

# Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen

Einfluss der Änderung von Rahmenbedingungen

Für eine Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG) müssen Rahmenbedingungen festgelegt werden, die sich von Fall zu Fall signifikant unterscheiden können. Die Berechnungsmethodik zur Optimierung ist komplex und kann sinnvoll nur relational und mehrdimensional durchgeführt werden.

Aus solchen Berechnungen ergibt sich eine Vielzahl von Optima, die den jeweiligen Flächen und den daraus resultierenden Luftgeschwindigkeiten und Anströmflächen zugeordnet sind. Durch eine Maximalwertbetrachtung kann das größte Optimum (Maximum der Einsparung oder maximaler Ertrag) bestimmt werden. Dass es auch aus ökonomischer Sicht sinnvoll ist, die WRG mit niedrigen Luftgeschwindigkeiten zu betreiben, wurde schon an den Beispielen des Fachberichts in Heft 7-8 und 9<sup>1)</sup> ersichtlich. In Heft 10 wurde der Einfluss des Standorts europaweit dargestellt, um die gesetzlichen Anforderungen an die Wärmerückgewinnung gemäß EU 1253/2014<sup>2)</sup> zu bewerten<sup>3)</sup>.

## Autor



**Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup**, Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung. Geschäftsführender Gesellschafter der Howatherm Klimatechnik GmbH. Vorsitzender des Vorstands Fachverband Gebäude Klima (FGK 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 im VDI-Richtlinienausschuss der VDI 3803.

Auch aus dieser Betrachtung ergibt sich, dass niedrige Luftgeschwindigkeiten selbst europaweit wirtschaftlich sinnvoll sind.

### Rahmenbedingungen

Um den Einfluss der Änderung von verschiedenen Rahmenbedingungen aufzuzeigen, wurde eine Auslegung mit folgenden Grundlagen verwendet:

- Volumenstrom, der einem mittleren Zu- und Abluftvolumenstrom von 14 400 m<sup>3</sup>/h entspricht
- WRG-System als Doppelplattenwärmeübertrager mit einer Rückwärmzahl von 73,1 %
- Druckverluste der WRG mit 232 Pa auf der Zuluftseite und 240 Pa auf der Abluftseite
- Als Ventilatorsysteme freilaufende Ventilatoren mit einem Systemwirkungsgrad von 60 % (Antriebe IE3)
- Effizienzklasse der Antriebe mit der Klasse P1 (nach EN 13053)
- SFP<sub>int.</sub> mit 1 019 s/m<sup>3</sup>. Damit wird die ErP-Verordnung EU 1253/2014 für die Stufe 2016 erfüllt. Die Stufe 2018 wird jedoch verfehlt, da der interne Druckabfall mit  $dp_{int.} = 609$  Pa zu hoch ist.
- Luftgeschwindigkeit im lichten Querschnitt des RLT-Gerätes mit 1,9 m/s, welche der Klasse V3 nach EN 13053 entspricht.

Es wird im Weiteren nur auf eine ökonomische, also auf eine monetäre Bewertung eingegangen, da eine ökologische Bewertung auf Basis von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten den Rahmen eines Artikels sprengen würde. Zur Berechnung der Aufwendungen und der Erträge wurden weiterhin folgende Basisdaten verwendet:

- Kosten für Wärme mit 0,10 €/kWh
- Kosten zur Kälteerzeugung mit 0,15 €/kWh
- Elektroenergie mit 0,15 €/kWh
- Zinssatz mit 5 % zur Abzinsung der Beträge über die Zeitperioden
- Preissteigerungsrate von 2 %
- Lebensdauer mit 15 a
- Ablufttemperatur mit 20 °C im Winter und 26 °C im Sommer
- Zulufttemperatur ganzjährig mit 20 °C

- Volumenstrom während des Tages mit 100 % (Volllastbetrieb) und 50 % während der Nacht (Teillastbetrieb)
- Verwendung von zwei Laufzeitmodellen mit 2 350 h/a (8 h/d) und 8 760 h/a (24 h/d)
- Als Standort für die WRG wurde Mannheim als „mittlerer“ Standort in Europa gewählt. Die meteorologischen Daten wurden mit der Software Meteo-norm 7.1 erzeugt.

