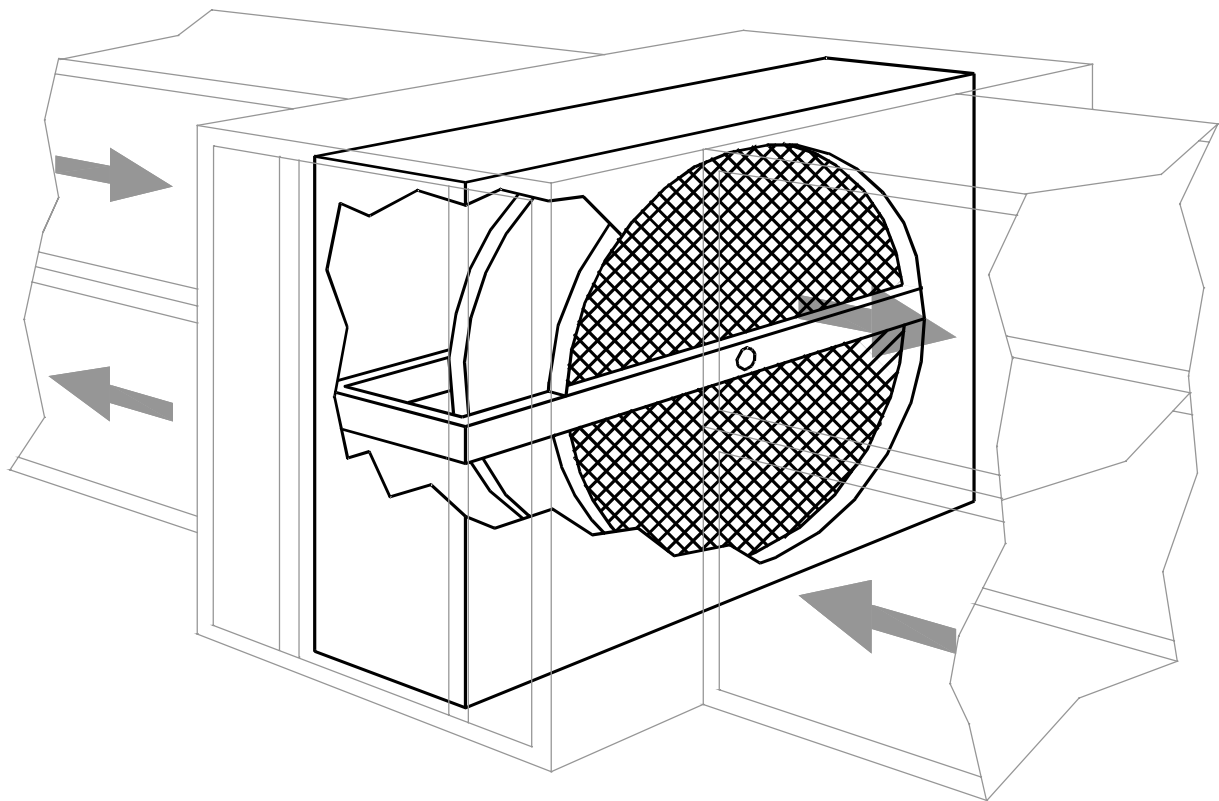


Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"

Temperatur- und Feuchteübertragungsverhalten von Wärmerückgewinnern im Teillastbetrieb

Schlussbericht



Prof. R. Furter, P. Keller
HTA Luzern

im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

Dezember 2000

Dieser Bericht wurde im Rahmen des BFE-Projektes

Temperatur- und Feuchteübertragungsverhalten von Wärmerückgewinnern im Teillastbetrieb (Projekt-Nr. 38'106)

verfasst.

Dezember 2000

Autoren: Prof. Rudolf Furter, Patrick Keller

Adressen: Hochschule Technik+Architektur (HTA) Luzern,
Abteilung Heizung-Lüftung-Klima,
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw

Telefon: 041 349 32 70

Email: rfurter@hta.fhz.ch, pkeller@hta.fhz.ch

Projektgruppe: R. Furter, Hochschule Technik+Architektur Luzern, CH-6048 Horw
P. Keller, Hochschule Technik+Architektur Luzern, CH-6048 Horw

Begleitgruppe: G. Zweifel, Hochschule Technik+Architektur Luzern, CH-6048 Horw
W. Waldhauser, Obmann Arbeitsgruppe SWKI
T. de Martin, Arbeitsgruppe SWKI
M. Dürig, Hochschule Technik+Architektur Luzern, CH-6048 Horw

Bezug: Hochschule Technik+Architektur (HTA) Luzern,
Abteilung Heizung-Lüftung-Klima,
Technikumstrasse 21
CH-6048 Horw

Copyright: Hochschule Technik+Architektur Luzern
Auszugsweiser Nachdruck unter Quellenangabe erlaubt.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	2
2	Einführung	3
2.1	Ausgangslage	3
2.2	Ziele	3
2.3	Geleistete Arbeiten und Resultate	3
2.4	Beteiligte Organisationen und Firmen	4
3	Prüfobjekte und Prüfeinrichtung	4
3.1	Beschreibung der Prüfobjekte	4
3.2	Zusammenstellung der Messungen	5
3.3	Prüfeinrichtung	6
3.4	Formelzusammenstellung	7
4	Messresultate	9
4.1	Normmesspunkte nach SN EN 308: 1997	9
4.2	Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen	10
4.3	Einfluss Massenstrom (Anströmgeschwindigkeit)	12
4.4	Einfluss Drehzahl	14
4.5	Einfluss Feuchtegehalt Ablufteintritt	16
4.6	Einfluss Ablufttemperatur	18
4.7	Einfluss Massenstromverhältnis	20
4.8	Abluftübertragung	22
5	Schlussbemerkung	23
6	Literaturverzeichnis	23

Diese Arbeit ist im Auftrag des Bundesamtes für Energie entstanden. Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

1 Zusammenfassung

Zusammenfassung

Leistungsmessungen an Luft-Luft-Wärmeübertragern für Wärmerückgewinnung in Lüftungsanlagen werden üblicherweise nach der Europäischen Norm EN 308 durchgeführt.

Die Luftzustände nach dieser Norm entsprechen sehr oft nicht den aktuellen Verhältnissen in ausgeführten Lüftungsanlagen. Bei tiefen Ablufttemperaturen und Feuchtigkeiten erreichen Rotoren nicht mehr die spezifizierte Feuchteübertragung.

Aus diesen Grund wurden für drei verschiedene typische Rotoren das Übertragungsverhalten bei unterschiedlichen Luftzuständen gemessen.

Die Lufteintrittstemperaturen und die Feuchtedifferenz zwischen Abluft und Aussenluft sind nebst dem Rotormaterial entscheidend für den Feuchteausaustausch. Der Einfluss auf den Temperatur-Änderungsgrad ist wie erwartet gering.

Summary

Air-to-air heat recovery devices in air handling units for heating and ventilation in buildings are generally tested according to the European Standard EN 308.

In practice the conditions of the exhaust-air and supply-air differ from the standard conditions. Lower temperature and moisture content on the exhaust-air side cause lower moisture transmission than specified by the manufacturer of rotary heat exchangers.

For that reason three different rotary heat exchangers have been measured at various part-load air conditions.

Besides the material and the treatment of the rotary heat exchangers the temperature of exhaust-air and supply-air and the difference of moisture content between the inlet air sides are responsible for the moisture transmission. The effect on the temperature ratio is, as expected, very small.

Resumé

Echangeurs de chaleur air-air installés dans des unités de traitement de l'air pour le chauffage et la ventilation, sont mesurés généralement d'après la Norme Européenne EN 308.

En pratique, les conditions de l'air extrait et de l'air neuf sont différentes des conditions de référence. Si la température et la teneur en humidité à l'entrée de l'air extrait sont plus bas, le transfert d'humidité est plus faible que la spécification du constructeur du régénérateur rotatif.

Pour cette raison, trois régénérateurs rotatifs différents ont été mesurés à des conditions d'air différentes.

La température, la différence de teneur en humidité à l'entrée de l'air extrait et de l'air neuf, le matériel et le traitement du régénérateur sont déterminants sur l'efficacité hygrométrique. L'influence sur l'efficacité thermique est faible.

2 Einführung

2.1 Ausgangslage

Im Rahmen des BEW/NEFF-Projektes „Wärmerückgewinnung durch regenerative Luft/Luft-Wärmeübertrager“ von 1996/1997 [1] [2] wurden an verschiedenen Rotoren das Temperatur- und Feuchteübertragungsverhalten untersucht. Die Messungen erfolgten hauptsächlich bei den in der Europäischen Norm SN EN 308: 1997 [3] festgelegten Aussenluft- und Fortluftzuständen. Es konnte aber bereits gezeigt werden, dass das Feuchteübertragungsverhalten auch vom Niveau der Aussenlufttemperatur abhängig ist. Rotoren, bei denen die Feuchteübertragung stark oder sogar ausschliesslich durch teilweise Kondensation des Wassergehaltes der Abluft erfolgt, zeigen eine ausgeprägte Abhängigkeit der Feuchteübertragung von der Aussenlufttemperatur auf. Rotoren aus Materialien mit guten sorptiven Eigenschaften zeigen diesen Einfluss kaum oder nur in geringem Ausmass.

