

Näherungsgleichungen zur Vorhersage von Wärmeübergangskoeffizienten, sowie von Temperaturübertragungsgraden an Wärmeübertragern, insbesondere zur Wärmerückgewinnung

Heinrich Huber

Dozent, Leiter Labor Gebäudetechnik

Hochschule Luzern

Koautor des Beitrages: Christoph Kaup, Hochschule Trier, Umwelt-Campus Birkenfeld



Berlin, 28./29. Januar 2021



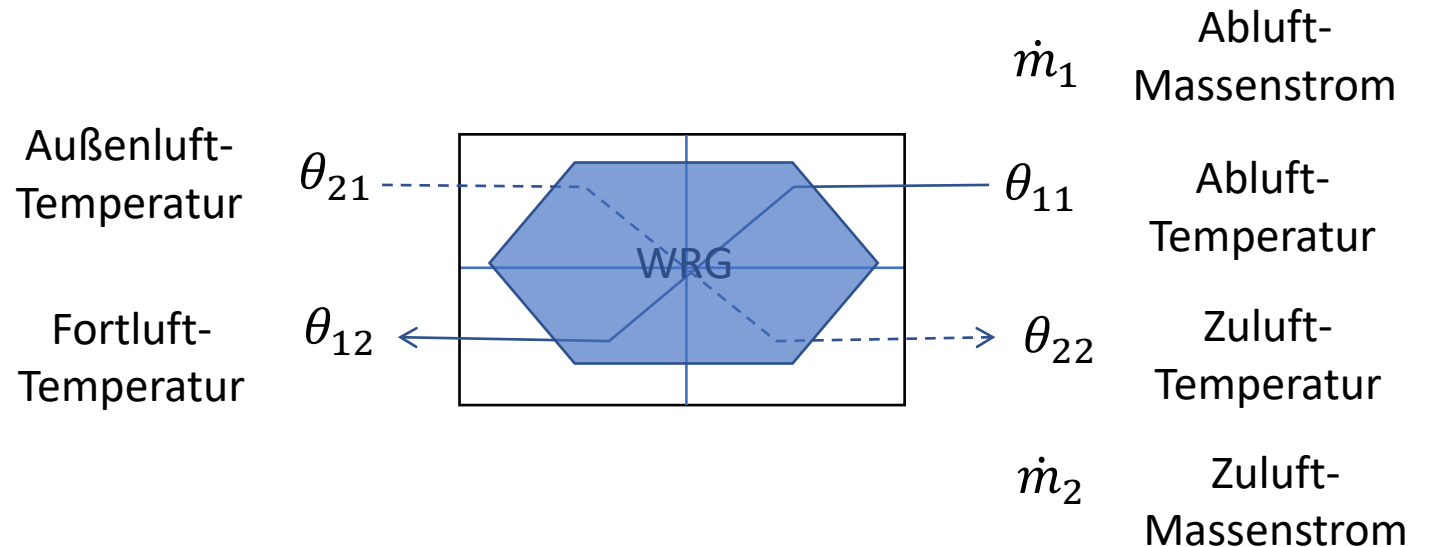
Inhalt

1. Ausgangslage
2. Vereinfachungen und Abgrenzung
3. Näherungsgleichungen für Temperaturänderungsgrade
4. Analyse von Daten von Wärmerückgewinnern
5. Einsatzbereich der Näherungsgleichungen
6. Bestimmung der Messunsicherheit mit Näherungsgleichungen
7. Schlussfolgerungen

1. Ausgangslage

Temperaturänderungsgrad Φ von Luft-Luft-Wärmerückgewinnern (WRG) gemäß EN 308:

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



- Nach EN 13053 bezieht sich der Referenzwert auf ein Massenstrom-Verhältnis von 1:1 ($\Phi_{1:1}$). Bei RLT-Anlagen muss oft von gemessenen Massenströmen auf den Referenzwert geschlossen werden, oder der Referenzwert ist auf die Betriebsbedingungen umzurechnen.
- Bei einer Prüfung nach prEN 308:2020 gilt es zu beurteilen, wie sich die Messunsicherheit der Massenströme auf die Messunsicherheit des Temperaturverhältnisses auswirkt.

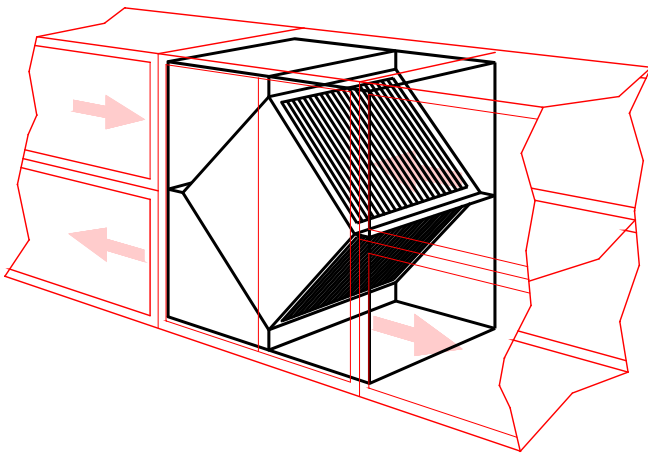
2. Vereinfachungen und Abgrenzung

Alle WRG-Typen werden als Blackbox betrachtet, die sich in guter Näherung wie reine Gegenstrom-Wärmeübertrager verhalten.

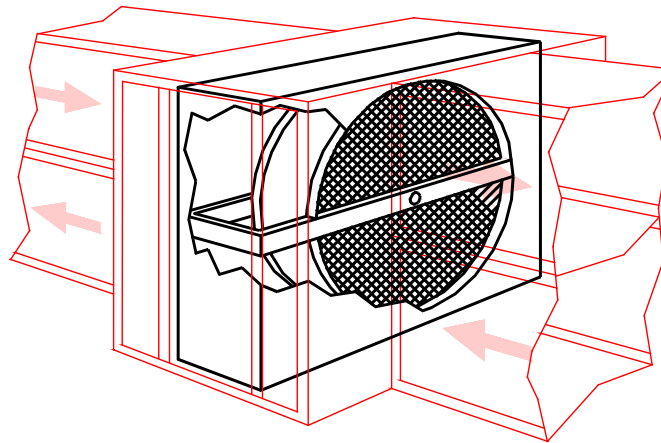
Die spezifischen Wärmekapazitäten sind auf der Zu- und Abluftseite gleich groß.

Keine Kondensation und keine Eisbildung.

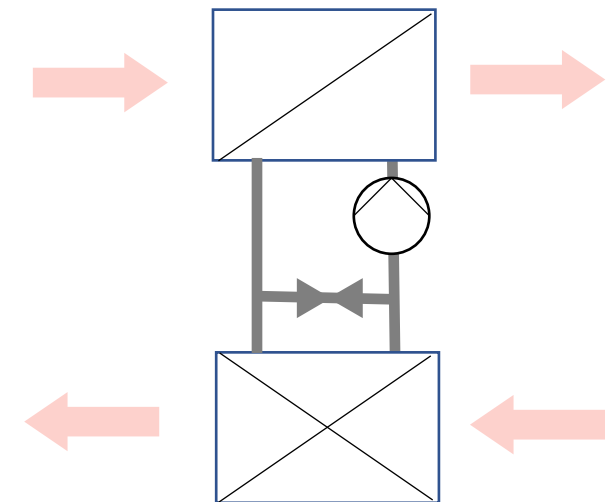
KVS mit optimalem Verhältnis der Wärmekapazitätsströme.