### Änderung der Rahmenbedingungen

Nachfolgende Parameter werden im Folgenden jeweils verändert, um deren Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der WRG mit einem Softwaretool darzustellen:

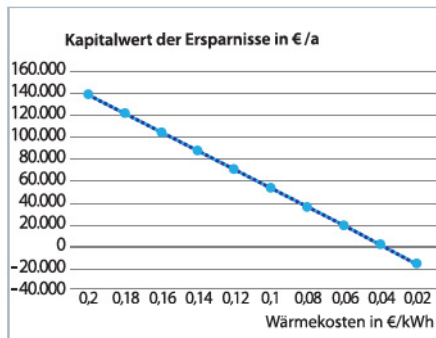
- Änderung des Wärmepreises von 0,02 bis 0,2 €/kWh
- Änderung der Preise für Elektroenergie von 0,04 bis 0,4 €/kWh
- Änderung der Laufzeit von 1 bis 7 Tage/Woche
- Änderung der spezifischen Druckverluste von 60 bis 340 Pa pro Luftseite
- Änderung der Sollwerte (Heizen und Kühlen) von 16 bis 24 °C
- Änderung der Ablufttemperatur (Winter) von 17 bis 24 °C und Änderung der Ablufttemperatur (Sommer) von 16 bis 26 °C

Dabei ergaben sich aufschlussreiche Erkenntnisse, die so nicht offensichtlich waren und bis heute noch nicht als allgemein anerkannter Stand der Technik gelten. Im Folgenden werden diese Erkenntnisse einzeln dargestellt und erläutert.

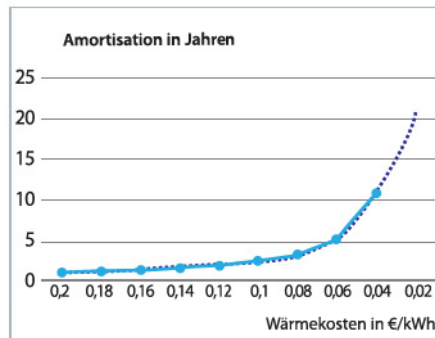
<sup>1)</sup> Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen - Im Kontext ökonomischer und ökologischer Zielsetzungen. HLH Bd. 68 (2017) Nr. 7-8, S. 22-26 (Teil 1) und Nr. 9, S. 33-38 (Teil 2).

<sup>2)</sup> Verordnung (EU) Nr. 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.

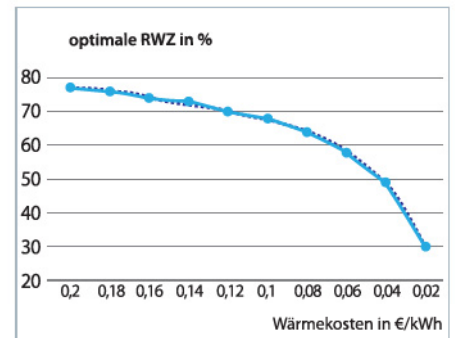
<sup>3)</sup> Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen - Eine Betrachtung für Europa. HLH Bd. 68 (2017) Nr. 10, S. 34-37.



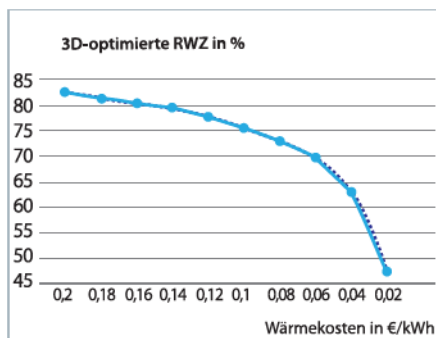
**Bild 1**  
Kapitalwert der Ersparnisse  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



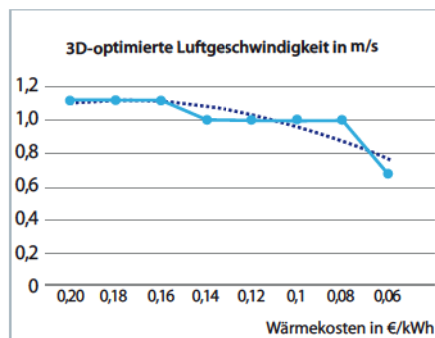
**Bild 2**  
Amortisation  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



