

Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 2)



Im ersten Teil der Veröffentlichung, der in der GI 2/2019 erschienen ist, wurden die Grundlagen der mehrdimensionalen und relationalen Optimierung der Wärmerückgewinnung (WRG) dargestellt, die sowohl unter monetären als auch unter ökologischen Rahmenbedingungen durchgeführt werden kann. Aufgrund der verschiedenen Rahmenbedingungen ist es so möglich, für den Einzelfall ein jeweiliges Optimum der WRG zu finden. Dabei kann sowohl ein ökonomisches wie auch ein ökologisches Optimum oder Maximum erreicht werden. Beide sind aber meist nicht identisch, sodass entschieden werden muss, ob der ökonomischen oder ökologischen Optimierung gefolgt werden soll. In jedem Fall kann die Festlegung einer optimalen WRG verhindern, dass mit einer zu kleinen oder einer zu großen WRG ein ökonomisches oder ökologisches Potenzial verschenkt wird. Dies ist sowohl unter betriebswirtschaftlichen als auch unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten sinnvoll, da die Summe der betriebswirtschaftlichen Optima zu einem volkswirtschaftlichen Optimum führen muss. Im zweiten Teil dieser Veröffentlichung wird der Einfluss der Optimierung auf Europa untersucht. Dabei werden für 46 Standorte vom Norden bis zum Süden Europas die meteorologischen Einflüsse auf die Wirtschaftlichkeit unter Berücksichtigung von verschiedenen Einflussfaktoren wie Laufzeit, Energiepreise etc. auf Basis eines mittleren Anwendungsfalls untersucht. Anhand einer Korrelation der Ergebnisse zur jeweiligen Außenlufttemperatur können Zusammenhänge zu den korrespondierenden Optima gefunden werden.

VON
CHRISTOPH KAUP

A Multi-Dimensional and Relational Optimization Method of Heat Recovery Systems (Part 2)

In the first part of the publication published in GI 2/2019, the method of multidimensional and relational optimization of heat recovery was presented, which can be carried out under both monetary and environmental conditions. Thus, due to the different framework conditions a respective optimum of the heat recovery can be found in individual cases. In this case, an economic as well as an ecological optimum or maximum can be achieved. However, both are usually not identical, so it has to be decided whether the economic or ecological optimization should be followed. In any case, the determination of an optimal heat recovery is able to prevent an economic or ecological potential being omitted through a too small or a too big heat recovery. This makes sense from a micro- as well as a macro-economic point of view since the sum of the business optimizations must lead to a macro-economic optimization. The second part of this publication examines the impact of optimization at an average example of a unit for Europe under different framework conditions. For 46 locations from the north to the south of Europe, an meteorological influences on economic efficiency are examined, taking into account various influencing factors such as operating time, energy prices, etc. On the basis of a correlation of the results to the respective outside air temperature, correlations to the corresponding optima can be found.

1. Eine Betrachtung für Europa

Eine Optimierung von WRG-Systemen kann nur durch Variation aller drei geometrischer Dimensionen grundlegend und tatsächlich erfolgen. Eine Methodik zur Optimierung wurde in Teil 1 dieser Veröffentlichung aufgezeigt [1]. Dazu ist auch der geografische Standort von Bedeutung, wie im Folgenden aufgezeigt wird [2]. Sowohl der Querschnitt (Höhe und Breite des WRG-Systems) als auch in einer zweiten Berechnungsschleife die Bautiefe muss in eine mehrdimensionale und relationale Optimierung einfließen. Beide dienen daher als Variablen zur Berechnung des maximalen Ertrags [3]. Hieraus ergibt sich eine Vielzahl von Optima, die den jeweiligen Flächen und den daraus resultierenden Luftgeschwindigkeiten bzw. Anströmflächen zugeordnet sind. Aus dieser Vielzahl kann durch eine Maximalwertbetrachtung das größte Optimum (Maximum der Einsparung oder maximaler Ertrag) bestimmt werden. Dass es auch aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvoll ist, die WRG mit niedrigen Luftgeschwindigkeiten zu betreiben, da damit einerseits der Übertragungsgrad steigt und andererseits der elektrische Aufwand bedeutend sinkt, wurde schon aus den bisherigen Beispielen des ersten Teils der Veröffentlichung ersichtlich.

Im Folgenden soll nun die Auswirkung der mehrdimensionalen Optimierung an einem Beispiel betrachtet werden, das eine durchschnittliche Wärmerückgewinnung 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 Wärmerückgewinnung gemäß EU 1253/2014 bewerten zu können. Die spezifischen Anforderungen an Nichtwohnungs-lüftungsgeräte betreffen im Wesentlichen die europaweite Festlegung der minimalen thermischen Übertragungsgrade der Wärmerückgewinnungssysteme, aber auch die maximale elektrische Leistungsaufnahme der verwendeten Ventilatoren.

Es stellt sich immer häufiger die Frage, ob die pauschalen und starren Mindestanforderungen nach EU 1253/2014 in allen Einzelfällen sinnvoll sind und zu positiven Ergebnissen führen. Die Grundidee der Verordnung beruht auf dem politischen Willen, Energie und CO₂-Emissionen einzusparen. Doch darf sie nicht dazu führen, dass es zur Verschwendung von Energie und Ressourcen kommt.

Zur Simulation des Betriebs wurde ein mittleres RLT-Gerät mit WRG und folgenden Rahmenbedingungen angenommen, welche sich aus dem Mittelwert der Analyse von rund 3.300 realer und marktbezogener Auslegungen aus den Jahren 2015–2018 [4] ergaben:

1. Ein Volumenstrom, der einem mittleren Zu- und Abluftvolumenstrom von $\dot{V} = 14.000 \text{ m}^3/\text{h}$ entspricht.
2. Ein WRG-System als Kreislaufverbundsystem mit einer Rückwärmzahl von $\Phi_t = 73 \%$.

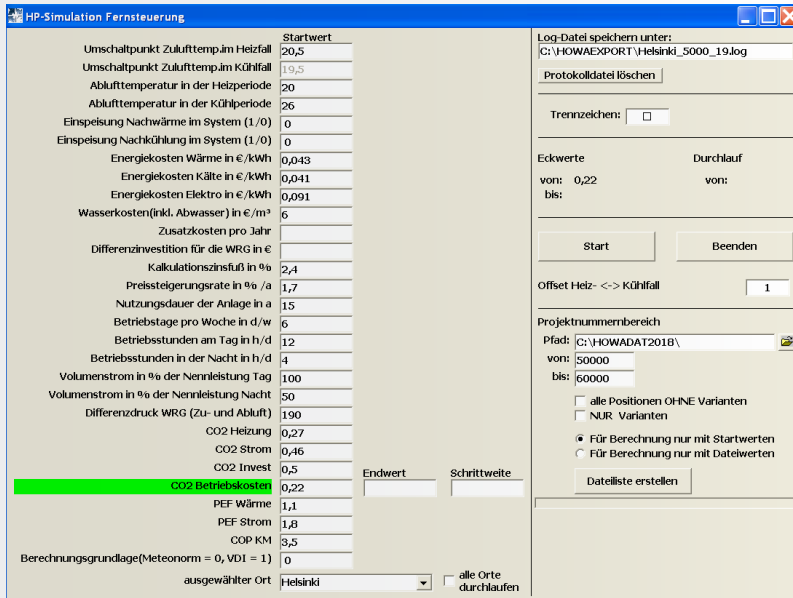


Bild 1: Softwarebot zur Simulation mit verschiedenen Rahmenparametern, nach [15].

3. Die Druckverluste der WRG mit $\Delta p = 176$ Pa auf der Zuluftseite und $\Delta p = 176$ Pa auf der Abluftseite.
4. Als Ventilatorsysteme freilaufende Räder mit einem Systemwirkungsgrad von $\eta = 60$ %.
5. Die Effizienzklasse der Antriebe mit der Klasse P1 (nach EN 13053).
6. Der $SFP_{int.} = 736$ W s/m^3 . Damit wird die ErP-Verordnung EU 1253/2014 für die Stufe 2018 erfüllt.
7. Die Luftgeschwindigkeit im lichten Querschnitt des RLT-Gerätes mit $w = 1,5$ m/s, welche der Klasse V1 nach EN 13053 entspricht.

Zur Berechnung der Aufwendungen und der Erträge wurden weiterhin folgende Annahmen berücksichtigt:

1. Die Kosten für Wärme mit $k_w = 0,043$ €/kWh (EU 28 Durchschnitt 2008–2017 [5], [6]).
2. Die Kosten zur Kälteerzeugung mit $k_k = 0,041$ €/kWh (siehe 3. mit COP = 3 und 35 % Verteilverlusten berechnet).
3. Elektroenergie mit $k_e = 0,091$ €/kWh (EU 28 Durchschnitt 2008–2017 [7]).
4. Ein Zinssatz mit $z = 2,4$ % zur Abzinsung der Zeitperioden [8].
5. Eine Preissteigerungsrate von $p = 1,7$ % [9].
6. Eine Lebensdauer mit $n = 15$ a.
7. Die Ablufttemperatur mit $\vartheta_{1'} = 20$ °C im Winter und $\vartheta_{1'} = 26$ °C im Sommer.
8. Die Zulufttemperatur ganzjährig mit $\vartheta_{1''} = 20$ °C.

9. CO₂-Emissionen für die Wärmeerzeugung mit $CO_2e_{Gas} = 270$ g/kWh (Gas) (inkl. 35 % Erzeugungs- und Verteilverluste) [10], $CO_2e_{Strom} = 460$ g/kWh für den Strommix [11] und „graue“ CO₂-Emission für die Investitionen $CO_2e_{Cost} = 500$ g/€ und Betriebskosten mit $CO_2e_{Cost} = 220$ g/€ [12], [13].

