

KfK 3167
Juni 1981

Die Trennsäulenfunktion TTR

Beitrag zur Abtrennung von Krypton 85 aus der Abluft kerntechnischer Anlagen

E. Hauss
Hauptabteilung Ingenieurtechnik
Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

Kernforschungszentrum Karlsruhe

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Hauptabteilung Ingenieurtechnik

Projekt Wiederaufarbeitung und Abfallbehandlung

KfK 3167

PWA 3/81

Die Trennsäulenfunktion TTR

Beitrag zur Abtrennung von Krypton 85
aus der Abluft kerntechnischer Anlagen

E. Hauss

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH
ISSN 0303-4003

Kurzfassung

Eine Trennsäule wird nach der Kaskadentheorie in einer Funktion beschrieben.

Diese wird auf die Form gebracht:

•

•
$$TX \leftarrow TTR \text{ (BP, RLV)}$$

•

Für die im Rahmen der Kryptonentfernung gestellte Trennaufgabe wird ein Kennlinienfeld für zwei und drei wirksame Stufen im Abtriebsteil der Säule mit dieser Funktion errechnet.

Möglichkeiten und Grenzen der Auslegung sind aus diesem Diagramm erkennbar.

Die konstruktive Ausbildung der Trennsäule ist nicht Inhalt dieser Arbeit. Physikalisch gegebene Randbedingungen erfordern hier besondere Sorgfalt.

Die in einer Beispielrechnung vorgeschlagene Auslegung ist auch bei Rückführung des Kopfproduktes der nachgeschalteten Trennsäule zur Einspeisung der ersten Kolonne richtig.

Die verwendeten Daten und Rechenabläufe werden angegeben, die Anwendung der Funktionen am Beispiel erläutert.

Als zweckmäßige Auslegung werden für die Abtrennung von Krypton eine erste Trennsäule mit 14 Stufen, bei 2 wirksamen Stufen im Abtriebsteil vorgeschlagen, die Ergebnisse dieser Rechnung zeigt Tabelle 1. Es ist gasförmiger Sumpfabzug vorgesehen, das Auslegungsrücklaufverhältnis beträgt 1.25.

Ein relativer Vergleich verschiedener praktischer Bodenarten für die konstruktive Auslegung wird angegeben.

The function TTR for separation-columns.

Comment on the separation of Kr-85 from the drawing-off air of nuclear plants.

Compact

A separation column is described in a function according to the theory of cascades, which is written as

$$TX \leftarrow TTR (BP, RLV).$$

This function is used to compute a family of characteristic curves for two and three operating plates to be used for the separation problems involved in krypton removal. the diagramm indicates the possibilities and limits of design.

The design proper of the separation column is not the subject of this paper. Special attention needs to be devoted to existing physical constraints.

The design proposed in a calculation given as an example is correct also if the top product of a downstream separation column is returned as feed to the first column.

The data used and the computation steps are indicated, the application of the functions is explained by an example.

As a useful design for krypton separation, a first separation column with 14 plates is proposed, which has two operating plates in the stripping section. The results of this calculation are shown in Table 1. The bottoms are withdrawn as gases, the design reflux value is 1.25.

A relative comparison of various practical types of plates is made for design purposes.

Inhaltsverzeichnis

Die Trennaufgabe	1
Inventar und Verweilzeit	4
Eine Funktionsmethode	5
Der Sumpfabzug und das Rücklaufverhältnis	7
Der Freiheitsgrad einer Trennsäule	8
TTR, ein Diagramm zum Suchen des Betriebspunktes	11
Der Betriebsbereich im Diagramm	13
Die Benutzung des Buches 91812 TTR	15
Das Kennlinienfeld für 4 wirksame Stufen im Abtriebsteil	19
Kondensatorleistung aus dem Rücklaufverhältnis	21
Wärmebilanz um den Verstärkungsteil	22
Umlauf im Abtriebsteil	23
Der Minderungsfaktor für den Umlauf im Abtriebsteil	24
Rechnungen zum Experiment	27
Messungen	30
Die Abbildung theor. Stufen auf prakt. Böden	31
Literaturverzeichnis	32

Anhang A : Funktionen, Variable

TTR (BP, RLV)	33
TTRINIT, Initialisierung der Eingabevariablen	33
TTRPRL, Prolog der Funktion ATTR	33
ATTR, Berechnung der Trennsaeule (Kaskadentheorie) .	34
TTREPI, Epilog zu ATTR, Ergebnistabelle	35
ΔK_C , Berechnung der Gleichgewichtszahlen	36
ΔH_{CL} , Bereitstellung der Flüssig-Enthalpien	36
ΔH_{CV} , Bereitstellung der Dampf-Enthalpien	36
ΔQ_V , Bereitstellung der Verlustwärmen	36
ΔQ_{ZF} , Bereitstellung der Zerfallswärme	36
Tabelle der Eingabevariablen	38

Die Trennaufgabe

Bei der Rückgewinnung von Kernbrennstoff aus abgebrannten Brennelementen wird Luft als Trägergas verwendet. Sauerstoff wird in einer katalytischen Vorreinigung entfernt.

Der Abgasstrom wird schließlich zu einer Tieftemperatur-Trennanlage geführt. Das in diese Anlage einströmende Gas, der Feed, enthält Stickstoff und geringe Mengen von Argon, Krypton, Xenon mit Spuren von Sauerstoff, Methan, Stickoxyden. Im Strahlenfeld von Kr^{85} entsteht bei Anwesenheit von Sauerstoff Ozon, durch Reaktion mit CH_4 auch CO_2 und Wasser.

Sichere Entfernung von Krypton ist Zweck der Trennung. Dies bedeutet: Im Krypton sind Restmengen anderer Gase erlaubt.

Im Kopfprodukt der 1. und im Sumpfprodukt der 2. Kolonne soll Krypton nicht enthalten sein.

In der Abb. 0 ist der eintretende Feedstrom in Form eines Stabmodelles aufgezeichnet. In unserem Falle ist der Feed ein Gasgemisch, das zu 99,56 Prozent aus Stickstoff und Argon besteht, nur der Rest ist Krypton und Xenon.

Im Inneren der Säule ordnen sich die Komponenten nach ihren Siedetemperaturen. Wie im Stabmodell angedeutet, geht der Stickstoff nach oben in den Kopf, Krypton und Xenon nach unten in den Sumpf der Säule.

In einer Trennsäule ist immer nur *e i n e* Trennung möglich. Im Stabmodell ist eine Trennlinie eingezeichnet.

Die Trennsäule zerlegt den ankommenden Feedstrom F in das nach oben abgehende Kopfprodukt D (Destillat) und das unten abgehende Sumpfprodukt B (Bottom).

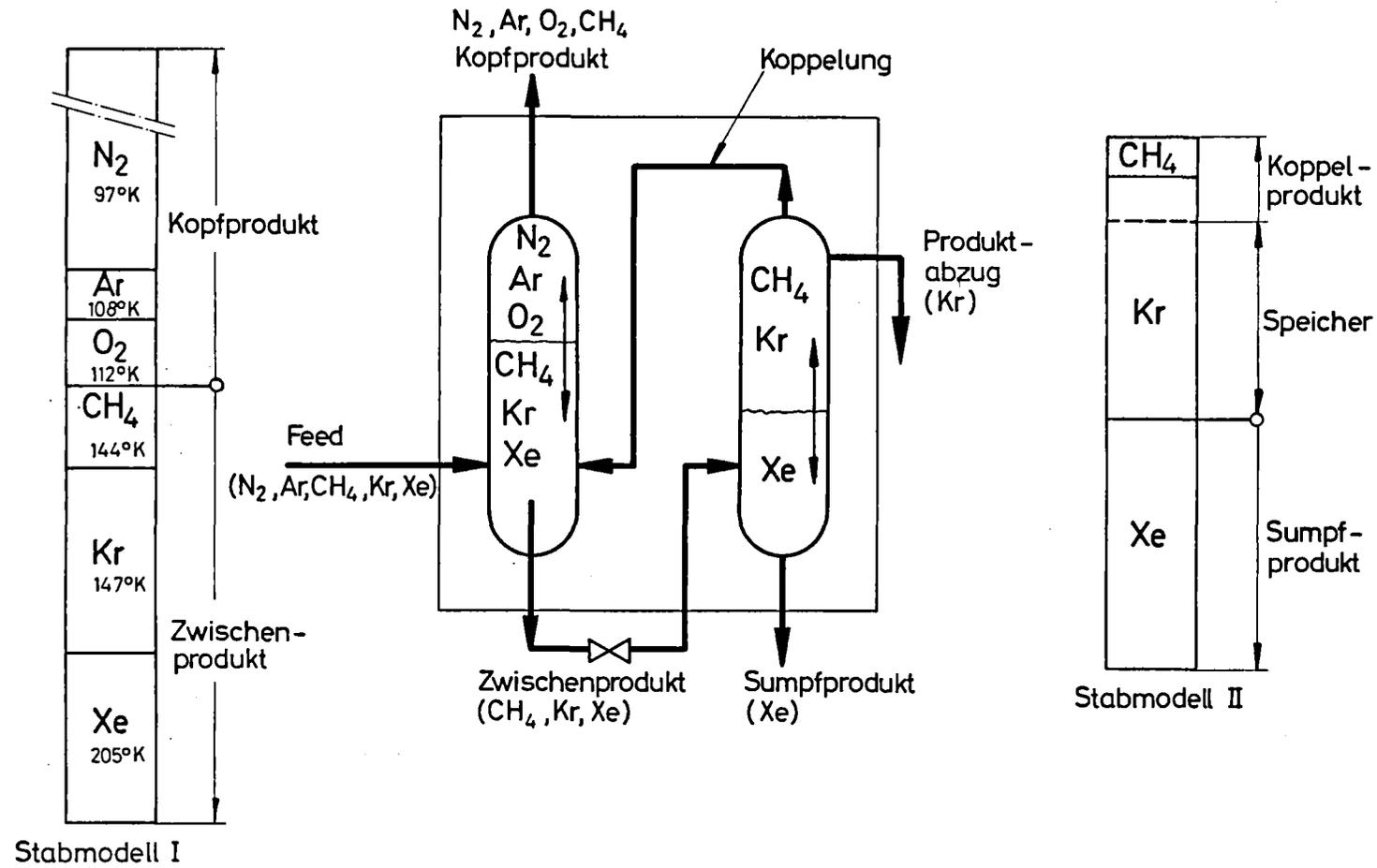
Den Sumpfabzug müssen wir so festlegen können, daß Krypton

sicher nach unten abfließt. Dies wird erreicht durch Anordnung einer genügend großen Stufenzahl im Verstärkungsteil der Säule. Der Verstärkungsteil ist das Oberteil der Trennsäule, dazu gehören die Stufen oberhalb des Feedeintrittes einschließlich des Kondensators. Die Säule unterhalb des Feedeintrittes nennt man Abtriebsteil.

