

# Die mehrdimensionale Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen

Eine Betrachtung für Europa

Eine Optimierung von Wärmerückgewinnungssystemen (WRG) kann nur durch Variation aller drei Dimensionen grundlegend und tatsächlich erfolgen. Dazu ist der geografische Standort von Bedeutung, wie im folgenden Beispiel aufgezeigt wird.

**S**owohl der Querschnitt (Höhe und Breite des WRG-Systems) als auch in einer zweiten Berechnungsschleife die Bautiefe muss in eine mehrdimensionale und relationale Optimierung einfließen und dienen daher als Variablen zur Berechnung des maximalen Ertrags.

Hieraus ergab sich eine Vielzahl von Optima, die den jeweiligen Flächen und den daraus resultierenden Luftgeschwindigkeiten bzw. Anströmflächen zugeordnet sind. Aus dieser Vielzahl konnte durch eine Maximalwertbetrachtung 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, da damit einerseits der Übertragungsgrad steigt und andererseits der elektrische Aufwand bedeutend sinkt, wurde schon

## Autor



**Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup**, Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld, Hochschule Trier, für Energieeffizienz und Wärmerückgewinnung. Geschäftsführender Gesellschafter von HOWA-THERM 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.

an den bisherigen Beispielen des Fachberichts in Heft 7-8 und 9<sup>1)</sup> 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<sup>2)</sup>, zu bewerten. Am 07. Juli 2014 verabschiedete die Europäische Kommission die Verordnung, die die Durchführung der Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG<sup>3)</sup> regelt. Diese Richtlinie bestimmt die Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Lüftungsgeräten.

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 grundsätzlichen politischen Willen, Energie und CO<sub>2</sub>-Emissionen einzusparen. Doch darf sie nicht dazu führen, dass es zur Verschwendung von Energie und Ressourcen kommt.

Es wurden folgende Rahmenbedingungen angenommen:

- Ein Volumenstrom, der einem mittleren Zu- und Abluftvolumenstrom von 14 400 m<sup>3</sup>/h entspricht,
- ein WRG-System als Doppelplattenwärmeübertrager mit einer Rückwärmzahl von 73,1 %,
- die 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),

- die Effizienzklasse der Antriebe mit der Klasse P1 (nach EN 13053),
- der SFP<sub>int.</sub> mit 1 019 Ws/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<sub>int.</sub> = 609 Pa zu hoch ist,
- eine Luftgeschwindigkeit im lichten Querschnitt des RLT-Gerätes mit 1,9 m/s, die der Klasse V3 nach EN 13053 entspricht.

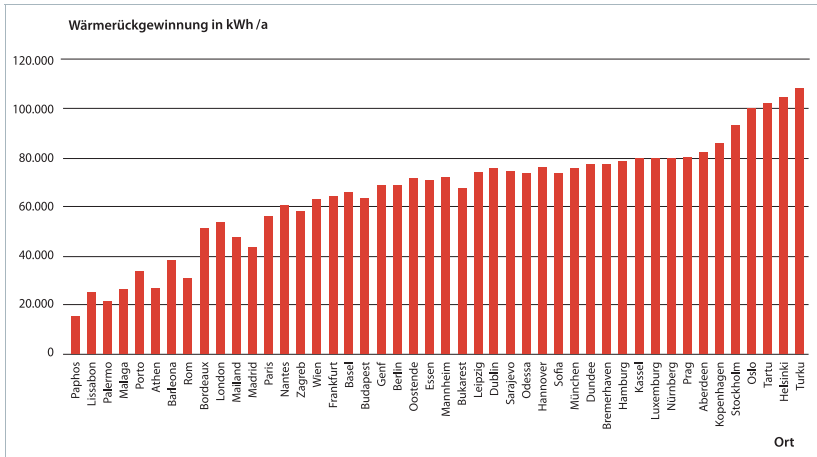
Zur Berechnung der Aufwendungen und der Erträge wurden weiterhin folgende Annahmen berücksichtigt:

