

Parameter für verschiedene WRG-Bauarten

Näherungsgleichungen zur Vorhersage von Temperaturübertragungsgraden an Wärmeübertragern – insbesondere zur Wärmerückgewinnung

Als wesentliche Leistungskenngröße einer Wärmerückgewinnung (WRG) dient der Temperaturänderungsgrad sowohl bei privatrechtlichen Vereinbarungen wie auch bei gesetzlichen Anforderungen. Üblicherweise werden zur Festlegung ein Wärmekapazitätsstromverhältnis von 1 und ein definierter Referenzmassenstrom vorausgesetzt. In der Praxis müssen aber Leistungsnachweise oft bei abweichenden Betriebszuständen durchgeführt werden. Dabei besteht der Bedarf nach einfachen Näherungsgleichungen zur Umrechnung auf die Referenzbedingungen. Zudem sind für die Beurteilung der Messunsicherheit bei Labor- und Feldmessungen Modelle gefragt, die neben dem Einfluss der Temperaturen auch die Massenströme berücksichtigen.

TEXT: Heinrich Huber und Christoph Kaup

Der vorliegende Beitrag vergleicht drei Modelle für Näherungsgleichungen von Temperaturänderungsgraden und schlägt zudem Parameter für verschiedene WRG-Bauarten vor.

Thermische Güte der Wärmerückgewinnung

Der Temperaturänderungsgrad (Φ) einer WRG ist definiert mit:

$$\Phi = \frac{\theta_{22} - \theta_{21}}{\theta_{11} - \theta_{21}}$$

wobei:

θ_{11}	Ablufttemperatur in °C
θ_{21}	Außenlufttemperatur in °C
θ_{22}	Zulufttemperatur in °C

Für die Beurteilung eines Temperaturänderungsgrads ist es unabdingbar, dass der dazugehörige Zuluft- und Abluftmassenstrom deklariert wird. Die Veränderung von einem oder von beiden dieser Massenströme führt zwangsläufig zu einer Veränderung des Temperaturänderungsgrads.

Heutige Berechnungsprogramme von Herstellern, insbesondere von zertifizier-

ten Produkten, erlauben eine genaue Berechnung von Temperaturänderungsgraden. Diese Programme sind aber nicht immer frei zugänglich und zur schnellen Umrechnung von Leistungskennwerten teilweise nicht einfach anwendbar. Zudem sind die Berechnungsmodelle zu komplex, um sie bei der Berechnung der Messunsicherheit einzusetzen.

Bei veränderten Bedingungen, also bei veränderbaren Luft- oder Medienmengen, müssen für sämtliche Zustände die Wärmedurchgangskoeffizienten (k) berechnet werden. Häufig wird in der Praxis vereinfacht mit einer konstanten k -Zahl gerechnet, was zu erheblichen Fehlern führt. Aus

diesem Grunde bieten sich Näherungsverfahren an, mit denen der Wärmedurchgangskoeffizient leicht auf unterschiedliche Betriebsbedingungen umgerechnet werden kann.

Abgrenzung und Vereinfachungen

Die Untersuchung gilt für WRG-Komponenten, die für den Einsatz in einer neuen RLT-Anlage bestimmt sind. Die Anströmgeschwindigkeit im Referenzfall liegt üblicherweise bei etwa 1,5 bis 2,0 m/s. Betrachtet werden die folgenden Bauarten:
 – Platten-Wärmeübertrager (PWÜ)
 – Rotations-Wärmeübertrager (RWÜ)
 – Kreislaufverbund-System (KVS)
 Die WRG verhält sich in guter Näherung wie ein reiner Gegenstrom-Wärmeübertrager (Gegenstrom-WÜ), deshalb werden die Gegenstrombeziehungen angewendet. Kondensation und Eisbildung werden nicht berücksichtigt. Beim KVS wird von einem optimalen Wärmekapazitätsstrom im Flüssigkeitskreislauf ausgegangen. Die temperaturbedingte Veränderung von Stoffwerten wird vernachlässigt.

Modell der Näherungsgleichung A: Gegenstrom-WÜ, mit Korrektur des Wärmedurchgangskoeffizienten

Das Modell baut auf den Gleichungen für Gegenstrom-Wärmeübertrager des VDI-Wärmeatlas [1] auf. Im ersten Schritt wird die dimensionslose Kennzahl NTU (Number of Transfer Units) im gemessenen beziehungsweise bekannten Zustand berechnet:

$$NTU_{Te} = \frac{1}{1 - \mu_{2,Te}} \cdot \ln \frac{1 - \mu_{2,Te} \cdot \Phi_{Te}}{1 - \Phi_{Te}}$$

für $\mu_{2,Te} \neq 1$

und

$$NTU_{Te} = \frac{\Phi_{Te}}{1 - \Phi_{Te}} \text{ für } \mu_{2,Te} = 1$$

wobei:

- Φ_{Te} Temperaturänderungsgrad im gemessenen oder bekannten Zustand
- $\mu_{2,Te}$ Wärmekapazitätsstromverhältnis von Zuluft zu Abluft im gemessenen oder bekannten Zustand

Das Wärmekapazitätsstromverhältnis errechnet sich mit

$$\mu_{2,Te} = W_2 / W_1$$

mit

$$W_i = \dot{m}_i \cdot c_p$$

mit:

- \dot{m}_i Massenstrom des Luftstroms i (1 für Abluft, 2 für Zuluft) in kg/s
- c_p spezifische Wärmekapazität der Luft, in J/kg/K

Im zweiten Schritt wird die dimensionslose Kennzahl NTU mit einem empirischen Ansatz für die Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten auf den korrigierten Zustand umgerechnet. Gemäss der Näherungsgleichung nach Kaup [2] verändert sich der Wärmedurchgangskoeffizient exponentiell mit der Strömungsgeschwindigkeit:

$$k_{kor} = k_{Te} \cdot \left(\frac{w_{1,kor}}{w_{1,Te}} \right)^n \cdot \left(\frac{w_{2,kor}}{w_{2,Te}} \right)^n$$

mit:

- k_{kor} umzurechnender Wärmedurchgangskoeffizient in W/m²/K
- k_{Te} Wärmedurchgangskoeffizient im gemessenen oder bekannten Zustand in W/m²/K
- $w_{1,kor}$ Geschwindigkeit auf der Medien-seite 1 im umzurechnenden Betriebszustand in m/s
- $w_{1,Te}$ Geschwindigkeit auf der Medien-seite 1 im gemessenen oder bekannten Zustand in m/s
- $w_{2,kor}$ Geschwindigkeit auf der Medien-seite 2 im umzurechnenden Betriebszustand in m/s
- $w_{2,Te}$ Geschwindigkeit auf der Medien-seite 2 im gemessenen oder bekannten Zustand in m/s
- n strömungs- und bauartabhängiger Exponent zur Charakterisierung der Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten ($n = 0,1$ bis $0,5$)

Dieses Modell wird nun auf verschiedene WRG-Komponenten übertragen. Bei gleichbleibender Geometrie und Vernachlässigung der Dichteänderung verhält sich die Geschwindigkeit proportional zum

Massenstrom. Damit ergibt sich die Näherungsgleichung für die Berechnung der dimensionslosen Kennzahl NTU im korrigierten Zustand:

$$NTU_{kor} = NTU_{Te} \cdot \frac{\dot{m}_{2,Te}}{\dot{m}_{2,kor}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{1,kor}}{\dot{m}_{1,Te}} \right)^n \cdot \left(\frac{\dot{m}_{2,kor}}{\dot{m}_{2,Te}} \right)^n$$

wobei:

- $\dot{m}_{1,Te}$ Abluftmassenstrom im gemessenen oder bekannten Zustand in kg/s
- $\dot{m}_{1,kor}$ Abluftmassenstrom im korrigierten Zustand in kg/s
- $\dot{m}_{2,Te}$ Zuluftmassenstrom im gemessenen oder bekannten Zustand in kg/s
- $\dot{m}_{2,kor}$ Zuluftmassenstrom im korrigierten Zustand in kg/s
- n strömungs- und bauartabhängiger Exponent für die Charakterisierung der Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten

Im dritten Schritt wird der korrigierte Temperaturänderungsgrad berechnet:

$$\Phi_{kor} = \frac{1 - e^{(\mu_{2,Te} - 1) \cdot NTU_{kor}}}{1 - \mu_{2,Te} \cdot e^{(\mu_{2,Te} - 1) \cdot NTU_{kor}}}$$

für $\mu_{2,Te} \neq 1$

$$\Phi_{kor} = \frac{NTU_{kor}}{1 + NTU_{kor}}$$

für $\mu_{2,Te} = 1$

Kaup schlägt für Plattenwärmeübertrager und Kreislaufverbundsysteme einen Exponenten von $n = 0,4$ vor. Der Gültigkeitsbereich wird mit $0,4 < \mu < 1,6$ (Luftseiten) angegeben.

Modell der Näherungsgleichung B: Umrechnung nach DIN EN 13053:2020

Die DIN EN 13053:2020 [3] schlägt in Ziffer 6.5.2 die folgende Gleichung vor, um einen Temperaturänderungsgrad mit einem Massenstromverhältnis von ungleich 1 auf ein Massenstromverhältnis von 1 umzurechnen:

$$\Phi_{1:1} = \Phi_{Te} \cdot \frac{(1 + \dot{m}_{2,Te} / \dot{m}_{1,Te})}{2}$$

wobei:

- Φ_{Te} Temperaturänderungsgrad im gemessenen oder bekannten Zustand
- $\dot{m}_{1,Te}$ Abluftmassenstrom im gemessenen oder bekannten Zustand in kg/s
- $\dot{m}_{2,Te}$ Zuluftmassenstrom im gemessenen oder bekannten Zustand in kg/s

In DIN EN 13053 wird kein Gültigkeitsbereich für die Nutzung der Umrechnung angegeben, somit können bei extremen Luftmengenunterschieden unsinnige Werte entstehen. Daher muss die Gleichung mit Vorsicht verwendet werden.