Platten-Wärmeübertrager



Rotor



KVS
Kreislauf-Verbundsystem

3. Näherungsgleichungen für Temperaturänderungsgrade

Modell A: Gegenstrom-WÜ, mit empirischer Korrektur für den Wärmedurchgangskoeffizienten

Der NTU-Wert wird anhand der gemessenen Werte bestimmt:

$$NTU_{Te} = \frac{1}{1 - \dot{m}_{2,Te}/\dot{m}_{1,Te}} \cdot \ln \frac{1 - (\dot{m}_{2,Te}/\dot{m}_{1,Te}) \cdot \Phi_{Te}}{1 - \Phi_{Te}}$$

Der NTU-Wert wird auf die Massenströme des korrigierten Zustandes umgerechnet:

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

n : empirischer Exponent für die Korrektur des Wärmedurchgangskoeffizienten

Schließlich wird der Temperaturänderungsgrad im korrigierten Zustand berechnet:

$$\Phi_{korr} = \frac{1 - e^{(\dot{m}_{2,korr}/\dot{m}_{1,korr} - 1) \cdot NTU_{korr}}}{1 - (\dot{m}_{2,korr}/\dot{m}_{1,korr}) \cdot e^{(\dot{m}_{2,korr}/\dot{m}_{1,korr} - 1) \cdot NTU_{korr}}}$$

Indizes:

Te gemessener Wert

$korr$ korrigierter Wert

Für $\dot{m}_2/\dot{m}_1 = 1$ gelten andere Gleichungen

3. Näherungsgleichungen für Temperaturänderungsgrade (2)

Modell B: EN 13053:2019

$$\Phi_{1:1} = \Phi_{Te} \frac{1 - \frac{\dot{m}_{2,Te}}{\dot{m}_{1,Te}}}{2}$$

Indizes:

<i>Te</i>	gemessener Wert
<i>korrr</i>	korrigierter Wert
1:1	für $\dot{m}_2/\dot{m}_1 = 1$

Modell C: prEN 308:2020

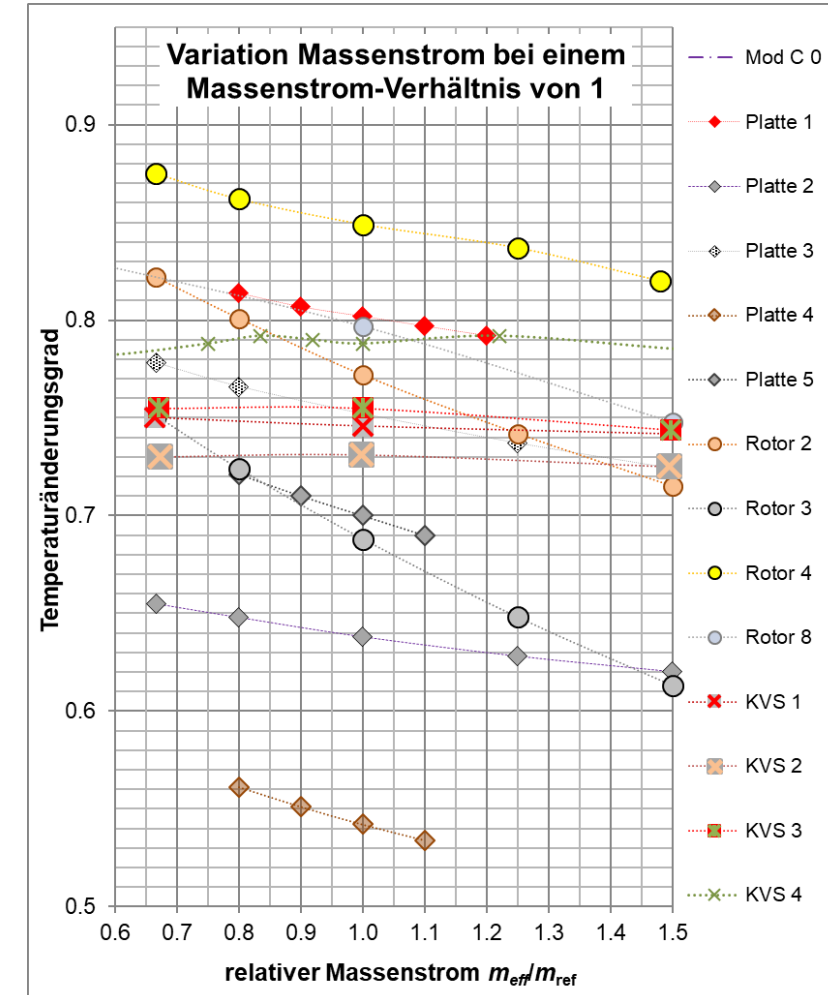
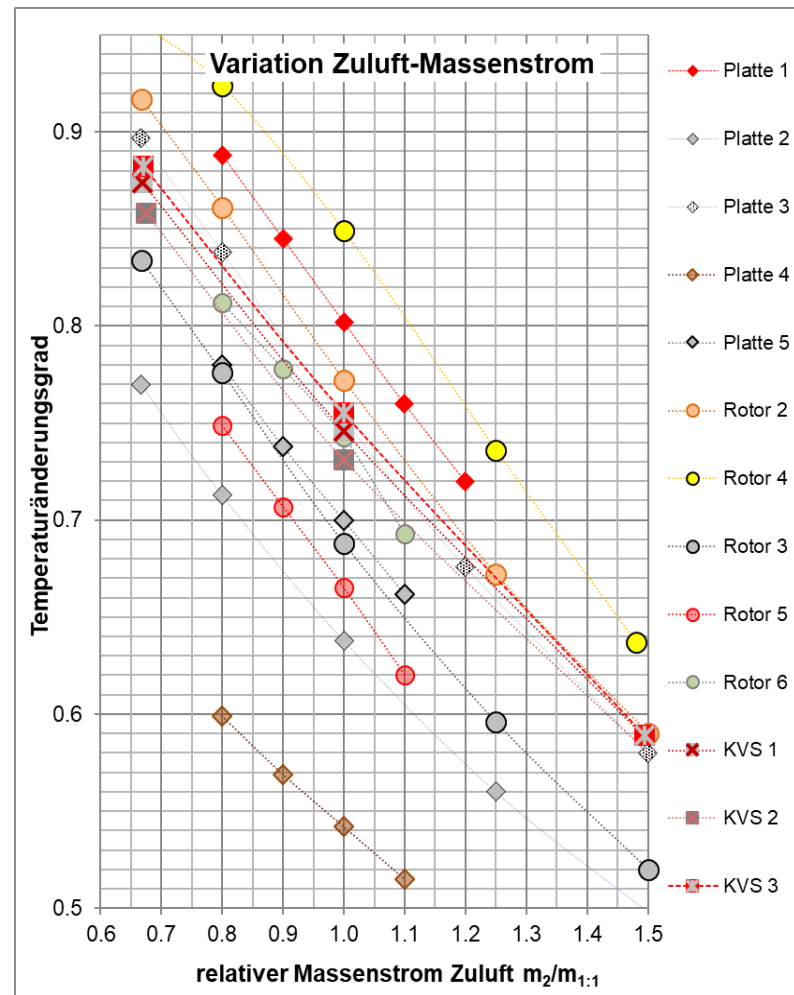
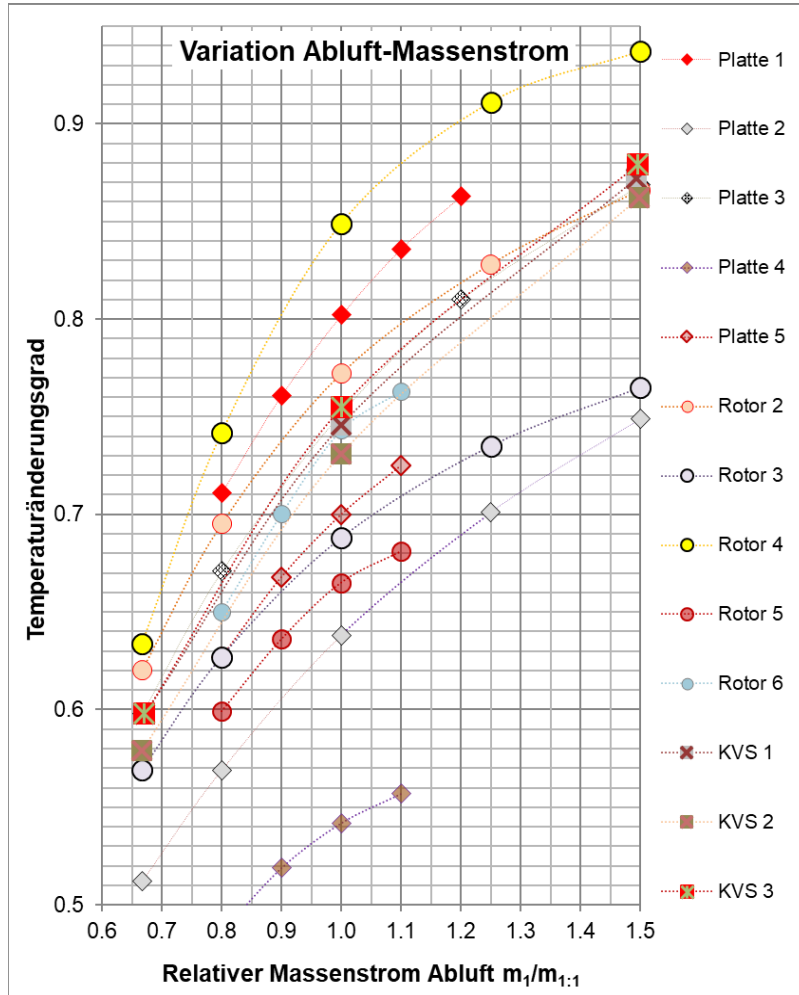
$$\Phi_{korrr} = \Phi_{1:1} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{1,korrr}}{\dot{m}_{1:1}} \right)^{f_{U1} \cdot 0.5 \cdot \Phi_{1:1}} \cdot \left(\frac{\dot{m}_{2,korrr}}{\dot{m}_{1:1}} \right)^{f_{U2} \cdot (0.5 \cdot \Phi_{1:1} - 1)}$$