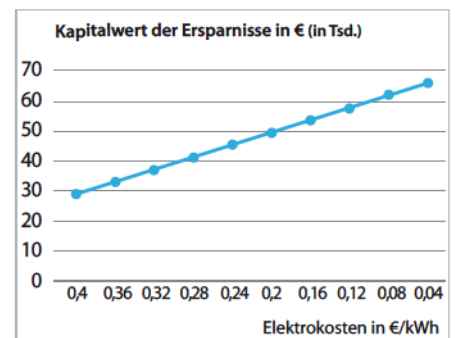
**Bild 3**  
Eindimensionales Optimum (RWZ) der WRG  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 4**  
Mehrdimensionales Optimum (RWZ) der WRG  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 5**  
3D-optimierte Luftgeschwindigkeit der WRG  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 6**  
Kapitalwert der Ersparnisse  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)

## Änderung des Wärmepreises von 0,02 bis 0,2 €/kWh

Aus **Bild 1** wird ersichtlich, dass der Kapitalwert der Ersparnisse linear mit steigendem Wärmepreis anwächst. Im Beispiel (2 350 h/a) wird bereits bei einem Wärmepreis unter 4 Cent/kWh ein Verlust realisiert. Liegt der Wärmepreis allerdings über 4 Cent/kWh, ist die WRG wirtschaftlich.

**Bild 2** zeigt, dass die Amortisation der WRG nicht linear, sondern exponentiell mit sinkenden Wärmepreisen ansteigt. Der Verlauf kann mit einem Polynom vierter Ordnung beschrieben werden. Bei unter 4 Cent/kWh ist unter Annahme der Rahmenbedingungen im Beispiel keine Amortisation im Rahmen der gegebenen Lebensdauer (bis 15 a) zu erzielen.

**Bild 3** zeigt, dass der eindimensional ermittelte optimale Übertragungsgrad, auch Rückwärmzahl (RWZ) genannt, ebenfalls stark vom Wärmepreis abhängt. Er fällt exponentiell von 0,68 bei 0,10 €/kWh auf 0,3 bei 0,02 €/kWh.

Selbst eine mehrdimensionale (dreidimensionale) Optimierung (3D-Opti-

mierung) kann diesen exponentiellen Zusammenhang nicht verändern (**Bild 4**). Das 3D-Optimum fällt ebenfalls exponentiell von rund 0,76 bei 0,10 €/kWh auf 0,47 bei 0,02 €/kWh. Allerdings erhöhen sich die absoluten Werte der RWZ deutlich gegenüber denen der eindimensionalen Optimierung.

Wird die mehrdimensional optimierte Luftgeschwindigkeit betrachtet, zeigt sich in **Bild 5**, dass diese mit sinkendem Wärmepreis leicht abfallen muss, um ein akzeptables Maximum finden zu können. Es wird deutlich, dass die Luftgeschwindigkeit unter den gegebenen Rahmenbedingungen in allen Fällen auf einem sehr niedrigen Niveau von etwa 1 m/s liegt.

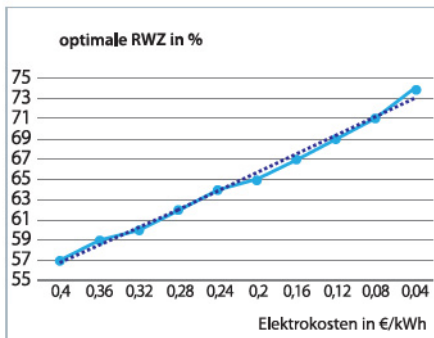
Da die mehrdimensionale Optimierung im klassischen Sinn keine Optimierung, sondern eine Maximalwertbetrachtung unter wirtschaftlich sinnvoller Abwägung ist, können die mehrdimensional gewonnenen Werte naturgemäß etwas streuen. Diese Werte repräsentieren damit nicht das absolute Maximum des Kapitalwertes, sondern

ein sinnvolles Optimum, welches etwa bis zu 2 % unterhalb des absolut höchsten Kapitalwertes liegt.

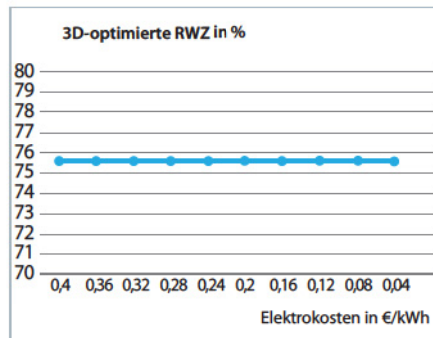
Sie stellen also ein sinnvoll ermitteltes Maximum dar, da die geringen zusätzlich möglichen Erträge in keinem Verhältnis zum geometrischen Aufwand für die WRG stehen. Des Weiteren würden dann auch die Auslegungsgeschwindigkeiten in einem Bereich von 0,5 m/s liegen, was insbesondere im Teillastbereich zu Problemen führen würde, da die Wärmeübertragung in diesem Fall nicht mehr stabil aufrechterhalten werden kann.