Modell der Näherungsgleichung C: Modell für die Messunsicherheit aus der FprEN 308:2021

Im Entwurf der Prüfnorm für Luft-Luft-Wärmerückgewinner FprEN 308:2021 [4] findet sich im Anhang C folgende Formel als Basis zur Berechnung der Messunsicherheit. Dabei wird vorausgesetzt, dass der Temperaturänderungsgrad bei einem Massenstromverhältnis im Bereich von 1 gemessen wird. Im Sinne der Bestimmung der Messunsicherheit wird ein korrigierter Temperaturänderungsgrad bei veränderten Massenströmen berechnet:

$$\Phi_{\text{korr}} = \Phi_{1:1,Te} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{1,\text{korr}}}{\dot{m}_{1,Te}} \right)^{f_{U1} \cdot 0,5 \cdot \Phi_{1:1}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{2,\text{korr}}}{\dot{m}_{2,Te}} \right)^{f_{U2} \cdot (0,5 \cdot \Phi_{1:1} - 1)}$$

wobei:

- $\Phi_{1:1,Te}$ Temperaturänderungsgrad im gemessenen oder bekannten Zustand bei einem Massen-

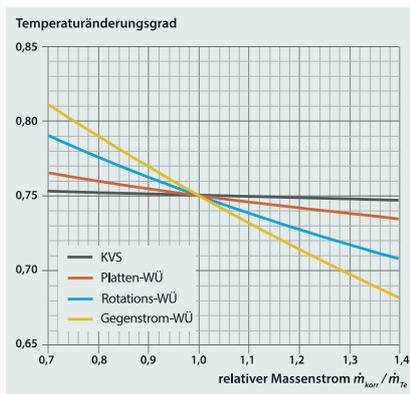


Bild 1: Temperaturänderungsgrade von unterschiedlichen WRG-Bauarten in Abhängigkeit vom relativen Massenstrom (Massenstromverhältnis 1, Temperaturänderungsgrad im Referenzpunkt 0,75). Grafik: IGE-HSLU.CH

- stromverhältnis von 1 (oder nahe 1)
- $\dot{m}_{1,Te}$ Abluftmassenstrom im gemessenen oder bekannten Zustand (bei einem Massenstromverhältnis im Bereich von 1) in kg/s
- $\dot{m}_{2,Te}$ Zuluftmassenstrom im gemessenen oder bekannten Zustand (bei einem Massenstromverhältnis im Bereich von 1) in kg/s
- $\dot{m}_{1,\text{korr}}$ Abluftmassenstrom im korrigierten Zustand in kg/s
- $\dot{m}_{2,\text{korr}}$ Zuluftmassenstrom im korrigierten Zustand in kg/s
- f_{U1} Faktor für die Charakterisierung der Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten auf der Abluftseite
- f_{U2} Faktor für die Charakterisierung der Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten auf der Zuluftseite

Tabelle 1 zeigt den Gültigkeitsbereich dieser Gleichung, bei dem der nach FprEN 308:2021 korrigierte Temperaturänderungsgrad um maximal 0,01 von einer Umrechnung nach dem Modell A abweicht. Die Grundform der Gleichung der

Bereich von $\Phi_{1:1,Te}$	Bereich von $\frac{\dot{m}_{1,\text{korr}}}{\dot{m}_{1:1,Te}}$	Bereich von $\frac{\dot{m}_{2,\text{korr}}}{\dot{m}_{1:1,Te}}$
≤ 0,70	0,80 ... 1,25	0,80 ... 1,25
0,71 ... 0,80	0,85 ... 1,20	0,90 ... 1,25
0,81 ... 0,90	0,90 ... 1,10	0,90 ... 1,10

Tabelle 1: Gültigkeitsbereich Modell C, bei dem der korrigierte Temperaturänderungsgrad um maximal 0,01 von Modell A abweicht.

FprEN 308:2021 (ohne die Faktoren für f_{U1} und f_{U2}) entspricht der Grenzwertfunktion, wenn in der Gleichung für Gegenstrom-Wärmeübertrager (für $\mu_{2,Te} \neq 1$) das Wärmestromkapazitätsverhältnis gegen 1 konvergiert.

Bestimmung und Bewertung der Parameter

Bei den Modellen A und C sind für die verschiedenen WRG-Bauarten die Exponenten oder Faktoren zu bestimmen. Dazu wurden Daten von fünf Platten-Wärmeübertragern (PWÜ), sieben Rotations-Wärmeübertragern (RWÜ) und vier Kreislaufverbundsystemen (KVS) verwendet. Bei acht Produkten haben Hersteller Messdaten zur Verfügung gestellt. Bei weiteren acht Produkten wurden von den Herstellern die Daten von Eurovent-zertifizierten Produkten berechnet. Da die Programme mit Messwerten validiert sind, gelten diese Daten als ebenso vertrauenswürdig wie die Messwerte. Die Auslegung entspricht der heutigen Praxis, außer dass bei einigen Berechnungen bewusst Temperaturänderungsgrade gewählt wurden, die nicht der EU-Verordnung EU 1253/2014 entsprechen.

Bild 1 zeigt beispielhaft den Temperaturänderungsgrad der drei WRG-Bauarten in Abhängigkeit vom Massenstrom. Dabei bleibt das Massenstromverhältnis konstant bei 1. Gemäß den analysierten Daten hängt die Steigung und Krümmung der Kurven von der WRG-Bauart ab. RWÜ weisen die ausgeprägteste Steigung und Krümmung auf, während der Temperaturänderungsgrad bei den KVS praktisch konstant bleibt. PWÜ liegen dazwischen. Als Vergleich ist die Funktion der Gleichung für einen idealen Gegenstrom-Wärmeübertrager eingetragen (ohne Berücksichtigung der Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten).