Die Trennaufgabe wird dadurch erschwert, daß sich im Feed Stickstoff neben Xenon befinden. Die Siedepunkte dieser Gase liegen etwa 100 K auseinander.

In der Regel stellt sich am Feedeintritt im Inneren der Säule auch der Siedepunkt des Feed ein, das wäre bei uns der Siedepunkt des Stickstoff (0,965 Anteil). Bei diesen Verhältnissen friert (desublimiert) Xenon und der entstehende Schnee verstopft die Löcher der Böden.

Es ist deshalb erforderlich die Temperatur der Flüssigkeit auf dem Boden über dem Feedeintritt bis zum Taupunkt des Xenon (ca. 120 K) anzuheben. Dies ist nur durch Einstellen des Krypton-Bereiches bis über den Feedeintritt möglich. Diese Verhältnisse müssen auch bei Schwankung des Speisestromes erhalten bleiben. Aus Abb.0 ist ersichtlich, daß bei Bedarf Krypton aus der 2.Säule rückgeführt werden kann, dies kann aus regeltechnischen Gründen erforderlich werden.



Entfernung von Krypton

Abb.: 0



Inventar und Verweilzeit

Bei den thermodynamischen Berechnungsverfahren wird die konstruktive Gestaltung der praktischen Böden nicht berücksichtigt. Bei unserer Trennaufgabe entsteht mit dem Krypton Zerfallswärme, diese beeinflusst den inneren Umlauf. Die Größe der Zerfallswärme wird wesentlich bestimmt durch das Flüssigkeitsinventar der Böden.

Für die weitere Betrachtung werden folgende realistische Annahmen getroffen:

Feedmenge	100	cbm/h
Inventar Kondenser	500	Nltr
Inventar theor. Stufe	1000	Nltr
Inventar Sumpf	5000	Nltr

Ausgehend von dieser Annahme werden Inventar und Verweilzeit der einzelnen Komponenten berechnet. Das Ergebnis zeigt folgende Tabelle.

Komp.	Feed	Inventar	Verweilzeit
	Nl/h	Nltr	h
N2	98559	8565	0.087
Ar	1000	1849	1.85
O2	1	13	13.0
CH4	.1	10	100.0
Kr	40	1935	48.4
Xe	400	5128	12.8

Die Tabelle zeigt, daß keine lineare Abhängigkeit zwischen durchfließender Menge und dem sich einstellenden Inventar in der Säule besteht.

Am CH4 ist ersichtlich, daß geringe Anteile im Feed sich in der Trennsäule zu erheblichen Mengen anreichern können.

Eine Funktionsmethode

Bei der Trennung von Vielstoffgemischen ist die Benutzung einer 'Entwurfsmethode' (z.B. Thiele-Mc.Cabe-Diagramm) für die Berechnung der erforderlichen Stufenzahl schlecht möglich. Deshalb ist man bei Mehrstoffgemischen auf 'Funktionsmethoden' angewiesen.

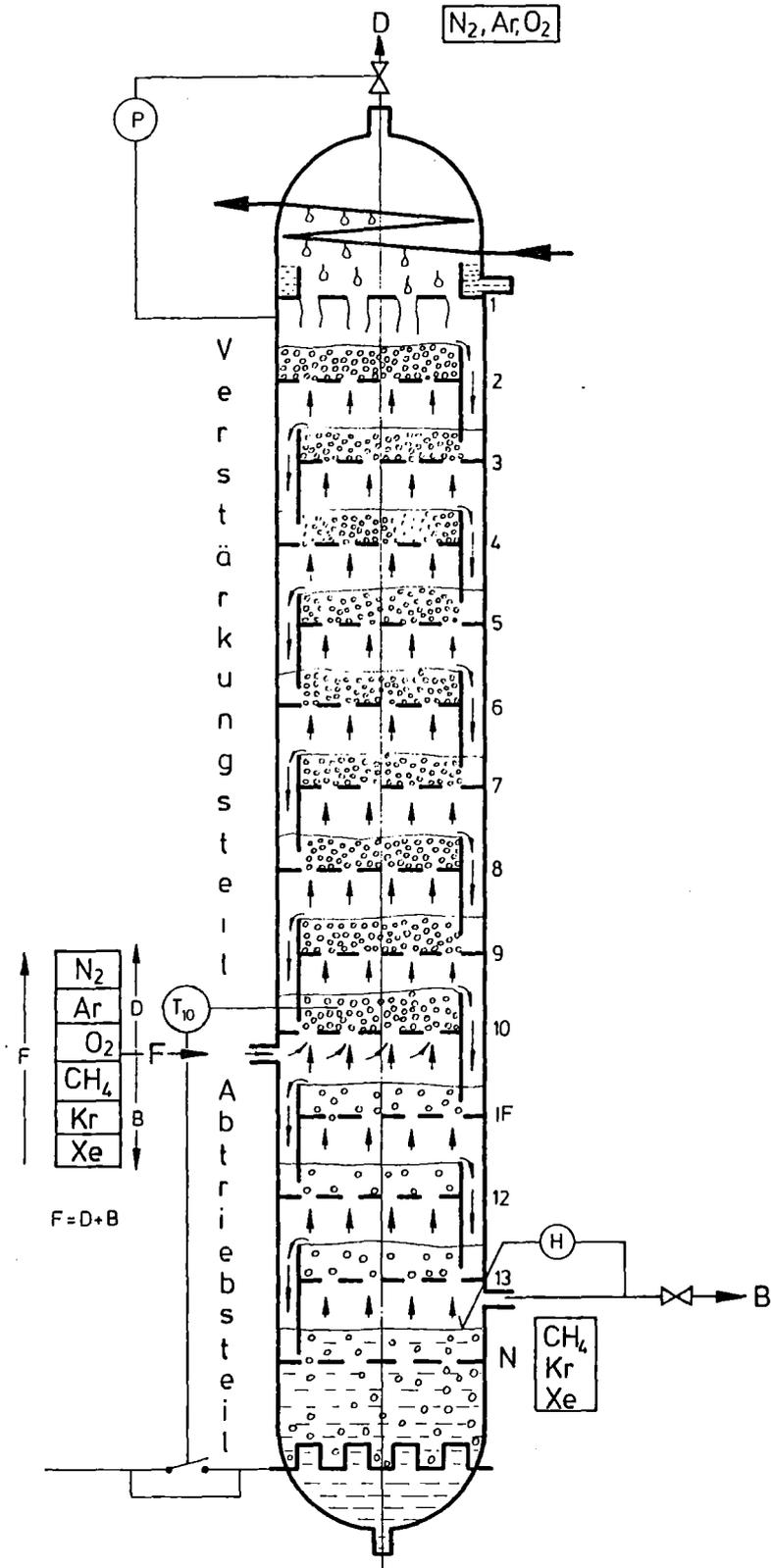
'Funktionsmethoden' berechnen die erzielbare Trennwirkung für eine vorgegebene Konfiguration der Kolonne.

Entwurfsprobleme werden mittels Funktionsmethoden gelöst, indem man verschiedene Konfigurationen vorgibt und durch kritische Wertung der Ergebnisse die zur vorgegebenen Trennaufgabe notwendige Konfiguration ermittelt.

Die Aufstellung einer solchen Funktion für die gestellte Trennaufgabe ist nicht trivial. Genauigkeitsanforderungen und gestellte Randbedingungen erschweren diese Aufgabe.

Für den Anwender sind solche Fragen unwesentlich, wichtig ist aber, daß er schon aus der möglichen symbolischen Schreibweise des Funktionskopfes das dahinter liegende System erkennt. Bekannt ist die Schreibweise $z=f(x,y)$. In neuer Form und speziell für die gestellte Trennaufgabe:

$$TX \leftarrow TTR (BP, RLV)$$



Entfernung von Krypton
TRENNSÄULE 1

Abb.: 1

Der Sumpfabzug und das Rücklaufverhältnis

Die allgemeine Schreibweise

Ergebnisse ← Funktion (Argumente)

liest sich in unserem Falle /1/:

TX ← TTR (BP, RLV)

TX ergibt sich aus der Funktion mit Namen TTR nach Eingabe der Argumente BP und RLV.

TTR Funktionsname der Trennsäulenfunktion

TX ist Ergebnismatrix, sie enthält Temperaturen, besonders die über der Feedstufe TCIF-11, siehe Abb.1 und die Molanteile im Sumpfprodukt als Kennzeichen der Trennwirkung.

BP Sumpfabzugsmenge in vpm vom Feed

RLV Rücklaufverhältnis, dies ist eine kennzeichnende Größe für den inneren Umlauf (Rektifikation!), auch für die aufgewendete Heiz- und Kühlleistung.

Alle anderen möglichen Parameter sind Auslegungsparameter, z.B. Stufenzahl, Einspeisepunkt u.a. Diese können nach Auslegung nicht mehr geändert werden.

Betriebsparameter sind BP und RLV.

BP, weil man am Sumpf immer mehr oder weniger abziehen kann, RLV weil die Heizleistung der Säule im gewissen Rahmen geändert werden kann. Nun ist es aber so, daß man ein Auslegungsrücklaufverhältnis festlegt. Zulässige Abweichungen nach oben und unten dienen der Abdeckung des Betriebsbereiches, das ist im wesentlichen die Schwankung des Speisestromes F (siehe schematische Abbildung einer Trennsäule: Abb.1)

Der Freiheitsgrad einer Trennsäule

$T_X \leftarrow TTR (BP, RLV \leftarrow \text{Konstant})$

Diese Schreibweise sagt zunächst aus, daß Temperatur und Trennwirkung sich ergeben aus der Größe des Sumpfabzuges BP, und dem Rücklaufverhältnis RLV. Bei festgehaltenem RLV sind die Ergebnisse nur noch vom Sumpfabzug BP abhängig.

Nach dieser Betrachtung ist diese Funktion und damit auch eine wirkliche Trennsäule ein System mit **E I N E M** Freiheitsgrad.

Nun ist es noch wesentlich zu wissen, wie hart dieser Freiheitsgrad ist, das heißt wie stark sich die Temperatur der Flüssigkeit auf dem Boden über dem Feedeintritt in Abhängigkeit vom Sumpfabzug ändert. Diese Temperatur ist wegen des Xe-Taupunktes im Feed die wesentliche Ergebniszahl der Funktion und des praktischen Betriebes. Diese Härte drückt sich aus in der Steilheit, also der Ableitung dT/dBP .