Erfahrungen in den letzten Jahren haben gezeigt, dass die Abluftfeuchtigkeiten und Ablufttemperaturen in den Lüftungs- und Klimaanlage häufig tiefer sind als der Normpunkt gemäss der Europäischen Norm. Das führt dazu, dass Rotoren mit schlechten sorptiven Eigenschaften ein noch wesentlich schlechteres Feuchteübertragungsverhalten aufweisen. Die vorhandenen Messresultate können nicht auf andere Randbedingungen übertragen werden und somit ist das Teillastverhalten nicht genügend beschreibbar.

2.2 Ziele

Damit über das Teillastverhalten Aussagen gemacht werden können, wurde mit der Arbeitsgruppe "Wärmerückgewinnung" des Schweizerischen Vereins von Wärme- und Klimatechnikern SWKI ein Messprogramm ausgearbeitet, das einerseits die heute aktuellen Abluftzustände berücksichtigt und die bereits vorhandenen Ergebnisse aus dem früheren Projekt ergänzt. Die Messungen werden an drei regenerativen Wärmeübertragern (Rotoren) mit unterschiedlichem Speichermaterial (Aluminium hygroskopisch, Aluminium nicht hygroskopisch und Ionenaustauschharz) durchgeführt. Die für die praktische Anwendung wichtigen Erkenntnisse werden für die in Revision befindliche SWKI-Richtlinie 95-3 /2000-3 "Wärmerückgewinnung in Lüftungsanlagen" benötigt. Sämtliche Daten fliessen auch in das parallel laufende Projekt "Ein- und Ausgabeprogramm für die Berechnung des jährlichen Energiebedarfs von Lüftungstechnischen Anlagen gemäss Richtlinie 95-3" [4] ein.

2.3 Geleistete Arbeiten und Resultate

Über die Projektpartner wurden auf dem Markt ein typischer hygroskopischer Aluminium-Rotor anonym beschafft. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass bei den Prüfungen kein modifiziertes Exemplar verwendet wurde. An diesem Rotor wurden neben einem ausführlichen thermischen Messprogramm auch die Abluftleckagen bei verschiedenen Druckverhältnissen untersucht.

Weitere thermische Messungen wurden an einem nicht hygroskopischen und einem Spezial-Rotor (Speichermasse mit Ionenaustauschharz) durchgeführt, jedoch mit einem den laufenden Erkenntnissen angepassten reduzierten Messprogramm.

2.4 Beteiligte Organisationen und Firmen

An diesem Projekt waren folgende Organisationen und Firmen beteiligt:

- Bundesamt für Energie (BFE), CH-3003 Bern
- Hochschule Technik+Architektur Luzern (HTA Luzern), Fachhochschule Zentralschweiz, Abteilung HLK, CH-6048 Horw
- SWKI (Schweizerischer Verein von Wärme- und Klimaingenieuren)
- Enventus GmbH, Hr. P. Müller, CH-8406 Winterthur
- Hovalwerk AG Werk Schaan, Hr. J. Ammann, FL-9494 Schaan
- Seven-Air Gebr. Meyer AG, Hr. A. Aregger, CH- 6000 Luzern

3 Prüfobjekte und Prüfeinrichtung

3.1 Beschreibung der Prüfobjekte

Aluminium Rotor, nicht hygroskopisch

Hersteller	Corroventa, Schweden
Typ	ST1-1.5-W-950-C-V
Lieferant	Enventus GmbH, Winterthur
Spülzone	vorhanden
Durchmesser	950 mm
Tiefe	200 mm
Speichermasse	Aluminium mit nicht hygroskopischer Oberfläche

Aluminium Rotor, hygroskopisch

Hersteller	ABB
Typ	Econovent PUMP-1-095-2-3-1-1
Lieferant	7-Air, Luzern
Spülzone	vorhanden
Durchmesser	950 mm
Tiefe	200 mm
Speichermasse	Aluminium mit hygroskopischer Oberfläche

Rotor mit Ionenaustauschharz (anstelle des keramischen Rotors des gleichen Herstellers)

Hersteller	Seibu Giken Co.Ltd, Japan
Typ	ECON-ION EC-980
Lieferant	Hovalwerk AG, Werk Schaan
Spülzone	vorhanden
Durchmesser	950 mm
Tiefe	200 mm
Speichermasse	Aluminium mit Dreifach-Beschichtung Auszug aus Hersteller-Beschreibung ECON-ION: In eine Kleberschicht wird als Sorptionsmittel ein Ionenaustausch-Harz in Pulverform eingelagert und mit einer anitbakteriell wirkenden Schutzschicht überzogen.

Der wesentliche Unterschied zu den herkömmlichen Sorbentien liegt in der besonderen Selektivität von Ionenaustausch-Harzen; es werden

durch den Ionenaustausch-Effekt nur Wassermoleküle zwischen den Luftströmen übertragen. Wassermoleküle werden dabei zur Harzoberfläche durch intermolekuläre Ladungskräfte angezogen und umgeben das Harz dann durch die elektrische Coulomb-Feldkraft. Dadurch wird erreicht, dass Geruchsmoleküle wie z.B. Ammoniak oder flüchtige Kohlenwasserstoffe (VOC) nicht in Kontakt mit dem Harz kommen können. Geruchsübertragungen im Rotor werden damit verhindert. Wassermoleküle auf der Harzoberfläche dringen durch osmotische Druckunterschiede in das Harzinnere und werden dort durch fixierte Ionen (SO_3^+ und Na^-) angezogen und hydriert. Bei der Wasseraufnahme und Wasserabgabe wird durch die Adsorptions- und Desorptionskräfte ein Gleichgewicht auch bei wechselnden äusseren Bedingungen gehalten.

3.2 Zusammenstellung der Messungen

	Aluminium Rotor, nicht hygroskopisch	Aluminium Rotor, hygroskopisch	Rotor mit Ionen- austauschharz
Normmessung EN 308	O	X	
Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen	X	X	X
Einfluss Massenstrom (Anströmgeschwindigkeit)	X und O	X	X
Einfluss Drehzahl	X und O	X	X
Einfluss Feuchtegehalt Abluft-eintritt	X	X	X
Einfluss Ablufttemperatur	X	X	X
Einfluss Massenstromverhältnis	X	X	X
Abluftübertragung	O	X	

X Messungen im Rahmen dieses Projektes

O Messungen aus Projekt [2]

Luftzustände "Normmessung EN 308"

$t_{11} = 25^\circ\text{C}$ / $\phi_{11} = 50\%\text{r.F.}$

$t_{21} = 5^\circ\text{C}$ / $\phi_{21} = 90\%\text{r.F.}$

Luftzustände "Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen"

aktueller Abluftzustand $t_{11} = 22^\circ\text{C}$ / $\phi_{11} = 35\%\text{r.F.}$

Zulufteintrittszustand $t_{21} = -5^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}$ und 5°C
 $\phi_{21} = \text{jeweils ca. } 90\%\text{r.F.}$

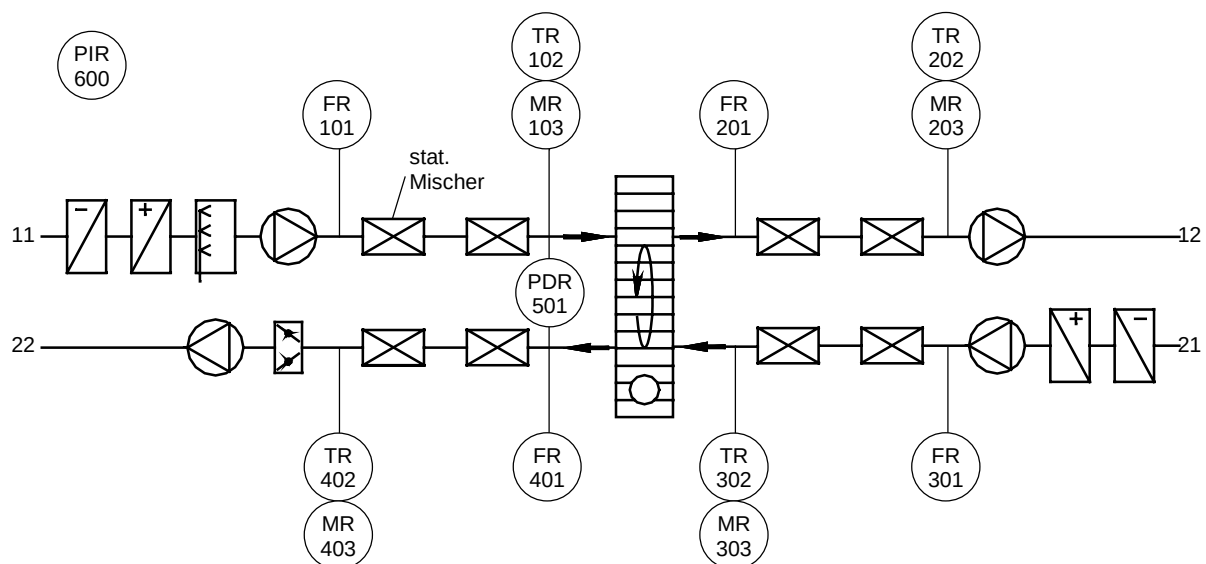
3.3 Prüfeinrichtung

Die Messungen wurden auf dem Prüfstand durchgeführt, welcher im Rahmen des BEW/NEFF-Projekts 1996/97 [1] [2] entstanden ist. Der Prüfstand ist im Schlussbericht [2] detailliert beschrieben, daher beschränkt sich hier die Darstellung auf das Schema der Versuchseinrichtungen mit den Messstellen.

Da viele Messungen durchgeführt werden mussten, konnten die Bedingungen der Norm SN EN 308 bezüglich Messdauer und Toleranz nicht voll eingehalten werden. Die Einhaltung der Norm war jedoch nicht vordringlich, da es um prinzipielle Kennlinienverläufe geht.