Die Exponenten und Faktoren für die verschiedenen WRG-Bauarten wurden in Anlehnung an die Methode des besten Grades der Anpassung bestimmt. Dabei ist die Summe der Fehlerquadrate der Differenz der Temperaturänderungsgrade zwischen einer Modellfunktion und den vertrauenswürdigen Werten minimal. Die dazu verwendeten Gleichungen sind:

$$s_b = \sqrt{\frac{\sum s_{b,i}^2}{m_b}}$$

wobei:

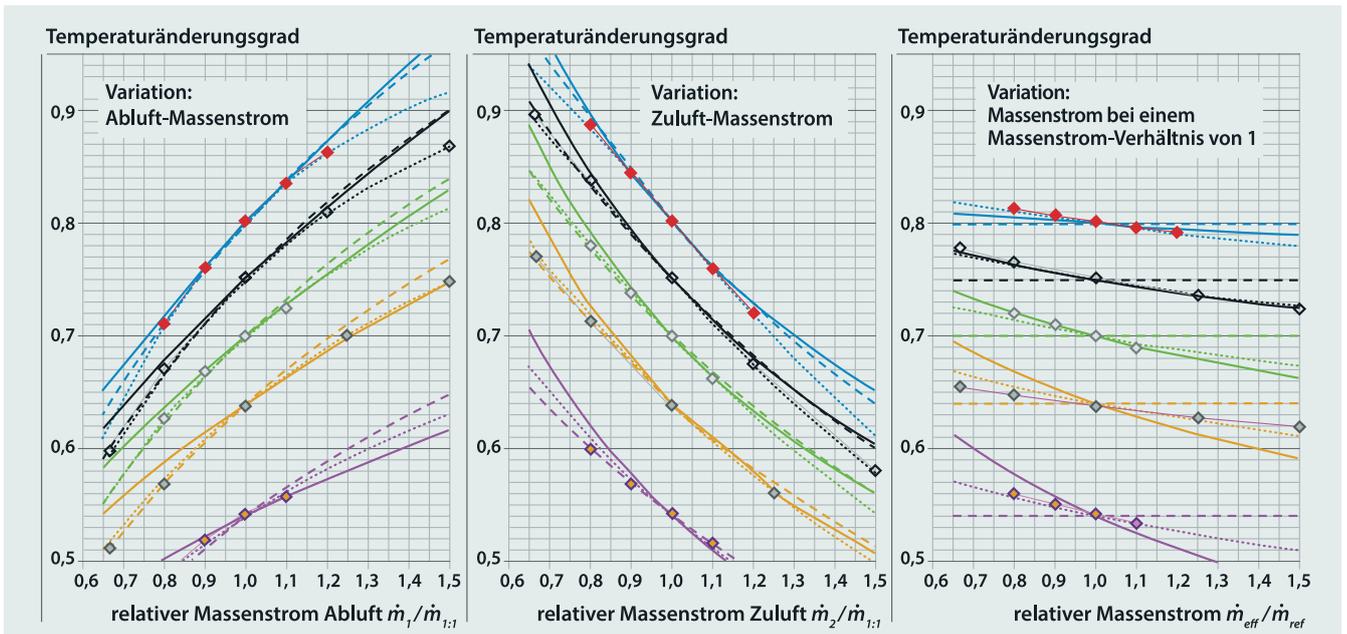


Bild 2: Vergleich der vertrauenswürdigen Datenpunkte (Rauten) von fünf Platten-WÜ mit Modell A (gepunktete Linie), Modell B (gestrichelte Linie) und Modell C (durchgezogene Linie). Grafik: IGE-HSLU.CH

- s_b Grad der Anpassung der Näherungsgleichung für die WRG-Bauart b
- $s_{b,i}$ Grad der Anpassung des Wärmeübertragers Nr. i der WRG-Bauart b
- m_b Anzahl Wärmeübertrager der WRG-Bauart b

mit

$$s_{b,i}^2 = \frac{\sum (\Phi_{Model,p} - \Phi_{Data,p})^2}{n_i}$$

wobei:

- n_i Anzahl vertrauenswürdige Datenpunkte des Wärmeübertragers Nr. i
- $\Phi_{Model,p}$ Temperaturänderungsgrad berechnet mit der Näherungsgleichung, mit den Massenströmen des Datenpunktes p
- $\Phi_{Data,p}$ Temperaturänderungsgrad des vertrauenswürdigen Datenpunktes p

Der Grad der Anpassung kann vereinfacht als Standardabweichung der Modellgleichung gegenüber den vertrauenswürdigen Daten verstanden werden.