Diese Ableitung nimmt in unserem Falle sehr große Werte an, je nach Betriebspunkt kommt es zu Größenordnungen von 100 K/vpm.

Es wird nun wie folgt vorgegangen:

mittels der Funktion TTR werden Kennlinienfelder ausgerechnet. Kurven mit der Temperatur der Flüssigkeit auf dem Boden über dem Feedeintritt (Ordinate) werden über der Sumpfabzugsmenge BP aufgetragen.

Ein Kennlinienfeld enthält Kurven mit jeweils konstantem Rücklaufverhältnis als Parameter.

Die Zahl RLV wird als Entwurfsparameter der Funktion TTR vorgegeben.

Zur Erläuterung wird eine kurze Betrachtung über das Rücklaufverhältnis $RLV = L / D$ gegeben.

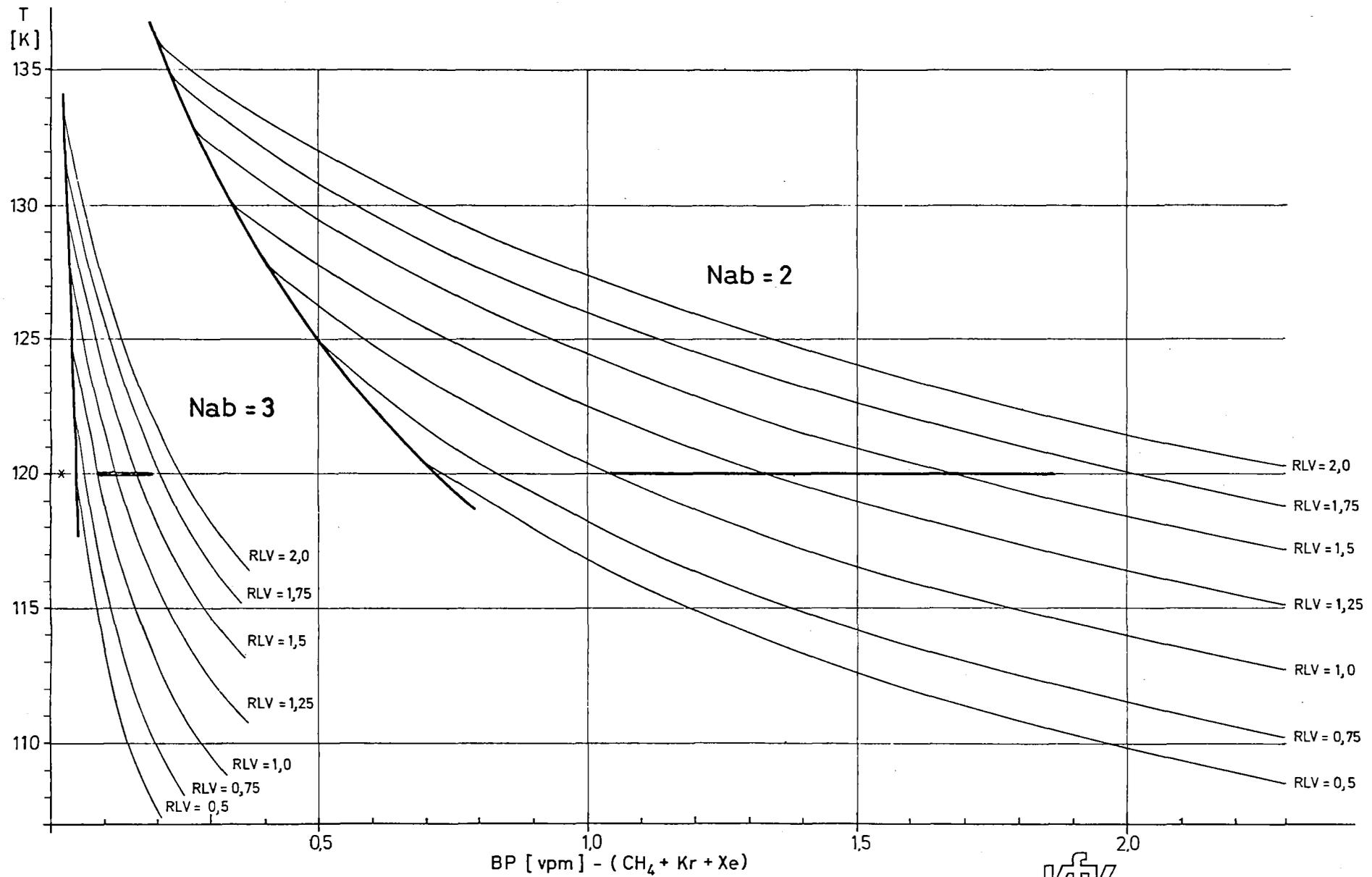
D (Destillat) strömt als Kopfprodukt oben aus der Trennsäule.
L (Liquid) ist der im Kondensator niedergeschlagene und auf den obersten Boden rektifizierte Flüssigkeitsstrom.

Der Wert $L=0$, Kennzeichen der Destillation, läßt sich in einer Rektifizierkolonne nicht verwirklichen, jedoch der Wert $D=0$. Dann erhält man kein Produkt, die Trennsäule befindet sich im Leerlauf. Bei $L=0$ ist auch RLV gleich Null, bei $D=0$ wächst RLV über alle Grenzen. Hohe Rücklaufverhältnisse z.B. $RLV=200$ werden praktisch ausgeführt.

Das Anfahren einer Trennsäule ist im Leerlauf möglich.

Ein Vorschlag ist folgender. Man verwendet inaktives Krypton mit Xenon, verdrängt danach mit Stickstoff das überschüssige Krypton. Die im Sumpf abgezogene Kr-Xe-Mischung wird in eine Anfahrflasche zurückgespeist.

Dieses Anfahren wurde von Herrn Prof. Vogelpohl vorgeschlagen.



- 10 -



TTR - Temperatur der Stufe über Feedeintritt als Funktion von BP.

Diagramm 1

TTR, Ein Diagramm zum Suchen des Betriebspunktes

Im Diagramm 1 eingezeichnet sind Kennlinienfelder. Das rechte gilt für eine wirksame Stufenzahl von zwei Stufen im Abtriebsteil, die links gezeichnete Kurvenschar für drei Stufen.

Aufgetragen sind die Temperaturen in der Flüssigkeit des Bodens über dem Feedeintritt, Abszisse ist das Sumpfabzugsverhältnis $BP=1E6 \times B/F$ (siehe Abb.1). Die Beschriftung der X-Achse beginnt bei den in den Sumpf gehenden Komponentenanteilen des Feed ($CH_4, Kr, Xe = 1 + 400 + 4000 = 4401$ vpm) mit Null. Aufgetragen ist damit die Verunreinigung im Sumpfprodukt.

Diese besteht aus den Komponenten des zweiten (oberen) Rektifikationsendpunktes, das sind Stickstoff, Argon, Sauerstoff. Jede Kurve gilt für das eingetragene Auslegungsrücklaufverhältnis RLV.

Nach rechts ist das Feld offen, links wird es abgeschlossen durch eine Grenzkurve.

Diese ist Abbild der Rektifikations-Scheidelinien oder Scheideflächen aus der Theorie der Rektifikation der Mehrstoffgemische. (Hausen/2/, Vogel(pohl/3/))

An dieser Grenzkurve beginnt die Rektifikation umzuschlagen, hier wandert Krypton zum zweiten Rektifikationsendpunkt, zum Kopfprodukt, die reine Abtrennung von Krypton-Xenon hört auf.

Bei Auslegung ist auf einen sicheren Abstand von diesen Grenzen zu achten. Die Auswirkungen der Zerfallswärme und der in die Säule eingestrahlten Verlustwärme verschieben das Kennlinienfeld. Dies ist mit der Funktion ΔTTR durch Setzen von

LG=1, LV=1 nachzurechnen. Man kommt dann zu dem Ergebnis, daß bei unserer Trennaufgabe das Rücklaufverhältnis nicht kleiner als $RLV = 1$ gesetzt werden kann.

Der Betriebsbereich im Diagramm

Für den Vorentwurf der Trennsäule sei ein Rücklaufverhältnis $RLV = 1.25$ als Betriebspunkt auf der Temperatur $T = 120\text{ K}$ angenommen. Der Betriebsbereich soll um 25 Prozent nach oben und unten gehen, die Temperatur $T = 120\text{ K}$ soll bleiben.

Damit ergibt sich: (APL-Schreibweise):

$$RLV \quad + \quad 1.25 \quad 1 \quad 0.75$$

wir erhalten

$$RLV \quad = \quad 1.00 \quad 1.25 \quad 1.67$$

für

$$\text{Einspeisung } F \quad = \quad 1.25 F \quad F \quad 0.75 F$$

denn hier gilt in guter Näherung $F = D$ (Feed = Kopfprodukt)

Es ist auch angenommen, daß der Rücklauf L und die Bodenwirkungsgrade konstant bleiben.

Im Diagramm sind jetzt die zugehörigen Werte von BP auf der Linie $T = 120\text{ K}$ abzulesen. Die Aufrufe

$$TX125 + TTR (BP, 1.00)$$

$$TX075 + TTR (BP, 1.67) \quad \text{liefere die gewünschten Ergebnisse in Form einer Tabelle}$$

Im Diagramm 1 ist der so berechnete Betriebsbereich eingezeichnet.