10. Der Volumenstrom während des Tages mit 100 % (Vollast) und 50 % während der Nacht (Teillastbetrieb).

11. Es wurden drei Laufzeitmodelle verwendet, die bei $L = 2.350$ h/a, $L = 5.000$ h/a und $L = 8.760$ h/a liegen.

12. Insgesamt 46 Orte in Europa vom Süden (Paphos) bis zum äußersten Norden (Turku). Die meteorologischen Daten wurden durch die Software Meteororm 7.1 erzeugt.

Die Energiepreise liegen auf europäischer Ebene (EU 28) deutlich niedriger als in Deutschland. Es wurden für die Simulationen die Mittelwerte der Preise der letzten zehn Jahre (2008–2017) verwendet.

Zur Bestimmung der Klimadaten wurde die Meteororm-Software verwendet. Sie ist eine umfassende meteorologische Referenz, die Zugang zu einem Katalog von meteorologischen Daten für jeden Punkt der Erde gewährt. Eine Vielzahl globaler und regionaler Datenbanken wurde kombiniert und validiert. In der verwendeten Version 7.1 stammen die meisten Daten aus dem WMO Climatological Normals 1961–1990 und aus der Schweizer Datenbank von Meteo Schweiz [14].

Aus den Monatswerten (Stationsdaten und interpolierte Daten) kalkuliert Meteororm mit einem stochastischen Modell Stundendaten eines „typischen Jahres“.

Nicht berücksichtigt wurden in den Berechnungen:

1. Außenluft- oder Raumluftfeuchten und damit keine Be- oder Entfeuchtung.
2. Im ersten Schritt die mögliche Reduktion von Investitionskosten, die sich durch eine kleinere Wärme- oder Kälteerzeugung ergeben hätte.
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.

Mit einem Bot (Batchgenerator siehe Bild 1) wurden die Simulationen automatisiert durchgeführt.

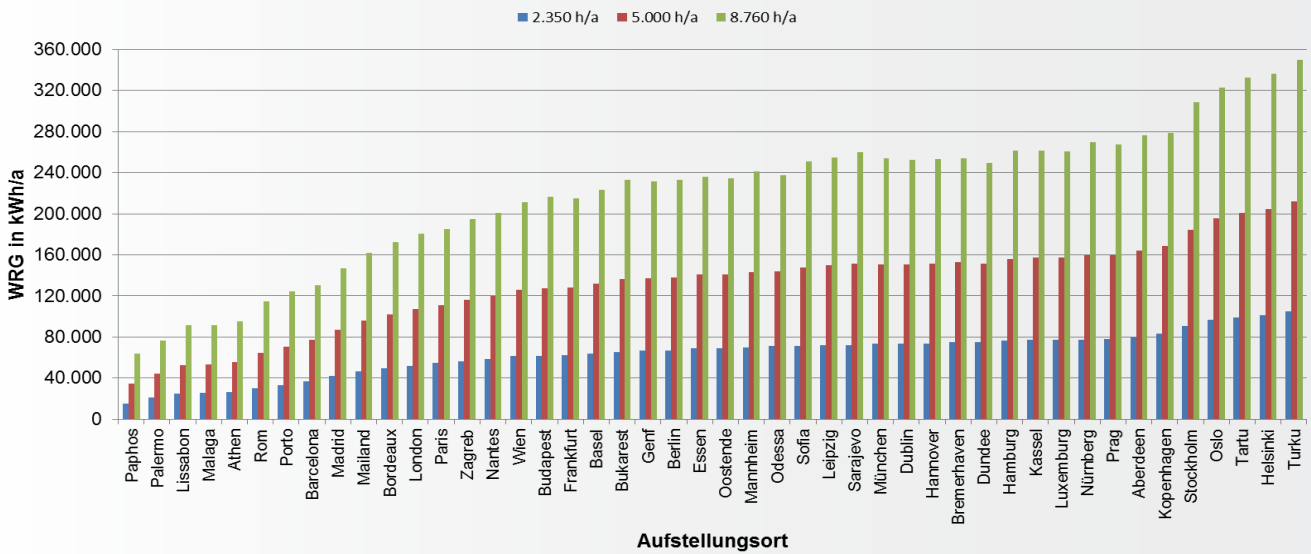


Bild 2: WRG mit $\varnothing W = 63.653 \text{ kWh/a}$ bei 2.350 h/a und einer Spanne von $F = 7,0$ (Nord zu Süd).

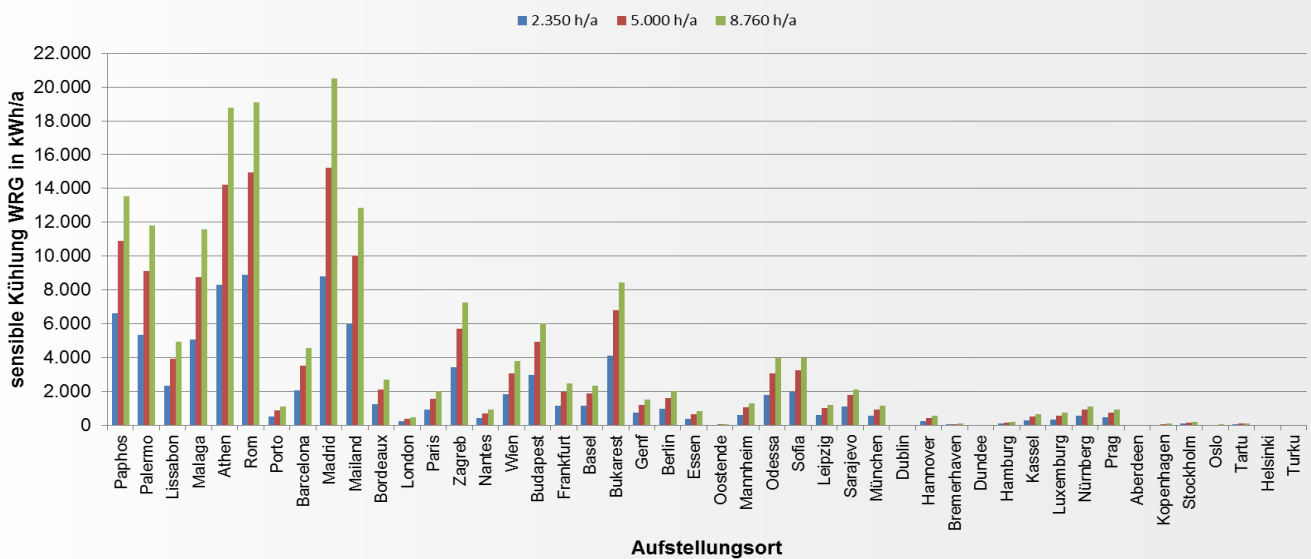


Bild 3: Sensible Kälterückgewinnung mit $\varnothing W = 1.976 \text{ kWh/a}$ bei 2.350 h/a.

Auf Basis der Berechnungen und Simulationen ergaben sich die in den folgenden Unterkapiteln dargestellten Ergebnisse.

2. Meteorologische (Standort) und laufzeitabhängige Einflüsse

Der Wärmeertrag der WRG im Winter innerhalb Europas bei einer Laufzeit von 9 h/d ($L = 2.350 \text{ h/a}$) sowie 16 h/d am Tag und 4 h/d in der Nacht ($L = 5.000 \text{ h/a}$) als auch bei 24 h/d ($L = 8.760 \text{ h/a}$) ergibt sich aus Bild 2. Der Anteil

der „Kälterückgewinnung“ im Sommer zeigt sich in Bild 3. Es wird ersichtlich, dass der Anteil der Kälterückgewinnung im Sommer im Durchschnitt nur einen Bruchteil (3 %) der Wärmerarbeiten im Winter ausmacht, welche die WRG liefert.

Auffällig ist ebenfalls, dass das Potenzial der Wärmerückgewinnung innerhalb Europas etwa um den Faktor $F = 7$ von Süd nach Nord zunimmt. Während in Paphos, Rom oder Madrid bei $L = 2.350 \text{ h/a}$ nur rund $W = 10.000 \text{ kWh/a}$ zurückgewonnen werden können, liegt der Anteil in Helsinki oder Turku bei über $W = 100.000 \text{ kWh/a}$.

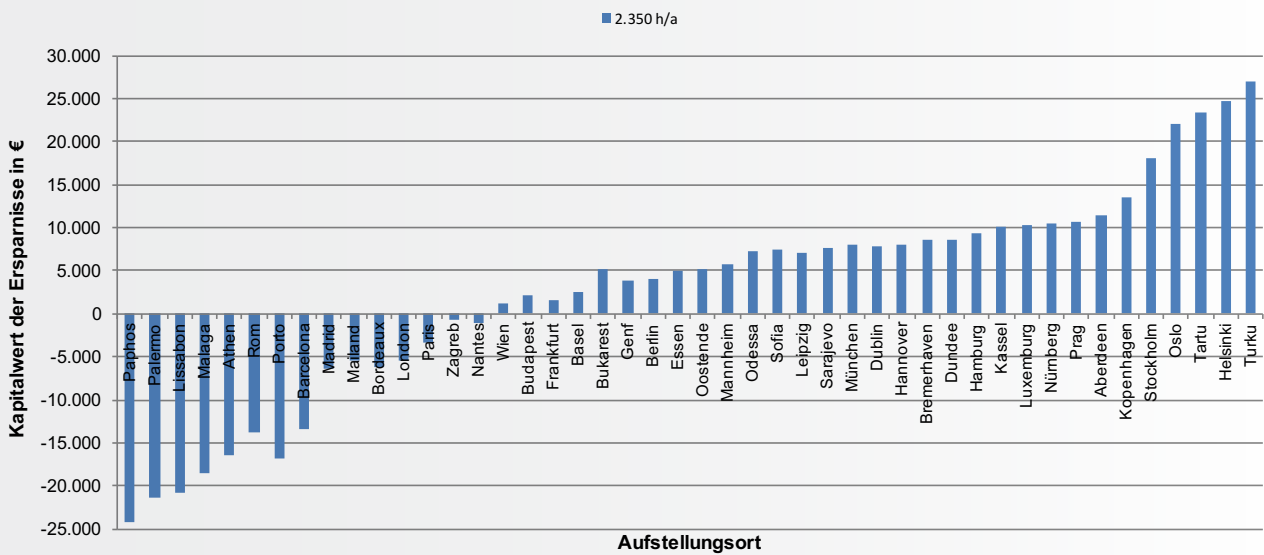


Bild 4: Kapitalwert der Ersparnisse Ø KW = 2.720 € bei 2.350 h/a.

