Technische Universität Dresden
Fakultät für Maschinenwesen
Institut für Strömungsmechanik
Prof. Dr.-Ing. habil. Lindner

DIPLOMARBEIT D 1479

Analyse und Bewertung verschiedener Pumpgrenzkriterien für vielstufige Verdichter

von Axel Ebert, geb. am 26.08.65 in Königs Wusterhausen
Matrikel Nummer 1344220

Übersicht

Die Diplomarbeit wurde bei Siemens KWU durchgeführt. Sie stellt vier Kriterien vor, nach denen sich die Stabilitätsgrenze für vielstufige Axialverdichter ermitteln läßt. Als Auswertungshilfe wurde das Programm STAB geschrieben. Mit diesem läßt sich die Stabilitätsgrenze nach den einzelnen Modellen errechnen. Der Vergleich zwischen Rechnung und Messung zeigt, daß unter den gegebenen Bedingungen keines der neuen Modelle genauer ist, als das bei Siemens bislang eingesetzte Wirkungsgradkriterium. Die Arbeit ist in der leicht gekürzten Fassung, d.h. ohne Abbildung 8.2 und Abbildung 8.3, zur Veröffentlichung freigegeben.

Mülheim, 4. Juni 1992

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 5
2 Formelzeichen ... 6
3 Das Dynatech-Kennfeldrechenprogramm ... 7
4 Zur Instabilität von Verdichtern ... 10
5 Modelle zur Bestimmung der Stabilitätsgrenze von Axialverdichtern ... 11
5.1 Äquivalente Diffusionszahl nach Lieblein ... 11
5.2 Methode der radialen Stufenelemente nach Traupel ... 14
5.3 Diffusormodell von Koch ... 18
5.4 Vergleich der Modelle ... 24
6 Der Einfluß der Vielstufigkeit auf die Stabilitätsgrenze von Verdichtern ... 25
7 Erläuterungen zum Programm STAB zur Bestimmung der Stabilitätsgrenze ... 26
8 Vergleich gerechneter und gemessener Daten für ausgewählte vielstufige Axialverdichter ... 30
8.1 Versuchsverdichter VV94 ... 30
8.2 Verdichter Vx4.2 ... 32
8.3 Verdichter Vx4.3 ... 34
9 Zusammenfassung und Ausblick ... 36
10 Literatur und Quellennachweis ... 37
11 Anhang ... 38
11.1 Source Code Listing Programm STAB ... 38
11.2 Source Code Listing Prozedur PROC.STAB ... 51
11.3 Beispiel für eine Ergebnisdatei STAB.DTA ... 52
11.4 Iso-Plotts für Diffusionszahlen bei verschiedenen Betriebspunkten ... 54

Tabellenverzeichnis

Tabelle 8.1: Kritische Ebenen für den 4-stufigen Versuchsverdichter VV94 ... 31
Tabelle 8.2: Kritische Ebenen für den 17-stufigen Verdichter Vx4.2 ... 32
Tabelle 8.3: Kritische Ebenen für den 17-stufigen Verdichter Vx4.3 ... 34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Winkeldefinitionen für NACA 65 Profile am Beispiel eines Laufrades ... 8
Abbildung 5.1: Beispiel für den Verlauf der äquivalenten Diffusionszahl über dem Radius eines Leitrades 14
Abbildung 5.2: Kennlinien der einzelnen Stufenelemente und gesamte Stufencharakteristik von Axialverdichterstufen nach Traupel ... 15
Abbildung 5.3: Separate Kennlinien für eine untersuchte Verdichterstufe ... 16
Abbildung 5.4: Integrale Kennlinie für die untersuchte Verdichterstufe aus Abbildung 5.3 ... 17
Abbildung 5.5: Diffusor-Analogie für Verdichterschaufeln, Bild links aus [15] © ASME ... 18
Abbildung 5.6: Koch'sche Korrelation für die Stabilitätsgrenze [15] © ASME ... 19
Abbildung 5.7: Korrekturfunktion für die Reynoldszahl als Polynom 4. Grades ... 21
Abbildung 5.8: Korrekturfunktion für die Radialspiele als Polynom 4. Grades ... 21
Abbildung 5.9: Korrekturfunktion für die Axialspalte als Polynom 4. Grades ... 22
Abbildung 5.10: Vergleichsfunktion zur Abbildung 5.6 als Polynom 4. Grades ... 22
Abbildung 5.11: Korrekturfaktor F_{ef} für die kinetischen Energie [15] © ASME ... 23
Abbildung 8.1: 4-stufiger Verdichter VV94 mit 3,5° aufgedrehtem Vorleitrad ... 31
Abbildung 8.2: 17-stufiger Verdichter Vx4.2 mit 6° aufgedrehtem Vorleitrad (nicht freigegeben) ... 33
Abbildung 8.3: 17-stufiger Verdichter Vx4.3 mit 8° aufgedrehtem Vorleitrad (nicht freigegeben) ... 35
Abbildung 11.1: VV94 W100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Wirkungsgradkriterium n*=100%) .. 54
Abbildung 11.2: VV94 L100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=100%) ... 54
Abbildung 11.3: VV94 L81 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=81%) ... 55
Abbildung 11.4: VV94 L60 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=60%) ... 55
Abbildung 11.5: VX4.2 W100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Wirkungsgradkriterium n*=100%) . 56
Abbildung 11.6: VX4.3 W100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Wirkungsgradkriterium n*=100%) . 56
Abbildung 11.7: VX4.3 L100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=100%) ... 57
Abbildung 11.8: VX4.3 L95 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=95%) ... 57

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät für Maschinenwesen

Aufgabenstellung für die Diplomarbeit D 1479

im Studiengang	Maschinenbau
in der Fachrichtung	Strömungsmechanik und Thermodynamik
Name des Diplomanden	Axel Ebert

Thema:

Analyse und Bewertung verschiedener Pumpgrenzkriterien für vielstufige Verdichter

Zielsetzung:

Beim Überschreiten der sog. Stabilitätsgrenze im Sinne abnehmenden Volumenstroms wird die Strömung in Turboverdichtern durch rotierendes Abreißen und / oder Pumpen ausgeprägt instationär, und die Schaufeln erfahren starke schwingungserregende Kräfte. Solche Betriebszustände können insbesondere bei Axialverdichtern zum Schaufelbruch führen und müssen daher vermieden werden. Hierzu ist schon während der Auslegungsphase eine möglichst genaue Kenntnis der Stabilitätsgrenze notwendig, um den zulässigen Arbeitsbereich des Verdichters vorhersagen zu können. Aus der Literatur sind verschiedene Modelle bekannt, die zur Vorhersage der Stabilitätsgrenze eingesetzt werden (u.a. /1/ , /2/ , /3/).

Diese sind hinsichtlich ihres Gültigkeitsbereiches (radial/axial, ein-/ mehrstufig) zu untersuchen und zu bewerten.

Für die rechnerische Bestimmung der Stabilitätsgrenze sollen ausgewählte Modelle in das bei Siemens/TGRM-V zur Verdichterauslegung und -nachrechnung eingesetzte Kennfeldrechenprogramm DYNATECH implementiert werden.

Die Ergebnisse der verschiedenen Modelle sind mit den bisher bei TGRM-V zugrundegelegten Stabilitätsgrenzverläufen und, soweit vorhanden, mit Meßergebnissen zu vergleichen. Ziel der Arbeit ist die Analyse der Rechenergebnisse und eine Empfehlung, welche(s) Modell(e) künftig bei TGRM-V zur Vorausbestimmung der Pumpgrenze einzusetzen ist (sind).

(Literaturangaben s. Rückseite)

Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. habil. Lindner (betreuender Hochschullehrer) Dr.-Ing. Janssen (Siemens AG KWU TGRM-V)
Fachrichtungsleiter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Vollheim
Ausgehändigt am:	02.03.1992

Studien-/Diplomarbeit

THEMA: Analyse und Bewertung verschiedener Pumpgrenzkriterien für vielstufige Verdichter

Das stationäre Verhalten eines Verdichters ist durch seine Charakteristik gekennzeichnet, welche z.B. durch das Druckverhältnis als Funktion des Massendurchsatzes beschrieben wird. Diese Charakteristik ist zu kleinen Massenströmen hin durch die sog. Stabilitäts- oder Pumpgrenze eingeschränkt.

Bei Überschreitung einer gewissen aerodynamischen Belastung wird die Verdichterströmung plötzlich und scheinbar ohne Vorankündigung instabil. Dieses Verhalten wird verursacht durch die strömungsmechanischen Phänomene der "rotierenden Abreißströmung" und des "Pumpens", besser bekannt als "Rotating Stall" und "Surge". Betrieb im Rotating Stall führt zu einer schwingungsmechanischen Beanspruchung der Maschine. Insbesondere stellen die umlaufenden Stall-Zellen für die Schaufeln eine starke Erregung dar, deren Frequenz wegen der meist unbekannten Anzahl und Umlaufgeschwindigkeit der Zellen nicht bekannt ist. Pumpen tritt je nach Vedichterdruckverhältnis und Größe des Verbrauchervolumens mehr oder weniger stark auf. Es kann durchaus zur Zerstörung der Beschaufelung führen.

Betriebszustände, bei denen die genannten Erscheinungen auftreten, sollten daher vermieden werden. Hierzu ist schon während der Auslegungsphase eine möglichst genaue Kenntnis der Stabilitätsgrenze notwendig, um den zulässigen Arbeitsbereich des Verdichters vorhersagen zu können.

Aus der Literatur sind verschiedene Modelle bekannt, die zur Vorhersage der Stabilitätsgrenze eingesetzt werden, u. a. /1/, /2/, /3/. Die bekannten Modelle sind hinsichtlich ihres Gültigkeitsbereiches (radial/axial, ein-/mehrstufig, etc.) zu untersuchen und zu bewerten. Für die rechnerische Bestimmung der Stabilitätsgrenze sollen ausgewählte Modelle in das bei TGRM-V zur Verdichterauslegung und -nachrechnung eingesetzte Kennfeldrechenprogramm DYNATECH implementiert werden.

Die Ergebnisse der verschiedenen Modelle sind mit den bisher bei TGRM-V zugrunde gelegten Pumpgrenzverläufen und, soweit vorhanden, mit Meßergebnissen zu vergleichen. Ziel der Arbeit ist die Analyse der Rechenergebnisse und eine Empfehlung des oder der in der Zukunft bei TGRM-V einzusetzenden Modell(e) zur Vorausbestimmung der Pumpgrenzlage.

Janssen, 8.11.1990

/1/ Lieblein, S. Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades., Trans. of the ASME, J. of Basic Eng. (1959).
/2/ Traupel, W. Thermische Turbomaschinen, Bd. II, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York (1982).
/3/ Koch, C.C. Stalling Pressure Rise Capability of Axial Flow Compressor Stages, ASME Paper No. 81-GT-3 (1981).

1 Einleitung

Die bei Siemens entworfenen vielstufigen Axialverdichter sind Komponenten von offenen Gasturbinenanlagen. Sie werden zur Stromerzeugung in Kraftwerken eingesetzt und arbeiten deshalb mit nahezu fester Drehzahl.

Für die Verdichter kann die Turbine als nachgeschaltetes Drosselorgan betrachtet werden. In Abhängigkeit vom Druck am Turbineneintritt kann der Verdichterdurchsatz unterschiedlich sein. Dabei darf der Massenstrom niemals so klein werden, daß die sogenannte Pumpgrenze überschritten wird. Diese begrenzt bei höheren Drehzahlen den stabilen Arbeitsbereich des Verdichters.

Die experimentelle Bestimmung der Pumpgrenze ist sehr kostspielig und nur bis zu Drehzahlen von ca. 85% der Nenndrehzahl sinnvoll. Darüber würde ein Anfahren der Pumpgrenze zur Zerstörung der Verdichter- und Turbinenbeschaufelung führen. In diesem Bereich läßt sich die Stabilitätsgrenze nur theoretisch ermitteln.

Genaue Stabilitätsmodelle sind also sehr wichtig. Gerechnete Pumpgrenzpunkte könnten mit gemessenen verbunden werden und so die Stabilitätsgrenze im gesamten Fahrbereich darstellen. Dieser muß überall einen sicheren Abstand zur Pumpgrenze aufweisen.

Nachfolgend werden vier Stabilitätskriterien für Axialverdichter erläutert. Sie sind in ein Auswertungsprogramm eingearbeitet, welches gleichfalls beschrieben wird. Zur Bewertung der Modelle werden die Rechenergebnisse mit vorhandenen Meßdaten verglichen.

2 Formelzeichen

c	absolute Strömungsgeschwindigkeit
c_A	Auftriebsbeiwert
c_f	Reibungskoeffizient aus Wandschubspannung und $\rho/2v^2$
C_h	Enthalpiekoeffizient
D	Diffusionszahl
D_{eq}	äquivalente Diffusionszahl
g	Schaufelkanalweite
Δh_s	isentroper Anstieg der statischen Enthalpie
H	Formfaktor δ^*/δ^{**}
i	Inzidenzwinkel (Fehlanströmung): α_1-α_{s1} für das Leitrad oder β_1-β_{s1} für das Laufrad
i^*	Referenzwert des Inzidenzwinkels für minimale Strömungsverluste: ergibt sich aus dem Mittelwert zwischen den Inzidenzwinkeln i, bei denen die Verluste ω das Doppelte des Minimalwertes erreichen
l	Länge der kreisbogenförmigen Skelettlinie eines Profils, das dieselbe Wölbung wie das entsprechende NACA65 Profil besitzt
$\dot{m}$	Massenstrom
$\dot{m}_S^*$	relativer Massenstrom am Saugstutzen, auf Normbedingungen reduziert und auf den Auslegungszustand bezogen
n^*	relative Drehzahl, auf Normbedingungen reduziert und auf die Nenndrehzahl bezogen
p	statischer Druck
p_R	Ruhedruck
r	Radius
Re	Reynoldszahl
s	Sehnenlänge
t	Teilung
u	Umfangsgeschwindigkeit
v	Strömungsgeschwindigkeit allgemein
w	relative Strömungsgeschwindigkeit
Δz	Axialspalt zwischen benachbarten Gittern
α	absoluter Strömungswinkel zur meridionalen Strömungsrichtung
α_s	äquivalenter Schaufelwinkel für das Leitrad zur meridionalen Strömungsrichtung
β	relativer Strömungswinkel zur meridionalen Strömungsrichtung
β_s	äquivalenter Schaufelwinkel für das Laufrad zur meridionalen Strömungsrichtung
δ	Deviationswinkel (Minderumlenkung): α_2-α_{s2} für das Leitrad oder β_2-β_{s2} für das Laufrad
δ^*	Summe der Verdrängungsdicken der Grenzschicht von Profilober- und Unterseite
δ^{**}	Summe der Impulsverlustdicken der Grenzschichten von Profilober- und Unterseite
θ	Wölbungswinkel: α_{s1}-α_{s2} oder β_{s1}-β_{s2}
π_R	Ruhedruckverhältnis für die gesamte Beschaufelung
φ	Durchflußzahl als c_{ax2}/u_2
ρ	Dichte
σ	Solidity (Gitterdichte): s/t
ω	Verlustzahl = $\Delta p_R/(p_{R1}-p_1)$
ψ	Druckzahl = $\Delta h_s / u_2^2$
Ψ	Stokesche Stromfunktion
ξ	Staffelungswinkel
ε	Radialspiel

Indices

0	Auslegungspunkt
1	Schaufeleintrittskante
2	Schaufelaustrittskante
ax	Axialkomponente
LA	Laufrad
LE	Leitrad
SS	Saugseite
u	Umfangskomponente

3 Das Dynatech-Kennfeldrechenprogramm

Das Programm HTO300 wurde 1970 von der Dynatech Corporation [1] entwickelt. Es dient u.a. der Nachrechnung von Strömungen durch Axialverdichter und soll an dieser Stelle kurz erläutert werden, da auf die Ergebnisse dieses Programms im Rahmen der Stabilitätsuntersuchungen zurückgegriffen wird. Alle Rechnungen betreffen Profile der NACA65 - (A_{10}) Reihe.

Die Meridianströmungsrechnung beruht auf einem zweidimensionalen Stromlinienkrümmungsverfahren und liefert die radiale Verteilung der Strömungsgrößen entlang der Maschinenachse. Vorgegeben wird die Gittergeometrie und der Eintrittszustand in den Verdichter. Druck und Temperatur werden in der Regel mit Normbedingungen (101,3 kPa und 15°C) festgelegt. Massenströme und Drehzahlen sind dann automatisch normiert. Eine Normierung ist für all jene Fälle wichtig, in denen Kennfelder mehrstufiger Maschinen ähnlichkeitstheoretisch richtig verglichen werden müssen. Die Nachrechnung erfolgt nach Smith [2] unter der Berücksichtigung des radialen Gleichgewichts zwischen den Schaufelreihen. Profilverluste und Randzoneneffekte werden über empirische Korrelationen erfaßt, wie es in der Praxis zur Zeit noch üblich ist.

Im Programm wird das Fluid als ideales Gas angenommen. Die Strömung gilt als:

- stationär,
- reibungsfrei,
- kompressibel,
- rotationssymmetrisch.

Es gibt keinen Massen-. Impuls- oder Energieaustausch zwischen den einzelnen Stromröhren.

Für die Umlenk- und Verlusteigenschaften der Schaufelgitter wird auf empirische Korrelationen aus umfangreichen NACA-Messungen an ebenen Gittern zurückgegriffen. Diese beruhen auf der von Lieblein/Schwenk/Broderick [5] eingeführten Diffusionszahl D für minimale Profilverluste. Conrad, der 1965 die verschiedensten Verlustkriterien verglichen hatte, weist in seiner Arbeit [4] darauf hin, daß gerade D ein brauchbares Kriterium zur Bestimmung der Impulsverlustdicke der Grenzschichten am Gitteraustritt ist. Sie wird in der Form δ**/s als Maß für die Belastung eines Gitters angesehen. D ist definiert als

$$D = \frac{v_{maxSS} - v_2}{v_1} \tag{3.1}$$

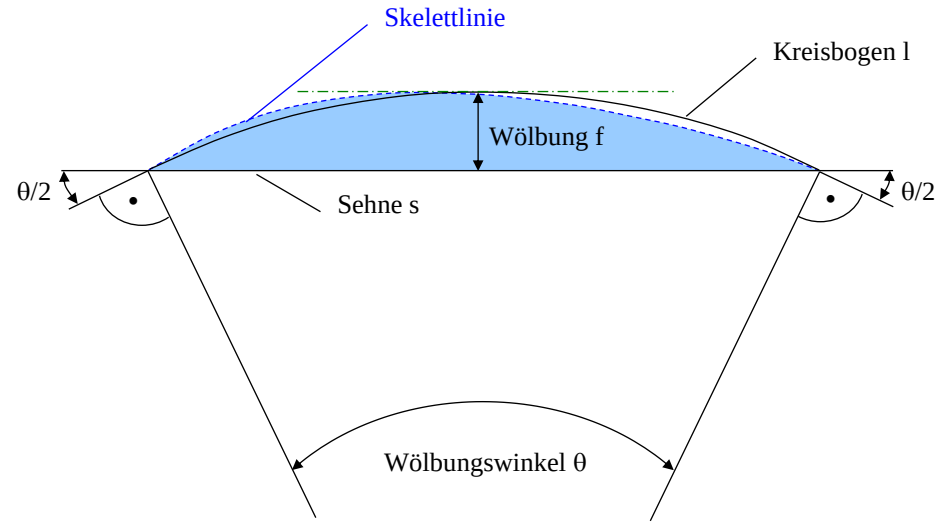
In [4] wird gezeigt, wie man von Gleichung (3.1) zur nachfolgenden Gleichung (3.2) kommt. Mit Gleichung (3.2) läßt sich D aus den Gitterdaten am Ein- und Austritt berechnen:

$$D = 1 - \frac{v_2}{v_1} + \frac{1}{2}\sigma\frac{\Delta v_u}{v_1} \tag{3.2}$$

Wenn für ein ebenes Gitter angenommen wird, daß $v_{ax1} = v_{ax2}$, kann Gleichung (3.1) in der folgenden Form geschrieben werden:

$$D = \frac{v_{maxSS}}{v_1} - \frac{\cos\beta_1}{\cos\beta_2} \tag{3.3}$$

Abbildung 3.1 verdeutlicht am Beispiel eines Laufrades die Winkeldefinitionen, die für die Umlenkeigenschaften der betrachteten Profile von Bedeutung sind.



$\beta_{s1} = \xi + \theta/2$
$\beta_{s2} = \xi - \theta/2$
$i = \beta_1 - \beta_{s1}$
$\delta = \beta_2 - \beta_{s2}$
$l = s \frac{\theta/2}{\sin \theta/2}$
$g_2 = t \cos\beta_{s2}$

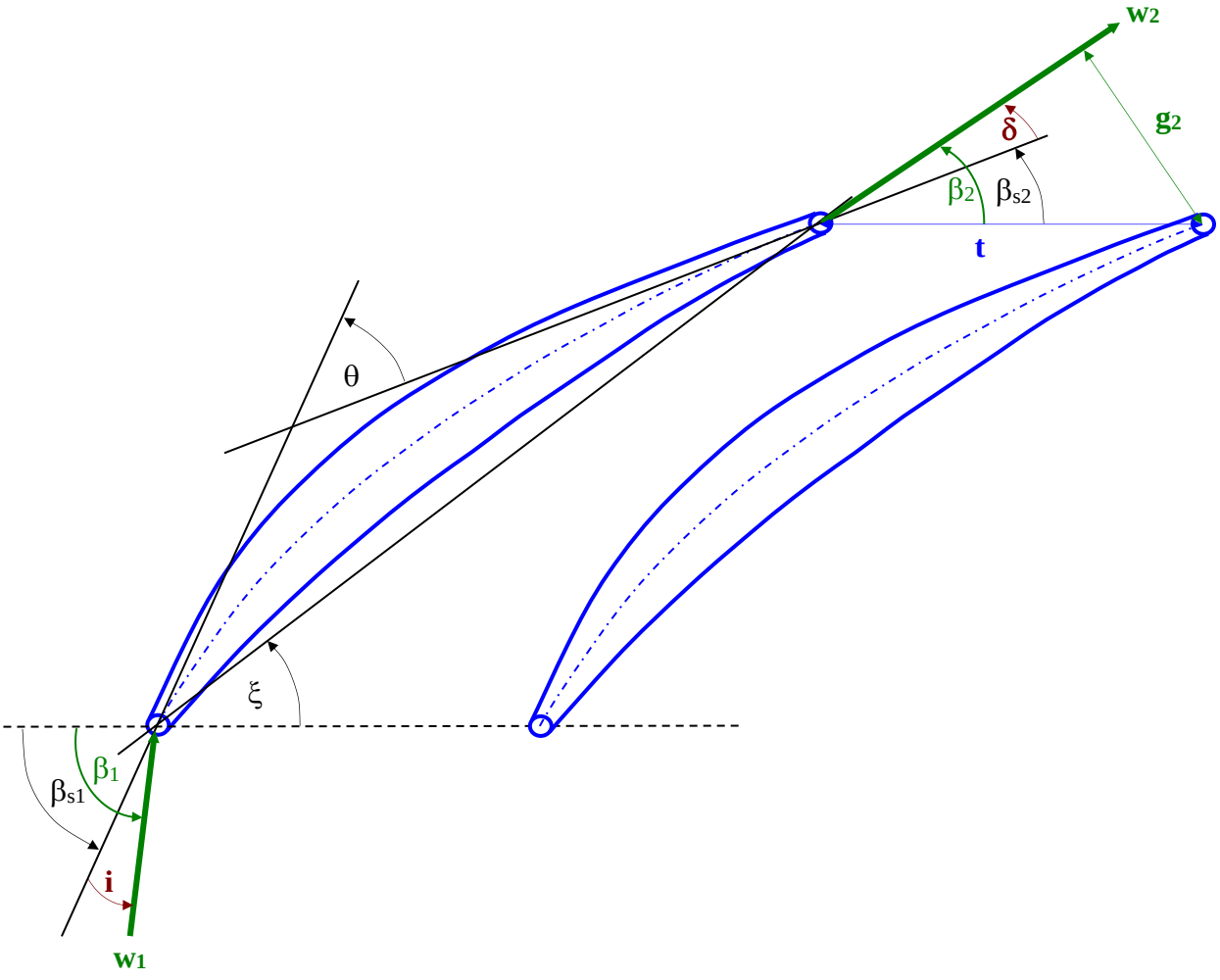


Abbildung 3.1: Winkeldefinitionen für NACA 65 Profile am Beispiel eines Laufrades

Der Inzidenzwinkel i charakterisiert die Fehlanströmung, der Deviationswinkel δ die Minderumlenkung. Das Schaufelprofil wird über den Wölbungswinkel θ und äquivalente Schaufelwinkel definiert, die sich aus einem Profil mit kreisbogenförmiger Skelettlinie ergeben, welches die gleiche Wölbung hat wie das entsprechende NACA65 Profil. Das Verfahren wird bei Johnson/Bullock et al [5] beschrieben und wird angewandt, da die Steigung der NACA65 Skelettlinie an den Vorder- und Hinterkanten gegen unendlich strebt.

Im Dynatech Programm werden die in Johnson/Bullock/Lieblein [5] zusammengetragenen Korrelationen für die Berechnung der aerodynamischen Gitterbelastung übernommen. Danach wird der Auslegungsinzidenzwinkel i* nach Liebleins Angaben in [5] berechnet und für abweichende Schaufeldicken und höhere Machzahlen (M<1) korrigiert. Hierzu wird ein korrespondierender Deviationswinkel berechnet und in Abhängigkeit von der Diffusionszahl D aus Gleichung (3.3) der tatsächliche Deviationswinkel δ gebildet. Das Verhältnis v_{maxSS}/v_1, das zur Bestimmung von D wichtig ist, wird nach Vorschlägen von Jansen/Moffatt in [6] ermittelt. Über D und die Beziehung zur Impulsverlustdicke am Gitteraustritt wird der Verlustkoeffizient berechnet.

Die Meßergebnisse, auf die sich die Autoren in [5] berufen, stammen von Herrig/Emery/Erwin [7] und Emery/Dunavant [8]. Die erste Arbeit ermöglicht insbesondere, die bei Fehlanströmungen höheren Verluste zu berücksichtigen. Die zweite Arbeit korrigiert die Verlustbestimmung bei größeren Machzahlen.

Die Verdrängungswirkung der Wandgrenzschichten wird mit Hilfe von Blockierungsfaktoren erfaßt und nach einer Methode von Jansen [9] berechnet. Für zusätzliche Randzonenverluste im Bereich der Schaufelspitzen wird dem Programm ein zusätzlicher Verlustkoeffizient vorgegeben. Damit wird eine Verlustparabel gebildet, welche den Profilverlusten über der Schaufelhöhe überlagert wird.

Der Arbeitsbereich wird durch Zuströmbedingungen abgegrenzt, bei denen die Verlustzahl ω für ein Gitter den doppelten Wert ihres optimalen Vergleichswertes hat. Im Dynatech Programm bestimmt also ω explizit das Gebiet zwischen Stabilitäts- und Schluckgrenze.

Das Kennfeld wird gewöhnlich für einen Drehzahlbereich vom 0,7 - bis 1,05 - fachen der Nenndrehzahl und die verschiedensten Drosselzustände berechnet. Gegebenenfalls kann die Stellung der Leitschaufeln durch das Programm variiert werden.

Mangel des Programms ist, daß sich instationäre Effekte und ihr Einfluß auf die Gesamtcharakteristik eines Verdichters nicht vorhersagen lassen. Gerade bei Betrachtungen an der Stabilitätsgrenze wäre es aber erforderlich, die periodische Wirkung von Gaskräften und die zeitabhängige Anfachung und Dämpfung von Störungen verfolgen zu können.

