

Universität Kassel

Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung

Fachgebiet Technische Gebäudeausrüstung

Entwicklung einer vereinfachten europaweit anwendbaren Methodik zur Festlegung von Effizienzanforderungen an Wärmerückgewinnungssysteme in der Raumluftechnik für Nicht-Wohngebäude auf der Grundlage mehrdimensionaler Optimierungsberechnungen

Kumulative Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften (Dr. rer. pol.)

Vorgelegt dem Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung
der Universität Kassel

Von

Christoph Kaup

Gutachter der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Jens Knissel
2. Prof. Dr. rer. pol. Heike Wetzel
3. Prof. Dr.-Ing. Anton Maas

Kassel im Mai 2022

Tag der Disputation: 07.12.2022

Bei der vorliegenden kumulativen Dissertation handelt es sich um eine zusammenfassende Darstellung der Forschungsergebnisse. Die einzelnen Ergebnisse wurden bereits in folgenden Fachzeitschriften und einer Konferenz im Peer Reviewed Verfahren veröffentlicht:

1. Kaup, C., Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1), GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, Recknagel Science, ISSN: 2195-643X Jahrgang 140, Heft 02/19, Seite 124 bis 137
2. Kaup, C., Knissel, J., European Study on heat recovery in non-residential buildings, E3S Web Conf., Volume 111, 2019, CLIMA 2019 Congress, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911102014>, 7 Seiten, 08/2019
3. Kaup, C., Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 2), GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, Recknagel Science, ISSN: 2195-643X Jahrgang 140, Heft 03/19, Seite 216 bis 229
4. Kaup, C., The optimum of heat recovery – Determination of the optimal heat recovery based on a multiple non-linear regression model, Journal of Building Engineering, Elsevier, <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101548>, 13 Seiten, Volume 38, June 2021

Danksagung

Danken möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Jens Knissel für die Betreuung meiner Dissertation, insbesondere für die Unterstützung zum zweiten Teil der kumulativen Dissertation. Danken möchte ich aber auch Herrn Dipl.-Betriebswirt Georg Allnoch bei der Unterstützung zur Programmierung der Software HPSimMeta (Softwarerobot) zur automatisierten Auswertung von Auslegungen mit meiner Optimierungssoftware HPSim.

Und ich danke Herrn Lukas Thomas, M. Sc. für die Unterstützung zur Erstellung der multiplen Regressionen mit dem Programm IBM SPSS.

Letztlich danke ich auch Herrn Karsten Schultheiß, M. A., Herrn Professor Dr. Tilman Cosack, Herrn Lukas Thomas, M. Sc., Frau Franziska Glaeser, M. Sc. und Frau Karin Kaltenkirchen für das Korrekturlesen der Dissertation.

Diese Dissertation widme ich meinen drei Kindern Julius, Marie-Helene und Constantin, die mir Kraft geben.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenhängende Verzeichnisse.....	IV
Abkürzungsverzeichnis.....	IV
Formelzeichenverzeichnis	IV
Indexverzeichnis.....	VI
Vorwort.....	1
1. Einleitung und Motivation.....	2
2. Grundlagen.....	3
2.1 Grundlagen der Wärmerückgewinnung.....	3
2.1.1 Effizienz der Wärmerückgewinnung.....	5
2.1.2 Bewertung der elektrischen Hilfsenergien.....	5
2.2 Die Ökodesignverordnung EU 1253/2014.....	6
2.3 Bilanzgrenze zur Bewertung der WRG	8
2.4 Spezifische Kosten zur Betrachtung der erweiterten Bilanzgrenze	9
2.5 Verwendetes Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren	13
2.6 Spezifische Rahmenbedingungen wie Energiepreise, CO ₂ -Emissionen, Zinssätze, Nutzungsdauer und Temperaturen	14
3. Stand der Forschung	19
3.1 Gegenstand der Forschungsfrage	19
3.2 Problemstellung und Abgrenzung des Untersuchungsobjektes.....	20
3.3 Angabe der wichtigsten Arbeiten anderer Wissenschaftler	22
3.4 Stand der eigenen Forschung in ihrer unmittelbaren Beziehung zum Problembereich.....	26
3.5 Unterschied zwischen der individuell optimierten Auslegung und der konstruktiven Detailoptimierung von Wärmeübertragern zur WRG	29
3.6 Resultierende Forschungslücke.....	30
3.7 Fragestellung und Zielsetzung.....	32

4.	Beitrag der Dissertation und Einbettung der kumulativen Teile	34
5.	Kumulative Teile der Dissertation	36
5.1	Erster kumulativer Teil der Dissertation – Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1).....	36
5.1.1	Das ökonomische Optimum der WRG auf Basis der Jahresenergiebetrachtung	36
	Optimierung der WRG (eindimensionale Optimierung)	37
5.1.2	Änderung der Wärmeübertragung bei Anpassung des Querschnitts der WRG	39
5.1.3	Änderung des Druckabfalls der Wärmerückgewinnung.....	40
5.1.4	Das mehrdimensionale Optimum der Wärmerückgewinnung.....	40
5.1.5	Darstellung der Eigenleistung zum ersten kumulativen Teil	42
5.2	Zweiter kumulativer Teil der Dissertation – European Study on heat recovery in non-residential buildings	43
5.2.1	Ökonomische Entwicklung der Wärmerückgewinnung in Europa.....	43
5.2.2	Auswirkungen der Referenzwerte	46
5.2.3	Auswertung der Feldstudie	47
5.2.4	Darstellung der Eigenleistung zum zweiten kumulativen Teil	48
5.2.5	Ergänzung zur Repräsentativität der Feldstudie	49
5.3	Dritter kumulativer Teil der Dissertation – Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 2).....	51
5.3.1	Eine Betrachtung für Europa.....	51
5.3.2	Meteorologische (Standort) und laufzeitabhängige Einflüsse.....	52
5.3.3	Definition des Standorts.....	55
5.3.4	Weitere Einflussparameter	56
5.3.5	Darstellung der Eigenleistung zum dritten kumulativen Teil	57
5.4	Vierter kumulativer Teil der Dissertation – The optimum of heat recovery – Determination of the optimal heat recovery based on a multiple non-linear regression model	58
5.4.1	Kapiteleinleitung	58
5.4.2	Datenerhebung als Grundlage für die multiple Regression	59

5.4.3	Nicht lineares multiples Regressionsmodell (nur WRG).....	59
5.4.4	Nicht lineares multiples Regressionsmodell (erweiterte Bilanzgrenze).....	62
5.4.5	Nicht lineares multiples Regressionsmodell mit Berücksichtigung des CO ₂ -Preises	63
5.4.6	Optimale WRG – Vollastbetrieb versus Teillastbetrieb	64
5.4.7	Kombinierte Angabe Temperaturübertragungsgrad und SFP	65
5.4.8	Grenzen der Bestimmung allgemeingültiger Optima.....	65
5.4.9	Darstellung der Eigenleistung zum vierten kumulativen Teil	66
6.	Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung.....	67
7.	Ergänzende Methodenkritik	77
7.1	Einfluss volatiler Energiepreise.....	77
7.2	Einfluss unterschiedlicher Luftmengenverhältnisse (Zu- und Abluft)	79
7.2.1	Theoretische Betrachtungen	79
7.2.2	Einfluss des Luftmengenverhältnisses auf die Wirtschaftlichkeit.....	83
7.2.3	Tatsächliches statistisches Luftmengenverhältnis.....	87
7.3	Einfluss von Leckagen auf die WRG.....	87
7.4	Näherungsgleichungen zur k-Zahl-Umrechnung.....	88
7.5	Näherungsgleichungen zum Druckabfall.....	90
8.	Zusammenfassung	92
	Zusammenhängendes Literaturverzeichnis	94
	Internetquellen.....	101
	Anhang A1. Ökologisch optimierte Übertragungsgrade der WRG	106
	Anhang A2. Monetär optimierte Übertragungsgrade der WRG mit erwarteter Klimaveränderung 2030, IPCC A1B.....	107
	Anhang A3. Monetär optimierte Übertragungsgrade der WRG mit Berücksichtigung der Minderinvestitionen für die Wärme- und Kälteerzeugung.....	108
	Anhang A4. Monetär optimierte Übertragungsgrade der WRG im Teillastbetrieb (70 % im Tagbetrieb und 40 % im Nachtbetrieb).....	109

Abkürzungsverzeichnis

AfA	Absetzung für Abnutzung
ANOVA	analysis of variance (Einfaktorielle Varianzanalyse)
BMVBS	Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
BVU	bidirectional ventilation unit
E	Energieeffizienzbonus
EnEV	Energieeinsparverordnung
ENTR	Directorate-General Enterprise and Industry
EU-ETS	Europäischer Emissionshandel (auch EU-EHS)
EW1	Endwert 1
EW2	Endwert 2
HR	Heatrecovery
IBM SPSS	IBM Statistical Package for the Social Sciences (IBM Statistikprogramm)
IE	Energieeffizienzklassen von Elektromotoren
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KWS	Kaltwassersatz
KV	Kreislaufverbund
KVS	Kreislaufverbundsystem
NWG	Nicht-Wohngebäude
NRVU	non-residential ventilation unit
RLT	Raumluftechnik
SFP	Specific fan power
SW1	Startwert 1
SW2	Startwert 2
RKW	Rückkühlwerk
RWZ	Rückwärmzahl
WMO	World Meteorological Organization
WRG	Wärmerückgewinnung
VAT	Value Added Tax

Formelzeichenverzeichnis

Δp	Druckabfall [Pa]
η	Gesamtwirkungsgrad des Antriebs (z. B. Ventilatoren) [./.]
η_t	Temperaturübertragungsgrad oder Rückwärmzahl [./. oder in %]
Φ	Temperaturübertragungsgrad oder Rückwärmzahl [./. oder in %]
μ	Wärmestromkapazitätenverhältnis oder Massenstromverhältnis bei $c_{p1} = c_{p2}$ [./.]
ρ	Luftdichte [kg/m^3]
ϑ	Temperatur [$^{\circ}\text{C}$]
ξ	Widerstandsbeiwert eines Körpers [./.]
A	Wärmeübertragende Fläche [m^2]

ABL	Abluft [°C]
ABL1-2	Regressionsparameter für die Ablufttemperatur [./.]
AUL	Außenluft [°C]
AUL1-3	Regressionsparameter für die Außenlufttemperatur [./.]
aR ²	Bestimmtheitsmaß des multiplen Regressionsmodells [./.]
b	Barwertfaktor innerhalb der Nutzungsphase [./.]
B	jährliche Betriebskosten [€/a]
C	Konstante zur Druckverlustberechnung [./.]
C ₁	Korrekturwert Regelung [./.]
C ₂	Korrekturwert Monitoring [./.]
c _p	spezifische Wärmekapazität in [kJ/kg/K]
df	Freiheitsgrad der Stichprobe
E	jährliche Einsparung (Annuität), oder auch jährlicher Differenzbetrag [€/a]
f	Annuitätenfaktor [./.]
F _{corr}	Korrekturfaktor bei unterschiedlichen und nicht bilanzierten Massenströmen [./.]
F	Filterkorrekturwert nach EU 1253/2014 [W/m ³ /s]
F	Faktor [./.]
I	Kapitaleinsatz durch die Investition [€]
i	Zinssatz [./.]
j	Inflationsrate / Preissteigerungsrate [./.]
k	Wärmedurchgangskoeffizient [W/m ² /K]
KW	Kapitalwert der Ersparnisse [€]
L	Laufzeit [h/a]
L1-2	Regressionsparameter der Laufzeit [./.]
m	Luftmassenstrom [kg/s]
n	Nutzungsdauer [a]
NTU	Number of Transfer [./.]
P	elektrische Leistung [kW]
P _m	aufgenommene elektrische Leistung [kW]
Q	Wärmeleistung [kW]
q _{nom}	Volumenstrom [m ³ /s]
R ²	Regressionsgüte (Bestimmtheitsmaß) [./.]
SFP _{int}	interne spezifische Ventilatorleistung der Lüftungskomponenten [W/m ³ /s]
V̇	Volumenstrom bei Normdichte [m ³ /h]
W	Wärmekapazitätsstrom [W/K]
w	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]
W	Arbeit [kWh]
x	Exponent oder Variable [./.] oder absolute Feuchte [g/kg]
y	Variable [./.]

Indexverzeichnis

1	Abluft
2	Zuluft
1:1	ausgeglichener Massenstrom
'	Eingang
''	Ausgang
aux.	Hilfsenergie
avg	Mittelwert
e	energetisch
el	elektrisch
int	Lüftungskomponenten
korr	korrigiert
L	Luft
limit	Grenzwert
min	Mindestwert
max	Maximalwert
M	Medium
nrvu	non-residential ventilation unit
μ	bezogen auf ein Luftmengenverhältnis μ
org	original
Strom	strombasiert
W	Wärmeübertrager
WRG	Wärmerückgewinnung
x	Feuchte basiert

Vorwort

Ich beschäftige mich bereits seit Anfang der 2000er-Jahre intensiv mit den Anforderungen an die Wärmerückgewinnung aus Raumluftechnischen Anlagen. Schon bei der Erstellung der Energieeinsparverordnung 2009 §15¹ habe ich beratend mitgewirkt. Insbesondere erstellte ich die Mindestanforderungen an die Wärmerückgewinnung aus Tabelle 5 der VDI Richtlinie VDI 3803 Blatt 1:2002², die auch in die gleichnamige Tabelle der DIN EN 13053:2007³ eingeflossen ist, auf die auch die folgenden Versionen der EnEV Bezug nahmen. In den Folgejahren habe ich mich dann intensiver mit der Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnung im Rahmen der Erstellung der VDI Richtlinie 3803 Blatt 5:2013⁴ beschäftigt. Meine ersten Veröffentlichungen zum Verfahren der Wirtschaftlichkeitsberechnung auf Basis von Summenhäufigkeiten stammen aus den Jahren 2009 und 2010 und sind in die VDI Richtlinie 3803 Blatt 5 eingeflossen.

Ab 2011 begannen dann die ersten Diskussionen auf europäischer Ebene zur Ökodesignverordnung für Raumluftechnische Geräte, die 2014 verabschiedet wurde und deren Überarbeitung diese Dissertation thematisiert. Angetrieben durch die Diskussionen ab dem Jahr 2011, als ich bereits Klimazonen zur Festlegung der Anforderungen vorschlug, habe ich mich in der Folgezeit mit dem Thema der „optimalen“ Wärmerückgewinnung ausgiebig beschäftigt. Im Jahr 2012 habe ich dann meine ersten Überlegungen zur eindimensionalen Optimierung der Wärmerückgewinnung veröffentlicht. Nachdem meine Forderung zur differenzierten Festlegung von Effizienzkriterien auf der Basis von Klimazonen mit dem Argument, im Norden werde Wärme und im Süden in gleicher Größenordnung Kälte zurückgewonnen, verworfen worden war, hat mich das Thema nicht mehr losgelassen. Ab 2017 habe ich dann das Verfahren zur mehrdimensionalen Optimierung entwickelt und veröffentlicht, das die Basis für diese Dissertation liefert. Auf dem Fundament dieser Veröffentlichungen ist diese Dissertation aufgebaut. Da bereits 2018 die ersten Diskussionen mit der Europäischen Kommission anliefen, musste ich die Ergebnisse meiner Arbeit schnell und zeitnah veröffentlichen, damit diese im Review Prozess der Verordnung Berücksichtigung finden konnten. Daher habe ich mich entschlossen, die Dissertation als kumulative Arbeit zu erstellen. Die genannten bisherigen Veröffentlichungen sind in diese Arbeit und in die kumulativen Teile eingeflossen.

¹ EnEV, Energieeinsparverordnung für Gebäude, Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, 2009

² VDI 3803 Blatt 1, Raumluftechnik – Zentrale Raumluftechnische Anlagen – Bauliche und technische Anforderungen, 2002-10

³ DIN EN 13053, Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumluftechnische Geräte – Leistungsdaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2006, 2007-11

⁴ VDI 3803 Blatt 5: Wärmerückgewinnungssysteme, 2013-04

1. Einleitung und Motivation

Der Klimaschutz nimmt heute eine herausgehobene Stellung in der öffentlichen Wahrnehmung ein. Maßnahmen zum Klimaschutz sind unabdingbar, um CO₂-Emissionen in allen Bereichen des täglichen Lebens zu mindern. Aus diesem Grund werden neben dem Einsatz regenerativer Energien politisch verstärkt Energieeffizienzmaßnahmen bei der Gestaltung von Produkten gefordert. Bereits im Oktober 2009 haben daher das Europäische Parlament und der Europäische Rat die Richtlinie 2009/125/EG⁵ zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte bekannt gegeben.

Raumluftechnische Geräte (RLT-Geräte) werden seit Jahren zur Versorgung von Räumen in Wohn- und Nicht-Wohngebäuden mit aufbereiteter Luft eingesetzt. Luft ist ein wichtiges Lebensmittel. Zudem halten Menschen sich in dem Medium Luft auf, sodass komfortable Umgebungsbedingungen (Temperatur und Feuchte) zur Steigerung des Komforts erstrebenswert sind.

Insbesondere in Nicht-Wohngebäuden (NWG) haben sich RLT-Geräte etabliert, da NWG aus funktionalen Gründen (z. B. notwendige Luftfilterung oder -temperierung etc.), aber auch aus Gründen der Raumgröße oft nicht über Fenster gelüftet werden können.

Im Juli 2014 hat die Kommission die Verordnung EU 1253/2014⁶ zur Durchführung der o. g. Richtlinie bezüglich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen veröffentlicht. Hierin spielt die Wärmerückgewinnung (WRG) zur Reduzierung der Lüftungswärmeverluste als Schlüsselkomponente eine große Rolle in Raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen). Ohne RLT-Anlagen können moderne Gebäude oft nicht energieoptimal betrieben werden, da nur eine kontrollierte mechanische Belüftung im Gegensatz zur natürlichen Lüftung mit einer WRG kombinierbar ist.

Die Verwendung der RLT-Anlage wird als Grundlage der weiteren Betrachtungen als gegeben vorausgesetzt. Auch die Verordnung EU 1253/2014 fordert nicht vorrangig RLT-Geräte als Ersatz für die natürliche Lüftung. Wenn aber die Entscheidung zur RLT-Anlage gefallen ist, wird die Erfüllung von strikten Mindesteffizienzkriterien gefordert. Umso wichtiger ist eine wirtschaftlich und/oder ökologisch sinnvolle Festlegung von Effizienzkriterien für die WRG, da eine Pflicht zu dieser nur dann besteht, wenn eine RLT-Anlage eingesetzt wird. Sind die geforderten Mindestkriterien an RLT-Anlagen unwirtschaftlich, könnten Investoren alleine aus Kostengründen auf

⁵ Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Veröffentlicht am 31.10.2009

⁶ Verordnung EU 1253/2014 der Kommission vom 7. Juli 2014 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen. Veröffentlicht am 25.11.2014

natürliche Lüftungsmaßnahmen ausweichen. Damit würde es zu einer Verzerrung der Marktbedingungen kommen.

Für die WRG in RLT-Geräten gelten seit 01.01.2016 Anforderungen, die in der Verordnung detailliert festgeschrieben sind und zum 01.01.2018 verschärft wurden (2. Stufe der EU 1253/2014). Sie gilt grundsätzlich für sämtliche Lüftungsgeräte, die mehr als 30 W elektrische Leistung pro Luftstrang (Zu- oder Abluft) benötigen. Die WRG wird zudem verpflichtend europaweit mit einheitlichen starren Mindestanforderungen bei Zu- und Abluftgeräten gefordert. Die Verordnung unterscheidet klar zwischen Anforderungen an Anlagen für die Wohnungslüftung und Anlagen für die Nicht-Wohnungslüftung (siehe auch Kapitel 2.2).

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich ausschließlich mit den Anforderungen an die WRG in Nicht-Wohngebäuden. Mit der Dissertation soll die Frage beantwortet werden, ob starre Festlegungen europaweit sinnvoll sind bzw. welche alternativen und flexiblen Anforderungen den Nettonutzen der WRG maximieren können. Hierzu wird in der vorliegenden Dissertation im ersten Schritt ein Werkzeug (vereinfachtes Verfahren) zur Optimierung der WRG entwickelt, das im zweiten Schritt in der Anwendung europaweit den maximalen Nutzen der WRG aufzeigen soll. Die Ergebnisse der europaweiten Optimierung sollen in die Überarbeitung der EU-Verordnung einfließen.

2. Grundlagen

2.1 Grundlagen der Wärmerückgewinnung

WRG ist ein Sammelbegriff für Verfahren der Wärmeübertragung, bei denen thermische Energie in einem Prozess mit mindestens zwei Massenströmen von unterschiedlichen Temperaturniveaus wieder nutzbar gemacht wird. Die Rückgewinnung von Wärme aus dem Fortluftstrom von Gebäuden ist eine wichtige Maßnahme zur Senkung des Primärenergiebedarfs für Temperierung des Außenluftstroms (siehe Abbildung 1).

Es ist energetisch sinnvoller, Abwärme mit höherem Temperaturniveau durch WRG direkt zu nutzen, statt Energie z. B. mittels elektrischer Wärmepumpen aus einem niedrigeren Umwelttemperaturniveau neu zu generieren oder primärenergetisch erzeugte Wärme zu nutzen. Da bei der Abwärmenutzung durch WRG die Abwärme zeitlich mit dem Bedarf an Wärme zusammenfällt, ist WRG auch eine nachhaltig nutzbare Energieressource, die immer dann zur Verfügung steht, wenn Wärme benötigt wird. Es besteht also keine Zeitverschiebung zwischen Angebot und Nachfrage. Eine Wärmespeicherung muss daher nicht berücksichtigt werden. Die zurückgewonnene Wärme

wird meist dem Ursprungsprozess zugeführt. Sie kann aber auch einem anderen Prozess zugeführt werden (mehrfachfunktionale Nutzung).^{7, 8}

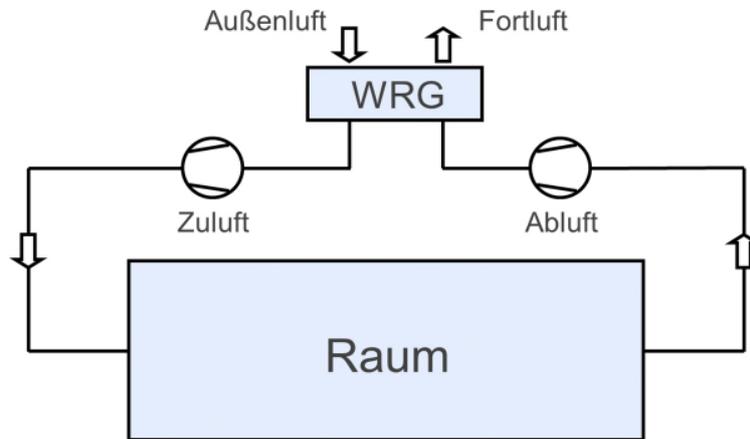


Abbildung 1: Prinzip der WRG in einer RLT-Anlage mit Zu- und Abluftstrom

Eine wesentliche Verringerung der bereitzustellenden Wärmeleistungen sowie des jährlichen Energieverbrauchs lässt sich durch Rückgewinnung erreichen. Dabei kann die mechanische Raumlüftung mit WRG gegenüber der natürlichen Lüftung einen erheblichen Betrag an thermischer Energie einsparen, da die Lüftungswärmeverluste rund 35 bis 38 % der gesamten Wärmeverluste der Gebäude ausmachen.⁹

Dies sind die wesentlichen Vorteile der WRG:^{10, 11, 12}

- Verringerung des Wärme- und Kälteenergieverbrauchs und damit Reduzierung der Betriebskosten.
- Verringerung der Schadstoffemissionen.
- Verringerung der zu installierenden Leistungen für die Lufterwärmung und ggf. für die Befeuchtung und damit Kostenreduzierung für die Wärmeerzeugung.
- Verringerung der zu installierenden Leistungen für die Luftkühlung und damit Kostenreduzierung für Kältemaschinen und Kühltürme.

⁷ Kaup, C., Kampeis, P., Gutachten zum Beitrag und zur Einordnung der Wärmerückgewinnung aus Raumlufthechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) im Vergleich zu bereits anerkannten regenerativen Energiequellen, Fachverband Gebäude-Klima e. V., 2012

⁸ Die Einleitung wurde vom Autor auch für das Fachbuch Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 77. Ausgabe 2015/16, Kapitel 3.3.2-5.1, Seite 1518 ff verwendet.

⁹ Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2 – Lot 6: Airconditioning and ventilation systems ENTR / 2009/ 035/ LOT6 – Draft Report Task 6 – Design Options, 2012

¹⁰ Jüttemann, H., Wärme- und Kälterückgewinnung in raumlufthechnischen Anlagen, Werner-Verlag, Düsseldorf 2001

¹¹ Beck, E. u. Hausladen, G., Energieverbrauch von RLT-Anlagen, ISH-Jahrbuch 1999

¹² Kaup, C., Potential der Wärmerückgewinnung, TGA-Fachplaner 12/2009

2.1.1 Effizienz der Wärmerückgewinnung

Die Güte eines Wärmerückgewinnungssystems wird maßgeblich durch den Temperaturübertragungsgrad, auch als Rückwärmzahl (Φ) bezeichnet, bestimmt. Der Temperaturübertragungsgrad, kurz Übertragungsgrad genannt, gibt das Verhältnis der Temperaturänderung in der Zuluft zur maximal möglichen Temperaturänderung, also das Temperaturpotenzial zwischen Außen- und Abluft, an. Das maximal mögliche Potenzial der Wärmerückgewinnung wird durch das Temperaturpotenzial als Temperaturdifferenz zwischen Abluft (ϑ_1') und Außenluft (ϑ_2') gebildet. Damit ergibt sich ohne Änderung der Feuchte (trockener Betrieb) und der Zulufttemperatur (ϑ_2'') der Temperaturänderungsgrad mit: ^{13, 14}

$$\Phi_t = \frac{(\vartheta_2'' - \vartheta_2')}{(\vartheta_1' - \vartheta_2')} \quad (1)$$

Neben dem Temperaturänderungsgrad wird die Effizienz der WRG auch durch die Druckverluste auf den Medienseiten bestimmt. Deshalb spielen die medienseitigen Widerstände der WRG, insbesondere auf der Zu- und der Abluftseite, eine große Rolle.

2.1.2 Bewertung der elektrischen Hilfsenergien

Die Druckverluste der WRG bestimmen die Hilfsenergien, die der Betrieb einer WRG erfordert. Diese Hilfsenergien werden im Wesentlichen durch die elektrischen Antriebe (wie Ventilatoren und weitere Verbraucher [$P_{aux.}$], z. B. Pumpen) bestimmt. Die erforderlichen elektrischen Leistungen errechnen sich dabei aus: ^{15, 16}

$$P_{el} = \dot{V} \cdot \Delta p_{WRG} \cdot \frac{1}{\eta} + P_{aux.} \quad (2)$$

In die Verordnung EU 1253/2014 fließt dagegen der elektrische Aufwand zur Bewertung der WRG in den SFP_{int} Wert (specific fan power der Lüftungskomponenten) ein. Dieser Wert leitet sich im Prinzip aus Gleichung (2) ab und berechnet sich mit: ¹⁷

$$SFP_{int} = \frac{P_{el}}{\dot{V}} = \frac{\Delta p_{int}}{\eta} \quad (3)$$

¹³ Kaup, C., Effizienz der Wärmerückgewinnung, Gentner Verlag, TGA-Fachplaner 06/2009

¹⁴ DIN EN 13053: Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumluftechnische Geräte-Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2020-05

¹⁵ DIN EN 13053 ebenda

¹⁶ Kaup, C., Effizienz der Wärmerückgewinnung, Gentner Verlag, TGA-Fachplaner 06/2009

¹⁷ DIN EN 13053 ebenda

2.2 Die Ökodesignverordnung EU 1253/2014

Am 07.07.2014 wurde die Verordnung EU 1253/2014 von der Europäischen Kommission zur Durchführung der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsgeräten verabschiedet und am 25.11.2014 veröffentlicht. In dieser Verordnung wurde unter Bezug auf den Luftdurchsatz zwischen Maßnahmen für Wohnraumlüftungs- und Nicht-Wohnraumlüftungsgeräten unterschieden, da für beide Anwendungsfälle aufgrund der unterschiedlichen Anforderungsprofile völlig verschiedene Normen gelten.

Der jährliche Stromverbrauch von Lüftungsgeräten betrug in der EU im Jahr 2010 Schätzungen zufolge 77,6 TWh. Gleichzeitig wurden mit diesen Produkten 2.570 PJ an Wärme (Raumheizenergie) durch WRG eingespart. Insgesamt ergab sich für 2010 unter Berücksichtigung eines Primärenergiefaktors von 2,5 für die elektrische Energie gegenüber der thermischen Energie zur Raumheizung eine Primärenergieeinsparung von 1.872 PJ. Schätzungen zufolge wird die Energieeinsparung ohne die geforderten Maßnahmen bis zum Jahr 2025 auf insgesamt 2.829 PJ ansteigen. Die vorbereitenden Studien zur Verordnung belegen, dass der Energiebedarf der von dieser Verordnung erfassten Produkte erheblich gesenkt werden kann. Voraussichtlich werden durch die aktuellen Ökodesign-Anforderungen die Gesamteinsparungen insgesamt um 1.300 PJ (45 %) auf 4.130 PJ von 2010 bis 2025 ansteigen. Die Kommission kam im Entwurf des Arbeitspapiers Lüftung¹⁸ aber auch zu dem Ergebnis, dass 24 % der Wohngebäude in Europa 2010 mit einer mechanischen Lüftung ausgestattet waren. Nur 1,5 % der Wohngebäude nutzten 2010 die Technik der WRG. Die Europäische Union geht davon aus, dass bis zum Jahr 2025 in der Wohnungslüftung bis zu 60 % an zusätzlicher Energie (ca. 360 PJ/a) eingespart werden können. In Nicht-Wohngebäuden ist das Einsparpotenzial jedoch deutlich größer, da bereits 40 % der NWG mechanisch belüftet werden. Dabei wurden 7 % der Geräte im Jahr 2010 mit WRG ausgestattet. Das entspricht einem weiteren Einsparpotenzial im Jahr 2025 von rund 950 PJ an Primärenergie. Zusammenfassend wird damit das jährliche Einsparpotenzial an Primärenergie durch WRG im Jahr 2025 mit rund 15 % in Wohngebäuden und mit rund 85 % in Nicht-Wohngebäuden zugeordnet.¹⁹ Daraus folgt, dass NWG mit rund 85 % hinsichtlich ihres Einsparpotenzials an Primärenergie durch WRG in Europa weit bedeutender sind als Wohngebäude. Zudem ändern sich die Rahmenbedingungen in NWG wie Raumtemperaturen oder Nutzungszeiten in einem größeren Umfang als in Wohngebäuden.

¹⁸ Draft Working Document Ventilation Units 10.10.2012: https://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Draft_Working_Document_Ventilation.pdf

¹⁹ C. Kaup, P. Kampeis, Studie zum Beitrag und zum Anteil der Wärmerückgewinnung aus zentralen Raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Nicht-Wohngebäuden, 2013

Seit dem 01.01.2018 gelten im Hinblick auf die WRG folgende Anforderungen an RLT-Geräte in NWG bei ausgeglichenen Massenströmen (1:1, Zuluft- gleich Abluftmenge):

- Der Mindestübertragungsgrad $\Phi_{1:1}$ aller WRG-Systeme (außer Kreislaufverbundsystemen) muss mindestens $\Phi_{1:1} = 73 \%$ und der Elektroenergie-Effizienzbonus (E) bezogen auf den SFP_{int} – Wert mit $E = (\Phi_{1:1} - 0,73) \cdot 3000$ betragen, wenn der Übertragungsgrad mehr als $\Phi_{1:1} = 73 \%$ beträgt, andernfalls ist $E = 0$.
- Der Mindestübertragungsgrad von Kreislaufverbundsystemen (KVS) muss $\Phi_{1:1} = 68 \%$ und der Effizienzbonus $E = (\Phi_{1:1} - 0,68) \cdot 3000$ betragen, wenn der Übertragungsgrad mehr als der Mindestwert von $\Phi_{1:1} = 68 \%$ beträgt, andernfalls ist $E = 0$.
- Die maximale interne spezifische Ventilatorleistung (SFP_{int}) in $W/(m^3/s)$ beträgt:
 - für ein bidirektionales Lüftungsgerät mit WRG-System (außer KVS)
 - $1.100 + E - 300 \cdot q_{nom} / 2 - F$, wenn $q_{nom} < 2 \text{ m}^3/s$ und
 - $800 + E - F$, wenn $q_{nom} \geq 2 \text{ m}^3/s$;
 - für ein bidirektionales Lüftungsgerät mit KVS
 - $1.600 + E - 300 \cdot q_{nom} / 2 - F$, wenn $q_{nom} < 2 \text{ m}^3/s$ und
 - $1.300 + E - F$, wenn $q_{nom} \geq 2 \text{ m}^3/s$

Der Energieeffizienzbonus beschreibt einen Bonus für den maximalen SFP-Wert, wenn die WRG einen höheren Temperaturübertragungsgrad aufweist, als die Verordnung fordert. Der Filterkorrekturwert F beschreibt einen SFP-Korrekturwert, wenn die Geräte nicht mit der normenkonformen Filtertechnik ausgestattet sind. Dieser Wert spielt bei den weiteren Betrachtungen keine Rolle. Die Bewertung einer WRG mit höherem Übertragungsgrad als durch die Verordnung gefordert wird auch in Kapitel 5.4.7 und in der Diskussion aufgegriffen.

Bei der Überarbeitung der Verordnung sollen Referenzwerte der Richtlinie EU 1253/2014 gültig werden. Dabei sollen die Mindestübertragungsgrade von 73 % auf 85 % (Ausnahme Kreislaufverbundsystem von 68 % auf 80 %) steigen. Gleichzeitig soll aber der elektrische Aufwand ($> 2 \text{ m}^3/s$) um $150 \text{ W}/\text{m}^3/s$ und unter $2 \text{ m}^3/s$ sogar um $250 \text{ W}/\text{m}^3/s$ sinken.²⁰

Die detaillierten Auswirkungen der Verordnung wurden in zwei Veröffentlichungen aus 2015 vom Autor detailliert beschrieben.²¹ Dieses Kapitel stellt eine Zusammenfassung der Veröffentlichungen zur EU-Verordnung dar.

²⁰ Artikel 7, Referenzwerte, Verordnung EU 1253/2014 der Kommission vom 7. Juli 2014 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen.

²¹ Kaup, C., Die neue Verordnung zur Ökodesign-Richtlinie der EU, Springer-VDI Verlag, HLH 02/2015 und Kaup, C., Neue Verordnung zur EU-Ökodesign-Richtlinie: Anforderungen an RLT-Geräte in Nicht-Wohngebäuden, Beuth-Verlag, EnEV aktuell IV/2015: Dieses Unterkapitel wurde im Wesentlichen aus

2.3 Bilanzgrenze zur Bewertung der WRG

Bei der energetischen und wirtschaftlichen Betrachtung der WRG-Systeme ist es von besonderer Bedeutung, wann, wo und wie die Bilanzgrenzen für die Beurteilung gezogen werden. Innerhalb der Bilanzgrenze wird der Nutzen einer WRG im Vergleich zur Technik ohne WRG bewertet. Die Bilanzgrenze ist so festzulegen, dass die WRG und alle davon beeinflussten Energieströme, Anlagenteile sowie die baulichen Rahmenbedingungen einbezogen sind.

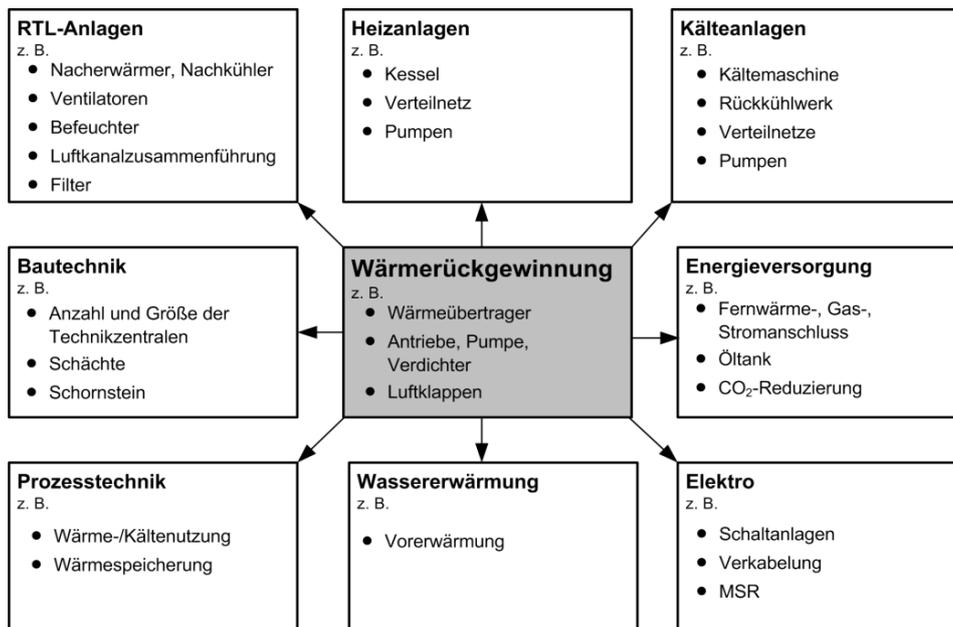


Abbildung 2: Beispiel der Gesamtbilanzgrenze für WRG und deren beeinflusste Bereiche²²

Die Bilanzgrenze kann dabei nicht nur um die WRG (in Abbildung 2 als WRG bezeichnet) gezogen, sondern sie kann erweitert werden. Beispielsweise können angrenzende Gewerke mit sämtlichen Auswirkungen des Einsatzes der WRG wie der Reduktion der Wärme- oder Kälteerzeugung berücksichtigt werden (in Abbildung 2 als Heiz- und Kälteanlagen bezeichnet).

Die Erweiterung der Bilanzgrenze setzt allerdings voraus, dass der Eingriff in angrenzende Gewerke möglich ist. Sind im Bestand Wärmeerzeugungsanlagen und/oder Kälteanlagen bereits ohne Berücksichtigung einer WRG installiert oder erfolgt ein ganzheitlicher Ansatz in der Planung nicht oder zu spät, kann dieser zusätzliche Effekt durch die WRG nicht genutzt und darf auch nicht

diesen Veröffentlichungen und der Verordnung EU 1253/2014 sowie den vorbereitenden Studien (Draft Working Document Ventilation Units 10.10.2012) entnommen.

²² VDI 3803 Blatt 5: Wärmerückgewinnungssysteme:2013-04, 6.1 Bilanzgrenzen der Wärmerückgewinnung

angesetzt werden, da die Auswirkungen nicht realisiert werden können. Die gezogene Bilanzgrenze gestattet eine konsistente Betrachtung hinsichtlich Kennzahlen, Energieströmen, Umweltschutz und Wirtschaftlichkeit (Investitions-, Substitutions- sowie Betriebskosten). Erst hierdurch wird eine umfassende Bewertung von WRG-Systemen möglich.²³

Im Rahmen dieser Dissertation wird daher vorrangig die WRG selbst betrachtet. Dabei wird die RLT-Anlage mit und ohne WRG bewertet. Daneben soll in einem zweiten Schritt auch der Einfluss auf die Wärme- und Kälteerzeugung betrachtet werden.

Bauliche Änderungen am Gebäude bedingt durch die WRG (z. B. durch eine geänderte Kubatur, in Abbildung 2 als Bautechnik und Elektro bezeichnet) werden als gering bewertet und nicht weiter berücksichtigt. Dieser Einfluss ist auch statistisch kaum bewertbar, sondern hängt von der baulichen Situation im Einzelfall ab.

Mehrfachfunktionen wie Freie Kälte oder Brauchwasservorerwärmung (in Abbildung 2 als Prozesstechnik oder Wärme-/Kältenutzung bezeichnet) werden ebenfalls nicht berücksichtigt.

Letztlich soll auch der Einfluss der WRG auf CO₂-Emissionen betrachtet werden (in Abbildung 2 als Energieversorgung bezeichnet). Die durch die WRG bedingten Änderungen der Komponenten in den RLT-Anlagen werden nicht berücksichtigt, da diese gering sind und deren Berücksichtigung komplexer spezifischen Auslegungen im Einzelfall bedarf.