Die Messungen wurden während mindestens 15 Minuten (statt der geforderten 30 Minuten) nach Erreichen des stationären Zustandes durchgeführt. Während der Messzeit blieben alle Messgrößen konstant.

Thermische Messungen

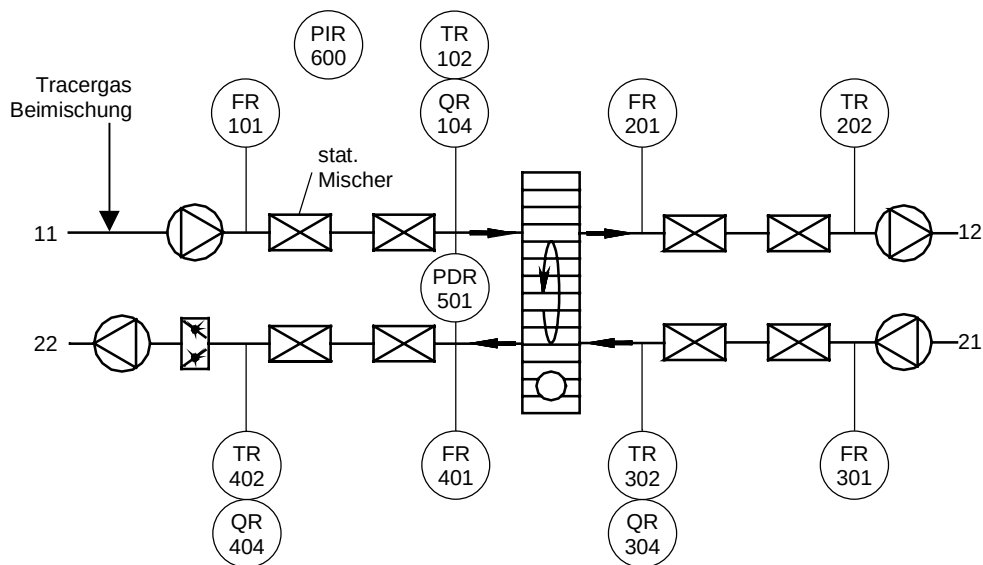


Legende:

11 Ablufteintritt	21 Zulufteneintritt
12 Abluftaustritt	22 Zuluftaustritt

Erstbuchstabe	Ergänzungsbuchstabe	Folgebuchstabe
F Durchfluss	D Differenz	I Anzeige
M Feuchte		R Registrierung
P Druck		
Q Konzentration		
T Temperatur		

Messung Abluftübertragung



Legende:

11 Ablufteintritt 21 Zuluftseintritt
 12 Abluftaustritt 22 Zuluftaustritt

Erstbuchstabe	Ergänzungsbuchstabe	Folgebuchstabe
F Durchfluss	D Differenz	I Anzeige
M Feuchte		R Registrierung
P Druck		
Q Konzentration		
T Temperatur		

3.4 Formelzusammenstellung

Indizes

1	Abluftseite
2	Zuluftseite
11	Ablufteintritt
12	Abluftaustritt
21	Zuluftseintritt
22	Zuluftaustritt
n	Nennwert

Gemessene Grössen

Formelzeichen	Einheit	Definition
a	mg/m ³	Konzentration Tracergas
p _{Baro}	Pa	Barometerstand
t	°C	Luft-Temperatur
t _{TP}	°C	Taupunkt-Temperatur
$\dot{V}$	m ³ /s	Volumenstrom
Δp_{22-11}	Pa	Differenzdruck zwischen der Zuluftaustritts- und der Ablufteintrittsseite

Berechnete Grössen

Formelzeichen	Einheit	Definition
q_m	kg/s	Massenstrom $q_m = \dot{V} \cdot \rho$
ρ	kg/m ³	Luftdichte $\rho = f(t, x, p_{\text{baro}})$
x	g/kg	absolute Feuchtigkeit (Wassergehalt) $x = f(t, t_{\text{TP}}, p_{\text{baro}})$
P	W	Wärmeleistung $P_1 = q_{m1} \cdot (h_{11} - h_{12})$ $P_2 = q_{m2} \cdot (h_{22} - h_{21})$
c_p	J/kgK	Enthalpie $h = f(t, x, p_{\text{baro}})$
η_t	-	Temperatur-Änderungsgrad $\eta_t = \frac{t_{22} - t_{21}}{t_{11} - t_{21}}$
η_x	-	Feuchtegehalts-Änderungsgrad $\eta_x = \frac{x_{22} - x_{21}}{x_{11} - x_{21}}$
q_{mco}	kg/s	Massenstrom der übertragenen Abluft, wird als Prozentsatz des Zuluft-Massenstromes q_{m2} nach folgender Gleichung errechnet: $\frac{q_{\text{mco}}}{q_{m2}} \cdot 100\% = \frac{a_{22}}{a_{11}} \cdot 100\%$

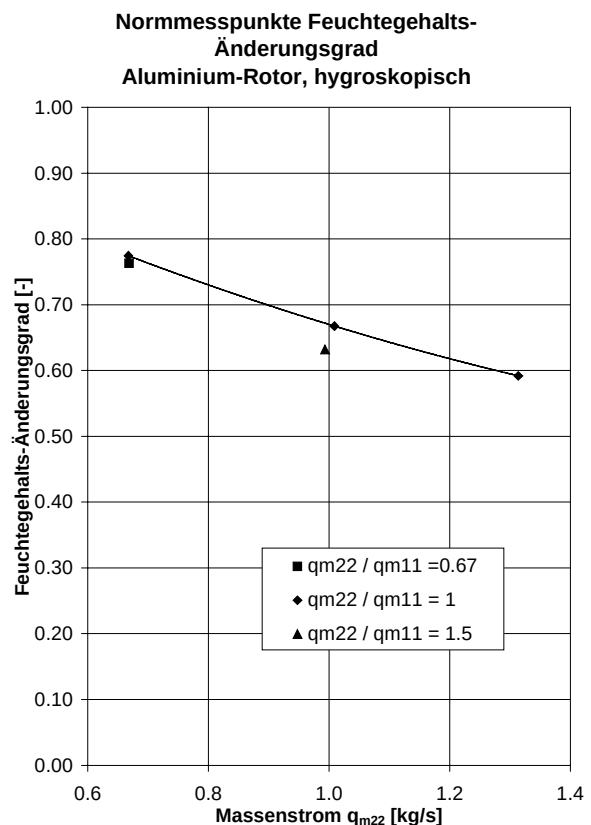
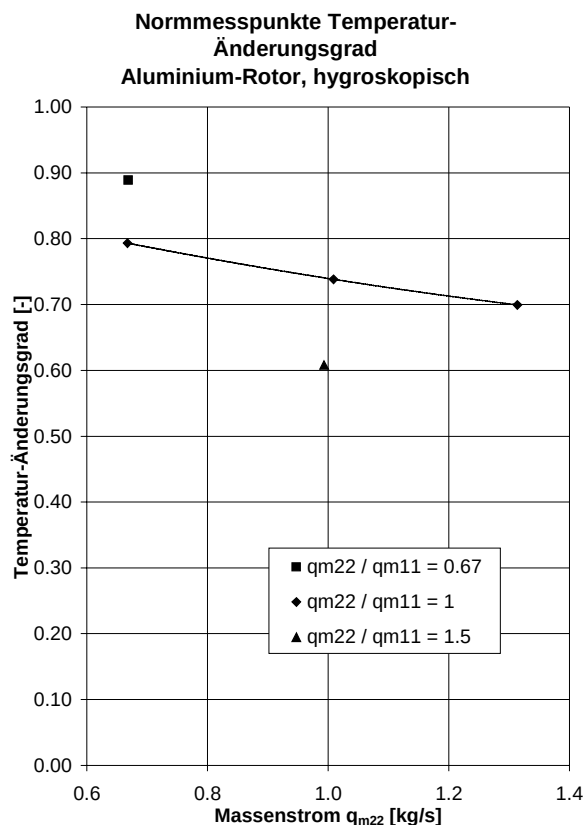
4 Messresultate

4.1 Normmesspunkte nach SN EN 308: 1997

Aluminium-Rotor, hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	η -	η_t -	η_x -
0.670	0.667	1.00	1.125	1.142	25.2	10.3	5.2	5.3	21.0	9.2	12	0.79	0.77
1.008	1.009	1.00	1.125	1.147	25.2	10.4	5.1	5.3	19.9	8.7	12	0.74	0.67
*1.307	1.314	1.00	1.127	1.151	25.1	10.3	5.1	5.2	19.1	8.2	12	0.70	0.59
1.010	0.669	0.66	1.124	1.133	25.1	9.9	5.3	5.1	22.9	8.8	12	0.89	0.76
1.297*	1.001	0.77	1.124	1.140	25.0	10.0	5.2	5.2	21.1	8.4	12	0.80	0.66
0.671	0.993	1.48	1.124	1.156	25.1	10.0	5.0	5.1	17.2	8.2	12	0.61	0.63
*0.989	1.271	1.28	1.123	1.153	25.0	10.0	5.3	5.3	17.8	8.2	12	0.63	0.62

* Der maximale auf dem Prüfstand erreichbare Massenstrom liegt nach einem zusätzlichen Kühlereinbau neu bei ca. 1.3 kg/s. Die Messreihen mit einem geforderten Massenstrom von $1.5 \cdot q_{mn}$ ($q_{mn} = 1$ kg/s) entsprechen daher nicht mehr ganz der Norm.