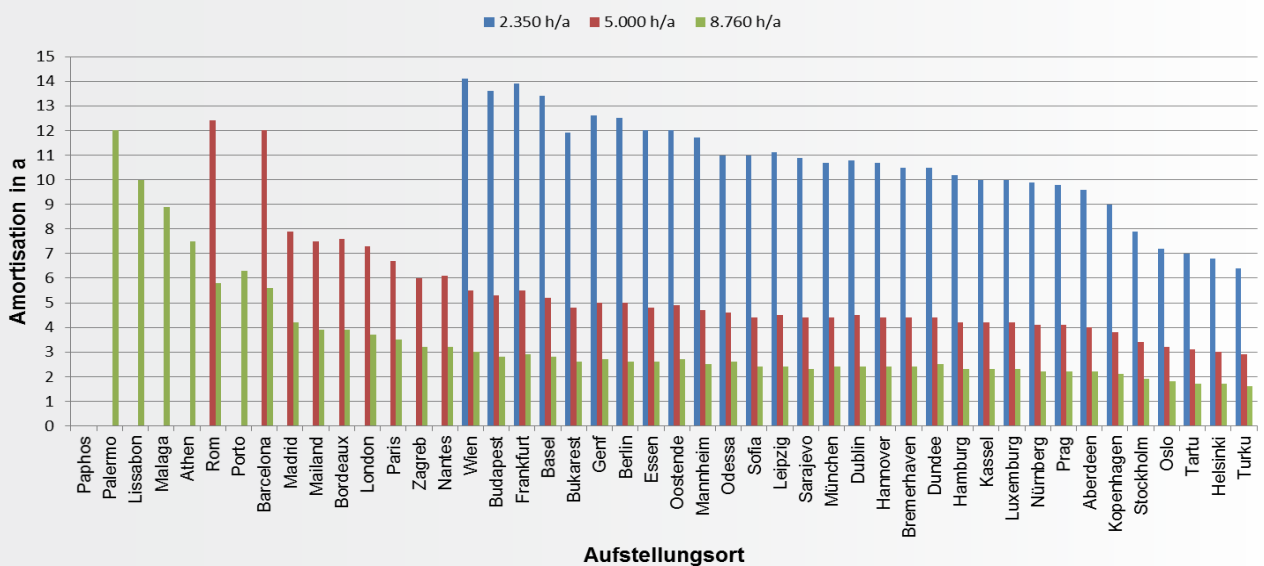


Bild 5: Amortisationszeit.

Wird die Laufzeit der WRG-Systeme auf das Maximum (L = 8760 h/a) erhöht, ändern sich die Ergebnisse zwar absolut, aber relativ gesehen kaum. Es wird im Durchschnitt ein Wärmeertrag von $W = 219.571 \text{ kWh/a}$ statt $W = 63.653 \text{ kWh/a}$ (bei $L = 2.350 \text{ h/a}$) zurückgewonnen. Der Ertrag an sensibler Kälte beträgt nun $W = 4.256 \text{ kWh/a}$ statt $W = 1.976 \text{ kWh/a}$ bei $L = 2.350 \text{ h/a}$.

Der Kapitalwert der Ersparnisse steigt dann im Durchschnitt von $KW = 2.720 \text{ €}$ bei $L = 2.350 \text{ h/a}$ auf $KW = 87.665 \text{ €}$ bei $L = 8.760 \text{ h/a}$.

Die wirtschaftlichen Kennwerte bei einer Laufzeit von $L = 2.350 \text{ h/a}$ sind Bild 4 zu entnehmen. Die Grafik macht deutlich, dass die Kapitalwerte

der Ersparnisse ein und derselben WRG innerhalb Europas je nach Standort deutlich variieren. Während im Süden eine WRG bei $L = 2.350 \text{ h/a}$ einen deutlichen Verlust (negativen Kapitalwert) bis zu $KW = 25.000 \text{ €}$ erwirtschaftet und damit unwirtschaftlich ist, liegt der Ertrag der identischen WRG in Helsinki oder Turku bei gleicher Laufzeit bei rund 27.000 € .

An der Entwicklung der Amortisationszeiten (siehe Bild 5) wird offensichtlich, dass im Süden die Zeiten deutlich länger sind als im Norden, wenn eine Amortisation der WRG im Süden überhaupt gegeben ist. Aber selbst bei einer Laufzeit von $L = 8.760 \text{ h/a}$ erreicht die WRG

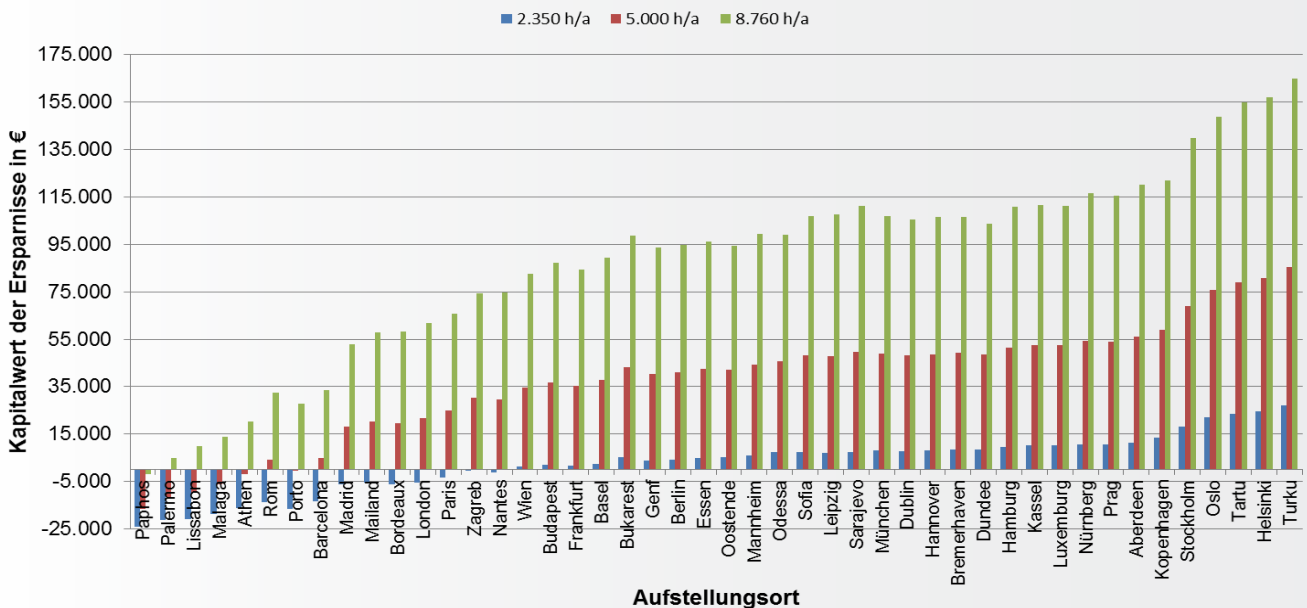


Bild 6: Jährliche Differenzkosten bei Auslegungsbedingungen (ca. 1,5 m/s).

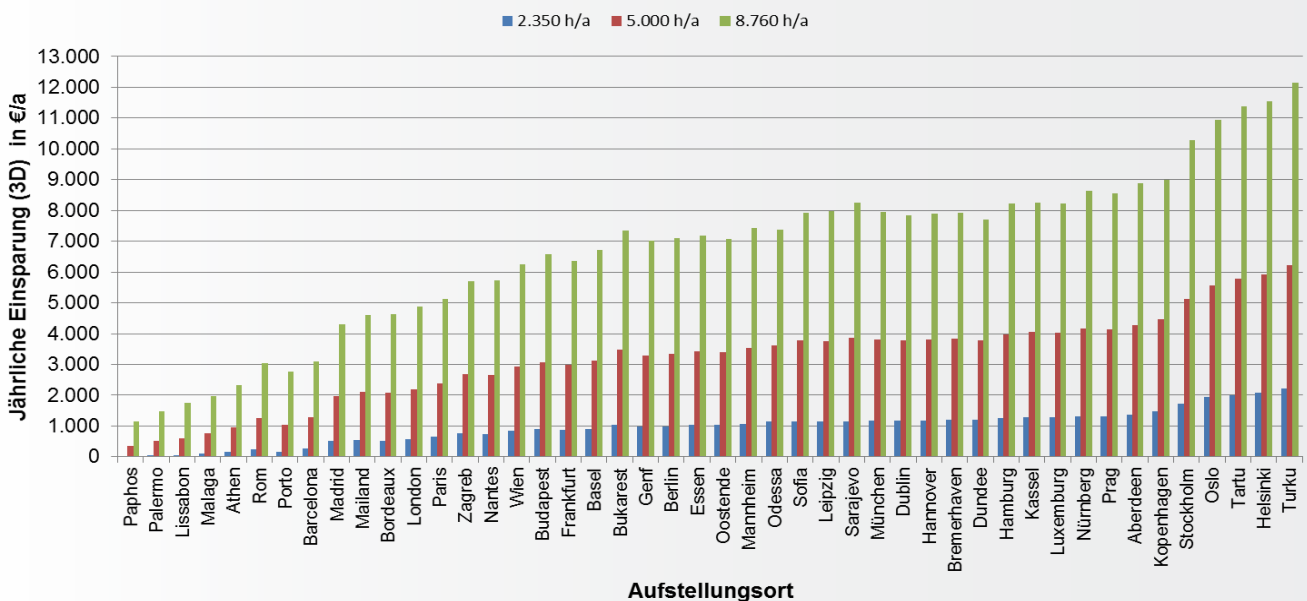


Bild 7: Mehrdimensionale Optimierung der monetären Einsparung (3D-Optimierung).

unter den gegebenen Rahmenbedingungen in Lissabon „nur“ eine Amortisationsdauer von $a = 10$ Jahren.

