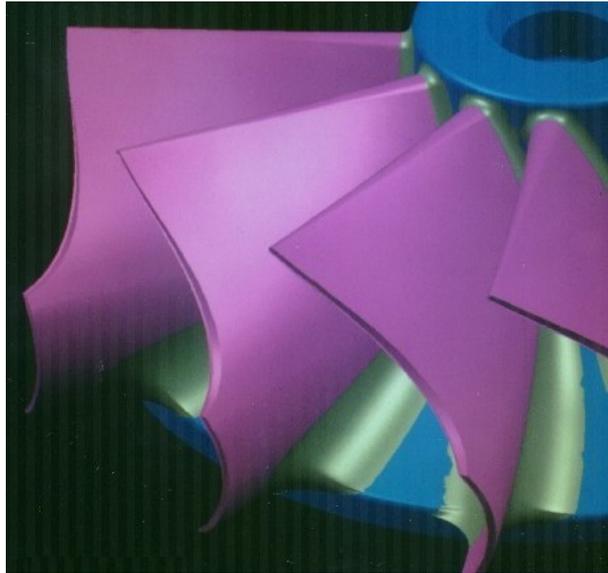


Theoretische Untersuchung des Teillastverhaltens einer Radialverdichterstufe



DIPLOMARBEIT

Nikolaus Langert

Mai 1998

Fachhochschule Ravensburg-Weingarten

Betreut von: Prof. Dipl.-Ing. Karl Götz
Dipl.-Ing. (FH) Jörg Hübler

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Grundlagen der Stufe	5
1.1 Thermodynamische Grundlagen	5
1.2 Wirkungsgrade	7
1.3 Kennzahlen	8
2 Auslegung	13
2.1 Die erforderlichen Eingabedaten	13
2.2 Geschwindigkeitspläne des Laufrades	15
2.2.1 Vorgabe von $\bar{\varphi}_2$	16
2.2.2 Vorgabe von R_1	18
2.3 Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt u_2	19
2.3.1 Frei ansaugende Stufe	19
2.3.2 Zwischenstufe	20
2.4 Berechnung der Stufe	20
2.4.1 Umgebungszustand, nur frei ansaugende Stufe	20
2.4.2 Geschwindigkeitspläne, Arbeitszahl λ und Umfangsgeschwindigkeit u_2	21
2.4.3 Laufrad	21
2.4.4 Ausgleichsbereich	23
2.4.5 Zusätzliche Verluste	25

2.4.6	Leitrad	26
2.4.7	Isentroper aerodynamischer Wirkungsgrad der Stufe η_{sa}	33
2.4.8	Fehlende Werte	33
2.5	Geometrische Details	33
2.5.1	Laufrad	33
2.5.2	Leitrad	34
3	Teillastverhalten	37
3.1	Vorgabe von M_u und φ_1	38
3.1.1	Laufrad	38
3.1.2	Ausgleichsbereich, zusätzliche Verluste, Leitrad	39
3.2	Vorgabe von M_u und φ	40
3.3	Vorgabe von N_c und \dot{m}_c	41
4	Verlustrechnung	43
4.1	Laufrad	43
4.2	Ausgleichsbereich	48
4.3	Reibungsverlust im schaufellosen Ringraum	51
4.4	Zusätzliche Verluste	52
5	Rechnerprogramm	55
5.1	Einschränkungen	55
5.2	Programmiersprache	55
5.3	Programmstart	56
5.4	Eingabedialogfeld	56
5.5	Berechnung	57
5.6	Ausgabe der berechneten Werte	58
5.6.1	Ausgabe im Textformat	58
5.6.2	Grafische Ausgabe	59

5.6.3	Kennfeld	59
5.7	Ausgabe der empirischen Diagramme	60
5.8	Drucken, Seitenansicht	60
5.9	Speichern, Laden	60
5.10	Schließen, Beenden	61
5.11	Hilfe	61
6	Numerische Ergebnisse, Vergleich mit Messungen	63
6.1	VW-Gasturbine	63
6.2	Beispiel Vorlesung Strömungsmaschinen I	79
6.3	Messung	95
	Literaturverzeichnis	111
	Formelzeichen, Stichwortverzeichnis	113
	GNU GENERAL PUBLIC LICENSE	117

Abbildungsverzeichnis

1.1	Isentropenexponent κ verschiedener Gase	5
1.2	Realgasfaktor Z für Luft	6
1.3	hs-Diagramm der halboffenen Radialverdichterstufe	11
2.1	Geschwindigkeitspläne am Laufradein- bzw. -austritt	16
2.2	Minderleistungszahl μ	17
2.3	Grenzschichtversperrungsmaß ε_{kE}	27
2.4	Stoßverlustkoeffizient des Leitrades $\zeta'_{Stoß}$	29
2.5	Druckrückgewinnbeiwert C_p	31
2.6	Leitrad	36
3.1	Qualitatives Teillast-Kennfeld	40
4.1	Bezeichnungen des Laufrades	44
4.2	Reibungskoeffizient c_f bzw. Korrekturfaktor C_M	46
4.3	Kinematische Zähigkeit der Luft $\nu(t, p)$	47
4.4	Diagramm zur Bestimmung von $F(\Delta i, M, \beta_{1s}$ bzw. $\alpha_{5s})$	48
4.5	Stoßverlustkoeffizient des Laufrades $\zeta''_{Stoß}$	49
4.6	Rückströmungs-Verlustkoeffizient ζ_r	53

EINLEITUNG

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dipl.-Ing. Karl Götz für die Vergabe dieser Diplomarbeit sowie für die zahlreichen Ratschläge und Hinweise herzlich bedanken. Obwohl es mit einem gewissen Risiko verbunden ist, Bestehendes und über Jahre Erprobtes nicht immer zu berücksichtigen (die verwendeten Unterlagen für die Ermittlung der Verluste sind die gleichen wie bisher, die Struktur des Programms ist jedoch vollkommen neu), bestanden seitens Herrn Götz keinerlei Vorschriften über die Vorgehensweise bei der Erstellung dieser Arbeit, für die mir gewährte Freiheit bin ich Herrn Götz sehr dankbar.

Mein besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. (FH) Jörg Hübler für dessen unermüdliche Unterstützung bei der Programmierung. Herr Hübler hat den größten Teil der Benutzeroberfläche geschrieben, nur durch seine Hilfe war es möglich, Funktionen wie z.B. das OpenGL-Ausgabefenster oder das HTML-Hilfefenster in das Programm zu integrieren.

Obwohl eine zuverlässige Berechnung des Teillastverhaltens von Strömungsmaschinen bis heute nicht möglich ist, so kann man dennoch den Versuch wagen, durch die Kombination von Theorie und empirischen Unterlagen die Charakteristik zumindest in einem Bereich in der Nähe des Auslegungspunktes abzuschätzen. Sicherlich treffen die erhaltenen Ergebnisse dann am ehesten zu, wenn die geometrischen Hauptabmessungen mit denen jener Maschine übereinstimmen, von welcher die verwendete Empirie anhand von Messungen abgeleitet wurde. Oftmals reicht aber bereits eine kleine Abweichung, um die Ergebnisse unbrauchbar, möglicherweise sogar irreführend werden zu lassen. Es kann nur vorteilhaft sein, über eine oder mehrere Alternativen zu verfügen, um so die erhaltenen Ergebnisse vergleichen zu können. Selten wird das Ergebnis identisch sein, doch läßt sich dadurch eine Unstimmigkeit besser erkennen.

Die Vorgehensweise bei der Ermittlung der Verluste ist nicht besonders schwierig und läßt sich mit wenigen Worten schildern: die Reibungsverluste werden durch die Summation aller je Zeiteinheit dissipierten Verluste an den einzelnen differentiellen Flächenelementen gebildet ($d\dot{A} = c_d \frac{\rho}{2} w^3 dF$), der Versperrungsfaktor am Laufradaustritt, der Spaltverlust des Laufrades, die zusätzlichen Verluste durch Radreibung und Rückströmung ins Laufrad, der Verlust durch nicht optimale Anströmung (bzw. beim Leitrad auch der Verlust durch unregelmäßige Winkelverteilung der Geschwindigkeitsrichtung) und der Druckrückgewinnbeiwert des Diffusors werden aus empirischen Diagrammen bzw. Gleichungen ermittelt. Für die Minderleistungszahl werden die theoretischen Ergebnisse von Busemann [Bus28] verwendet, davon abweichend wird statt der Durchsatzzahl φ die Normalkomponente der Geschwindigkeit am Laufradaustritt für die Abschätzung aus den angegebenen Diagrammen verwendet. Die am häufigsten verwendeten Gesetze sind der Energieerhaltungs- und der Kontinuitätssatz.

Zum Thema Strömungsmaschinen bzw. Radialverdichter gibt es eine Fülle guter Literatur. Sucht man jedoch detaillierte Informationen zur Charakteristik, so ist der Erfolg selten befriedigend. Auch im Internet ist kaum was zu finden, die Suche nach dem Stichwort **Radialverdichter** liefert bei Yahoo keinen einzigen Eintrag, bei AltaVista gerade mal vierundneunzig Einträge. Fast alle gefundenen Seiten haben eine Universitätsadresse, sie enthalten jedoch nur Allgemeines, meistens eine Beschreibung dessen, wozu man fähig ist, oder eine Auflistung der aktuellen Forschungsarbeiten (jedoch keinerlei Ergebnisse), man erhält den Eindruck, daß alle das eigene Süppchen kochen und gegeneinander wetteifern. Zu finden waren auch jede Menge Literaturverzeichnisse (meist Diplomarbeiten, Dissertationen, etc.), keine einzige davon stand jedoch zum Download bereit, als ob sie alle noch von Hand geschrieben wären und nicht in irgendeiner elektronischen Form vorliegen würden. Das Internet scheint den meisten unbekannt zu sein, und für diejenigen, welche die Möglichkeit haben, eigene Seiten zu publizieren, ist es wohl eher eine Bühne zur Selbstdarstellung. Das oben Gesagte hat zwar mit Radialverdichterstufen nichts gemeinsam und gehört auch nicht hierher, aber ich möchte meine Enttäuschung über die Erfolglosigkeit der Suche und die verschwendete Zeit auch nicht verschweigen.

Entgegen der ursprünglichen Absicht, ein bereits vorhandenes Rechnerprogramm für die Auslegung von halboffenen Radialverdichtern als Grundlage für die Teillastberechnung zu verwenden, entstand ein fast vollständig neues Programm. Es wurden jedoch noch einige Funktionen aus dem vorhandenen Quelltext übernommen, beispielsweise die Darstellung des Meridianschnittes in dem Fenster SEITENANSICHT, um die Abweichungen der Außenwandkonturen, die sich aus den unterschiedlichen Berechnungsmethoden ergeben, vergleichen zu können. Abgesehen von dem zusätzlichen zeitlichen Aufwand hat sich die Neuprogrammierung in jeder Hinsicht als vorteilhafter erwiesen: der vorhandene Quellcode ließ sich mit der verwendeten aktuellen Version des Linkers aus nicht nachvollziehbaren Gründen nicht fehlerfrei binden, eine optimierte ausführbare Binärdatei konnte somit nicht mehr erstellt werden. Desweiteren war der Quelltext nur unter erheblichem Aufwand zu verstehen (wenn überhaupt), da versucht wurde, den Quellcode eines damals bereits für die Auslegung vorhandenen BASIC-Programms bis ins letzte Detail in der Sprache C nachzubilden. Wenn diese Vorgehensweise auch nicht unbedingt mit Geschwindigkeitseinbußen verbunden sein muß, so war sie jedoch bestimmt nicht der richtige Weg, zumal das BASIC-Programm für einen Rechner mit einer Speicherkapazität von 64 KByte geschrieben wurde, aus diesem Grund in vier einzelne Programmteile aufgeteilt war, welche bei Bedarf von Bändern eingelesen wurden. Es bestand keine strikte Trennung von Oberfläche bzw. Rechnerarchitektur und Berechnungsteil, keine Trennung zwischen Geometrie und Thermodynamik, wie sie für mehr als einen zu berechnenden Betriebspunkt erforderlich ist. Der größte Teil der Berechnungszeit wurde mit der Ausgabe in bzw. dem Einlesen aus Dateien verschwendet, eine noch nicht einmal unter dem Aspekt eines auf 64K begrenzten Hauptspeichers zu vertretende Lösung (die Gesamtgröße der zu lesenden Daten beläuft sich auf ca. 6-7K, wenn Datentypen mit doppelter Genauigkeit verwendet werden), da Festplattenzugriffe (bzw. Zugriffe auf Bänder) bekanntlich zu den zeitraubendsten Tätigkeiten eines Rechners gehören.

Das im Rahmen dieser Arbeit entstandene Rechnerprogramm ist mit Sicherheit noch nicht die optimale Lösung. Wenn man z.B. versucht, es um die Berechnungsmöglichkeit eines Axialverdichters oder einer Zentripetalturbine zu erweitern, werden die gemachten Fehler in aller Deutlichkeit feststellbar sein. Da jedoch von den Möglichkeiten der objektorientierten Programmierung, wo immer möglich und sinnvoll, Gebrauch gemacht wurde (die einzige globale Konstante ist die Zahl π , globale Variablen sind nicht vorhanden), sollte eine Erweiterbarkeit möglich sein. Ein Programm dieser Größenordnung ist auch bestimmt nicht ohne Fehler, zumindest nicht nach einer so kurzen Testphase. Abstürze kommen immer wieder mal vor, allerdings in der letzten Zeit relativ selten, aber bei dem Versuch, sie mit dem Debugger zu finden, ließen sie sich nicht mehr nachvollziehen. Falls ein Anwender Fehler findet oder Verbesserungs- und Erweiterungsvorschläge hat, bitte ich, mir diese unter der folgenden Adresse mitzuteilen: NLangert@t-online.de¹. Vorschläge, wie z.B. das Programm um die Fähigkeit der Berechnung aller Strömungsmaschinen-Typen zu erweitern, werde ich allerdings nicht berücksichtigen :-).

Die Diplomarbeit wird im Internet auf einem, vielleicht auch auf mehreren ftp-Rechnern zum Download bereitliegen, es stehen zu diesem Zeitpunkt jedoch noch keine Adressen fest². Da die Diplomarbeit auch im HTML-Format verfügbar ist, liegt es nahe, sie auch online über eine W3-Adresse lesen zu können, ohne erst eine komprimierte Datei kopieren und entkomprimieren zu müssen, eine Adresse kann ich auch hier noch nicht angeben³.

Die Diplomarbeit (nicht das Programm!) untersteht der GNU GENERAL PUBLIC LICENSE, mit Ausnahme der folgenden Abbildungen: 1.1, 1.2, 2.4, 4.5. Diese unterliegen dem Copyright des jeweiligen Verlages⁴. Das Programm darf in der vorliegenden Form nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden.

¹die aktuelle Adresse: nlangert@stroem.de

²die Download-Adresse sowohl für die Diplomarbeit als auch das Programm ist <http://www.stroem.de>

³<http://www.stroem.de>

⁴Die Abbildungen 1.1 und 1.2 wurden mit der freundlichen Genehmigung des Carl Hanser Verlages veröffentlicht. Die Abbildungen 2.4 und 4.5 wurden mit der freundlichen Genehmigung des VDI Verlages veröffentlicht. Sämtliche Abbildungen aus den Büchern des Springerverlages sind in dieser frei erhältlichen Version der Diplomarbeit nicht enthalten, da dieser die Veröffentlichung verweigert. Alle Bilder des Springerverlages wurden neu gezeichnet.

Kapitel 1

Grundlagen der Stufe

1.1 Thermodynamische Grundlagen

Isentropenexponent κ :

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

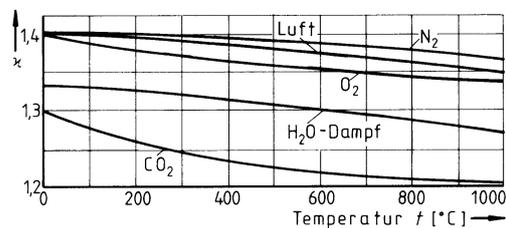


Abbildung 1.1: Isentropenexponent κ verschiedener Gase, nach [Sig84], S. 439

$$m = \frac{\kappa - 1}{\kappa}$$

Gaskonstante R :

$$R = c_p - c_v$$

Gasgleichung für reale Gase:

$$pv = ZRT, \quad \text{mit } Z \text{ für Luft aus Abbildung 1.2.}$$

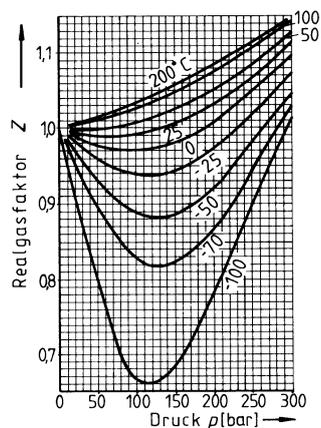


Abbildung 1.2: Realgasfaktor Z für Luft, nach [Sig84], S. 439, bzw. VDI-Richtlinien 2040, Bl. 4 und 2045 Bl. 2

Falls der isentrope Wirkungsgrad η_s bekannt ist, kann der entsprechende polytrope Wirkungsgrad η_p aus der nachfolgenden Beziehung ermittelt werden

$$\eta_s = \frac{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^m - 1}{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\eta_p} - 1}.$$

In umgekehrter Reihenfolge erhält man mit bekanntem η_s

$$\eta_p = \frac{\ln \frac{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^m - 1}{\eta_s} - 1}{m \ln \left(\frac{p_2}{p_1}\right)}.$$

Die beiden oberen Gleichungen gelten ebenso für die aerodynamischen Wirkungsgrade η_{sa} und η_{pa} . Falls die Zustandsänderung durch den Polytropenexponenten n_k beschrieben werden soll, so erhält man diesen aus

$$n_k = \frac{1}{1 - \frac{m}{\eta_p}}.$$

Eulersche Turbinengleichung:

$$\bar{a}_a = \frac{u_2^2}{2} - \frac{u_1^2}{2} + \frac{c_2^2}{2} - \frac{c_1^2}{2} - \frac{w_2^2}{2} + \frac{w_1^2}{2} = u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}.$$

1.2 Wirkungsgrade

Zur Kennzeichnung der Güte von Turbomaschinen-Stufen werden diverse Wirkungsgrade verwendet:

$$\eta_{sa} \equiv \frac{\Delta h_s}{\Delta h_a}, \quad (1.1)$$

$$\eta_{sa}^\circ \equiv \frac{\Delta h_s^\circ}{\Delta h_a^\circ}, \quad (1.2)$$

$$\eta_{sa}^{(ts)} \equiv \frac{\Delta h_s - \frac{c_1^2}{2}}{\Delta h_a^\circ}. \quad (1.3)$$

η_{sa} wird als *isentropen aerodynamischer Wirkungsgrad der Stufe*, η_{sa}° als *aerodynamischer Arbeitswirkungsgrad der Stufe*, $\eta_{sa}^{(ts)}$ als *aerodynamischer Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Verdichterstufe* bezeichnet.

Berücksichtigt man auch die zusätzlichen Verluste (für die Radialverdichterstufe mit halb-offenem Laufrad: Radreibungsverlust bzw. Reibungsverlust durch Rückströmung ins Laufrad), so erhält man die folgenden Beziehungen:

$$\eta_s \equiv \frac{\Delta h_s}{\Delta h}, \quad (1.4)$$

$$\eta_s^\circ \equiv \frac{\Delta h_s^\circ}{\Delta h^\circ}, \quad (1.5)$$

$$\eta_s^{(ts)} \equiv \frac{\Delta h_s - \frac{c_1^2}{2}}{\Delta h^\circ}. \quad (1.6)$$

η_s wird als *isentropen Wirkungsgrad der Stufe*, η_s° als *Arbeitswirkungsgrad der Stufe*, $\eta_s^{(ts)}$ als *Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Verdichterstufe* bezeichnet.

Die für die Berechnung der Wirkungsgrade benötigten Größen erhält man mit den folgenden Gleichungen:

$$\Delta h_s = j_1 \left(\left(\frac{p_A}{p_1} \right)^m - 1 \right), \quad (1.7)$$

$$\Delta h = j_A - j_1 , \quad (1.8)$$

$$\Delta h_a = \Delta h - \Delta h_Z , \quad (1.9)$$

$$\Delta h_s^\circ = j_1^\circ \left(\left(\frac{p_A^\circ}{p_1^\circ} \right)^m - 1 \right) , \quad (1.10)$$

mit

$$j_1^\circ = j_E^\circ = j_E , \text{ nur für die frei ansaugende Stufe,} \quad (1.11)$$

$$j_1^\circ = j_1 + \frac{c_1^2}{2} , \text{ allgemein gültig,} \quad (1.12)$$

$$p_1^\circ = p_1 \left(\frac{c_1^2}{2j_1} + 1 \right)^{1/m} , \quad (1.13)$$

$$p_A^\circ = p_A \left(\frac{c_A^2}{2j_A} + 1 \right)^{1/m} , \quad (1.14)$$

und letztendlich

$$\Delta h_a^\circ = \bar{a}_a , \quad (1.15)$$

$$\Delta h^\circ = \bar{a} = j_A^\circ - j_1^\circ , \text{ mit } j_A^\circ = j_A + \frac{c_A^2}{2} . \quad (1.16)$$

1.3 Kennzahlen

Sowohl zur Auslegung als auch zur Kennzeichnung der Arbeitsweise von Turbomaschinenstufen werden diverse Kennzahlen verwendet. Sie wurden in großer Zahl vorgeschlagen, ihre Definition und Bezeichnung ist nicht immer einheitlich. Meist handelt es sich dabei um dimensionslose Zahlen, die von der Maschinengröße (ähnliche Maschinen) sowie vom Umgebungs- bzw. Laufrad-Eintrittszustand des Mediums (ideales Gas) unabhängig sind.

Der *Reaktionsgrad* r kennzeichnet die Aufteilung des Druckumsatzes auf das Lauf- bzw. Leitrad

$$r \equiv \frac{\Delta h_s''}{\Delta h_s'' + \Delta h_s'} , \quad (1.17)$$

die *Durchsatzzahl* oder *Lieferzahl* (veraltet) φ ist definiert durch

$$\varphi \equiv \frac{\dot{V}}{\varepsilon_b \Omega u}, \quad (1.18)$$

mit dem Beaufschlagungsverhältnis $\varepsilon_b = 1$ für die Radialverdichterstufe. Wie \dot{V} , Ω und u gebildet werden, ist eine Sache der Konvention, üblich ist jedoch der Bezug aller drei Werte auf den Laufradaustritt:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \dot{V}_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2}, \\ \Omega &= \Omega_2 = 2\pi B_2 r_2^2, \end{aligned} \quad (1.19)$$

und $u = u_2$.

Mit dieser Festlegung ergibt sich für φ :

$$\varphi = k_2 \bar{\varphi}_2, \text{ mit } \bar{\varphi}_2 = C_{2n} \quad (1.20)$$

Der Druckumsatz wird gekennzeichnet durch die *Druckzahl*, die unterschiedlich gebildet werden kann. In dieser Arbeit wird nur ψ_s verwendet:

$$\psi_s \equiv \frac{\Delta h_s}{u^2}. \quad (1.21)$$

Die *Arbeitszahl*, *Arbeitskennzahl* oder *Leistungszahl* kann mit der aerodynamischen Stufenarbeit \bar{a}_a oder der spezifischen Stufenarbeit \bar{a} gebildet werden:

$$\lambda \equiv \frac{\bar{a}_a}{u^2}, \text{ oder } \lambda_r \equiv \frac{\bar{a}}{u^2}, \quad (1.22)$$

wobei die erste Definition die bedeutsamere ist, wegen ihres Zusammenhanges mit den Geschwindigkeitsplänen (gilt nur für Verdichter):

$$\lambda = U_2 C_{2u} - U_1 C_{1u}. \quad (1.23)$$

Im Turbomaschinenbau werden u.a. auch die folgenden Kennzahlen verwendet:

$$\text{Laufzahl } \nu \equiv \frac{u}{\sqrt{2\Delta h_s}}, \quad (1.24)$$

$$\text{Schluckzahl } \mu \equiv \frac{\dot{V}}{\varepsilon_b \Omega \sqrt{2\Delta h_s}} = \frac{\varphi}{\nu}. \quad (1.25)$$

Kennzahlen zur Klassifizierung der Stufen (*Cordier*-Diagramm):

$$\text{Schnellaufzahl } \sigma \equiv 2n_s \frac{\sqrt{\pi \dot{V}_1}}{(2\Delta h_s)^{\frac{3}{4}}}, \quad (1.26)$$

$$\text{Durchmesserzahl } \delta \equiv r_2 \sqrt{\pi \frac{(2\Delta h_s)^{1/2}}{\dot{V}_1}} = \frac{\nu}{\sigma}. \quad (1.27)$$

Kapitel 2

Auslegung

2.1 Die erforderlichen Eingabedaten

Daten des zu verdichtenden Mediums:

Gaskonstante	R	[J/kgK]
Isentropenexponent	κ	[-]
Realgasfaktor	Z z.B. Luft 0.8 – 1.1	[-]

Thermodynamische Daten:

Nur frei ansaugende Stufe:

Umgebungsdruck	p_E	[bar]
Umgebungstemperatur	t_E	[°C]
Druckverhältnis Austritt / Umgebung	Π_{EA}	1.05 – 6 [-]
isentropen Wirkungsgrad im Einlaufbereich	η_{sE}	0.95 – 0.97 [-]

Nur Zwischenstufe:

Druck am Laufradeintritt	p_1	[bar]
Temperatur am Laufradeintritt	t_1	[°C]
Druckverhältnis Austritt / Laufradeintritt	Π_{1A}	1.05 – 6 [-]

Massenstrom \dot{m}	[kg/s]
-----------------------	--------

Dimensionslose Geschwindigkeiten:

Normalkomponente der Geschwindigkeit am Laufradeintritt	C_{1n}	0.1 – 0.4	[-]
Zuströmwinkel des Mediums am Laufradeintritt	α_1	90° – 120°	[°]
Geschwindigkeitsverhältnis W_1/W_2	ξ	0.65 – 0.8	[-]
Durchsatzzahl am Laufradaustritt	$\bar{\varphi}_2$	0.15 – 0.5	[-]
Geschwindigkeit am Austritt aus dem Diffusor	C_A	0.1 – 0.4	[-]

Versperrungsmaß durch Verdrängungsdicke am Laufradaustritt	ε_{v2}	0.03 – 0.15	[-]
--	--------------------	-------------	-----

Geometrische Daten des Laufrades:

Nabenverhältnis (Radienverhältnis r_N/r_2)	R_N	0.2 – 0.35	[-]
Eulerradius am Eintritt	R_1	0.35 – 0.5	[-]
axiale Länge	L_{ax}	0.5 – 0.8	[-]
Schaufelzahl	z''	10 – 24	[-]
Schaufelwinkel am Austritt	β_{2s}	60° – 90°	[°]
Schaufeldicke am Austritt	S_2	0.01 – 0.03	[-]
Radius Schaufeleintrittskante	R''	50% – 100% von S_2	[-]
ab % ($L_{ax} - B_2$) Schaufeldicke = S_2	S_f	0 – 100	[%]
Exponent Außenwand	N	1 – 3	[-]
bis % ($L_{ax} - B_2$) Schaufelkrümmung am Eintritt	E_f	40 – 100	[%]
Exponent Schaufelkrümmung am Eintritt	K	2 – 3	[-]
Spaltweite	Δ''	0.002 – 0.02	[-]
mittlere Rauigkeit in den Kanälen	k_s''	0.005 – 0.1	[mm]

Von den beiden Größen $\bar{\varphi}_2$ bzw. R_1 darf jeweils nur eine vorgeschrieben werden, E_f und β_{2s} müssen zusammenpassen !