Definitionen für die Berechnungen:

- die Datenanalyse behandelt drei WÜ-Arten: Rotoren-WÜ, Platten-WÜ und KVS

Modell A: Gegenstrom-WÜ mit Korrektur für k-Wert		
WRG-Bauart	Exponent n	Grad der Anpassung
Platten-WÜ	0,35	0,006
Rotations-WÜ	0,18	0,009
KVS	0,48	0,005

Modell B: EN 13053 : 2019	
WRG-Bauart	Grad der Anpassung
Platten-WÜ	0,010
Rotations-WÜ	0,029
KVS	0,012

Modell C: FprEN 308 : 2021			
WRG-Bauart	Faktor $f_{u,1}$	Faktor $f_{u,2}$	Grad der Anpassung
Platten-WÜ	1,20	0,85	0,015
Rotations-WÜ	1,05	0,88	0,023
KVS	1,20	0,80	0,021

Tabelle 2: Grad der Anpassung der drei Modelle sowie dazugehörige Exponenten und Faktoren für drei WRG-Bauarten.

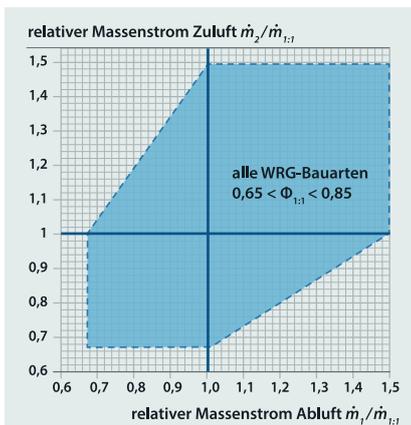


Bild 3: Bereich, in dem Modell A maximal 0,01 vom tatsächlichen Temperaturänderungsgrad abweicht. Grafik: IGE-HSLU.CH

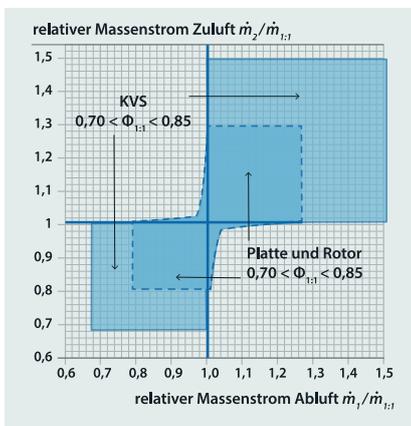


Bild 4: Bereich, in dem Modell B maximal 0,01 vom tatsächlichen Temperaturänderungsgrad abweicht. Grafik: IGE-HSLU.CH

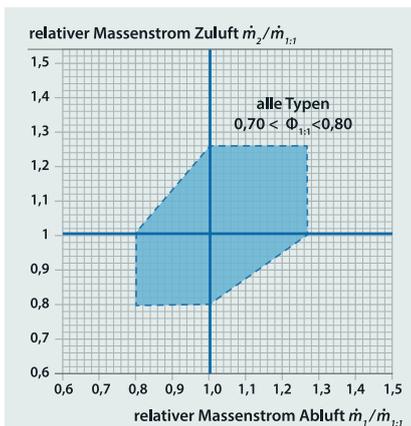


Bild 5: Bereich, in dem Modell C maximal 0,01 vom tatsächlichen Temperaturänderungsgrad abweicht. Grafik: IGE-HSLU.CH

- ein WÜ ist ein bestimmtes Produkt, zum Beispiel: KVS1, KVS2, KVS3 oder Rotor1, Rotor2, Rotor3 et cetera
- der Referenzpunkt (definiert durch einen Temperaturänderungsgrad und

Messgröße oder Größe mit Unsicherheit	Symbol	Einheit	Wert	Erweiterte Messunsicherheit	Anteil am Gesamtbudget
Temperatur Zuluft, bei der Messebene	$\theta_{22,S}$	°C	19,20	0,25	31,2 %
Temperatur Abluft, bei der Messebene	$\theta_{11,S}$	°C	25,00	0,25	17,6 %
Temperatur Außenluft, bei der Messebene	$\theta_{21,S}$	°C	5,00	0,25	2,0 %
Temperaturverlust zuluftseitig zwischen WRG und Messebene	$\Delta\theta_{22}$	°C	0,15	0,15	7,0 %
Temperaturverlust abluftseitig zwischen Messebene und WRG	$\Delta\theta_{11}$	°C	0,05	0,05	1,0 %
Temperaturverlust außenluftseitig zwischen Messebene und Eintritt	$\Delta\theta_{21}$	°C	0,05	0,05	0,1 %
Luftvolumenstrom Zuluft, bei der Messebene	q_{v2}	m³/s	1,00	0,03	21,9 %
Luftvolumenstrom Abluft, bei der Messebene	q_{v1}	m³/s	1,05	0,03	12,0 %
Leckage zuluftseitig zwischen Austritt WRG und Messebene	q_{v12}	m³/s	0,01	0,01	4,3 %
Leckage abluftseitig zwischen Messebene und Eintritt WRG	q_{v11}	m³/s	0,01	0,01	2,8 %
Exponent Änderung Wärmedurchgangskoeffizient	n	–	0,35	0,05	0,1 %
Umgebungsdruck (barometrischer Druck)	p_a	Pa	101325	500	< 0,1 %
Relative Feuchte Abluft	φ_{11}	–	0,28	0,03	< 0,1 %
Relative Feuchte Zuluft	φ_{22}	–	0,32	0,03	< 0,1 %
Druckdifferenz zwischen Umgebung und Ablufteintritt WRG	Δp_{11}	Pa	100	2	< 0,1 %
Druckdifferenz zwischen Umgebung und Zuluftaustritt WRG	Δp_{22}	Pa	100	2	< 0,1 %
Temperaturänderungsgrad	Φ	–	0,748	0,022	100 %

Tabelle 3: Messunsicherheitsbudget des Temperaturänderungsgrades eines Platten-Wärmeübertragers bei einem Wintermesspunkt, Präzisionsklasse P1 gemäß FprEN 308:2021.

die Massenströme) ist der Ausgangspunkt für die Umrechnung.

