



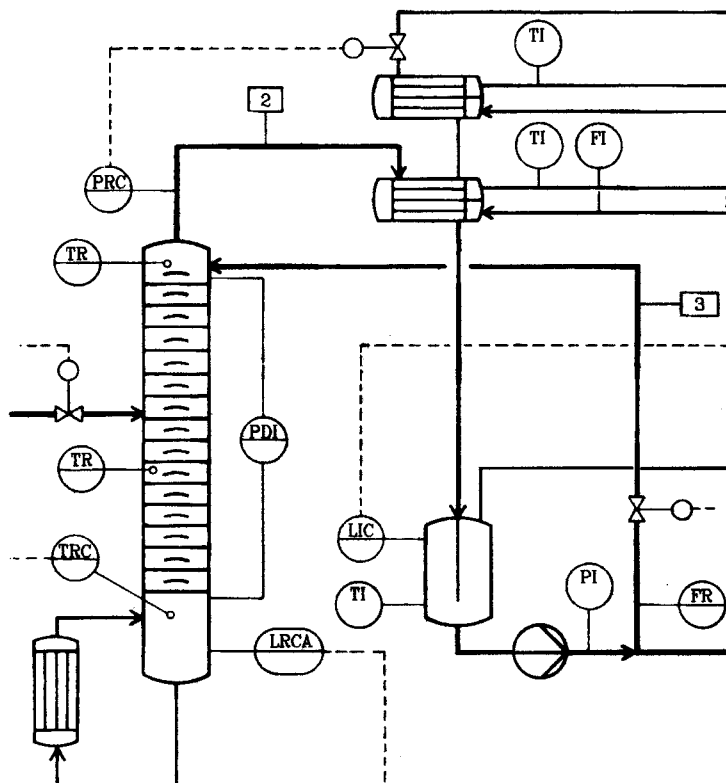
# TVT

Programmpaket für die Thermische Verfahrenstechnik

Version 1

## Handbuch

2. Auflage 1991



# INHALT

<b>Einleitung</b>	<b>2</b>
<b>1 Benützung der Programme des Pakets TVT</b>	<b>3</b>
<b>1.1 Installation des Pakets</b>	<b>3</b>
1.1.1 Hardware-Anforderungen	3
1.1.2 Installation mit Programm TVTInst	4
1.1.3 Nachträgliche Änderung der Installation	6
<b>1.2 Auswahl einzelner Programme</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Eingaben</b>	<b>7</b>
1.3.1 Vorgabewerte des Programms	8
1.3.2 Vorgabewerte aus Datenfiles	8
1.3.3 Stoffdatenbank	9
1.3.4 Formeleingaben	11
<b>1.4 Ausgaben</b>	<b>13</b>
1.4.1 Sichern der Eingabedaten auf Datenfiles	13
1.4.2 Ausgabemöglichkeiten	14
<b>1.5 Grafische Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>15</b>
<b>2 Informationen zu den einzelnen Programmen des Pakets</b>	<b>17</b>
<b>2.1 ZusUm Umrechnen von Zusammensetzungsmassen</b>	<b>17</b>
<b>2.2 StoBi Stoffstrombilanzen für Trennapparate</b>	<b>19</b>
<b>2.3 WSU Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten</b>	<b>21</b>
<b>2.4 WD Wärmedurchgangskoeffizienten</b>	<b>25</b>
<b>2.5 WueAb Wärmeübertrager: Abschätzen der Oberfläche</b>	<b>29</b>
<b>2.6 WueDr Wärmeübertrager: Doppelrohr</b>	<b>32</b>
<b>2.7 WueRb Wärmeübertrager: Rohrbündel</b>	<b>34</b>
<b>2.8 WueRbK Wärmeübertrager: Luftkühlung mit Kondensation</b>	<b>43</b>
<b>2.9 VerR Verdampfen reiner Stoffe (Behälter, Rohre)</b>	<b>48</b>
<b>2.10 KonR Kondensation reiner Dämpfe an Rohren</b>	<b>51</b>
<b>2.11 DestB Destillation von Zweistoffgemischen</b>	<b>55</b>
<b>2.12 DestM Destillation idealer Mehrstoffgemische</b>	<b>57</b>
<b>2.13 EinDa Eindampfen in Mehrstufenanlagen</b>	<b>59</b>
<b>2.14 RekB Rektifikation in Bodenkolonnen</b>	<b>62</b>
<b>2.15 RekF Rektifikation in Füllkörperkolonnen</b>	<b>70</b>
<b>2.16 AbsF Absorption in Füllkörperkolonnen</b>	<b>80</b>
<b>2.17 SorIs Sorptionsisothermen (Näherungsgleichungen)</b>	<b>87</b>
<b>2.18 SorRo Isotherme Sorption im Festbett</b>	<b>89</b>
<b>2.19 TroKG Kühlgrenztemperatur</b>	<b>91</b>
<b>2.20 TroFDi Konvektionstrockner diskontinuierlich (Fließbett)</b>	<b>92</b>
<b>2.21 TroFli Konvektionstrockner kontinuierlich (Fließbett)</b>	<b>97</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>106</b>

Das Buch "Wärme- und Stofftransportprozesse" des Programmators gehört als ergänzender Teil zu diesem Handbuch.

## Einleitung

Das Programmpaket TVT ermöglicht die bequeme Auslegung und Optimierung grundlegender Operationen der Thermischen Verfahrenstechnik. Es umfasst nebst den im Lehrbuch "Wärme- und Stofftransportprozesse" des Programmautors enthaltenen Grundlagen wesentliche Erweiterungen.

Der Anwender wird bei der Benützung der 21 Programme des Pakets mit einer Code-Grösse von total rund 3 MB durch das Einlesen von Vorgabewerten ab Datenfiles und durch eine Bedienerführung mit Menüs, Masken und Erläuterungstexten unterstützt. Alle Programme ermöglichen ein Abspeichern der Anlage- und Prozessdaten auf Datenfiles, welche bei späteren Rechnungen als neue Vorgabewerte wieder eingelesen werden können. In einer Stoffdatenbank können die Stoffwerte für mehrere Programme gemeinsam verwaltet werden. Die Ergebnisse können zur Einbindung in Textprogramme auf Files geschrieben oder direkt auf einen Drucker ausgegeben werden. Zur grafischen Darstellung der Ergebnisse mit einem der handelsüblichen Grafikprogramme lassen sich die Ergebnisse auch als Plot-Files im ASCII-Format zwischenspeichern. Das Bild 1 illustriert den Aufbau und die Arbeitsweise des Pakets:

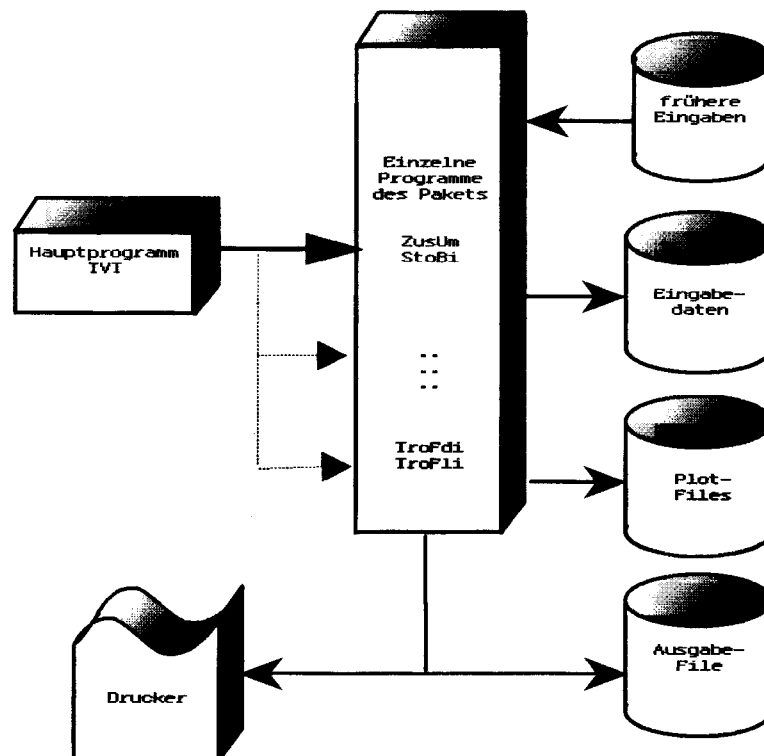


Bild 1: Aufbau und Arbeitsweise des Programmpakets TVT.

Als Besonderheit kann der Benutzer bei einigen Programmen die Berechnungsgleichungen selbst eingeben (und zur wiederholten Verwendung selbstverständlich auch auf Files abspeichern). Dies ermöglicht die Benützung eigener und den laufenden Einbau neuer Berechnungsgrundlagen.

Das Paket TVT kann auf jedem IBM-kompatiblen Personal Computer mit MS-DOS-Betriebssystem (ab Version 3.0) und wenigstens 448 kB freiem Speicherplatz betrieben werden.

## 1 Benützung des Pakets TVT

Im vorliegenden ersten Kapitel des Handbuchs wird das allen Programmen Gemeinsame erläutert. Eine Beschreibung der einzelnen Programme finden Sie im Kapitel 2.

### 1.1 Installation des Pakets

#### 1.1.1 Hardware-Anforderungen

Das Programmpaket TVT wird auf 3.5" oder 5,25" Disketten geliefert. Es läuft auf IBM-kompatiblen Personal Computern mit MS-DOS Betriebssystem (ab Version 3.0) und einer Harddisk. Mit einem freien RAM von 448 kB können sämtliche Programme des Pakets betrieben werden. Ein numerischer Co-Prozessor beschleunigt den Ablauf vieler Programme wesentlich. Er wird aber nicht vorausgesetzt. Die Programme wurden für Farbbildschirme geschrieben. Sie können aber auch ohne betrieben werden. Für grafische Darstellungen ist der Einsatz handelsüblicher Grafikprogramme vorgesehen. Zur Datenübertragung auf diese werden Plotfiles im ASCII-Format geschrieben. Deshalb ist zum Betreiben des Pakets MVT keine Grafikausrüstung notwendig.

Auf der Harddisk werden zur Installation minimal 1 MB (nur einzelne Programme) bis zu etwa 3.5 MB für die Installation des ganzen Pakets mit allen Datenfiles benötigt. Die Tabelle 1.1 gibt Auskunft über den ungefähren Bedarf an Harddiskkapazität. Infolge der laufenden Weiterentwicklung sind leichte Abweichungen von den angegebenen Zahlenwerten möglich.

Tabelle 1.1: Programmverzeichnis TVT		
Name	Programm	Grösse [kB]
stets zu installieren		
TVT	Hauptprogramm	49
TVTInfo	Informationen zum Hauptprogramm	52
TVTInst	Installationsprogramm	34
vollständig oder teilweise installierbar		
ZusUm	Umrechnen von Zusammensetzungsmassen	108
StoBi	Stoffstrombilanzen für Trennapparate	94
WSU	Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten	106
WD	Wärmedurchgangskoeffizienten	155
WueAb	Wärmeübertrager: Abschätzen der Oberfläche	98
WueDr	Wärmeübertrager: Doppelrohr	130
WueRb	Wärmeübertrager: Rohrbündel	167
WueRbK	Wärmeübertrager: Luftkühlung mit Kondensation	138
VerR	Verdampfen reiner Stoffe (Behälter, Rohre)	125


KonR	Kondensation reiner Dämpfe an Rohren	120
DestB	Destillation von Zweistoffgemischen	91
DestM	Destillation idealer Mehrstoffgemische	96
EinDa	Eindampfen in Mehrstufenanlagen	117
RekB	Rektifikation in Bodenkolonnen	197
RekF	Rektifikation in Füllkörperkolonnen	218
AbsF	Absorption in Füllkörperkolonnen	190
SorIs	Sorptionsisothermen	96
SorRo	Isotherme Sorption im Festbett	89
TroKG	Kühlgrenztemperatur	105
TroFDi	Konvektionstrockner diskontinuierlich (Fließbett)	169
TroFli	Konvektionstrockner kontinuierlich (Fließbett)	193
Totaler Bedarf an Harddiskkapazität (ohne Datenfiles)		2937 kB

### 1.1.2 Installation mit Programm TVTInst

Benützen Sie zur Installation des Pakets das mitgelieferte Programm TVTInst und gehen Sie wie folgt vor:

- Legen Sie die Diskette Nr. 1 in das Laufwerk A: ein.
- Starten Sie das Installationsprogramm mit "TVTInst"

Nun erscheint das nachstehende Menü:

		Thermische Verfahrenstechnik Version 1.0 Prof. Dr. M. Zogg, Kirchstutz 3, CH-3414 Oberburg
I N S T A L L A T I O N   A U F   D I E   H A R D D I S K		
Art der Installation:	Erstinstallation Programmauswahl ändern Abbrechen	Bedienung:  Wahl-Balken mit Cursortasten bewegen und "Return" drücken als Bestätigung.
Eröffnet Pfade für Programme und Daten, kopiert die auszuwählenden Programme in den Programmpfad und die dazugehörigen Datenfiles in den Datenpfad. Erstellt ein Batchfile zum Starten des Pakets TVT.		

- Wählen Sie "Erstinstallation": Am Bildschirm erscheint ein Untermenü.
- Wählen Sie aus diesem die Option "Harddisk": Ihr Computer wird nach den vorhandenen Laufwerken und den auf diesen verbliebenen freien Plätzen abgesehen. Installieren Sie das ganze Paket nur auf ein Laufwerk mit dem Vermerk "genügend Platz". Falls Sie diesen Vermerk in der untenstehenden Maske nicht finden, können Sie nur einzelne Programme des Pakets installieren.

Harddisk	
Pfad für TVT-Programme	
Pfad für Daten	
Program	
Install	Wählen Sie die Harddisk mit den Cursortasten
Abbrech	und bestätigen Sie mit "Return":
	C: frei: 3244032 Bytes genügend Platz
	D: frei: 4599808 Bytes genügend Platz
	E: frei: 7573504 Bytes genügend Platz
	F: frei: 3561472 Bytes genügend Platz

- Wählen Sie nun den Programmpfad ("Pfad für TVT-Programme"), in welchen alle gewählten Programme (Files mit Verlängerung \*.EXE) kopiert werden. Vorgabebeispiel:

Harddisk	
Pfad für TVT-Programme	
Pfad für	
Program	Pfad für TVT = C:\TVT\
Install	
Abbrechen	

- Wählen Sie jetzt den Datenpfad ("Pfad für Daten"), in welchen alle Datenfiles zu den gewählten Programmen kopiert werden. In diesen Datenpfad werden beim Betrieb auch alle Ein- und Ausgabefiles abgelegt. Der Datenpfad MUSS ein Unterpfad des Programmpfades sein. Vorgabebeispiel:

Harddisk	
Pfad für TVT-Programme	
Pfad für Daten	
Program	
Install	Pfad für Daten = C:\TVT\DAT\
Abbrech	

- Nehmen Sie als nächstes die Programmauswahl aus der nachstehenden Maske vor. Zu Beginn sind alle Programme für die Installation markiert. Falls Sie nur einzelne Programme installieren möchten, können Sie die Markierung mit <RETURN> entfernen.

►ZusUm	Umrechnung Zusammensetzungsmasse	Programmverzeichnis TVT
►StoBi	Stoffstrombilanzen für Trennapparate	
►WSU	Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten	Wählen Sie aus nebenstehendem Verzeichnis diejenigen Programme, die Sie auf Ihrer Harddisk installieren möchten.
►WD	Wärmedurchgangskoeffizienten	
►WueAb	Wärmeübertrager: Abschätzung der Oberfläche	
►WueDr	Wärmeübertrager: Doppelrohr	
►WueRb	Wärmeübertrager: Rohrbündel	
►WueRbK	Wärmeübertrager: Luftkühlung mit Kondensation	
►VerR	Verdampfen reiner Stoffe (Behälter, Rohre)	
►KonR	Kondensation reiner Dämpfe an Rohren	
►DestB	Destillation von Zweistoffgemischen	
►DestM	Destillation idealer Mehrstoffgemische	
►EinDa	Eindampfen in Mehrstufenanlagen	BEDIENUNG:
►RekB	Rektifikation in Bodenkolonnen	Wahl-Balken bewegen: mit Cursortasten
►RekF	Rektifikation in Füllkörperkolonnen	
►AbsF	Absorption in Füllkörperkolonnen	Markieren (►) der zu installierenden Programme: mit Return
►SorIs	Sorptionsisothermen	
►SorRo	Isotherme Sorption im Festbett	
►TroKG	Kühlgrenztemperatur	Weiter: mit F10
►TroFDi	Konvektionstrockner diskontinuierlich	
►TroFli	Konvektionstrockner kontinuierlich	


- Starten Sie schliesslich die Installation der gewünschten Programme und Datenfiles mit dem Menüpunkt "Installation starten". Auf Wunsch können Sie durch das Installationsprogramm im Stammverzeichnis (Root) eine Batch-Datei TVT.BAT zum Aufstarten des Pakets mit der Eingabe von TVT erstellen lassen.

### 1.1.3 Nachträgliche Änderung der Installation

Sie können Ihre Auswahl von TVT-Programmen jederzeit ändern, indem Sie das Installationsprogramm TVTInst ab der Harddisk neu starten und den Menüpunkt "Programmauswahl ändern" anwählen. Die neue Programmauswahl erfolgt analog zur Erstinstallation. Nicht mehr benötigte Programme werden auf der Harddisk gelöscht. Aus Sicherheitsgründen bleiben Ihre Datenfiles jedoch erhalten.

### 1.2 Auswahl einzelner Programme

Alle Programme des Pakets werden vom Hauptprogramm TVT.EXE aufgerufen. Sie können über das folgende Menü angewählt werden:

A	Umrechnen von Zusammensetzungsmassen	ZusUm	 HAUPTMENÜ
B	Stoffstrombilanzen für Trennapparate	StoBi	
C	Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten	WSU	
D	Wärmedurchgangskoeffizienten	WD	
E	Wärmeübertrager: Abschätzen der Oberfläche	WueAb	
F	Wärmeübertrager: Doppelrohr	WueDr	
G	Wärmeübertrager: Rohrbündel	WueRb	
H	Wärmeübertrager: Luftkühlung mit Kondensation	WueRbK	
I	Verdampfen reiner Stoffe (Behälter, Rohre)	VerR	Installierte Programme
J	Kondensation reiner Dämpfe an Rohren	KonR	
K	Destillation von Zweistoffgemischen	DestB	
L	Destillation idealer Mehrstoffgemische	DestM	
M	Eindampfen in Mehrstufenanlagen	EinDa	Nicht installierte Programme
N	Rektifikation in Bodenkolonnen	RekB	
O	Rektifikation in Füllkörperkolonnen	RekF	
P	Absorption in Füllkörperkolonnen	AbsF	
Q	Sorptionsisothermen	SorIs	V Informationen Z TVT-Ende
R	Isotherme Sorption im Festbett	SorRo	
S	Kühlgrenztemperatur	TroKG	
T	Konvektionstrockner diskontinuierlich	TroFDi	
U	Konvektionstrockner kontinuierlich	TroFli	

### 1.3 Eingaben

Die Eingaben erfolgen über Eingabefelder. Sie enthalten zunächst Vorschlagswerte. Sie können diese unverändert übernehmen, ändern oder völlig überschreiben. Die Anleitung zur Bearbeitung der Eingabefelder erhalten Sie mit der Taste <F1> am Bildschirm.

Ausserhalb von Tabelleneingaben erhalten Sie zu jeder Eingabe von Zahlenwerten einen Minimal- und einen Maximalwert eingeblendet:

Druck (Absolutdruck)                      p                      [Pa] = 1.000E+0005? 1.000E+0005

5000 ≤ Eingabebereich ≤ 5.000E+0005

Diese Eingabebereiche wurden grosszügig gewählt und sollen Sie nur vor Fehleingaben aus Unachtsamkeit schützen. In den zum Teil sehr komplexen Programmen mit einer grossen Zahl von Eingabegrössen wurde im Interesse einer nicht zu vorsichtigen Abblockung auch noch interessanter Fälle - aber auch im Interesse eines vertretbaren Speicherplatzbedarfs und eines günstigen Preises des Pakets - auf das Überprüfen des ganzen Satzes von Eingabegrössen verzichtet. Dies schien uns vertretbar, da das Paket durch Ingenieure eingesetzt wird, die den Sinn ihres ganzen Satzes von Eingaben beurteilen können. Als Nachteil ist in Kauf zu nehmen, dass bei unbedachten Eingaben insbesondere die komplexeren Simulationsprogramme nicht "durchkommen". Speichern Sie deshalb Ihre Daten bei gewagten Eingaben vor dem Beginn der Rechnungen gemäss Abschnitt 1.4.1 ab!



Beachten Sie deshalb, dass Sie ein Einhalten der jeweils eingeblendeten Eingabebereiche nicht von einer ingenieurmässigen Beurteilung Ihrer Eingaben entbindet.

### 1.3.1 Vorgabewerte des Programms

Alle Programme enthalten feste Vorgabewerte. Sie ermöglichen Ihnen, alle Programme ohne Eintippen von Zahlenwerten zu testen. Soweit die Programme dem Buch [W+S] folgen, entsprechen diese Vorgabewerte den Beispielen des Buchs. Dies erlaubt Ihnen ein rascheres Kennenlernen der Programme. Wo die Programme über den Inhalt des Buchs [W+S] hinausgehen, unterstützen Sie die fest eingebauten Vorgabewerte bei der Eingabe eigener Werte.

### 1.3.2 Vorgabewerte aus Datenfiles

Sie haben die Möglichkeit, die Vorgabewerte aus früheren, eigenen Eingaben zu übernehmen. Dazu können Sie alle Eingabedaten auf Datenfiles sichern (--> Abschnitt 1.4.1). Bei späterer Gelegenheit können Sie die früheren Eingaben als neue Vorgabewerte wieder aus den Datenfiles einlesen. Dazu müssen Sie wie folgt vorgehen:

Auf dem Bildschirm erscheint am Anfang jedes Programms die folgende Frage:

Wärmeübergangskoeffizient: EINGABEN

Früher gespeicherte Eingabedaten können zur Wiederverwendung ab einem ASCII-File gelesen werden. Disk --> RAM

Eingabedaten aus File lesen (j/<n>)?

Nach der Eingabe von "j" erscheint das Menü:

Wärmeübergangskoeffizient: EINGABEN

Pfad: F:\TVT\DAT\  
 ROHR\_T\_S.WSU ROHR\_T\_W.WSU ZYLINDQS.WSU ZYLINDQW.WSU

File wählen: ↑/↓/+ /PgUp/PgDn/Home/End + Return (ESC = Abbruch)

In diesem Fenster werden die für das gewählte Programm aus früheren Eingaben zur Verfügung stehenden Datenfiles angezeigt. Sie können das gewünschte Datenfile mit den Cursortasten anwählen und mit der Taste <ENTER> das Einlesen starten. Ab jetzt erhalten Sie in allen Eingabefeldern Ihre früheren Eingaben als Vorgabewerte.

### 1.3.3 Stoffdatenbank

Die Programme mit einer grösseren Anzahl von Stoffwerteingaben erlauben Ihnen die gemeinsame Verwendung einer Stoffdatenbank. Diese können Sie bei Bedarf für jeden Stoff abrufen, ergänzen oder neu anlegen. In den einzelnen Programmen brauchen Sie nur die jeweils benötigten Daten zu bearbeiten. Da die Daten auf Textdateien im ASCII-Format abgespeichert werden, kann die Stoffdatenbank auch durch fremde Stoffwertprogramme oder externe Stoffwertdateien ergänzt werden. Umfangreiche Tabellen zur Übernahme in die Stoffdatenbank finden Sie im Wärmeetlas [WA], Kapitel D. Ausführliche Tabellen mit den Antoine-Konstanten zum Berechnen des Dampfdrucks finden Sie in "Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Sherwood, T.K.: The Properties of Gases and Liquids, 3. Aufl., McGraw-Hill Book Company, New York, London, Düsseldorf 1977. Zur Berechnung von Diffusionskoeffizienten sei auf [WA], S. Da32/34 und [RPP] hingewiesen (siehe Literaturverzeichnis).

Für jeden Stoff erscheint auf dem Bildschirm ein Datenblatt nach dem folgenden Muster (Beispiel aus dem Programm ReKb):

Mindestens 1 Eingabe pro markiertem Stoffwert (2: lineare, 3: quadrat. Interpol.)

Mindestens 1 Eingabe pro markiertem Stoffwert (2: lineare, 3: quadrat. Interpol.)

Leichter flüchtige Komponente			E_ACET_S.SW		
Stoff: Ethylacetat bei Sättigung		Temp. K	350.00	370.00	390.00
F	Dichte	rho_l kg/m <sup>3</sup>	830.00	800.00	770.00
L	dyn. Viskosität	eta_l Pas	2.550E-0004	2.210E-0004	1.930E-0004
Ü	spez. Wärmekapazität	cp_l J/kgK	2100.0	2170.0	2280.0
S	Wärmeleitfähigkeit	lam_l W/mK	0.12500	0.11800	0.11100
S	Diffusionskoeffizient	Dif_l m <sup>2</sup> /s	9.999E-0009		
I	therm. Ausdehnungskoeff.	betaT_l 1/K	0.0016500	0.0017900	0.0019900
G	Oberflächenspannung	sigma_A N/m <sup>2</sup>	0.017400	0.015000	0.012600
	Dichte	rho_g kg/m <sup>3</sup>	3.2000	5.6300	9.5400
G	dyn. Viskosität	eta_g Pas	8.900E-0006	9.500E-0006	1.010E-0005
A	spez. Wärmekapazität	cp_g J/kgK	1460.0	1540.0	1630.0
S	Wärmeleitfähigkeit	lam_g W/mK	0.015800	0.017400	0.019300
	Diffusionskoeffizient	Dif_g m <sup>2</sup> /s	9.999E-0006		
	therm. Ausdehnungskoeff.	betaT_g 1/K			
	spez. Verdampfungsenth.	hl_g J/kg	3.643E+0005	3.475E+0005	3.329E+0005
Antoine-Konstanten für Dampfdruck [W+S], Gl. (5.7)			c1 [Pa]	c2 [Pa/K]	c3 [K]
			21.044	2790.5	-57.150
Molmasse Mm = 88.100 [kg/m <sup>3</sup> ]			Druck p = [Pa] ESC		
F1 Hilfe F6 anderer/ F7 neuer Stoff F8 speichern F9 speichern unter F10 weiter					

Die von den einzelnen Programmen benötigten Stoffwerte werden auf diesen Datenblättern markiert. Die entsprechenden Datenfelder müssen Sie je nach dem Stand Ihrer früheren Einträge ergänzen. Bei den temperaturabhängigen Stoffwerten (bis zur spezifischen Verdampfungsenthalpie) haben Sie die Wahl zwischen einem, zwei oder drei Einträgen. Das Programm rechnet entsprechend mit konstanten, linear oder quadratisch interpolierten Stoffwerten. Achten Sie darauf, dass der Temperaturbereich Ihrer Einträge mit demjenigen in Ihrer Anwendung übereinstimmt.

Bei Programmen mit Formeleingaben (Abschnitt 1.3.4) kann es vorkommen, dass Sie bei vereinfachten Rechnungen nicht alle markierten Stoffwerte benötigen. Im gezeigten Beispiel für das Programm ReKB wird das Bodenverstärkungsverhältnis mit einer Formel bestimmt, die keine Diffusionskoeffizienten benötigt. Da diese Zeilen im Programm ReKB richtigerweise zur Eingabe markiert sind, müssen Sie zur Umgehung der Eingabesicherung einen Eintrag anbringen. Dieser braucht dem tatsächlichen Wert nicht zu entsprechen. Verwenden Sie in solchen Fällen wie im gezeigten Beispiel ( $9.999E-9$  bzw.  $9.999E-6$ ) einen Eintrag, den Sie bei späterer tatsächlicher Verwendung solcher Daten als unzutreffend erkennen können.

Drücken Sie die Funktionstaste F6, falls Sie die Stoffwerte eines anderen, bereits auf einem Datenfile gespeicherten Stoffes benötigen.

Mit der Funktionstaste F7 können Sie Stoffwerte für einen neuen Stoff eingeben. Wenn Sie dies wünschen, werden Sie zunächst zur Eingabe eines Namens für die zu erstellende neue Datei aufgefordert:

---

---

Kurzbezeichnung für den Stoff in diesem Datensatz?

---

---

Änderungen oder Neueingaben können mit der Funktionstaste F8 unter dem bisherigen Dateinamen gespeichert werden. Mit der Funktionstaste F9 kann der Inhalt eines bearbeiteten Datenblatts auch unter einem neuen Dateinamen abgespeichert werden.

Falls Sie die aktuellen Stoffdaten für die Weiterrechnung verwenden wollen, müssen Sie dies mit der Funktionstaste F10 bestätigen.

Da Ihre individuelle Stoffdatenbank im Laufe der Zeit stark anwachsen kann, ist es ratsam, wenn Sie bei der Wahl der Filenamen systematisch vorgehen. In den mitgelieferten Beispielen verwenden wir folgende Anfangs- oder Endzeichenfolgen:

Zeichenfolge	Bedeutung
nnnnnn_L	Stoff nnnnnn, flüssig
nnnnnn_1	Stoff nnnnnn, gasförmig bei 1 bar
nnnnA_20	Stoff nnnn, Absorptiv bei 20 bar
nnnnnn_S	Stoff nnnnnn bei Sättigung

#### 1.3.4 Formeleingaben

Einige Programme (AbsF, RekB, RekF, WSU) stellen die Möglichkeit einer Eingabe von Berechnungsgleichungen in algebraischer Schreibweise zur Verfügung. Diese erfolgt in 2 Schritten, wie nachstehend an einem Beispiel des Programms WSU gezeigt wird.

##### 1.3.4.1 Eingabe der Formelzeichen

Wie aus der nachstehenden Maske erkennbar, werden die Formelzeichen (Symbole) für die im allgemeinen benötigten Grössen auf einer ersten Bildschirmseite vorgeschlagen (hier ein Beispiel für den Stoffübergang). Diese können - wo nicht anders vermerkt - geändert und durch zusätzliche Formelzeichen ergänzt werden.

Stoffübergang Kugelschüttung [W+S], Beispiel 1.7 EINGABE SYMBOLE (1)

Zulässig : Buchstaben, Ziffern  
Unzulässig: Leerzeichen innerhalb der Formelzeichen

Schmidtzahl	:	Sc	
Reynoldszahl	:	Re	
1. Zwischengrösse für Sh	:	ShZwGr1	
2. Zwischengrösse für Sh	:	ShZwGr2	
Sherwoodzahl	:	Sh	
Stoffübergangskoeffizient	:	beta	
charakteristische Länge	:	dp	
Geschwindigkeit	:	w	
Dichte	:	rho	
dynamische Viskosität	:	eta	
Diffusionskoeffizient	:	Dif	
Anzahl zusätzlicher Formelzeichen	=	1?	1

Bei der Eingabe zusätzlicher Formelzeichen ist zu beachten, dass innerhalb der Formelzeichen keine Leerzeichen zulässig sind und dass nicht zwischen Gross- und Kleinschreibung unterschieden wird!

Die Eingabe der zusätzlichen Formelzeichen erfolgt auf der zweiten Bildschirmseite. Im nachstehenden Beispiel wird "eps" für die Porosität einer Schüttung eingegeben.

Stoffübergang Kugelschüttung	[W+S], Beispiel 1.7	EINGABE SYMBOLE (2)
------------------------------	---------------------	---------------------

Schmidtzahl	:	Sc
Reynoldszahl	:	Re
1. Zwischengrösse für Sh	:	ShZwGr1
2. Zwischengrösse für Sh	:	ShZwGr2
Sherwoodzahl	:	Sh
Stoffübergangskoeffizient	:	beta
charakteristische Länge	:	dp
Geschwindigkeit	:	w
Dichte	:	rho
dynamische Viskosität	:	eta
Diffusionskoeffizient	:	Dif
Erste Zusatzgrösse	=	eps ? eps

Bei der Änderung vorgeschlagener und der Eingabe zusätzlicher Formelzeichen ist zu beachten, dass innerhalb der Formelzeichen keine Leerzeichen zulässig sind und dass nicht zwischen Gross- und Kleinschreibung unterschieden wird!

#### 1.3.4 2. Eingabe der Berechnungsgleichungen

Mit den nach 1 festgelegten Symbolen können nun auf der dritten Bildschirmseite die benötigten Berechnungsgleichungen eingegeben werden. Die Eingabe der Formeln muss so erfolgen, dass die Berechnung von oben nach unten der Reihe nach erfolgen kann. Dies wird nachfolgend an einem Beispiel für den Stoffübergang in einer durchströmten Schüttung (Programm WSU) gezeigt:

Stoffübergang Kugelschüttung	[W+S], Beispiel 1.7	EINGABE FORMELN
------------------------------	---------------------	-----------------

Für die nachstehenden Formeleingaben sind nebst den Symbolen
Sc Re ShZwGr1 ShZwGr2 Sh
dp w rho eta Dif eps
die Operatoren + - * / ^
die Funktionen sqrt() ln() log() sin() cos() tan() atn()
und die Konstante pi gestattet.

Definition Schmidtzahl	Sc?	eta/(rho*Dif)
Definition Reynoldszahl	Re:	(1/(1-eps))*(w*rho*dp/eta)
ShZwGr1:		3.72/(Re^(2/3))
ShZwGr2:		1.06/(30+Re^(1/3))
Sh:		(0.12+eps)*Re*Sc^(1/3)*(ShZwGr1+ShZwGr2)
Stoffübergangskoeffizient beta:		((1-eps)/eps)*(Sh*Dif/dp)

Die gewählten Formelzeichen werden zur Erleichterung der Eingabe mit den zulässigen Operatoren, Funktionen und Konstanten in einem Hilfsfenster aufgelistet. Achten Sie darauf, dass Ihre Formelzeichen mit diesen exakt übereinstimmen! Lange Terme werden wie im gezeigten Beispiel zweckmässigerweise über Zwischengrössen (ShZwGr1, ShZwGr2) errechnet.

Die Formeleingabe ist damit abgeschlossen. Den auf diese Weise eingegebenen unabhängigen Variablen können nun in den folgenden Masken Werte zugewiesen werden. Diese können wie die übrigen Eingabedaten und die Berechnungsgleichungen zur späteren Wiederverwendung auf ASCII-Files geschrieben werden.

## 1.4 Ausgaben

### 1.4.1 Sichern der Eingabedaten auf Datenfiles

Damit Sie Ihre Eingaben bei späteren Arbeiten wieder zur Verfügung haben, können Sie diese nach der Frage

Stoffübergang Rohr turbulent WA\_Gb3 Gln.(5) u.(6) AUSGABE (2)

Die Eingabedaten können zur späteren Wiederverwendung auf ein ASCII-File geschrieben werden.