## Änderung der Preise für Elektroenergie von 0,04 bis 0,4 €/kWh

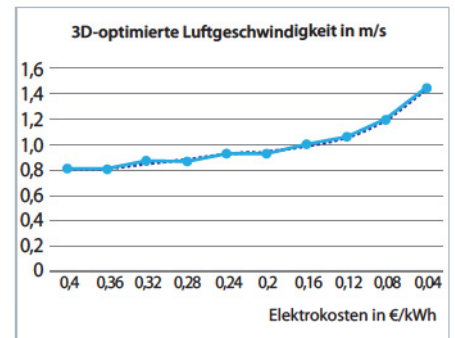
**Bild 6** zeigt den Verlauf des Kapitalwertes der Ersparnisse bei Preisänderung für die benötigte Elektroenergie, die im Wesentlichen benötigt wird, um die Druckverluste der WRG zu überwinden. Der Elektroenergiepreis hat einen umgekehrt proportionalen Einfluss auf den Kapitalwert der Ersparnisse, der üblicherweise deutlich geringer ausfällt als der Einfluss des Wärmepreises, da



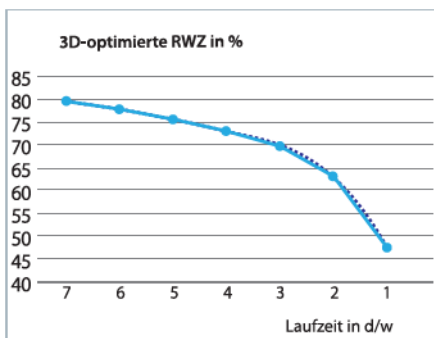
**Bild 7**  
Eindimensionales Optimum der WRG  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



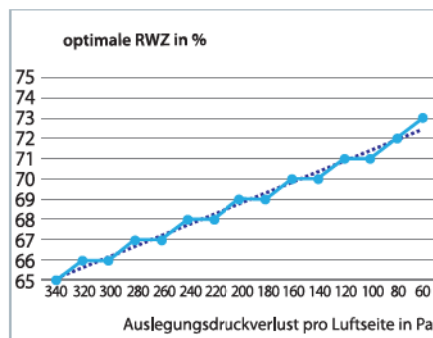
**Bild 8**  
Mehrdimensionales Optimum der WRG  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



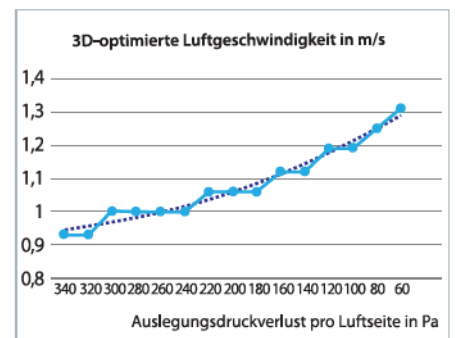
**Bild 9**  
3D-optimierte Luftgeschwindigkeit der WRG  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 10**  
Mehrdimensionales Optimum der WRG  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 11**  
Eindimensional optimierte RWZ der WRG  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 12**  
3D-optimierte Luftgeschwindigkeit der WRG  
(Standort Mannheim bei 8 h/Tag)

die Jahresarbeitszahl einer WRG meist über 10 liegt und damit die Wärme ein wesentlich größeres Gewicht in der Wirtschaftlichkeitsberechnung und Optimierung erhält.

Der Einfluss des Elektroenergiepreises verläuft linear zur eindimensional ermittelten optimalen Rückwärmzahl (Bild 7), während das mehrdimensionale Optimum unabhängig vom Elektroenergiepreis konstant bleibt (Bild 8). Dieses Ergebnis beruht auf der Tatsache, dass der Wirkungsgrad bei der mehrdimensionalen Optimierung gegen einen Grenzwert läuft, der in diesem Beispiel bei 0,757 liegt.