Da die Wahl der Bilanzgrenze die Ergebnisse der Betrachtung wesentlich beeinflusst, muss zu jeder Betrachtung die verwendete Bilanzgrenze angegeben werden.^{24, 25}

2.4 Spezifische Kosten zur Betrachtung der erweiterten Bilanzgrenze²⁶

Zur Bemessung der Wärme- und Kälteerzeugung im Rahmen der erweiterten Bilanzgrenze müssen spezifische Werte vorliegen, mit denen die Minderung der Investitionsausgaben der Wärme- und/oder Kälteerzeugungsanlagen bewertet werden können. Diese wurden bereits in einer Publikation des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) im Jahr 2012 zu

²³ VDI 3803 Blatt 5: Wärmerückgewinnungssysteme:2013-04, 6.1 Bilanzgrenzen der Wärmerückgewinnung

²⁴ Kaup, C., Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 77, Kapitel 3.3.2-5.5.7, Seite 1527, Ausgabe 2015/16

²⁵ VDI 3803 Blatt 5: Wärmerückgewinnungssysteme:2013-04, 6.1 Bilanzgrenzen der Wärmerückgewinnung

²⁶ Teile dieses Kapitels meiner Dissertation habe ich kostenfrei ebenfalls verwendet in: Kaup, C., Gutachten zur Bezifferung der CO₂-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG-Systemen) Raumlufttechnischer Geräte (RLT-Geräte) für Nicht-Wohngebäude, FGK, 2019

Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012 ermittelt.²⁷ Da Wärme- und/oder Kälteerzeugungsanlagen durch die WRG nicht vollständig substituiert werden können, werden die Medienleitungen weiterhin erforderlich sein. Die Änderung des Verteilnetzes wird im Folgenden nicht weiter berücksichtigt, weil der Aufwand für Medienleitungen vom Anwendungsfall abhängig ist und die Änderungen im Durchmesser nicht wesentlich sind. Genauso werden die Änderungen bei Abgasleitungen, Ausdehnungsgefäßen etc. ebenfalls nicht betrachtet.

In der Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Datenerhebung zu verschiedenen Wärmeerzeugern im Leistungsbereich bis 500 kW dargestellt.

Tabelle 1: Investitionsausgaben für Wärmeerzeugungsanlagen in Abhängigkeit der Wärmeleistung²⁸

Leistungsbereich	[kW]	50	100	150	200	250	300	500
Gas-Brennwert	[€/kW]	120	100	90	90	80	60	60
Öl-Brennwert	[€/kW]	110	160	120	100	110	90	100
Holzpellets	[€/kW]	390	340	250	200	180	180	150
Hackschnitzel	[€/kW]	480	284	229	221	194	180	122
Fernwärmeübergabe	[€/kW]	90	60	50	50	40	40	30
Mittelwert	[€/kW]	238	189	148	132	121	110	92
korr. Gas-Brennwert	[€/kW]	133	111	100	100	89	66	66
korr. Mittelwert	[€/kW]	263	209	164	146	134	122	102

Da die BMVBS-Publikation im Jahr 2012 veröffentlicht wurde, werden die verwendeten Daten (Basis 2009) mit der durchschnittlichen Preisentwicklung (1,7 % Inflationsrate 2008 bis 2017 siehe Tabelle 7) auf das Niveau 2012 bis 2017 (Faktor 1,017⁶) hochgerechnet. Zur Betrachtung in Europa wird im Folgenden auf den Gas-Brennwertkessel Bezug genommen, da die statistische Verteilung der verwendeten Wärmeerzeugung in der EU unbekannt ist. Der Ansatz ist konservativ gewählt.

Abbildung 3 zeigt die Entwicklung des korrigierten Mittelwerts aller Kessel und den korrigierten Wert pro kW des Gas-Brennwertkessels im Bereich von 50 bis 500 kW.

Bei Kälteerzeugungsanlagen wurden Rückkühlwerke, Pufferspeicher, Ausdehnungsgefäße, Pumpen, Armaturen und Zubehör sowie Verteilkreise ebenfalls nicht berücksichtigt.

²⁷ BMVBS-Online-Publikation, Ermittlung von spezifischen Kosten energiesparender Bauteil-, Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nicht-Wohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012, 06/2012

²⁸ BMVBS-Online-Publikation, ebenda

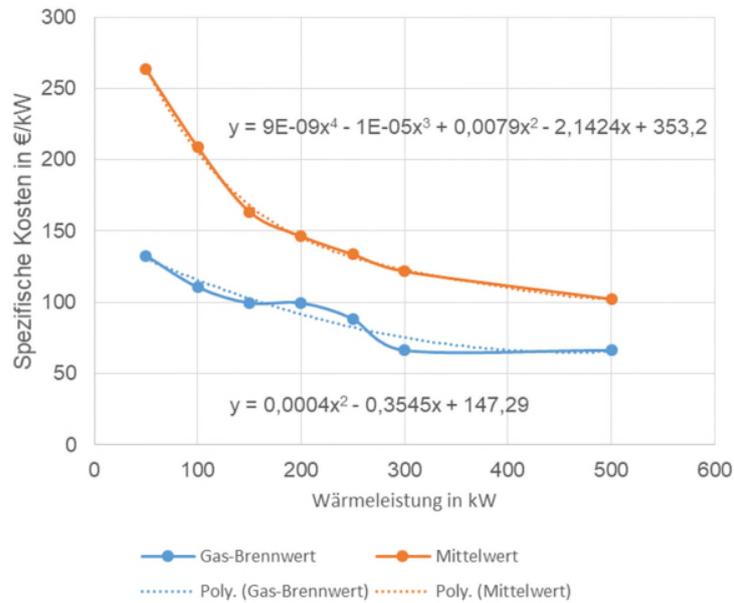


Abbildung 3: Investitionsausgaben für Gas-Brennwertkessel und den Mittelwert sämtlicher Wärmeerzeuger in Abhängigkeit der Wärmeleistung

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Datenerhebung zu verschiedenen Kaltwassersätzen im Leistungsbereich bis 1.500 kW dargestellt. Die verwendeten Mittelwerte werden ebenfalls auf den Zeitpunkt 2017 preisbereinigt (siehe Zeile korr. Mittelwerte).

Tabelle 2: Investitionskosten für Kaltwassersätze in Abhängigkeit der Kälteleistung ²⁹

Leistungsbereich	[kW]	125	250	500	750	1.000	1.250	1.500
Kolbenverdichter	[€/kW]	180	140	120	100	90	90	-
Schraubenverdichter	[€/kW]	-	-	90	90	80	60	60
Turboverdichter	[€/kW]	-	-	-	110	100	100	90
verwendete Mittelwerte	[€/kW]	180	140	110	105	90	85	75
korr. Mittelwerte	[€/kW]	199	155	122	116	100	94	83

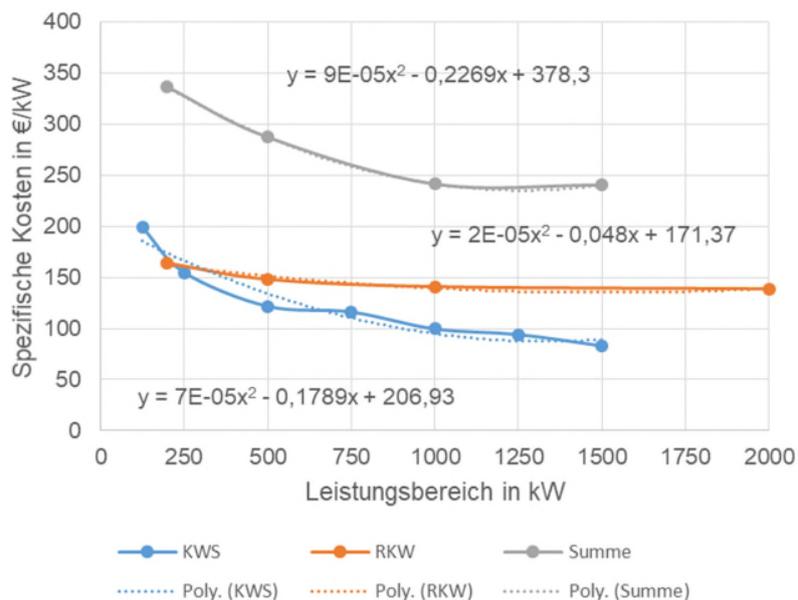
Die Rückkühlung der Kältemaschinen muss zusätzlich betrachtet werden. Da zur statistischen Betrachtung der Bilanzgrenze nicht bekannt sein kann, welche Art der Rückkühlung verwendet wird, wird im Folgenden der Mittelwert aus allen spezifischen Werten verwendet (Tabelle 3).

In Summe ergeben sich damit folgende Werte für die Kälteerzeugung (KWS) und Rückkühlwerk (RKW) (siehe Abbildung 4 und Tabelle 4).

²⁹ BMVBS-Online-Publikation, ebenda

Tabelle 3: Investitionsausgaben für verschiedene Arten von Rückkühlwerken (RKW) in Abhängigkeit der Kälteleistung³⁰

Leistungsbereich	[kW]	200	500	1.000	2.000
geschlossenes RKW	[€/kW]	123	96	84	81
offenes RKW	[€/kW]	54	33	27	22
Hybridkühler	[€/kW]	251	242	235	235
Trockenkühler		165	165	164	164
verwendete Mittelwerte	[€/kW]	148	134	128	126
korr. Mittelwerte	[€/kW]	164	148	141	139

**Abbildung 4: Investitionsausgaben für die Kälteversorgung (Mittelwerte) in Abhängigkeit der Kälteleistung****Tabelle 4: Investitionsausgaben für die Kälteversorgung (Mittelwerte) in Abhängigkeit der Kälteleistung**³¹

Leistungsbereich	[kW]	100	200	500	1.000	1.500
Mittelwert KWS	[€/kW]	190	174	122	100	83
Mittelwert RKW	[€/kW]	167	164	148	141	140
verwendete Summenwerte	[€/kW]	357	338	270	241	223

³⁰ BMVBS-Online-Publikation, ebenda³¹ Werte berechnet mit: $y = 7E-05x^2 - 0,1789x + 206,93$ (KWS) und $y = 2E-05x^2 - 0,048x + 171,37$ (RKW)

2.5 Verwendetes Wirtschaftlichkeitsberechnungsverfahren

Der Nutzen und der Aufwand der WRG soll unter monetären Gesichtspunkten bewertet werden, da letztlich die Amortisation und der Kapitalwert der Ersparnisse den Ausschlag für die Investitionsentscheidung geben können. Hierbei werden neben den Erträgen auch die Aufwendungen für die WRG für die gesamte Nutzungszeit (n) der WRG auf den Zeitpunkt der Investitionsentscheidung abgezinst. Dazu werden das betriebswirtschaftliche Kapitalwert-Verfahren und das Annuitäten-Verfahren angewendet, die als dynamische Investitionsrechnung bezeichnet werden.

Der Barwertfaktor (b) – auch Rentenbarwertfaktor genannt – mit Bezug zum Nutzungszeitraum gibt den Wert künftiger Erträge und Aufwendungen an, abgezinst mit Zins (i) auf den heutigen Zeitpunkt, und errechnet sich mit:³²

$$b = \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \quad (4)$$

Mit der Berücksichtigung der Preissteigerung (j) ermittelt sich der Barwertfaktor aus:

$$b = \frac{1 - \left[\frac{1+j}{1+i}\right]^n}{1-j} \quad (5)$$

Die jährlichen Betriebskosten (B) bemessen sich aus der Differenz zwischen dem Nutzen und den Aufwendungen für die WRG. Der Nutzen wird im Wesentlichen durch den Ertrag bestimmt, der sich aus der Verwendung der Abwärme ergibt. Der Aufwand wird hauptsächlich durch die benötigte Elektroenergie zur Überwindung der Druckverluste, aber auch durch die Unterhaltskosten errechnet:

$$B = \text{Nutzen} - \text{Aufwand} \quad (6)$$

Der Kapitalwert der Ersparnisse (KW) zum Ende der Nutzungsdauer, abgezinst auf den aktuellen Zeitpunkt der Investitionsentscheidung, kalkuliert sich dann aus:

$$KW = B \cdot b - I \quad (7)$$

Die Annuität (jährlicher Differenzbetrag) (E) berechnet sich aus den jährlichen Betriebskosten und der jährlichen Kapitalbedarfskosten, die sich aus der Investition (I) und dem Annuitätenfaktor (f) errechnen. Der Annuitätenfaktor – auch Kapitalwiedergewinnungsfaktor genannt – stellt den reziproken Wert des Barwertfaktors ohne Berücksichtigung der Preissteigerung dar:

³² Mensch, G., Investition: Investitionsrechnung in der Planung und Beurteilung von Investitionen, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2002

$$E = B - I \cdot f \quad (8)$$

mit:

$$f = \frac{1}{b} = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (9)$$

Die Investition (I) ermittelt sich unter der Berücksichtigung sämtlicher Rahmenbedingungen. Hierbei sind je nach betrachteter Bilanzgrenze neben der Investition für das WRG-System auch die eingesparten Investitionen oder die benötigten Mehrinvestitionen zu berücksichtigen (vergleiche Kapitel 2.3).^{33, 34} Die Investitionsaufwendungen für die RLT-Anlage ohne WRG werden als So-wieso-Kosten vorausgesetzt.

2.6 Spezifische Rahmenbedingungen wie Energiepreise, CO₂-Emissionen, Zinssätze, Nutzungsdauer und Temperaturen³⁵

Laut dem zuständigen Policy Officer der Kommission sollten die Optimierungen vorrangig nach monetären Gesichtspunkten erfolgen. Eine Berechnung auf Basis von CO₂-Äquivalenten wurde von ihm nicht prioritär gefordert, sondern zur Entscheidungsfindung als informativ und additiv bewertet.

Um eine monetäre und eine ökologische Betrachtung für Europa in den vorliegenden Untersuchungen durchführen zu können, mussten die spezifischen Energiepreise und CO₂-Emissionen ermittelt werden.

In Tabelle 5 wird der spezifische Nettopreis für Elektroenergie dargestellt. Aus den Daten der 28 EU-Länder im Betrachtungszeitraum (2008 bis 2017) wurde für mittelgroße Industriekunden (Abgabe an die Industrie, Jahresverbrauch 2.000 MWh bis unter 20.000 MWh) ein Mittelwert von 9,1 Cent/kWh errechnet.

Tabelle 5: Elektroenergiepreis in Europa EU 28 ohne VAT der Jahre 2008 bis 2017³⁶

2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	€/kWh
0,0875	0,0950	0,0911	0,0926	0,0960	0,0942	0,0924	0,0877	0,0919	0,0788	0,091
96,5	104,7	100,4	102,1	105,8	103,8	101,9	96,7	101,3	86,9	100 %

³³ Kaup, C., Effizienz der Wärmerückgewinnung, Gentner Verlag, TGA-Fachplaner 06/2009

³⁴ VDI 3803 Blatt 5:2013-04, Raumluftechnik, Geräteanforderungen – Wärmerückgewinnungssysteme (VDI-Lüftungsregeln)

³⁵ Teile dieses Kapitels meiner Dissertation habe ich kostenfrei ebenfalls verwendet in: Kaup, C., Gutachten zur Bezifferung der CO₂-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG-Systemen) Raumluftechnischer Geräte (RLT-Geräte) für Nicht-Wohngebäude, FGK, 2019

³⁶ <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&pcode=ten00117&plugin=1>

Der durchschnittliche Wärmepreis (Mix) in Europa lässt sich nicht explizit ermitteln, da die Europäische Kommission lediglich den durchschnittlichen Gaspreis veröffentlicht.

In Deutschland werden in Nicht-Wohngebäuden (meist Gewerbebauten) 22,2 % der Wärme durch Öl, 52,7 % durch Gas, 7,6 % durch Fernwärme, 13,8 % durch erneuerbare Energie und der Rest durch Strom (3,0 %) und Kohle (0,6 %) erzeugt.^{37, 38} Für Europa sind diese Zahlen nicht verfügbar. Zwar kann angenommen werden, dass hier eine ähnliche Verteilung zu erwarten ist, jedoch selbst wenn diese These zutrifft, fehlt es an spezifischen, statistischen Kosten für die einzelnen Energieträger. Auch aus diesem Grund wird für die weitere Betrachtung Gas als Referenz für die Wärmeversorgung gewählt.

In Tabelle 6 wird der spezifische Nettopreis für Wärmeenergie pro kWh basierend auf Erdgas dargestellt. Aus den Daten der 28 EU-Länder wurde für mittelgroße Industriekunden (industrial consumers with annual consumption between 10 000 and 100 000 GJ) im Betrachtungszeitraum ein Mittelwert von 3,2 Cent/kWh netto berechnet.

Tabelle 6: Gaspreis in Europa EU 28 ohne VAT der Jahre 2008 bis 2017³⁹

2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	€/kWh
0,0321	0,0337	0,0284	0,0307	0,0345	0,0379	0,0359	0,0331	0,0275	0,0256	0,0320
100,6	105,6	89,0	96,1	107,9	118,7	112,4	103,5	86,1	80,1	100 %

Zusätzlich müssen bei der Wärmeerzeugung Verteil- und Erzeugungsverluste berücksichtigt werden. Diese liegen nach DIN SPEC 15420 Tabelle 13⁴⁰ (70 °C Vorlauftemperatur) bei 35 %. Damit ergibt sich ein Nutzenergiepreis von 3,2 Cent/kWh mal Verteilverluste 1,35 = 4,32 Cent/kWh netto. Für die Bewertung der Kälteenergie wird der Kältepreis aus dem Elektropreis mit einer Leistungsziffer von 3 berechnet. Dieser liegt dann bei 9,1 Cent/kWh geteilt durch die Leistungsziffer 3 mal Verteilverluste 1,35 ergibt 4,1 Cent/kWh.

³⁷ <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/UmweltEnergie/Energiemix.html>

³⁸ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/6_datentabelle-zur-abb_energieverbrauch-sektor-hgd-waermezwecke_2018-02-14.pdf

³⁹ <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00118&language=en>

⁴⁰ DIN SPEC 15240:2018-08 – Entwurf: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Energetische Inspektion von Klimaanlage, 2018-08

Die spezifischen CO₂-Emissionen liegen für Gas bei 202 g CO₂ eq./kWh⁴¹ und für Strom bei 460 g CO₂ eq./kWh^{42, 43} in Europa. Die CO₂ Emissionen für Gas müssen ebenfalls mit den Verteilverlusten bewertet werden, sodass sich effektiv $202 \text{ g CO}_2 \text{ eq./kWh} \cdot 1,35 = 272 \text{ g CO}_2 \text{ eq./kWh}$ für die gasbasierten Emissionen bezogen auf Nutzenergie ergeben.

Die „grauen“ CO₂-Emissionen für die Herstellung und den Betrieb von WRG-Systemen ergeben sich aus mehreren Veröffentlichungen. Dabei wird der CO₂-Fußabdruck mit einem Wert von 450 g CO₂ eq./€ (Construction) bis 690 g CO₂ eq./€ (Machinery and equipment, Manuf. Prod. Metals) bewertet.⁴⁴ In Working Paper Series Nr. 13 der Universität Wien⁴⁵ wird für Metal industry ein Wert von 470 g CO₂ eq./€ angegeben. Als Mittelwert wird für die weiteren Betrachtungen 500 g CO₂ eq./€ gewählt. Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen können mit *Real estate activities* mit 230 g CO₂ eq./€ und *Other service activities* mit 220 g CO₂ eq./€ bewertet werden.⁴⁶ Im Folgenden werden Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen mit 220 g CO₂ eq./€ berücksichtigt.

Insgesamt wird in Europa für das Bruttoinlandsprodukt, also die Wertschöpfung sämtlicher Waren und Dienstleistungen, eine Emission von 272 g CO₂ eq./€ (2019)⁴⁷ aufgewendet. Die Schwankungen in Europa sind allerdings enorm. Sie reichen von 103 g CO₂ eq./€ in Schweden bis zu 1.066 g CO₂ eq./€ in Bulgarien. In Deutschland wurden 251 g CO₂ eq./€ emittiert.

Um die CO₂-Reduktion mit der monetären Optimierung vergleichen zu können, ist die monetäre Bewertung der CO₂-Emissionen notwendig. Die spezifischen nationalen CO₂-Reduktionskosten sind jedoch europaweit extrem uneinheitlich geregelt, zumal sie noch nicht einmal in allen europäischen Ländern gefordert werden. Während in Schweden 114 €/t. CO₂ erhoben werden, liegt beispielsweise in Slowenien der Preis im Jahr 2019 bei knapp 17 €/t. In Estland werden 2 €/t. und in Lettland 5 €/t. eingefordert. In Dänemark, Irland oder UK werden rund 21 €/t. entrichtet, wobei

⁴¹ https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissions-faktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf

⁴² <https://de.econologie.com/Europa-Emission-co2-Land-kwh-elektrische/>

⁴³ Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles Moro, A., Lonza L., European Commission, Joint Research Centre (JRC), Via Enrico Fermi 2749, 21027 Ispra (VA), Italy, Transportation Research Part D: Transport and Environment Volume 64, October 2018, Pages 5-14

⁴⁴ An Environmentally Extended Input-Output Analysis to Support Sustainable Use of Forest Resources, Table 3, Tuomas Mattila, Pekka Leskinen, Ilmo Mäenpää and Jyri Seppälä, The Open Forest Science Journal, 2011, 4, 15-23

⁴⁵ Carbon footprint decomposition in MRIO models: identifying EU-supply chain hot-spots and their structural changes over time, Table 1, Hanspeter Wieland, Stefan Giljum, Universität Wien, Working Paper Series Nr. 13, 2/2016

⁴⁶ Carbon footprint decomposition in MRIO models, ebenda

⁴⁷ <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#emissionen-in-relation-zum-bruttoinlandsprodukt-bip>

in Frankreich 44 €/t. und in Finnland rund 62 €/t. gefordert werden.⁴⁸ In Deutschland wurde ein CO₂-Preis von 25 €/t. diskutiert und für 2021 auch festgelegt, der in 2022 auf 30 €/t. stieg.⁴⁹

Neben den nationalen CO₂-Abgaben werden ETS-basierte CO₂-Emissionen europäisch gehandelt. Der Europäische Emissionshandel (EU-ETS) ist seit 2005 das zentrale Klimaschutzinstrument der EU. Dabei ist der CO₂-Preis in den letzten drei Jahren des Betrachtungszeitraums (2017 bis 2019) deutlich von rund 5 €/t. auf rund 25 €/t. (Mittelwert 2019) angestiegen.⁵⁰

Der Höchststand wurde im Betrachtungszeitraum mit 29,05 €/t. im Juli 2019 erreicht. In den weiteren Betrachtungen werden die CO₂-Emissionsminderungen mit 25 €/t. berücksichtigt.

Der Nominalzins, der als kalkulatorischer Zinssatz und die Inflationsrate, die als Preissteigerungsrate in den folgenden Bewertungen verwendet werden, ergeben sich aus dem Mittelwert des Betrachtungszeitraums (Tabelle 7).

Tabelle 7: Nominalzins und Inflationsrate in der EU für 2008 bis 2017^{51, 52}

Jahr	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Mittelwert	
Nominalzins	4,0	3,3	3,4	3,3	3,1	2,3	1,7	1,3	1,0	0,7	2,4	%
Inflation in der EU	3,7	1,0	2,1	3,1	2,6	1,5	0,5	0,0	0,4	1,7	1,7	%

Nach Diskussionen mit Stakeholdern und dem Ordnungsgeber wurden die Optimierungsberechnungen auf Basis der Mittelwerte der Energiepreise erstellt. Da die Preise für Gas im Betrachtungszeitraum tendenziell gefallen sind (bezogen auf den Mittelwert von rund +19 % in 2013 auf etwa -20 % in 2017, vergleiche Tabelle 6) und die Preise für Elektroenergie in den Vorjahren ebenfalls gefallen sind (bezogen auf den Mittelwert von rund +6 % in 2012 auf -13 % in 2017, vergleiche Tabelle 5), wurden keine Energiepreissteigerungen in den Optimierungsberechnungen berücksichtigt. Aus diesem Grund basieren die dargestellten Optimierungen auf der Maxi-

⁴⁸ Herzig, L., Caspar, O., STUDIE: CO₂-Preise: eine Idee, deren Zeit gekommen ist, Bestehende Instrumente und aktuelle Debatten in Europa und den G20, 07/2019, www.germanwatch.org/de/16693

⁴⁹ <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/nationaler-emissionshandel-1684508>

⁵⁰ <https://www.finanzen.net/rohstoffe/co2-emissionsrechte> (siehe auch <https://www.boerse-online.de/rohstoffe/co2-emissionsrecht>) vom 25.01.2020

⁵¹ GZ II A 3 – H 1012-10/07/0001 (www.bundesfinanzministerium.de), Stand 2018, Veröffentlichungsdatum 14. Mai 2018), siehe auch <https://wibe.de/wahl-des-zinssatzes-fur-wirtschaftlichkeitsuntersuchungen-wibe-projekte/>

⁵² <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156285/umfrage/entwicklung-der-inflationsrate-in-der-eu-und-der-eurozone/>

mierung der jährlichen Differenzbeträge, die sich aus Gleichung 8 und 9 ergeben. In den angegebenen Kapitalwerten der Ersparnisse wurde eine Preissteigerung gemäß Gleichung 5 (Inflation laut Tabelle 7) berücksichtigt.

Die verwendete Nutzungsdauer ergibt sich aus mehreren Veröffentlichungen. Sie wird in Deutschland für die WRG im Wirtschaftszweig Heil-, Kur-, Sport- und Freizeitbäder⁵³ sowie bei allgemein verwendbaren Anlagegütern für Wärmetauscher⁵⁴ und international für HVAC-Systeme (Cooling, heating)⁵⁵ mit 15 Jahren angegeben.

Die Ablufttemperatur wird in Anlehnung an DIN EN 16798-1⁵⁶ für den Winter mit 20 °C und für den Sommer mit 26 °C gewählt. Die Zulufttemperatur wird ganzjährig mit 20 °C angesetzt.

In den Berechnungen werden weder interne Lasten noch Transmissionswärmeverluste oder Wärmeeinträge berücksichtigt, da diese signifikant von der Nutzung abhängen und sich ausgleichen können. Zudem wird keine Strahlungswärme einbezogen, da diese ebenfalls vom Gebäudetyp und dem Gebäudealter abhängig ist. Es werden zur Beurteilung der WRG in den Betrachtungen nur Lüftungswärmeverluste bilanziert.

Als meteorologische Außenlufttemperaturen für die einzelnen betrachteten europäischen Standorte und deren Häufigkeitsverteilung während eines Jahres wurde die Software Meteororm (Version 7.1) gewählt, da diese Software eine anerkannte meteorologische Referenz ist.

⁵³ Bundesfinanzministerium, AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Heil-, Kur-, Sport- und Freizeitbäder", BMF-Schreiben vom 10. April 1995 - IV A 8 - S 1551 - 85/95

⁵⁴ Bundesfinanzministerium, AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle "AV"), IV D 2-S 1551-188/00, B/2-2-337/2000-S 1551 A, S 1551 - 88/00

⁵⁵ Washington State Department of Commerce, DCA Office of Affordable Housing, 2011 Architectural Manual, Expected Useful Life Table: <https://www.commerce.wa.gov/wp-content/uploads/2016/11/hfu-expected-useful-life-2011.pdf>

⁵⁶ DIN EN 16798-1: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Modul M1-6; Deutsche Fassung 2019: Tabelle B.2.4 Standard-Innentemperaturen für Energieberechnungen, Tabelle B.5 – Temperaturbereiche für die Berechnung der Kühl- und Heizenergie auf stündlicher Basis für vier Kategorien des Innenraumklimas

3. Stand der Forschung

3.1 Gegenstand der Forschungsfrage

Gegenstand der Dissertation sind die Anforderungen an Wärmerückgewinnungseinrichtungen, die in RLT-Anlagen in Nicht-Wohngebäuden als Energieeffizienzmaßnahme eingesetzt werden.

Hierbei stellt sich die Frage, ob sich unter spezifischen Rahmenbedingungen jeweils ein eindeutiges Optimum (Maximum der Erträge) beim Einsatz von WRG-Systemen ergeben kann. Dabei kann die Bewertung sowohl monetär als auch ökologisch auf Basis der mit der WRG verbundenen CO₂-Emission, bzw. -Emissionsminderungen erfolgen.

Da im Einzelfall aufgrund der verschiedensten Rahmenbedingungen der Nutzen und der damit verbundene Aufwand stark variieren können, stellt sich die Frage, ob es nicht sinnvoll ist, die WRG-Anforderungen auf Basis von individuellen Kriterien zu definieren, anstatt pauschalen, starren gesetzlichen Festlegungen der EU-Verordnung (vergleiche Anforderungen aus Kapitel 2.2) den Vorzug zu geben. Mit einer individuellen Optimierung könnte in jedem Fall weder mit einer zu „kleinen“ noch mit einer zu „großen“ WRG ein betriebswirtschaftliches und letztlich ein volkswirtschaftliches Potenzial vergeudet, sondern das Maximum des Potenzials ermöglicht werden. Eine entsprechende Optimierung im Hinblick auf den Temperaturänderungsgrad und den benötigten Elektroenergieeinsatz kann nicht nur unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten, sondern auch unter ökologischen Gesichtspunkten sinnvoll sein.

In dieser Dissertation sollen die gesetzlichen Maßnahmen mit Blick auf die Revision der EU 1253/2014 auf Basis von Optimierungen unter Berücksichtigung von Studien und Simulationen sowie unter Zuhilfenahme von mehrdimensionalen Optimierungsrechnungen bewertet und Vorschläge zur Neugestaltung erarbeitet werden.

Unter der mehrdimensionalen Optimierung wird im Wesentlichen die Anpassung der Geometrien des jeweiligen Wärmeübertragers in den drei Dimensionen, Breite, Höhe und Bautiefe verstanden, welche unter verschiedensten Rahmenbedingungen erfolgen kann, während eindimensional nur die Bautiefe des Wärmeübertragers angepasst wird, um ein Maximum der Erträge zu erreichen. Mit einer mehrdimensionalen Optimierung könnte das Potenzial der WRG gegenüber einer eindimensionalen Optimierung erhöht werden, da sich mit dem Strömungsquerschnitt das Verhältnis des thermischen Nutzens zum Druckabfall und damit zum notwendigen elektrischen Aufwand ändert. Zudem bedingt eine Strömungsquerschnittsänderung auch eine Änderung der Wärmeübertragung, die berücksichtigt werden muss.

Bei der Gestaltung der neuen Anforderungen ist zu beachten, dass die Europäische Verordnung EU 1253/2014 von Portugal bis Finnland ihre wirtschaftlichen Effekte entfaltet. Die Verordnung

EU 1253/2014 wird aktuell überarbeitet und soll voraussichtlich 2023 in Kraft treten. Die Kommission ist verpflichtet, diese Verordnung nach Maßgabe des technischen Fortschritts zu überprüfen, und sollte dem Kommunikationsforum spätestens Ende 2020 über die Ergebnisse dieser Überprüfung berichten.

Dieser Prozess wurde durch den Start der Review Studie 2019 eingeläutet. Erste Studienergebnisse liegen seit dem 25.11.2019 vor.⁵⁷ Im September 2020 wurden die finalen Task Reports der Review Studie veröffentlicht.⁵⁸ Am 30.03.2021 fand online das Consultationforum über die Anpassung der EU-Verordnung statt. Insgesamt ist der gesamte Review Prozess durch die anhaltende Corona-Pandemie deutlich verzögert worden. Eine endgültige Festlegung der neuen Kriterien ist bis heute nicht erfolgt, allerdings sind die Ergebnisse dieser Dissertation in den Review Prozess der Europäischen Kommission eingeflossen.

3.2 Problemstellung und Abgrenzung des Untersuchungsobjektes

Die WRG wird durch den Temperaturübertragungsgrad im Rahmen der EU 1253/2014 reglementiert. Die Anforderungen an die Luftfeuchte, also Be- und Entfeuchtungsanforderungen, und damit auch latente Wärmeanforderungen sollen daher weder für die Änderung der Verordnung noch in dieser Dissertation betrachtet werden, da dies zudem den Umfang der Arbeit übersteigen würde. Weiterhin ist die Berücksichtigung der Luftfeuchte auch deshalb besonders schwierig, weil verschiedenste Anforderungen daran gestellt werden. Zudem hat die Bedeutung der Feuchte normativ eher abgenommen, da sehr weite Grenzen für die Festlegung von Feuchtegrenzwerten gesetzt werden (siehe DIN EN 16798-3⁵⁹).

Neben dem Nutzen in Form von Wärme muss für den Betrieb der WRG elektrische Energie aufgewendet werden, um die Strömungswiderstände zu überwinden, die durch den apparativen Aufwand erzeugt werden. Dieser energetische Aufwand schmälert den Ertrag der WRG und hängt linear von der Bautiefe der WRG (apparativer Aufwand) ab und nimmt exponentiell zum Temperaturübertragungsgrad der WRG zu, während der Ertrag der WRG linear zum Temperaturübertragungsgrad wächst. Um einen steigenden Nutzen zu realisieren, muss der Aufwand exponentiell gesteigert werden (abnehmender Grenznutzen). Im besten Fall der Wärmeübertragung unter der Nutzung des Gegenstromprinzips zeigt Abbildung 5 sehr deutlich den abnehmenden Grenznutzen

⁵⁷ Review Study Phase 1.1 and phase 1.2 / Technical Analysis and update Preparatory Studies / Draft Report / TASK 3. Use-phase Impacts / Review study on Regulations EU 1253/2014 (Ecodesign requirements for ventilation units) and EU 1254/2014 (energy labelling of residential ventilation units)

⁵⁸ <https://www.ecoventilation-review.eu/documents.htm#authors>

⁵⁹ DIN EN 16798-3: Lüftung von Nicht-Wohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Raumklimaanlagen, 2017 (Revision der EN 13779)

der WRG, der sich bei ausgeglichenen Massenströmen (Zuluft- gleich Abluftmenge mit $\mu = 1$) aus der Gleichung:

$$\Phi = \frac{NTU}{NTU + 1} \quad (10)$$

ergibt, wobei NTU (number of transfer units) den Aufwand widerspiegelt, während der Temperaturübertragungsgrad Φ den thermischen Nutzen repräsentiert (vergleiche Kapitel 5.1.1). Das Problem ist demnach eindeutig ein Optimum der WRG zu erreichen, das den maximalen Ertrag ermöglicht.

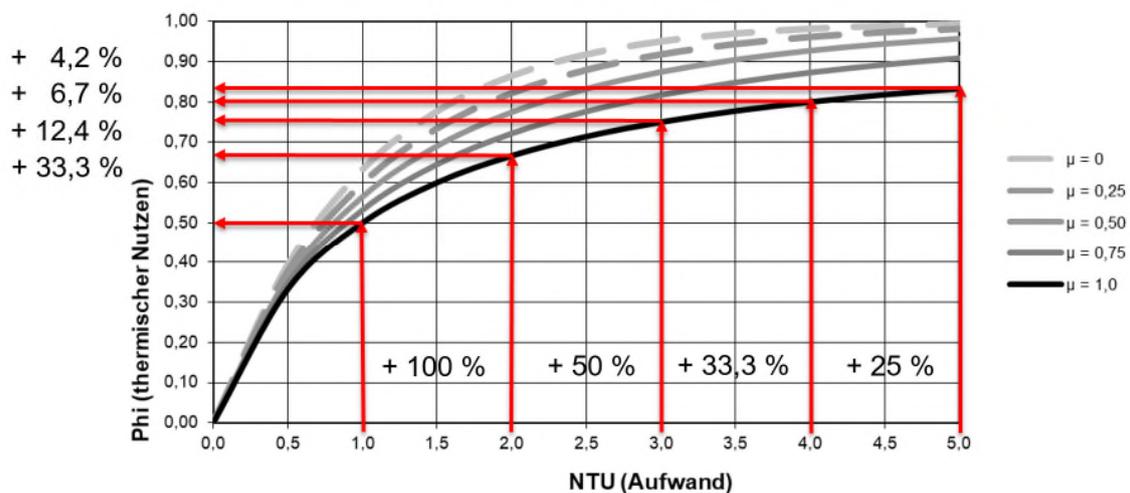


Abbildung 5: Abnehmender Grenznutzen der WRG im Gegenstrom als Funktion von NTU⁶⁰

Nicht betrachtet werden in dieser Dissertation Anforderungen an Wohnraumlüftungsgeräte. Zudem wird lediglich der WRG-Prozess betrachtet. Einspeisungen weiterer Energieströme oder Mehrfachfunktionen, wie die indirekte Verdunstungskühlung, aber auch die Freie Kühlung durch Außenluft sollen nicht Bestandteil der Dissertation sein. In der Dissertation sollen aber auch die Einflüsse der Investitionsänderungen durch die Minderung der Wärme- und Kälteerzeugung berücksichtigt werden. Nicht berücksichtigt wird die Gesamtinvestition für die RLT-Anlage als solche. Es wird die RLT-Anlage mit und ohne WRG betrachtet. Dabei werden sämtliche Kosten, wie Investitionsausgaben der WRG, durch die WRG bedingte Investitionsänderungen, Elektroenergiekosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten sowie die Wärmeerträge berücksichtigt.

⁶⁰ Eigene Darstellung auf Basis des VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 7. Auflage

3.3 Angabe der wichtigsten Arbeiten anderer Wissenschaftler

Im Rahmen dieser Dissertation wurden die folgenden Arbeiten anderer Wissenschaftler (chronologisch aufgeführt) berücksichtigt, um den Stand der Wissenschaft abzubilden:

- Kremer, M., Rewitz, K., Müller, D., Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen, White Paper, RWTH-EBC 2021-005, Aachen, 2021
- Harleß, A., Steigerung der Energie- und Kosteneffizienz bei der Abwärmenutzung durch Optimierung von Strukturrohren in Rohrbündelwärmeübertragern, Dissertation, Helmut Schmidt Universität Hamburg, 2017
- Stettler, C., Simulationsgestützte Optimierung von Kreislaufverbundsystemen in raumlufttechnischen Anlagen, Hochschule für Technik und Architektur, Luzern, 2016
- Wystrcil, D., Ein Beitrag zur thermo-hydraulischen Optimierung niedrigexergetischer Wärme- und Kälteversorgungssysteme, Dissertation Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2016
- Abdul, A., Matthes, P., Schmidt, M., Müller, D., Energetic evaluation of the heat recovery of an air handling unit taking into account the insulation standards and internal thermal loads, RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, 2015
- Brunner, F., Krummenacher, P., Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode, Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen, 07/2015
- Wenterodt, T., Die Bewertung und numerische Optimierung von Wärmeübertragern anhand einer Energieentwertungszahl, Dissertation TU Hamburg-Harburg, 2013
- Matthes, P., EBC Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, FGK-Tagung Lüftung in Schulen, München, 14.02.2012
- Franzke, U., Schiller, H., Untersuchungen zum Energieeinsparpotenzial der Raumlufttechnik in Deutschland, 10/2011
- Eggers, I., Matthes, P., Müller, D., Hybride Lüftungstechnik für Schulgebäude – dezentrale Lüftungstechnik, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, DKV Fachtagung 2009
- Brune, M., Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung der Wärmeübertragung in Rekuperatorbrennern, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 2005

- Tandogan, E., Optimierter Entwurf von Hochleistungswärmeübertragern, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 2001
- Beck, E., Energieverbrauch, -einsparpotential und -grenzwerte von Lüftungsanlagen, Dissertation GH Kassel, 07/2000
- Brunner R., Kyburz, V., Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung, Planung, Bau und Betrieb von Wärmerückgewinnungs- und Abwärmenutzungsanlagen, Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1993
- Feist, W., Passivhäuser in Mitteleuropa: theoretische Untersuchungen von Simulationsmodellen für das thermische Verhalten von Gebäuden und Anwendung auf die Auslegung der Konstruktionsdetails von Passivhäusern, Dissertation Universität Kassel, 1992
- Groscurth, H., Rationelle Energieverwendung durch Wärmerückgewinnung, Physica-Verlag Heidelberg, 1991

Die genannten Arbeiten anderer Wissenschaftler beschäftigen sich einerseits mit Studien zum Energieverbrauch (Beck und Franzke) von RLT-Anlagen in Gebäuden und ihren Auswirkungen. Auf Basis von statistischen Auswertungen werden generelle und pauschale Handlungsempfehlungen auch für die WRG ausgesprochen, jedoch erfolgten in diesen Arbeiten keinerlei Optimierungsberechnungen.

Andererseits beziehen sie sich auf die thermodynamische Simulation auf Basis von WRG-Systemen im konkreten Zusammenhang mit einem zu untersuchenden Gebäude(typ) (Matthes, 2012 und 2015).

Lediglich Groscurth setzt sich mit der nicht linearen Optimierung von Optimierungsproblemen umfangreicher Wärmerückgewinnungssysteme auseinander. Dabei bezieht sich Groscurth im Wesentlichen auf WRG in regionalen Energiesystemen mit zeitlichen Bedarfsschwankungen. Insbesondere betrachtet Groscurth die Wärmepumpe zur WRG. Gemäß Definition ist die Wärmepumpe jedoch keine WRG im eigentlichen Sinn. In RLT-Anlagen besteht zudem diese Bedarfsschwankung nicht, da Abwärme und Nutzwärme gleichzeitig entstehen bzw. notwendig werden. Daher können die Erkenntnisse von Groscurth hier keinen weiteren Beitrag zur Beantwortung der Fragestellung liefern.

Feist thematisiert mit seiner Dissertation Passivhäuser, die laut seiner Aussage zwingend eine WRG benötigen. Darin empfiehlt Feist grundsätzlich eine Erhöhung der RWZ. Die Aussage ist allerdings zu pauschal und zu undifferenziert. Eine Optimierung beschreibt Feist zum Thema der WRG nicht. Interessanterweise greift Feist in seiner Dissertation aber beim Thema Gebäudedämmung einen Optimierungsgedanken auf. Er beschreibt ein Kostenoptimum der Dämmung (Dicke), indem er die Investitionsausgaben im Verhältnis zur Wärmeeinsparung beurteilt. Mit dieser

Methode kommt er dann unter spezifischen Rahmenbedingungen zu einer optimalen Dämmstärke. Dieser Ansatz entspricht etwa dem Ansatz der eindimensionalen Optimierung der WRG (siehe Kapitel 5.1.1) und ist für die Dämmung auch ausreichend, da hier „nur“ eine Dimension (Stärke der Dämmung) berücksichtigt werden muss. Die WRG kann allerdings in drei Dimensionen ausgelegt werden, wodurch sich das Verhältnis des thermischen Nutzens zum elektrischen Aufwand der WRG verschiebt, da sich der spezifische Druckverlust sowie die Wärmeübertragungseigenschaften ändern (siehe Kapitel 5.1.4).