RAM → Disk

Eingabedaten auf File schreiben (j/<n>)?

auf ein Datenfile abspeichern. Zunächst erscheint ein Menü mit den bereits vorhandenen Files:

Stoffübergang Rohr turbulent WA\_Gb3 Gln.(5) u.(6) AUSGABE (2)

Pfad: F:\TVT\DAT\

NEU ROHR\_T\_S.WSU ROHR\_T\_W.WSU ZYLINDQS.WSU ZYLINDQW.WSU

Neues File schreiben

File wählen: ↑/↓/→/PgUp/PgDn/Home/End + Return (ESC = Abbruch)

Sie können daraus eines zum Überschreiben anwählen oder einen neuen Namen eingeben. Beachten Sie dabei, dass Sie keine Verlängerungen (Extensions) eingeben dürfen, da diese für die einzelnen Programme gemäss der folgenden Tabelle festgelegt sind:

Tabelle 1.4: Verzeichnis der Extensions der TVT-Datenfiles		
Extension	Programm	
*.Abs	AbsF	Absorption in Füllkörperkolonnen
*.AUS	alle	Ausgaben aller Programme auf ASCII-Files
*.DeB	DestB	Destillation von Zweistoffgemischen
*.DeM	DestM	Destillation idealer Mehrstoffgemische
*.EiD	EinDa	Eindampfen in Mehrstufenanlagen
*.KoR	KonR	Kondensation reiner Dämpfe an Rohren
*.RbN	WueRb	Wärmeübertrager Rohrbündel: Normdaten Geom.
*.ReB	RekB	Rektifikation in Bodenkolonnen
*.ReF	RekF	Rektifikation in Füllkörperkolonnen
*.Sto	StoBi	Stoffstrombilanzen für Trennapparate
*.SoI	SorIs	Sorptionsisothermen
*.SoR	SorRo	Isotherme Sorption im Festbett
*.SW	gemeinsam	Stoffdatensammlung
*.TKG	TroKg	Kühlgrenztemperatur
*.TrD	TroFDi	Konvektionstrockner diskont. (Fließbett)
*.TrF	TroFli	Konvektionstrockner kont. (Fließbett)
*.TrS	TroFli	Stoffwerte Trocknungsgut
*.TrS	TroFDi	Stoffwerte Trocknungsgut
*.WAb	WueAb	Wärmeübertrager: Abschätzung der Oberfläche
*.WD	WD	Wärmedurchgangskoeffizienten
*.WDr	WueDr	Wärmeübertrager: Doppelrohr
*.WRb	WueRb	Wärmeübertrager: Rohrbündel
*.WRK	WueRbK	Wärmeübertrager: Luftkühlung mit Kondensat.
*.WSU	WSU	Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten
*.VeR	VerR	Verdampfen reiner Stoffe (Behälter, Rohre)
*.Zus	ZusUm	Umrechnung Zusammensetzungsmasse

#### 1.4.2 Ausgabemöglichkeiten

Standardausgabegerät ist zunächst der Bildschirm. Nach der Beendigung eines Programmdurchlaufs haben Sie aber über das Menü

Weitere Ausgaben und Durchrechnungen	
A	Ausgabe auf ASCII-File (in Datenpfad, Filename: *.AUS)
B	Ausgabe direkt auf Drucker mit ASCII-Zeichensatz (an LPT1:)
C	erneute Ausgabe am Bildschirm
D	weitere Durchrechnung
<ESCAPE>	Programm beenden (RAM-Daten gehen verloren!)

die Möglichkeit, Ihre Ausgaben zum späteren Einbau in ein Textprogramm auf ein ASCII-File zu schreiben, direkt am Drucker (mit vollständigem ASCII-Zeichensatz - sonst Umweg über ASCII-File und Textprogramm mit nichtproportionaler Schrift!) auszugeben oder die Bildschirmausgabe erneut anzusehen. Sie können nun auch weitere Varianten rechnen. Auf die Wahl des Menüs "D weitere Durchrechnung" können Sie das Programm veranlassen, mit den bisherigen Eingabedaten als Vorgabewerte wieder von vorne zu beginnen.

### 1.5 Grafische Darstellung der Ergebnisse

Wo sinnvoll, bietet ihnen das Paket TVT die Möglichkeit zur grafischen Darstellung der Ergebnisse mit Ihnen vertrauten Grafikprogrammen. Zu diesem Zweck werden die grafisch darzustellenden Daten auf ein File im ASCII-Format übertragen.

Wir wollen dies am Beispiel des Programms DestB verfolgen. Die Ergebnisse des Vorgabebeispiels werden am Bildschirm in folgender Form ausgegeben:

Zweikomponentendestillation	Ausgaben	[W+S], Bild 5.10/13
-----------------------------	----------	---------------------

GEMISCH: Ethylacetat / Ethanol		DRUCK = 1.000E+0005 [Pa]			
Molenbruch Flüssigkeit Ethylacetat x [-]	Molenbruch Dampf Ethylacetat y [-]	Siede-/Kondensations-Temperatur Tb [K]	Siede-/Kondensations-Temperatur TbC [°C]	relative Flüchtigg. ideal $\alpha_{12\_id}$ [-]	relative Flüchtigg. real $\alpha_{12\_re}$ [-]
0.0000	0.0000	351.15	78.00	1.041	2.415
0.1000	0.1880	348.24	75.09	1.064	2.084
0.2000	0.3087	346.50	73.35	1.078	1.786
0.3000	0.3953	345.48	72.33	1.086	1.526
0.4000	0.4645	344.93	71.78	1.091	1.301
0.5000	0.5258	344.72	71.57	1.093	1.109
0.6000	0.5863	344.80	71.65	1.092	0.945
0.7000	0.6525	345.19	72.04	1.089	0.805
0.8000	0.7326	345.99	72.84	1.082	0.685
0.9000	0.8395	347.41	74.26	1.071	0.581
1.0000	1.0000	349.91	76.76	1.051	0.490

<Weiter mit beliebiger Taste>

Anschliessend erscheint am Bildschirm die Frage

Zum Aufzeichnen der errechneten Abhängigkeiten mit einem fremden Plot-Programm kann ein ASCII-File geschrieben werden. Dieses enthält nur die Daten der angezeigten Tabellen (ohne Texte und Rahmen).
Ist ein ASCII-Plotfile erwünscht (j/<n>)?

Auf die Antwort "j" erscheint ein Menü mit den bereits vorhandenen Plot-Files. Sie können eines überschreiben oder einen neuen Namen eingeben. Das Programm schreibt nun die oben gezeigten Daten ohne Rahmen und Kommentare in das folgende ASCII-File:

```
0.0000 0.0000 351.15 78.00 1.041 2.415
0.1000 0.1880 348.24 75.09 1.064 2.084
0.2000 0.3087 346.50 73.35 1.078 1.786
0.3000 0.3953 345.48 72.33 1.086 1.526
0.4000 0.4645 344.93 71.78 1.091 1.301
```



0.5000	0.5258	344.72	71.57	1.093	1.109
0.6000	0.5863	344.80	71.65	1.092	0.945
0.7000	0.6525	345.19	72.04	1.089	0.805
0.8000	0.7326	345.99	72.84	1.082	0.685
0.9000	0.8395	347.41	74.26	1.071	0.581
1.0000	1.0000	349.91	76.76	1.051	0.490

Ab diesem können die Daten in ein fremdes Grafikprogramm eingelesen und aufgezeichnet werden: Bild 2.

Siede- und Taulinie, Default DestB

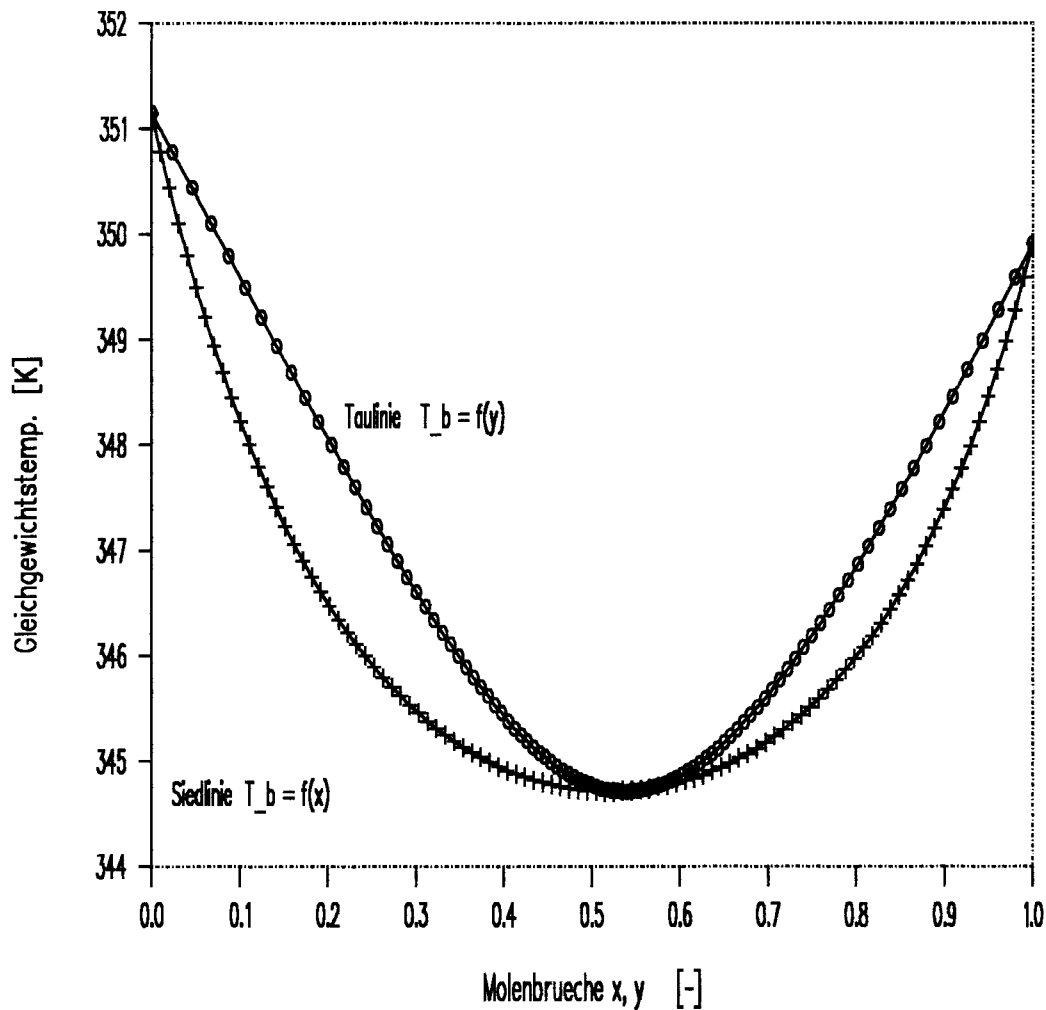


Bild 2: Siede- und Taulinie für das Vorgabebeispiel des Programms DestB (mit dem Grafik-Programm Tech-Graph-Pad der Firma Binary Engineering aufgezeichnet).

## 2 Informationen zu den einzelnen Programmen des Pakets

Im folgenden lernen Sie die einzelnen Programme anhand beispielhafter Ein- und Ausgaben (Bildschirmkopien im Kleindruck) kennen. Am besten lassen Sie die jeweils benötigten Programme vor dem Ersteinsatz für Ihre Probleme parallel zur Durchsicht der folgenden Erläuterungen laufen. Dank der in alle Programme eingebauten Vorgabewerte brauchen Sie dazu fast nur die <ENTER>- oder <RETURN>-Taste zu drücken. Die am Anfang jedes Programmdurchlaufs erscheinenden Benutzerinformationen geben Ihnen einen ersten Überblick zu dem, was die einzelnen Programme zu leisten vermögen.

Beim späterem Einsatz der Programme erleichtert die Wiedergabe der Ein- und Ausgaben in diesem zweiten Teil die Orientierung in den sich oft über viele Bildschirmseiten erstreckenden Programmen.

### 2.1 ZusUm Umrechnen von Zusammensetzungsmassen

Programm: ZusUm		Daten: *.Zus
UMRECHNEN DER FOLGENDEN ZUSAMMENSETZUNGSMASSE		
Massenbruch (Massenanteil)	$x_{mi} = M_i / M$	
Molenbruch (Molanteil)	$x_i = N_i / N$	
Beladung (Massenbeladung)	$X_{mi} = M_i / M_k$	
Molbeladung	$X_i = N_i / N_k$	
Konzentration	$c_i = M_i / V$	
Molkonzentration	$c^*_i = N_i / V$	
Partialdruck (ideales Gasgemisch)	$p_i = N_i * R * T / V$	
Bedeutung der Symbole:		
M	Masse	[kg]
N	Stoffmenge (Molzahl)	[kmol]
R	universelle Gaskonstante	8314.3 [J/kmolK]
T	Temperatur	[K]
V	Volumen	[m <sup>3</sup> ]
Bedeutung der Indizes:		
i	Komponente	
k	Trägerkomponente	
m	massenbezogen	
Näheres in [W+S], Abschnitt 1.1		

Zunächst können Sie die gegebenen und die gesuchten Zusammensetzungsmasse auswählen. Die Umrechnung bei Gasen erfolgt - wo nötig - mit dem Gesetz für ideale Gase. Auch die Partialdrücke gelten für ideale Gase.

GEGEBENE ZUSAMMENSETZUNGSMASSE (Menü 1)	
A	Massenbruch
B	Molenbruch
C	Beladung
D	Molbeladung
E	Konzentration
F	Molkonzentration
G	Partialdruck
<ESCAPE>	

GESUCHTE ZUSAMMENSETZUNGSMASSE (Menü 2)	
A	Massenbruch
B	Molenbruch
C	Beladung
D	Molbeladung
E	Konzentration
F	Molkonzentration
G	Partialdruck (nur bei Gas)
<ESCAPE>	

Umrechnung für ...	
A	Gase
B	Flüssigkeiten
<ESCAPE> zurück zum Menü 1	

Mit der Anzahl Komponenten des Gemischs müssen Sie je nach Fall auch den Druck und die Temperatur eingeben.

Anzahl Stoffe	n	[-]	=	5?	5
Gesamtdruck	p	[Pa]	=	9.500E+0004	
Temperatur	T	[K]	=	293.1	

In der nächsten Maske müssen Sie die gegebenen Größen für jede Komponente eingeben. Beachten Sie, dass bei Massen- und Molenbrüchen die Summe Eins ergeben muss. Als Eingabeerleichterung kann in diesen Fällen für die letzte Komponente Null eingegeben werden. Der entsprechende Massen- oder Molenbruch wird dann automatisch ergänzt.

Stoff-Nr	Molmasse	Massenbruch
[-]	[kg/kmol]	[-]
Stoff 1	18.00000	0.1000000
Stoff 2	29.00000	0.3000000
Stoff 3	16.00000	0.2000000
Stoff 4	28.00000	0.2000000
Stoff 5	12.00000	0.2000000

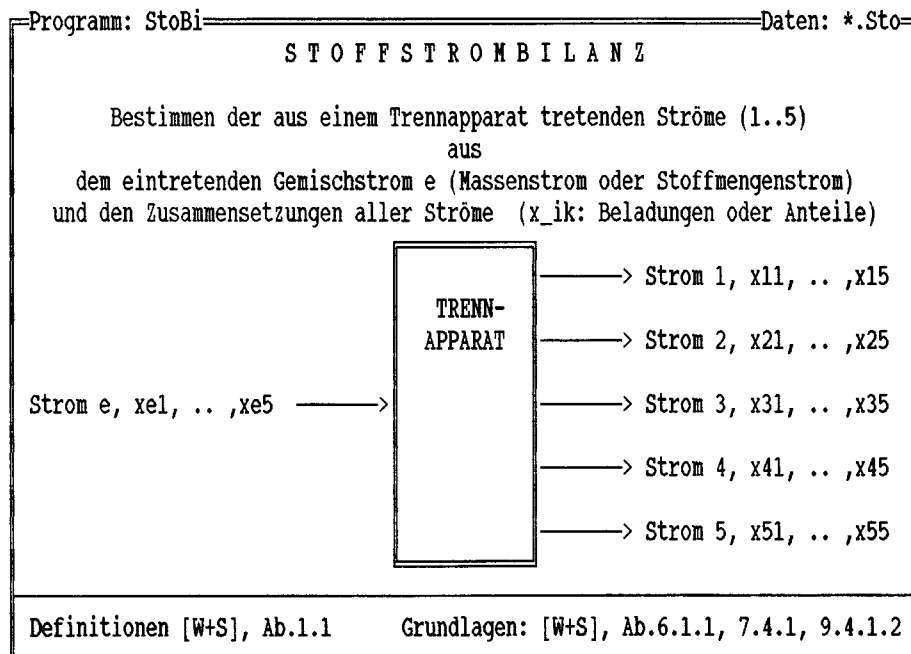
Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt in der nachstehenden Maske zusammen mit den Eingabedaten:

AUSGABEN für Massenbruch --> Partialdruck für Gase				Beispiel
Stoff-Nr [-]	Molmasse [kg/kmol] Eingabe	Massenbruch [-] Eingabe	Partialdruck [Pa] Ausgabe	
Stoff 1	18.00000	0.1000000	10108.77	
Stoff 2	29.00000	0.3000000	18823.22	
Stoff 3	16.00000	0.2000000	22744.73	
Stoff 4	28.00000	0.2000000	12996.99	
Stoff 5	12.00000	0.2000000	30326.30	

Druck = 9.500E+0004 [Pa]

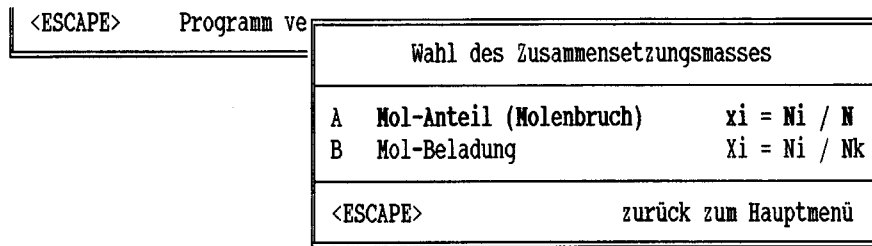
Temperatur = 293.15 [K]

## 2.2 StoBi Stoffstrombilanzen für Trennapparate



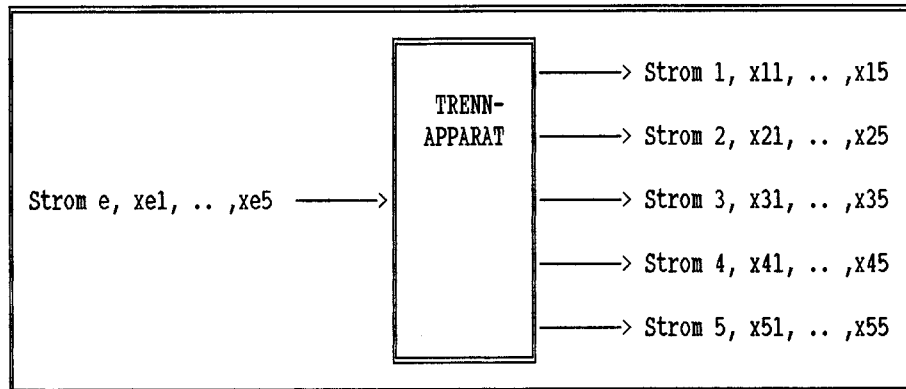
Geben Sie nach der Wahl von Massen- oder Stoffmengenströmen und von Anteilen oder Beladungen ([W+S], Abschnitt 1.1; Umrechnung: Programm ZusUm)

Wahl der Stromart		
<b>M</b>	Massenstrom	[kg/s]
<b>N</b>	Stoffmengenstrom	[kmol/s]



die Größe des eintretenden Stroms und die Anzahl Komponenten des Gemischs (= Anzahl austretender Ströme) ein.

Eingabe der Ströme | Vorgabe-Beispiel



Eintretendes Gemisch: Stoffmengenstrom [kmol/s] = 1.000? 1.000  
 Anzahl Komponenten [-] = 5

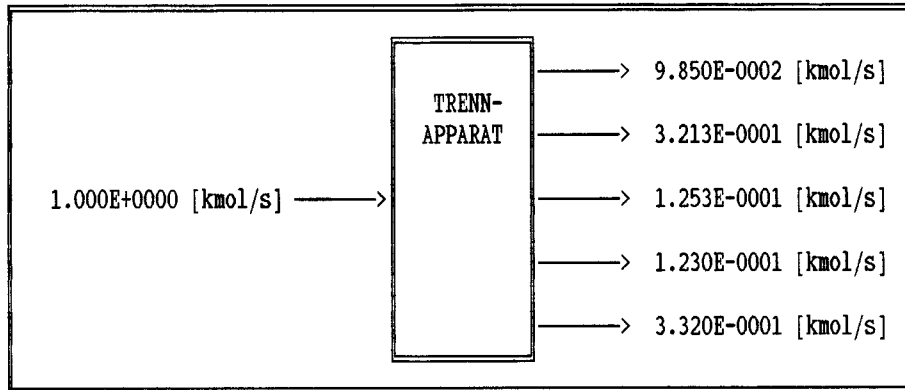
Nun müssen Sie die Zusammensetzungen für alle Ströme in den gewählten Massen eingeben. Dabei ist zu beachten, dass die Summe der Massen- oder Molanteile für jeden Strom 1 ergeben muss.

Eingabe des Molanteils für alle Komponenten | Vorgabe-Beispiel

Anteil der	Strom ein	Strom 1 aus	Strom 2 aus	Strom 3 aus	Strom 4 aus	Strom 5 aus
Komponente 1	0.100000	0.950000	0.020000	0.000000	0.000000	0.000000
Komponente 2	0.300000	0.030000	0.900000	0.010000	0.000000	0.020000
Komponente 3	0.150000	0.020000	0.040000	0.980000	0.020000	0.030000
Komponente 4	0.150000	0.000000	0.040000	0.010000	0.970000	0.050000
Komponente 5	0.300000	0.000000	0.000000	0.000000	0.010000	0.900000

Die Strombilanzen für alle Komponenten ergeben ein lineares Gleichungssystem. Dieses wird nach den unbekanntenen Strömen am Austritt aus dem Trennapparat aufgelöst. Die Ergebnisse werden wie folgt dargestellt:

ERGEBNISSE: austretende Stoffmengenströme | Vorgabe-Beispiel



Molanteile in ein- und austretenden Strömen		Vorgabe-Beispiel				
Anteil der	Strom ein	Strom 1 aus	Strom 2 aus	Strom 3 aus	Strom 4 aus	Strom 5 aus
Komponente 1	0.100000	0.950000	0.020000	0.000000	0.000000	0.000000
Komponente 2	0.300000	0.030000	0.900000	0.010000	0.000000	0.020000
Komponente 3	0.150000	0.020000	0.040000	0.980000	0.020000	0.030000
Komponente 4	0.150000	0.000000	0.040000	0.010000	0.970000	0.050000
Komponente 5	0.300000	0.000000	0.000000	0.000000	0.010000	0.900000

### 2.3 WSU Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten

Programm: Wsu | Daten: \*.WSU

WÄRME- UND STOFFÜBERGANGSKOEFFIZIENTEN BEI ERZWUNGENER KONVEKTION

aus vom Anwender einzugebenden Gleichungen

Die Zahlenwerte der Einflussgrößen und die eingegebenen Berechnungsgleichungen lassen sich editieren und auf Dateien abspeichern.

Grundlagen: [W+S], Abschn. 1.4.1 | Beispiele: [W+S], 1.7 und 2.1

Wählen Sie als erstes zwischen einem Stoff- oder einem Wärmeübergang:

Übergangsart	
W	Wärmeübergang
S	Stoffübergang
<ESCAPE>	Programm verlassen

Nach dem Einlesen von Vorgabewerten aus vorhandenen Datenfiles, der Eingabe von Fall- und Projektbezeichnungen müssen Sie die zu verwendenden Formelzeichen eingeben. Die vorgeschlagenen Symbole können Sie ändern und durch zusätzliche Formelzeichen ergänzen (Formeleingabe --> siehe Abschnitt 1.3.4).

Stoffübergang Kugelschüttung [W+S], Beispiel 1.7 EINGABE SYMBOLE (1)

Zulässig : Buchstaben, Ziffern  
Unzulässig: Leerzeichen innerhalb der Formelzeichen

Schmidtzahl	:	Sc
Reynoldszahl	:	Re
1. Zwischengröße für Sh	:	ShZwGr1
2. Zwischengröße für Sh	:	ShZwGr2
Sherwoodzahl	:	Sh
Stoffübergangskoeffizient	:	beta
charakteristische Länge	:	dp
Geschwindigkeit	:	w
Dichte	:	rho
dynamische Viskosität	:	eta
Diffusionskoeffizient	:	Dif

Anzahl zusätzlicher Formelzeichen = 1? 1

Im nachstehenden Beispiel wird als zusätzliches Symbol eps für die Porosität der Schüttung eingegeben:

Stoffübergang Kugelschüttung [W+S], Beispiel 1.7 EINGABE SYMBOLE (2)

Schmidtzahl	:	Sc
Reynoldszahl	:	Re
1. Zwischengröße für Sh	:	ShZwGr1
2. Zwischengröße für Sh	:	ShZwGr2
Sherwoodzahl	:	Sh
Stoffübergangskoeffizient	:	beta
charakteristische Länge	:	dp
Geschwindigkeit	:	w
Dichte	:	rho
dynamische Viskosität	:	eta
Diffusionskoeffizient	:	Dif
Erste Zusatzgröße	=	eps ? eps

Geben Sie anschliessend die Formeln ein (Formeleingabe --> siehe Abschnitt 1.3.4).

Stoffübergang Kugelschüttung	[W+S], Beispiel 1.7	EINGABE FORMELN
------------------------------	---------------------	-----------------

Für die nachstehenden Formeleingaben sind nebst den Symbolen	Sc	Re	ShZwGr1	ShZwGr2	Sh		
	dp	w	rho	eta	Dif	eps	
die Operatoren	+	-	*	/	^		
die Funktionen	sqrt()	ln()	log()	sin()	cos()	tan()	atn()
und die Konstante	pi	gestattet.					

Definition Schmidtzahl	Sc?	$\frac{\eta}{\rho \cdot \text{Dif}}$
Definition Reynoldszahl	Re:	$\frac{1}{(1-\epsilon)} \cdot \left( \frac{w \cdot \rho \cdot \text{dp}}{\eta} \right)$
ShZwGr1:		$3.72 / (\text{Re}^{2/3})$
ShZwGr2:		$1.06 / (30 + \text{Re}^{1/3})$
Sh:		$(0.12 + \epsilon) \cdot \text{Re} \cdot \text{Sc}^{1/3} \cdot (\text{ShZwGr1} + \text{ShZwGr2})$
Stoffübergangskoeffizient beta:		$\frac{(1-\epsilon) \cdot \text{Sh} \cdot \text{Dif}}{\text{dp}}$

Die Formeleingabe ist damit abgeschlossen. Nun können Sie den einzelnen Einflussgrössen Werte zuweisen. Vorschlagswerte für die Stoffwerte können Sie auf Wunsch auch aus Ihrer Stoffdatenbank übernehmen (--> Abschnitt 1.1.3):

Eingabemodus für Stoffwerte	
D	direkte Eingabe der Stoffwerte
F	Vorgabewerte aus Stoffwertdatei
<ESCAPE>	zurück

Wahl des Aggregatzustands	
F	flüssig
G	gasförmig
<ESCAPE>	zurück

Temperatur zum Bestimmen der Stoffwerte T [K] = 332.00? 332.00

Stoffübergang Kugelschüttung	[W+S], Beispiel 1.7	EINGABE ZAHLENWERTE
------------------------------	---------------------	---------------------

charakteristische Länge	dp	[m] =	0.006000?	0.006000
Geschwindigkeit	w	[m/s] =	2.000	
Dichte	rho	[kg/m3] =	1.190	
dynamische Viskosität	eta	[Pas] =	1.800E-0005	
Diffusionskoeffizient	Dif	[m/s] =	2.780E-0005	
Erste Zusatzgrösse	eps	[ ] =	0.3700	

In der Ausgabe werden die benützten Berechnungsgleichungen nochmals zusammengestellt:



Stoffübergang Kugelschüttung [W+S], Beispiel 1.7 AUSGABE (1)

Zusammenstellung der benützten Berechnungsgleichungen:

$$\begin{aligned} Sc &= \eta / (\rho \cdot Dif) \\ Re &= (1 / (1 - \epsilon)) \cdot (w \cdot \rho \cdot dp / \eta) \\ ShZwGr1 &= 3.72 / (Re^{2/3}) \\ ShZwGr2 &= 1.06 / (30 + Re^{1/3}) \\ Sh &= (0.12 + \epsilon) \cdot Re \cdot Sc^{1/3} \cdot (ShZwGr1 + ShZwGr2) \\ \beta &= ((1 - \epsilon) / \epsilon) \cdot (Sh \cdot Dif / dp) \end{aligned}$$

Anschliessend werden die Resultate mit den Einflussgrössen ausgegeben. Da dieses Programm keine Gültigkeitsbereiche der Berechnungsgleichungen enthält, müssen Sie überprüfen, ob diese nicht verletzt werden.

Stoffübergang Kugelschüttung [W+S], Beispiel 1.7 AUSGABE (2)

EINGABEDATEN:

charakteristische Länge	dp	[m]	=	0.006000
Geschwindigkeit	w	[m/s]	=	2.000
Dichte	rho	[kg/m <sup>3</sup> ]	=	1.190
dynamische Viskosität	eta	[Pas]	=	1.800E-0005
Diffusionskoeffizient	Dif	[m/s]	=	2.780E-0005
Erste Zusatzgrösse	eps	[ ]	=	0.3700

BERECHNUNGSERGEBNISSE:

Schmidtzahl	Sc	[-]	=	0.5441
Reynoldszahl	Re	[-]	=	1259
1. Zwischengrösse für Sh	ShZwGr1	[-]	=	0.03190
2. Zwischengrösse für Sh	ShZwGr2	[-]	=	0.02598
Sherwoodzahl	Sh	[-]	=	29.15
Stoffübergangskoeffizient	beta	[m/s]	=	0.2301

ACHTUNG: Gültigkeitsbereiche der benützten Beziehungen überprüfen!

## 2.4 WD Wärmedurchgangskoeffizienten

Programm: WD		Daten: *.WD	
<b>WÄRME DURCHGANGSKOEFFIZIENTEN</b> BEI FREIER UND ERZWUNGENER KONVEKTION			
GRUNDLAGEN: [W+S], Kapitel 1/2			
WÄRMEÜBERGANGSKOEFFIZIENTEN aus folgenden Unterlagen:			
- erzwungene Konvektion:	Hohlzylinder, innen (Rohr)	[WA],	S.Gb1/5
	Platte, eben	[WA],	S.Ga1/2
	Ringspalt	[WA],	S.Gd1/2
	Zylinder, querangeströmt	[WA],	S.Ge1
	Zylinder, längsangeströmt	[WA],	S.Ga1/2
- freie Konvektion:	Hohlzylinder, horizontal	[HEDH],	Abschn. 2.5
	Hohlzylinder, vertikal	[HEDH],	Abschn. 2.5
	Platte, eben, horizontal	[WA],	S.Fa1/4
	Platte, eben, vertikal	[WA],	S.Fa1/2
	Ringspalt, horizontal	[WA],	S.Fc3
	Ringspalt, vertikal	[WA],	S.Fc3/4
	Zylinder, horizontal	[WA],	S.Fa4
	Zylinder, vertikal	[WA],	S.Fa2

Wählen Sie zunächst die zu untersuchenden Anordnungen aus. Die Eingabe der Anströmrichtung ist nur für die erzwungene Konvektion von Bedeutung. Bei freier Konvektion wird diese Eingabe ignoriert. Für die gewählte Anordnung müssen Sie anschliessend die benötigten Abmessungen angeben:

Geometrie	
A	ebene Wand, vertikal
B	ebene Wand, horizontal
C	Hohlzylinder vertikal
D	Hohlzylinder horizontal
E	Ringspalt vertikal
F	Ringspalt horizontal
<ESCAPE> Programm verlassen	

Anströmrichtung aussen	
L	längs der Zylinderachse
Q	quer zur Zylinderachse
<ESCAPE> zurück	

Länge des Hohlzylinders	L	[m] =	2.000?	2.000
Innendurchmesser	d_i	[m] =	0.03500	

Die Zwischenwand kann aus ein bis vier Schichten bestehen. Ihre Dicken und Wärmeleitfähigkeiten können Sie in der folgenden Maske eingeben. Die Eingaben für die einzelnen Schichten haben von innen nach aussen zu erfolgen. Für nicht vorhandene Schichten (im nachstehenden Beispiel existiert keine vierte Schicht) ist die Wand-

stärke mit Null einzugeben. Die Wärmeleitfähigkeit nicht existierender Schichten wird selbstverständlich ignoriert.

Horizontaler Hohlzylinder ZWISCHENWAND

Dicken nicht vorhandener Schichten  
ab entsprechender Schicht Null setzen

Dicke	innerste Wandschicht	s_1	[m] =	1.000E-0003	
Dicke	2. Wandschicht	s_2	[m] =	0.002000	
Dicke	3. Wandschicht	s_3	[m] =	1.000E-0003	
Dicke	äusserste Wandschicht	s_4	[m] =	0.0000	
Wärmeleitfähigkeit	innerste Sch.	lam_1	[W/mK] =	1.000	
Wärmeleitfähigkeit	2. Wandschicht	lam_2	[W/mK] =	55.00?	55.00
Wärmeleitfähigkeit	3. Wandschicht	lam_3	[W/mK] =	1.000	
Wärmeleitfähigkeit	äusserste Sch.	lam_4	[W/mK] =	1.000	

Nun erfolgt die Auswahl der Konvektionsart, die Stoffwert- und die Temperatureingabe für jede Seite der Zwischenwand getrennt. Bei der Wahl "U freie UND erzwungene Konvektion" werden die Wärmeübergangskoeffizienten auf der betreffenden Seite für freie Konvektion und für erzwungene Konvektion berechnet. Sie können dann den Ihnen richtig erscheinenden Wert selbst wählen. Das nachstehende Beispiel zeigt eine direkte Eingabe aller Stoffwerte für das Menü "B BELIEBIGES Medium Direkteingabe". Die Stoffwerte sind für eine Mitteltemperatur zwischen Wandoberfläche und Medium einzugeben. Bei erzwungener Konvektion müssen Sie in dieser Maske auch die Strömungsgeschwindigkeit eingeben. Für geschlossene Querschnitte wird zur Orientierung der sich damit ergebende Volumenstrom eingeblendet.

Horizontaler Hohlzylinder INNENSEITE

Konvektionsart	Stoffwerte für
F FREIE Konvektion	W WASSER im Temperaturbereich 273..373 K
E ERZWUNGENE Konvektion	L LUFT im Temperaturbereich 273..473 K
U freie UND erzwungene Ko	B BELIEBIGES Medium Direkteingabe
	F BELIEBIGE FLÜSSIGKEIT über Stoffwertdatei
	G BELIEBIGES GAS über Stoffwertdatei
<ESCAPE>	<ESCAPE> zurück

Fluidtemperatur	T	[K] =	323.00?	323.00
Dichte	rho	[kg/m3] =	983.00	
dynamische Viskosität	eta	[Pas] =	4.720E-0004	
Wärmeleitfähigkeit	lam	[W/mK] =	0.65000	
spezifische Wärmekapazität	cp	[J/kg] =	4180.0	
thermischer Ausdehnungskoeffizient	BT	[1/K] =	5.260E-0004	
Strömungsgeschwindigkeit	w	[m/s] =	0.75000	
Eingabedaten ergeben einen Volumenstrom von			7.216E-0004	m3/s

Die Stoffwerte können Sie auch aus der Stoffdatenbank einlesen (--> Abschnitt 1.1.3). Wie für Wasser und Luft brauchen Sie dann nur noch die Temperatur und - bei erzwungener Konvektion - die Strömungsgeschwindigkeit einzugeben. Bei Luft werden zusätzlich die Temperatur und die Wassermassenbeladung ( --> Programm ZusUm) benötigt.