f_{U1} und f_{U2} : empirische Faktoren für die Korrektur des Wärmedurchgangskoeffizienten

Entspricht der Grenzwertfunktion der Gleichung für ideale Gegenstrom-WÜ wenn das Massenstromverhältnis gegen 1 konvergiert.

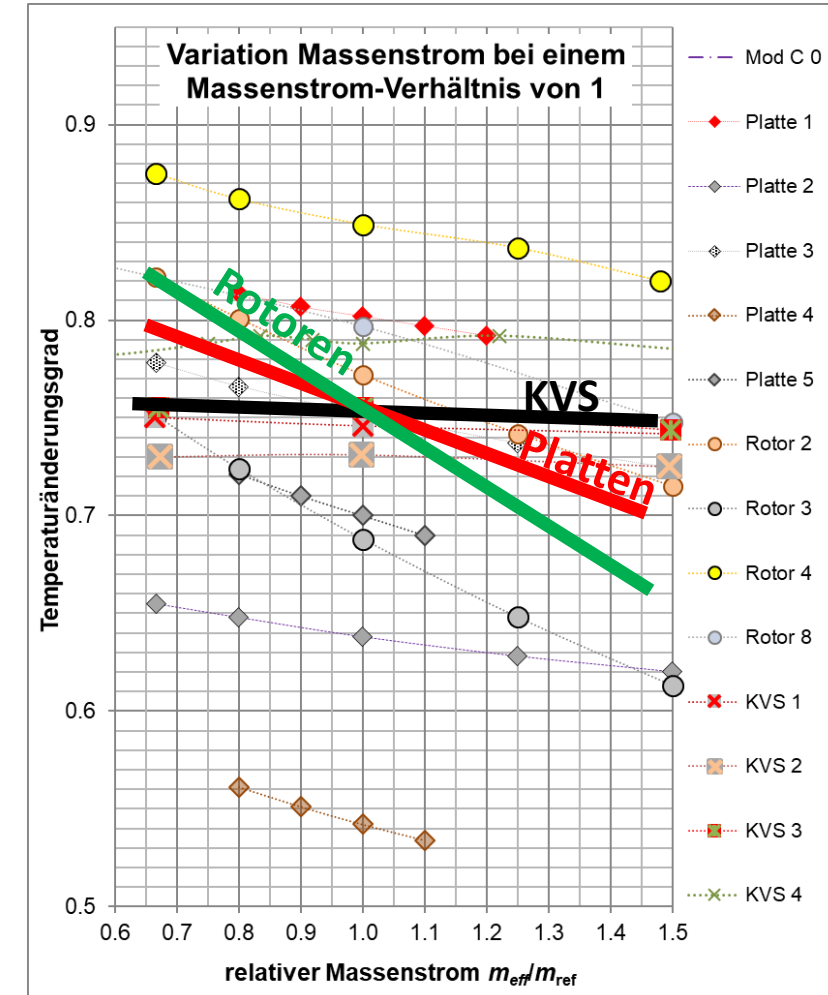
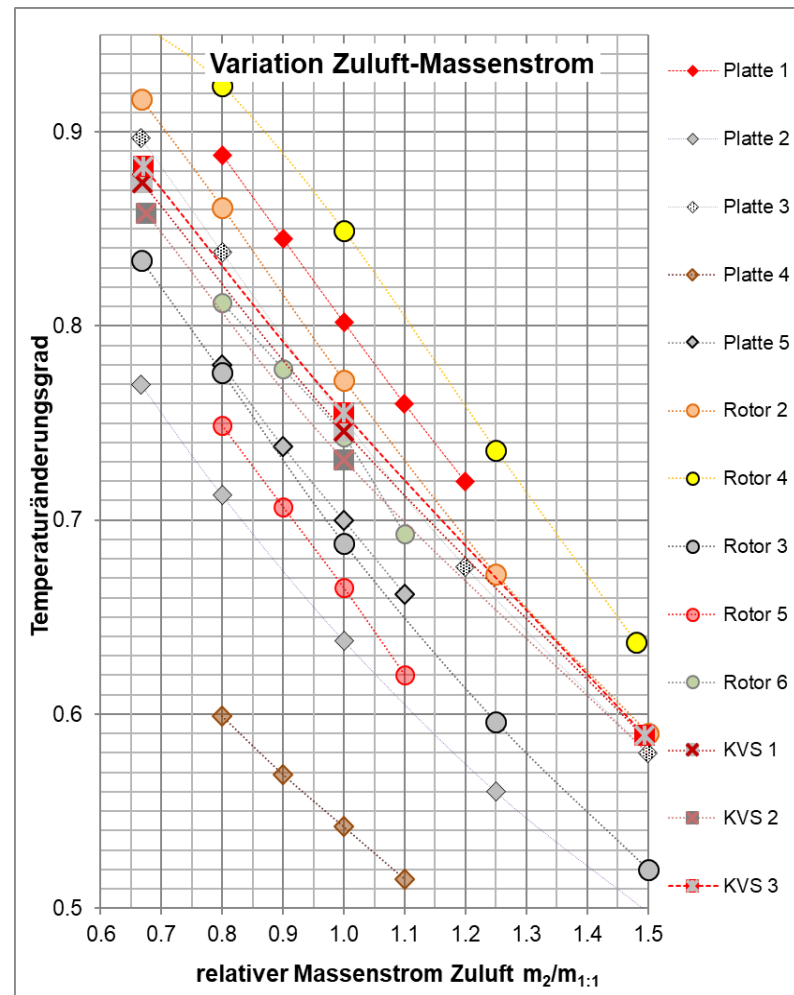
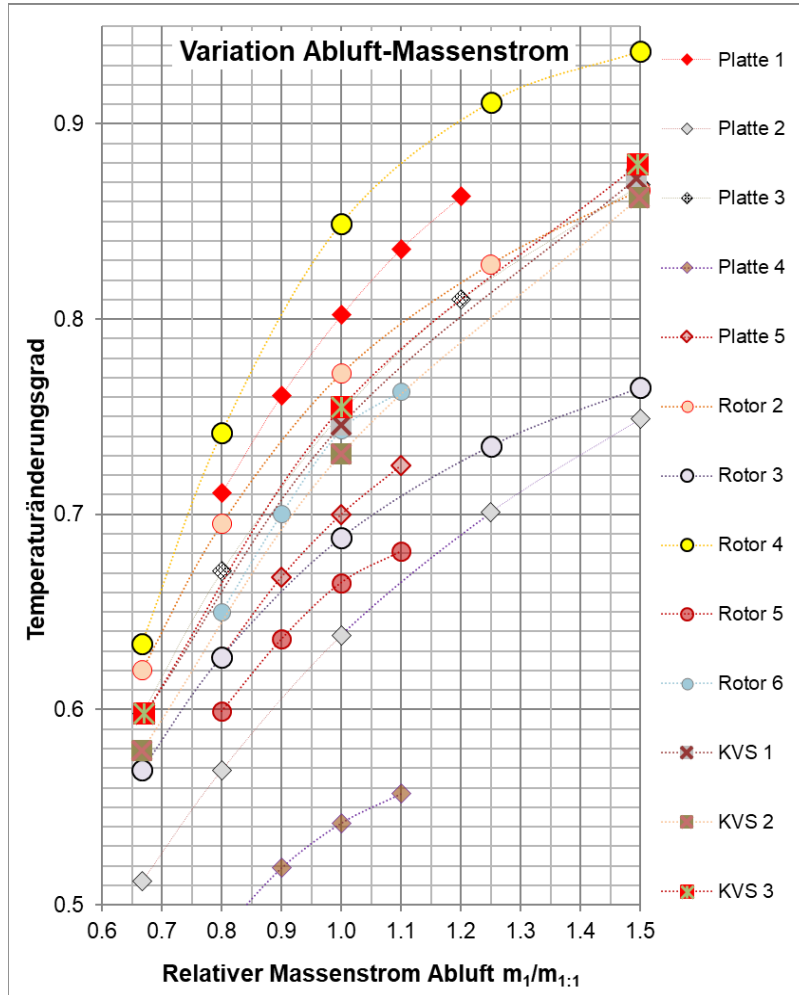
4. Analyse von Daten von Wärmerückgewinnern