- Die Kosten für Wärme mit 0,10 €/kWh,
- die Kosten zur Kälteerzeugung mit 0,15 €/kWh,
- Elektroenergie mit 0,15 €/kWh,
- ein Zinssatz mit 5 % zur Abzinsung der Zeitperioden,
- eine Preissteigerungsrate von 2 %,
- eine Lebensdauer mit 15 Jahren,
- die Ablufttemperatur mit 20 °C im Winter und 26 °C im Sommer,
- die Zulufttemperatur ganzjährig mit 20 °C,
- CO<sub>2</sub>-Emissionen für die Wärmeerzeugung mit 340 g/kWh (Öl), 630 g/kWh für den Strommix und „graue“ CO<sub>2</sub>-Emission für die Investitionen und sonstige Betriebskosten mit 600 g/€,
- der Volumenstrom während des Tages mit 100 % (Volllastbetrieb) und 50 % während der Nacht (Teillastbetrieb),
- es wurden zwei Laufzeitmodelle verwendet, die bei 2 350 h/a und 8 760 h/a liegen,

<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> 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 energieverbrauchender Produkte. Veröffentlicht am 31.10.2009.



**Bild 1**

Wärmerückgewinnung mit  $\varnothing$  65 558 kWh/a und einer Spanne von  $F = 7,0$  (Nord zu Süd)

stammen die meisten Daten aus dem GEBÄUDE, aus den WMO/OMM Climatological Normals 1961–1990 und aus der Schweizer Datenbank von Meteonorm Schweiz<sup>4)</sup>.

Aus den Monatswerten (Stationsdaten und interpolierte Daten) kalkuliert Meteonorm mit einem stochastischen Modell Stundendaten eines „typischen Jahres“. Zudem werden die folgenden Feuchtigkeitsparameter (Taupunkt, relative Luftfeuchtigkeit, Wassergehalt, psychrometrische Temperatur, Außentemperatur, Luftdruck) berechnet.

Nicht berücksichtigt wurden in den Berechnungen:

- Außenluft- oder Raumluftfeuchten und damit keine Be- oder Entfeuchtung,
- die mögliche Reduktion von Investitionskosten, die sich durch eine kleinere Wärme- oder Kälteerzeugung ergeben hätte,
- zusätzliche Funktionen der WRG wie indirekte Verdunstungskühlung, integrierte Wärme- oder Kälteeinspeisung, integrierte Freie Kälte oder Brauchwasservererwärmung,
- keine zusätzlichen Ausgaben, die sich durch die WRG ergeben können.

Auf Basis der Berechnungen und Simulationen ergaben sich folgende Ergebnisse:

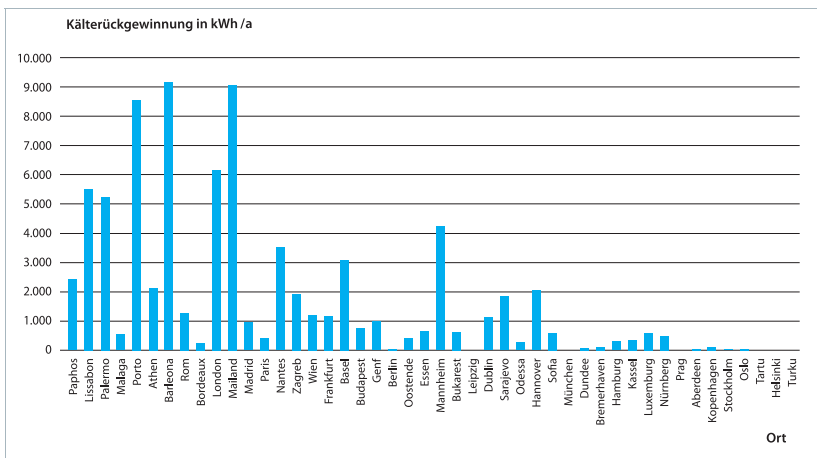
### Laufzeit 2 350 h/a mit 9 h Laufzeit pro Tag und 1 h pro Nacht

Die Ergebnisse zum Wärmeertrag der WRG innerhalb Europas ergeben sich aus (Bild 1).

Der Anteil der „Kälterückgewinnung“ im Sommer ergibt sich aus (Bild 2).