Auch die Veröffentlichung von Kremer und Rewitz bewertet zwar den Einfluss von zwei unterschiedlichen WRG-Systemen (Temperaturübertragungsgrade 79 % und 54,5 %) auf die Wirtschaftlichkeit und die Ökologie, aber eine Optimierung der WRG wird auch in dieser aktuellen Veröffentlichung nicht durchgeführt.

Auf den ersten Blick erscheint die Pinch-Analyse (Pinch, englisch: Engstelle, „kneifen“) von Brunner und Krummenacher besonders interessant, weil die Pinch-Analyse zur Optimierung von Anlagen mit Wärme- und Kältebedarf angewendet wird. Sie ergibt vor allem Sinn, wenn es ein Wärmeangebot und einen Wärmebedarf gibt und es auf den ersten Blick nicht ersichtlich ist, ob und wie eine WRG wirtschaftlich umgesetzt werden kann, da die Temperaturquellen und -senken nicht eindeutig erkennbar sind und sich annähern können. Sie ergibt daher weniger Sinn, wenn der thermische Hauptenergiebedarf nicht in verschiedenen Prozessen, sondern in einem einzigen Prozess auf einem Temperaturniveau liegt. Auch wenn verschiedene Heizanforderungen auf unterschiedlichem Temperaturniveau (z. B. Pasteurisation auf 75 °C, Warmwasserproduktion, Vorwärm Schritte auf 40 °C, Luftherhitzung auf 30 °C etc.) existieren, ist die Anwendung der Pinch-Analyse dagegen geboten und sinnvoll, da die Temperaturverläufe sich annähern und die niedrigste Temperaturdifferenz den „Pinch“ bestimmt. Dies trifft aber auf die WRG nicht zu, weil nur ein Temperaturniveau (in einem Prozess) betrachtet wird.

Der Pinch, also die Engstelle, entsteht bei der WRG zunehmend mit steigendem Temperaturübertragungsgrad, da sich die beiden Temperaturen zwischen der Außenluft und der Abluft immer weiter annähern, und ist damit klar determiniert. Bei einem theoretischen Temperaturübertragungsgrad von 1 (100 %) wäre keine treibende Temperaturdifferenz mehr vorhanden (gleitender Pinch bis zum Maximum von Null).

Stettler widmet sich in seiner Masterthesis dem Problem der Optimierung von KV-Systemen. Dabei wendet er ebenfalls die Pinch-Analyse an. Jedoch bezieht er sich auf ein vernetztes System mit mehreren Wärmequellen und -senken. Zudem betrachtet er in der Optimierung den Zwischenkreis (optimale Soleumlaufrmenge) und nicht die optimalen Abmessungen des, bzw. der Wärme-

übertrager. Außerdem betrachtet er verschiedene weitere Varianten (Reduktion des Volumensstroms, Nacherwärmer und Luftkühler im Solestrom, Taupunktregelung etc.). Diese Fragestellungen gehen über die Anforderungen der EU 1253/2014 hinaus.

Brunner und Kyburz beschäftigen sich beim Thema Optimierung mit der Frage der monetären und energetischen Optimierung. Dabei wird prinzipiell die Optimierung als eindimensionale Optimierung ohne systematische Veränderung der Querschnittsfläche durchgeführt. Bei diesem Verfahren wird der Mehraufwand für Zusatz- und Hilfsenergie vom Wärmerückgewinn mit angemessener Gewichtung subtrahiert. Bei dieser Berechnung werden sowohl die Betriebs- als auch die Investitionsausgaben optimiert. Zwar beschreiben die Autoren richtigerweise, dass höhere Luftgeschwindigkeiten im Wärmeübertrager zwar kleinere Apparate bzw. Investitionen ergeben, aber auch meistens einen erheblich größeren Mehraufwand an Hilfsenergie benötigen. Sie beschreiben aber keine systematische Methodik, um ein Optimum im Hinblick auf die Geometrie der WRG durch Anpassung in Höhe, Breite und Bautiefe und damit durch Anpassung der Strömungsgeschwindigkeit zu finden. Zwar wird in dieser Veröffentlichung der prinzipielle Zusammenhang zwischen Aufwand und Ertrag aufgezeigt, aber eine Berechnungsmethodik, wie die Aufwände und Erträge einfach auf Basis einer Auslegung ermittelt werden können, unterbleibt. Es wird lediglich auf Auslegungssoftware von Herstellern verwiesen. Offensichtlich soll die Optimierung auf Basis einer Vielzahl von Auslegungen mit verschiedenen Temperaturübertragungsgraden erfolgen.

Die Arbeiten von Tandogan, Brune, Harleß und Wenterodt befassen sich mit der Detailoptimierung von Wärmeübertragern (siehe auch Kapitel 3.5). Also der Optimierung der spezifischen Geometrien, wie Rippenhöhe, Rohranordnung und -abstände etc. Zudem beschäftigen sich diese Arbeiten mit der Erhöhung der Wärmeübertragerleistung durch Oberflächenveränderungen wie Winglets, Louvered- und Offset-Strip-Fins, die aus Gründen der Hygieneanforderungen in RLT-Anlagen meist nicht verwendet werden dürfen (siehe VDI 6022 Blatt 1). Wystrcil hingegen befasst sich mit einer thermo-hydraulischen Optimierung niedrigexergetischer Wärme- und Kälteversorgungssysteme.

Keine dieser Arbeiten befasst sich im Detail mit der individuellen Auslegung der Wärmeübertrager zur WRG im jeweiligen Anwendungsfall. Spezifische Detailgeometrien können in der Praxis meist nur mit sehr hohem Kostenaufwand geändert werden und werden nach einer erstmaligen Konstruktionsoptimierung in ihrer späteren Anwendung meist als konstant angenommen und nicht mehr verändert. Aber auch auf Basis „optimierter“ Detailgeometrien besteht die Anforderung eine Optimierung der Gesamtabmessungen und damit der optimalen Auslegungsgeschwindigkeit von Wärmeübertragern im jeweiligen individuellen Anwendungsfall durchzuführen (vergleiche auch Kapitel 3.5).

3.4 Stand der eigenen Forschung in ihrer unmittelbaren Beziehung zum Problembereich

Der bisherige Stand der Forschung zum Einsatz und zur Optimierung von WRG-Systemen bezieht sich im Wesentlichen auf die Arbeiten des Verfassers der Dissertation, die in den Jahren 2009 bis 2016 entstanden sind. Diese wurden wie folgt – chronologisch gelistet – veröffentlicht:

- Effizienz der Wärmerückgewinnung, Gentner Verlag, TGA-Fachplaner 06/2009: In diesem Beitrag werden die Bewertung der WRG und das Verfahren der Wirtschaftlichkeitsberechnung auf Basis von Summenhäufigkeiten explizit dargestellt, was auch in die VDI-Richtlinie 3803 Blatt 5 eingeflossen ist (siehe auch HLH 05/2010). Diese Basis wurde für die eindimensionale und mehrfachdimensionale Optimierung der WRG genutzt.
- Wärmerückgewinnung als Schlüsselkomponente der Lebenszykluskosten, Springer-VDI Verlag, HLH 05/2010: Dieser Beitrag betrachtet das Verfahren der Wirtschaftlichkeitsberechnung auf Grundlage von Summenhäufigkeiten und den Einfluss von Lebenszykluskosten für vier Standorte in Deutschland.
- Erweiterung der Studie zur Energieeffizienz von raumluftechnischen Geräten, Springer-VDI Verlag, HLH 01/2012: In dieser Veröffentlichung wird die Energieeffizienz von RLT-Geräten auf Basis einer Studie aus 2010 für die Folgejahre erweitert.
- Energiebedarf und Einsparpotenzial in Europa, Gentner Verlag, TGA Fachplaner 02/2012: In diesem Artikel wird das Potenzial der WRG anhand deren Entwicklung in Deutschland bis 2010 auf Europa übertragen und deren Einfluss erstmals europaweit auf Basis des Bruttoinlandsprodukts (2008) der einzelnen europäischen Länder abgeschätzt.
- Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Springer-VDI Verlag, HLH 06/2012: In diesem Beitrag wird die eindimensionale Optimierung auf Grundlage der Abhängigkeit der Kosten und Erträge von charakteristischen Kenngrößen (Φ und NTU) erstmals dargestellt. Auf dieser Basis wurde die mehrdimensionale Optimierung aufgebaut, die ein wesentlicher Baustein dieser Dissertation ist.
- mit Kampeis, P., Studie zum Beitrag und zum Anteil der Wärmerückgewinnung aus zentralen Raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Nicht-Wohngebäuden, Fachverband Gebäude-Klima e. V., 2013 ⁶¹: Diese Studie vergleicht den volkswirtschaftlichen Beitrag der WRG in Wohn- gegenüber Nicht-Wohngebäuden für die Jahre 2009 bis 2012.

⁶¹ Prof. Kampeis wurde als Co-Autor genannt, da er als Prodekan die Studien offiziell gegenzeichnen musste. Die Arbeiten zu den Studien 2013 und 2014 wurden von C. Kaup alleine durchgeführt. Sämtliche Studien wurden eigenfinanziert.

- mit Kampeis, P., Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs zentraler Raumluftechnischer Anlagen in Nicht-Wohngebäuden in Deutschland, Fachverband Gebäude-Klima und Herstellerverband Raumluftechnische Geräte e. V., 2014: In dieser Studie wird die Entwicklung der WRG, aber auch des SFP-Werts der RLT-Anlagen in NWG in Deutschland für die Jahre 2006 bis 2013 dargestellt und eine Abschätzung des Einflusses für Deutschland berechnet.
- Berippte Wärmeübertrager, Näherungsgleichung zur k-Zahl-Berechnung, Gentner-Verlag, TGA-Fachplaner 03/2015: In diesem Artikel werden dezidiert die Grundlagen zur Berechnung des Wärmeübergangs an Wärmeübertragern beschrieben und eine Näherungsgleichung zur k-Zahl-Abschätzung vorgestellt sowie deren Ergebnisse mit dem klassischen Verfahren verglichen. Diese Gleichung wurde für die Optimierungsberechnungen dieser Dissertation verwendet.
- Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 77. Ausgabe 2015/16 (und Folgejahre), Wärmerückgewinnung, Seite 1518 bis 1555, ITM InnoTech Medien: Diese Veröffentlichung beschreibt die Grundlagen zur WRG in der Raumluftechnik fachbuchartig.
- Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen im Kontext volks- und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen (Teil 1), Huss Medien, Moderne Gebäudetechnik 11/2016: Dieser Beitrag stellt die Entwicklung der WRG in Deutschland bis 2013 und die Abhängigkeit der Kosten und Erträge der WRG von charakteristischen Kenngrößen (Φ und NTU) prinzipiell dar, die auch die Basis zur ein- und mehrdimensionalen Optimierung bilden.
- Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen im Kontext volks- und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen (Teil 2), Huss Medien, Moderne Gebäudetechnik 12/2016: In dieser Publikation wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung und Optimierung (eindimensional) am Beispiel mit verschiedenen Laufzeiten (Änderung der Rahmenbedingungen) dargestellt.

Ein Teil der Studien und Veröffentlichungen des Autors sind auch in die vorbereitenden Studien der Europäischen Kommission zu Umsetzung der Ökodesignrichtlinie 2009/125/EG eingeflossen:

- Ventilation products regulations based on Ecodesign directive ongoing study Ecodesign ENTR Lot 6 (Tasks 1-7), 2012

- Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2 – Lot 6: Air-conditioning and ventilation systems ENTR / 2009/035/ LOT6 – executive summary 14.06.2012

Diese dienen der Verordnung EU 1253/2014 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Europäischen Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen, veröffentlicht am 25.11.2014.

Jedoch konnten die weiteren o. g. Veröffentlichungen des Verfassers zur Optimierung der WRG nach 2012 in der Umsetzung der Ökodesignverordnung 2014 nicht mehr berücksichtigt werden.

Die Europäische Union hat bisher die Argumentation vertreten: „Im Norden wird Wärme und im Süden der gleiche Anteil Kälte (in gleicher Größenordnung, Anmerkung des Verfassers) zurückgewonnen!“, um eine starre europaweite Festlegung der WRG zu legitimieren. Diese Sichtweise kann aber vom wissenschaftlichen Standpunkt nicht aufrechterhalten werden, um mit dieser Aussage eine EU-weite einheitliche Festlegung zu begründen, da der Wärmebedarf in Europa nicht nur insgesamt wesentlich größer ist als der Kältebedarf, sondern im Norden um Zehnerpotenzen mehr Wärme zurückgewonnen wird, als im Süden „Kälte“⁶² (siehe auch Kapitel 5 und 5.3).

Da andere Wissenschaftler dieses Thema bisher nur rudimentär bearbeitet haben und der Stand der Wissenschaft im Wesentlichen durch die eigenen Schriften abgebildet wird, werden diese bisherigen Schriften in dieser Dissertation als Eigenzitate verwendet. Auf den genannten bisherigen Veröffentlichungen des Autors und dem damit abgebildeten Stand der Wissenschaft ist die vorliegende Dissertation aufgebaut. Diese eigenen Schriften wurden in dieser Dissertation und in den kumulativen Beiträgen in Teilen verwendet.

⁶² Kaup, C., Energiebedarf und Einsparpotenzial in Europa, Gentner Verlag, TGA Fachplaner 02/2012

3.5 Unterschied zwischen der individuell optimierten Auslegung und der konstruktiven Detailoptimierung von Wärmeübertragern zur WRG⁶³

Wie bereits beschrieben haben sich viele wissenschaftliche Arbeiten mit der thermodynamischen Detailoptimierung der Konstruktion von Wärmeübertragern befasst (siehe auch Kapitel 3.3). Beispielsweise untersuchte Knissel 2019 den Einfluss auf längs angeströmte, berippte Rohre zur Druckverlust- und damit zur Aufwandminderung.⁶⁴ Dabei konnten Druckverlusteinsparungen bis zu 60 % gegenüber konventionellen, querangeströmten Rundrohrwärmeübertragern nachgewiesen werden.

Dies ist auch ein wichtiger Aspekt zur Optimierung der WRG, der keinesfalls fehlen darf. Allerdings lassen sich auch thermodynamisch im Detail optimierte Wärmeübertragerkonstruktionen (vergleiche Kapitel 3.3) in ihrer individuellen Anwendung zusätzlich optimieren, indem optimale Dimensionen in der jeweiligen Auslegung genutzt werden. Denn jeder Wärmeübertrager wird üblicherweise nicht in der Detailkonstruktion auf den spezifischen Auslegungsfall angepasst und daraufhin ausgelegt, aber in seinen individuellen Auslegungsdimensionen (Höhe, Breite und Bautiefe). Dabei spielt das Verhältnis zwischen energetischem Nutzen (Wärme) und dem Aufwand (Elektroenergie) eine entscheidende Rolle.

Der Verfasser dieser Arbeit hat ebenfalls in anderen Arbeiten Wärmeübertrager im Detail optimiert, um zum einen die Wärmeübertragung zu verbessern, aber zum anderen auch den spezifischen Druckverlust zu minimieren. Um den elektrischen Aufwand durch die Druckverluste weiter zu reduzieren, wurde der Einsatz von Ovalrohren untersucht. Nach der Herstellung von sonst baugleichen Wärmeübertragern mit Rund- und Ovalrohrgeometrie konnten diese auf dem Prüfstand des TÜV Süd nach EN 308 messtechnisch untersucht werden. Bei den Systemen handelte es sich um Kreislaufverbundsysteme mit sonst identischen Geometrien (gleiche Anzahl der Rohrreihen, Lamellenabstände, Rohrabstände etc.) und gleichen Abmessungen (Höhe, Breite und Tiefe). Dabei ergaben sich folgende Messwerte. Der Temperaturübertragungsgrad des Systems lag bei 0,752 (Rundrohrgeometrie 12 mm) zu 0,731 (Ovalrohrgeometrie 12 mm)⁶⁵ und damit im Rahmen der Messtoleranz (0,03) auf einem vergleichbaren Niveau. Die luftseitigen Differenzdrücke ergaben eine Reduzierung von 309 Pa der Rundrohrgeometrie zu 172 Pa (-44 %) gegenüber der prinzipiell vergleichbaren Ovalrohrgeometrie.

⁶³ Die Ergebnisse dieses Unterkapitels wurden bereits ausführlich in: Steigerung der Wirtschaftlichkeit von berippten Lamellenwärmeübertragern in Kreislaufverbundsystemen zur Wärmerückgewinnung, Teil 2, Springer-VDI-Verlag, HLH 09/2018 veröffentlicht

⁶⁴ Knissel, J., Druckverlustarmes Längsrippenheizregister für Lüftungsanlagen, GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 140, Ausgabe 2/2019

⁶⁵ Messung TÜV Süd, HOWATHERM HPWRG-System, Bericht AHU 119, 2018-04

An diesem Beispiel wird ersichtlich, dass es notwendig ist, die zur WRG benötigten Wärmeübertrager thermodynamisch in den Detailgeometrien konstruktiv zu optimieren, um prinzipiell das Verhältnis zwischen der zurückgewonnenen Wärme und dem elektrischen Aufwand zu verbessern. Es wird aber auch deutlich, dass damit nicht die Frage nach den optimalen individuellen Auslegungsgeometrien (Querschnitt zur Bautiefe) der WRG im Einzelfall beantwortet werden kann, da die beschriebenen Verbesserungen bei identischen und festen Abmessungen (Höhe, Breite und Bautiefe) ermittelt wurden, selbst wenn die WRG auf einer detailoptimierten Konstruktion beruht. Eine Anpassung der Abmessungen könnte eventuell auch nach einer Optimierung der Detailgeometrien das Verhältnis von Nutzen und Aufwand weiter verbessern.

Trotz allem können auch diese detailoptimierten Wärmeübertrager in ihren globalen Dimensionen, also in ihren Abmessungen, für die jeweiligen Rahmenbedingungen projektspezifisch optimiert werden. Die Detailoptimierung der Wärmeübertragerelemente und die globale Optimierung der Abmessungen sind voneinander unabhängige Verfahren.

3.6 Resultierende Forschungslücke

Spezielle Forschungsarbeiten zur Optimierung der Abmessungen der WRG im Auslegungsfall im Gegensatz zur spezifischen Detailoptimierung existieren nicht. Bis heute ist eine mehrdimensionale Optimierung der Abmessungen von WRG-Systemen nicht systematisch untersucht worden. Vor allem bezieht sich diese Forschungslücke auf die Fragestellung der optimal einzusetzenden WRG in NWG, zumal die Rahmenbedingungen in NWG viel unterschiedlicher als in Wohngebäuden sind. Diese Frage stellt sich nicht nur in der Bundesrepublik Deutschland, sondern gerade mit Blick auf die Ökodesignverordnung EU 1253/2014 auch in allen Mitgliedstaaten der Europäischen Union.

Die beiden Extrema der Anwendung einer möglichen WRG liegen zum einen im Verzicht der WRG, wobei dann sowohl der Nutzen als auch der Aufwand bei null liegen. Das andere Extrem liegt in einer unendlich großen WRG, die infinit einen Änderungsgrad von 1 (100 % Nutzung der Abwärme) im Gegenstrom erreichen könnte, dem jedoch ein unendlich großer Wärmeübertrager mit unendlichem Aufwand ein endlicher Nutzen gegenüberstünde. Aus dieser Überlegung wird denkotwendig ersichtlich, dass spätestens dann eine Leistungssteigerung der WRG keinen Sinn mehr macht, wenn der Aufwand gleich dem Nutzen der WRG ist.

Würden die Referenzwerte der EU 1253/2014 gültig (vergleiche Kapitel 2.2), werden die Mindeständerungsgrade von 0,73 auf 0,85 (Ausnahme Kreislaufverbundsystem 0,68 auf 0,80) steigen. Die Verordnung unterscheidet sonstige Wärmerückgewinnungssysteme vom KVS, weil beim KVS zwei Wärmeübertrager zu einem System gekoppelt werden und die thermische Effizienz i. d. R.

gemindert bzw. der SFP-Wert erhöht ist. Im Gegenstrom muss dann die notwendige WRG, dimensionslos als NTU dargestellt, von beispielsweise $0,73/(1-0,73)$ gleich 2,70 auf $0,85/(1-0,85)$ gleich 5,67 bei ausgeglichen Massenströmen steigen (Berechnungsgrundlagen hierzu siehe Kapitel 5.1.1). Dies bedeutet, dass der apparative Aufwand für die WRG pauschal etwa um den Faktor 2 gesteigert werden muss, um dieses Ziel zu erreichen. Gleichzeitig soll aber der elektrische Aufwand ($> 2 \text{ m}^3/\text{s}$) von $800 \text{ W}/\text{m}^3/\text{s}$ um rund $150 \text{ W}/\text{m}^3/\text{s}$, also um $-18,8 \%$ sinken.⁶⁶

Es wird durch den stärkeren Anstieg des apparativen Aufwands offensichtlich, dass mit diesen starren Werten, die von jeglichen Rahmenbedingungen im Einzelfall abgekoppelt sind, deutlich mehr Anlagen unwirtschaftlicher werden könnten, als dies heute der Fall ist. Offenkundig ist damit auch, dass mit einer wachsenden Anzahl von unwirtschaftlicheren Anlagen die Akzeptanz der WRG leiden wird.

Bereits heute existiert eine erhebliche Anzahl an Beispielen von Anlagen, die durch die gültigen Werte zu unwirtschaftlichen Situationen im Einzelfall führen. So wurde z. B. die Messe Frankfurt durch die Ökodesignverordnung gezwungen, in der neuen „Messehalle 12“ RLT-Anlagen mit einem Gesamtvolumenstrom von $1.242.000 \text{ m}^3/\text{h}$ (entspricht einem Luftaustausch von 1.490 Tonnen pro Stunde) WRG-Systeme mit Änderungsgraden von 0,67 einzusetzen, obwohl eine Messehalle in etwa 75 % des Jahres entweder nicht genutzt wird, oder während des Betriebs so hohe innere Lasten anfallen, dass die zurückgewonnene Wärme gar nicht genutzt werden kann. Sie muss hier im Gegenteil als Last abgeführt werden. Im Beispiel wurden zwar WRG-Systeme gemäß EU 1253/2014 installiert, die aber laut dem Betreiber der Anlagen (Angabe Messe Frankfurt) ganzjährig im Bypass-Betrieb umfahren werden.

WRG ergibt aber nur dann Sinn, wenn die anfallende Wärme genutzt werden kann. Eine umfassende Optimierung im Einzelfall kann heute in der Gesetzgebung nicht berücksichtigt werden, da einfach anzuwendende Optimierungsleitlinien fehlen.

Eine eindimensionale Optimierung im Einzelfall ist auf monetärer Basis durch Kaup 2012 dargestellt worden.⁶⁷ Allerdings bezog sich diese Art der Optimierung auf die Veränderung eines einzigen Freiheitsgrads, nämlich der Bautiefe der WRG. Es können aber geometrisch auch die Höhe und die Breite der WRG und damit die Luftgeschwindigkeit in gegebenen Grenzen verändert werden, was zu völlig anderen Ergebnissen führen muss. Insbesondere stellt eine mehrdimensionale Optimierung mit der gleichzeitigen Änderung mehrerer Parameter eine anspruchsvolle Aufgabe

⁶⁶ Artikel 7, Referenzwerte, Verordnung EU 1253/2014 der Kommission vom 7. Juli 2014 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen.

⁶⁷ Kaup, C., Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Springer-VDI Verlag, HLH 06/2012

dar, die nicht trivial zu lösen ist, zumal sich thermodynamische Parameter und strömungstechnische Grundlagen mit der veränderten Luftgeschwindigkeit (Änderung der Anströmfläche oder im Teillastverhalten) signifikant ändern.

Eine individuelle und mehrdimensionale Optimierung (siehe Kapitel 5) unter der Beachtung weiterer Parameter sowie unter Berücksichtigung einer erweiterten Bilanzgrenze war bis heute unüblich und nicht Stand der Wissenschaft.

Somit stellt sich zum einen die Frage nach der Möglichkeit einer erweiterten Optimierung mit mehreren Freiheitsgraden und verschiedenen Rahmenbedingungen, zum anderen muss die WRG beim Einsatz in Europa unter verschiedensten meteorologischen Bedingungen (Nord-Süd-Gefälle) betrachtet werden.

Neben der monetären Optimierung erscheint es vor diesem Hintergrund sinnvoll, die ökologische Optimierung auch auf der Basis von CO₂-Äquivalenten durchzuführen, da Umweltaspekte immer häufiger in den Vordergrund des Interesses rücken.

3.7 Fragestellung und Zielsetzung

Aus der Bearbeitung der beschriebenen Forschungslücke können sich Methoden zur Optimierung der WRG sowie konkrete Handlungsempfehlungen für eine zukünftige Gesetzgebung in Europa ergeben. Durch die heute geltenden starren Effizianzorderungen (EU 1253/2014) an die WRG werden sowohl betriebswirtschaftliche als auch gesamtwirtschaftliche Potenziale vergeudet, da starre Vorgaben ein individuelles Optimum nicht treffen können.

Folgende Fragen stellen sich demnach zwangsläufig:

- Kann die WRG mit vertretbarem Aufwand mehrdimensional optimiert werden? Wenn ja, wie kann diese konkrete Methode ohne Nutzung einer Vielzahl von individuellen Auslegungen erfolgen?
- Wie verhält sich ein ökonomisches Optimum im Verhältnis zum ökologischen Optimum? Wenn beide Werte unterschiedlich sind, wie können beide Optima miteinander kombiniert werden?
- Welche gesetzlichen Rahmenbedingungen (z. B. durch die Überarbeitung der EU-Verordnung EU 1253/2014) können sinnvollerweise gesetzt werden, um nicht nur einer volkswirtschaftlich, sondern auch im Einzelfall einer betriebswirtschaftlich und/oder ökologisch optimalen Lösung in Europa Rechnung zu tragen?

Ziel der Dissertation ist es, eine Methodik auf einem vereinfachten Berechnungsansatz (abgebildet z. B. in einer Software, abhängige Algorithmen o. ä.) zu erstellen, mit der in Abhängigkeit gegebener Rahmenbedingungen das Optimum einer WRG leicht berechnet werden kann, ohne dass sehr aufwendige Simulationen und/oder Optimierungsberechnungen im Einzelfall durchgeführt werden müssen. Zusätzlich soll eine nach wesentlichen Rahmenparametern optimierte Matrix oder ein Gleichungssystem von Mindestvorgaben in Abhängigkeit von Einsatzorten und Laufzeiten (wahrscheinliche Einflussparameter) und sonstiger Rahmenbedingungen für eine europaweite Anwendung und für eine mögliche neue europäische Verordnung im Bereich wirtschaftlich oder ökologisch sinnvoller Werte erstellt werden, die unter ökonomischen Kriterien sinnvoll ist. Diese Vorgaben sollen auch ökologische Optimierungsaspekte berücksichtigen, die ebenfalls in eine Novellierung der Verordnung einfließen können.

Ziel der Arbeit ist die Festlegung von Kriterien einer optimalen WRG mit maximalem Ertrag auf Basis von verschiedenen Einflussfaktoren innerhalb Europas. Dabei wird die WRG sowohl unter wirtschaftlichen als auch unter ökologischen Gesichtspunkten untersucht.

4. Beitrag der Dissertation und Einbettung der kumulativen Teile

WRG ist eine wichtige Effizienzmaßnahme in der Gebäudetechnik. Es ist grundsätzlich positiv zu bewerten, dass die Ökodesignverordnung EU 1253/2014 einen Rahmen für die verpflichtende Nutzung dieser Technologie geschaffen hat. Das belegen auch die begleitenden Studien zur Einführung der Verordnung, welche die WRG prinzipiell als eine sehr wirtschaftliche Maßnahme im volkswirtschaftlichen Kontext bestätigt haben. Im Einzelfall können aufgrund der verschiedenen Rahmenbedingungen die Erträge der WRG sehr stark variieren und auch zu negativen Ergebnissen führen. Daher stellt sich zwingend die Frage, ob es bei der Festlegung von Kriterien in der Verordnung nicht sinnvoller wäre, auf Basis von individuellen Rahmenbedingungen ein betriebswirtschaftliches Optimum oder Maximum in jedem Einzelfall zu fordern, anstatt pauschalen Festlegungen den Vorzug zu geben, weil sich aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen die individuellen Optima deutlich verschieben können. Es wird ersichtlich, dass dabei ein ökonomisches wie auch ein ökologisches Optimum oder Maximum der Erträge erreichbar sind. Beide sind aber meist nicht identisch, sodass entschieden werden muss, ob der ökonomischen oder ökologischen Optimierung gefolgt werden soll. Es ergibt sich in beiden Fällen unter projektspezifischen Rahmenbedingungen ein jeweils eindeutiges Optimum oder Maximum beim Einsatz von Wärmerückgewinnungssystemen. Eine Kombination der beiden Optima kann durch die Berücksichtigung der CO₂-Einsparungen im Rahmen der monetären Optimierung erfolgen, indem diese Reduktionen mittels eines CO₂-Preises bewertet werden.

Im ersten kumulativen Teil der Arbeit (Kapitel 5.1) werden die Grundlagen der mehrdimensionalen und relationalen Optimierung der WRG dargestellt, die sowohl unter monetären als auch unter ökologischen Rahmenbedingungen durchgeführt werden kann.

Um die Entwicklung der WRG-Nutzung aufzuzeigen, werden im Kapitel 5.2 in einer ersten Studie rund 5.000 Auslegungen statistisch für Deutschland ausgewertet. Zunächst wurde durch die Auswertung der Auslegungen die Frage beantwortet, wie sich die wichtigsten Effizienzmerkmale der WRG im Laufe der Jahre 2014 bis 2017 verändert haben. Anschließend werden alle WRG relevanten Auslegungsdaten unter EU-weiten mittleren Rahmenbedingungen Wirtschaftlichkeitsberechnungen unterzogen, um das Potenzial einer mehrdimensionalen Optimierung bestimmen zu können. Ergebnisse zeigen die Unterschiede zwischen den realen Auslegungen und der ermittelten optimalen Bedingungen auf Basis von mittleren Rahmenbedingungen. Darüber hinaus werden auch die Auswirkungen der Referenzwerte der EU 1253/2014 ab 2020 europaweit untersucht. Um die Entwicklung in Europa zu verdeutlichen, werden in dieser zweiten Studie rund 3.300 reale Auslegungen detailliert ausgewertet. Dabei werden die Auslegungen im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeitskriterien der WRG bewertet. Der Einfluss des Standorts (Klima) wird dabei auch bei

der Untersuchung von drei europäischen Standorten berücksichtigt (Nord-Mitte-Süd-Gefälle). Gleichzeitig wird der Einfluss von drei typischen Laufzeiten der Systeme berechnet. Letztlich enthalten die Analysen erste Empfehlungen für die künftige Gestaltung der Ökodesignverordnung.

In Kapitel 5.3 wird der Einfluss der mehrdimensionalen Optimierung der WRG auf Europa untersucht. Dabei werden für 46 Standorte vom Norden bis zum Süden die meteorologischen Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung von verschiedenen Einflussfaktoren wie Laufzeit, Energiepreise etc. anhand eines mittleren Anwendungsfalls untersucht. Auf Grundlage einer Korrelation der Ergebnisse zur jeweiligen Außenlufttemperatur können Zusammenhänge zu den korrespondierenden Optima gefunden werden.

In Kapitel 5.4 wird die Frage beantwortet, wie sich bei Verwendung von Wärmerückgewinnungssystemen unter bestimmten Rahmenbedingungen ein klares Optimum hinsichtlich des thermischen Übertragungsgrads und des entsprechenden elektrischen Aufwands ergeben kann. Da der Nutzen und der damit verbundene Aufwand im konkreten Fall aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen (Temperaturen, Energiepreise, Erträge, Kosten, Betriebszeiten etc.) sehr unterschiedlich sein können, wird aufgezeigt, dass es sehr sinnvoll ist die WRG-Anforderungen anhand individueller und maßgeblicher Kriterien zu definieren. Um in sämtlichen Anwendungsfällen auf Basis verschiedener Rahmenbedingungen ohne eine individuelle und projektspezifische Optimierung ein jeweiliges wirtschaftliches Optimum der WRG finden zu können, werden auf der nicht linearen Mehrfachregressionsanalyse basierende Polynomgleichungen entwickelt. Dabei wird sowohl der thermische Mindestübertragungsgrad als auch der maximale erforderliche elektrische Aufwand (SFP-Wert) im Optimum determiniert. Dies ist sowohl aus betriebswirtschaftlicher, als auch aus makroökonomischer Sicht sinnvoll, da die Summe der betriebswirtschaftlichen (mikroökonomischen) Optima (maximaler Nettonutzen) zu einem makroökonomischen Maximum der Erträge führt. Das Optimum der WRG wird anhand der Parameter Außenlufttemperatur, Ablufttemperatur und Betriebszeit aufgezeigt. Infolgedessen werden sowohl die optimale Temperatureffizienz (Temperaturübertragungsgrad) der WRG als auch die erforderliche optimale Luftgeschwindigkeit sowie der resultierende Druckabfall oder der darauf basierende und korrespondierende SFP-Wert in Abhängigkeit von den allgemeinen Rahmenbedingungen auf der Grundlage von zwei Lastfällen und zwei Bilanzgrenzen dargestellt.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse diskutiert, bewertet und eine Schlussfolgerung gezogen. Eine Methodenkritik (Kapitel 7) hat sich im Anschluss an die durchgeführten Arbeiten ergeben, die für weitere Studien genutzt werden kann. Kapitel 8 fasst die Ergebnisse zusammen.

5. Kumulative Teile der Dissertation

5.1 Erster kumulativer Teil der Dissertation – Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1)

Der Inhalt dieses Kapitels wurde veröffentlicht in:

Kaup, C., Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1), GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, Recknagel Science, ISSN: 2195-643X Jahrgang 140, Heft 02/19, Seite 124 bis 137^{68, 69}

Dieses Kapitel gibt auszugsweise aus der o. g. Veröffentlichung die wesentlichen Ergebnisse wieder.

5.1.1 Das ökonomische Optimum der WRG auf Basis der Jahresenergiebetrachtung⁷⁰

Um Wärmerückgewinnungssysteme im Einzelfall wirtschaftlich bewerten zu können, müssen die Erträge, welche dank der WRG erzielt werden, den Aufwendungen gegenübergestellt werden. Dazu werden insbesondere die Hilfsenergien in Form von elektrischer Energie und weitere Kosten (auch Kapitalkosten) für den Betrieb der Systeme im Verhältnis zum erhaltenen Nutzen in Form von thermischen Energien bewertet.

Dabei kann mithilfe einer Jahressimulation die Effizienz der WRG im individuellen Projekt aussagekräftig betriebswirtschaftlich dargestellt und optimiert werden. Letztlich muss eine Wirtschaftlichkeitsberechnung auf Jahrestemperaturverlaufswerten die entscheidenden Kennwerte liefern, die zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der WRG in jedem Einzelfall herangezogen werden müssen.

⁶⁸ Inhalte dieser Veröffentlichung sind auch in folgenden Fachartikeln vorveröffentlicht worden (Preprint): Kaup, C., Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Teil 1, Springer-VDI-Verlag, HLH 07-08/2017 und Kaup, C., Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Teil 2, Springer-VDI-Verlag, HLH 09/2017

⁶⁹ Die mehrdimensionale Optimierung ist auch in das Fachbuch Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 79., Kaup C., Kapitel 3.3.2-5.6.3, Seite 1594ff, Ausgabe 2019/20 eingeflossen.

⁷⁰ Grundlagen zur Optimierung sind auch in folgenden Fachartikeln veröffentlicht worden: Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen im Kontext volks- und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen (Teil 1 und 2), Huss Medien, Moderne Gebäudetechnik 11-12/2016

Optimierung der WRG (eindimensionale Optimierung)^{71, 72}

Nach der Auslegung einer beliebigen WRG kann unter den gegebenen projektspezifischen Rahmenbedingungen relational ein diskretes betriebswirtschaftliches Optimum für die Effizienz gefunden werden. Diese Berechnung basiert auf einer eindimensionalen Optimierung, bei welcher der Querschnitt der WRG als konstant angenommen wird und die Bautiefe der WRG als einzige Variable (Freiheitsgrad) zur Optimierung genutzt wird. Mit konstantem Querschnitt und damit mit konstanter Luftgeschwindigkeit kann die folgende Optimierungsrechnung mit konstanten Reynoldszahlen und somit mit konstantem Wärmedurchgangskoeffizienten (k-Zahl) erfolgen.

Dabei wird die ausgelegte WRG mit ihrer RWZ (Φ) in eine korrespondierende dimensionslose Wärmeübertragerkennzahl NTU (Number of Transfer Units) umgewandelt. Diese Kennzahl wird definiert als:

$$NTU = \frac{k \cdot A}{\dot{W}} \quad (11)$$

Ebenfalls muss das Wärmestromkapazitätenverhältnis (μ) aus den Wärmestromkapazitäten (\dot{W}) von Zu- und Abluft bestimmt werden:

$$\mu = \frac{\dot{W}_1}{\dot{W}_2} = \frac{\dot{m}_1 \cdot c_p}{\dot{m}_2 \cdot c_p} \quad (12)$$

Die Kennzahl NTU ist somit bei konstanter k-Zahl und konstantem Massenstrom der Luft proportional zur wärmeübertragenden Fläche (A) der WRG. NTU repräsentiert somit die Fläche, die sich bei konstanter Querschnittsfläche linear zur Bautiefe des Wärmeübertragers verhält. Sie errechnet sich im Gegenstrom aus:⁷³

$$NTU = \frac{1}{1 - \mu} \cdot \ln \left(\frac{1 - \mu \cdot \Phi}{1 - \Phi} \right) \quad (13)$$

bzw. bei $\mu = 1$ aus:

$$NTU = \frac{\Phi}{1 - \Phi} \quad (14)$$

Unter der Voraussetzung, dass sich Aufwendungen und Erträge der WRG entweder proportional zum NTU (damit zur wärmeübertragenden Fläche bei konstanter Geschwindigkeit) oder zur RWZ

⁷¹ Inhalte dieses Kapitels sind auch in folgenden Fachartikeln veröffentlicht worden: Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen im Kontext volks- und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen (Teil 1 und 2), Huss Medien, Moderne Gebäudetechnik 11-12/2016

⁷² Kaup, C., Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Springer-VDI Verlag, HLH 06/2012

⁷³ VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 7. Auflage

(Φ) verhalten, kann durch diskrete Berechnungen das Optimum der WRG gefunden werden. Dabei wird aus den einzelnen NTU_i des zu untersuchenden Bereichs der korrespondierende Temperaturübertragungsgrad (Φ_i) bestimmt:⁷⁴

$$\Phi_i = \frac{1 - e^{(\mu-1) \cdot NTU_i}}{1 - \mu \cdot e^{(\mu-1) \cdot NTU_i}} \quad (15)$$

bzw. bei $\mu = 1$ aus:

$$\Phi = \frac{NTU_i}{NTU_i + 1} \quad (16)$$

Zu den einzelnen Werten werden dann sowohl der jeweilige Aufwand als auch der Nutzen bestimmt. Dabei muss zwischen NTU - und Φ -abhängigen Kosten und Erträgen unterschieden werden:

- Direkt NTU -abhängig:
 - Kosten der WRG
 - Kapitalkosten
 - Wartungs- und Unterhaltungskosten
 - Elektroenergie durch den Druckabfall der WRG (bei konstanter Anströmfläche)
- Direkt Φ -abhängig:
 - Wärmeertrag (Nutzen)
 - Wärme
 - Kälte
 - Mehrfachfunktionale Nutzung der WRG (z. B. Freie Kälte)
 - Minderinvestition der WRG
 - Verringerung der Wärmeerzeugung und -verteilung
 - Verringerung der Kälteerzeugung und -verteilung
 - Mehrinvestition der WRG
 - z. B. Wasseraufbereitung für eine Verdunstungskühlung

⁷⁴ VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 7. Auflage

Jeder RWZ (Φ) wird eindeutig sowohl der Aufwand als auch der Nutzen zugeordnet. Der Ertrag für jede RWZ ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Nutzen und dem entsprechenden Aufwand. Der höchste Ertrag bestimmt dann das eindimensionale Optimum der WRG. Damit liegt fest, welcher Temperaturübertragungsgrad der optimale unter den gegebenen Bedingungen ist.

5.1.2 Änderung der Wärmeübertragung bei Anpassung des Querschnitts der WRG

Mit der Änderung des Anströmquerschnitts kann die k-Zahl (Wärmedurchgangskoeffizient) der WRG nicht mehr als konstant angenommen werden. Sie ändert sich mit der Änderung der Strömungsgeschwindigkeit deutlich.