Konvektionsart		Stoffwerte für	
F	FREIE Konvektion	W	WASSER im Temperaturbereich 273..373 K
E	ERZWUNGENE Konvektion	L	LUFT im Temperaturbereich 273..473 K
U	freie UND erzwungene Ko	B	BELIEBIGES Medium direkte Eingabe
<ESCAPE>		F	BELIEBIGE FLÜSSIGKEIT über Stoffwertdatei
		G	BELIEBIGES GAS über Stoffwertdatei
		<ESCAPE>	zurück

Temperatur	T	[K] =	303.00?	303.00
Strömungsgeschwindigkeit	w	[m/s] =	0.50000	

Falls eine Durchrechnung mit freier und erzwungener Konvektion auf einer oder auf beiden Seiten der Zwischenwand gewünscht wurde, erscheint das folgende Menü mit den Werten der für beide Konvektionsarten berechneten Wärmeübergangskoeffizienten:

Auswahl Konvektionsarten auf Innen- und Aussenseite	Vorgabe-Beispiel
---	------------------

Abkürzungen : fK = freie Konvektion ; eK = erzwungene Konvektion

1	$\alpha$ -innen (eK)	[W/m <sup>2</sup> K] =	4855.6
	$\alpha$ -aussen (eK)	[W/m <sup>2</sup> K] =	3848.0
2	$\alpha$ -innen (fK)	[W/m <sup>2</sup> K] =	751.3
	$\alpha$ -aussen (eK)	[W/m <sup>2</sup> K] =	3848.0
3	$\alpha$ -innen (eK)	[W/m <sup>2</sup> K] =	4855.6
	$\alpha$ -aussen (fK)	[W/m <sup>2</sup> K] =	553.1
4	$\alpha$ -innen (fK)	[W/m <sup>2</sup> K] =	698.8
	$\alpha$ -aussen (fK)	[W/m <sup>2</sup> K] =	513.3

Gewünschte Kombination für Weiterrechnung = 1? 1

Die für die weitere Rechnung gewünschte Kombination können Sie daraus durch Eingabe der entsprechenden Nummer wählen.

Auf den nächsten drei Bildschirmseiten werden die Eingabedaten und die Ergebnisse der Rechnung wiedergegeben.

Horizontaler Hohlzylinder   Vorgabe-Beispiel
--

## AUSGABE 1/3: Innen erzwungene Konvektion - aussen erzwungene Konvektion

Länge des Hohlzylinders	L	[m]	=	2.0000
Innendurchmesser	d_i	[m]	=	0.035000
Dicke innere Schicht	s_1	[m]	=	1.000E-0003
Dicke Zwischenschicht	s_2	[m]	=	0.0020000
Dicke äussere Schicht	s_3	[m]	=	1.000E-0003
Wärmeleitfähigkeit innere Schicht	lam_1	[W/mK]	=	1.0000
Wärmeleitfähigkeit Zwischenschicht	lam_2	[W/mK]	=	55.000
Wärmeleitfähigkeit äussere Schicht	lam_3	[W/mK]	=	1.0000

## AUSGABE 2/3: Innen erzwungene Konvektion - aussen erzwungene Konvektion

## STOFFWERTE INNEN:

Fluidtemperatur	T	[K]	=	323.00
Dichte	rho	[kg/m <sup>3</sup> ]	=	983.00
dynamische Viskosität	eta	[Pas]	=	4.720E-0004
spezifische Wärmekapazität	cp	[J/kg]	=	4180.0
Wärmeleitfähigkeit	lam	[W/mK]	=	0.65000
Prandtlzahl	Pr	[-]	=	3.0353

## STOFFWERTE AUSSEN:

Fluidtemperatur	T	[K]	=	303.00
Dichte	rho	[kg/m <sup>3</sup> ]	=	995.41
dynamische Viskosität	eta	[Pas]	=	8.642E-0004
spezifische Wärmekapazität	cp	[J/kg]	=	4182.2
Wärmeleitfähigkeit	lam	[W/mK]	=	0.61431
Prandtlzahl	Pr	[-]	=	5.8831

## AUSGABE 3/3: Innen erzwungene Konvektion - aussen erzwungene Konvektion

## WÄRMEÜBERGANG INNEN:

Strömungsgeschwindigkeit	w	[m/s]	=	0.75000
Reynoldszahl	Re	[-]	=	5.467E+0004
Nusseltzahl	Nu	[-]	=	261.45
Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> K]	=	4855.6

## WÄRMEÜBERGANG AUSSEN:

Strömungsgeschwindigkeit	w	[m/s]	=	0.50000
Reynoldszahl	Re	[-]	=	3.890E+0004
Nusseltzahl	Nu	[-]	=	423.10
Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> K]	=	3848.0

## WÄRMEDURCHGANG:

Wärmedurchgangskoeffizient	k	[W/m <sup>2</sup> K]	=	360.78
übertragener Wärmestrom	Qst	[W]	=	1949.5
übertragene Wärmestromdichte	qstd	[W/m <sup>2</sup> ]	=	7215.6

Falls Sie ausserhalb der Gültigkeitsgrenzen der jeweiligen Berechnungsgleichungen arbeiten, erscheinen während der Rechnung und in der Ausgabe entsprechende Warnungen.

## 2.5 WueAb Wärmeübertrager: Abschätzen der Oberfläche

Programm: WueAb	Daten: *.WUA
ABSCHÄTZUNG DER ÜBERTRAGUNGSFLÄCHE VON WÄRMEÜBERTRAGERN für die Grenzfälle Gleich- und Gegenstrom und für allgemeine Stromführung	
Grundlagen: [W+S], Kapitel 2	Beispiele: [W+S], Bsp. 2.2 und 2.3

Zunächst sind die spezifischen Wärmekapazitäten der beiden Medien einzugeben. Sie können dabei Ihre Stoffdatenbank (--> Abschnitt 1.3.3) verwenden, die Werte für Wasser und Luft berechnen lassen oder die spezifischen Wärmekapazitäten direkt eingeben.

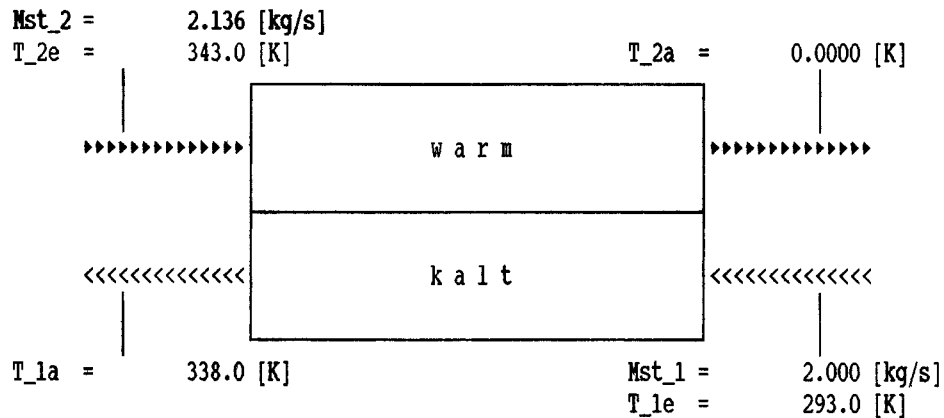
Eingabe Wärmekapazitäten | [W+S], Beispiel 2.2

spez. Wärmekapazität wärmeres Medium	
D Direktes Eingeben E Einlesen aus Stoffdatenfile W Berechnung für Wasser (273..373 K) L Berechnung für Luft (273..473 K)	
<ESCAPE>	spez. Wärmekapazität kälteres Medium
D Direktes Eingeben E Einlesen aus Stoffdatenfile W Berechnung für Wasser (273..373 K) L Berechnung für Luft (273..473 K)	
<ESCAPE>	zurück

spezifische Wärmekapazität wärmeres Medium [J/kgK] = 4190.0  
 spezifische Wärmekapazität kälteres Medium [J/kgK] = 1790.0? 1790.0

Nun sind die Bilanzgrößen einzugeben:

Eingabe von 5 der 6 Bilanzgrößen | [W+S], Beispiel 2.2



Die aus der Wärmestrombilanz zu berechnende Größe ist Null zu setzen.

Die Legenden zu den einzelnen Größen erscheinen während der Eingabe. Die sechs Bilanzgrößen sind im stationären Betrieb durch die Wärmestrombilanz miteinander verknüpft. Deshalb dürfen Sie in dieser Maske nur fünf Bilanzgrößen eingeben. Die aus der Wärmestrombilanz zu bestimmende sechste Größe ist in dieser Eingabe Null zu setzen. Sie wird unter Vernachlässigung von Wärmeverlusten aus der Wärmestrombilanz [W+S], Gl.(2.11) berechnet.

Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten: Programm WD in diesem Paket

Anhaltswerte für Wärmedurchgangskoeffizienten in:  
 [W+S], Seite 33 und ausführlicher in [WA], Seiten Cb6/Cb8

[WA] VDI-Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang,  
 5.Aufl., VDI-Verlag, Düsseldorf 1988.

Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  [W/m<sup>2</sup>K] = 500.0

Stromführung	
G	Grenzfälle: reiner Gegenstrom und reiner Gleichstrom
A	Allgemeine Stromführung (mit Diagrammen in [WA],Ca18/32)
<ESCAPE>	zurück

Nun können Sie die Stromführung wählen. Sie haben dabei folgende Möglichkeiten:

- G Grenzfälle: reiner Gegenstrom und reiner Gleichstrom  
 Bei dieser Wahl werden die NTU-Werte nach [W+S], Gl.(2.27) für Gleichstrom und nach [W+S], Gl.(2.25) für Gegenstrom berechnet. Die Rechnung für Gleichstrom wird nur durchgeführt, wenn die eingegeben Bilanzgrößen eine Gleichstromführung erlauben.

## A Allgemeine Stromführung (mit Diagrammen in [WA], S. Ca18/32)

Die Berechnung der erforderlichen Wärmeübertragungsfläche für eine allgemeine Stromführung stützt sich auf die Diagramme in [WA], S. Ca18/32. Den NTU-Wert können Sie daraus mit Hilfe der folgenden Eingabemaske bestimmen:

NTU-Wert für allgemeine Stromführung | [W+S], Beispiel 2.2

Der NTU-Wert für zahlreiche Stromführungen kann aus den Diagrammen in [WA], Seiten Ca17 bis Ca 32 mit folgenden Werten bestimmt werden.

Abszisse ( $\phi_{2,1}$ ) = 0.900

Ordinate ( $\phi_{1,2}$ ) = 0.360

Die Diagrammkurven für den NTU-Wert sind im [WA] mit dem griechischen Psi beschriftet.

[WA] VDI-Wärmeatlas - Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 5. Aufl., VDI-Verlag, Düsseldorf 1988.

NTU-Wert ( = Psi) aus [WA]-Diagramm [-] = 4.000? 4.000

3.094 ≤ Eingabebereich ≤ 20.00

Das Programm WueAb erleichtert die Verwendung der Diagramme durch Berechnen von Abszissen und Ordinaten und mit der Angabe der Grenzen für den Eingabebereich. Als untere Grenze wird der NTU-Wert für Gegenstrom gesetzt. Die obere Grenze ist der NTU-Wert für Gleichstrom, wenn ein solcher möglich ist.

Das Programm WueAb liefert die nachstehende Ausgabe:

Ausgaben Abschätzung Wärmeübertrager | [W+S], Beispiel 2.2

Temperatur warmes Medium ein	T2e	[K]	=	343.0
Temperatur warmes Medium aus	T2a	[K]	=	325.0
Temperatur kaltes Medium ein	T1e	[K]	=	293.0
Temperatur kaltes Medium aus	T1a	[K]	=	338.0
Massenstrom kaltes Medium	Mst1	[kg/s]	=	2.000
Massenstrom warmes Medium	Mst2	[kg/s]	=	2.136
Mittlere Temperatur kaltes Medium	T1_m	[K]	=	315.5
Mittlere Temperatur warmes Medium	T2_m	[K]	=	334.0
spezifische Wärmekapazität kaltes Medium	cp1	[J/kgK]	=	1790
spezifische Wärmekapazität warmes Medium	cp2	[J/kgK]	=	4190
Stromverhältnis	phi	[-]	=	0.4000
maximales Stromverhältnis Gegenstrom	phiMaxGe	[-]	=	1.111
maximales Stromverhältnis Gleichstrom	phiMaxGl	[-]	=	0.1111



übertragener Wärmestrom	Qst	[W]	=	1.611E+0005
NTU-Wert für Gegenstrom	NTUGe	[-]	=	3.094
Wärmedurchgangskoeffizient	k	[W/m <sup>2</sup> K]	=	500.0
Erforderliche Oberfläche bei Gegenstrom	A_gegen	[m <sup>2</sup> ]	=	22.15

Eingabedaten erlauben keine Gleichstromführung!

## 2.6 WueDr Wärmeübertrager: Doppelrohr

Programm: WueDr		Daten: *.WDr	
AUSLEGEN VON DOPPELROHRWÄRMEÜBERTRAGERN nach [W+S], Bild 2.12  für Gleich- und Gegenstromführung (ohne Phasenänderungen)			
GRUNDLAGEN:		[W+S], Kapitel 2	
Wärmeübergangskoeffizienten:	Rohr, innen	[WA], S.Gb1/Gb3	
	Ringspalt	[WA], S.Gd1/Gd2	
Druckverlust	:	[WA], S.Lb1/Lb3	

Die Stoffwerte können für Wasser berechnet oder für andere Stoffe aus der Stoffdatenbank übernommen werden (--> Abschnitt 1.3.3):

Wärmeres Medium	
E	Einlesen aus Stoffdatenfile
W	Berechnung für Wasser (273..373 K)
<ESCAPE>	zurück

Kälteres Medium	
E	Einlesen aus Stoffdatenfile
W	Berechnung für Wasser (273..373 K)
<ESCAPE>	zurück

Falls ausnahmsweise Gase als Strömungsmedien gewählt werden, sind ihre Stoffwerte ebenfalls in den für die flüssige Phase markierten Feldern der Stoffdatenmasken einzutragen. Beachten Sie bitte, dass das Programm in der vorliegenden Version keinen Strahlungsaustausch berücksichtigt.

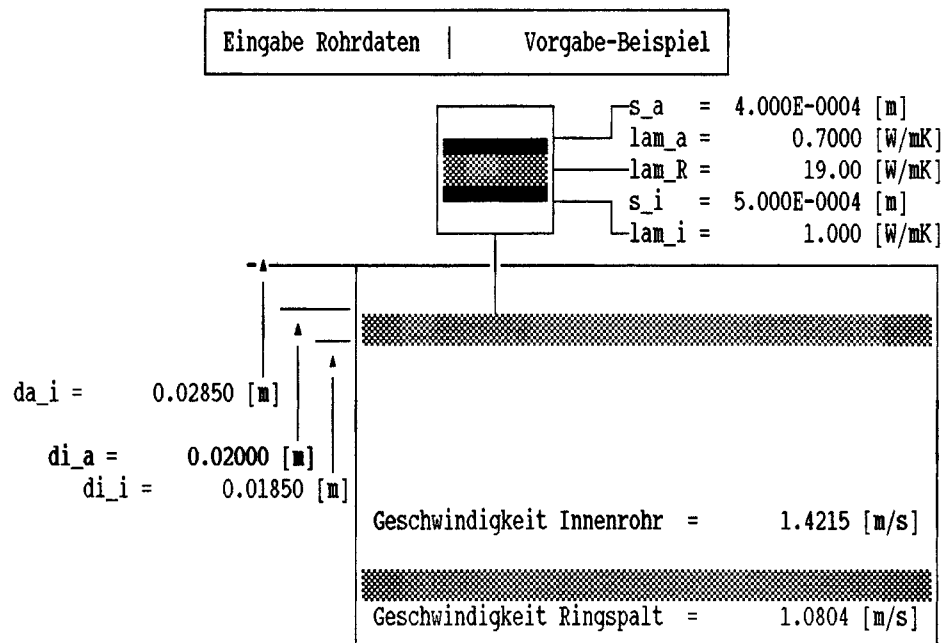
Eingaben der Bilanzgrößen

--> siehe WueAb

Nun haben Sie festzulegen, ob das wärmere Medium im Ringspalt zwischen dem Innen- und dem Aussenrohr oder im Innennrohr strömen soll:

Festlegen der Durchströmung	
I	warmes Medium strömt im Innenrohr
R	warmes Medium strömt zwischen Aussen- und Innenrohr
<ESCAPE>	zurück

Die benötigten Apparatedaten können Sie der folgenden Maske entnehmen. Die Legenden zu den einzelnen Grössen erscheinen während der Eingabe. Zur Unterstützung der Eingabe werden die sich im Innenrohr und im Ringspalt zwischen Aussen- und Innenrohr ergebenden mittleren Geschwindigkeiten laufend angezeigt:



Für die Druckverlustberechnung können Sie neben den Rauigkeiten auch Zuschläge für die Ein- und Auslaufzonen in Form zusätzlicher Rohrlängen eingeben:

Rohrrauigkeit im Mantelraum	[m] =	0.0000	
Rohrrauigkeit im Innenrohr	[m] =	0.0000	
Zuschlag für Ein- und Auslaufzonen	[m] =	0.1710?	0.1710

Das Programm berechnet die folgenden Grössen:

Doppelrohrwärmeübertrager	Vorgabe-Beispiel
---------------------------	------------------

Stromverhältnis	phi	[-] =	0.37332
maximales Stromverhältnis bei Gegenstrom	phiMaxGe	[-] =	1.7143
maximales Stromverhältnis bei Gleichstrom	phiMaxGl	[-] =	0.71429
übertragener Wärmestrom	Qst	[W] =	3475.5
NTU-Wert für Gegenstrom	NTUGe	[-] =	1.0051

NTU-Wert für Gleichstrom	NTUGl	[-]	=	1.1760
Prandtlzahl innen	Pr_i	[-]	=	3.1272
Prandtlzahl aussen	Pr_a	[-]	=	6.0194
Strömungsgeschwindigkeit innen	w_i	[m/s]	=	1.4215
Strömungsgeschwindigkeit aussen	w_a	[m/s]	=	1.0804
Reynoldszahl innen	Re_i	[-]	=	4.927E+0004
Reynoldszahl aussen	Re_a	[-]	=	1.585E+0004
Nusseltzahl innen	Nu_i	[-]	=	230.12
Nusseltzahl aussen	Nu_a	[-]	=	103.45
Wärmeübergangskoeffizient innen	alfa_i	[W/m <sup>2</sup> K]	=	8751.9
Wärmeübergangskoeffizient aussen	alfa_a	[W/m <sup>2</sup> K]	=	1806.2
Wärmedurchgangskoeffizient	k_a	[W/m <sup>2</sup> K]	=	518.60
Gesamte aktive Länge (ohne Ein- und Auslauf)	z_aktiv	[m]	=	14.726
Gesamte aktive äussere Oberfläche (ohne E/A)	A_aktiv	[m <sup>2</sup> ]	=	0.96225

Doppelrohr-WÜ - DRUCKVERLUSTE

Vorgabe-Beispiel

Druckverlust im Innenrohr	deltap_i	[Pa]	=	1.808E+0004
Druckverlust im Aussenrohr	deltap_a	[Pa]	=	2.598E+0004

Der nach [W+S], Gl.(2.8) bestimmte Wärmedurchgangskoeffizient  $k_a$  bezieht sich auf den Aussendurchmesser des Innenrohres bzw. der sich darauf befindenden äusseren Schicht.

## 2.7 WueRb Wärmeübertrager: Rohrbündel

Programm: WueRb		Daten: *.WRb und *.RbN	
AUSLEGEN VON ROHRBÜNDELWÄRMEÜBERTRAGERN mit 2 und 4 Gängen ohne Phasenänderung			
GRUNDLAGEN:		[W+S],	Kapitel 2
Wärmeübergangskoeffizienten Rohr, innen :		[WA],	S.Gb1/Gb3
	Mantelraum :	[WA],	Abschnitt Gg
Geometrie	:	[WA],	Abschnitt Ob
NTU-Wert	:	[WA],	Abschnitt Ca
Druckverlust mantelseitig	:	[WA],	Abschnitt Ll
Druckverlust Innenrohre	:	Paket MVT, Programm DruRo	

Eingaben Stoffwerte

--&gt; siehe WueDr

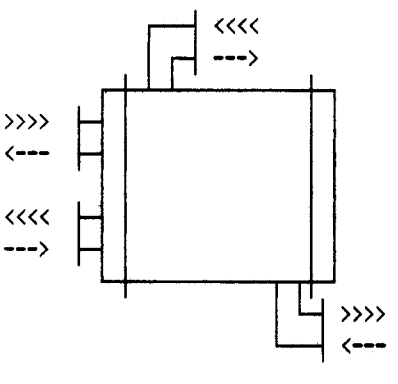
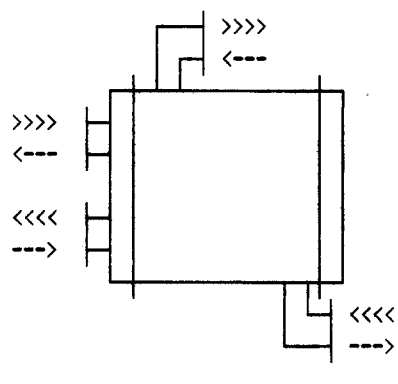
Eingaben Bilanzgrössen

--&gt; siehe WueAb

Zunächst müssen Sie festlegen, ob das wärmere Medium in den Rohren des Rohrbündels oder im Mantelraum strömen soll.

Festlegen der Durchströmung	
I	warmes Medium strömt durch die Rohre
R	warmes Medium strömt im Mantelraum
<ESCAPE>	zurück

Dann haben Sie eine der folgenden Stutzenanordnungen zu wählen (Strömungsrichtungen beachten!).

Durchströmung >>> oder <<< 	Durchströmung >>> oder <<< 
Rohrbündelwärmeübertrager: STUTZENANORDNUNG, Projekt Vorgabe-Beispiel	
A nach Skizze links	B nach Skizze rechts
<ESCAPE> keine Änderung	

Das Programm berechnet zwei- und viergängige Wärmeübertrager (Bilder 3 und 4). Die Rohre des Bündels können fluchtend oder versetzt angeordnet sein.

Wahl der Gangzahl	
2	Gangzahl = 2
4	Gangzahl = 4
<ESCAPE>	k

Wahl der Rohranordnung	
F	fluchtend
V	versetzt
<ESCAPE>	zurück

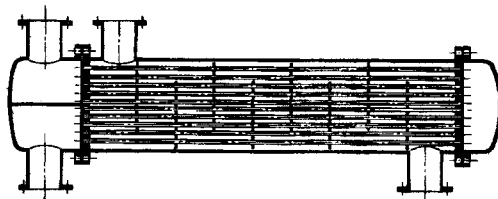


Bild 3: Zweigängiger Rohrbündelwärmeübertrager

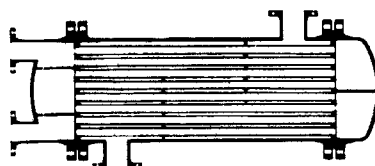


Bild 4: Viergängiger Rohrbündelwärmeübertrager

Die weiteren Geometriedaten können Sie auf Wunsch als Vorschlagswerte aus Ihrer Geometriedatensammlung übernehmen.

Geometriedaten von Rohrbündel-Wärmeübertragern	Vorgabe-Beispiel
--	------------------

Vorschlagswerte aus Datenfile einlesen?	
A	Vorschlagswerte aus Vorrechnung (bzw. Programmstandard) übernehmen
B	Vorschlagswerte aus ASCII-Datenfile mit Geometriedaten einlesen
<ESCAPE>	zurück

<p><b>ACHTUNG:</b> Bei der Wahl des Menüs B werden alle bisher eingelesenen und/oder veränderten Geometriedaten überschrieben!</p>
--

Die Option B dient der Wahl eines geeigneten Wärmeübertragertyps aus einer Baureihe. Dazu müssen Sie die wesentlichen geometrischen Daten von Wärmeübertragern in separaten ASCII-Files ablegen. Mit dem Paket TVT erhalten Sie als Muster das File ROHRE\_25.RBN mitgeliefert.

<p>Die geometrischen Daten geeigneter Typen von Rohrbündelwärmeübertragern können aus einem Datenfile eingelesen werden (mitgeliefertes Beispiel: Rohre_25.RbN).</p> <p>Dieses Datenfile kann mit einem Editor beliebig abgeändert und ergänzt werden. Entsprechende Files können durch Kopieren und Ändern auch für andere Rohrabmessungen angelegt werden.</p>
--

BEACHTEN SIE dabei, dass die richtige Auswahl nur funktioniert, wenn die Eingabereihenfolge von kleinen zu grossen Gesamtrohrquerschnitten strikte eingehalten wird.

Diese separaten Geometriedatenfiles (mit der Verlängerung RbN für "Rohrbündel-Norm") können wie die übrigen Eingabefiles eingelesen werden:

Geometriedaten von Rohrbündel-Wärmeübertragern | Vorgabe-Beispiel

Pfad: F:\TVT\DAT\

ROHRE\_25.RBN

Maximal zulässige Rohrrinnengeschwindigkeit [m/s] = 1.0000? 1.0000

Geben Sie zur Auswahl eines geeigneten Typs die maximal zulässige Rohrrinnengeschwindigkeit ein. Das Programm sucht dann aus den im gewählten Datenfile \*.RbN enthaltenen Typen jenen aus, der eine möglichst hohe Rohrrinnengeschwindigkeit unter oder an der eingegebenen Grenze ergibt.

Die Geometrie-Datenfiles \*.RbN müssen den folgenden Aufbau aufweisen:

GEOMETRIEDATEN Rohrbündelwärmeübertrager Rohre mit NW 25 --> ROHRE\_25.RBN

LEGENDE:

d_ra	Aussendurchmesser der Rohre
s_r	Wandstärke der Rohre
t_q	Querteilung (quer zur Strömungsrichtung)
t_l	Längsteilung (in Strömungsrichtung)
d_BÜml	Bohrungsdurchmesser in den Umlenkblechen
Flucht	Rohranordnung 0: versetzt, 1: fluchtend
GangZ	Gangzahl
d_mN	Norndurchmesser Mantel (nur zur Information)
d_ma	Aussendurchmesser Mantel
d_h	Hüllkreisdurchmesser
d_SN	Norndurchmesser Stutzen
s_m	Wandstärke Mantel
n_rtot	totale Anzahl Rohre
n_r12	Rohrzahl in den Gängen 1 und 2
n_r34	Rohrzahl in den Gängen 3 und 4
n_Reih	Anzahl Rohrreihen
n_rRmax	Maximale Anzahl Rohre in einer Rohrreihe

## KONSTANTEN (DIN 28184)

d_ra [m]	s_r [m]	t_q [m]	t_l [m]	d_BUml [m]	Flucht
.0250	.0016	.0320	.0277	.0257	0

## TYPEN

Gan gZ	d_mN	d_ma [m]	d_h [m]	d_SN	s_m [m]	n_rtot [-]	n_r12 [-]	n_r34 [-]	n_Reih [-]	n_rR max
2	150	.1680	.1432	80	.0040	14	14	0	4	3
2	200	.2190	.1910	80	.0040	26	26	0	6	5
2	250	.2730	.2477	100	.0040	44	44	0	8	6
2	300	.3240	.2980	100	.0040	66	66	0	10	8
2	400	.4060	.3725	150	.0040	106	106	0	12	10
4	400	.4060	.3686	150	.0040	88	46	42	10	10
<del>2</del>	<del>500</del>	<del>.5080</del>	<del>.4783</del>	<del>150</del>	<del>.0040</del>	<del>180</del>	<del>90</del>	<del>90</del>	<del>16</del>	<del>13</del>
4	500	.5080	.4815	150	.0040	164	80	84	14	14

Es bleibt Ihnen überlassen, für die Sie interessierenden Typen von Rohrbündelwärmeübertragern mit einem beliebigen ASCII-File-Editor entsprechende Dateien zu schreiben. Beachten Sie dabei, dass die Zeilennummern, bei denen die Zahlenreihen beginnen, mit jenen im mitgelieferten Beispiel ROHRE\_25.RbN genau übereinstimmen. (Das Programm überliest die Kommentare, die nur zur Erleichterung der Dateneingabe dienen). Am besten gehen Sie zum Erzeugen eines neuen Geometriedatenfiles wie folgt vor:

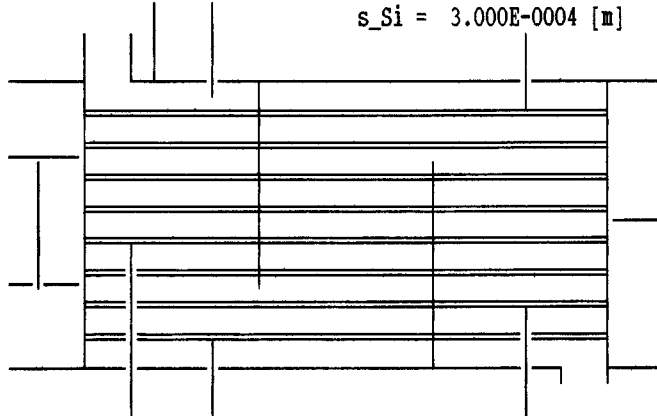
1. Kopieren des Beispiel-File ROHRE\_25.RbN auf einen neuen Filenamens (Copy ROHRE\_25.RbN Neu.RbN),
2. Überschreiben der Einträge in der KONSTANTEN-Zeile,
3. Überschreiben der Einträge in den TYPEN-Zeilen. Das File darf beliebig viele TYPEN-Zeilen enthalten. Sie müssen aber alle vollständig sein!

Für die Umlenkbleche werden für die folgenden Eingaben Spaltweiten zwischen Umlenkblech und Mantel (nach [WA], S.Ob11, Tab. 11), die Höhe des Segmentabschnitts und der Bohrungsdurchmesser vorgeschlagen.

Unabhängig davon, ob Sie mit oder ohne Einlesen von Normdaten aus den Files \*.RbN als Vorgabewerte arbeiten, können Sie die geometrischen Daten in den folgenden Masken überprüfen und gegebenenfalls ändern. Wie bei den übrigen Maskeneingaben werden die Legenden zu den jeweils aktivierten Eingaben in einer Fusszeile eingeblendet.

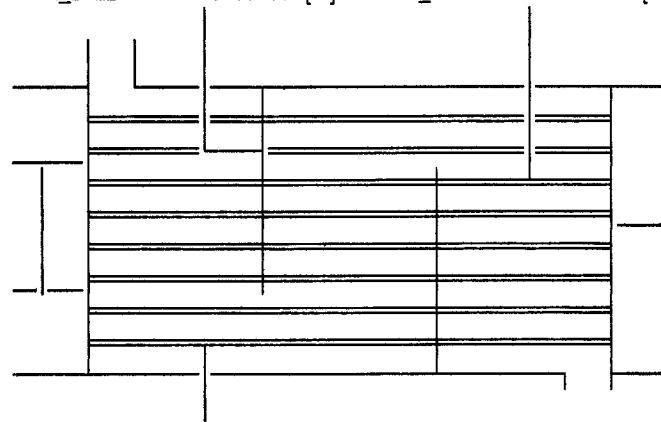
Rohrbündel-WÜ: GEOMETRIE ([WA], Abschn.Ob)	Vorgabe-Beispiel
--	------------------

d_ma =	0.3240 [m]	d_ra =	0.02500 [m]		
s_m =	0.004000 [m]	s_r =	0.001600 [m]		
d_h =	0.2980 [m]	s_Sa =	2.000E-0004 [m]	t_g =	0.03200 [m]
		s_Si =	3.000E-0004 [m]	t_l =	0.02770 [m]



n_Reih =	10	n_rtot =	66	Geschwindigkeit in Rohren	
n_rRmax =	9	n_rl2 =		w_i =	0.3059 [m/s]

n_Uml =	10 [-]		
d_Uml =	0.3130 [m]	lam_r =	50.00 [W/mK]
z_Uml =	0.07825 [m]	lam_Sa =	1.000 [W/mK]
d_BUml =	0.02600 [m]	lam_Si =	0.7500 [W/mK]



n\_rsa = 26 [-]

Für das Berechnen des Druckverlusts sind folgende Zusatzeingaben nötig:

Zusätzliche GEOMETRIEDATEN für DRUCKVERLUST	Vorgabe-Beispiel
---	------------------

Mantelseitiger Druckverlust (ohne Abdichtungsstreifen, [WA], Abschn.Ll)

Bestimmen von n\_W, n\_WE, n\_RF und n\_rsa  
siehe HANDBUCH, Abschnitt WuerB, Fall b).

Anz.Hauptwiderst. in Querströmungszone	n_W [-]	=	6
Anzahl Hauptwiderstände in Einlaufzone	n_WE [-]	=	8.000
Anzahl Rohrreihen in Segmentausschnitt	n_RF [-]	=	4.000

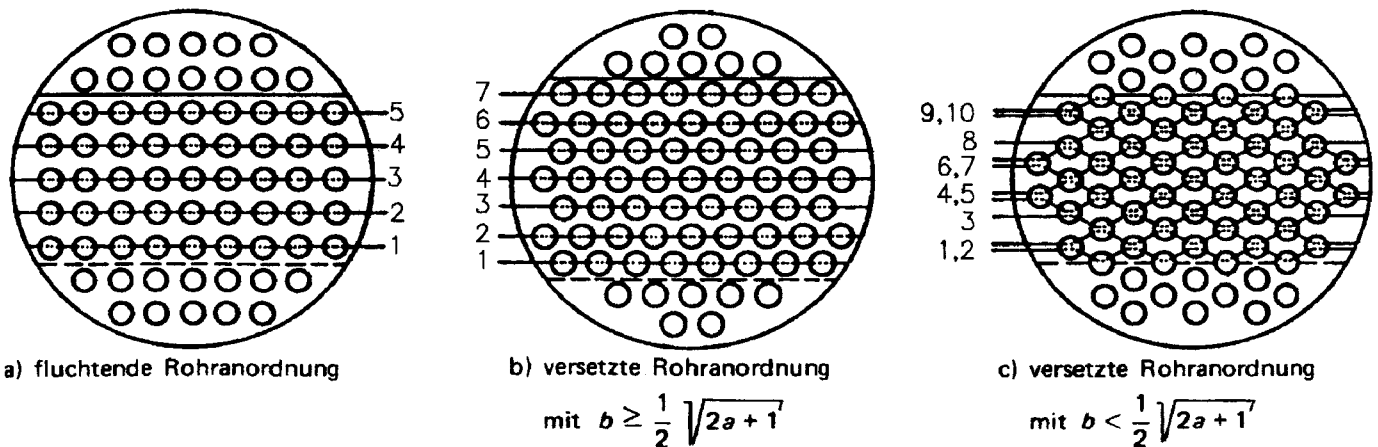


Anz.Rohre in BEIDEN Segmentausschnitten n\_rSA[-] = 26  
 Innendurchmesser der Mantelstutzen d\_Si [m] = 0.10000

Druckverlust in den Rohren

Rauigkeit Rohr bzw. Schmutzschicht innen [m] = 0.0000? 0.0000

Je nach der Rohranordnung und dem Teilungsverhältnis ist zwischen den folgenden drei Fällen zu unterscheiden:



**Bild 5:** Zur Bestimmung der Anzahl Hauptwiderstände in Rohrbündel-  
 apparaten.

Wie oben zu sehen ist, orientiert Sie das Programm über den aktuellen Eingabefall. Für die im Bild gezeigten Beispiele ergäben sich die folgenden Eingaben (Näheres in [WA], Abschnitt Ll):

Fall		a)	b)	c)
Anz.Hauptwiderst. in Querströmungszone	n_W	5	7	10
Anzahl Hauptwiderstände in Einlaufzone	n_WE	7	9	13
Anzahl Rohrreihen in Segmentausschnitt	n_RF	2	2	4
Anz.Rohre in BEIDEN Segmentausschnitten	n_rSA	24	14	20

Die Hauptergebnisse werden am Bildschirm angezeigt:

Rohrbündelwärmeübertrager - ERGEBNISSE | : Vorgabe-Beispiel

Stromverhältnis phi [-] = 0.52174  
 maximales Stromverhältnis Gegenstrom phiMaxGe [-] = 2.5217  
 maximales Stromverhältnis Gleichstrom phiMaxGl [-] = 1.5217  
 übertragener Wärmestrom Qst [W] = 1.756E+0005

NTU-Wert für Gegenstrom	NTUGe	[-]	=	0.57143
NTU-Wert für Gleichstrom	NTUGl	[-]	=	0.60782
Effektiver NTU-Wert	NTU	[-]	=	0.58870
Prandtlzahl innen	Pr_i	[-]	=	2.9186
Prandtlzahl aussen	Pa_a	[-]	=	7.7042
Strömungsgeschwindigkeit innen	w_i	[m/s]	=	0.30591
Strömungsgeschwindigkeit aussen	w_a	[m/s]	=	0.087350
Reynoldszahl innen	Re_i	[-]	=	1.393E+0004
Reynoldszahl aussen	Re_a	[-]	=	1.274E+0004
Nusseltzahl innen	Nu_i	[-]	=	79.156
Nusseltzahl aussen	Nu_a	[-]	=	232.24
Wärmeübergangskoeffizient innen	alfa_i	[W/m <sup>2</sup> K]	=	2446.0
Wärmeübergangskoeffizient aussen	alfa_a	[W/m <sup>2</sup> K]	=	835.03
Wärmedurchgangskoeffizient	k_a	[W/m <sup>2</sup> K]	=	417.30
Länge des Rohrbündels (Rohrboden-Rohrboden)	z	[m]	=	2.0447
Gesamte äussere Rohroberfläche	A_ra_tot	[m <sup>2</sup> ]	=	10.599
Druckverlust Querströmungszone	deltap_Q	[Pa]	=	49.366
Druckverlust Endzone	deltap_E	[Pa]	=	124.88
Druckverlust Fensterzone	deltap_F	[Pa]	=	151.33
Druckverlust beider Mantelstutzen	deltap_S	[Pa]	=	358.32
GESAMTDROCKVERLUST MANTELSEITIG	deltap_a	[Pa]	=	2565.6
Druckverlust in den geraden Rohren	deltap_r	[Pa]	=	251.19
Zuschlag Ein-/Austritt Rohre	deltap_Z	[Pa]	=	55.149
GESAMTDROCKVERLUST INNEN (OHNE STUTZEN)	deltap_i	[Pa]	=	306.34

Die Angaben der NTU-Werte für die Grenzfälle Gleich- und Gegenstrom dienen nur als Zusatzinformationen. Zur Berechnung des Druckverlusts in den Rohren ist zu ergänzen, dass die Zuschläge für den Ein- und Austritt mit dem 0.6-fachen des Staudrucks berechnet wurden. Über die Menüpunkte A und B

Weitere Ausgaben und Durchrechnungen	
A	Ausgabe auf ASCII-File (in Datenpfad, Name: *.AUS)
B	Ausgabe direkt auf Drucker (Drucker an LPT1: angeschlossen)
C	erneute Ausgabe am Bildschirm
D	weitere Durchrechnung
<ESCAPE>	Programm beenden (RAM-Daten gehen verloren!)

können Sie die nachstehende zusammenfassende Ausgabe auf ein ASCII-Datenfile oder direkt auf den Drucker veranlassen.