Herstellerangaben (Messwerte und berechnete Wert von Eurovent-zertifizierten Produkten)



4. Analyse von Daten von Wärmerückgewinnern

Herstellerangaben (Messwerte und berechnete Wert von Eurovent-zertifizierten Produkten)

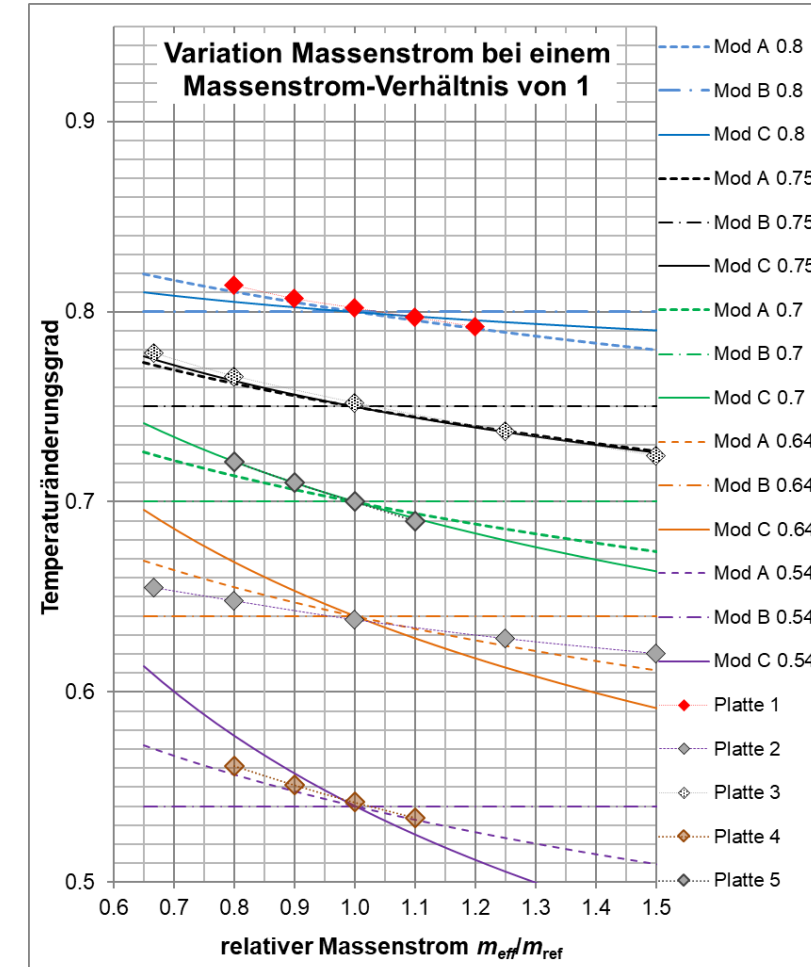
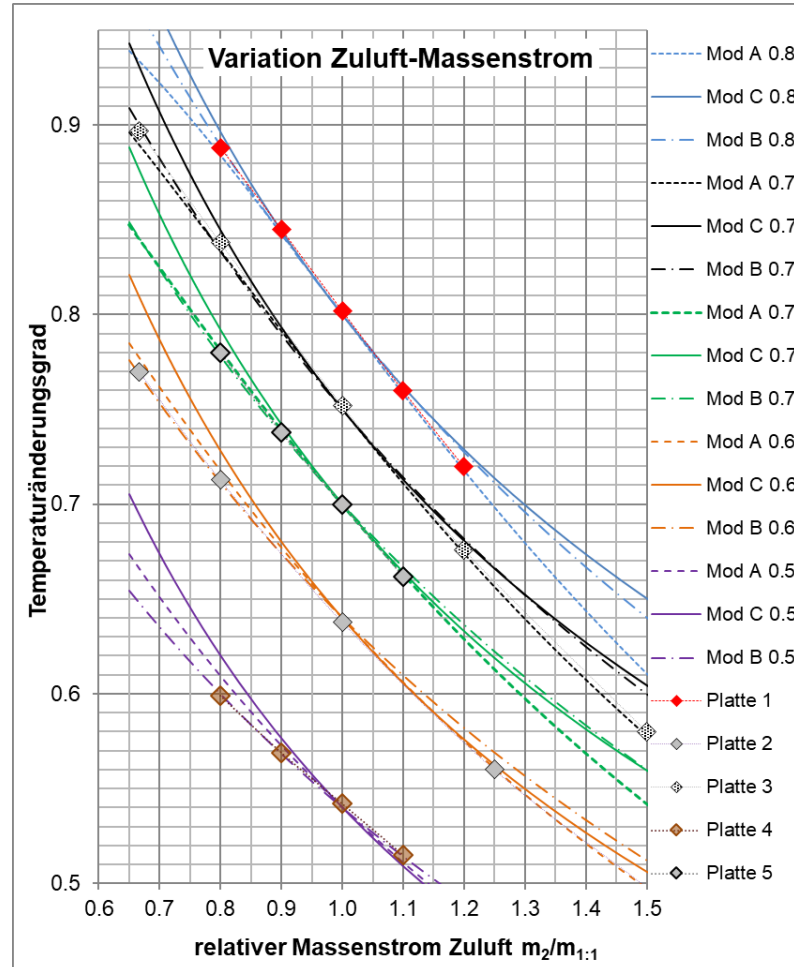
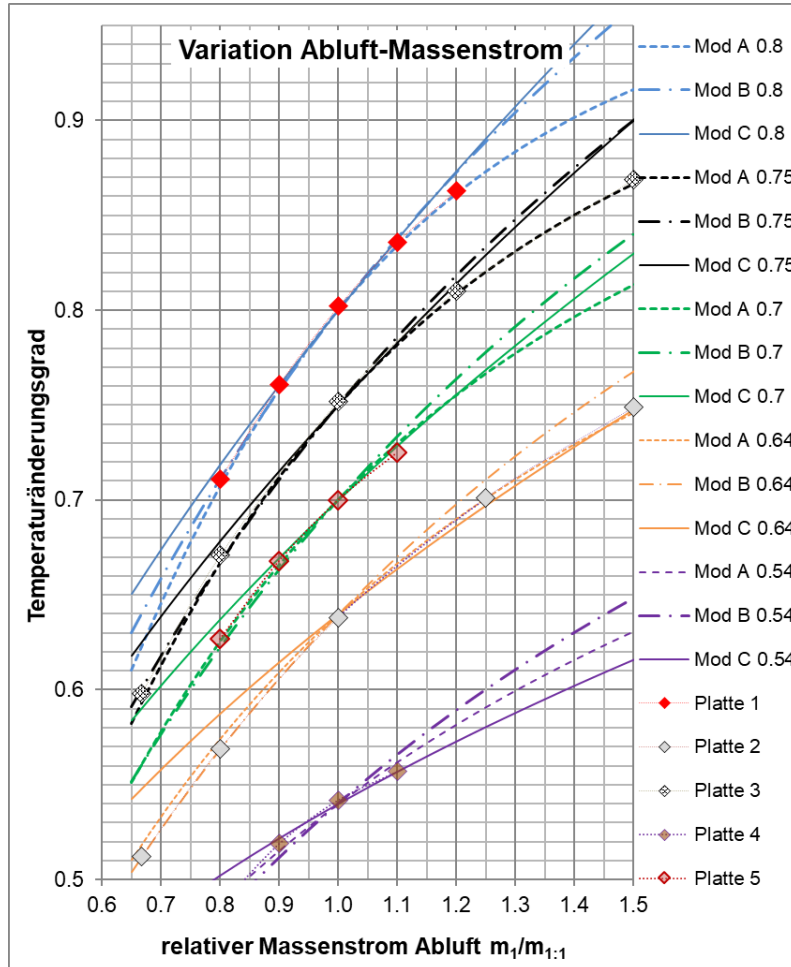