Zur Berechnung einer Vielzahl von Optimierungsrechnungen auf Basis von Einzelauslegungen erscheint das klassische thermodynamische Berechnungsverfahren zu kompliziert und zu aufwendig. Außerdem basiert es auf einer rein theoretischen Bestimmung der k-Zahl, die eine messtechnische Verifizierung nicht berücksichtigt. Insbesondere bei veränderten Bedingungen, also bei veränderlichen Luft- oder Medienmengen, müssen für sämtliche Zustände die Wärmedurchgangskoeffizienten explizit berechnet werden. Häufig wird in der Praxis vereinfacht mit einer konstanten k-Zahl gerechnet, was dann zu erheblichen Fehlern führt und daher für eine Optimierungsrechnung gänzlich ungeeignet ist.

Aus diesem Grund bietet sich ein relatives Näherungsverfahren an, mit dem ein ausgelegter und validierter Wärmedurchgangskoeffizient (k) leicht auf unterschiedliche Betriebsbedingungen umgerechnet werden kann.

Dazu wird die ursprüngliche k-Zahl, die sich aus der Auslegung oder Messung ergibt, aufgrund der sich ändernden Luft- und Mediengeschwindigkeiten (w) mit folgender Gleichung nach Kaup korrigiert:⁷⁵

$$k_{korr} = k_{org} \cdot \left(\frac{w_{L\ korr}}{w_{L\ org}} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{w_{M\ korr}}{w_{M\ org}} \right)^{0,4} \quad (17)$$

Aufgrund umfangreicher Vergleichsberechnungen kann die Gleichung im Bereich von:

$$1,6 < w_{L\ korr} / w_{L\ org} < 0,4$$

und:

$$1,4 < w_{M\ korr} / w_{M\ org} < 0,8$$

⁷⁵ Kaup, C., Berippte Wärmeübertrager, Näherungsgleichung zur k-Zahl-Berechnung, Gentner-Verlag, TGA-Fachplaner 03/2015

verwendet werden. Sie leitet sich von der Näherungsgleichung nach Kaup^{76, 77} zur Umrechnung von Temperaturänderungsgraden von Wärmerückgewinnungssystemen ab.

Die Abweichungen zur Berechnung nach VDI-Wärmeatlas im reinen Gegenstrom liegen innerhalb der o. g. Gültigkeitsgrenzen im Bereich von etwa $\pm 3 \%$ und damit auf einem niedrigen Niveau.

Bei Luft-/Luftwärmeübertragern kann analog folgende Gleichung verwendet werden:

$$k_{korr} = k_{org} \cdot \left(\frac{w_{1\ korr}}{w_{1\ org}} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{w_{2\ korr}}{w_{2\ org}} \right)^{0,4} \quad (18)$$

5.1.3 Änderung des Druckabfalls der Wärmerückgewinnung

Parallel zur Änderung der Wärmeübertragung muss der sich ergebende Druckabfall bei geänderter Fläche bestimmt werden. Theoretisch ändert sich der Druckabfall Δp eines Körpers nach der Beziehung:

$$\Delta p = \xi_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \quad (19)$$

Aufgrund zahlreicher Messungen an ausgeführten WRG-Einrichtungen hat sich jedoch gezeigt, dass sich der Druckverlust nicht quadratisch ändert, sondern mit einem Exponenten in einem Bereich von 1,4 bis 1,7.⁷⁸

5.1.4 Das mehrdimensionale Optimum der Wärmerückgewinnung^{79, 80}

Aus den vorangegangenen Betrachtungen wird leicht ersichtlich, dass eine tatsächliche und grundlegende Optimierung der WRG nur erfolgen kann, wenn sämtliche Geometrien, also alle drei Dimensionen, geändert werden können.

⁷⁶ DIN EN 13053, Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumlufttechnische Geräte – Leistungsdaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2006, 2007-11

⁷⁷ Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 77., Kaup C., Kapitel 3.3.2-5.5.3, Seite 1525, Ausgabe 2015/16

⁷⁸ Swiderek, M., Wollscheid, B., Kaup, C., Validierung durch Messung eines Doppelplattenwärmeübertragers (Fabrikat Hoval mit RWZ = 0,78) und Messung eines Kreislaufverbundsystems mit 24 Rohrreihen (Fabrikat HOWATHERM mit RWZ = 0,78) auf dem Leistungsprüfstand der HOWATHERM Klimatechnik GmbH, zertifiziert durch den RWTÜV, 2017

⁷⁹ Kaup, C., DE 10 2017 110 912, Mehrdimensionales, relationales Optimierungsverfahren für die Auslegung eines Wärmeübertragers einer raumlufttechnischen Anlage, Deutsche Patentanmeldung 2017

⁸⁰ Kaup, C., EP 3 404 562, Relationales Optimierungsverfahren für einen Wärmeübertrager einer raumlufttechnischen Anlage, Europäische Patentanmeldung 2018

Sowohl der Querschnitt (Höhe und Breite der WRG) als auch die Bautiefe müssen in die Optimierung einfließen und dienen daher als Variablen zur Berechnung des maximalen Ertrags.

Basis für die Optimierung ist eine Ausgangsauslegung (Startauslegung, in Abbildung 6 als rotes Feld dargestellt). In einem Algorithmus werden daher sowohl der Querschnitt als auch in einer zweiten Berechnungsschleife die Bautiefe der WRG durch Iteration nach den oben beschriebenen Verfahren bestimmt. Hierzu wird in einer ersten Berechnungsschleife die Fläche des Wärmeübertragers der WRG von einem minimalen Startwert SW1 bis zu einem maximal zu wählenden Endwert EW1 in einer Schrittweite SWE1 durchgeführt. Für jeden Einzelwert werden auf Grundlage der ursprünglichen k-Zahl der Auslegung die sich nun ergebenden relationalen k-Zahlen und die spezifischen Druckverluste für die jeweiligen Flächen bestimmt. Mit diesen sich ergebenden k-Zahlen werden dann in einer zweiten Schleife die Bautiefe des Wärmeübertragers der WRG von einem zweiten Startwert SW2 bis zu einem maximal zu wählenden Endwert EW2 in einer Schrittweite SWE2 geändert. Die relationale k-Zahl aus der ersten Iterationsschleife bleibt in der zweiten Iterationsschleife konstant.

In dieser zweiten Schleife wird auf Basis der bereits beschriebenen eindimensionalen Optimierung der jeweilige maximale Ertrag aus der Differenz zwischen Nutzen und Aufwand bestimmt.

So ergibt sich für jede Fläche im Bereich des Startwerts SW2 bis zum maximalen Endwert EW2 das jeweilige Optimum (in Abbildung 6 als einzelnes Feld dargestellt), das sich durch den maximalen Ertrag für jede zu berechnende Fläche auszeichnet.

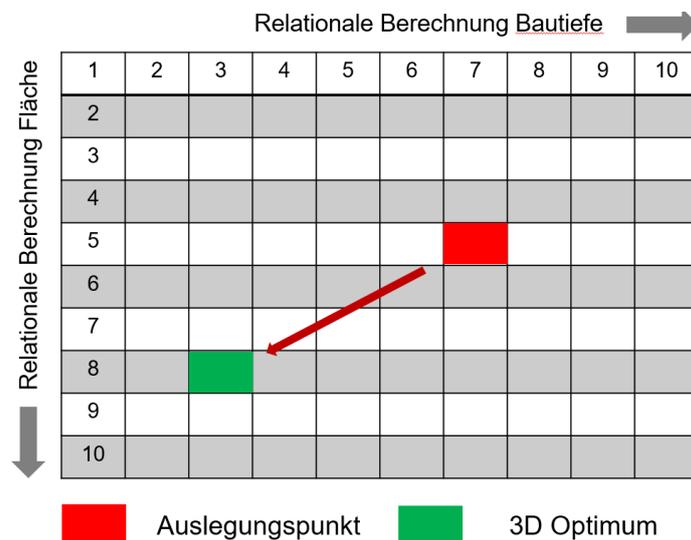


Abbildung 6: Relationale und mehrdimensionale Optimierung nach Fläche und Bautiefe

Hieraus ergeben sich eine Vielzahl von Optima, die den jeweiligen Flächen und den daraus resultierenden Luftgeschwindigkeiten bzw. Anströmflächen zugeordnet sind. Aus dieser Vielzahl von

Optima kann durch eine Maximalwertbetrachtung das absolute Optimum (Maximum der Einsparung oder maximaler Ertrag) bestimmt werden (in Abbildung 6 als grünes Feld dargestellt).

Selbstverständlich lässt sich auch die mehrdimensionale relationale Optimierungsrechnung nicht nur monetär, sondern auch auf Grundlage von CO₂-Äquivalenten durchführen.

5.1.5 Darstellung der Eigenleistung zum ersten kumulativen Teil

Alle präsentierten Arbeiten von der Entwicklung der Konzeption, der Methodenentwicklung, Analysedesign, Datenerhebung, Datenauswertung, Ergebnisdiskussion, Programmierung und das Erstellen des Manuskriptes habe ich alleine durchgeführt. Das Verfahren wurde auch von mir als Erfinder sowohl in Deutschland als auch in Europa zum Patent ^{81, 82} angemeldet. Die Software HPSim zur ein- und mehrdimensionalen Optimierung habe ich selbst geschrieben.

⁸¹ Kaup, C., DE 10 2017 110 912, ebenda

⁸² Kaup, C., EP 3 404 562, ebenda

5.2 Zweiter kumulativer Teil der Dissertation – European Study on heat recovery in non-residential buildings

Der Inhalt dieses Kapitels wurde veröffentlicht in:

Kaup, C., Knissel, J., European Study on heat recovery in non-residential buildings, E3S Web Conf., Volume 111, 2019, CLIMA 2019 Congress, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911102014>, 7 Seiten, 08/2019⁸³

Anmerkung: Der englische Text des Originalbeitrags wurde ins Deutsche übersetzt. Dieses Kapitel gibt auszugsweise die wesentlichen Ergebnisse der o. g. Veröffentlichung wieder.

5.2.1 Ökonomische Entwicklung der Wärmerückgewinnung in Europa

Zu der deutlichen Erhöhung der Temperaturübertragungsgrade der WRG in RLT-Geräten hat die Ökodesignverordnung EU 1253/2014 beigetragen. Es stellt sich trotz dieser positiven Entwicklung immer häufiger die Frage, ob diese Festlegungen der Ökodesignverordnung tatsächlich ein Optimum der WRG im betriebswirtschaftlichen oder volkswirtschaftlichen Sinne darstellen. Um diese Frage beantworten zu können, wurden insgesamt rund 3.300 Geräteauslegungen aus den Jahren 2015 bis 2018 automatisiert wirtschaftlich bewertet.

Es handelte sich um reale Auslegungen, die mit einer TÜV-zertifizierten Auslegungssoftware anhand von konkreten Ausschreibungen in verschiedenen Projekten durchgeführt wurden. Jedem Gerät liegt also ein reales Projekt mit tatsächlichen Leistungsanforderungen zugrunde, die marktgerecht sind und in Nicht-Wohngebäuden eingesetzt wurden.

Jedes RLT-Gerät mit WRG wurde mit einem Batchgenerator (Software-Bot) einer quasidynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung unterzogen.

Dabei wurden zwei Anwendungsfälle untersucht – einerseits ein Entwurf mit Startwerten, d. h. mit vordefinierten Grundbedingungen, die für alle Auslegungen gleichermaßen gelten sollen, und andererseits ein Entwurf mit Dateiwerten, d. h. die Daten, die bereits im konkreten Entwurf für das jeweilige Projekt während der ursprünglichen Auslegung ausgewählt wurden. Letztlich wurden die Berechnungen für die europaweiten Betrachtungen mit für alle Auslegungen einheitlichen und mittleren Startwerten durchgeführt.

⁸³ Ergebnisse des Kapitels sind vorveröffentlicht worden (Preprint): Kaup, C., European Study on Heat Recovery in Non-residential Buildings, Rehva Journal 5/2018 und Kaup, C., Entwicklung der Wärmerückgewinnung in Deutschland, Springer-VDI-Verlag, HLH 10/2018. Im ersten Beitrag wurden abweichende Energiepreise (Mittelwerte für Deutschland) verwendet.

Bei dieser Betrachtung wurden die Auslegungen für drei Standorte bewertet. Neben Mannheim als mittlerem Standort, wurden als südlicher Standort stellvertretend Lissabon und als nördlicher Standort Helsinki ausgewählt. Als Basis der wirtschaftlichen Bewertung mit vorgegebenen Werten wurden die jährlichen Differenzbeträge ermittelt. Diese ergeben sich aus dem monetär bewerteten Rückgewinn an Wärme im Winter sowie dem Kälterückgewinn im Sommer. Davon wurden die Aufwände abgezogen (vergleiche Kapitel 2.5).

Während in Lissabon im Mittel über alle etwa 3.300 Auslegungen 23.090 kWh/a an Wärme bei einer Laufzeit von 2.350 h/a zurückgewonnen werden, sind dies in Helsinki bei gleicher Laufzeit 100.467 kWh/a (siehe auch Abbildung 7).

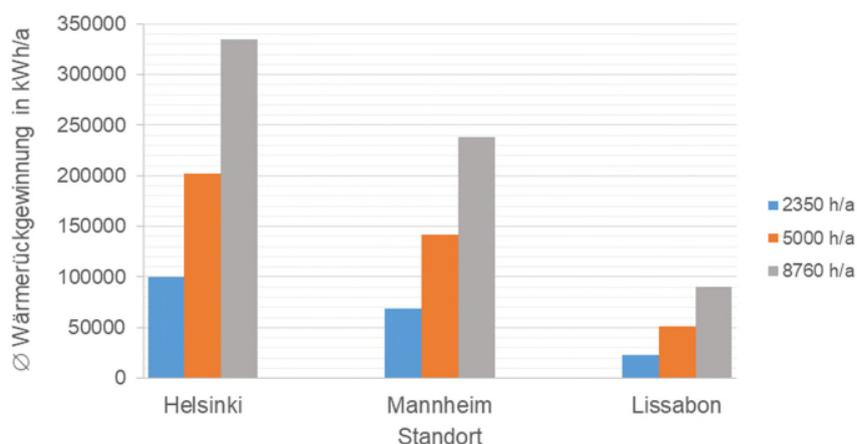


Abbildung 7: Durchschnittliche WRG der Anlagen in kWh/a

Der monetäre Effekt der WRG wird mit einem Preis von 0,043 €/kWh für Wärme, einem Preis von 0,091 €/kWh für Strom (EU 28 Mittelwert über die letzten zehn Jahre) und 0,041 €/kWh für Kälteenergie (kalkuliert mit einem COP von 3 basierend auf Elektroenergie) berechnet. Als kalkulatorischer Zinssatz wurden 2,4 %/a (EU 28 Mittelwert über die letzten zehn Jahre) angesetzt. Die Nutzungsdauer der WRG wurde mit 15 Jahren gewählt (siehe auch Kapitel 2.5).

Die Auslastung der WRG wurde an den Tagstunden mit 100 % der Sollluftmenge und in den Nachtstunden mit 50 % (abgesenkter Betrieb) angenommen. Die Investitionsausgaben der WRG-Systeme lagen in der Studie durchschnittlich bei 21.350 €.

Im 9-Stundenbetrieb (rund 2.350 h/a) würden die untersuchten Anlagen in Lissabon durchschnittlich einen Verlust von -1.048 €/a mit einem mittleren Übertragungsgrad von $\Phi_t = 73,2\%$ erwirtschaften. Insgesamt wären 98,0 % aller Anlagen im Süden Europas (Standort Lissabon) unwirtschaftlich (negative Differenzbeträge pro Jahr), während im Norden (Standort Helsinki) bei gleicher Laufzeit ein Gewinn von 1.558 €/a erwirtschaftet würde (siehe Abbildung 8). In Helsinki würden daher nur 10,9 % der spezifischen Anlagen einen projektspezifischen Verlust erzeugen.

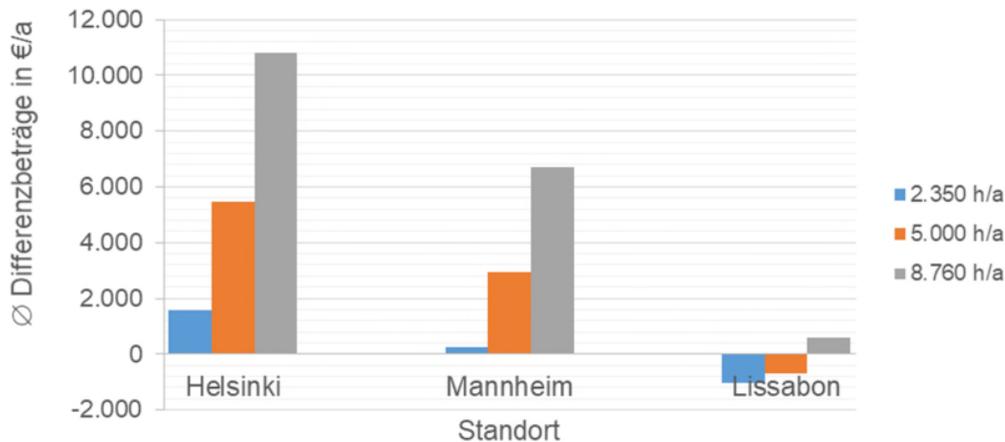


Abbildung 8: Jährliche Ø Differenzbeträge bei Auslegungsbedingungen

Im 24-Stundenbetrieb würde bei den untersuchten Anlagen selbst in Lissabon ein durchschnittlicher Gewinn von 568 €/a erwirtschaftet werden. Allerdings würden selbst bei dieser Laufzeit noch 22,1 % der untersuchten Anlagen einen individuellen Verlust erwirtschaften.

In Helsinki wäre es dagegen möglich, mit den gleichen Anlagen einen Gewinn von 10.802 €/a zu erwirtschaften (siehe auch Abbildung 8). An diesem Standort wären unter diesen Rahmenbedingungen nur 0,1 % der untersuchten Anlagen unwirtschaftlich.

Wenn alle Anlagen bei konstanter Auslegungsgeschwindigkeit wirtschaftlich optimiert würden (eindimensionale Optimierung), würde ein höherer Gewinn erzielt, wodurch ein durchschnittlicher Verlust für alle Anlagen vermieden werden könnte.

Dann müssten jedoch die Systeme mit durchschnittlichen Temperaturübertragungsgraden von $\Phi_t = 31,4\%$ in Lissabon bis $60,5\%$ in Helsinki hergestellt werden, d. h. mit signifikant niedrigeren Übertragungsraten als die tatsächlichen, durchschnittlichen und undifferenzierten $73,2\%$ der in dieser Feldstudie untersuchten Systeme. In Mannheim wäre der optimale Temperaturübertragungsgrad unter diesen Bedingungen $\Phi_t = 53,0\%$.

Selbst bei einer Laufzeit im 24-Stundenbetrieb (8.760 h/a) wären Temperaturübertragungsgrade von $57,9\%$ (Lissabon) und $77,1\%$ (Helsinki) sowie $73,1\%$ (Mannheim) sinnvoll. Hier könnte in Helsinki ein 10% höherer Gewinn erwirtschaftet werden, während in Lissabon ein um 238% höherer Gewinn realisierbar wäre.

Bei Durchführung einer mehrdimensionalen Optimierung könnten bei einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa $1,1\text{ m/s}$ deutlich höhere Gewinne erzielt werden (siehe Abbildung 9). Bei einem 9-Stundenbetrieb könnten beispielweise in Mannheim die jährlichen Differenzbeträge von durchschnittlich 251 €/a auf 1.204 €/a (+ $379,7\%$) erhöht werden.

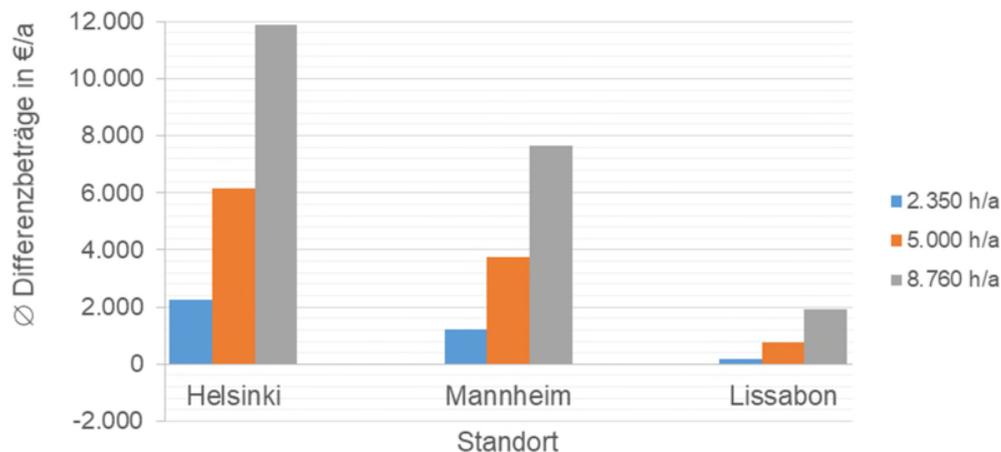


Abbildung 9: Jährliche $\bar{\varnothing}$ Differenzbeträge nach der 3D Optimierung

5.2.2 Auswirkungen der Referenzwerte

Wenn die Referenzwerte der EU 1253/2014, die im Zuge der Überarbeitung der Ökodesignverordnung in Kraft treten sollen, bereits heute angesetzt würden, ergäbe sich folgende Situation: Im Durchschnitt müsste die WRG in ihren Übertragungseinheiten doppelt so groß sein wie in den untersuchten Jahren. Die jährlichen Einsparungen für die Standorte Helsinki (Abbildung 10) bis Lissabon (Abbildung 11) wurden mit unterschiedlichen Laufzeiten dargestellt. Selbst bei einer optimalen Strömungsgeschwindigkeit von etwa 1,1 m/s würden die Referenzwerte der EU 1253/2014 geringere Erträge verursachen als die ein- oder mehrdimensional optimierten Erträge.

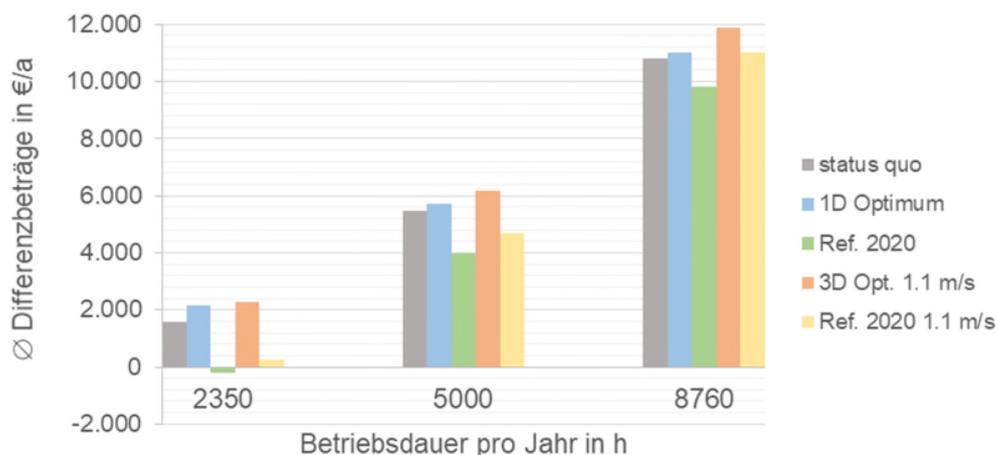


Abbildung 10: Jährliche $\bar{\varnothing}$ Differenzbeträge unter verschiedenen Bedingungen für Helsinki

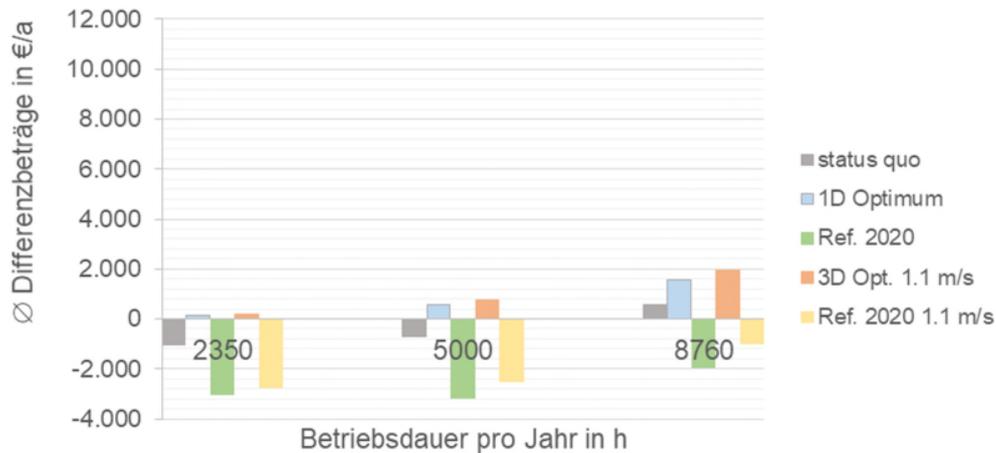


Abbildung 11: Jährliche $\bar{\Delta}$ Differenzbeträge unter verschiedenen Bedingungen für Lissabon

Zwar würden die Temperaturübertragungsgrade bei Referenzbedingungen im Durchschnitt sämtlicher Anlagen der Studie bei $\Phi_t = 83\%$ bis 84% liegen, jedoch wären sämtliche Erträge geringer als im mehrdimensional berechneten Optimum. Selbst in Helsinki würde ein 24-Stundenbetrieb den Gewinn von 11.882 €/a auf 10.980 €/a reduzieren, d. h. um $-7,6\%$. In Lissabon hingegen würde ein 9-stündiger Betrieb (2.350 h/a) den verbleibenden kleinen Gewinn von 172 €/a in einen signifikanten Verlust von 2.722 €/a verwandeln.

5.2.3 Auswertung der Feldstudie

Wenn die Referenzwerte der EU 1253/2014 tatsächlich in geltendes Recht gewandelt werden, dann wird zwar auch europaweit die zurückgewonnene Wärmeleistung um rund 15% steigen, aber der apparative Aufwand würde sich etwa um den Faktor 2 erhöhen. Diese Entwicklung ist nicht wirtschaftlich, da die durchschnittlichen Erträge der WRG europaweit sinken würden. Dies hat die Feldstudie auf Einzellebene an rund 3.300 untersuchten Anlagen eindeutig ergeben. Die Erträge werden in allen Fällen signifikant sinken. In der Quintessenz der Erkenntnisse wird keine Anlage in Europa durch die Anwendung der Referenzwerte ab 2020 in Europa wirtschaftlicher werden, als dies heute der Fall ist.

Im Ergebnis der Feldstudie könnten folgende Mindestübertragungsgrade, maximale Druckverluste sowie Luftgeschwindigkeiten für die WRG sinnvoll sein (siehe Tabelle 8). In der Tabelle werden auch die sich ergebenden Standardabweichungen (s) zu den einzelnen Größen sowie die sich ergebenden jährlichen Differenzbeträge in €/a angegeben.

Die Luftgeschwindigkeit im Gerät müsste dann auf etwa 1,1 m/s sinken. Noch niedrigere Luftgeschwindigkeiten sind kaum noch sinnvoll, da einerseits die Anlagen auch im Teillastbetrieb arbeiten sollen und andererseits das monetäre Optimum dann meist überschritten ist. Bei einer Luftgeschwindigkeit von 1,1 m/s wäre ein Teillastbetrieb bis etwa 0,4 m/s⁸⁴ noch realisierbar.

Tabelle 8: Optimale ϕ Übertragungsgrade, Druckverluste und Luftgeschwindigkeiten der WRG

		RWZ im 3D-Optimum	s	Δ Diff.- Beträge €/a	Δp mittel Pa	s	w	s
		%	%		Pa	Pa	m/s	m/s
2.350 h/a								
Nord	Helsinki	61	9,3	2.251	58	15,2	1,22	0,21
Mitte	Mannheim	53	10,4	1.204	42	12,0	1,22	0,21
Süd	Lissabon	31	9,4	172	15	4,6	1,18	0,19
		RWZ im 3D-Optimum	s	Δ Diff.- Beträge €/a	Δp mittel Pa	s	w	s
		%	%		Pa	Pa	m/s	m/s
5.000 h/a								
Nord	Helsinki	71	7,1	6.155	72	17,0	1,09	0,19
Mitte	Mannheim	66	8,2	3.741	56	13,7	1,09	0,19
Süd	Lissabon	47	10,6	742	25	7,4	1,08	0,18
		RWZ im 3D-Optimum	s	Δ Diff.- Beträge €/a	Δp mittel Pa	s	w	s
		%	%		Pa	Pa	m/s	m/s
8.760 h/a								
Nord	Helsinki	77	5,7	11.882	87	19,7	1,03	0,18
Mitte	Mannheim	73	6,6	7.641	70	16,1	1,03	0,18
Süd	Lissabon	58	9,4	1.920	35	9,1	1,02	0,18

Die Ergebnisse der ökologischen Optimierung ergeben sich aus Anhang A1. Der Einfluss der Änderung des mittelfristigen Klimas (IPCC A1B 2030) im Vergleich zur Tabelle 8 sind zudem in Anhang A2 zu finden. Die monetär optimierten Übertragungsgrade der WRG mit Berücksichtigung der Minderinvestitionen für die Wärme- und Kälteerzeugung zeigt Anhang A3 und die monetär optimierten Übertragungsgrade der WRG im Teillastbetrieb (70 % im Tagbetrieb und 40 % im Nachtbetrieb) stellt Anhang A4 dar.

5.2.4 Darstellung der Eigenleistung zum zweiten kumulativen Teil

Die präsentierten Arbeiten von der Entwicklung der Konzeption, der Methodenentwicklung, Analysedesign, Datenerhebung, Datenauswertung, Ergebnisdiskussion und das Erstellen des Manuskriptes habe ich weitgehend alleine durchgeführt. Dies beinhaltet sowohl die Aufbereitung wie

⁸⁴ Swiderek, M., Wollscheid, B., Kaup, C., Validierung durch Messung eines Doppelplattenwärmeübertragers (Fabrikat Hoval mit RWZ = 0,78) und Messung eines Kreislaufverbundsystems mit 24 Rohrreihen (Fabrikat HOWATHERM mit RWZ = 0,78) auf dem Leistungsprüfstand der HOWATHERM Klimatechnik GmbH, zertifiziert durch den RWTÜV, 2017

auch die Analyse der Ergebnisse. Professor Jens Knissel hat als Ideengeber an diesem Kapitel mitgewirkt und Korrekturarbeiten durchgeführt. Bei der Erstellung der Software HPSimMeta zur automatisierten Auswertung der 3.300 Auslegungen hat mich Herr Georg Allnoch unterstützt. Die konzeptionellen Grundlagen zur Software stammen von mir.

5.2.5 Ergänzung zur Repräsentativität der Feldstudie

Mit der Repräsentativität der verwendeten Daten befasste sich bereits eine Studie, die vom Verfasser der Dissertation am Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier 2009 durchgeführt wurde. In dieser Studie wurden RLT-Geräte und deren Auslegungsdaten analysiert. Es handelte sich dabei um marktbezogene und reale Geräteauslegungen eines Herstellers aus den Jahren 2000 bis 2009. Es wurden bewusst ausschreibungsbezogene Auslegungen im Angebotsstadium und nicht ausgeführte Geräte zur Auswertung herangezogen, um unternehmensspezifische Einflüsse zu minimieren. Da die erste Analyse auf den Daten eines Herstellers beruht, können die Ergebnisse in ihrer absoluten Größe im Verhältnis zum gesamten Markt statistisch abweichen.

In dieser Studie wurden daher Datenbanken von zwei unterschiedlichen Herstellern mit einer Gesamtheit von 30.022 und 53.597 Stichproben aus den Jahren 2000 bis 2009 untersucht.

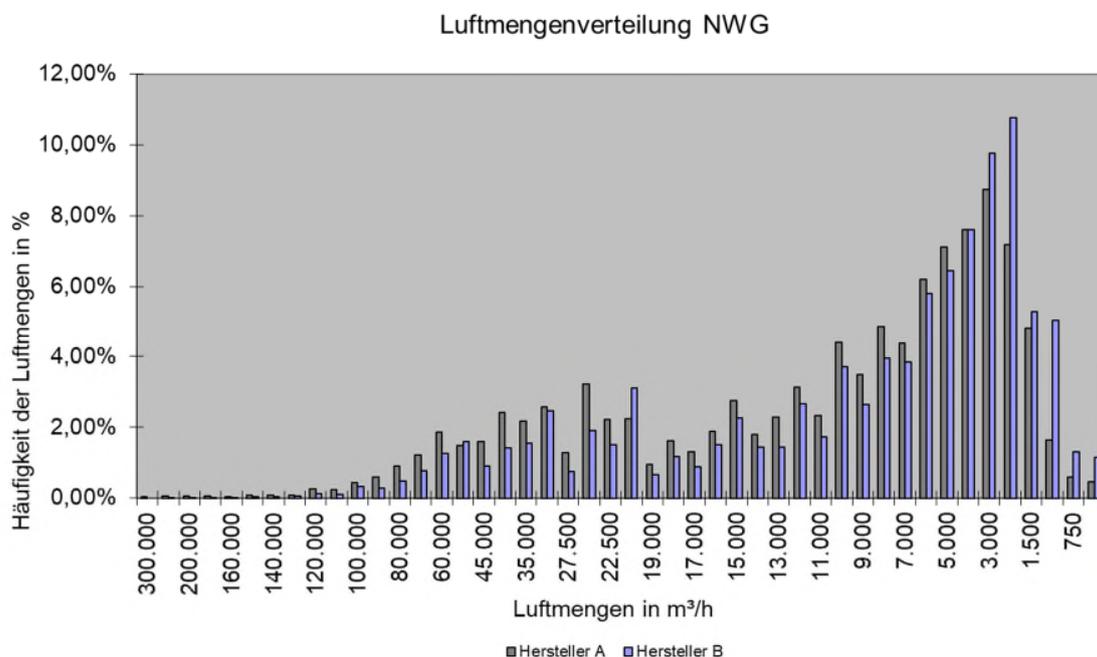


Abbildung 12: Statistische Verteilung der ausgelegten Volumenströme aus zwei unterschiedlichen Datenbanken zweier Hersteller⁸⁵

⁸⁵ Kaup, C.: Potenzial der Wärmerückgewinnung, Gentner Verlag, TGA Fachplaner 12/2009

Die Verteilung der Luftmengen beider Datenbanken zeigt Abbildung 12.

Die Übereinstimmung der Verteilung war signifikant. Lediglich bei kleinen Volumenströmen unter 3.000 m³/h kam es zu deutlichen Abweichungen von mehr als einem %-Punkt je Volumenstrom. Der mittlere Volumenstrom lag bei 14.408 m³/h (Mittelwert beider Verteilungen).

In einer weiteren Studie aus den Jahren 2006 bis 2013 lag der mittlere geförderte Volumenstrom aller ausgewerteten Geräte bei 14.239 m³/h (Zuluft) und 13.332 m³/h (Abluft).⁸⁶

Da in der Feldstudie der Volumenstrom der Geräte ebenfalls im Durchschnitt auf der Zu- und Abluftseite bei rund 14.000 m³/h (vergleiche Kapitel 7.2.3) liegt, kann davon ausgegangen werden, dass die Daten zumindest für Deutschland repräsentativ sind.⁸⁷ Da Deutschland der größte Markt für RLT-Geräte in Europa ist⁸⁸ und deutsche Hersteller auch in europäische Länder exportieren, kann weiter davon ausgegangen werden, dass die Daten auch für gesamt Europa repräsentativ sind. Gleichwohl sind die technischen Daten der jeweiligen Auslegungsprogramme beider Hersteller durch den TÜV Süd geprüft und zertifiziert und damit im Rahmen der üblichen Bau-toleranzen als realistisch anzusehen.

Des Weiteren wurden die Daten der o. g. Studien bis zum Jahr 2011 auch als Basis für die Auswertungen im Rahmen der EuP-preparatory studies (Task 2, Seite 21ff)⁸⁹ von der EU-Kommission verwendet.

⁸⁶ Kaup, C., Kampeis, P., Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs zentraler Raumluftechnischer Anlagen in Nicht-Wohngebäuden in Deutschland, Fachverband Gebäude-Klima e. V. und Hersteller-verband Raumluftechnische Geräte e. V., 2014

⁸⁷ Kaup, C., Erweiterung der Studie zur Energieeffizienz von raumluftechnischen Geräten, Springer-VDI Verlag, HLH 02/2012

⁸⁸ Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2, Lot 6: Air-conditioning and ventilation systems Contract No. ENTR / 2009/ 035/ LOT6/ Final Report – Task 2 Market on Ventilation Systems for non residential and collective residential applications, 2012

⁸⁹ Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2 / Lot 6: Airconditioning and ventilation systems / Contract No. ENTR / 2009/ 035/ LOT6/ SI2.549494 / Final Report Task 2 / Market on Ventilation Systems for non residential and collective residential applications, 06/2012

5.3 Dritter kumulativer Teil der Dissertation – Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 2)

Der Inhalt dieses Kapitels wurde veröffentlicht in:

Kaup, C., Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 2), GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis, Recknagel Science, ISSN: 2195-643X Jahrgang 140, Heft 03/19, Seite 216 bis 229⁹⁰

Dieses Kapitel gibt auszugsweise die wichtigsten Ergebnisse aus dieser Veröffentlichung wieder.

5.3.1 Eine Betrachtung für Europa

Eine Optimierung von WRG-Systemen kann nur durch Variation aller drei Dimensionen grundlegend und tatsächlich erfolgen. Die Methodik zur Optimierung wurde in Kapitel 5.1.4 dargestellt. Dazu ist auch der geografische Standort von Bedeutung, wie im Folgenden verdeutlicht wird.

Es soll die Auswirkung der mehrdimensionalen Optimierung an einem Beispiel betrachtet werden, welches eine durchschnittliche WRG bei verschiedenen Laufzeiten und in verschiedenen Orten in Europa aufzeigt. Damit soll der Einfluss des Standorts europaweit dargestellt werden, um die gesetzlichen Anforderungen an die WRG gemäß EU 1253/2014 detailliert bewerten zu können.

Zur Simulation des Betriebs wurde ein mittleres RLT-Gerät mit WRG und zugrunde gelegten Rahmenbedingungen angenommen, welche sich aus dem Mittelwert der Analyse realer und marktbezogener Auslegungen aus der Feldstudie ergaben (vergleiche Kapitel 5.2.1).

Zur Bestimmung der Klimadaten wurde die Meteonorm-Software verwendet (vergleiche Kapitel 2.6). Nicht berücksichtigt wurden in den Berechnungen:

1. Außenluft- oder Raumluftfeuchten und damit keine Be- oder Entfeuchtung.
2. in einem ersten Schritt die mögliche Reduktion von Investitionsausgaben, die sich durch eine kleinere Wärme- oder Kälteerzeugung ergeben hätten.
3. zusätzliche Funktionen der WRG wie indirekte Verdunstungskühlung, integrierte Wärme- oder Kälteeinspeisung, integrierte Freie Kälte oder Brauchwasservorerwärmung.
4. zusätzliche Ausgaben, die sich durch die WRG ergeben können.

⁹⁰ Ergebnisse dieses Kapitels sind vorveröffentlicht worden (Preprint): Kaup, C., Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Eine Betrachtung für Europa, Springer-VDI-Verlag, HLH 10/2017 und Kaup, C., Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Einfluss der Änderung der Rahmenbedingungen, Springer-VDI-Verlag, HLH 11/2017. In diesen Beiträgen wurden abweichende Energiepreise (Mittelwerte für Deutschland) verwendet.

5.3.2 Meteorologische (Standort) und laufzeitabhängige Einflüsse

Der Rückgewinn an Wärme im Winter innerhalb Europas ergibt sich aus Abbildung 13. Der Anteil der „Kälterückgewinnung“ im Sommer zeigt Abbildung 14.