Geometrische Daten des Ausgleichsbereichs:

mittlere Rauigkeit im Ausgleichsbereich	k_{sA}	0.005 – 0.1	[mm]
---	----------	-------------	------

Geometrische Daten des Leitrades:

Schaufeldicke am Eintritt	S_5	0.008 – 0.02	[-]
Versperrungsmaß durch Schaufeldicke am Eintritt	\bar{e}_5	0.03 – 0.08	[-]
Anstellwinkel der Leitrad-schaufeln im Auslegungspunkt relativ zum Mediumswinkel am Eintritt	$\Delta\alpha_{5s}$	0° – 4°	[°]
Öffnungswinkel des Leitrad-diffusors	ϑ	8° – 10°	[°]
mittlere Rauigkeit in den Kanälen	k'_s	0.005 – 0.1	[mm]

Von den beiden Größen S_5 bzw. \bar{e}_5 darf jeweils nur eine vorgeschrieben werden, Programm beschränkt auf $\vartheta = 8^\circ$!

2.2 Geschwindigkeitspläne des Laufrades

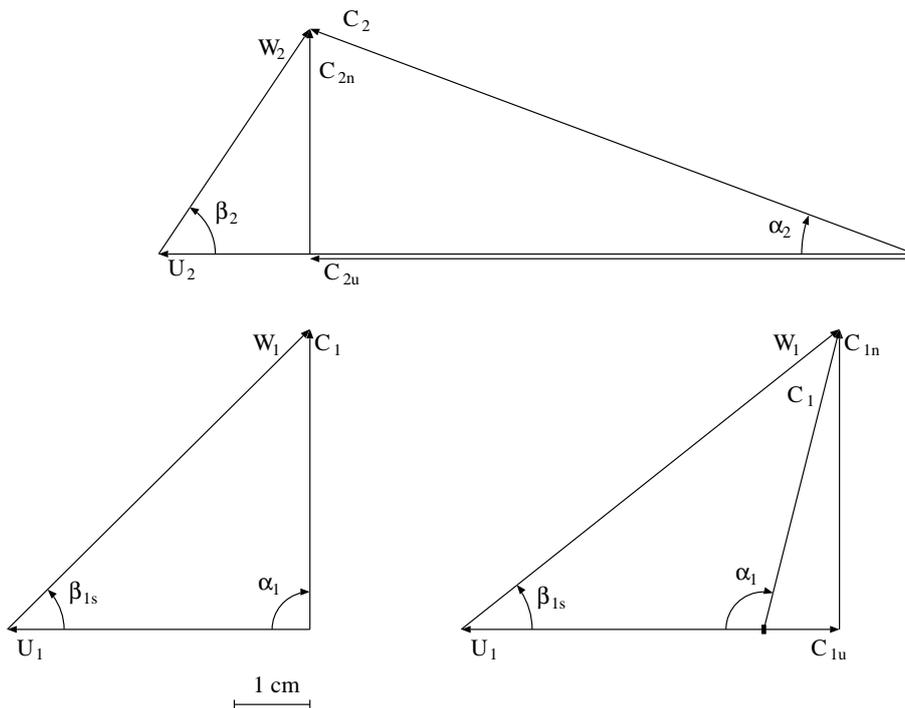
Durch die Vorgabe der folgenden Werte: Umfangsgeschwindigkeit des Rades am Austritt $U_2 = 1$, Geschwindigkeits-Normalkomponente am Eintritt C_{1n} , Zuströmwinkel am Eintritt α_1 , Verhältnis der Relativgeschwindigkeiten (Verzögerungsverhältnis) $\xi = W_2/W_1$, Schaufelzahl z'' , Schaufelwinkel am Austritt β_{2s} , Schaufeldicke am Austritt S_2 sowie entweder der Durchsatzzahl $\bar{\varphi}_2$ oder dem Eulerradius $R_1 = \sqrt{(R_N^2 + R_{1a}^2)}/2$ können die Geschwindigkeitspläne am Laufradein- bzw. -austritt ermittelt werden.

Das Versperrungsmaß durch endliche Schaufeldicke e_2 am Austritt erhält man aus

$$e_2 \approx \frac{z'' S_2}{2\pi \sin \beta_{2s}} . \quad (2.1)$$

Die Versperrung durch Totwasser ε_{t2} am Austritt kann mit folgender, in [Gö80] S. 129, angegebenen empirischen Beziehung abgeschätzt werden, wobei darauf zu achten ist, daß der Wert für β_{2s} in Grad eingesetzt wird:

$$\varepsilon_{t2} \approx \frac{1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_{v2}}{1 - e_2}\right) \xi}{\frac{1}{(0.15 + 0.004\beta_{2s}^{[0]})} - \left(1 - \frac{\varepsilon_{v2}}{1 - e_2}\right) \xi} . \quad (2.2)$$



oben: Geschwindigkeitsdreieck am Austritt für folgende Werte:

$$U_2 = 1, C_{2n} = \bar{\varphi}_2 = 0.3, C_{2u} = 0.8$$

unten links: Geschwindigkeitsdreieck am Eintritt für folgende Werte:

$$C_{1n} = U_1 = 0.4, C_{1u} = 0, \text{ drallfreie Zuströmung}$$

unten rechts: Geschwindigkeitsdreieck am Eintritt für folgende Werte:

$$C_{1n} = U_1 = 0.4, C_{1u} = -0.1$$

Abbildung 2.1: Geschwindigkeitspläne am Laufradein- bzw. -austritt

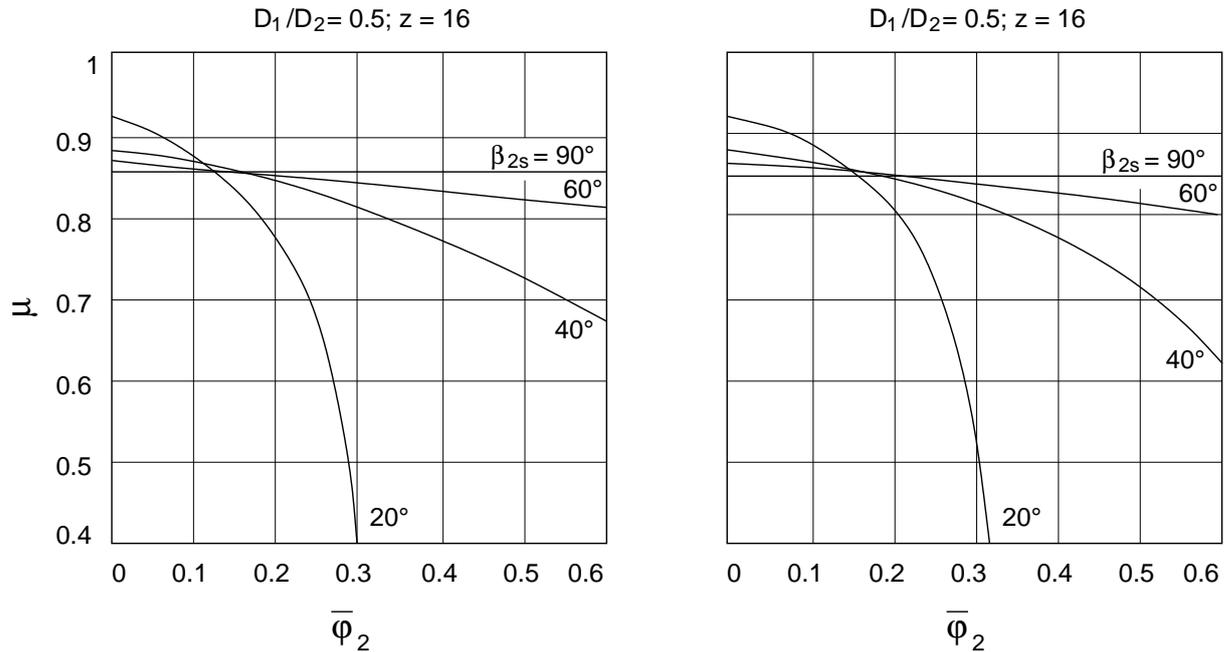
Versperrungsfaktor am Laufradaustritt k_2 :

$$k_2 = (1 - e_2 - \varepsilon_{v2})(1 - \varepsilon_{t2}) . \quad (2.3)$$

2.2.1 Vorgabe von $\bar{\varphi}_2$

Mit einem geschätzten bzw. aus vorhergehenden Rechnungen (Iteration) bekannten R_1 kann die Minderleistungszahl μ nach Abbildung 2.2 ermittelt werden, und mit μ und $C_{2n} = \bar{\varphi}_2$ die Geschwindigkeits-Umfangskomponente C_{2u} :

$$C_{2u} = \mu \left(1 - \frac{C_{2n}}{\tan \beta_{2s}} \right) . \quad (2.4)$$



Minderleistungszahl μ_{16} nach [Tra88], S. 310 bzw. [Bus28] für $z'' = 16$, $R_1 = 0.5$ bzw. $R_1 = 0.65$. Davon abweichend wird jedoch nicht die Durchsatzzahl φ verwendet, sondern $\bar{\varphi}_2 = C_{2n}$, die erhaltenen Werte stimmen [Gö80] zufolge denn besser mit den empirischen Unterlagen überein. Für abweichende R_1 wird (im Programm) linear inter- bzw. extrapoliert, für abweichende Schaufelzahlen z'' kann die Minderleistungszahl nach der folgenden Beziehung ermittelt werden:

$$\mu = 1 - (1 - \mu_{16}) \frac{16}{z''} k_2$$

Abbildung 2.2: Minderleistungszahl μ

Die Relativgeschwindigkeit am Austritt W_2 erhält man aus

$$W_2 = \sqrt{C_{2n}^2 + (U_2 - C_{2u})^2}, \quad (2.5)$$

mit ξ die Relativgeschwindigkeit am Eintritt W_1

$$W_1 = \frac{W_2}{\xi}, \quad (2.6)$$

und die Umfangskomponente der Geschwindigkeit am Eintritt C_{1u} aus

$$C_{1u} = \frac{C_{1n}}{\tan \alpha_1}, \quad (2.7)$$

wobei darauf zu achten ist, daß C_{1u} negativ ist für $\alpha_1 > 90^\circ$.

Die Umfangsgeschwindigkeit des Rades am Eintritt U_1 erhält man aus

$$U_1 = \sqrt{W_1^2 - C_{1n}^2} + C_{1u} , \quad (2.8)$$

und mit

$$R_1 = U_1 \quad (2.9)$$

kann man aus Abbildung 2.2 einen genaueren Wert für μ ablesen, und die Rechnung von Gl. (2.4) bis (2.9) bis zur gewünschten Genauigkeit wiederholen. Anschließend können C_1 und C_2 mit

$$C_1 = \sqrt{C_{1n}^2 + C_{1u}^2} , \quad (2.10)$$

$$C_2 = \sqrt{C_{2n}^2 + C_{2u}^2} \quad (2.11)$$

berechnet werden. Das hier beschriebene Verfahren, $\bar{\varphi}_2$ vorzuschreiben, hat folgende Nachteile: Wie aus den Gln. (2.5) und (2.6) oder aus Abbildung 2.1 zu erkennen ist, erhält man für klein gewählte Werte für $\bar{\varphi}_2$ und ξ kleine Werte für W_2 und somit auch W_1 . Ist dann das gewählte C_{1n} größer als das so erhaltene W_1 , so wird in Gl. (2.8) der Ausdruck unter dem Wurzelzeichen negativ. Außerdem kann R_1 kleiner werden als das gewählte R_N . Eine mit ungünstig gewählten Werten gestartete Rechnung muß abgebrochen werden. Dieser Nachteil kann durch die

2.2.2 Vorgabe von R_1

umgangen werden. Mit Gl. (2.9) erhält man U_1 , mit (2.7) C_{1u} , mit (2.10) C_1 , mit (2.8) W_1 , mit (2.6) W_2 , mit einem Startwert für $\bar{\varphi}_2 = C_{2n}$ aus Abbildung 2.2 die Minderleistungszahl, mit Gl. (2.4) C_{2u} , mit (2.5) einen verbesserten Wert für C_{2n} , aus Abbildung 2.2 einen verbesserten Wert für μ , bis zur gewünschten Genauigkeit, anschließend C_2 mit (2.11).

Zu diesem Zeitpunkt ist R_1 bekannt, egal welcher Wert ($\bar{\varphi}_2$ oder R_1) vorgegeben wurde, und damit erhält man den

$$\text{Außenradius am Laufradeintritt} \quad R_{1a} = \sqrt{2R_1^2 - R_N^2} . \quad (2.12)$$

2.3 Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt u_2

2.3.1 Frei ansaugende Stufe

Ausgehend vom h_s -Diagramm, von den dimensionslosen Geschwindigkeitsplänen, der Leistungszahl λ , dem Umgebungszustand des Mediums, dem als bekannt vorausgesetzten Wirkungsgrad im Einlaufbereich η_{sE} und dem geschätzten oder aus vorhergehenden Berechnungen (Iteration) bereits recht genau bekannten isentropen aerodynamischen Wirkungsgrad η_{sa} erhält man die Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt u_2 .

Setzt man die rechten Seiten der folgenden beiden Beziehungen gleich

$$\Delta h_s = j_1 \left(\left(\frac{p_A}{p_1} \right)^m - 1 \right), \quad (2.13)$$

$$\Delta h_s = \eta_{sa} u_2^2 \left(\lambda + \frac{C_1^2}{2} - \frac{C_A^2}{2} \right), \quad (2.14)$$

und ersetzt man j_1 , p_1 durch

$$j_1 = j_E - \frac{C_1^2}{2} u_2^2, \quad (2.15)$$

$$p_1 = p_E \left(1 - \frac{C_1^2 u_2^2}{2 j_E \eta_{sE}} \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (2.16)$$

so erhält man die folgende Gleichung:

$$\eta_{sa} u_2^2 \left(\lambda + \frac{C_1^2}{2} - \frac{C_A^2}{2} \right) = \left(j_E - \frac{C_1^2}{2} u_2^2 \right) \left(\left(\frac{p_A}{p_E} \right)^m \frac{2 j_E \eta_{sE}}{2 j_E \eta_{sE} - C_1^2 u_2^2} - 1 \right). \quad (2.17)$$

Löst man diese Gleichung nach u_2 auf, so erhält man zunächst

$$\begin{aligned}
& \underbrace{C_1^2 \left(\eta_{sa} \left(\lambda + \frac{C_1^2}{2} - \frac{C_A^2}{2} \right) - \frac{C_1^2}{2} \right)}_a u_2^4 + \\
& \underbrace{j_E \left(C_1^2 + \eta_{sE} C_1^2 \left(1 - \left(\frac{p_A}{p_E} \right)^m \right) - 2\eta_{sE} \eta_{sa} \left(\lambda + \frac{C_1^2}{2} - \frac{C_A^2}{2} \right) \right)}_b u_2^2 + \\
& \underbrace{2\eta_{sE} j_E^2 \left(\left(\frac{p_A}{p_E} \right) - 1 \right)}_c = 0 . \tag{2.18}
\end{aligned}$$

Somit läßt sich für u_2 schreiben:

$$u_2 = +\sqrt{\frac{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}} , \tag{2.19}$$

die anderen mathematischen Lösungen treffen nicht zu.

2.3.2 Zwischenstufe

Wie bei der frei ansaugenden Stufe setzt man die rechten Seiten der beiden Gln. (2.13) und (2.14) gleich, und erhält damit die Umfangsgeschwindigkeit u_2 :

$$u_2 = \sqrt{\frac{j_1 \left(\left(\frac{p_A}{p_1} \right)^m - 1 \right)}{\eta_{sa} \left(\lambda + \frac{C_1^2}{2} - \frac{C_A^2}{2} \right)}} \tag{2.20}$$

2.4 Berechnung der Stufe

2.4.1 Umgebungszustand, nur frei ansaugende Stufe

Umgebungsdruck p_E und Umgebungstemperatur T_E vorgegeben.

$$\text{Normalenthalpie bzw. totale Normalenthalpie} \quad j_E = j_E^\circ = \frac{ZRT_E}{m} . \tag{2.21}$$

$$\text{Spezifisches Volumen } v_E = \frac{j_E m}{p_E} . \quad (2.22)$$

$$\text{Dichte } \rho_E = \frac{1}{v_E} . \quad (2.23)$$

2.4.2 Geschwindigkeitspläne, Arbeitszahl λ und Umfangsgeschwindigkeit u_2

Die Geschwindigkeitspläne erhält man wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, die Arbeitszahl λ aus Gl. (1.23) und die für alle folgenden Berechnungen notwendige Umfangsgeschwindigkeit u_2 (eine vollkommen dimensionsbefreite Rechnung ist nur mit festliegenden Wirkungsgraden möglich) mit den Gln. aus Abschnitt 2.3.

2.4.3 Laufrad

Zustand am Radeintritt

Frei ansaugende Stufe: isentroper Wirkungsgrad η_{sE} des Einlaufbereiches vorgegeben, Geschwindigkeit $c_1 = C_1 u_2$ aus dem Geschwindigkeitsplan.

$$\text{Enthalpiedifferenzen: } \Delta h_{aE} = -\frac{C_1^2 u_2^2}{2} \text{ und } \Delta h_{sE} = \frac{\Delta h_{aE}}{\eta_{sE}} . \quad (2.24)$$

$$\text{Normalenthalpie } j_1 = j_E + \Delta h_{aE} . \quad (2.25)$$

$$\text{Druck } p_1 = p_E \left(1 + \frac{\Delta h_{sE}}{j_E} \right)^{\frac{1}{m}} . \quad (2.26)$$

$$\text{Temperatur } T_1 = \frac{j_1 m}{ZR} . \quad (2.27)$$

$$\text{Totale Normalenthalpie } j_1^\circ = j_E = j_E^\circ = j_1 + \frac{C_1^2 u_2^2}{2} . \quad (2.28)$$

Zwischenstufe: Druck p_1 und Temperatur T_1 vorgegeben, Geschwindigkeit c_1 aus dem Geschwindigkeitsplan.

$$\text{Normalenthalpie } j_1 = \frac{ZR T_1}{m} . \quad (2.29)$$

$$\text{Totale Normalenthalpie} \quad j_1^\circ = j_1 + \frac{C_1^2 u_2^2}{2} . \quad (2.30)$$

Beide Stufentypen:

$$\text{Spezifisches Volumen} \quad v_1 = \frac{j_1 m}{p_1} . \quad (2.31)$$

$$\text{Dichte} \quad \rho_1 = \frac{1}{v_1} . \quad (2.32)$$

Zustand am Radaustritt, Radius r_2 , Breite B_2

Austrittszustand:

$$\text{Enthalpieänderung} \quad \Delta h_a'' = \frac{u_2^2}{2} (1 - U_1^2 + W_1^2 - W_2^2) . \quad (2.33)$$

$$\text{Isentrope Enthalpieänderung} \quad \Delta h_s'' = \Delta h_a'' \eta_{sa}'' . \quad (2.34)$$

$$\text{Druck} \quad p_2 = p_1 \left(1 + \frac{\Delta h_s''}{j_1} \right)^{\frac{1}{m}} . \quad (2.35)$$

$$\text{Normalenthalpie} \quad j_2 = j_1 + \Delta h_a'' . \quad (2.36)$$

$$\text{Spezifisches Volumen} \quad v_2 = \frac{j_2 m}{p_2} . \quad (2.37)$$

$$\text{Dichte} \quad \rho_2 = \frac{1}{v_2} . \quad (2.38)$$

$$\text{Temperatur} \quad T_2 = \frac{j_2 m}{ZR} . \quad (2.39)$$

$$\text{Totale Normalenthalpie} \quad j_2^\circ = j_2 + \frac{C_2^2 u_2^2}{2} . \quad (2.40)$$

Geometrie:

$$\text{Radius am Laufradaustritt} \quad r_2 = \sqrt{\frac{\dot{m}}{2\pi C_{1n} u_2 \rho_1 (R_1^2 - R_N^2)}} . \quad (2.41)$$

$$\text{Breite am Laufradaustritt} \quad B_2 = \frac{\dot{m}}{2\pi r_2^2 C_{2n} k_2 u_2 \rho_2} . \quad (2.42)$$

Die Verlustzahl Z'' erhält man mit der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Verlustrechnung, und damit den isentropen aerodynamischen Wirkungsgrad:

$$\eta_{sa}'' = 1 - \frac{Z'' \frac{u_2^2}{2}}{\Delta h_a''} . \quad (2.43)$$

Mit diesem neuen Wirkungsgrad können für $\Delta h_s''$, p_2 , v_2 , ρ_2 , r_2 und B_2 aus den oberen Gleichungen verbesserte Werte ermittelt werden. Es bringt jedoch keinen Geschwindigkeitsvorteil bei der iterativen Berechnung der Stufe, wenn man mit diesen verbesserten Werten und η_{sa}'' hier eine Iteration durchführt, denn u_2 stimmt noch nicht und ändert sich durch eine solche Iteration auch nicht. Ganz im Gegenteil erhöht sich die Rechenzeit des Programms um ca. 100% (für die gleiche Berechnungsgenauigkeit).

2.4.4 Ausgleichsbereich

In [Tra88] wird empfohlen, die Verluste, die unmittelbar hinter dem Laufrad auftreten, obwohl durch Vorgänge im Laufrad verursacht, in die Diffusorverluste einzuschließen. Der Verlust im Ausgleichsraum kann nach der in Abschnitt 4.2 beschriebenen „hydraulischen“ Methode ermittelt werden, oder wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, hierbei muß jedoch noch ein Verlust durch *Carnot-Stoß* berücksichtigt werden: fände unmittelbar hinter dem Laufrad in einer radial unendlich schmalen Zone ein Geschwindigkeitsausgleich durch Carnot-Stoß statt, so entstünde dadurch eine Energiedissipation vom Betrage

$$\Delta h_{dC} = \frac{u_2^2 (C_{2n} - \varphi)^2}{2} . \quad (2.44)$$

In der Realität liegt der Verlust jedoch höher: ungefähr das 1.5-fache dieses theoretischen Verlustes.

Zusätzlich benötigt man für die Berechnung nach Abschnitt 4.3 einen ideellen ausgeglichenen Eintrittszustand:

$$p_0 = p_2, \quad \rho_0 = \rho_2, \quad c_{0u} = c_{2u}, \quad c_{0n} = k_2 c_{2n} = \varphi u_2$$

Den Radius R_4 , ab welchem die Strömung als ausgeglichen betrachtet werden kann, erhält man auch hier aus Gl. (4.10). Nach der Verlustrechnung können die noch fehlenden Werte

aus den folgenden Beziehungen ermittelt werden, links für die „hydraulische“ Methode, rechts Reibungs- und Carnot-Verlust, die zentrierten Gleichungen gelten für beide.

$$p_4 = \Pi p_2 \quad (2.45)$$

$$\Delta h_{sA} = j_2 \left(\left(\frac{p_4}{p_2} \right)^m - 1 \right) \quad (2.46)$$

$$\eta_{paA} = m \frac{n_A}{n_A - 1} \quad (2.47)$$

$$\eta_{saA} = \frac{\left(\frac{p_4}{p_2} \right)^m - 1}{\left(\frac{p_4}{p_2} \right)^{\frac{m}{\eta_{paA}}} - 1} \quad (2.48)$$

$$\Delta h_{aA} = \frac{\Delta h_{sA}}{\eta_{saA}} \quad (2.49)$$

$$\Delta h_{aA} = \Delta h_{dC} + \frac{p_4}{\sigma \rho_2 m} - j_2 \quad (2.50)$$

$$\eta_{saA} = \frac{\Delta h_{sA}}{\Delta h_{aA}} \quad (2.51)$$

$$\text{Normalenthalpie } j_4 = j_2 + \Delta h_{aA} \quad (2.52)$$

$$\text{Spezifisches Volumen } v_4 = \frac{j_4 m}{p_4} \quad (2.53)$$

$$\text{Dichte } \rho_4 = \frac{1}{v_4} \quad (2.54)$$

$$\text{Temperatur } T_4 = \frac{j_4 m}{ZR} \quad (2.55)$$

$$\text{Totale Normalenthalpie } j_4^\circ = j_2^\circ \quad (2.56)$$

$$C_{4n} = \frac{\dot{m}}{u_2 \rho_4 2\pi R_4 B_4 r_2^2} \quad (2.57)$$

$$C_4 = \frac{\sqrt{2(j_4^\circ - j_4)}}{u_2} \quad (2.58)$$

$$C_{4u} = \sqrt{C_4^2 - C_{4n}^2} \quad (2.59)$$

2.4.5 Zusätzliche Verluste

Den Energieverlust Δh_Z durch zusätzliche Verluste erhält man aus der nachfolgenden Beziehung, die hierfür notwendigen Verlustkoeffizienten ζ_R und ζ_r aus Abschnitt 4.4.

$$\text{Energieverlust } \Delta h_Z = (\zeta_R + \zeta_r) \psi_s u_2^2 . \quad (2.60)$$

Zustand am Leitradeintritt, $R_5 = R_4$, bzw. Beginn des Teils des schaufellosen Diffusors, in dem die Strömung ausgeglichen verläuft:

$$\text{Totale Normalenthalpie } j_5^\circ = j_4^\circ + \Delta h_Z . \quad (2.61)$$

$$\text{Umfangskomponente der Geschwindigkeit } C_{5u} = C_{4u} . \quad (2.62)$$

Startwerte für Iteration (Schleife):

$$\text{Druck } p_5 = p_4 . \quad (2.63)$$

$$\text{Normalenthalpie } j_5 = j_4 + \Delta h_Z . \quad (2.64)$$

Iterationschleife (bis zur gewünschten Genauigkeit):

$$\text{Dichte } \rho_5 = \frac{p_5 m}{j_5} . \quad (2.65)$$

$$\text{Normalkomponente der Geschwindigkeit } C_{5n} = \frac{C_{4n} \rho_4}{\rho_5} . \quad (2.66)$$

$$\text{Geschwindigkeit } C_5 = \sqrt{C_{5u}^2 + C_{5n}^2} . \quad (2.67)$$

$$\text{Normalenthalpie} \quad j_5 = j_5^\circ - \frac{C_5^2 u_2^2}{2} . \quad (2.68)$$

$$\text{Druck} \quad p_5 = p_4 \left(\frac{\frac{-C_5^2 u_2^2}{2} + \frac{C_4^2 u_2^2}{2}}{j_4 + \Delta h_Z} + 1 \right)^{1/m} . \quad (2.69)$$

Nach dem Schleifendurchlauf:

$$\text{Zuströmwinkel des Mediums} \quad \alpha_5 = \arctan \left(\frac{C_{5n}}{C_{5u}} \right) . \quad (2.70)$$

2.4.6 Leitrad

Bei der Verlustrechnung des Leitrades bzw. bei der Ermittlung dessen Hauptabmessungen ist es zweckmäßig, in zwei Zonen einzuteilen: die erste Zone, der Einlaufbereich, reicht vom Ringquerschnitt bei R_5 bis zu den Querschnitten H_E der einzelnen Schaufeln, und die zweite Zone, die eigentlichen Diffusorkanäle, vom Querschnitt bzw. der Eintrittshöhe H_E bis zum Ende der Schaufeln, R_A bzw. H_A .