5. Vergleich mit den Modellen

Beispiel Platten-Wärmeübertrager

Modell A: Gegenstrom-WÜ
Exponent $n = 0.35$

Modell C: prEN 308
Faktor $f_{U1} = 1.20$
Faktor $f_{U2} = 0.85$



Empirische Bestimmung der Exponenten und Faktoren nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (bester Grad der Anpassung)

Modell		Art der Wärmerückgewinnung		
		Rotor	Platten-WÜ	KVS
Modell A: Gegenstömer	Exponent n	0.18	0.35	0.48
	Grad der Anpassung s^*	0.009	0.006	0.005
Modell B: EN 13053	Grad der Anpassung s^*	0.029	0.010	0.012
Modell C: prEN 308	Faktor f_{u1}	1.05	1.20	1.20
	Faktor f_{u2}	0.88	0.85	0.80
	Grad der Anpassung s^*	0.023	0.015	0.021

* In Anlehnung an den absoluten Grad der Anpassung

$$s = \sqrt{\frac{\sum s_i^2}{m}}$$

$$s_i^2 = \frac{\sum (\Phi_{Mod,i} - \Phi_{Te,i})^2}{n_i}$$

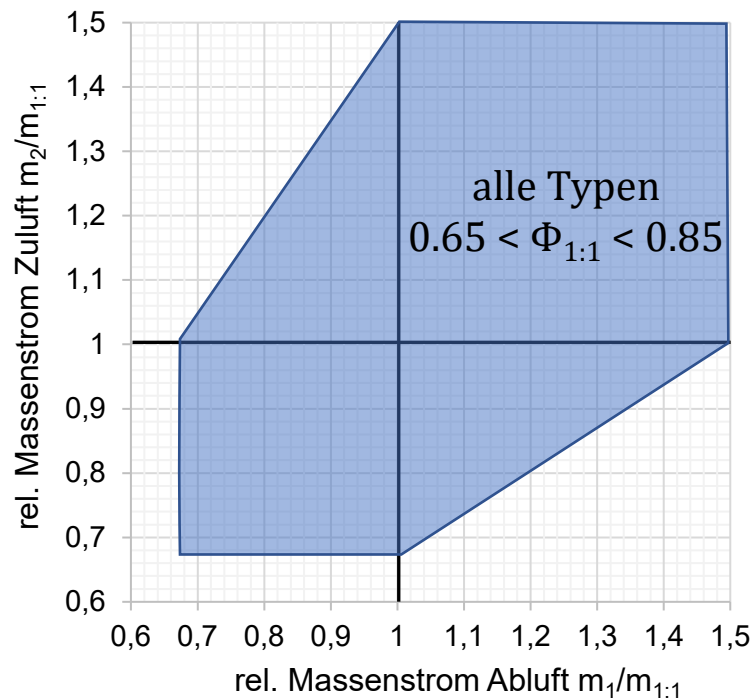
- s Grad der Anpassung des gesamten Modells
- s_i Grad der Anpassung des WÜ i
- m Anzahl WÜ einer Bauart
- n_i Anzahl Daten (Herstellerangabe) zum WÜ i
- $\Phi_{Mod,i}$ Temperaturänderungsgrad beim jeweiligen Massenstromverhältnis, berechnet mit dem Modell
- $\Phi_{Te,i}$ Temperaturänderungsgrad beim jeweiligen Massenstromverhältnis, nach Herstellerangabe



6. Einsatzbereich der Näherungsgleichungen

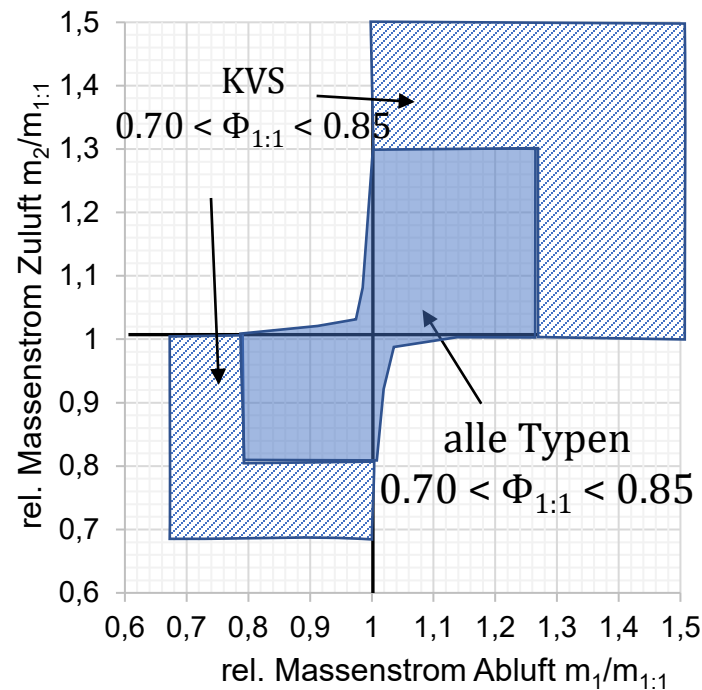
Modell A: Gegenströmer

Gute Genauigkeit für alle WRG-Typen.
Rel. aufwändig für schnelle
Abschätzungen und Messunsicherheit.