Die in der vorliegenden Arbeit behandelten Stabilitätsuntersuchungen können natürlich nicht exakter sein als die vorgelegten Dynatech Ergebnisse. Sie bleiben deshalb auch auf halbempirische Betrachtungen beschränkt.

Der Einsatz instationärer Berechnungsverfahren könnte in vielem genauere Ergebnisse liefern, besonders wenn er mit analytischen Grenzschichtbetrachtungen gekoppelt wäre. Befriedigende Lösungen für vielstufige Verdichter existieren auf diesem Gebiet jedoch noch nicht.

4 Zur Instabilität von Verdichtern

Axialverdichter sind Turbomaschinen, die in der Kraftwerkstechnik, in der Schwerindustrie aber auch bei Flugzeugtriebwerken eine wichtige Rolle spielen. Sie sind so ausgelegt, daß sie den Druck einer stetigen rotationssymmetrischen Strömung erhöhen. Die Charakteristik eines Verdichters läßt sich als Funktion des Druckverhältnisses über dem Durchsatz am Saugstutzen darstellen. Als Parameter für zwei Kennlinienscharen gelten die feste Drehzahl für die Drosselkurven und konstanter Wirkungsgrad für die Muschelkurven. Die Steigung der Drosselkurven ist in ihrem jeweiligen Bereich des relativen Wirkungsgradmaximums ("gesunder Bereich") fast immer negativ. Das bedeutet, daß mit kleinerem Massendurchsatz der Druckanstieg größer wird. Diese Charakteristik ist ab einem kritischen Wert für den Massenstrom eingeschränkt, denn unterhalb dieses Wertes ist die Strömung nicht mehr stabil. Einerseits wäre es wünschenswert, eine Anlage so dicht wie möglich am kritischen Punkt zu betreiben - das brächte z. B. bei Kopplung mit einer Gasturbine eine verbesserte Nutzleistung; andererseits könnte eine geringfügige Änderung des Durchsatzes dazu führen, daß das System in den instabilen Bereich gedrückt werden würde.

Grob unterteilt lassen sich vier Zustände einer Strömung beschreiben:

- rotationssymmetrisch und stationär,
- nicht rotationssymmetrisch und stationär,
- rotationssymmetrisch und instationär,
- nicht rotationssymmetrisch und instationär.

Sie vertreten nach Mc Caughan [10] die folgenden Betriebserscheinungen:

- Auslegungszustand,
- Rotierende Abreißen (Rotating Stall),
- Tiefes Pumpen (Deep Surge),
- Mildes Pumpen (Classic Surge).

Das Rotierende Abreißen ist durch eine oder mehrere Zellen mit abgerissener Strömung gekennzeichnet, die die Beschaufelung mit etwa der halben Maschinendrehzahl umlaufen. Die Ablösung kann sich entweder über nur einen Teil der Schaufelhöhe oder aber über die volle Höhe erstrecken. Für einen sich mit diesen Zellen mitdrehenden Betrachter wäre die Strömung stationär; für die Schaufeln im betreffenden Bezugssystem trifft das nicht zu. Die Leistungsübertragung ist in dem Zustand um vieles geringer als noch kurz davor. Die Schaufeln selbst werden durch den ständigen Wechsel zwischen abgerissener und anliegender Strömung sehr hoch belastet. Es kommt zu starken Vibrationen und in kürzester Zeit zu Schwingungsbrüchen.

Pumpen entsteht durch selbsterregte axiale Schwingungen der Gasmasse in Rohrnetz und Verdichter. Die Periodendauer der Schwingungen liegt ca. eine Zehnerpotenz über der des Rotierenden Abreißens. Pumpen tritt je nach Verdichterdruckverhältnis und Verbrauchervolumen mehr oder weniger stark auf. Tiefes Pumpen ist eine meist rotationssymmetrische Erscheinung mit großen Änderungen im Massenstrom; der Verdichter wird dabei periodisch in umgekehrten Richtungen durchströmt. Mildes Pumpen ist mit Oszillationen geringeren Ausmaßes verbunden. Es tritt zusammen mit Rotierendem Abreißen auf. Zu Rückströmungen kommt es nicht.

Einzelheiten zur Physik dieser Erscheinungen können z.B. bei Greitzer [11], Lindner [12] oder Traupel [13] nachgelesen werden. Alle Formen der Strömungsinstabilität sind durch einen einheitlichen Entstehungsmechanismus gekennzeichnet. Ist die maximale aerodynamische Belastung

eines Schaufelgitters erreicht, löst die Strömung zunächst an einer Stelle am Umfang ab. Der hierdurch hervorgerufene höhere Strömungswiderstand zwischen zwei Schaufeln bewirkt, daß die Strömung in die in Umfangsrichtung benachbarten Schaufelkanäle ausweicht. Der Inzidenzwinkel zu den Profilen steigt zu einer Seite hin an, wodurch eine Fortbewegung des Ablösegebietes eingeleitet wird. In entgegengesetzter Richtung führt die Abnahme des Inzidenzwinkels zum Wiederanlegen der Strömung. Das so entstandene, sich fortpflanzende Ablösegebiet verursacht Rückwirkungen auf das gesamte Strömungsfeld, und die Wechselwirkungen zwischen den Druck- und Trägheitskräften innerhalb der Strömung entscheiden dann, welche Instabilitätsform das Leistungsverhalten des Verdichters verändert.

Für den Ingenieur ist indessen weniger wichtig, welche dieser Erscheinungen für seinen Verdichter in Frage kommen könnte, ob also z.B. nur Rotierendes Abreißen auftritt oder ob es zeitgleich mit dem Pumpen einsetzt oder auch zeitversetzt. Alle Erscheinungen stellen eine große Gefahr für den Betrieb dar und müssen vermieden werden. Sie liegen jenseits der Stabilitätsgrenze, die das Kennfeld eines jeden Verdichters zu kleineren Massenströmen hin abgrenzt.

Die Stabilitätsgrenze läßt sich wegen der komplizierten Strömungsverhältnisse im betrachteten Bereich nicht exakt vorhersagen. Vier halbempirische Kriterien, die zu ihrer Bestimmung vorgeschlagen werden und sämtlich für Gitter von Axialverdichtern gelten, nämlich das bisher bei Siemens eingesetzte Wirkungsgradkriterium sowie die Kriterien von Traupel [13], Lieblein [14] und Koch [15], werden nachfolgend erläutert und mit bekannten Pumpgrenzverläufen von Siemens-Verdichtern verglichen.

5 Modelle zur Bestimmung der Stabilitätsgrenze von Axialverdichtern

Bei Siemens wird zur Zeit mit einem Stabilitätsmodell gearbeitet, das als Wirkungsgradkriterium bezeichnet wird. Es gilt der Massenstrom als kritisch, bei dem die Kurve des isentropen Wirkungsgrades der Maschine für eine bestimmte Drehzahl ein Maximum aufweist. Diese Annahme, die darauf beruht, daß die beste Leistungsabgabe beim kleinsten abrißfreien Durchfluß liegen muß, ist jedoch nicht sehr genau. Bei Betrachtung von Kennfeldern mehrstufiger Verdichter, z.B. nach Lindner [12], [16], ist zu sehen, daß der Verlauf der Linie des maximalen Wirkungsgrades je nach Verdichtertyp mehr oder weniger weit rechts von der Stabilitätsgrenze liegt. Jedenfalls befindet man sich mit dem Wirkungsgradkriterium auf der sicheren Seite, wenn man damit die Betriebsgrenze eines Verdichters beschreiben will. Für die vorliegende Arbeit sind die Wirkungsgraddaten insofern von Bedeutung, als damit die Genauigkeit der zu überprüfenden Modelle beurteilt werden kann.

5.1 Äquivalente Diffusionszahl nach Lieblein

Die Analyse der reibungsbehafteten Profil- und Gitterströmung zeigt, daß die Grenzschichtentwicklung und insbesondere auftretende Grenzschichtablösungen das Verlust- und Umlenkverhalten der Schaufelgitter maßgeblich beeinflussen. Dies gilt insbesondere für Verzögerungsgitter, bei denen die Grenzschicht einen entsprechenden Druckanstieg überwinden muß.

Deshalb ist immer wieder versucht worden, geeignete Kriterien für eine einfache zahlenmäßige Abschätzung der Gitterbelastung (Umlenkung, Verzögerung, Druckanstieg) zu finden, die einem Schaufelgitter maximal oder optimal zugemutet werden kann. Zu ihnen zählen das de Haller-

Belastungskriterium v_2/v_1, die Belastungszahl $c_A \cdot \sigma$, verschiedene Zirkulationszahlen oder auch die im Abschnitt 0 bereits erwähnte Diffusionszahl D in Gleichung (3.1) nach Lieblein.

Lieblein hatte bei Untersuchungen an ebenen Gittern festgestellt, daß die Impulsverlustdicke im Gitternachlauf im wesentlichen proportional zur Verzögerung auf der Profilsaugseite ist. Da aber die Maximalgeschwindigkeit auf der Saugseite im allgemeinen nicht bekannt ist, wurde versucht, D mit Hilfe von Korrelationsformeln wie z.B. Gleichung (3.2) zu erfassen, wobei hier nochmals erwähnt sei, dass Gleichung (3.2) nur für den Bereich minimaler Profilverluste zutrifft. Eine Ablösung der Strömung von der Saugseite der Schaufeloberfläche entsteht dann, wenn D folgende Grenzwerte überschreitet [4]:

- D = 0,6 für die Kernströmung und den Nabenbereich des Laufrades
- D = 0,48 im Naben- und Gehäusebereich des Leitrades
- D = 0,45 im Gehäusebereich des Laufrades

Neben diesen Richtwerten für den Auslegungszustand entwickelte Lieblein einen verbesserten Belastungsparameter, der auch bei Anströmzuständen, die vom Referenzzustand minimaler Verluste abweichen, eine sinnvolle Korrelation mit der Impulsverlustdicke an der Schaufelhinterkante ermöglicht. Es ist dies die sogenannte äquivalente Diffusionszahl D_{eq}.

Sie ist definiert als

$$D_{eq} = \frac{v_{maxSS}}{v_2} \tag{5.1}$$

und kommt dem reziproken Wert der de Hallerzahl (v_2/v_1) ziemlich nahe, ist allerdings schon deswegen günstiger, weil sie die Physik des Abrisses exakter beschreiben kann. Das erfordert natürlich die Kenntnis des Geschwindigkeitsverlaufes über der Schaufel. Die Korrelation, die Lieblein in [14] zur Berechnung von D_{eq} angibt, lautet für NACA65 - (A10) Profile

$$D_{eq} = \frac{\cos\beta_2}{\cos\beta_1}\left[1{,}12 + 0{,}0117(i - i^*)^{1{,}43} + 0{,}61\frac{\cos^2\beta_2}{\sigma}(\tan\beta_1 - \tan\beta_2)\right] \tag{5.2}$$

Hierbei folgt $\cos\beta_2/\cos\beta_1$ wieder aus v_1/v_2.

Ausgewertet wurden Meßergebnisse einer Vielzahl von ebenen Gittern, bei denen Anströmwinkel, Umlenkung und Schaufeldichte variiert worden sind. Lieblein zeigt, daß ab $D_{eq} > 2$ die Profilverluste stark ansteigen.

Betrachtet man die Gleichung (5.2), so sieht man, daß Lieblein neben dem Auslegungsinzidenzwinkel i* auch größere Inzidenzwinkel i zuläßt. Hierdurch werden Strömungen erfaßt, die im Bereich zwischen optimaler Zuströmung und Abriß liegen. Teillastzustände können also berücksichtigt werden. Es fällt auf, daß die Zuströmwinkel von großem Einfluß auf die Liebleinkorrelation sind. Auf die Entwicklung der Gleichung (5.2) geht Lieblein in seiner Arbeit nicht ein. Indessen erläutert er die Beziehung zwischen Diffusionszahl und Impulsverlustdicke, wobei letztere bei hohen Werten auf Abriß schließen läßt. Die Herleitung beruht auf der Anwendung der Kármán'schen Impulsgleichungen für die Schaufelgrenzschichten.

$$\frac{d\delta^{**}}{dx} = \frac{c_f}{2} - (H+2)\frac{\delta^*}{v}\frac{dv}{dx} \tag{5.3}$$

Es wird eine zweidimensionale inkompressible Strömung vorausgesetzt; v ist die Geschwindigkeit am Grenzschichtrand.

Mit der Integration der Gleichung (5.3) von Gittereintrittskante bis Gitteraustrittskante erscheint auf der linken Seite die Impulsverlustdicke am Austritt in der Form δ**/s (es wird angenommen, daß Skelettlinie und Sehne identisch seien). Aus dv/v wird der Term $\ln(v_{max}/v_2)$, was Gleichung (5.1) praktisch wiedergibt; v_{max} soll dicht am Eintritt liegen. Aus $c_f/2$ wird ein integraler Wert gebildet und der Rest der Gleichung (5.3) vereinfachend, und zwar Glied für Glied gemittelt.

Nach diesen zum Teil groben Annahmen geht Lieblein zur Analyse einzelner Glieder und Abschätzung ihrer Größenordnung über. Er stellt fest, daß eine größere Umlenkung bzw. größere Zuströmwinkel zu starken Geschwindigkeitsgradienten auf der Saugseite führen, während die auf der Druckseite ohnehin schwachen Gradienten sich kaum ändern. Seine Betrachtungen, die in [6] ausführlich dargelegt sind, führen zur exponentiellen Abhängigkeit zwischen δ**/s und v_{maxSS}/v_2

$$\frac{\delta_2^{**}}{s} = \frac{0{,}0045}{1 - 0{,}95 \ln\left(D_{eq}\right)} \tag{5.4}$$

und zur Bestimmung der Verlustzahl als

$$\omega = 2 \frac{\delta_2^{**}}{s} \frac{\sigma}{\cos\beta_2} \frac{\cos^2\beta_1}{\cos^2\beta_2} \tag{5.5}$$

Gleichung (5.4) und Gleichung (5.5) sind einer neueren Arbeit von Casey [17] entnommen. Sie weichen etwas von den ursprünglichen Formeln Liebleins ab, denn dieser gibt statt 0,0045 nur den Bereich 0,004 - 0,005 und statt 0,95 den Bereich 1 - 1,17 an. Die Verlustzahl multipliziert Lieblein noch mit dem Term 2H/(3H+1), was bei seiner Vorgabe von H = 1,08 = const. einen Faktor von 0,96 ergibt.

Will man D_{eq} als Stabilitätskriterium für Verdichterstufen einsetzen, so kann die Korrelation nur Gitter für Gitter und Stromlinie für Stromlinie durchgeführt werden. Ähnlich wie bei D steht auch hier wieder die Frage, in wie weit die Berechnungsformel auf die Randzonen angewandt werden darf und ob hier der kritische Wert $D_{eq} = 2$ überhaupt gültig ist. Leider wurden zu diesem Problem keine Veröffentlichungen gefunden.

Erfahrungen zeigen, daß lokale Überlastungen, also Überschreitungen von $D_{eq} = 2$, zulässig sein müssen, denn bei stabilen Massenströmen kommt auch örtlich $D_{eq} > 2$ vor. Traulsen [18] verlangt als Abrißbedingung für ein Gitter, daß über 30% der Schaufelhöhe $D_{eq} > 2$ sein muß. In der vorliegenden Arbeit wird das Liebleinkriterium in ähnlicher Weise behandelt: die Stabilitätsgrenze des Verdichters gilt dann als überschritten, wenn für ein Gitter auf mehr als einem Drittel der Stromlinien $D_{eq} > 2$ ist. Der dabei zugrunde liegende Massenstrom wird als jenseits der Stabilitätsgrenze bewertet.

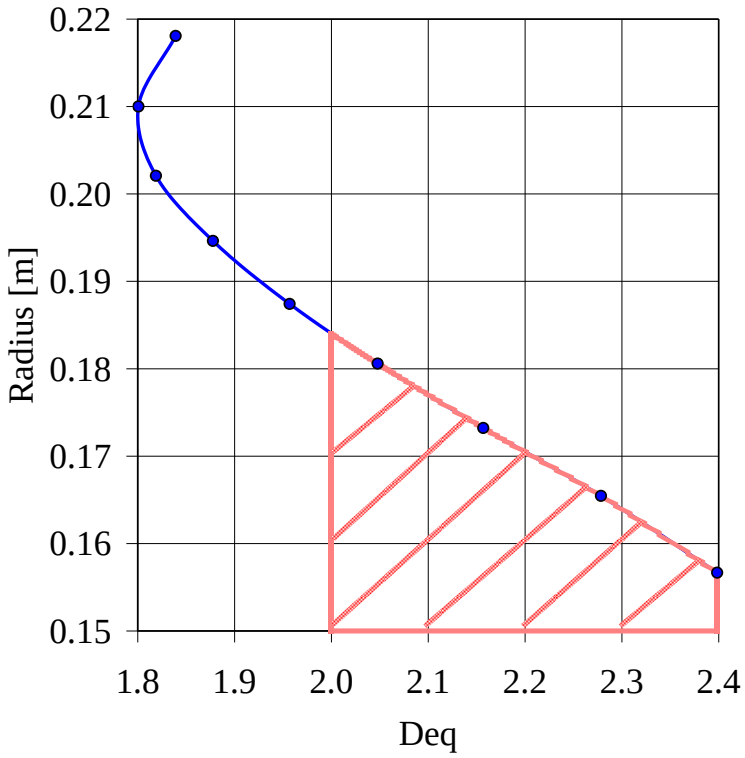


Abbildung 5.1: Beispiel für den Verlauf der äquivalenten Diffusionszahl über dem Radius eines Leitrades

Abbildung 5.1 verdeutlicht anhand eines ausgewählten Gitters, wie sich D_{eq} über dem Radius eines Leitrades ändert. Die gerechneten Stromlinien sind durch Punkte hervorgehoben. Der Bereich, in dem D_{eq} nach Lieblein zu groß ist, wurde schraffiert dargestellt. Die Nabe ist am stärksten belastet, was nach Liebleins Vorgaben meist zutreffen wird. Im vorgestellten Falle ist fast die halbe Schaufelhöhe überlastet. In vier von neun Stromlinien wird das Liebleinkriterium überschritten. Der dabei anliegende Massenstrom wird deshalb als instabil bewertet.

Bei Anwendung des Liebleinkriteriums kann es bei einzelnen Gittern und insbesondere bei größeren Massenströmen vorkommen, daß der Inzidenzwinkel kleiner wird als sein Referenzwert. Physikalisch treten dadurch Rückenanströmungen anstelle von Bruststößen auf und es kann zur Ablösung auf der Druckseite kommen. Damit sind zwar keine Instabilitäten wie die in Abschnitt 4 beschriebenen verbunden, dennoch kann die Strömung ein Schaufelflattern verursachen, das zu Ermüdungsbrüchen führt. Weil solche Zuströmbedingungen nicht über D_{eq} erfaßbar sind, kann programmintern nur mit dem Referenzinzidenzwinkel als aktuellem Wert weitergerechnet werden. Die betroffenen Ergebnisse sind durch ein negatives Vorzeichen in der Ausgabedatei kenntlich gemacht. Große negative Werte sollten nicht unbeachtet bleiben, denn sie dokumentieren eine hohe Gitterbelastung selbst bei optimaler Zuströmung.

5.2 Methode der radialen Stufenelemente nach Traupel

Abweichend von Lieblein verlangt Traupel, daß zur Beurteilung der Stabilität die Stufe als ganzes betrachtet werde. Dazu führt er in [13] die Stokesche Stromfunktion Ψ ein, mit deren Hilfe er die Stufe radial in einzelne Elemente zerlegt. Ψ kann theoretisch die Werte von 0 bis 1 annehmen, denn es charakterisiert den Anteil des Massenstromes bis zu einer festgelegten Stromlinie am Gesamtmassenstrom. $\Psi = 0$ kann somit für die Nabe und $\Psi = 1$ für das Gehäuse definiert werden. Entlang der Linien $\Psi = \text{const.}$, also der einzelnen Stromlinien oder Stufenelemente betrachtet Traupel

nun die Charakteristik des Enthalpieanstieges innerhalb der gesamten Stufe über dem Durchfluß in der dimensionslosen Abhängigkeit der Druckzahl ψ über der Durchflußzahl φ, wobei sich ψ und φ auf eine feste Umfangsgeschwindigkeit, z.B. die im Mittelschnitt beziehen. φ wird mit der Geschwindigkeit am Laufradaustritt berechnet. Unmittelbar wandnahe Schichten (Ψ < 0,1 und Ψ > 0,9) gehen in die Betrachtung nicht ein.

Traupel untersucht nun eine Stufe, bei der sich der Arbeitsumsatz über dem Radius für den jeweiligen Massendurchsatz kaum ändert. Zur Erläuterung dient die Abbildung 5.2.

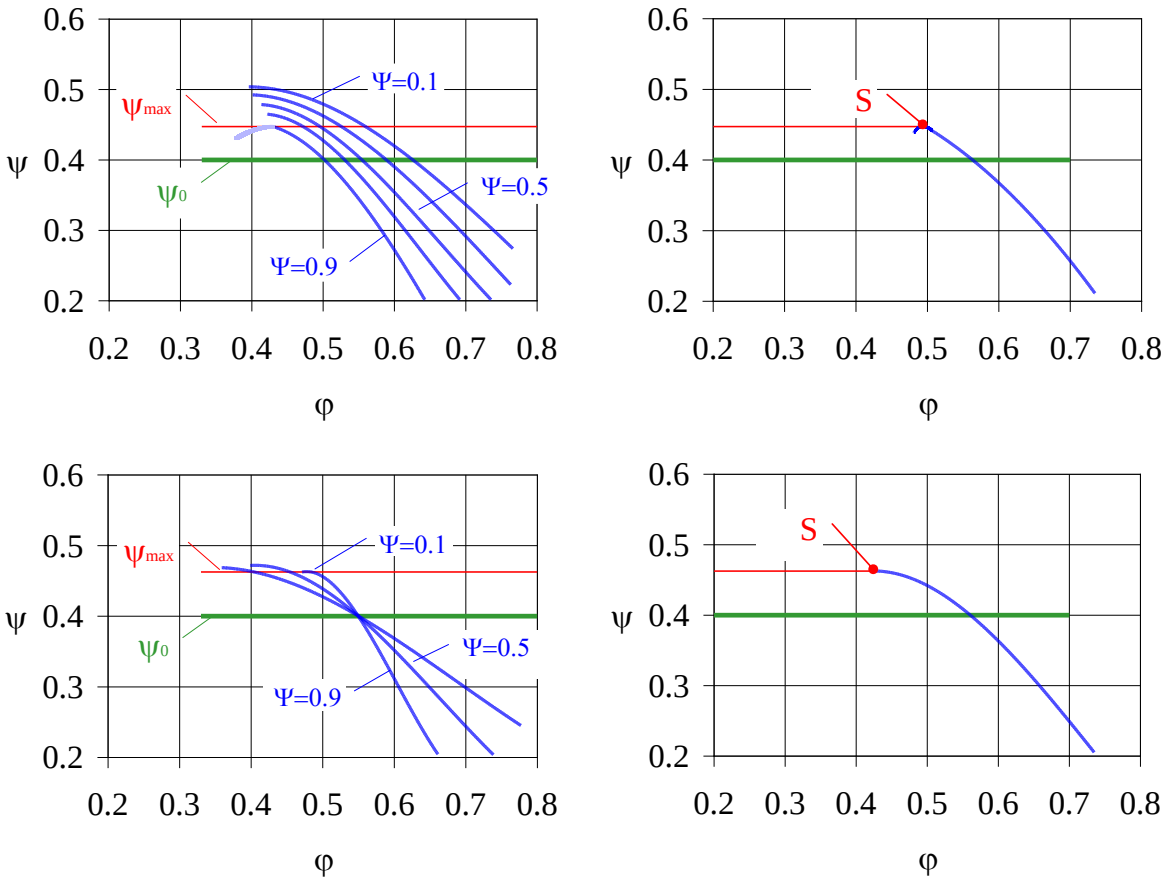


Abbildung 5.2: Kennlinien der einzelnen Stufenelemente und gesamte Stufencharakteristik von Axialverdichterstufen nach Traupel

Nach seiner Forderung gilt für alle Stufenkennlinien bei einem vorgegebenen Massenstrom: $\psi(r) \approx$ const.

Jede Stufenkennlinie wird bei irgendeinem separaten Durchsatz ein Maximum aufweisen, das heißt die Kurve hat eine waagerechte Tangente. Bei irgendeiner der Kurven liegt dieses (separate) Maximum am tiefsten. Dieses Maximum legt die Stabilitätsgrenze der gesamten Stufe fest. Wird in dem kritischen Stufenelement der Durchsatz, der dem Kennlinienmaximum entspricht, unterschritten, so bricht dort die Strömung zusammen, weil die durch die übrigen Stufenelemente aufgezwungene Druckerhöhung größer ist, als nach der Kennlinie des betreffenden Elements erzeugt werden kann.

Das kritische Maximum befindet sich im Gegensatz zum Liebleinkriterium häufig außen, was Traupel damit begründet, daß dort die Verluste bei Fehlanströmungen der hohen Machzahlen wegen besonders stark ansteigen. Weiterhin liegt der zulässige Grenzwert für die Diffusionszahl, wie in 5.1 angedeutet, außen tiefer.

Aus der Schar der Kennlinien der einzelnen Stufenelemente gewinnt Traupel jetzt die integrale Darstellung von ψ über φ. Weil sich die ψ über der Schaufelhöhe kaum ändern, kann er anhand des ermittelten kritischen separaten ψ das integrale φ bestimmen, welches den Massenstrom an der Stabilitätsgrenze für die vorgegebene Drehzahl repräsentiert.

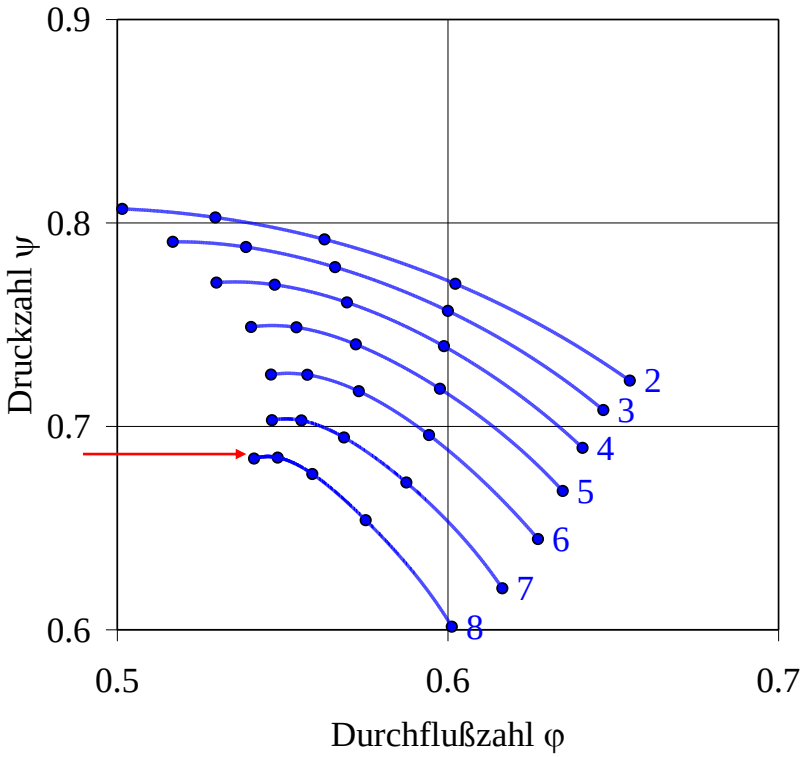


Abbildung 5.3: Separate Kennlinien für eine untersuchte Verdichterstufe

Abbildung 5.3 zeigt eine Darstellung separater Kennlinien, also der für die einzelnen Stufenelemente, wie sie sich nach einer Kennlinienrechnung für die letzte Stufe eines vierstufigen Siemens-Versuchsverdichters ergibt. Die Strömungsverhältnisse sind auf neun Stromlinien berechnet. Die Ziffern zwei bis acht an den dargestellten Linien geben die Nummern der bei der Auswertung berücksichtigten Stromlinien an. Die Stromlinien direkt an Nabe und Gehäuse fallen also bei der Untersuchung heraus. Auf jeder Kennlinie sind fünf Punkte besonders hervorgehoben. Sie verdeutlichen die fünf gerechneten Massenströme (22,2 bis 23,0 kg/s). Die Rechnung gilt für Nenndrehzahl.