Der Kapitalwert der Ersparnisse ergibt sich aus den jährlichen Differenzkosten (Annuitäten) (siehe Bild 6). Im Süden Europas sind diese bei den geforderten Übertragungsgraden bei geringen Laufzeiten negativ. Erst bei höheren Laufzeiten werden diese positiv.

Mit der beschriebenen mehrdimensionalen Optimierung (siehe Bild 7) könnte jedoch die potenzielle Einsparung der WRG im Durchschnitt, insbesondere im Süden Europas, deutlich gesteigert werden (vergleiche Bild 6 mit Bild 7). Im Süden kann damit ein Verlust gänzlich ausgeschlossen werden.

Hierzu sind jedoch wesentlich geringere Luftgeschwindigkeiten im Querschnitt erforderlich,

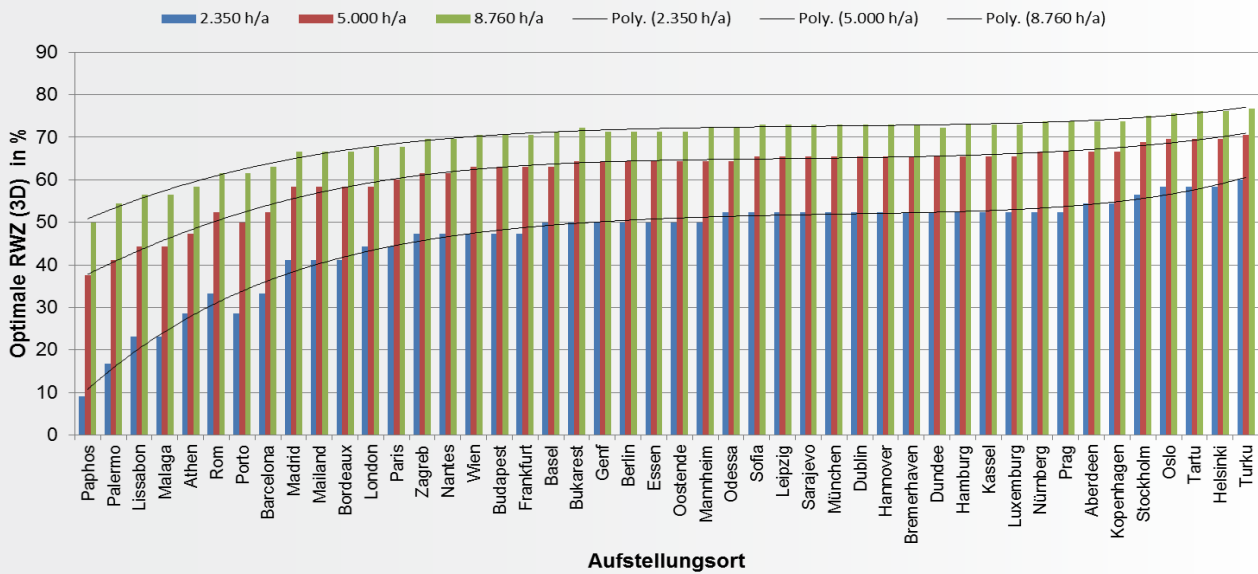


Bild 8: Optimale Übertragungsgrade (monetäre 3D-Optimierung).

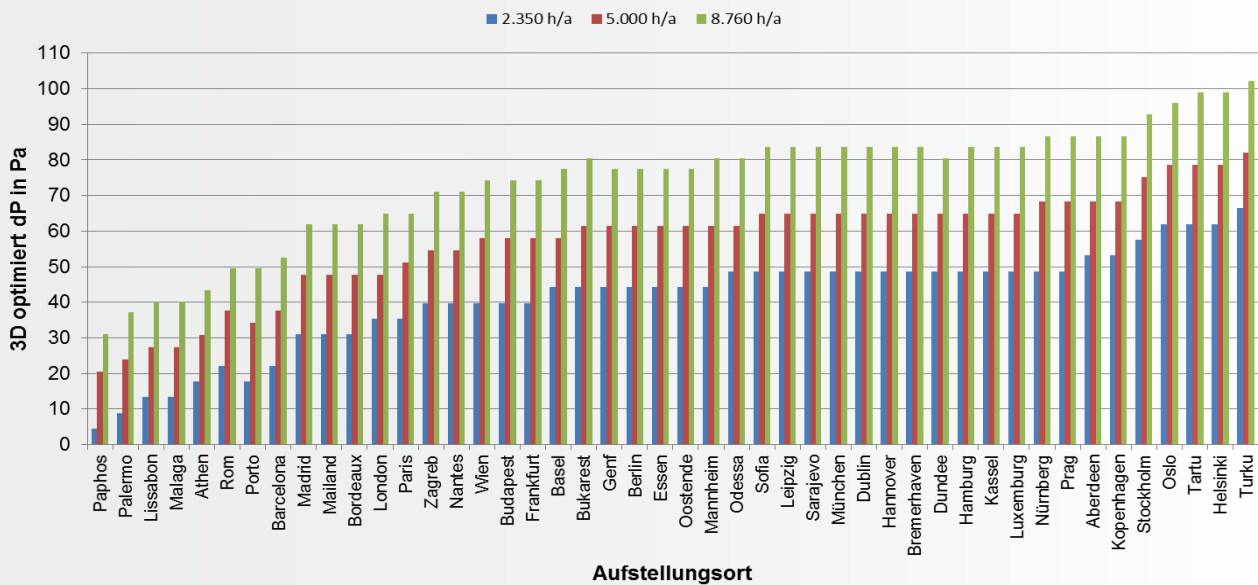


Bild 9: Optimaler Differenzdruck des WRG-Systems (monetäre 3D-Optimierung).

die an jedem Standort in Europa bei knapp $w = 1,2 \text{ m/s}$ liegen müssen. Bei diesen Luftgeschwindigkeiten ergeben sich dann optimale Übertragungsgrade, die aus Bild 8 zu entnehmen sind.

Die Ergebnisse zeigen, dass Mindestübertragungsgrade nicht pauschal festgelegt werden können. Es wird auch deutlich, dass der heute geforderte Temperaturübertragungsgrad nach EU 1253/2014 von 73 % (68 % bei KVS) bei den gegebenen Rahmenbedingungen nur im äußersten Norden und bei $L = 8.760 \text{ h/a}$ sinnvoll ist.

Während im Süden bei $L = 2.350 \text{ h/a}$ Übertragungsgrade von rund $\Phi_t = 10\text{--}15 \%$ ausreichen, sind im Norden Übertragungsgrade von bis zu $\Phi_t = 60 \%$ notwendig, um das volle Potenzial der WRG ausschöpfen zu können. Es zeigt sich, dass die Laufzeit ebenfalls einen großen Einfluss auf den optimalen Übertragungsgrad hat. Bei einer Laufzeit von $L = 8.760 \text{ h/a}$ liegen die optimalen Übertragungsgrade bei rund $\Phi_t = 50 \%$ im Süden und bei etwa $\Phi_t = 78 \%$ im Norden.

Die notwendige Bautiefe des WRG-Systems bezogen auf die Bautiefe der Referenzauslegung

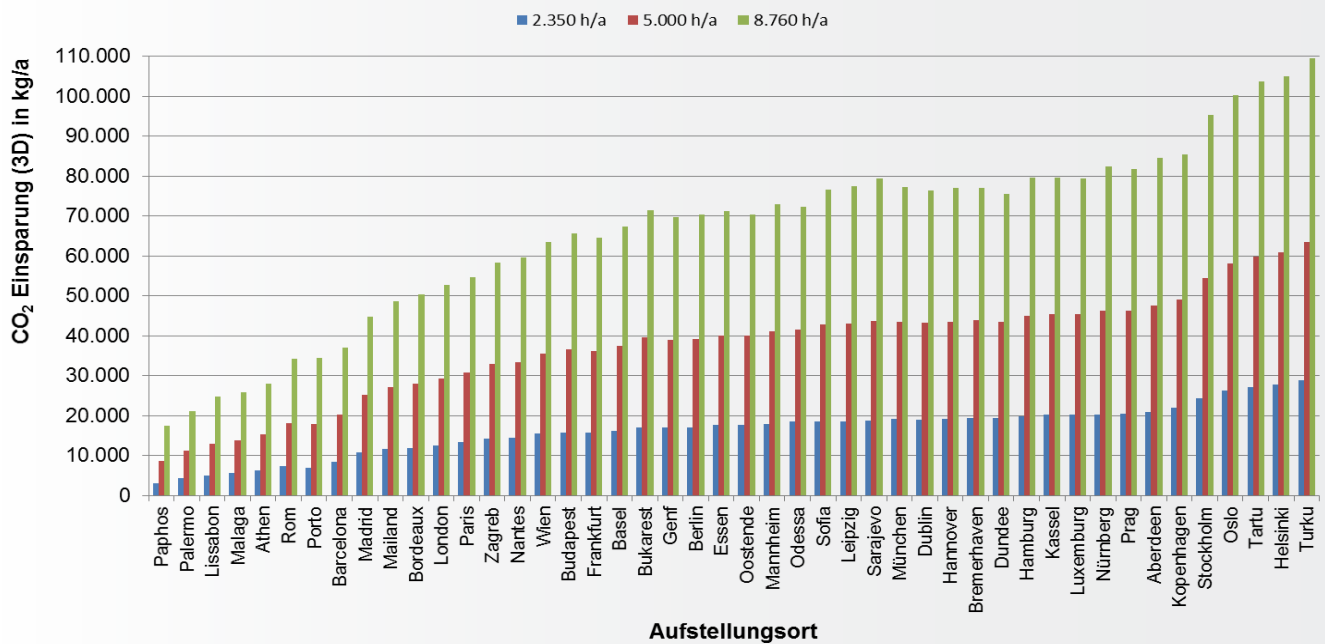


Bild 10: CO₂-Einsparung des WRG-Systems im 3D-Optimum.