Leitrad einlauf

Ausgehend von der Forderung, daß die Eintrittshöhe H_E bei Beginn des eigentlichen Diffusorteils des Leitrades ungefähr mit der Breite an der gleichen Stelle B_{5^*} übereinstimmen soll (maximaler Diffusor-Wirkungsgrad unter ansonsten gleichen Bedingungen), liegt somit H_E fest. Eine Abweichung davon muß lediglich dann gemacht werden, wenn diese Höhe auf eine zu große Leitschaufelzahl führen würde ($z'_{max} = \frac{2\pi}{\vartheta} \Rightarrow$ „Blehschaufel“, für kleine B_{5^*} , meist bei hohen Stufen-Druckverhältnissen). Dies ist jedoch nicht von großem Nachteil, da der Wirkungsgrad für die sich aus dieser Bedingung ergebenden größeren H_E -Werten nur unwesentlich abfällt (ein Verhältnis $\frac{H_E}{B_{5^*}} < 1$ ist dagegen besonders ungünstig, man vgl. mit [Tra88] sowie Abbildung 2.5, die C_p -Werte des mittleren bzw. rechten Bildes).

Die Forderung nach guten Wirkungsgraden führt weiterhin auf einen Öffnungswinkel des Diffusors ϑ in der Größenordnung $8^\circ - 10^\circ$. Wählt man für die Form der Leitschaufel die einfache, gerade „Blehschaufel“ mit einer über der ganze Länge gleichbleibenden Dicke, so liegt damit bereits auch die Leitschaufelzahl fest: $z' = \frac{2\pi}{\vartheta}$, z.B. $z' = 45$ für $\vartheta = 8^\circ$, $z' = 40$ für $\vartheta = 9^\circ$, und $z' = 36$ für $\vartheta = 10^\circ$. Für eine keilförmige Leitschaufel mit gekrümmter Saugseite im Einlaufbereich erhält man die Schaufelzahl aus der folgenden Beziehung

$$z' = \frac{\dot{m}}{\rho_{5^*}^{sl} C_{5^*}^{sl} u_2 B_{5^*}^2 r_2^2 (1 - \varepsilon_{kE})} , \quad (2.71)$$

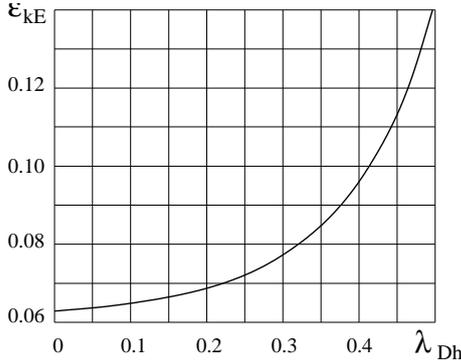


Abbildung 2.3: Diagramm zur Bestimmung des Grenzschichtversperrungsmaßes ε_{kE} , nach [Tra88], S. 459

wobei der erhaltene Werte gerundet werden muß, mit dem Versperrungsmaß durch Grenzschicht ε_{kE} aus Abbildung 2.3 (beim ersten Schleifendurchlauf müssen $\rho_{5^*}^{sl}$, $C_{5^*}^{sl}$ und ε_{kE} geschätzt werden, $\rho_{5^*}^{sl}$, $C_{5^*}^{sl}$ kennzeichnen die aus der schaufellosen Verlustrechnung mit vergrößertem Reibungs- bzw. Dissipationskoeffizienten erhaltenen Werte). Den für Abbildung 2.3 benötigten Umsetzungsgrad λ_{Dh} erhält man aus

$$\lambda_{Dh} \equiv \frac{\Delta h_{s25^*}}{c_2^2/2} = \frac{2j_2}{C_2^2 u_2^2} \left(\left(\frac{p_{5^*}}{p_2} \right)^m - 1 \right). \quad (2.72)$$

Für den Anstellwinkel der Schaufeln α_{5s} wählt man einen Wert, der gleich oder wenig größer als der Wert des mittleren Zuströmwinkels des Mediums α_5 ist (Winkeldifferenz $\Delta\alpha_{5s} = \alpha_{5s} - \alpha_5 \approx \max. 4^\circ$, ansonsten werden die erhaltenen Ergebnisse aus der Verlustrechnung zu unsicher, es müssten Informationen über den Wert der Versperrung durch Ablösung bzw. Totwasser vorliegen). Der Vorteil einer positiven Winkeldifferenz ist eine zu höheren Durchsätzen φ verschobene Sperrgrenze, die für hohe Druckverhältnisse sehr nahe am Auslegungspunkt liegt. Der Nachteil dabei ist jedoch eine ebenfalls zu höheren Durchsätzen (näher an den Auslegungspunkt) verschobene Pumpgrenze. Diese Winkeldifferenz muß bei der Ermittlung der Eintrittshöhe H_E berücksichtigt werden ($H_f \approx 1$, jedoch sollte man darauf achten, daß für eine festliegende Schaufelzahl bzw. einen festliegenden Anstellwinkel nicht beliebige Werte möglich sind):

$$H_E = B_{5^*} \left(1 + H_f \frac{\Delta\alpha_{5s}}{\alpha_5} \right). \quad (2.73)$$

Der im Einlaufbereich des Leitrades entstehende Reibungsverlust kann [Tra88] zufolge nach dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen Verfahren ermittelt werden, die vergrößerte

Oberfläche durch die Schaufeln wird im Reibungskoeffizient c_f und im Dissipationskoeffizient c_d berücksichtigt. Beide werden mit dem folgenden Ausdruck multipliziert:

$$\left[1 + \frac{B_5 R_{5^*} \cos \alpha_{5s}}{(R_{5^*}^2 - 1) z'} \right] .$$

Mit den so ermittelten Werten für das Druckverhältnis Π und das Dichteverhältnis σ kann der Reibungsverlust bestimmt werden:

$$\Delta h_{dR} = j_5 \Pi \left(\frac{1}{\sigma} - \Pi^{m-1} \right) . \quad (2.74)$$

Bedingt durch die ungleichmäßige Strömung (Abweichungen der Geschwindigkeitsrichtung von der mittleren Richtung bis ca. $\pm 10^\circ$) ergibt sich selbst für den optimalen Anstellwinkel der Schaufeln ein Stoßverlust, der [Tra88] zufolge aus der folgenden Beziehung abgeschätzt werden kann:

$$\Delta h_{d\Delta\alpha} = \frac{1}{3} \tan^2 \Delta\alpha \frac{C_5^2 u_2^2}{2} . \quad (2.75)$$

Wenn Anstellwinkel der Schaufeln und mittlere Geschwindigkeitsrichtung nicht übereinstimmen (Teillastpunkt bzw. Auslegungspunkt mit $\Delta\alpha_{5s} \neq 0$), kann der zusätzliche Verlust aus der folgenden Beziehung abgeschätzt werden

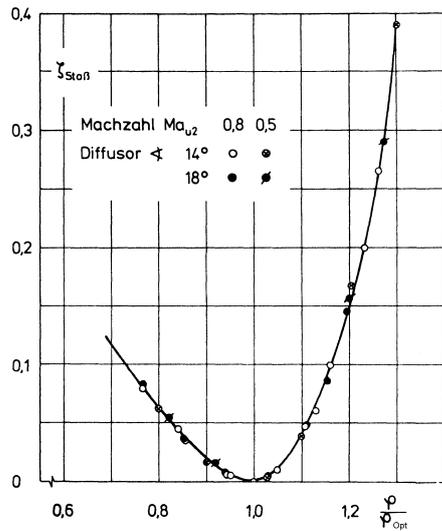
$$\Delta h_{d\alpha} = F \frac{C_5^2 u_2^2}{2} , \quad (2.76)$$

wobei man $F(\Delta i, M, \alpha_{5s})$ wie bei der Verlustermittlung des Laufrades aus Abbildung 4.4 ablesen kann.

Alternativ dazu kann der Stoßverlust des Leitrades aus der nachstehenden Beziehung ermittelt werden:

$$\Delta h_{d\alpha} = \zeta'_{Sto\beta} \frac{C_5^2 u_2^2}{2} , \quad (2.77)$$

mit dem Stoßverlustkoeffizient $\zeta'_{Sto\beta}$ aus Abbildung 2.4. Das Diagramm ist für die Ermittlung des Teillastverhaltens gedacht, deswegen ist auch der Verlust über dem Durchsatzverhältnis φ/φ_{Opt} aufgetragen. Da sich ein solches für einen Auslegungspunkt mit $\Delta\alpha_{5s} \neq 0$ nicht bestimmen läßt, liegt es nahe, statt dem Durchsatzverhältnis das Verhältnis der Geschwindigkeits-Normalkomponenten zu verwenden: C_{5n}/C_{5nOpt} , mit $C_{5nOpt} = C_{5u} \tan \alpha_{5s}$.



Die folgende Gleichung stimmt nur im Bereich $0.75 < \frac{\varphi}{\varphi_{Opt}} < 1.3$!

$$\zeta'_{Sto\beta} = K \left(\frac{\varphi}{\varphi_{Opt}} \right)^2 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{Opt}} \right)^2, \text{ mit } K = 2.5$$

Abbildung 2.4: Stoßverlustkoeffizient des Leitrades $\zeta'_{Sto\beta}$, nach [WW80]

Die gesamte im Leitrad einlauf dissipierte Energie erhält man durch Summation aller Energieverluste, wobei K_f den Anteil des Stoßverlustes kennzeichnet, der dem Einlaufbereich zugeordnet wird:

$$\Delta h_{d5^*} = \Delta h_{dR} + \Delta h_{d\Delta\alpha} + K_f \Delta h_{d\alpha}. \quad (2.78)$$

Mit der Energiedissipation, dem Kontinuitätsgesetz und mit $j_{5^*}^{\circ} = j_5^{\circ}$ kann, wie in den nachfolgenden Gleichungen angegeben, eine Korrektur des Zustandes des Mediums erfolgen:

$$C_{5^*} = \frac{\dot{m}}{u_2 \rho_{5^*} z' H_E B_{5^*} r_2^2 (1 - \varepsilon_{kE})}, \quad (2.79)$$

$$j_{5^*} = j_{5^*}^{\circ} - \frac{C_{5^*}^2 u_2^2}{2}, \quad (2.80)$$

$$p_{5^*} = j_{5^*} \rho_{5^*} m, \quad (2.81)$$

$$\Delta h_{s55^*} = j_5 \left(\left(\frac{p_{5^*}}{p_5} \right)^m - 1 \right) , \quad (2.82)$$

$$j_{5^*} = j_5 + \Delta h_{s55^*} + \Delta h_{d55^*} , \quad (2.83)$$

$$\rho_{5^*} = \frac{p_{5^*}}{j_{5^*} m} . \quad (2.84)$$

Diese Rechnung wiederholt man bis zur gewünschten Genauigkeit. Die oben beschriebene Korrektur kann man auch mit den in [Sch82], S. 59 angegebenen Beziehungen vornehmen, jedoch erhält man dann (zumindest für die gleiche Abbruchbedingung) geringe Abweichungen bei der totalen Normalenthalpie, die sich nicht ändern darf.

Die fehlenden Werte erhält man aus den folgenden Beziehungen:

$$\Delta h_{a55^*} = j_{5^*} - j_5 ,$$

$$\eta_{sa55^*} = \frac{\Delta h_{s55^*}}{\Delta h_{a55^*}} ,$$

$$v_{5^*} = \frac{1}{\rho_{5^*}} ,$$

$$T_{5^*} = \frac{j_{5^*} m}{Z R} .$$

Leitraddiffusor

Der Austrittsdruck p_A ist durch das Druckverhältnis (Π_{EA} oder Π_{1A}) vorgegeben, und somit auch der Druckrückgewinnbeiwert C_p des Leitraddiffusors:

$$C_p = \frac{\frac{p_A}{p_{5^*}} - 1}{\left(\frac{C_{5^*}^2 u_2^2}{2j_{5^*}} + 1 \right)^{1/m} - 1} . \quad (2.85)$$

Aus Abbildung 2.5 kann man für den gewünschten Druckrückgewinnbeiwert das erforderliche Verhältnis L/H_E ablesen, womit dann L festliegt. Solange keine genaueren Informationen vorliegen, kann das Versperrungsmaß am Diffusoraustritt gleichgesetzt werden mit dem am Eintritt $\varepsilon_{kA} = \varepsilon_{kE}$. Die Austrittshöhe H_A erhält man aus

$$H_A = H_E + 2 \tan \left(\frac{\vartheta}{2} \right) L .$$

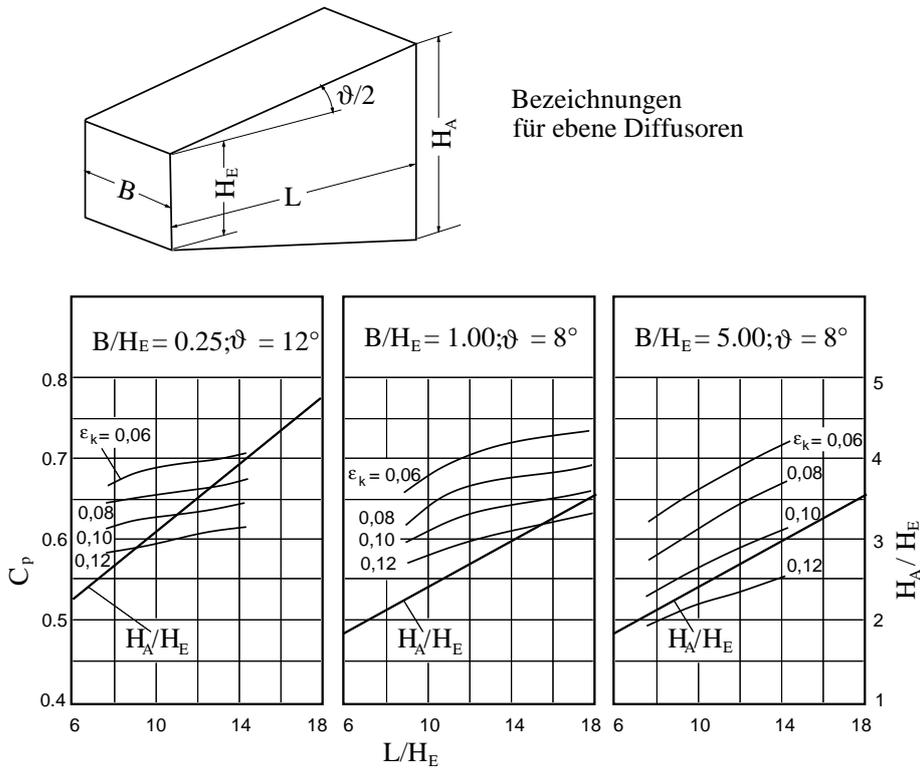


Abbildung 2.5: Druckrückgewinnbeiwert C_p , nach [Tra88], S. 458, bzw. [RDD75]

Mit dem Energieerhaltungssatz und dem Kontinuitätssatz kann die Geschwindigkeit am Austritt ermittelt werden:

$$j_A^\circ = j_{5^*}^\circ, \quad \Rightarrow C_A^2 + \frac{2j_A}{u_2^2} - C_{5^*}^2 - \frac{2j_{5^*}}{u_2^2} = 0.$$

In der oberen Gleichung ersetzt man j_A durch

$$j_A = \frac{p_A}{\rho_A m}, \quad \text{mit}$$

$$\rho_A = \frac{(1 - \epsilon_{kE}) C_{5^*} H_E \rho_{5^*}}{(1 - \epsilon_{kA}) C_A H_A} \quad (2.86)$$

und erhält damit

$$C_A^2 + \underbrace{\frac{2}{u_2^2} \frac{(1 - \epsilon_{kA}) p_A H_A}{(1 - \epsilon_{kE}) C_{5^*} H_E \rho_{5^*} m}}_b C_A + \underbrace{\left(-C_{5^*}^2 - \frac{2j_{5^*}}{u_2^2} \right)}_c = 0.$$

Somit läßt sich für C_A schreiben:

$$C_A = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2}, \quad (2.87)$$

die andere mathematische Lösung trifft nicht zu. Die Dichte ρ_A erhält man aus Gl. (2.86).

Verlust im Leitrad diffusor, wenn nur C_p berücksichtigt wird:

$$\Delta h_{dC_p} = j_{5^*} \frac{p_A}{p_{5^*}} \left[\frac{\rho_{5^*}}{\rho_A} - \left(\frac{p_A}{p_{5^*}} \right)^{m-1} \right].$$

Wenn jedoch die Leitschaufeln im Auslegungspunkt um eine Winkeldifferenz $\Delta\alpha_{5s} \neq 0$ von α_5 abweichen, so muß noch der Anteil des Stoßverlustes des Leitrades berücksichtigt werden, der diesem Abschnitt zugeordnet wird:

$$\Delta h_{d\alpha 5^*A} = (1 - K_f) \Delta h_{d\alpha}.$$

Die gesamte dissipierte Energie erhält man auch hier durch Summation aller Energieverluste:

$$\Delta h_{d5^*A} = \Delta h_{dC_p} + \Delta h_{d\alpha}. \quad (2.88)$$

Wie im Leitrad einlauf erfolgt damit eine Korrektur des Zustandes des Mediums:

$$C_A = \frac{\dot{m}}{u_2 \rho_A z' H_A B_A r_2^2 (1 - \varepsilon_{kA})},$$

$$j_A = j_A^\circ - \frac{C_A^2 u_2^2}{2},$$

$$p_A = j_A \rho_A m,$$

$$\Delta h_{s5^*A} = j_{5^*} \left(\left(\frac{p_A}{p_{5^*}} \right)^m - 1 \right),$$

$$j_A = j_{5^*} + \Delta h_{s5^*A} + \Delta h_{d5^*A},$$

$$\rho_A = \frac{p_A}{j_A m}.$$

Diese Rechnung wird bis zur gewünschten Genauigkeit wiederholt. Bedingt durch den Stoßverlust verringert sich der Druck p_A , so daß ein höherer Wert für C_p erforderlich ist. Diesen erhält man aus Gl. (2.85), wobei statt dem geforderten p_A ein um den zuvor ermittelten Druckabfall erhöhter Wert eingesetzt wird. Auch diese Schleife wird bis zur gewünschten Genauigkeit wiederholt.

Die fehlenden Werte erhält man analog zum Leitrad einlauf aus den folgenden Beziehungen:

$$\Delta h_{a5^*A} = j_A - j_{5^*} ,$$

$$\eta_{sa5^*A} = \frac{\Delta h_{s5^*A}}{\Delta h_{a5^*A}} ,$$

$$v_A = \frac{1}{\rho_A} ,$$

$$T_A = \frac{j_A m}{ZR}$$

2.4.7 Isentroper aerodynamischer Wirkungsgrad der Stufe η_{sa}

Einen genaueren isentropen aerodynamischen Wirkungsgrad η_{sa} erhält man aus Gl. (1.1), mit Δh_s aus Gl. (1.7) und Δh_a aus Gl. (1.9), und hiermit einen genaueren Wert für die Umfangsgeschwindigkeit u_2 , worauf die Stufe nach in den Abschnitten 2.4.3, 2.4.4, 2.4.5 und 2.4.6 angegebenen Gleichungen neu berechnet werden kann.

2.4.8 Fehlende Werte

Die noch fehlenden Werte sollten erst nach erfolgter Iteration der Stufe berechnet werden, z.B. die Strömungswirkungsgrade, die polytropen Wirkungsgrade oder die Polytropenexponente, die spezifische Arbeit, die Stufenwirkungsgrade, die Kennzahlen, etc., die Rechenzeit dürfte dadurch jedoch nicht merklich beeinflußt werden.

2.5 Geometrische Details

2.5.1 Laufrad

Die Gestaltung des Laufrades ist identisch mit den in [Sch82], Kapitel 5 angegebenen Unterlagen, lediglich für die Außenwandkontur wird eine elliptische Form verwendet.

2.5.2 Leitrad

Um dieses zu konstruieren, benötigt man lediglich die folgenden Werte: Radius am Eintritt R_5 , Schaufelzahl z' , Anstellwinkel α_{5s} , Schaufeldicke am Eintritt S_5 , Eintrittshöhe in den Leitrad diffusor H_E , dessen Länge L und Öffnungswinkel ϑ sowie den Radius am Laufradaustritt r_2 . Die Schaufelform erhält man wie nachfolgend beschrieben (Abbildung 2.6 zeigt nach diesen Vorgaben konstruierte Schaufeln):

1. Der Mittelpunkt des Leitrades wird auf den Nullpunkt $(0, 0)$ gelegt.
2. Der Mittelpunkt des Kreises der Leitradspitze mit dem Radius $S_5/2$ wird auf den Punkt mit den Koordinaten $(0, R_5)$ gelegt.

3. Koordinaten des Punktes A :

$$x_A = \frac{S_5}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{5s}\right), \quad y_A = R_5 + \frac{S_5}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{5s}\right).$$

4. Koordinaten des Punktes E :

$$x_E = -x_A = -\frac{S_5}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{5s}\right), \quad y_E = R_5 - \frac{S_5}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{5s}\right).$$

5. Koordinaten des Punktes D' :

$$x_{D'} = \left(H_E + \frac{S_5}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{5s} - \frac{\vartheta}{2}\right), \quad y_{D'} = R_5 + \left(H_E + \frac{S_5}{2}\right) \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_{5s} - \frac{\vartheta}{2}\right).$$

6. Koordinaten des Punktes C' :

Länge der Strecke $|C'D'| = L / \cos \frac{\vartheta}{2}$

$$x_{C'} = x_{D'} + |C'D'| \cos(\pi - \alpha_{5s} - \vartheta), \quad y_{C'} = y_{D'} + |C'D'| \sin(\pi - \alpha_{5s} - \vartheta).$$

7. Durch Drehung um den Winkel $\gamma = 2\pi/z'$ von C' und D' um den Nullpunkt erhält man die Koordinaten der Punkte C und D :

$$x_D = \sqrt{x_{D'}^2 + y_{D'}^2} \cos \left(\arctan \frac{y_{D'}}{x_{D'}} + \gamma \right), \quad y_D = \sqrt{x_{D'}^2 + y_{D'}^2} \sin \left(\arctan \frac{y_{D'}}{x_{D'}} + \gamma \right),$$

$$x_C = \sqrt{x_{C'}^2 + y_{C'}^2} \cos \left(\arctan \frac{y_{C'}}{x_{C'}} + \gamma \right), \quad y_C = \sqrt{x_{C'}^2 + y_{C'}^2} \sin \left(\arctan \frac{y_{C'}}{x_{C'}} + \gamma \right).$$

8. Radius R_6 :

$$R_6 = \sqrt{x_{C'}^2 + y_{C'}^2}$$

9. Der Punkt B ist der Schnittpunkt des Kreises R_6 mit einer Geraden, die durch den Punkt A geht und unter dem Winkel $(\pi - \alpha_{5s})$ verläuft:

$$\begin{cases} x_B = x_A + |AB| \cos(\pi - \alpha_{5s}) & (1) \\ y_B = y_A + |AB| \sin(\pi - \alpha_{5s}) & (2) \\ R_6^2 = x_B^2 + y_B^2 & (3) \end{cases}$$

Werden in Gl. (3) x_B und y_B durch die rechten Seiten der Gln. (1) bzw. (2) ersetzt, so erhält man eine Gl. mit der Länge der Strecke $|AB|$ als einziger Unbekannten:

$$|AB|^2 + 2 \underbrace{(x_A \cos(\pi - \alpha_{5s}) + y_A \sin(\pi - \alpha_{5s}))}_b |AB| + \underbrace{(x_A^2 + y_A^2 - R_6^2)}_c = 0$$

Für $|AB|$ läßt sich somit schreiben:

$$|AB| = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4c}}{2},$$

die andere Lösung ist für die Konstruktion der Schaufel bedeutungslos. x_B, y_B können nun mit Gl. (1) bzw. (2) bestimmt werden.

10. Die dimensionslosen Koordinaten der fünf Punkte A, B, C, D, E liegen damit fest und müssen nur noch mit r_2 multipliziert werden.

11. Der Verlauf der Schaufelkontur zwischen D und E kann durch eine Kurve beschrieben werden, welche die folgenden Bedingungen erfüllt:

- Sie muß durch die Punkte D und E verlaufen.
- Sie muß in D tangential zur Geraden CD verlaufen, in E tangential zu einer Parallelen zu AB , die durch E läuft.