Das Beispiel zeigt, daß mehrere Kennlinien bei kleinen Massenströmen ein Maximum aufweisen, wobei das Maximum des äußersten Stufenelements absolut am tiefsten liegt, was Traupel auch erwartet. Dieses kleinste lokale Maximum der Druckzahlen in Abbildung 5.3 liegt bei $\psi = 0{,}68$, was bedeutet, daß das Stufenelement keinen höheren Druckanstieg verwirklichen kann als eben diesen, der 0,68 entspricht. Die einzelnen Kennlinien haben bei gleichem Gesamtmassenstrom leider sehr unterschiedliche ψ. Als Auslegungsgesetz der Stufe ist demnach nicht die Potentialwirbel-drallverteilung genommen worden. Die großen Unterschiede in ψ über r bedeuten aber auch, daß Traupels Vorgehensweise nicht zum richtigen Ergebnis führen würde, wenn man das Beispiel aus Abbildung 5.3 danach analysieren wollte.

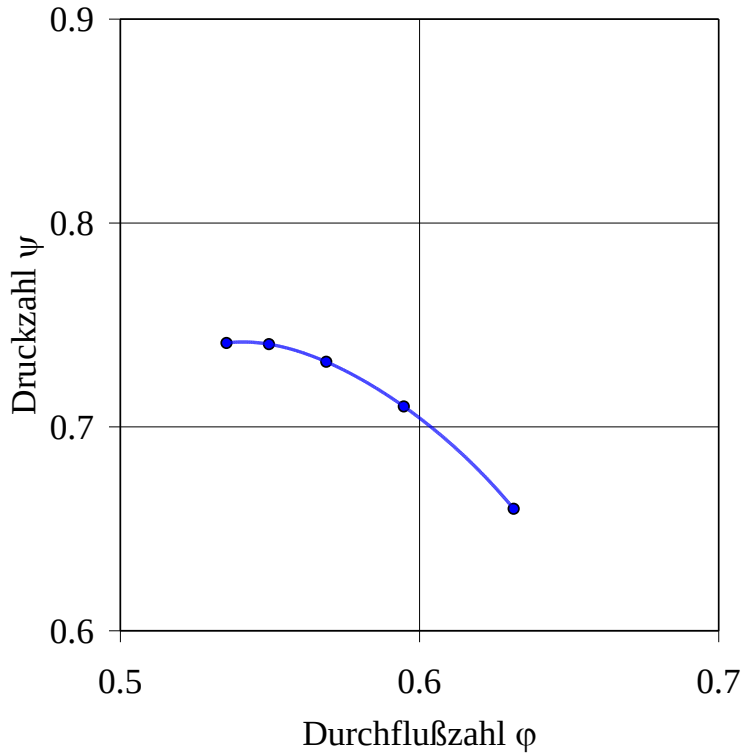


Abbildung 5.4: Integrale Kennlinie für die untersuchte Verdichterstufe aus Abbildung 5.3

Abbildung 5.4 stellt zur Veranschaulichung die integrale Kennlinie dar, die durch Massenstrommittlung der ψ und φ aus Abbildung 5.3 gewonnen werden kann. Es fällt sofort auf, daß das kritische φ zwischen Betriebspunkten liegt, für die die separaten Kennlinien keine Instabilitäten andeuten. Rechnerischer Grund dafür ist, daß das ψ von 0,68 integral gesehen natürlich erst bei viel größeren Massenströmen erreicht wird.

Es wäre sicher nützlich, das Stabilitätskriterium für eine nach Traupels Anforderungen ausgelegte Maschine zu testen; umso mehr als er sein Postulat durch keine experimentellen Vergleiche bestätigt.

Für die vorliegende Maschine ist nur die Wahl geblieben, das Traupelkriterium außer Acht zu lassen oder zu modifizieren. Für den Verdichter aus Abbildung 5.3 liegt die tatsächliche Stabilitätsgrenze zwischen den beiden Massenströmen, innerhalb derer sich auch der kritische Druckanstieg ergibt. Deshalb hat sich der Autor zu folgender Vorgehensweise entschlossen.

Aus der Lage des kritischen ψ wird das separate φ durch Interpolation über der entsprechenden Kennlinie gebildet. Dieses charakterisiert einen bestimmten Gesamtmassenstrom, welcher ebenso durch Interpolation aus den vorgegebenen Massenströmen bestimmbar ist. Der auf diese Art ermittelte Massenstrom wird für sämtliche Stufen verglichen. Der größte sich so ergebende Wert gilt, gleich welche Stufe er betrifft, als der für die Stabilitätsgrenze des gesamten Verdichters charakteristische.

Natürlich ist dieser Weg nicht exakt. Es läßt sich im Einzelfall schwer sagen, ob für das kritische Element zu hohe Druckanstiege, nicht doch von anderen Elementen mit steilen Kennlinien übernommen werden können. Andere Fälle sind ebenfalls möglich, denn anhand von Nachrechnungen läßt sich zeigen, daß sämtliche Kennlinien für alle Stufen bis weit in den instabilen Bereich monoton ansteigen können.

5.3 Diffusormodell von Koch

Betrachtet man einen Schaufelkanal innerhalb eines Verdichters, so arbeitet dieser quasi als Diffusor. Durch Querschnittserweiterung des Kanals wird die Strömung unter Druckanstieg verzögert. Der erreichbare Druckanstieg läßt sich für einen Diffusor aus seiner vorgegebenen Geometrie ermitteln, wozu man Kennfelder wie die von Albring [19] oder Sovran und Klomp [20] (s. a. Abbildung 5.5) verwenden kann. Hier ist das Flächenverhältnis über Diffusorlängen, bezogen auf die Eintrittsbreite, aufgetragen. Im Kennfeld werden Linien gleichen statischen Druckanstiegs dargestellt. Die Werte gelten immer nur für eine festgelegte Dicke der Eintrittsgrenzschicht, denn von ihr ist der mögliche Druckanstieg abhängig. Im Beispiel sind es 5% Blockierung am Eintritt, was bedeutet, daß der Strömungsquerschnitt aufgrund der Verdrängungsdicke um 5% kleiner ist als der geometrisch vorgegebene. Wichtig ist noch die experimentell ermittelte Kurve, die für eine gegebene bezogene Diffusorlänge das Flächenverhältnis angibt, bei dem der statische Druckanstieg maximal wird. Wird das Flächenverhältnis weiter vergrößert, so ergibt das nur einen größeren Anteil an abgerissener Strömung bei gleichem oder sogar kleinerem Druckanstieg.

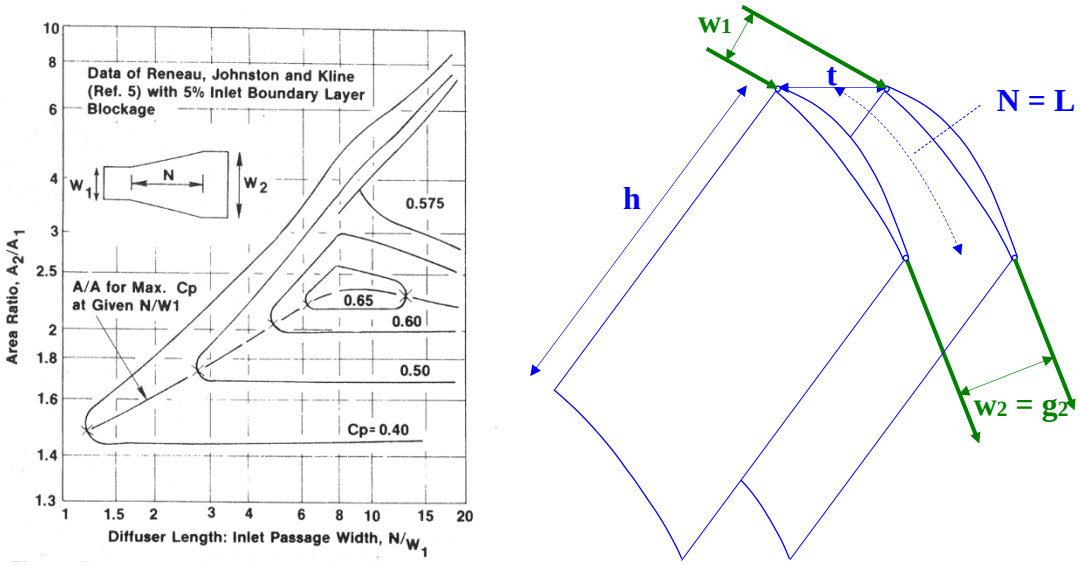


Abbildung 5.5: Diffusor-Analogie für Verdichterschaufeln, Bild links aus [15] © ASME

Koch versucht, diese Erfahrungen auf Verdichter zu übertragen. Dabei stellt er als erstes fest, daß sich für seine Anwendung das Flächenverhältnis nicht allein aus der Schaufelgeometrie ergibt. Dieses wird zum Beispiel größer, wenn die Strömung zu höheren Inzidenzwinkeln und kleineren Durchflußzahlen hin gedrosselt wird. Was sich bei unterschiedlichen Drosselzuständen allerdings kaum ändert, ist die senkrecht durchströmte Austrittsfläche. Hieraus folgt zweierlei.

Zum einen muß als unabhängiger Abszissenparameter eine Strömungskanallänge, bezogen auf eine Austrittsbreite gebildet werden.

Zum zweiten muß sich aus dieser Größe und nicht etwa aus dem Flächenverhältnis der maximal mögliche Druckanstieg bestimmen lassen, der ja gleichzeitig die Grenze des stabilen Arbeitsbereiches darstellt.

Diese Überlegungen bilden die Grundlage für die Diffusoranalogie Kochs in [15]. Koch stellt dort schließlich auch eine Kurve (siehe Abbildung 5.6) vor, die für die vorgegebene Geometrie einer Verdichterstufe vorhersagen kann, welcher Druckanstieg bzw. welcher Enthalpieanstieg in ihr erreichbar ist. An physikalischen Größen sind nur wenige Mittelschnittdaten erforderlich, was den

Vorteil dieses Modells für Vorentwurfsphasen neuer Stufen hervorhebt. Kochs Verfahrensweg soll nachfolgend beschrieben werden.

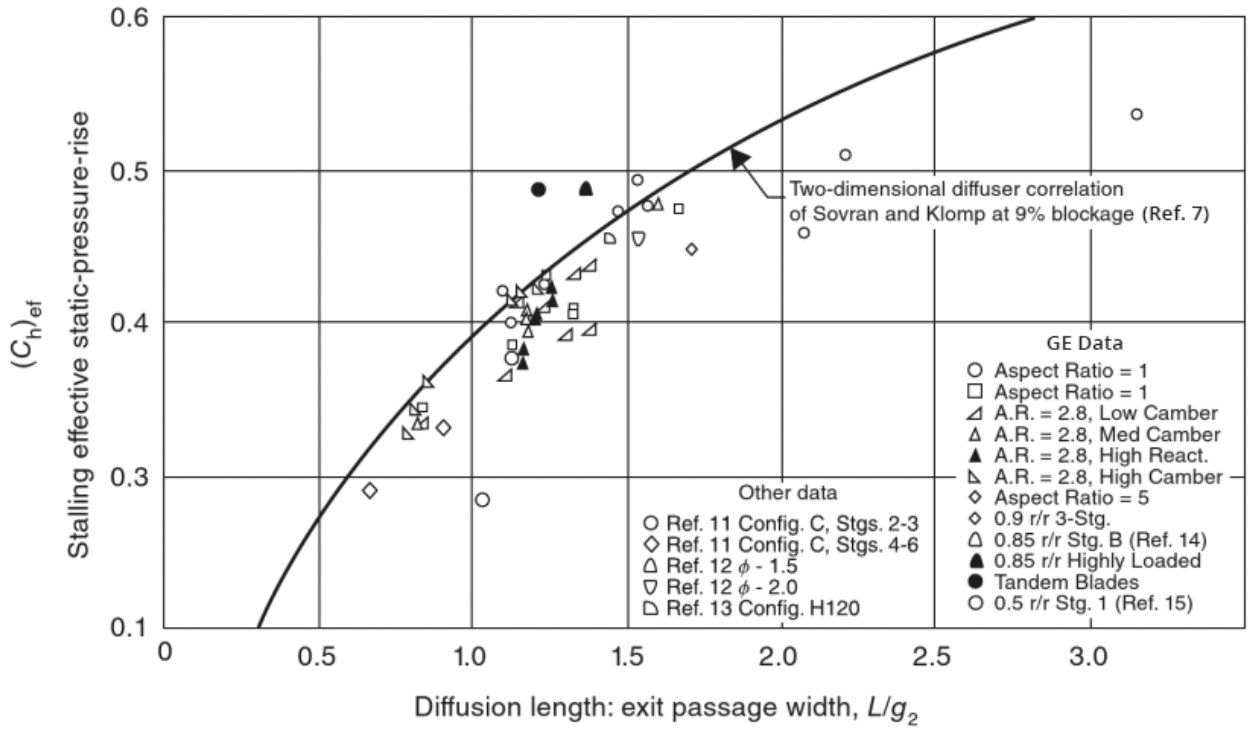


Abbildung 5.6: Koch'sche Korrelation für die Stabilitätsgrenze [15] © ASME

Als Abszissenparameter wird die Länge l der kreisbogenförmigen Skelettlinie einer Schaufel gewählt, welche auf die Schaufelkanalweite am Austritt g_2 bezogen wird. Weil Koch seine Betrachtungen immer auf gesamte Stufen bezieht, mittelt er die Werte von l/g_2 aus Laufrad und Leitrad und wichtet sie mit den kinetischen Energien am jeweiligen Gittereintritt.

$$\frac{l}{g_2} = \frac{\frac{l_{LA}}{g_{2LA}}\frac{w_1^2}{2} + \frac{l_{LE}}{g_{2LE}}\frac{c_1^2}{2}}{\frac{w_{1LA}^2}{2} + \frac{c_{1LE}^2}{2}} \tag{5.6}$$

In Abbildung 3.1 sind die Formeln angegeben, nach denen sich l und g_2 ermitteln lassen.

Kochs Stabilitätskriterium ist nun ein Enthalpiekoeffizient C_h, der sich aus der statischen Enthalpieerhöhung der Stufe entlang der Isentropen ergibt. Enthalpieänderungen, die durch unterschiedliche Umfangsgeschwindigkeiten auf der Stromlinie am Ein- und Austritt des Laufrades bedingt sind, werden davon abgezogen, denn sie haben mit der Physik des Abreißens der Strömung nichts zu tun. Der sich ergebende Wert wird, ebenso wie l/g_2, auf die kinetischen Energien am Eintritt bezogen.

$$C_h = \frac{\Delta h_s - \Delta\frac{u^2}{2}}{\frac{w_{1LA}^2}{2} + \frac{c_{1LE}^2}{2}} \tag{5.7}$$

Die Verdichter, die Koch in seine Stabilitätsuntersuchungen einbezieht, haben unterschiedlichste Daten.

- Nabenverhältnis am Eintritt von 0,40 bis 0,92
- l/g_2 von 0,65 bis 3,5
- Machzahlen am Eintritt von 0,1 bis 1,6
- Reaktionsgrade von 0,4 bis 1,1
- Seitenverhältnisse (aspect ratios) h/s von 0,35 bis 5,0
- Gitterdichten s/t von 0,6 bis 3,0
- Staffelungswinkel von 22° bis 51°
- Wölbungswinkel von 31° bis 36°
- Radialspiele von 0,7 bis 3,4% der Schaufelhöhe
- Stufenzahlen bis hoch zu 16

Koch versucht, die Funktion $C_h(l/g_2)$ in gute Übereinstimmung mit der Sovran/Klomp Korrelation zu bringen. Er zeigt, daß seine Daten für die Sovran/Klomp Kurve bei 9% Blockierung am Eintritt die beste Genauigkeit erzielen (Abbildung 5.6). Dennoch ist der Streubereich groß, was Koch mit unterschiedlichen Reynoldszahlen (gebildet aus Eintrittsgeschwindigkeit und Sehnenlänge des Laufrades) sowie verschiedenen Radialspielen und Axialspalten bei den einzelnen Verdichtern begründet. Abbildung 5.7, Abbildung 5.8 und Abbildung 5.9 zeigen die interpolierten Korrekturfunktionen f1, f2 und f3. Die Funktionen werden verwendet, um das ermittelte C_h auf bestimmte Bezugswerte umzurechnen:

- f1 $\rightarrow$ Reynoldszahl $Re = 1{,}3 \cdot 10^5$
- f2 $\rightarrow$ Radialspiel $\varepsilon/g = 0{,}055$
- f3 $\rightarrow$ Axialspalt $\Delta z/t = 0{,}3$

Es wird der Quotient $\frac{C_h}{f1 \cdot f2 \cdot f3}$ gebildet. Hiernach liegen die Pumpgrenzpunkte schon in einem engeren Bereich der Sovran/Klomp Kurve aus Abbildung 5.6.

Abbildung 5.10 zeigt die interpolierte Vergleichsfunktion zur Abbildung 5.6.

Das Auswerteprogramm benutzt die Korrekturfunktionen und nähert sich den veröffentlichten Kurven von Koch mit Polynomen vierten Grades an. Vergleichspunkte aus den veröffentlichten Kurven sind in den Abbildungen besonders gekennzeichnet. Die angezeigten Polynomkoeffizienten in den Abbildungen sind gerundet. Die exakten Koeffizienten können im Programmlisting nachgeschlagen werden.

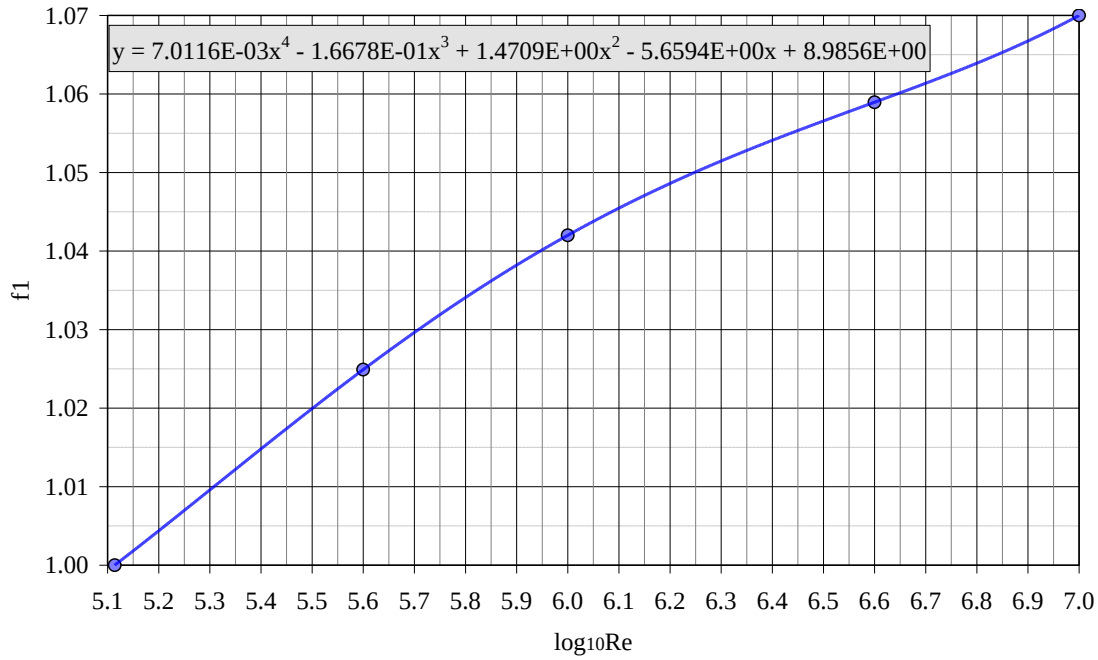


Abbildung 5.7: Korrekturfunktion für die Reynoldszahl als Polynom 4. Grades

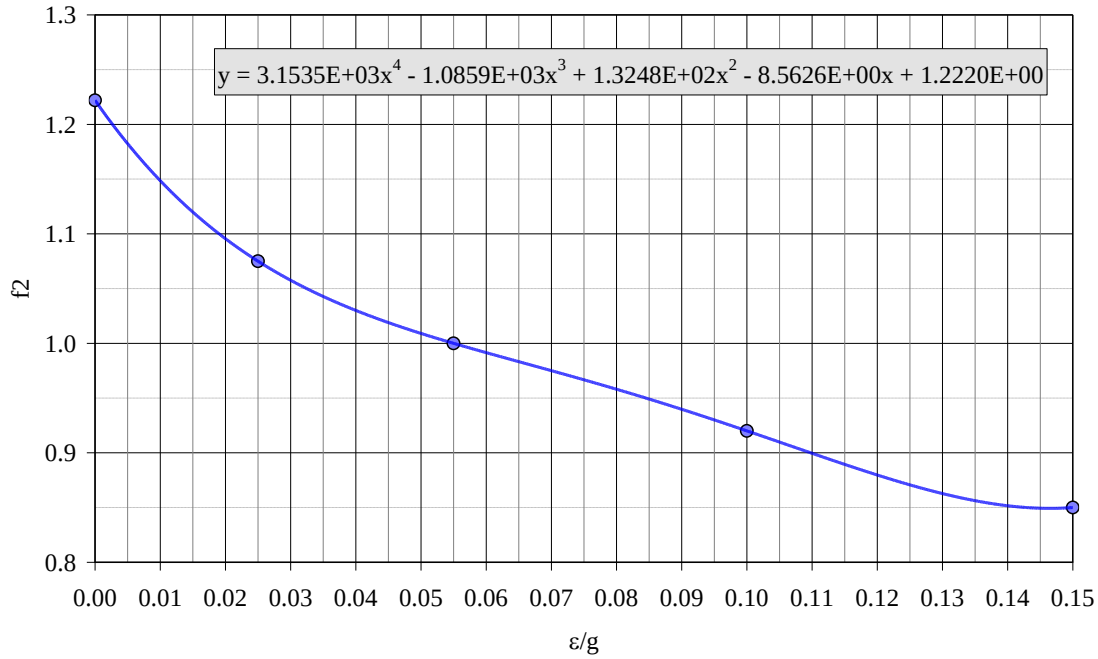


Abbildung 5.8: Korrekturfunktion für die Radialspiele als Polynom 4. Grades

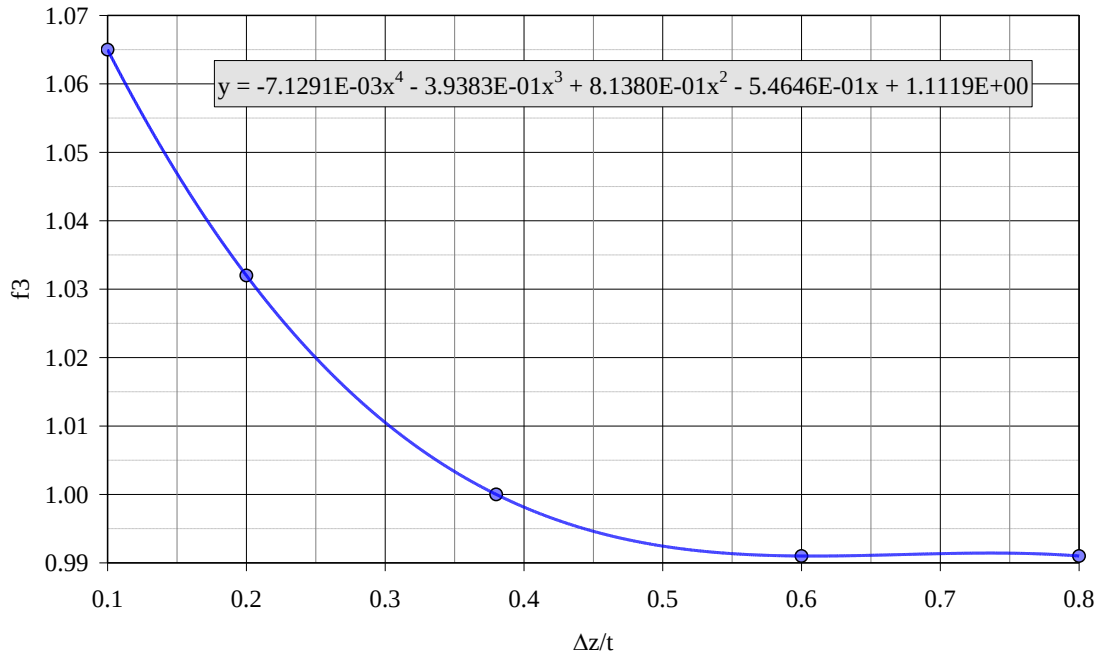


Abbildung 5.9: Korrekturfunktion für die Axialspalte als Polynom 4. Grades

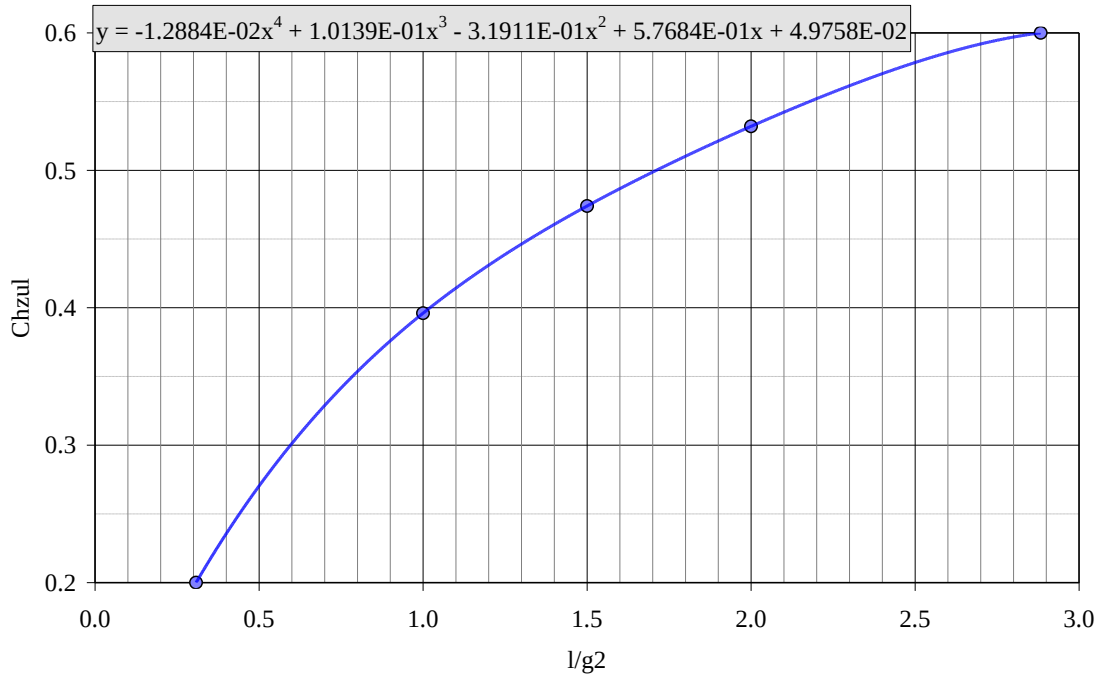


Abbildung 5.10: Vergleichsfunktion zur Abbildung 5.6 als Polynom 4. Grades

Für den Autor haben sich bei den Kochkorrekturen folgende Schwierigkeiten ergeben:

- Die Reynoldszahlen der untersuchten Verdichter liegen deutlich über denen, die Koch in seiner Korrektur berücksichtigt. Der Funktionsverlauf ist deshalb mittels Kurvenschablone soweit verlängert worden, daß er auch den Bereich von 10^6 bis 10^7 überstreicht. Wegen des hohen Grades des gebildeten Polynoms nimmt dabei der Anstieg der Funktion in diesem extrapolierten Bereich leider wieder etwas zu. In der Realität dürfte er weiter abnehmen; allein der Unterschied hat minimale Auswirkungen, wie an den Korrekturfaktoren in dem Bereich zu sehen ist.