4.2 Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen

Aluminium-Rotor, nicht hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
0.998	0.995	1.00	1.110	1.134	25.0	10.0	5.1	5.3	19.3	7.0	12	0.71	0.36
1.009	1.001	0.99	1.110	1.140	25.3	10.1	0.1	3.5	18.1	7.0	12	0.72	0.53
1.001	1.005	1.00	1.110	1.146	25.1	10.0	-5.6	2.1	16.2	7.1	12	0.71	0.64
0.991	1.00	1.01	1.122	1.140	22.0	6.4	5.3	5.3	17.4	5.3	12	0.72	0.00
1.009	1.002	0.99	1.120	1.141	22.0	6.3	3.1	4.7	16.9	4.8	12	0.73	0.05
1.000	1.000	1.00	1.123	1.149	22.0	6.4	-0.1	3.8	15.8	4.3	12	0.72	0.20
1.005	1.009	1.00	1.124	1.156	22.1	6.4	-5.5	2.1	14.2	4.0	12	0.71	0.45

Aluminium-Rotor, hygroskopisch

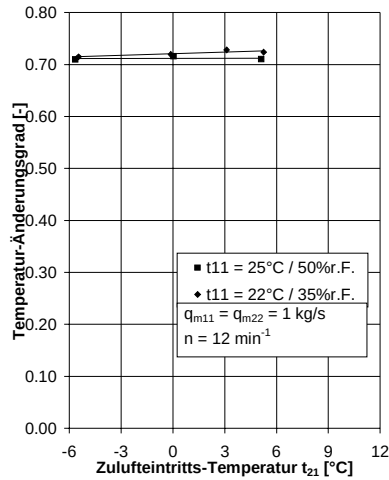
q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.001	1.001	1.00	1.126	1.141	25.2	10.3	10.4	7.5	21.4	9.2	12	0.74	0.59
1.008	1.009	1.00	1.125	1.147	25.2	10.4	5.1	5.3	19.9	8.7	12	0.74	0.67
1.007	1.003	1.00	1.124	1.150	25.1	10.4	0.6	3.7	18.8	8.5	12	0.74	0.71
1.015	1.008	0.99	1.119	1.150	25.1	10.4	-5.5	2.0	17.5	8.2	12	0.75	0.74
1.000	1.000	1.00	1.131	1.147	22.0	6.0	5.0	5.3	17.8	5.7	12	0.75	0.47
1.002	1.005	1.00	1.134	1.156	22.0	6.1	-0.1	3.5	16.5	5.2	12	0.75	0.64
0.999	1.005	1.01	1.134	1.162	22.0	6.2	-5.8	2.1	15.1	5.0	12	0.75	0.70

Rotor mit Ionenaustauscharz

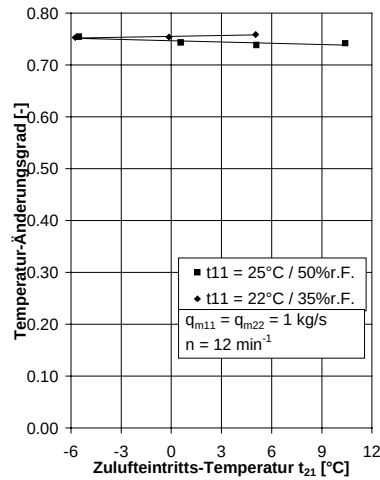
q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.002	1.00	1.00	1.104	1.124	25.0	10.4	5.3	5.7	19.9	9.2	17	0.74	0.74
1.005	1.006	1.00	1.105	1.130	25.0	10.4	0.3	3.8	18.7	8.6	17	0.74	0.74
1.009	1.009	1.00	1.108	1.138	25.0	10.4	-5.1	2.2	17.4	8.3	17	0.75	0.75
1.006	1.003	1.00	1.135	1.152	22.0	6.2	5.1	4.3	17.9	5.7	17	0.75	0.71
1.001	1.010	1.01	1.124	1.146	22.0	6.2	0.0	3.7	16.4	5.5	17	0.74	0.72
1.014	1.001	0.99	1.124	1.151	22.0	6.2	-5.4	2.1	15.1	5.1	17	0.75	0.75

Temperatur-Änderungsgrad "Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen"

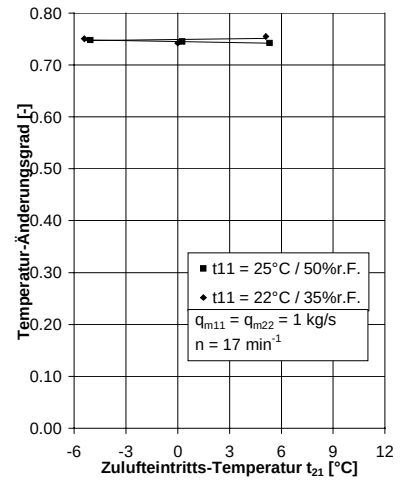
Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen
Aluminium-Rotor, nicht hygroskopisch
Temperatur-Änderungsgrad



Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen
Aluminium-Rotor, hygroskopisch
Temperatur-Änderungsgrad

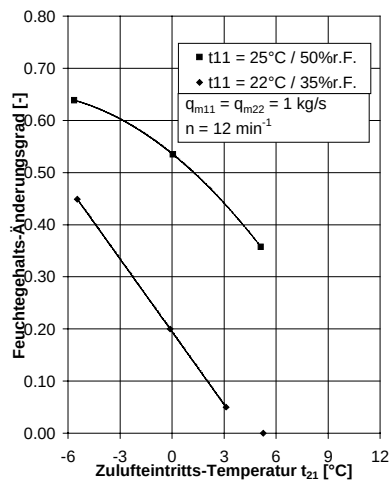


Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen
Rotor mit Ionenaustauschharz
Temperatur-Änderungsgrad

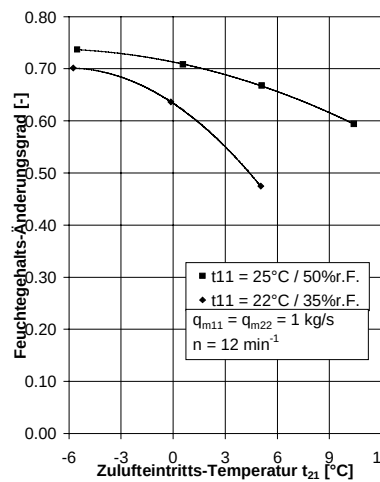


Feuchtegehalts-Änderungsgrad "Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen"

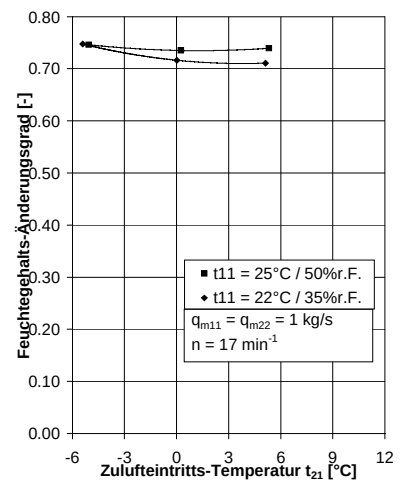
Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen
Aluminium-Rotor, nicht hygroskopisch
Feuchtegehalts-Änderungsgrad



Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen
Aluminium-Rotor, hygroskopisch
Feuchtegehalts-Änderungsgrad



Vergleich EN 308 mit aktuellen Abluftzuständen
Rotor mit Ionenaustauschharz
Feuchtegehalts-Änderungsgrad



4.3 Einfluss Massenstrom (Anströmgeschwindigkeit)

Aluminium-Rotor, nicht hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
0.682	0.687	1.01	1.114	1.1	22.1	8.6	5.2	5.0	17.9	5.99	12	0.75	0.28
0.998	1.005	1.01	1.114	1.1	22.1	8.6	5.1	5.1	17.4	5.77	12	0.72	0.20
1.281	1.273	0.99	1.114	1.1	22.1	8.6	5.1	5.2	16.8	5.84	12	0.69	0.18

Um noch messbare Resultate für η_x zu erhalten mussten höhere Werte für x_{11} eingestellt werden.