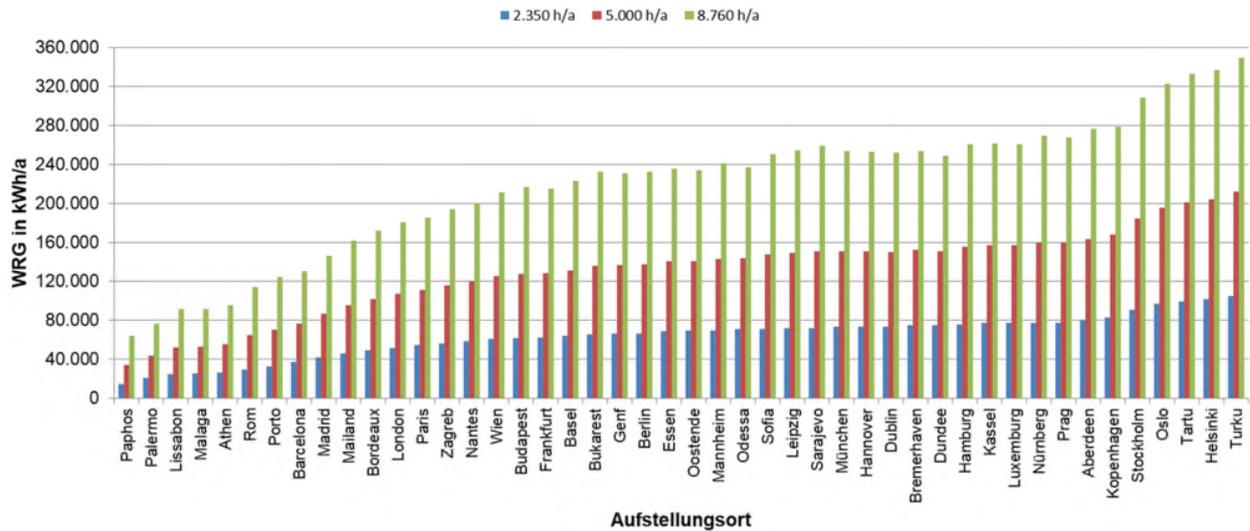


Abbildung 13: WRG mit \varnothing 63.653 kWh/a bei 2.350 h/a und einer Spanne von $F = 7,0$ (Nord zu Süd)

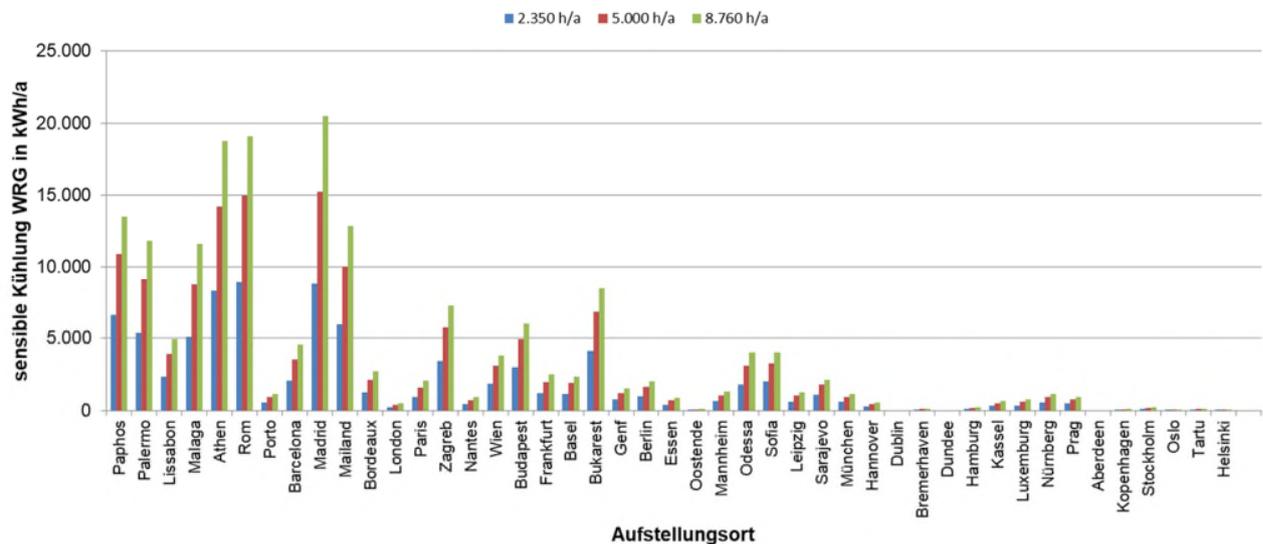


Abbildung 14: Sensible Kälterückgewinnung mit \varnothing 1.976 kWh/a bei 2.350 h/a

Es wird ersichtlich, dass der Anteil der Kälterückgewinnung im Sommer im Durchschnitt nur einen Bruchteil (3 %) der WRG im Winter ausmacht, welche die WRG liefert.

Die wirtschaftlichen Kennwerte bei einer Laufzeit von 2.350 h/a sind der Abbildung 15 zu entnehmen.

Die Grafik macht deutlich, dass die Kapitalwerte der Ersparnisse ein und derselben WRG innerhalb Europas je nach Standort deutlich variieren.

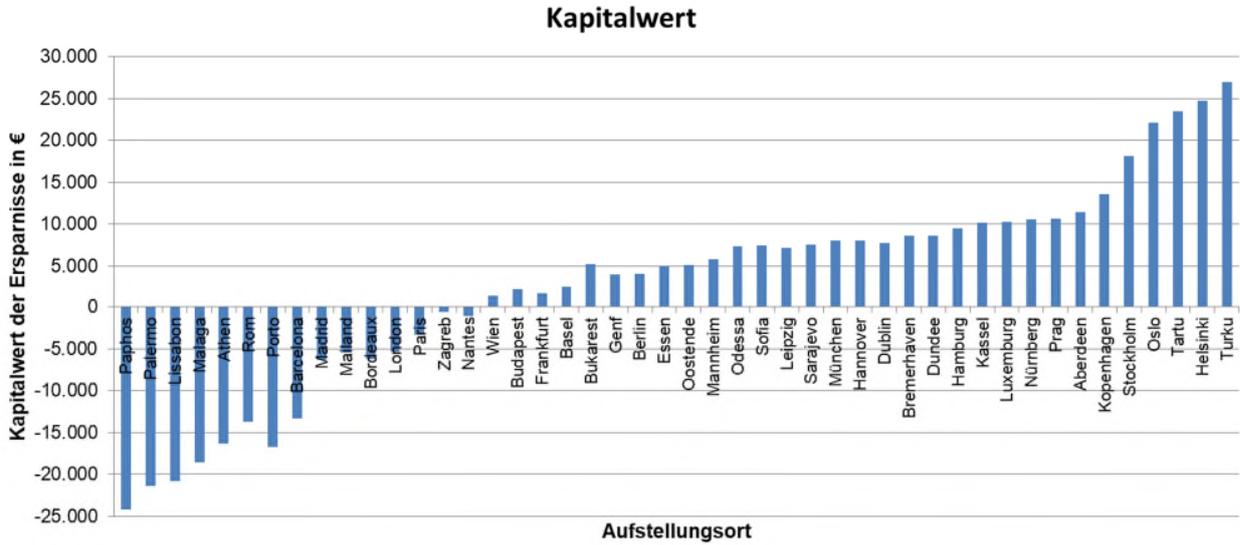


Abbildung 15: Kapitalwert der Ersparnisse Ø 2.720 € bei 2.350 h/a

Während im Süden eine WRG bei einer Laufzeit von 2.350 h/a einen deutlichen Verlust (negativen Kapitalwert) bis zu 25.000 € erwirtschaftet und damit unwirtschaftlich ist, liegt der Ertrag der identischen WRG in Helsinki oder Turku bei gleicher Laufzeit bei etwa 27.000 €. Der Kapitalwert der Ersparnisse ergibt sich aus den jährlichen Differenzbeträgen (siehe Abbildung 16).

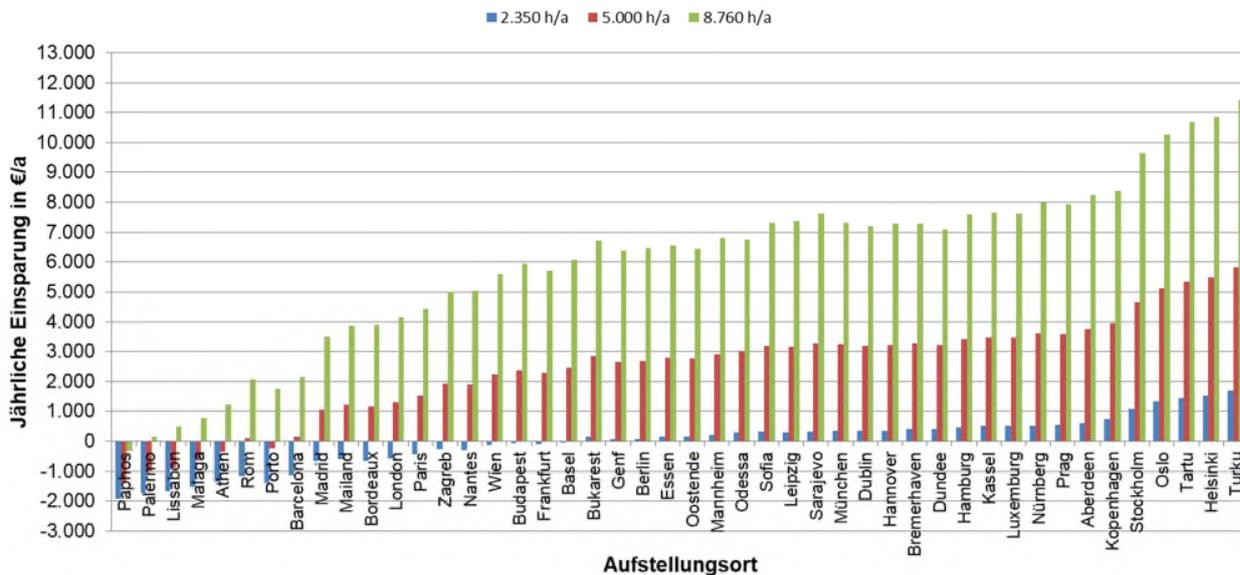


Abbildung 16: Jährliche Einsparung (Differenzbeträge) bei Auslegungsbedingungen (ca. 1,5 m/s)

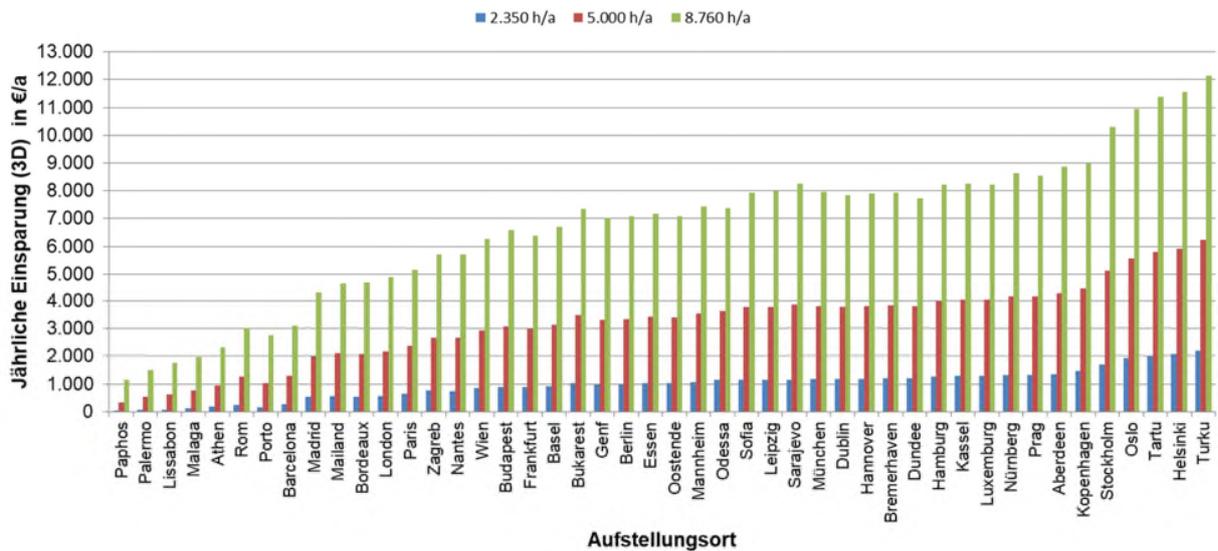


Abbildung 17: Mehrdimensionale Optimierung der monetären jährlichen Einsparung (3D)

Mit der beschriebenen mehrdimensionalen Optimierung (Abbildung 17) könnte jedoch die potenzielle Einsparung (Differenzbeträge) der WRG, insbesondere im Süden Europas, deutlich gesteigert werden (vergleiche Abbildung 16 mit Abbildung 17).

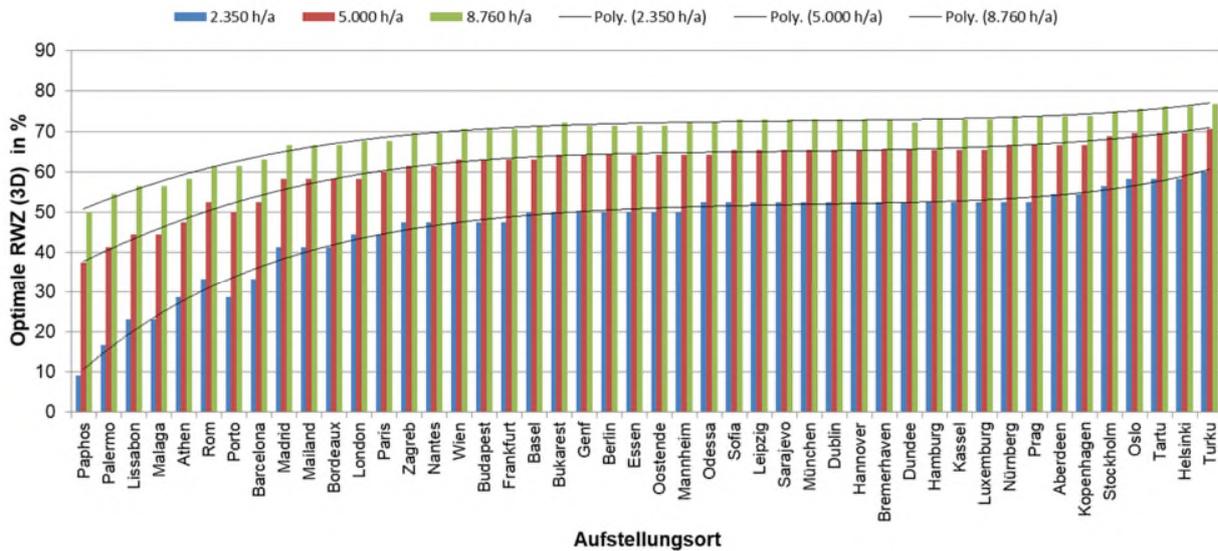


Abbildung 18: optimale Rückwärmzahl (RWZ) (monetäre 3D-Optimierung)

Hierzu sind jedoch wesentlich geringere Luftgeschwindigkeiten im Querschnitt erforderlich, die an jedem Standort in Europa bei rund 1,1 m/s liegen müssen. Bei diesen Luftgeschwindigkeiten er-

geben sich dann optimale RWZ (Temperaturübertragungsgrade), die aus Abbildung 18 zu entnehmen sind. Die Ergebnisse zeigen, dass Mindestübertragungsgrade nicht pauschal festgelegt werden können.

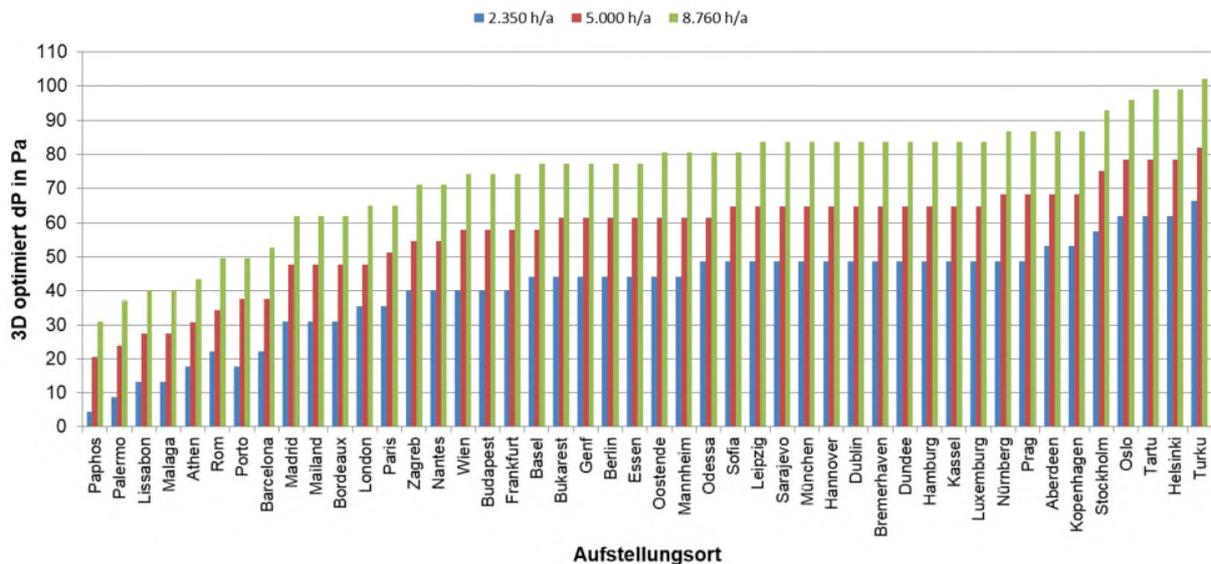


Abbildung 19: optimaler Differenzdruck des WRG-Systems (monetäre 3D-Optimierung)

Abbildung 19 zeigt, dass die Differenzdrücke bei optimaler Luftgeschwindigkeit sehr gering sind und selbst bei 8.760 h/a meist deutlich unter $\Delta p = 100$ Pa liegen müssen. Es zeigt sich auch, dass bei der Festlegung der Mindestübertragungsgrade der Aufstellungsort der WRG flexibel berücksichtigt werden muss.

5.3.3 Definition des Standorts

Wie könnte der Einfluss des Aufstellungsorts in eine mögliche Regulierung einfließen? Wäre z. B. die Definition von Klimazonen sinnvoll? Um diese Fragen zu beantworten, könnte sinnvollerweise ein Zusammenhang zwischen der Auslegungstemperatur der Außenluft und dem Aufstellungsort hergestellt werden. Die tiefsten Außenlufttemperaturen schwanken zwischen etwa -17 °C (Winter im Norden) und $+4$ °C (Winter im Süden), während im Sommer die maximalen Temperaturen zwischen 25 °C und 38 °C moderater differieren. Die mittlere Außenlufttemperatur ergibt sich aus der maximalen Sommer- und der tiefsten Wintertemperatur.

Auf Basis der Außenlufttemperaturen kann ein Zusammenhang mit der optimalen RWZ (vergleiche Abbildung 18) hergestellt werden. Das Ergebnis aus dieser Kombination zeigt Abbildung 20.

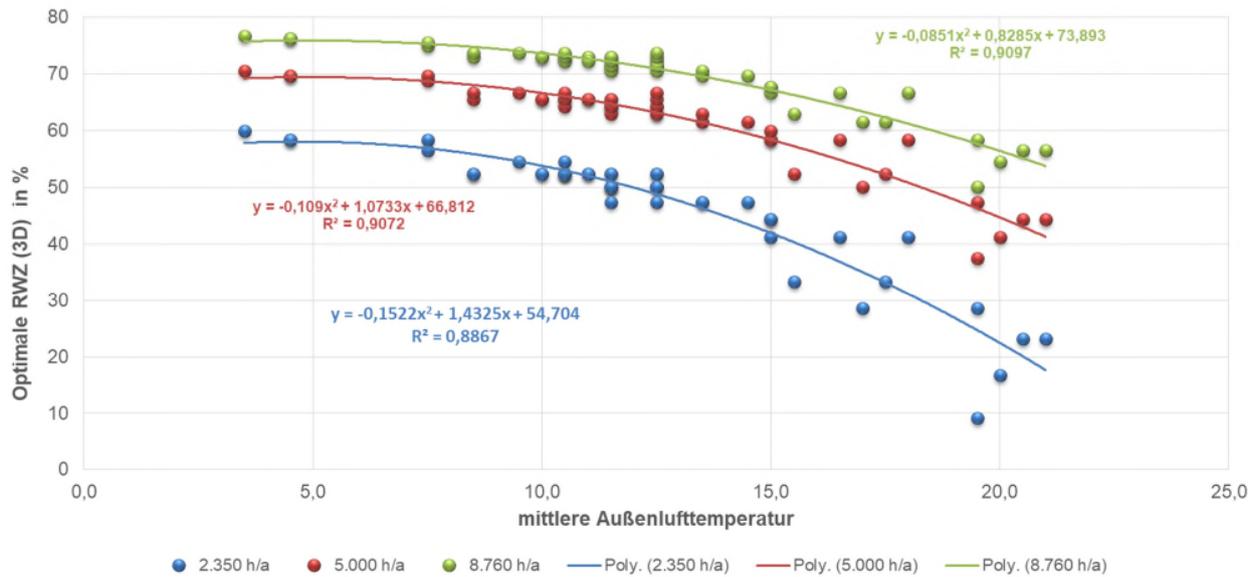


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen mittlerer Außenlufttemperatur und optimaler RWZ

Es wird ersichtlich, dass jeder Außenlufttemperatur je nach Laufzeit eine optimale RWZ zugeordnet werden kann. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei höheren Laufzeiten bei $R^2 = 0,91$ und zeigt eine geringe Streuung (und damit die hohe Anpassungsgüte) des Regressionsmodells.

Wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln gezeigt, kann die Wirtschaftlichkeit der WRG erheblich gesteigert werden, wenn die WRG die Investition der Wärmeerzeugung und/oder der Kälteerzeugung verringert und diese Investition bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit der WRG berücksichtigt werden kann. Unter Berücksichtigung dieser Einsparung erhöht sich die Wirtschaftlichkeit deutlich, da der Kapitalaufwand sinkt.

5.3.4 Weitere Einflussparameter ⁹¹

Neben dem Ort der Aufstellung und der Laufzeit fließen insbesondere die spezifischen Preise und die Ablufttemperatur in die Wirtschaftlichkeit der WRG ein.

Der Einfluss des spezifischen Wärmepreises geht linear in den Kapitalwert der Ersparnisse ein. Die Laufzeit geht ebenfalls nahezu linear in den Kapitalwert ein. Umgekehrt proportional verhält sich der Einfluss des spezifischen Elektropreises. Auch der spezifische Druckabfall der WRG (Auslegung) hat prinzipiell den gleichen Einfluss, den auch der Elektroenergiepreis hat.

⁹¹ Mit Deutschland repräsentativen und höheren Energiepreisen ergeben sich Ergebnisse, die aus: Kaup, C., Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Einfluss der Änderung der Rahmenbedingungen, Springer-VDI-Verlag, HLH 11/2017, entnommen werden können.

Speziell die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Druckverluste im Optimum werden maßgeblich durch den Elektroenergiepreis und die Laufzeit bestimmt. Die optimale RWZ wird durch den Elektroenergiepreis kaum beeinflusst. Sie ist in Abhängigkeit des Elektroenergiepreises nahezu konstant.

Einen wesentlichen Einfluss hat allerdings auch die Ablufttemperatur auf die Wirtschaftlichkeit der WRG. Diese Abhängigkeit des Kapitalwerts ist prinzipiell linear und verhält sich analog zum spezifischen Wärmepreis. Der Kapitalwert wird allerdings durch den Sollwert der erforderlichen Zulufttemperatur begrenzt. Dagegen hat die Ablufttemperatur, ähnlich wie der Wärmepreis, keinen entscheidenden Einfluss auf die optimale Strömungsgeschwindigkeit.

5.3.5 Darstellung der Eigenleistung zum dritten kumulativen Teil

Die präsentierten Arbeiten von der Entwicklung der Konzeption, der Methodenentwicklung, Analysedesign, Datenerhebung, Datenauswertung, Ergebnisdiskussion und das Erstellen des Manuskriptes habe ich weitgehend alleine durchgeführt. Dies beinhaltet sowohl die Aufbereitung als auch die Analyse der Ergebnisse. Bei der Erstellung der Software HPSimMeta zur automatisierten Auswertung der Auslegungen hat mich Herr Georg Allnoch unterstützt. Die konzeptionellen Grundlagen dazu stammen von mir.

5.4 Vierter kumulativer Teil der Dissertation – The optimum of heat recovery – Determination of the optimal heat recovery based on a multiple non-linear regression model

Der Inhalt dieses Kapitels wurde veröffentlicht in:

Kaup, C., The optimum of heat recovery – Determination of the optimal heat recovery based on a multiple non-linear regression model, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101548>, 13 Seiten

Journal of Building Engineering, Volume 38, June 2021 ⁹²

Anmerkung: Der englische Text des Originalbeitrags wurde ins Deutsche übersetzt. Dieses Kapitel gibt auszugsweise die wesentlichen Ergebnisse der o. g. Veröffentlichung wieder.

5.4.1 Kapiteleinleitung

Basierend auf Optimierungsberechnungen soll eine nicht lineare multiple Regressionsanalyse verwendet werden, um Modelle zu generieren, mit denen das optimale WRG-System unter verschiedenen Rahmenbedingungen einfach und universell ohne weitere individuelle Optimierungsberechnungen vorhergesagt werden kann. Ein solcher allgemeiner Ansatz ist neu und existierte bis 2020 nicht.

Dabei sollen folgende Rahmenparameter berücksichtigt werden:

- Die Außenlufttemperatur im Winter und damit der jeweilige geografische Standort,
- die Ablufttemperatur, welche die jeweilige Anwendung der WRG repräsentiert,
- die Laufzeit,
- die Bilanzgrenze (WRG alleine und andere Einflussfaktoren) und
- die Lastfälle (Voll- und Teillast) der WRG.

Um das Modell nicht zu komplex werden zu lassen, wurden im Folgenden die Energiepreise (Preis für elektrische Energie und Wärmepreis) als konstant angenommen, da sich diese Rahmenparameter im Betrachtungszeitraum nur langsam änderten und im ersten Schritt als konstant angenommen werden konnten. In einem weiteren Schritt sollte aber auch der Einfluss der CO₂-Reduktion berücksichtigt werden.

⁹² Ergebnisse des Kapitels sind als Stakeholder-Kommentar in der Diskussion mit der EU-Kommission vorveröffentlicht worden (Preprint), um rechtzeitig berücksichtigt werden zu können: https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/HOWATHERM%20-%20Multiple_Regression_HRS_Optimum.pdf

5.4.2 Datenerhebung als Grundlage für die multiple Regression

Als Grundlage zur Ermittlung des Regressionsmodells dienen die Ergebnisse der mehrdimensionalen Optimierung unter den im Folgenden angegebenen Rahmenbedingungen, die zu zwei verschiedenen Lastfällen bestimmt wurden. Dabei wurden sowohl ein Volllastfall (bei Auslegungsluftmenge) als auch ein Teillastfall bei reduzierter Luftmenge (70 % der Nennluftmenge) betrachtet. Des Weiteren wurden die Optimierungen für zwei Bilanzgrenzen berücksichtigt – einerseits mit Blickwinkel auf die WRG ohne weitere Einflüsse und andererseits mit Berücksichtigung der Minderung der Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen (siehe Kapitel 2.3). Es wurde zur Simulation des Betriebs ein mittleres RLT-Gerät mit WRG im Vergleich zum RLT-Gerät ohne WRG angenommen (vergleiche Kapitel 5.3.1).

Es wurden drei Laufzeitmodelle verwendet (2.350 h/a, 5.000 h/a und 8.760 h/a). Dabei wurde als Stützwert zur Ermittlung der Regression ein weiterer Datensatz von 8.766 h/a aufgenommen, der allerdings identisch mit den Werten für 8.760 h/a ist.

Der Standort der WRG wird physikalisch durch die Außenlufttemperatur ϑ_2 (AUL) repräsentiert. Die Datensätze wurden analog auch für die Ablufttemperaturen 18 °C, 20 °C, 22 °C sowie 24 °C mit der mehrdimensionalen Optimierung erstellt. Damit ergeben sich insgesamt 16 Datensätze.

Alle Datensätze und die Ergebnisse der multiplen Regressionen sind verfügbar auf:

<https://data.mendeley.com/datasets/w7sw8njrz5/1> (DOI: 10.17632/w7sw8njrz5.1).

Dabei bilden die Außenlufttemperatur, die Ablufttemperatur sowie die Laufzeit der WRG die unabhängigen Variablen (x_i), die über die Regressionsanalyse die abhängigen Variablen (y_i) beschreiben. Der Temperaturübertragungsgrad, der Druckabfall sowie die Luftgeschwindigkeit wurden im Optimum in Form einer multiplen Regression abgebildet.

5.4.3 Nicht lineares multiples Regressionsmodell (nur WRG)

Aus den bisherigen Betrachtungen ergab sich ein nicht linearer Zusammenhang zwischen der Außenlufttemperatur und dem Temperaturübertragungsgrad der WRG. Die Luftgeschwindigkeit und der Druckabfall zeigen ebenfalls keinen linearen Zusammenhang zur Außenlufttemperatur. Aus diesem Grund konnte auch in diesen Fällen keine lineare Regression angewendet werden. Außerdem konnte keine einfache Regression durchgeführt werden, da die gesuchten abhängigen Variablen durch mehrere unabhängige Variablen bestimmt sind. Diese Modelle sind sehr komplex, da die Zusammenhänge zwischen den Variablen nicht mit einfachen mathematischen Mitteln abzubilden sind. Eine eindeutige, analytische Lösung ist nicht möglich. Tabelle 9 zeigt für diesen Fall das Ergebnis, welches mit dem Statistikprogramm SPSS von IBM berechnet wurde.

Tabelle 9: Multiple Regression für den Vollastfall und mit einfacher Bilanzgrenze

Φ	Parameter	Δp	Parameter	W	Parameter
AUL1	-2,0645	AUL1	-4,314	AUL1	-0,0001
AUL2	-0,12985	AUL2	-0,23924	AUL2	-0,00001
AUL3	-0,003528	AUL3	-0,00807	AUL3	-7,053E-08
ABL1	0,4781	ABL1	-4,3081	ABL1	0,1391
ABL2	0,0262	ABL2	0,21055	ABL2	-0,0033
L1	0,009043	L1	0,011	L1	-0,000096
L2	-4,99E-07	L2	-3,65E-07	L2	6E-09

Als Ergebnis ermittelt das Programm ein Polynom 3. Grades, das auf Basis der Mindestaußenlufttemperatur die optimale RWZ berechnet. Zudem können mittels zweier weiterer Polynomglieder 2. Grades die Ablufttemperatur sowie die Laufzeit berücksichtigt werden. Analog können die Polynome für den Druckverlust der WRG im Optimum sowie für die dann notwendige Luftgeschwindigkeit gebildet werden.

Beispielhaft ergibt sich für den Temperaturübertragungsgrad:

$$\Phi_{\text{opt}} = \text{AUL1} \cdot \text{AUL} + \text{AUL2} \cdot \text{AUL}^2 + \text{AUL3} \cdot \text{AUL}^3 + \text{ABL1} \cdot \text{ABL} + \text{ABL2} \cdot \text{ABL}^2 + \text{L1} \cdot \text{LZ} + \text{L2} \cdot \text{LZ}^2$$

Für den Temperaturübertragungsgrad, den Druckabfall und die optimale Luftgeschwindigkeit ergeben sich in diesem Fall:

$$\Phi_{\text{opt}} = - 2,0645 \cdot \text{AUL} - 0,12985 \cdot \text{AUL}^2 - 0,003528 \cdot \text{AUL}^3 + 0,4781 \cdot \text{ABL} + 0,0262 \cdot \text{ABL}^2 + 0,009043 \cdot \text{LZ} - 4,99\text{E-}07 \cdot \text{LZ}^2$$

$$\Delta p_{\text{opt}} = - 4,314 \cdot \text{AUL} - 0,23924 \cdot \text{AUL}^2 - 0,00807 \cdot \text{AUL}^3 - 4,3081 \cdot \text{ABL} + 0,21055 \cdot \text{ABL}^2 + 0,011 \cdot \text{LZ} - 3,65\text{E-}07 \cdot \text{LZ}^2$$

$$w_{\text{opt}} = - 0,0001 \cdot \text{AUL} - 0,00001 \cdot \text{AUL}^2 - 7,053\text{E-}08 \cdot \text{AUL}^3 + 0,1391 \cdot \text{ABL} - 0,0033 \cdot \text{ABL}^2 - 0,000096 \cdot \text{LZ} + 6\text{E-}09 \cdot \text{LZ}^2$$

Die Ergebnisse der Einfaktoriellen Varianzanalyse (analysis of variance, kurz ANOVA) zeigt für diesen beispielhaften Fall folgende Tabelle 10.

Tabelle 10: Analyse der multiplen Regression für den Vollastfall und mit einfacher Bilanzgrenze für die RWZ

Parameterschätzer Parameter	Schätzer	Std.-Fehler	95 %-Konfidenzintervall		Skalierung Schätzer
			Untere Grenze	Obere Grenze	
AUL1	-20,645	0,634	-21,889	-19,401	10
AUL2	-12,985	1,227	-15,394	-10,576	100
AUL3	-3,528	0,565	-4,638	-2,418	1.000
ABL1	4,781	1,163	2,498	7,064	10
ABL2	2,62	0,386	1,863	3,377	100
L1	9,043	0,403	8,251	9,834	1.000
L2	-0,499	0,035	-0,567	-0,431	1.000.000

ANOVAa				
Quelle	Quadratsumme	df	Mittel der Quadrate	
Regression	2999217,354	7	428459,622	
Residuen	11314,216	729	15,52	
Nicht korrigierter Gesamt- wert	3010531,57	736		
Korrigierter Gesamt- wert	113301,263	735		

Abhängige Variable: Φ_a

$$a \text{ R-Quadrat} = 1 - (\text{Residuenquadratsumme}) / (\text{Korrigierte Quadratsumme}) = 0,900$$

Das Modell kann verbessert werden, wenn statt der tiefsten Außenlufttemperatur (AUL min.) im Winter die mittlere Außenlufttemperatur (AUL avg.) als unabhängige Variable berücksichtigt wird. Die Regression mittels IBM SPSS liefert hierfür Ergebnisse, die Tabelle 11 entnommen werden können.

Tabelle 11: Multiple Regression für den Vollastfall und mit einfacher Bilanzgrenze (nur WRG basierend auf der mittleren Außenlufttemperatur)

Φ	Parameter	Δp	Parameter	w	Parameter
AUL avg1	0,3242	AUL avg1	-0,1135	AUL avg1	0,0074
AUL avg2	-0,04045	AUL avg2	-0,20108	AUL avg2	-0,00062
AUL avg3	-0,001668	AUL avg3	0,001769	AUL avg3	0,000016
ABL1	1,9278	ABL1	0,6523	ABL1	0,1366
ABL2	-0,00838	ABL2	0,09222	ABL2	-0,00324
L1	0,00902	L1	0,010925	L1	-0,000096
L2	-0,000000498	L2	-0,000000361	L2	0,000000006

Mit dieser Regressionsanalyse wird für die abhängige Variable der RWZ $aR^2 = 0,915$ erreicht. Für den Druckabfall liefert ANOVA $aR^2 = 0,951$ (Druckabfall) und für die Luftgeschwindigkeit $aR^2 = 0,971$. Damit wird die Regressionsgüte insbesondere für die RWZ (Φ) von $aR^2 = 0,9$ (AUL min.) auf $aR^2 = 0,915$ verbessert. Bei der Abschätzung des Druckabfalls (Δp) verbessert sich die Regressionsgüte von $aR^2 = 0,906$ deutlich auf $aR^2 = 0,951$. Nur zur Vorhersage der optimalen Luftgeschwindigkeit (w) bleibt die Regressionsgüte gegenüber dem Modell gleich, welches mit der tiefsten Außenlufttemperatur arbeitet.

Ein kleiner Vorteil dieses Modells ist die etwas bessere Regressionsgüte; dieses Modell hat allerdings den entscheidenden Nachteil, dass nicht nur die tiefste Außenlufttemperatur als Auslegungswert bekannt sein muss, sondern auch die maximale Auslegungstemperatur im Sommer.

Die höchste Temperatur im Sommer ist jedoch nicht in allen Fällen bekannt, da nicht immer Kühlung gefordert wird, während das Heizen im Winter immer relevant ist. Aus diesem Grund wird im Folgenden trotz der etwas schlechteren Regressionsqualität das auf der niedrigsten Außenlufttemperatur basierende Modell verwendet.

5.4.4 Nicht lineares multiples Regressionsmodell (erweiterte Bilanzgrenze)

Wird die Bilanzgrenze nicht nur um die WRG direkt gezogen, sondern die Wärme- und Kälteerzeugung einbezogen, ergibt sich basierend auf der tiefsten Außenlufttemperatur im Winter, der Ablufttemperatur und der Laufzeit der WRG folgendes Bild, das aus Tabelle 12 entnommen werden kann.

Tabelle 12: Multiple Regression mit erweiterter Bilanzgrenze im Volllastfall

Φ	Parameter	Δp	Parameter	w	Parameter
AUL1	-1,0227	AUL1	-3,5279	AUL1	-0,0039
AUL2	-0,0574	AUL2	-0,20239	AUL2	-0,00062
AUL3	-0,001282	AUL3	-0,006821	AUL3	-0,000033
ABL1	3,6874	ABL1	-1,0036	ABL1	0,1127
ABL2	-0,06266	ABL2	0,12139	ABL2	-0,00267
L1	0,004429	L1	0,006309	L1	-0,000056
L2	-0,000000222	L2	-0,000000103	L2	0,000000003

Mit dieser Regression wird die Regressionsgüte insbesondere für den Temperaturübertragungsgrad (Φ) von $aR^2 = 0,9$ auf $aR^2 = 0,941$ deutlich verbessert. Bei der Abschätzung des Druckabfalls (Δp) verschlechtert sich jedoch die Regressionsgüte von $aR^2 = 0,906$ auf $aR^2 = 0,881$.

5.4.5 Nicht lineares multiples Regressionsmodell mit Berücksichtigung des CO₂-Preises

Das Europäische Emissionshandelssystem (EU-EHS), das seit 2005 das zentrale Klimaschutzinstrument der EU ist, kann als Referenz für den CO₂-Preis verwendet werden. Der CO₂-Preis lag zum Betrachtungszeitpunkt bei 25 €/t (Mittelwert 2019).⁹³ Die CO₂-Reduktion berechnet sich aus der Emissionsminderung durch die Wärmeeinsparungen abzüglich des Emissionsmehraufwands für elektrische Energie und der Emissionen, die bei der Herstellung der WRG anfallen (graue CO₂-Emissionen vergleiche Kapitel 2.5).

Wenn die optimale WRG mit Einfluss des CO₂-Preises berechnet wird, ergibt sich für die erweiterte Bilanz für den Vollastfall folgendes Optimierungsergebnis (siehe Tabelle 13).

Tabelle 13: Multiple Regression für den Vollastfall und mit erweiterter Bilanzgrenze mit Einfluss des CO₂-Preises (25 €/t.)

Φ	Parameter	Δp	Parameter	w	Parameter
AUL1	-1,0230	AUL1	-3,8557	AUL1	-0,003943
AUL2	-0,0581	AUL2	-0,2269	AUL2	-0,0006294
AUL3	-0,001338	AUL3	-0,008067	AUL3	-3,4451E-05
ABL1	3,9363	ABL1	-0,8103	ABL1	0,1129
ABL2	-0,0712	ABL2	0,1125	ABL2	-0,002670
L1	0,004494	L1	0,008117	L1	-5,3070E-05
L2	-2,3453E-07	L2	-2,3739E-07	L2	3,1804E-09

RWZ $aR^2 = 0,935$ / Druckabfall $aR^2 = 0,879$

Der mehrdimensional optimierte Temperaturübertragungsgrad steigt um rund 2 bis 3 %-Punkte, während der Druckabfall proportional zu NTU deutlicher ansteigt. Mit diesen Regressionen wird für die abhängige Variable RWZ und für den Druckabfall aR^2 in ähnlicher Größenordnung ermittelt (vergleiche Kapitel 5.4.4).

⁹³ <https://www.finanzen.net/rohstoffe/co2-emissionsrechte> (vergleiche: <https://www.boerse-online.de/rohstoffe/co2-emissionsrecht>)

5.4.6 Optimale WRG – Volllastbetrieb versus Teillastbetrieb

Die Darstellung zwischen dem Volllastbetrieb und dem Teillastbetrieb zeigt Abbildung 21. Links sind die optimalen Temperaturübertragungsgrade in Abhängigkeit der Variablen im Teillastbetrieb dargestellt, während rechts der Volllastfall abgebildet ist.

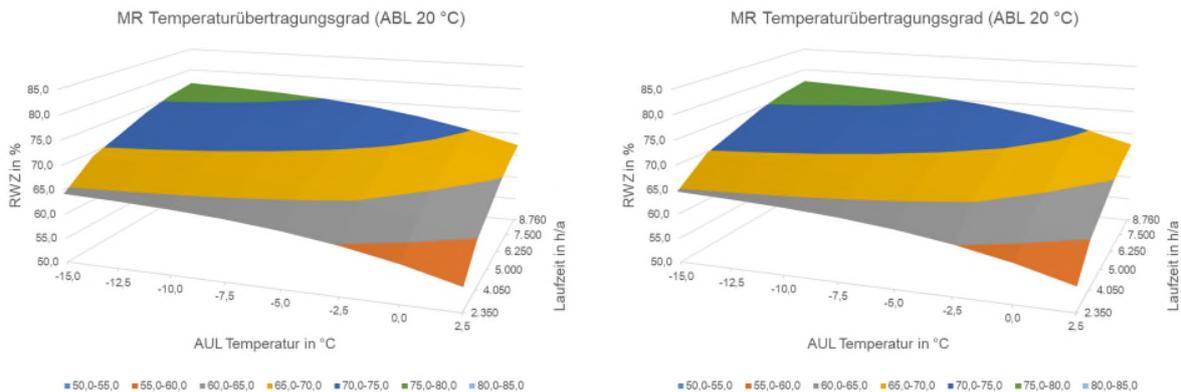


Abbildung 21 Optimaler Temperaturübertragungsgrad bei 20 °C Ablufttemperatur (links Teillast- und rechts Volllastbetrieb) jeweils ohne Berücksichtigung des CO₂-Preises

Der Temperaturübertragungsgrad wird nur unwesentlich durch den Teillastbetrieb im Vergleich zum Volllastbetrieb beeinflusst. Abbildung 22 stellt die korrespondierenden SFP-Werte für die WRG für beide Lastfälle dar. Auffallend ist die Zunahme der tolerierbaren SFP-Werte im Teillastfall, die rund 1,25-mal (1,17 - 1,32) höher ausfallen dürfen als im Volllastbetrieb. Dieses Ergebnis ist nachvollziehbar, da die Anlagen meist im Teillastbetriebszustand genutzt werden und dadurch bei niedrigerer Luftgeschwindigkeit betrieben werden, was den resultierenden, tatsächlichen SFP-Wert in der Praxis reduziert. Dieses Ergebnis führte zu der Idee eines Bonus auf den SFP-Wert im Auslegungspunkt und legitimiert sie, wenn die Systeme durch eine elektronische integrierte Regelung in einem kontrollierten Teillastbetrieb arbeiten.