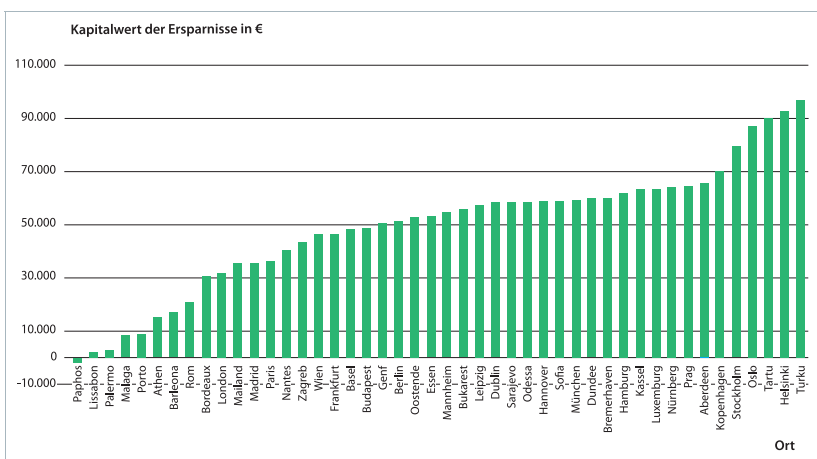
Man erkennt, dass der Anteil der sensiblen Kälterückgewinnung im Durchschnitt nur einen Bruchteil (3 %) der Wärmearbeiten ausmacht, welche die WRG liefert. Auffällig ist ebenfalls, dass das Potenzial der Wärmerückgewinnung innerhalb Europas um den Faktor 7 von Süd nach Nord zunimmt. Während in Paphos, Lissabon oder Palermo nur rund 20 000 kWh/a zurückgewonnen werden können, liegt der Anteil in Helsinki oder Turku bei über 100 000 kWh/a. Daraus ergeben sich folgende wirtschaftliche Kennwerte (Bild 3).

In Bild 3 wird deutlich, dass die Kapitalwerte der Ersparnisse ein und dersel-



**Bild 2**

Sensible Kälterückgewinnung mit durchschnittlich 2 032 kWh/a



**Bild 3**

Kapitalwert der Ersparnisse durchschnittlich 49 282 €

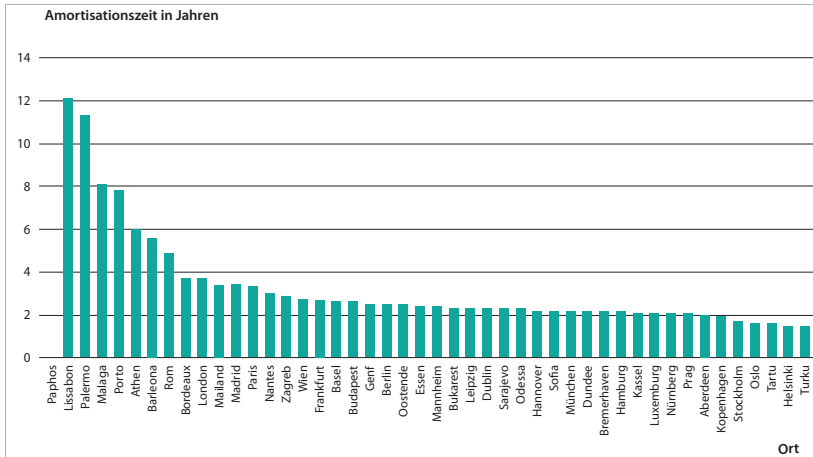
□ insgesamt 46 Orte in Europa vom Süden (Paphos) bis zum äußersten Norden (Turku). Die meteorologischen Daten wurden mit der Software Meteonorm 7.1 erzeugt.

Die Meteonorm-Software ist eine umfassende meteorologische Referenz, die Zugang zu einem Katalog von meteorolo-

gischen Daten für jeden Punkt der Erde gewährt. Sie basiert auf über 25 Jahren Erfahrung in der Entwicklung meteorologischer Datenbanken für Energie-Applikationen.

Eine Vielzahl globaler und regionaler Datenbanken wurde kombiniert und validiert. In der aktuellen Version 7.1

<sup>4)</sup> Meteonorm 7.1 Produkt-Broschüre (en) 2014.



**Bild 4**

Amortisationszeit durchschnittlich 3,27 Jahre

nal durch Variation der Bautiefe, so erhält man folgende mögliche Einsparungen (siehe **Bild 5**).

Es wird deutlich, dass durch das Nord-Süd-Gefälle auch die möglichen Einsparungen pro Jahr um den Faktor 11,2 differieren.