Modell B: EN 13053

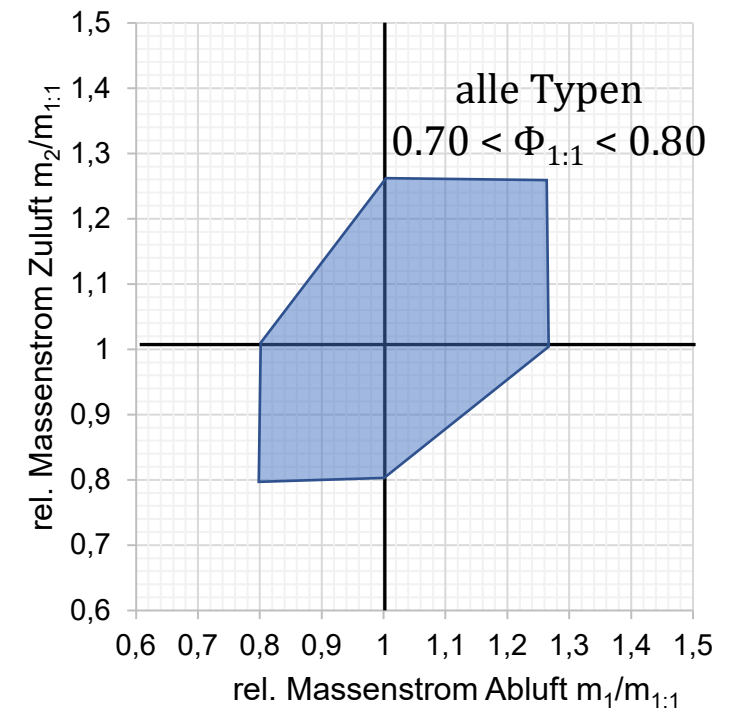
Hohe Genauigkeit für KVS.
Gut geeignet schnelle Abschätzungen.
Ungeeignet für Messunsicherheit.



Schraffierter Bereich:
Abweichung von Φ max. 0.01

Modell B: prEN 308

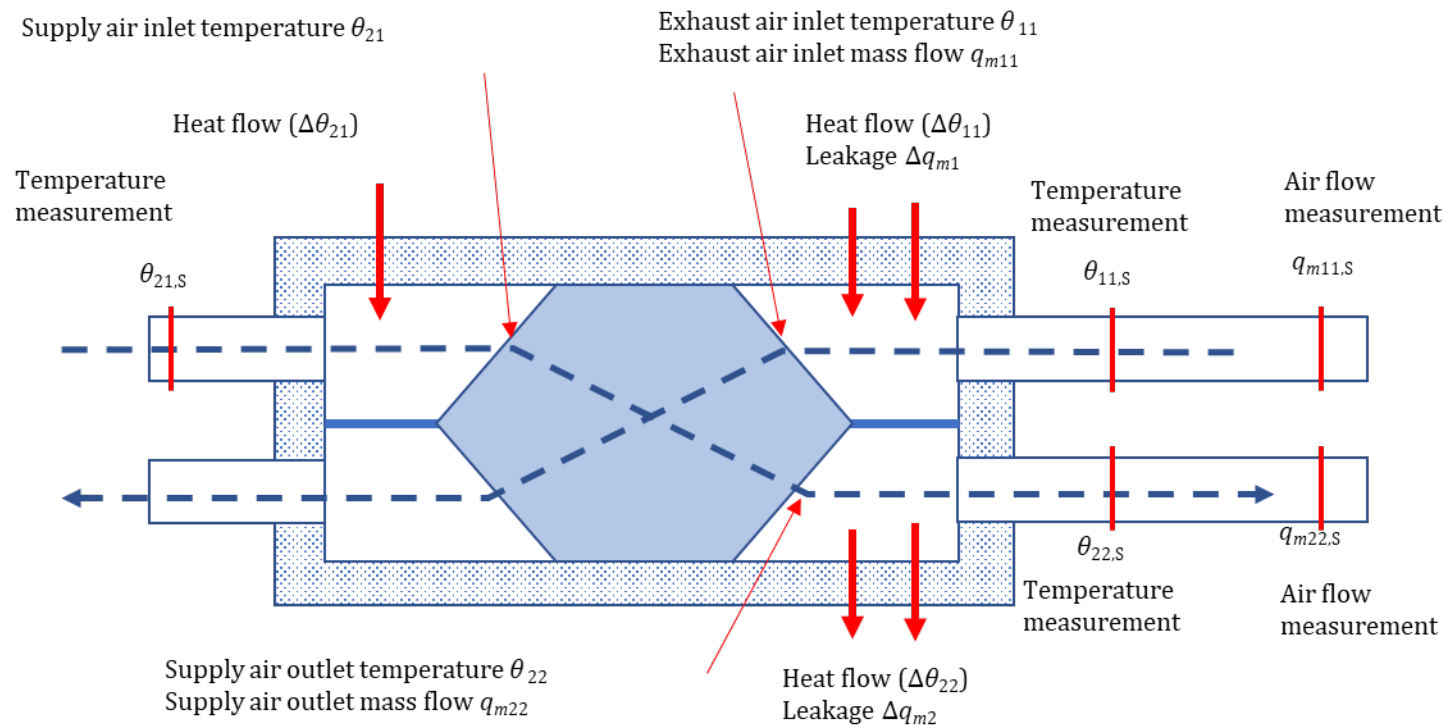
Mittlere Genauigkeit.
Geeignet schnelle Abschätzungen.
Geeignet für Messunsicherheit.
Reversibel nur mit Iteration.



7. Messunsicherheit

Die Messunsicherheit wird nach den Grundsätzen des GUM* berechnet.