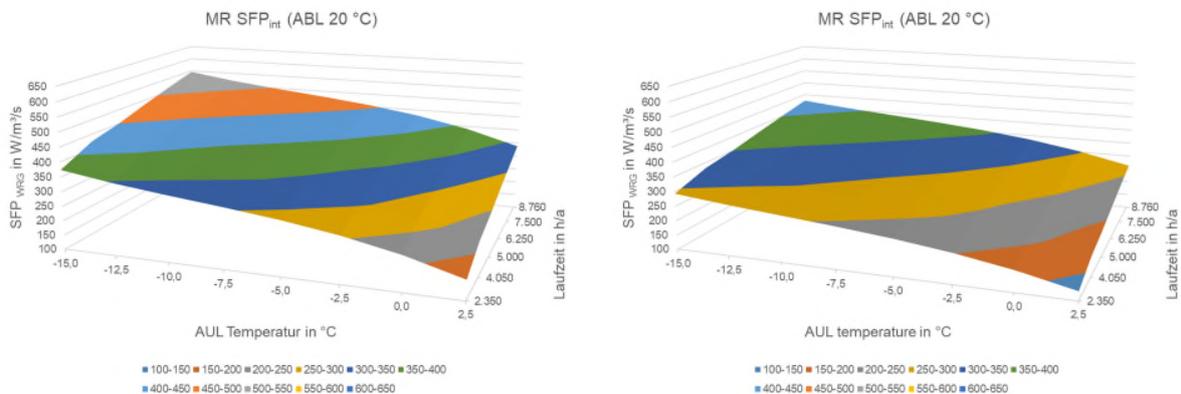


Abbildung 22: Korrespondierender SFP-Wert für die WRG bei 20 °C Ablufttemperatur (links Teillast- und rechts Volllastbetrieb) jeweils ohne Berücksichtigung des CO₂-Preises

5.4.7 Kombinierte Angabe Temperaturübertragungsgrad und SFP

Die gewonnenen Ergebnisse können als Basis für eine neue europäische Festlegung der Anforderungen an die WRG verwendet werden. Dabei könnten aus den nicht linearen Regressionsmodellen (polynombasiert) sowohl die Mindest-RWZ als auch der maximale korrespondierende SFP-Wert abgeleitet werden. Beide Werte bedingen einander. Als unabhängige Variable zur Bildung der Polynome werden neben der Mindestaußenlufttemperatur (Auslegungswert Winter), die dazugehörige Ablufttemperatur und die Laufzeit vorgeschlagen.

Da die Verordnung jedoch Mindestkriterien für Φ fordert, muss ein Weg gefunden werden, wenn in einzelnen Anwendungsfällen auch höhere RWZ eingesetzt werden sollen. Dies darf eine mögliche Festlegung zu strenger SFP-Werte nicht verhindern. Daher muss proportional zur höheren RWZ (NTU) ein größerer SFP-Wert zugelassen werden.

Dies kann einfach über die dimensionslose Wärmeübertragerkennzahl NTU abgebildet werden, da die Festlegung der Kenngrößen bei einem Wärmestromkapazitätenverhältnis von $\mu = 1$ erfolgt. Wird eine höhere RWZ eingesetzt, als z. B. die Optimierung dies vorgibt, kann der maximale SFP-Wert um den Betrag des korrespondierenden NTU proportional erhöht werden, da die Luftgeschwindigkeit als weitere Einflussgröße nicht weiter verringert werden kann (vergleiche Kapitel 5.2.3).

Wäre beispielweise der geforderte Wert $\Phi_{\min} = 0,75$, ergibt sich daraus ein $NTU_{\min} = 0,75/(1-0,75) = 3$. Wird im konkreten Fall eine RWZ von $\Phi_t = 0,8$ erwünscht, wäre die hierzu korrespondierende Wärmeübertragerkennzahl $NTU = 0,8/(1-0,8) = 4$ und somit $4/3 = 1,333$ höher als der erforderliche Wert. Damit wäre auch ein um den Faktor $F = 1,333$ höherer SFP-Wert zulässig, da die Luftgeschwindigkeit nach der 3D-Optimierung bereits sehr niedrig ist und nicht weiter reduziert werden kann. Wäre beispielsweise der zulässige SFP-Wert $SFP = 400 \text{ W/m}^3/\text{s}$ (bei $\Phi_{\min} = 0,75$), so könnte bei Wahl einer bewusst „größer“ ausgelegten WRG mit $\Phi_t = 0,8$ ein korrespondierender SFP-Wert von $SFP = 400 \cdot 1,333 = 533 \text{ W/m}^3/\text{s}$ zugelassen werden.

5.4.8 Grenzen der Bestimmung allgemeingültiger Optima

Aus den bisherigen Erkenntnissen kann klar eine Begrenzung der Festlegungen zur WRG gezogen werden. Dabei ist festzustellen, dass sehr geringe Laufzeiten die WRG als unwirtschaftlich erscheinen lassen, dies insbesondere in der Kombination mit geringen Temperaturdifferenzen (Ablufttemperatur abzüglich der standortbezogenen Mindestaußenlufttemperatur).

Die bisher getroffenen Festlegungen beziehen sich auf folgende Grenzwerte:

- Laufzeit 2.350 h/a bis zum Vollbenutzungsbetrieb mit 8.760 h/a,
- Ablufttemperaturniveau mit mindestens 18 °C und ein
- Mindestaußenlufttemperaturniveau von -15 °C bis maximal +2,5 °C.

Die maximale Ablufttemperatur war auf 24 °C begrenzt, da oberhalb von 24 °C die Sollwerte für die Zulufttemperatur die WRG limitieren. Liegen die Werte im jeweiligen Betrachtungsfall außerhalb dieser Grenzen, kann die WRG im Einzelfall immer noch wirtschaftlich sein, jedoch kann dann eine abschließende Betrachtung im Einzelfall nur durch eine individuelle Optimierung erfolgen. Dabei können dann die individuellen Energiepreise im Einzelfall herangezogen werden, die in den berechneten multiplen Regressionen standardisiert und europaweit als Mittelwerte berücksichtigt wurden. Im tatsächlichen Einzelfall können diese Werte differieren und somit das Ergebnis der individuellen Optimierung maßgeblich verändern.

Außenlufttemperaturen unter -15 °C wurden bewusst nicht berücksichtigt, da die Häufigkeiten dieser Temperaturen sehr selten sind und bei diesen niedrigen Temperaturen der Vereisungsschutz die Wärmeübertragung begrenzt.

Es bestehen jedoch auch Anwendungen, die eine WRG unwirtschaftlich darstellen. An dieser Stelle sind als Beispiel Rechenzentren genannt. Zwar ist das Temperaturniveau hoch, jedoch existiert in den meisten Fällen kein Abnehmer für die Wärme, die theoretisch zurückgewonnen werden könnte. Dies ist auch in Anlagen mit freier Kühlung (beispielsweise Messehallen) der Fall. In der Industrie existieren auch Fälle, in denen Prozesswärme als Abwärme aus anderen Prozessen und auf höherem Temperaturniveau zur Verfügung steht, die vorrangig genutzt werden kann. Leider kann die Abwärme in vielen Fällen nicht genutzt werden, sodass eine WRG in diesen Fällen ad absurdum geführt würde.

Sämtliche Regressionen und Optimierungen beruhen jedoch denknotwendig auf der Grundlage, dass die Wärme im gleichen Prozess (oder in einem weiteren, verfügbaren Prozess) genutzt werden kann und gleichzeitig benötigt wird.

5.4.9 Darstellung der Eigenleistung zum vierten kumulativen Teil

Die präsentierten Arbeiten von der Entwicklung der Konzeption, der Methodenentwicklung, Analysedesign, Datenerhebung, Datenauswertung, Ergebnisdiskussion und das Erstellen des Manuskriptes habe ich weitgehend alleine durchgeführt. Dies beinhaltet sowohl die Aufbereitung wie auch die Analyse der Ergebnisse. Die multiplen Regressionen wurden mit IBM SPSS erstellt. Herr Lukas Thomas, M. Sc. hat mich in der Bedienung des Programms zur Datengewinnung unterstützt.

6. Diskussion der Ergebnisse und Schlussfolgerung

Die Anpassung der Verordnung EU 1253/2014 zur Durchführung der Ökodesign-Richtlinie kann eine deutliche Wirkung auf die Entwicklung der WRG im europäischen Markt hervorrufen. Nicht zuletzt hat die Diskussion zu den Referenzwerten für Nicht-Wohnraum-Lüftungsgeräte für Spannungen im Markt gesorgt. Denn laut Artikel 8 überprüft die Kommission die Verordnung und kann dabei schärfere Anforderungen festlegen. Diese schärferen Anforderungen sollen sich laut Verordnung an den Referenzwerten orientieren, die den nächsten verfügbaren Stand der Technik darstellen. Somit sollen laut Verordnung der SFP_{int} um bis zu $250 \text{ W/m}^3/\text{s}$ unter dem heutigen Grenzwert für Geräte liegen. Für WRG-Systeme wird dann ein Temperaturübertragungsgrad von mindestens 85 % mit Ausnahme des Kreislaufverbundsystems gefordert, das mindestens 80 % einhalten muss. Diese Referenzwerte stellen für die Hersteller ein schwer zu lösendes technisches und wirtschaftliches Problem dar, da sie bei sämtlichen Systemen zur WRG an physikalische und ökonomische Grenzen stoßen.⁹⁴

Zusammenfassend ist als Ergebnis der Dissertation die WRG heute unter betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten positiv zu bewerten. In individuellen Fällen können aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen die wirtschaftlichen Ergebnisse sehr stark abweichen und auch zu Verlusten führen. Es stellte sich dabei bereits zwingend die Frage, ob es überhaupt sinnvoll ist in der EU-Verordnung allgemeine und starre gesetzliche Festlegungen zu fordern.

Letztlich soll die Auslegung einer WRG dazu führen, dass ein möglichst hoher Kapitalwert der Ersparnisse oder eine möglichst hohe CO_2 -Einsparung, also der maximale Ertrag, im Einzelfall ermöglicht wird. Mit der mehrdimensionalen Optimierung auf Basis einer relationalen Berechnungsmethodik kann dieses Ziel erreicht werden. Dabei kann ein ökonomisches oder auch ein ökologisches Optimum oder Maximum angestrebt werden. Dabei muss entschieden werden, ob das ökonomische oder ökologische Optimum oder Maximum ausgewählt werden soll, da beide nicht gleich sind, bzw. mit welchem CO_2 -Preis eine vergleichende monetäre Bewertung erfolgen kann. Mit Berücksichtigung eines CO_2 -Preises kann der ökologische Einfluss in die monetäre Optimierung einfließen. Damit kann ein Gesamtoptimum zwischen dem monetären und ökologischen Optimum erreicht werden.

Diese neu entwickelte Berechnungsmethodik aus Kapitel 5.1.4 bildet einen wesentlichen Kern der Dissertation und wird detailliert beschrieben. Dabei spielen Näherungsgleichungen eine bedeutende Rolle, da sich bei den notwendigen Geschwindigkeitsänderungen die spezifischen Wärmeübertragerkennwerte verändern. Mit der mehrdimensionalen und relationalen Optimierung kann

⁹⁴ Kaup, C., Die neue Verordnung zur Ökodesign-Richtlinie der EU, Springer-VDI Verlag, HLH 02/2015

in jedem Fall verhindert werden, dass eine zu kleine oder eine zu große WRG ökonomisches oder ökologisches Potenzial vergeudet.

Die Erweiterung der Bilanzgrenze, bezogen auf die Investitionsausgaben, von der reinen WRG auf die Energieerzeugungsanlagen hat großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der WRG, da die WRG die Dimensionierung der Wärme- und Kälteerzeugung innerhalb der Bilanzgrenze beeinflusst. Weiter wurde bereits im Kapitel 5.2 und 5.3 deutlich, dass zur Erreichung des maximalen Ertrags der WRG die Auslegungsluftgeschwindigkeiten signifikant von heute rund 1,6 m/s auf rund 1,1 m/s sinken müssen.

Wenn die Referenzwerte der EU 1253/2014 für eine Überarbeitung der Ökodesignverordnung tatsächlich genutzt werden sollen, zeigt das Kapitel 5.2, dass die zurückgewonnene thermische Energie um rund 15 % steigen wird, während sich die Druckverluste und damit der elektrische Energieaufwand durch den enormen notwendigen apparativen Aufwand fast verdoppeln werden, wenn die Strömungsgeschwindigkeiten auf dem Status quo verharren. Die Strömungsgeschwindigkeit muss auch deswegen auf etwa 1,1 m/s reduziert werden, um die berechneten Optima zu erreichen, wie die Ergebnisse der mehrdimensionalen Optimierungen der Feldstudie belegen. Eine weitere Absenkung der Luftgeschwindigkeiten ist jedoch nicht zielführend, da dann ein Teillastbetrieb praktisch unmöglich wird. Aus diesem Grund ist die ökologische mehrdimensionale Optimierung auf Basis der CO₂-Reduktion nicht sinnvoll umsetzbar, da dann die Luftgeschwindigkeiten auf rund 0,6 m/s sinken müssten. Die Ergebnisse dieser Feldstudie (Kapitel 5.2) wurden im Rahmen der Review-Verfahren zur Ökodesignverordnung in Ventilation Units, Ecodesign and Energy Labelling, Preparatory Review Study, Phase 1.1 and phase 1.2, Final Report, TASK 3, Use-phase Impacts ausführlich diskutiert und zitiert.⁹⁵

Aus Kapitel 5.3 wurde auch deutlich, dass die Kälterückgewinnung im Sommerfall nahezu unbedeutend ist und die WRG im Winterfall für die Bestimmung des Optimums maßgebend ist. Aus den Berechnungen wurde zudem ersichtlich, dass ein klares Nord-Süd-Gefälle in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit der WRG existiert. In der gleichen Größenordnung beeinflusst die Laufzeit die Wirtschaftlichkeit der WRG. Deutlich wurde auch, dass die Referenzwerte nach EU 1253/2014 keinen Sinn ergeben, da sie insbesondere im Süden Europas zu Verlusten führen. Sogar im Norden Europas können durch eine mehrdimensionale Optimierung der WRG größere jährliche Differenzbeträge und damit Kapitalwerte erwirtschaftet werden, als dies mit der Anwendung der Referenzwerte selbst bei sehr niedrigen Luftgeschwindigkeiten (etwa 1,1 m/s) möglich wäre. Mit

⁹⁵ <https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Ventilation%20Units%20TASK%203%20Final%20Report%202020-09-10.pdf>

einer mehrdimensionalen Optimierung kann ein Verlust in allen Fällen europaweit verhindert werden. Die Ergebnisse aus Kapitel 5.3 machen deutlich, dass die optimalen Temperaturübertragungsgrade je nach Lokalität oder Laufzeit zwischen rund $\Phi_t = 20\%$ (im Süden bei geringen Laufzeiten) und $\Phi_t = 78\%$ (im Norden bei hohen Laufzeiten) variieren. Auch die weiteren Analysen (vergleiche Kapitel 5.2.3 und 5.3.2) haben gezeigt, dass die Luftgeschwindigkeit in den Auslegungen gesunken ist und noch weiter deutlich sinken muss.

Um den Einfluss des Aufstellungsorts berücksichtigen zu können, kann die jeweilige Außenlufttemperatur (z. B. die minimalen Außenlufttemperaturen) als Indikator zur Bestimmung der Temperaturübertragungsgrade verwendet werden, da der Winterbetrieb europaweit für die Optimierung bestimmend ist. Die Nutzung der tiefsten Außenlufttemperatur hat den Vorteil, dass damit ein kontinuierlicher und diskreter Einfluss des Standorts gewährleistet wäre. Die alternative Nutzung von Klimazonen hätte dagegen den entscheidenden Nachteil, dass es zwingend zu nicht stetigen Festlegungen am Rand der Klimazone kommt. Zudem ist die Definition von Klimazonen nicht trivial und führt zu langen Diskussionen zu deren Festlegung.

Es wird auch belegt, dass neben der Laufzeit und dem Standort insbesondere der spezifische Wärmepreis und die Ablufttemperatur einen großen Einfluss auf den optimalen Temperaturübertragungsgrad der WRG haben. Die spezifischen Elektroenergiepreise sowie der spezifische Druckabfall der WRG beeinflussen im Wesentlichen die optimale Strömungsgeschwindigkeit und sind damit die signifikanten Stellschrauben des Elektroenergiebedarfs.

Die Ergebnisse des Kapitels 5.4 zeigen, dass auf Basis von individuellen Rahmenbedingungen ein betriebswirtschaftliches Optimum oder Maximum im jeweiligen Anwendungsfall gefordert werden kann. Eine Festlegung kann in definierten Grenzen allgemeingültig in Form von nicht linearen multiplen Regressionen erfolgen. Diese Optima bestehen aus korrespondierenden Wertepaaren, die sich aus der jeweils optimalen RWZ und dem dazugehörigen SFP-Wert ergeben. Diese Optima konnten vereinfacht auf Basis von mehrdimensionalen Optimierungsberechnungen und einer darauf aufbauenden nicht linearen multiplen Regression für die genannten individuellen Randbedingungen abgebildet werden. Mit den unabhängigen Variablen Mindestaußenlufttemperatur (Auslegungstemperatur im Winter), Ablufttemperatur im Winter und der Laufzeit können die abhängigen Variablen beschrieben werden, wenn die Energiepreise mittelfristig als konstant angesehen werden. Hierbei können die Modelle unter Berücksichtigung der Bilanzgrenze und der Lastfälle (Volllastbetrieb und Teillastbetrieb) berechnet werden. Auf die Einbindung der Energiepreise konnte verzichtet werden, da sich diese im Betrachtungszeitraum nur wenig änderten. Es wurde erkennbar, dass das Modell mit erweiterter Bilanzgrenze nicht nur aus Gründen der Regressionsgüte dem Modell mit einfacher Bilanzgrenze vorzuziehen ist, sondern auch, weil die

WRG primär zur Wärme- und Kältebereitstellung genutzt und die primärenergetische Erzeugung von Wärme und Kälte reduziert werden soll. Damit würde eine politische Förderung hin zur vorrangigen Nutzung der Effizienzmaßnahme WRG vorangetrieben werden.

Auch zeigte sich, dass der Teillastbetrieb bei geringerer Last keinen großen Einfluss auf die optimale RWZ, aber auf die Strömungsgeschwindigkeit und den Druckabfall und damit auf den SFP-Wert hat.

Die Güte des Modells kann mit der Auswertung der Studiendaten (Kapitel 5.2) verglichen werden. In Braun sind die Ergebnisse der Feldstudie und in Blau die Ergebnisse der multiplen Regression dargestellt.

Tabelle 14: Vergleich der optimalen \varnothing Temperaturübertragungsgrade und Druckverluste der WRG der Feldstudie (braun) mit der multiplen Regression (blau) mit erweiterter Bilanzgrenze

2.350 h/a	3D-Optimum	ΔP	w
	%	Pa	m/s
Helsinki	66,7	61	1,10
-17,5 °C	65,1	79	1,13
Mannheim	66,3	50	1,01
-10,5 °C	63,8	65	1,08
Lissabon	58,2	32	0,96
2,5 °C	54,9	33	1,06
5.000 h/a	3D-Optimum	ΔP	w
	%	Pa	m/s
Helsinki	74,3	72	1,01
-17,5 °C	72,5	94	1,04
Mannheim	72,9	58	0,95
-10,5 °C	71,2	80	0,99
Lissabon	63,8	35	0,90
2,5 °C	62,3	47	0,97
8.760 h/a	3D-Optimum	ΔP	w
	%	Pa	m/s
Helsinki	79,1	85	0,97
-17,5 °C	77,6	112	0,98
Mannheim	77,5	69	0,92
-10,5 °C	76,3	98	0,94
Lissabon	68,7	41	0,88
2,5 °C	67,5	66	0,91

Die Temperaturübertragungsgrade und die Luftgeschwindigkeit der beiden Modelle im Optimum stimmen relativ gut überein. Der zulässige Druckverlust, der den elektrischen Aufwand repräsentiert, liegt in der Feldstudie relativ bis zu rund 30 %, aber absolut nur rund 10 bis 30 Pa niedriger als die Ergebnisse des Regressionsmodells. Der elektrische Aufwand hat jedoch einen geringeren Einfluss, da der thermische Nutzen einer WRG um den Faktor 10 bis 20 höher liegt.

Am sinnvollsten wird jedoch abschließend die individuelle Optimierung jeder einzelnen WRG bewertet, da dann sämtliche Einflussparameter individuell und ganzheitlich einfließen können. Diese Güte der Optimierung kann keine allgemeingültige Festlegung liefern, da aufgrund der Komplexität der Rahmenparameter und aufgrund allgemeiner, mittlerer Rahmenbedingungen ein umfassendes, immer zutreffendes Modell nicht erstellt werden kann. Auch die Festlegung von Gleichungssystemen auf Basis von multiplen Regressionen kann nur mit einem Bestimmtheitsmaß erfolgen, welches zwar bei etwa 0,9, aber kaum bei 1 liegen wird. Zudem sind die Grundlagen zur Bestimmung der Regressionsparameter ebenfalls mit Näherungsgleichungen bestimmt worden, die ebenfalls nicht exakt sein können.

Trotzdem wäre es der EU-Kommission zu empfehlen, eine Festlegung auf Basis der gewonnenen nicht linearen Polynome zu treffen, welche die optimale WRG modellhaft widerspiegelt. Leider sträubt sich die EU-Kommission bis heute (Stand April 2022) dagegen, diesen Ansatz primär zu nutzen, da aus ihrer Sicht diese Festlegung „Spielräume“ eröffnet und zu Schlupflöchern führen könnte. Der Autor hält dem entgegen, dass durch eine Deklarationsverpflichtung dem entgegen gewirkt werden kann. Der Hersteller könnte verpflichtet werden, die Parameter (Auslegungstemperatur der Außenluft und der Abluft sowie der Laufzeit) zu deklarieren, die der Optimierung zugrunde liegen. Mit diesen Angaben könnte der Anwender die Tauglichkeit der WRG mit seinen Anforderungen im konkreten Anwendungsfall überprüfen und bewerten. Da WRG-Systeme in NWG durch Fachleute installiert und in Betrieb genommen werden, kann die entsprechende Fachkunde zur Beurteilung der Effizienzkriterien vorausgesetzt werden. Alleine aus Gewährleistungsgründen würde eine bewusst fehlerhafte und manipulative Festlegung der Werte vom Markt nicht akzeptiert werden. Auch wenn durch eine „variablere“ Festlegung der Anforderungen etwaige „Schlupflöcher“ entstehen können, kann damit keineswegs eine starre Festlegung legitimiert werden, welche bewusst die tatsächlich gegebenen Einflussfaktoren ignoriert. Es ergibt keinen Sinn, eine bewusst „falsche“ Festlegung zu treffen, die nur den Vorteil hätte, „eindeutiger“ zu sein. Allerdings ist es bereits durch die wissenschaftliche Grundlage dieser Dissertation gelungen, die EU-Kommission von den enorm überhöhten Anforderungen der Referenzwerte abzubringen.

In der vorliegenden Review Studie vom 25.11.2019 wurde ein Temperaturübertragungsgrad von 77 %⁹⁶ für alle WRG-Systeme bei reduzierten SFP-Werten vorgeschlagen, die bei Volumenströmen über 2 m³/s bei maximal 460 W/m³/s für die WRG liegen sollen (Ausnahme KVS mit 960 W/m³/s).

Damit rückte die Kommission bereits deutlich von den in der Verordnung geforderten Referenzwerten (85 % respektive 80 % bei KVS) ab. Dieser immer noch starre Mindestübertragungsgrad von 77 % wird in dem Papier einheitlich für alle Systeme, auch für KVS, vorgeschlagen. Aber auch der empfohlene Mindestübertragungsgrad von 77 % entschärfte die Situation nur teilweise, da der apparative Aufwand gegenüber den heute üblichen 73 % um 24 % steigen müsste (NTU = 3,348 zu NTU = 2,704), während der Nutzen der WRG dann nur um 5,5 % (77 % zu 73 %) steigen würde. Der diskutierte Wert von 77 % wurde mit Hinweis auf die Feldstudie aus Tabelle 8 (Maximalwert für Helsinki und 8.760 h/a) gewählt. Zitat aus der Review Studie: *„Proposal to increase limit values for minimum thermal efficiency to 77 % (value resulting in maximized economic savings in cold climates when lower energy-prices are assumed).“*⁹⁷ Im Rahmen der Review Studie wurden der Kommission vom Autor ab 2019 erste wesentliche Ergebnisse der Dissertation im Rahmen von zwei Präsentationen vorgestellt.^{98, 99}

Diese Veröffentlichung (Kapitel 5.2) ist in die Review Studie der EU maßgeblich eingeflossen. Zitat der Review Studie: *„Main conclusion of this European study is that - although the overall energy consumption and related emissions in most cases are reduced - it will not always be economically feasible to increase the limit values for HR efficiencies. Short operating times and warmer climate zones both lower the optimal heat recovery efficiency value when economic feasibility is pursued. In such cases the actual energy rates determine the allowable limit values for HR-efficiency. With current energy prices the optimized efficiencies would be around 77 % for a continuously running HR-system in cold climates, to around 31 % for a running time of 2350 hours per annum in warm climate zones (using relative low energy prices of 0.043/ 0.041/ 0.091 €/kWh for heating/ cooling/ electricity respectively).“*¹⁰⁰

⁹⁶ Review Study Phase 1.1 and phase 1.2 / Technical Analysis and update Preparatory Studies / Draft Report / TASK 3. Use-phase Impacts / Review study on Regulations EU 1253/2014 (Ecodesign requirements for ventilation units) and EU 1254/2014 (energy labelling of residential ventilation units)

⁹⁷ Übersetzung ins Deutsche: „Vorschlag, die Grenzwerte für den minimalen thermischen Übertragungsgrad auf 77 % zu erhöhen (Wert, der zu maximalen wirtschaftlichen Einsparungen in kalten Klimazonen führt, wenn niedrigere Energiepreise angenommen werden).“

⁹⁸ https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/UCB_EVIA_Study_2019.pdf

⁹⁹ https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/HOWATHERM%20-%20FGK_UCB_Study_HR_2019.pdf

¹⁰⁰ Übersetzung ins Deutsche: „Die Hauptschlussfolgerung dieser europäischen Studie ist, dass – obwohl der Gesamtenergieverbrauch und die damit verbundenen Emissionen in den meisten Fällen reduziert

Mit diesem Temperaturübertragungsgrad würden sich statistisch bei den heute üblichen 1,55 m/s mittlere Druckverluste von 170 (+ 24 %) = 211 Pa ergeben. Wird der geplante SFP-Wert von 460 W/m³/s berücksichtigt, ergeben sich maximal zulässige Druckverluste von 138 Pa pro Luftseite ($460 / 2 \cdot 0,6$). Also müssen die WRG-Systeme statistisch betrachtet mit einer niedrigeren Luftgeschwindigkeit von 1,25 m/s betrieben werden, um die statistisch ermittelten mittleren 211 Pa auf 138 Pa zu reduzieren. Damit folgt die Review Studie in diesem Punkt den Forschungsergebnissen des Autors im Hinblick auf die Notwendigkeit von niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten. Zudem greift die Review Studie auch die Idee eines Bonus für den SFP-Wert auf, wenn die Anlagen mit einer elektronischen Regelung ausgeliefert werden, welche einen Teillastbetrieb ermöglichen. Damit könnten WRG-Systeme mit einem höheren SFP-Wert ausgelegt werden, wenn sie durch eine vorhandene elektronische Regelung vorrangig in Teillast betrieben werden können, was zu de facto niedrigeren SFP-Werten führt.

Dem folgte der im Consultationforum diskutierte Entwurf. Zitat: *“Since smart controls can significantly reduce the amount of energy needed for ventilation, encouraging the use of smart controls may be considered a complementary method, next to utilizing the last percentages on the parameters Φ and SFP. A bonus on the $SFP_{int-limit}$ is proposed as a means to encourage that. This approach offers an alternative for situations where the default Φ and SFP limits would result in uneconomic application of the HR-system. ... The proposal is to allow a reduction on limit values for $SFP_{int-limit}$ for nonresidential BVU's that have smart controls that are co-supplied with the NRVU's (\geq IDA-C5, following table 12 of EN 16798-3).”*^{101, 102}

werden – es nicht immer wirtschaftlich machbar sein wird, die Grenzwerte für die WRG-Effizienz zu erhöhen. Sowohl kurze Betriebszeiten als auch wärmere Klimazonen senken bei angestrebter Wirtschaftlichkeit den optimalen Wärmeübertragungsgrad. In solchen Fällen bestimmen die tatsächlichen Energiepreise die zulässigen Grenzwerte für die WRG-Effizienz. Bei aktuellen Energiepreisen lägen die optimierten Übertragungsgrade bei etwa 77 % für ein kontinuierlich laufendes WRG-System in kalten Klimazonen bis etwa 31 % für eine Laufzeit von 2.350 Stunden pro Jahr in warmen Klimazonen (bei relativ niedrigen Energiepreisen von 0,043/ 0,041/ 0,091 €/kWh für Heizung/ Kälte/ Strom)”

¹⁰¹ Preparatory Review Study, Phase 1.1 and phase 1.2, Final Report, TASK 6, Options, chapter 4.6, <https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Ventilation%20Units%20TASK%206%20Final%20Report%202020-09-10.pdf>

¹⁰² Übersetzung ins Deutsche: „Da intelligente Steuerungen die für die Belüftung benötigte Energiemenge erheblich reduzieren können, kann die Förderung der Verwendung intelligenter Steuerungen neben der Ausnutzung der letzten Prozentpunkte bei den Parametern Φ und SFP als ergänzende Methode angesehen werden. Um dies zu fördern, wird ein Bonus auf den $SFP_{int-limit}$ vorgeschlagen. Dieser Ansatz bietet eine Alternative für Situationen, in denen die Standardgrenzen für Φ und SFP zu einer unwirtschaftlichen Anwendung des WRG-Systems führen würden. Der Vorschlag besteht darin, eine Reduzierung der Grenzwerte für $SFP_{int-Limit}$ für RLT-Geräte für Zu- und Abluft in NWG zuzulassen, die über intelligente Steuerungen verfügen, die mit den RLT-Geräten mitgeliefert werden (\geq IDA-C5, gemäß Tabelle 12 der EN 16798-3).“

Im aktuellen Entwurf der neuen Verordnung werden zwei Faktoren (control bonus C_1 und C_2) vorgeschlagen, die bei $C_1 = 1,05$ bis $1,15$ (Regelungsfaktor) und $C_2 = 1,1$ (Monitoring Funktionen) liegen. Der maximale SFP_{int} -Wert soll dann wie folgt korrigiert werden:¹⁰³

$$SFP_{int, max} = SFP_{int} \cdot C_1 \cdot C_2 \quad (20)$$

Beide Korrekturfaktoren erreichen in Summe einen Wert von 1,16 bis 1,27 und liegen damit etwa in dem vom Verfasser dieser Dissertation ermittelten Bereich von 1,17 bis 1,32 (vergleiche Kapitel 5.4.6).

Obwohl Feuchteanforderungen zum Beginn der Review Studie nicht Bestandteil der Überarbeitung sein sollten, wurde von Stakeholdern der energetische Nutzen einer Feuchterückgewinnung im Kühlfall diskutiert. So wird hierzu vorgeschlagen, den Feuchteübertragungsgrad ($\Phi_{x_{nrvu}}$) der WRG mit Faktor 0,08 dem trockenen Temperaturübertragungsgrad hinzuzurechnen:¹⁰⁴

$$\Phi_{e_{nrvu}} = \Phi_{e_{nrvu}} + 0,08 \cdot \Phi_{x_{nrvu}} \quad (21)$$

mit:

$$\Phi_{x_{nrvu}} = \frac{(x_{22} - x_{21})}{(x_{11} - x_{21})} \quad (22)$$

Zitat aus dem Entwurf der neuen Verordnung: „*efficiency of the total recovered energy of a NRVU ($\Phi_{e_{nrvu}}$)’ means the aggregation of the efficiency of the humidity recovery for cooling conditions and of the thermal efficiency, determined according to the formula in Annex VII.*”^{105, 106}

Auf welcher wissenschaftlichen, technischen oder ökonomischen Grundlage diese Festlegung für die Kühlung getroffen wurde, entzieht sich der Kenntnis des Verfassers. Da eine Feuchterückgewinnung nicht in allen Fällen sinnvoll ist, wird dieser Ansatz vom Verfasser kritisch gesehen. Außerdem kann nur eine WRG-Bauart (Regenerator) überhaupt Feuchte übertragen.

¹⁰³ EUROPEAN COMMISSION, DRAFT WORKING DOCUMENT ON Ecodesign Requirements for Ventilation Units (Review EU 1253/2014), DRAFT TEXT REVIEWED ECODESIGN REGULATION, Ref. Ares(2021)1548552, Annex VII – 01/03/2021

¹⁰⁴ ebenda

¹⁰⁵ EUROPEAN COMMISSION, DRAFT WORKING DOCUMENT ON Ecodesign Requirements for Ventilation Units (Review EU 1253/2014), DRAFT TEXT REVIEWED ECODESIGN REGULATION, Ref. Ares(2021)1548552, Annex I – 01/03/2021

¹⁰⁶ Übersetzung ins Deutsche: „Der Übertragungsgrad der insgesamt rückgewonnenen Energie einer NWG RLT-Geräts ($\Phi_{e_{nrvu}}$) bezeichnet die Summe des Übertragungsgrads der Feuchtigkeitsrückgewinnung für Kühlbedingungen und des thermischen Übertragungsgrads, bestimmt nach der Formel in Anhang VII“

Eine standortbezogene Festlegung der Anforderungen an die WRG wird zudem seit Mai 2020 als „parallel track“ diskutiert.^{107, 108} Dabei wird explizit die multiple Regression des Autors mit Berücksichtigung des CO₂-Preises aus Tabelle 13 als alternatives Verfahren vorgeschlagen. Insofern ist es gelungen, die Kommission doch noch insoweit zu überzeugen, die weiteren Einflussparameter wie Außen-, Ablufttemperatur und Laufzeit mit den Stakeholdern zu diskutieren. Leider wurden nach dem Consultationforum und dem Entwurf der Verordnung zum März 2021 und in der Zeit danach die Einflussfaktoren Laufzeit und Ablufttemperatur mit mittleren Werten „eingefroren“, also als konstant angenommen.

Der aktuelle Vorschlag der Kommission lautet daher:^{109, 110}

$$\Phi_{e_nr\ddot{u}\text{-min}} = -1,02302 \cdot ODA - 0,05813 \cdot ODA^2 - 0,00134 \cdot ODA^3 + \Phi_{e_nr\ddot{u}\text{-base}} \quad (23)$$

Nur die Außenlufttemperatur (ODA) soll als Kennwert zur Bestimmung des Einsatzorts als Einflussfaktor zur Bestimmung des Optimums der WRG verwendet werden, wenn der Einsatzort der WRG bekannt ist ($\Phi_{e_nr\ddot{u}\text{-base}}$ ist konstant und basiert auf einer Ablufttemperatur von etwa 20 °C und einer Laufzeit von 5.000 h/a). In den Fällen, in denen der Einsatzort nicht bekannt ist, hat der Verfasser der Kommission vorgeschlagen, als Default-Wert für die Außenlufttemperatur -15 °C festzulegen. Damit wären die Anforderungen in sich konsistent und nicht durch die Nutzung zweier völlig unterschiedlicher Anforderungen widersprüchlich. Auch damit würde ein Anreiz geschaffen, den Einsatzort der Anlagen zu recherchieren, damit die WRG in vielen Fällen weder unnötig groß oder zu klein dimensioniert würde. Es ist aber zumindest 2021 gelungen, die pauschale Forderung für einen europaweiten Mindestübertragungsgrad von 77 % kritisch zu hinterfragen. Falls es trotz

¹⁰⁷ Review study on the Ecodesign and Energy Regulations on ventilation units, Discussion Document for 2nd SH meeting, REVIEW STUDY VENTILATION UNITS Project: Technical Assistance Impact Assessment Revision of Ventilation Unit Regulations, <https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/20200416%20-%20Discussions%20Document%202nd%20Stakeholder%20Meeting%20Review%20Study%20VUs.pdf>

¹⁰⁸ Preparatory Review Study, Phase 1.1 and phase 1.2, Final Report, TASK 6, Options, chapter 4.2.2, <https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Ventilation%20Units%20TASK%206%20Final%20Report%202020-09-10.pdf>

¹⁰⁹ EUROPEAN COMMISSION, DRAFT WORKING DOCUMENT ON Ecodesign Requirements for Ventilation Units (Review EU 1253/2014), DRAFT TEXT REVIEWED ECODESIGN REGULATION, Ref. Ares(2021)1548552 – 01/03/2021

¹¹⁰ Polverini, D., Heat recovery in AHUs, and the new ecodesign regulation, European Commission, DG GROW, presentation EFRIARC-forum, 25.11.2021

dieser Arbeit erneut zu einer pauschalen Festlegung kommen soll, wird aktuell das Festhalten an den bisherigen 73 % vorgeschlagen.^{111, 112}

Da die Verordnung Mindestkriterien für Φ und den SFP_{int} fordert, wird im aktuellen Entwurf zur Umrechnung der Werte dem Vorschlag des Kapitels 5.4.7 gefolgt, wenn in einzelnen Anwendungsfällen höhere Übertragungsgrade verwendet werden.

Es wird aktuell vorgeschlagen, proportional zur höheren RWZ (NTU-basiert) einen größeren SFP-Wert in Form eines Energieeffizienzbonus (E) zuzulassen.¹¹³

Wenn $\Phi_{e_nrvu} = \Phi_{e_nrvu_min}$ dann ist $E = 1$ und wenn $\Phi_{e_nrvu} > \Phi_{e_nrvu_min}$ dann wird:

$$E = \frac{\Phi_{e_nrvu}}{1 - \Phi_{e_nrvu}} \cdot \frac{1 - \Phi_{e_nrvu_min}}{\Phi_{e_nrvu_min}} \quad (24)$$

Mit dem Korrekturwert E wird der zulässige maximale SFP_{int} -Wert multipliziert.

Insgesamt haben die Veröffentlichungen zu dieser Dissertation dazu beigetragen, dass sich der Entwurf der neuen Verordnung EU 1253/2014 in wesentlichen Punkten vom ursprünglichen Ansatz unterscheidet.

¹¹¹ Preparatory Review Study, Phase 1.1 and phase 1.2, Final Report, TASK 6, Options, chapter 4.2.1, <https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Ventilation%20Units%20TASK%206%20Final%20Report%202020-09-10.pdf>

¹¹² EUROPEAN COMMISSION, DRAFT WORKING DOCUMENT ON Ecodesign Requirements for Ventilation Units (Review EU 1253/2014), DRAFT TEXT REVIEWED ECODESIGN REGULATION, Ref. Ares(2021)1548552, Annex III – 01/03/2021

¹¹³ EUROPEAN COMMISSION, DRAFT WORKING DOCUMENT ON Ecodesign Requirements for Ventilation Units (Review EU 1253/2014), DRAFT TEXT REVIEWED ECODESIGN REGULATION, Ref. Ares(2021)1548552, Annex III – 01/03/2021

7. Ergänzende Methodenkritik

Die im Rahmen dieser Dissertation erstellten Arbeiten basieren auf Annahmen und Festlegungen, die der Verfasser dieser Arbeit treffen musste, um den Aufwand in vertretbaren Grenzen zu halten. Insbesondere im Nachgang zu den Veröffentlichungen ergaben sich aber weitere Überlegungen, die ebenfalls interessant sind und in weiteren Arbeiten untersucht werden könnten. Die hier vorgestellte Methodenkritik ist nicht als Fehlerkorrektur zu verstehen, sondern als Hinweis zur Einordnung der Erkenntnisse und der Rahmenbedingungen sowie Grenzen, unter denen die Ergebnisse gewonnen wurden.

7.1 Einfluss volatiler Energiepreise

Auf der Grundlage statistischer Mittelwerte der Energiepreise im Betrachtungszeitraum wurden die multiplen Regressionsmodelle entwickelt. Die Energiepreise unterliegen zurzeit einer hohen Volatilität. Daher können sich die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeits- und Optimierungsberechnungen in Abhängigkeit zu den tatsächlichen Preisen maßgeblich ändern. Im Verlauf des Jahres 2021 sind die Wärmepreise stark angestiegen. Insbesondere der Gaspreis ist in 2021 gegenüber dem Vorjahr um 56,1 % gestiegen.¹¹⁴ Die Preise für Strom sind 2021 aber europaweit im Mittel bei 8,6 Cent/kWh relativ stabil geblieben.¹¹⁵ Es kann aber nicht zwangsläufig davon ausgegangen werden, dass diese Preise dauerhaft auf diesem Niveau verharren.