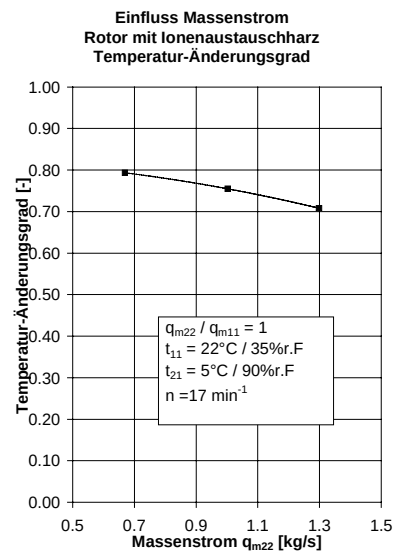
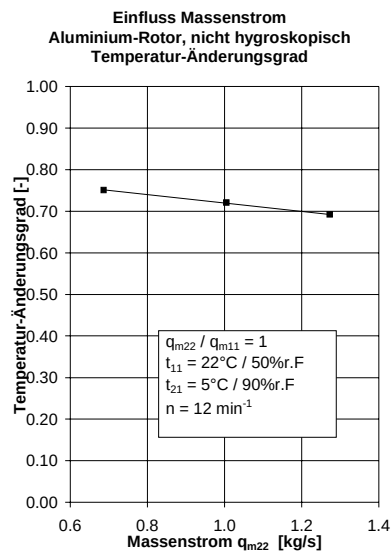
Aluminium-Rotor, hygroskopisch

siehe 4.1 Normmesspunkte nach SN EN 308: 1997 [3]

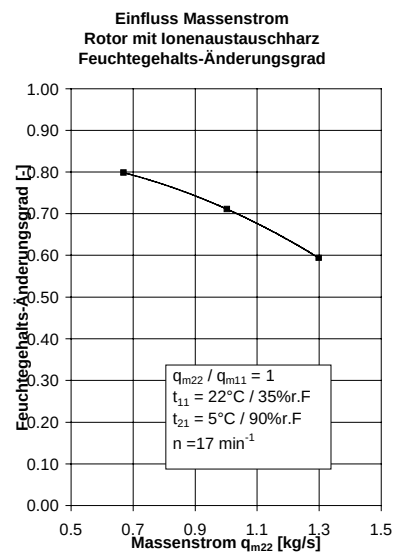
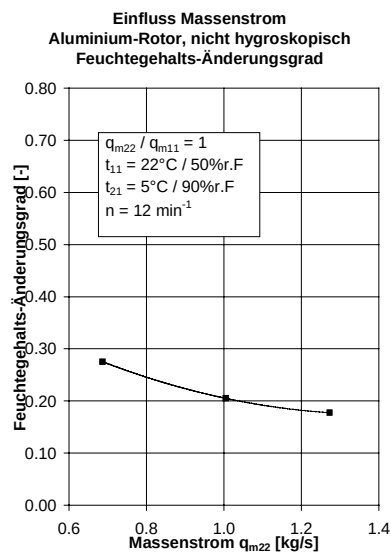
Rotor mit Ionenaustauschharz

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
0.669	0.670	1.00	1.125	1.139	22.0	6.3	4.9	5.4	18.5	6.1	17	0.79	0.80
1.006	1.003	1.00	1.135	1.152	22.0	6.2	5.1	4.3	17.9	5.7	17	0.75	0.71
1.298	1.298	1.00	1.124	1.144	22.0	6.2	4.8	5.4	16.9	5.9	17	0.71	0.59

Temperatur-Änderungsgrad "Einfluss Massenstrom (Anströmgeschwindigkeit)"



Feuchtegehalts-Änderungsgrad "Einfluss Massenstrom (Anströmgeschwindigkeit)"



4.4 Einfluss Drehzahl

Aluminium-Rotor, nicht hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	η -	η_t -	η_x -
1.007	1.002	0.99	1.118	1.1	22.0	9.7	4.8	5.3	17.3	7.26	17	0.73	0.45
1.006	1.000	0.99	1.118	1.1	22.0	9.6	4.7	5.2	17.2	7.02	14	0.72	0.42
1.005	1.001	1.00	1.118	1.1	22.0	9.6	4.8	5.2	17.1	6.92	12	0.71	0.39
1.004	1.004	1.00	1.103	1.1	22.0	9.5	5.1	5.2	17.2	6.61	10	0.71	0.33

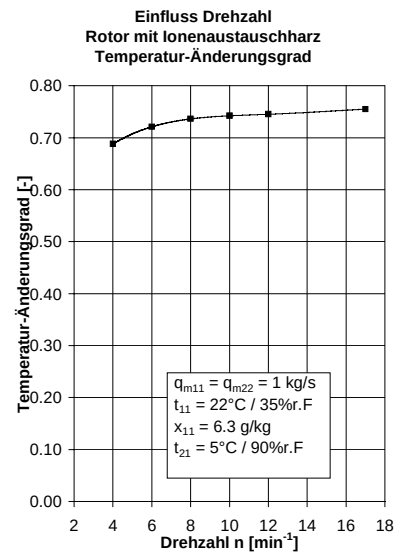
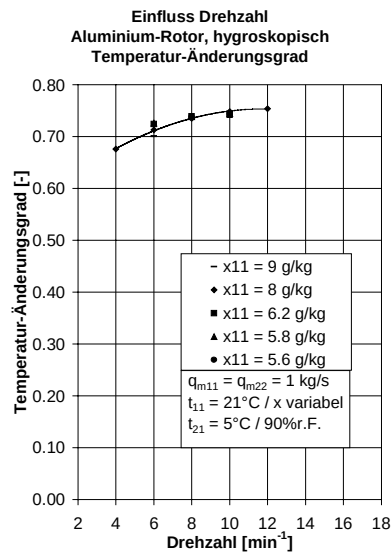
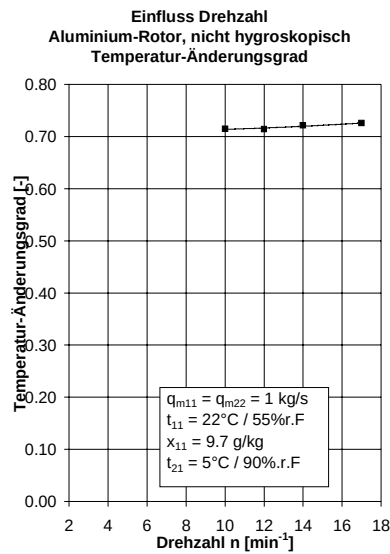
Aluminium-Rotor, hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	η -	η_t -	η_x -
0.998	0.998	1.0	1.140	1.2	21.1	9.0	5.3	5.4	17.0	7.72	10	0.74	0.65
0.999	1.000	1.0	1.139	1.2	21.2	9.0	5.3	5.4	16.4	7.27	6	0.70	0.52
1.006	0.999	1.0	1.141	1.157	21.1	8.0	5.2	5.3	17.2	7.1	12	0.75	0.66
1.002	0.995	1.0	1.141	1.157	21.1	8.0	5.4	5.4	17.1	7.0	10	0.75	0.62
1.001	1.000	1.0	1.141	1.158	21.1	8.0	5.5	5.4	16.9	6.8	8	0.73	0.55
1.004	1.000	1.0	1.140	1.159	21.1	8.1	5.4	5.4	16.6	6.7	6	0.71	0.47
1.002	1.001	1.0	1.140	1.162	21.1	7.9	5.4	5.3	16.0	6.1	4	0.68	0.28
0.998	0.995	1.0	1.148	1.165	21.2	6.3	5.0	5.2	17.0	5.7	10	0.74	0.49
1.002	1.001	1.0	1.149	1.166	21.1	6.1	5.0	5.1	16.9	5.5	8	0.74	0.37
1.001	0.999	1.0	1.149	1.167	21.2	6.2	5.0	5.1	16.7	5.4	6	0.72	0.22
0.999	1.000	1.0	1.144	1.2	21.1	5.8	4.9	5.2	17.0	5.4	10	0.74	0.39
0.998	0.998	1.0	1.144	1.2	21.2	5.9	5.0	5.2	16.9	5.4	8	0.74	0.27
0.995	0.994	1.0	1.143	1.2	21.1	5.9	5.0	5.2	16.7	5.3	6	0.73	0.04
1.008	1.016	1.0	1.144	1.161	21.1	5.6	5.1	5.2	17.0	5.3	10	0.74	0.29
1.001	1.004	1.0	1.145	1.161	21.1	5.6	5.0	5.2	16.9	5.3	8	0.74	0.10

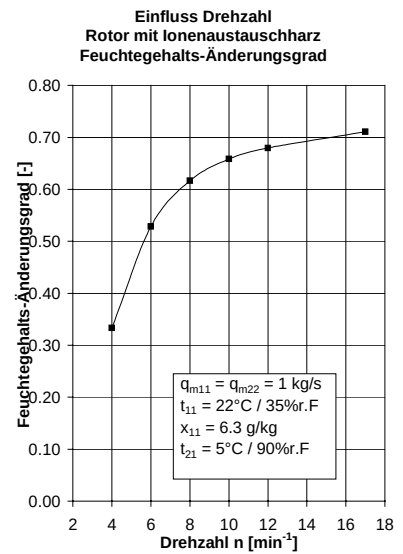
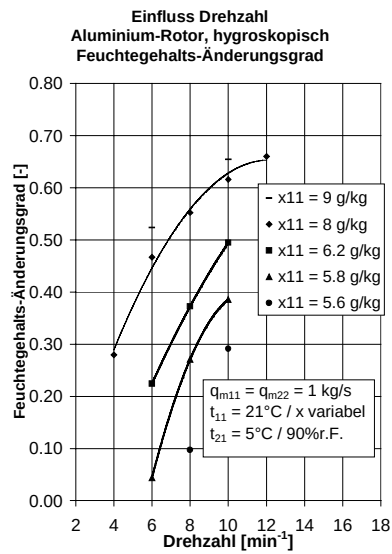
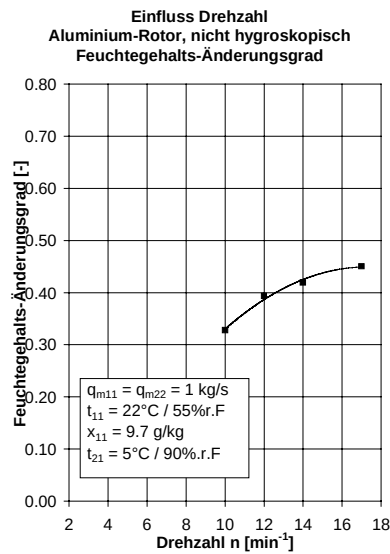
Rotor mit Ionenaustauschharz