ERGEBNISTABELLE TRENNSAEULENRECHNUNG ATTR

23.12.80 *12.46

STUFE NR.	TEMP T (K)	DAMPFSTRM V (NLTR/H)	FLUESSTRM L (NLTR/H)	BODENINH. (NLTR/STF)	ZERF.WRME (WATT)	VERL.WRME (WATT)	AKTIVIT. (CI)
1	96.5	99560	124450	500	.0	.0	0
2	96.7	224009	123804	1000	.0	.0	0
3	96.9	223364	122998	1000	.0	.0	0
4	97.1	222558	122046	1000	.0	.0	0
5	97.4	221606	120984	1000	.0	.0	0
6	97.8	220544	119860	1000	.0	.0	0
7	98.1	219420	118739	1000	.0	.0	0
8	98.5	218299	117677	1000	.0	.0	4
9	98.8	217237	116296	1000	.2	.0	105
10	99.4	215856	108041	1000	4.3	.0	2350
11	104.1	207601	74501	1000	54.9	.0	30214
->12	120.4	174060	53561	1000	132.5	.0	72970
IF13	157.3	53121	46169	1000	87.1	.0	47959
14	189.6	45729	440	5000	85.6	.0	47113

KOMP NAME	FEED (NLTR/H)	FEED VPM	KOPFPRD (NLTR/H)	KOPFPRD VPM	SUMPFPRD (NLTR/H)	SUMPFPRD VPM
N2	98559	985589	98559	989947	0	134
AR	1000	10000	1000	10043	0	165
O2	1	10	1	10	0	8
CH4	0	1	0	0	0	227
NO	0	0	0	0	0	0
KR	40	400	0	0	40	90861
O3	0	0	0	0	0	0
XE	400	4000	0	0	400	908606

SUMME 100000 1000000 99560 1000000 440 1000000
 FLUESSIGKEITSANTEILE (VPM)

NR	XC(;N2)	XC(;AR)	XC(;O2)	XC(;CH4)	XC(;NO)	XC(;KR)	XC(;O3)	XC(;XE)
1	975290	24677	32	0	0	0	0	0
2	955879	44050	71	0	0	0	0	0
3	931054	68810	136	0	0	0	0	0
4	900678	99079	242	0	0	0	0	0
5	865441	134150	409	0	0	0	0	0
6	826957	172386	657	0	0	0	0	0
7	787535	211450	1013	0	0	2	0	0
8	749645	248807	1501	5	0	42	0	0
9	714776	282012	2146	52	0	1014	0	0
10	671634	302297	2902	508	0	22659	0	1
11	482689	219682	2620	3026	0	291353	0	631
12	181337	48351	690	3927	0	703643	0	62052
13	8916	4727	104	1641	0	462461	0	522151
14	134	165	8	227	0	90861	0	908606

INVENLTJ 8564.85 1848.96 12.55 10.30 .00 1935.48 .00 5127.86

KOPFPR. 11900.9 KONDENS. 7184.5 SUMPFPR. 28.5 REBOIL. 6245.2 FEED 10990.1 ZERFALL .0 VERLUST .0 Δ(WATT) .0

RLV 1.25 RP 4402.3500 EP 5E-04 TF 125 PB 6 IF 13 BV 0 NAB 2 NIT 8

TABELLE 1, TTR1, AUSLEGUNG 1.TRENNSAEULE

Das Buch 91812 TTR wurde erstellt und wird verwaltet von
Hauß KfK-Tel.3051.

ERGEBNISTABELLE TRENNSAEULENRECHNUNG ATTR

23.12.80 *12.59

STUFE NR.	TEMP T (K)	DAMPFSTRM V (NLTR/H)	FLUESSTRM L (NLTR/H)	BODENINH. (NLTR/STF)	ZERF. WRME (WATT)	VERL. WRME (WATT)	AKTIVIT. (CI)
1	96.5	99560	199120	500	.0	.0	0
2	96.7	298680	197889	1000	.0	.0	0
3	97.0	297449	196090	1000	.0	.0	0
4	97.4	295650	193659	1000	.0	.0	0
5	98.0	293219	190690	1000	.0	.0	2
6	98.7	290250	187133	1000	.1	.0	52
7	99.7	286693	177014	1000	2.5	.0	1359
8	103.6	276574	131536	1000	41.0	.0	22565
-> 9	119.8	231096	96952	1000	137.0	.0	75461
IF10	143.1	96512	100940	1000	179.5	.0	98841
11	149.2	100500	97162	1000	171.3	.0	94352
12	162.8	96722	79677	1000	88.4	.0	48680
13	189.9	79237	75594	1000	17.1	.0	9425
NW14	201.5	75154	440	5000	11.7	.0	6417

KOMP NAME	FEED (NLTR/H)	FEED VPM	17500 KOPFPRD (NLTR/H)	648.6 KOPFPRD VPM	0 SUMPFPRD (NLTR/H)	357154 SUMPFPRD VPM
N2	98559	985589	98559	989946	0	1
AR	1000	10000	1000	10044	0	5
O2	1	10	1	10	0	0
CH4	0	1	0	0	0	227
NO	0	0	0	0	0	0
KR	40	400	0	0	40	90888
O3	0	0	0	0	0	0
XE	400	4000	0	0	400	908879

SUMME 100000 1000000 99560 1000000 440 1000000
 FLUESSIGKEITSAANTEILE (VPM)

NR	XC(;N2)	XC(;AR)	XC(;O2)	XC(;CH4)	XC(;NO)	XC(;KR)	XC(;O3)	XC(;XE)
1	975289	24679	32	0	0	0	0	0
2	952055	47866	79	0	0	0	0	0
3	916826	83002	172	0	0	0	0	0
4	866803	132849	348	0	0	1	0	0
5	801905	197417	656	5	0	17	0	0
6	726394	271888	1152	68	0	498	0	0
7	641772	342499	1849	779	0	13101	0	0
8	462330	311972	2124	5956	0	217586	0	32
9	165810	90635	764	10662	0	727663	0	4468
10	14158	15142	176	8442	0	953114	0	8968
11	946	1984	33	4984	0	909825	0	82228
12	38	159	4	1664	0	469412	0	528723
13	1	5	0	227	0	90888	0	908879
14	0	0	0	23	0	12376	0	987601

INVENLTJ 6036.68 1507.76 7.37 32.90 .00 3443.99 .00 6471.30

KOPFPR. 11900.9
 KONDENS. 11495.2
 SUMPFPR. 33.4
 REBOIL. 10617.7
 FEED 10990.1
 ZERFALL .0
 VERLUST .0
 Δ(WATT) .0

RLV 2.00 BP 4401.0280 EP 2E-04 TF 125 PB 6 IF 10 BV 1 NAB 4 NIT 6

TABELLE 2, TTR1, 4 WIRKSAME STUFEN IM ABTRIEBSTEIL

ERGEBNISTABELLE TRENNSAEULENRECHNUNG ATTR

23.12.80 *12.58

STUFE NR.	TEMP T (K)	DAMPFSTRM V (NLTR/H)	FLUESSTRM L (NLTR/H)	BODENINH. (NLTR/STF)	ZERF.WRME (WATT)	VERL.WRME (WATT)	AKTIVIT. (CI)
1	96.5	99560	99560	500	.0	.0	0
2	96.6	199120	99093	1000	.0	.0	0
3	96.8	198653	98564	1000	.0	.0	0
4	97.0	198124	97984	1000	.0	.0	0
5	97.2	197544	97344	1000	.0	.0	6
6	97.5	196904	95998	1000	.3	.0	158
7	98.2	195557	85237	1000	6.8	.0	3741
8	104.7	184797	54530	1000	72.0	.0	39671
-> 9	120.3	154090	43533	1000	144.4	.0	79521
IF10	144.1	43093	46280	1000	180.5	.0	99387
11	149.5	45840	44472	1000	170.6	.0	93942
12	163.0	44032	36525	1000	87.9	.0	48427
13	189.9	36085	34674	1000	17.1	.0	9425
NW14	201.5	34234	440	5000	11.7	.0	6417

KOMP NAME	FEED (NLTR/H)	FEED VPM	KOPFPRD (NLTR/H)	KOPFPRD VPM	SUMPFPRD (NLTR/H)	SUMPFPRD VPM
N2	98559	985589	98559	989946	0	1
AR	1000	10000	1000	10044	0	1
O2	1	10	1	10	0	0
CH4	0	1	0	0	0	227
NO	0	0	0	0	0	0
KR	40	400	0	0	40	90888
O3	0	0	0	0	0	0
XE	400	4000	0	0	400	908883

SUMME 100000 1000000 99560 1000000 440 1000000
 FLUESSIGKEITSANTEILE (VPM)

NR	XC(;N2)	XC(;AR)	XC(;O2)	XC(;CH4)	XC(;NO)	XC(;KR)	XC(;O3)	XC(;XE)
1	975289	24679	32	0	0	0	0	0
2	957793	42139	67	0	0	0	0	0
3	937540	62339	121	0	0	0	0	0
4	914900	84896	200	2	0	2	0	0
5	890496	109112	315	19	0	59	0	0
6	864000	133791	476	207	0	1526	0	0
7	809848	151318	663	2095	0	36077	0	0
8	509436	97025	512	10371	0	382537	0	119
9	192347	19799	115	11160	0	766806	0	9773
10	15870	3196	26	8467	0	958371	0	14070
11	1053	416	5	4957	0	905870	0	87699
12	42	33	1	1655	0	466977	0	531292
13	1	1	0	227	0	90888	0	908883
14	0	0	0	23	0	12376	0	987601

INVCNLTI 6580.97 716.41 2.52 39.27 .00 3671.00 .00 6489.84

KOPFPR.	KONDENS.	SUMPFPR.	REBOIL.	FEED	ZERFALL	VERLUST	A(WATT)
11900.9	5747.6	33.4	4870.2	10990.1	.0	.0	.0

RLV	BP	EP	TF	PB	IF	BV	NAB	NIT
1.00	4401.0080	6E-04	125	6	10	1	4	4

TABELLE 3, TTR1, 4 WIRKSAME STUFEN IM ABTRIEBSTEIL

Das Kennlinienfeld für 4 wirksame Stufen im Abtriebsteil

Das Diagramm hat Kennlinienfelder für 2 und 3 wirksame Stufen im Abtriebsteil. Mit Setzen des Auslegungsparameters IF nach der Formel:

$$IF = 1 + N - NA + BV ;$$
$$IF = 1 + 14 - 4 + 1$$

ergibt sich $IF=10$.

N Stufenzahl der Trennsäule
NA Stufenzahl im Abtriebsteil
BV 0/1 flüssig/gasf. Sumpfabzug

Die Stufen 10 bis 13 sind damit wirksame Stufen des Abtriebsteiles, 14 ist der Sumpf, bei Sumpfabzug in der Gasphase (BV=1) ist diese Stufe nicht wirksam.

Am Terminal praktisch ausgeführt:

IF=10 In den von dieser Stufe wegströmenden Mengenstrom (hier gasförmig) addiert sich der Feed. Dieser Strom geht in die nächste (hier darüberliegende) Stufe der Säule.

Erweiterung des Diagrammes

Der Feedeintritt liegt unter der 9. Stufe. Anzahl der Stufen des Abtriebsteiles ist 4.

Durch vorhergehendes Probieren wurden BP für RLV = 2 und RLV = 1 bei 120 K ermittelt. Die Funktion wird aufgerufen, die Tabelle beschriftet

TX4R2←TTR(4401.05,2)

TEXT:TABELLE 2, TTR1, 4 WIRKSAME STUFEN IM ABTRIEBSTEIL

TX4R1←TTR(4401.03,1)

TEXT:TABELLE 3, TTR1, 4 WIRKSAME STUFEN IM ABTRIEBSTEIL

Die Tabellen sind auf den vorherigen Seiten ausgedruckt, die Punkte als Kreuz im Diagramm 1 eingezeichnet.