Zu jedem WÜ gehört eine Messreihe mit n Datenpunkten (auch „vertrauenswürdige Daten“ genannt, weil sie teilweise mit zertifizierter Software berechnet wurden). Bei der Messreihe eines WÜ liegen (mit einer Ausnahme) Daten mit folgenden Variationen vor:

- Abluftmassenstrom wird variiert – Zuluftmassenstrom bleibt konstant

- Zuluftmassenstrom wird variiert – Abluftmassenstrom bleibt konstant
- beide Massenströme werden parallel variiert – das Massenstromverhältnis bleibt konstant.

Die Messreihen der verschiedenen WÜ enthalten unterschiedlich viele Datenpunkte ($n = 4$ bis $n = 12$). Der Referenzpunkt ist dabei nicht enthalten und wird beim Grad der Anpassung nicht berücksichtigt. **Tabelle 2** fasst die Ergebnisse zusammen, die mit dem Datenstamm der

16 WRG-Komponenten ermittelt wurden. Dass die KVS im Vergleich zu den Rotations-WÜ einen besseren Grad der Anpassung erreichen, lässt sich dadurch erklären, dass die vertrauenswürdigen Datenpunkte der KVS enger beieinander liegen als diejenigen der Rotations-WÜ. Beim Modell B ist zu beachten, dass diverse verwendete „vertrauenswürdige Datenpunkte“ außerhalb des Gültigkeitsbereichs liegen, der in Tabelle 1 aufgezeigt ist. **Bild 2** illustriert die Auswertung am Beispiel der Platten-WÜ. Ausgehend von einem Referenzmassenstrom (Wert 1 auf der Abszisse) wurden

1. der Abluftmassenstrom variiert und der Zuluftmassenstrom konstant gehalten (Figur links),
2. der Zuluftmassenstrom variiert und der Abluftmassenstrom konstant gehalten (Figur mitte) und
3. der Zuluft- und Abluftmassenstrom in gleichem Mass variiert, so dass das Massenstromverhältnis konstant bei 1 bleibt (Figur rechts).

Bemerkung: Die Funktion der Modellgleichung B ist in der Figur rechts schwer erkennbar, da die Kurve horizontal verläuft (konstanter Wert).

Alternativ zum Grad der Anpassung kann beurteilt werden, in welchem Bereich ein Modell eine hohe Genauigkeit erreicht. Die **Bilder 3** und **4** zeigen die Bereiche, in denen davon ausgegangen werden kann, dass die Abweichung zwischen der Modellgleichung A oder B und dem effektiven Temperaturänderungsgrad maximal 0,01 beträgt. Der entsprechende Bereich für Modell C findet sich in Tabelle 1 und **Bild 5**.

Messunsicherheit des Temperaturänderungsgrads

Näherungsgleichungen lassen sich als Grundlage für die Berechnung der Messunsicherheit verwenden, wenn ihre Werte und Gradienten den physikalischen Zusammenhang in guter Näherung abbilden. Modell A ist in einem weiten Bereich sehr gut geeignet. Modell C eignet sich unter der Einschränkung, dass der Messwert bei einem Massenstromverhältnis von 1 (oder nahe von 1) ermittelt wird, ebenfalls gut. Modell B scheidet aus, da es für den häufigen Fall einer Korrelation von Zuluft- und Abluftmassenstrom (zum Beispiel Kalibrierung mit dem gleichen Normal) die Unsicherheit der Massen-

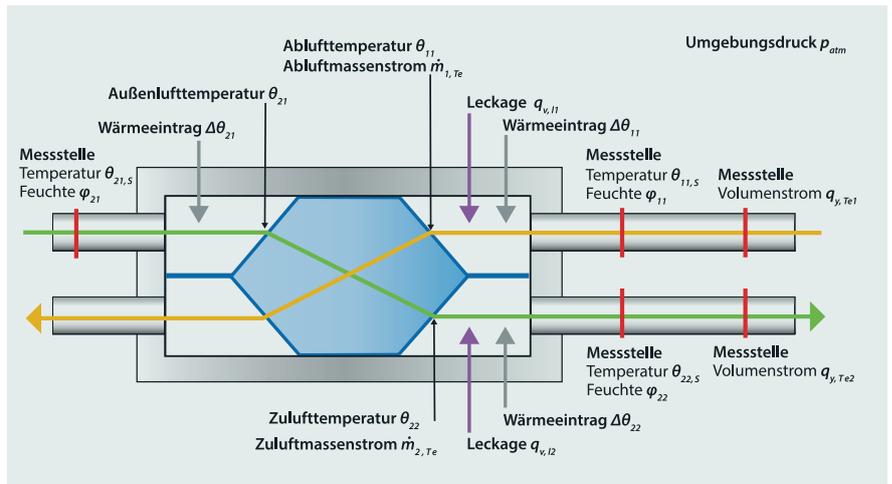


Bild 6: Einflussgrößen für die Messunsicherheit des Temperaturänderungsgrads. Grafik: IGE-HSLU.CH