Berücksichtigt werden die in prEN 308 aufgeführten Einflussgrößen:



*JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data —
Guide to the expression of uncertainty in measurement

Bildquelle: prEN308:2020



Beispiel Messunsicherheit

- Temperaturänderungsgrad 0.70 ... 0.80
- Winter-Messpunkt, ohne Kondensation
- Max. Messunsicherheiten von Einzelgrößen und Toleranzen nach prEN 308:2020, 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)
- Verwendung von Modell A (Gegenströmer)
- Exponenten für die WRG-Typen gemäß Folie 9, Annahme für die Unsicherheit der Exponenten ± 0.05
- Berechnung mit Software GUM Workbench 2.4*

* Anbieter: Metrodata, Braunschweig



Beispiel Messunsicherheit

Platten-Wärmeübertrager mit einem Temperaturänderungsgrad 0.748 ± 0.022

Messgröße resp. Größe mit Unsicherheit	Sym- bol	Ein- heit	Wert	Erw. Unsich- erheit	Anteil am Gesamt- budget
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 Austritt WRG und Messebene	$\Delta\theta_{22}$	°C	0.15	0.15	7.0 %
Temperaturverlust abluftseitig zwischen Messebene und Eintritt WRG	$\Delta\theta_{11}$	°C	0.05	0.05	1.0 %
Temperaturverlust außenluftseitig zwischen Messebene und Eintritt WRG	$\Delta\theta_{21}$	°C	0.05	0.05	0.1 %
Luftvolumenstrom Zuluft, bei der Messebene	q_{v22}	m³/s	1.00	0.03	21.9 %
Luftvolumenstrom Abluft, bei der Messebene	q_{v11}	m³/s	1.05	0.03	12.0 %
Leckage zuluftseitig zwischen Austritt WRG und Messebene	Δq_{v22}	m³/s	0.01	0.01	4.3 %
Leckage abluftseitig zwischen Messebene und Eintritt WRG	Δq_{v11}	m³/s	0.01	0.01	2.8 %
Exponent n (Änderung des Wärmedurchgangskoeffizienten)	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 %

Temperatur und
Temperaturverluste
ca. 59 %

Volumenstrom
und Leckagen
ca. 41 %

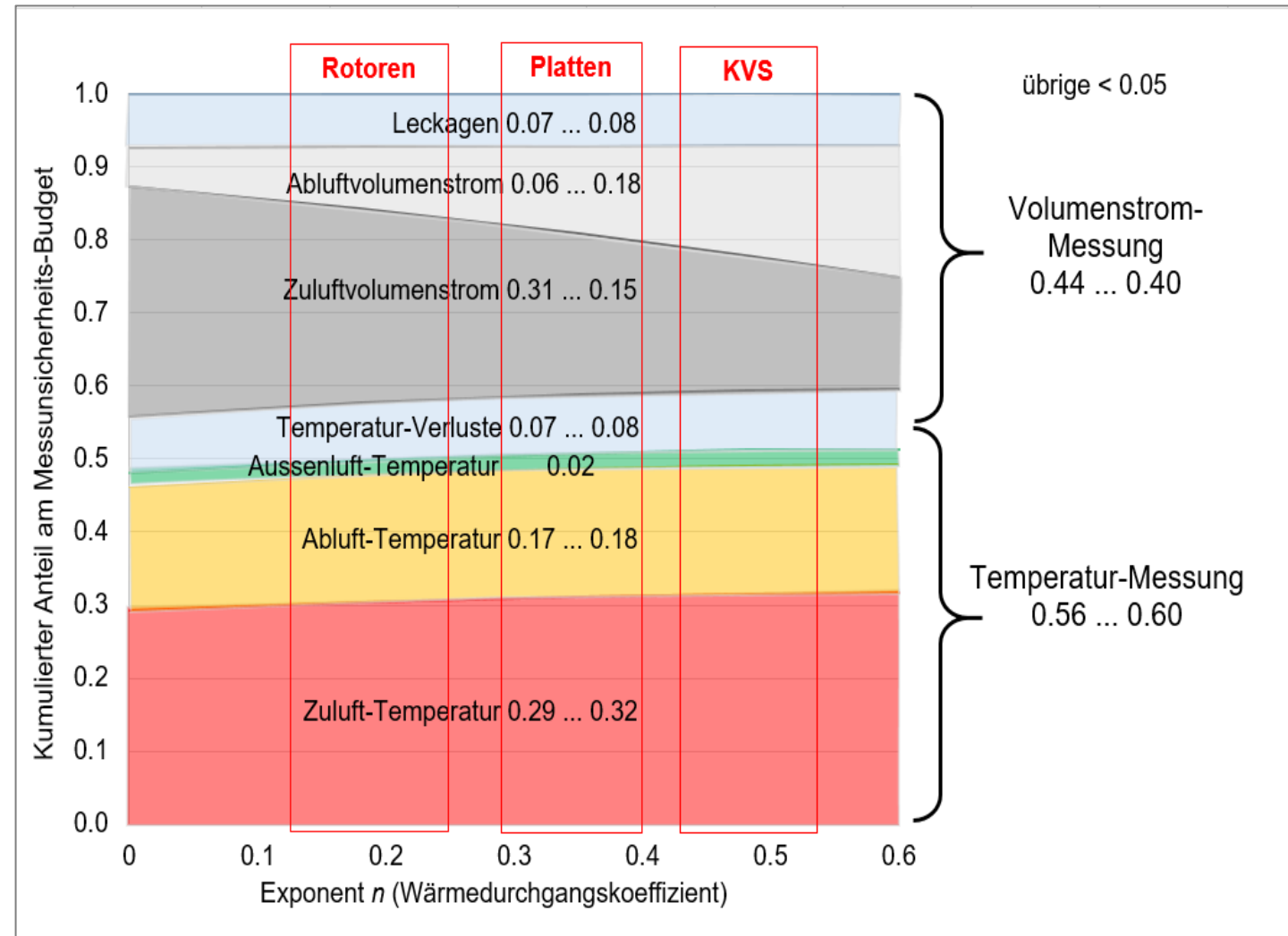
übrige
< 0.5 %

Messunsicherheit des Temperaturänderungsgrades und Anteile am Budget (für das Beispiel)

Bei einem Temperaturänderungsgrad zwischen 0,70 und 0,80 und einem Exponenten n zwischen 0,0 bis 0,6 bleibt der die Messunsicherheit praktisch konstant (0.021 bis 0.022).

Die Beiträge des Zuluftvolumenstroms und des Abluftvolumenstroms hängen deutlich vom Exponenten n ab.

Die Beiträge der übrigen Größen verändert sich nur geringfügig (0,00 bis 0,03).



7. Schlussfolgerungen

Näherungsgleichungen für den Temperaturänderungsgrad

- Die bisherigen Auswertungen lassen darauf schliessen, dass die untersuchten Modelle eine für die Praxis hinreichend gute Abschätzung des Temperaturänderungsgrades bei einer Veränderungen der Massenströme erlauben.
- Bei den Modellen A und C sollen die Parameter der Bauart der WRG angepasst werden.
- Für eine Validierung und Verfeinerung der Einsatzgrenzen und der Parameter sind weitere Messdaten erforderlich, insbesondere mit unterschiedlichen Massenstromverhältnissen.

Messunsicherheit des Temperaturänderungsgrades

Wenn die Anforderungen der prEN 308:2020, Präzisionsklasse P1 (Prüfstandmessung der WRG-Komponente) eingehalten werden, ergibt sich eine Messunsicherheit von 0.020 bis 0.025.