- In der Dynatech Rechnung tauchen keine Radialspiele auf. Vereinfachend rechnet das Programm STAB an dieser Stelle mit der Annahme weiter, daß das Spiel 1% der Schaufelhöhe beträgt.
- Auf Axialspalte kann nur über die Eingabedatei zur Dynatech Rechnung zurückgegriffen werden, was bedeutet, daß etwaige Leitschaufelverstellungen unbeachtet bleiben.
- Die Bezugsgröße von Kochs Korrekturfunktion für die Radialspalte ist nicht eindeutig erklärt. Er bezieht das Radialspiel ε des Laufrades auf eine mittlere Kanalbreite g, ohne diese näher zu beschreiben. Das Programm STAB mittelt deshalb g_2 von Lauf- u. Leitrad.

Koch gibt noch eine letzte Korrektur für C_h an, die sich daraus ergibt, daß bei kleinen Staffelungswinkeln der mögliche Enthalpieanstieg kleiner ist als bei großen, was sich mit der Diffusoranalogie nicht erklären läßt. Dieser qualitativ neue Effekt hängt mit der Fähigkeit oder Unfähigkeit einer Stufe zusammen, einer Grenzschichtströmung mit schwachem Impuls beim Wechsel des Bezugssystems wieder Energie zuführen zu können. Zur Veranschaulichung des Problems, das nur auf Turbomaschinen zutrifft, dient die Abbildung 5.11.

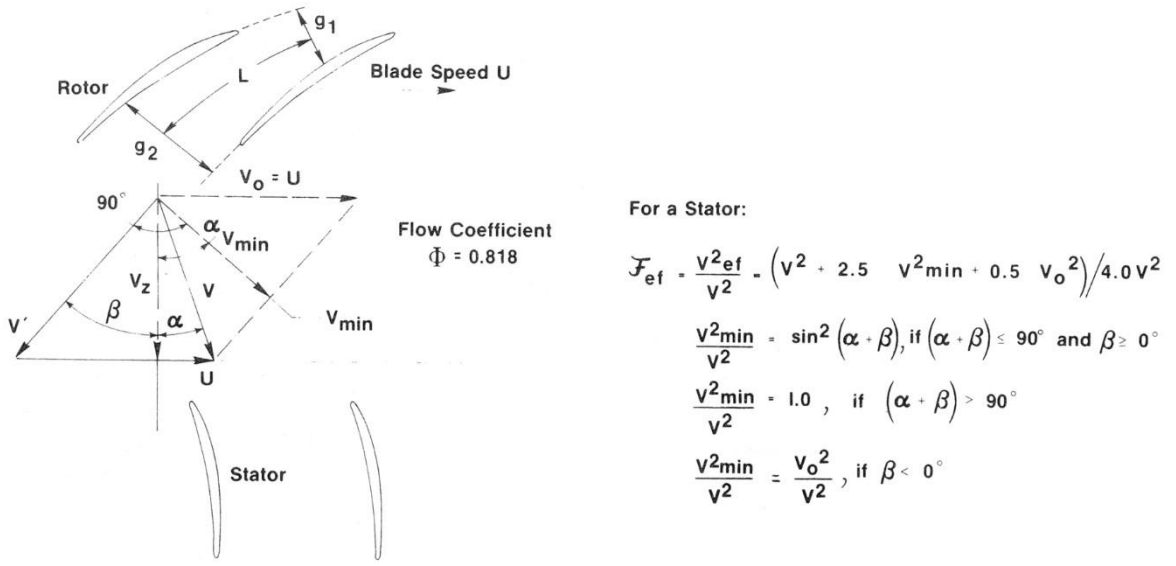


Abbildung 5.11: Korrekturfaktor F_{ef} für die kinetischen Energie [15] © ASME

Mit durchgehenden Linien ist das Geschwindigkeitsdreieck eingezeichnet, daß sich zwischen Laufrad und Leitrad in der Kernströmung ergibt. Für die Grenzschichtströmung, welche das Laufrad mit dem gleichen Winkel β verlässt wie die Kernströmung, kann das Geschwindigkeitsdreieck im Gitternachlauf ganz anders aussehen. Die Absolutgeschwindigkeit ist hier reduziert, der Winkel α dabei gleichzeitig vergrößert. Je größer der relative Impulsverlust im Laufrad ist, desto größer wird α. Der Impuls der auf das Leitrad auftreffenden Strömung sinkt unterdessen bis zu einem Winkel α_{min} ab, wie in der Abbildung zu sehen ist. Dieser Punkt tritt genau dann ein, wenn $\alpha_{min}+\beta = 90°$. Bei noch größeren Verlusten als denen, die zu α_{min} führen, würde der absolute Impuls wieder größer werden und sich der Umfangsgeschwindigkeit u annähern.

Stufen, die große Durchflußzahlen und kleine Staffelungswinkel aufweisen, haben die Eigenschaft, daß die Absolutgeschwindigkeit c_{min} viel kleiner ist, als das c der Kernströmung, wenn $\alpha+\beta << 90°$ ist. Der erreichbare dynamische Druck tendiert durch die impulsschwache Strömung zu sehr kleinen Werten. So läßt sich erklären, daß eben beschriebene Stufen unter sonst gleichen Bedingungen viel abreißgefährdeter sind als andere. Umgekehrt können Stufen mit großem Staffelungswinkel und

kleinen Durchflußzahlen durchaus einen Impulsgewinn für die Grenzschichtströmung erzielen, wodurch die Abreißgefahr sinkt.

Kochs letzte Korrektur betrifft deshalb die Analyse der Geschwindigkeitsdreiecke und die Berücksichtigung der minimalen Geschwindigkeit, die im neuen Bezugssystem auftreten kann. Die kinetischen Energien am Eintritt werden durch diese Funktion, die er mit F_{ef} bezeichnet, in effektive kinetische Energien umgerechnet. Im Nenner von Gleichung (5.7), die die Berechnung von C_h zeigt, ist das zu berücksichtigen. Beide dynamischen Enthalpien in Gleichung (5.7) müssen mit dem entsprechenden F_{ef} multipliziert werden. Wie F_{ef} zu ermitteln ist, kann am Beispiel des Leitrades in Abbildung 5.11 gesehen werden.

Bei der Beurteilung der Stabilität nach Koch wird wie folgt verfahren. Stufe für Stufe wird im Mittelschnitt l/g_2 nach Gleichung (5.6) und C_h nach Gleichung (5.7) berechnet. Der Nenner von C_h wird mit F_{ef} für Lauf- und Leitrad korrigiert. Anschließend werden die Korrekturen von C_h für die Reynoldszahlen und für die radialen Spiele des Laufrades sowie die axialen Spalte zwischen Lauf- und Leitrad durchgeführt. An dieser Stelle sei nochmals an die Einschränkungen erinnert, die weiter oben beschrieben sind. Schließlich wird aus l/g_2 das zulässige C_h ermittelt und mit dem tatsächlichen C_h verglichen. Für jede Stufe kann C_h durch seinen zulässigen Wert dividiert und über dem Massenstrom aufgetragen werden. Mittels Interpolation wird dann der größte Massenstrom errechnet, bei dem der Quotient größer oder gleich eins ist. Der Vergleich sämtlicher Stufen ergibt danach den größten kritischen Massenstrom nach Koch.

5.4 Vergleich der Modelle

Alle drei Modelle weisen gewisse Gemeinsamkeiten auf. Sie bieten die Möglichkeit, in den Verdichter "hineinzugehen", so daß man nicht nur auf eine gerechnete Gesamtcharakteristik bei der Beurteilung der Stabilitätsgrenze angewiesen ist.

Traupel und Koch betrachten jeweils eine gesamte Stufe, wobei sich ihre Kriterien darin ähnlich sind, daß sie jeweils den isentropen Enthalpieanstieg untersuchen. Während Traupel direkt die Stufencharakteristik bewertet, korreliert Koch den Arbeitsumsatz mit einem Geometrieparameter.

Lieblein untersucht dagegen jedes Gitter für sich und verwendet dabei als kennzeichnenden Parameter die aerodynamische Gitterbelastung.

Lieblein und Traupel betrachten jeweils die radiale Verteilung ihrer Kenngröße und müssen lokale Überschreitungen besonders im Seitenwandbereich zulassen. Die hierbei zu treffenden Annahmen sind noch recht willkürlich und können durch systematisches Probieren gut an experimentelle Erfahrungen angenähert werden. Während sich aus Liebleins Vorstellungen ergibt, daß die Instabilität häufig von der Nabe ausgeht, führen Traupels Betrachtungen dazu, daß zumeist außen der kritische Bereich liegt.

Koch umgeht dieses Problem, denn er bewertet die Stabilität lediglich anhand von Mittelschnittdaten. Der Einfluß der Randzonen geht aber implizit in die Betrachtungen ein, die sich aus Meßdatenanalysen an unterschiedlichsten Verdichtern ergeben.

In Abschnitt 8 wird gezeigt, wie die Modelle im Vergleich zur tatsächlichen Stabilitätsgrenze von verschiedenen Verdichtern liegen.

6 Der Einfluß der Vielstufigkeit auf die Stabilitätsgrenze von Verdichtern

Es sei π_{R0} das Ruhedruckverhältnis eines vielstufigen Verdichters im Auslegungspunkt.

Wenn das Druckverhältnis unter π_{R0} sinkt, was z.B. bei niedrigeren Drehzahlen als der Nenndrehzahl eintreten kann, so nimmt die Dichte des Fluids weniger stark zu, weshalb die Durchflußzahl entlang der Maschinenachse ansteigt und schließlich, beginnend mit der letzten Stufe, die Schluckgrenze erreicht wird. Ein Betrieb jenseits der Stabilitätsgrenze kann nur durch die ersten Stufen verursacht werden, denn dort sind die Durchflußzahlen am kleinsten. Bei genügend kleinem Massenstrom fallen sie hier zuerst unterhalb des kritischen φ, das die Stabilität der Stufe begrenzt.

Ist hingegen $\pi_R > \pi_{R0}$, so nimmt die Dichte entlang der Maschinenachse mehr zu als angestrebt. Die Durchflußzahl φ fällt deshalb wegen der Kontinuität bis zur letzten Stufe immer weiter ab und kann dort das die Stabilität abgrenzende φ am ehesten unterschreiten. Für diesen Fall, der im Bereich größerer oder nur wenig kleinerer Drehzahlen als der Nenndrehzahl auftreten kann, wird die Stabilitätsgrenze ausgehend von der letzten Stufe bestimmt. Die Verschiedenheit der die Stabilität gefährdenden Stufen ist Ursache dafür, daß die Stabilitätsgrenze keinen gleichmäßigen Verlauf im Kennfeld eines vielstufigen Verdichters hat.

Tritt der zuerst beschriebene Fall ein, bei dem die vorderen Stufen eines Verdichters instabil werden, so ist es durchaus möglich, daß der Verdichter als ganzes trotzdem noch stabil fördert. Mechanikov [21] schreibt dazu weiter, daß die hinteren Stufen kaum Arbeit verrichten und so eine stabilisierende Wirkung auf das gesamte System ausüben. Bei kleineren Drehzahlen (ca. 0,3-0,4- faches der Nenndrehzahl) kommt es bei seinen Untersuchungen sogar zu solch großen Anstiegen von φ, daß ein Druckabfall hervorgerufen wird und die letzten Stufen als Turbine arbeiten. Der beschriebene Druckabfall kann größer sein als der gesamte frühere Druckgewinn. Entnahmen nach den ersten Stufen wirken beim Anfahren stabilitätsfördernd. Zufällige Erregungen z.B. beim Öffnen von Ventilen zur Pumpgrenzverhütung oder beim Durchfahren bestimmter Drehzahlbereiche beeinträchtigen die Stabilität. Burmaskov [22] erwähnt Fälle, in denen ein Abreißen in der ersten Stufe beginnt und sich dann durch den gesamten Kompressor fortpflanzt. Entnahmen haben hier den abrißgefährdeten Drehzahlbereich verringert; Leitschaufelverstellungen sind kaum von Einfluß gewesen.

Suter/Späti [23] verwerfen die Vorstellung, daß sich Instabilitäten in den letzten Stufen eines Verdichters nicht mehr ausgleichen lassen und der Verdichter als ganzes instabil wird. Für höhere Betriebsdruckverhältnisse als denen im Auslegungspunkt ist das interessant. Sie schlagen als Pumpgrenzkriterium eine mittlere Durchflußzahl vor, welche sich aus Aufsummierung derer für die Stufen und Division durch die Stufenzahl ergibt. Für die verschiedensten Drehzahlen variiert dieser Wert nach Suter/Späti nur wenig.

Alle Fälle unterstreichen nur das Komplizierte des Systems und zeigen die Unzulänglichkeiten der in 5.1, 5.2 und 5.3 beschriebenen Methoden. Dort wird sofort der gesamte Verdichter als instabil bewertet, wenn in einem einzigen Gitter oder einer einzigen Stufe, gleich wo, das Kriterium versagt. Dieser Gesichtspunkt sollte in jedem Falle Beachtung finden. Rezepte, die diesen Mangel der untersuchten Modelle ausgleichen könnten, gibt es leider noch nicht. Mit der angewandten isolierten Betrachtung eines Gitters oder einer Stufe in einer mehrstufigen Umgebung dürfte man aber auf der sicheren Seite liegen.

7 Erläuterungen zum Programm STAB zur Bestimmung der Stabilitätsgrenze

Der Source Code zum Programm STAB ist im Anhang gelistet, gleichfalls die Prozedur PROC.STAB, über die das Programm gestartet wird, sowie ein Beispiel für die im Ergebnisfile $(NAME.TYP).STAB.DTA abgelegten Daten.

STAB läuft über eine Prozedur, da dadurch eine bequeme Dateiarbeit möglich ist. Es muß auf die Eingabedatei $(NAME.TYP) und die Ergebnisdatei $(NAME.TYP).PLOT einer Dynatech Rechnung zurückgreifen können. STAB setzt voraus, daß die Dynatech Rechnung erfolgreich, also ohne Abbruch, durchgeführt wurde. Eine sinnvolle Auswertung ist nur unter folgenden Bedingungen möglich.

- Wenigstens drei Betriebspunkte müssen gerechnet worden sein. Liegt die Zahl der gerechneten Betriebspunkte über zehn, so werden nur die ersten zehn ausgewertet.
- Sämtliche Punkte sollten bei gleicher Drehzahl liegen.
- Die vorgegebenen Massenströme müssen entweder monoton fallen oder steigen und sollten in gleichen Abständen voneinander liegen.

STAB ist ein unabhängiges Fortranprogramm von wenigen Sekunden Laufzeit. Es wurde absichtlich nicht in die Dynatech Rechnung implementiert, um es besser von den vorgeschalteten Rechnungen abgrenzen und gegebenenfalls verändern zu können. Es enthält keine Sprunganweisungen und läßt sich so in seinem Ablauf gut "von oben nach unten" verfolgen. Sämtliche Größen sind eingangs erläutert. Das Programmlisting ist mit umfangreichen Kommentaren ausgestattet.

Es sei eine Dynatech Rechnung wie oben beschrieben durchgeführt worden. Zum Einsatz des Programms STAB muß der Nutzer als erstes die Prozedur mit

```
DO $TGMV.PROC.STAB
```

aufrufen. Anschließend wird mit

```
NAME
```

die Benutzerkennung abgefragt, unter der die Dynatech Dateien abgelegt sind. Das kann z.B. TGMV sein. Nachfolgend erscheint

```
TYP
```

auf dem Bildschirm, und hier muß der Name der Eingabedatei zur Dynatech Rechnung eingegeben werden.

Weitere Vorgaben sind nicht nötig.

Die Prozedur öffnet die Files $(NAME.TYP) und $(NAME.TYP).PLOT sowie eine weitere Datei $(NAME.TYP).STAB.DTA, in welcher die Ergebnisse aus STAB abgespeichert werden. Dazu zählen

- Beschreibung des Verdichters
- Beschreibung der Betriebspunkte

- Aufführung der einzelnen Rechenebenen mit
    - Stromliniennummer
    - Stromlinienradius
    - äquivalenter Diffusionszahl nach Lieblein
    - Druckzahl und Durchflußzahl nach Traupel
    - Enthalpiekoeffizienten nach Koch
- isentroper Wirkungsgrad der Beschaufelung
- kritische Massenströme, entsprechende Ruhedruckverhältnisse und Kurzbeschreibung der zugehörigen Ebenen

Zusätzlich werden temporäre Dateien #STAB.PLOT.1 bis #STAB.PLOT.17 eröffnet. Die Nummer gibt die Stufennummer an, für die die Datei bestimmt ist. Jede Datei enthält für ihre Stufe alle nach Traupel errechneten separaten φ und ψ. Über das bei Siemens vorhandene Grafikprogramm XYPLOT kann unter Vorgabe von z.B. #STAB.PLOT.1 das Kennfeld $\psi(\varphi)$ für die separaten Stufenelemente der ersten Stufe sichtbar gemacht werden. Ein Beispiel dafür liefert die Abbildung 5.3 im Abschnitt 5.2.

Durch den LOGOFF-Befehl werden alle temporären Dateien gelöscht!

Jetzt zum eigentlichen Programm, das nach Eröffnung der Dateien gestartet wird.

Folgende Größen werden aus dem Ergebnisfile der Dynatech Rechnung übernommen:

- Stationszahl je Stromline
- Stromlinienanzahl
- Zahl der Lauf-, Leit- und Vorleiträder
- Zahl der Betriebspunkte

sowie für jeden Punkt

- Gesamtdruckverhältnis
- Massenstrom
- Verhältnis der gerechneten Drehzahl zur Nenndrehzahl
- Sehnenlängen an Nabe und Gehäuse
- Radien der Stromlinien am Ein- und Austritt der Gitter
- äquivalenter Schaufelwinkel am Austritt
- Wölbungswinkel
- aktueller sowie Referenzinzidenzwinkel
- Axialgeschwindigkeit am Austritt
- statischer Druck und statische Temperatur am Austritt
- Zu- und Abströmwinkel der Strömung
- Eintrittsgeschwindigkeit
- Druckzahl und Durchflußzahl
- isentroper Wirkungsgrad

Zusätzlich werden aus dem Eingabefile die Axialspalte über die axialen Schaufelkoordinaten an Nabe und Gehäuse eingelesen. Eventuelles Auf- oder Zudrehen der Schaufeln bleibt bei den Axialspalten unberücksichtigt.

STAB arbeitet zuerst jeden Betriebspunkt für sich ab, bevor es die Ergebnisse der einzelnen Punkte untereinander vergleicht. Einige Größen müssen nach dem Einlesen erst in eine für das Programm brauchbare Form umgeschrieben werden. Winkel werden ins Bogenmaß umgerechnet und mit positivem Vorzeichen versehen (Das negative Vorzeichen ist bei Dynatech Kennzeichen der Strömungswinkel am Laufrad, nicht jedoch der Schaufelwinkel des Laufrades.). Der Druck wird in Pascal umgerechnet; φ und ψ werden auf den Radius der mittleren Stromlinie bezogen.

Die eigentliche Auswertung kommt auf wenigen Programmseiten unter und soll vom programmtechnischen Aspekt nur kurz angerissen werden.

Die äquivalente Diffusionszahl Liebleins wird Stromlinie für Stromlinie und Gitter für Gitter berechnet.

Stufenweise und ohne Beachtung des Vorleitrades wird bei den Kriterien von Traupel und Koch vorgegangen.

Für Traupels Vorschrift werden zu den separaten φ und ψ noch die jeweiligen integralen Werte durch Massenstrommittlung bestimmt. Dazu wird der Massenstrom zwischen zwei benachbarten Stromröhren ermittelt und mit dem Mittelwert der zugehörigen φ bzw. ψ multipliziert. Danach wird über alle betrachteten Stromröhren aufsummiert (wandnahe Schichten gehen nicht ein) und durch den eingeschlossenen Massenstrom dividiert. Bemerkt sei, daß die integralen Ergebnisse programmintern nicht weiter verwendet werden, was mit der von Traupel abweichenden Interpretation der Kennlinien durch den Autor zusammenhängt (s. Abschnitt 5.2.).

Als nächstes werden zulässiger und tatsächlicher Enthalpiekoeffizient nach Koch errechnet. Der zulässige Wert ergibt sich aus der geometrischen Größe l/g_2 (Gleichung (5.6) und Abbildung 5.6). Der tatsächliche Wert wird nach Gleichung (5.7) ermittelt und sogleich nach Lage der Geschwindigkeitsdreiecke korrigiert. Dazu dient das Unterprogramm FE, welches die Rechenoperationen durchführt, die in Abbildung 5.11 aufgezeigt sind. Hiernach wird der tatsächliche Enthalpiekoeffizient beginnend mit der Reynoldszahl korrigiert. So, wie es Koch vorschlägt, erfolgt dann die Radialspiel- und Axialspaltkorrektur.

Der Vergleich der Betriebspunkte ist mit drei Interpolationsprogrammen gekoppelt, die alle davon ausgehen, daß mindestens drei Punkte zur Interpolation zur Verfügung stehen. Alle bilden Polynome zweiten Grades, und von der Spezifik des Kriteriums hängt ab, welches der drei Unterprogramme zum Einsatz kommt.

Beim Traupelkriterium wird als erstes IP2MAX aufgerufen. Es untersucht, ob eine separate Kennlinie einen Betriebspunkt hat, der ein maximales ψ aufweist und dennoch nicht am Rande des Wertebereiches liegt. Durch diesen Punkt und seine Nachbarpunkte wird dann die Polynomfunktion gelegt und das lokale Maximum mit zugehörigem Abszissenwert gesucht. Dieser wird als PHIMIN übergeben. Seine Position innerhalb der φ der gerechneten Betriebspunkte ermöglicht mit dem Unterprogramm IP2, den Massenstrom innerhalb der gerechneten Punkte zu ermitteln, bei dem PHIMIN auftritt. Dieser Massenstrom wird als MT solange weitergeführt, bis sich bei Betrachtung weiterer Stufen ein noch größerer Wert ergibt. MT = 0 bedeutet, daß bis dato kein lokales Maximum aufgetreten ist.

Folgende Schwierigkeit kann auftreten und zu Extrapolationen führen. Bei zu kleinen Massenströmen wird φ, nachdem es kleiner wurde, plötzlich wieder größer. Das Interpolationsprogramm sucht dadurch unter ungünstigen Bedingungen seine Werte in der falschen Richtung. Sollten Extrapolationen angezeigt werden, so ist es ratsam, die Kennlinienverläufe über die eingangs

erwähnten Plotdateien zu verfolgen. Gegebenenfalls ist der Massenstrom zu vergrößern. Weiterhin kann es sein, daß die zum Schluß angezeigte kritische Stufe numerisch gesehen nur minimal höher belastet ist als eine andere. Somit sollte die Stufe nicht als absolut gefährlichste und der ermittelte Massenstrom, besonders bei flachen Kennlinien, nicht als der exakt die Stabilität begrenzende angesehen werden.

Beim Kochkriterium kommt das Interpolationsprogramm IP2CH1 zum Einsatz, das im vorgegebenen Massenstrombereich den größten Wert sucht, bei dem der Enthalpiekoeffizient gerade noch kleiner ist als sein zulässiger Vergleichswert. Wird MK = 0 ausgegeben, so bedeutet das, daß nirgends das Kriterium übertreten wurde. Liegt MK etwas über dem größten vorgegebenen Massenstrom, so befinden sich alle Punkte im instabilen Bereich, und eine Extrapolation wird am Bildschirm angezeigt.

Das Maximum des isentropen Wirkungsgrades wird mit IP2MAX bestimmt.

Die Massenstrombewertung nach Lieblein erfolgt ohne Interpolation und gibt deswegen nur an, bis zu welchem gerechneten Massenstrom Instabilität herrscht. Es kann einzig empfohlen werden, die Abstände zwischen den Massenströmen klein zu halten, um ein genaues Ergebnis zu erzielen.

Für jeden errechneten kritischen Massenstrom wird über IP2 das zugehörige Ruhedruckverhältnis ermittelt. Ruhedruckverhältnis und isentroper Wirkungsgrad gelten nur für die gesamte Beschaufelung, nicht jedoch für die gesamte Maschine mit Einlaufgehäuse und nachgeschaltetem Diffusor. Andere Werte werden in der Dynatech Ergebnisdatei leider nicht abgespeichert und sind deshalb nicht greifbar.

Nochmals sei erwähnt, daß alle Extrapolationen nur am Bildschirm angezeigt werden. Steht zur Auswertung nur noch die STAB Ergebnisdatei zur Verfügung, so ist es unerläßlich zu prüfen, ob die kritischen Punkte tatsächlich innerhalb der vorgegebenen Betriebspunkte liegen. In anderen Fällen sind die Daten nicht brauchbar, und die Vorgaben müssen abgeändert werden, wozu freilich neue Dynatech Rechnungen nötig sind.

Mit dem Programmende von STAB werden sämtliche Dateien geschlossen, und die Prozedur PROC.STAB ist beendet.

8 Vergleich gerechneter und gemessener Daten für ausgewählte vielstufige Axialverdichter

Zur Bewertung der Stabilitätskriterien wurden für drei mehrstufige Verdichter Dynatech Rechnungen durchgeführt und Kennlinien ermittelt. Die Rechenergebnisse wurden mit dem Programm STAB ausgewertet, das nach allen zuvor beschriebenen Modellen die Stabilitätsgrenze bestimmt. Die Kurvenverläufe sind in Abbildung 8.1, Abbildung 8.2, Abbildung 8.3 aufgetragen. Die Abbildungen beinhalten auch die experimentellen Vergleichskurven zu den gerechneten Kennlinien. Im Versuch ermittelte Pumpgrenzpunkte sind besonders hervorgehoben.

Für jeden Verdichter läßt sich anhand der zugehörigen Tabelle die Ebene ersehen, die nach STAB als kritisch angesehen werden muß.

Im Anhang befinden sich noch Iso-Plotts für die Diffusionszahl D. Sie wurden für Betriebspunkte angefertigt, die in Abbildung 8.1, Abbildung 8.2, Abbildung 8.3 wiederzufinden sind. Der Buchstabe L kennzeichnet im Schriftfeld einen Pumpgrenzpunkt nach dem Liebleinkriterium, W einen Punkt nach dem Wirkungsgradkriterium. Die nachfolgende Zahl gibt die relative Drehzahl n* in Prozent wieder. Die horizontalen Linien stellen die gerechneten Stromlinien dar; die vertikalen Linien grenzen die einzelnen Leit- und Laufräder ab.