Allerdings hat der Elektroenergiepreis Einfluss auf die Luftgeschwindigkeit, die notwendig ist, um das Optimum zu erreichen. Je niedriger der Elektroenergiepreis ist, desto höher kann die wirtschaftlich optimale Luftgeschwindigkeit gewählt werden (Bild 9). Der Einfluss ist jedoch relativ gering. Die optimale Luftgeschwindigkeit liegt bei Preisen von 0,08 bis 0,4 €/kWh in einem geringen Toleranzbereich von 1,2 bis 0,8 m/s.

### Änderung der Laufzeit von 1 bis 7 Tage/Woche

Der Einfluss der Laufzeit ist direkt vergleichbar mit der Änderung des Wärmepreises. Im folgenden Beispiel wird der Einfluss von ein bis sieben Tage Laufzeit pro Woche im Acht-Stundenbetrieb berechnet. Der Kapitalwert der Ersparnisse verläuft ebenfalls direkt proportional zur Laufzeit wie beim Einfluss des Wärmepreises (vgl. Bild 1). Während bei sieben Tagen pro Woche über 80 000 € erwirtschaftet werden können, liegt der Kapitalwert bei einem Tag pro Woche knapp unter null Euro.

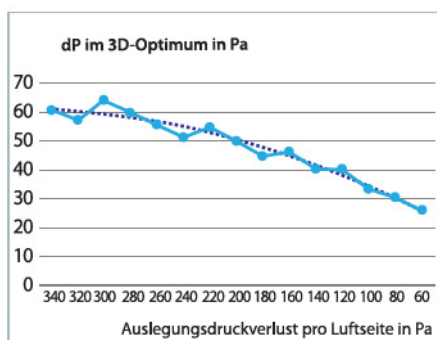
Wird die Abhängigkeit des mehrdimensionalen Optimums aus Bild 10 mit dem Optimum bei Änderung der Laufzeit in Bild 4 verglichen, wird der prinzipielle Zusammenhang offensichtlich. Je länger die Anlage läuft, desto größer wird ihr Nutzen und entsprechend umso höher muss sowohl der eindimensional als auch der mehrdimensional optimale Übertragungsgrad sein. Die Laufzeit hat demzufolge den gleichen systemspezifischen exponentiell beeinflussenden Effekt wie die Än-

derung des Wärmepreises. Auf die optimale Luftgeschwindigkeit hat die Änderung der Laufzeit jedoch keinen nennenswerten Einfluss. Sowohl bei 2 350 h/a als auch bei 5 005 h/a sowie bei 8 760 h/a liegt der errechnete Mittelwert sämtlicher betrachteter Standorte bei etwa 1,0 m/s.

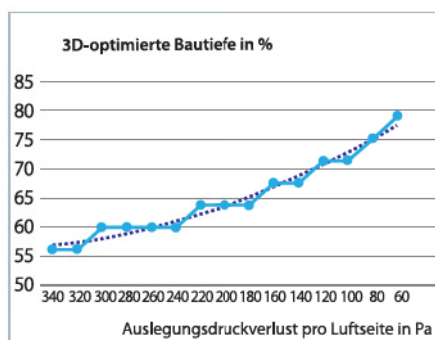
### Änderung der Auslegungsdruckverluste von 60 bis 340 Pa pro Luftseite

Der Einfluss der Druckverluste im Auslegungspunkt der WRG ist wiederum unmittelbar vergleichbar mit der Änderung des Preises für Elektroenergie (vgl. Bild 6). Im hier folgenden Beispiel wird der Einfluss des spezifischen Auslegungsdruckabfalls bei einer Luftgeschwindigkeit von 1,9 m/s von 60 bis 340 Pa pro Luftseite berechnet.

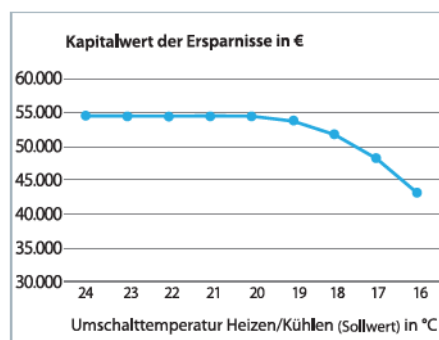
Der Kapitalwert der Ersparnisse verläuft ebenfalls proportional zum Auslegungsdruckabfall. Während bei einem Auslegungsdruckabfall von 60 Pa rund 64 000 € erwirtschaftet werden können, liegt der Kapitalwert bei 340 Pa bei etwa 50 000 €. Auch die eindimensio-