Das Kennlinienfeld rückt immer enger an die Ordinatenachse,
es quetscht sich zusammen.

Aus dem Diagramm 1 ist ersichtlich, daß mit zwei wirksamen
Stufen im Abtriebsteil ($N_{ab}=2$) ausreichende Produktreinheit
im Sumpf erreicht wird. 1 - 1.5 vpm vom Feed sind Anteile der
Komponenten N_2 , Ar, O₂ im Sumpfprodukt.

Kondensatorleistung aus dem Rücklaufverhältnis



Die unterstrichenen Buchstaben kennzeichnen hier immer einen Wärmefluß.

KONDENSER



\underline{D} [J/s] Wärmefluß (Leistung) abgeführt im Destillat (Kopf)

\underline{Q} Kondensatorleistung.

\underline{V} Dampf aus der 2. Stufe (in den Kondensator)

\underline{L} Flüssigkeit in die 2. Stufe (vom Kondensator)

D, V, L [Mol/s] Namen der entsprechenden Mengenströme

v, d, l [J/Mol] Namen der entsprechenden Enthalpien

Δd [J/Mol] Enthalpiedifferenz $d-l \iff v-l$

r Rücklaufverhältnis L/D oder auch RLV

$\underline{Q} \leftarrow \underline{V} - \underline{D} - \underline{L}$ Wärmebilanz Kondenser

$\underline{Q} \leftarrow D(1+r)v - Dd - rDl$ Mengen, r eingesetzt

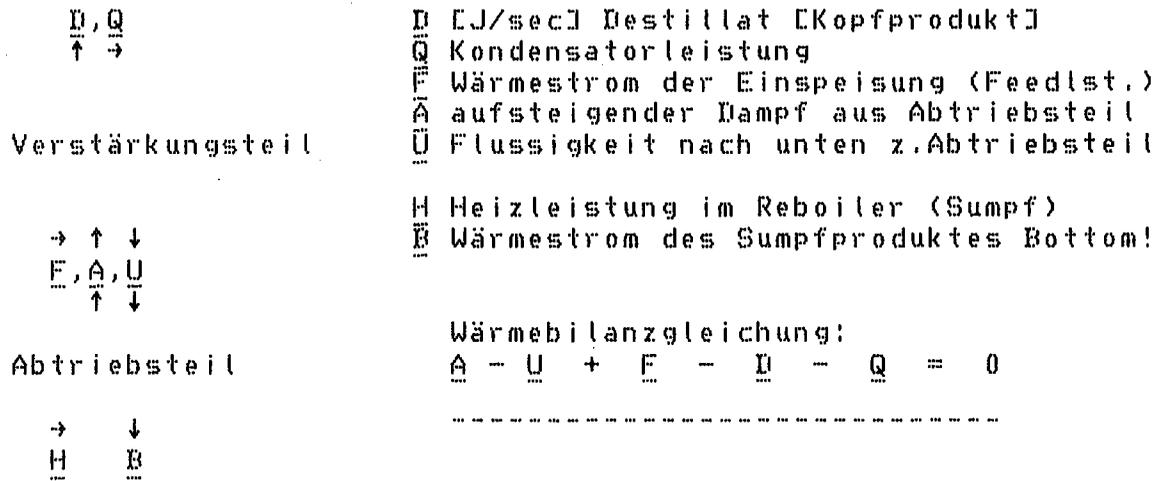
$\underline{Q} \leftarrow D(v + rv - d - rl)$ Trennaufgabe: $v \iff d$

$\underline{Q} \leftarrow Dr(v-l)$

$$\underline{Q} \leftarrow D \times r \times \Delta d$$

Leistung Kondenser

Wärmebilanz um den Verstärkungsteil



Nach oben gehen an Wärmeleistung: Kopfprodukt, Kondensator
 Von unten kommen Feed, Dampf vom Abtriebsteil, es geht ab die Flüssigkeit vom Verstärkungsteil. In die Wärmebilanz gehen ein, die damit verknüpften Wärmeströme.

Die Kondensatorleistung \underline{Q} ist mit keinem Mengenstrom behaftet, \underline{Q} berechnet sich aus: $\underline{Q} = D \cdot r \cdot \Delta t$. Da nun Feedstrom \underline{F} und Kopfprodukt \underline{D} bei unserer Trennaufgabe etwa gleichgroß sind, sind der aufsteigende Dampf aus dem Abtriebsteil \underline{A} und die abfließende Flüssigkeit aus dem Verstärkungsteil ebenfalls etwa gleichgroß.

Umlauf im Abtriebsteil

$$Aa - Uu + Ff - Dd - D_{rx} \Delta d = 0$$

A [Mol/sec] Dampf aus Abtriebs- in den Verstärkungsteil

a [kJ/Mol] Enthalpie dieses Stromes

U [Mol/sec] Flüssigkeit vom Verstärkungsteil in den Abtriebsteil

u [kJ/Mol] Enthalpie der Flüssigkeit

F [Mol/sec] Feed

f [kJ/Mol] Enthalpie des Feed

D [Mol/sec] Destillat, Kopfprodukt

d [kJ/Mol] Enthalpie des Kopfproduktes

$D_{rx} \Delta d$ Kondensatorleistung

Mit folgenden Vereinfachungen:

$$F = D \quad \text{sowie} \quad A = U$$

und in abgekürzter Schreibweise:

$$\Delta u \leftarrow a - u \quad \text{sowie} \quad \Delta f \leftarrow f - d$$

ergibt sich:

$$A \Delta u + D \Delta d - D_{rx} \Delta d = 0$$

$$U \Delta u + F \Delta d - F_{rx} \Delta d = 0$$

$$U/F = r \Delta d / \Delta u - \Delta f / \Delta u$$

Hieraus ist ersichtlich, daß nicht nur im Verstärkungsteil, sondern auch im Abtriebsteil der Umlauf mit steigendem RLV wächst.

Der Minderungsfaktor für den Umlauf im Abtriebsteil

$$U/D = r \Delta d/\Delta u - \Delta f/\Delta u$$

Da die Quotienten in erster Näherung konstant sind,
(Trennaufgabe: Temperatur Feedstufe = 120 K), muß das Rück-
laufverhältnis bei steigendem Feedstrom ($F \Leftrightarrow D$) fallen. Der
kritische Punkt ist wegen der Scheidelinie der Überlastpunkt
der Trennsäule.

Mit $r = L/D$ ergibt sich:

$$U = L \Delta d/\Delta u - F \Delta f/\Delta u$$

$$U = L \times k_1 - F \times k_2$$

Die Zahlenwerte für die gegebene Trennaufgabe eingesetzt:

$$\Delta d = 51 \text{ kcal/Ncbm} \quad \text{Verdampfungsenthalpie Destillat (N2)}$$

$$\Delta u = 92 \text{ kcal/Ncbm} \quad \text{Verdampfungsenthalpie Krypton (70 Prz)}$$

$$\Delta f = 9.6 \text{ kcal/Ncbm} \quad \text{Enthalpiedifferenz Feed-Destillat}$$

$\Delta f = \Delta T \times c_p = (125 - 95) \times 0.32 = 9.6$

$$k_1 = 0.551$$

$$k_2 = 0.104$$

Entsprechend der Gleichung für U wird der Umlauf im Abtriebs-
teil erheblich kleiner als der Umlauf im Verstärkungsteil.

Dies ist eine Folge von Verdampfung von Flüssigkeit im
Oberteil der Trennsäule.

Das Verhältnis der Mengenströme $U/L = m$ wird als Minderungs-
faktor bezeichnet. Es läßt sich ausdrücken:

$$\begin{aligned} m &= U/L = \Delta d/\Delta u - 1/r \Delta f/\Delta u \\ m &= k_1 - 1/r k_2 \\ m &= 0.551 - 0.104/r \end{aligned}$$

Aus dieser Formel ist ersichtlich, daß diese Trennaufgabe

ein möglichst großes RLV erfordert, auf jeden Fall: $RLV \geq 1$.

Dies steht im Widerspruch zur Forderung: Inventar der Trennsäule möglichst klein, denn ein großer Umlauf im Abtriebsteil erfordert auch entsprechende Querschnitte.

Die in den Abtriebsteil zurückfließende Menge beträgt nur ca. 50 Prozent der Rücklaufmenge am Kopf der Säule. Im Abtriebsteil müssen innerhalb von 2 Stufen der Stickstoff abgetrieben, und eine Temperaturdifferenz von ca. 70 K überbrückt werden.

Im Abtriebsteil wird der Unterschied der Trennwirksamkeit eines praktischen Bodens zur theoretischen Stufe, das ist der Austauschgrad in unserem Fall kleiner werden als sonst üblich.

Aus diesen Gründen ist für diese Trennaufgabe der Einsatz von Böden mit gutem Austauschgrad und ausreichender Umlauf im Abtriebsteil wichtig, das Inventar und damit die Aktivität in der 1. Trennsäule müssen diesen Forderungen angepaßt werden.

Bei üblicher Trennung, d.h. ohne Anheben der Temperatur über der Feedstufe, ist $A_d = A_u$, daraus folgt: $k_1 = 1$.

Wird nun noch die Temperatur des eintretenden Feed am zugehörigen Siedepunkt gehalten, so wird Δ_f klein. Es ergibt sich: $m = U/L = 1$, also keine Minderung des Flüssigkeitsstromes im Abtriebsteil gegenüber dem Verstärkungsteil.

An diesem Faktor ($m = 0.45$!) ist der A u s n a h m e f a l l dieser Trennaufgabe erkennbar.