8.1 Versuchsverdichter VV94

Der Verdichter VV94 ist von allen drei untersuchten Verdichtern am besten zur Auswertung geeignet. Die Pumpgrenze ist bis hoch zur Nenndrehzahl vermessen. Die Dynatech Rechnungen sind recht genau, was sich aus der kleinen Stufenzahl und den großen Abmessungen des Verdichters ergibt. Hierdurch ist der Einfluß der Seitenwandgrenzschichten nur schwach.

Die gerechneten Kennlinien sagen immer einen größeren erreichbaren Druckanstieg voraus, als tatsächlich verwirklicht werden kann. Je steiler die Kennlinie ist, desto mehr fällt das auf. Bei Nenndrehzahl liegen alle Kriterien sehr dicht und sehr gut, was den Massenstrom anbelangt. Für die Sicherheit eines Kriteriums ist aber das Verdichterdruckverhältnis der entscheidende Parameter, da dieses als Regelgröße verwendet werden kann. Danach sagen Traupel und Lieblein etwas zu hohe π^* als Pumpgrenze voraus. Das Koch- u. das Wirkungsgradkriterium liegen knapp unter der wirklichen Pumpgrenze, wobei das Kochkriterium am konservativsten ist.

Bei kleineren Drehzahlen gehen die Pumpgrenzpunkte wegen der Flachheit der Kennlinien immer weiter auseinander. Die Kriterien nach Koch und Traupel lokalisieren die Pumpgrenze immer auf der instabilen Seite, wobei letzteres für $n^* < 0{,}81$ so weit im instabilen Gebiet liegt, daß es auf den gerechneten Kennlinien nicht erfaßt wird. Das Liebleinkriterium bewegt sich vom leicht instabilen Bereich bei $n^* = 0{,}9$ auf die sichere Seite der Kennlinien bei $n^* = 0{,}81$ bis $n^* = 0{,}6$. Das Wirkungsgradmaximum liegt überall unterhalb der gemessenen Stabilitätsgrenze.

Die Iso-Plotts bei Nenndrehzahl (Abbildung 11.1, Abbildung 11.2) zeigen, daß für das Wirkungsgradkriterium nur der Nabenbereich des letzten Leitrades zu stark belastet ist. Der Punkt, den das Liebleinkriterium vorhersagt, weist bereits Überlastungen im Gehäusebereich des vorletzten Laufrades sowie im Nabenbereich der beiden letzten Leiträder auf. Diese Ergebnisse bestätigen den richtigen Bezug zwischen gerechneten und gemessenen Daten. Die Plotts bei reduzierten Drehzahlen (Abbildung 11.3, Abbildung 11.4) zeigen deutlich, wie die gefährlichen Zonen innerhalb des Verdichters nach vorn wandern. Diese richtige Tendenz gibt auch die Tabelle **8.1** wieder, denn nach

STAB sind bei Nenndrehzahl entweder die letzte oder die vorletzte Stufe kritisch, und bei kleinerer Drehzahl liegen die gefährlichen Ebenen am Eintritt.

Nach der Abbildung 8.1 ist das Wirkungsgradkriterium am besten geeignet, um die Stabilitätsgrenze zu bestimmen. Die Kurve verläuft gleichmäßig und nur bis zu drei Prozentpunkten unterhalb der tatsächlichen Grenze.

relative Drehzahl	Kriterium nach Koch	Lieblein	Traupel
n* = 1,0	3. Stufe	Leitrad 4	4. Stufe
n* = 0,9	3. Stufe	Laufrad 3	4. Stufe
n* = 0,81	3. Stufe	Laufrad 3	4. Stufe
n* = 0,7	1. Stufe	Laufrad 1	($\dot{m}$ zu groß)
n* = 0,6	1. Stufe	Laufrad 1	($\dot{m}$ zu groß)

Tabelle 8.1: Kritische Ebenen für den 4-stufigen Versuchsverdichter VV94

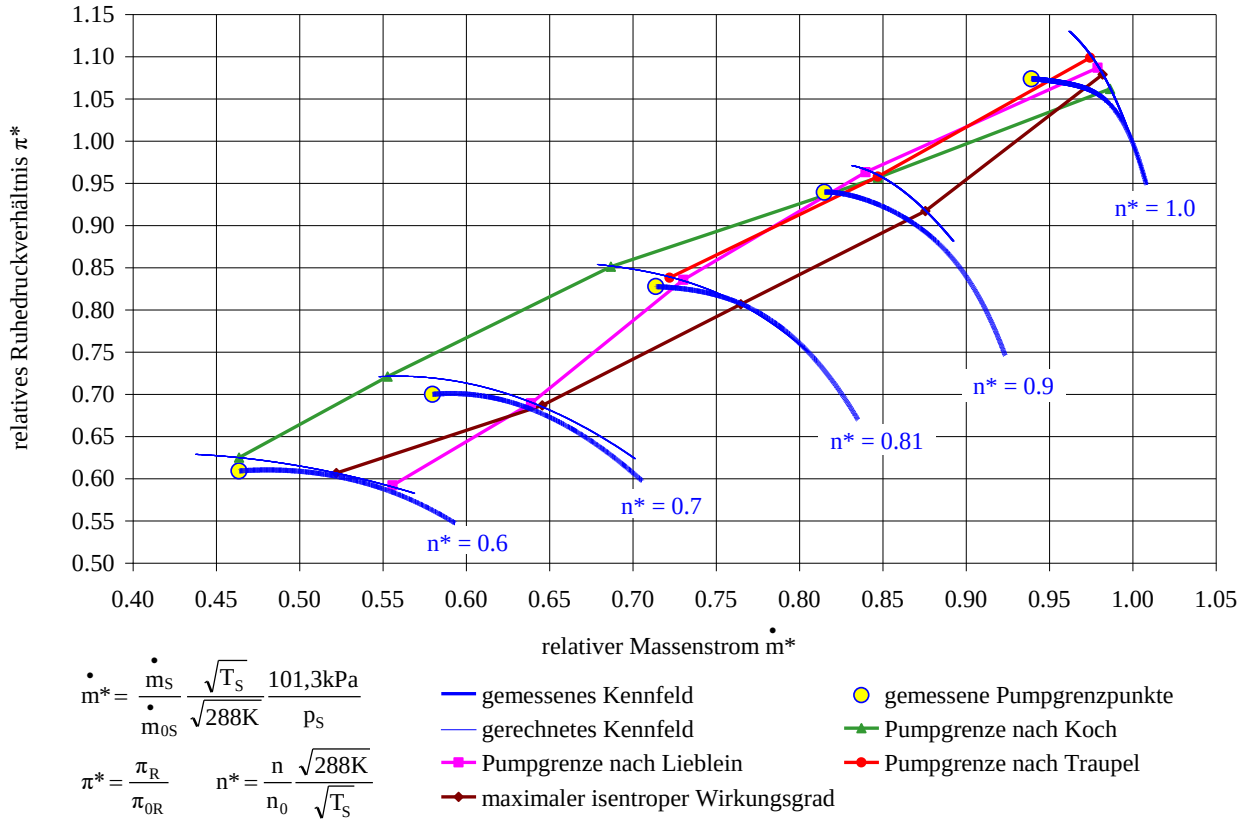


Abbildung 8.1: 4-stufiger Verdichter VV94 mit 3,5° aufgedrehtem Vorleitrad

8.2 Verdichter Vx4.2

Bei dem 17-stufigen Verdichter Vx4.2 wurde die Pumpgrenze nur dreimal bei niedrigen Drehzahlen angefahren. Zur Bewertung der Kriterien bei Nenndrehzahl kann in Anlehnung an das Wirkungsgradkriterium davon ausgegangen werden, daß dort die Pumpgrenze beim ca. 1,2 bis 1,3-fachen vom Auslegungsdruckverhältnis liegt. Die berechneten Modelle sagen im gesamten Bereich zu optimistische Druckanstiege voraus, wobei sie untereinander stark streuen (Abbildung 8.2). Nur das Wirkungsgradkriterium hat einen gleichmäßigen Verlauf und liegt relativ dicht an der Pumpgrenze. Die Auswertung nach Traupel und Lieblein kann nicht im gesamten Drehzahlbereich erfolgen. Bei kleinen Drehzahlen ist nach Lieblein überhaupt kein Betrieb mehr möglich. Bei Nenndrehzahl erwartet Traupel viel zu kleine Massenströme. Erst dort weisen seine Stufenkennlinien lokale Maxima auf.

Es stellt sich die Frage, ob das Kennfeldprogramm nicht viel zu gute Strömungsbedingungen errechnet und dadurch die meisten Pumpgrenzpunkte so weit im instabilen Gebiet liegen. Aus dem Iso-Plott für das Wirkungsgradmaximum bei Nenndrehzahl (Abbildung 11.5) ergibt sich, daß der Nabenbereich der beiden letzten Leiträder schwach gefährdet ist.

Tabelle 8.2 macht die Verlagerung der kritischen Ebenen mit Drehzahlreduzierung nochmals anschaulich. Die Modelle nach Traupel und Koch liefern bei Nenndrehzahl ungenügende Ergebnisse. Beide gehen vom statischen Enthalpieanstieg aus und finden entweder keinen kritischen Punkt bzw. erst dann einen Wert, wenn praktisch nicht zu erreichende Druckverhältnisse erzielt werden sollen.

relative Drehzahl	Kriterium nach Koch	Lieblein	Traupel
n* = 1,0	5. Stufe	Leitrad 16	($\dot{m}$ zu groß)
n* = 0,95	1. Stufe	Laufrad 1	5. Stufe
n* = 0,9	1. Stufe	($\dot{m}$ zu klein)	4. Stufe
n* = 0,85	1. Stufe	($\dot{m}$ zu klein)	3. Stufe

Tabelle 8.2: Kritische Ebenen für den 17-stufigen Verdichter Vx4.2

Die Abbildung 8.2 ist von Siemens KWU nicht zur Veröffentlichung freigegeben.

Abbildung 8.2: 17-stufiger Verdichter Vx4.2 mit 6° aufgedrehtem Vorleitrad (nicht freigegeben)

8.3 Verdichter Vx4.3

Die Ergebnisse unterscheiden sich etwas von denen des Verdichters Vx4.2. Das Wirkungsgradkriterium liegt ab $n^* \geq 0{,}9$ im stabilen Bereich. Für $n^* \geq 0{,}95$ liefern die errechneten Punkte nach Lieblein und Koch noch Resultate dicht an der Pumpgrenze. Bei kleinerer Drehzahl lassen sich nach ihnen keine Betriebspunkte mehr ermitteln (Abbildung 8.3). Tabelle 8.3 verdeutlicht wieder, wie sich die Instabilitäten bei Drehzahlverringerung zum Verdichtereintritt hin verlagern. Die Iso-Plotts in Abbildung 11.6, Abbildung 11.7, Abbildung 11.8 zeigen für alle drei ausgewählten Betriebspunkte überkritische Diffusionszahlen an.

relative Drehzahl	Kriterium nach Koch	Lieblein	Traupel
$n^* = 1{,}0$	17. Stufe	Leitrad 17	13. Stufe
$n^* = 0{,}95$	1. Stufe	Leitrad 12	11. Stufe
$n^* = 0{,}9$	1. Stufe	($\dot{m}$ zu klein)	5. Stufe
$n^* = 0{,}85$	($\dot{m}$ zu klein)	($\dot{m}$ zu klein)	4. Stufe
$n^* = 0{,}8$	($\dot{m}$ zu klein)	($\dot{m}$ zu klein)	4. Stufe

Tabelle 8.3: Kritische Ebenen für den 17-stufigen Verdichter Vx4.3

Die Abbildung 8.3 ist von Siemens KWU nicht zur Veröffentlichung freigegeben.

Abbildung 8.3: 17-stufiger Verdichter Vx4.3 mit 8° aufgedrehtem Vorleitrad (nicht freigegeben)

9 Zusammenfassung und Ausblick

Der Vergleich zwischen gerechneten und gemessenen Daten zeigt, daß von allen untersuchten Modellen das Wirkungsgradkriterium (Betriebspunkt beim maximalen isentropen Wirkungsgrad) am besten geeignet ist, um den Arbeitsbereich eines vielstufigen Verdichters zu kleinen Massenströmen theoretisch abgrenzen zu können. Dieses Resultat ergibt sich unter der Voraussetzung, daß die Strömungsverhältnisse durch das Kennfeldrechenprogramm richtig dargestellt werden. Das ist bei hoher Stufenzahl und besonders bei kleinen Drehzahlen nicht der Fall, was für diese Maschinen eine Bewertung der Stabilitätskriterien zum jetzigen Zeitpunkt nicht zuläßt. Grundlegendes Problem ist die noch fehlerhafte Verlustbestimmung in der Dynatech Rechnung.

Erst dann, wenn das Kennfeldprogramm einer guten Genauigkeit genügt, läßt sich mit Sicherheit sagen, ob ein anderes Modell noch von Nutzen sein kann und in bestimmten Bereichen möglicherweise sogar besser liegt als das Wirkungsgradkriterium.

Zur Auswertungsprozedur werden folgende weitergehende Untersuchungen vorgeschlagen. Momentan werden wegen fehlender Vorgaben nur beschaufelungsbezogene Druckverhältnisse und Wirkungsgrade analysiert. Die Abweichungen zu maschinenbezogenen Daten sind zu bewerten und gegebenenfalls zu berücksichtigen. Die Auswertung nach dem Liebleinkriterium kann exakter gestaltet werden. Dazu muß sie mit einer Integrationsfunktion gekoppelt werden, wodurch sich die prozentual überlastete Schaufelhöhe besser bestimmen läßt, als es momentan durch die diskrete Betrachtung von Werten auf den einzelnen Stromlinien der Fall ist.

Für das Kochkriterium sind genaue Radialspaltvorgaben zu treffen.

Das Traupelkriterium sollte an Verdichtern untersucht werden, die nach dem Potentialwirbelgesetz ausgelegt sind. Für die bisher untersuchten Maschinen könnte eine größere Stromlinienanzahl von Vorteil für das Modell sein, denn dadurch käme der Wandeinfluß mehr zum tragen, und die viel zu optimistischen Werte könnten reeller werden. Problematisch ist dabei, daß für mehr als neun Stromlinien in der Dynatech Ergebnisdatei kein Speicherplatz vorgesehen ist. Alle Felder sind bis zehn dimensioniert, wobei der letzte Wert immer ein Integralausdruck über die Stromlinien ist. Die gleiche Dimensionierung gilt auch für STAB.

Abschließend möchte sich der Autor für die tatkräftige Unterstützung durch seine Betreuer Herrn Prof. Lindner von der TU Dresden und Herrn Dr. Janssen von Siemens KWU bedanken. Der Dank gilt gleichfalls allen anderen Kollegen der Gasturbinenabteilung TGRM. Sie alle haben mitgeholfen, daß die Diplomarbeit einen wirklich interessanten Einblick in dieses so wichtige Gebiet der Strömungsmechanik gebracht hat.

10 Literatur und Quellennachweis

[1] Dynatech R/D Company, 17 Tudor Street, Cambridge, Massachusetts 02139, USA: HTO300 A Computer Program for the Design and Analysis of Axial Turbomachinery, Parts I, II, 1970

[2] L. H. Smith Jr.: The Radial-Equilibrium Equation of Turbomachinery, ASME Journal of Engineering for Power (Paper No 65-WA/GTP-1), January, 1966

[3] Lieblein/ Schwenk/ Broderick: Diffusion Factor for Estimating Losses and Limiting Blade Loadings in Axial-Flow-Compressor Blade Elements, NACA RM E53D01, 1953

[4] O. Conrad: Belastungskriterien von Verzögerungsgittern, MTZ 26/8,1965

[5] Johnson/ Bullock et al: Aerodynamic Design of Axial-Flow Compressors, NASA SP36,1965

[6] Jansen/ Moffatt: The Off-Design Analysis of Axial-Flow Compressors, ASME 66-WA/GT-1, 1966

[7] Herrig/ Emery/ Erwin: Systematic Two-Dimensional Cascade Tests of NACA65-Series Compressor Blades at Low Speeds, NACA TN 3916, 1957 (Supersedes TN 3916, RM L51G31)

[8] Emery/ Dunavant: Two-Dimensional Cascade Tests of NACA65-$(C_{10}A_{10})_{10}$ Blade Sections at Typical Compressor Hub Conditions for Speeds up to Choking, NACA RM L57H05, 1957

[9] W. Jansen: The Application of End-Wall Boundary-Layer-Effects in the Performance Analysis of Axial Compressors, ASME 67-WA/GT-11, 1967

[10] F. E. Mc Caughan: Bifurcation Analysis of Axial Flow Compressor Stability, SIAM J. APPL. MATH. Vol. 50, No 5, 1990

[11] E. M. Greitzer: Surge and Rotating Stall in Axial Flow Compressors, Parts I, II, ASME Journal of Engineering for Power, 1967

[12] E. Lindner: Taschenbuch Maschinenbau, Bd. 5, Turboverdichter, Berlin, 1989

[13] W. Traupel: Thermische Turbomaschinen, 2. Bd., Geänderte Betriebsbedingungen, Regelung, Mechanische Probleme, Temperaturprobleme, Springer Verlag Berlin und Heidelberg, 1982

[14] S. Lieblein: Loss and Stall Analysis of Compressor Cascades, Transaction of the ASME, Journal of Basic Engineering (Paper No 58-A-91), 1959

[15] C. C. Koch: Stalling Pressure Rise Capability of Axial Flow Compressor Stages, Journal of Engineering for Power, ASME 81-GT-3, 1981

[16] E. Lindner: Vorlesung Turboverdichter, TU Dresden, Institut für Strömungsmechanik, 1991

[17] M. V. Casey: A Mean Line Prediction Method for Estimating the Performance Characteristic of an Axial Compressor Stage, Mechanical Engineering Publications Ltd., London, 1987

[18] D. Traulsen: Axialverdichterprüfstand zur Untersuchung von Randzonenströmungen, Fortschrittberichte, VDI Reihe 7 No 161, Düsseldorf, 1989

[19] W. Albring: Angewandte Strömungslehre, 6. Auflage, Berlin, 1990

[20] Sovran/ Klomp: Experimentally Determined Optimum Geometries for Rectilinear Diffusers with Rectangular, Conical or Annular Cross Section, Fluid Mechanics of Internal Flow, Elsevier Publishing, Amsterdam, Netherlands, 1967

[21] A. I. Mechanikov et al: Untersuchung von Verdichtercharakteristiken stationärer Gasturbinenanlagen, Teploenergetika No 3, 1983 (russisch)

[22] A. O. Burmaskov et al: Versuche zur Verdichterstabilität während der Inbetriebnahme der PGU200 Gas- und Dampfturbinen Anlage, Energomasinostroenie No 11, 1975 (russisch)

[23] Suter/ Späti: Die Abreißgrenze mehrstufiger Axialverdichter, Turboforum No 2, 1972

Abbildung 5.5 (Bild links), Abbildung 5.6, Abbildung 5.11 aus [15] © ASME mit freundlicher Genehmigung. Alle anderen Abbildungen vom Autor Axel Ebert.