Kapitel 3

Teillastverhalten

Bei der Darstellung des Kennfeldes einer Radialverdichterstufe kann auf verschiedene Art und Weise vorgegangen werden (Aufzählung nicht vollständig):

- Massenstrom \dot{m} als Abszisse, die Drehzahl n als konstanter Parameter.
- korrigierter Massenstrom \dot{m}_c als Abszisse, korrigierte Drehzahl N_c als konstanter Parameter.
- Durchsatzzahl φ als Abszisse, wobei diese den Massenstrom kennzeichnet, Machzahl M_u als konstanter Parameter.
- Durchsatzzahl φ_1 als Abszisse, Machzahl M_u als konstanter Parameter.

$$\dot{m}_c = \dot{m} \frac{\sqrt{\frac{T_1}{288.15\text{K}}}}{\frac{p_1}{101300\text{Pa}}}, \quad \text{in [kg/s]}. \quad (3.1)$$

$$N_c = \frac{n}{\sqrt{\frac{T_1}{288.15\text{K}}}} 60 \frac{\text{s}}{\text{min}}, \quad \text{in [1/min]}. \quad (3.2)$$

$$\varphi_1 = \frac{\dot{V}_1}{\Omega_2 u_2} = \varphi \frac{v_1}{v_2}, \quad \text{mit } \Omega_2 \text{ aus Gl. (1.19)}. \quad (3.3)$$

$$M_u^2 = \frac{1}{(\kappa - 1)} \frac{u_2^2}{j_1} \quad (3.4)$$

3.1 Vorgabe von M_u und φ_1

3.1.1 Laufrad

Zustand am Radeintritt

Frei ansaugende Stufe, gleichbleibender Umgebungszustand ($p_E, T_E = \text{konst.}$):

Aus Gl. (3.3) und dem Kontinuitätsgesetz kann C_{1n} ermittelt werden:

$$\varphi_1 = \frac{C_{1n} u_2 2\pi (r_1^2 - r_N^2)}{2\pi r_2 b_2 u_2}, \text{ und hieraus}$$

$$C_{1n} = \varphi_1 \frac{B_2}{R_1^2 - R_N^2}. \quad (3.5)$$

Mit α_1 erhält man aus Gl. (2.7) C_{1u} , und mit Gl. (2.10) C_1 . Mit den Gln. (2.25) und (3.4) erhält man für einen bekannten Umgebungszustand die Normalenthalpie j_1 :

$$j_1 = \frac{j_E}{1 + \frac{(\kappa - 1) C_1^2 M_u^2}{2}}. \quad (3.6)$$

Mit j_1 und mit Gl. (3.4) kann u_2 berechnet werden:

$$u_2 = \frac{j_E}{\frac{1}{(\kappa - 1) M_u^2} + \frac{C_1^2}{2}}. \quad (3.7)$$

Drehzahl n :

$$n = \frac{u_2}{2\pi r_2}. \quad (3.8)$$

Enthalpiedifferenzen Δh_{sE} und Δh_{aE} aus Gl. (2.24), Druck p_1 aus (2.26), Temperatur T_1 aus (2.27), totale Normalenthalpie j_1° aus (2.28), spezifisches Volumen v_1 aus (2.31), Dichte ρ_1 aus (2.32).

Der Massenstrom \dot{m} ergibt sich aus dem Kontinuitätsgesetz:

$$\dot{m} = C_{1n} u_2 \rho_1 2\pi (r_1^2 - r_N^2). \quad (3.9)$$

Zwischenstufe, gleichbleibender Zustand am Laufradeintritt ($p_1, T_1 = \text{konst.}$):

C_{1n} erhält man mit Gl. (3.5), mit (2.7) C_{1u} , mit (2.10) C_1 , mit (2.29) j_1 , mit (2.30) j_1° , mit (2.31) v_1 , mit (2.32) ρ_1 , mit (3.4) u_2 und mit (3.9) \dot{m} .

Geschwindigkeitsplan am Radeintritt

Umfangskomponente $U_1 = R_1$, die Relativgeschwindigkeit am Laufradeintritt W_1 aus Gl. (2.8).

Geschwindigkeitsplan am Radaustritt

Mit einem für den ersten Schleifendurchlauf geschätzten, für die nächsten Durchläufe jeweils aus dem vorherigen Durchlauf bekannten Verzögerungsverhältnis ξ erhält man W_2 aus Gl. (2.6), mit Gl. (2.2) ε_{t2} , mit (2.3) den Versperrungsfaktor k_2 , mit (2.4) und einem für den ersten Schleifendurchlauf geschätzten $C_{2n} = W_2 \sin \beta_{2s}$ die Umfangskomponente C_{2u} . Aus Gl. (2.5) kann ein verbesserter Wert für C_{2n} ermittelt werden, die Rechnung wird bis zur gewünschten Genauigkeit wiederholt.

Zustand am Radaustritt

Mit den Gln. (2.33) bis (2.40) kann der Zustand am Austritt ermittelt werden (für den ersten Schleifendurchlauf muß η''_{sa} geschätzt werden), anschließend wird der

Laufradverlust

nach dem in Abschnitt 4.1 angegebenen Verfahren berechnet, und letztendlich erhält man mit Gl. (2.43) einen verbesserten Wirkungsgrad. Das Verzögerungsverhältnis muß ebenfalls neu ermittelt werden:

$$\rho_2 = \frac{p_1}{m(j_1 + \Delta h''_a)} \left(1 + \frac{\eta''_{sa} \Delta h''_a}{j_1} \right)^{1/m},$$

mit ρ_2 erhält man aus Gl. (2.42) C_{2n} , W_2 aus (2.5) und ξ aus (2.6). Diese Rechnung wiederholt man, beginnend mit dem Geschwindigkeitsplan am Austritt, bis zur gewünschten Genauigkeit.

3.1.2 Ausgleichsbereich, zusätzliche Verluste, Leitrad

Die weitere Berechnung ist identisch mit der des Auslegungspunktes, bis auf die folgenden Abweichungen:

- ψ_s ist bei der Ermittlung der zusätzlichen Verluste nicht bekannt, da der Austrittsdruck p_A gleichfalls noch nicht bekannt ist. Es ist also auch hier eine Iteration

erforderlich (damit ein auf diese Art und Weise nachgerechneter Auslegungspunkt mit dem aus der eigentlichen Berechnungsschleife übereinstimmt, sollte die gleiche Abbruchbedingung bzw. Genauigkeit verwendet werden).

- die Geometrie ist bereits bekannt, die für deren Ermittlung erforderlichen Gleichungen müssen übersprungen werden.
- Das Druckverhältnis Π_{5^*A} des Leitrad diffusors wird aus der nachstehenden Beziehung ermittelt:

$$\Pi_{5^*A} = 1 + C_p \left(\left(1 + \frac{C_{5^*}^2 u_2^2}{j_{5^*}} \right)^{1/m} - 1 \right).$$

Wie aus Abbildung 4.6 ersichtlich, wird der Verlust durch Rückströmung ins Laufrad für kleine φ sehr hoch. Statt diesen, abhängig von φ , für jeden Teillastpunkt neu zu ermitteln, kann auch mit einem Verlust gleich dem im Auslegungspunkt gerechnet werden.

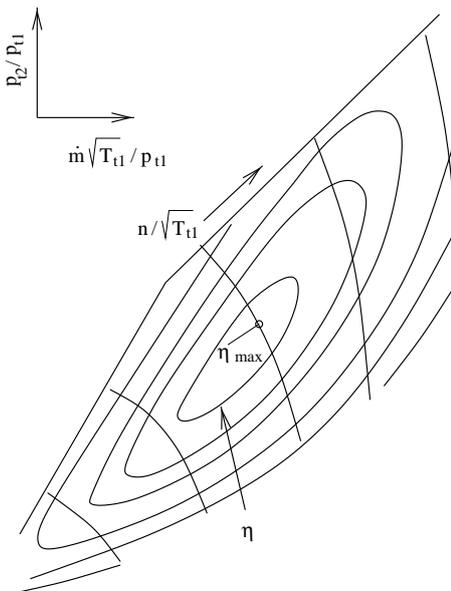


Abbildung 3.1: Qualitatives Teillast-Kennfeld

3.2 Vorgabe von M_u und φ

Da v_1/v_2 nicht bekannt ist, muß φ_1 geschätzt werden. Damit wird identisch wie in Abschnitt 3.1 der Zustand am Laufradaustritt ermittelt, aus Gl.(3.3) erhält man einen verbesserten Startwert für φ_1 . Auch diese Schleife wird bis zur gewünschten Genauigkeit wiederholt.

3.3 Vorgabe von N_c und \dot{m}_c

Zwischenstufe: gleichbleibender Zustand am Laufradeintritt ($p_1, T_1 = \text{konst.}$), somit auch gleiche Werte für j_1, ρ_1 und v_1 .

Mit Gl. (3.1) erhält man \dot{m} , mit (3.2) n , mit (3.8) u_2 und aus dem Kontinuitätssatz, Gl. (3.9), C_{1n} . Die weitere Berechnung ist identisch mit jener in Abschnitt 3.1.

Kapitel 4

Verlustrechnung

4.1 Laufrad

Mit den bekannten Hauptabmessungen des Laufrades, dem bekannten Eintrittszustand sowie dem geschätzten oder aus vorhergehenden Rechnungen (Iteration) bereits bekannten Austrittszustand kann der hier entstehende Verlust nach den in [Tra88], S. 449-453 angegebenen Unterlagen berechnet werden. Man macht dabei folgenden Ansatz: $d\dot{A} = c_d \frac{\rho}{2} w^3 dF$, dabei entspricht $d\dot{A}$ der je Zeiteinheit dissipierten Arbeit, c_d dem Dissipationskoeffizienten, ρ der Dichte, w der Relativgeschwindigkeit sowie dF der Fläche, an der die Dissipation erfolgt.

Der Laufradverlust kann durch folgende Beziehung ausgedrückt werden:

$$Z'' \equiv \frac{\Delta h_d''}{u_2^2/2} = c_{dk}\Phi_k + c_{da}\Phi_a + Z_{sp} + Z_\beta, \quad (4.1)$$

wobei $c_{dk}\Phi_k$ dem Verlust an der Radscheibe sowie an den Schaufelflächen entspricht, $c_{da}\Phi_a$ dem Verlust an der Außenwand, Z_{sp} dem Spaltverlust und Z_β dem Verlust durch nicht optimale Zuströmrichtung.

Beim halboffenen Rad ist

$$\Phi_k = \frac{2}{\pi (R_{1a}^2 - R_N^2) C_{1n}} \int_0^{S_2} \frac{\rho}{\rho_1} W^3 \left[\frac{Bz''}{\sin \beta} + \pi R_i (1 - e_i) \frac{dS_i}{dS} \right] dS, \quad (4.2)$$

$$\Phi_a = \frac{2}{(R_{1a}^2 - R_N^2) C_{1n}} \int_0^{S_a} \frac{\rho}{\rho_1} (R_a^2 + W^2 - 2R_a W \cos \beta)^{\frac{3}{2}} R_a dS_a, \quad (4.3)$$

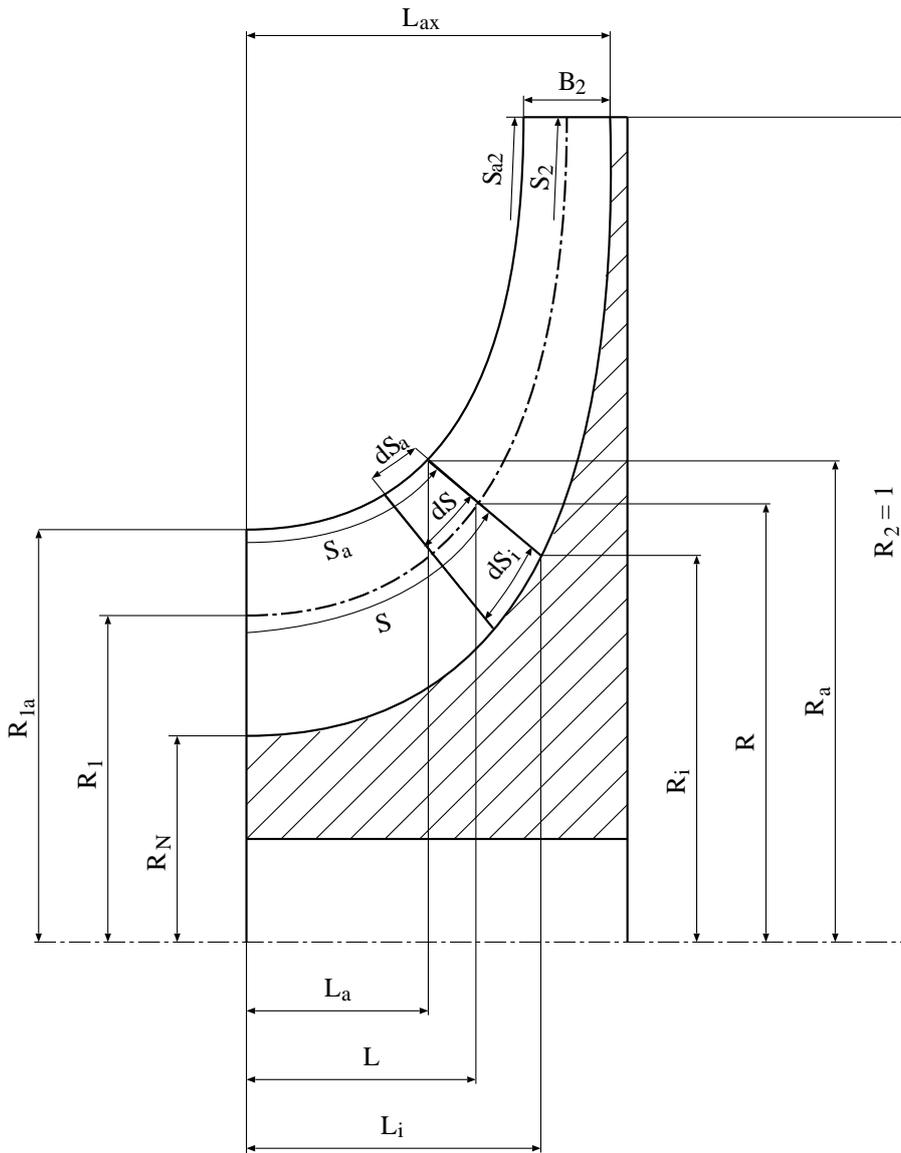


Abbildung 4.1: Bezeichnungen des Laufrades

wobei β dem an der Stelle S auftretenden mittleren Strömungswinkel entspricht, S ist dabei die von der Eintrittskante aus längs der Mittelfläche mit dem Radius $R = \sqrt{(R_a^2 + R_i^2)}/2$ gemessene Bogenkoordinate, e_i kennzeichnet den Anteil der lokalen Versperrung an der Radscheibe durch die endliche Schaufeldicke, und B die lokale Kanalbreite:

$$B = \sqrt{(R_a - R_i)^2 + (L_i - L_a)^2} .$$

In den Gleichungen (4.2) und (4.3) wird der Verlauf der Dichte ρ sowie der dimensionslo-

sen Relativgeschwindigkeit W längs des Strömungsweges S benötigt. Wenn angenommen werden kann, daß W entlang S linear von W_1 nach W_2 abnimmt, dann gilt:

$$W = W_1 - \frac{S}{S_2} (W_1 - W_2) .$$

Die Dichte ρ erhält man aus der Kontinuitätsgleichung:

$$\rho = \frac{\dot{m}}{(1 - e) (1 - \varepsilon_t) W u_2 \Omega r_2^2 \sin \beta} ,$$

wobei e den Anteil der lokalen Versperrung entlang der Mittelfläche durch die endliche Schaufeldicke kennzeichnet, ε_t die lokale Querschnittsversperrung durch Totwasser und Ω den lokalen Ringquerschnitt:

$$\Omega = \pi B (R_i + R_a) . \quad (4.4)$$

Für ε_t kann man eine lineare Zunahme entlang des Strömungsweges S annehmen

$$\varepsilon_t = \frac{S}{S_2} \varepsilon_{t2} ,$$

oder eine lineare Zunahme mit dem Radius R

$$\varepsilon_t = \frac{R - R_1}{R_2 - R_1} \varepsilon_{t2} .$$

Statt eine lineare Abnahme von W anzunehmen, kann auch von einem gleichbleibenden isentropen aerodynamischen Wirkungsgrad η''_{sa} ausgegangen werden:

$$W = \frac{C_{1n} \rho_1 \Omega_1}{(1 - e) (1 - \varepsilon_t) \rho \Omega \sin \beta} ,$$

$$\Delta h_a = \frac{u_2^2}{2} (W_1^2 - W^2 + U^2 - U_1^2) , \quad \text{mit } U = R ,$$

$$j = j_1 + \Delta h_a ,$$

$$p = p_1 \left(1 + \frac{\eta''_{sa} \Delta h_a}{j_1} \right)^{1/m} ,$$

$$\rho = \frac{p}{mj} ,$$

wobei als Startwert für ρ jeweils der Wert des letzten Abschnittes verwendet wird. Der Nachteil hierbei: es muß iteriert werden, so daß die Rechenzeit erheblich steigt ($t_{\eta''_{sa}=\text{konst}} \approx 1.8 t_{\text{lineare Abnahme von } W}$, die Ergebnisse sind fast identisch: $|\Delta\eta''_{sa}| \approx 0.1\%$).

Der Spaltverlust läßt sich aus der folgenden empirischen Beziehung abschätzen:

$$Z_{sp} \equiv \frac{\Delta h_{sp}}{u_2^2/2} \approx 0.6 \left(\frac{\Delta''}{B_2} - 0.013 \right) , \quad (4.5)$$

mit der dimensionslosen Spaltweite Δ'' .

Als weitere empirische Unterlagen gehen die Dissipationskoeffizienten c_{dk} sowie c_{da} in die Verlustrechnung ein:

$$c_{dk} = (c_f + 0.0015) (1.1 + 2B_2) , \quad (4.6)$$

$$c_{da} = c_f + 0.0015 , \quad (4.7)$$

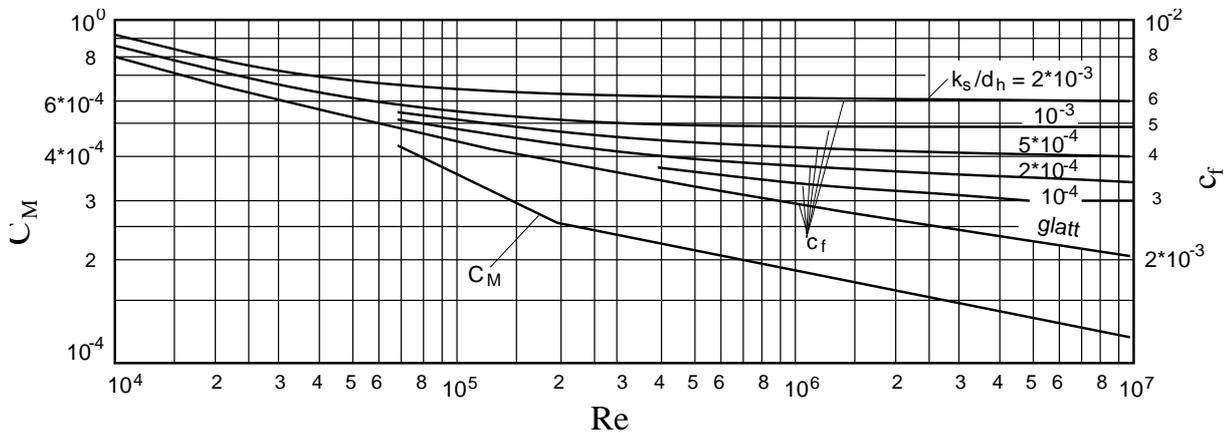


Abbildung 4.2: Diagramm zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten c_f sowie des Korrekturfaktors für den Radreibungsverlust C_M in Abhängigkeit von der Reynoldszahl, nach [Tra88], S. 409

mit dem Reibungskoeffizienten c_f für ausgebildete Rohrströmung, der aus Abbildung (4.2) ermittelt werden kann. Die hierfür notwendige Reynoldszahl kann für den Zustand am

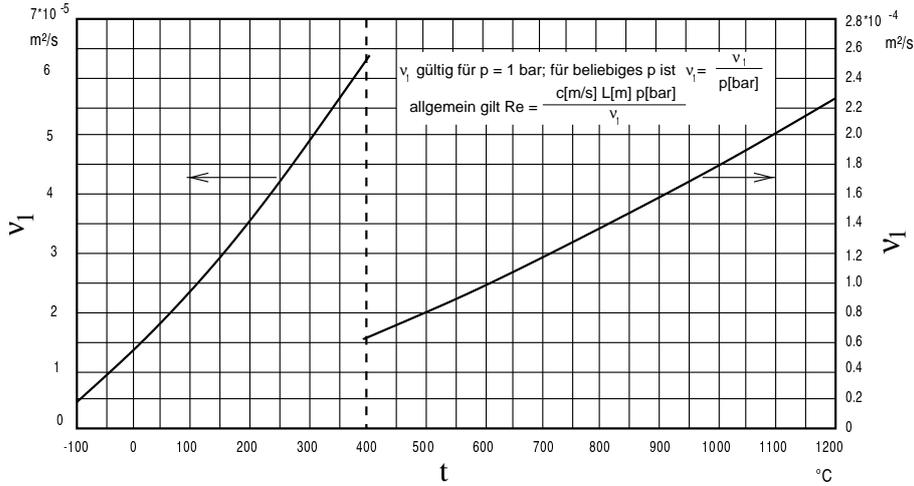


Abbildung 4.3: Kinematische Zähigkeit der Luft $\nu(t, p)$, nach [Tra88], S. 465

Radaustritt ermittelt werden: $Re = \frac{c_2 b_2}{\nu(t_2, p_2)}$, mit $\nu(t_2, p_2)$ für Luft aus Abbildung 4.3. Ebenso muß die relative mittlere Rauigkeit $\frac{k_s''}{d_h}$ in den Kanälen bekannt sein

$$d_h = \frac{4A}{U} = \frac{8\pi r_2 b_2 r_2 k_2}{z'' (2b_2 + 2(t_2 - s_2 / \sin \beta_{2s}))} = \frac{4\pi R_2 B_2 r_2 k_2}{z'' (B_2 - S_2 / \sin \beta_{2s}) + 2\pi} ,$$

mit $t_2 = 2\pi r_2 / z''$. Vernachlässigt man k_2 und S_2 , wird $\eta_{sa}'' \approx 0.5\%$ besser.

Den Verlust durch nicht optimale Zuströmung Z_β erhält man aus

$$Z_\beta = F W_1^2 , \quad (4.8)$$

wobei $F(\Delta i, M, \beta_{1s})$ aus Abbildung 4.4 abgeschätzt werden kann, mit Δi als Anströmwinkel gegen die Skelettlinie (positiv, wenn auf die Druckseite gerichtet), und $M = w_1 / \sqrt{\kappa p_1 v_1}$.

Ein Alternative dazu ist, den Strömungswirkungsgrad des Laufrades nur mit dem Reibungs- und Spaltverlust zu ermitteln, und davon den Stoßverlustkoeffizienten $\zeta_{Sto\beta}''$ abzuziehen (Verlust durch nicht optimale Anströmung), den man aus Abbildung (4.5) in Abhängigkeit vom Durchmesser Verhältnis $D_v = D_1 / D_2$ und vom auf das Optimum bezogenen Durchsatz φ / φ_{Opt} erhält:

$$\eta_D'' = 1 - \frac{c_{dk} \Phi_k + c_{da} \Phi_a + Z_{sp}}{W_1^2 + U_2^2 - U_1^2} - \zeta_{Sto\beta}'' . \quad (4.9)$$

Mit diesem korrigierten Wirkungsgrad kann der Zustand am Radaustritt ermittelt werden.

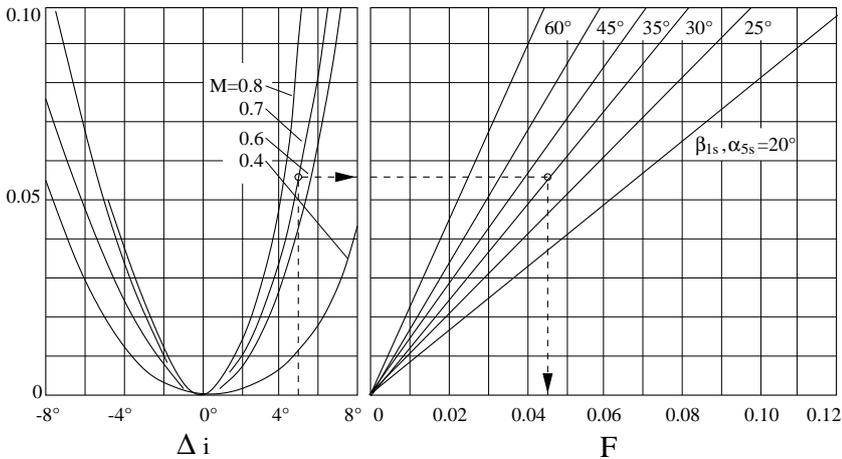


Abbildung 4.4: Diagramm zur Bestimmung von F ($\Delta i, M, \beta_{1s}$ bzw. α_{5s}), nach [Tra88], S. 451

4.2 Ermittlung des Verlustes im Ausgleichsbereich, „hydraulische“ Methode

Mit den geschätzten oder aus vorhergehenden Rechnungen (Iteration) bereits bekannten Hauptabmessungen bzw. bekanntem Eintrittszustand kann der hier entstehende Verlust bzw. der Zustand nach erfolgtem Ausgleich der Strömung nach den in [Gö80], S. 131-136 und [Tra88], S. 374-378 angegebenen Unterlagen berechnet werden.