ERGEBNISTABELLE TRENNSAEULENRECHNUNG ATTR

23.12.80 *14.07

STUFE NR.	TEMP T (K)	DAMPFSTRM V (NLTR/H)	FLUESSTRM L (NLTR/H)	BODENINH. (NLTR/STF)	ZERF. WRME (WATT)	VERL. WRME (WATT)	AKTIVIT. (CI)
1	94.1	39824	29868	1100	.0	15.0	0
2	94.3	69692	29491	2200	.0	15.0	0
3	94.4	69315	29117	2200	.0	15.0	0
4	94.5	68941	28750	2200	.0	15.0	0
5	94.6	68574	28392	2200	.0	15.0	3
6	94.8	68216	27991	2200	.1	15.0	82
7	95.0	67815	26560	2200	3.7	15.0	2023
8	97.2	66384	19232	2200	66.1	15.0	36423
9	109.2	59056	12357	2200	263.8	15.0	145290
->10	119.6	52181	9086	2200	310.8	15.0	171132
IF11	154.4	8910	7915	2200	196.0	15.0	107911
12	185.0	7739	176	11000	188.3	15.0	103666

KOMP NAME	FEED (NLTR/H)	FEED VPM	KOPFPRD (NLTR/H)	KOPFPRD VPM	SUMPFPRD (NLTR/H)	SUMPFPRD VPM
N2	39424	985589	39424	989946	0	117
AR	400	10000	400	10044	0	19
O2	0	10	0	10	0	0
CH4	0	1	0	0	0	227
NO	0	0	0	0	0	0
KR	16	400	0	0	16	90876
O3	0	0	0	0	0	0
XE	160	4000	0	0	160	908760

SUMME 40000 1000000 39824 1000000 176 1000000
 FLUESSIGKEITSANTEILE (VPM)

NR	XC(;N2)	XC(;AR)	XC(;O2)	XC(;CH4)	XC(;NO)	XC(;KR)	XC(;O3)	XC(;XE)
1	974632	25335	34	0	0	0	0	0
2	958547	41386	66	0	0	0	0	0
3	942270	57620	111	0	0	0	0	0
4	926404	73426	169	0	0	1	0	0
5	911491	88246	244	4	0	14	0	0
6	897671	101587	338	46	0	359	0	0
7	878265	111963	449	458	0	8865	0	0
8	738291	98107	467	3484	0	159645	0	5
9	324240	30546	158	6806	0	636821	0	1428
10	168626	6259	24	4284	0	750090	0	70717
11	7803	572	3	1703	0	472988	0	516931
12	117	19	0	227	0	90876	0	908760

INVINLTJ15931.32 1369.45 4.50 39.43 .00 5462.96 .0011292.34

KOPFPR. 4794.3 KONDENS. 1785.2 SUMPFPR. 12.0 REBOIL. 1051.1 FEED 4252.2 ZERFALL .0 VERLUST 180.0 Δ(WATT) .0

RLV .75 BP 4401.6000 EP BE-04 TF 135 PB 5 IF 11 BV 0 NAB 2 NIT 7

TABELLE 4, EXPMT, 2 STUFEN IM ABTRIEBSTEIL

Rechnungen zum Experiment

Mit Hilfe der Trennsäulenfunktion wurden begleitende Rechnungen für ein Experiment durchgeführt.

Um die Auslegungsparameter (N, IF, BV, LG, LV u.a.) anpassen zu können, wurde das Buch TTR nach der Methode der 'Strukturierten Programmierung' gestaltet.

Die Abbildung von Kreta erfolgt mit einer Eingabefunktion, es folgt der Prolog, hier werden Eingabedimensionen in Rechen-dimensionen umgerechnet und Anfangswerte vorgegeben.

Die Rechnung erfolgt in der globalen Funktion (z.Zt ATTR).

Im Epilog erfolgt die Aufbereitung, die Formatierung der Ergebnisse in eine Ausgabetablelle.

Die Funktionen für Stoffdaten, Zerfall, Enthalpien, Verluste behandeln unabhängig von der Hauptfunktion ihre Aufgabe.

Sie haben keine Globalen mit der Hauptfunktion, sie werden von der Hauptfunktion mit den jeweils gültigen Parametern aufgerufen.

Der Rechenablauf ist folgender:

TTRK40	Aufruf der Eingabe (40 cbm)
TTRPRL	Prolog
ATTR	Aufruf der Trennsäulenfunktion ATTR
TEXT:TABELLE 4, EXPMT, 3 STUFEN IM ABTRIEBSTEIL	
T402+TTREPI	Berechnung der Ausgabe, Eintrag unter dem Namen T402 (cbm=40, Nabtriebst.=2) in das offene Buch
T402	Ausgabe der Ergebnisse

Die links aufgeführten Aufrufe sind zu machen. Bei Änderung

z.B. der wirksamen Stufenzahl im Abtriebsteil auf drei Stufen ist IF zu ändern. Aufrufe:

IF←9

BP←4001.0xx

TTRPRL

ATTR

TEXT←TABELLE 5, EXPMT, 3 STUFEN IM ABTRIEBSTEIL

T403←TTREPI

Die entsprechenden BP Werte müssen bekannt sein oder durch Probieren gefunden werden. Die Temperatur über dem Feed-eintritt soll 120 K betragen.

Die Rechnungen sind aus der Tabelle 4 (NA=2 Stufen) und Tabelle 5 (NA=3 Stufen) ersichtlich.

ERGEBNISTABELLE TRENNSAEULENRECHNUNG ATTR

23.12.80 *14.08

STUFE NR.	TEMP T (K)	DAMPFSTRM V (NLTR/H)	FLUESSTRM L (NLTR/H)	BODENINH. (NLTR/STF)	ZERF.WRME (WATT)	VERL.WRME (WATT)	AKTIVIT. (CI)
1	94.1	39824	29868	1100	.0	15.0	0
2	94.3	69692	29491	2200	.0	15.0	0
3	94.4	69315	29117	2200	.0	15.0	0
4	94.5	68941	28747	2200	.0	15.0	4
5	94.6	68571	28317	2200	.2	15.0	101
6	94.9	68141	26601	2200	4.6	15.0	2536
7	97.7	66425	18620	2200	78.7	15.0	43317
8	110.4	58444	12467	2200	274.1	15.0	150941
-> 9	119.4	52290	9681	2200	330.2	15.0	181854
IF10	142.8	9505	9729	2200	371.5	15.0	204583
11	158.2	9553	8052	2200	197.4	15.0	108678
12	185.2	7876	176	11000	188.3	15.0	103679

KOMP NAME	FEED (NLTR/H)	FEED VPM	KOPFPRD (NLTR/H)	KOPFPRD VPM	SUMPFPRD (NLTR/H)	SUMPFPRD VPM
N2	39424	985589	39424	989946	0	7
AR	400	10000	400	10044	0	2
O2	0	10	0	10	0	0
CH4	0	1	0	0	0	227
NO	0	0	0	0	0	0
KR	16	400	0	0	16	90888
O3	0	0	0	0	0	0
XE	160	4000	0	0	160	908876

SUMME 40000 1000000 39824 1000000 176 1000000

NR	XC(;N2)	XC(;AR)	XC(;O2)	XC(;CH4)	XC(;NO)	XC(;KR)	XC(;O3)	XC(;XE)
1	974632	25335	34	0	0	0	0	0
2	958547	41387	66	0	0	0	0	0
3	942268	57620	111	1	0	1	0	0
4	926381	73425	169	9	0	17	0	0
5	911033	88190	244	90	0	443	0	0
6	887524	100107	333	922	0	11114	0	0
7	717320	85779	338	6698	0	189864	0	2
8	301377	24961	105	11568	0	661592	0	397
9	169387	5785	18	7435	0	797088	0	20286
10	12382	828	3	5055	0	896710	0	85022
11	495	66	0	1713	0	476347	0	521378
12	7	2	0	227	0	90888	0	908876

INVENLT113890.95 1079.82 3.09 76.18 .00 7672.75 .0011377.22

KOPFPR.	KONDENS.	SUMPFPR.	REBOIL.	FEED	ZERFALL	VERLUST	Δ(WATT)
4794.3	1785.2	12.0	1051.2	4252.2	.0	180.0	.0

RLV	BP	EP	TF	PB	IF	BV	NAB	NIT
.75	4401.0420	9E-04	135	5	10	0	3	8

TABELLE 5, EXPMT, 3 STUFEN IM ABTRIEBSTEIL

Messungen

Aus Diagramm 1 ist ersichtlich, daß die Rechnung in Kaskaden erfolgt, sie hat digitale Eigenschaften mit dem Merkmal ganzzahliger Stufenzahlen.

Die praktische Bodenzahl ist immer ein Vielfaches der theoretischen Stufenzahl. Die praktische Säule kann zwischen den theoretischen Säulen mit ganzzahligen Stufenzahlen liegen, sie hat dann eine Stufenzahl von z.B. 2.25 .

Die Einspeisung erfolgt immer in den Dampf- oder Flüssigkeitsstrom der mit IF bezeichneten Stufe.

Der Feedeintritt liegt auch bei der praktischen Säule zwischen Böden, die zu verschiedenen theor. Stufen der Rechnung gehören, andere Betrachtungsweisen kommen in der Fachliteratur vor.

Der Feed tritt gasförmig ein, er strömt in die erste Stufe des Verstärkungsteiles von unten ein. Dieser Boden hat ein durch die Randbedingung festgelegte konstante Temperatur (120 K).

Wir bilden deshalb die Kaskaden auf den jeweils untersten Boden einer praktischen Stufe ab, d.h.

Der Boden über dem Feedeintritt ist unterster Boden der zugehörigen praktischen Stufe, er repräsentiert die Temperatur der zugeordneten Kaskade der Rechnung.

Der Sumpf ist unterster Boden der zugehörigen Stufe.

Bei gasf. Sumpfabzug wird über dem obersten Boden der letzten Stufe abgezogen, diese Stufe ist für die Trennung nicht wirksam. Der über dem Sumpfabzug liegende Boden ist unterster Boden der zugehörigen Stufe. Die Zusammensetzung der Flüssigkeit auf diesem Boden entspricht der Zusammensetzung des gasförmigen Abzuges.

Die Messungen an der Versuchsanlage ergaben für die Sumpfreinheit:

Einzelmessung am 30.6.80	N2 =	200 vpm	Ar =	20 vpm
Summenmessung	N2 =	60 - 80 vpm	Ar =	10 - 20 vpm

Die Abbildung mit Hilfe der Funktion ΔTTR ergaben:

2 Stufen im Abtriebsteil:	N2 =	117 vpm	Ar =	19 vpm
3 Stufen im Abtriebsteil:	N2 =	7 vpm	Ar =	2 vpm

Interpolationstabelle

NA [Stufen]	=	3.00	2.75	2.50	2.25	2.00
N2 [vpm]	=	8	15	29	58	117
Ar [vpm]	=	2	3.5	6	10.4	19

Die wirksame Stufenzahl liegt nach diesen Messungen bei 2.25 theor. Stufen. Diese werden verwirklicht durch 8 Sieböden und Sumpf. Bei späteren Messung erfolgte der Produktabzug unterhalb des 4. praktischen Boden vom Feed aus gerechnet. Die Produktreinheit lag in gleicher Größenordnung.

Die Abbildung theoretischer Stufen auf praktische Böden

Diese Arbeit befaßt sich mit der Ermittlung der theoretischen Stufenzahl einer Trennkolonne für die Abtrennung von Krypton und Xenon aus Stickstoff und Argon mit einigen Schwachkomponenten.

Hinsichtlich der Methoden für die Ermittlung der praktischen Stufen sei auf eine Arbeit von Wetzler /6/ hingewiesen.