11 Anhang

11.1 Source Code Listing Programm STAB

```
      PROGRAM STAB
C     PROGRAMSOURCE: STAB.SRC                        (AXEL EBERT, MAI 1992)
C
C     BESTIMMUNG DER STABILITAETSGRENZE FUER AXIALVERDICHTER NACH VIER
C     VERSCHIEDENEN KRITERIEN:
C     FUER EINZELNE GITTER NACH LIEBLEIN;
C     FUER EINZELNE STUFEN NACH KOCH UND NACH EINEM ANSATZ VON TRAUPEL;
C     FUER DIE GESAMTE BESCHAUFELUNG NACH DER LAGE DES MAXIMALEN
C     ISENTROPEN WIRKUNGSGRADS
C
C     ZUR RICHTIGEN INTERPRETATION DER ERGEBNISSE IST ES ERFORDERLICH,
C     DASS 3 - 10 BETRIEBSPUNKTE VORGEGEBEN WERDEN UND ALLE BEI GLEICHER
C     DREHZAHL LIEGEN
C
C     AUSGEGEBEN WIRD DER MASSENSTROM AN DER STABILITAETSGRENZE
C     ==>DER WERT IST NUR GUELTIG, WENN ER IM BEREICH DER VORGEGEBENEN
C     MASSENSTROEME LIEGT; ALLE ERGEBNISSE WERDEN ZUSAETZLICH IN EINER
C     DATEI STAB.DTA ABGELEGT
C
C     PROGRAMMSTART: UEBER PROZEDUR PROC.STAB WEGEN DATEIARBEIT
C
C*******BESCHREIBUNG*****************************************************
C
C     ALLE AERODYNAMISCHEN CHARAKTERISTIKEN WERDEN AUS DER EINGABE- BZW.
C     ERGEBNISDATEI DES KENNFELDRECHENPROGRAMMS HT0 300 VON DYNATECH
C     (1970) EINGELESEN
C
C     ALLE WINKEL BEZIEHEN SICH AUF MERIDIONALE STROEMUNGSRICHTUNG
C
C     1 EINTRITTSKANTE SCHAUFEL
C     2 AUSTRITTSKANTE SCHAUFEL
C     I INNEN
C     A AUSSEN
C
C     LA,LE BEDEUTEN LAUFRAD,LEITRAD
C     Z.B.: HI LA02 = HINTER LAUFRAD 2; HI LE00 = HINTER VORLEITRAD
C
C     BE      STROEMUNGSWINKEL BETA: ABSOL. FUER LE BZW. RELAT. FUER LA
C     BES     AEQUIVAL. SCHAUFELWINKEL BETAS: ABSOL.F. LE, RELAT. F. LA
C     C       ABS. STROEMUNGSGESCHW.: IM PROGRAMM IST C GLEICH V FUER LE
C     C10-C44 KONSTANTEN ZUR INTERPOLATION VON KOCH - KRITERIEN
C     CA      C IN AXIALER RICHTUNG
C     CAM     CAMBER (WOELBUNGSWINKEL) BES1 - BES2
C     CH      ENTHALPIEKOEFFIZIENT NACH C.C.KOCH
C     CHZUL   ZULAESSIGER WERT FUER CH
C     CM      C IN MERIDIONALER RICHTUNG (IM PROGRAMM NICHT IN GEBRAUCH)
C     CU      C IN UMFANGSRICHTUNG       (IM PROGRAMM NICHT IN GEBRAUCH)
C     DEQ     AEQUIVAL. DIFFUSIONSFAKTOR NACH S.LIEBLEIN
C     DEQZUL  ZULAESSIGER WERT FUER DEQ
C     DHG     RADIALSPIEL (1% DER SCHAUFELHOEHE), BEZOGEN AUF G
C     DZ      AXIALSPALT ZWISCHEN 2 UND 1
C     DZT     DZ, BEZOGEN AUF T
C     ETAS    ISENTROPER WIRKUNGSGRAD
C     FE      FAKTOR ZUR BESTIMMUNG DER EFFEKT. KIN. ENERGIE NACH KOCH
C     G       SCHAUFELKANALWEITE
C     GASR    GASKONSTANTE FUER LUFT = 287.22 J/(KG*K)
C     IN      INZIDENZWINKEL BE1-BES1
```

```
C     INREF   REFERENZWERT VON IN FUER STROEMUNG MIT MIN. VERLUSTEN
C     L       LAENGE DER KREISBOGENFOERMIGEN SKELETTLINIE EINES PROFILS,
C             DAS DIESELBE WOELBUNG WIE DAS ENTSPR.NACA65 PROFIL BESITZT
C     LG      GEWICHTETER MITTELWERT VON L/G2 AUS LA UND LE - DATEN
C     M       MASSENSTROM FUER DEN BETRIEBSPUNKT
C     MK      KRITISCHER MASSENSTROM NACH KOCH
C     ML      KRITISCHER MASSENSTROM NACH LIEBLEIN
C     MT      KRITISCHER MASSENSTROM NACH TRAUPEL
C     MW      KRITISCHER MASSENSTROM NACH WIRKUNGSGRADKRITERIUM
C     MX      MASSENSTROM ZW.BENACHBARTEN STROMLINIEN; J=10 IST INTEGRAL
C     NDT     ZAHL DER VORGABEN EINER GROESSE UEBER R IN EINGABEDATEI
C     NGI     ZAHL DER GITTER = NLA + NLE + NL0 < 51
C     NLA     ZAHL DER LAUFRAEDER
C     NLE     ZAHL DER LEITRAEDER
C     NL0     ZAHL DER VORLEITRAEDER
C     NM      ZAHL DER ZU BERECHNENDEN BETRIEBSPUNKTE < 6
C     NMI     NUMMER DER MITTLEREN STROMLINIE   {FUER MITTELSCHNITTDATEN
C     NSCH    SCHAUFELZAHL PRO RAD
C     NSTA    STATIONSZAHL JE STROMLINIE
C     NSTR    ZAHL DER STROMLINIEN J < 10; J = 10 IST INTEGRIERTER WERT
C     PHI     LIEFERZAHL FUER EINE STUFE CA2/U2|NMI
C     PHIMIN  PHI, DASS SICH AUS PSIZUL ERGIBT
C     PIT     GESAMTDRUCKVERHAELTNIS DER BESCHAUFELUNG
C     PK      PIT FUER MK
C     PL      PIT FUER ML
C     PT      PIT FUER MT
C     PW      PIT FUER MW
C     PSI     DRUCKZAHL DELTA(STAT.ENTH.BEI S=CONST)|STUFE/(U2*U2)*2|NMI
C     PSIZUL  MAXIMAL MOEGL. DRUCKZAHL FUER DIE UNGUENSTIGSTE STROMLINIE
C     PSTAT   STATISCHER DRUCK AM GITTERAUSTRITT
C     R       RADIUS
C     RE      REYNOLDSZAHL AUS S UND W1
C     RHO     DICHTE AUS PSTAT UND TSTAT FUER IDEALES GAS
C     S       SEHNENLAENGE
C     SO      SOLIDITY S/T (SCHAUFELDICHTE)
C     SPD     SPEED (DREHZAHL IN U/MIN)
C     SPF     SPEEDFACTOR FUER BETRIEBSP. (DREHZAHL/AUSLEGUNGSDREHZAHL)
C     T       TEILUNG = 2*PI*R/NSCH
C     TSTAT   STATISCHE TEMPERATUR AM GITTERAUSTRITT
C     U       SCHAUFELGESCHWINDIGKEIT
C     V       STROEMUNGSGESCHWINDIGKEIT: ABSOL. FUER LE, RELAT. FUER LA
C     VID     DYNAMISCHE VISKOSITAET, IM BETRIEBSBER. NUR VON TSTAT ABH.
C     VX,VY   EINDIMENSIONALE HILFSFELDER ZUR INTERPOLATION
C     XKRIT   HILFSGROESSE ZUR INTERPOLATION
C     YMAX    HILFSGROESSE ZUR INTERPOLATION
C     W       REL. STROEMUNGSGESCHW.:IM PROGRAMM IST W GLEICH V FUER LA
C     Z       AXIALE KOORDINATE DER SCHAUFELKANTE
C     $EBENE  STRING ZUR BESCHREIBUNG DER STATIONSEBENE, Z.B. HI LA02
C     $K      STRING ZUR BESCHREIBUNG DER KRITISCHEN STUFE NACH KOCH
C     $L      STRING ZUR BESCHREIBUNG DES KRITISCHEN GITTERS NACH LIEBL.
C     $STUFE  STRING ZUR BESCHREIBUNG DER BETRACHTETEN STUFE
C     $T      STRING ZUR BESCHREIBUNG DER KRITISCHEN STUFE NACH TRAUPEL
C     $TYP    STRING ZUR BESCHREIBUNG DES VERDICHTERTYPS
C
C
C     FELD " VALG " FUER DYNATECH ERGEBNISSE
C     ======================================
C      VALG(I, 1,J) = RDATA (RADIUS)   EINGABE
C      VALG(I, 2,J) = BETAS1           EINGABE          F(RDATA)
C      VALG(I, 3,J) = BETAS2           EINGABE          F(RDATA)
C      VALG(I, 4,J) = CAMBER           EINGABE          F(RDATA)
C      VALG(I, 5,J) = STAGGER          EINGABE          F(RDATA)
C      VALG(I, 6,J) = CHORD (SEHNENL.) EINGABE          F(RDATA)
```

```
C      VALG(I, 7,J) = D/L              EINGABE          F(RDATA)
C      VALG(I, 8,J) = RADIUS           INLET
C      VALG(I, 9,J) = RADIUS           OUTLET
C      VALG(I,10,J) = BES1             STROMLINIE       F(RIN)
C      VALG(I,11,J) = BES2             STROMLINIE       F(ROUT)
C      VALG(I,12,J) = CAMBER(BES1-BES2)STROMLINIE       F(STRL)
C      VALG(I,13,J) = STAGGER          STROMLINIE       F(STRL)
C      VALG(I,14,J) = MACH-NO ABS      OUTLET           F(ROUT)
C      VALG(I,15,J) = MACH-NR          CRITICAL         F(RIN)
C      VALG(I,16,J) = DIFFUSION FACT   REF              F(STRL)
C      VALG(I,17,J) = DIFFUSION FACT   ACT              F(STRL)
C      VALG(I,18,J) = INCIDENCE        REF              F(RIN)
C      VALG(I,19,J) = INCIDENCE        ACT              F(RIN)
C      VALG(I,20,J) = STALL                             F(RIN)
C      VALG(I,21,J) = CHOKE                             F(RIN)
C      VALG(I,22,J) = DEVIATION        REF              F(ROUT)
C      VALG(I,23,J) = DEVIATION        ACT              F(ROUT)
C      VALG(I,24,J) = LOSS             TOT              F(RIN)
C      VALG(I,25,J) = LOSS             MIN              F(RIN)
C      VALG(I,26,J) = LOSS             INC              F(RIN)
C      VALG(I,27,J) = LOSS             SHOCK            F(RIN)
C      VALG(I,28,J) = LOSS             TIP              F(RIN)
C      VALG(I,29,J) = VELOCITY = U1    CIRC INLET       F(RIN)
C      VALG(I,30,J) = VELOCITY         RAD              F(ROUT)
C      VALG(I,31,J) = VELOCITY = CA2   AXI              F(ROUT)
C      VALG(I,32,J) = VELOCITY = CM2   MER              F(ROUT)
C      VALG(I,33,J) = VELOCITY = CU2   TAN              F(ROUT)
C      VALG(I,34,J) = VELOCITY = C2    TOT              F(ROUT)
C      VALG(I,35,J) = PRESSURE         TOT              F(ROUT)
C      VALG(I,36,J) = PRESSURE         STA              F(ROUT)
C      VALG(I,37,J) = TEMPERATURE      TOT              F(ROUT)
C      VALG(I,38,J) = TEMPERATURE      STA              F(ROUT)
C      VALG(I,39,J) = FLOW-ANGLE =     INLET            F(RIN)
C                   = AL1|LE ODER B1|LA
C      VALG(I,40,J) = FLOW-ANGLE =     OUTLET           F(ROUT)
C                   = AL2|LE ODER BE2|LA
C      VALG(I,41,J) = FLOW-MACH-NR     INLET            F(RIN)
C      VALG(I,42,J) = FLOW-MACH-NR     OUTLET           F(ROUT)
C      VALG(I,43,J) = FLOW-VELOCITY =  INLET            F(RIN)
C                   = C1|LE ODER W1|LA
C      VALG(I,44,J) = FLOW-VELOCITY =  OUTLET           F(ROUT)
C                   = C2|LE ODER W2|LA
C      VALG(I,45,J) = DE HALLER NR                      F(STRL)
C      VALG(I,46,J) = STA-PRES-RISE    ACT              F(RIN)
C      VALG(I,47,J) = STA-PRES-RISE    PERM             F(RIN)
C      VALG(I,48,J) = STA-PRES-RISE    MAX              F(RIN)
C      VALG(I,49,J) = D-ALPHA FLOW                      F(STRL)
C      VALG(I,50,J) = D-BETA FLOW                       F(STRL)
C      VALG(I,51,J) = VELOCITY = U2    CIRC OUTLET      F(ROUT)
C      VALG(I,52,J) = PI               MASCHINE         F(STRL)
C      VALG(I,53,J) = ETAS (ISENTROP)  MASCHINE         F(STRL)
C      VALG(I,54,J) = ETAP (POLYTROP)  MASCHINE         F(STRL)
C      VALG(I,55,J) = PHI              MASCHINE         F(STRL)
C      VALG(I,56,J) = PSI              MASCHINE         F(STRL)
C      VALG(I,57,J) = PI               GITTER           F(STRL)
C      VALG(I,58,J) = ETAS             GITTER (NUR LA)  F(STRL)
C      VALG(I,59,J) = ETAP             GITTER (NUR LA)  F(STRL)
C      VALG(I,60,J) = PHI ALS CA2/U2   GITTER           F(STRL)
C      VALG(I,61,J) = PSI STA =        GITTER (NUR LA)  F(STRL)
C                   = PSI TOT-(C2*C2-C1*C1)/(U2*U2)*2
C      VALG(I,62,J) = PSI TOT =        GITTER (NUR LA)  F(STRL)
C                   = (U2CU2-U1CU1)/(U2*U2)*2
C      VALG(I,63,J) = PSI STA =        STUFE            F(STRL)
```

```
C                   = PSI TOT-{(C2*C2)|LE-(C1*C1)|LA}/(U2*U2)*2
C      VALG(I,64,J) = REACT            STUFE            F(STRL)
C      VALG(I,65,J) = ETAS             STUFE            F(STRL)
C      VALG(I,66,J) = ETAP             STUFE            F(STRL)
C      VALG(I,67,J) = PI               STUFE            F(STRL)
C
C
C*****KONSTANTEN, VARIALBLEN, FELDER FUER DAS PROGRAMM*****************
      PARAMETER (
     &C10 =  0.898561702631210535E+01, C11 = -0.565938339569078175E+01,
     &C12 =  0.147086726005759227E+01, C13 = -0.166784928586288669E+00,
     &C14 =  0.701157913610926924E-02, C20 =  0.122200000000000001E+01,
     &C21 = -0.856256246677299648E+01, C22 =  0.132478539783803086E+03,
     &C23 = -0.108587914230019658E+04, C24 =  0.315349991139465391E+04,
     &C30 =  0.111190298907441720E+01, C31 = -0.546464268535693257E+00,
     &C32 =  0.813798357726914251E+00, C33 = -0.393832886690006795E+00,
     &C34 = -0.712911427198331324E-02, C40 =  0.497579288285793109E-01,
     &C41 =  0.576841813488708957E+00, C42 = -0.319106201872386655E+00,
     &C43 =  0.101390012649753086E+00, C44 = -0.128835530946547110E-01,
     &DEQZUL = 2.0, GASR = 287.22, PI = 3.141592653)
      REAL
     &BE1(50,10), BE2(50,10), BES2(50,10), CA2(50,10), CAM(50,10),
     &CH(10,50), CHZUL(10,50), DEQ(10,50,10), DHG, DZ(50,10), DZT,
     &ETAS(10,50,10), FE, G,
     &IN(50,10), INREF(50,10), L, LG,
     &M(10), MK, ML, MT, MW, MX(10), PHI(10,50,10), PHIMIN,
     &PIT(10), PK, PL, PT, PW,
     &PSI(10,50,10), PSIZUL, PSTAT(50,10), R1(10,50,10), R2(10,50,10),
     &RE, RHO(50,10), S(50,10), SA(50), SI(50),
     &SO(50,10), SPD(50), SPF(10), T(50,10),
     &TSTAT(50,10), U1, U2, V1(50,10), VALG(50,67,10),
     &VID, VX(10), VY(10), XKRIT, YMAX,
     &Z1I(50), Z1A(50), Z2I(50), Z2A(50)
      INTEGER
     &I, J, K, LL, NDT(50), NGI, NLA, NLE, NL0, NM, NMI, NSCH(50), NSTA,
     &NSTR
      CHARACTER * (80,V) $K, $L, $T, $TYP, $Z
      CHARACTER * 25 $STUFE(50)
      CHARACTER * 10 $EBENE(50)
      $K='               '
      $L='               '
      $T='               '
C
C*****LESEN DER KOPFZEILEN AUS DEM ERGEBNISFILE DER DYNATECH-RECHNUNG***
C     $(NAME).(TYP).PLOT
      READ(15,'(A)') $TYP
      READ(15,'(5I5)') NSTA,NSTR,NLA,NLE,NL0
      READ(15,'(I5)') NM
      DO 100 LL=1,NM
      READ(15,'(3F12.4)') SPF(LL),M(LL),PIT(LL)
      IF (PIT(LL).LE.0.0) THEN
        WRITE(2,'(A,F8.3,A)')' M = ',M(LL),' NICHT AUSWERTBAR ==> STOP'
        STOP
      ENDIF
  100 CONTINUE
      NGI=NLA+NLE+NL0
      NMI=INT((NSTR+1)/2)
C
C*****LESEN DES EINGABEFILE DER DYNATECH-RECHNUNG $(NAME).(TYP)*********
C     ZUR BESTIMMUNG DER AXIALEN SCHAUFELKOORD.{WICHTIG FUER AXIALSPALTE
C
      DO 110 I=1,5
      READ(16,'(A)') $Z
```

```
  110 CONTINUE
      DO 120 LL=1,NM
      READ(16,'(A)') $Z
  120 CONTINUE
      J=0
      DO 130 I=1,NSTA
      READ(16,'(A)') $Z
      IF ($Z(73:73).EQ.'V') THEN
        J=J+1
        READ ($Z( 1:12),'(F12.5)') Z1I(J)
        READ ($Z(37:48),'(F12.5)') Z1A(J)
      ENDIF
      IF ($Z(73:73).EQ.'H') THEN
        READ ($Z( 1:12),'(F12.5)') Z2I(J)
        READ ($Z(37:48),'(F12.5)') Z2A(J)
      ENDIF
  130 CONTINUE
C
C*****SCHLEIFE UM ALLE KENNFELDPUNKTE ZUR BESTIMMUNG DER KRITERIEN******
C     FUER DEN JEWEILIGEN KENNFELDPUNKT
      IF (NM.GT.10) THEN
        NM=10
        WRITE(2,'(A)') ' AUSWERTUNG NUR FUER DIE ERSTEN 10MASSENSTROEME'
      ENDIF
      DO 260 LL = 1,NM
C
C*****EINLESEN DER DATEN DES KENNFELDPUNKTES AUS $(NAME).(TYP).PLOT*****
C     ==> FELD {VALG(I,1,J) - VALG(I,67,J)} FUER J=1 BIS MAX 10
C     I IST DAS GITTER, J EINE AUSGEWAEHLTE STROMLINIE FUER J<10
C     J=10 IST EIN INTEGRIERTER WERT UEBER DIE STROMLINIEN
C     BEI EINGABEGROESSEN {VALG(I,1,J)-VALG(I,7,J)} SIND NUR NDT WERTE
C     UEBER R BELEGT, WOMIT ALSO NICHT ZWINGEND FUER JEDE STROMLINIE
C     VORGABEN GETROFFEN WERDEN MUESSEN
C
      DO 140 I=1,NGI
      READ(15,'(A)') $EBENE(I)
      READ(15,'(2I5,F12.0)') NDT(I),NSCH(I),SPD(I)
      DO 140 K=1,67
      READ(15,'(10F12.0)') (VALG(I,K,J),J=1,10)
  140 CONTINUE
      DO 150 I=1,NGI
      DO 150 J=1,10
      IF(VALG(I,38,J).EQ.0.) GOTO 150
      VALG(I,14,J)=VALG(I,34,J)/SQRT(402.967*VALG(I,38,J))
  150 CONTINUE
C*****ENDE EINLESEN FUER EINEN PUNKT************************************
C
C*****UMSCHREIBUNG DER NOETIGEN GROESSEN FUER DIE STABILITAETSKRITERIEN*
      DO 160 I=1,NGI
      SI(I)       = VALG(I, 6,1)
      SA(I)       = VALG(I, 6,NDT(I))
      DO 160 J=1,NSTR
      R1(LL,I,J)  = VALG(I, 8,J)
      R2(LL,I,J)  = VALG(I, 9,J)
      BES2(I,J)   = VALG(I,11,J)*PI/180.0
      CAM(I,J)    = VALG(I,12,J)*PI/180.0
      INREF(I,J)  = VALG(I,18,J)
      IN(I,J)     = VALG(I,19,J)
      CA2(I,J)    = VALG(I,31,J)
      PSTAT(I,J)  = VALG(I,36,J)*100000.0
      TSTAT(I,J)  = VALG(I,38,J)
      RHO(I,J)    = PSTAT(I,J)/TSTAT(I,J)/GASR
      BE1(I,J)    = ABS(VALG(I,39,J)*PI/180.0)
```

```
      BE2(I,J)    = ABS(VALG(I,40,J)*PI/180.0)
      V1(I,J)     = VALG(I,43,J)
  160 CONTINUE
      DO 170 I=1,NGI
      DO 170 J=1,10
      ETAS(LL,I,J)= VALG(I,53,J)
      PHI(LL,I,J) = VALG(I,60,J)*R2(LL,I,J)/R2(LL,I,NMI)
      PSI(LL,I,J) = VALG(I,63,J)*
     &              R2(LL,I,J)*R2(LL,I,J)/(R2(LL,I,NMI)*R2(LL,I,NMI))
  170 CONTINUE
      DO 180 I=1,NL0
      $STUFE(I)='VORLEITRAD'
  180 CONTINUE
      DO 190 I=(1+NL0),NGI,2
      $STUFE(I)='STUFE AUS '//$EBENE(I)(4:7)//' UND '//$EBENE(I+1)(4:7)
      $STUFE(I+1)=$STUFE(I)
  190 CONTINUE
C
C*****BERECHNUNG SEHNENLAENGEN, AXIALSPALTE DURCH INTERPOLATION*********
C     BERECHNUNG TEILUNGEN, SOLIDITIES
      DO 200 I=1,NGI
      DO 200 J=1,NSTR
      S(I,J) = (SA(I)-SI(I))/
     &         (R1(LL,I,NSTR)-R1(LL,I,1))*(R1(LL,I,J)-R1(LL,I,1)) +SI(I)
      T(I,J)   = 2*PI*R1(LL,I,J)/NSCH(I)
      SO(I,J)  = S(I,J)/T(I,J)
  200 CONTINUE
      DO 210 I=1,(NGI-1)
      DO 210 J=1,NSTR
      DZ(I,J) = (Z1A(I+1)-Z1I(I+1))/
     &(R1(LL,I+1,NSTR)-R1(LL,I+1,1))*(R2(LL,I,J)-R1(LL,I+1,1))+Z1I(I+1)
     &    -     (Z2A(I)-Z2I(I))/
     &(R2(LL,I  ,NSTR)-R2(LL,I  ,1))*(R2(LL,I,J)-R2(LL,I  ,1))-Z2I(I)
  210 CONTINUE
C
C*****BERECHNUNG DER AEQUIV.DIFF.-FAKTOREN FUER ALLE STROMLINIEN UND****
C     GITTER NACH LIEBLEIN; DEQ GILT NICHT FUER IN < INREF, IN DIESEN
C     FAELLEN WIRD MIT IN = INREF WEITERGERECHNET UND DEQ < 0 AUSGEGEBEN
      WRITE(2,'(A,F8.3)')' BERECHNUNG DEQ       FUER M =',M(LL)
      DO 220 I=1,NGI
      DO 220 J=1,NSTR
      IF (IN(I,J).LT.INREF(I,J)) THEN
      DEQ(LL,I,J)= -COS(BE2(I,J))/COS(BE1(I,J))*
     &(1.12 +                                    0.61*COS(BE1(I,J))*
     &COS(BE1(I,J))/SO(I,J)*(TAN(BE1(I,J))-TAN(BE2(I,J))))
      ELSE
      DEQ(LL,I,J)=  COS(BE2(I,J))/COS(BE1(I,J))*
     &(1.12 + 0.0117*(IN(I,J)-INREF(I,J))**1.43 + 0.61*COS(BE1(I,J))*
     &COS(BE1(I,J))/SO(I,J)*(TAN(BE1(I,J))-TAN(BE2(I,J))))
      ENDIF
  220 CONTINUE
C
C*****BERECHNUNG DER INTEGRALEN PHI UND PSI FUER ALLE STUFEN NACH DER***
C     VORSCHRIFT VON TRAUPEL (CHARAKTERISTIKEN BEZIEHEN SICH AUF U2|NMI
C     UND KLAMMERN DEN WANDNAHEN BEREICH AUS)
C     DA CAX MIT DEM BLOCKIERUNGSFAKTOR KORRIGIERT WIRD, ERGAEBE EINE
C     AUFSUMMIERUNG ALLER MX(J) EIN ZU GROSSES M, IM KERNBEREICH DER
C     STROEMUNG TRIFFT CAX UND MX(J) ABER UMSO GENAUER ZU
      WRITE(2,'(A,F8.3)')' BERECHNUNG PHI,  PSI FUER M =',M(LL)
      DO 240 I=1,NGI
      PHI(LL,I,10)=0.0
      PSI(LL,I,10)=0.0
      MX(10)=0.0
```

```
      DO 230 J=3,(NSTR-1)
      MX(J)=(CA2  (I,J)+CA2  (I,J-1))*0.5*
     &      (RHO  (I,J)+RHO  (I,J-1))*0.5*
     &   PI*(R2(LL,I,J)*R2(LL,I,J)-R2(LL,I,J-1)*R2(LL,I,J-1))
      MX(10)=MX(10)+MX(J)
  230 CONTINUE
      DO 240 J=3,(NSTR-1)
      PHI(LL,I,10)=PHI(LL,I,10) +
     &             MX(J)/MX(10)*0.5*(PHI(LL,I,J)+PHI(LL,I,J-1))
      PSI(LL,I,10)=PSI(LL,I,10) +
     &             MX(J)/MX(10)*0.5*(PSI(LL,I,J)+PSI(LL,I,J-1))
  240 CONTINUE
C
C*****BERECHNUNG DES ENTHALPIEKOEFFIZIENTEN FUER ALLE STUFEN IM*********
C     MITTELSCHNITT NACH KOCH
      WRITE(2,'(A,F8.3)')' BERECHNUNG CH, CHZUL FUER M =',M(LL)
      DO 250 I=(1+NL0),NGI,2
      L=S(I,NMI)*0.5*CAM(I,NMI)/SIN(0.5*CAM(I,NMI))
      G=T(I,NMI)*COS(BES2(I,NMI))
      DHG=G
      LG=L/G*V1(I,NMI)*V1(I,NMI)
      L=S(I+1,NMI)*0.5*CAM(I+1,NMI)/SIN(0.5*CAM(I+1,NMI))
      G=T(I+1,NMI)*COS(BES2(I+1,NMI))
      DHG=0.5*(DHG+G)
      LG=LG + L/G*V1(I+1,NMI)*V1(I+1,NMI)
      LG=LG/ (V1(I,NMI)*V1(I,NMI)+V1(I+1,NMI)*V1(I+1,NMI))
      IF (LG.LT.0.308.OR.LG.GT.2.883) THEN
        WRITE(2,'(A,F8.3,A)') ' EXTRAPOLATION: LG = ',LG,' '//$STUFE(I)
      ENDIF
      CHZUL(LL,I)=C40+C41*LG+C42*LG**2+C43*LG**3+C44*LG**4
      U2=CA2(I,NMI)/PHI(LL,I,NMI)
      U1=U2*R1(LL,I,NMI)/R2(LL,I,NMI)
      CH(LL,I)=(PSI(LL,I+1,NMI)*U2*U2 - U2*U2 + U1*U1)/
     &(V1(I   ,NMI)*V1(I   ,NMI)*FE(PI,R1(LL,I   ,NMI),R2(LL,I   ,NMI),
     &           BE1(I   ,NMI),V1(I   ,NMI),CA2(I   ,NMI),PHI(LL,I   ,NMI))+
     & V1(I+1,NMI)*V1(I+1,NMI)*FE(PI,R1(LL,I+1,NMI),R2(LL,I+1,NMI),
     &           BE1(I+1,NMI),V1(I+1,NMI),CA2(I+1,NMI),PHI(LL,I+1,NMI)))
      IF (I.EQ.1) THEN
        VID=1.71E-05*(TSTAT(I,NMI)/273.15)**0.72
        RE=V1(I,NMI)*S(I,NMI)*RHO(I   ,NMI)/VID
      ELSE
        VID=1.71E-05*(TSTAT(I-1,NMI)/273.15)**0.72
        RE=V1(I,NMI)*S(I,NMI)*RHO(I-1,NMI)/VID
      ENDIF
      RE=LOG10(RE)
      IF (RE.LT.5.114.OR.RE.GT.7.000) THEN
        WRITE(2,'(A,F8.3,A)')' EXTRAPOLATION:LOG10(RE)=',RE,$STUFE(I)
      ENDIF
      CH(LL,I)=CH(LL,I)/(C10+C11*RE+C12*RE**2+C13*RE**3+C14*RE**4)
      DHG=(R2(LL,I,NSTR)-R2(LL,I,1))*0.01/DHG
      IF (DHG.LT.0.000.OR.DHG.GT.0.150) THEN
        WRITE(2,'(A,F8.3,A)') ' EXTRAPOLATION:DHG =',DHG,' '//$STUFE(I)
      ENDIF
      CH(LL,I)=CH(LL,I)/(C20+C21*DHG+C22*DHG**2+C23*DHG**3+C24*DHG**4)
      DZT=DZ(I,NMI)/T(I,NMI)
      IF (DZT.LT.0.100.OR.DZT.GT.0.800) THEN
        WRITE(2,'(A,F8.3,A)') ' EXTRAPOLATION:DZT =',DZT,' '//$STUFE(I)
      ENDIF
      CH(LL,I)=CH(LL,I)/(C30+C31*DZT+C32*DZT**2+C33*DZT**3+C34*DZT**4)
  250 CONTINUE
C
  260 CONTINUE
C*****ENDE SCHLEIFE UM ALLE KENNFELDPUNKTE (BESTIMMUNG DER KRITERIEN****
```

```
C     FUER DEN JEWEILIGEN PUNKT)
C
      WRITE(2,'(A)')' *VERGLEICH UNTER ALLEN MASSENSTROEMEN*'
C*****BESTIMMUNG DES KRITISCHEN MASSENSTROMES NACH LIEBLEIN*************
      WRITE(2,'(A)')' KRITISCHER MASSENSTROM NACH LIEBLEIN'
      ML=0.0
      DO 280 LL=1,NM
      DO 280  I=1,NGI
      K=0
      DO 270  J=1,NSTR
      IF (DEQ(LL,I,J).GE.DEQZUL) THEN
        K=K+1
      ENDIF
  270 CONTINUE
      IF (3*K.GT.NSTR) THEN
        IF (M(LL).GT.ML) THEN
          ML=M(LL)
          $L=$EBENE(I)
        ENDIF
      ENDIF
  280 CONTINUE
      CALL IP2(NM,M,PIT,ML,PL)
      WRITE(2,'(A,F8.3,A)') ' ML =',ML,' KG/S  '//$L
C
C*****BESTIMMUNG DES KRITISCHEN MASSENSTROMES NACH TRAUPEL**************
      WRITE(2,'(A)')' KRITISCHER MASSENSTROM NACH TRAUPEL'
      MT=0.0
      DO 300 I=(1+NL0),NGI,2
      DO 300 J=2,(NSTR-1)
      DO 290 LL=1,NM
      VX(LL)=PHI(LL,I,J)
      VY(LL)=PSI(LL,I+1,J)
  290 CONTINUE
      CALL IP2MAX(NM,VX,VY,PHIMIN,PSIZUL)
      IF (PSIZUL.GT.0.0) THEN
        CALL IP2(NM,VX,M,PHIMIN,YMAX)
        IF (YMAX.GT.MT) THEN
          MT=YMAX
          $T=$STUFE(I)
        ENDIF
      ENDIF
  300 CONTINUE
      CALL IP2(NM,M,PIT,MT,PT)
      WRITE(2,'(A,F8.3,A)') ' MT =',MT,' KG/S  '//$T
C
C*****BESTIMMUNG DES KRITISCHEN MASSENSTROMES NACH KOCH*****************
C     ES WIRD DER QUOTIENT AUS CH/CHZUL GEBILDET UND UEBER INTERPOLATION
C     DER GROESSTE MASSENSTROM GESUCHT, BEI DEM CH/CHZUL = 1 IST
      WRITE(2,'(A)')' KRITISCHER MASSENSTROM NACH KOCH'
      MK=0.0
      DO 320  I=(1+NL0),NGI,2
      DO 310 LL=1,NM
        VY(LL)=CH(LL,I)/CHZUL(LL,I)
  310 CONTINUE
      CALL IP2CH1(NM,M,VY,XKRIT,1.0)
      IF (XKRIT.GT.MK) THEN
        MK=XKRIT
        $K=$STUFE(I)
      ENDIF
  320 CONTINUE
      CALL IP2(NM,M,PIT,MK,PK)
      WRITE(2,'(A,F8.3,A)') ' MK =',MK,' KG/S  '//$K
C
```

```
C*****BESTIMMUNG DES KRITISCHEN MASSENSTROMES AUS DEM MAXIMUM VON ETAS**
      WRITE(2,'(A)')' KRITISCHER MASSENSTROM NACH WIRKUNGSGRAD'
      MW=0.0
      DO 330 LL=1,NM
      VY(LL)=ETAS(LL,NGI,10)
  330 CONTINUE
      CALL IP2MAX(NM,M,VY,XKRIT,YMAX)
      IF (XKRIT.GT.MW) THEN
        MW=XKRIT
      ENDIF
      CALL IP2(NM,M,PIT,MW,PW)
      WRITE(2,'(A,F8.3,A)') ' MW =',MW,' KG/S'
C
C*****ABSPEICHERN DER ERGEBNISSE IN DER DATEI $(NAME).(TYP).STAB.DTA****
      WRITE( 2,'(A)')' ERGEBNISSE IN DATEI $(NAME).(TYP).STAB.DTA'
      WRITE(17,'(A)')'DATEN ZUR BEURTEILUNG DER STABILITAETSGRENZE FUER
     &AXIALVERDICHTER NACH DEM PROGRAMM STAB.SRC'
      WRITE(17,'(A)') $TYP
      WRITE(17,'(A)') 'PUNKT     SPF          M            PIT'
      DO 340 LL=1,NM
      WRITE(17,'(I3,3F12.4)') LL,SPF(LL),M(LL),PIT(LL)
  340 CONTINUE
      WRITE(17,'(A)')  'DATEN FUER DIE KRITERIEN VON LIEBLEIN UND TRAUPE
     &L:'
      DO 370 I=1,NGI
      WRITE(17,'(A)') $EBENE(I)
      WRITE(17,'(A)')'     ---------M1---------- ---------M2----------
     & ---------M3---------- ---------M4---------- ---------M5--------
     &----'
      WRITE(17,'(A)')'STRL    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU
     &    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSI
     &STU '
      DO 350 J=1,NSTR
      WRITE(17,'(I3,5(F8.2,3F5.2))') J,(R2(LL,I,J),DEQ(LL,I,J),
     &PHI(LL,I,J),PSI(LL,I,J),LL=1,5)
  350 CONTINUE
      WRITE(17,'(A,F6.2,3F5.2,4(F8.2,3F5.2))') 'INTEG',(R2(LL,I,10),
     &DEQ(LL,I,10),PHI(LL,I,10),PSI(LL,I,10),LL=1,5)
      WRITE(17,'(A)')'     ---------M6---------- ---------M7----------
     & ---------M8---------- ---------M9---------- ---------M10-------
     &----'
      WRITE(17,'(A)')'STRL    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU
     &    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSI
     &STU '
      DO 360 J=1,NSTR
      WRITE(17,'(I3,5(F8.2,3F5.2))') J,(R2(LL,I,J),DEQ(LL,I,J),
     &PHI(LL,I,J),PSI(LL,I,J),LL=6,NM)
  360 CONTINUE
      WRITE(17,'(A,F6.2,3F5.2,4(F8.2,3F5.2))') 'INTEG',(R2(LL,I,10),
     &DEQ(LL,I,10),PHI(LL,I,10),PSI(LL,I,10),LL=6,NM)
  370 CONTINUE
      WRITE(17,'(A)')'                              ---------M1------- -----
     &----M2------- ---------M3------- ---------M4------- ---------M5---
     &----'
      WRITE(17,'(A)')'                              ---------M6------- -----
     &----M7------- ---------M8------- ---------M9------- ---------M10--
     &----'
      WRITE(17,'(A)')'KOCHKRITERIUM:                CHZUL    CH        CH
     &ZUL    CH        CHZUL    CH        CHZUL    CH        CHZUL   CH'
      DO 380 I=(1+NL0),NGI,2
      WRITE(17,'(A,F9.3,F8.3,4(F11.3,F8.3))')$STUFE(I),
     &     (CHZUL(LL,I),CH(LL,I),LL=1,5)
      WRITE(17,'(A,F9.3,F8.3,4(F11.3,F8.3))')$STUFE(I),
```

```
     &     (CHZUL(LL,I),CH(LL,I),LL=6,NM)
  380 CONTINUE
      WRITE(17,'(A)')'                              ---------M1------- -----
     &----M2------- ---------M3------- ---------M4------- ---------M5---
     &----'
      WRITE(17,'(A)')'                              ---------M6------- -----
     &----M7------- ---------M8------- ---------M9------- ---------M10--
     &----'
      WRITE(17,'(A,F14.4,4F19.4)') 'ETAS DER BESCHAUFELUNG ==>',
     &     (ETAS(LL,NGI,10),LL=1,5)
      WRITE(17,'(A,F14.4,4F19.4)') '                              ',
     &     (ETAS(LL,NGI,10),LL=6,NM)
      WRITE(17,'(A)') 'STABILITAETSGRENZE: '
      WRITE(17,'(2(A,F8.3),A)')'NACH LIEBLEIN INSTABIL BIS ML =',ML,
     &' KG/S UND PIT =',PL,'  '//$L//
     &'(NAECHST GROESSERES VORGEGEBENES M IST STABIL)'
      WRITE(17,'(2(A,F8.3),A)')'NACH   KOCH   GRENZE   BEI MK =',MK,
     &' KG/S UND PIT =',PK,'  '//$K
      WRITE(17,'(2(A,F8.3),A)')'NACH  TRAUPEL GRENZE   BEI MT =',MT,
     &' KG/S UND PIT =',PT,'  '//$T
      WRITE(17,'(2(A,F8.3))')  'NACH  ETASMAX GRENZE   BEI MW =',MW,
     &' KG/S UND PIT =',PW
C
C*****VORBEREITUNG VON PLOTTDATEIEN************************************
      K=17
      DO 390 I=(1+NL0),NGI,2
      K=K+1
      CALL PLOT (NM,NSTR,K,I,PHI,PSI)
  390 CONTINUE
C
      STOP
      END
C#####ENDE HAUPTPROGRAMM###############################################
C#####UNTERPROGRAMME####################################################
      REAL FUNCTION FE(PI,R1,R2,BE1,V1,CA2,PHI)
C*****KOEFFIZIENT ZUR BESTIMMUNG DER EFFEKT.KIN.ENERGIE NACH KOCH*******
C     FE = V1EFF^2/V1^2
      REAL BE1, CA2, PHI, PI, R1, R2, V1, U1, U2, X
      U2=CA2/PHI
      U1=U2*R1/R2
C     X WIRD NACHFOLGEND BENUTZT, UM CM1=WM1 ZU BESTIMMEN
      X=COS(BE1)*V1
C     X WIRD NACHFOLGEND BENUTZT, UM STROEM.WINKEL IM ANDEREN BEZUGS-
C     SYSTEM ZU BESTIMMEN
      X=ATAN((U1-SIN(BE1)*V1)/X)
C     X WIRD ZUM ANTEIL VON FE
      IF     (X     .LT.    0.0) THEN
        X=0.625*U1*U1/(V1*V1)
      ELSEIF (X+BE1 .GT. 0.5*PI) THEN
        X=0.625
      ELSE
        X=0.625*SIN(X+BE1)*SIN(X+BE1)
      ENDIF
      FE=0.25+X+0.125*U1*U1/(V1*V1)
      END
C
      SUBROUTINE PLOT (NM,NSTR,DEV,GITTER,PHI,PSI)
C*****ANLEGEN EINER PLOTDATEI FUER SEPARATE PSI/PHI KENNLINIEN (1 STUFE)
      REAL PHI(10,50,10), PSI(10,50,10)
      INTEGER DEV,J,LL,NM,NSTR,GITTER
      CHARACTER * (80,V) $STR
      DO 100 J=2,(NSTR-1)
      WRITE($STR,'(I1)') NM
```

```
      WRITE(DEV,'(A)') $STR//', 1, 1, 1'
      WRITE($STR,'(I1)') J
      WRITE(DEV,'(A)') ''''//$STR//''''
      DO 100 LL=1,NM
      WRITE(DEV,'(2F12.8)') PHI(LL,GITTER,J), PSI(LL,(GITTER+1),J)
  100 CONTINUE
      END
C
      SUBROUTINE IP2MAX (NM,VX,VY,XKRIT,YMAX)
C*****BESTIMMUNG DES MAXIMUMS INNERHALB VY MIT POLYNOM 2. GRADES********
C     SIND WENIGER ALS DREI WERTEPAARE VORHANDEN ODER LIEGT DAS MAXIMUM
C     AM RANDE DES INTERVALLS, SO WIRD MAXIMUM = 0 AUSGEGEBEN
C     XKRIT IST DER KORRESPONDIERENDE WERT ZU YMAX
      REAL G1, G2, X, XKRIT, Y, YMAX, VX(10), VY(10)
      INTEGER K,LL,M,N,NM
      XKRIT=0.0
      YMAX=0.0
      K   =0
      M   =0
      IF (NM.GT.2) THEN
        DO 100 LL=1,NM
        IF (VY(LL).GT.YMAX) THEN
          YMAX=VY(LL)
          M=LL
        ENDIF
  100   CONTINUE
        IF     (M.LT.   2) THEN
          M=2
          K=1
        ELSEIF (M.GT.NM-1) THEN
          M=NM-1
          K=1
        ENDIF
        G1= (VY(M  )-VY(M-1))/(VX(M  )-VX(M-1))
        G2=((VY(M+1)-VY(M-1))/(VX(M+1)-VX(M-1)) - G1)/(VX(M+1)-VX(M))
        DO 110 N=0,100
        X=VX(M-1)+N*(VX(M+1)-VX(M-1))/100
        Y=(G2*(X-VX(M))+G1)*(X-VX(M-1)) + VY(M-1)
        IF (Y.GE.YMAX) THEN
          XKRIT=X
          YMAX =Y
        ENDIF
  110   CONTINUE
        IF (K.EQ.1) THEN
          XKRIT=0.0
          YMAX=0.0
        ENDIF
      ENDIF
      END
C
      SUBROUTINE IP2CH1 (NM,VX,VY,XKRIT,YMAX)
C*****INTERPOLATION FUER DAS KOCHKRITERIUM MIT POLYNAOM 2. GRADES*******
C     YMAX IST DER MAXIMAL ZULAESSIGE Y-WERT, DER UEBER X NATUERLICH
C     AUCH MEHRMALS AUFTRETEN KANN; DAS GROESSTE SO ZU YMAX ERMITTELTE X
C     WIRD ALS XKRIT UEBERGEBEN
      REAL G1, G2, X, XKRIT, Y, YMAX, VX(10), VY(10)
      INTEGER K,LL,N,NM
      XKRIT=0.0
      IF (NM.GT.2) THEN
        DO 120 K=0,100
        X=VX(1)+K*(VX(NM)-VX(1))/100
C       BESTIMMUNG VON N = LAGE VON X
        N=0
```

```
        IF (VX(2).GE.VX(1)) THEN
          DO 100 LL=1,NM
            IF (X.GT.VX(LL)) THEN
              N=LL
            ENDIF
  100     CONTINUE
        ELSE
          DO 110 LL=1,NM
            IF (X.LT.VX(LL)) THEN
              N=LL
            ENDIF
  110     CONTINUE
        ENDIF
        IF (N.GT.NM-2) THEN
          N=NM-2
        ENDIF
        G1= (VY(N+1)-VY(N))/(VX(N+1)-VX(N))
        G2=((VY(N+2)-VY(N))/(VX(N+2)-VX(N))-G1)/(VX(N+2)-VX(N+1))
        Y=(G2*(X-VX(N+1))+G1)*(X-VX(N)) + VY(N)
        IF (Y.GE.YMAX) THEN
          IF (X.GT.XKRIT) THEN
            XKRIT=X
          ENDIF
        ENDIF
  120   CONTINUE
        IF (XKRIT.GT.0.0) THEN
          XKRIT=XKRIT + ABS(VX(NM)-VX(1))/100
        ENDIF
      ENDIF
      END
C
      SUBROUTINE IP2 (NM,VX,VY,X,Y)
C*****BESTIMMUNG Y(X) AUS DEN FELDERN VX,VY MIT POLYNOM 2. GRADES*******
C     BEI VORGABE VON X=0 WIRD Y=0 AUSGEGEBEN
C     MUSS EXTRAPOLIERT ODER LINEAR INTERPOLIERT WERDEN, SO WIRD NUR AM
C     BILDSCHIRM DARAUF HINGEWIESEN
C
      REAL G1, G2, X, Y, VX(10), VY(10)
      INTEGER LL, N, NM
      Y=0.0
      IF (X.NE.0.0) THEN
       IF (NM.GT.2) THEN
C       BESTIMMUNG VON N = LAGE VON X
        N=0
        IF (VX(2).GE.VX(1)) THEN
          DO 100 LL=1,NM
            IF (X.GT.VX(LL)) THEN
              N=LL
            ENDIF
  100     CONTINUE
        ELSE
          DO 110 LL=1,NM
            IF (X.LT.VX(LL)) THEN
              N=LL
            ENDIF
  110     CONTINUE
        ENDIF
        IF     (N.LT.  1) THEN
          N=1
        ELSEIF (N.GT.NM-2) THEN
          N=NM-2
        ENDIF
        IF (X.LT.VX(1).AND.X.LT.VX(NM)) THEN
```

```
          WRITE(2,'(A,F8.3,A)') ' EXTRAPOLATION: X = ',X,' ZU KLEIN'
        ENDIF
        IF (X.GT.VX(1).AND.X.GT.VX(NM)) THEN
          WRITE(2,'(A,F8.3,A)') ' EXTRAPOLATION: X = ',X,' ZU GR0SS'
        ENDIF
        G1= (VY(N+1)-VY(N))/(VX(N+1)-VX(N))
        G2=((VY(N+2)-VY(N))/(VX(N+2)-VX(N))-G1)/(VX(N+2)-VX(N+1))
        Y=(G2*(X-VX(N+1))+G1)*(X-VX(N)) + VY(N)
      ENDIF
      ENDIF
      END
C
```