In der Vorveröffentlichung¹¹⁶ zum zweiten kumulativen Teil der Dissertation wurden höhere mittlere Energiepreise für Deutschland mit 0,08 €/kWh für Wärme und 0,17 €/kWh für Elektroenergie zur Berechnung der Optima verwendet, die gegenüber den in der Dissertation verwendeten mittleren europäischen Werten nahezu doppelt so hoch waren.

Die Ergebnisse dieser Optimierung sind in Tabelle 15 dargestellt (vergleiche mit Tabelle 8). Der Vergleich mit den Werten, die mit niedrigeren Preisen der Tabelle 15 berechnet wurden, zeigt, dass die optimalen Temperaturübertragungsgrade mit höheren Wärmepreisen deutlich um 6 bis 14 %-Punkte je nach Laufzeit und Lokalität steigen. Die Luftgeschwindigkeiten sinken im Optimum um 0 bis zu 0,2 m/s (2.350 h/a). Die tolerierbaren Druckverluste steigen je nach Laufzeit und Standort moderat um rund 10 bis 30 Pa.

Interessanterweise hat bereits die Review Studie aus März 2020 diesen Vergleich der beiden Tabellen vorgenommen.

¹¹⁴ <https://www.finanzen.net/rohstoffe/erdgas-preis-natural-gas>

¹¹⁵ <https://strom-report.de/strompreise-europa/#strompreise-europa-industrie-unternehmen>

¹¹⁶ Kaup, C., European Study on Heat Recovery in Non-residential Buildings, Rehva Journal 5/2018

Tabelle 15: Mögliche optimale \varnothing Temperaturübertragungsgrade und Druckverluste der WRG bei höheren Energiepreisen

		RWZ im 3D- Optimum	Δ Diff.- Kosten	Δp mittel	w
		%	€/a	Pa	m/s
2.350 h/a					
Nord	Helsinki	71	6.944	61	1,01
Mitte	Mannheim	65	4.097	47	1,01
Süd	Lissabon	45	773	21	1,03
		RWZ im 3D- Optimum	Δ Diff.- Kosten	Δp mittel	
		%	€/a	Pa	
5.000 h/a					
Nord	Helsinki	79	16.945	91	1,00
Mitte	Mannheim	75	10.762	71	0,99
Süd	Lissabon	60	2.725	35	0,99
		RWZ im 3D- Optimum	Δ Diff.- Kosten	Δp mittel	
		%	€/a	Pa	
8.760 h/a					
Nord	Helsinki	83	30.774	119	1,01
Mitte	Mannheim	80	20.616	96	0,99
Süd	Lissabon	68	6.005	51	0,98

Letztlich wäre eine Optimierung unter Berücksichtigung einer erwarteten Energiepreissteigerung vor dem Hintergrund aktuell steigender Energiepreise zielführender gewesen. Bei einer angenommenen Preissteigerung von 1,7 % (vergleiche Tabelle 7) ergibt eine beispielhafte Optimierung eine Steigerung der RWZ im Optimum von rund einem Prozentpunkt. Bei den aktuell stark steigenden Energiepreisen werden die optimalen RWZ weiter signifikant steigen.

Zur Abschätzung des Einflusses der Energiepreise könnten auch weitere multiple Regressionen erstellt werden. Mit der Berücksichtigung des Einflusses der Energiepreise hätte sich die Datenbasis für die multiple Regression jedoch wesentlich erhöht. Bei jeweils nur fünf zu untersuchenden Preispaaren für Wärme- und Elektroenergie hätte sich die verwendete Datenbasis von 16 Datensätzen um den Faktor 25 auf 400 Datensätze erhöht. Alternativ könnte der relative Einfluss auf das Gesamtergebnis auf der Grundlage von einfach zu erstellenden nicht linearen Einfachregressionen für die verschiedenen Einflussfaktoren mit größerer Unsicherheit näherungsweise abgebildet werden, da die Variablen weder korrelieren noch kausal zusammenhängen.

Des Weiteren sind die Preissteigerungsraten ab dem Jahr 2021 stark angestiegen. Auch dieser Einfluss wurde in der vorliegenden Dissertation nicht berücksichtigt. Dies betrifft auch die Investitionsaufwendungen für die WRG sowie die Investitionsänderungen für die Wärme- und Kälteerzeugung.

Letztlich waren im Jahr 2021 insbesondere die CO₂-Preise einer deutlichen Steigerung unterworfen. Während CO₂-Zertifikate im Jahr 2020 an der Leipziger Energiebörse noch mit 25 €/t. gehandelt wurden, lag der Preis in 2021 deutlich höher bei im Durchschnitt rund 60 €/t. Am 07.01.2022 lag der Preis bei 86,8 €/t.¹¹⁷ Es kann angenommen werden, dass die CO₂-Preise in der Zukunft noch weiter ansteigen werden. Der Einfluss einer variablen CO₂-Bepreisung könnte ebenfalls in weitere Betrachtungen einfließen, zumal die Europäische Kommission mit dem Green Deal CO₂-Einsparungen anstrebt. Würde in der multiplen Regression der CO₂-Preis Berücksichtigung finden, so würde bei angenommenen fünf zu betrachtenden CO₂-Preisen eine Datenbasis von 400 (s. o.) mal 5, also 2.000 Datensätze, zugrunde gelegt werden. Damit würde der Rahmen der Arbeit gesprengt. Diese Ansätze könnten in weiteren Arbeiten betrachtet werden.

7.2 Einfluss unterschiedlicher Luftmengenverhältnisse (Zu- und Abluft)

7.2.1 Theoretische Betrachtungen ¹¹⁸

Die bisherigen Ausführungen beziehen sich auf die WRG, die mit ausgeglichenen Massenströmen (Abluftmenge = Zuluftmenge) betrieben wird. Dies ist der Regelfall, da die abgeführte Abluft durch die gleiche Menge an zugeführter Zuluft ausgeglichen werden muss, weil sich im Raum sonst bei unterschiedlichen Massenstromverhältnissen ein Überdruck oder ein Unterdruck ausbilden würde. Auf dieser Annahme basieren auch die aktuellen sowie die geplanten Festlegungen der EU-Verordnung EU 1253/2014 sowie die bisherigen Arbeiten im Rahmen dieser Dissertation.

Es existieren jedoch Anwendungsfälle, in denen die Luftmengen unterschiedlich sind, da z. B. neben der RLT-Anlage eine Prozesslufttechnische Abluftanlage betrieben wird. In diesem Fall müssen die Luftmengen der RLT-Anlage unterschiedlich sein, um die Mengenbilanz beider Anlagen in Summe ausgleichen zu können. Auch können Fälle mit gewolltem Über- oder Unterdruck im Raum gefordert werden, was unterschiedliche Zu- und Abluftmengen benötigt. Um die Auswirkungen dieser Fälle betrachten zu können, werden mittels der dimensionslosen Wärmeübertragerkennzahl NTU die Daten der WRG für ungleiche Massenstromverhältnisse berechnet.

¹¹⁷ <https://www.boerse.de/rohstoffe/Co2-Emissionsrecht/preis/XC000A0C4KJ2>, siehe auch EUA-Future, <https://www.eex.com/de/>

¹¹⁸ Der Zusammenhang und Einfluss unterschiedlicher Massenströme wurde der EU-Kommission im Stakeholder-Prozess offengelegt, siehe: https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/HOWATHERM%20-%20Heatrecovery%20with%20different%20mass%20flows_L3.pdf

Als Referenz für die weiteren Betrachtungen wird ein Temperaturübertragungsgrad von 73 % (Stufe 2018 nach EU 1253/2014 und Mittelwert der Feldstudie) bei ausgeglichenen Massenströmen gewählt. Hieraus ergibt sich ein $NTU = 0,73/(1-0,73) = 2,704$.

Aus dem jeweiligen Massenstromverhältnis μ kann NTU je Luftseite berechnet werden. Da eine Seite mit konstanter Luftmenge beaufschlagt wird, ändert sich hier weder der Wärmestrom noch die k -Zahl, während auf der anderen Seite, die mit geringerer Menge beaufschlagt wird, der Wärmestrom linear zu $\mu < 1$ abnimmt und zudem die k -Zahl mit $k = f(\mu^{0,4})$ sinkt (vergleiche Kapitel 5.1.2). Dabei wird als Annahme eine konstante und gleich große Anströmfläche auf der Zuluft- wie der Abluftseite angenommen. Zudem sind die wärmeübertragenden Flächen auf beiden Seiten gleich groß, was in der Regel bei Rotoren und Plattenwärmeübertragern der Fall ist.

Hieraus errechnet sich NTU auf der Seite mit geringerer Luftmenge mit der empirisch ermittelten Beziehung:

$$NTU_{\mu} = \frac{NTU_{1:1}}{\mu} \cdot \mu^{0,4} \quad (25)$$

Aus dem Massenstromverhältnis μ und dem berechneten NTU_{μ} bestimmt sich der Temperaturübertragungsgrad je Luftseite mit:

$$\Phi_{\mu} = \frac{1 - e^{(\mu-1) \cdot NTU_{\mu}}}{1 - \mu \cdot e^{(\mu-1) \cdot NTU_{\mu}}} \quad (26)$$

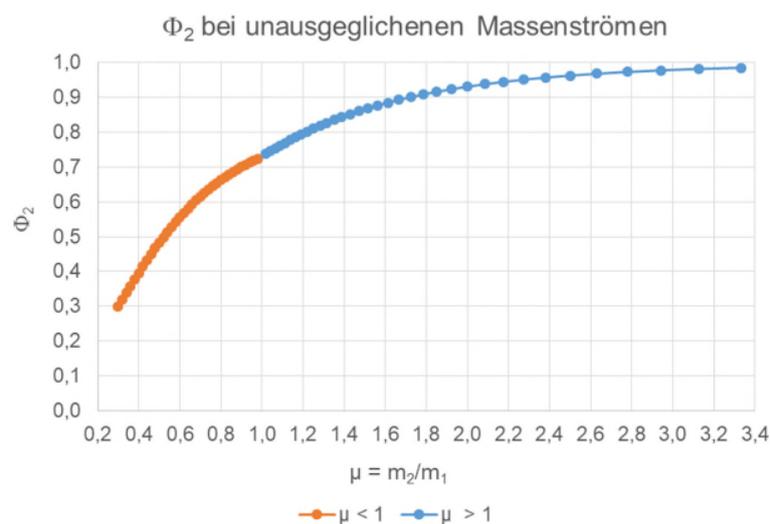


Abbildung 23: Temperaturübertragungsgrad bezogen auf die Zuluft Φ_2 in Abhängigkeit zum Luftmengenverhältnis bei $\Phi_{1:1} = 0,73$ bei $cp_1 = cp_2$

Abbildung 23 zeigt den Temperaturübertragungsgrad bezogen auf die Zuluft, der sich bei folgenden Luftmengenverhältnissen (μ) einstellt, wenn $NTU_{1:1}$ den Wert von 2,704 hat. Bei $\mu < 1$, also bei geringerer Abluftmenge (kleiner als Zuluftmenge), ergibt sich ein deutlich reduzierter Temperaturübertragungsgrad, der z. B. bei $\mu = 0,667$ von $\Phi_{1:1} = 0,73$ auf 0,597 (-18,2 %) sinkt.

Bei größerer Abluftmenge ($\mu > 1$) steigt der Temperaturübertragungsgrad an und liegt z. B. bei $\mu = 1,5$ bei $\Phi_{\mu} = 0,866$ (+18,6 %). Abbildung 23 ist von $\Phi_{1:1}$ abhängig und gilt nur für $\Phi_{1:1} = 0,73$.

Abbildung 24 zeigt die relative Änderung des SFP-Werts oder des zugrunde liegenden Druckverlustes der WRG an. Der Druckabfall der WRG verhält sich proportional zur dimensionslosen Wärmeübertragerkennzahl NTU , wenn die Luftgeschwindigkeit im Verhältnis zum Auslegungswert konstant ist.

$$\Delta p_{korr} = \Delta p_{org} \cdot NTU \quad (27)$$

Bei geringerer Luftmenge und damit proportional geringerer Luftgeschwindigkeit ändert sich der Druckabfall nach der empirisch ermittelten Beziehung (vergleiche Kapitel 5.1.3):

$$\Delta p_{korr} = \Delta p_{org} \cdot NTU \cdot \mu^{1,6} \quad (28)$$

Bei unterschiedlichen Luftmengenverhältnissen ($\mu < 1$ und $\mu > 1$) sinkt der spezifische Elektroenergiebedarf. Zwar bleibt der SFP-Wert einer Luftseite konstant, aber auf der Seite mit geringerer Luftmenge sinken der Differenzdruck und damit die elektrische Leistungsaufnahme deutlich.

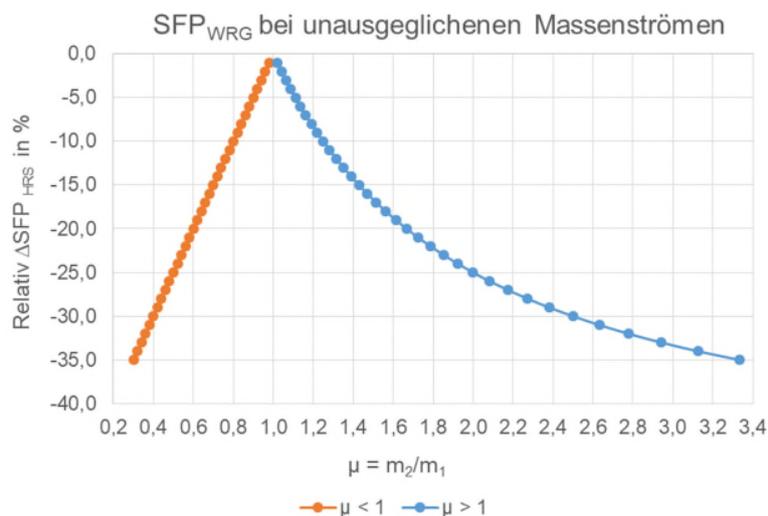


Abbildung 24: Relative SFP-Änderung bei $\Phi_{1:1} = 0,73$ bezogen auf das Luftmengenverhältnis μ

Bei einer Luftmengenänderung mit $\mu = 0,67$ (67 % Abluft- zu 100 % Zuluftmenge) und $\mu = 1,5$ (100 % Abluft- zu 67 % Zuluftmenge) sinkt der Elektroenergiebedarf relativ zur ausgeglichenen Auslegung um 16,7 %. Abbildung 24 ist von $\Phi_{1:1}$ unabhängig.

Da der SFP-Wert im Verhältnis zur tatsächlich nutzbaren thermischen Leistung bewertet werden muss, darf nicht $\Phi_{1:1}$ betrachtet werden, sondern Φ_2 , also der Temperaturübertragungsgrad bezogen auf die Zuluftseite (vergleiche Abbildung 23).

Eine höhere Abluftmenge ($\mu > 1$) beeinflusst den Temperaturübertragungsgrad positiv, da mehr „Abwärme“ zur Verfügung steht und damit die Zulufttemperaturdifferenz vergrößert wird. Jedoch wird die Zuluftmenge reduziert, sodass in der Multiplikation die nutzbare thermische Leistung bezogen auf die (hohe) Abluftseite verringert ist.

Im gewählten Beispiel steigt zwar der Temperaturübertragungsgrad um 18,6 % von 0,73 auf 0,866, aber die Zuluftmenge reduziert sich um $1 - \mu = 0,333$. Somit sinkt die nutzbare thermische Leistung (bezogen auf den Abluftstrom) letztlich um ca. 21 % ($1,186 \cdot 0,667 = 0,791$).

Dagegen sinkt bei $\mu < 1$ der Temperaturübertragungsgrad signifikant, da in diesem Fall weniger „Abwärme“ zur Verfügung steht, aber die Zuluftmenge bleibt konstant.

Abbildung 25 zeigt die relative Änderung der zurückgewonnenen Wärmeleistung in Abhängigkeit des Luftmengenverhältnisses bezogen auf den jeweils größeren Luftstrom.

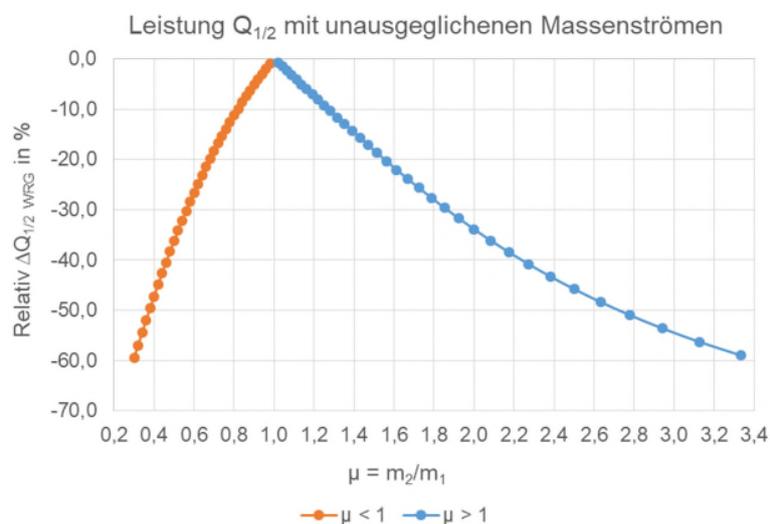


Abbildung 25: Relative Q-Änderung bei $\Phi_{1:1} = 0,73$ bezogen auf das Luftmengenverhältnis μ

Auf eine weitere explizite theoretische Betrachtung dieses Einflusses wird verzichtet, da es sich um einen Sonderfall handelt. Allerdings sollte eine europäische Regelung diesen prinzipiellen Zusammenhang nicht gänzlich unberücksichtigt lassen. Eine Begrenzung der maximal möglichen Massenstromverhältnisse scheint geboten, um den Einfluss auf die wirtschaftlichen Kennwerte zu begrenzen. Zudem hat das Luftmengenverhältnis einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (siehe Kapitel 7.2.2). Daher wird der Einfluss in diesem Kapitel empirisch

aufgezeigt. Der Autor hat der Kommission vorgeschlagen, die Festlegungen der WRG nur dann zu fordern, wenn die Luftmengen im Bereich der EN 308¹¹⁹ liegen also zwischen $\mu = 0,67$ bis $1,5$. Dieser Vorschlag wurde bisher nicht vom Ordnungsgeber aufgenommen oder diskutiert.

Zur Begrenzung der Luftmengenverhältnisse müssen ebenfalls die Luftgeschwindigkeiten betrachtet werden. Die bisherigen Ausführungen gelten für den jeweiligen Auslegungsfall. Hierbei bestimmt der große Volumenstrom in der Regel die Auslegungsluftgeschwindigkeit. Die Luftgeschwindigkeit des „kleinen“ Volumenstroms liegt bei angenommener gleicher Anströmfläche entsprechend niedriger. Wäre z. B. die Auslegungsgeschwindigkeit des „großen“ Luftstroms $1,5$ m/s und $\mu = 0,667$, so ergäbe sich auf der Luftseite mit dem „kleineren“ Volumenstrom im Auslegungsfall eine Luftgeschwindigkeit von 1 m/s. Würde als Grenze für den Teillastfall eine Mindestluftgeschwindigkeit von $0,4$ m/s angenommen werden, so könnte in diesem Fall eine Teillastmenge von maximal $0,4 / 1,0$, also 40% , erreicht werden, da sonst auf der Luftseite mit geringer Menge die Mindestgeschwindigkeit unterschritten werden würde. Darunter könnte ggf. ein stabiler Wärmeübergang nicht mehr erreicht werden.

Es wird offensichtlich, dass es bei unterschiedlichen Luftmengenverhältnissen zu Problemen kommen kann, insbesondere je niedriger die Auslegungsgeschwindigkeit ist, je unterschiedlicher die Luftmengen sind und je weiter die Anlagen in der Teillast betrieben werden sollen.

Dies wird vor allem dann problematisch, wenn auf der Luftseite mit geringer Menge eine turbulente Strömung nicht mehr aufrechterhalten werden kann und damit die WRG nicht mehr stabil betrieben werden kann (siehe auch Kapitel 5.1.4).

7.2.2 Einfluss des Luftmengenverhältnisses auf die Wirtschaftlichkeit¹²⁰

Wie dargelegt können unterschiedliche Luftmengenverhältnisse einen deutlichen Einfluss auf die Leistungen und damit auf die Wirtschaftlichkeit der Wärmerückgewinnungssysteme haben. Zwar handelt es sich dabei um Sonderfälle (vergleiche Kapitel 7.2.3), jedoch muss die EU-Verordnung auch für diese Sonderfälle eine Regelung vorsehen. Jedenfalls kann der Einfluss nicht unberücksichtigt bleiben.

Daher wurde das in Kapitel 5.3.1 betrachtete mittlere Gerät (mit 14.000 m³/h) auch mit unterschiedlichen Abluftmengen ausgelegt. Hierbei wird die WRG mit Luftmengenverhältnissen von

¹¹⁹ DIN EN 308: Wärmeaustauscher – Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft- und Luft/Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen; Deutsche Fassung EN 308:1997

¹²⁰ Der Zusammenhang und Einfluss unterschiedlicher Massenströme wurde der EU-Kommission im Stakeholder-Prozess offengelegt, siehe: https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/HOWATHERM%20-%20Heatrecovery%20with%20different%20mass%20flows_L3.pdf

$\mu = 0,67$ (9.380 m³/h Abluft) bis $\mu = 1,5$ (21.000 m³/h Abluft) berechnet. Die Zuluftmenge wurde in diesem Fall als konstant angenommen. Im ersten Schritt werden die Betrachtungen für den mittleren Standort Mannheim bei den Laufzeiten 2.350 h/a, 5.000 h/a und 8.760 h/a durchgeführt.

Dazu wurde die WRG auf Basis eines KVS-Systems auf die jeweiligen Luftmengenverhältnisse individuell und optimiert ausgelegt. Andere WRG-Systeme, beispielsweise Plattenwärmeübertrager oder Rotoren, können nicht derart individuell angepasst werden, da dort beide Luftseiten systembedingt geometrisch identisch sind. Die Auslegungen erfolgten mit einem Temperaturübertragungsgrad, der bei ausgeglichenen Luftmengen bei $\Phi_{1:1} = 73$ % lag.

Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen. Es wird ersichtlich, dass der Kapitalwert der Ersparnisse bei 8.760 h/a im Auslegungspunkt und bei $\mu > 1$ am höchsten ist. Bei geringen Laufzeiten (5.000 h/a und 2.350 h/a) zeigt sich ein Maximum des Kapitalwerts bei $\mu = 1$. Die Investitionsausgaben der WRG erreichen bei $\mu = 1$ ein Minimum.

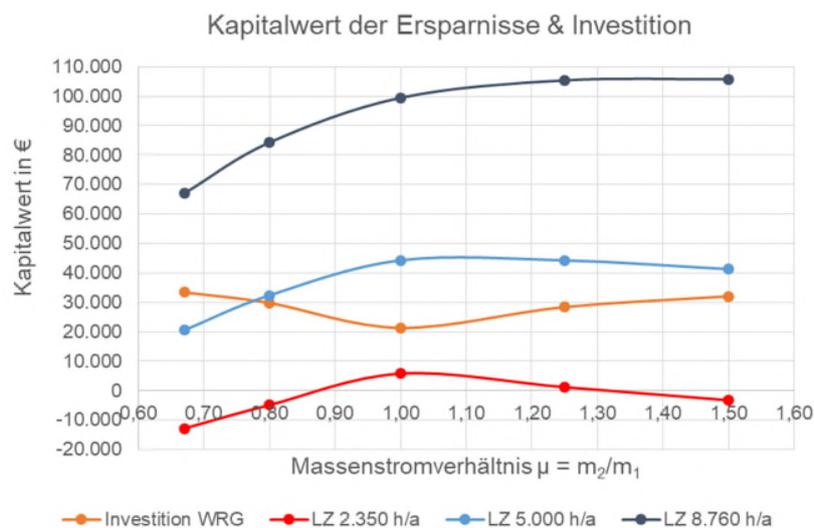


Abbildung 26: Kapitalwerte der Ersparnisse und Investition der WRG bei verschiedenen Laufzeiten

Abbildung 27 zeigt den Verlauf der Amortisationszeiten bei 5.000 und 8.760 h/a. Bei geringerer Laufzeit (2.350 h/a) ergeben sich meist Amortisationszeiten, die über der Nutzungsdauer liegen. Daher ist diese geringe Laufzeit in der Abbildung nicht dargestellt worden. Die geringsten Amortisationszeiten ergeben sich sonst bei ausgeglichenen Massenströmen ($\mu = 1$). Insbesondere bei geringeren Abluftmengen ($\mu < 1$) steigen die Amortisationszeiten deutlich an als bei $\mu > 1$.

In der weiteren Analyse wurde der Einfluss des Standorts an den Beispielen Helsinki, Lissabon und Mannheim (analog zu Kapitel 5.2.1) bei einer mittleren Laufzeit von 5.000 h/a betrachtet. Abbildung 28 zeigt den Verlauf der Kapitalwerte für die drei Standorte. Es wird im Vergleich mit Abbildung 26 wiederholt offensichtlich, dass der Einfluss des Standorts (Klima) in der gleichen Größenordnung liegt wie der Einfluss der Laufzeit.

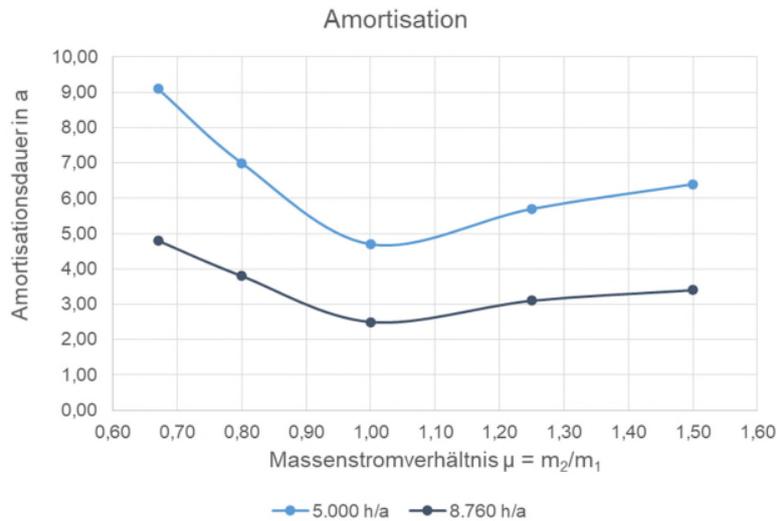


Abbildung 27: Amortisationszeiten der WRG am mittleren Gerät

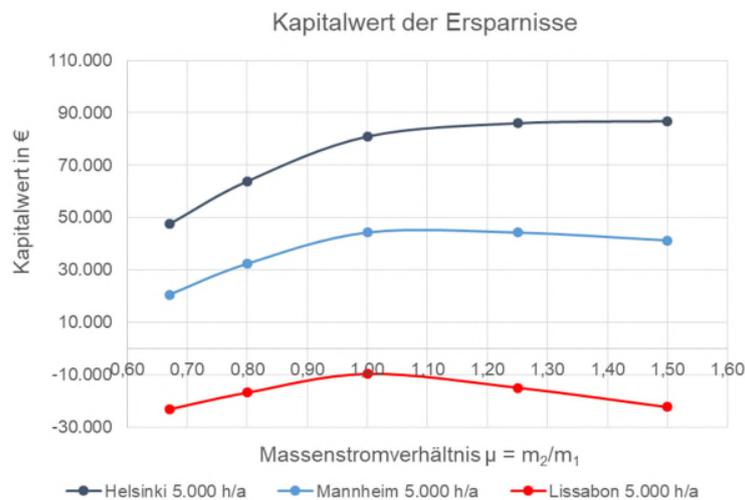


Abbildung 28: Kapitalwerte der Ersparnisse und Investitionsausgaben bei verschiedenen Standorten

Wird das sich bei diesen Auslegungen ergebende eindimensionale Optimum als Funktion des Luftmengenverhältnisses dargestellt, ergibt sich der Zusammenhang, den Abbildung 29 zeigt. Das eindimensionale Optimum wird in diesem Fall genutzt, da die Strömungsgeschwindigkeit bereits sehr niedrig liegt und nicht weiter verringert werden kann. Hierbei wurden die Daten für Mannheim und Helsinki bewertet, da die Optimierung für Lissabon aufgrund der negativen Kapitalwerte keine verwertbaren Ergebnisse liefert. Demnach sollte der optimale Temperaturübertragungsgrad bezogen auf ausgeglichene Massenströme und bei einer RWZ von $\Phi_{1:1} = 73 \%$ für $\mu = 0,67$ oder 1,5 um rund 10 % abgewertet werden.

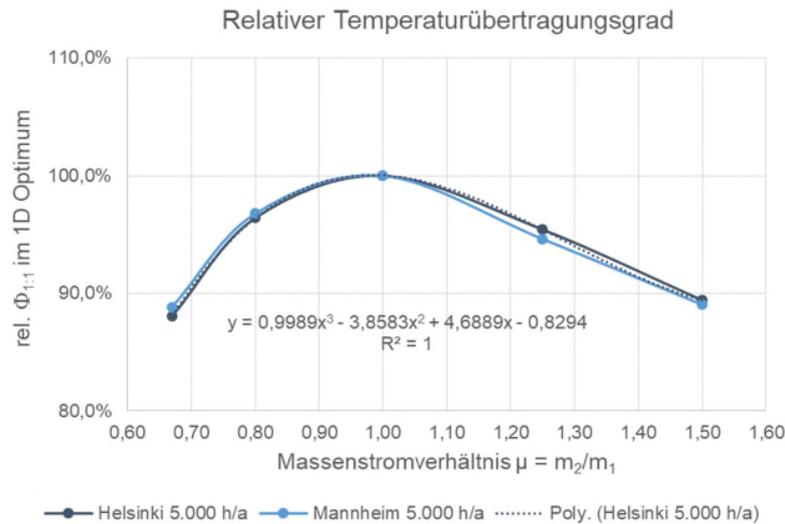


Abbildung 29: relative Änderung des Temperaturübertragungsgrads $\Phi_{1:1}$ als Funktion von μ

Im Bereich von $\mu > 0,9$ und $\mu < 1,1$ werden keine Abwertungen vorgeschlagen, wenn eine Berechnungstoleranz von rund 1 % für den Temperaturübertragungsgrad akzeptiert wird. Der Einfluss könnte über einen Abwertungsfaktor ($F_{\text{corr.}}$) mittels folgendem Polynom (siehe Gleichung 30) in Abhängigkeit des Wärmestromkapazitätenverhältnisses (Luftmengenverhältnis) berücksichtigt werden:

$$\Phi_{\mu} = \Phi_{1:1} \cdot F_{\text{corr}} \quad (29)$$

mit:

$$F_{\text{corr}} = 0,9989 \cdot \mu^3 - 3,8583 \cdot \mu^2 + 4,6889 \cdot \mu - 0,8294 \quad (30)$$

mit: $1,1 > \mu > 0,9$ oder: $0,67 > \mu > 0,9$

Diese Erkenntnisse und der konkrete Vorschlag zur Korrektur wurden vom Verfasser der Dissertation gegenüber der Kommission im Rahmen der Review Studie kommuniziert.¹²¹

Leider wurde auch diese Korrekturgleichung bisher nicht von der Kommission berücksichtigt.

¹²¹ https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/HOWATHERM%20-%20Heatrecovery%20with%20different%20mass%20flows_L3.pdf

7.2.3 Tatsächliches statistisches Luftmengenverhältnis

Die Wirtschaftlichkeit ändert sich bei unterschiedlichen und nicht bilanzierten Luftmengenverhältnissen. Daher wurden die bisher untersuchten Daten der Feldstudie auch in Bezug auf das durchschnittliche Massenstromverhältnis ausgewertet, um die statistische Relevanz dieses Phänomens bewerten zu können. Bei den rund 3.300 Auslegungen aus den Jahren 2015 bis 2018 lag das durchschnittliche Massenstromverhältnis bei $\mu = 1,003$ mit einer Standardabweichung von $s = 0,042$. Der Maximalwert lag bei $\mu = 1,563$, der Minimalwert bei $\mu = 0,481$. Dies bestätigt die Annahme, dass es in Extremfällen zu deutlich abweichenden Massenstromverhältnissen kommt, dies aber ein Sonderfall ist und statistisch gesehen von einer geringen Schwankung des Massenstromverhältnisses ausgegangen werden kann, da die Standardabweichung bei $s = 0,04$ liegt.

Der Mittelwert der Volumenströme lag in diesem Zeitraum auf der Zuluftseite bei $13.956 \text{ m}^3/\text{h}$ und bei $13.900 \text{ m}^3/\text{h}$ auf der Abluftseite.¹²²

7.3 Einfluss von Leckagen auf die WRG

Technische Anlagen wie RLT-Anlagen können nicht vollständig dicht ausgeführt werden. So müssen Leckagen in RLT-Anlagen im technisch zulässigen Rahmen grundsätzlich toleriert werden. Diese Leckagen haben in Bezug auf die Energieeffizienz und Hygiene Auswirkungen auf die gesamte RLT-Anlage. Insbesondere die Leckagen an der WRG müssen berücksichtigt werden, da diese bis zu 10 % der Nennluftmenge betragen können. Die Luftvolumenströme müssen in einer Berechnung um den Anteil der auftretenden Leckagen korrigiert werden, um den für das Gebäude geforderten Außenluftvolumenstrom zu gewährleisten. Dazu müssen die Leckagen auf der Zuluftseite zusätzlich zum Nennvolumenstrom durch den oder die Ventilatoren gefördert werden. Allerdings setzt dies meist auch auf der Abluftseite eine Korrektur voraus, da sonst ein Über- oder Unterdruck im Raum herrschen würde. Das führt dann zu höheren Luftmengen und damit zu höheren Differenzdrücken und letztlich zu höheren Elektroenergiebedarfen an sämtlichen Komponenten der Anlagen.¹²³

Die Leckagen werden mittels einer Bilanzierung an ihrem jeweiligen Entstehungsort berücksichtigt. Dabei ändern sich an den jeweiligen Entstehungsorten die Teilvolumenströme in der Anlage. Bei einer Zuführung von Leckagen (Unterdruck) ändern sich auch die Lufttemperaturen am Entstehungsort, die nach den physikalischen Mischungsregeln berechnet werden können.

¹²² https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/HOWATHERM%20-%20Heatrecovery%20with%20different%20mass%20flows_L3.pdf

¹²³ Kaup, C., Die Auswirkungen von Leckagen in Raumluftechnischen Anlagen auf deren Energiebedarf, Springer-VDI Verlag, HLH 02/2014

Durch die Leckagen, insbesondere des Umluftanteils an der WRG, kann sich die Zulufttemperatur erhöhen, obwohl die WRG durch die Leckage sogar eine geringere thermische Leistung erbringt. Durch eine signifikante Reduktion der Leckagen ergibt sich ein deutlich geringerer Korrekturbedarf.

Der Einfluss der Leckagen ist komplex und von vielen Rahmenbedingungen abhängig. Bisher ist der Einfluss von Leckagen in der EU 1253/2014 nicht erfolgt. Daher wurde auch auf eine Berücksichtigung des Einflusses auf die Wirtschaftlichkeit der WRG in dieser Dissertation verzichtet, zumal der Umfang der Dissertation nicht zu groß werden sollte. In einer Veröffentlichung in 2014 hat sich der Autor ausgiebig mit der Berechnung der Korrekturen der Volumenströme und Daten beschäftigt, die zudem nur individuell berücksichtigt werden können.

Im Ergebnis sollte jedoch im Rahmen der Revision der EU 1253/2014 die Forderung aufgestellt werden, dass Leckagen an der WRG minimiert werden müssen, um den negativen Einfluss auf die wirtschaftlichen und ökologischen Kennwerte zu reduzieren.

Die Leckage soll gemäß dem aktuellen Entwurf der Verordnung berücksichtigt werden. Gemäß Annex III soll die Leckage an der WRG (Exhaust Air transfer ratio) auf 5 % limitiert werden.

7.4 Näherungsgleichungen zur k-Zahl-Umrechnung

Im Nachgang zu den Arbeiten für diese Dissertation hat Professor Heinrich Huber 2020 und 2021 auf Basis von jahrelangen Messungen im Rahmen von Kundenprüfungen am Prüflabor Gebäudetechnik der Hochschule Luzern verschiedene Näherungsgleichungen zur Abschätzung der k-Zahl überprüft.¹²⁴

Die in dieser Dissertation verwendete Abschätzung (siehe Kapitel 5.1.2) wurde von ihm als sehr gutes Modell mit geringem Fehler bewertet. Allerdings hat Professor Huber im Gegensatz zu den Erkenntnissen des Verfassers dieser Dissertation unterschiedliche Exponenten für unterschiedliche WRG-Systeme ermittelt. Diese lagen laut seinen Erkenntnissen für Plattenwärmeübertrager bei 0,35 und für KV-Systeme bei 0,48 sowie für Rotationswärmeübertrager bei 0,18. Sowohl für Plattenwärmeübertrager als auch für KVS hat der Verfasser der Dissertation einen Exponenten von jeweils 0,4 vorgeschlagen. In den Berechnungen wurde daher ein mittlerer Exponent von 0,4 für sämtliche WRG-Systeme verwendet.

¹²⁴ Huber, H., Kaup, C., Näherungsgleichungen zur Vorhersage von Wärmeübergangskoeffizienten sowie von Temperaturübertragungsgraden an Wärmeübertragern, insbesondere zur Wärmerückgewinnung, TGA-Kongress 2021, und Huber, H., Kaup, C., Näherungsgleichungen zur Vorhersage von Temperaturübertragungsgraden an Wärmeübertragern – insbesondere zur Wärmerückgewinnung, Springer-VDI-Verlag, HLH 07/2021

Professor Huber kommt bei seinen Betrachtungen im Mittel auf einen Exponenten von 0,34. Eine stichprobenartige Überprüfung der Berechnung mit den veränderten Exponenten hat ergeben, dass der Fehler im Vergleich zu dem vom Verfasser der Dissertation verwendeten Exponenten keine gravierenden Auswirkungen auf die getroffenen Erkenntnisse hat, da sich insbesondere bei kleineren Exponenten die Luftgeschwindigkeit im mehrdimensionalen Optimum zu niedrigeren Werten verschiebt. Ein Exponent von 0,15 liefert im Gegensatz zum verwendeten Exponenten von 0,4 ein Optimum, das sich von beispielsweise 1,21 m/s auf 0,87 m/s verringert. Der optimale Temperaturübertragungsgrad steigt damit von 66,7 % auf 69,7 %, wobei die ermittelte optimale Luftgeschwindigkeit so niedrig ist, dass sie wegen des notwendigen Teillastverhaltens kaum realisiert werden kann. Bei identischer Strömungsgeschwindigkeit (rund 1,2 m/s) sinkt der bestmögliche Temperaturübertragungsgrad dann auf 68,8 %. Bei einem maximalen Exponenten von 0,48 ändert sich das Optimum kaum. Die optimalen Temperaturübertragungsgrade sind identisch und die optimale Strömungsgeschwindigkeit erhöht sich von 1,21 m/s auf 1,24 m/s.

Bei einem Exponenten von 0,35 sind die optimalen Temperaturübertragungsgrade ebenfalls identisch. Die optimale Strömungsgeschwindigkeit sinkt geringfügig von 1,21 m/s auf 1,13 m/s.

Da in der Datenbasis der untersuchten Geräte wenige Geräte mit Rotoren verwendet wurden, ist der mögliche Fehler der verwendeten Berechnungen zu vernachlässigen: Plattenwärmeübertrager und KVS sind im Mittel mit einem Exponenten von 0,4 gut repräsentiert. Zwar liegt der Mittelwert nach Professor Huber bei 0,34, jedoch ist der gewählte Ansatz mit einem Exponenten von 0,4, der sich aus den Messungen des Verfassers der Dissertation ergeben hat, konservativer und führt zu etwas höheren optimalen Strömungsgeschwindigkeiten. Zudem handelt es sich um eine Näherung und um keine determinierten und exakten Werte. Interessant wäre zukünftig sicherlich die Auswertung mehrerer Datenbanken, die eventuell einen größeren Anteil an Rotoren verwenden. In der vom Autor verwendeten Datenbank lag der Anteil an KVS bei 39 % und der Anteil an Plattenwärmeübertrager bei 53 %. Rotationswärmeübertrager waren nur zu 7 % vertreten.