Die Beträge zu diesem Budget sind:

- Temperaturmessung und Temperaturverluste 55 bis 60 %
- Volumenstrommessung und Leckagen 45 bis 40 %

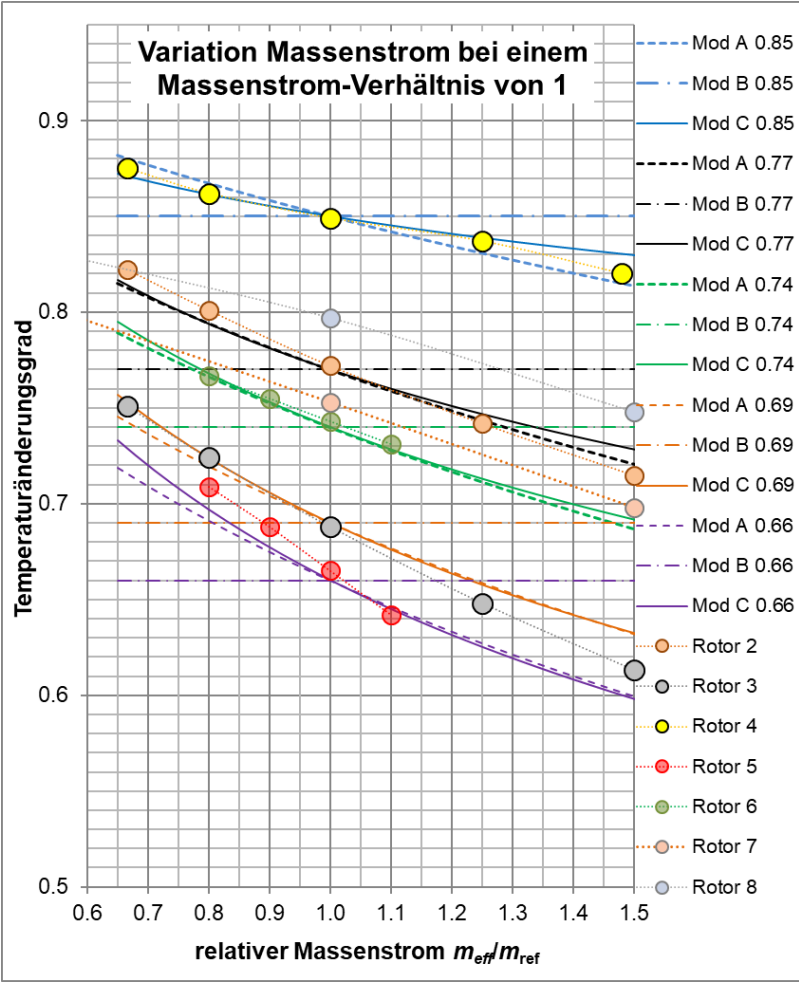
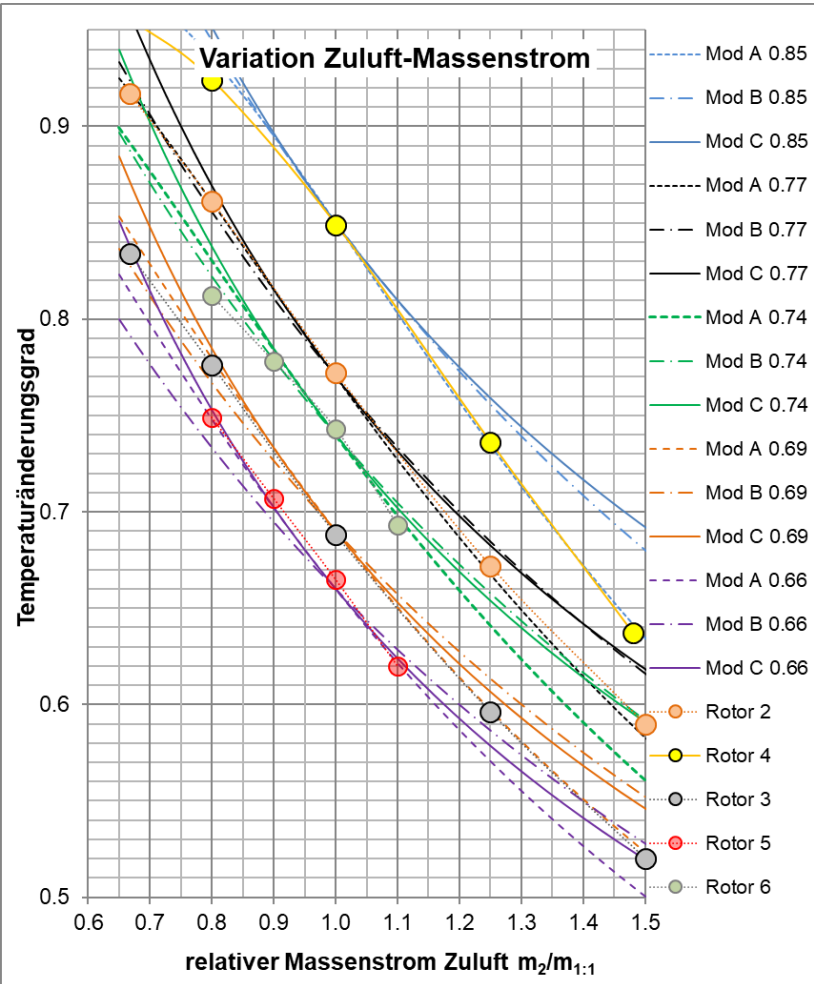
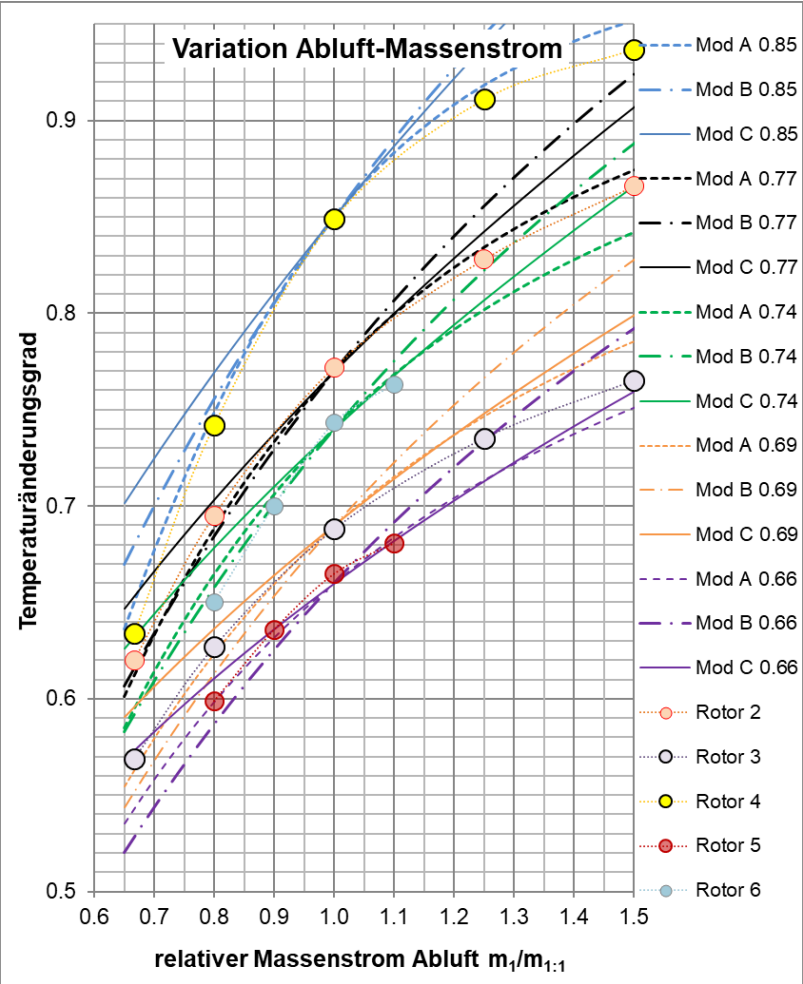


Vergleich mit den Modellen

Rotor

Modell A: Gegenstrom-WÜ
Exponent $n = 0.18$

Modell C: prEN 308
Faktor $f_{U1} = 1.05$
Faktor $f_{U2} = 0.88$



Vergleich mit den Modellen

KVS

Modell A: Gegenstrom-WÜ
Exponent $n = 0.48$

Modell C: prEN 308
Faktor $f_{U1} = 1.20$
Faktor $f_{U2} = 0.80$