ROHRBÜNDELWÄERMEÜBERTRAGER: Vorgabe-Beispiel
--

TEMPERATUREN und STOFFWERTE		warmes Medium	kaltes Medium
Eintrittstemperatur	[K]	341.00	283.00
Austrittstemperatur	[K]	329.00	306.00
Massenstrom	[kg/s]	3.50	4.40

Dichte	[kg/m <sup>3</sup> ]	982.20	877.57
spezifische Wärmekapazität	[J/kgK]	4180.18	1733.20
dynamische Viskosität	[Pas]	0.000457	0.000638
Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]	0.655	0.143

Warmes Medium in den Rohren des Rohrbündels

## BILANZGRÖSSEN

Stromverhältnis	phi [-]	0.5217	phi-max. Gegenstrom	[-]	2.5217
			phi-max. Gleichstrom	[-]	1.5217
NTU-Wert	[-]	0.5887	NTU-Gegenstrom	[-]	0.5714
			NTU-Gleichstrom	[-]	0.6078
Übertragener Wärmestrom	[kW]	175.6			

## APPARATEDATEN

Anordnung der Eintritts- und Austrittsstutzen: Fall A

Gangzahl : 2

Anordnung der Innenrohre : versetzt

Rohraussendurchmesser	[m]	0.0250	Mantelaussendurchmesser	[m]	0.3240
Rohrwanddicke	[m]	0.0016	Mantelwandstärke	[m]	0.0040
Teilung quer zur Strömung	[m]	0.0320	Hüllkreisdurchmesser	[m]	0.2980
Teilung parallel Strömung	[m]	0.0277	Rohrreihen Segmentausschn.		4.0
Lochdurchm. im Umlenblech	[m]	0.0260	Max.Rohrzahl pro Reihe		9
Gesamtrohrzahl		66	Gesamte Rohrreihenzahl		10
Anzahl Rohre in Gängen 1/2		66			
Rauhigkeit innen	[m]	0.0000	Innendurchm. M.-Stutzen	[m]	0.1000
Anzahl Umlenbleche		10	Abstand Umlenbleche	[m]	0.1818
Durchmesser Umlenblech	[m]	0.3130	Höhe Segmentausschnitt	[m]	0.0783
Anz. Rohre in Segmentausschn.		26	Wärmeleitf. Rohre	[W/mK]	50
Hauptwiderstände Querstr.-Zone		6	Hauptwiderstände Einlaufzone		8.0

## SCHMUTZSCHICHTEN

		aussen	innen
Dicke der Schmutzschicht	[m]	0.0002	0.0003
Wärmeleitfähigkeit der Schmutzschicht	[W/mK]	1.00	0.75

## WÄRMEÜBERTRAGUNG

		aussen	innen
Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]	0.087	0.306
Wärmeübergangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]	835.0	2446.0
Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]	417.3	
HTU-Wert (Höhe einer Übertragungseinheit)	[-]	3.473	

Länge des Rohrbündels (Abstand zwischen Rohrböden)	=	2.045 [m]
gesamte Wärmeübertragungsfläche (Rohrbündel aussen)	=	10.60 [m <sup>2</sup> ]
Gesamtdruckverlust aussen (mantelseitig)	=	0.0257 [bar]
Gesamtdruckverlust innen (rohrseitig)	=	0.0031 [bar]

## 2.8 WueRbK Wärmeübertrager: Luftkühlung mit Kondensation

Programm: WueRbK		Daten: *.RbK	
KÜHLUNG FEUCHTER LUFT MIT KONDENSATION VON WASSERDAMPF IN ROHRBÜNDELWÄRMEÜBERTRAGERN MIT GLATTEN ROHREN			
Vollständige Auslegung für		- gewünschte Austrittstemperatur - gewünschte Anzahl Rohrreihen	
durch numerische Lösung des gekoppelten Wärme- und Stofftransportvorgangs			
Rohranordnung:	fluchtend oder versetzt		
Kühlmedium:	Wasser		
Stromführung:	Kreuz-Gegenstrom		
Grundlagen: HANDBUCH, [W+S], Kapitel 1, 2, 4 und 9			

Nach der Eingabe der Rohrdaten

Aussendurchmesser der Rohre	d_a	[m]	=	0.01600
Innendurchmesser der Rohre	d_i	[m]	=	0.01400
Rohrrauhigkeit innen (Druckverlust)	R_i	[m]	=	0.0000
Wärmeleitfähigkeit Rohrwerkstoff	lam_R	[W/mK]	=	21.00

haben Sie die für die numerische Durchrechnung gewünschte Anzahl Unterteilungen in der Breite des Wärmeübertragers (Abmessung in Richtung der Rohre nach der Skizze in der Eingabemaske) einzugeben:

EINGABE der Schrittweite für die numerische Durchrechnung

Anzahl Unterteilungen in Breite    AnzUnt    [-]    =    10?    10

5 ≤ Eingabebereich ≤ 40

Eine hohe Anzahl von Unterteilungen AnzUnt ergibt zwar genauere Ergebnisse - sie führt aber zu einem grossen Zeitbedarf für die aufwendigen numerischen Rechnungen. Da der Wärmeübertrager für die numerischen Rechnungen der Wärmeübertrager in AnzUnt \* AnzRohrL Abschnitte unterteilt wird, ist die Rechenzeit zur gewählten Anzahl Unterteilungen proportional (AnzRohrL: Anzahl Rohrreihen längs der Luftströmung gemäss Skizze in der Eingabemaske). Da man schon mit 5 bis 10 Unterteilungen sehr gute Ergebnisse erzielt, empfiehlt sich die Grobauslegung mit 5 Unterteilungen. Die definitive Rechnung kann dann mit 20 Unterteilungen erfolgen. Zur Abschätzung des Diskretisationsfehlers empfiehlt sich eine zusätzliche Durchrechnung mit 40 Unterteilungen.

Die Rohranordnung und den Berechnungsmodus können Sie mit der folgenden Maske wählen:

Rohranordnung		Berechnungsmodus	
F	fluchtend	R	gegebene Anzahl Rohrreihen
V	versetzt	T	gegebene Luftaustrittstemperatur
<ESCAPE>	zurück	<ESCAPE>	zurück

**R** gegebene Anzahl Rohrreihen

Bei dieser Berechnungsart können Sie die Anzahl der Rohrreihen in Luftströmungsrichtung vorgeben. Das Programm bestimmt dann die Austrittstemperatur und die Austrittsfeuchte der abzukühlenden Luft.

**T** gegebene Luftaustrittstemperatur

Dieser Berechnungsmodus erlaubt Ihnen die Eingabe einer gewünschten Luftaustrittstemperatur. Das Programm errechnet damit die erforderliche Anzahl Rohrreihen in Luftströmungsrichtung und die Austrittsfeuchte der abzukühlenden Luft.

Die übrigen Eingabegrößen können Sie über die nachstehende Eingabemaske eingeben:

```

s_laengs = 0.03500 [m]
Mst_k = 0.8000 [kg/s]
T_ke = 288.0 [K]
AnzRohrQ = 6 [-]
Mst_ge = 0.3000 [kg/s]
T_ge = 335.0 [K]
phi_e = 52.58 [%]
p_gm = 1.000E+0005 [Pa]
Breite = 0.33000 [m]
w_Luft (Eintritt) = 4.3508 [m/s]
w_Kühlwasser (Eintritt) = 0.86681 [m/s]
s_quer = 0.03500 [m]
T_ga = 328.0 [K]
AnzRohrL = [-]
    
```

**Die Anzeige**

Es werden umfangreiche Berechnungen durchgeführt - bitte warten

2. ITERATION, Rohrreihe: | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |

orientiert Sie über den Stand der Berechnung. Für jedes der (AnzUnt \* AnzRohrL) Berechnungselemente werden die sich ergebenden Wärmestromdichten aus den folgenden Gleichungen iterativ bestimmt:

Kondensierende Wassermassenstromdichte:

$$mst\_w = \beta\_g (c\_w - c\_wE) \quad (1)$$

Von der feuchten Luft an den Kondensatfilm übergehende Wärmestromdichte:

$$qst\_g = \alpha\_g (T\_g - T\_E) + mst\_w * hlg \quad (2)$$

Wärmestromdichte durch den Rieselfilm:

$$qst\_F = \alpha\_F (T\_E - T\_Wa) \quad (3)$$

Wärmestromdichte von der Rohroberfläche ans Kühlwasser:

$$qst\_k = k' (T\_Wa - T\_k) \quad (4)$$

mit dem Wärmedurchgangskoeffizienten nach [W+S], Gl.(2.8):

$$k' = \{ [d\_a / (d\_i \alpha\_i)] + [d\_a \ln(d\_a / d\_i) / 2 \lambda_{mR}] \}^{-1} \quad (5)$$

In den obigen Gleichungen bedeuten:

$\alpha\_F$	Wärmeübergangskoeffizient Kondensatfilm	[W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha\_g$	Wärmeübergangskoeffizient gasseitig	[W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha\_i$	Wärmeübergangskoeffizient in den Rohren	[W/m <sup>2</sup> K]
$c\_w$	Wasserkonzentration in der Luft	[kg/m <sup>3</sup> ]
$c\_wE$	Wassersättigungskonz. an Filmoberfläche	[kg/m <sup>3</sup> ]
$d\_a$	Rohraussendurchmesser	[m]
$d\_i$	Rohrinnendurchmesser	[m]
$hlg$	spezifische Verdampfungsenthalpie	[J/kgK]
$k'$	innerer Wärmedurchgangskoeffizient	[W/m <sup>2</sup> K]
$\lambda_{mR}$	Wärmeleitfähigkeit Rohrmaterial	[W/mK]
$mst\_w$	Massenstromdichte Wasser	[kg/sm <sup>2</sup> ]
$qst\_F$	Wärmestromdichte durch Kondensatfilm	[W/m <sup>2</sup> ]
$qst\_g$	Wärmestromdichte von der Gasphase	[W/m <sup>2</sup> ]
$qst\_k$	Wärmestromdichte an das Kühlwasser	[W/m <sup>2</sup> ]
$T\_E$	Temperatur an der Filmoberfläche	[K]
$T\_g$	Temperatur der Gasphase	[K]
$T\_Wa$	Temperatur an der Rohraussenwand	[K]

Sämtliche Stoffwerte von Luft und Wasser werden mit den Programmen SwLuft und SwWass des Pakets MVT elementweise neu berechnet.

Der gasseitige Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha\_g$  wird für querangeströmte Rohrbündel nach [WA], S. Gf1/3 berechnet. Der gasseitige Stoffübergangskoeffizient folgt unter Anwendung der Analogie zwischen Wärme- und Stoffübergang ([W+S], Abschnitt 1.4) aus den gleichen Unterlagen. Der Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft wird zur näherungsweise Berücksichtigung des einseitigen Stofftransportvorgangs mit der [W+S], Gl. (7.47) korrigiert.

Der Wärmeübergangskoeffizient im (laminaren) Kondensatfilm  $\alpha\_F$  wird mit den Gln. (4.23) und (4.28) aus [W+S] bestimmt. Der Wärmeübergangskoeffizient in den Rohren des Rohrbündels  $\alpha\_i$  wird mit den Gleichungen in [WA], S. Gb1/3 errechnet.

Nach den geometrischen Daten des Kühlers

Luftkühler mit Kondensation: APPARATEDATEN	Vorgabe-Beispiel
--	------------------

Gesamte Übertragungsfläche	(aussen)	A_WueTot	[m <sup>2</sup> ]	=	0.5972
Breite des Kühlers	(Einzelrohrlänge)	Breite	[m]	=	0.3300
Höhe des Kühlers (senkrecht zur Luftströmung)		Hoehe	[m]	=	0.2450
Länge des Kühlers (in Luftströmungsrichtung)		Laenge	[m]	=	0.2450
Gesamte Übertragungsfläche	(aussen)	A_WueTot	[m <sup>2</sup> ]	=	0.5972
Rohranordnung:		fluchtend			
Rohrdurchmesser aussen		d_a	[m]	=	0.01600
Rohrdurchmesser innen		d_i	[m]	=	0.01400
Rohrrauigkeit innen		R_i	[m]	=	0.0000
Querteilung (senkrecht zur Luftströmung)		s_quer	[m]	=	0.03500
Anzahl Rohre in Höhe (senkrecht zur Luftstr.)		AnzRohrQ	[-]	=	6.000
Längsteilung (in Luftströmungsrichtung)		s_laengs	[m]	=	0.03500
Anzahl Rohrreihen (in Luftströmungsrichtung)		AnzRohrL	[-]	=	6.000
Wärmeleitfähigkeit des Rohres		lam_R	[W/mK]	=	21.00

werden die Übertragungswerte und die Druckverluste als Hauptergebnisse ausgegeben:

Luftkühler mit Kondensation: ÜBERTRAGUNGSWERTE	Vorgabe-Beispiel
--	------------------

Übertragene Leistung	Qst	[W]	=	1.239E+0004
mittlere logarithmische Temperaturdifferenz	deltaT_lg	[K]	=	41.63
mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient	k_a_lg	[W/m <sup>2</sup> K]	=	498.6

LUFTSEITIGER DRUCKVERLUST	Vorgabe-Beispiel
---------------------------	------------------

Geschwindigkeit (engster Querschn.)	w_a	[m/s]	=	6.770
Reynoldszahl (engster Querschnitt)	Re_a	[-]	=	5867
Luftseitiger Druckverlust	deltap_a	[Pa]	=	31.14

KÜHLWASSERSEITIGER DRUCKVERLUST	Vorgabe-Beispiel
---------------------------------	------------------

Geschwindigkeit in den Rohren	w_i	[m/s]	=	0.8671
Reynoldszahl in den Rohren	Re_i	[-]	=	1.106E+0004
Kühlwasserseitiger Druckverlust	deltap_i	[Pa]	=	3377

Der auf den Rohraussendurchmesser bezogene mittlere Wärmedurchgangskoeffizient  $k_{a\_lg}$  wird mit dem logarithmischen Mittelwert der Temperaturdifferenz  $\Delta T_{lg}$  gebildet.

Der luftseitige Druckverlust wird nach [WA], S.L11/9 bestimmt, der kühlwasserseitige Druckverlust mit dem Programm DruRo des Pakets MVT.

Der Austrittszustand der Luft kann nebst anderen Angaben der folgenden Bildschirmseite entnommen werden:

Luftkühler mit Kondensation: FEUCHTE LUFT	Vorgabe-Beispiel
---	------------------

Massenstrom feuchte Luft ein	Mst_ge	[kg/s]	=	0.3000
Massenstrom feuchte Luft aus	Mst_ga	[kg/s]	=	0.2960
Geschwindigkeit (freier Querschnitt)	w_g	[m/s]	=	4.261
Lufttemperatur am Eintritt	T_ge	[K]	=	335.0
Lufttemperatur am Austritt	T_ga	[K]	=	328.0
Wassermassenbeladung am Eintritt	Ym_e	[-]	=	0.08001
Wassermassenbeladung am Austritt	Ym_a	[-]	=	0.06558
relative Feuchte am Eintritt	phi_e	[%]	=	52.58
relative Feuchte am Austritt	phi_a	[%]	=	61.06
mittlerer Druck	p_gm	[Pa]	=	1.000E+0005
mittlere Dichte	rho_g	[kg/m <sup>3</sup> ]	=	1.009
mittlere dynamische Viskosität	eta_g	[Pa s]	=	1.878E-0005
mittlere Wärmeleitfähigkeit	lam_g	[W/mK]	=	0.02783
mittlere spezifische Wärmekapazität	cp_g	[J/kgK]	=	1067
mittlerer Diffusionskoeffizient	D_g	[m <sup>2</sup> /s]	=	3.533E-0005

Die darin ebenfalls ausgegebenen mittleren Stoffwerte dienen nur zur Orientierung. Selbstverständlich werden die Stoffwerte im Programm in jedem der bis zu 240 Berechnungselemente neu errechnet. Das Gleiche gilt auch für die in der letzten Bildschirmseite wiedergegebenen Mittelwerte (einschliesslich der Kondensatfilmdicke):

Luftkühler mit Kondensation: KÜHLWASSER	Vorgabe-Beispiel
---	------------------

Kühlwassermassenstrom	Mst_k	[kg/s]	=	0.8000
Geschwindigkeit in den Rohren	w_k	[m/s]	=	0.8671
Temperatur am Eintritt	T_ke	[K]	=	288.0
Temperatur am Austritt	T_ka	[K]	=	291.7
mittlere Dichte	rho_k	[kg/m <sup>3</sup> ]	=	998.9
mittlere dynamische Viskosität	eta_k	[Pa s]	=	0.001096
mittlere Wärmeleitfähigkeit	lam_k	[W/mK]	=	0.5978
mittlere spezifische Wärmekapazität	cp_k	[J/kgK]	=	4194

Luftkühler mit Kondensation: KONDENSAT	Vorgabe-Beispiel
--	------------------

anfallender Kondensatmassenstrom	Mst_F	[kg/s]	=	0.004006
mittlere Kondensatfilmdicke	deltal	[m]	=	6.040E-0005



2.9 VerR Verdampfen reiner Stoffe (Behälter, Rohre)

Programm: VerR	Daten: *.Ver
VERDAMPFEN REINER STOFFE in Behältern und in vertikalen Rohren mit Zwangskonvektion	
- Behältersieden - örtlicher Wärmeübergang beim Verdampfen in vertikalen Rohren - vollständige numerische Durchrechnung (mit konstantem äusserem Wärmeübergang) --> mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient	
Grundlagen: HANDBUCH; [W+S], Abschn. 3.2,3.3    Beispiele: [W+S], Bsp.3.1/4	

Wahl der Berechnungsart	
A	Behältersieden
B	Rohr: lokale Untersuchung, Wandtemperatur gegeben
C	Rohr: lokale Untersuchung mit Wärmedurchgang
D	Rohr: vollständige nume
<ESCAPE>	

Zu verdampfendes Medium	
W	Wasser, Temperaturbereich 285..375 K
A	anderes Medium --> Stoffwertdatei
<ESCAPE>	zurück

Das Untermenü "Zu verdampfendes Medium" dient der Stoffwerteingabe. Sie haben die Wahl zwischen:

W Wasser

Bei der Verdampfung von Wasser werden die Vorschlagswerte für die folgenden Stoffwerteingaben im angegebenen Temperaturbereich zur einzugebenden Temperatur errechnet. In der folgenden Eingabe haben Sie eine Kontroll- und Korrekturmöglichkeit.

A anderes Medium (Stoffwerte eingeben)

Hier werden die Vorschlagswerte für die folgenden Eingaben aus den Stützwerten in Ihrer Datenbank interpoliert (--> Abschnitt 1.3.3).

Das Programm kann die folgenden Berechnungsarten durchführen:

## A Behältersieden

\* Berechnung der maximalen Heizflächenbelastung (Wärmestromdichte am Ausbrennpunkt) nach [W+S], Gl.(3.2) und Beispiel 3.1.

\* Blasenverdampfung bei freier Konvektion nach [W+S], Abschnitt 3.3.1 und Beispiel 3.2.

## B Rohr: lokale Untersuchung, Wandtemperatur gegeben

Örtlicher Wärmeübergangskoeffizient beim Verdampfen bei erzwungener Konvektion in einem Rohr für gegebene Temperatur an der Grenzfläche zwischen Wand und verdampfender Flüssigkeit. Siehe [W+S], Abschnitt 3.3.2 und Beispiel 3.3.

## C Rohr: lokale Untersuchung mit Wärmedurchgang

Diese Berechnungsart berücksichtigt gegenüber derjenigen nach Menü B zusätzlich den Wärmedurchgang von einem Heizmedium durch die zylindrische Rohrwand (aus 1 bis 3 Schichten) nach [W+S], Gl(2.8). Dabei muss die Wandtemperatur an der Grenzfläche zur verdampfenden Flüssigkeit aus der folgenden Bedingung iterativ bestimmt werden:

Auf der Verdampfungsseite übergehender Wärmestrom = durchgehender Wärmestrom.

## D Rohr: vollständige numerische Berechnung

Hier wird die Rechnung nach Menü C ab dem Eintritt der zu verdampfenden Flüssigkeit schrittweise durchgeführt. Dazu wird das Verdampferrohr in 100 Abschnitte unterteilt. Ausgehend von einem Dampfmassenanteil von 0 (nur Flüssigkeit) wird dabei der Dampfmassenanteil nach jedem Abschnitt nach der folgenden Überlegung erhöht:

In einem Abschnitt verdampfender Massenstrom:

$$\Delta m_{\text{stg}} = k_a \cdot \Delta A_a \cdot (T_a - T_b) / h_{\text{lg}} \quad (1)$$

Änderung des Dampfmassenanteils in einem Abschnitt:

$$\Delta x_m = \Delta m_{\text{stg}} / \dot{m}_{\text{st}} \quad (2)$$

In diesen Gleichungen bedeuten:

$\Delta A_a$	: äussere Oberfläche des Abschnitts
$\Delta m_{\text{stg}}$	: in einem Abschnitt entstehender Dampf
$\Delta x_m$	: Änderung des Dampfmassenanteils in einem Abschnitt
$h_{\text{lg}}$	: spezifische Verdampfungsenthalpie
$k_a$	: auf den Aussendurchmesser bezogener Wärmedurchgangskoeffizient
$\dot{m}_{\text{st}}$	: Gesamtmassenstrom Verdampfungsmedium durch Rohre
$T_a$	: Temperatur des Heizmediums
$T_b$	: Siedetemperatur

Die Bedeutung der Eingabegrössen können Sie den zu den aktiven Feldern in die Eingabemaske eingeblendeten Legenden entnehmen.

Verdampfung in Rohren: Eingaben für Menüs C und D | Vorgabe-Beispiel

```

rho_g = 2.9664 [kg/m3]
eta_g = 8.977E-0006 [Pa s]
T_a = 404.10 [K]
alfa_a = 5000.0 [W/m2K]
s_a = 0.00000 [m]
lam_a = 1.0000 [W/mK]
n_R = 195.00 [-]
d_i = 0.015000 [m]
d_a = 0.018000 [m]
lam_R = 17.000 [W/mK]
s_i = 0.00000 [m]
lam_i = 1.0000 [W/mK]
RR = 1.000E-0004 [m]
w_e = 0.12844 [m/s]

Tb = 383.00 [K]
hlq = 3.599E+0005 [J/kgK]
rho_l = 775.95 [kg/m3]
eta_l = 2.380E-0004 [Pa s]
lam_l = 0.10699 [W/mK]
cp_l = 1810.9 [J/kgK]
sigmaA = 0.018004 [N/m]
Mst = 2.7500 [kg/s]
Xm = [kg/kg]
z_R = 1.0000 [m]
    
```

Die Ausgaben lauten für diesen Fall:

Numerische Durchrechnung über Rohrlänge ERGEBNISSE | Vorgabe-Beispiel

```

Dampfmassenbruch am Austritt aus den Rohren xm_a [-] = 0.29825
entstehender Dampfmassenstrom Mstg [kg/s] = 0.29825
Total übertragener Wärmestrom Qst [W] = 2.952E+0005
Total übertragene Wärmestromdichte (Qst/A_a) qstd [kW/m2] = 26.767
mittlere Temperatur Grenzfläche Verd.Medium T_wim [K] = 6.856E+0008
Aussenfläche des Rohrbündels (mit Schicht_a) A_a [m2] = 11.027
mittlerer Wärmeübergangskoeff. verdampfungss. alfa_EKm [W/m2K] = 2440.5
mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient kw_am [W/m2K] = 1268.6
    
```

Die örtlichen Ergebnisse werden ebenfalls ausgegeben und können auf Ihren Wunsch in ein Plot-Datenfile geschrieben werden:

Verdampfung in vertikalen Rohren mit Zwangskonvektion | Vorgabe-Beispiel

Länge z [m]	Wandtemp. T_wi [K]	Dampfbr. xm [-]	Wärmestrom deltaQst [W]	Wärmeüberg.Ver. alfa_EK [W/m2K]	Wärmedurchgang k_a [W/m2K]
0.01	396.93	0.00269	2.665E+0003	2081.7	1145.5
0.02	396.11	0.00570	2.972E+0003	2467.7	1277.5
0.03	396.11	0.00870	2.972E+0003	2467.5	1277.4
0.04	396.11	0.01170	2.971E+0003	2466.6	1277.1
0.05	396.11	0.01470	2.971E+0003	2466.6	1277.1
0.06	396.11	0.01771	2.971E+0003	2465.9	1276.9
0.07	396.11	0.02071	2.971E+0003	2465.7	1276.8
0.08	396.11	0.02371	2.970E+0003	2464.8	1276.5
0.09	396.11	0.02671	2.970E+0003	2464.7	1276.5
0.10	396.11	0.02971	2.970E+0003	2464.1	1276.3
0.11	396.12	0.03271	2.969E+0003	2463.9	1276.2
0.12	396.12	0.03571	2.969E+0003	2463.3	1276.0

0.13	396.12	0.03871	2.969E+0003	2463.0	1275.9
0.14	396.12	0.04171	2.968E+0003	2462.4	1275.7
0.15	396.12	0.04471	2.968E+0003	2462.1	1275.7
0.16	396.12	0.04771	2.968E+0003	2461.5	1275.5

↑        ↓        PgUp        PgDn        Home        End        F10 Weiter

In dieser Ausgabe der örtlichen Ergebnisse bedeuten:

Länge                          z : Abstand vom Kühlwassereintritt,  
Wandtemp                        T\_wi : Wandtemperatur an der Grenzfläche  
   zur verdampfenden Flüssigkeit,  
Dampfbr.                         xm : Massenbruch (Massenanteil) des  
   Dampfs,  
Wärmestrom                        deltaQst : im jeweiligen Berechnungsabschnitt  
   übergehender Wärmestrom,  
Wärmeüberg.Ver.                alfa\_EK: verdampfungsseitiger Wärmeübergangs-  
   koeffizient bei erzwungener Konvek-  
   tion im Verdampferrohr,  
Wärmedurchgang                k\_a : auf die Aussenfläche (einschliess-  
   lich allfälliger äusserer Schicht)  
   bezogener Wärmedurchgangskoeffi-  
   zient.

## 2.10 KonR    Kondensation reiner Dämpfe an Rohren

Programm: KonR	Daten: *.KonR
KONDENSATION    REINER    DÄMPFE an der Aussenseite horizontaler Rohre	
<ul style="list-style-type: none"> <li>- örtliche Wärmeübergangs- und Wärmedurchgangskoeffizienten</li> <li>- vollständige numerische Durchrechnung (mit innerem Wärmeübergang und Schmutzschichten)</li> </ul>	
Grundlagen: [W+S], Abschnitt 4.2	Beispiel: [W+S], Bsp. 4.2
Ergänzungen zum Erfassen des Dampfströmungseinflusses: [WA], S. Ja16/Ja19	

Filmkondensation horizontales Rohr		Vorgabe-Beispiel
------------------------------------	--	------------------

Wahl der Berechnungsart	
A	Lokale Untersuchung, Wärmeübergang und Temperatur innen gegeben
B	Lokale Untersuchung, nur Temperatur im Rohr gegeben
C	Vollständige numerische Berechnung
Kühlmedium	
zurück	
K	Konstante Stoffwerte direkt eingeben
T	Stoffwerte als f(T) aus Stoffwertdatei
W	Wasser, Stoffwerte als f(T) 273..373 K
<ESCAPE>	
Dampf	
K	Konstante Stoffwerte direkt eingeben
T	Stoffwerte als f(T) aus Stoffwertdatei
W	Wasser, Stoffwerte als f(T) 283..393 K
<ESCAPE>	
zurück	

Dieses Programm ermöglicht Ihnen die folgenden **Berechnungsarten**:

**A Lokale Untersuchung, Wärmeübergang und Temperatur innen gegeben**

Diese Berechnungsweise entspricht der in [W+S], Beispiel 4.2 gezeigten. Als Ergänzungen gegenüber [W+S] wurden aufgenommen:

- \* Berücksichtigung des Einflusses der Gasdichte: Ergänzung der Gl.(4.29) durch den Faktor  $(1 - \rho_g / \rho_l)$  im Ausdruck unter der Wurzel. Die Gl.(4.29) entspricht damit den Gleichungen in [WA], Abschnitt Ja. Diese Ergänzung ist im allgemeinen bedeutungslos.
- \* Berücksichtigung des Einflusses der Dampfgeschwindigkeit: Die Erhöhung des äusseren Wärmeübergangskoeffizienten durch eine Dampfströmung wird nach Fujii ([WA], Ja17, Gln. (83/86) erfasst, sobald der damit bestimmte äussere Wärmeübergangskoeffizient den Wert nach der Gl.(4.29) in [W+S] übersteigt.

Bei der Kondensation von Wasserdampf (Dampf, Menü W) werden die Stoffwerte für die Siedetemperatur berechnet (--> Stoffwerte von Wasser, Paket MVT).

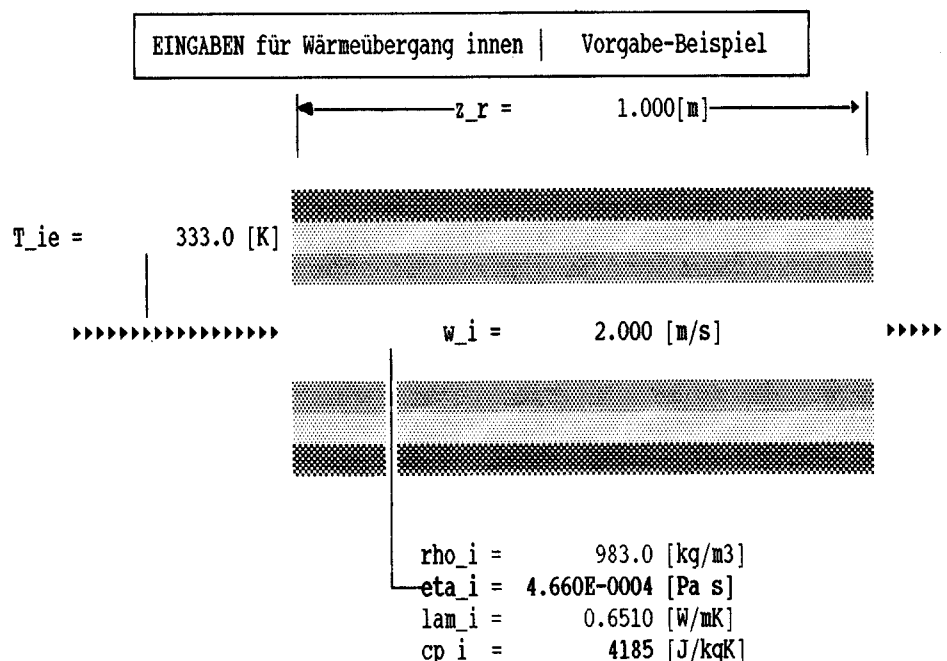
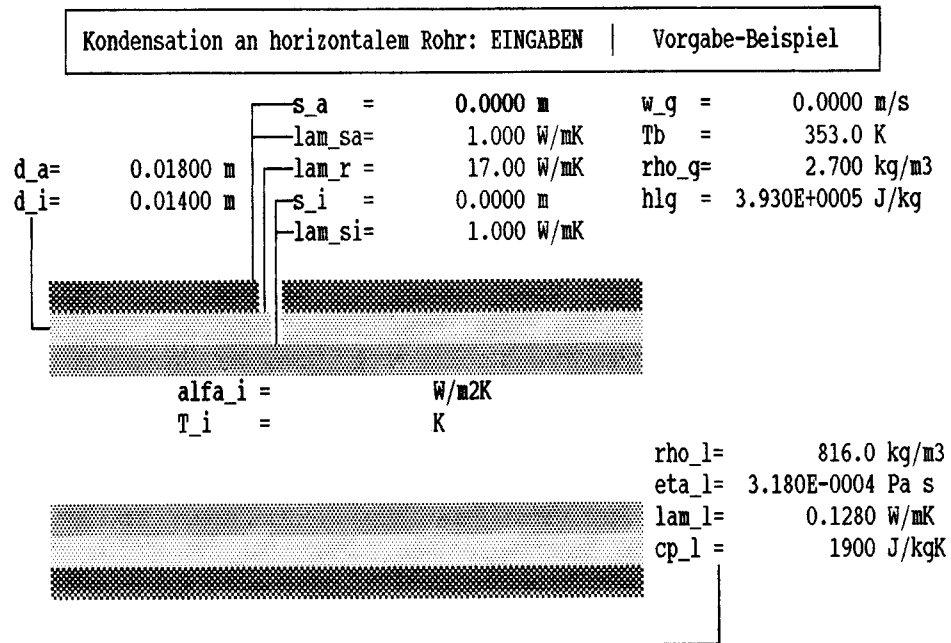
**B Lokale Untersuchung, nur Temperatur im Rohr gegeben**

Diese Berechnungsart enthält gegenüber derjenigen nach Menü A zusätzlich eine Berechnung des inneren (kühlmediumseitigen) Wärmeübergangskoeffizienten gemäss dem Programm WSU dieses Pakets. Bei Wasser als Kühlmedium (Kühlmedium, Menü W) werden die Stoffwerte für die eingegebene Temperatur des Kühlwassers  $T_i$  berechnet (--> Stoffwerte von Wasser, Paket MVT).

C Vollständige numerische Berechnung

Hier wird die Rechnung nach Menü B ab dem Eintritt des Kühlmediums schrittweise durchgeführt. Dabei wird die Temperatur des Kühlwassers nach jedem Schritt durch eine Wärmestrombilanz neu bestimmt. Die Unterteilung des Rohres erfolgt in 100 gleichlange Abschnitte. Diese Rechnung liefert eine gute Basis zur Abschätzung eingängiger Kondensatoren mit horizontalen Rohren.