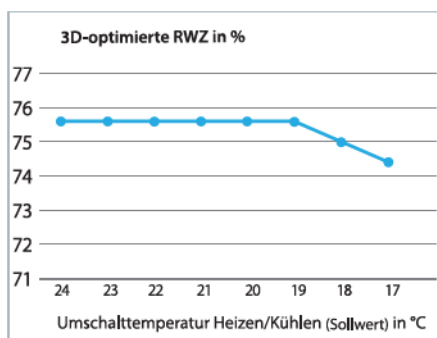
**Bild 13**  
Druckverluste im mehrdimensional optimierten Betriebspunkt (Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



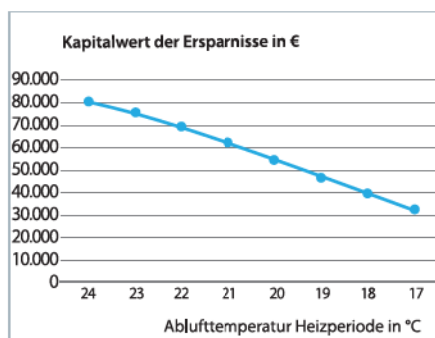
**Bild 14**  
Optimale Bautiefen der WRG im mehrdimensional optimierten Betriebspunkt (Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



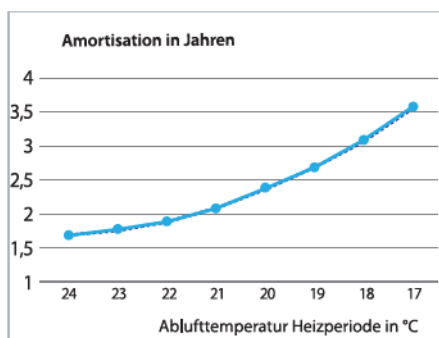
**Bild 15**  
Kapitalwert der Ersparnisse (Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 16**  
Mehrdimensionales Optimum der WRG (Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 17**  
Kapitalwert der Ersparnisse (Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 18**  
Amortisation (Standort Mannheim bei 8 h/Tag)

nal berechnete optimale RWZ verläuft prinzipiell linear (Bild 11), wie dies auch bei der Änderung des Elektroenergiepreises zu erkennen ist (vgl. Bild 7). Dies resultiert daraus, dass bei höheren spezifischen Druckverlusten der Nettutzen der WRG geschmälert wird beziehungsweise der Aufwand entsprechend steigt.

Und die so mehrdimensional berechnete RWZ ist ebenfalls unabhängig vom Auslegungsdruckabfall der WRG wie die Änderung der Elektroenergiepreise (vgl. Bild 8) und liegt im Beispiel ebenfalls beim Grenzwert von 0,757.

Allerdings muss bei Veränderung der Auslegungsdruckverluste die Luftgeschwindigkeit zur Erreichung der optimalen Wirtschaftlichkeit angepasst werden. Je größer der Auslegungsdruckabfall der WRG ist, desto kleiner muss die optimierte Durchtrittsgeschwindigkeit gewählt werden. Diese variiert im Beispiel zwischen ca. 0,9 und 1,3 m/s (Bild 12 und vgl. Bild 9). Hieraus ergeben sich die tatsächlichen Druckverluste im 3D-Optimum von rund 30 bis et-

wa 60 Pa (Bild 13). Diese Druckverluste resultieren aus den unterschiedlich ermittelten optimalen Bautiefen der WRG (Bild 14) sowie den optimalen Durchtrittsgeschwindigkeiten. (Bild 12)

### Änderung der Sollwerte (Heizen und Kühlen) von 16 bis 24 °C

Mit der Anpassung der Sollwerte für den Winter- und Sommerfall ergeben sich folgende Kapitalwerte der Ersparnisse (Bild 15): Der Unterschied im Sollwert (Umschalttemp.) zwischen Heiz- und Kühlfall liegt im Beispiel bei -0,5 K (Isothermer Betrieb). Es wird deutlich, dass die Sollwerte für die WRG nur dann eine Relevanz haben, wenn die möglich erreichbare Zulufttemperatur der WRG höher liegt als die geforderten Temperaturen und die WRG in ihrer Leistung „abgeregelt“ werden muss. Hierdurch reduziert sich ihr Nutzen und damit auch der Kapitalwert der Ersparnisse ab den Zulufttemperaturen unter 19 °C.