11.2 Source Code Listing Prozedur PROC.STAB

```
/PROC N ,(&NAME,&TYP),SUBDTA=&
/REMARK &NAME
/REMARK &TYP
/FILE $&NAME..&TYP..PLOT,LINK=DSET15,FCBTYPE=SAM
/FILE $&NAME..&TYP.,LINK=DSET16,FCBTYPE=SAM
/FILE $&NAME..&TYP..STAB.DTA,LINK=DSET17,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.1,LINK=DSET18,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.2,LINK=DSET19,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.3,LINK=DSET20,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.4,LINK=DSET21,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.5,LINK=DSET22,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.6,LINK=DSET23,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.7,LINK=DSET24,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.8,LINK=DSET25,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.9,LINK=DSET26,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.10,LINK=DSET27,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.11,LINK=DSET28,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.12,LINK=DSET29,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.13,LINK=DSET30,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.14,LINK=DSET31,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.15,LINK=DSET32,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.16,LINK=DSET33,FCBTYPE=SAM
/FILE #STAB.PLOT.17,LINK=DSET34,FCBTYPE=SAM
/EXEC OBJ.STAB
/RELEASE DSET15
/RELEASE DSET16
/RELEASE DSET17
/RELEASE DSET18
/RELEASE DSET19
/RELEASE DSET20
/RELEASE DSET21
/RELEASE DSET22
/RELEASE DSET23
/RELEASE DSET24
/RELEASE DSET25
/RELEASE DSET26
/RELEASE DSET27
/RELEASE DSET28
/RELEASE DSET29
/RELEASE DSET30
/RELEASE DSET31
/RELEASE DSET32
/RELEASE DSET33
/RELEASE DSET34
/ENDP
```

11.3 Beispiel für eine Ergebnisdatei STAB.DTA

```
DATEN ZUR BEURTEILUNG DER STABILITAETSGRENZE FUER AXIALVERDICHTER NACH DEM PROGRAMM STAB.SRC
VERSUCHSVERDICHTER VV94 MIT LE00 + 3.5 GRAD       VV94.FLE0.ODF
PUNKT      SPF          M           PIT
  1       1.0000      22.0000      2.7141
  2       1.0000      22.2000      2.6692
  3       1.0000      22.4000      2.6131
  4       1.0000      22.6000      2.5414
  5       1.0000      22.8000      2.4458
DATEN FUER DIE KRITERIEN VON LIEBLEIN UND TRAUPEL:
HI LE00
     ---------M1---------- ---------M2---------- ---------M3---------- ---------M4---------- ---------M5----------
STRL    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU
  1    0.12-1.00 0.65 0.00    0.12-1.00 0.66 0.00    0.12-1.00 0.67 0.00    0.12-1.00 0.68 0.00    0.12-1.00 0.68 0.00
  2    0.14-0.95 0.66 0.00    0.14-0.95 0.67 0.00    0.14-0.95 0.68 0.00    0.14-0.95 0.69 0.00    0.14-0.95 0.70 0.00
  3    0.15-0.90 0.66 0.00    0.15-0.90 0.67 0.00    0.15-0.90 0.68 0.00    0.15-0.90 0.69 0.00    0.15-0.90 0.70 0.00
  4    0.16-0.86 0.67 0.00    0.16-0.86 0.68 0.00    0.16-0.86 0.69 0.00    0.16-0.86 0.70 0.00    0.16-0.86 0.71 0.00
  5    0.18-0.81 0.67 0.00    0.18-0.81 0.68 0.00    0.18-0.81 0.69 0.00    0.18-0.81 0.70 0.00    0.18-0.81 0.71 0.00
  6    0.19-0.76 0.66 0.00    0.19-0.76 0.67 0.00    0.19-0.76 0.68 0.00    0.19-0.76 0.69 0.00    0.19-0.76 0.70 0.00
  7    0.20-0.69 0.65 0.00    0.20-0.69 0.66 0.00    0.20-0.69 0.67 0.00    0.20-0.69 0.68 0.00    0.20-0.69 0.68 0.00
  8    0.22-0.62 0.63 0.00    0.22-0.62 0.64 0.00    0.22-0.62 0.65 0.00    0.22-0.62 0.65 0.00    0.22-0.62 0.66 0.00
  9    0.24-0.54 0.60 0.00    0.24-0.54 0.61 0.00    0.24-0.54 0.61 0.00    0.24-0.54 0.62 0.00    0.24-0.54 0.63 0.00
INTEG  0.00 0.00 0.66 0.00    0.00 0.00 0.67 0.00    0.00 0.00 0.68 0.00    0.00 0.00 0.69 0.00    0.00 0.00 0.69 0.00
HI LA01
     ---------M1---------- ---------M2---------- ---------M3---------- ---------M4---------- ---------M5----------
STRL    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU
  1    0.13 1.60 0.74 0.00    0.13 1.57 0.75 0.00    0.13 1.54 0.77 0.00    0.13 1.51 0.78 0.00    0.13 1.49 0.80 0.00
  2    0.14 1.56 0.72 0.00    0.14 1.53 0.73 0.00    0.14 1.50 0.75 0.00    0.14 1.48 0.76 0.00    0.14 1.45 0.78 0.00
  3    0.15 1.54 0.70 0.00    0.15 1.51 0.71 0.00    0.15 1.48 0.73 0.00    0.15 1.46 0.74 0.00    0.15-1.44 0.76 0.00
  4    0.17 1.52 0.68 0.00    0.17 1.49 0.70 0.00    0.17 1.47 0.71 0.00    0.17-1.45 0.72 0.00    0.17-1.44 0.74 0.00
  5    0.18 1.50 0.66 0.00    0.18 1.48 0.68 0.00    0.18-1.46 0.69 0.00    0.18-1.45 0.70 0.00    0.18-1.43 0.72 0.00
  6    0.19 1.48 0.64 0.00    0.19-1.46 0.65 0.00    0.19-1.45 0.66 0.00    0.19-1.43 0.68 0.00    0.19-1.41 0.69 0.00
  7    0.20-1.46 0.61 0.00    0.20-1.45 0.62 0.00    0.20-1.43 0.63 0.00    0.20-1.41 0.64 0.00    0.20-1.39 0.65 0.00
  8    0.22-1.44 0.57 0.00    0.22-1.43 0.58 0.00    0.22-1.41 0.59 0.00    0.22-1.39 0.60 0.00    0.22-1.37 0.61 0.00
  9    0.23-1.43 0.52 0.00    0.23-1.41 0.53 0.00    0.23-1.39 0.54 0.00    0.23-1.37 0.55 0.00    0.23-1.35 0.56 0.00
INTEG  0.00 0.00 0.65 0.00    0.00 0.00 0.66 0.00    0.00 0.00 0.67 0.00    0.00 0.00 0.69 0.00    0.00 0.00 0.70 0.00
HI LE01
     ---------M1---------- ---------M2---------- ---------M3---------- ---------M4---------- ---------M5----------
STRL    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU
  1    0.14 1.43 0.72 0.51    0.14 1.40 0.74 0.49    0.14 1.38 0.77 0.46    0.14-1.36 0.79 0.43    0.14-1.35 0.82 0.39
  2    0.15 1.47 0.69 0.55    0.15 1.43 0.71 0.53    0.15 1.40 0.73 0.50    0.15-1.38 0.76 0.47    0.15-1.37 0.78 0.43
  3    0.16 1.49 0.67 0.58    0.16 1.46 0.69 0.56    0.16 1.42 0.71 0.53    0.16-1.40 0.73 0.50    0.16-1.38 0.76 0.47
  4    0.17 1.51 0.66 0.62    0.17 1.47 0.67 0.59    0.17 1.44 0.69 0.56    0.17-1.41 0.71 0.53    0.17-1.39 0.73 0.50
  5    0.18 1.53 0.64 0.65    0.18 1.49 0.65 0.62    0.18 1.45 0.67 0.59    0.18-1.43 0.69 0.56    0.18-1.40 0.71 0.53
  6    0.19 1.57 0.62 0.67    0.19 1.53 0.63 0.65    0.19 1.49 0.65 0.62    0.19-1.45 0.66 0.59    0.19-1.43 0.68 0.55
  7    0.21 1.64 0.60 0.70    0.21 1.59 0.61 0.68    0.21 1.54 0.62 0.65    0.21 1.50 0.63 0.62    0.21-1.47 0.65 0.58
  8    0.22 1.74 0.58 0.72    0.22 1.69 0.59 0.70    0.22 1.64 0.60 0.67    0.22 1.59 0.61 0.64    0.22 1.54 0.62 0.60
  9    0.23 1.92 0.58 0.74    0.23 1.86 0.58 0.71    0.23 1.80 0.59 0.68    0.23 1.74 0.60 0.65    0.23 1.68 0.61 0.62
INTEG  0.00 0.00 0.63 0.65    0.00 0.00 0.65 0.63    0.00 0.00 0.66 0.60    0.00 0.00 0.68 0.57    0.00 0.00 0.70 0.53
HI LA02
     ---------M1---------- ---------M2---------- ---------M3---------- ---------M4---------- ---------M5----------
STRL    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU
  1    0.15 1.59 0.63 0.00    0.15 1.53 0.65 0.00    0.15 1.47 0.67 0.00    0.15-1.43 0.70 0.00    0.15-1.40 0.73 0.00
  2    0.16 1.62 0.62 0.00    0.16 1.55 0.64 0.00    0.16 1.50 0.66 0.00    0.16-1.45 0.69 0.00    0.16-1.42 0.71 0.00
  3    0.17 1.63 0.61 0.00    0.17 1.57 0.63 0.00    0.17 1.52 0.65 0.00    0.16 1.47 0.67 0.00    0.16-1.44 0.70 0.00
  4    0.18 1.64 0.60 0.00    0.17 1.59 0.62 0.00    0.17 1.53 0.63 0.00    0.17 1.49 0.65 0.00    0.17-1.46 0.68 0.00
  5    0.19 1.66 0.59 0.00    0.19 1.60 0.61 0.00    0.18 1.55 0.62 0.00    0.18 1.51 0.64 0.00    0.18-1.48 0.66 0.00
  6    0.20 1.68 0.58 0.00    0.20 1.63 0.59 0.00    0.20 1.59 0.61 0.00    0.20 1.54 0.62 0.00    0.19-1.50 0.64 0.00
  7    0.21 1.69 0.57 0.00    0.21 1.65 0.58 0.00    0.21 1.61 0.59 0.00    0.21 1.57 0.61 0.00    0.21 1.53 0.62 0.00
  8    0.22 1.65 0.55 0.00    0.22 1.62 0.56 0.00    0.22 1.59 0.57 0.00    0.22 1.56 0.59 0.00    0.22 1.53 0.60 0.00
  9    0.23 1.51 0.53 0.00    0.23 1.50 0.54 0.00    0.23-1.49 0.55 0.00    0.23-1.48 0.56 0.00    0.23-1.46 0.57 0.00
INTEG  0.00 0.00 0.59 0.00    0.00 0.00 0.60 0.00    0.00 0.00 0.62 0.00    0.00 0.00 0.63 0.00    0.00 0.00 0.65 0.00
HI LE02
     ---------M1---------- ---------M2---------- ---------M3---------- ---------M4---------- ---------M5----------
STRL    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU
  1    0.15 1.70 0.57 0.73    0.15 1.62 0.60 0.72    0.15 1.54 0.63 0.69    0.15 1.48 0.67 0.67    0.15-1.45 0.71 0.63
  2    0.16 1.73 0.57 0.75    0.16 1.65 0.59 0.73    0.16 1.58 0.62 0.71    0.16 1.51 0.65 0.68    0.16-1.46 0.69 0.65
  3    0.17 1.75 0.57 0.75    0.17 1.68 0.59 0.74    0.17 1.60 0.62 0.72    0.17 1.53 0.64 0.69    0.17-1.48 0.67 0.66
  4    0.18 1.76 0.58 0.76    0.18 1.69 0.59 0.74    0.18 1.62 0.61 0.72    0.18 1.55 0.63 0.70    0.18-1.49 0.66 0.67
  5    0.19 1.75 0.58 0.76    0.19 1.69 0.59 0.75    0.19 1.63 0.61 0.73    0.19 1.57 0.62 0.71    0.19 1.51 0.65 0.67
  6    0.20 1.75 0.57 0.77    0.20 1.70 0.59 0.75    0.20 1.64 0.60 0.74    0.20 1.58 0.62 0.71    0.20 1.53 0.63 0.68
  7    0.21 1.74 0.57 0.77    0.21 1.70 0.58 0.76    0.21 1.65 0.59 0.75    0.21 1.59 0.61 0.72    0.21 1.54 0.62 0.69
  8    0.22 1.74 0.57 0.78    0.22 1.70 0.57 0.77    0.22 1.65 0.58 0.76    0.22 1.60 0.60 0.73    0.22 1.55 0.61 0.70
  9    0.23 1.78 0.57 0.80    0.23 1.74 0.57 0.79    0.23 1.70 0.58 0.78    0.23 1.65 0.59 0.76    0.23 1.60 0.60 0.73
INTEG  0.00 0.00 0.57 0.76    0.00 0.00 0.59 0.75    0.00 0.00 0.60 0.73    0.00 0.00 0.62 0.71    0.00 0.00 0.64 0.68
HI LA03
     ---------M1---------- ---------M2---------- ---------M3---------- ---------M4---------- ---------M5----------
STRL    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU    R2  DEQ  PHI PSISTU
  1    0.15 2.23 0.53 0.00    0.15 2.06 0.56 0.00    0.15 1.90 0.59 0.00    0.15 1.76 0.63 0.00    0.15 1.62 0.67 0.00
  2    0.16 2.10 0.54 0.00    0.16 1.98 0.56 0.00    0.16 1.85 0.59 0.00    0.16 1.73 0.62 0.00    0.16 1.62 0.65 0.00
  3    0.17 2.01 0.54 0.00    0.17 1.92 0.56 0.00    0.17 1.82 0.58 0.00    0.17 1.72 0.61 0.00    0.17 1.62 0.64 0.00
  4    0.18 1.93 0.55 0.00    0.18 1.86 0.56 0.00    0.18 1.79 0.58 0.00    0.18 1.70 0.60 0.00    0.18 1.62 0.63 0.00
  5    0.19 1.87 0.55 0.00    0.19 1.81 0.56 0.00    0.19 1.75 0.58 0.00    0.19 1.68 0.60 0.00    0.19 1.61 0.62 0.00
  6    0.20 1.80 0.55 0.00    0.20 1.76 0.56 0.00    0.20 1.71 0.58 0.00    0.20 1.65 0.59 0.00    0.20 1.59 0.61 0.00
  7    0.21 1.73 0.55 0.00    0.21 1.70 0.56 0.00    0.21 1.66 0.57 0.00    0.21 1.61 0.59 0.00    0.21-1.57 0.60 0.00
  8    0.22 1.64 0.54 0.00    0.22 1.62 0.55 0.00    0.22 1.59 0.56 0.00    0.22 1.56 0.57 0.00    0.22-1.53 0.59 0.00
  9    0.23-1.52 0.52 0.00    0.23-1.51 0.53 0.00    0.23-1.50 0.54 0.00    0.23-1.49 0.55 0.00    0.23-1.47 0.56 0.00
INTEG  0.00 0.00 0.55 0.00    0.00 0.00 0.56 0.00    0.00 0.00 0.58 0.00    0.00 0.00 0.60 0.00    0.00 0.00 0.62 0.00
```