Die Bedeutung der Eingabegrößen gehen aus den zu den aktiven Feldern in die Eingabemasken eingeblendeten Legenden hervor:



Die Ergebnisse der numerischen Rechnung werden global

## Kondensation an Aussenseite horizontaler Rohre | Vorgabe-Beispiel

Eintrittstemperatur des Kühlmediums (Eingabe)	T <sub>ie</sub>	[K]	=	333.0
Austrittstemperatur des Kühlmediums	T <sub>ia</sub>	[K]	=	334.2
Kondensationstemperatur des Dampfes (Eingabe)	T <sub>b</sub>	[K]	=	353.0
Total übertragener Wärmestrom	Q <sub>st</sub>	[W]	=	1562
Total übertragene Wärmestromdichte (Q <sub>st</sub> /A <sub>a</sub> )	q <sub>st</sub>	[kW/m <sup>2</sup> ]	=	27.63
mittlerer Wärmeübergangskoeffizient innen	alfa <sub>im</sub>	[W/m <sup>2</sup> K]	=	1.379E+0004
mittlerer Wärmeübergangskoeffizient aussen	alfa <sub>am</sub>	[W/m <sup>2</sup> K]	=	2109
mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient	k <sub>am</sub>	[W/m <sup>2</sup> K]	=	1425
Wärmedurchgangskoeffizient Q <sub>st</sub> /(deltaT <sub>lg</sub> *A <sub>a</sub> )	k <sub>alg</sub>	[W/m <sup>2</sup> K]	=	1426

und lokal ausgegeben. Die lokalen Werte können gemäss der folgenden Tabelle auch als Plot-File geschrieben werden.

Kondensation an Aussenseite horizontaler Rohre   Vorgabe-Beispiel						
Länge [m]	Temperatur innen [K]	Temp.Wand aussern [K]	Wärmestrom Abschn. [W]	alfa innen [W/m <sup>2</sup> K]	alfa aussen [W/m <sup>2</sup> K]	k <sub>a</sub> [W/m <sup>2</sup> K]
0.01	333.01	338.54	1.682E+0001	24155.1	2057.2	1487.3
0.02	333.03	338.70	1.669E+0001	21599.2	2062.8	1476.3
0.03	333.04	338.86	1.654E+0001	19343.9	2068.8	1464.4

Darin bedeuten:

- Länge : Abstand vom Kühlwassereintritt,  
 Temp.Wand : Temperatur an der Grenzfläche zwischen Kondensatfilm und Wand (Rohraussenwand bzw. Aussenfläche der äusseren Schmutzschicht),  
 Wärmestrom : im betreffenden Berechnungsabschnitt übertragener Wärmestrom,  
 alfa\_innen : Wärmeübergangskoeffizient auf Kühlwasserseite,  
 alfa\_aussen : Wärmeübergangskoeffizient auf Kondensatfilmseite,  
 k<sub>a</sub> : auf den Aussendurchmesser des Rohres bezogener Wärmedurchgangskoeffizient nach [W+S], Gl.(2.8).

Bei Wasser als Dampf und/oder Kühlmedium oder bei Verwendung der Stoffdatenbank werden die Stoffwerte nach jedem Schritt für die sich neu einstellenden Temperaturen des Kondensatfilms (Mitteltemperatur zwischen Wand und Kondensationstemperatur) und des Kühlwassers neu errechnet.

## 2.11 DestB Destillation von Zweistoffgemischen

Programm: DestB	Daten: *.DeB
DESTILLATION BINÄRER GEMISCHE  Siede- und Taulinien bei konstantem Druck: [W+S], Bilder 5.7 und 5.10 Gleichgewichtslinien bei konstantem Druck: [W+S], Bilder 5.8 und 5.12 relative Flüchtigkeit bei konstantem Druck: [W+S], Bild 5.8  für ideale und reale Gemische	
Grundlagen: [W+S], Abschnitt 5.1	Beispiel 5.3

Dieses Programm berechnet Stützwerte der Siede- und Taulinie und des x-y-Diagramms ([W+S], Abschnitte 5.1.1.4 und 5.1.2) für konstanten Druck. Je nach Verwendungszweck werden mehr (Aufzeichnen mit Grafikprogrammen) oder weniger (nur Tabelle erforderlich) Tabellenwerte benötigt.

Anzahl Tabellenwerte	n_TabW	[-]	=	11?	11
Druck (Absolutdruck)	p	[Pa]	=	1.000E+0005	

In der folgenden Stoffwerteingabe müssen für dieses Programm nur die Felder für die Antoine-Konstanten bearbeitet werden.

$$\ln(p_{bi}) = c_{Ant1i} - \frac{c_{Ant2i}}{c_{Ant3i} + T} \quad ([W+S], \text{Gl.}(5.7)).$$

p<sub>bi</sub>: Dampfdruck der Komponente i in [Pa]  
 T : Temperatur in [K]

Umfangreiche Tabellen für c<sub>Ant</sub> z.B. in  
 Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Sherwood, T.K.:  
 The Properties of Gases and Liquids, 3. Aufl.,  
 McGraw-Hill Book Company, New York, London, Düsseldorf 1977.

Die Konstanten der Antoine-Gleichung zur Bestimmung der Dampfdrücke der beiden Komponenten werden über die Stoffwertdatenbank eingegeben (--> Abschnitt 1.3.3).

Zur Erfassung des realen Verhaltens des Gemisches werden die Aktivitätskoeffizienten der beiden Komponenten in Abhängigkeit der leichter flüchtigen Komponente benötigt. Falls keine experimentell bestimmten Werte zur Verfügung stehen, sind diese mit Berechnungsmethoden wie z.B. Wilson, NRTL oder UNIQUAC ([RPP], Abschnitt 8.2) für die jeweilige Siedetemperatur zu bestimmen. Für das Gemisch Ethylacetat-Ethanol (Vorgabebeispiel des Programms) entnehmen wir [RPP], S.310 folgende Aktivitätskoeffizienten:



Molenbruch Ethylacetat	Aktivitätsk. Ethylacetat	Aktivitätsk. Ethanol
0	2.30	1.00
0.2	1.75	1.04
0.4	1.38	1.16
0.6	1.14	1.32
0.8	1.04	1.66
1.0	1.00	2.14

Die Abhängigkeit des Aktivitätskoeffizienten vom Molenbruch der leichter flüchtigen Komponente kann mit einem Polynom angenähert werden:

$$\ln(\gamma_1) := c_{\text{gam}01} + c_{\text{gam}11} \cdot x_1 + c_{\text{gam}21} \cdot x_1^2 + c_{\text{gam}31} \cdot x_1^3$$

Die darin enthaltenen Koeffizienten  $c_{\text{gam}}..$  werden mit dem Programm FitPol aus dem Paket MVT durch eine Ausgleichsrechnung bestimmt. Sie führt für das obige Beispiel auf die folgenden Eingaben:

Nachfolgend sind für die beiden Komponenten die Koeffizienten der folgenden Näherungsgleichungen für die Aktivitätskoeffizienten  $\gamma_1$  und  $\gamma_2$  einzugeben:

$$\begin{aligned} \ln(\gamma_1) &:= c_{\text{gam}01} + c_{\text{gam}11} \cdot x_1 + c_{\text{gam}21} \cdot x_1^2 + c_{\text{gam}31} \cdot x_1^3 \\ \ln(\gamma_2) &:= c_{\text{gam}02} + c_{\text{gam}12} \cdot x_1 + c_{\text{gam}22} \cdot x_1^2 + c_{\text{gam}32} \cdot x_1^3 \end{aligned}$$

--> ideale Gemische: Alle Koeffizienten Null setzen.  
--> reale Gemische : HANDBUCH, [W+S], Abschnitt 5.1.2

Eingabe der Koeffizienten für zutreffenden Temperaturbereich

Komponente	Name	Koeffizient c_gam0	Koeffizient c_gam1	Koeffizient c_gam2	Koeffizient c_gam3
1	Ethylacetat	0.841605	-1.634674	0.793069	0.000000
2	Ethanol	0.000000	0.069136	0.693275	0.000000

Koeffizienten aus Wertepaaren: Paket MVT, Programm FitPol

Bei idealen Gemischen müssen Sie alle Koeffizienten Null setzen. Ein azeotropes Verhalten wird wie folgt angezeigt:

Das Gemisch verhält sich positiv-azeotrop.

Der azeotrope Punkt liegt bei einem Molenbruch der leichter flüchtigen Komponente von 0.56418

Nur zur Orientierung werden bei realen Gemischen auch die relativen Flüchtigkeiten bei idealem Verhalten ausgegeben:

Zweikomponentendestillation		Ausgaben   [W+S], Bild 5.10/13			
GEMISCH: Ethylacetat / Ethanol			DRUCK = 1.000E+0005 [Pa]		
Molenbruch Flüssigkeit Ethylacetat x [-]	Molenbruch Dampf Ethylacetat y [-]	Siede-/Kon- densations- Temperatur Tb [K]	Siede-/Kon- densations- Temperatur TbC [°C]	relative Flüchtigk. ideal $\alpha_{12\_id}$ [-]	relative Flüchtigk. real $\alpha_{12\_re}$ [-]
0.0000	0.0000	351.15	78.00	1.040	2.414
0.1000	0.1879	348.24	75.09	1.063	2.082
0.2000	0.3085	346.50	73.35	1.077	1.785
0.3000	0.3952	345.48	72.33	1.086	1.525
0.4000	0.4643	344.93	71.78	1.090	1.300
0.5000	0.5257	344.72	71.57	1.092	1.108
0.6000	0.5862	344.81	71.66	1.091	0.944
0.7000	0.6524	345.20	72.05	1.088	0.804
0.8000	0.7324	346.00	72.85	1.081	0.684
0.9000	0.8394	347.42	74.27	1.070	0.581
1.0000	1.0000	349.93	76.78	1.050	0.490

## 2.12 DestM Destillation idealer Mehrstoffgemische

Programm: DestM	Daten: *.DeM
DESTILLATION IDEALER MEHRKOMONENTENGEMISCHE  Berechnung der Siedetemperaturen und der Zusammensetzung des Dampfgemisches  nach 1 bis 100 Destillationen bei konstantem Druck	
Grundlagen: [W+S], Abschnitt 5.1	Beispiele 5.1 und 5.2

Geben Sie nach der Wahl der Komponentenzahl die gewünschte Anzahl von Destillationen und den Absolutdruck ein. Bei der Mehrfachdestillation wird davon ausgegangen, dass jeweils aus einem grossen Volumen des Ausgangsgemisches nur ein verschwindend kleiner Teil destilliert wird (--> keine Änderung der Zusammensetzung während einer Destillation).

Anzahl Destillationen                      AnzDest    [-] =            10?            10  
 Druck (Absolutdruck)                      p            [Pa] = 1.500E+0005

In der folgenden Stoffwerteingabe müssen für dieses Programm nur die Felder für die Antoine-Konstanten bearbeitet werden.	
$p_{bi} = c_{Antli} - c_{Ant2i}/(c_{Ant3i} + T)$	([W+S], Gl.(5.7)).
$p_{bi}$ :	Dampfdruck der Komponente i in [Pa]
T :	Temperatur in [K]

Umfangreiche Tabellen für  $c_{Ant}$  z.B. in  
 Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Sherwood, T.K.:  
 The Properties of Gases and Liquids, 3. Aufl.,  
 McGraw-Hill Book Company, New York, London, Düsseldorf 1977.

Zur Bestimmung der Dampfdrücke müssen Sie die Konstanten der Antoine-Gleichung ([W+S], Gl.(5.7)) für jede Komponente aus der Stoffdatenbank einlesen (--> Abschnitt 1.3.3).

Geben Sie nun die Zusammensetzung des Ausgangsgemischs in Molanteilen (Molenbrüchen) ein. Die Umrechnung aus anderen Zusammensetzungsmassen können Sie mit dem Programm ZusUm durchführen.

Molenbrüche (kmol-Komponente / kmol-Gemisch) in flüssigem Ausgangsgemisch

Komponente	Name	Molenbruch $x_i$
1	Benzol	0.2000
2	Toluol	0.2000
3	p_Xylol	0.2000
4	m_Xylol	0.2000
5	o-Xylol	0.2000

Als erstes werden die Siedetemperaturen der reinen Komponenten bestimmt:

Siedetemperaturen der reinen Komponenten | [W+S], Beispiel 5.2

Druck = 1.500E+0005 [Pa]			
Komponente	Name	Siedetemperatur Tb [K]	Siedetemperatur TbC [°C]
1	Benzol	366.54	93.39
2	Toluol	398.16	125.01
3	p_Xylol	426.75	153.60
4	m_Xylol	427.49	154.34
5	o-Xylol	431.37	158.22

Anschliessend werden die Siedetemperaturen des Gemischs und die Molenbrüche im Dampf nach ([W+S], Abschnitt 5.1.1.4) für die eingangs verlangte Anzahl Destillationen berechnet:

Siedetemperaturen  $T_b$  und Molenbrüche  $y_i$  im Dampf | [W+S], Beispiel 5.2

Druck = 1.500E+0005 [Pa]						
Dest.	$T_b$ [K]	Benzol $y$ [-]	Toluol $y$ [-]	p_Xylol $y$ [-]	m_Xylol $y$ [-]	o-Xylol $y$ [-]
1	401.57	0.4872	0.2184	0.1029	0.1005	0.0909
2	383.57	0.7690	0.1467	0.0309	0.0294	0.0240
3	372.67	0.9115	0.0716	0.0065	0.0060	0.0044
4	368.61	0.9662	0.0308	0.0012	0.0011	0.0007
5	367.28	0.9868	0.0127	0.0002	0.0002	0.0001
6	366.82	0.9948	0.0052	0.0000	0.0000	0.0000
7	366.65	0.9979	0.0021	0.0000	0.0000	0.0000
8	366.58	0.9992	0.0008	0.0000	0.0000	0.0000
9	366.55	0.9997	0.0003	0.0000	0.0000	0.0000
10	366.54	0.9999	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000

### 2.13 EinDa Eindampfen in Mehrstufenanlagen

Programm: EinDa Daten: \*.EiD

**M E H R S T U F E N E I N D A M P F U N G**

**M I T G L E I C H S T R O M F Ü H R U N G**

Anlagen bis 10 Stufen nach [W+S], Bild 5.14 (ohne Zulaufvorwärmung)

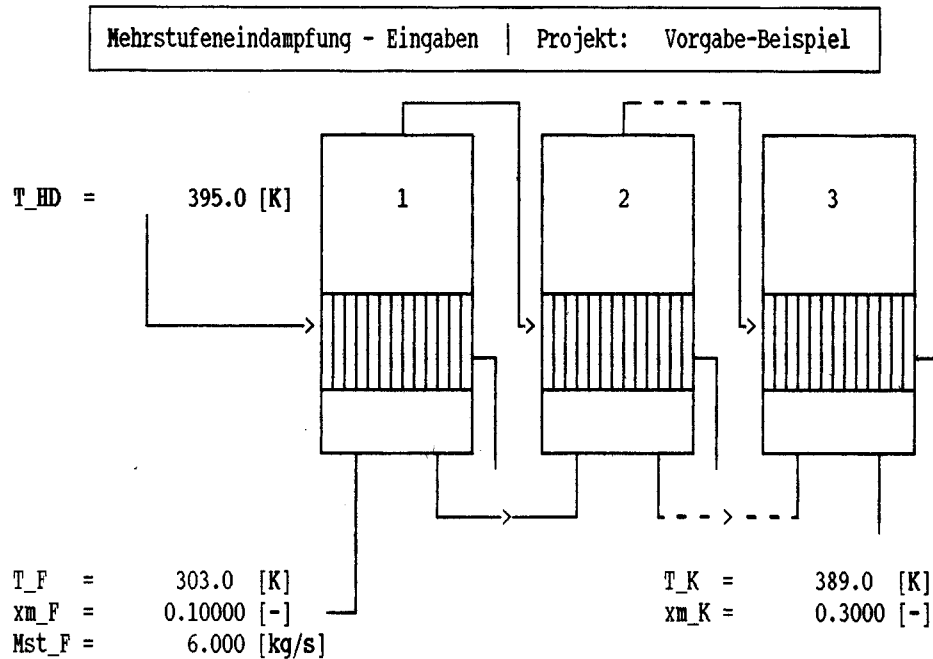
---

Vereinfachende Annahmen: 1. keine Wärmeverluste  
2. Brüden reißen keine Flüssigkeit mit

---

Grundlagen: [W+S], Abschnitt 5.3, HANDBUCH

Geben Sie nach der Wahl des Projektnamens die von der folgenden Maske verlangten Daten ein. Die Legenden zu den aktivierten Eingabefeldern werden auf dem Bildschirm eingeblendet. Als Zusammensetzungsmass dient hier der Massenbruch. Die Umrechnung aus anderen Zusammensetzungsmassen können Sie mit dem Programm ZusUm durchführen.



Die Wärmedurchgangskoeffizienten für die einzelnen Verdampfer (--> Abschätzungen mit dem Programm VerR) haben Sie in die nachstehende Tabelle einzugeben:

Nummer der Stufe	Wärmedurchgangskoeff. [W/m <sup>2</sup> K]
1	3000.0
2	2000.0
3	1500.0

Wählen Sie für die folgende Rechnung zwischen gleichen Wärmeübertragungsflächen in allen Stufen (baugleiche Verdampfer) und gleichen Temperaturdifferenzen in allen Stufen.

Die aus der Stoffdatenbank benötigten Stoffwerte für die verdampfende (spezifische Wärmekapazität in der flüssigen Phase, spezifische Verdampfungsenthalpie, Dampfdruck, Antoine-Konstanten für die Dampfdruckberechnung und Molmasse) und die nicht verdampfende Komponente (spezifische Wärmekapazität und Molmasse) werden in den Eingabemasken markiert (--> Abschnitt 1.3.3).

Die weiteren Berechnungen können Sie mit oder ohne Berücksichtigung der Siedetemperaturerhöhung infolge der Anwesenheit der aufzukonzentrierenden Komponente ([W+S], Abschnitt 5.3.1) durchführen. Falls Sie die Siedetemperaturerhöhung berücksichtigen möchten, kann dies durch Eingabe der Koeffizienten für die Bestimmung des Aktivitätskoeffizienten in die nachstehende Maske mit korrekter Erfassung des realen Verhaltens erfolgen. Durch Null Setzen aller Koeffizienten können Sie näherungsweise auch für ideale Gemische rechnen.

Eingaben zur Siedetemperaturerhöhung		Vorgabe-Beispiel
A	Berücksichtigung der Siedetemperaturerhöhung	
B	Vernachlässigung der Siedetemperaturerhöhung	

Zur Bestimmung der Siedetemperaturerhöhungen wird der Aktivitätskoeffizient als $f(x_1)$ benötigt. Dazu dient der folgende Polynomansatz:
---

$$\ln(\gamma_{11}) = -2.3724 + 2.3724 * x_1 + 0.00000 * x_1^2$$

$x_1$ : Molenbruch verdampfende Komponente [kmol/kmol]
--

Die Ausgabe erscheint auf drei Bildschirmseiten. Auf der ersten werden die Eingabedaten wiedergegeben:

Mehrstufigeindampfung: Ergebnisse 1/2							Vorgabe-Beispiel
Stufe	Temperatur [K]	Temp.-differenz [K]	benötigte Leistung [kW]	A-Wärmeübertr. [m <sup>2</sup> ]	Massenstr. Brüden [kg/s]	Massenstrom Konzentrat [kg/s]	Massenbruch Konzentrat [kg/kg]
1	379.1	15.9	4468.3	122.00	1.2071	4.7929	0.1252
2	363.1	16.0	2757.2	122.01	1.3350	3.4579	0.1735
3	339.0	24.1	3116.8	121.99	1.4579	2.0000	0.3000

Die Berechnung erfolgt durch Lösen des linearen Gleichungssystems, das sich aus den Wärme- und Stoffstrombilanzen ergibt. Eine gute Zusammenfassung dazu gibt [ROSS] im Kapitel 3. Dort findet man auch ein ausführlich durchgerechnetes Zahlenbeispiel für vernachlässigte Siedetemperaturerhöhung. Die Resultate der Berechnungen werden auf der zweiten und dritten Bildschirmseite wie folgt wiedergegeben:

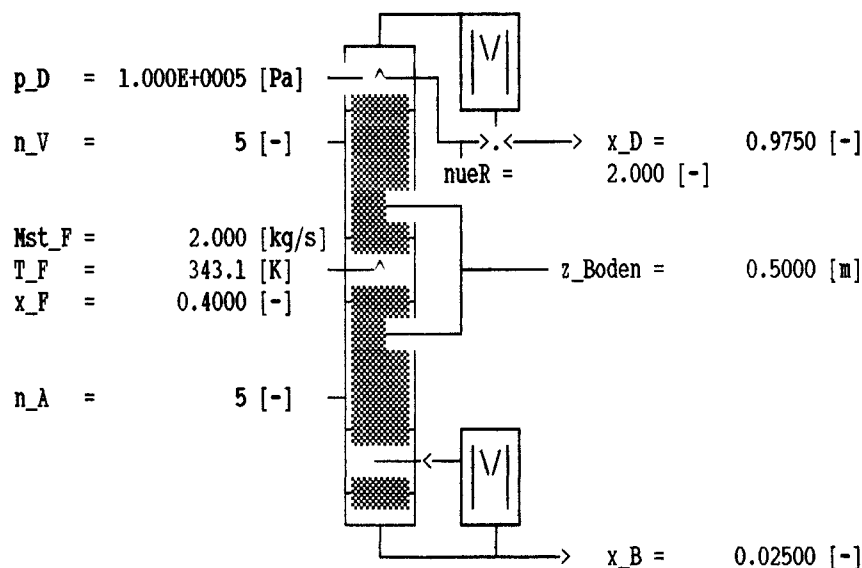
Mehrstufigeindampfung: Ergebnisse 2/2					Vorgabe-Beispiel
Stufe	Temperatur [K]	Temp.differenz total [K]	Siedetemp.-Erhöhung [K]	mittlere T.diff Wärmeübertrager [K]	Druck [bar]
1	379.12	15.88	4.12	12.21	1.083
2	363.08	16.04	5.36	11.30	0.569
3	339.00	24.08	8.74	17.03	0.174

## 2.14 RekB Rektifikation in Bodenkolonnen

Programm: RekB	Daten: *.ReB
<b>REKTIFIKATION BINÄRER GEMISCHTE IN BODENKOLONNEN</b> vollständige Auslegung für Gemische mit idealem und realem Gleichgewichtsverhalten ohne Berücksichtigung von Wärmeverlusten. MIT FORMELEINGABE	
Mit diesem Programm können auch Füllkörperkolonnen nach dem $n_{th}$ - HETP - Konzept dimensioniert werden: Eingabemuster auf File NTH_HETP	
Grundlagen: [W+S], Kapitel 6	Beispiele 6.1 bis 6.7

Geben Sie die Prozess- und Apparatedaten über die folgende Maske ein:

RekB: Eingabe Prozess- und Apparatedaten | [W+S], Bsp. Kap. 6



Wie üblich erscheint auf dem Bildschirm zu jedem aktiven Eingabefeld eine Erklärung. Hier sei nur auf die Anzahl Unterteilungen des Verstärkungs-  $n_V$  und des Abtriebteils  $n_A$  hingewiesen. Innerhalb dieser Abschnitte wird mit konstanten Stoffwerten gerechnet. Eine höhere Anzahl Abschnitte verbessert die Genauigkeit der Berechnung - sie erhöht aber auch die Rechenzeit. Die Genauigkeit der verfügbaren Berechnungsgleichungen rechtfertigt allerdings keine hohe Zahl an Unterteilungen. Lediglich zur Aufzeichnung des Verlaufs der Trennung mit einem Grafikprogramm ist eine höhere Anzahl von Kolonnenabschnitten sinnvoll.

Die für die Rechnung benötigten Stoffwerte können Sie aus der Stoffdatenbank einlesen (--> Abschnitt 1.3.3). Selbstverständlich

haben Sie bei Neueingaben nur die in den nachfolgend einzugebenden Gleichungen benötigten Grössen zu bearbeiten (die nicht benötigten werden vom Programm ignoriert).

Nachfolgend sind nur die Felder für die wirklich benötigten Stoffwerte zu bearbeiten.

In manchen Beziehungen zum Berechnen des Bodenverstärkungsverhältnisses werden z.B. keine Diffusionskoeffizienten benötigt. Es genügt dann, für diese Stoffwerte je einen beliebigen Wert innerhalb des vom Programm verlangten Bereichs einzugeben.  
(Umgehen der Sicherungen für eine vollständige Eingabe)

Nebst den Dichten beider Phasen werden auf jeden Fall die Konstanten der Dampfdruckgleichung nach Antoine benötigt:

$$p_{bi} = c_{Ant1i} - c_{Ant2i} / (c_{Ant3i} + T) \quad ([W+S], \text{Gl.}(5.7)).$$

$p_{bi}$ : Dampfdruck der Komponente  $i$  in [Pa]  
 $T$  : Temperatur in [K]

Umfangreiche Tabellen für  $c_{Ant}$  z.B. in  
 Reid, R.C., Prausnitz, J.M., Sherwood, T.K.:  
 The Properties of Gases and Liquids, 3. Aufl.,  
 McGraw-Hill Book Company, New York, London, Düsseldorf 1977.

Zur Erfassung des realen Verhaltens des Gemisches werden die Aktivitätskoeffizienten der beiden Komponenten in Abhängigkeit des Molenbruchs der leichter flüchtigen Komponente benötigt (--> siehe Programm DestB).

Im folgenden sind für die beiden Komponenten die Koeffizienten der nachstehenden Näherungsgleichungen für die Aktivitätskoeffizienten einzugeben:

$$\ln(\gamma_1) := c_{gam01} + c_{gam11} \cdot x_1 + c_{gam21} \cdot x_1^2 + c_{gam31} \cdot x_1^3$$

$$\ln(\gamma_2) := c_{gam02} + c_{gam12} \cdot x_1 + c_{gam22} \cdot x_1^2 + c_{gam32} \cdot x_1^3$$

--> ideale Gemische: Alle Koeffizienten Null setzen.

--> reale Gemische : HANDBUCH, [W+S], Abschnitt 5.1.2

Eingabe der Koeffizienten für zutreffenden Temperaturbereich

Komponente	Name	Koeffizient $c_{gam0}$	Koeffizient $c_{gam1}$	Koeffizient $c_{gam2}$	Koeffizient $c_{gam3}$
1	Benzol	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	Toluol	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Für die Bestimmung des minimalen Kolonnendurchmessers und des integralen Bodenverstärkungsverhältnisses können Sie Gleichungen aus der Literatur oder aus eigenen Untersuchungen eingeben (Formeleingabe --> siehe Abschnitt 1.3.4):



## DURCHMESSER und BODENVERSTÄRKUNGSVERHÄLTNIS | [W+S], Bsp. Kap. 6

Nachfolgend sind eigene Beziehungen zur Berechnung des minimalen Kolonnendurchmessers und zur Bestimmung des integralen Bodenverstärkungsverhältnisses einzugeben.

Die im Programm integrierte Formel-Auswertungsprozedur erlaubt die Verwendung folgender Operatoren und Funktionen:

Operatoren: + - \* / ^

Funktionen: sqrt() ln() log()  
sin() cos() tan() atn()

Konstante: pi

Wie aus der nachstehenden Maske erkennbar, sind die im allgemeinen benötigten Formelzeichen bereits vorgegeben. Für die Berechnung des minimalen Kolonnendurchmessers werden die Symbole A\_K, d\_K und w\_g verlangt. Sie wurden deshalb mit dem Vermerk "OBLIGATORISCH" versehen. Verändern Sie die übrigen Symbole gegenüber der Bildschirmanzeige zweckmässigerweise nicht:

## Gleichungen MINIMALER KOLONNENDURCHMESSER | [W+S], Bsp. Kap. 6

Für die auf der nächsten Seite einzugebenen Formeln stehen die folgenden Symbole zur Verfügung. Eigene Symbole dürfen nur für Zusatzgrössen IN DER REIHENFOLGE DER BERECHNUNGS AUSFÜHRUNG gewählt werden.

A_K	Kolonnenquerschnittsfläche	OBLIGATORISCH	m <sup>2</sup>
d_K	Kolonnendurchmesser	OBLIGATORISCH	m
eta_g	dynamische Viskosität, Gasphase		Pa s
eta_l	dynamische Viskosität, flüssige Phase		Pa s
rho_g	Dichte, Gasphase		kg/m <sup>3</sup>
rho_l	Dichte, flüssige Phase		kg/m <sup>3</sup>
sigmaA	Oberflächenspannung		N/m
Vst_g	Volumenstrom, Gasphase		m <sup>3</sup> /s
Vst_l	Volumenstrom, flüssige Phase		m <sup>3</sup> /s
w_g	Geschwindigkeit der Gasphase	OBLIGATORISCH	m/s

Anzahl zusätzlicher Formelzeichen (Durchmesser) = 4? 4

Wenn in den einzugebenden Formeln zusätzliche Grössen vorkommen, können Sie nun bis zu 7 zusätzliche Formelzeichen eingeben. Sie dürfen die dafür vom Programm vorgeschlagenen Formelzeichen selbstverständlich ändern (Formeleingabe --> siehe Abschnitt 1.3.4).

Definition ZUSÄTZLICHER SYMBOLE für den MINIMALEN KOLONNENDURCHMESSER

Geben Sie nachfolgend die Formelzeichen  
der zusätzlich benötigten Grössen ein.  
ACHTUNG: BERECHNUNGSREIHENFOLGE EINHALTEN!

1. Zusatzgrösse	=	phi ? phi
2. Zusatzgrösse	:	hilf
3. Zusatzgrösse	:	F_max
4. Zusatzgrösse	:	F

Für die Eingabe der Formeln sei auf den Abschnitt 1.3.4 verwiesen.

Gleichungen für den minimalen KOLONNENDURCHMESSER | [W+S], Bsp. Kap. 6

phi ?	0.1
hilf :	$(Vst\_l / (0.01 * Vst\_g))^{0.06} / \sqrt{1 - (Vst\_l / (0.1 * Vst\_g))}$
F_max :	$2.5 * (\phi * \phi * \sigma_A * (\rho_l - \rho_g) * 9.81)^{0.25} * hilf$
F :	$1.00 * F\_max$
w_g :	$F / \sqrt{\rho_g}$
AK :	$Vst\_g / w_g$
d_K :	$\sqrt{4 * AK / \pi}$

In den einzugebenden Formeln dürfen  
NUR DIE FOLGENDEN SYMBOLE verwendet werden.

DURCH DAS PROGRAMM ZUR VERFÜGUNG GESTELLTE GRÖSSEN:

eta\_g eta\_l sigmaA rho\_g rho\_l  
Vst\_g Vst\_l

ZU BERECHNENDE GRÖSSEN:

phi hilf F\_max F w\_g AK d\_K

Gehen Sie für das integrale Bodenverstärkungsverhältnis analog vor. Definieren Sie zunächst die Symbole,

Gleichungen für das BODENVERSTÄRKUNGSVERHÄLTNIS | [W+S], Bsp. Kap. 6

Für die auf der nächsten Seite einzugebenen Formeln stehen die folgenden  
Symbole zur Verfügung. Eigene Symbole dürfen nur für Zusatzgrössen  
IN DER REIHENFOLGE DER BERECHNUNGS AUSFÜHRUNG gewählt werden.

A_K	Kolonnenquerschnittsfläche (leer)	m <sup>2</sup>
Dif_g	Diffusionskoeffizient, Gasphase	m <sup>2</sup> /s
Dif_l	Diffusionskoeffizient, flüssige Phase	m <sup>2</sup> /s
eta_g	dynamische Viskosität, Gasphase	Pa s
eta_l	dynamische Viskosität, flüssige Phase	Pa s
rho_g	Dichte, Gasphase	kg/m <sup>3</sup>
rho_l	Dichte, flüssige Phase	kg/m <sup>3</sup>
Sc_g	Schmidtzahl, Gasphase	-

Sc_l	Schmidtzahl, flüssige Phase	-
Vst_g	Volumenstrom, Gasphase	m <sup>3</sup> /s
Vst_l	Volumenstrom, flüssige Phase	m <sup>3</sup> /s
Eg	Bodenverstärkungsverhältnis (global) OBLIGATORISCH	-

Anzahl zusätzlicher Formelzeichen (Verst.Verh.) = 4?  
 0 ≤ Eingabebereich ≤ 6

dann die Formelzeichen für zusätzlich benötigte Grössen

Definition ZUSÄTZLICHER SYMBOLE für das BODENVERSTÄRKUNGSVERHÄLTNIS

Geben Sie nachfolgend die Formelzeichen  
 der zusätzlich benötigten Grössen ein.  
 ACHTUNG: BERECHNUNGSREIHENFOLGE EINHALTEN!

1. Zusatzgrösse	=	Veta ? Veta
2. Zusatzgrösse	:	Re_g
3. Zusatzgrösse	:	Re2We
4. Zusatzgrösse	:	K

und schliesslich die Formeln für die Berechnung des integralen Bodenverstärkungsverhältnisses:

Gleichungen für das BODENVERSTÄRKUNGSVERHÄLTNIS | [W+S], Bsp. Kap. 6

Veta ?	$(\eta_l/\eta_g)^{0.9}$
Re_g :	$(Vst_g/A_K) \cdot \rho_g/\eta_g$
Re2We :	$\rho_l \cdot \sigma_A / (\eta_l \cdot \eta_l)$
K :	$1.92E-4 \cdot Re2We^{0.4} \cdot Veta^{0.9} / Re_g^{0.13}$
Eg :	$1 - 1/(2.7183^K)$

In den einzugebenden Formeln dürfen  
 NUR DIE FOLGENDEN SYMBOLE verwendet werden.

DURCH DAS PROGRAMM ZUR VERFÜGUNG GESTELLTE GRÖSSEN:

A\_K    Dif\_g    Dif\_l    eta\_g    eta\_l    sigmaA    Sc\_g  
          Sc\_l    rho\_g    rho\_l    Vst\_g    Vst\_l

ZU BERECHNENDE GRÖSSEN:

Veta    Re\_g    Re2We    K    Eg

Nun wird der minimale Kolonnendurchmesser für den Verstärkungs- und den Abtriebsteil getrennt berechnet und in der nachstehenden Tabelle ausgegeben:

RekB: Eingabe des KOLONNENDURCHMESSERS | [W+S], Bsp. Kap. 6

Kolonnen- teil	maximale Geschwindigkeiten		maximaler F-Faktor	minimaler Kolonne- querschn.	minimaler Kolonne- durchm.
	Gasphase w_g [m/s]	flüssige Phase w_l [m/s]	F_max [ kg/ ms ]	A_K_min [m2]	d_K_min [m]
Verstärkung	1.57265	0.00324	2.59	0.5766	0.8568
Abtrieb	1.61976	0.00860	2.72	0.5822	0.8610

gewählter Kolonnendurchmesser                      d\_K    [m] =            1.0300?            1.0300

Mittlerer F-Faktor im Verstärkungsteil = 1.792 [ kg/ ms ]

Mittlerer F-Faktor im Abtriebsteil        = 1.901 [ kg/ ms ]

Sie können nun einen geeigneten Kolonnendurchmesser eingeben. Zur Beurteilung der Eingabe werden anschliessend die sich damit in den beiden Kolonnenteilen ergebenden F-Faktoren angezeigt.

Damit der sich in der Kolonne ändernde Druck in der Berechnung berücksichtigt werden kann (die Stoffwerte und Gleichgewichtsdaten werden abschnittsweise berechnet), wird der Druckverlust pro Trennstufe mit einem Polynomansatz in Abhängigkeit des F-Faktors bestimmt. Um dabei die Flüssigkeitsbelastung grob berücksichtigen zu können, werden die entsprechenden Werte in einem Hilfsfenster für den Verstärkungs- und den Abtriebsteil eingeblendet.