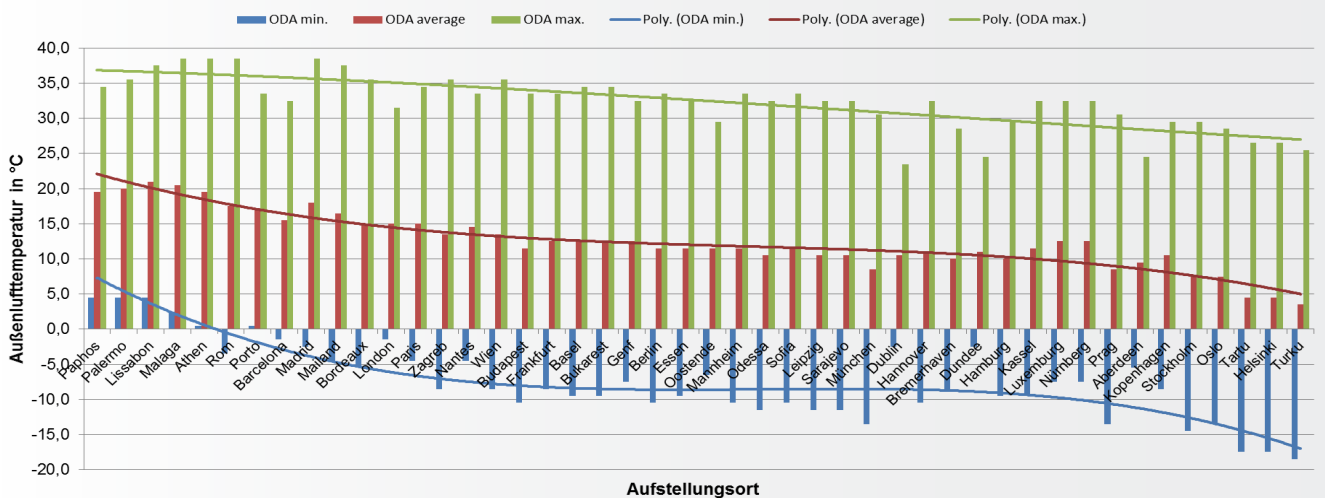


Bild 11: Zusammenhang zwischen Aufstellungsort und Außenlufttemperatur.

muss unter optimalen Bedingungen variabel gewählt werden. Es wird auch deutlich, dass der geforderte Übertragungsgrad von $\Phi_t = 68\%$ bei KVS bei einer Laufzeit von $L = 2.350$ h/a deutlich zu hoch liegt. Selbst bei einem 16-Stundenbetrieb mit $L = 5.000$ h/a werden Übertragungsgrade von $\Phi_t \geq 0,68$ erst im äußersten Norden sinnvoll.

Aus Bild 9 wird ersichtlich, dass die Differenzdrücke bei optimaler Luftgeschwindigkeit sehr gering sind und selbst bei $L = 8.760$ h/a meist deutlich unter $\Delta p = 100$ Pa liegen. Es zeigt sich auch, dass bei der Festlegung der Übertragungsgrade der

Aufstellungsort der WRG flexibel berücksichtigt werden muss.

Bei der ökologischen Optimierung auf Basis einer maximalen CO₂-Einsparung wird ein ähnliches Bild sichtbar, wobei die sich ergebenden Luftgeschwindigkeiten bei einer mehrdimensionalen Optimierung an allen Standorten in Europa unter $w = 0,6$ m/s liegen. Mit dieser geringen Geschwindigkeit kann die mögliche CO₂-Reduktion ebenfalls gesteigert werden (siehe Bild 10).

Kritisch muss jedoch bewertet werden, dass es bei solch niedrigen Luftgeschwindigkeiten

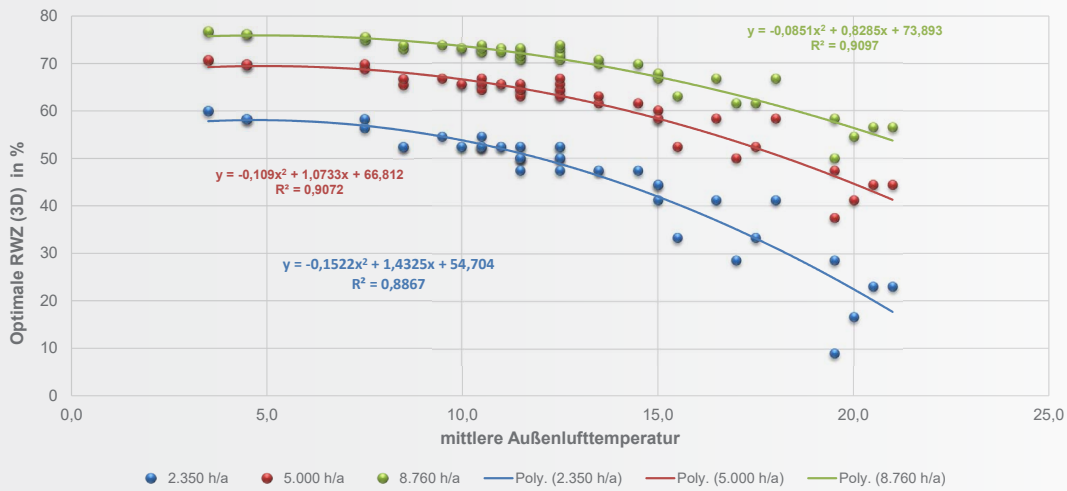


Bild 12: Zusammenhang zwischen mittlerer Außenlufttemperatur und optimaler RWZ.

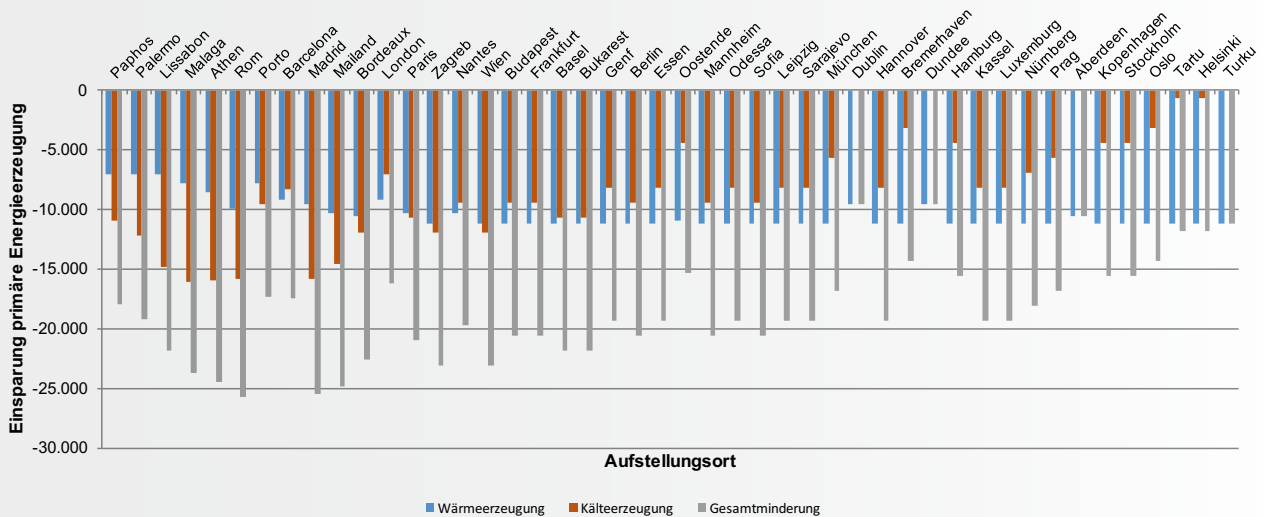


Bild 13: Mögliche Einsparungen der Wärme- und Kälteerzeugung durch WRG [16].