Hier heißt es u.a. :

'Eine konkrete universelle, technisch-wissenschaftlich begründete Berechnungsmethode für die numerische Berechnung des Bodenwirkungsgrades ist bis heute weder für binäre, noch für Mehr- oder Vielstoffgemische bekannt.'

Diese Schwierigkeit wird meist durch die Annahme eines mittleren Bodenwirkungsgrades für die gesamte Säule umgangen. Wie in /6/ angegebenen, ist dies nur bei symmetrischer Feedeinspeisung halbwegs richtig. Bei unserer Trennaufgabe ist die Einspeisung weit unten, damit ist diese Methode nicht anwendbar.

Eine Grenzwertbetrachtung führt zu dem Schluß, daß bei geringer Temperaturdifferenz zwischen benachbarten theor. Stufen der zugehörige Übertragungsgrad (Wirkungsgrad !) groß wird ($\eta \rightarrow 1$), damit wird beim Gegenteil -grosse Temperaturdifferenzen benachbarter Stufen- der Übertragungsgrad klein. Dies ist im Abtriebsteil der Säule für die gestellte Trennaufgabe der Fall.

Diese Betrachtung gilt allgemein für jede Bodenart, das sind: Siebböden, Ventilböden oder Glockenböden.

Ein absoluter Vergleich solcher Bodenarten ist im Hinblick auf die genannten Schwierigkeiten wenig sinnvoll. Die relative Wirksamkeit verschiedener Bodenarten wurde von Hoppe /7/ angegeben. Hier zeigt sich, daß über einen Bereich betrachtet, der Glockenboden hinsichtlich Wirksamkeit und Austauschgrad Vorteile bringt.

In Bezug auf das Inventar, den Flüssigkeitsinhalt eines Bodens sind in der Literatur kaum Vergleichswerte zu finden, da eine Minimierung in dieser Hinsicht noch nicht erforderlich war.

Es ist aber leicht einzusehen, daß Bodenarten die durch Einbauten Flüssigkeit verdrängen, das Aktivitätsinventar mindern. Bei der Betrachtung hinsichtlich der Aktivitätsminderung sind folgende Einflüsse zu bewerten:

Einfluß	auf Aktivitätsminderung	
	Siebb.	Glockenb.
Rel. Austauschgrad	-	+
mögl. geom. Kleinheit	+	-
Verdrängungskörper	-	+
Blasenvolumen	-	+
Betriebsbereich	-	+

Bei der gestellten Trennaufgabe ist eine Überlegenheit des Glockenbodens gegenüber anderen Bodenarten zu erwarten.

Literaturverzeichnis

- [1] Die APL-Sprache, Handbuch
IBM-Form GC12-1328-1

- [2] Rektifikation idealer Dreistoffgemische
H.Hausen
Zeitschrift für angewandte Physik, Bd.4, Feb.1952, Heft 2
Seite 41/51

- [3] Rektifikation idealer Vielstoffgemische
A.Vogelpohl
Chemie-Ing. Technik, 42.Jahrgang 1970, Nr.22
Seite 1377/1382

- [4] Bumiller, Hutter, Unveröffentlichte Protokolle des KfK
1980/1981

- [5] Hauß, Unveröffentlicher Bericht des KfK,
1976

- [6] Methoden für die Berechnung der Stufenzahl für
Trennkolonnen
H.Wetzler
chemie- anlagen + verfahren
Oktober 1980, 17.Jahrgang 10/80
Seite 47/69, 118

- [7] Grundlagen der Dimensionierung von Kolonnenböden
Klaus Hoppe und Manfred Mittelstrass
Dresden 1967, Verlag Theodor Steinkopff

```

V TX←TTR BR
[1]  ATTR:CM←F(SUMPFABZUG,RUECKLAUFV.)
[2]  FUN←'TTR'
[3]  BP←BRC1]
[4]  RLV←BRC2]
[5]  TTRPRL
[6]  ATTR
[7]  'BITTE TABELLENBESCHRIFTUNG EINGEBEN'
[8]  TEXT←[]
[9]  TX←TTREPI
[10]  a23.12.80

```

```

V
V TTRINIT
[1]  aEINGABEWERTE UND UMRECHNUNGEN
[2]  a ZUR TRENNSAEULENFUNKTION ATTR
[3]  BP←4402.35
[4]  RLV←1.25
[5]  P←6
[6]  N←14
[7]  IF←13
[8]  CBM←100
[9]  CBML←0
[10] HUP←1000
[11] TF←125
[12] ZP←8ρ0
[13] ZN2←1000000
[14] ZAR←10000
[15] ZO2←10
[16] ZCH4←1
[17] ZNO←0
[18] ZKR←400
[19] ZO3←0
[20] ZXE←4000
[21] TU←95
[22] TO←185
[23] LG←0
[24] KR←6
[25] XE←8
[26] LV←0
[27] BV←0
[28] TOT←0
[29] E←0.001
[30] VWATT←0
[31] LI←1
[32] IA←1
[33] a-----
[34] a26.12.80

```

```

V
V TTRPRL
[1]  aEINGABEWERTE UND UMRECHNUNGEN
[2]  a ZUR TRENNSAEULENFUNKTION ATTR
[3]  aLI/'V←I←\0'
[4]  LI←0
[5]  ZP←ZN2,ZAR,ZO2,ZCH4,ZNO,ZKR,ZO3,ZXE
[6]  HFL←1↑,ΔHCL TF
[7]  FL←CBML×1000÷22.41
[8]  FV←CBM×1000÷22.41

```

```

E9J HFV+1↑,ΔHCV TF
E10J D←FV-FV×BP̄×1E-6
E11J BM←(HUP÷22.41)×105 0.5 , (N-2)ρ1
E12J T̄0←TU, TU+(N-1)×(T0-TU)÷N-1
E13J V̄0←D, ((IF-2)ρD×1+RLV), (N-IF-1)ρ(D×1+RLV)-FV
E14J T̄←((10.5×N)↑T, T0), (-10.5×N)↑T0, T̄
E15J V̄←Nρ(V, Nρ-1↑V̄+V̄, V0)
E16J V̄C1J←D̄
E17J Z̄P←(1000000-+ / 1↓ZP), 1↓ZP
E18J Z̄←ZP×1E-6
E19J a-----

```

E20J a26.12.80

V

V ATTR

```

E1J aTRENNSAEULE, KR85-ENTFERNUNG, →IT ARBEITSBERICHT 14/76
E2J FUN←'ATTR'
E3J NIT←0
E4J N←+ / ρV
E5J C←+ / ρZ̄
E6J L←(N↑1↓V)+(FV×IF≤1+N)+(FL×IF≤N)-V̄C1J
E7J IC←C+IIO
E8J M0:KC←T AKC P
E9J AC←((L+V)° . +Cρ0)÷KC
E10J ACEN; J←ACEN; J×(~BV̄)+BV×KCCN; J
E11J ACC1; J←ACC1; J×(~TOT)+TOT×KCC1; J
E12J V̄C←(N, 0)↑J←0
E13J M1:AA←(2-N)Φ(N, N)↑(0, -1↓ACC; J), (-ACC; , J←J+1J+1), N≠N
E14J VC←V̄C, I←((-IF-2)ΦN↑-(FV×Z̄CJ), FL×Z̄CJ)⊞AA
E15J →M1×J<C
E16J LC←AC×VC
E17J R←0
E18J M2:AG←+ / ((FV+FL)×Z×LCCN; J÷V̄C1; J)÷N×N←1+R×LCCN; J÷V̄C1; J
E19J R←R-AR←(V̄C1J)-+ / ((FV+FL)×Z÷N)÷AG
E20J →M2×E<110×AR÷R
E21J DC←((FV+FL)×Z÷1+R×LCCN; J÷V̄C1; J)÷V̄C1; J
E22J YC←VC×DC° . ÷VC+ . ×DC
E23J XC←LC×DC° . ÷LC+ . ×DC
E24J A←(T̄E1, N)×θ+ / KCC1, N; J÷C)⊞ 1 1 , 2 1 ρT̄C1, N
E25J →M3×10=BV
E26J XCEN; J←XCEN; J÷+ / XCEN; J←XCEN; J÷KCCN; J
E27J M3:AT←-T-T1←-AC1J÷AC2J-θK←÷+ / XC×ACB+KC÷(* (AC1J÷T)+AC2J)° . +Cρ0
E28J TΔ / T̄←T+ΔT̄×1L4÷NIT←NIT+1
E29J HV←+ / YC×ΔHCV T
E30J HL←+ / XC×ΔHCL T̄
E31J QD←V̄C1J×(RLV×HVC2J-HLC1J)+HVC2J-(TOT= 0 1) / HVC1J, HLC1J
E32J QD←QD+(1↑LG×QG←BM ΔQZF XCF; KRJ)+1↑QV←ΔQV LV
E33J C←(QD+(~TOT)×V̄C1J×1↑HV-HL)
E34J C←C, ((-2↓HL-1ΦHL)×V̄C1J-(FL+FV)×(IF-1)≤(N-2))
E35J C̄C1F-1J←C̄C1F-1J+FV×HLC1F-1J-HFV
E36J C̄C1FJ←C̄C1FJ+FL×HLC1F-1J-HFL
E37J C←C-(LG×-1↓QG)+LV×-1↓QV
E38J V1←V
E39J V←V̄C1J, C̄C(2-N-1)Φ(-1+N, N)↑(-0, -1↓H), E1.2J H←-1↓(1ΦHV)-HL
E40J L←(N↑1↓V)+(FV×IF≤1+N)+(FL×IF≤N)-V̄C1J
E41J →END×NIT=50
E42J →M0×E<Γ / ΔT÷T
E43J →M0×E<0.1×Γ / I(V1-V)÷V

```

[44] END:→0

[45] 29.12.80 HAUSS, KFK-IT, TEL.07247-823051

V

V T←TTREPI;A;B;A1;B1;B2;FO;INV;AQ;EP;NL;QV1;QKO;QFE;QSU;QBO;QVL;QGA

[1] ATTR: EPILOG UND PRINT: TX←CM←F(ATTR)

[2] T←(72↑'ERGEBNISTABELLE TRENNSAEULENRECHNUNG ',(20↑FUN),DTM,' ',AUF

[3] A←',STUFE, TEMP,DAMPFSTRM,FLUESSTRM,BODENINH.,ZERF.WRME,VERL.WRME

[4] B←',NR.,T(K),V(NLTR/H),L(NLTR/H),(NLTR/STF),(WATT),(WATT),(CI)'