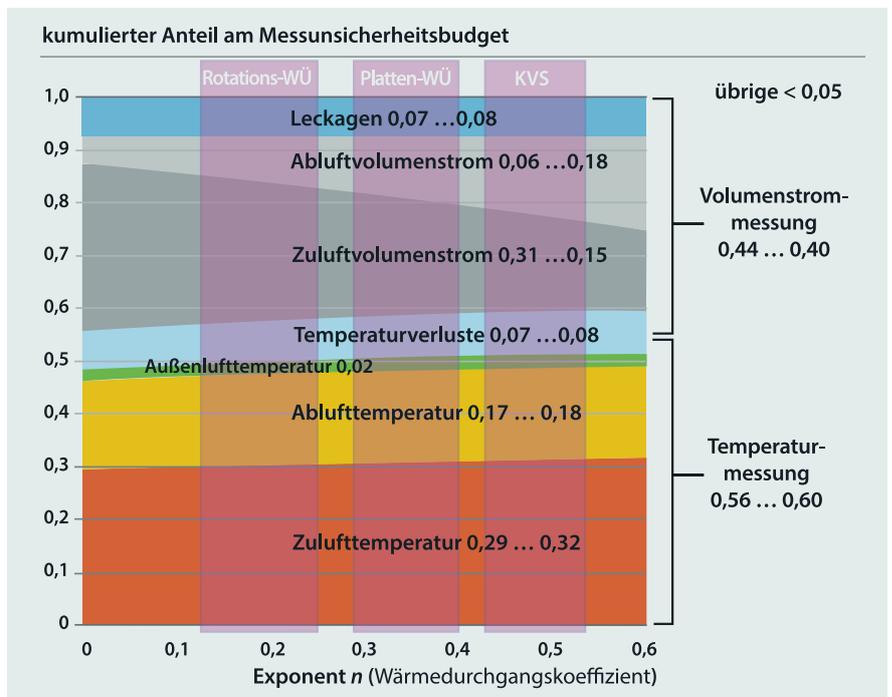


Bild 7: Aufteilung des Messunsicherheitsbudgets einer WRG mit einem Temperaturänderungsgrad von $0,750 \pm 0,023$ in Abhängigkeit des Exponenten n (Wintermesspunkt, Präzisionsklasse P1 gemäß FprEN 308:2021). Grafik: IGE-HSLU.CH

strommessung nicht berücksichtigt. **Bild 6** zeigt die Einflussgrößen, die bei der messtechnischen Prüfung einer WRG-Komponente zu berücksichtigen sind.

Beispiel für die Messunsicherheit des Temperaturänderungsgrads

Tabelle 3 zeigt beispielhaft das Messunsicherheitsbudget eines Platten-Wärmeübertragers mit einem Temperaturänderungsgrad von 0,75. Dabei gelten folgende Annahmen:

- Winter-Messpunkt, ohne Kondensation
- Messunsicherheiten der Einzelgrößen sowie Toleranzen nach FprEN 308:2021, Präzisionsklasse P1
- Standardabweichung der Temperaturschwankungen 0,05 K, weitere Schwankungen von Messgrößen werden vernachlässigt
- Leckagen und Temperaturverluste werden als Unsicherheiten mit Rechteckverteilung angenommen
- keine Korrelationen, außer bei der Massenstrommessung (Korrelationsfaktor 0,3)

- Berechnung mit Modell A, Exponent $n = 0,35 \pm 0,05$ (Rechteckverteilung)
Die Berechnung wurde mit der Software GUM Workbench 2.4 [5] durchgeführt.

Im Beispiel betragen die Messunsicherheiten der Temperaturen und der Temperaturverluste insgesamt 59 Prozent des Messunsicherheitsbudgets. Die aufsummierten Messunsicherheiten der Massen- oder Volumenströme und der Leckagen liegen bei 41 Prozent. Der Einfluss der Messunsicherheiten von Druck und Feuchte ist bei Einhaltung der Anforderungen der FprEN 308:2021 vernachlässigbar klein.

Bild 7 zeigt, wie sich die Anteile der einzelnen Beiträge des Messunsicherheitsbudgets in Abhängigkeit vom Exponenten n verändern. Der Betrag der Messunsicherheit des Temperaturänderungsgrads bleibt dabei praktisch konstant in einem Bereich von 0,022 bis 0,023. Wenn die Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten nicht berücksichtigt wird ($n = 0$), wird der Beitrag der Messunsicherheit des Zuluftvolumenstroms überschätzt und derjenige des Abluftvolumenstroms unterschätzt. Bei realen WRG-Komponenten ($n = 0,2 \dots 0,5$) liegen beide Beiträge in einem ähnlichen Bereich. Es ist daher angemessen, dass die Prüfnormen für beide Volumenströme die gleiche Messunsicherheit fordern. Eine weitere Aussage dieser Analyse ist, dass die Anforderungen der FprEN 308:2021 bei allen WRG-Bauarten bei gleichen Prüfbedingungen zur gleichen Messunsicherheit des Temperaturänderungsgrads führen.