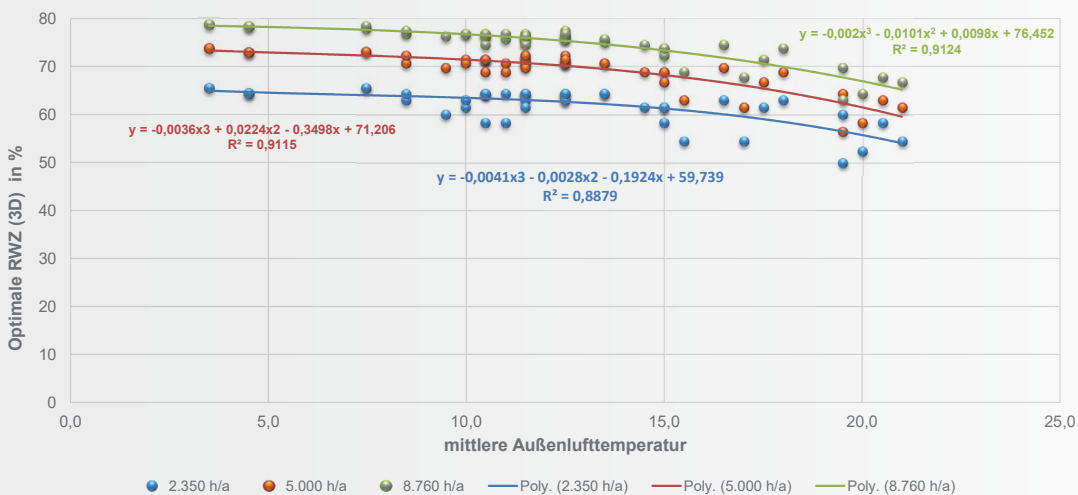


Bild 14: Optimale RWZ mit Berücksichtigung der Investitionseinsparungen.

zu Problemen im Teillastbereich kommen kann. WRG-Systeme können nur bis zu einer Geschwindigkeit von etwa $w = 0,4$ m/s bis $w = 0,5$ m/s noch sicher betrieben werden. Somit wäre der Teillastbetrieb mit $w = 0,6$ m/s Auslegungsgeschwindigkeit fast vollständig ausgeschlossen.

Die sich dann ergebenden Übertragungsgrade sind deutlich höher als die Übertragungsgrade, die sich bei einer monetären Optimierung ergeben. Dieser Umstand zeigte sich bereits im ersten Teil dieser Veröffentlichung.

Bei maximaler Laufzeit von $L = 8.760$ h/a liegen die optimalen Luftgeschwindigkeiten auch unter monetären Gesichtspunkten ebenfalls auf einem Niveau von knapp $w = 1$ m/s und die optimale Geschwindigkeit zur Reduzierung der CO₂-Emissionen liegt bei ca. $w = 0,5$ m/s.

3. Definition des Einflusses des Standorts

Wie könnte der Einfluss des Aufstellungsorts in eine mögliche Regulierung einfließen? Wäre die Definition von Klimazonen sinnvoll? Um diese Fragen zu beantworten, könnte sinnvollerweise ein Zusammenhang zwischen der mittleren Außenlufttemperatur und des Aufstellungsorts hergestellt werden. Bild 11 zeigt diesen Zusammenhang. Die Temperaturen schwanken zwischen $\vartheta = -17$ °C (Winter im Norden) bis $+4$ °C (Winter im Süden) (blaue Balken), während im Sommer die maximalen Temperaturen zwischen $\vartheta = 25$ °C und 38 °C moderater differieren (grüne Balken). Die roten Balken stellen die mittlere Außenlufttemperatur (Mittelwert aus der maximalen Sommer- und der tiefsten Wintertemperatur) dar.

Auf Basis der Außenlufttemperaturen (vgl. Bild 11) kann ein Zusammenhang mit der optimalen Rückwärmzahl (RWZ) (vgl. Bild 8) hergestellt werden. Das Ergebnis aus dieser Kombination zeigt Bild 12. Es wird ersichtlich, dass somit 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 (Anpassungsgüte) des Regressionsmodells.

Wie bereits im ersten Teil dieser Veröffentlichung gezeigt, kann die Wirtschaftlichkeit der WRG erheblich gesteigert werden, wenn durch die WRG die Investition der Wärmeerzeugung und/oder der Kälteerzeugung verringert wird und

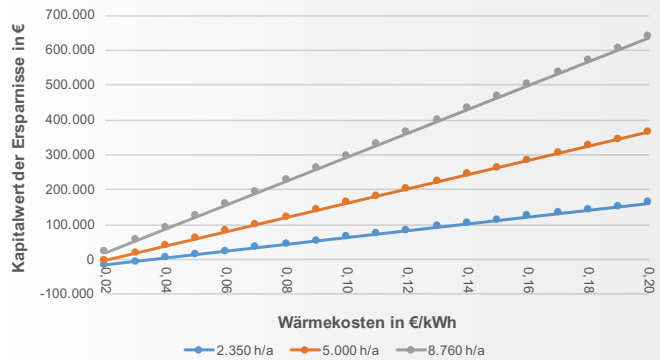


Bild 15: Einfluss des Wärmepreises und der Laufzeit der WRG auf den Kapitalwert der Ersparnisse.

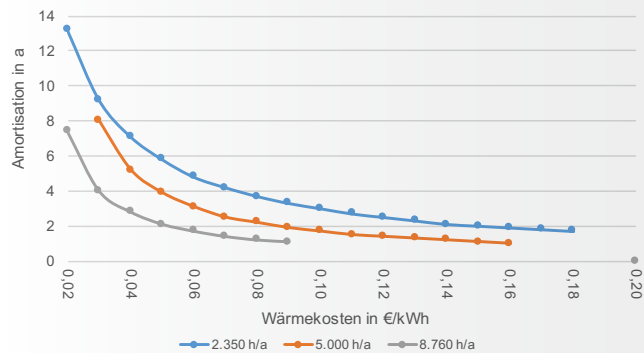


Bild 16: Einfluss des Wärmepreises und der Laufzeit der WRG auf die Amortisation.

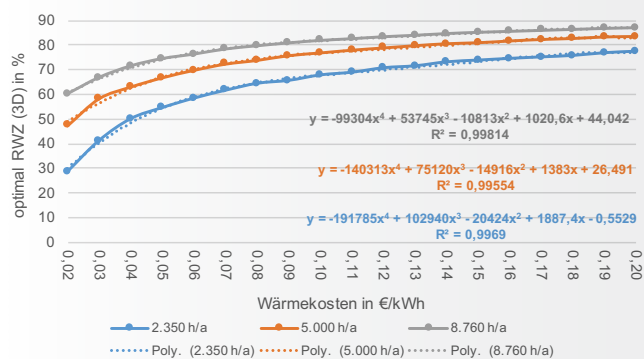


Bild 17: Einfluss des Wärmepreises und der Laufzeit der WRG auf die optimale RWZ.

diese Investition bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit der WRG berücksichtigt werden kann. Bild 13 zeigt die möglichen Einsparungen (Wärme- und Kälteerzeugung) in Europa auf. Die mittlere Gesamteinsparung bei $\dot{V} = 14.400$ m³/h liegt bei rund $\Delta I = 20-25$ T€ im Süden und bei rund $\Delta I = 11$ T€ im Norden Europas.

Unter Berücksichtigung dieser Einsparung erhöht sich die Wirtschaftlichkeit deutlich, da

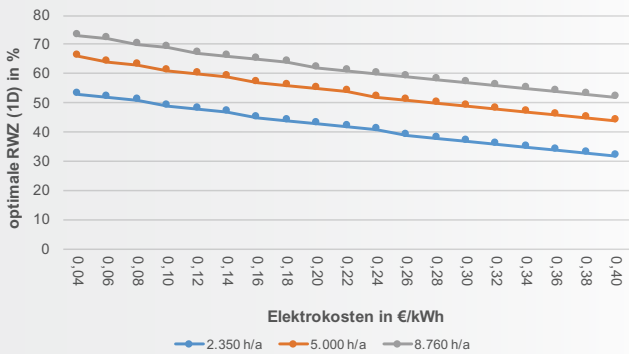


Bild 18: Einfluss des Elektroenergiepreises und der Laufzeit der WRG auf die optimale RWZ.

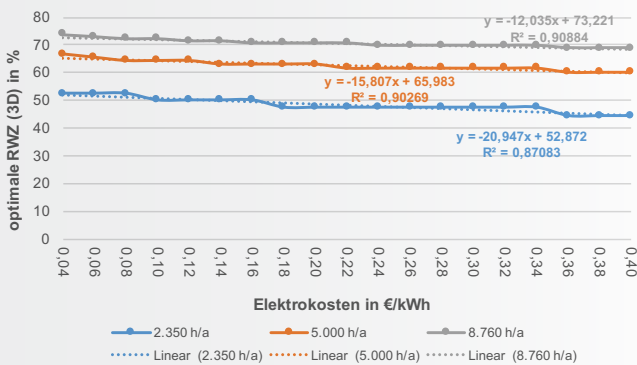


Bild 19: Einfluss des Elektroenergiepreises und der Laufzeit der WRG auf die mehrdimensional optimale RWZ.

der Kapitalaufwand sinkt. **Bild 14** zeigt die optimale RWZ unter dieser Voraussetzung in Abhängigkeit der Laufzeit und der mittleren Außenlufttemperatur.

4. Weitere Einflussparameter

Neben dem Ort der Aufstellung fließen insbesondere die Laufzeit sowie die spezifischen Preise in die Wirtschaftlichkeit der WRG ein. **Bild 15** zeigt den Einfluss der Laufzeit (2.350 h/a – 8.760 h/a) und des spezifischen Wärmepreises im Bereich von $k_w = 2-20$ Cent/kWh. Der Einfluss des spezifischen Wärmepreises geht linear in den Kapitalwert der Ersparnisse ein. Die Laufzeit nahezu ebenfalls.

Bild 16 zeigt den Einfluss auf die Amortisationsdauer. Insbesondere bei niedrigen Wärmepreisen wächst der Einfluss auf die Amortisationsdauer exponentiell.