Mit der beschriebenen mehrdimensionalen Optimierung könnte jedoch die potenzielle Einsparung der WRG im Durchschnitt um 27 % von durchschnittlich 4 180 €/a auf 5 297 €/a gesteigert werden (siehe **Bild 6**).

Hierzu sind jedoch wesentlich geringere Luftgeschwindigkeiten im Querschnitt erforderlich, die an jedem Standort in Europa bei knapp unter 1 m/s liegen (siehe **Bild 7**).

Bei diesen Luftgeschwindigkeiten ergeben sich dann optimale Übertragungsgrade, die aus **Bild 8** zu entnehmen sind.

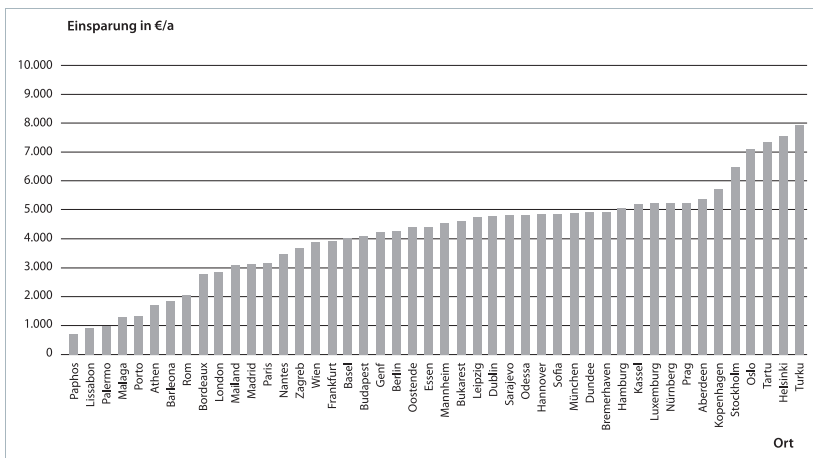
Die Ergebnisse zeigen, dass Mindestübertragungsgrade nicht pauschal festgelegt werden können. Während im Süden unter den gegebenen Rahmenbedingungen Übertragungsgrade von rd. 60 % ausreichen, sind im Norden Übertragungsgrade von fast 80 % notwendig, um das volle Potenzial der WRG ausschöpfen zu können. Mit der individuellen Festlegung einer optimalen WRG kann in jedem Fall verhindert werden, dass weder mit einer zu kleinen noch mit einer zu großen WRG ökonomisches Potenzial verschenkt wird.

Man sieht auch aus **Bild 9**, dass die optimale berechnete und notwendige Bautiefe des WRG-Systems bezogen auf die Bautiefe der Referenzauslegung zwischen rund 30 % im Süden bis 80 % im Norden liegen muss.

Es wird also deutlich, dass die Festlegung der Übertragungsgrade auf den Aufstellungsort entsprechend flexibel berücksichtigt werden muss.

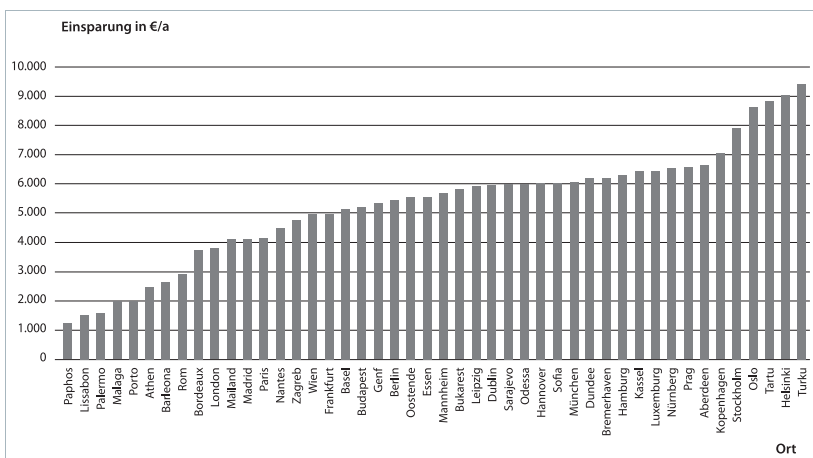
Bei der ökologischen Optimierung auf Basis einer maximalen CO<sub>2</sub>-Einsparung zeigt sich ein ähnliches Bild, wobei die sich ergebenden Luftgeschwindigkeiten bei einer mehrdimensionalen Optimierung an allen Standorten in Europa unter 0,7 m/s liegen. Mit dieser geringen Geschwindigkeit könnte die mögliche CO<sub>2</sub>-Reduktion um 40 bis 50 % gesteigert werden.