RekB: Eingaben DRUCKVERLUST PRO BODEN | [W+S], Bsp. Kap. 6

Druckverlust pro Boden für Volumenstromdichten  
der flüssigen Phase (Flüssigkeitsbelastungen) von  
Verstärkungsteil: 0.002240 [m3/m2s] =    8.07 [m3/m2h]  
Abtriebsteil:        0.006011 [m3/m2s] =    21.64 [m3/m2h]  
aus der nachstehenden Näherungsgleichung:

deltap/n =        0.0000 +        0.0000 \* F\_Faktor            28.00 \* F\_Faktor^2

deltap/n    Druckverlust pro Boden    in            [Pa]  
F\_Faktor    F\_Faktor [W+S], Gl.(6.30) in [ kg/ m s ]  
(Rechnung mit konstantem Druck:alle Koeffizienten Null setzen)

Nach dem (fakultativen) Abspeichern aller Eingaben - einschliesslich der Berechnungsgleichungen - wird die in [W+S], Kap. 6 ausführlich gezeigte Rechnung gestartet. Sie wird zunächst für konstanten Druck (= Kopfdruck) durchgeführt. Nach der ersten Durchrechnung werden die sich in der Kolonne ergebenden neuen Drücke bestimmt. Damit wird eine neue Kolonnenhöhe ermittelt. Die Rech-

nung wird dann solange wiederholt, bis sich keine Druckänderungen in der Kolonne mehr ergeben. Das Programm orientiert Sie mit der folgenden Einblendung über den Fortschritt der Rechnung:

Bitte warten: Es werden umfangreiche Iterationen durchgeführt.

w |

Iteration: 2 / Abschnitt: 3

Die Ergebnisse werden auf den folgenden vier Bildschirmseiten getrennt für den Verstärkungsteil und den Abtriebsteil (hier nicht wiedergegeben) ausgegeben:

RekB: Hauptergebnisse Verstärkungsteil | [W+S], Bsp. Kap. 6

Durchmesser der Kolonne	d_K	[m]	=	1.03
Bodenabstand	z_Boden	[m]	=	0.50
Trennstufenzahl Verstärkungsteil	n_thV	[-]	=	7.60
Bodenzahl Verstärkungsteil	n_BodenV	[-]	=	10.59
Höhe Verstärkungsteil	z_V	[m]	=	5.29
Kondensatorleistung (ohne Unterkr.)	Qst_K	[kW]	=	843.99

LEGENDE FÜR DIE FOLGENDE RESULTATTABELLE

Nr	Nummer des Kolonnenabschnitts
y_m	mittlere Molbeladung der Gasphase im Kolonnenabschnitt
x_m	mittlere Molbeladung der flüssigen Phase im K.-Abschnitt
T_m	mittlere Temperatur im Kolonnenabschnitt
n_th	Anzahl Trennstufen
Eg	integrales Bodenverstärkungsverhältnis
n_Boden	Bodenzahl
z_Abschn	Höhe des Kolonnenabschnitts
z_tot_V	Gesamthöhe des Verstärkungsteils

RekB: Ergebnisse für den Verstärkungsteil | [W+S], Bsp. Kap. 6

Nr	Molenbr. y_m [-]	Molenbr. x_m [-]	Temp. T_m [K]	Trennst. n_th [-]	Verst.v. Eg [-]	Bodenz. n_Boden [-]	Abschnitt z_Abschn [m]	Verst.tl. z_tot_V [m]
1	0.6443	0.4790	364.09	1.6880	0.7163	2.282	1.141	1.141
2	0.7178	0.5892	361.06	1.1971	0.7208	1.633	0.816	1.957
3	0.7913	0.6994	358.30	1.1202	0.7250	1.559	0.780	2.737
4	0.8648	0.8097	355.75	1.3193	0.7288	1.842	0.921	3.658
5	0.9383	0.9199	353.39	2.2719	0.7324	3.270	1.635	5.293

Anschliessend werden die Berechnungsgleichungen

RekB: Gleichungen für Kolonnendurchmesser	[W+S], Bsp. Kap. 6
---	--------------------

```

phi : 0.1
hilf : (Vst_l/(0.01*Vst_g))^0.06 / sqrt(1 - (Vst_l/(0.1*Vst_g)))
F_max : 2.5*(phi*phi*sigmaA*(rho_l-rho_g)*9.81)^0.25*hilf
F : 1.00*F_max
w_g : F/sqrt(rho_g)
AK : Vst_g/w_g
d_K : sqrt(4*AK/pi)

```

RekB: Gln. für Bodenverstärkungsverhältnis	[W+S], Bsp. Kap. 6
--	--------------------

```

Veta : (eta_l/eta_g)^0.9
Re_g : (Vst_g/A_K)*rho_g/eta_g
Re2We : rho_l*sigmaA/(eta_l*eta_l)
K : 1.92E-4 * Re2We^0.4 * Veta^0.9 / Re_g^0.13
Eg : 1 - 1/(2.7183^K)

```

und die Auslegungsdaten nochmals zusammengestellt.

Rektifikation: Auslegungsdaten	[W+S], Bsp. Kap. 6
--------------------------------	--------------------

Kolonnendurchmesser	d_K	[m]	=	1.030
Molenbruch Zulauf	x_F	[-]	=	0.4000
Temperatur Zulauf	T_F	[K]	=	343.1
Molenbruch Kopfprodukt	x_D	[-]	=	0.9750
Druck Kopf	p_D	[Pa]	=	1.000E+0005
Molenbruch Sumpfprodukt	x_B	[-]	=	0.02500

Rektifikation: Temperaturen, Drücke	[W+S], Bsp. Kap. 6
-------------------------------------	--------------------

Temperatur Kopf	T_D	[K]	=	353.3
Druck Zulaufzone	p_Zz	[Pa]	=	1.008E+0005
Molenbruch Zulaufzone	x_Zz	[-]	=	0.4236
Temperatur Zulaufzone	T_Zz	[K]	=	367.4
Druck Sumpf	p_B	[Pa]	=	1.020E+0005
Temperatur Sumpf	T_B	[K]	=	382.8

Zur Orientierung werden die mittleren Stoffwerte

Rektifikation: Stoffwerte	[W+S], Bsp. Kap. 6
---------------------------	--------------------

STOFFWERTE 1		Mm	rho	eta	cpm
		kg/kmol	kg/m3	mPa s	J/kmolK
V-Teil	flüssig	82.33	804.7	2.954E-0004	1.509E+0005
	gasförmig	81.04	2.721	8.994E-0006	
A-Teil	flüssig	88.99	787.2	2.556E-0004	1.608E+0005
	gasförmig	87.70	2.887	9.025E-0006	

STOFFWERTE 2		hmlg J/kmol	sigmaA N/m	Dif m <sup>2</sup> /s
V-Teil	flüssig	3.230E+0007	0.020495	4.853E-0009
	gasförmig			4.443E-0006
A-Teil	flüssig	3.312E+0007	0.018917	5.829E-0009
	gasförmig			4.562E-0006

und die mittleren Ströme in den beiden Kolonnenteilen ausgegeben. Hierzu ist zu bemerken, dass das Programm die Stoffwerte und Ströme für jeden Abschnitt berechnet.

Rektifikation: Ströme | [W+S], Bsp. Kap. 6

minimales Rücklaufverhältnis	nueRmin	[-]	=	1.4682
gewähltes Rücklaufverhältnis	nueR	[-]	=	2.0000

	Zulauf	Kopf- pro- dukt	Sumpf pro- dukt
Massenströme [kg/s]	2.0000	0.7159	1.2841
Molströme [kmol/s]	0.023114	0.009124	0.013990

	Gas- seite V-Teil	Gas- seite A-Teil	Flüssig- keitss. V-Teil	Flüssig- keitss. A-Teil
Massenströme [kg/s]	2.4613	2.6637	1.5023	3.9478
Molströme [kmol/s]	0.027372	0.030372	0.018248	0.044362
Volumenströme [m <sup>3</sup> /s]	0.9046	0.9225	0.0018668	0.0050150
F-Faktor [kg/ms]	1.901	1.792		

## 2.15 ReKF Rektifikation in Füllkörperkolonnen

Programm: ReKF	Daten: *.ReF
REKTIFIKATION BINÄRER GEMISCHE IN FÜLLKÖRPERKOLONNEN  vollständige Auslegung mit der HTU-NTU-Methode  für Gemische mit idealem und realem Gleichgewichtsverhalten ohne Berücksichtigung von Wärmeverlusten.  KANN MIT UND OHNE FORMELEINGABE BETRIEBEN WERDEN	
Grundlagen: [W+S], Kapitel 6	Beispiele 6.1 bis 6.3 und 6.8 bis 6.12

Dieses Programm arbeitet nach dem HTU-NTU-Konzept. Falls Sie mit experimentellen Daten nach der Trennstufenmethode (HETP-n<sub>th</sub>-Konzept) arbeiten möchten, müssen sie auch für Füllkörperkolonnen das Programm RekB verwenden. Beachten Sie dazu den folgenden Hinweis:

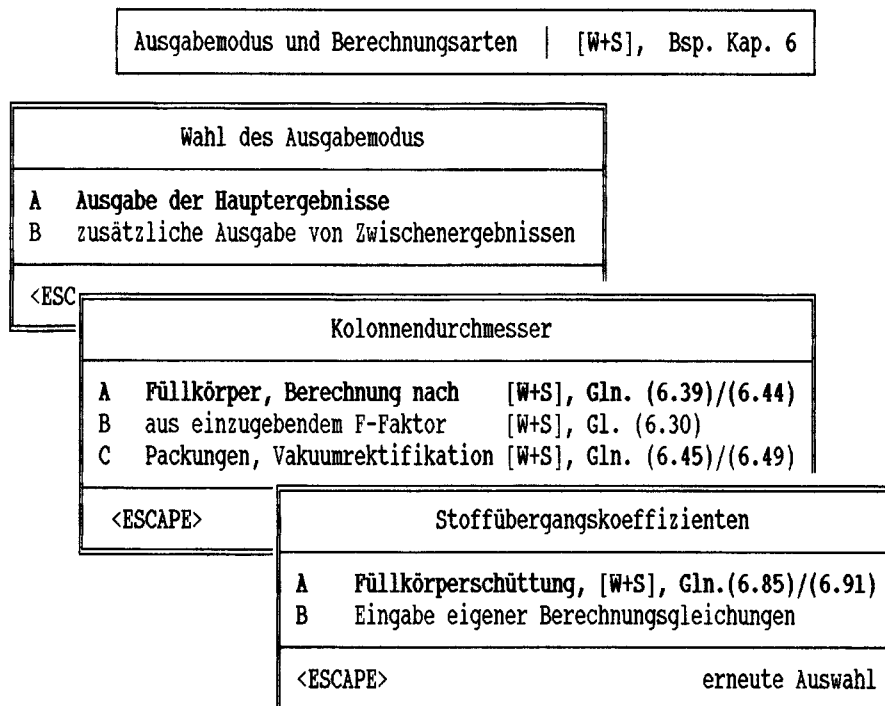
Füllkörperkolonnen können näherungsweise auch nach dem n<sub>th</sub> - HETP - Konzept berechnet werden:

Höhe der Füllkörper (Packung) = Trennstufenzahl \* Höhe einer Trennstufe

Verwenden Sie dazu das Programm RekB für Bodenkolonnen. Geben Sie darin für den Bodenabstand z<sub>Boden</sub> den HETP-Wert und für das Bodenverstärkungsverhältnis Eg den Wert Eins ein.

Eingabemuster im Programm RekB unter dem Namen NTH\_HETP abrufbar.

Das Programm RekF ermöglicht Ihnen die Auswahl zwischen verschiedenen Ausgabemodi und unterschiedlichen Berechnungsmethoden für den Kolonnendurchmesser und die Stoffübergangskoeffizienten:



Die einzelnen Menüpunkte werden nachstehend kurz beschrieben.

#### Wahl des Ausgabemodus

- A Ausgabe der Hauptergebnisse  
In diesem Ausgabemodus wird auf die ausführliche Wiedergabe von Zwischenergebnissen verzichtet.
- B zusätzliche Ausgabe von Zwischenergebnissen  
Bei der Wahl dieses Menüpunktes erhalten Sie zusätzlich zu den Ausgaben nach A ein ausführliches Protokoll der Zwischenergebnisse für alle Abschnitte.



**Kolonnenendurchmesser**

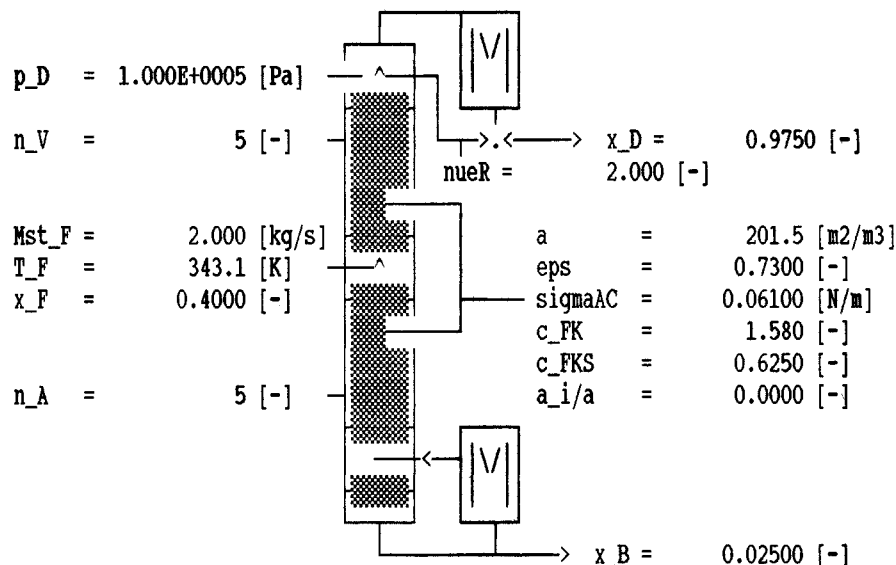
- A Füllkörper, Berechnung nach [W+S], Gl. (6.39)/(6.44)  
Siehe Buch [W+S].
- B aus einzugebendem F-Faktor [W+S], Gl. (6.30)  
In der Praxis ist die Durchmesserberechnung über F-Faktoren häufig. Geben Sie den gewünschten F-Faktor in der Maske "Prozess- und Apparatedaten" ein.
- C Packungen, Vakuumrektifikation [W+S], Gl. (6.45)/(6.49)  
Siehe Buch [W+S].

**Stoffübergangskoeffizienten**

- A Füllkörperschüttung, [W+S], Gl.(6.85)/(6.91)  
Für regellose Füllkörperschüttungen, siehe Buch [W+S].
- B Eingabe eigener Berechnungsgleichungen  
Mit der Aktivierung dieses Menüs können Sie die Gleichungen zur Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten in algebraischer Schreibweise eingeben.

Geben Sie die Prozess- und Apparatedaten über die nachstehende Maske ein:

RekF: Eingaben 1/6 - Prozess- und Apparatedaten | [W+S], Bsp. Kap. 6



Je nach der Auswahl in den oben gezeigten Menü sieht diese Maske etwas unterschiedlich aus. Wie üblich wird auf dem Bildschirm zu jedem aktiven Eingabefeld eine Legende eingeblendet.

Hier sei auf die Anzahl Unterteilungen des Verstärkungs-  $n_V$  und des Abtriebteils  $n_A$  hingewiesen. Innerhalb dieser Abschnitte wird mit konstanten Stoffwerten und Strömen gerechnet. Da für jeden Abschnitt auch eine neue Steigung der Gleichgewichtslinie bestimmt wird (Einfluss siehe [W+S], Gl.6.76), wirkt sich die Unterteilung hier stärker aus als bei den Bodenkolonnen. Eine höhere Anzahl Abschnitte verbessert die Genauigkeit der Berechnung deutlicher. Die Genauigkeit der verfügbaren Berechnungsgleichungen rechtfertigt allerdings auch hier keine hohe Zahl an Unterteilungen. Lediglich

zur Aufzeichnung des Verlaufs der Trennung mit einem Grafikprogramm ist eine höhere Anzahl von Kolonnenabschnitten sinnvoll.

Die für die Rechnung benötigten Stoffwerte werden über die Stoffdatenbank eingegeben (--> Abschnitt 1.3.3). Die bei Neueingaben zu bearbeitenden Felder sind in den Eingabemasken markiert.

Zur Erfassung des realen Verhaltens des Gemisches werden die Aktivitätskoeffizienten der beiden Komponenten in Abhängigkeit des Molenbruchs der leichter flüchtigen Komponente benötigt (--> siehe Programm DestB).

Im folgenden sind für die beiden Komponenten die Koeffizienten der nachstehenden Näherungsgleichungen für die Aktivitätskoeffizienten einzugeben:

$$\ln(\gamma_1) = c_{\text{gam}01} + c_{\text{gam}11}x_1 + c_{\text{gam}21}x_1^2 + c_{\text{gam}31}x_1^3$$

$$\ln(\gamma_2) = c_{\text{gam}02} + c_{\text{gam}12}x_1 + c_{\text{gam}22}x_1^2 + c_{\text{gam}32}x_1^3$$

--> ideale Gemische: Alle Koeffizienten Null setzen.

--> reale Gemische : HANDBUCH, [W+S], Abschnitt 5.1.2

Eingabe der Koeffizienten für zutreffenden Temperaturbereich

Komponente	Name	Koeffizient c_gam0	Koeffizient c_gam1	Koeffizient c_gam2	Koeffizient c_gam3
1	Benzol	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
2	Toluol	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Koeffizienten aus Wertepaaren: Paket MVT, Programm FitPol

Gemäss Ihrer Wahl im Menü **Kolonnendurchmesser** wird der minimale Kolonnendurchmesser für Füllkörperschüttungen nach [W+S], Gln. (6.39)/(6.44), für Sulzer-Gewebepackungen nach [W+S], Gln. (6.45)/(6.49) oder mit einem eingegebenen F-Faktor aus [W+S], Gl. (6.30) für den Verstärkungs- und den Abtriebsteil getrennt berechnet und in der nachstehenden Tabelle ausgegeben:

Eingabe 5/6: Kolonnendurchmesser | [W+S], Beispiel 6.11

Kolonnen- teil	maximale Geschwindigkeiten		maximale Reynoldszahl	minimaler Kolonnen- querschn.	minimaler Kolonnen- durchm.
	Gasphase w_g [m/s]	flüssige Phase w_l [m/s]	Gasphase Re_g [-]	A_K_min [m2]	d_K_min [m]
Verstärkung	1.10915	0.00228	1660.0	0.8175	1.0202
Abtrieb	0.90838	0.00482	1412.6	1.0382	1.1497

gewählter Kolonnendurchmesser  $d_K$  [m] = 1.1900? 1.1900

Mittlerer F-Faktor im Verstärkungsteil = 1.342 [kg/ms]  
 Mittlerer F-Faktor im Abtriebsteil = 1.424 [kg/ms]

Sie können nun einen geeigneten Kolonnendurchmesser eingeben. Zur Beurteilung der Eingabe werden anschliessend die sich damit in den beiden Kolonnenteilen ergebenden F-Faktoren angezeigt.

Damit der sich in der Kolonne ändernde Druck in der Berechnung berücksichtigt werden kann (die Stoffwerte, Gleichgewichtsdaten und Übergangskoeffizienten werden abschnittsweise berechnet), wird der auf die Füllkörperhöhe bezogene Druckverlust mit einem Polynomansatz in Abhängigkeit des F-Faktors bestimmt. Um dabei die Flüssigkeitsbelastung grob berücksichtigen zu können, werden die entsprechenden Werte in einem Hilfsfenster für den Verstärkungs- und den Abtriebsteil eingeblendet:

Eingaben 6/6: Druckverlust | [W+S], Bsp. Kap. 6

Druckverlust pro Meter Füllkörperfüllung für Volumenstromdichten der flüssigen Phase (Flüssigkeitsbelastungen) von  
 Verstärkungsteil: 0.001678 [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>s] = 6.04 [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h]  
 Abtriebsteil: 0.004503 [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>s] = 16.21 [m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>h]  
 aus der nachstehenden Näherungsgleichung:

$$\text{deltap/z} = 0.0000 + 0.0000 * \text{F\_Faktor} + 28.00 * \text{F\_Faktor}^2$$

deltap/z Druckverlust pro Packungshöhe in [Pa/m]  
 F\_Faktor F\_Faktor [W+S], Gl.(6.30) in [kg/m s]  
 (Rechnung mit konstantem Druck: alle Koeffizienten Null setzen)

Nach dem (fakultativen) Abspeichern aller Eingabedaten und Berechnungsgleichungen wird die in [W+S], Kap. 6 ausführlich gezeigte Rechnung gestartet. Sie wird zunächst für konstanten Druck (= Kopfdruck) durchgeführt. Nach der ersten Durchrechnung werden die sich in der Kolonne ergebenden neuen Drücke bestimmt. Damit wird eine neue Kolonnenhöhe ermittelt. Die Rechnung wird dann solange wiederholt, bis sich keine Druckänderungen in der Kolonne mehr ergeben.

Bei der Wahl "Ausgabe der Hauptergebnisse" (Menü Wahl des Ausgabemodus) orientiert Sie das Programm mit der folgenden Einblendung über den Fortschritt der Rechnung:

Bitte warten: Es werden umfangreiche Berechnungen durchgeführt.

w | ai | k\_g | k\_l | HTÜg | Iteration: 1 / Abschnitt: 5

Falls Sie beim Ausgabemodus "zusätzliche Ausgabe von Zwischenergebnissen" gewählt haben, wird auf dem Bildschirm ein ausführliches Protokoll über die Berechnungsergebnisse in jedem Abschnitt ausgegeben:

```

DURCHGANG (Iteration Druckverlust):      2      ABSCHNITT:      5

GASPHASE
rho_g   =      2.6813 [-]
Dif_g   =  4.189E-0006 [m2/s]
Vst_g   =      0.80621 [m3/s]
F_Faktor =      1.1870 [ kg/ m s]
Re_g    =      1075.1 [-]
beta_g  =      0.015369 [m/s]

y_m     =      0.93824 [kmol/kmol]
eta_g   =  8.972E-0006 [Pa s]
Mm_g    =      78.976 [kg/kmol]
w_g     =      0.72488 [m/s]
Sc_g    =      0.79876 [-]
Sh_g    =      79.750 [-]
k_g     =  5.218E-0004 [kmol/m2s]

FLÜSSIGE PHASE
rho_l   =      813.45 [kg/m3]
Dif_l   =  4.283E-0009 [m2/s]
Vst_l   =      0.0017774 [m3/s]
Sc_l    =      89.995 [-]
We      =  4.893E-0004 [-]
beta_l  =  1.164E-0004 [m/s]

x_m     =      0.91987 [kmol/kmol]
eta_l   =  3.135E-0004 [Pa s]
Mm_l    =      79.234 [kg/kmol]
w_l     =      0.0015981 [m/s]
Re_l    =      20.577 [-]
Sh_l    =      590.96 [-]
k_l     =  0.0011954 [kmol/m2s]

VERSTÄRKUNGSTEIL
p       =  1.000E+0005 [Pa]
m_Gl    =      0.42730 [-]
ai/a    =      0.52333 [m2/m3]
NTUg    =      2.7492 [-]

alfal2  =      2.5886 [-]
T_m     =      353.33 [K]
Kg      =  4.398E-0004 [kmol/m2s]
HTUg    =      0.53069 [m]
deltaz  =      1.4590 [m]

```

Die Ergebnisse werden auf den folgenden vier Bildschirmseiten getrennt für den Verstärkungsteil und den Abtriebsteil (hier nicht wiedergegeben) angezeigt:

RekF: Hauptergebnisse Verstärkungsteil | [W+S], Bsp. Kap. 6

```

Durchmesser der Kolonne      d_K      [m] =      1.19
Höhe des Verstärkungsteils  z_V      [m] =      4.27
Kondensatorleistung (ohne Unterk.) Qst_K    [kW] =      853.99

```

RekF: Ergebnisse für den Verstärkungsteil   [W+S], Beispiel 6.11								
Nr	Molenbr. y_m [-]	Molenbr. x_m [-]	Temp. T_m [K]	Steigung m_Gl [-]	HTUg [m]	NTUg [-]	Abschnitt z_Abschn [m]	Verst.tl. z_tot_V [m]
1	0.6442	0.4788	363.89	0.8482	0.5571	1.4727	0.820	0.820
2	0.7177	0.5891	360.91	0.7020	0.5394	1.1381	0.614	1.434
3	0.7912	0.6993	358.18	0.5885	0.5294	1.1567	0.612	2.047
4	0.8647	0.8096	355.66	0.4989	0.5265	1.4589	0.768	2.815
5	0.9382	0.9199	353.33	0.4273	0.5307	2.7492	1.459	4.274

Anschliessend werden die Auslegungsdaten

Rektifikation: Auslegungsdaten   [W+S], Bsp. Kap. 6
---

Kolonnendurchmesser	d_K	[m] =	1.190
Molenbruch Zulauf	x_F	[-] =	0.4000
Temperatur Zulauf	T_F	[K] =	343.1
Molenbruch Kopfprodukt	x_D	[-] =	0.9750
Druck Kopf	p_D	[Pa] =	1.000E+0005
Molenbruch Sumpfprodukt	x_B	[-] =	0.02500

Rektifikation: Temperaturen, Drücke   [W+S], Bsp. Kap. 6
--

Temperatur Kopf	T_D	[K] =	353.3
Druck Zulaufzone	p_Zz	[Pa] =	1.002E+0005
Molenbruch Zulaufzone	x_Zz	[-] =	0.4237
Temperatur Zulaufzone	T_Zz	[K] =	367.2
Druck Sumpf	p_B	[Pa] =	1.004E+0005
Temperatur Sumpf	T_B	[K] =	382.3

und die Daten der Füllkörper nochmals zusammengestellt.

Rektifikation: Daten der Füllkörperfüllung   [W+S], Bsp. Kap. 6
---

bezogene Oberfläche	a	[m <sup>2</sup> /m] =	201.5
Porosität	eps	[-] =	0.7300
Gleichwertiger Kugeldurchmesser	d_32	[m] =	0.008040
kritische Oberflächenspannung	sigmaAC	[N/m] =	0.06100
Füllkörperkonstante [W+S], Gl.(6.42)	c_FK	[-] =	1.580
Füllkörperkonstante [W+S], Gl.(6.85)	c_FKS	[-] =	0.6250

Zur Orientierung werden die mittleren Stoffwerte

Rektifikation: Stoffwerte   [W+S], Beispiel 6.11
--

STOFFWERTE 1		Mm	rho	eta	cpm
		kg/kmol	kg/m <sup>3</sup>	mPa s	J/kmolK
V-Teil	flüssig	82.33	804.8	2.956E-0004	1.509E+0005
	gasförmig	81.04	2.714	8.992E-0006	
A-Teil	flüssig	88.99	787.6	2.569E-0004	1.605E+0005
	gasförmig	87.70	2.834	9.009E-0006	

STOFFWERTE 2		hmlg	sigmaA	Dif
		J/kmol	N/m	m <sup>2</sup> /s
V-Teil	flüssig	3.231E+0007	0.020507	4.849E-0009
	gasförmig			4.455E-0006
A-Teil	flüssig	3.319E+0007	0.018997	5.813E-0009
	gasförmig			4.650E-0006

und die mittleren Ströme in den beiden Kolonnenteilen ausgegeben. Hierzu ist zu bemerken, dass das Programm die Stoffwerte und Ströme für jeden Abschnitt berechnet.

Rektifikation: Ströme | [W+S], Beispiel 6.11

minimales Rücklaufverhältnis	nueRmin	[-]	=	1.4682
gewähltes Rücklaufverhältnis	nueR	[-]	=	2.0000

		Zulauf	Kopf- pro- dukt	Sumpf pro- dukt
Massenströme	[kg/s]	2.0000	0.7159	1.2841
Molströme	[kmol/s]	0.023114	0.009124	0.013990
		Gas- seite V-Teil	Gas- seite A-Teil	Flüssig- keitss. V-Teil
Massenströme	[kg/s]	2.4593	2.6615	1.5023
Molströme	[kmol/s]	0.027372	0.030347	0.018248
Volumenströme	[m <sup>3</sup> /s]	0.9063	0.9392	0.0018667
F-Faktor	[ kg/ ms]	1.424	1.342	0.0050096

Falls Sie im Menü **Stoffübergangskoeffizienten** die Eingabe eigener Berechnungsgleichungen gewählt haben, ergibt sich gegenüber dem Gezeigten folgende Ergänzung:

Zusätzlich zu den oben erörterten Eingaben müssen Sie die Symbole und die Gleichungen zur Berechnung der gas- und flüssigkeitsseitigen Stoffübergangskoeffizienten eingeben (Formeleingabe --> siehe Abschnitt 1.3.4):

Formeleingaben: STOFFÜBERGANGSKOEFFIZIENTEN | [W+S], Bsp. Kap. 6

Sie haben die Eingabe eigener Beziehungen der Form  
 $Sh_g = f(Re_g, Sc_g, \dots)$  und  $Sh_l = f(Re_l, Sc_l, \dots)$   
 zur Bestimmung des Stoffübergangs gewählt.

Die Wärmeübergangskoeffizienten werden aus der  
 Analogie zwischen Wärme- und Stoffübergang bestimmt.

Die im Programm integrierte Formel-Auswertungsprozedur erlaubt die Verwendung folgender Operatoren und Funktionen:

Operatoren: + - \* / ^

Funktionen: sqrt() ln() log()  
 sin() cos() tan() atn()

Konstante: pi

Die Wahl der Symbole und die Formeleingabe wird nachfolgend nur am Beispiel des gaseitigen Stoffübergangskoeffizienten gezeigt (Eingaben für die Flüssigkeitsseite analog). Der erste Bildschirm listet die vom Programm für die wichtigsten Grössen bereits zur Verfügung gestellten Symbole auf:

Formeleingaben: GASSEITIGER STOFFÜBERGANG | [W+S], Bsp. Kap. 6

Für die auf der nächsten Seite einzugebenen Formeln stehen die folgenden Symbole zur Verfügung. Eigene Symbole dürfen nur für Zusatzgrössen IN DER REIHENFOLGE DER BERECHNUNGS AUSFÜHRUNG gewählt werden.

ab	bezogene Oberfläche der Füllkörper/Packung	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	
aizuab	Verhältnis benetzte zu geometrischer Füllkörperoberfläche	-	
A_K	Kolonnenquerschnitt "Leerrohrquerschnittsfläche"	m <sup>2</sup>	
d <sub>32</sub>	Gleichwertiger Kugeldurchmesser	m	
Dif <sub>g</sub>	Diffusionskoeffizient, Gasphase	m <sup>2</sup> /s	
eps	Porosität der Füllkörper/Packung	-	
eta <sub>g</sub>	dynamische Viskosität, Gasphase	Pa s	
eta <sub>l</sub>	dynamische Viskosität, flüssige Phase	Pa s	
Sc <sub>g</sub>	Schmidtzahl, Gasphase	-	
rho <sub>g</sub>	Dichte, Gasphase	kg/m <sup>3</sup>	
rho <sub>l</sub>	Dichte, flüssige Phase	kg/m <sup>3</sup>	
Vst <sub>g</sub>	Volumenstrom, Gasphase	m <sup>3</sup> /s	
Vst <sub>l</sub>	Volumenstrom, flüssige Phase	m <sup>3</sup> /s	
Re <sub>g</sub>	Reynoldszahl der Gasphase	-	
Sh <sub>g</sub>	Sherwoodzahl, gaseitig	-	
beta <sub>g</sub>	Stoffübergangskoeffizient, gaseitig	m/s	
Anzahl zusätzlicher Formelzeichen (gaseitig)	=	5?	5

Falls Sie weitere Formelzeichen benötigen, sind diese in die nächste Maske in der Reihenfolge ihrer Berechnung einzutragen (Formeleingabe --> siehe Abschnitt 1.3.4):

DEFINITION ZUSÄTZLICHER SYMBOLE für den GASSEITIGEN STOFFÜBERGANG

Geben Sie nachfolgend die Formelzeichen der zusätzlich benötigten Grössen ein.  
**ACHTUNG: BERECHNUNGSREIHENFOLGE EINHALTEN!**

1. Zusatzgrösse	=	Re <sub>lh</sub> ? Re <sub>lh</sub>
2. Zusatzgrösse	:	Re <sub>6</sub>
3. Zusatzgrösse	:	Sh <sub>gt</sub>
4. Zusatzgrösse	:	Fr
5. Zusatzgrösse	:	FrdRe

In der folgenden Maske müssen Sie die Formeln eingeben. Beachten Sie, dass Ihre Formelzeichen mit den unten auf der Maske eingeblendeten exakt übereinstimmen (Formeleingabe --> siehe Abschnitt 1.3.4)!

BERECHNUNGSGLEICHUNGEN für den GASSEITIGEN STOFFÜBERGANG
--

$Re_g ? \quad (Vst_g/A_K) \cdot \rho_g / (ab \cdot \eta_g)$   
 $Re_{lh} : \quad (Vst_l/A_K) \cdot \rho_l / (ab \cdot \eta_l)$   
 $Re_6 : \quad 6 \cdot Re_g$   
 $Sh_{gt} : \quad .625 \cdot (.12 + \epsilon) \cdot Re_6 \cdot Sc_g^{1/3} \cdot ((3.72/Re_6^{2/3}) + 1.06 / (30 + Re_6^{1/3}))$   
 $Fr : \quad (Vst_l/A_K) \cdot (Vst_l/A_K) \cdot ab / 9.81$   
 $FrdRe : \quad Fr / Re_{lh}$   
 $Sh_g : \quad Sh_{gt} \cdot 7.43 / aizuab \cdot FrdRe^{0.225} \cdot (\rho_l / \rho_g)^{0.08} \cdot (\eta_g / \eta_l)^{0.133}$   
 $\beta_{g} : \quad Sh_g \cdot (1 - \epsilon) \cdot Dif_g / (\epsilon \cdot d_{32})$

In den einzugebenden Formeln dürfen  
NUR DIE FOLGENDEN SYMBOLE verwendet werden

DURCH DAS PROGRAMM ZUR VERFÜGUNG GESTELLTE GRÖSSEN:  
 ab      aizuab    A\_K      d\_32      Dif\_g    eps  
 eta\_g   eta\_l    Sc\_g    rho\_g   rho\_l    Vst\_g   Vst\_l  
 ZU BERECHNENDE GRÖSSEN:  
 Re\_g    Re\_lh    Re\_6    Sh\_gt    Fr      FrdRe   Sh\_g



## 2.16 AbsF Absorption in Füllkörperkolonnen

Programm: AbsF	Daten: *.Abs
<p>ABSORPTION IN IDEAL ISOLIERTEN FÜLLKÖRPERKOLONNEN</p> <p>Physikalische Absorption einer Komponente mit Berücksichtigung des bei der Absorption auftretenden Wärmeeffekts</p> <p>vollständige Auslegung mit der HTU-NTU-Methode</p> <p>KANN MIT UND OHNE FORMELEINGABE BETRIEBEN WERDEN</p>	
Grundlagen: [W+S], Abschnitte 7.5 und 7.6	Beispiel 7.6

Dieses Programm ermöglicht Ihnen die Auswahl verschiedener Ausgabemodi und unterschiedlicher Berechnungsmethoden für den Kolonnendurchmesser und die Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten:

Ausgabemodus und Berechnungsarten   [W+S], Bsp. Kap. 7	
Wahl des Ausgabemodus	
A	Ausgabe der Hauptergebnisse
B	zusätzliche Ausgabe von Zwischenergebnissen
<ES	
Kolonnendurchmesser	
A	Füllkörper, Berechnung nach [W+S], Gln. (6.39)/(6.44)
B	aus einzugebendem F-Faktor [W+S], Gl. (6.30)
<ESCAPE>	
Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten	
A	Füllkörperschüttung, [W+S], Gln.(6.85)/(6.91)
B	Eingabe eigener Berechnungsgleichungen
<ESCAPE>	erneute Auswahl

Die einzelnen Menüpunkte werden nachstehend kurz beschrieben.