7.5 Näherungsgleichungen zum Druckabfall

Nach den Optimierungsberechnungen, die im Rahmen dieser Dissertation erstellt wurden und auf Basis der genutzten Näherungsgleichung erfolgten (Kapitel 5.1.3), hat sich der Autor der Dissertation mit einem Ansatz zur Erweiterung der Näherungsgleichung zur Umrechnung des Druckabfalls von Wärmeübertragern beschäftigt. Dieser theoretische Ansatz beruht darauf, dass sich der Druckabfall im Mischgebiet zwischen turbulenter und laminarer Strömung aus zwei Anteilen zusammensetzt.¹²⁵ Bei vollständig turbulenter Strömung ändert sich der Druckabfall Δp eines Körpers nach der Beziehung:

$$\Delta p = \xi_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \quad (31)$$

Bei vollständig laminarer Strömung ändert sich der Druckabfall Δp linear zur Strömungsgeschwindigkeit:

$$\Delta p = \xi_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w \quad (32)$$

Der Strömungsbeiwert (ξ_w) wird experimentell ermittelt und ist von der Geometrie der durchströmten Einheit und im geringeren Maß von der Reynold-Zahl, also von der Strömungsgeschwindigkeit, abhängig. Im Übergangsbereich kann der Differenzdruck auch vereinfachend mittels quadratischem Mittelwert aus dem laminaren Anteil und dem turbulenten Druckanteil bestimmt werden. Zusammengesetzt ergibt sich für den Übergangsbereich:

$$\Delta p = \sqrt{\frac{\left(\xi_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2\right)^2 + \left(\xi_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w\right)^2}{2}} \quad (33)$$

Hieraus ergibt sich bei konstanter Dichte und konstant angenommenem ξ_w näherungsweise:

$$\Delta p \approx \xi_w \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{w^4 + w^2}{2}} \quad (34)$$

¹²⁵ Veröffentlicht in Kaup, C., Änderung des Druckabfalls der Wärmerückgewinnung, Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 80. Ausgabe 2020/21, Seite 1559 bis 1560, ITM InnoTech Medien

Oder reduziert:

$$\Delta p \approx C \cdot \sqrt{\frac{w^4 + w^2}{2}} \quad (35)$$

Vereinfacht kann der Druckabfall auch über einen resultierenden Exponenten ermittelt werden, der dann zwischen 1 (vollständig laminar) und 2 (vollständig turbulent) liegt (vergleiche Kapitel 5.1.3).

$$\Delta p = C \cdot w^x \quad (36)$$

Umgestellt nach x ergibt dann:

$$x = \frac{\log\left(\frac{\Delta p}{C}\right)}{\log(w)} \quad (37)$$

Der theoretisch ermittelte Exponent errechnet sich damit näherungsweise für $w \neq 1$ aus:

$$x \approx \frac{\log\left(\sqrt{\frac{w^4 + w^2}{2}}\right)}{\log(w)} \quad (38)$$

Der Exponent x ist abhängig von der Luftgeschwindigkeit und variiert damit näherungsweise zwischen $w = 0,8$ und $2,2$ m/s zwischen $x = 1,44$ und $1,68$. Damit ist der Unterschied zu dem verwendeten Exponenten von $x = 1,6$ (siehe Kapitel 5.1.3) gering. Bei der Näherungsgleichung ist zu beachten, dass sie für $w = 1,0$ m/s nicht definiert ist. Durch eine Grenzwertbetrachtung ergibt sich für $w = 1,0$ m/s der Exponent von $x = 1,50$. Diese Näherung beruht auf der Annahme, dass die Strömungsbeiwerte bei laminarer und turbulenter Strömung als etwa konstant bewertet werden können. Dies kann jedoch nur in einer Näherung angenommen werden.

Der Autor hat diesen Ansatz im Berechnungsmodell beispielhaft überprüft, jedoch ist die Änderung zum verwendeten Ansatz vernachlässigbar, da der Elektroenergieaufwand zum thermischen Nutzen im Verhältnis von rund 1 zu 10 bis 20 steht und damit von Natur aus einen geringen Einfluss hat.

Trotzdem wäre es sicherlich interessant, weitere Studien mit einem variablen Exponenten je nach Luftgeschwindigkeit durchzuführen. Insbesondere Messungen an Rotoren haben gezeigt, dass der Druckabfall sich aufgrund der nahezu laminaren Strömung fast linear ändert. Dieser Einfluss könnte in weiterführenden Studien betrachtet und verifiziert werden.

8. Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der Anpassung der EU-Verordnung 1253/2014, welche die Effizienzkriterien an die WRG von RLT-Geräten in NWG festlegt. Die Verordnung definiert die Anforderungen als starre Grenzwerte, die vom Süden bis zum Norden Europas gelten ohne den jeweiligen Standort oder die Gebäudenutzung zu berücksichtigen. Gemäß den Referenzwerten der aktuellen Verordnung wurde eine Verschärfung des Anforderungsniveaus diskutiert, wobei auch hier zunächst starre Grenzwerte geplant waren. Der Autor vermutete, dass dies in vielen Fällen zu unwirtschaftlichen Lösungen führt.

Ziel der Arbeit ist es zu klären, welche ökonomischen Konsequenzen starre Grenzwerte bei einem verschärften Anforderungsniveau mit sich bringen, und einen Vorschlag für ein Anforderungssystem auszuarbeiten, das den Standort und weitere individuelle Randbedingungen berücksichtigt und sich so an dem jeweiligen ökonomischen bzw. ökologischen Optimum orientieren kann. Dies wird vom Autor in die Diskussion mit den EU-Gremien eingebracht, in denen er vertreten ist.

Die Ergebnisse der Arbeit verdeutlichen, dass ein klares Nord-Süd-Gefälle in Bezug auf das ökonomische wie ökologische Optimum der Effizienz einer WRG existiert, sodass die bestehenden und undifferenzierten Festlegungen insbesondere für die geplante Verschärfung der aktuellen EU-Verordnung ökonomisch und ökologisch nicht zu empfehlen sind.

Die Analyse der Wirtschaftlichkeit basiert auf einer neu entwickelten Berechnungsmethodik zur mehrdimensionalen und relationalen Optimierung der WRG auf einer monetären Basis sowie unter ökologischen Gesichtspunkten. Mit der mehrdimensionalen und relationalen Optimierung wurden europaweite Optimierungsberechnungen durchgeführt, die belegen, dass neben der Laufzeit und dem Standort insbesondere der spezifische Wärmepreis und die Ablufttemperatur einen großen Einfluss auf den optimalen Temperaturübertragungsgrad der WRG haben. Die spezifischen Elektroenergiepreise sowie der spezifische Druckabfall der WRG beeinflussen im Wesentlichen die optimale Strömungsgeschwindigkeit und damit den Elektroenergiebedarf.

Das entwickelte differenzierte Anforderungssystem für die Effizienz der WRG fußt auf nicht linearen multiplen Regressionen auf Basis der europaweiten mehrdimensionalen Optimierungsberechnungen. Die beschriebenen Optima bestehen aus korrespondierenden Wertepaaren aus dem jeweils optimalen Übertragungsgrad und dem dazugehörigen maximalen SFP-Wert (specific fan power). Die unabhängigen Variablen sind die Mindestaußenlufttemperatur im Winter (beschreibt Einfluss des Standorts), die Ablufttemperatur und die Laufzeit. Die CO₂-Emissionsreduzierung wird in Form eines CO₂-Preises in der monetären Optimierung berücksichtigt, um die ökologische Optimierung mit der monetären Optimierung zusammenzuführen. Die Energiepreise

wurden mittelfristig unter Berücksichtigung der Mittelwerte der letzten zehn Jahre des Betrachtungszeitraums als konstant angenommen.

Die ergänzende Methodenkritik zeigt, dass der Einfluss der Energiepreise vor dem Hintergrund der aktuell steigenden Preise eine signifikante Rolle bei der Festlegung des Optimums spielt. Zukünftig sollte dieser Einfluss in entsprechenden Modellen berücksichtigt werden.

Auch der Einfluss unterschiedlicher und nicht balanzierter Luftmengen auf die Wirtschaftlichkeit muss in der Verordnung zwingend beachtet werden. Zwar tritt dieses Phänomen selten auf, aber diese Fälle – insbesondere bei geringerer Abluftmenge – können ohne deren Berücksichtigung die Grenzwerte für ausgeglichene Werte nicht einhalten.

Außerdem fordert der aktuelle Entwurf der Verordnung die Minimierung von Leckagen. Gemäß Annex III des aktuellen Entwurfs der Verordnung soll die Leckage bezogen auf das Gehäuse des RLT-Geräts und auf die Leckage an der WRG auf 5 % limitiert werden. Diese Festlegung wird vom Autor dieser Dissertation als erster Schritt für ausreichend betrachtet.

Zudem könnten die Näherungsgleichungen zur Berücksichtigung der Wärmeübertragung und der Druckverluste gemäß Kapitel 7.4 und 7.5 im geringen Maß verbessert werden.

Insgesamt hat diese Dissertation dazu beigetragen, dass sich der Entwurf der neuen Verordnung EU 1253/2014 in wesentlichen Punkten vom ursprünglichen Ansatz unterscheidet, da die Ergebnisse dieser Dissertation in den Entwurf der Verordnung eingeflossen sind.

Sie hat dazu geführt, dass die WRG differenziert betrachtet und nicht weiter pauschal beurteilt wird. Durch die Nutzung der Ergebnisse der Dissertation kann die neue Festlegung einer optimalen WRG verhindern, dass mit einer zu kleinen oder einer zu großen WRG ein ökonomisches oder ökologisches Potenzial vergeudet wird.

Letztlich muss aber selbstkritisch angemerkt werden, dass nur auf Grundlage einer individuellen wirtschaftlichen und/oder ökologischen Betrachtung eine treffende Optimierung unter Beachtung sämtlicher Rahmenbedingungen im Einzelfall möglich ist. Aber selbst dann basieren die Berechnungen auf Rahmenbedingungen, die sich in der Zukunft ändern können, wie es die aktuellen Entwicklungen deutlich vor Augen führen.

Zusammenhängendes Literaturverzeichnis

- Abdul, A., Matthes, P., Schmidt, M., Müller, D., Energetic evaluation of the heat recovery of an air handling unit taking into account the insulation standards and internal thermal loads, RWTH Aachen, E.ON Energy Research Center, Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, 2015
- Beck, E., Energieverbrauch, -einsparpotential und -grenzwerte von Lüftungsanlagen, Dissertation GH Kassel, 07/2000
- Beck, E. u. Hausladen, G., Energieverbrauch von RLT-Anlagen, ISH-Jahrbuch 1999
- Brune, M., Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Optimierung der Wärmeübertragung in Rekuperatorbrennern, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 2005
- Brunner, F., Krummenacher, P., Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode, Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen, Download: www.pinch-analyse.ch, 07/2015
- Brunner R., Kyburz, V., Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung, Planung, Bau und Betrieb von Wärmerückgewinnungs- und Abwärmenutzungsanlagen, Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfüragen, Bern, 1993
- DIN EN 308: Wärmeaustauscher – Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft- und Luft/Abgas-Wärmerückgewinnungsanlagen; Deutsche Fassung EN 308:1997
- DIN 4710: Statistiken meteorologischer Daten zur Berechnung des Energiebedarfs von heiz- und raumluftechnischen Anlagen in Deutschland, 2003-01
- DIN EN 13053: Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumluftechnische Geräte - Leistungsdaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2006, 2007-11
- DIN EN 13053: Lüftung von Gebäuden- Zentrale raumluftechnische Geräte-Leistungsdaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten; Deutsche Fassung EN 13053:2020-05
- DIN EN 16798-1: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumlufqualität, Temperatur, Licht und Akustik, Deutsche Fassung 2019

- DIN EN 16798-3: Lüftung von Nicht-Wohngebäuden – Leistungsanforderungen an Lüftungs- und Raumklimaanlagen, 2017
- DIN SPEC 15240: Entwurf: Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Energetische Inspektion von Klimaanlagen, Ausgabedatum 2018-08
- EU Kommission, Draft Working Document Ventilation Units 10.10.2012
- EUROPEAN COMMISSION, DRAFT WORKING DOCUMENT ON Ecodesign Requirements for Ventilation Units (Review EU 1253/2014), DRAFT TEXT REVIEWED ECODESIGN REGULATION, Ref. Ares(2021)1548552 – 01/03/2021
- Eggers, I., Matthes, P., Müller, D., Hybride Lüftungstechnik für Schulgebäude – dezentrale Lüftungstechnik, Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, DKV Fachtagung 2009
- EnEV, Energieeinsparverordnung für Gebäude, Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden, 2009
- Feist, W., Passivhäuser in Mitteleuropa: theoretische Untersuchungen von Simulationsmodellen für das thermische Verhalten von Gebäuden und Anwendung auf die Auslegung der Konstruktionsdetails von Passivhäusern, Dissertation Universität Kassel, 1992
- Franzke, U., Schiller, H., Untersuchungen zum Energieeinsparpotenzial der Raumlufttechnik in Deutschland, 10/2011
- Groscurth, H., Rationelle Energieverwendung durch Wärmerückgewinnung, Heidelberg, 1991
- Harleß, A., Steigerung der Energie- und Kosteneffizienz bei der Abwärmenutzung durch Optimierung von Strukturrohren in Rohrbündelwärmeübertragern, Dissertation, Helmut Schmidt Universität Hamburg, 2017
- Herzig, L., Caspar, O., STUDIE: CO₂-Preise: eine Idee, deren Zeit gekommen ist, Bestehende Instrumente und aktuelle Debatten in Europa und den G20, 07/2019
- HOWATHERM HPWRG-System, Messung TÜV Süd, Bericht AHU 119, 2018-04
- Huber, H., Kaup, C., Näherungsgleichungen zur Vorhersage von Wärmeübergangskoeffizienten sowie von Temperaturübertragungsgraden an Wärmeübertragern, insbesondere zur Wärmerückgewinnung, TGA-Kongress 2021
- Huber, H., Kaup, C., Näherungsgleichungen zur Vorhersage von Temperaturübertragungsgraden an Wärmeübertragern – insbesondere zur Wärmerückgewinnung, Springer-VDI-Verlag, HLH 07/2021

- Jüttemann, H.: Wärme- und Kälterückgewinnung in raumluftechnischen Anlagen, Werner-Verlag, Düsseldorf 2001
- Kaup, C., Effizienz der Wärmerückgewinnung, Gentner Verlag, TGA-Fachplaner 06/2009
- Kaup, C., Potential der Wärmerückgewinnung, TGA-Fachplaner 12/2009
- Kaup, C., Wärmerückgewinnung als Schlüsselkomponente der Lebenszykluskosten, Springer-VDI Verlag, HLH 05/2010
- Kaup, C., Erweiterung der Studie zur Energieeffizienz von raumluftechnischen Geräten, Springer-VDI Verlag, HLH 01/2012
- Kaup, C., Energiebedarf und Einsparpotenzial in Europa, Gentner Verlag, TGA Fachplaner 02/2012
- Kaup, C., Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Springer-VDI Verlag, HLH 06/2012
- Kaup, C., Kampeis, P., Gutachten zum Beitrag und zur Einordnung der Wärmerückgewinnung aus Raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) im Vergleich zu bereits anerkannten regenerativen Energiequellen, Fachverband Gebäude-Klima e. V., 2012
- Kaup, C., Kampeis, P., Studie zum Beitrag und zum Anteil der Wärmerückgewinnung aus zentralen Raumluftechnischen Anlagen (RLT-Anlagen) in Nicht-Wohngebäuden, Fachverband Gebäude-Klima e. V., 2013
- Kaup, C., Die Auswirkungen von Leckagen in Raumluftechnischen Anlagen auf deren Energiebedarf, Springer-VDI Verlag, HLH 02/2014
- Kaup, C., Kampeis, P., Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs zentraler Raumluftechnischer Anlagen in Nicht-Wohngebäuden in Deutschland, Fachverband Gebäude-Klima e. V. und Herstellerverband Raumluftechnische Geräte e. V., 2014
- Kaup, C., Die neue Verordnung zur Ökodesign-Richtlinie der EU, Springer-VDI Verlag, HLH 02/2015
- Kaup, C., Berippte Wärmeübertrager, Näherungsgleichung zur k-Zahl-Berechnung, Gentner-Verlag, TGA-Fachplaner 03/2015
- Kaup, C., Neue Verordnung zur EU-Ökodesign-Richtlinie: Anforderungen an RLT-Geräte in Nicht-Wohngebäuden, Beuth-Verlag, EnEV aktuell IV/2015
- Kaup, C., Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 77. Ausgabe 2015/16, Wärmerückgewinnung, Seite 1518 bis 1555, ITM InnoTech Medien

- Kaup, C., Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen im Kontext volks- und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen (Teil 2), Huss Medien, Moderne Gebäudetechnik 12/2016
- Kaup, C., Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen im Kontext volks- und betriebswirtschaftlicher Rahmenbedingungen (Teil 1), Huss Medien, Moderne Gebäudetechnik 11/2016
- Kaup, C., Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 78. Ausgabe 2017/18, Wärmerückgewinnung, Seite 1595 bis 1631, ITM InnoTech Medien
- Kaup, C., Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Einfluss der Änderung der Rahmenbedingungen, Springer-VDI-Verlag, HLH 11/2017
- Kaup, C., Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Eine Betrachtung für Europa, Springer-VDI-Verlag, HLH 10/2017
- Kaup, C., Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Springer-VDI-Verlag, Teil 2, HLH 09/2017
- Kaup, C., Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Springer-VDI-Verlag, Teil 1, HLH 07-08/2017
- Kaup, C., DE 10 2017 110 912, Mehrdimensionales, relationales Optimierungsverfahren für die Auslegung eines Wärmeübertragers einer raumlufttechnischen Anlage, Deutsche Patentanmeldung 2017
- Kaup, C., EP 3 404 562, Relationales Optimierungsverfahren für einen Wärmeübertrager einer Raumlufttechnischen Anlage, Europäische Patentanmeldung 2018
- Kaup, C., European Study on Heat Recovery in Non-residential Buildings, Rehva Journal 5/2018
- Kaup C., Steigerung der Wirtschaftlichkeit von berippten Lamellenwärmeübertragern in Kreislaufverbundsystemen zur Wärmerückgewinnung, Teil 1 & 2, Springer-VDI-Verlag, HLH 07-09/2018
- Kaup, C., Entwicklung der Wärmerückgewinnung in Deutschland, Springer-VDI-Verlag, HLH 10/2018
- Kaup, C., Ergänzende Studie zur Entwicklung des Energiebedarfs zentraler Raumlufttechnischer Anlagen in Nicht-Wohngebäuden in Deutschland, Umwelt-Campus Birkenfeld mit 1090 Auslegungen 2017, 1141 in 2016, 1088 in 2015 und 816 Auslegungen in 2014, 2018

- Kaup, C., Allnoch, G. Programm zur automatisierten Wirtschaftlichkeits- und Optimierungsrechnung von WRG-Systemen (Softwarebot), 2017 - 2019
- Kaup, C., Programm zur Wirtschaftlichkeitsberechnung und Optimierungsrechnung, 2010 bis 2019
- Kaup, C., Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1). GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 140, Ausgabe 2/2019, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg, 2019
- Kaup, C., Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 2). GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 140, Ausgabe 3/2019, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg, 2019
- Kaup, C., Knissel, J., European Study on heat recovery in non-residential buildings, E3S Web Conf., Volume 111, 2019, CLIMA 2019 Congress, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911102014>, 7 Seiten, 08/2019
- Kaup, C., Gutachten zur Bezifferung der CO₂-Intensität von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG-Systemen) Raumlufttechnischer Geräte (RLT-Geräte) für Nicht-Wohngebäude, FGK, 2019
- Kaup, C., Europäische Patentanmeldung EP 3 404 562 A3 20190220 (DE), RELATIONAL OPTIMISING PROCESS FOR A HEAT EXCHANGER OF AN AIR CONDITIONING SYSTEM, 2019
- Kaup, C., Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 79. Ausgabe 2019/20, Seite 1581 bis 1625, Wärmerückgewinnung, ITM InnoTech Medien
- Kaup, C., The optimum of heat recovery – Determination of the optimal heat recovery based on a multiple non-linear regression model, Journal of Building Engineering, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101548>, Volume 38, June 2021
- Kaup, C., Recknagel-Sprenger, Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 80. Ausgabe 2020/21, Änderung des Druckabfalls der WRG, Seite 1559 bis 1560, ITM InnoTech Medien
- Kremer, M., Rewitz, K., Müller, D., Bewertung der Wärmerückgewinnung für die maschinelle Belüftung von Klassenräumen, White Paper, RWTH-EBC 2021-005, Aachen, 2021, DOI: 10.18154/RWTH-2021-07252
- Knissel, J. Druckverlustarmes Längsrippenheizregister für Lüftungsanlagen, GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 140, Ausgabe 2/19, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg, 2019

- Mattila, T., Leskinen, P., Mäenpää, I. and Seppälä, J., An Environmentally Extended Input-Output Analysis to Support Sustainable Use of Forest Resources, *The Open Forest Science Journal*, 2011, 4, 15-23
- Matthes, P., EBC Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik, RWTH Aachen, FGK-Tagung Lüftung in Schulen, München, 14.02.2012
- Mensch, G., *Investition: Investitionsrechnung in der Planung und Beurteilung von Investitionen*, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2002
- Meteonorm 7.1 Produkt-Broschüre (en) 2014
- Moro, A., Lonza, L., Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles, European Commission, Joint Research Centre (JRC), Via Enrico Fermi 2749, 21027 Ispra (VA), Italy, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 64, Pages 5-14, 10/2018
- Review Study Phase 1.1 and phase 1.2 / Technical Analysis and update Preparatory Studies / Draft Report / TASK 3. Use-phase Impacts / Review study on Regulations EU 1253/2014 (Ecodesign requirements for ventilation units) and EU 1254/2014 (energy labelling of residential ventilation units)
- Review study, Phase 1.1 and phase 1.2, Final Report, TASK 6, Options, chapter 4.4.2
- Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Veröffentlicht am 31.10.2009
- Stettler, C., *Simulationsgestützte Optimierung von Kreislaufverbundsystemen in raumluft-technischen Anlagen*, Hochschule für Technik und Architektur, Luzern, 2016
- Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2 – Lot 6: Airconditioning and ventilation systems ENTR / 2009/ 035/ LOT6 - Draft Report Task 6 – Design Options, 2012
- Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2, Lot 6: Air-conditioning and ventilation systems Contract No. ENTR / 2009/ 035/ LOT6/ Final Report Task 2 – Market on Ventilation Systems for non residential and collective residential applications, 2012
- Sustainable Industrial Policy – Building on the Ecodesign Directive – Energy-Using Product Group Analysis/2 – Lot 6: Air-conditioning and ventilation systems ENTR / 2009/ 035/ LOT6 – executive summary 14.06.2012

- Swiderek, M., Wollscheid, B., Kaup, C., Messung eines Doppelplattenwärmeübertragers (Fabrikat Hoval mit $RWZ = 0,78$) und Messung eines Kreislaufverbundsystems mit 24 Rohrreihen (Fabrikat HOWATHERM mit $RWZ = 0,78$) auf dem Leistungsprüfstand der HOWATHERM Klimatechnik GmbH, zertifiziert durch den RWTÜV, 2017
- Tandogan, E., Optimierter Entwurf von Hochleistungswärmeübertragern, Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 2001
- VDI 3803 Blatt 1: Raumluftechnik – Zentrale Raumluftechnische Anlagen – Bauliche und technische Anforderungen, 2002-10
- VDI 3803 Blatt 5: Wärmerückgewinnungssysteme, 2013-04
- VDI 4710 Blatt 1:2013-03: Meteorologische Grundlagen für die Technische Gebäudeausrüstung
- VDI 6022 Blatt 1: Raumluftechnik, Raumlufqualität – Hygieneanforderungen an raumluftechnische Anlagen und Geräte (VDI-Lüftungsregeln), 2018-01
- VDI-Wärmeatlas, Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 7. Auflage
- Ventilation products regulations based on Ecodesign directive ongoing study Ecodesign ENTR Lot 6 (Tasks 1-7), 2012
- Verordnung EU 1253/2014 der Kommission vom 7. Juli 2014 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsanlagen. Veröffentlicht am 25.11.2014
- Wenterodt, T., Die Bewertung und numerische Optimierung von Wärmeübertragern anhand einer Energieentwertungszahl, Dissertation TU Hamburg-Harburg, 2013
- Wieland, H., Giljum, S., Carbon footprint decomposition in MRIO models: identifying EU-supply chain hot-spots and their structural changes over time, Table 1, Universität Wien, Working Paper Series Nr. 13, 2/2016
- Wystrcil, D., Ein Beitrag zur thermo-hydraulischen Optimierung niedrigexergetischer Wärme- und Kälteversorgungssysteme, Dissertation Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2016

Internetquellen

- Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen: Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2016, Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen für Wärmezwecke 2016, Stand 11/2017
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/384/bilder/dateien/6_datentabelle-zur-abb_energieverbrauch-sektor-hgd-waermezwecke_2018-02-14.pdf>
[Zugriff: 20.03.2019]
- BMVBS-Online-Publikation, Ermittlung von spezifischen Kosten energiesparender Bauteil-, Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nicht-Wohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012, 06/2012
<www.energiekompetenz-bw.de/fileadmin/user_upload/energiemanagement/Wissensportal/Ausbildungen/energieauditor_16247_kommunal/16-Kostenkennwerte-Technik.pdf> [Zugriff: 12.06.2019]
- Die Bundesregierung, Einstieg in CO₂-Bepreisung: Grundlage für CO₂-Preis steht, 10.11.2020 <<https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/nationaler-emissionshandel-1684508>> [Zugriff: 04.01.2022]
- Bundesfinanzministerium, AfA-Tabelle für den Wirtschaftszweig "Heil-, Kur-, Sport- und Freizeitbäder", BMF-Schreiben vom 10. April 1995 - IV A 8 - S 1551 - 85/95
<https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_Heil-Kur-Sport-und-Freizeitbaeder.pdf?__blob=publicationFile&v=3> [Zugriff: 06.01.2022]
- Bundesfinanzministerium, AfA-Tabelle für die allgemein verwendbaren Anlagegüter (AfA-Tabelle "AV"), IV D 2-S 1551-188/00, B/2-2-337/2000-S 1551 A, S 1551 - 88/00
<https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Steuern/Weitere_Steuerthemen/Betriebspruefung/AfA-Tabellen/Ergaenzende-AfA-Tabellen/AfA-Tabelle_AV.html> [Zugriff: 06.01.2022]
- GZ II A 3 – H 1012-10/07/0001, Das Dokument mit dem GZ II A 3 – H 1012-10/07/0001 wird regelmäßig aktualisiert und enthält den vorgeschriebenen Kalkulationszinssatz, letzter genutzter Stand 2018, Veröffentlichungsdatum 14. Mai 2018)
<<https://www.bundesfinanzministerium.de>> [Zugriff: 12.06.2019]
- Wahl des Zinssatzes für Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen <<https://wibe.de/wahl-des-zinssatzes-fur-wirtschaftlichkeitsuntersuchungen-wibe-projekte/>>
[Zugriff: 04.01.2022]

- <<https://www.boerse-online.de/rohstoffe/co2-emissionsrechte>>
[Zugriff: 24.05.2020]
- <<https://www.boerse.de/rohstoffe/co2-Emissionsrechtetpreis/XC000A0C4KJ2>>
[Zugriff: 07.01.2022]
- Caspar, O. & Herzig, L., CO₂-Preise: eine Idee, deren Zeit gekommen ist, Germanwatch – Politik & Gesellschaft, 2019 <www.germanwatch.org/de/16693>
[Zugriff: 12.06.2019]
- Brunner R., Kyburz, V., Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung, Planung, Bau und Betrieb von Wärmerückgewinnungs- und Abwärmenutzungsanlagen, Impulsprogramm RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfagen, Bern, 1993
<<https://www.dev3.energie.ch/bfk/ravel/355D.pdf>> [Zugriff: 24.05.2020]
- Brunner, F., Krummenacher, P., Einführung in die Prozessintegration mit der Pinch-Methode, Handbuch für die Analyse von kontinuierlichen Prozessen und Batch-Prozessen, 07/2015 <www.pinch-analyse.ch> [Zugriff: 12.06.2019]
- <<https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/UmweltEnergie/Energiemix.html>>
[Zugriff: 20.03.2019]
alternative Quelle:
<<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/250403/umfrage/raumwaermebereitstellung-nach-energetraeger-in-deutschen-haushalten/>> [Zugriff: 15.01.2022]
- European Network, Draft Working Document Ventilation Units, 2012 <https://www.eup-network.de/fileadmin/user_upload/Draft_Working_Document_Ventilation.pdf>
[Zugriff: 12.06.2019]
- <<https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&pcode=ten00117&plugin=1>> [Zugriff: 07.06.2019]
alternative Quelle: <[https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Entwicklung_der_Strompreise_f%C3%BCr_Nichthaushalt skunden,_EU-28_und_Euroraum,_2008-2019_\(in_EUR_je_kWh\)_FP19-DE.png](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Entwicklung_der_Strompreise_f%C3%BCr_Nichthaushalt skunden,_EU-28_und_Euroraum,_2008-2019_(in_EUR_je_kWh)_FP19-DE.png)>
[Zugriff: 07.01.2022]
- <<https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00118&language=en>> [Zugriff: 07.06.2019]
alternative Quelle: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=File:Development_of_natural_gas_prices_for_non-household_consumers,_EU,_2008-2021_v1.png> [Zugriff: 07.01.2022]

- Econologie, Miller, F., Europa: CO₂-Emissionen nach Ländern und elektrische kWh in Technische Thermodynamik, 2008 <<https://de.econologie.com/Europa-Emission-co2-Land-kwh-elektrische/>> [Zugriff: 07.06.2019]
- EUA-Future, Cal-22 <<https://www.eex.com/de/>> [Zugriff: 06.01.2022]
- <<https://www.finanzen.net/rohstoffe/co2-emissionsrechte/>> [Zugriff: 24.05.2020]
- <<https://www.finanzen.net/rohstoffe/erdgas-preis-natural-gas/>> [Zugriff: 06.01.2022]
- Kaup, C., The optimum of heat recovery in non-residential buildings, 2019 <https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/HOWATHERM%20-%20Multiple_Regression_HRS_Optimum.pdf> [Zugriff: 02.01.2021]
- Kaup, C., Heatrecovery with different mass flows, 2020 <https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/HOWATHERM%20-%20Heatrecovery%20with%20different%20mass%20flows_L3.pdf> [Zugriff: 02.01.2021]
- Review study on the Ecodesign and Energy Regulations on ventilation units, Publications by study authors, Final Task Reports <<https://www.ecoventilation-review.eu/documents.htm#authors>> [Zugriff: 24.05.2020]
- Review study on the Ecodesign and Energy Regulations on ventilation units, Discussion Document for 2nd SH meeting, REVIEW STUDY VENTILATION UNITS Project: Technical Assistance Impact Assessment Revision of Ventilation Unit Regulations <<https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/20200416%20-%20Discussions%20Document%202nd%20Stakeholder%20Meeting%20Review%20Study%20VUs.pdf>> [Zugriff: 24.05.2020]
- Review Study Phase 2: Technical Assistance & Impact Assessment Revision of Ventilation Unit Regulations 2nd stakeholder meeting 07.5.2020 Review study Commission Regulation (EU) No. 1253/2014 [Ecodesign] and Commission Delegated Regulation No. (EU) No. 1254/2014 (Energy Label) <<https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/20200507%20-%20Presentation%20VUs%202nd%20SH-meeting%207th%20May%202019.pdf>> [Zugriff: 04.01.2022]
- Kaup, C., Heatrecovery in Europe, Economic and environmental study 2019 <https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/UCB_EVIA_Study_2019.pdf> [Zugriff: 04.01.2022]

- Kaup, C. Heatrecovery in Europe, Influence factors on economic values
<https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Comments/HOWATHERM%20-%20FGK_UCB_Study_HR_2019.pdf> [Zugriff: 04.01.2022]
- Ventilation Units Ecodesign and Energy Labelling, Preparatory Review Study Phase 1.1 and phase 1.2, Final Report, TASK 6. Options Review study on Regulations EU 1253/2014 (Ecodesign requirements for ventilation units) and EU 1254/2014 (energy labelling of residential ventilation units) Prepared by VHK, Delft (NL), for the European Commission, DG GROW, 08/2020
<<https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Ventilation%20Units%20TASK%206%20Final%20Report%202020-09-10.pdf>> [Zugriff: 02.01.2021]
- Ventilation Units Ecodesign and Energy Labelling, Preparatory Review Study Phase 1.1 and phase 1.2, Final Report, TASK 3. Use-phase Impacts Review study on Regulations EU 1253/2014 (Ecodesign requirements for ventilation units) and EU 1254/2014 (energy labelling of residential ventilation units), Prepared by VHK, Delft (NL), for the European Commission, DG GROW, 03/2020 <<https://www.ecoventilation-review.eu/downloads/Ventilation%20Units%20TASK%203%20Final%20Report%202020-09-10.pdf>> [Zugriff: 02.01.2021]
- Statista, veröffentlicht Urnersbach, Bruno, Europäische Union & Euro-Zone: Inflationsrate von 2010 bis 2020, 2021
<<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156285/umfrage/entwicklung-der-inflationsrate-in-der-eu-und-der-eurozone/>> [Zugriff: 14.01.2019]
- Strompreise für Gewerbe und Unternehmen im Europa-Vergleich <<https://strom-report.de/strompreise-europa/#strompreise-europa-industrie-unternehmen>> [Zugriff: 08.01.2022]
- <<https://strom-report.de/strompreise-europa/#strompreise-europa-industrie-unternehmen>> [Zugriff: 06.01.2022]
- Umweltbundesamt, Treibhausgas-Emissionen in der Europäischen Union, 13.09.2021
<<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-der-europaeischen-union#emissionen-in-relation-zum-bruttoinlandsprodukt-bip>> [Zugriff: 25.12.2021]

- Icha, P., Umweltbundesamt, Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2016 in Climate-Change 15/2017, Dessau-Roßlau, 2017
<www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-05-22_climate-change_15-2017_strommix.pdf> [Zugriff: 20.03.2019]
- <<https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.523833.de>> [Zugriff: 07.06.2019]
alternative Quelle: Juhrich, K., Umweltbundesamt, CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe in Climate-Change 27/2016, Dessau-Roßlau, 2016
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf> [Zugriff: 20.03.2019]
- Washington State Department of Commerce, DCA Office of Affordable Housing, 2011 Architectural Manual, Expected Useful Life Table: <<https://www.commerce.wa.gov/wp-content/uploads/2016/11/hfu-expected-useful-life-2011.pdf>> [Zugriff: 04.01.2022]

Anhang A1. Ökologisch optimierte Übertragungsgrade der WRG

		RWZ im 3D- Optimum			Δp mittel	s	w	s
		%	%	\varnothing Diff.- CO ₂ kg/a	Pa	Pa	m/s	m/s
2.350 h/a								
Nord	Helsinki	86	5,3	26.007	47	11,1	0,58	0,16
Mitte	Mannheim	83	8,2	17.982	38	9,0	0,60	0,24
Süd	Lissabon	76	4,7	5.281	21	4,7	0,56	0,13
		RWZ Im 3D- Optimum			Δp mittel	s	w	s
		%	%	\varnothing Diff.- CO ₂ kg/a	Pa	Pa	m/s	m/s
5.000 h/a								
Nord	Helsinki	90	5,5	60.814	50	12,2	0,52	0,19
Mitte	Mannheim	88	6,5	41.177	41	10,0	0,52	0,21
Süd	Lissabon	81	5,2	13.179	23	5,6	0,51	0,14
		RWZ im 3D- Optimum			Δp mittel	s	w	s
		%	%	\varnothing Diff.- CO ₂ kg/a	Pa	Pa	m/s	m/s
8.760 h/a								
Nord	Helsinki	92	3,9	105.521	55	13,2	0,48	0,15
Mitte	Mannheim	90	5,8	72.859	46	11,0	0,49	0,18
Süd	Lissabon	84	8,6	24.899	27	6,4	0,50	0,23

Anhang A2. Monetär optimierte Übertragungsgrade der WRG mit erwarteter Klimaveränderung 2030, IPCC A1B

		RWZ im 3D- Optimum		Ø Diff.- Beträge	Δp mittel	s	w	s
		%	%	€/a	Pa	Pa	m/s	m/s
2.350 h/a								
Nord	Helsinki	61	9,0	2.264	64	16,6	1,26	0,22
		0,5%		0,6%	10,5%		3,3%	
Mitte	Mannheim	50	10,4	969	42	18,3	1,26	0,22
		-4,9%		-19,5%	-1,9%		3,3%	
Süd	Lissabon	26	10,5	126	13	5,2	1,23	0,19
		-15,9%		-26,7%	-13,0%		4,2%	
		RWZ im 3D- Optimum		Ø Diff.- Beträge	Δp mittel	s	w	s
		%	%	€/a	Pa	Pa	m/s	m/s
5.000 h/a								
Nord	Helsinki	71	7,1	6.123	80	19,1	1,13	0,20
		0,0%		-0,5%	11,0%		3,7%	
Mitte	Mannheim	64	8,3	3.043	56	14,0	1,13	0,20
		-3,2%		-18,7%	0,4%		3,7%	
Süd	Lissabon	44	10,9	620	25	7,7	1,12	0,19
		-5,6%		-16,4%	-0,4%		3,7%	
		RWZ im 3D- Optimum		Ø Diff.- Beträge	Δp mittel	s	w	s
		%	%	€/a	Pa	Pa	m/s	m/s
8.760 h/a								
Nord	Helsinki	77	6,1	11.708	97	22,4	1,07	0,19
		-0,3%		-1,5%	11,3%		3,9%	
Mitte	Mannheim	71	7,0	6.310	71	16,8	1,07	0,19
		-2,7%		-17,4%	1,4%		3,9%	
Süd	Lissabon	56	9,5	1.644	36	9,6	1,06	0,18
		-3,3%		-14,4%	2,3%		3,9%	

Anhang A3. Monetär optimierte Übertragungsgrade der WRG mit Berücksichtigung der Minderinvestitionen für die Wärme- und Kälteerzeugung

		RWZ im 3D- Optimum		Ø Diff.- Beträge	Δp mittel	s	w	s
		%	%	€/a	Pa	Pa	m/s	m/s
2.350 h/a								
Nord	Helsinki	67	9,1	3.309	61	15,2	1,10	0,21
		10,2%		47,0%	4,5%		-9,8%	
Mitte	Mannheim	66	9,9	2.955	50	30,8	1,01	0,21
		25,1%		145,4%	18,0%		-17,2%	
Süd	Lissabon	58	11,8	1.527	32	33,7	0,96	0,19
		85,4%		787,8%	107,8%		-18,6%	
		RWZ im 3D- Optimum		Ø Diff.- Beträge	Δp mittel	s	w	s
		%	%	€/a	Pa	Pa	m/s	m/s
5.000 h/a								
Nord	Helsinki	74	7,1	7.493	72	17,0	1,01	0,18
		4,5%		21,7%	-0,4%		-7,3%	
Mitte	Mannheim	73	8,0	5.860	58	14,8	0,95	0,18
		11,0%		56,6%	3,2%		-12,8%	
Süd	Lissabon	64	10,5	2.532	35	30,3	0,90	0,17
		36,3%		241,2%	40,6%		-16,7%	
		RWZ im 3D- Optimum		Ø Diff.- Beträge	Δp mittel	s	w	s
		%	%	€/a	Pa	Pa	m/s	m/s
8.760 h/a								
Nord	Helsinki	79	5,9	13.600	85	19,8	0,97	0,17
		2,6%		14,5%	-2,1%		-5,8%	
Mitte	Mannheim	78	6,7	10.147	69	17,1	0,92	0,17
		6,0%		32,8%	-1,1%		-10,7%	
Süd	Lissabon	69	9,1	3.990	41	30,4	0,88	0,16
		18,7%		107,8%	17,4%		-13,7%	

Anhang A4. Monetär optimierte Übertragungsgrade der WRG im Teillastbetrieb (70 % im Tagbetrieb und 40 % im Nachtbetrieb)

		RWZ im 3D- Optimum		Ø Diff.- Beträge	Δp mittel	s	w	s
		%	%	€/a	Pa	Pa	m/s	m/s
2.350 h/a								
Nord	Helsinki	59	9,6	1.722	85	23,8	1,50	0,26
		-2,5%		-23,5%	47,2%		23,0%	
Mitte	Mannheim	51	10,7	934	62	18,3	1,50	0,26
		-3,2%		-22,4%	47,0%		23,0%	
Süd	Lissabon	30	9,4	129	22	6,9	1,44	0,22
		-5,7%		-25,0%	43,5%		22,0%	
		RWZ im 3D- Optimum		Ø Diff.- Beträge	Δp mittel	s	w	s
		%	%	€/a	Pa	Pa	m/s	m/s
5.000 h/a								
Nord	Helsinki	70	7,4	4.931	107	26,0	1,33	0,23
		-1,5%		-19,9%	49,2%		22,0%	
Mitte	Mannheim	65	8,4	3.010	83	20,9	1,33	0,24
		-1,8%		-19,5%	48,6%		22,0%	
Süd	Lissabon	45	10,6	596	37	11,1	1,32	0,23
		-3,2%		-19,7%	47,0%		22,2%	
		RWZ im 3D- Optimum		Ø Diff.- Beträge	Δp mittel	s	w	s
		%	%	€/a	Pa	Pa	m/s	m/s
8.760 h/a								
Nord	Helsinki	76	6,0	9.758	128	29,8	1,25	0,22
		-1,2%		-17,9%	47,8%		21,4%	
Mitte	Mannheim	72	6,9	6.245	103	24,4	1,25	0,22
		-1,4%		-18,3%	47,2%		21,4%	
Süd	Lissabon	57	9,6	1.557	51	13,7	1,24	0,22
		-2,2%		-18,9%	46,2%		21,6%	