Kritisch kann jedoch bewertet werden, dass es bei solch niedrigen Luftge-



**Bild 5**

Eindimensionale Optimierung der monetären Einsparung bei Auslegungsbedingungen (1,9 m/s), durchschnittlich 4 180 € pro Jahr (F = 11,17)



**Bild 6**

Mehrdimensionale Optimierung der monetären Einsparung (3D-Optimierung) durchschnittlich 5 297 € pro Jahr (+26,7 %)

ben WRG innerhalb Europas je nach Standort deutlich variieren. Während in Paphos oder Lissabon eine WRG kaum einen Kapitalwert erwirtschaften kann oder sogar negativ und damit unwirtschaftlich ist, liegt der Ertrag der

identischen WRG in Helsinki oder Turku bei über 90 000 €.

Man sieht auch an der Entwicklung der Amortisationszeiten (**Bild 4**), dass im Süden die Amortisationszeiten deutlich länger sind als im Norden, wenn eine Amortisation der WRG im Süden überhaupt gegeben ist.

Optimiert man bei einem festen Querschnitt das WRG-System eindimensio-

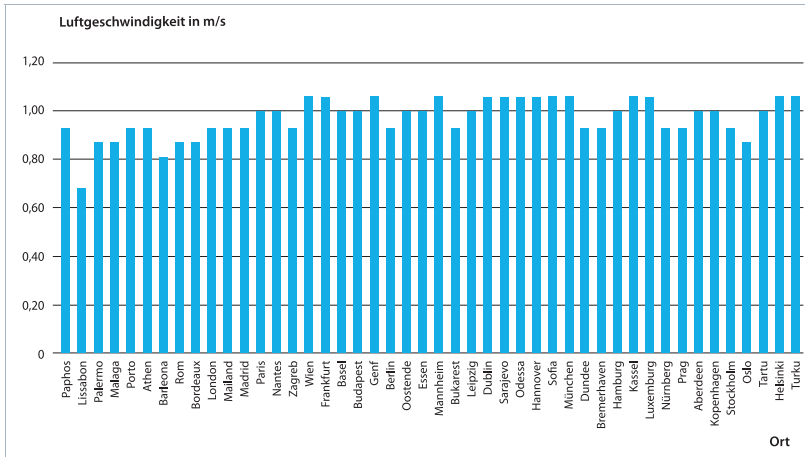


Bild 7

Luftgeschwindigkeiten (monetäre 3D-Optimierung) durchschnittlich 0,97 m/s

im Durchschnitt ein Wärmeertrag von  $\varnothing$  226 144 kWh/a statt  $\varnothing$  65 558 kWh/a (bei 2 350 h/a) zurückgewonnen. Die Spanne vom Norden zum Süden beträgt nun  $F = 5,47$  statt  $F = 7,0$  (bei 2 350 h/a). Der Ertrag an sensibler Kälte beträgt nun 4 376 kWh/a statt  $\varnothing$  2 032 kWh/a bei 2 350 h/a.

Der Kapitalwert der Ersparnisse steigt dann von  $\varnothing$  49 282 € auf  $\varnothing$  226 090 € (mit  $F = 7,33$ ). Die durchschnittliche Amortisationsdauer sinkt deutlich. Selbst im Süden ergibt sich beispielsweise in Lissabon eine Amortisationszeit von knapp zwei Jahren.

Erstaunlicherweise liegen die optimalen Luftgeschwindigkeiten auch bei maximaler Laufzeit von 8 760 h/a unter monetären Gesichtspunkten ebenfalls auf einem Niveau von knapp 1 m/s. Ein Betrieb rund um die Uhr führt jedoch zu höheren, optimalen Übertragungsgraden von 78 % (im Süden) bis 88 % (im Norden). Auch die optimale Geschwindigkeit zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt ebenfalls bei ca. 0,7 m/s.