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	η -	η_t -	η_x -
1.006	1.003	1.00	1.135	1.152	22.0	6.2	5.1	4.3	17.9	5.7	17	0.75	0.71
1.002	1.003	1.00	1.135	1.152	22.0	6.3	5.1	4.4	17.7	5.7	12	0.75	0.68
1.005	1.005	1.00	1.135	1.153	22.0	6.2	4.9	4.4	17.6	5.6	10	0.74	0.66
1.002	1.003	1.00	1.135	1.153	22.0	6.2	4.8	4.6	17.5	5.6	8	0.74	0.62
1.003	1.004	1.00	1.135	1.154	22.0	6.2	4.8	4.8	17.2	5.5	6	0.72	0.53
1.002	1.005	1.00	1.134	1.156	22.0	6.2	4.8	4.7	16.6	5.2	4	0.69	0.33

Temperatur-Änderungsgrad "Einfluss Drehzahl"



Feuchtegehalts-Änderungsgrad "Einfluss Drehzahl"



4.5 Einfluss Feuchtegehalt Ablufteintritt

Aluminium-Rotor, nicht hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	$x_{11} - x_{21}$ g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.002	1.00	1.100	1.121	22.1	10.6	5.1	5.4	17.2	7.8	5.2	12	0.72	0.47
1.005	1.00	1.118	1.139	22.0	9.6	4.8	5.2	17.1	6.9	4.4	12	0.71	0.39
1.002	1.00	1.119	1.139	22.0	8.5	4.8	5.2	17.2	6.0	3.3	12	0.72	0.25
1.000	1.00	1.120	1.140	22.0	7.7	4.7	5.2	17.2	5.5	2.5	12	0.72	0.12

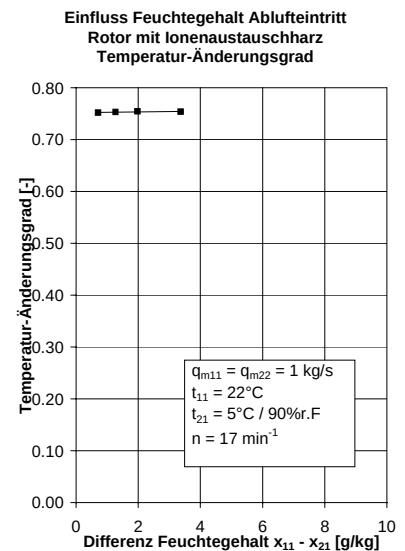
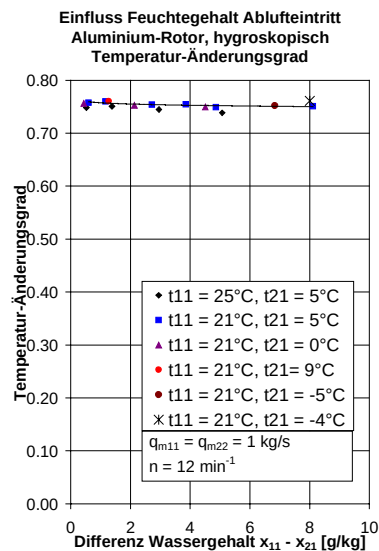
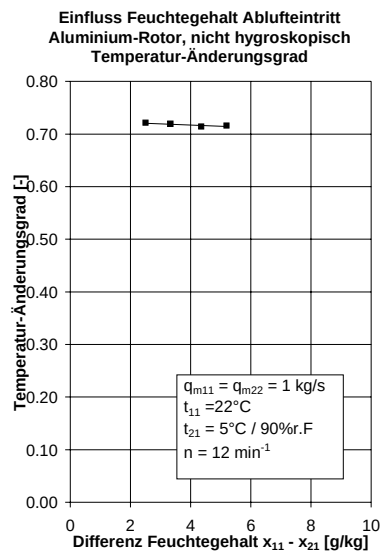
Aluminium-Rotor, hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	$x_{11} - x_{21}$ g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.008	1.009	1.125	1.147	25.2	10.4	5.1	5.3	19.9	8.7	5.1	12	0.74	0.67
1.003	1.002	1.129	1.150	25.2	8.2	5.0	5.3	20.1	7.0	3.0	12	0.74	0.59
1.004	1.002	1.130	1.150	25.2	6.6	5.0	5.2	20.1	5.9	1.4	12	0.75	0.49
1.004	0.998	1.126	1.146	25.1	5.8	4.9	5.2	20.1	5.4	0.5	12	0.75	0.34
1.008	1.005	1.141	1.158	21.1	13.4	5.1	5.3	17.1	11.7	8.1	12	0.75	0.78
1.003	1.009	1.143	1.160	21.1	10.1	5.0	5.3	17.1	8.8	4.9	12	0.75	0.72
1.004	1.005	1.144	1.160	21.1	9.1	5.0	5.2	17.1	7.9	3.9	12	0.75	0.69
1.006	0.999	1.141	1.157	21.1	8.0	5.2	5.3	17.2	7.1	2.7	12	0.75	0.66
1.008	1.007	1.146	1.162	21.1	6.4	4.9	5.2	17.2	5.9	1.2	12	0.76	0.56
1.009	1.007	1.147	1.162	21.1	5.8	4.9	5.2	17.2	5.5	0.6	12	0.76	0.45
0.999	1.001	1.144	1.166	21.1	7.9	-0.3	3.4	15.7	6.6	4.5	12	0.75	0.70
1.004	1.002	1.145	1.167	21.0	5.6	-0.3	3.4	15.8	4.8	2.1	12	0.75	0.63
1.003	1.004	1.144	1.164	21.0	3.8	-0.2	3.4	15.8	3.6	0.4	12	0.76	0.43
1.009	1.003	1.140	1.152	21.2	8.5	9.1	7.2	18.3	8.0	1.3	12	0.76	0.57
1.014	1.003	1.126	1.154	21.0	9.0	-5.3	2.1	14.5	7.3	6.8	12	0.75	0.75
1.007	1.000	1.125	1.150	21.0	10.5	-3.7	2.5	15.0	8.6	8.0	12	0.76	0.76

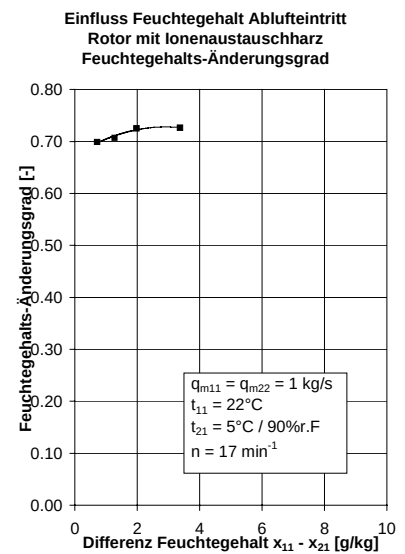
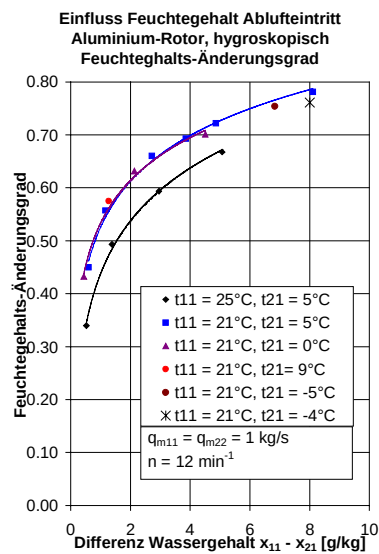
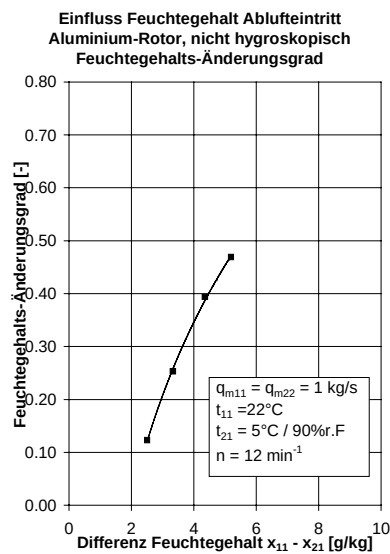
Rotor mit Ionenaustauscharz

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	$x_{11} - x_{21}$ g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.002	1.003	1.137	1.154	22.0	5.9	4.9	5.2	17.8	5.7	0.7	17	0.75	0.70
0.999	1.004	1.136	1.153	22.0	6.4	5.0	5.1	17.8	6.0	1.3	17	0.75	0.71
1.010	1.009	1.118	1.134	22.0	7.6	5.3	5.6	17.9	7.0	2.0	17	0.75	0.73
1.004	1.005	1.135	1.153	22.0	8.6	4.9	5.2	17.8	7.7	3.4	17	0.75	0.73

Temperatur-Änderungsgrad "Einfluss Feuchtegehalt Ablufteintritt"



Feuchtegehalts-Änderungsgrad "Einfluss Feuchtegehalt Ablufteintritt"



4.6 Einfluss Ablufttemperatur

Aluminium-Rotor, nicht hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.007	1.009	1.00	1.118	1.133	18.1	7.8	5.0	5.3	14.5	5.8	12	0.73	0.20
1.000	1.002	1.00	1.120	1.140	22.0	7.7	4.7	5.2	17.2	5.5	12	0.72	0.12
0.997	0.999	1.00	1.092	1.115	25.0	7.9	5.0	5.3	19.3	5.5	12	0.71	0.07