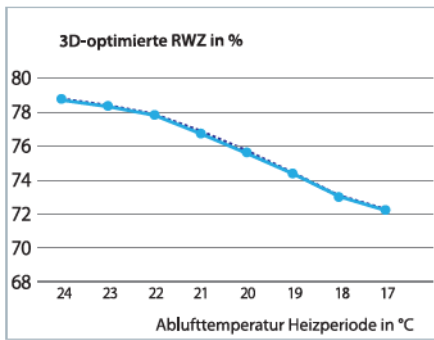
Die gewünschten Sollwerte haben einen erheblichen Einfluss auf die zusätzlich einzuspeisenden Energiemengen

(Nacherwärmung oder Kühlung), aber eben nicht auf die grundsätzliche Wirtschaftlichkeit der WRG, solange die Sollwerte über den Temperaturen liegen, welche die WRG erreichen kann. Dies wird eindeutig aus Bild 16 ersichtlich. Die 3D-optimierte RWZ muss reduziert werden, sobald die Sollwerte den vollen Nutzen der WRG unmöglich machen.

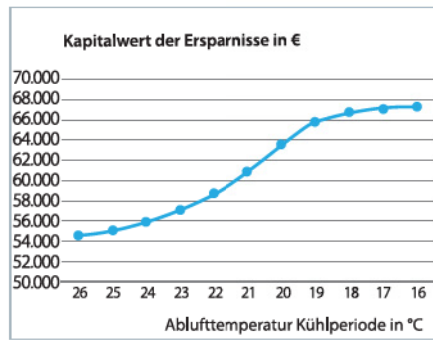
### Änderung der Ablufttemperatur (Winter) von 17 bis 24 °C und Änderung der Ablufttemperatur (Sommer) von 16 bis 26 °C

Die Ablufttemperatur hat demgegenüber einen sehr großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der WRG, da mit der Ablufttemperatur das nutzbare Energieniveau direkt proportional repräsentiert wird (Bild 17).

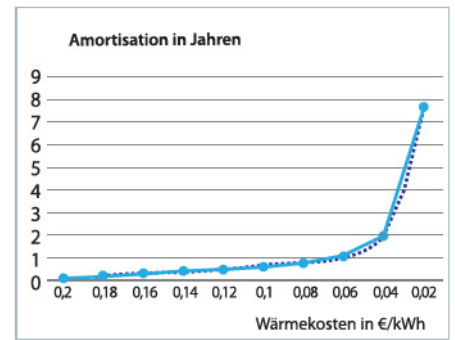
Im Beispiel können bei 24 °C Ablufttemperatur im Heizfall rund 80 000 € Kapitalwert erwirtschaftet werden, bei 18 °C sind es hingegen nur noch 40 000 €. Durch die Absenkung des Ablufttemperaturniveaus um 6 K halbiert



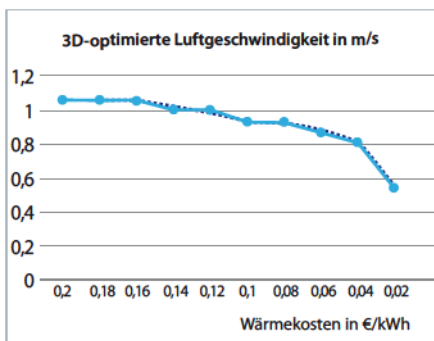
**Bild 19**  
Mehrdimensionales Optimum der WRG (Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



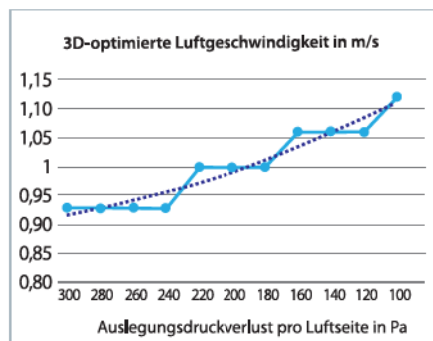
**Bild 20**  
Kapitalwert der Ersparnisse (Standort Mannheim bei 8 h/Tag)



**Bild 21**  
Amortisation (Standort Mannheim bei 24 h/Tag)



**Bild 22**  
3D-optimierte Luftgeschwindigkeit der WRG (Standort Mannheim bei 24 h/Tag)



**Bild 23**  
3D-optimierte Luftgeschwindigkeit der WRG (Standort Mannheim bei 24 h/Tag)

sich am Standort Mannheim unter den hier gegebenen Rahmenbedingungen der wirtschaftliche Nutzen der WRG. Auf diese Weise ändert sich auch die Amortisationsdauer der WRG (**Bild 18**) signifikant, die sich exponentiell von 1,7 auf rund 3,6 a mit sinkender Ablufttemperatur erhöht. Damit hat die Ablufttemperatur auch einen ausgeprägten Einfluss auf den optimalen Übertragungsgrad der WRG, der sich aus **Bild 19** ergibt.