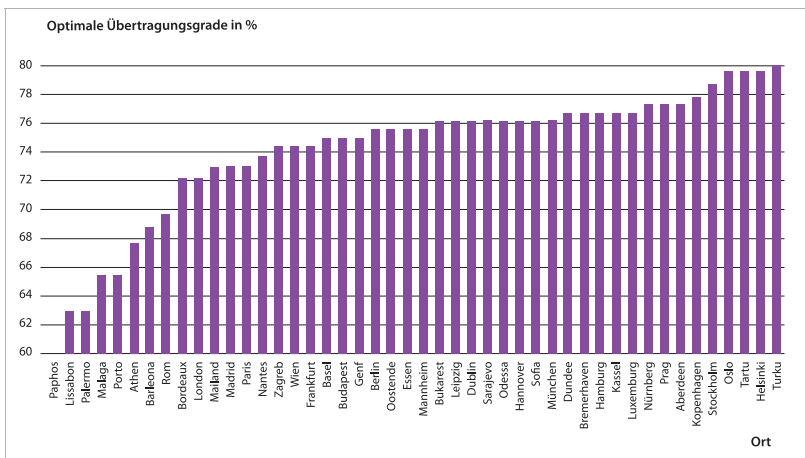


Bild 8

Optimale Übertragungsgrade (monetäre 3D-Optimierung)

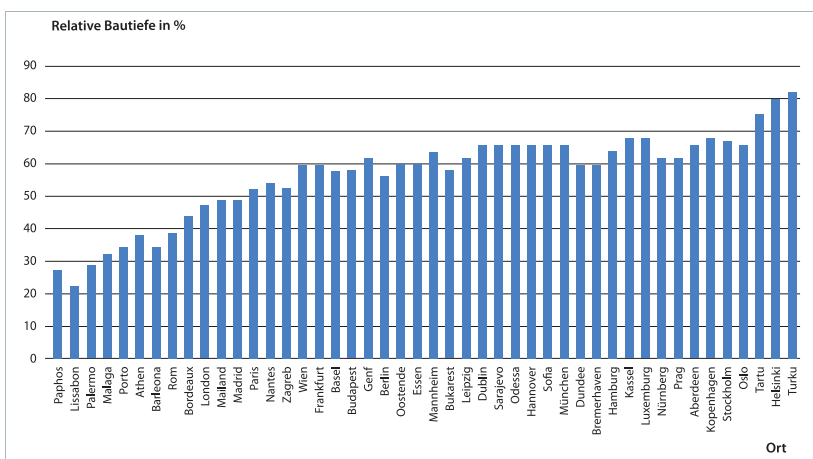


Bild 9

Optimale relative Bautiefe des WRG-Systems (monetäre 3D-Optimierung)

schwindigkeiten zu Problemen im Teillastbereich kommen kann. Wie bereits beschrieben, können WRG-Systeme bis zu einer Geschwindigkeit von etwa 0,4 bis 0,5 m/s noch sicher betrieben werden. Somit wäre der Teillastbetrieb mit einer Auslegungsgeschwindigkeit von 0,7 m/sec deutlich limitiert.

### Ergebnisse bei einer maximalen Laufzeit von 8 760 h/a mit 12 Stunden Laufzeit pro Tag und 12 Stunden pro Nacht

Wird die Laufzeit der WRG-Systeme auf das Maximum (8760 h/a) erhöht, ändern sich die Ergebnisse zwar absolut, aber relativ gesehen kaum. Es wird

### Zusammenfassung

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass auf Basis von individuellen Rahmenbedingungen ein betriebswirtschaftliches Optimum oder Maximum in 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 unterscheiden.

Weiter wird ersichtlich, dass zur Erreichung des maximalen Ertrags der WRG die Auslegungsluftgeschwindigkeit signifikant sinken muss und zwar auf  $\leq 1$  m/s, um einen maximalen Ertrag erreichen zu können.

Es ist aber auch offensichtlich, dass pauschale Referenzwerte der Ökodesignverordnung ab 2020 unsinnig sind, da die optimalen Übertragungsgrade je nach Lokalität oder Laufzeit zwischen rund 60 % und 88 % variieren können.

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 CO<sub>2</sub>-Minderungen deutlich.