HI LE03

STRL	M1 R2	M1 DEQ	M1 PHI	M1 PSISTU	M2 R2	M2 DEQ	M2 PHI	M2 PSISTU	M3 R2	M3 DEQ	M3 PHI	M3 PSISTU	M4 R2	M4 DEQ	M4 PHI	M4 PSISTU	M5 R2	M5 DEQ	M5 PHI	M5 PSISTU
1	0.16	2.11	0.45	0.81	0.16	1.97	0.48	0.80	0.16	1.83	0.52	0.79	0.16	1.71	0.57	0.77	0.16	1.60	0.62	0.74
2	0.17	2.09	0.48	0.82	0.17	1.97	0.51	0.81	0.17	1.85	0.54	0.80	0.16	1.73	0.57	0.78	0.16	1.61	0.61	0.76
3	0.17	2.05	0.51	0.82	0.17	1.95	0.53	0.81	0.17	1.85	0.55	0.80	0.17	1.74	0.58	0.78	0.17	1.63	0.61	0.76
4	0.18	2.00	0.53	0.81	0.18	1.92	0.54	0.81	0.18	1.83	0.56	0.80	0.18	1.74	0.58	0.78	0.18	1.64	0.61	0.75
5	0.19	1.94	0.54	0.81	0.19	1.88	0.55	0.80	0.19	1.81	0.56	0.79	0.19	1.73	0.58	0.78	0.19	1.64	0.61	0.75
6	0.20	1.89	0.55	0.80	0.20	1.84	0.55	0.80	0.20	1.78	0.56	0.79	0.20	1.72	0.58	0.77	0.20	1.64	0.60	0.75
7	0.21	1.86	0.55	0.80	0.21	1.82	0.55	0.80	0.21	1.77	0.56	0.79	0.21	1.71	0.57	0.77	0.21	1.64	0.59	0.75
8	0.22	1.87	0.54	0.81	0.22	1.83	0.54	0.80	0.22	1.79	0.55	0.80	0.22	1.73	0.56	0.78	0.22	1.66	0.57	0.75
9	0.23	1.98	0.52	0.83	0.23	1.95	0.53	0.83	0.23	1.90	0.53	0.83	0.23	1.85	0.54	0.81	0.23	1.77	0.55	0.79
INTEG	0.00	0.00	0.53	0.81	0.00	0.00	0.54	0.80	0.00	0.00	0.56	0.79	0.00	0.00	0.58	0.78	0.00	0.00	0.60	0.75

HI LA04

STRL	M1 R2	M1 DEQ	M1 PHI	M1 PSISTU	M2 R2	M2 DEQ	M2 PHI	M2 PSISTU	M3 R2	M3 DEQ	M3 PHI	M3 PSISTU	M4 R2	M4 DEQ	M4 PHI	M4 PSISTU	M5 R2	M5 DEQ	M5 PHI	M5 PSISTU
1	0.16	2.96	0.45	0.00	0.16	2.65	0.48	0.00	0.16	2.37	0.52	0.00	0.16	2.10	0.56	0.00	0.16	1.86	0.61	0.00
2	0.17	2.48	0.48	0.00	0.16	2.32	0.50	0.00	0.16	2.14	0.53	0.00	0.16	1.97	0.56	0.00	0.16	1.79	0.60	0.00
3	0.17	2.22	0.50	0.00	0.17	2.12	0.52	0.00	0.17	2.01	0.54	0.00	0.17	1.88	0.57	0.00	0.17	1.74	0.60	0.00
4	0.18	2.04	0.52	0.00	0.18	1.98	0.53	0.00	0.18	1.90	0.55	0.00	0.18	1.81	0.57	0.00	0.18	1.70	0.60	0.00
5	0.19	1.91	0.53	0.00	0.19	1.87	0.54	0.00	0.19	1.82	0.55	0.00	0.19	1.75	0.57	0.00	0.19	1.66	0.60	0.00
6	0.20	1.81	0.54	0.00	0.20	1.78	0.55	0.00	0.20	1.74	0.56	0.00	0.19	1.69	0.57	0.00	0.19	1.62	0.60	0.00
7	0.20	1.72	0.54	0.00	0.20	1.70	0.55	0.00	0.20	1.68	0.56	0.00	0.20	1.64	0.57	0.00	0.20	1.58	0.59	0.00
8	0.21	1.62	0.54	0.00	0.21	1.61	0.54	0.00	0.21	1.60	0.55	0.00	0.21	1.57	0.56	0.00	0.21	1.53	0.58	0.00
9	0.22	1.49	0.52	0.00	0.22	1.49	0.53	0.00	0.22	1.49	0.53	0.00	0.22	-1.48	0.54	0.00	0.22	-1.46	0.56	0.00
INTEG	0.00	0.00	0.52	0.00	0.00	0.00	0.54	0.00	0.00	0.00	0.55	0.00	0.00	0.00	0.57	0.00	0.00	0.00	0.59	0.00

HI LE04

STRL	M1 R2	M1 DEQ	M1 PHI	M1 PSISTU	M2 R2	M2 DEQ	M2 PHI	M2 PSISTU	M3 R2	M3 DEQ	M3 PHI	M3 PSISTU	M4 R2	M4 DEQ	M4 PHI	M4 PSISTU	M5 R2	M5 DEQ	M5 PHI	M5 PSISTU
1	0.16	2.63	0.34	0.81	0.16	2.40	0.38	0.81	0.16	2.19	0.43	0.81	0.16	1.99	0.47	0.80	0.16	1.79	0.53	0.77
2	0.17	2.45	0.43	0.81	0.17	2.28	0.45	0.81	0.16	2.12	0.48	0.80	0.16	1.95	0.51	0.79	0.16	1.77	0.55	0.77
3	0.17	2.27	0.49	0.79	0.17	2.16	0.50	0.79	0.17	2.04	0.51	0.79	0.17	1.90	0.53	0.78	0.17	1.75	0.57	0.76
4	0.18	2.13	0.52	0.77	0.18	2.05	0.53	0.77	0.18	1.96	0.54	0.77	0.18	1.86	0.55	0.76	0.18	1.73	0.58	0.74
5	0.19	2.01	0.54	0.74	0.19	1.96	0.55	0.75	0.19	1.89	0.55	0.75	0.19	1.81	0.57	0.74	0.19	1.70	0.59	0.72
6	0.20	1.92	0.56	0.72	0.19	1.88	0.56	0.72	0.19	1.83	0.57	0.72	0.19	1.76	0.58	0.72	0.19	1.67	0.60	0.69
7	0.20	1.85	0.57	0.70	0.20	1.82	0.57	0.70	0.20	1.78	0.58	0.70	0.20	1.73	0.58	0.69	0.20	1.65	0.60	0.67
8	0.21	1.82	0.58	0.68	0.21	1.80	0.58	0.68	0.21	1.77	0.58	0.68	0.21	1.72	0.59	0.68	0.21	1.65	0.60	0.65
9	0.22	1.86	0.59	0.67	0.22	1.84	0.59	0.68	0.22	1.81	0.59	0.68	0.22	1.76	0.60	0.67	0.22	1.69	0.61	0.65
INTEG	0.00	0.00	0.54	0.74	0.00	0.00	0.54	0.74	0.00	0.00	0.55	0.74	0.00	0.00	0.56	0.73	0.00	0.00	0.59	0.71

KOCHKRITERIUM:	M1 CHZUL	M1 CH	M2 CHZUL	M2 CH	M3 CHZUL	M3 CH	M4 CHZUL	M4 CH	M5 CHZUL	M5 CH
STUFE AUS LA01 UND LE01	0.444	0.350	0.444	0.335	0.444	0.318	0.444	0.300	0.444	0.279
STUFE AUS LA02 UND LE02	0.439	0.415	0.439	0.405	0.440	0.392	0.440	0.376	0.440	0.356
STUFE AUS LA03 UND LE03	0.426	0.453	0.427	0.447	0.427	0.438	0.427	0.425	0.427	0.406
STUFE AUS LA04 UND LE04	0.421	0.431	0.421	0.431	0.422	0.427	0.422	0.418	0.422	0.401

	M1	M2	M3	M4	M5
ETAS DER BESCHAUFELUNG ==>	0.9294	0.9307	0.9316	0.9315	0.9293

STABILITAETSGRENZE:
NACH LIEBLEIN INSTABIL BIS ML = 22.200 KG/S UND PIT = 2.669 HI LE04 (NAECHST GROESSERES VORGEGEBENES M IST STABIL)
NACH KOCH GRENZE BEI MK = 22.576 KG/S UND PIT = 2.551 STUFE AUS LA03 UND LE03
NACH TRAUPEL GRENZE BEI MT = 22.310 KG/S UND PIT = 2.640 STUFE AUS LA04 UND LE04
NACH ETASMAX GRENZE BEI MW = 22.476 KG/S UND PIT = 2.589

11.4 Iso-Plotts für Diffusionszahlen bei verschiedenen Betriebspunkten

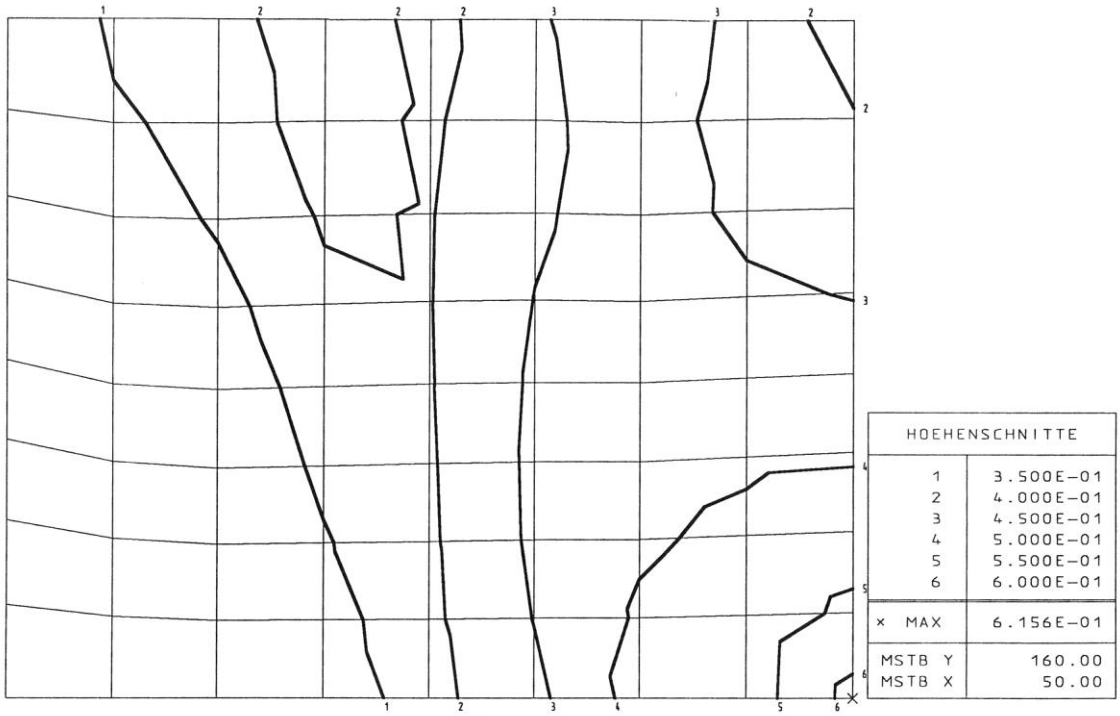


Abbildung 11.1: VV94 W100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Wirkungsgradkriterium n*=100%)

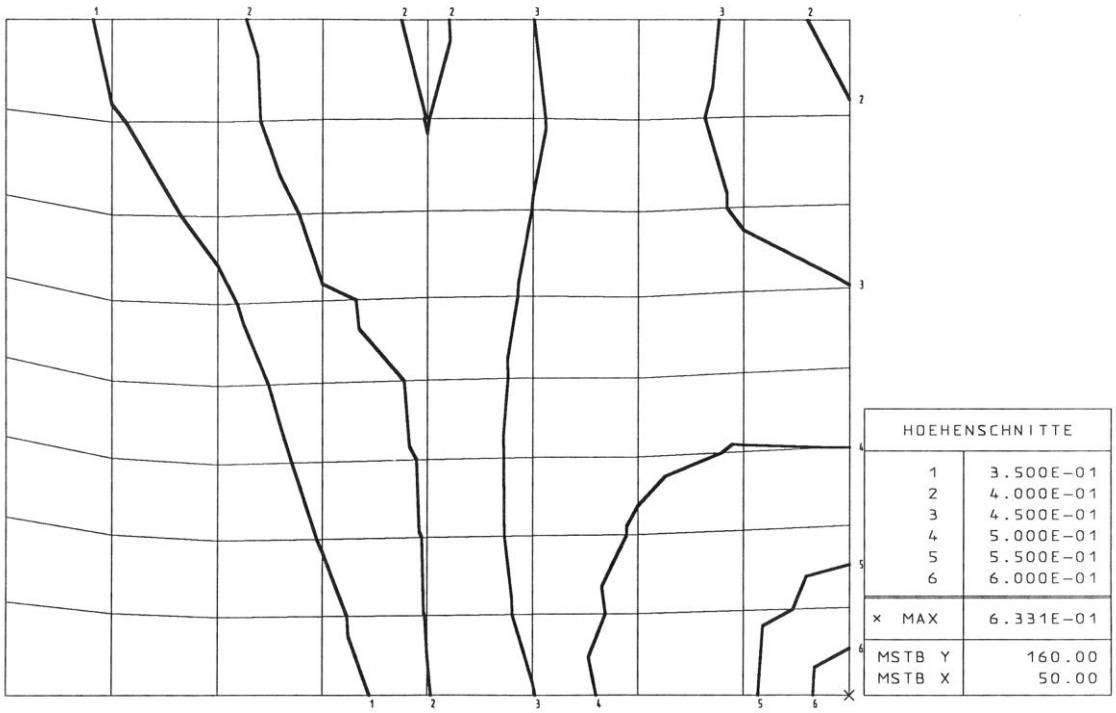


Abbildung 11.2: VV94 L100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=100%)

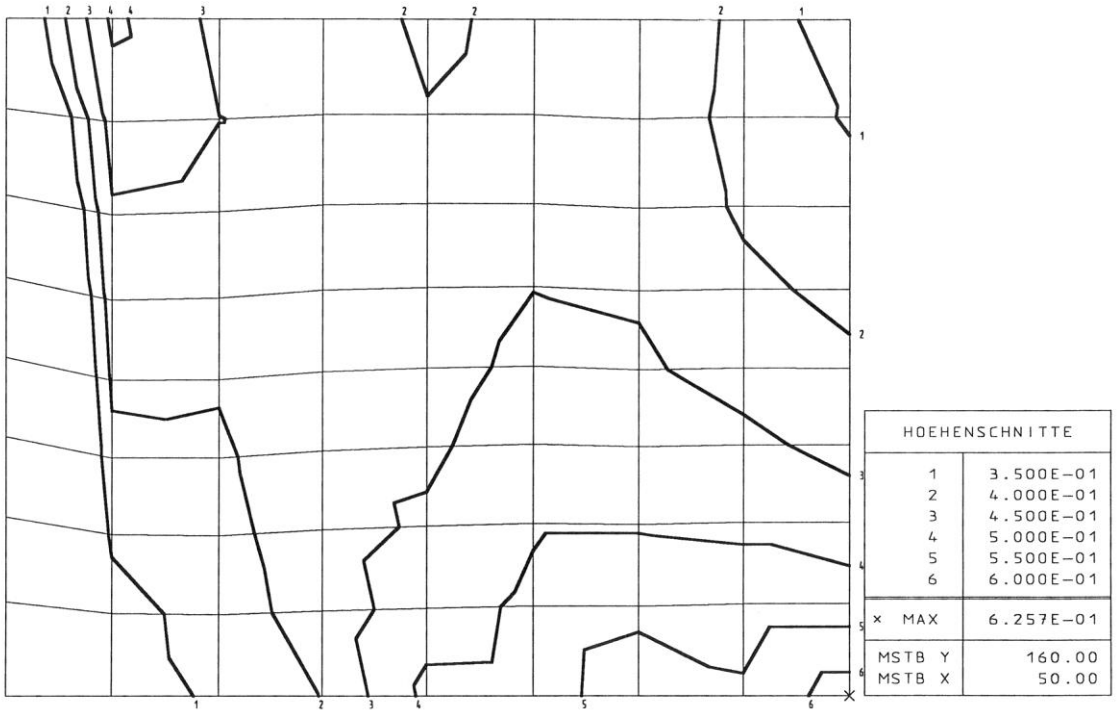


Abbildung 11.3: VV94 L81 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=81%)

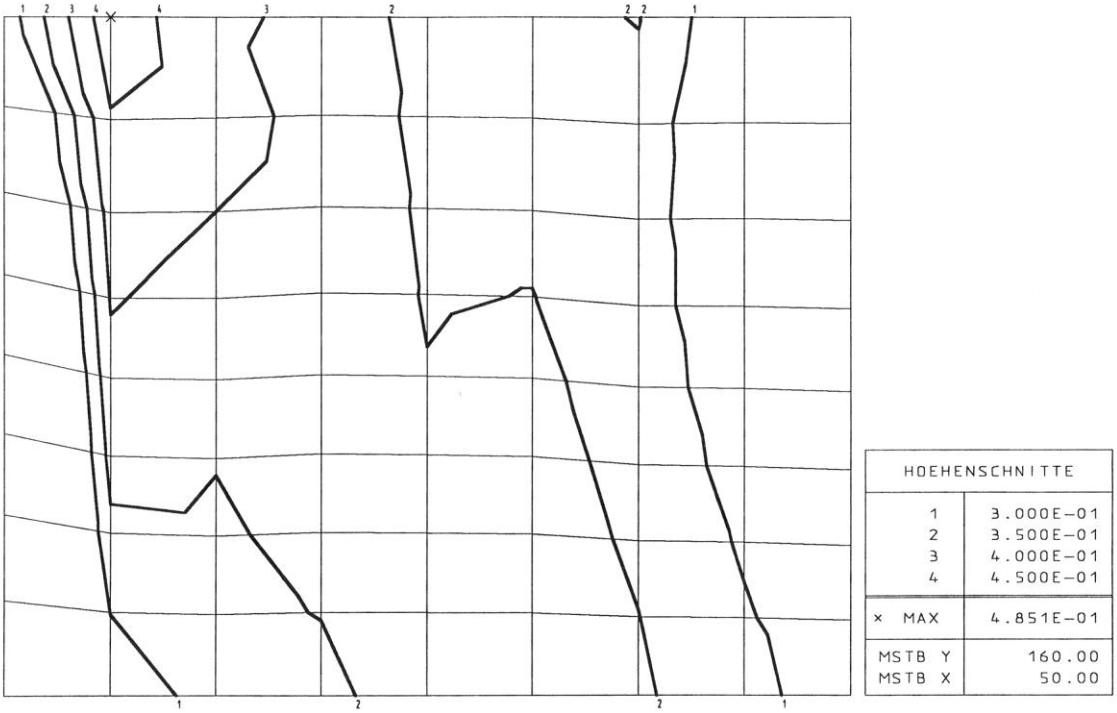
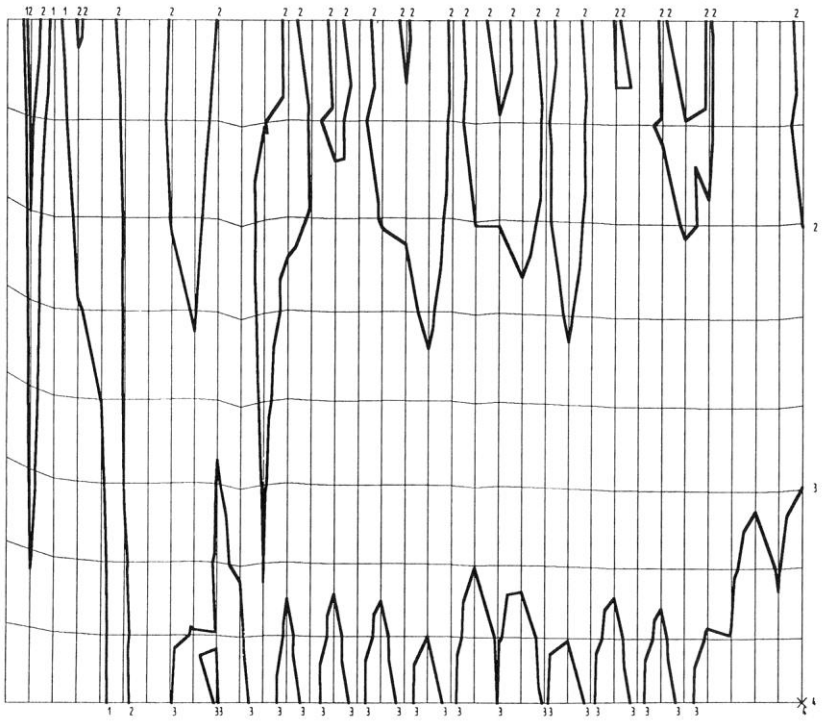
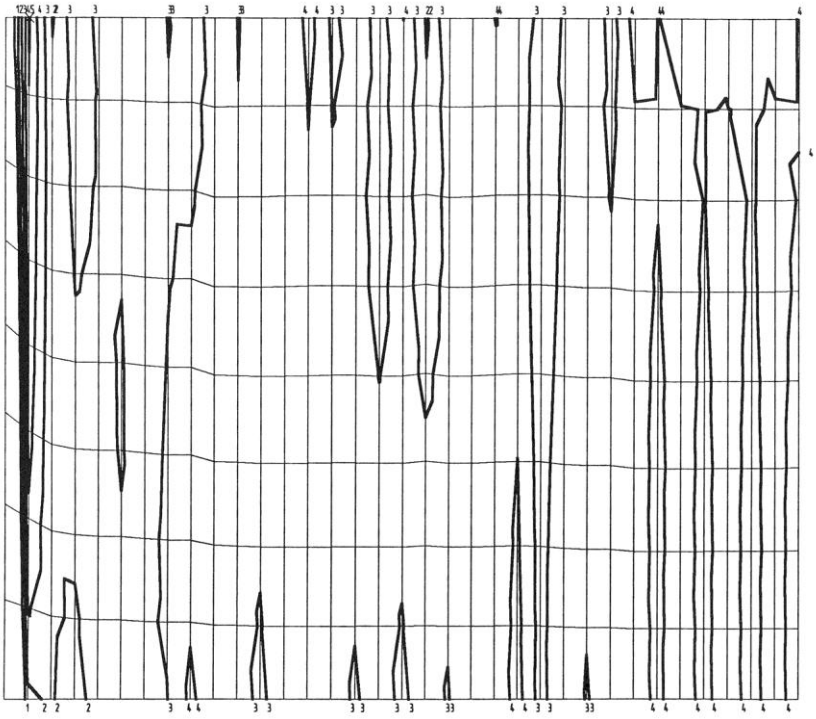


Abbildung 11.4: VV94 L60 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=60%)



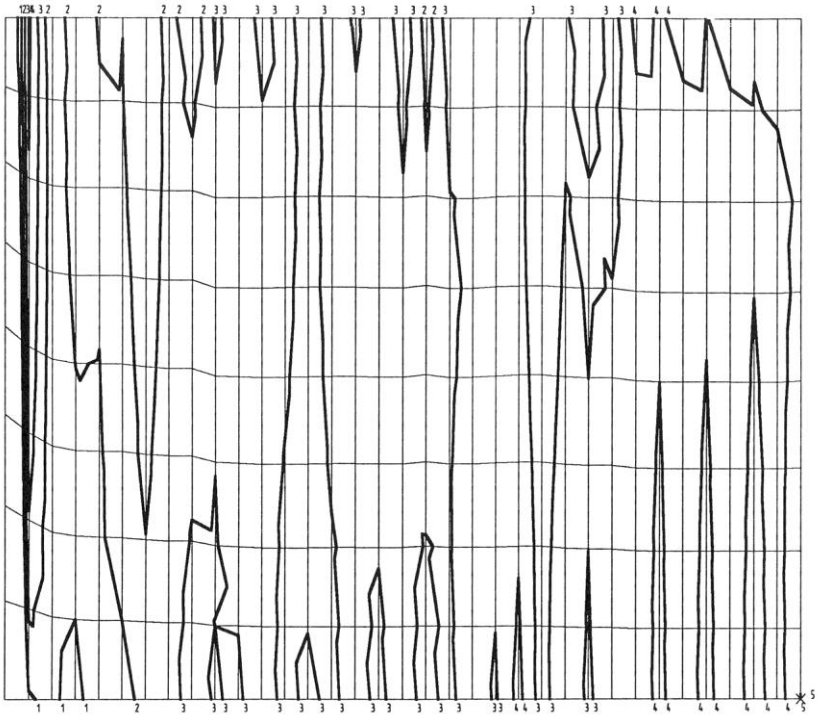
HOEHENSCHNITTE	
1	3.500E-01
2	4.000E-01
3	4.500E-01
4	5.000E-01
× MAX	5.003E-01
MSTB Y	160.00
MSTB X	11.00

Abbildung 11.5: VX4.2 W100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Wirkungsgradkriterium n*=100%)



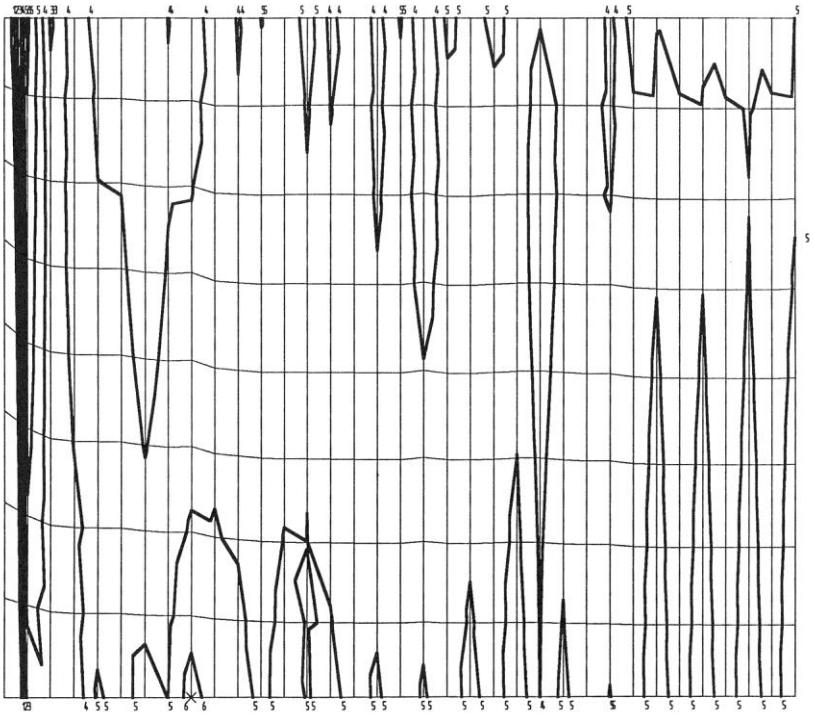
HOEHENSCHNITTE	
1	3.000E-01
2	3.500E-01
3	4.000E-01
4	4.500E-01
5	5.000E-01
× MAX	5.018E-01
MSTB Y	160.00
MSTB X	11.00

Abbildung 11.6: VX4.3 W100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Wirkungsgradkriterium n*=100%)



HOEHENSCHNITTE	
1	3.500E-01
2	4.000E-01
3	4.500E-01
4	5.000E-01
5	5.500E-01
× MAX	5.503E-01
MSTB Y	160.00
MSTB X	11.00

Abbildung 11.7: VX4.3 L100 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=100%)



HOEHENSCHNITTE	
1	3.000E-01
2	3.500E-01
3	4.000E-01
4	4.500E-01
5	5.000E-01
6	5.500E-01
× MAX	5.741E-01
MSTB Y	160.00
MSTB X	11.00

Abbildung 11.8: VX4.3 L95 Diffusionszahl (Pumpgrenzpunkt nach Liebleinkriterium n*=95%)