

# Effizienz-NTU-Methode für einen zyklischen Sorptionsprozess

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>17</b>
2.1	Feuchte Luft	17
2.1.1	Luftfeuchte	18
2.1.2	Spezifische Enthalpie und Wärmekapazität	21
2.1.3	Massendichte	21
2.2	Konvektive Wärme- und Stoffübertragung	21
2.3	Adsorption	25
2.4	Berechnung von Wärmeübertragern	29
2.5	Statistische Versuchsplanung	35
<b>3</b>	<b>Stand der Technik &amp; Literaturübersicht</b>	<b>39</b>
3.1	Klimatisierungsverfahren	39
3.1.1	Klimatisierung und Behaglichkeit	39
3.1.2	Bekannte Kühl- und Entfeuchtungsverfahren	40
3.1.3	ECOS-Konzept	46
3.2	Literaturübersicht	50
3.2.1	Ähnliche Klimatisierungsverfahren	50
3.2.2	Arbeiten zum ECOS-Verfahren	51
3.2.3	Modellierung von Verdunstung, Wärmeübertragung und Sorption	52
<b>4</b>	<b>Versuchsaufbau</b>	<b>57</b>
4.1	Verschaltung und Betriebsweise	57
4.2	Beschreibung der Komponenten	62
4.2.1	ECOS-Wärmeübertrager und Anströmungen	62
4.2.2	Lüftungsklappen und Stromführung	64
4.2.3	Wassersystem	67
4.3	Gesamtaufbau und Regelung	68
4.4	Messtechnik	72
4.4.1	Messfehler und Genauigkeit	72
4.4.2	Messgeräte, -größen und -unsicherheiten	75
4.4.3	Bestimmung der mittleren Lufttemperatur	78
<b>5</b>	<b>Prozessanalyse</b>	<b>91</b>
5.1	Eingangsgrößen und Arbeitspunkt	92
5.2	Typischer Messpunkt	94
5.2.1	Verlauf im <i>Mollier-h,x</i> -Diagramm	95
5.2.2	Übergang vom zyklischen zum stationären Zustand	100
5.3	Regressionsmodell	101
5.4	Wasserbilanz und Leckage	105
5.5	Modellierung	106
5.5.1	Annahmen	109

5.5.2	Bilanzgrenzen . . . . .	110
5.5.3	Direkte Verdunstungskühlung . . . . .	112
5.5.4	Kühlseite . . . . .	114
5.5.5	Sorptionssseite . . . . .	123
5.6	Auswertung . . . . .	138
5.6.1	Betrieb als Wärmeübertrager ohne Adsorption . . . . .	139
5.6.2	Betrieb als indirekter Verdunstungskühler . . . . .	145
5.6.3	Adsorptionsphase des zyklischen Betriebs . . . . .	154
5.6.4	Einflussgrößen auf die modifizierte Phasenübergangszahl auf der Kühlseite $\Phi_K$ . . . . .	171
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>175</b>
	<b>Nomenklatur</b>	<b>177</b>
	<b>Literatur</b>	<b>181</b>
	<b>Normen</b>	<b>189</b>
	<b>Datenblätter und Software</b>	<b>190</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>191</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>195</b>
<b>A</b>	<b>Verwendete Gleichungen und Approximationen</b>	<b>197</b>
A.1	Berechnung von Gegen- und Kreuzstromwärmeübertragern . . . . .	197
A.2	Approximation Sättigungsdampfdruck . . . . .	198
A.3	Nebenrechnung Modellierung . . . . .	199
<b>B</b>	<b>Messunsicherheit absolute Feuchte</b>	<b>200</b>
B.1	Vaisala HMT 330 . . . . .	200
B.2	Taupunktspiegel . . . . .	200
<b>C</b>	<b>Kennzahlen und Randbedingungen des Prototyps</b>	<b>202</b>
C.1	Berechnung Wärmeübergangskoeffizienten . . . . .	202
C.1.1	Verwendete Stoffdaten . . . . .	202
C.1.2	Wärmeübergangskoeffizient und Wärmeleitwert der Lüftungsrohre . . . . .	202
C.1.3	Wärmedurchgangskoeffizient der Wärmeübertrager aus Geometriedaten . . . . .	204
C.2	Verluste und Verlustflächen . . . . .	206
C.2.1	Anströmungen . . . . .	206
C.2.2	Außenflächen am Wärmeübertrager . . . . .	207
C.3	Thermische Masse . . . . .	207
<b>D</b>	<b>Messdaten</b>	<b>209</b>
D.1	Trockener Betrieb . . . . .	209
D.2	Betrieb als indirekter Verdunstungskühler . . . . .	212
D.3	Zyklischer ECOS-Betrieb . . . . .	216
<b>E</b>	<b>Regressionsmodelle</b>	<b>222</b>