**Wahl des Ausgabemodus**

## A Ausgabe der Hauptergebnisse

In diesem Ausgabemodus wird auf die ausführliche Wiedergabe von Zwischenergebnissen verzichtet.

**B zusätzliche Ausgabe von Zwischenergebnissen**

Bei der Wahl dieses Menüpunktes erhalten Sie zusätzlich zu den Ausgaben nach A ein ausführliches Protokoll der Zwischenergebnisse für alle Abschnitte.

**Kolonnendurchmesser**

**A** Füllkörper, Berechnung nach [W+S], Gln. (6.39)/(6.44)  
Siehe Buch [W+S].

**B** aus einzugebendem F-Faktor [W+S], Gl. (6.30)  
In der Praxis ist die Durchmesserberechnung über F-Faktoren häufig. Den gewünschten F-Faktor können Sie in der Maske "Prozess- und Apparatedaten" eingeben.

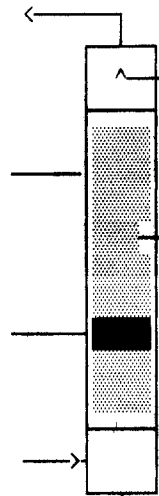
**Stoffübergangskoeffizienten**

**A** Füllkörperschüttung, [W+S], Gln.(6.85)/(6.91)  
Für regellose Füllkörperschüttungen, siehe Buch [W+S].

**B** Eingabe eigener Berechnungsgleichungen  
Mit der Aktivierung dieses Menüs können Sie die Gleichungen zur Berechnung des Stoffübergangskoeffizienten in algebraischer Schreibweise eingeben.

Geben Sie die Prozess- und Apparatedaten über die nachstehende Maske ein:

AbsF: Eingaben 1/4 - Prozess- und Apparatedaten | [W+S], Bsp. Kap. 7

$y_{bA} = 0.02500 [-]$					
					
		$X_{bE} = 0.004000 [-]$			
$d_K = 0.8820 [m]$					
$p = 2.000E+0006 [Pa]$					
		$ab = 201.5 [1/m]$			
		$eps = 0.7300 [-]$			
		$sigmaAc = 0.06100 [N/m]$			
		$c_{FK} = 1.580 [-]$			
$n = 10$		$c_{FKS} = 0.6250 [-]$			
		$aizuab = 1.000 [-]$			
$Mst_{gE} = 0.7500 [kg/s]$					
$T_{gE} = 308.1 [K]$					
$Y_{bE} = 0.5000 [-]$					
		$T_{lA} = 313.2 [K]$			
		$X_{bA} = 0.07500 [-]$			

Je nach Ihrer Auswahl in den oben gezeigten Menü sieht diese Maske etwas unterschiedlich aus. Wie üblich wird auf dem Bildschirm zu jedem aktiven Eingabefeld eine Legende eingeblendet.

Da sich längs der Absorptionskolonne Temperatur und Zusammensetzung in beiden Phasen ändern, ist eine Unterteilung der Kolonne in  $n$  Abschnitte erforderlich. In den meisten Fällen wird die vorgeschlagene Anzahl von 10 Unterteilungen genügen. Sie können durch fortlaufendes Verdoppeln (5, 10, 20, 40, 80 Abschnitte) leicht herausfinden, welche minimale Zahl von Unterteilungen für Ihren Anwendungsfall hinreichend ist. Lediglich zur Aufzeichnung des

Verlaufs der Trennung mit einem Grafikprogramm ist eine hohe Anzahl von Kolonnenabschnitten sinnvoll.

Die für die Rechnung benötigten Stoffwerte werden aus der Stoffdatenbank eingelesen (--> Abschnitt 1.3.3).

AbsF: Eingaben der Stoffwerte | [W+S], Bsp. Kap. 7

Die Eingaben der Stoffwerte erfolgen auf den nächsten drei Beilschirmseiten getrennt für das Absorptiv, das Absorptionsmittel (Trägerflüssigkeit) und das Trägergas.

Nachstehend sind die mittleren Temperaturen beider Phasen (für die Stoffwerte), die molare Absorptionswärme und die Faktoren des Polynomansatzes zum Bestimmen des Henrykoeffizienten ([W+S], Gl.(7.1))  $H$  in [Pa] aus der Temperatur  $T$  in [K] einzugeben:

Mittlere Temperatur Gasphase	$T_{gmitt}$	[K]	=	310.66
Mittlere Temperatur Flüssigkeit	$T_{lmitt}$	[K]	=	310.66
Spezifische Absorptionswärme	$h_a$	[J/kg]	=	3.300E+0005
Henry-Koeffizient aus	$c_{Henry0}$	[Pa]	=	5.749E+0007
$H = c_{Henry0} + c_{Henry1} * T +$	$c_{Henry1}$	[Pa/K]	=	-4.780E+0005? -4.780E+0005
$c_{Henry2} * T^2 + c_{Henry3} * T^3, T$	$c_{Henry2}$	[Pa/K <sup>2</sup> ]	=	1031.0
( $H$ in [Pa], $T$ in [K])	$c_{Henry3}$	[Pa/K <sup>3</sup> ]	=	0.00000

Der Henry-Koeffizient wird im interessierenden Temperaturbereich durch einen Polynomansatz berechnet. Die Koeffizienten können Sie aus experimentell oder rechnerisch ([RPP], Kapitel 8) bestimmten Stützwerten mit dem Programm FitPol des Paktes MVT ermitteln.

Gemäss Ihrer Wahl im Menü **Kolonnendurchmesser** wird der minimale Kolonnendurchmesser für Füllkörperschüttungen nach [W+S], Gln. (6.39)/(6.44) oder mit einem eingegebenen F-Faktor aus [W+S], Gl. (6.30) berechnet und in der nachstehenden Tabelle für den Kopf, die Mitte und den Sumpf der Kolonne ausgegeben:

AbsF: Eingabe des Kolonnendurchmessers | [W+S], Bsp. Kap. 7

Ort in der Kolonne	maximale Geschwindigkeiten		maximale Reynoldszahl	minimaler Kolonnen- querschn.	minimaler Kolonnen- durchm.
	Gasphase $w_g$ [m/s]	flüssige Phase $w_l$ [m/s]	Gasphase $Re_g$ [-]	$A_{K\_min}$ [m <sup>2</sup> ]	$d_{K\_min}$ [m]
oben	0.07645	0.03881	273.4	0.3311	0.6493
Mitte	0.07945	0.03460	389.8	0.3811	0.6966
unten	0.08321	0.03168	487.3	0.4267	0.7371

gewählter Kolonnendurchmesser  $d_K$  [m] = 0.88200? 0.88200

Mittlerer F-Faktor = 0.210 kg/ ms

Sie können nun einen geeigneten Kolonnendurchmesser eingeben. Zur Beurteilung der Eingabe werden anschliessend die sich damit in den beiden Kolonnenteilen ergebenden F-Faktoren angezeigt.

Nach dem (fakultativen) Abspeichern aller Eingabedaten und Berechnungsgleichungen wird die in [W+S], Kap. 7 ausführlich gezeigte Rechnung gestartet. Die Koppelung von Wärme- und Stofftransport bedingt ein aufwendiges iteratives Vorgehen. Sie werden deshalb laufend über den Gang der Rechnung orientiert. Bei der Wahl "Ausgabe der Hauptergebnisse" (Menü Wahl des Ausgabemodus) geschieht dies mit der folgenden Einblendung:

Bitte warten: es werden umfangreiche Rechnungen durchgeführt

|||||||

Berechnen eines Abschnitts

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Berechnen der ganzen Kolonne

Falls Sie den Modus "zusätzliche Ausgabe von Zwischenergebnissen" gewählt haben, wird auf dem Bildschirm ein ausführliches Protokoll über die Berechnungsergebnisse in jedem Abschnitt ausgegeben:

GASPHASE ABSCHNITT 7:		y	=	0.16055 [kmol/kmol]	
rho_g	=	16.860 [-]	eta_g	=	1.837E-0005 [Pa s]
lambda_g	=	0.035137 [W/mK]	cp_g	=	1885.8 [J/kgK]
Mm_g	=	20.833 [kg/kmol]	cpm_g	=	3.929E+0004 [J/kmolK]
hm_g	=	4.921E+0006 [J/kmol*]	Dif_g	=	8.522E-0007 [m <sup>2</sup> /s]
Dif_gkorr	=	1.015E-0006 [m <sup>2</sup> /s]	Pr_g	=	0.98565 [-]
Sc_g	=	1.0730 [-]	Vst_g	=	0.028745 [m <sup>3</sup> /s]
w_g	=	0.047048 [m/s]	Re_g	=	214.35 [-]
Nu_g	=	28.895 [-]	alfa_g	=	46.708 [W/m <sup>2</sup> K]
Sh_g	=	29.725 [-]	k_g	=	9.283E-0004 [kmol/m <sup>2</sup> s]
FLÜSSIGE PHASE ABSCHNITT 7:		x	=	0.028041 [kmol/kmol]	
rho_l	=	1002.6 [kg/m <sup>3</sup> ]	eta_l	=	9.880E-0004 [Pa s]
lambda_l	=	0.15851 [W/mK]	cp_l	=	1673.0 [J/kgK]
Mm_l	=	97.594 [kg/kmol]	cpm_l	=	1.633E+0005 [J/kmolK]
hm_l	=	6.291E+0006 [J/kmol*]	Dif_l	=	2.945E-0009 [m <sup>2</sup> /s]
Dif_lkorr	=	3.030E-0009 [m <sup>2</sup> /s]	Pr_l	=	10.428 [-]
Sc_l	=	325.20 [-]	Vst_l	=	0.013085 [m <sup>3</sup> /s]
w_l	=	0.021416 [m/s]	Re_l	=	107.85 [-]
Nu_l	=	376.64 [-]	alfa_l	=	2746.5 [W/m <sup>2</sup> K]
Sh_l	=	2103.3 [-]	k_l	=	0.0029366 [kmol/m <sup>2</sup> s]
T_loberfl.	=	310.25 [K]			
KOLONNENABSCHNITT 7:		ai/a	=	1.0000 [m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ]	
kw	=	45.927 [W/m <sup>2</sup> K]	deltaz	=	0.37873 [m]
K	=	3.492E-0004 [kmol/m <sup>2</sup> s]			

Die Ausgabe der Ergebnisse umfasst eine Zusammenfassung der Eingabedaten

AbsF: Absorption Auslegungsdaten		[W+S], Bsp. Kap. 7
----------------------------------	--	--------------------

Druck in der Absorptionskolonne	p	[Pa]	=	2.000E+0006
Kolonnendurchmesser	d_K	[m]	=	0.8820
Molbeladung Rohgas	Yb_E	[-]	=	0.5000
Eintrittstemperatur Rohgas	T_gE	[K]	=	308.1
Molbeladung Reingas	Yb_A	[-]	=	0.02500
Eintrittsmolbeladung Absorptionsmittel	Xb_E	[-]	=	0.004000
Austrittsmolbeladung Absorptionsmittel	Xb_A	[-]	=	0.07500
Austrittstemperatur Absorptionsmittel	T_lA	[K]	=	313.2

## Daten der Füllkörperfüllung

bezogene Oberfläche	a	[m <sup>2</sup> /m]	=	201.5
Porosität	eps	[-]	=	0.7300
Gleichwertiger Kugeldurchmesser	d_32	[m]	=	0.008040
kritische Oberflächenspannung		[N/m]	=	0.06100
Füllkörperkonstante [W+S], Gl.(6.42)		[-]	=	1.580
Füllkörperkonstante [W+S], Gl.(6.85)		[-]	=	0.6250

AbsF: Absorption Stoffwerte		[W+S], Bsp. Kap. 7
-----------------------------	--	--------------------

STOFFWERTE 1	Mm	rho	eta	lambda	cpm
	kg/kmol	kg/m <sup>3</sup>	mPa s	W/mK	J/kmolK

gasförmig Träger	16.40	12.9	1.880E-0005	0.0356	3.834E+0004
Absorptiv	44.01	37.6	1.609E-0005	0.0191	4.422E+0004
flüssig Träger	99.14	1011.0	1.015E-0003	0.1610	1.643E+0005
Absorptiv	44.01	711.0	5.140E-0005	0.0721	1.276E+0005

STOFFWERTE 2	hma	sigmaA	Dif
	J/kmol	N/m	m <sup>2</sup> /s

gasförmig Absorptiv	1.452E+0007		9.010E-0007
flüssig Träger		3.900E-0002	
Absorptiv		3.900E-0002	2.560E-0009

Eigendiffusionskoeffizient Gasphase	Dif_gE	[m <sup>2</sup> /s]	=	5.970E-0007
Eigendiffusionskoeffizient fl.Phase	Dif_lE	[m <sup>2</sup> /s]	=	1.630E-0008

Henry-Koeffizient H aus (H in [Pa], T in [K]):

$$H = 5.749E+0007 + -4.780E+0005 * T + 1.031E+0003 * T^2 + 0.000E+0000 * T^3$$

und der sich in der Kolonne einstellenden Ströme.

AbsF: Absorption Ströme   [W+S], Bsp. Kap. 7
--

Lösungsmittelverhältnis Nst\_l / Nst\_g [-] = 6.6901

	Träger- gas	Absorp- tions- mittel	Gas unten	Gas Mitte	Gas oben
Massenströme [kg/s]	0.3203	12.953	0.7500	0.5459	0.3418
Molströme [kmol/s]	0.01953	0.1306	0.02929	0.02465	0.02002
Volumenströme [m3/s]			0.03551	0.03028	0.02531

	Flüssig- keit unten	Flüssig- keit Mitte	Flüssig- keit oben
Massenströme [kg/s]	13.384	13.180	12.976
Molströme [kmol/s]	0.1404	0.1358	0.1312
Volumenströme [m3/s]	0.01352	0.01319	0.01285

Die Hauptergebnisse werden für die ganze Kolonne

AbsF: Absorption Hauptergebnisse   [W+S], Bsp. Kap. 7
---

Austrittstemperatur des Reingases	[K] =	308.48
Eintrittstemperatur des Absorptionsmittels	[K] =	308.45
Höhe der Füllkörperschüttung/-packung	[m] =	4.98

LEGENDE FÜR DIE FOLGENDE RESULTATTABELLE	
Nr	Nummer des Kolonnenabschnitts
Yb_m	mittlere Molbeladung der Gasphase im Kolonnenabschnitt
Xb_m	mittlere Molbeladung der flüssigen Phase im K.-Abschnitt
Tg_m	mittlere Gastemperatur im Kolonnenabschnitt
T_lm	mittlere Flüssigkeitstemperatur im Kolonnenabschnitt
HTUg	HTUg-Wert im betreffenden Kolonnenabschnitt
NTUg	NTUg-Wert des Kolonnenabschnitts
z_Abschn	Höhe des Kolonnenabschnitts
z_total	Gesamthöhe der Füllkörperfüllung (ohne Zuschläge)

und für die einzelnen Kolonnenabschnitte ausgegeben.

AbsF: Ergebnisse für einzelne Kolonnenabschnitte   [W+S], Bsp. Kap. 7								
Nr	Beladung Yb_m [-]	Beladung Xb_m [-]	Temp. T_gm [K]	Temp. T_lm [K]	HTUg [-]	NTUg [-]	Abschnitt z_Abschn [m]	Schüttung z_total [m]
1	0.47625	0.07145	310.99	313.08	0.544	0.8670	0.4715	0.471
2	0.42875	0.06435	313.25	312.74	0.526	0.7429	0.3909	0.862
3	0.38125	0.05725	312.45	312.23	0.508	0.6741	0.3427	1.205
4	0.33375	0.05015	311.99	311.74	0.492	0.6558	0.3230	1.528
5	0.28625	0.04305	311.50	311.25	0.478	0.6730	0.3219	1.850
6	0.23875	0.03595	311.00	310.75	0.466	0.7273	0.3386	2.189
7	0.19125	0.02885	310.47	310.24	0.454	0.8337	0.3787	2.567
8	0.14375	0.02175	309.93	309.74	0.444	1.0359	0.4601	3.027
9	0.09625	0.01465	309.36	309.22	0.435	1.4784	0.6434	3.671
10	0.04875	0.00755	308.78	308.71	0.427	3.0599	1.3075	4.978

Falls Sie im Menü **Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten** die Eingabe eigener Berechnungsgleichungen gewählt haben, ergibt sich gegenüber dem Gezeigten folgende Ergänzung:

Zusätzlich zu den oben erörterten Eingaben müssen Sie die Symbole und Gleichungen zur Berechnung der gas- und flüssigkeitsseitigen Stoffübergangskoeffizienten eintragen. Da dieser Teil mit dem auch im Programm RekF vorkommenden identisch ist, wird auf die entsprechenden Erklärungen zum Programm RekF hingewiesen.

## 2.17 SorIs Sorptionsisothermen

Programm: SorIs	Daten: *.SoI
NÄHERUNGSGLEICHUNGEN FÜR SORPTIONSISOTHERMEN	
	1/2
Potenzansatz (Freundlich) $X = a \cdot \phi^b$	
Ansatz von Brunauer-Emmet-Teller (BET-Gleichung)	
$X$	$\phi$
-----	-----
$X_{max}$	$1 - \phi$
	$1 + (b-1) \cdot \phi$
Polynomansatz: --> Programm FitPol im Paket MVT	
a, b, Xmax : mit diesem Programm aus Stützwerten zu bestimmende Parameter	
X	: Massenbeladung des Sorbens an Sorptiv in [kg/kg]
phi	: relative Feuchtigkeit ([W+S], Gl.(8.1))
Grundlagen: [W+S], Abschnitt 8.2	[KAST] --> HANDBUCH
BINDUNGSWÄRME	
	2/2
[W+S], Abschnitt 8.3:	
Sorptionswärme = Verdampfungswärme + Bindungswärme	
hms	= hmlg + hmB
Die molare Bindungswärme hmB wird in diesem Programm nach der folgenden Gleichung berechnet ([KAST], Abschn.6.3):	
$hmB = R \cdot T \cdot \ln(1/\phi)$	

Für das rechnerische Auslegen von Sorptionsverfahren oder von Trocknern benötigt man Näherungsgleichungen (Übersicht in [KAST], Abschnitt 3.1) für den Verlauf der Sorptionsisothermen. Sie können mit Hilfe dieses Programms aus Gleichgewichtsmessungen ermittelt werden. Nach der Eingabe der Anzahl Stützwertepaare und der Temperatur

Projektbezeichnung	?			3A-Molekularsieb 40C
Anzahl Stützwertepaare	n	[-]	=	14
Temperatur	T	[K]	=	313.0

können Sie die gemessenen Massenbeladungen X (kg Sorbtiv pro kg Sorbens) in Abhängigkeit der relativen Umgebungsfeuchtigkeit phi in die nachstehende Tabelle eintragen.



Eingabe von Stützwerten der Sorptionsisothermen 3A-Molekularsieb 40C
--

Stütz- wert	phi [-]	X [-]
1	0.01000	0.13966
2	0.02000	0.15670
3	0.03000	0.16543
4	0.04000	0.17104
5	0.05000	0.17505
6	0.06000	0.17812
7	0.07000	0.18057
8	0.08000	0.18260
9	0.09000	0.18431
10	0.10000	0.18580
11	0.20000	0.19471
12	0.40000	0.20351
13	0.60000	0.20967
14	0.80000	0.21498

Als Ergebnis liefert das Programm auf einer ersten Bildschirmseite die Parameter der Freundlich- und der BET-Gleichung mit den dazugehörigen mittleren relativen Abweichungen.

Parameter und Abweichungen der Näherungsgleichungen/ 3A-Molekularsieb 40C
---

Potenzansatz (Freundlich)  $X = a \cdot \text{phi}^b$

Koeffizient	a	[-]	=	0.2243
Exponent	b	[-]	=	0.08889
Mittlere relative Abweichung (absolut)		[%]	=	1.944

Ansatz von Brunauer-Emmet-Teller (BET-Gleichung)

$$\frac{X}{X_{\max}} = \frac{\text{phi}}{1-\text{phi}} * \frac{b}{1 + (b-1)*\text{phi}}$$

1. Parameter (maximale Beladung)	Xmax	[-]	=	0.05527
2. Parameter	b	[-]	=	-16.58
Mittlere relative Abweichung (absolut)		[%]	=	117.6

Die zweite Bildschirmseite zeigt den Vergleich zwischen eingegebenen und den mit den beiden Näherungsgleichungen berechneten Feststoffmassenbeladungen im einzelnen. Weiter wird die molare Bindungswärme h-Bindung ausgegeben.

Stützwerte/Näherungen nach Freundlich und BET/ 3A-Molekularsieb 40C						
phi [-]	X-Eingabe [kg/kg]	X-Freundl. [kg/kg]	rel.Abw. [%]	X-BET [kg/kg]	rel.Abw. [%]	h-Bindung [MJ/kmol]
0.0100	0.1397	0.1489	6.64	-0.0112	-108.04	11.9844
0.0200	0.1567	0.1584	1.09	-0.0288	-118.41	10.1806
0.0300	0.1654	0.1642	-0.74	-0.0600	-136.26	9.1254
0.0400	0.1710	0.1685	-1.50	-0.1287	-175.23	8.3767
0.0500	0.1751	0.1718	-1.83	-0.3988	-327.82	7.7960
0.0600	0.1781	0.1747	-1.95	1.0664	498.72	7.3216
0.0700	0.1806	0.1771	-1.94	0.2991	65.62	6.9204
0.0800	0.1826	0.1792	-1.88	0.1961	7.38	6.5729
0.0900	0.1843	0.1811	-1.76	0.1557	-15.54	6.2664
0.1000	0.1858	0.1828	-1.63	0.1343	-27.70	5.9922
0.2000	0.1947	0.1944	-0.17	0.0911	-53.23	4.1884
0.4000	0.2035	0.2067	1.58	0.1013	-50.23	2.3845
0.6000	0.2097	0.2143	2.22	0.1440	-31.33	1.3294
0.8000	0.2150	0.2199	2.28	0.2806	30.53	0.5807

Wenn die Eingabedaten weder mit dem Potenzansatz nach Freundlich noch mit der BET-Gleichung befriedigend wiedergegeben werden, können Sie mit dem Programm FitPol des Pakets MVT nach einer besseren Näherung suchen. Schreiben Sie dazu mit dem Programm SorIs ein ASCII-Plotfile. Dieses kann vom Programm FitPol direkt gelesen werden.

Falls die Gleichungen von Freundlich und BET Ihre Daten nicht hinreichend genau wiedergeben, kann die Sorptionsisotherme mit dem Programm FitPol aus dem Paket MVT angenähert werden.

--> Plotfile schreiben (Daten können von FitPol gelesen werden)

## 2.18 SorRo Isotherme Sorption im Festbett

Programm: SorRo	Daten: *.Sor
ISOTHERME SORPTION IN FESTBETTEN	
Berechnen der Durchbruchskurven nach ROSEN (lineare Annäherung der Sorptionsisotherme)	
Fluidseitiger Stoffübergang für kugelhähnliche Teilchen aus [W+S], Gl.(1.6) Grundlagen: [W+S], Abschnitt 8.5 <span style="float: right;">Beispiel 8.3</span>	

Die nachfolgenden Eingabedaten werden in [W+S], Abschnitt 8.5 erläutert. Die Anzahl ausgegebener Tabellenwerte hat keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Rechenergebnisse. Für Plot-Files empfiehlt sich eine hohe, für Tabellenausgaben eine kleinere Zahl einzugeben.

Projektbezeichnung	?	[W+S], Beispiel 8.3
Anzahl Tabellenwerte	[-]	= 10
Dichte Fluid	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	= 1.200
dynamische Viskosität Fluid	eta [Pas]	= 1.800E-0005
Diff.koeff. Sorptiv Gasphase	D [m <sup>2</sup> /s]	= 2.780E-0005
Diff.koeff. Sorptiv scheinbarer gleichwertiger Kugeldurchmesser	D_sch [m <sup>2</sup> /s]	= 1.000E-0010
Porosität der Schüttung	eps [-]	= 0.4000
Gesamthöhe der Sorbens-Schüttung	z_tot [m]	= 1.500
Leerrohrgeschwindigkeit Fluid	w [m/s]	= 0.3300
Steigung Gleichgewichtslinie	m [-]	= 3.030E+0004
Sorptivkonzentration Eintritt	c_ie [kg/m <sup>3</sup> ]	= 0.01040
Gleichgewichts-Sorptivkonzentration	c_iGl [kg/m <sup>3</sup> ]	= 1.000E-0004
Sorptionszeit	t [s]	= 3.000E+0004

Die Rechnung nach [W+S], Abschnitt 8.5 liefert zunächst folgende Zwischenwerte:

Festbettsorber konstante Werte		[W+S], Beispiel 8.3
--------------------------------	--	---------------------

ZWISCHENERGEBNISSE:

fluidseitige Schmidtzahl	Sc	[-]	=	0.5396
fluidseitige Reynoldszahl	Re	[-]	=	110.0
fluidseitiger Stoffübergangskoeff.	beta	[m/s]	=	0.1246
dimensionsloser Stoffübergangswiderstand	Rk	[-]	=	0.01621

Die Tabelle der Durchbruchskurve enthält nebst dem in [W+S], Bild 8.14 gezeigten Verhältnis der Sorptivkonzentration am Eintritt zur Sorptivkonzentration im Abstand z vom Eintritt auch die Sorptivkonzentration am Austritt aus dem Festbettsorber:

Durchbruchskurve nach 30000.0 [s]		[W+S], Beispiel 8.3
-----------------------------------	--	---------------------

Abstand ab Eintritt z [m]	dim.loser Abstand Rz [-]	dim.lose Zeit Rt [-]	Konzentrationsverh. Gl.(8.17) [-]	Sorptiv-Konzentration c_i [kg/m <sup>3</sup> ]
0.0000	0.00000	2.666667	1.000000	0.0104000
0.1667	1.22424	2.666649	0.999932	0.0103993
0.3333	2.44848	2.666631	0.934195	0.0097222
0.5000	3.67273	2.666613	0.602425	0.0063050
0.6667	4.89697	2.666595	0.268792	0.0028686
0.8333	6.12121	2.666577	0.096137	0.0010902
1.0000	7.34545	2.666559	0.030245	0.0004115
1.1667	8.56970	2.666541	0.008800	0.0001906
1.3333	9.79394	2.666523	0.002435	0.0001251
1.5000	11.01818	2.666505	0.000651	0.0001067

## 2.19 TroKG Kühlgrenztemperatur

Programm: TroKg	Daten: *.TKG
TROCKNUNG: KÜHLGRENZTEMPERATUR	
Kühlgrenztemperatur für Luft/Wasser und andere Stoffe in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und relativer Feuchtigkeit der Gasphase	
Grundlagen: [W+S], Abschnitt 9.1	Beispiel 9.1

Für die Berechnung der Kühlgrenztemperatur nach [W+S], Abschnitt 9.1, können Sie zwischen dem System Wasser/Luft oder beliebigen Stoffsystemen wählen:

Wahl des Stoffsystems	
A	Wasser als zu entfernender Stoff in Luft als Trocknungsgas
B	beliebiger " " Stoff in beliebigem Trocknungsgas
<ESCAPE>	Programm verlassen

Um die Kühlgrenztemperatur in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit [W+S], Bild 9.2, zu berechnen, werden die Temperatur, der Druck (Gesamtdruck), die Bereichsgrenzen für die Rechnung und die Schrittweite für die Tabellenausgaben benötigt:

Projektbezeichnung		?	[W+S], Beispiel 9.1
Gastemperatur	T <sub>g</sub>	[K]	= 313.0
Gesamtdruck	p	[Pa]	= 1.000E+0005
minimale relative Feuchtigkeit	phiMin	[%]	= 0.0000
maximale relative Feuchtigkeit	phiMax	[%]	= 100.0
Schrittweite relat.Feuchtigkeit	phiSchritt	[%]	= 10.00

Falls Sie für ein beliebiges Stoffsystem rechnen, sind die Stoffwerte für den verdunstenden Stoff ("Feuchte") und das Trocknungsgas über die Stoffdatenbank einzugeben (--> Abschnitt 1.3.3):

Die Berechnungsergebnisse werden in der folgenden Tabelle ausgegeben. Darin enthält die Spalte "Konzentrationsdifferenz" den Konzentrationsunterschied am verdunstenden Stoff zwischen dem gesättigten Trocknungsgas unmittelbar an der feuchten Oberfläche und der Umgebung.

Kühlgrenztemperatur für beliebige Stoffe   [W+S], Beispiel 9.1				
Gastemperatur [K]	Gesamtdruck [Pa]	relative Feuchtigkeit [%]	Konzentra- tionsdifferenz [kg/m <sup>3</sup> ]	Kühlgrenz- temperatur [K]
313.0	1.000E+0005	0.0	0.0106101	285.4
313.0	1.000E+0005	10.0	0.0088891	289.8
313.0	1.000E+0005	20.0	0.0074093	293.6
313.0	1.000E+0005	30.0	0.0061166	296.9
313.0	1.000E+0005	40.0	0.0049718	299.9
313.0	1.000E+0005	50.0	0.0039460	302.6
313.0	1.000E+0005	60.0	0.0030176	305.0
313.0	1.000E+0005	70.0	0.0021702	307.2
313.0	1.000E+0005	80.0	0.0013912	309.3
313.0	1.000E+0005	90.0	0.0006704	311.2
313.0	1.000E+0005	100.0	0.0000000	313.0

Bei hohen Temperaturen und relativen Feuchtigkeiten wird die Rechnung abgebrochen, wenn der Partialdruck des verdunstenden Stoffes den Gesamtdruck erreicht.

## 2.20 TroFDi Konvektionstrockner diskontinuierlich (Fliessbett)

Programm: TroFDi	Daten: *.TrD
1/2	
COMPUTERSIMULATION EINES DISKONTINUIERLICH ARBEITENDEN KONVEKTIONSTROCKNERS  DURCHSTRÖMTES Fest- oder FLIESSBETT nach [MVT], Bild 5.2  mit fakultativer zusätzlicher Wärmezufuhr im Trockner	
Trocknungsgas: Luft Feuchtigkeit: Wasser Teilchengometrie: kugelähnlich	
Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten aus [W+S], Gln.(1.60/1.62) Berechnungsweg nach [W+S], Bild 9.19	
Grundlagen: [W+S], Abschnitt 9.4	
2/2	
BERECHNUNGSANNAHMEN	
1. Vollständige Durchmischung des Feststoffs im Trockner	
--> Bei Festbetten sind die Simulationsergebnisse nur als grobe Näherung aufzufassen. Sie sind umso genauer, je geringer die Festbetthöhe ist.	

2. Die Teilchengröße (gleichwertiger Kugeldurchmesser) bleibt während dem Trocknen hinreichend konstant.

Da die Eingabe der Daten des Trocknungsguts jener des Programms TroFli entspricht, wird hier auf eine Wiedergabe dieses ersten Eingabeteils verzichtet (--> siehe Programm TroFli).

Im zweiten Teil der Eingabe werden die gutsunabhängigen Prozess- und Trocknerdaten manuell oder über ein Datenfile (--> Programm TroFli)eingegeben.

Tragen Sie die Daten des Feststoffs und der Trocknungsluft in die erste Eingabemaske ein:

EINGABEN der PROZESS- UND TROCKNERDATEN / Gut: 3A - Molekularsieb

Im zweiten Eingabeteil sind nun die Prozess- und Anlagedaten einzugeben.

Früher gespeicherte Eingabedaten können zur Wiederverwendung ab einem ASCII-File gelesen werden. Disk → RAM

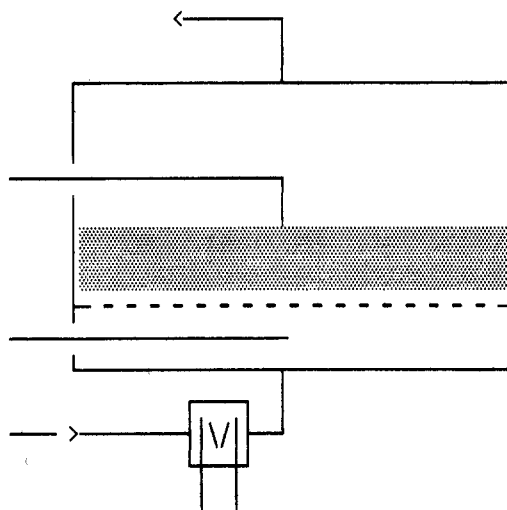
Eingabedaten aus File lesen (j/<n>)?

EINGABEN PROZESSDATEN | Bsp. Molekularsieb / Gut: 3A - Molekularsieb

T\_salfa = 305.0 [K]  
 X\_m\_alfa = 0.4000 [-]  
 X\_m\_omega = 0.1500 [-]  
 d\_p = 0.003000 [m]  
 eps0 = 0.4000 [-]

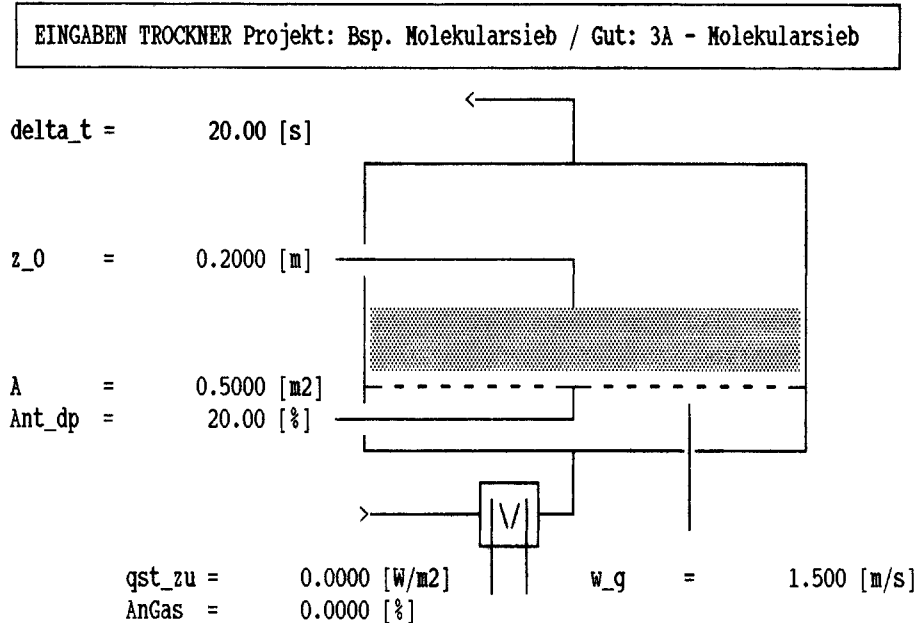
p\_uA = 1.020E+0005 [Pa]  
 T\_ge = 400.0 [K]

T\_umg = 293.0 [K]  
 phi\_umg = 75.00 [%]



Geben Sie auf der nächsten Bildschirmseite nebst den Trocknerdaten auch den Zeitschritt für die numerische Rechnung ein. Ein kurzer Zeitschritt führt zu höheren Genauigkeiten der Ergebnisse - ein grosser Zeitschritt verkürzt den Zeitbedarf für die Computersimu-

lation. Sie müssen den optimalen Zeitschritt für Ihr Problem durch einige Versuche mit unterschiedlichen Zeitschritten selbst ermitteln.



Auch dieses Simulationsprogramm ermöglicht die Erfassung einer auf die Anströmfläche bezogenen Zusatzwärmestromzufuhr im Trockner  $q_{st\_zu}$ . Durch die Angabe des davon direkt ans Gut übergehenden Anteils kann auch eine Kontakttrocknung angenähert werden.

Nach einem fakultativen Sichern der Eingabedaten auf einem Datenfile, wird die Computersimulation (im wesentlichen nach [W+S], Abschnitte 9.4.1 und 9.4.2) gestartet. Auch hier führt die Koppelung von Wärme- und Stofftransport zu einem erheblichen Berechnungsaufwand. Über den Berechnungsfortschritt orientiert Sie im ersten Zeitschritt das Bild:

Bitte warten --> Iterative Berechnung des ersten Elements.