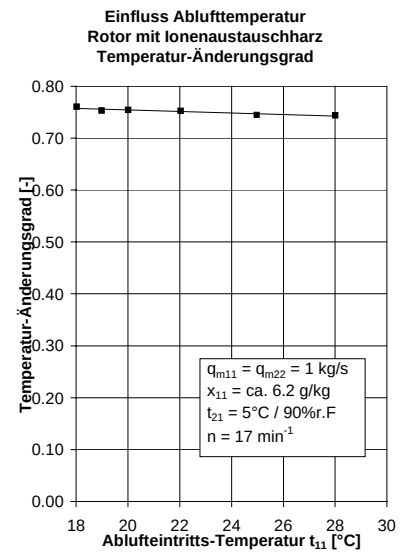
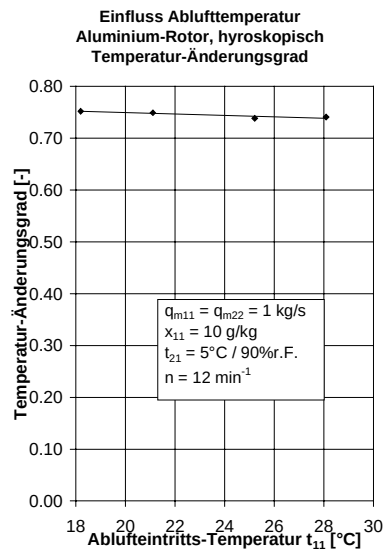
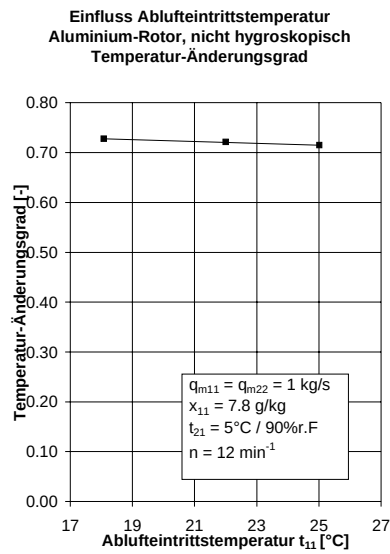
Aluminium-Rotor, hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.004	1.004	1.0	1.104	1.128	28.1	10.5	5.1	5.4	22.1	8.6	12	0.74	0.63
1.008	1.009	1.0	1.125	1.147	25.2	10.4	5.1	5.3	19.9	8.7	12	0.74	0.67
1.003	1.009	1.0	1.143	1.160	21.1	10.1	5.0	5.3	17.1	8.8	12	0.75	0.72
1.011	1.001	1.0	1.141	1.155	18.2	10.2	5.1	5.4	15.0	9.0	12	0.75	0.75

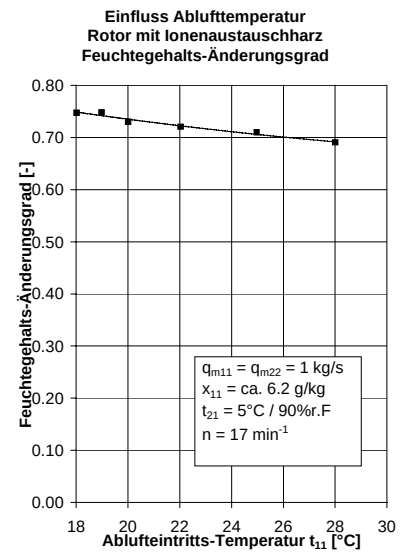
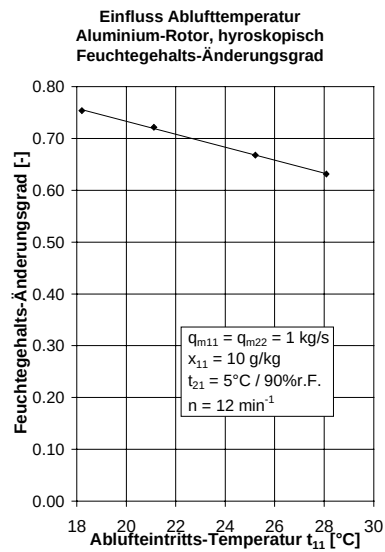
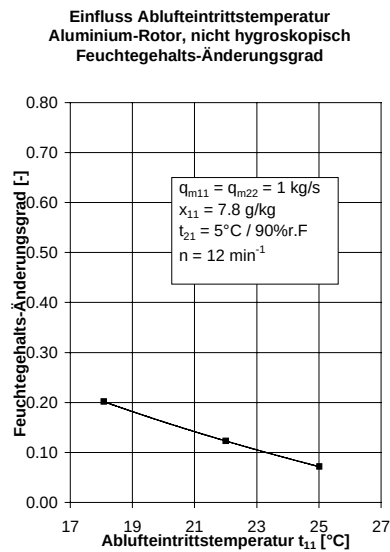
Rotor mit Ionenaustauschharz

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.011	1.008	1.00	1.152	1.165	18.0	6.2	4.9	5.2	14.9	6.0	17	0.76	0.75
1.008	1.008	1.00	1.148	1.162	19.0	6.1	4.8	5.3	15.5	5.9	17	0.75	0.75
1.005	1.007	1.00	1.145	1.160	20.0	6.3	4.8	5.3	16.3	6.0	17	0.75	0.73
1.003	1.005	1.00	1.137	1.154	22.0	6.3	4.9	5.2	17.8	6.0	17	0.75	0.72
0.999	1.000	1.00	1.124	1.144	25.0	6.2	4.8	5.2	19.8	5.9	17	0.74	0.71
0.993	0.996	1.00	1.113	1.136	28.0	6.2	4.8	5.2	22.1	5.9	17	0.74	0.69

Temperatur-Änderungsgrad "Einfluss Ablufttemperatur"



Feuchtegehalts-Änderungsgrad "Einfluss Ablufttemperatur"



4.7 Einfluss Massenstromverhältnis

Aluminium-Rotor, nicht hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.002	1.002	1.00	1.119	1.139	22.0	8.5	4.8	5.2	17.2	6.0	12	0.72	0.25
1.007	0.911	0.90	1.102	1.119	22.1	8.6	5.1	5.4	18.1	6.0	12	0.76	0.19
1.005	0.808	0.80	1.101	1.116	22.1	8.6	5.1	5.4	18.9	5.8	12	0.81	0.14
1.006	0.703	0.70	1.101	1.112	22.1	8.6	5.2	5.4	19.7	5.6	12	0.86	0.06

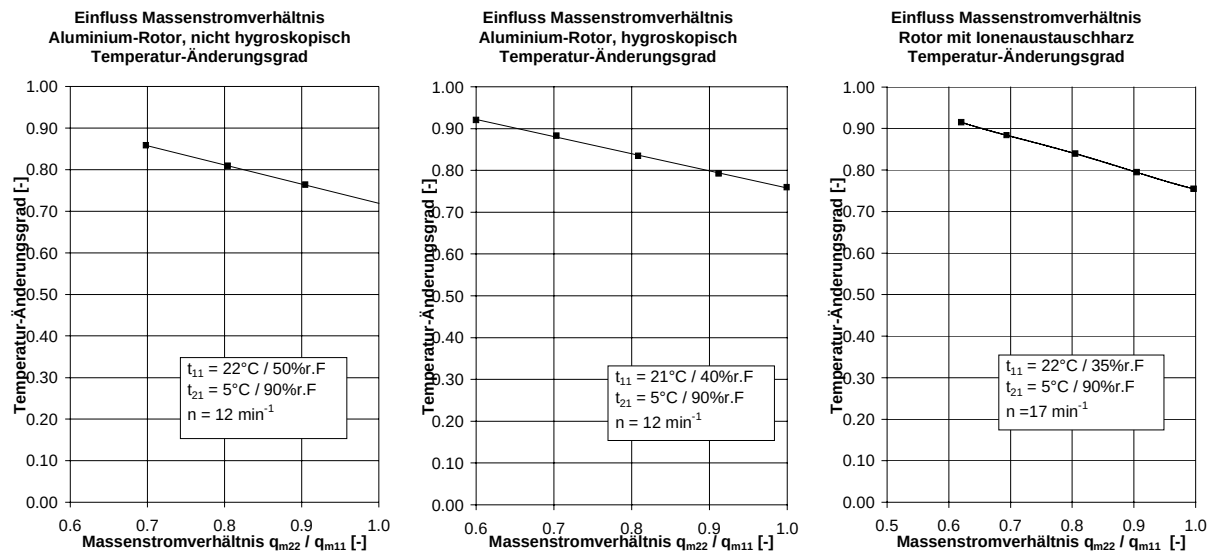
Aluminium-Rotor, hygroskopisch

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.008	1.007	1.00	1.146	1.162	21.1	6.4	4.9	5.2	17.2	5.9	12	0.76	0.56
1.006	0.917	0.91	1.140	1.154	21.1	6.5	5.0	5.3	17.8	6.0	12	0.79	0.59
1.006	0.813	0.81	1.141	1.151	21.1	6.4	5.1	5.3	18.5	6.0	12	0.83	0.62
1.005	0.707	0.70	1.140	1.148	21.1	6.5	5.1	5.3	19.3	6.0	12	0.88	0.65
1.005	0.603	0.60	1.140	1.145	21.2	6.5	5.1	5.3	19.9	6.2	12	0.92	0.70