Bild 17 zeigt den Einfluss auf die mehrdimensional optimale Rückwärmzahl. Insbesondere bei niedrigen Wärmepreisen sinkt die optimale RWZ deutlich. Es wird auch ersichtlich, dass der Einfluss sich verstärkt, je kürzer die Laufzeit der WRG ist. Polynome 4. Grades liefern die optimalen Übertragungsgrade unter den gegebenen Bedingungen.

Umgekehrt proportional verhält sich der Einfluss des spezifischen Elektropreises, der durch den Druckabfall der WRG zum Tragen kommt. Auch der spezifische Druckabfall der WRG (Auslegung) hat prinzipiell den gleichen Einfluss auf die optimale WRG, den auch der Elektroenergiepreis hat (siehe **Bild 18** und **Bild 19**).

Speziell die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten und damit die Druckverluste im Optimum werden maßgeblich durch den Elektroenergiepreis und die Laufzeit bestimmt (siehe **Bild 20**). Aus den Abbildungen wird nochmals deutlich, dass im mehrdimensionalen Optimum die Strömungsgeschwindigkeit niedrig sein muss, sodass zwar

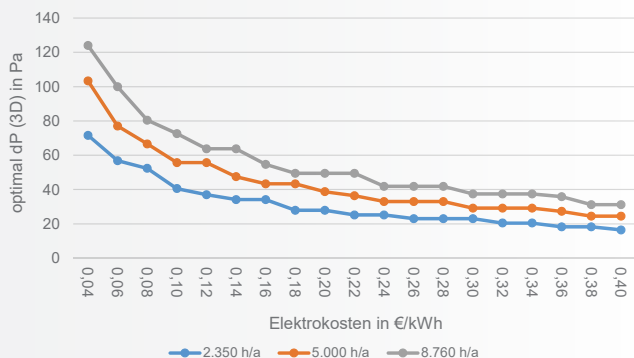
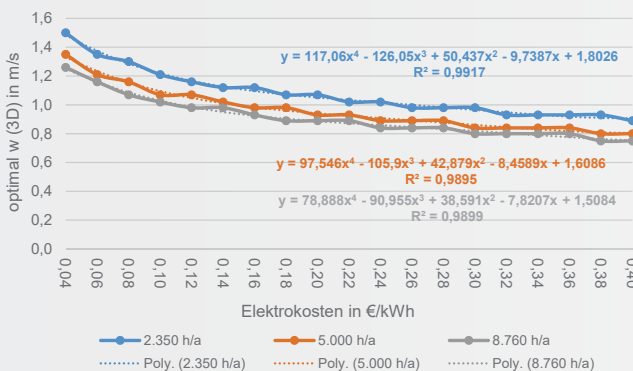


Bild 20: Einfluss des Elektroenergiepreises und der Laufzeit der WRG auf die Strömungsgeschwindigkeit (links) und den Druckabfall (rechts).

noch der Wärmeübergang sichergestellt ist, aber andererseits die Druckverluste niedrig sind.

Die optimale RWZ wird durch den Elektroenergiepreis kaum beeinflusst. Sie ist in Abhängigkeit des Elektroenergiepreises nahezu konstant. Im Beispiel liegt sie bei rund $\Phi_t = 42\%$ bei einer Laufzeit von $L = 2.350$ h/a und etwa bei $\Phi_t = 54\%$ bei $L = 5.000$ h/a und bei $\Phi_t = 61\%$ bei $L = 8.760$ h/a. Einen wesentlichen Einfluss hat allerdings auch die Ablufttemperatur auf die Wirtschaftlichkeit der WRG (siehe Bild 21). Diese Abhängigkeit ist prinzipiell linear und verhält sich analog zum spezifischen Wärmepreis (vgl. Bild 15).

Der Kapitalwert wird allerdings durch den Sollwert der erforderlichen Zulufttemperatur begrenzt. Daher flacht sich der Kapitalwert zu sehr hohen Ablufttemperaturen hin ab.

Dagegen hat die Ablufttemperatur, ähnlich wie der Wärmepreis, keinen Einfluss auf die optimale Strömungsgeschwindigkeit. Allerdings besteht ein Einfluss auf den Druckabfall, da der apparative Aufwand durch die höhere optimale RWZ größer wird. Durch die höhere Bautiefe der WRG steigt naturgemäß der Druckabfall (siehe Bild 22).

Den Einfluss der durchschnittlichen Volumenströme (Last) zeigen Bild 23 und Bild 24. Die mehrdimensional ermittelte RWZ wird kaum beeinflusst, während die Luftgeschwindigkeit und die zulässigen Druckverluste bei einem hohen Teillastbetrieb höher ausfallen dürfen.

5. Fazit

Die Ergebnisse machen deutlich, dass auf Basis individueller Rahmenbedingungen ein betriebswirtschaftliches Optimum oder Maximum in

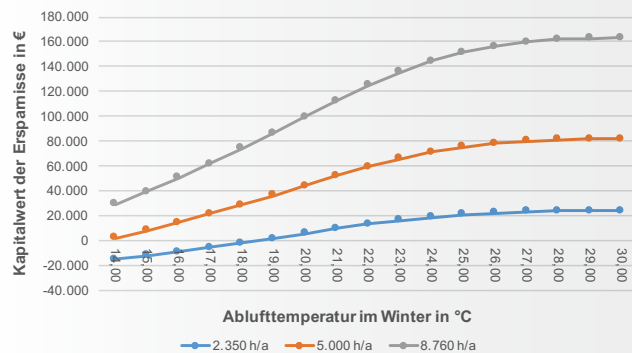


Bild 21: Einfluss der Ablufttemperatur und der Laufzeit der WRG auf den Kapitalwert der Ersparnisse.

jedem Einzelfall gefordert werden kann und muss, anstatt pauschalen Festlegungen den Vorzug zu geben, da sich aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen die lokalen Optima auch in Europa deutlich verschieben.

Weiter wird ersichtlich, dass zur Erreichung des maximalen Ertrags der WRG die Auslegungsluftgeschwindigkeit signifikant sinken muss und zwar auf etwa 1,2 m/s unter den gegebenen Rahmenbedingungen, um einen maximalen Ertrag erreichen zu können.

Es ist aber auch offensichtlich, dass pauschale Referenzwerte der Ökodesignverordnung ab 2020 nicht sinnvoll sind, da die optimalen Übertragungsgrade je nach Lokalität oder Laufzeit zwischen rund $\Phi_t = 20\%$ und $\Phi_t = 78\%$ variieren können.

Um den Einfluss des Aufstellungsortes berücksichtigen zu können, kann die jeweilige Außenlufttemperatur (z. B. der Mittelwert zwischen maximalen und minimalen Außenlufttemperaturen) als Indikator zur

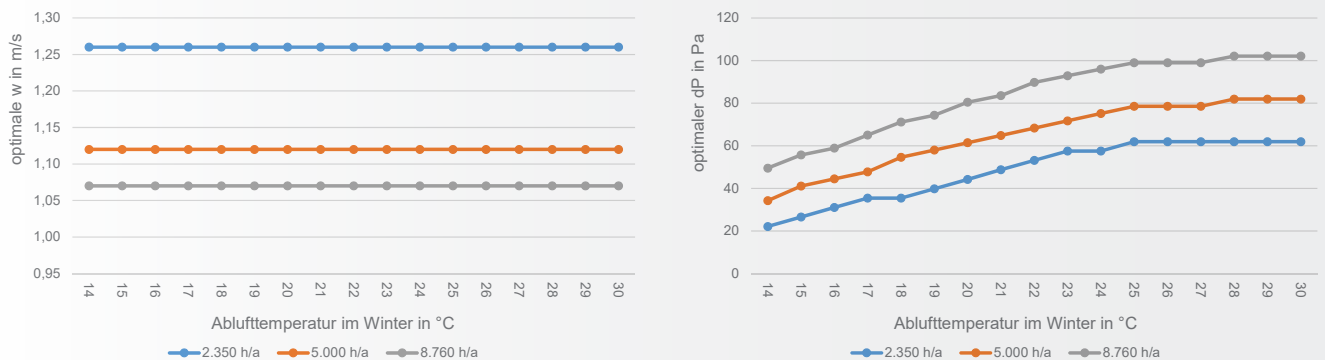


Bild 22: Einfluss der Ablufttemperatur und der Laufzeit der WRG auf die Strömungsgeschwindigkeit (links) und den Druckabfall (rechts).

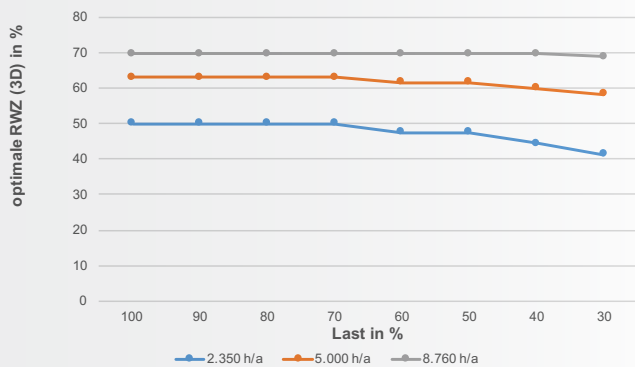


Bild 23: Einfluss der durchschnittlichen Volumenströme und der Laufzeit der WRG auf das mehrdimensionale Optimum.

Bestimmung der Übertragungsgrade (RWZ) verwendet werden.

Selbst die heutige pauschale Festlegung von Mindestübertragungsgraden gemäß Ökodesign macht keinen Sinn. Denn sowohl eine „zu kleine“ als auch eine „zu große“ WRG mindert den Ertrag und reduziert mögliche CO₂-Minderungen deutlich.