[5] FO←6 0 8 1 10 0 10 0 10 0 10 1 10 1 10 0

[6] T←T,[1](FO ACK ACL A),[1](FO ACK ACL B),[0.5] '-'

[7] B←(N),T,(22.41×V,[1.1] L),(22.41×BM),(QV,[1.5] QV)÷3600,CI←2320

[8] B←FO↑B

[9] BC(IF- 1 0),N; 3 4]← 3 2 ρ'→IF',2↑BV/'NW'

[10] T←T,[1] B,[1] '-'

[11] T←T,[1] 1 72 ↑ 10 0 10 1 10 0 10 0 ρ(+ /BM×22.41),(+ /QV÷3600

[12] A←',FEED,FEED,KOPFPRD,KOPFPRD,SUMPFPRD,SUMPFPRD'

[13] B←',(NLTR/H),VPM,(NLTR/H),VPM,(NLTR/H),VPM'

[14] B1←22.41

[15] B2←(XCEN;]×~BV)+BV×YCCN;]

[16] FO←12ρ(10 0)

[17] A1←(B1×FV×Z),(Z×1000000),(B1×V[1]×YCC1;]),(1000000×YCC1;]),(B1×B2×

[18] A←(FO ACK ACL A),[1](FO ACK ACL B),[1] FO↑A1

[19] A←A,[1] '-',[0.5] FO↑+A1

[20] B←ACL ',KOMP,NAME',(,',',KOMP←ACL ',N2,AR,02,CH4,NO,KR,03,XE ')

[21] B←(1 1 0 ,10ρ1)× 12 72 ↑B,A

[22] BC3;]←'-'

[23] T←T,[1] B

[24] T←T,[1] 72↑' FLUESSIGKEITSANTEILE (VPM)'

[25] A←',NR,XC(;N2),XC(;AR),XC(;02),XC(;CH4),XC(;NO),XC(;KR),XC(;03),XC

[26] FO←8 0 ,(16ρ 8 0)

[27] T←T,[1](FO ACK ACL A),[1] '-',[1] FO↑(N),(XC×1000000)

[28] T←T,[1] '-'

[29] INV←(BM+.×XC)×22.41

[30] T←T,[1] 'INVENLT]', 8 2 ↑INV

[31] T←T,[1] '-'

[32] T←(1 1 × 0 80 [ρT)↑T

[33] QV1←V[1]×HVE[1]

[34] QKO←(LG×QGE[1])+(LV×QVE[1])+(V[2]×HVE[2])-QV1+L[1]×HLE[1]

[35] QFE←FV×HFV

[36] QSU←LEN]×(BV= 1 0)/HVEN],HLEN]

[37] QBO←(VEN]×HVEN])+(QSU-(LEN-1]×HLEN-1])+(LG×QGEN])+(LV×QVEN]

[38] QVL←+7QV

[39] QGA←+ /QV

[40] A←',KOPFPR.,KONDENS.,SUMPFPR.,REBOIL.,FEED,ZERFALL,VERLUST,Δ(WATT)

[41] B←((-QV1,QKO,QSU),QBO,QFE,(LG×QGA),(LV×QVL))÷3600

[42] AQ←(÷3600)×+ /(-QV1,QKO,QSU),QBO,QFE,(QGA×LG),QVL×LV

[43] B←B,AQ

[44] FO←16ρ 9 1

[45] A←(FO ACK ACL A),[1](FO↑B),[0.5] '-'

[46] EP←[/IAT÷T

[47] NAB←1+N-IF+BV

[48] NL←',RLV,BP,EP,TF,P,IF,BV,NAB,NIT'

[49] FO←8 2 12 4 8 1 4 0 4 0 4 0 4 0 4 0 6 0

[50] T←T,[1](2 80 ↑A),[1] '-'

[51] T←T,[1] 2 80 ↑(FO ACK ACL NL),[0.5](FO↑+NL)

[52] T←T,[1] '-'

[53] T←T,[1] 2 80 ↑TEXT,[0.5] '-'

[54] A27.12.80

V

V KC+T AKC P;K

[1] A GLEICHGEW.ZAHLEN KCCT;N2,AR,02,CH4,NO,KR,03,XE]

[2] A T [GRD K] ; P [BAR]

[3] K+4 0 p0

[4] N2:K+K, 634.3337 37.46311 -15.33647 0.0332183

[5] AR:K+K, 550.821 24.71871 -8.78494 0.017471

[6] O2:K+K, 408.74 7.86224 0 -0.0049832

[7] CH4:K+K, 443.1 6.853 0 0

[8] NO:K+K, 1014.2 21.996 -5.161 0

[9] KR:K+K, 710.0193 22.43901 -7.156931 0.01039974

[10] O3:K+K, 814.941587 8.25313 0 -0.001966943

[11] XE:K+K, 1040.76 26.08415 -8.25369 0.0085216

[12] KC+10*(K1;J+.÷T)+(K2;J+.÷T)+((10*1)+K3;J+.÷T)+K4;J+.÷T

[13] KC+KC÷P×750.06

[14] AA K-ZAHLEN: 1.LANDOLT-BOERNSTEIN

[15] AA T+96.3 108.39 111.95 138.48 139.38 148.23 193.11 203.71

[16] AA T+96.30 108.39 111.95 138.48 139.38 148.23 193.11 203.71

[17] AA T+10 5f(T),(T) AKC 6

[18] AA

[19] A20.08.79 AUS LANDOLT-BOERNSTEIN, 6.AUFL.,B.II/2A

[20] AERWEITERUNG UM ABLEITUNG

[21] DKC+(KC×10)×(K1;J+.÷T)+(((10*1)+K3;J+.÷T)+K4;J+.÷T)

[22] A26.12.80

V

V H+AHCL T

[1] A FLÜESSIGKEITSENTHALPIE N2,AR,02,CH4,KR,03,XE,NO

[2] A H [JOULE/MOL] ; T [GRD K]

[3] AA T+9 8 19 4p'T N2 AR 02 CH4 NO KR 03 XE

[4] AA T+96.3 108.39 111.95 138.48 139.38 148.23 193.11 203.71

[5] AA T+(8 2,(16p8 0))fT, AHCL T

[6] H+ 81 61 71 94 110 78 85 61

[7] H+(T.-273.15)×H

[8] A02.12.80 WERTE UNI CLAUSTHAL ITVT

V

V H+AHCV T

[1] A DAMPF-ENTHALPIE N2,AR,02,CH4,NO,KR,03,XE

[2] A H [JOULE/MOL] ; T [GRD K]

[3] AA T+9 8 19 4p'T N2 AR 02 CH4 NO KR 03 XE

[4] AA T+96.3 108.39 111.95 138.48 139.38 148.23 193.11 203.71

[5] AA T+(8 2,(16p8 0))fT, AHCV T

[6] AA T+AHCL

[7] AA T+(8 2,(16p8 0))f T,(AHCV T)-AHCL T

[8] H+ -4570 -1095 -840 -2230 -1510 1070 8220 8290

[9] H+ 29 21 29 30 29 21 32 21 ,[0.5] H

[10] H+(T.-,273.15)×H

[11] A02.12.80 WERTE UNI CLAUSTHAL ITVT

V

V QV+AQV LV

[1] AUMRECHNUNG VON WATT IN J÷H

[2] →0×10=V/QV+NpLV

[3] QV+Np3600×VWATT÷N

[4] A30.07.79

V

V QZ+BI AQZF XR

[1] A ZERFALLSLEISTUNG VON KR-85

[2] aBI [MOL] FLSSKTS-INVNTR DER THEOR STUFEN
[3] aXR KRYPTONANTEIL
[4] aQZ [J÷H] ZERFALLSLEISTUNG
[5] aa'FAKTOR=' , r3600×0.4×0.08×6.023E23×1.602E⁻¹³×0.67×2.04E⁻⁹
[6] a3600 [SEC÷H]
[7] a0.4 WAERMELEIST.ANTL (0.6 NEUTRINOS)
[8] a0.08 [KR-85÷KR] RADIOAKTIVER ANTEIL
[9] a6.023E23 [TEILE÷MOL]
[10] a1.602E⁻¹³ [J÷MEV]
[11] a0.67 [MEV÷ZERF]
[12] a2.04E⁻⁹ [1÷SEC] ZERFALL KR-85
[13] aFAKTOR=15193 [J÷(H×MOL)] KONSTANTE
[14] QZ+15193×BI×XR
[15] aa'WATT/MOL=' , r(+3600)×1 ΔQZF 1
[16] a26.07.79

v

TABELLE DER EINGABEVARIABLEN FUER TTRPRL

BP	[VPM]	4402.350	SUMPFABZUG
RLV	[]	1.25	RUECKLAUFVERHAELTNIS
P	[BAR]	6	SAEULENINNENDRUCK
N	[]	14	GESAMTSTUFENZAHL
IF	[]	13	STUFE UEBER/UNTER FEED
CBM	[CBM]	100	EINSPEISUNG DAMPFF.
CBML	[CBM]	0	EINSPEISUNG FLUESSIG
HUP	[NL]	1000	STUFENINVENTAR
TF	[K]	125	FEEDTEMPERATUR
ZN2	[VPM]	895985	N2-FEEDANTEIL
ZAR	[VPM]	10000	AR-FEEDANTEIL
ZO2	[VPM]	10	O2-FEEDANTEIL
ZCH4	[VPM]	1	CH4-FEEDANTEIL
ZNO	[VPM]	0	NO-FEEDANTEIL
ZKR	[VPM]	400	KR-FEEDANTEIL
ZO3	[VPM]	0	O3-FEEDANTEIL
ZXE	[VPM]	4000	XE-FEEDANTEIL
TU	[K]	95	KOPFTEMPERATUR DER SLE.
TO	[K]	185	SUMPFTEMPERATUR
LG	[]	0	SCHALTER 1/0 MIT/OHNE KR-ZERFALL
KR	[]	6	KOMPONENTENNR.KRYPTON
XE	[]	8	KOMPONENTENNR.XENON
LV	[]	0	SCHALTER 0/1 MIT/OHNE WAERMEVERLUST
BV	[]	0	SCHALTER 0/1 FLUESS./DAMPFF. SUMPFABZUG
TOT	[]	0	SCHALTER 0/1 TEIL/TOTAL -KONDENSATION
E	[]	0.001	REL.GENAUIGKEIT DER TEMPERATUR-ITERATION
VWATT	[WATT]	0	KAELTEVERLUST DER TRENNSAEULE
LI	[]	1	SCALTER 1/0 NEUE/KEINE VORGABE VON T UND V
TA	[]	1	TRACEVEKTOR 0/1 OHNE/MIT AUSGABE ZWISCHENTEMP.