Der Ausgleich kann bei $R = R_{3^*}$ als beendet angesehen werden, R_{3^*} kann aus der nachstehenden Beziehung abgeschätzt werden:

$$R_{3^*} = 1 + \frac{0,75 + 7 \tan \bar{\alpha}_2}{z''} \sin^2 \beta_{2s}, \quad \text{mit } \tan \bar{\alpha}_2 = \frac{C_{2n}}{C_{2u}}. \quad (4.10)$$

Den Druck p_{3^*} erhält man aus:

$$p_{3^*} \approx p_2 \left(1 + \bar{U}_2^2 (P_{3^*} - \bar{P}_2) \right)^{\frac{1}{m}}, \quad (4.11)$$

mit $\bar{U}_2^2 = \frac{u_2^2}{2j_2}$, $\bar{P}_2 = \frac{p_2}{\frac{\rho}{2} u_2^2}$, und

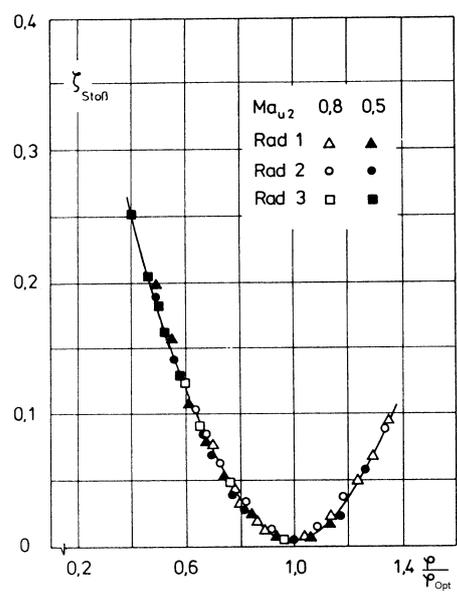


Diagramm zur Bestimmung des Stoßverlustkoeffizienten des Laufrades $\zeta''_{Sto\beta}$ in Abhängigkeit vom Durchmesser Verhältnis $D_v = D_1/D_2$ und vom auf das Optimum bezogenen Durchsatz φ/φ_{Opt} , nach [WW80]

Rad:	1	2	3
B_2	0.06	0.04	0.02

$$Ma_{u2} = \frac{u_2}{a_0}, \quad a_0 = \text{Schallgeschwindigkeit}$$

$$\zeta''_{Sto\beta} = K \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \left(1 - \frac{\varphi}{\varphi_{Opt}} \right)^2, \quad \text{mit } K = 2.02$$

Abbildung 4.5: Stoßverlustkoeffizient des Laufrades $\zeta''_{Sto\beta}$

$$P_{3^*} = \bar{P}_2 + C_2^2 \cos^2 \bar{\alpha}_2 \left[\left(1 - \frac{1}{R_{3^*}} \right) - \frac{\bar{c}_\tau I_1}{B_2 k_2 C_2^2 \sin \bar{\alpha}_2} + 2k_2^2 \tan^2 \bar{\alpha}_2 I_2 \right] - \frac{2(R_{3^*} - 1) \bar{c}_\tau \sin \bar{\alpha}_2}{B_2}. \quad (4.12)$$

Die folgenden Größen werden in Gleichung (4.12) benötigt: $\bar{c}_\tau = c_f C_2^2$, wobei der Reibungskoeffizient c_f wie bei der Verlustrechnung des Laufrades aus Abbildung 4.2 ermittelt werden kann. Hierfür sind die Reynoldszahl $Re = \frac{2u_2 b_2}{\nu(t_2, p_2)}$, mit $\nu(t_2, p_2)$ für Luft aus Abbildung 4.3 und die relative mittlere Rauigkeit $\frac{k_s}{d_n} = \frac{k_s}{2b_2}$ erforderlich; desweiteren werden

I_1 und I_2 benötigt:

$$I_1 = R_{3^*} + \ln R_{3^*} + \frac{1}{R_{3^*}} + \frac{1}{2R_{3^*}^2} - \frac{5}{2}, \quad (4.13)$$

$$I_2 = \frac{N^2}{M^3} \left[\ln \left| \frac{1}{R_{3^*}(M+N)} \right| + \frac{1}{2} \left(\frac{M}{N} \right)^2 \left(1 - \frac{1}{R_{3^*}^2} \right) \right] \\ + \frac{N^2}{M^2} \left(\frac{1}{M+N} - \frac{1}{M+NR_{3^*}} \right). \quad (4.14)$$

Folgende Größen werden in Gleichung (4.14) benötigt:

$$M = \frac{k_2 R_{3^*} - 1}{R_{3^*} - 1}, \quad (4.15)$$

$$N = \frac{1 - k_2}{R_{3^*} - 1}. \quad (4.16)$$

Für Werte $|M| < 0.01$ sollte die folgende Näherungsgleichung statt Gleichung (4.14) verwendet werden, Fehler $< 3\%$:

$$I_2 = \frac{2}{1 + R_{3^*}} \left(\frac{1}{k_2} - \frac{1}{R_{3^*}} \right). \quad (4.17)$$

Die Umfangskomponente der Geschwindigkeit C_{3^*u} erhält man aus

$$C_{3^*u} = \frac{C_{2u}}{R_{3^*}} - \frac{(R_{3^*} + 1)^2 (R_{3^*} - 1) \bar{c}_\tau \cos \bar{\alpha}_2}{4R_{3^*} B_2 k_2 C_{2n}}, \quad (4.18)$$

die Normalkomponente C_{3^*n} aus

$$C_{3^*n} = \frac{C_{2n} k_2}{R_{3^*} \pi^{\frac{1}{n_k}}}, \quad (4.19)$$

mit dem Druckverhältnis $\Pi = \frac{p_{3^*}}{p_2}$ und dem Polytropenexponent n_k

$$n_k = \frac{-\ln \Pi}{\ln \left[\left(1 + \bar{U}_2^2 C_2^2 \right) - \bar{U}_2^2 C_{3^*}^2 \right] - \ln \Pi}. \quad (4.20)$$

Aus den beiden Gleichungen (4.19) und (4.20) erhält man C_{3^*n} und n_k durch iterative Rechnung.

4.3 Reibungsverlust im schaufelloren Ringraum

Der in einem schaufelloren Ringraum entstehende Verlust kann nach den in [Tra88], S. 453-454 angegebenen Unterlagen ermittelt werden. Der Ansatz ist hierbei der gleiche wie bei der Verlustermittlung des Laufrades (Summation aller Verluste an den einzelnen differentiellen Flächenelementen).

Ausgehend von einem ideellen ausgeglichenen Eintrittszustand des Mediums (konstante Werte für Druck, Dichte, Geschwindigkeit sowie Geschwindigkeitsrichtung über den gesamten Eintrittsquerschnitt) kann unter Verwendung der Kontinuitätsgleichung, des Drallsatzes, der Hauptgleichung der Thermodynamik sowie dem Zustandsgesetz des idealen Dampfes, beginnend am Eintrittsradius, der Zustand bei einem um ein sehr kleines Intervall vergrößerten Radius ermittelt werden. Diese Rechnung wird so lange wiederholt, bis man den gewünschten Druck (für den schaufelloren Ringraum) erhält (es sind jedoch nicht beliebig hohe Drucksteigerungen möglich) bzw. bis zu dem gewünschten Radius (R_5 , Beginn der Leitrad-schaufeln).

Es werden die folgenden dimensionslosen Größen eingeführt:

$$\begin{aligned} V &\equiv \frac{c}{c_0}, & V_u &\equiv \frac{c_u}{c_0}, & V_n &\equiv \frac{c_n}{c_0} \\ R &\equiv \frac{r}{r_0}, & B &\equiv \frac{b}{b_0}, & B_0 &\equiv \frac{b_0}{r_0} \\ \Pi &\equiv \frac{p}{p_0}, & \sigma &\equiv \frac{\rho}{\rho_0}, & M_0^2 &\equiv \frac{\rho_0 c_0^2}{\kappa p_0} \end{aligned} \quad (4.21)$$

wobei der Index 0 den Eintrittszustand kennzeichnet. Nach Überführung der Differentialbeziehungen der oben genannten Gesetze in Differenzengleichungen erhält man mit den Größen in Gleichung (4.21) die folgenden Beziehungen:

$$\Delta\sigma = -\sigma \left[\frac{\Delta V_n}{V_n} + \frac{\Delta(BR)}{BR} \right], \quad (4.22)$$

$$\Delta V_u = - \left[V_u + \frac{R^2 c_f \sigma V_u \sqrt{V_u^2 + V_n^2}}{B_0 \sin \alpha_0} \right] \frac{\Delta R}{R}, \quad (4.23)$$

$$\Delta\Pi = -\kappa M_0^2 \sigma \left[V_u \Delta V_u + V_n \Delta V_n + \frac{c_d \sigma (V_u^2 + V_n^2)^{\frac{3}{2}}}{B_0 \sin \alpha_0} R \Delta R \right], \quad (4.24)$$

$$\Delta\Pi = \Pi \frac{\Delta\sigma}{\sigma} - (\kappa - 1) M_0^2 \sigma (V_u \Delta V_u + V_n \Delta V_n). \quad (4.25)$$

Ersetzt man in Gleichung (4.25) $\Delta\sigma$ durch den rechten Teil der Gleichung (4.22), und subtrahiert dann die erhaltene Gleichung und Gleichung (4.24), so erhält man:

$$\begin{aligned} \Delta V_n \left(M_0^2 \sigma V_n - \frac{\Pi}{V_n} \right) &= \Pi \frac{\Delta(BR)}{BR} + (\kappa - 1) M_0^2 \sigma V_u \Delta V_u \\ &- \kappa M_0^2 \sigma \left[V_u \Delta V_u + \frac{c_d \sigma (V_u^2 + V_n^2)^{\frac{3}{2}}}{B_0 \sin \alpha_0} R \Delta R \right]. \end{aligned} \quad (4.26)$$

Auflösen nach ΔV_n :

$$\Delta V_n = \frac{\Pi \frac{\Delta(BR)}{BR V_n M_0^2 \sigma} - \Delta V_u \frac{V_u}{V_n} - \frac{\kappa \sigma c_d (V_u^2 + V_n^2)^{\frac{3}{2}}}{V_n B_0 \sin \alpha_0} R \Delta R}{1 - \frac{\Pi}{V_n^2 \sigma M_0^2}}. \quad (4.27)$$

Für ein gewähltes Intervall ΔR liefert Gl. (4.23) ΔV_u , (4.27) ΔV_n , (4.22) $\Delta\sigma$ und (4.24) oder (4.25) $\Delta\Pi$. Für das nächste Radienintervall ersetzt man R durch $R + \Delta R$, V_u durch $V_u + \Delta V_u$, V_n durch $V_n + \Delta V_n$, σ durch $\sigma + \Delta\sigma$ und Π durch $\Pi + \Delta\Pi$.

Für den Reibungskoeffizienten c_f (aus Abbildung 4.2) wird die Reynoldszahl benötigt $Re = \frac{c_0 b_0}{\nu_0}$, mit $\nu_0 = f(p_0, t_0)$ für Luft aus Abbildung 4.3, und die relative mittlere Rauigkeit $\frac{k_s}{d_h} = \frac{k_s}{2b_0}$; Dissipationskoeffizient $c_d = c_f + 0.0015$.

Bedingt durch die nicht unendlich kleinen Intervalle (und durch Rundungen des Rechners) werden der Kontinuitätssatz und der Energierhaltungssatz nicht genau eingehalten. Von den berechneten vier Werten am Austritt, V_u , V_n , σ und Π , reichen jedoch beliebige zwei Werte, um den Zustand genau festzulegen. Mit den gewählten zwei Werten können die beiden anderen so bestimmt werden, daß die beiden genannten Gesetze nicht verletzt werden.

4.4 Zusätzliche Verluste

Zusätzlich entstehende Verluste können nach den in [Tra88], S. 461-462 angegebenen Unterlagen ermittelt werden.

Der Radreibungsverlustkoeffizient $\zeta_R = \Delta h_{dR} / \Delta h_s$ kann für einen Verdichter mit halboffenem Laufrad durch folgende Beziehung ausgedrückt werden:

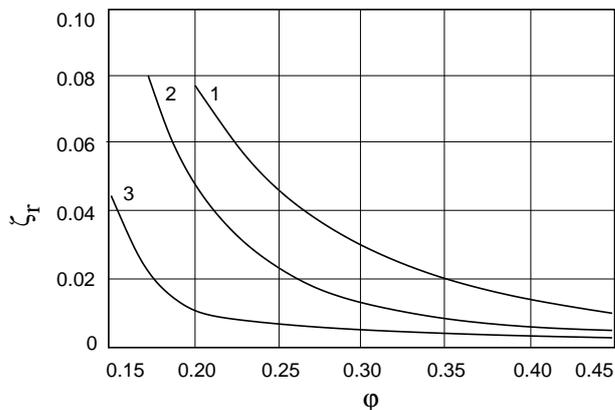
$$\zeta_R = \frac{1.28 C_M}{\varphi \psi B_2}, \quad (4.28)$$

wobei Δh_{dR} der hervorgerufenen Energiedissipation entspricht. Aus Abbildung 4.2 kann C_M ermittelt werden, mit der dazu notwendige Reynoldszahl $Re = \frac{2u_2 r^2}{\nu(t_2, p_2)}$, $\nu(t_2, p_2)$ für Luft aus Abbildung 4.3.

Zusätzlich zum Radreibungsverlust tritt ein Reibungsverlust durch die stark fluktuierende Strömung am Laufradaustritt auf (durch lokale *Rückströmung* aus dem Diffusor- bzw. Ausgleichsraum ins Laufrad). Dieser Verlust stellt [Tra88] zufolge die größte Unsicherheit bei der Verdichterberechnung dar.

Der Verlustkoeffizient $\zeta_r = \Delta h_{dr} / \Delta h_s$ kann aus Abbildung 4.6 abgeschätzt werden, wobei Δh_{dr} der hervorgerufenen Energiedissipation entspricht.

Beide Zusatzverluste sollten nicht in die aerodynamischen Radwirkungsgrade eingerechnet werden, da sie lediglich das am Laufrad aufzubringende Drehmoment vergrößern, nicht aber die Druckerzeugung herabsetzen.



- 1 geschaufelter Diffusor, Schaufelaustrittswinkel 90°;
- 2 geschaufelter Diffusor, Schaufelaustrittswinkel 60°;
- 3 ungeschaufelter Diffusor.

Abbildung 4.6: Rückströmungs-Verlustkoeffizient ζ_r , nach [Tra88], S. 462

Kapitel 5

Rechnerprogramm

5.1 Einschränkungen

Mit dem Rechnerprogramm lassen sich nicht beliebige Verdichtertypen berechnen. Folgende Einschränkungen existieren (noch):

- keine hydraulischen Medien, nur Luft, wegen $\nu(p, t)$.
- keine Abweichung von der axialen Zuströmung des Mediums am Eintritt ins Laufrad (abgesehen von C_{1u} auch $\neq 0$).
- nur halboffene Laufräder ohne Deckscheibe.
- nur geschaufelte Diffusoren, nur Öffnungswinkel $\vartheta = 8^\circ$ (jedoch einfache Erweiterung möglich für schaufellose Ringräume).
- Radscheiben- und Außenwandkontur nur elliptische Form.
- Kennfeldberechnung nur mit den in [WW80] angegebenen Diagrammen bzw. Beziehungen für die Ermittlung der Stoßverlustkoeffizienten.

5.2 Programmiersprache

Für die Programmierung wurde die Programmiersprache C++ gewählt, der Berechnungskern in ANSI C++, für die Oberfläche die Klassenbibliothek MFC. Bedingt durch die MFC ist das Programm nur unter WindowsTM lauffähig, bedingt durch die 3-dimensionale OpenGLTM-Ausgabe auch nur, wenn diese von der Betriebssystemversion bereits unterstützt wird (getestet: NT 3.51 - OK, NT 4.0 - OK, Win95B - OK, Win95A wahrscheinlich auch, vorausgesetzt es werden die entsprechenden DLLs installiert, nicht lauffähig

unter Win31, nicht getestet). Der Berechnungskern dürfte jedoch auf allen Rechnertypen laufen, für die ANSI C++ Compiler verfügbar sind. Die erzeugten Ausgabedateien `*.imp` im Binärformat sind kompatibel mit denen anderer Betriebssysteme (getestet: Linux, demzufolge wohl auch alle anderen UNIXTM-Derivate), vorausgesetzt die Datentypen `int` und `double` haben eine Größe von 4 Byte bzw. 8 Byte. Es ist durchaus möglich, falls man einen relativ langsamen Wintel-Rechner benutzt, nur die Eingabefiles mit diesem Rechner zu erzeugen, diese dann auf einem größeren Rechner rechnen zu lassen, die Ausgabe erfolgt dann wieder auf dem Wintel. Sinnvoll ist das jedoch nur bei umfangreichen Kennfeld-Berechnungen, die Auslegung erfolgt selbst auf einem bereits etwas betagten 486er in wenigen Sekunden.

5.3 Programmstart

Falls die Datei `verdichter.conf` vorhanden ist, wird sie beim Programmstart geladen. Sie muß sich im gleichen Verzeichnis befinden, aus dem das Programm aufgerufen wird (Kommandozeilen-Aufruf), im gleichen Verzeichnis wie die ausführbare binäre Datei, wenn das Programm durch Doppelklick im Dateimanager oder Explorer (nur Windows) gestartet wird, oder im in der Link-Datei `*.lnk` eingestellten Arbeitsverzeichnis, falls es über einen Link gestartet wird (nur Windows). Diese Datei muß die gleiche Struktur haben wie eine Datei, die Daten eines Verdichters enthält (Dateiendung `*.imp`). Alle vorhandenen Daten (nur Eingabewerte, + Geometrie und Auslegungspunkt, + Laufrad-Dynamik, + Kennfeld) werden geladen. Um solch eine Konfigurationsdatei zu erzeugen, muß lediglich eine `*.imp`-Datei umbenannt werden.

5.4 Eingabedialogfeld

Zusätzlich für das Programm erforderliche Eingabedaten bzw. die empfohlenen Grenzen:

Geschätzte Startwerte für die Iterationsschleife der Stufe, Genauigkeit

isentropen aerodynamischer Wirkungsgrad des Laufrades	η_{sa}''	70 – 90	%
isentropen aerodynamischer Wirkungsgrad der Stufe	η_{sa}	65 – 87	%
Iterationsgenauigkeit von η_{sa}		10^{-8} – 10^{-12}	

Die vorgeschlagenen sehr kleinen Grenzen für die Iterationsgenauigkeit bedeuten jedoch nicht, daß die erhaltenen Werte so genau stimmen, sondern daß das berechnete C_A mit dem vorgeschriebenen C_A relativ genau übereinstimmt.

Genauigkeit der Wirkungsgradberechnung bzw. Anzahl der berechneten Punkte einer Laufradschaufel:

Anzahl der Kurven (Ellipsen) des Laufrades	9 – 21
dimensionsloser Abstand zweier Punkte der mittleren Kurve	$10^{-4} - 10^{-2}$
Anzahl der Intervalle für die	
Wirkungsgradberechnung des Ausgleichsbereiches	$10^3 - 10^5$
Anzahl der Intervalle für die	
Wirkungsgradberechnung des Leitradelaufes	$10^3 - 10^5$

Die Angabe ANZAHL DER INTERVALLE FÜR DIE WIRKUNGSGRADBBERECHNUNG DES AUSGLEICHBEREICHES ist nur für die Berechnungsmethode „Reibungsverluste, Carnotstoß“ erforderlich.

Bewegt man den Mauszeiger über ein Eingabefeld, so erscheint eine Zeile auf dem Bildschirm (Tooltip), welche die empfohlenen Grenzen für den in diesem Feld einzugebenden Wert anzeigt. Diese Grenzen können jedoch überschritten werden, aber möglicherweise weichen die Ergebnisse dann von den tatsächlichen Werten so sehr ab, daß sie vollkommen unbrauchbar sind. Wenn die Eingabe eines Wertes, abhängig von der gewählten Berechnungsmethode, zu einer Überbestimmung führen würde, wird das entsprechende Dialogfeld gesperrt, d.h. es erhält einen grauen Hintergrund und läßt sich nicht mehr anwählen, so daß keine Eingaben möglich sind.

5.5 Berechnung

Es wird entweder nur der Auslegungspunkt und die Geometrie berechnet, oder, falls gewünscht, auch das Kennfeld. Falls an den Eingabewerten für den Auslegungspunkt und für die Geometrie nach erfolgter Berechnung nichts verändert wurde, werden diese Daten bei einer erneuten Berechnung beibehalten (spart Rechenzeit, wenn auch nicht besonders viel). Die Charakteristik wird hingegen immer neu berechnet. Während die Berechnung läuft, wird unten rechts in der Statuszeile des Programmfensters für das aktive Verdichter-Dokument die Anzahl der Durchläufe (Iterationsschleife der Stufe), der isentrope aerodynamische Wirkungsgrad sowie die Leitschaufelzahl des vorherigen Durchlaufes angezeigt. Falls sich über längere Zeit die Anzeige nicht ändert (eine hohe Genauigkeit bei der Berechnung läßt die Berechnungszeit ungefähr wenig unterproportional ansteigen), sollte die Berechnung abgebrochen und mit veränderten Eingabewerten wiederholt werden (wahrscheinlich hängt die Berechnung in einer Endlosschleife, sollte jedoch nicht mehr vorkommen). Die geschätzten Wirkungsgrade (Laufrad und Stufe) sollten nicht zu sehr von den für diesen Typ real existierenden Werten abweichen. Die Leitschaufelzahl kann bei der Berechnung von einem Durchlauf zum anderen schwanken, so daß der Wirkungsgrad der

Stufe nicht konvergiert (es reicht bereits eine Schaufelzahldifferenz = 1). Der Grund dafür ist, daß der Wert, den man aus den Berechnungsgleichungen erhält, kein ganzer Wert ist, und dementsprechend ab- oder aufgerundet werden muß. Deshalb wird die Schaufelzahl auch nur bei den ersten zehn Durchläufen aus den angegebenen Beziehungen ermittelt, beim elften Durchlauf wird dann ein Mittelwert aus den bisherigen Durchläufen gebildet, und dieser dann für alle weiteren Durchläufe beibehalten (unabhängig von der gewählten Leitradgeometrie).

Für jede Berechnung wird ein eigener Prozess (Thread) gestartet, dadurch kann mit dem Programm auch während den laufenden Berechnungen weitergearbeitet werden, es reagiert auf Meldungen (Benutzereingaben) und zwingt den Benutzer nicht zu unfreiwilligen und unnötigen Wartezeiten. Bedingt durch die Threads können (fast) beliebig viele (wahrscheinlich 65536) Berechnungen gleichzeitig gestartet werden. Die Berechnung kann zu jedem Zeitpunkt abgebrochen werden, in kritischen Abschnitten (wenn gerade Speicher reserviert bzw. freigegeben wird) erst nach einer Verzögerung von wenigen Millisekunden, aber das merkt der Benutzer nicht :-).

5.6 Ausgabe der berechneten Werte

Zusätzlich zum Scrollen mit der Maus (kann eine Instanz der Klasse `CScrollView` automatisch) kann auch mit der Tastatur der sichtbare Bereich verschoben werden (muß man aber leider selbst programmieren): durch die Tasten \uparrow , \downarrow , \leftarrow , \rightarrow in die jeweils entsprechende Richtung des Pfeils. Bei der Textausgabe gelangt man dabei jeweils um genau eine Zeile höher bzw. tiefer, bei der grafischen Ausgabe um genau 4 mm. Seitenweise geblättert werden kann mit $\text{Bild } \uparrow$ bzw. $\text{Bild } \downarrow$.

5.6.1 Ausgabe im Textformat

Über FENSTER - AUSLEGUNGSPUNKT erhält man die vorgegebenen Eingabewerte, die berechneten geometrischen Daten, die Werte für die Dynamik-Berechnung des Laufrades (Masse, Schwerpunkt, Trägheitsmomente) und die Daten des Auslegungspunktes.

Über FENSTER - TEILLASTPUNKT erhält man die Daten des ersten Teillastpunktes (kleinste Machzahl bzw. korrigierte Drehzahl, kleinste Durchsatzzahl bzw. kleinster korrigierter Massenstrom). Dieser Punkt ist auch der erste einer doppelt verketteten Liste, welche Zeiger auf alle Punkte enthält. Die doppelte Verkettung ist für das nachfolgend beschriebene Vor- bzw. Rückwärts-Blättern erforderlich. Mit der Tastenkombination $\text{Strg} + \downarrow$ gelangt man zur nächstkleineren Machzahl bzw. korrigierten Drehzahl, mit $\text{Strg} + \uparrow$ in die entgegengesetzte Richtung. Die Tastenkombinationen $\text{Strg} + \rightarrow$ und $\text{Strg} + \leftarrow$ gelten entsprechend für die Durchsatzzahl bzw. den korrigierten Massenstrom, abhängig von der Vorgabe bei der Teillastberechnung. Drückt man die rechte Maustaste, dann erscheint

ein Fenster, welches das Blättern mit der Maus erlaubt, ebenso kann über die Menüleiste geblättert werden.

Bei der Ausgabe eines neuen Betriebspunktes wird der Bereich, der sich nicht verändert (Bezeichnung, Formelzeichen, Einheit), auch nicht neu gezeichnet, nur der sich ändernde Wert (ist augenscheinlicher).

5.6.2 Grafische Ausgabe

Über FENSTER - NETZ erhält man die Skelettfläche einer Laufradschaufel in drei Ansichten, über FENSTER - FRONTANSICHT die Frontansicht des Laufrades und des Leitrades, und über FENSTER - SEITENANSICHT den Meridianschnitt und die seitliche Draufsicht auf eine Schaufel. Jeweils für die aktive Ansicht läßt sich der Maßstab entweder beliebig einstellen (Texteingabe in einer Dialogbox) oder halbieren bzw. verdoppeln (am einfachsten über die Buttons der Symbolleiste, aber auch über die Menüleiste sowie über das Kontext-Menü der rechten Maustaste).

Über FENSTER - 3D-ANSICHT gelangt man in ein OpenGL-Fenster, das bisher nur die Skelettfläche aller Laufradschaufeln zeigt, irgendwann aber sowohl Laufrad als auch Leitrad darstellen können soll. Mit den Tasten \uparrow , \downarrow , \leftarrow und \rightarrow kann das Rad gedreht werden.

5.6.3 Kennfeld

Über FENSTER-TEILLASTDIAGRAMM können die Werte der Teillast-Betriebspunkte in einem Diagramm dargestellt werden. Zunächst erscheint eine Dialogbox mit vorgewählten Kurven, die so übernommen werden können, oder es können sofort neue Kurven gewählt werden. Maximal können vier verschiedene Werte (Kurven), z.B. isentroper aerodynamischer Wirkungsgrad, Arbeitszahl, Druckverhältnis etc. dargestellt werden, man kann die Werte dimensionslos (relativ zu denen des Auslegungspunktes) oder absolut darstellen lassen, bei der letztgenannten Darstellungsweise wird der Auslegungspunkt auch eingezeichnet und durch ein Kreuz gekennzeichnet. Die einzelnen berechneten Punkte lassen sich dabei auch einzeichnen, alle Punkte einer Machzahl bzw. korrigierten Drehzahl sind jeweils durch die gleiche Zahl gekennzeichnet (0 für die kleinste Machzahl bzw. korrigierte Drehzahl, alle weiteren werden entsprechend hochgezählt). Durch die einzelnen Punkte werden AKIMA-Splines gelegt, die den Kurvenverlauf recht genau wiedergeben (sie gehen genau durch alle angegebenen Punkte, nicht wie die üblichen Splines nur durch Start- und Endpunkt), somit erübrigt sich die Wahl einer sehr kleinen Schrittweite. Empfehlenswert ist, die Sperrgrenze hierbei genauer berechnen zu lassen, 0.5% sollten jedoch ausreichen, zumal die erhaltenen Werte eine nicht vorhandene Genauigkeit vortäuschen und andererseits Rechenaufwand und Speicherbedarf überproportional steigen.