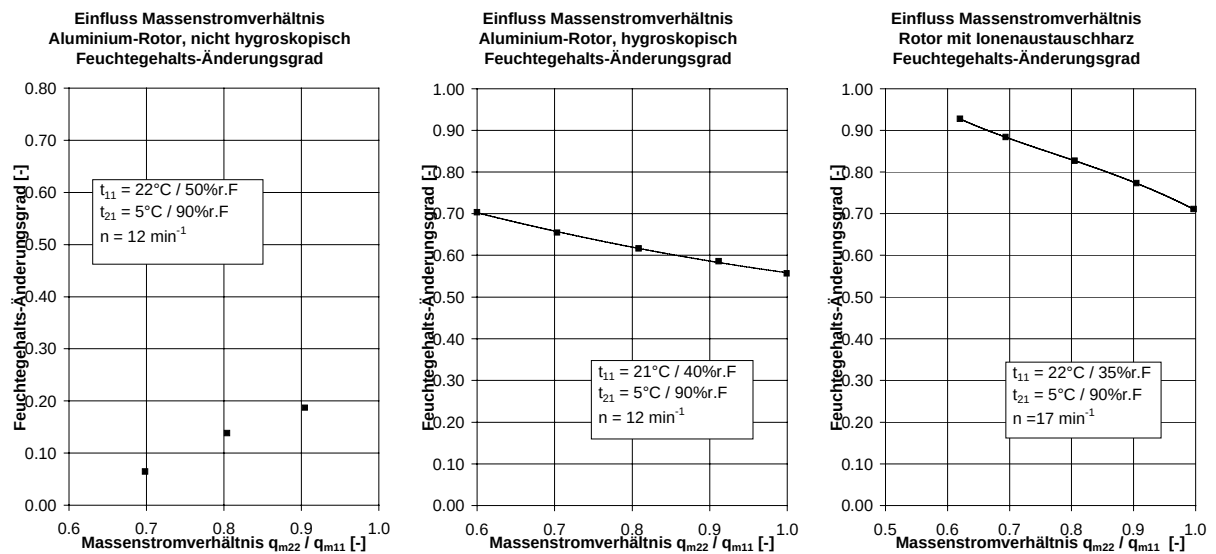
Rotor mit Ionenaustauschharz

q_{m11} kg/s	q_{m22} kg/s	q_{m22}/q_{m11} -	ρ_{11} kg/m ³	ρ_{22} kg/m ³	t_{11} °C	x_{11} g/kg	t_{21} °C	x_{21} g/kg	t_{22} °C	x_{22} g/kg	n -	η_t -	η_x -
1.006	1.003	1.00	1.135	1.152	22.0	6.2	5.1	4.3	17.9	5.7	17	0.75	0.71
1.002	0.907	0.90	1.134	1.148	22.0	6.3	4.8	4.7	18.5	6.0	17	0.79	0.77
1.000	0.805	0.81	1.132	1.143	22.0	6.2	4.8	4.7	19.2	5.9	17	0.84	0.83
1.001	0.694	0.69	1.132	1.140	22.0	6.2	4.9	4.7	20.0	6.0	17	0.88	0.88
0.998	0.619	0.62	1.131	1.137	22.0	6.3	4.9	4.8	20.5	6.2	17	0.91	0.93

Temperatur-Änderungsgrad "Einfluss Massenstromverhältnis"



Feuchtegehalts-Änderungsgrad "Einfluss Massenstromverhältnis"



Die Messunsicherheit für tiefe Werte von η_x bei kleinen Differenzen für $x_{11} - x_{21}$ ist sehr gross.

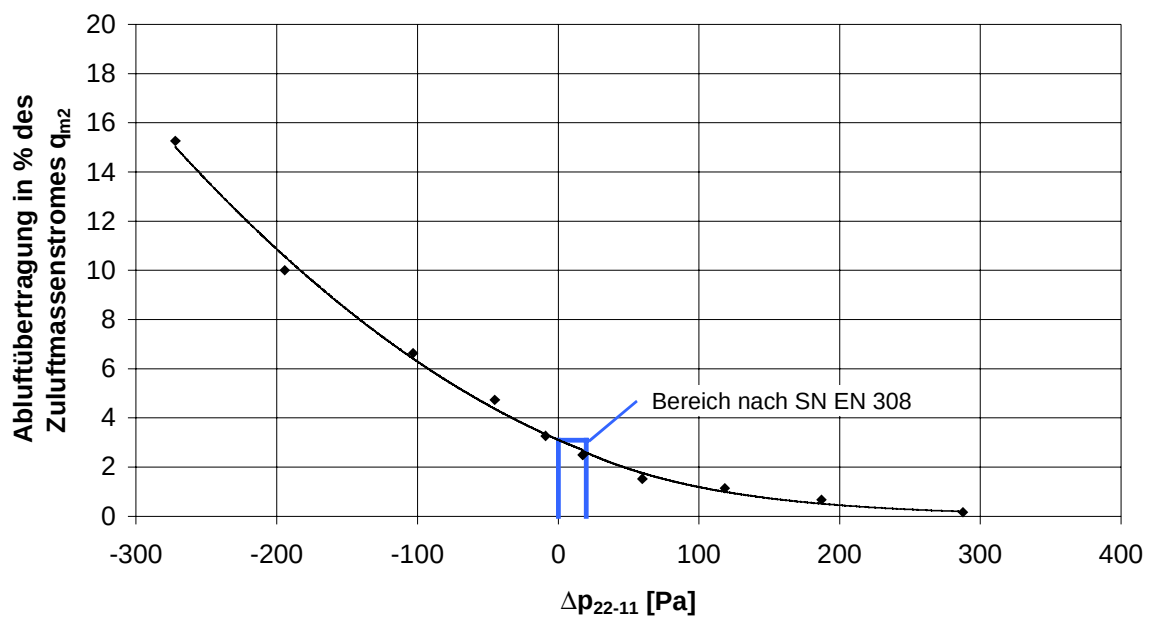
Eine Aussage über den Einfluss des Massenstromverhältnisses beim "Aluminium-Rotor, nicht hygroskopisch", ist nicht sinnvoll.

4.8 Abluftübertragung

Aluminium-Rotor, hygroskopisch

Δp_{22-11}	$a_{22}/a_{11} \cdot 100$
Pa	%
-272	15.3
-194	10.0
-103	6.6
-45	4.7
-9	3.3
17	2.5
60	1.5
118	1.1
187	0.7
288	0.2

Abluftübertragung Aluminium-Rotor, hygroskopisch



Nach der Norm [3] darf der Massenstrom der auf die Zuluftseite übertragenen Abluft bei einer statischen Druckdifferenz Δp_{22-11} von 0 Pa bis 20 Pa 3% des Zuluftmassenstromes nicht überschreiten.

Alle Prüflinge wurde auf diese Forderung hin überprüft und erfüllen diese. Als Beispiel ist nur die Messung am hygroskopischen Rotor dargestellt.

5 Schlussbemerkung

Die wichtigste Erkenntnis aus den vielen Messungen ist der Einfluss des Abluftzustandes auf die Feuchteübertragung. Der Einfluss auf den Temperatur-Änderungsgrad ist minimal und kann vernachlässigt werden.

Im BEW/NEFF-Projekt 1996/97 wurde ein hygroskopischer Aluminium-Rotor gemessen, der nicht mehr dem gegenwärtigen Marktangebot entspricht. Diese Rotorart wird häufig eingesetzt; aus diesem Grund wurden bei einem aktuellen Typ entsprechend viele Messungen durchgeführt, um die Resultate der früheren Messungen noch verwenden zu können. Es zeigt sich, dass die Differenz des Wassergehaltes zwischen der Aussenluft und der Abluft massgebend für den Feuchtegehalts-Änderungsgrad ist. Die Temperaturdifferenz zwischen Aussenluft und Abluft hat einen geringen Einfluss, hingegen wird der Feuchtegehalts-Änderungsgrad besser bei tieferen Ablufttemperaturen und gleicher Differenz des Wassergehaltes.

Beim nicht hygroskopischen Rotor ist der Einfluss der Feuchtegehaltsdifferenz erwartungsgemäss noch wesentlich deutlicher. Bei Differenzen unter ca. 3 g/kg ist eine Messung kaum mehr möglich. Die Messunsicherheiten bewegen sich in der gleichen Grössenordnung wie die Beträge der Messresultate. Die Resultate liegen unter Berücksichtigung der Messunsicherheit bei den Werten aus den früheren Messungen.

Der Rotor mit Ionenaustauschharz als Sorptionsmittel zeigt erwartungsgemäss die besten Resultate. Dieser Rotor stammt von gleichen Hersteller wie der Keramik-Rotor im früheren Projekt 1996/97, der ebenfalls sehr gute Ergebnisse aufwies.

Horw, Dezember 2000

Dank

Die Arbeit wurde vom Bundesamt für Energie im Rahmen des Projektes Nr. 38'106 finanziell unterstützt. Wir danken den beteiligten Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Schlussbericht des BEW-Projektes Nr. 50507, *Wärmerückgewinnung durch regenerative Luft/Luft-Wärmeübertrager*, November 1996
- [2] Schlussbericht des NEFF-Projektes Nr. 250.2, *Nachweis der Wärmerückgewinnung durch regenerative Luft/Luft-Wärmeübertrager*, Januar 1997
- [3] SN EN 308: 1997, *Wärmeaustauscher – Prüfverfahren zur Bestimmung der Leistungskriterien von Luft/Luft- und Luft/Abgas- Wärmerückgewinnungsanlagen*
- [4] Schlussbericht des BFE-Projektes Nr. 24 891, *Ein- und Ausgabeprogramm für Berechnung des jährlichen Energiebedarfs von Lüftungstechnischen Anlagen gemäss Richtlinie 95-3*, 2001.