Es wird auch offensichtlich, dass diese beiden Einflussparameter – insbesondere der spezifische Wärmepreis und die Ablufttemperatur – einen großen Einfluss auf die optimale WRG haben. Die spezifischen Elektroenergiepreise sowie der spezifische Druckabfall der WRG beeinflussen im Wesentlichen die optimale Strömungsgeschwindigkeit. Auch zeigt sich, dass der Teillastbetrieb bei geringerer Last keinen großen Einfluss auf die RWZ, aber auf die Strömungsgeschwindigkeit hat.

Daher werden die Referenzwerte für Nichtwohnraumlüftungsgeräte ab Januar 2020 für Spannung sorgen. Denn dann wird laut Artikel 8 die Kommission die Verordnung überprüfen

und sie kann dabei schärfere Anforderungen festlegen, die eventuell mit niedrigeren Mess-toleranzen verbunden sein werden. Diese schärferen Anforderungen sollen sich an den Referenzwerten der Verordnung orientieren. Somit würde der $SFP_{int} = 150 \text{ W/m}^3/\text{s}$ unter dem Grenzwert des Jahres 2018 bei einem Volumenstrom $\dot{V} < 2 \text{ m}^3/\text{s}$ liegen und sogar $SFP_{int} = 250 \text{ W/m}^3/\text{s}$ unter dem Grenzwert für Geräte mit einem Luftvolumenstrom $\dot{V} \geq 2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Für Wärmerückgewinnungssysteme wird dann ein Übertragungsgrad von mindestens $\Phi_t = 85 \%$ mit Ausnahme des Kreislauf-Verbundsystems gefordert, das mindestens $\Phi_t = 80 \%$ einhalten muss. Diese Referenzwerte werden für alle Systeme und Hersteller ein kaum zu lösendes technisches und wie nun dargelegt auch ein wirtschaftliches Problem darstellen. Sie ergeben ökonomisch, aber auch ökologisch keinen Sinn.

Literatur

- [1] Kaup, C.: Mehrdimensionale und relationale Optimierung der Wärmerückgewinnung (Teil 1). GI – Gebäudetechnik in Wissenschaft & Praxis 140, Ausgabe 2/19, ITM InnoTech Medien GmbH, Augsburg, 2019.
- [2] Kaup, C.: Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen, Eine Betrachtung für Europa. Springer-VDI-Verlag, HLH 10/2017.
- [3] Kaup C.: Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen im Kontext ökonomischer und ökologischer Zielsetzungen. Springer-VDI-Verlag, HLH 08 und 09/2017.
- [4] Kaup, C.: Entwicklung der Wärmerückgewinnung in Deutschland. Springer-VDI-Verlag, HLH 10/2018.
- [5] <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&pcode=ten00117&plugin=1> (abgerufen am 07.06.2019).
- [6] <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode=ten00118&language=en> (abgerufen am 07.06.2019).

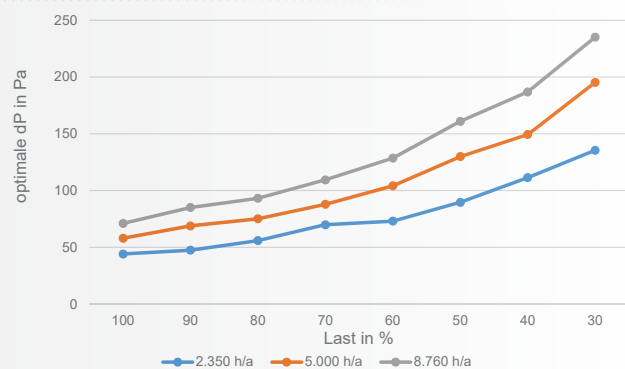
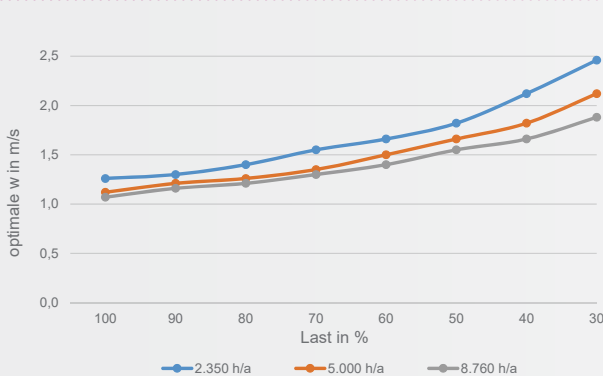


Bild 24: Einfluss der durchschnittlichen Volumenströme und der Laufzeit der WRG auf die Strömungsgeschwindigkeit (links) und den Druckabfall (rechts).

- [7] <https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&pcode=ten00117&plugin=1> (abgerufen am 07.06.2019).
- [8] GZ II A 3 – H 1012-10/07/0001 (www.bundesfinanzministerium), Stand 2018, Veröffentlichungsdatum 14. Mai 2018.
- [9] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/156285/umfrage/entwicklung-der-inflationsrate-in-der-eu-und-der-eurozone/> (abgerufen am 07.06.2019).
- [10] <https://lfu.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.523833.de> (abgerufen am 07.06.2019).
- [11] <https://de.econologie.com/Europa-Emission-co2-Land-kwh-elektrische/> (abgerufen am 07.06.2019).
- [12] https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/co2-emissionsfaktoren_fur_fossile_brennstoffe_korrektur.pdf (abgerufen am 07.06.2019).
- [13] 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.
- [14] Meteonorm 7.1 Produkt-Broschüre (en) 2014.
- [15] Allnoch, G., Kaup, C., Programm zur automatisierten Wirtschaftlichkeits- und Optimierungsrechnung von WRG-Systemen (Softwarebot), 2017–2019.
- [16] BMVBS-Online-Publikation: Ermittlung von spezifischen Kosten energiesparender Bauteile-, Beleuchtungs-, Heizungs- und Klimatechnikausführungen bei Nichtwohngebäuden für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen zur EnEV 2012, 08/2012. www.energiekompetenz-bw.de/fileadmin/user_upload/energiemanagement/Wissensportal/Ausbildungen/energieauditor_16247_kommunal/16-Kostenkennwerte-Technik.pdf (abgerufen am 12.06.2019).

RWZ	Rückwärmzahl	
SFP	Specific fan power	[W/m ³ /s]
θ	Lufttemperatur	[°C]
Ṁ	Volumenstrom bei Normdichte	[m ³ /s]
W	Wärmearbeit	[kWh]
w	Strömungsgeschwindigkeit im engsten Querschnitt	[m/s]
WMO	World meteorologic organization	
WRG	Wärmerückgewinnung	
z	Zins	[%]

Indizes

1	Abluft	Gas	gasbasiert
2	Zuluft	int	Lüftungskomponenten
,	Eingang	Strom	strombasiert
..	Ausgang	t	trocken
Cost	kostenbasiert		

Abkürzungsverzeichnis

a	Amortisationsdauer	[a]
CO ₂ e	CO ₂ -äquivalente Emissionen	[g/kWh]
COP	Coefficient of performance	
Δp	Druckabfall	[Pa]
ΔI	Differenz der Investitionskosten	[€]
η	Gesamtwirkungsgrad des Antriebs (z. B. Ventilatoren)	[./.]
ErP	Energy related product	
F	Faktor	[./.]
ke	Spezifische Kosten für Elektroenergie	[€/kWh]
kk	Spezifische Kosten für Kälteenergie	[€/kWh]
kw	Spezifische Kosten für Wärme	[€/kWh]
KVS	Kreislaufverbundsystem	
KW	Kapitalwert der Ersparnisse	[€]
L	Laufzeit	[h/a]
n	Nutzungsdauer	[a]
p	Preissteigerungsrate	[%]
Φ	Temperaturübertragungsgrad oder Rückwärmzahl	[./.]
R ²	Bestimmtheitsmaß der Regression	

AUTOREN VITA



Prof. Dr.-Ing. CHRISTOPH KAUP

- 1982 – 1985 Studium der Verfahrenstechnik mit Schwerpunkt „Versorgungs- und Energietechnik“, Dipl.-Ing. (FH), Fachhochschule des Landes Rheinland-Pfalz, Abteilung Bingen
- 1985 – 1987 Studium Wirtschaftsingenieurwesen, Dipl.-Wirt.-Ing. (FH), Fachhochschule des Landes Rheinland-Pfalz, Abteilung Ludwigshafen
- 1990 – 1991 Studium der Mikroelektronik mit Schwerpunkt „Technische Informatik“, Dipl.-Ing., Ingenieurhochschule Mittweida (Sachsen)
- 1992 Promotion zum Dr.-Ing. in der angewandten Informatik, Thema: „Strategien zur Einführung der rechnerintegrierten Fertigung bei auftragsbezogener Einzelfertigung in mittelständischen Unternehmen, Konzeption und Realisation“
- Seit 1993 Geschäftsführender Gesellschafter, HOWATHERM Klimatechnik GmbH
- 2009 – 2014 Lehrbeauftragter für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung, Umweltcampus Birkenfeld, Hochschule Trier
- Seit 2014 Honorarprofessor für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung, Umweltcampus Birkenfeld, Hochschule Trier
- Seit 2017 Vorstandsvorsitzender, Fachverband Gebäude-Klima e. V.
- Mitglied in verschiedenen Normungsgremien wie zum Beispiel EN 16798, EN 308, EN 13053 und EN 1886 sowie in verschiedenen Richtlinienausschüssen wie VDI 6022 und VDI 3803. Vorsitzender der VDI Richtlinie VDI 3803 Blatt 1

Kontakt Hochschule Trier
Umwelt-Campus Birkenfeld
Postfach 1380
55761 Birkenfeld
Tel.: +49 6782 99 99 0
E-Mail: c.kaup@umwelt-campus.de