### III

Der weitere Fortschritt der Rechnung lässt sich anhand der laufenden Ausgabe der Ergebnisse auf dem Bildschirm verfolgen:

Berechnungsverlauf (Iterationsergebnisse für jedes Element)

n	Xma_n	Tsa_n	Yma_n	Tga_n	eps_n	$\phi$	$\mu$	Zeit
[-]	[-]	[K]	[-]	[K]	[-]	[-]	[-]	[s]
17	0.2925	312.66	0.0471	314.91	0.459	1.000	1.000	340.0
18	0.2857	312.66	0.0471	314.91	0.459	1.000	1.000	360.0
19	0.2790	312.66	0.0471	314.91	0.459	1.000	1.000	380.0
20	0.2722	312.66	0.0471	314.91	0.459	1.000	1.000	400.0
21	0.2655	312.66	0.0471	314.91	0.459	1.000	1.000	420.0
22	0.2588	312.66	0.0471	314.91	0.459	1.000	1.000	440.0
23	0.2520	312.66	0.0471	314.91	0.458	1.000	1.000	460.0

24	0.2453	312.66	0.0471	314.91	0.458	0.828	0.588	480.0
25	0.2425	317.15	0.0257	319.62	0.460	0.827	0.587	500.0
26	0.2394	320.90	0.0275	323.25	0.462	0.768	0.480	520.0
27	0.2368	324.86	0.0251	327.21	0.464	0.743	0.439	540.0
28	0.2343	328.66	0.0243	330.94	0.465	0.718	0.403	560.0
29	0.2319	332.32	0.0234	334.53	0.467	0.700	0.377	580.0
30	0.2297	335.80	0.0228	337.94	0.469	0.684	0.355	600.0
31	0.2276	339.11	0.0223	341.16	0.471	0.670	0.337	620.0
32	0.2255	342.23	0.0219	344.20	0.472	0.658	0.322	640.0

Nach dem Abschluss der Computersimulation werden die Eingabedaten für eine allfällige Druckerausgabe nochmals zusammengefasst:

EINGABEN 1 - Projekt: Bsp. Molekularsieb / Gut: 3A - Molekularsieb

Zustand des Trocknungsgases:

Temperatur Ansaugstutzen (Umgebung)	T_umg	[K]	=	293.0
Relative Feuchtigkeit Ansaugstutzen	phi_umg	[%]	=	75.00
Eintrittstemperatur Trocknungsgas	T_ge	[K]	=	400.0
Druck unter dem Anströmboden	p_uA	[Pa]	=	1.020E+0005

Feststoffdaten:

Guttemperatur vor der Trocknung	T_salfa	[K]	=	305.0
Massenbeladung Gut vor Trocknung	Xm_alfa	[-]	=	0.4000
Massenbeladung am Knickpunkt	Xm_c	[-]	=	0.2500
Massenbeladung Gut nach Trocknung	Xm_omega	[-]	=	0.1500
Masse feuchtes Trocknungsgut	M_Gut	[kg]	=	98.89
Masse reiner Feststoff	M_S	[kg]	=	70.63
Teilchengrösse (gleichwertiger Kugeldurchm.)	d_p	[m]	=	0.003000
Porosität des Festbetts	eps_0	[-]	=	0.4000

EINGABEN 2 - Projekt: Bsp. Molekularsieb / Gut: 3A - Molekularsieb

Trocknerdaten:

Gasgeschwindigkeit vor Anströmboden	w_g	[m/s]	=	1.500
Trocknerquerschnittsfläche	A	[m <sup>2</sup> ]	=	0.5000
Höhe des Festbetts (für eps_0)	z_0	[m]	=	0.2000
Druckverlustanteil im Anströmboden	Ant_dp	[%]	=	20.00
Direkt zugeführte Wärmestromdichte	qst_zu	[W/m <sup>2</sup> ]	=	0.0000
davon an Gas übergehender Anteil	AnGas	[%]	=	0.0000

Dann werden die Hauptergebnisse ausgegeben:

RESULTATE 1 Projekt: Bsp. Molekularsieb / Gut: 3A - Molekularsieb

Gesamte Trocknungszeit	t_tot	[s]	=	2500
Wärmeleistungsbedarf (total)	Qst	[kW]	=	72.20
Masse Trocknungsgut nach Trocknung	M_GutΩ	[kg]	=	81.20



Schliesslich wird der errechnete Trocknungsverlauf detailliert wiedergegeben. Sie können ihn zur grafischen Darstellung des Trocknungsfortschritts mit Fremdprogrammen auf ein ASCII-Plotfile schreiben.

LEGENDE für die folgenden tabellarischen Ausgaben:

---

n	Nummer des Berechnungsschritts
t	Trocknungszeit
X <sub>m_an</sub>	erreichte Massenbeladung des Feststoffs
T <sub>san</sub>	erreichte Temperatur des Feststoffs
Y <sub>m_an</sub>	Massenbeladung des austretenden Trocknungsgases
T <sub>gan</sub>	Temperatur des austretenden Trocknungsgases
eps <sub>n</sub>	Porosität des Fliessbetts (bzw. Festbetts)
z <sub>n</sub>	Höhe des Fliessbetts (bzw. Festbetts)
Q <sub>Tot</sub>	totaler Heizwärmebedarf (Trocknungsgas und direkt)
μ	dimensionslose Trocknungsgeschwindigkeit (2.Trocknungsabschn.)
mst <sub>1</sub>	Trocknungsgeschwindigkeit (übertragener Massenstrom / Bettoberfl.)

RESULTATE 2 Projekt: Bsp. Molekularsieb / Gut: 3A - Molekularsieb										
n	t	X <sub>m_an</sub>	T <sub>san</sub>	Y <sub>m_an</sub>	T <sub>gan</sub>	eps <sub>n</sub>	z <sub>n</sub>	Q <sub>Tot</sub>	μ	mst <sub>1</sub>
[-]	[s]	[-]	[K]	[-]	[K]	[-]	[m]	[MJ]	[-]	[g/m <sup>2</sup> s]
1	20.0	0.3955	307.5	0.0349	309.9	0.456	0.221	1.44	1.000	0.131742
3	60.0	0.3847	310.4	0.0413	312.7	0.459	0.222	4.33	1.000	0.166509
5	100.0	0.3724	311.7	0.0445	314.0	0.460	0.222	7.22	1.000	0.184237
7	140.0	0.3595	312.3	0.0460	314.5	0.460	0.222	10.11	1.000	0.192343
9	180.0	0.3462	312.5	0.0467	314.8	0.460	0.222	13.00	1.000	0.195837
11	220.0	0.3328	312.6	0.0469	314.9	0.460	0.222	15.88	1.000	0.197291
13	260.0	0.3194	312.6	0.0470	314.9	0.460	0.222	18.77	1.000	0.197881
15	300.0	0.3059	312.7	0.0471	314.9	0.459	0.222	21.66	1.000	0.198117
17	340.0	0.2925	312.7	0.0471	314.9	0.459	0.222	24.55	1.000	0.198210
19	380.0	0.2790	312.7	0.0471	314.9	0.459	0.222	27.44	1.000	0.198247
21	420.0	0.2655	312.7	0.0471	314.9	0.459	0.222	30.32	1.000	0.198262
23	460.0	0.2520	312.7	0.0471	314.9	0.458	0.222	33.21	1.000	0.198269
25	500.0	0.2425	317.2	0.0257	319.6	0.460	0.222	36.10	0.587	0.081330
27	540.0	0.2368	324.9	0.0251	327.2	0.464	0.224	38.99	0.439	0.077943
29	580.0	0.2319	332.3	0.0234	334.5	0.467	0.225	41.88	0.377	0.069116
31	620.0	0.2276	339.1	0.0223	341.2	0.471	0.227	44.76	0.337	0.062879

## 2.21 TroFli Konvektionstrockner kontinuierlich (Fliessbett)

Programm: TroFli	Daten: *.TrF
1/2	
COMPUTERSIMULATION EINES KONTINUIERLICH ARBEITENDEN KONVEKTIONSTROCKNERS  DURCHSTRÖMTES Fest- oder FLIESSBETT nach [W+S], Bild 9.13  mit ein oder zwei Trocknerteilen (zweiter Trocknerteil als Kühler) und fakultativer zusätzlicher Wärmezufuhr im Trockner	
Trocknungsgas: Luft Feuchtigkeit: Wasser Teilchengeometrie: kugelähnlich  Wärme- und Stoffübergangskoeffizienten aus [W+S], Gln.(1.60/1.62) Berechnungsweg nach [W+S], Bild 9.19	
Grundlagen: [W+S], Abschnitt 9.4	Beispiele: [W+S], 9.2 und 9.3
2/2	
BERECHNUNGSANNAHMEN	
1. Vollständige Durchmischung des Feststoffs in einer Berechnungszelle  --> Bei Festbetten sind die Simulationsergebnisse nur als grobe Näherung aufzufassen. Sie sind umso genauer, je geringer die Festbetthöhe ist.	
2. Die Teilchengrösse (gleichwertiger Kugeldurchmesser) bleibt während dem Trocknen hinreichend konstant.	

Damit Sie auf Files gespeicherte Daten des Trocknungsguts auch vom Programm TroFDi lesen können, erfolgt die Dateneingabe in zwei Teilen. Im ersten Teil werden die Stoffwerte des Trocknungsguts eingelesen, im zweiten die Prozess- und Trocknerdaten. Wir verfolgen zunächst den **ersten Teil der Eingabe**:

Stoffwerte des Trocknungsguts

Die Eingaben der Stoffwerte des Trocknungsguts werden  
in separaten Files (mit der Extension \*.TrS) abgespeichert.

Zahlreiche Eingaben erfolgen in der Form von Polynomen.  
Die Koeffizienten dieser Polynome sind vorgängig mit dem

**Programm FitPol des Pakets MVT**

aus Messwerten oder Tabellenwerten zu bestimmen.

Sie können die Daten des Trocknungsguts von jenen des Trockners getrennt aus früher erstellten Datenfiles einlesen:

Eingabe der Stoffwerte des Trocknungsguts
---

Im ersten Eingabeteil sind die Stoffwerte des Trocknungsguts einzugeben (Verlängerung der Datenfiles: *.TrS).
---

Früher gespeicherte Eingabedaten können zur Wiederverwendung ab einem ASCII-File gelesen werden.	Disk → RAM
--	------------

Eingabedaten aus File lesen (j/<n>)?
--------------------------------------

Bezeichnung für das Trocknungsgut      ?                      3A - Molekularsieb

Im folgenden Menü haben Sie anzugeben, ob die Trocknung nur ab der Gutoberfläche (bei dieser Wahl sind anschliessend weniger Eingaben nötig) oder auch aus dem Gutsinneren erfolgen soll. Ferner ist bei zwei Trocknungsabschnitten zwischen den im Programm SorIs erörterten Näherungsgleichungen für die Sorptionsisotherme auszuwählen. Bestimmen Sie die Parameter dieser Näherungsgleichungen vorgängig mit dem Programm SorIs.

Angaben zum Trocknungsgut / 3A - Molekularsieb
--

Anzahl Trocknungsabschnitte / 3A - Molekularsieb	
0	Gut nur oberflächenfeucht (1 Abschnitt)
I	Gut auch innen feucht (2 Abschnitte)
<ESCAPE>	zurück

Typ der Sorptionsisothermen / 3A - Molekularsieb	
F	Freundlich-Sorptionsisotherme (Potenzansatz)
B	BET-Sorptionsisotherme
P	Sorptionsisotherme als Polynom
<ESCAPE>	zurück

Tragen Sie die Parameter der Näherungsgleichungen der gewählten Sorptionsisotherme (Programm SorIs) in die nachstehende Maske ein:

## Sorptionisotherme (Potenzansatz) / 3A - Molekularsieb

## Ansatz von Freundlich (Potenzansatz)

$$X_e = a_{Fre} * \phi^{b_{Fre}}$$

mit folgenden Näherungen für die Parameter (T in [K]):

$$a_{Fre} := a_{Fre0} + a_{Fre1} * T_s + a_{Fre2} * T_s^2$$

$$b_{Fre} := b_{Fre0} + b_{Fre1} * T_s + b_{Fre2} * T_s^2$$

Konstante	aFre0	[-]	=	0.1494?	0.1494
Koeffizient	aFre1	[1/K]	=	3.862E-0004	
Koeffizient	aFre2	[1/K <sup>2</sup> ]	=	-4.591E-0007	
Konstante	bFre0	[-]	=	-0.1204	
Koeffizient	bFre1	[1/K]	=	6.880E-0004	
Koeffizient	bFre2	[1/K <sup>2</sup> ]	=	-5.672E-0008	

Die Auslegung von Trocknern für den zweiten Trocknungsabschnitt benötigt ein Minimum an experimentell zu gewinnenden Informationen. Sie werden in [W+S], Abschnitt 9.4.2 erörtert.

## Eingaben zum Trocknungsverlauf / 3A - Molekularsieb

Kritische Massenbeladung (Massenbeladung am Knickpunkt) aus:

$$X_c = c_{Xc0} + c_{Xc1} * T_s + c_{Xc2} * T_s^2 \quad [X_c \text{ in kg/kg}, T_s \text{ in K}]$$

Konstante	cXc0	[kg/m <sup>3</sup> ]	=	0.2500	
Koeffizient	cXc1	[kg/m <sup>3</sup> K]	=	0.0000	
Koeffizient	cXc2	[kg/m <sup>3</sup> K <sup>2</sup> ]	=	0.0000	

Verlauf des experimentell bestimmten dimensionslosen Trocknungsverlaufs ( $\mu$ ) nach [W+S], Abschnitt 9.4.2, Bild 9.22 in Abhängigkeit der dimensionslosen Gutfeuchte ( $G_{phi}$ ) aus:

$$\mu = c_{\mu0} + c_{\mu1} * G_{phi} + c_{\mu2} * G_{phi}^2 + c_{\mu3} * G_{phi}^3$$

Konstante	c $\mu$ 0	[kg/m <sup>3</sup> ]	=	0.0000?	0.0000
Koeffizient	c $\mu$ 1	[kg/m <sup>3</sup> K]	=	0.2510	
Koeffizient	c $\mu$ 2	[kg/m <sup>3</sup> K <sup>2</sup> ]	=	-0.3780	
Koeffizient	c $\mu$ 3	[kg/m <sup>3</sup> K <sup>3</sup> ]	=	1.127	

Die nächste Eingabe betrifft den Maximalwert der molaren Bindungsenthalpie. Falls Sie diesen nicht kennen, kann die molare Bindungsenthalpie  $h_{mB}$  im ganzen Simulationsbereich mit der Gleichung  $h_{mB} = R \cdot T \cdot \ln(1/\phi)$  berechnet werden. Geben Sie dazu für den Koeffizienten  $ch_{B10}$  den vom Programm noch akzeptierten Höchstwert ein.

## Bindungsenthalpie / 3A - Molekularsieb

Die molare Bindungsenthalpie  $hmB$  wird aus der Beziehung  
 $hmB = R T \ln(1/\phi)$   
 berechnet ( $\phi$  zu jeweiligem  $X$  aus Sorptionsisotherme).  
 Für sehr kleine Massenbeladungen liefert diese Gleichung  
 zu grosse Werte. Deshalb kann nachfolgend die molare  
 Bindungsenthalpie für eine monomolekulare Bedeckung des  
 Feststoffs ( $hmB1$ ) als obere Grenze eingegeben werden.

Für diesen Grenzwert gilt in Abhängigkeit der Temperatur:  
 $hmB1 = chB10 + chB11 * Ts + chB12 * Ts^2$  [ $hmB1$  in J/kmol,  $Ts$  in K]

Konstante	chB10	[J/komol]	=	1.870E+0007?	1.870E+0007
Koeffizient	chB11	[J/komolK]	=	0.0000	
Koeffizient	chB12	[J/komolK <sup>2</sup> ]	=	0.0000	

Schliesslich müssen Sie für das Trocknungsgut noch Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit eingeben:

## Stoffwerte des Trocknungsguts / 3A - Molekularsieb

Dichte trockener Feststoff ( $\rho_{hoS}$ ) aus:

$$\rho_{hoS} = crhoS0 + crhoS1 * Ts \quad [\rho_{hoS} \text{ in kg/m}^3, Ts \text{ in K}]$$

Konstante	crhoS0	[kg/m <sup>3</sup> ]	=	1250	
Koeffizient	crhoS1	[kg/m <sup>3</sup> K]	=	0.0000	

spezifische Wärmekapazität trockener Feststoff ( $cpS$ ) aus:

$$cpS = ccpS0 + ccpS1 * Ts \quad [cpS \text{ in J/kgK}, Ts \text{ in K}]$$

Konstante	ccpS0	[J/kgK]	=	920.0	
Koeffizient	ccpS1	[J/kgK <sup>2</sup> ]	=	0.0000	

Wärmeleitfähigkeit trockener Feststoff ( $\lambda_{mS}$ ) aus:

$$\lambda_{mS} = clamS0 + clamS1 * Ts \quad [\lambda_{mS} \text{ in W/mK}, Ts \text{ in K}]$$

Konstante	clamS0	[W/mK]	=	0.1300?	0.1300
Koeffizient	clamS1	[W/mK <sup>2</sup> ]	=	0.0000	

Falls - wie beispielsweise bei Kochsalz - die Partialdruckerniedrigung ( $[W+S]$ , Abschnitt 5.3.1) zu berücksichtigen ist, kann dies durch eine Näherungsgleichung für die relative Gleichgewichtsfeuchtigkeit über der Gutoberfläche erfolgen. Wenn dies nicht nötig ist, setzen Sie  $ch\phi E0$  Eins und die beiden anderen Koeffizienten Null.

Eventuelle Partialdruck-Erniedrigung / 3A - Molekularsieb

Relative Gleichgewichtsfeuchtigkeit an der Guts oberfläche  
im ersten Trocknungsabschnitt (z.B. bei Salzlösungen)  
 $\phi_E = c\phi_{E0} + c\phi_{E1} \cdot T_s + c\phi_{E2} \cdot T_s^2$  [Ts in K]

Konstante	$c\phi_{E0}$	[-]	=	1.000?	1.000
Koeffizient	$c\phi_{E1}$	[1/K]	=	0.0000	
Koeffizient	$c\phi_{E2}$	[1/K <sup>2</sup> ]	=	0.0000	

Damit ist die Eingabe der Daten des Trocknungsguts beendet. Um diese auch im Programm TroFDi verwenden zu können, werden sie getrennt von den Prozess- und Trocknerdaten abgespeichert.

Eingabedaten für Trocknungsgut sichern / 3A - Molekularsieb

Sichern Sie die bisher eingegebenen Stoffwerte vor den restlichen Eingaben auf eine separate Datei (sie erhält vom Programm die Verlängerung \*.TrS).

Die Eingabedaten können zur späteren Wiederverwendung auf ein ASCII-File geschrieben werden. RAM → Disk

Eingabedaten auf File schreiben (j/<n>)?

Nun verfolgen wir den **zweiten Teil der Eingabe**. In diesem werden die gutsunabhängigen Prozess- und Trocknerdaten manuell oder über ein (ebenfalls separates) Datenfile eingeben:

EINGABEN der PROZESS- UND TROCKNERDATEN / Gut: 3A - Molekularsieb

Im zweiten Eingabeteil sind nun die Prozess- und Anlagedaten einzugeben.

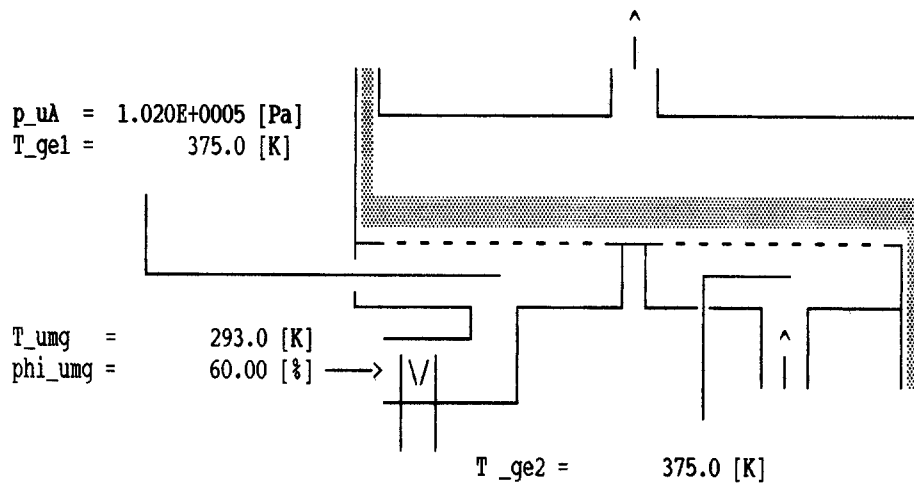
Früher gespeicherte Eingabedaten können zur Wiederverwendung ab einem ASCII-File gelesen werden. Disk → RAM

Eingabedaten aus File lesen (j/<n>)?

Projektbezeichnung	?			ca. [W+S], Beisp. 9.3
Mit (2) oder ohne (1) Kaltlufteintritt		=		2

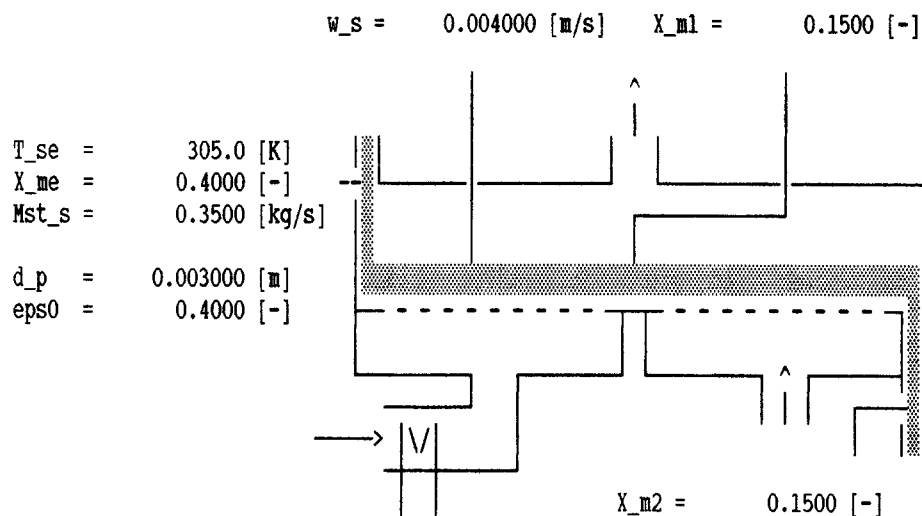
Je nach der Eingabe mit (2) oder ohne (1) Kaltlufteintritt wird ein ein- oder zweiteiliger ([W+S], Bild 9.13) Trockner simuliert. Nach den Daten zur Trocknungsluft (Legenden in der Eingabemaske)

EINGABEN TROCKNUNGSGAS		ca.[W+S],Beisp.9.3 / Gut: 3A - Molekularsieb
------------------------	--	--

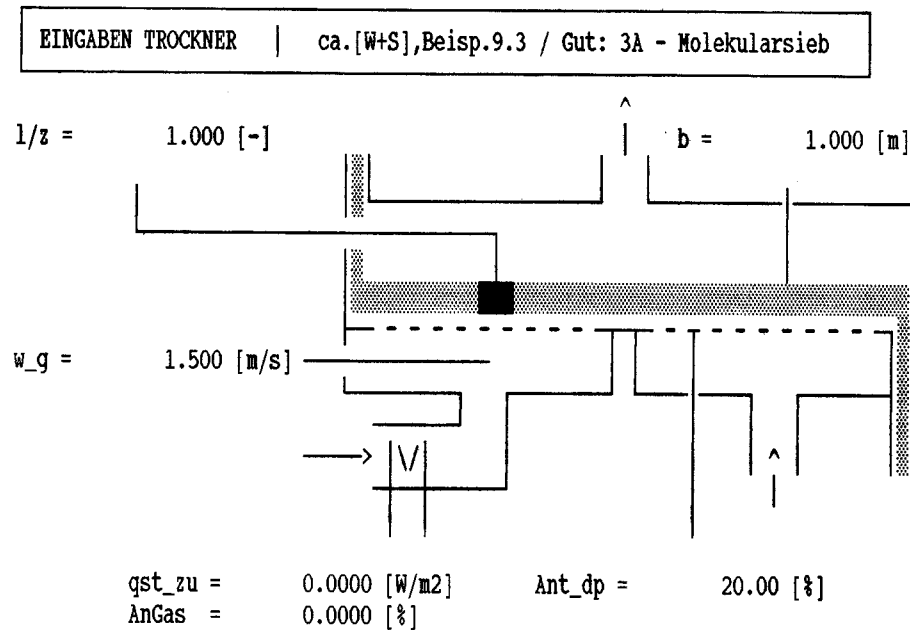


und zum Trocknungsgut

EINGABEN TROCKNUNGSGUT		ca.[W+S],Beisp.9.3 / Gut: - Molekularsieb
------------------------	--	---



müssen Sie die Trocknerdaten eingeben. Das Simulationsprogramm ermöglicht die Erfassung einer auf die Anströmfläche bezogenen Zusatzwärmestromzufuhr im Trockner  $q_{st\_zu}$ . Durch die Angabe des davon direkt ans Gut übergehenden Anteils kann auch eine Kontakttrocknung angenähert werden. Das Verhältnis von Länge zu Höhe eines Berechnungselements (Element mit völliger Vermischung) kann im allgemeinen als Eins angenommen werden. Ein kleinerer Wert führt zu höheren Genauigkeiten - aber auch zu grösseren Rechenzeiten. Sie müssen das optimale Verhältnis von  $l/z$  für Ihr Problem durch einige Versuche mit unterschiedlichen Werten selbst ermitteln.



Damit haben Sie auch die Daten zum Trocknungsgut, zum Trocknungsgas und zum Trockner eingegeben. Diese können auf einem separaten Datenfile zur späteren Wiederverwendung gesichert werden.

Prozess- und Anlagedaten sichern	ca.[W+S], Beisp.9.3
----------------------------------	---------------------

Die Prozess- und Anlagedaten werden auf eine separate Datei geschrieben (sie erhält vom Programm die Verlängerung *.TrF).
---

Die Eingabedaten können zur späteren Wiederverwendung auf ein ASCII-File geschrieben werden.	RAM → Disk
--	------------

Eingabedaten auf File schreiben (j/<n>)?
--

Die Computersimulation nach [W+S], Abschnitte 9.4.1 und 9.4.2 wird nun gestartet. Die Koppelung von Wärme- und Stofftransport bedingt eine aufwendige iterative Berechnung. Da zu Beginn noch keine Näherungswerte bekannt sind, dauert die Berechnung des ersten Elements etwas länger als die der folgenden Berechnungselemente. Am Bildschirm erscheint während der Rechnung am ersten Element die folgende Anzeige:

Bitte warten --> Iterative Berechnung des ersten Elements.
--



Der weitere Fortschritt der Rechnung lässt sich anhand der laufenden Ausgabe der Ergebnisse auf dem Bildschirm verfolgen:



Berechnungsverlauf (Iterationsergebnisse für jedes Element)
---

n	Xma_n	Tsa_n	Yma_n	Tga_n	eps_n	$\phi$	$\mu$	Tga_m	Yma_m
[-]	[-]	[K]	[-]	[K]	[-]	[-]	[-]	[K]	[-]
1	0.3865	306.68	0.0325	310.74	0.473	1.000	1.000	310.74	0.0325
2	0.3722	307.44	0.0340	311.46	0.474	1.000	1.000	311.10	0.0333
3	0.3575	307.78	0.0347	311.78	0.474	1.000	1.000	311.29	0.0338
4	0.3426	307.93	0.0350	311.93	0.473	1.000	1.000	311.42	0.0341
5	0.3277	307.99	0.0351	311.99	0.473	1.000	1.000	311.50	0.0343
6	0.3129	308.02	0.0352	312.02	0.473	1.000	1.000	311.57	0.0344
7	0.2980	308.03	0.0352	312.04	0.473	1.000	1.000	311.61	0.0346
8	0.2832	308.03	0.0352	312.05	0.472	1.000	1.000	311.65	0.0346
9	0.2684	308.03	0.0352	312.05	0.472	1.000	1.000	311.67	0.0347
10	0.2536	308.04	0.0352	312.06	0.472	1.000	1.000	311.70	0.0348
11	0.2389	308.03	0.0352	312.07	0.471	0.630	0.290	311.71	0.0348
12	0.2361	319.55	0.0137	324.16	0.477	0.764	0.473	312.73	0.0330

Nach dem Abschluss der Computersimulation werden die Eingabedaten zur allfälligen Ausgabe an einem Drucker zusammengefasst:

EINGABEN 1 - Projekt: ca.[W+S],Beisp.9.3 / Gut: 3A - Molekularsieb
--

Zustand des Trocknungsgases:

Temperatur Ansaugstutzen (Umgebung)	T_umg	[K] =	293.0
Relative Feuchtigkeit Ansaugstutzen	phi_umg	[%] =	60.00
Gastemperatur Eintritt 1.Teil	T_ge1	[K] =	375.0
Gastemperatur Eintritt 2.Teil	T_ge2	[K] =	375.0
Druck unter dem Anströmboden	p_uA	[Pa] =	1.020E+0005

Feststoffdaten:

Temperatur Trocknungsgut ein	T_se	[K] =	305.0
Massenbeladung Trocknungsgut ein	Xm_e	[-] =	0.4000
Massenbeladung am Knickpunkt	Xm_c	[-] =	0.2500
Massenbeladung Gut nach 1.Teil	Xm_1	[-] =	0.1500
Massenbeladung Gut nach 2.Teil	Xm_2	[-] =	0.1500
Massenstrom Trocknungsgut ein	Mst_s	[kg/s] =	0.3500
Massenstrom trockener Feststoff	Mst_S	[kg/s] =	0.2500
Teilchengrösse (gleichwert.Kugel- $\phi$ )	d_p	[m] =	0.003000
Porosität des Festbetts	eps_0	[-] =	0.4000
Feststoffgeschwindigkeit im Trockner	w_s	[m/s] =	0.004000

EINGABEN 2 - Projekt: ca.[W+S],Beisp.9.3 / Gut: 3A - Molekularsieb
--

Trocknerdaten:

Gasgeschwindigkeit vor Anströmboden	w_g	[m/s] =	1.500
Trocknerbreite	b	[m] =	1.000
Höhe des Festbetts (für eps_0)	z_0	[m] =	0.08594
Druckverlustanteil im Anströmboden	Ant_dp	[%] =	20.00
Direkt zugeführte Wärmestromdichte	qst_zu	[W/m <sup>2</sup> ] =	0.0000
davon an Gas übergelender Anteil	AnGas	[%] =	0.0000

## Nach der Wiedergabe der Hauptergebnisse

RESULTATE 1 Projekt: ca.[W+S],Beisp.9.3 / Gut: 3A - Molekularsieb
---

Gesamte Länge des Trockners	z_tot	[m]	=	7.591
Gesamte Verweilzeit im Trockner	t_r	[s]	=	1898
Temperatur Trocknungsgas Austritt	T_ga	[K]	=	358.1
Massenbeladung Trocknungsgas Austritt	Ym_a	[-]	=	0.01448
Massenstrom Trocknungsgas Teil 1	Mst_gT1	[kg/s]	=	10.64
Massenstrom Trocknungsgas Teil 1	Mst_gT2	[kg/s]	=	4.898E-0036

werden die detaillierten Simulationsergebnisse angezeigt. Diese können zur grafischen Darstellung des Trocknungsfortschritts mit Fremdprogrammen auf ein ASCII-Plotfile geschrieben werden.

LEGENDE für die folgenden tabellarischen Ausgaben:

n	Zellennummer
z	Abstand ab Gutaufgabe (Trocknerlänge)
Xm_an	Massenbeladung des Feststoffs am Austritt aus den Zellen
T_san	Temperatur des Feststoffs am Austritt aus den Zellen
Ym_an	Massenbeladung des Trocknungsgases am Austritt aus den Zellen
T_gan	Temperatur des Trocknungsgases am Austritt aus den Zellen
eps_n	Porosität des Fliessbetts (bzw. Festbetts)
z_n	Höhe des Fliessbetts (bzw. Festbetts)
QstTot	totaler Heizleistungsbedarf (durch Trocknungsgas und direkt)
$\mu$	dimensionslose Trocknungsgeschwindigkeit (2.Trocknungsabschn.)
mst_1	Trocknungsgeschwindigkeit (übertragener Massenstrom / Betttoberfl.)

RESULTATE 2 Projekt: ca.[W+S],Beisp.9.3 / Gut: 3A - Molekularsieb
---

n	z	Xm_an	T_san	Ym_an	T_gan	eps_n	z_n	QstTot	$\mu$	mst_1
[-]	[m]	[-]	[K]	[-]	[K]	[-]	[m]	[kW]	[-]	[g/m2s]
1	0.101	0.3865	306.7	0.0325	310.7	0.473	0.101	11.8	1.000	0.316520
2	0.201	0.3722	307.4	0.0340	311.5	0.474	0.101	23.7	1.000	0.335850
3	0.301	0.3575	307.8	0.0347	311.8	0.474	0.100	35.5	1.000	0.345312
4	0.402	0.3426	307.9	0.0350	311.9	0.473	0.100	47.3	1.000	0.349805
5	0.502	0.3277	308.0	0.0351	312.0	0.473	0.100	59.1	1.000	0.352093
6	0.601	0.3129	308.0	0.0352	312.0	0.473	0.100	70.9	1.000	0.353421
7	0.701	0.2980	308.0	0.0352	312.0	0.473	0.099	82.6	1.000	0.354342
8	0.800	0.2832	308.0	0.0352	312.0	0.472	0.099	94.3	1.000	0.355100
9	0.899	0.2684	308.0	0.0352	312.1	0.472	0.099	105.9	1.000	0.355797
10	0.998	0.2536	308.0	0.0352	312.1	0.472	0.099	117.6	1.000	0.356477
11	1.096	0.2389	308.0	0.0352	312.1	0.471	0.098	129.2	0.290	0.357159
12	1.196	0.2361	319.6	0.0137	324.2	0.477	0.100	140.9	0.473	0.068395
13	1.296	0.2309	326.6	0.0179	330.1	0.480	0.100	152.7	0.355	0.124826
14	1.397	0.2268	333.2	0.0159	336.4	0.484	0.101	164.6	0.329	0.098943
15	1.498	0.2228	338.5	0.0156	341.5	0.486	0.101	176.5	0.296	0.094726
16	1.600	0.2192	343.1	0.0151	345.7	0.488	0.102	188.5	0.271	0.087161

## Literaturverzeichnis

- [HEDH] Heat Exchanger Design Handbook, Rev.1986, Hemisphere Publishing Corporation, VDI-Verlag, Düsseldorf 1986.
- [KAST] Kast,W: Adsorption aus der Gasphase, VCH-Verlagsgesellschaft, Weinheim 1988
- [MVT] Zogg,M: Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik, 2.Aufl., B.G. Teubner, Stuttgart 1987.
- [ROSS] Ross,G.: Computer Programming Examples for Chemical Engineers, Computer-Aided Chemical Engineering, Vol.3, Elsevier, Amsterdam u.a.O. 1987
- [RPP] Reid,R., Prausnitz, J.M., Poling B.E.: The Properties of Gases & Liquids, 4.Aufl, International Edition, MacGraw-Hill, New York u.a.O. 1988.
- [WA] VDI-Wärmeatlas, 5.Auflage, VDI-Verlag Düsseldorf, 1988.
- [W+S] Zogg,M: Wärme- und Stofftransportprozesse (Einführung in die Thermische Verfahrenstechnik), Otto Salle Verlag, Frankfurt / Berlin / München und Verlag Sauerländer Aarau / Frankfurt / Salzburg, 1983.

## Programmverzeichnis

- [MVT] Zogg,M: Programmpaket zur Mechanischen Verfahrenstechnik, Version 1.03, Zogg, Kirchstutz 3, CH-3414 Oberburg 1990.