Diskussion

Die drei analysierten Modelle zur Abschätzung des Temperaturänderungsgrads haben alle ihre Berechtigung.

Modell A ist in einem weiten Bereich sowohl für die Umrechnung von Temperaturänderungsgraden wie auch zur Berechnung der Messunsicherheit geeignet. Der Nachteil des Modells liegt in seiner Komplexität. Für eine Umrechnung von Temperaturänderungsgraden ist ein Tabellenkalkulationsprogramm nötig. Die partiellen Ableitungen sind so komplex, dass für die Messunsicherheit ein einschlägiges Berechnungstool oder eine Monte-Carlo-Simulation erforderlich ist.

Modell B besticht durch seine Einfachheit, die sich sogar für Kopfrechnungen eignet. Zudem ist eine Umrechnung

des Temperaturänderungsgrads recht zuverlässig, sofern gegenüber der Messung entweder nur der Zuluft- oder nur der Abluftmassenstrom geändert wird. Ausgenommen sind KVS, da sich bei dieser WRG-Bauart die Veränderung des Massenstroms und die Veränderung des Wärmedurchgangskoeffizienten weitgehend kompensieren. Modell B ist für die Berechnung der Messunsicherheit ungeeignet.

Modell C kann als Zwischenstufe zwischen den Modellen A und B betrachtet werden. Die Umrechnung des Temperaturänderungsgrads lässt sich mit einem Taschenrechner bewältigen. Zudem sind die partiellen Ableitungen noch soweit handhabbar, dass die Messunsicherheit mit einem Tabellenkalkulationsprogramm berechnet werden kann. Der Nachteil ist die beschränkte Gültigkeit bei einem Massenstromverhältnis im Bereich von 1. Zudem muss für eine Umrechnung von ungleichen Massenströmen auf ein Massenstromverhältnis von 1 iterativ vorgegangen werden (zum Beispiel mit Solverfunktion bei einem Tabellenkalkulationsprogramm).

Ein mögliches Anwendungsfeld der Modelle A und C sind Berechnungstools für den Jahresenergiebedarf von RLT-Anlagen. Temperaturänderungsgrade bei Teillast lassen sich damit mit ausreichender Genauigkeit abbilden. Die Berechnung der Messunsicherheit zeigt, dass die Messunsicherheiten der Massenströme relevante Beiträge zur Messunsicherheit des Temperaturänderungsgrads liefern. Bei messtechnischen Leistungsnachweisen muss dies unbedingt berücksichtigt werden.

Ausblick

Zur energetischen Beurteilung einer WRG gehört neben dem Temperaturänderungsgrad auch der luftseitige Druckverlust sowie die Hilfsenergie (spezifische Pumpenleistung). Die DIN EN 13053 berücksichtigt dies mit der Kennzahl der Energieeffizienz einer WRG. Diese wird in VDI 3803 Blatt 5 [6] als Wirkungsgrad der WRG bezeichnet. In einem weiteren Fachartikel sollen Näherungsgleichungen für die Abschätzung der luftseitigen Druckverluste vorgestellt werden.

Bei der Revision der Ecodesign-Verordnung für RLT-Geräte ist ein Bonus für eine Feuchterückgewinnung vorgesehen. Analog zum Temperaturänderungsgrad

besteht daher ein Interesse an Näherungsgleichungen zur Bestimmung des Feuchteänderungsgrads sowie an Modellen zur Berechnung der Messunsicherheit des Feuchteänderungsgrads. In einer laufenden Bachelorthesis werden erste Modelle erstellt und erprobt. ■

LITERATUR

- [1] VDI-Gesellschaft: VDI-Wärmeatlas, C1 Berechnung von Wärmeübertragern. Wiesbaden, Springer Berlin Heidelberg, 2019.
- [2] Kaup, C.: Berippte Wärmeübertrager, Näherungsgleichung zur k-Zahl-Berechnung. Gentner-Verlag, TGA-Fachplaner, 03/2015.
- [3] DIN EN 13053:2020 Lüftung von Gebäuden – Zentrale raumluftechnische Geräte – Leistungskenndaten für Geräte, Komponenten und Baueinheiten.
- [4] FprEN 308:2021 Wärmetauscher – Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft-Luft-Wärmerückgewinnungskomponenten.
- [5] GUM Workbench Professional Version (2.4). Danish Technological Institute, Metrodata GmbH, 2010, <http://www.metrodata.de/ver24.html>
- [6] VDI 3803 Blatt 5:2013 Raumluftechnik, Geräteanforderungen – Wärmerückgewinnungssysteme (VDI-Lüftungsregeln).



Prof. Heinrich Huber

ist Leiter des Labor Gebäudetechnik der Hochschule Luzern am Institut für Gebäudetechnik und Energie IGE.
Bild: HSLU-IGE



Prof. Dr.-Ing. Christoph Kaup

ist Honorarprofessor am Umwelt-Campus Birkenfeld und Geschäftsführer der Howatherm Klimatechnik GmbH, Brücken.
Bild: Nikola Krieger