Als Ergebnis gilt: Je höher das Temperaturniveau ist, desto höher kann der optimale Übertragungsgrad der WRG gewählt werden. Im Kühlfall (**Bild 20**) zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei der Kapitalwert der Ersparnisse bei niedrigen Temperaturen durch die gewählten Sollwerte deutlich begrenzt wird.

### Änderung der Laufzeit pro Tag (24 h/Tag Betrieb)

Ändert sich die Laufzeit pro Tag auf 24 h (Volllastbetrieb), so ergeben sich grundsätzlich ähnliche Zusammenhänge wie die bereits dargestellten. **Bild 21** zeigt beispielsweise den Verlauf der Amortisati-

onsdauer bei Änderung des Wärmepreises beim Volllastbetrieb (vgl. Bild 2). Es ist zu erkennen, dass der Wärmepreis die Amortisation bis zu einem Wert von etwa 6 Cent/kWh bei  $\leq$  einem Jahr halten kann. Danach steigt die Amortisation exponentiell auf etwa acht Jahre bei einem Preis von 2 Cent/kWh an.

Auch die optimale Luftgeschwindigkeit ändert sich im Volllastbetrieb nur unwesentlich in Abhängigkeit der Laufzeit pro Tag. Aus **Bild 22** ergibt sich, dass diese ebenfalls im Bereich von 1 m/s liegt (vgl. Bild 5). Unter 4 Cent/kWh fällt die Luftgeschwindigkeit exponentiell ab.

Bei Änderung der Druckverluste (**Bild 23**) ergibt sich ebenfalls beim 24 h/Tag-Betrieb ein vergleichbares Bild zum 8 h/Tag-Betrieb (vgl. Bild 12). Auch hier liegt die optimale Luftgeschwindigkeit auf einem identischen Niveau. Die optimale Luftgeschwindigkeit scheint demnach unabhängig von der Betriebszeit der WRG zu sein, da die Ergebnisse im 8 h/Tag-Betrieb denen des 24 h/Tag-Betriebs sehr ähnlich sind.

### Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen wird ersichtlich, dass zur Erreichung des maximalen Ertrags der WRG die Auslegungsluftgeschwindigkeit bei veränderten Rahmenbedingungen signifikant sinken muss und zwar auf ein Niveau von etwa 1 m/s und darunter, um einen maximalen Ertrag erreichen zu können. Es wird aber auch klar, dass der Wärmepreis, die Laufzeit sowie die Ablufttemperatur den höchsten Einfluss auf die wirtschaftlichen Kennzahlen der WRG haben. Diese bestimmen im Wesentlichen die Rückwärmzahl der WRG. Daneben wird auch offensichtlich, dass die Elektroenergiekosten sowie die Druckverluste ebenfalls einen Einfluss auf die Kennzahlen haben, die aber aufgrund des geringeren „Hebels“ nicht die Dimension der Änderung des Wärmepreises oder der Laufzeiten erreichen. Allerdings bestimmen sie die optimale Luftgeschwindigkeit am deutlichsten. Es ist aber jedenfalls verständlich, dass pauschale Referenzwerte der WRG für den Übertragungsgrad nach Ökodesignverordnung EU 1253/2014 ab 2020 unsinnig sind, da die optimalen Übertragungsgrade je nach gegebenen Rahmenbedingungen sehr deutlich variieren können. Mit den hier dargestellten Simulationen kann ebenfalls bewiesen werden, dass selbst die heutige pauschale Festlegung von Mindestübertragungsgraden gemäß Ökodesignverordnung wirtschaftlich wie ökologisch keinen Sinn ergibt. Denn sowohl eine „zu kleine“, als auch eine „zu große“ WRG mindert den Ertrag in jedem einzelnen Fall entscheidend.