Mit der linken Maustaste kann ein Ausschnitt gewählt werden, der dann vergrößert darge-

stellt wird. Nach dem Drücken der rechten Maustaste erhält man ein Kontext-Menü mit den Funktionen ZOOM ZURÜCKSETZEN (die Anzeige des vergrößerten Ausschnittes wird zurückgesetzt) und KURVE WÄHLEN, diese Funktionen lassen sich jedoch auch über die Menüzeile bzw. die Toolbar auswählen.

5.7 Ausgabe der empirischen Diagramme

Über FENSTER-EMPIRISCHE DIAGRAMME können die für die Berechnung verwendeten empirischen Diagramme ausgegeben werden. Genau wie beim Teillastdiagramm kann mit der linken Maustaste ein Ausschnitt gewählt werden, der dann vergrößert dargestellt wird, die Funktionen ZOOM ZURÜCKSETZEN und KURVE WÄHLEN sind auch hier über die rechte Maustaste, die Toolbar und die Menüzeile verfügbar.

5.8 Drucken, Seitenansicht

DATEI - DRUCKEN ermöglicht das Drucken aller Ausgabefenster bis auf das OpenGL-Fenster, das vorgewählte Seitenformat läßt sich ändern, jedoch nicht in der Seitenansicht. Über DATEI - SEITENANSICHT kann die Ausgabe des Druckers bereits vor dem Druckvorgang am Bildschirm betrachtet werden. Nur in der Seitenansicht (und beim Drucken) erhält man für die Fenster FRONTANSICHT und SEITENANSICHT die jeweilige Kurzausgabe mit den wichtigsten Werten der Stufe.

5.9 Speichern, Laden

Die Eingabewerte sowie alle berechneten Daten (Geometrie und Auslegungspunkt, Dynamik des Laufrades, Kennfeld) werden gespeichert bzw. geladen, die voreingestellte Dateiendung ist *.imp. Entsprechend der Genauigkeit (Laufrad-Geometrie: ANZAHL DER KURVEN, DIMENSIONSLOSER ABSTAND ZWEIER PUNKTE, Kennfeld: START- bzw. ENDWERT, SCHRITTWEITE, + SERRGRENZE), mit der gerechnet wurde, variiert die Größe dieser Dateien. Unabhängig von jedwelchen Genauigkeitsangaben ist die Größe eines berechneten Punktes des Kennfeldes, egal ob Auslegungspunkt oder Teillastpunkt.

Über DATEI - SCHAUFELGEOMETRIE EXPORTIEREN können im x,y,z-Format (als Text) die Koordinaten von insgesamt elf Punkten der Schaufel-Skelettlinie auf der Radscheibenseite und an der Außenkontur ausgegeben werden. Die voreingestellte Dateiendung ist *.sch. Man kann damit auf einfache Art und Weise die Schaufelgeometrie in ein CAD/CIM-Programm übernehmen (die Ausgabedatei muß in der Form vorliegen, die von diesem Programm verstanden wird), damit ein NC-Programm erstellen und das Laufrad fräsen,

wie an der Fachhochschule Ravensburg-Weingarten anlässlich eines Tages der Offenen Tür bereits geschehen.

Für die Leitradschaukeln ist das nicht notwendig, bei deren Konstruktion werden nur wenige Größen gebraucht (vgl. Abschnitt 2.5.2). Es ist jedoch mit minimalem Aufwand möglich, bei Bedarf die Koordinaten der Punkte A, B, C, D, E auszugeben, falls diese Daten für den Anwender die Vorgehensweise bei der Konstruktion vereinfachen.

Über DATEI - SIMULATIONSWERTE EXPORTIEREN können der Wirkungsgrad η_s° und das Druckverhältnis Π_{EA} in Tabellenform (als Text) in eine Datei geschrieben werden, die voreingestellte Dateieindung ist `*.sim` (um andere Werte auszugeben bedarf es nur kleiner Änderungen). Mit diesen Werten kann das Verhalten der gesamten Baugruppe (Klimaanlage, Turbolader, etc.) in einem Simulationsprogramm wie z.B. Simulink (wahrscheinlich TM) veranschaulicht werden. Falls bei der Berechnung SPERRGRENZE BERECHNEN angekreuzt wurde, ist diese Ausgabe nicht möglich, da dann keine eindeutige Zuordnung von Ausgabewert und dem diesem Wert entsprechenden korrigierten Massenstrom mehr erfolgen kann (jedenfalls nicht ohne sehr hohen Aufwand). Die Ausgabe ist nur dann möglich, wenn bei der Kennfeld-Ermittlung N_c bzw. \dot{m}_c vorgegeben wurden, da für die anderen Vorgaben bisher kein Bedarf bestand.

5.10 Schließen, Beenden

Solange eine Berechnung läuft, kann das entsprechende Verdichter-Dokument nicht geschlossen werden, ebensowenig das Programm vorschriftsmäßig beendet werden. Wurde ein Wert verändert, so erfolgt eine Abfrage, ob der Verdichter vor dem Schließen bzw. Beenden des Programms gespeichert werden soll oder nicht, oder der Vorgang abgebrochen werden soll.

5.11 Hilfe

Diese Diplomarbeit ist auch im HTML-Format verfügbar, sie kann über das Hilfefenster des Programmes gelesen werden (der Internet Explorer ab Version 3.0 muß jedoch vorhanden sein), ebenso mit jedem Browser, der HTML 2.2 beherrscht (das können wohl seit Jahren die meisten Browser). Die `*.dvi`-Dateien (device independent) und `*.ps`-Dateien (PostScript) sind gleichfalls verfügbar, ebenso die \LaTeX -Quelltexte.

Kapitel 6

Numerische Ergebnisse, Vergleich mit Messungen

6.1 VW-Gasturbine

Die nachfolgende Tabelle, dritte Spalte, zeigt die Daten des Verdichters einer von der Volkswagen AG im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersuchten Automobilgasturbine (GT 150), veröffentlicht in der Motortechnischen Zeitschrift MTZ 1982 (Nr. 3 und 5). Die vierte Spalte enthält die Eingabewerte bzw. Ergebnisse des Programms.

		Messung	Programm	
Luftdurchsatz	\dot{m}	0.84	0.84	$\frac{kg}{s}$
Druckverhältnis	Π	4.5	4.5	
Drehzahl	n	63700	64410	$\frac{1}{min}$
Umfangsgeschwindigkeit	u_2	513	517	$\frac{m}{s}$

Der isentrope Wirkungsgrad im Einlaufbereich wird auf den relativ niedrigen Wert $\approx 90\%$ geschätzt, da der Verdichter über einen verstellbaren Vorleitkranz verfügt (bei Nennlast $\alpha_1 = 90^\circ$).

Obwohl damit nur einige der für das Programm benötigten Eingabedaten zur Verfügung stehen, kann man damit den Verdichter nachrechnen, und so Erkenntnisse über die Genauigkeit der Berechnung gewinnen. Allerdings sollte größeren Abweichungen ebenso wie recht genauen Übereinstimmungen nicht sehr große Bedeutung beigemessen werden, dafür fehlen leider zu viele Eingabewerte, und das Messen in den recht kleinen Bildern der Zeitschrift ist auch nicht besonders genau.

Bei der Berechnung des Kennfeldes erfolgte die Aufteilung des Verlustes durch nicht optimale Anströmung des Leitrades im Verhältnis 1/4 auf die beiden Bereiche Leitrad einlauf/Leitrad diffusor ($K_f = 20\%$). Desweiteren wurde nur mit 20% des Stoßverlustes ($C_f = 20\%$) aus Abbildung 2.4 gerechnet, denn die angegebenen Werte für den Stoßverlust sind zu hoch, zumindest wenn ε_{kE} berücksichtigt wird.

Aus diversen Bildern konnten die folgenden Daten ermittelt werden (dritte Spalte), die Eingabewerte bzw. Ergebnisse des Programms enthält die vierte Spalte:

		Bilder	Programm	
isentropischer Wirkungsgrad	η_s	≈ 78	78.1	%
Schaufelzahl	z''	22	22	
Schaufelwinkel am Laufradaustritt	β_{2s}	≈ 65	65	°
Nabenverhältnis	R_N	≈ 0.24	0.223	
Außenradius am Laufradeintritt	R_{1a}	≈ 0.63	0.61	
Breite am Radaustritt	B_2	≈ 0.08	0.089	

Eingabedaten:

Auslegung

Medium:

Gaskonstante	R	287.200000 [J/kgK]
Isentropenexponent	κ	1.400000 [-]
Realgasfaktor	Z	1.000000 [-]

Thermodynamik:

Umgebungsdruck	p_U	1.000000 [bar]
Umgebungstemperatur	t_U	20.000000 [°C]
Druckverhältnis	Π_{UA}	4.500000 [-]
isentropen Einlaufwirkungsgrad	η_{sE}	0.900000 [-]
Massenstrom	\dot{m}	0.840000 [kg/s]

dimensionslose Geschwindigkeiten:

Normalkomponente der Geschwindigkeit am Laufradeintritt	C_{1n}	0.250000 [-]
mittlerer Zuströmwinkel des Mediums am Laufradeintritt	$\bar{\alpha}_1$	90.000000 [°]
Geschwindigkeitsverhältnis (W2 / W1)	ξ	0.720000 [-]
Geschwindigkeit am Leitradaustritt	C_A	0.250000 [-]
Versperrungsmaß durch Grenzschicht am Laufradaustritt	ε_{v2}	0.060000 [-]

Laufrad-Geometrie:

Nabenverhältnis (RN / R2)	R_N	0.223000 [-]
Außenradius am Eintritt	R_{1a}	0.609617 [-]
axiale Länge	L_{ax}	0.714000 [-]
Schaufelzahl	z''	22.000000 [-]
Schaufelwinkel am Austritt	β_{2s}	65.000000 [°]
Schaufeldicke am Austritt	S_2	0.015000 [-]
bis % (Lax - B2) Schaufelkrümmung Eintritt	E_f	80.000000 [%]
Exponent Schaufelkrümmung am Eintritt	K	2.000000 [-]
Spaltweite	Δ''	0.006000 [-]
mittlere Rauigkeit in den Kanälen	k_s''	0.008800 [mm]

Werte für Dynamik-Berechnung des Laufrades:

Wellenradius	R_W	0.160000 [-]
Scheibendicke	S_D	0.020000 [-]
Werkstoffdichte	ρ_W	2700.000000 [-]
mittlere Rauigkeit im Ausgleichsbereich	k_{sA}	0.008000 [mm]

Leitrad-Geometrie:

Schaufeldicke am Eintritt	S_5	0.011000 [-]
---------------------------	-------	--------------

Winkeldifferenz Anstellung der Schaufeln	$\Delta\alpha_{5s}$	1.000000 [°]
Öffnungswinkel Leitrad diffusor	ϑ	8.000000 [°]
mittlere Rauigkeit in den Kanälen	k'_s	0.008000 [mm]

Genauigkeit bei der Berechnung:

Anzahl der Kurven des Laufrades	11.000000 [-]
dimensionsloser Abstand zweier Punkte	0.002000 [-]

"hydraulische" Berechnungsmethode Ausgleichsbereich

Berechnungsmethode Leitrad einlauf: gleichbleibende Verluste

Anzahl der Intervalle bei der Berechnung	1000.000000 [-]
--	-----------------

Berechnungsergebnisse:

Geometrie:

Laufrad:

Schaufelzahl	z''	22.000000 [-]
Schaufelwinkel am Austritt	β_{2s}	65.000000 [°]
Nabenverhältnis (RN / R2)	R_N	0.223000 [-]
Eulerradius am Eintritt	R_1	0.459000 [-]
Außenradius am Eintritt	R_{1a}	0.609617 [-]
axiale Länge	L_{ax}	0.714000 [-]
Austrittsradius	R_2	1.000000 [-]
Austrittsbreite	B_2	0.087400 [-]
Schaufeldicke am Austritt	S_2	0.015000 [-]
Nabendurchmesser	d_N	34.196294 [mm]
Eulerdurchmesser am Eintritt	d_1	70.386084 [mm]
Außendurchmesser am Eintritt	d_{1a}	93.482700 [mm]
axiale Länge	l_{ax}	54.744740 [mm]
Austrittsdurchmesser	d_2	153.346609 [mm]
Austrittsbreite	b_2	6.701241 [mm]
Schaufeldicke am Austritt	s_2	1.150100 [mm]
Versperrung am Austritt durch Schaufeldicke	e_2	5.795066 [%]

Genauigkeit:

Anzahl der Punkte einer Kurve	475.000000 [-]
-------------------------------	----------------

Laufrad-Dynamik:

Masse	m	0.628855 [kg]
-------	-----	---------------

Schwerpunkt	z_S	39.560804 [mm]
axiales Massenträgheitsmoment	J_{ax}	0.000946 [kg*m ²]
äquat. Massenträgheitsmoment	$J_{\ddot{a}q}$	0.000518 [kg*m ²]
polares Massenträgheitsmoment	J_{pol}	0.000991 [kg*m ²]

Leitrad:

Schaufelzahl	z'	23.000000 [-]
Schaufeldicke am Eintritt	S_5	0.011000 [-]
Öffnungswinkel Leitrad diffusor	ϑ	8.000000 [°]
Anstellwinkel der Schaufeln	α_{5s}	15.787656 [°]
Innenradius	R_5	1.102055 [-]
Außenradius	R_6	1.606231 [-]
Eintrittshöhe	H_E	0.093310 [-]
Austrittshöhe	H_A	0.192704 [-]
Länge Leitrad diffusor / Eintrittshöhe	L / H_E	7.616545 [-]
Länge Leitrad diffusor	L	0.710702 [-]
Schaufeldicke am Eintritt	s_5	0.843406 [mm]
Innendurchmesser	d_5	168.996366 [mm]
Außendurchmesser	d_6	246.310104 [mm]

Kennzahlen der Stufe:

Machzahl	M_u	1.528182 [-]
Durchsatzzahl	φ	0.222818 [-]
Durchsatzzahl	φ_1	0.460389 [-]
korrigierte Drehzahl	N_c	37971.970663 [1/min]
korrigierter Massenstrom	\dot{m}_c	0.858483 [kg/s]
Arbeitszahl	λ	0.786387 [-]
Druckzahl	ψ_s	0.628241 [-]
Reaktionsgrad	r	0.606816 [-]
Laufzahl	v	0.892117 [-]
Schluckzahl	μ	0.249764 [-]
Schnellaufzahl	σ	0.239037 [-]
Durchmesserzahl	δ	3.732123 [-]

Auslegungspunkt**Antriebsdaten:**

Drehzahl des Laufrades	n	64410.309422 [1/min]
Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt	u_2	517.163880 [m/s]

spezifische aerodynamische Arbeit	\bar{a}_a	210.325986 [kJ/kg]
aerodynamische Leistung	P_a	176.673828 [kW]
spezifische Arbeit	\bar{a}	214.926160 [kJ/kg]
Leistung	P	180.537974 [kW]

Wirkungsgrade:

Stufe:

isentrop aerodynamisch	η_{sa}	0.798895 [-]
aerodynamischer Arbeitswirkungsgrad	η_{sa}^o	0.817731 [-]
aerodyn. Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Stufe	$\eta_{sa}^{(ts)}$	0.759156 [-]
isentrop	η_s	0.781796 [-]
Arbeitswirkungsgrad	η_s^o	0.800229 [-]
Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Stufe	$\eta_s^{(ts)}$	0.742908 [-]

Einlaufbereich:

Strömungs-	η_{DE}	0.900000 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sE}	0.900000 [-]

Laufgrad:

Strömungs-	η_D''	0.864415 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa}''	0.843564 [-]

Ausgleichsbereich:

Strömungs-	η_{DA}	0.937104 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{saA}	0.769551 [-]

Wirkungsgrade Leitradeinlauf:

Strömungs-	η_{D55^*}	0.960278 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa55^*}	0.883008 [-]

Wirkungsgrade Leitrad diffusor:

Strömungs-	η_{D5^*A}	0.790176 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa5^*A}	0.743521 [-]

Wirkungsgrade Leitrad

Strömungs-	η_D'	0.819300 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa}'	0.794626 [-]

Wirkungsgrade Ausgleichsb. + zusätzl. Verl. + Leitrad

isentrop	η_s^*	0.733421 [-]
----------	------------	--------------

Thermodynamik:

Umgebungszustand:

Temperatur	T_U	20.000000 [°C]
Druck	p_U	1.000000 [bar]
Dichte	ρ_U	1.187752 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_U	294674.380000 [J/kg]

Zustand am Laufradeintritt:

Temperatur	T_1	11.685160 [°C]
Druck	p_1	0.893974 [bar]
Dichte	ρ_1	1.092815 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_1	286316.302530 [J/kg]

Zustand am Laufradaustritt:

Temperatur	T_2	134.197081 [°C]
Druck	p_2	2.641618 [bar]
Dichte	ρ_2	2.257985 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_2	409465.285671 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_2°	505000.365906 [J/kg]

Zustand vor Leitradeintritt ohne zusätzl. Verl.:

Temperatur	T_4	160.136610 [°C]
Druck	p_4	3.123134 [bar]
Dichte	ρ_4	2.509752 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_4	435539.699946 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_4°	505000.365906 [J/kg]

Zustand vor Leitradeintritt mit zusätzl. Verl.:

Temperatur	T_5	164.606347 [°C]
Druck	p_5	3.117813 [bar]
Dichte	ρ_5	2.479894 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_5	440032.679783 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_5°	509600.540094 [J/kg]

Zustand am Leitrad diffusoreintritt:

Temperatur	T_{5^*}	188.104377 [°C]
Druck	p_{5^*}	3.666415 [bar]
Dichte	ρ_{5^*}	2.767685 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_{5^*}	463652.899423 [J/kg]
totale Normalenthalpie	$j_{5^*}^\circ$	509600.540094 [J/kg]
Zustand am Leitradaustritt:		
Temperatur	T_A	225.499485 [°C]
Druck	p_A	4.500000 [bar]
Dichte	ρ_A	3.142192 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_A	501242.462623 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_A°	509600.540094 [J/kg]
Druckverhältnisse:		
Leitradaustritt / Umgebungszustand	Π_{UA}	4.500000 [-]
Einlaufbereich	π_{U1}	0.893974 [-]
Leitradaustritt / Laufradeintritt	Π_{1A}	5.033706 [-]
Laufrad	Π''	2.954917 [-]
Ausgleichsbereich	Π_A	1.182281 [-]
Leitradeinlauf	Π_{55^*}	1.175958 [-]
Leitraddiffusor	Π_{5^*A}	1.227357 [-]
Leitrad	Π'	1.443320 [-]
Ausgleichsb. + zusätzl. Verl. + Leitrad	Π^*	1.703501 [-]
Enthalpieänderungen:		
Stufe:		
isentrop	Δh_s	168028.392434 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_a	210325.985906 [J/kg]
isentrop total	Δh_s°	171990.123961 [J/kg]
aerodynamisch total	Δh_a°	210325.985906 [J/kg]
einschl. zusätzlicher Verluste	Δh	214926.160093 [J/kg]
total, einschl. zusätzlicher Verluste	Δh°	214926.160094 [J/kg]
Einlaufbereich:		
isentrop	Δh_{sE1}	-9286.752745 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{aE1}	-8358.077470 [J/kg]
Laufrad:		
isentrop	$\Delta h''_s$	103884.005739 [J/kg]
aerodynamisch	$\Delta h''_a$	123148.983141 [J/kg]
Ausgleichsbereich:		
isentrop	Δh_{sA}	20065.592320 [J/kg]

aerodynamisch	Δh_{aA}	26074.414275 [J/kg]
Zusätzliche Verluste:		
isentrop	Δh_{sZ}	-212.147992 [J/kg]
absolut	Δh_Z	4492.979837 [J/kg]
Leitradeinlauf:		
isentrop	Δh_{s55^*}	20856.837153 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{a55^*}	23620.219640 [J/kg]
Leitraddiffusor:		
isentrop	Δh_{s5^*A}	27948.630848 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{a5^*A}	37589.563201 [J/kg]
Leitrad:		
isentrop	$\Delta h'_s$	48638.893486 [J/kg]
aerodynamisch	$\Delta h'_a$	61209.782840 [J/kg]
Ausgleichsb. + zusätzl. Verl. + Leitrad:		
isentrop	Δh^{*s}	67311.324635 [J/kg]
aerodynamisch	Δh^{*a}	91777.176952 [J/kg]
Enthalpiesteigerung durch zusätzliche Verluste:		
Radreibung und Rückströmung	Δh_Z	4600.174187 [J/kg]
Temperaturdifferenzen:		
Einlaufbereich	ΔT_{U1}	-8.314840 [K]
Laufgrad	$\Delta T''$	122.511921 [K]
Ausgleichsbereich	ΔT_A	25.939529 [K]
Zusätzliche Verluste	ΔT_{45}	4.469737 [K]
Leitradeintritt	ΔT_{55^*}	23.498030 [K]
Leitraddiffusor	ΔT_{5^*A}	37.395109 [K]
Leitrad	$\Delta T'$	60.893139 [K]
Umgebungszustand - Laufradaustritt	ΔT_{U2}	114.197081 [K]
Umgebungszustand - Leitradeintritt	ΔT_{U5}	144.606347 [K]
Stufe	ΔT_{UA}	205.499485 [K]

Geschwindigkeiten:

Laufgradeintritt:

Geschwindigkeit	C_1	0.250000 [-]
Normalkomponente	C_{1n}	0.250000 [-]
Umfangskomponente	C_{1u}	0.000000 [-]

Relativgeschwindigkeit	W_1	0.522667 [-]
mittlerer Zuströmwinkel	$\bar{\alpha}_1$	90.000000 [°]
Laufradaustritt:		
Geschwindigkeit	C_2	0.845217 [-]
Normalkomponente	C_{2n}	0.309817 [-]
Umfangskomponente	C_{2u}	0.786387 [-]
Relativgeschwindigkeit	W_2	0.376320 [-]
mittlerer Abströmwinkel	$\bar{\alpha}_2$	21.503211 [°]
Leitradeintritt - ohne zusätzl. Verl.:		
Geschwindigkeit	C_4	0.720703 [-]
Normalkomponente	C_{4n}	0.181902 [-]
Umfangskomponente	C_{4u}	0.697370 [-]
mittlerer Zuströmwinkel	$\bar{\alpha}_4$	14.619307 [°]
Leitradeintritt - mit zusätzl. Verl.:		
Geschwindigkeit	C_5	0.721259 [-]
Normalkomponente	C_{5n}	0.184092 [-]
Umfangskomponente	C_{5u}	0.697370 [-]
mittlerer Zuströmwinkel	$\bar{\alpha}_5$	14.787656 [°]
Geschwindigkeit vor Leitrad diffusor	C_{5^*}	0.586163 [-]
Geschwindigkeit am Leitradaustritt	C_A	0.250000 [-]

Zwischenergebnisse:

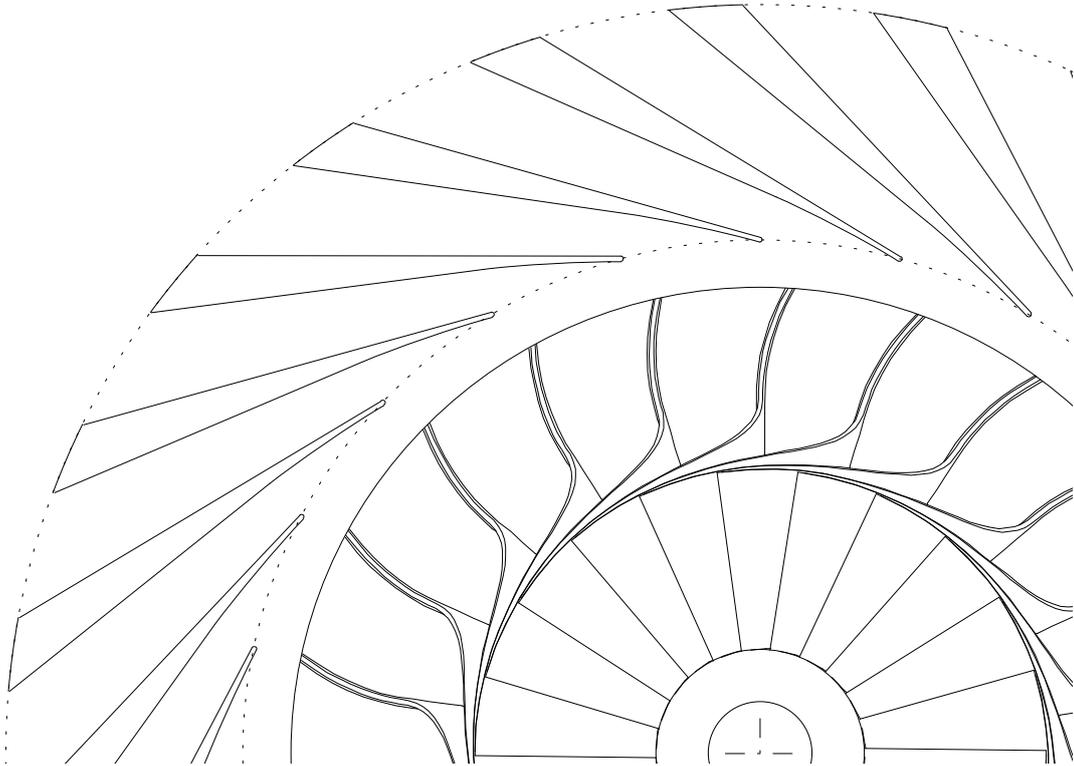
Laufgrad:

Versperrung am Austritt durch Totwasser	ε_{t2}	0.184634 [-]
Versperrungsfaktor am Austritt	k_2	0.719193 [-]
Minderleistungszahl	μ	0.919182 [-]
Integral	ϕ_a	7.627208 [-]
Integral	ϕ_k	6.906568 [-]
Reynoldszahl	R_e	290300.679198 [-]
Dissipationskoeffizient Außenwand	c_{da}	0.006735 [-]
Dissipationskoeffizient Schaufeln + Radscheibe	c_{dk}	0.008586 [-]
Stoßverlustkoeffizient	ζ''	0.000000 [-]

Ausgleichsbereich:

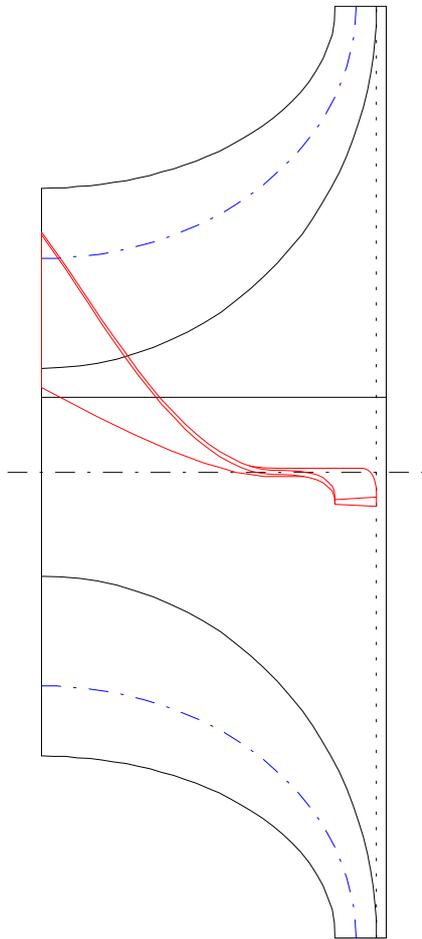
Korrekturfaktor Radreibung	C_M	0.000126 [-]
----------------------------	-------	--------------

Verlustkoeffizient Radreibung	ζ_R	0.013151 [-]
Verlustkoeffizient Rückströmung ins Laufrad	ζ_r	0.014226 [-]
Leitrad:		
Umsetzungsgrad Leitrad einlauf	λ_{Dh}	0.487320 [-]
Stoßverlustkoeffizient	ζ'	0.001918 [-]
Versperrung Eintritt Leitrad diffusor	ε_{kE}	0.092055 [-]
Druckrückgewinnbeiwert Leitrad diffusor	C_p	0.580040 [-]
Umsetzungsgrad Leitrad diffusor	λ_{DA}	0.608271 [-]
Versperrung Austritt Leitrad diffusor	ε_{kA}	0.092055 [-]



VW-Gasturbine.imp M 1:1

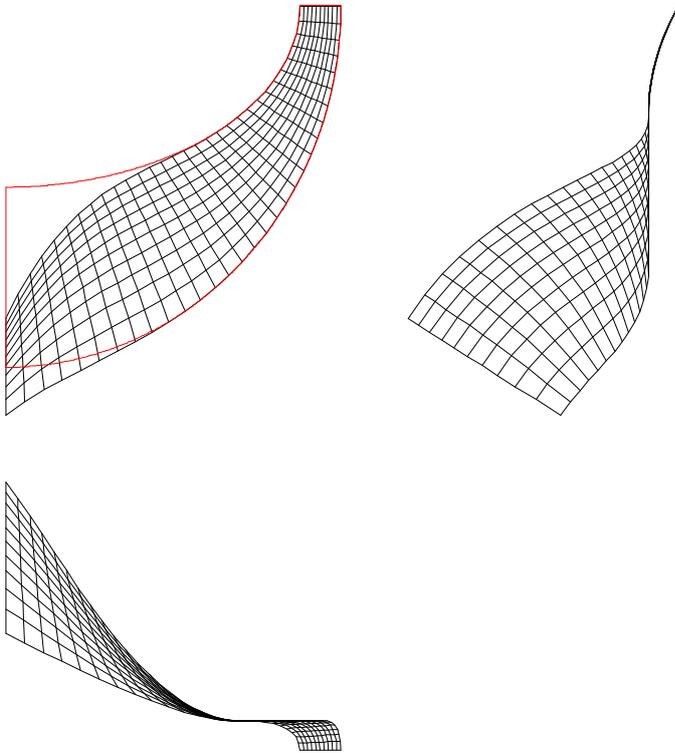
Medium: Luft			z''	22	
\dot{m}	0.840	[kg/s]	β_{2s}	65	[°]
p_U	1	[bar]	R_N	0.223	17.098 [mm]
t_U	20	[°C]	R_1	0.459	35.193 [mm]
Π_{UA}	4.500		R_{1a}	0.610	46.741 [mm]
η_{sa}	0.799		R_2	1	76.673 [mm]
η_s	0.782		B_2	0.087	6.701 [mm]
P	180.538	[kW]	S_2	0.015	1.150 [mm]
n	64410	[1/min]	z'	23	
u_2	517.164	[m/s]	ϑ	8	[°]
			α_{5s}	15.788	[°]
			S_5	0.011	0.843 [mm]
			R_5	1.102	84.498 [mm]
			R_6	1.606	123.155 [mm]
			H_E	0.093	7.154 [mm]
			L / H_E	7.617	



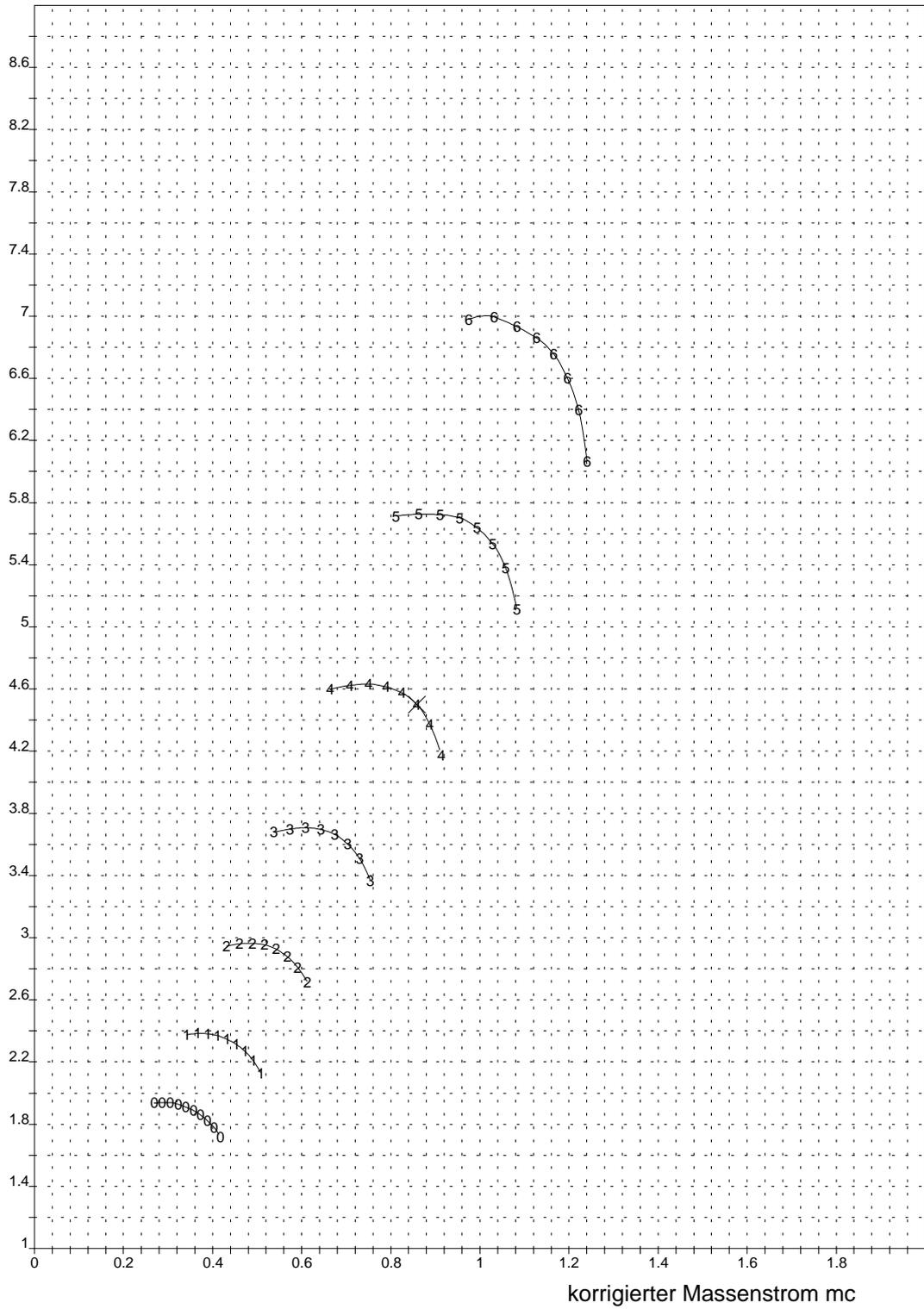
VW-Gasturbine.imp M 1:1

Medium: Luft		z''	22	
\dot{m}	0.840 [kg/s]	β_{2s}	65	[°]
p_U	1 [bar]	R_N	0.223	17.098 [mm]
t_U	20 [°C]	R_1	0.459	35.193 [mm]
Π_{UA}	4.500	R_{1a}	0.610	46.741 [mm]
η_{sa}	0.799	L_{ax}	0.714	54.745 [mm]
η_s	0.782	R_2	1	76.673 [mm]
P	180.538 [kW]	B_2	0.087	6.701 [mm]
n	64410 [1/min]	S_2	0.015	1.150 [mm]
u_2	517.164 [m/s]	R_5	1.102	84.498 [mm]
		R_6	1.606	123.155 [mm]

M 1:1

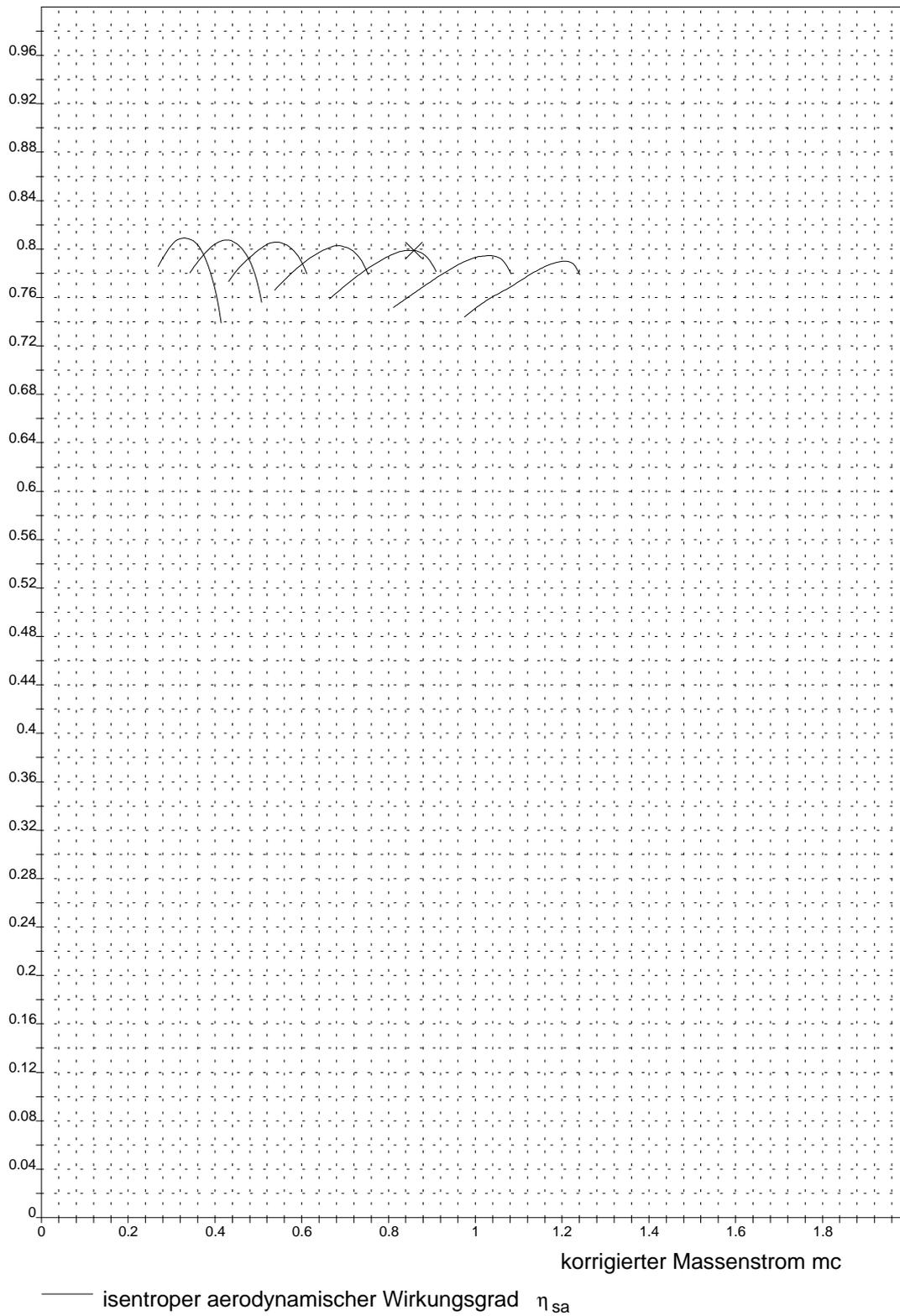


Teillastdiagramm VW-Gasturbine; Teillast mit $K_f=20\%$, $C_f=20\%$.imp
 Machzahl 60-120/10 > 0-6



— Druckverhältnis Leitradaustritt / Umgebungszustand Π_{UA}

Teillastdiagramm VW-Gasturbine; Teillast mit $K_f=20\%$, $C_f=20\%$.imp
Machzahl 60-120/10



6.2 Beispiel Vorlesung Strömungsmaschinen I

Bei dem nachfolgend vorgestellte Beispiel wurden die gleichen Eingabewerte vorgegeben wie in einem Berechnungsbeispiel aus der Vorlesung Strömungsmaschinen I (identisch mit dem ersten Beispiel in [Sch82]).

Eingabedaten:

Auslegung

Medium:

Gaskonstante	R	287.200000 [J/kgK]
Isentropenexponent	κ	1.400000 [-]
Realgasfaktor	Z	1.000000 [-]

Thermodynamik:

Umgebungsdruck	p_U	1.000000 [bar]
Umgebungstemperatur	t_U	15.000000 [°C]
Druckverhältnis	Π_{UA}	3.000000 [-]
isentropen Einlaufwirkungsgrad	η_{sE}	0.900000 [-]
Massenstrom	\dot{m}	3.500000 [kg/s]

dimensionslose Geschwindigkeiten:

Normalkomponente der Geschwindigkeit am Laufradeintritt	C_{1n}	0.400000 [-]
mittlerer Zuströmwinkel des Mediums am Laufradeintritt	$\bar{\alpha}_1$	90.000000 [°]
Durchsatzzahl am Laufradaustritt	$\bar{\varphi}_2$	0.350000 [-]
Geschwindigkeitsverhältnis (W_2 / W_1)	ξ	0.650000 [-]
Geschwindigkeit am Leitradaustritt	C_A	0.400000 [-]
Versperrungsmaß durch Grenzschicht am Laufradaustritt	ϵ_{v2}	0.080000 [-]

Laufrad-Geometrie:

Nabenverhältnis (R_N / R_2)	R_N	0.277650 [-]
axiale Länge	L_{ax}	0.600000 [-]
Schaufelzahl	z''	18.000000 [-]
Schaufelwinkel am Austritt	β_{2s}	90.000000 [°]
Schaufeldicke am Austritt	S_2	0.012000 [-]
bis $\%(L_{ax} - B_2)$ Schaufelkrümmung Eintritt	E_f	70.000000 [%]
Exponent Schaufelkrümmung am Eintritt	K	2.000000 [-]
Spaltweite	Δ''	0.001000 [-]
mittlere Rauigkeit in den Kanälen	k''_s	0.007500 [mm]

Werte für Dynamik-Berechnung des Laufrades:

Wellenradius	R_W	0.160000 [-]
Scheibendicke	S_D	0.020000 [-]
Werkstoffdichte	ρ_W	2700.000000 [-]
mittlere Rauigkeit im Ausgleichsbereich	k_{sA}	0.007500 [mm]

Leitrad-Geometrie:

Versperrung am Eintritt	\bar{e}_5	0.040000 [-]
-------------------------	-------------	--------------

Winkeldifferenz Anstellung der Schaufeln	$\Delta\alpha_{5s}$	2.000000 [°]
Öffnungswinkel Leitrad diffusor	ϑ	8.000000 [°]
mittlere Rauigkeit in den Kanälen	K'_s	0.007500 [mm]

Genauigkeit bei der Berechnung:

Anzahl der Kurven des Laufrades	11.000000 [-]
dimensionsloser Abstand zweier Punkte	0.002000 [-]

"hydraulische" Berechnungsmethode Ausgleichsbereich

Berechnungsmethode Leitrad einlauf: wie in [Schaut]

Anzahl der Intervalle bei der Berechnung	1000.000000 [-]
--	-----------------

Berechnungsergebnisse:

Geometrie:

Laufrad:

Schaufelzahl	z''	18.000000 [-]
Schaufelwinkel am Austritt	β_{2s}	90.000000 [°]
Nabenverhältnis (RN / R2)	R_N	0.277650 [-]
Eulerradius am Eintritt	R_1	0.379995 [-]
Außenradius am Eintritt	R_{1a}	0.460111 [-]
axiale Länge	L_{ax}	0.600000 [-]
Austrittsradius	R_2	1.000000 [-]
Austrittsbreite	B_2	0.070759 [-]
Schaufeldicke am Austritt	S_2	0.012000 [-]

Nabendurchmesser	d_N	122.298550 [mm]
Eulerdurchmesser am Eintritt	d_1	167.379052 [mm]
Außendurchmesser am Eintritt	d_{1a}	202.668594 [mm]
axiale Länge	l_{ax}	132.143220 [mm]
Austrittsdurchmesser	d_2	440.477400 [mm]
Austrittsbreite	b_2	15.583947 [mm]
Schaufeldicke am Austritt	s_2	2.642864 [mm]
Versperrung am Austritt durch Schaufeldicke	e_2	3.437747 [%]

Genauigkeit:

Anzahl der Punkte einer Kurve	463.000000 [-]
-------------------------------	----------------

Laufrad-Dynamik:

Masse	m	12.737061 [kg]
Schwerpunkt	z_S	99.355728 [mm]

axiales Massenträgheitsmoment	J_{ax}	0.153817 [kg*m ²]
äquat. Massenträgheitsmoment	$J_{\ddot{a}q}$	0.086683 [kg*m ²]
polares Massenträgheitsmoment	J_{pol}	0.163592 [kg*m ²]

Leitrad:

Schaufelzahl	z'	29.000000 [-]
Schaufeldicke am Eintritt	S_5	0.009825 [-]
Öffnungswinkel Leitradiffusor	ϑ	8.000000 [°]
Anstellwinkel der Schaufeln	α_{5s}	16.724540 [°]
Innenradius	R_5	1.133731 [-]
Außenradius	R_6	1.308428 [-]
Eintrittshöhe	H_E	0.069970 [-]
Austrittshöhe	H_A	0.100950 [-]
Länge Leitradiffusor / Eintrittshöhe	L / H_E	3.165883 [-]
Länge Leitradiffusor	L	0.221516 [-]
Schaufeldicke am Eintritt	s_5	2.163941 [mm]
Innendurchmesser	d_5	499.382822 [mm]
Außendurchmesser	d_6	576.332793 [mm]

Kennzahlen der Stufe:

Machzahl	M_u	1.212511 [-]
Durchsatzzahl	φ	0.218236 [-]
Durchsatzzahl	φ_1	0.380481 [-]
korrigierte Drehzahl	N_c	38300.000000 [1/min]
korrigierter Massenstrom	\dot{m}_c	3.546375 [kg/s]
Arbeitszahl	λ	0.921851 [-]
Druckzahl	ψ_s	0.749333 [-]
Reaktionsgrad	r	0.592398 [-]
Laufzahl	ν	0.816860 [-]
Schluckzahl	μ	0.267164 [-]
Schnellaufzahl	σ	0.171315 [-]
Durchmesserzahl	δ	4.768184 [-]

Auslegungspunkt**Antriebsdaten:**

Drehzahl des Laufrades	n	17488.239110 [1/min]
Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt	u_2	403.337252 [m/s]
spezifische aerodynamische Arbeit	\bar{a}_a	149.967572 [kJ/kg]

aerodynamische Leistung	P_a	524.886502 [kW]
spezifische Arbeit	\bar{a}	153.628085 [kJ/kg]
Leistung	P	537.698298 [kW]

Wirkungsgrade:

Stufe:

isentrop aerodynamisch	η_{sa}	0.812857 [-]
aerodynamischer Arbeitswirkungsgrad	η_{sa}^o	0.842693 [-]
aerodyn. Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Stufe	$\eta_{sa}^{(ts)}$	0.726075 [-]
isentrop	η_s	0.793489 [-]
Arbeitswirkungsgrad	η_s^o	0.822615 [-]
Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Stufe	$\eta_s^{(ts)}$	0.708774 [-]

Einlaufbereich:

Strömungs-	η_{DE}	0.900000 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sE}	0.900000 [-]

Laufrad:

Strömungs-	η_D''	0.885668 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa}''	0.871412 [-]

Ausgleichsbereich:

Strömungs-	η_{DA}	0.910277 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{saA}	0.735512 [-]

Wirkungsgrade Leitradeinlauf:

Strömungs-	η_{D55^*}	0.956163 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa55^*}	0.894736 [-]

Wirkungsgrade Leitrad diffusor:

Strömungs-	η_{D5^*A}	0.823146 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa5^*A}	0.691698 [-]

Wirkungsgrade Leitrad

Strömungs-	η_D'	0.851673 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa}'	0.802545 [-]

Wirkungsgrade Ausgleichsb. + zusätzl. Verl. + Leitrad

isentrop	η_s^+	0.721326 [-]
----------	------------	--------------

Thermodynamik:

Umgebungszustand:

Temperatur	T_U	15.000000 [°C]
Druck	p_U	1.000000 [bar]
Dichte	ρ_U	1.208362 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_U	289648.380000 [J/kg]

Zustand am Laufradeintritt:

Temperatur	T_1	2.052850 [°C]
Druck	p_1	0.835898 [bar]
Dichte	ρ_1	1.057587 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_1	276633.904878 [J/kg]

Zustand am Laufradaustritt:

Temperatur	T_2	85.512826 [°C]
Druck	p_2	1.899300 [bar]
Dichte	ρ_2	1.843838 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_2	360527.872986 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_2°	439615.952126 [J/kg]

Zustand vor Leitradeintritt ohne zusätzl. Verl.:

Temperatur	T_4	112.203265 [°C]
Druck	p_4	2.288729 [bar]
Dichte	ρ_4	2.068001 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_4	387357.102065 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_4°	439615.952126 [J/kg]

Zustand vor Leitradeintritt mit zusätzl. Verl.:

Temperatur	T_5	115.795910 [°C]
Druck	p_5	2.286714 [bar]
Dichte	ρ_5	2.047096 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_5	390968.428564 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_5°	443276.465071 [J/kg]

Zustand am Leitradiffusoreintritt:

Temperatur	T_{5^*}	137.466622 [°C]
Druck	p_{5^*}	2.711187 [bar]
Dichte	ρ_{5^*}	2.298998 [kg/m ³]

Normalenthalpie	j_{5^*}	412751.828723 [J/kg]
totale Normalenthalpie	$j_{5^*}^{\circ}$	443276.465071 [J/kg]
Zustand am Leitradaustritt:		
Temperatur	T_A	154.886202 [°C]
Druck	p_A	3.000000 [bar]
Dichte	ρ_A	2.440374 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_A	430261.989949 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_A°	443276.465071 [J/kg]
Druckverhältnisse:		
Leitradaustritt / Umgebungszustand	Π_{UA}	3.000000 [-]
Einlaufbereich	π_{U1}	0.835898 [-]
Leitradaustritt / Laufradeintritt	Π_{1A}	3.588953 [-]
Laufrad	Π''	2.272166 [-]
Ausgleichsbereich	Π_A	1.205038 [-]
Leitradeinlauf	Π_{55^*}	1.185626 [-]
Leitraddiffusor	Π_{5^*A}	1.106526 [-]
Leitrad	Π'	1.311926 [-]
Ausgleichsb. + zusätzl. Verl. + Leitrad	Π^{*}	1.579529 [-]
Enthalpieänderungen:		
Stufe:		
isentrop	Δh_s	121902.144155 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_a	149967.572126 [J/kg]
isentrop total	Δh_s°	126376.690650 [J/kg]
aerodynamisch total	Δh_a°	149967.572126 [J/kg]
einschl. zusätzlicher Verluste	Δh	153628.085071 [J/kg]
total, einschl. zusätzlicher Verluste	Δh°	153628.085071 [J/kg]
Einlaufbereich:		
isentrop	Δh_{sE1}	-14460.527913 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{aE1}	-13014.475122 [J/kg]
Laufrad:		
isentrop	$\Delta h''_s$	73106.200169 [J/kg]
aerodynamisch	$\Delta h''_a$	83893.968108 [J/kg]
Ausgleichsbereich:		
isentrop	Δh_{sA}	19733.224716 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{aA}	26829.229079 [J/kg]
Zusätzliche Verluste:		
isentrop	Δh_{sZ}	-97.451973 [J/kg]

absolut	Δh_z	3611.326499 [J/kg]
Leitradeinlauf:		
isentrop	Δh_{s55^*}	19490.387023 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{a55^*}	21783.400159 [J/kg]
Leitraddiffusor:		
isentrop	Δh_{s5^*A}	12111.752201 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{a5^*A}	17510.161226 [J/kg]
Leitrad:		
isentrop	$\Delta h'_s$	31534.853254 [J/kg]
aerodynamisch	$\Delta h'_a$	39293.561385 [J/kg]
Ausgleichsb. + zusätzl. Verl. + Leitrad:		
isentrop	Δh^+_s	50301.059677 [J/kg]
aerodynamisch	Δh^+_a	69734.116963 [J/kg]
Enthalpiesteigerung durch zusätzliche Verluste:		
Radreibung und Rückströmung	Δh_z	3660.512945 [J/kg]
Temperaturdifferenzen:		
Einlaufbereich	ΔT_{U1}	-12.947150 [K]
Laufgrad	$\Delta T''$	83.459976 [K]
Ausgleichsbereich	ΔT_A	26.690439 [K]
Zusätzliche Verluste	ΔT_{45}	3.592645 [K]
Leitradeinritt	ΔT_{55^*}	21.670712 [K]
Leitraddiffusor	ΔT_{5^*A}	17.419579 [K]
Leitrad	$\Delta T'$	39.090292 [K]
Umgebungszustand - Laufradaustritt	ΔT_{U2}	70.512826 [K]
Umgebungszustand - Leitradeinritt	ΔT_{U5}	100.795910 [K]
Stufe	ΔT_{UA}	139.886202 [K]

Geschwindigkeiten:

Laufradeintritt:

Geschwindigkeit	C_1	0.400000 [-]
Normalkomponente	C_{1n}	0.400000 [-]
Umfangskomponente	C_{1u}	0.000000 [-]
Relativgeschwindigkeit	W_1	0.551721 [-]
mittlerer Zuströmwinkel	$\bar{\alpha}_1$	90.000000 [°]

Laufradaustritt:

Geschwindigkeit	C_2	0.986057 [-]
Normalkomponente	C_{2n}	0.350000 [-]
Umfangskomponente	C_{2u}	0.921851 [-]
Relativgeschwindigkeit	W_2	0.358619 [-]
mittlerer Abströmwinkel	$\bar{\alpha}_2$	20.790314 [°]

Leitradeneintritt - ohne zusätzl. Verl.:

Geschwindigkeit	C_4	0.801543 [-]
Normalkomponente	C_{4n}	0.171628 [-]
Umfangskomponente	C_{4u}	0.782952 [-]
mittlerer Zuströmwinkel	$\bar{\alpha}_4$	12.364024 [°]

Leitradeneintritt - mit zusätzl. Verl.:

Geschwindigkeit	C_5	0.801920 [-]
Normalkomponente	C_{5n}	0.173381 [-]
Umfangskomponente	C_{5u}	0.782952 [-]
mittlerer Zuströmwinkel	$\bar{\alpha}_5$	12.486347 [°]

Geschwindigkeit vor Leitradendiffusor C_{5^*} 0.612593 [-]Geschwindigkeit am Leitradaustritt C_A 0.400000 [-]**Zwischenergebnisse:**

Lauftrad:

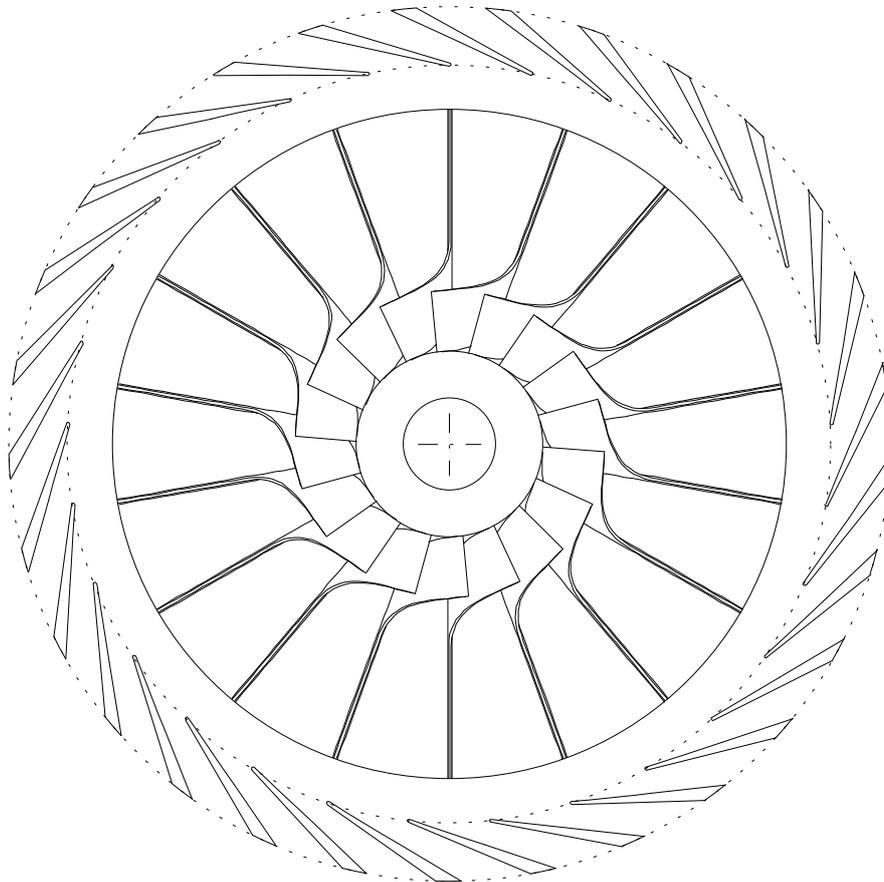
Versperrung am Austritt durch Totwasser	ε_{t2}	0.295941 [-]
Versperrungsfaktor am Austritt	k_2	0.623531 [-]
Minderleistungszahl	μ	0.921851 [-]
Integral	ϕ_a	15.661451 [-]
Integral	ϕ_k	5.636109 [-]
Reynoldszahl	R_e	518711.768017 [-]
Dissipationskoeffizient Außenwand	c_{da}	0.005823 [-]
Dissipationskoeffizient Schaufeln + Radscheibe	c_{dk}	0.007230 [-]
Stoßverlustkoeffizient	ζ''	0.000000 [-]

Ausgleichsbereich:

Korrekturfaktor Radreibung	C_M	0.000091 [-]
Verlustkoeffizient Radreibung	ζ_R	0.010028 [-]
Verlustkoeffizient Rückströmung ins Lauftrad	ζ_r	0.020000 [-]

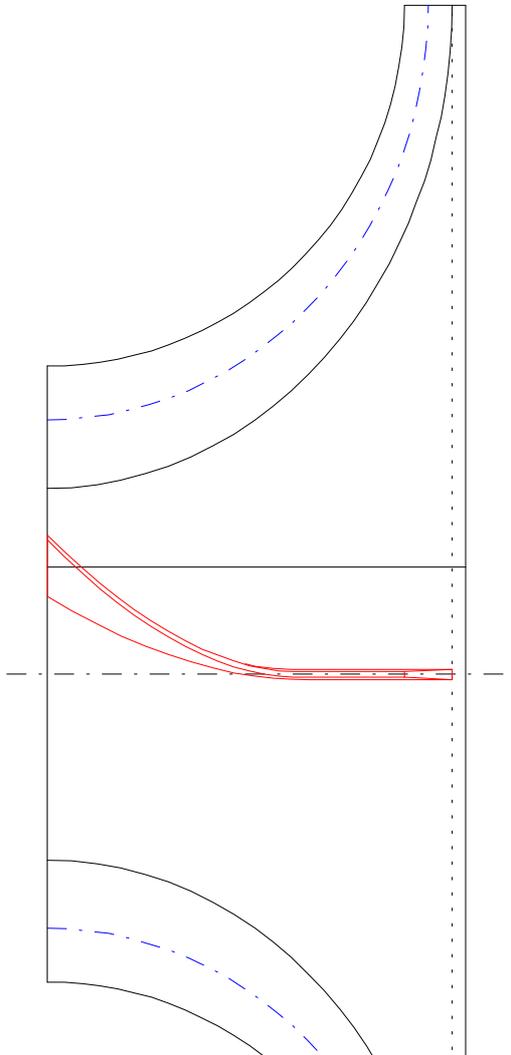
Leitrad:

Umsetzungsgrad Leitrad einlauf	λ_{Dh}	0.554317 [-]
Stoßverlustkoeffizient	ζ'	0.018788 [-]
Versperrung Eintritt Leitrad diffusor	ε_{kE}	0.115272 [-]
Druckrückgewinnbeiwert Leitrad diffusor	C_p	0.375543 [-]
Umsetzungsgrad Leitrad diffusor	λ_{DA}	0.396786 [-]
Versperrung Austritt Leitrad diffusor	ε_{kA}	0.115272 [-]



BeispielVorlesungStroemungsmaschinen1.imp M 1:4

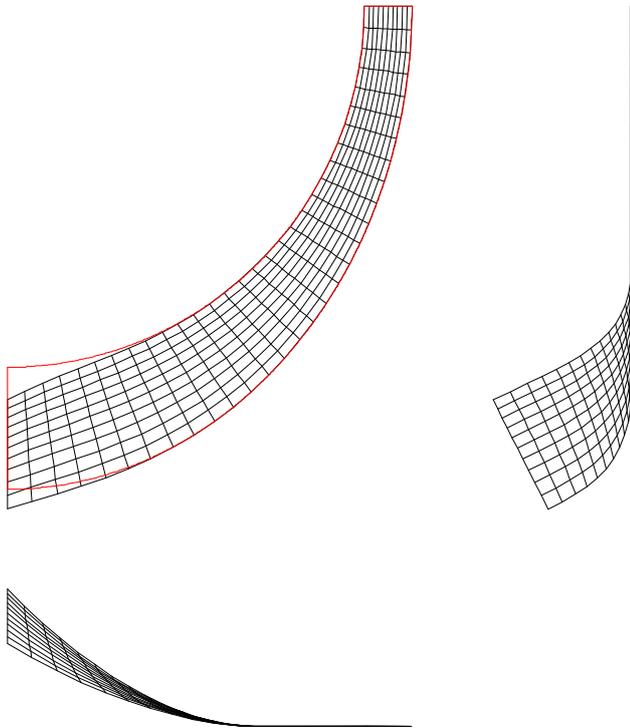
Medium: Luft			z''	18	
\dot{m}	3.500	[kg/s]	β_{2s}	90	[°]
p_U	1	[bar]	R_N	0.278	61.149 [mm]
t_U	15	[°C]	R_1	0.380	83.690 [mm]
Π_{UA}	3.000		R_{1a}	0.460	101.334 [mm]
η_{sa}	0.813		R_2	1	220.239 [mm]
η_s	0.793		B_2	0.071	15.584 [mm]
P	537.698	[kW]	S_2	0.012	2.643 [mm]
n	17488	[1/min]	z'	29	
u_2	403.337	[m/s]	ϑ	8	[°]
			α_{5s}	16.725	[°]
			S_5	0.010	2.164 [mm]
			R_5	1.134	249.691 [mm]
			R_6	1.308	288.166 [mm]
			H_E	0.070	15.410 [mm]
			L/H_E	3.166	



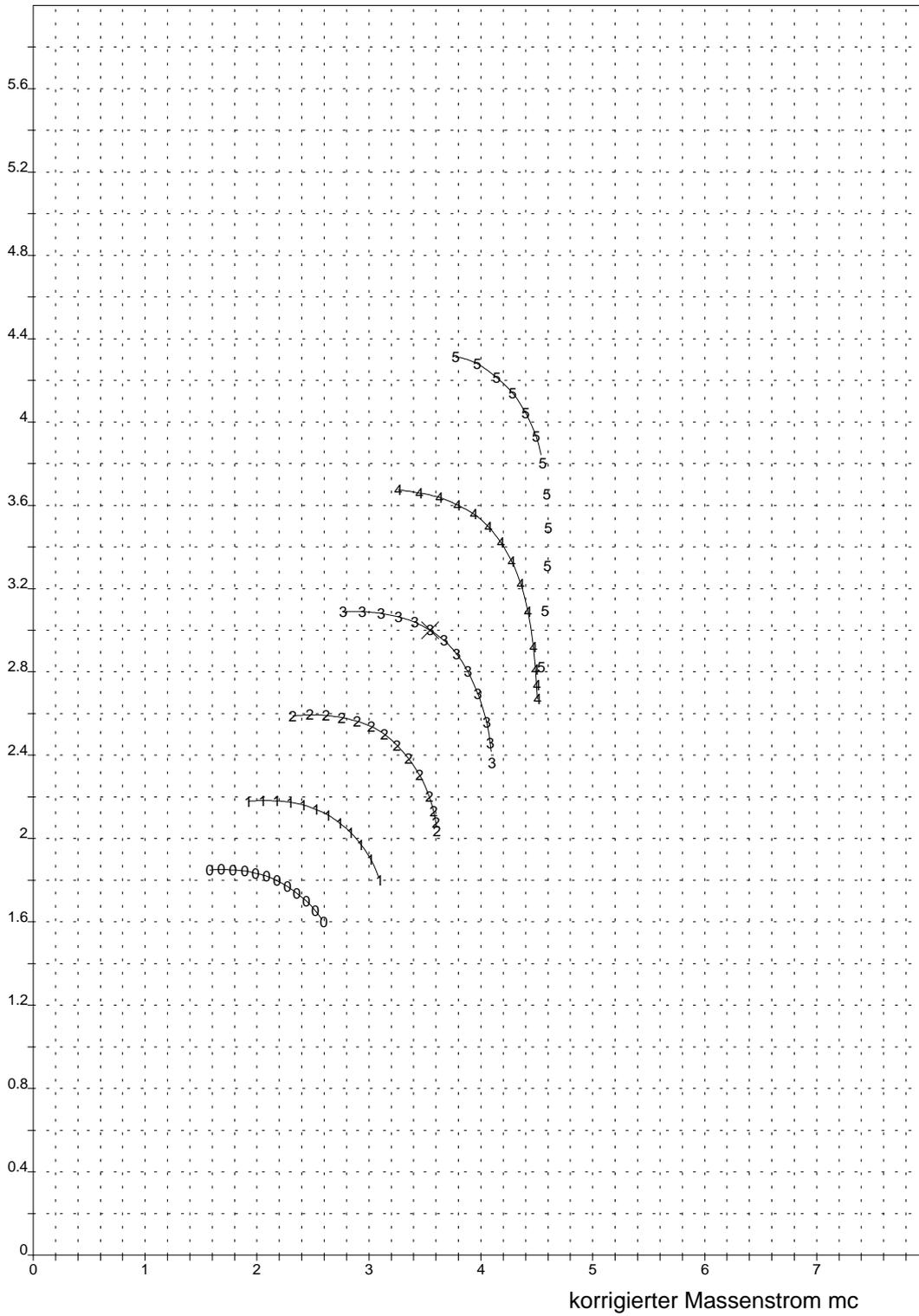
BeispielVorlesungStroemungsmaschinen1.imp M 1:2

Medium: Luft			z''	18	
\dot{m}	3.500	[kg/s]	β_{2s}	90	[°]
p_U	1	[bar]	R_N	0.278	61.149 [mm]
t_U	15	[°C]	R_1	0.380	83.690 [mm]
Π_{UA}	3.000		R_{1a}	0.460	101.334 [mm]
η_{sa}	0.813		L_{ax}	0.600	132.143 [mm]
η_s	0.793		R_2	1	220.239 [mm]
P	537.698	[kW]	B_2	0.071	15.584 [mm]
n	17488	[1/min]	S_2	0.012	2.643 [mm]
u_2	403.337	[m/s]	R_5	1.134	249.691 [mm]
			R_6	1.308	288.166 [mm]

M 1:2

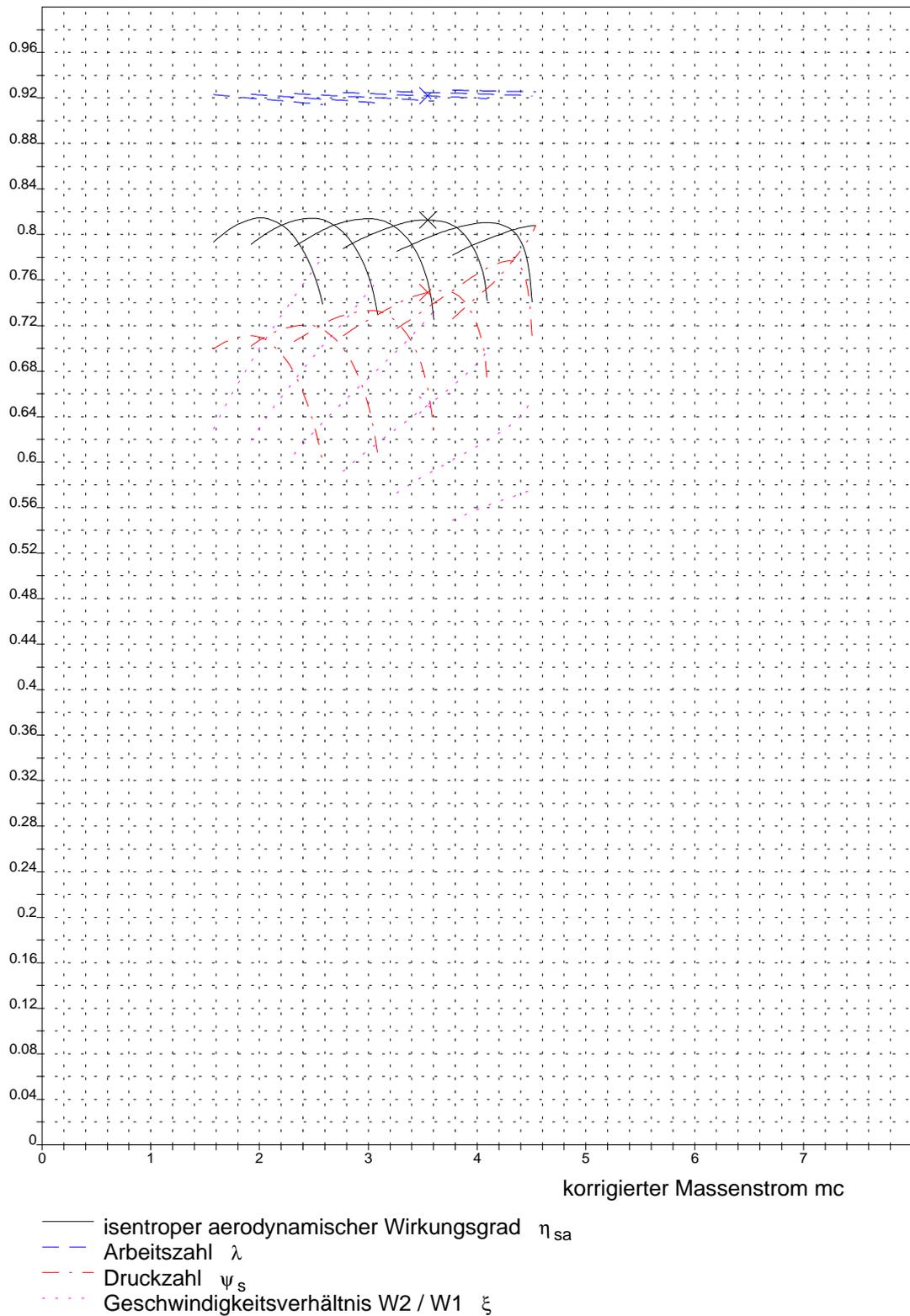


Teillastdiagramm BeispielVorlesungStromungsmaschinen1.imp
 Machzahl 70-120/10 > 0-5

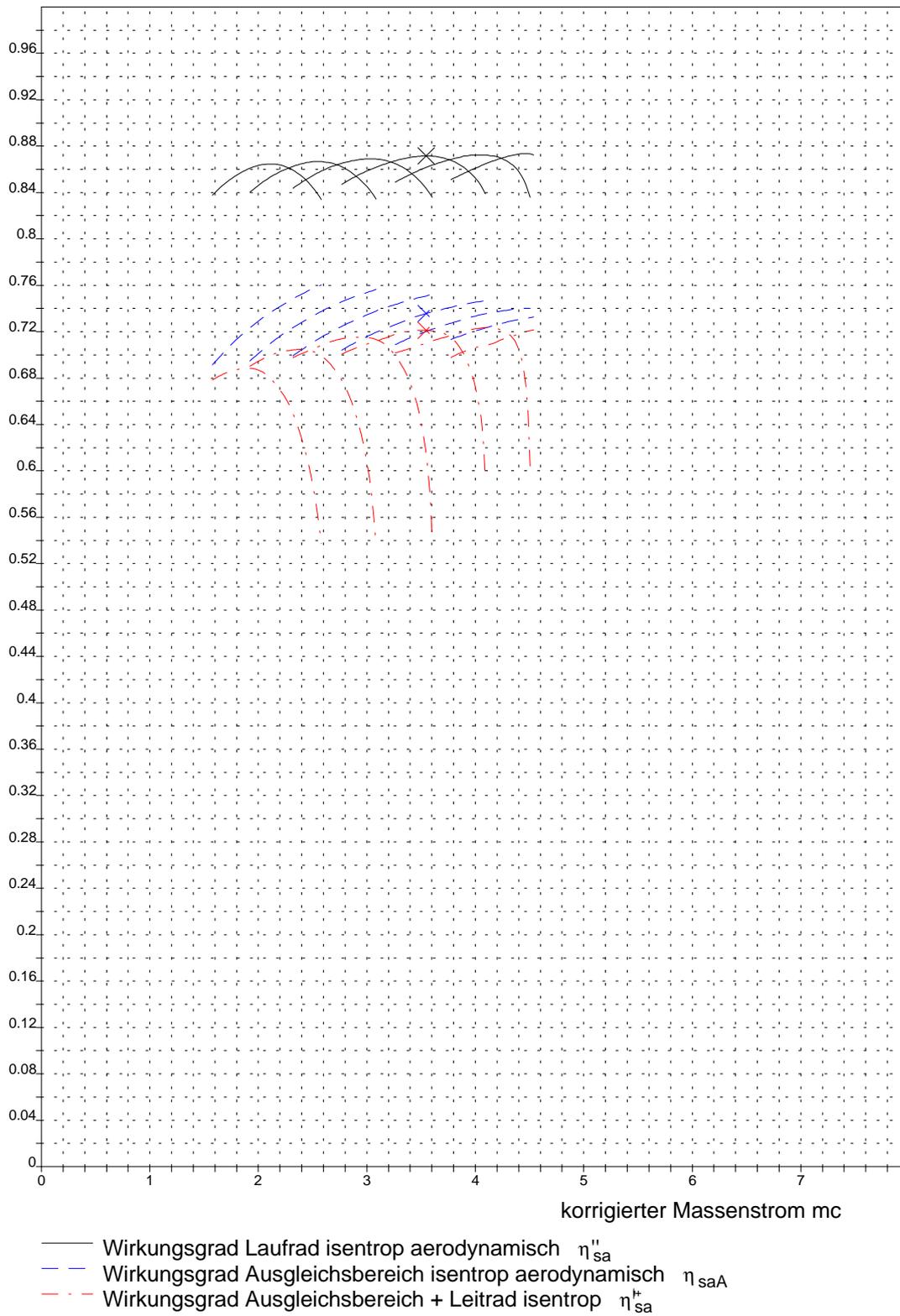


— Druckverhältnis Leitradaustritt / Umgebungszustand Π_{UA}

Teillastdiagramm BeispielVorlesungStroemungsmaschinen1.imp
Machzahl 70-120/10



Teillastdiagramm BeispielVorlesungStromungsmaschinen1.imp
Machzahl 70-120/10



6.3 Messung

Eingabedaten:

Nachrechnung

Medium:

Gaskonstante	R	287.200000 [J/kgK]
Isentropenexponent	κ	1.400000 [-]
Realgasfaktor	Z	1.000000 [-]

Thermodynamik:

Eintrittsdruck (total)	p_E	1.002000 [bar]
Eintrittstemperatur	t_E	32.000000 [°C]
isentropen Einlaufwirkungsgrad	η_{sE}	0.980000 [-]
Massenstrom	\dot{m}	0.411000 [kg/s]
Drehzahl	n	38300.000000 [1/min]

dimensionslose Geschwindigkeiten:

mittlerer Zuströmwinkel des Mediums am Laufradeintritt	$\bar{\alpha}_1$	90.000000 [°]
Versperrungsmaß durch Grenzschicht am Laufradaustritt	ε_{v2}	0.080000 [-]

Laufrad-Geometrie:

Außenradius	r_2	73.000000 [mm]
Nabenverhältnis (RN / R2)	R_N	0.273970 [-]
axiale Länge	L_{ax}	0.684930 [-]
Schaufelzahl	z''	17.000000 [-]
Schaufelwinkel am Austritt	β_{2s}	60.000000 [°]
Breite am Austritt	B_2	0.143830 [-]
Schaufeldicke am Austritt	S_2	0.012000 [-]
bis %($L_{ax} - B_2$) Schaufelkrümmung Eintritt	E_f	70.000000 [%]
Exponent Schaufelkrümmung am Eintritt	K	2.000000 [-]
Spaltweite	Δ''	0.006000 [-]
mittlere Rauigkeit in den Kanälen	k_s''	0.007500 [mm]

Werte für Dynamik-Berechnung des Laufrades:

Wellenradius	R_W	0.160000 [-]
Scheibendicke	S_D	0.020000 [-]
Werkstoffdichte	ρ_W	2700.000000 [-]
mittlere Rauigkeit im Ausgleichsbereich	k_{sA}	0.007500 [mm]

Leitrad-Geometrie:

Schaufeldicke am Eintritt	S_5	0.011000 [-]
Innenradius	R_5	1.058200 [-]
Schaufelzahl	z'	18.000000 [-]

Diffusorlänge	L	0.753400 [-]
Eintrittshöhe Diffusor	H_E	0.109590 [-]
Winkeldifferenz Anstellung der Schaufeln	$\Delta\alpha_{5s}$	0.000000 [°]
Öffnungswinkel Leitrad diffusor	ϑ	8.000000 [°]
mittlere Rauigkeit in den Kanälen	k'_s	0.007500 [mm]
Genauigkeit bei der Berechnung:		
Anzahl der Kurven des Laufrades		11.000000 [-]
dimensionsloser Abstand zweier Punkte		0.008000 [-]
Berechnungsmethode Ausgleichsbereich: gleichbleibende Verluste		
Anzahl der Intervalle bei der Berechnung		1000.000000 [-]
Berechnungsmethode Leitrad einlauf: gleichbleibende Verluste		
Anzahl der Intervalle bei der Berechnung		1000.000000 [-]

Berechnungsergebnisse:**Geometrie:**

Laufrad:

Schaufelzahl	z''	17.000000 [-]
Schaufelwinkel am Austritt	β_{2s}	60.000000 [°]
Nabenverhältnis (RN / R2)	R_N	0.273970 [-]
Eulerradius am Eintritt	R_1	0.450597 [-]
Außenradius am Eintritt	R_{1a}	0.575340 [-]
axiale Länge	L_{ax}	0.684930 [-]
Austrittsradius	R_2	1.000000 [-]
Austrittsbreite	B_2	0.143830 [-]
Schaufeldicke am Austritt	S_2	0.012000 [-]
Nabendurchmesser	d_N	39.999620 [mm]
Eulerdurchmesser am Eintritt	d_1	65.787191 [mm]
Außendurchmesser am Eintritt	d_{1a}	83.999640 [mm]
axiale Länge	l_{ax}	49.999890 [mm]
Austrittsdurchmesser	d_2	146.000000 [mm]
Austrittsbreite	b_2	10.499590 [mm]
Schaufeldicke am Austritt	s_2	0.876000 [mm]
Versperrung am Austritt durch Schaufeldicke	e_2	3.749036 [%]
Genauigkeit:		
Anzahl der Punkte einer Kurve		113.000000 [-]

Lauftrad-Dynamik:

Masse	m	0.535295 [kg]
Schwerpunkt	z_S	36.813457 [mm]
axiales Massenträgheitsmoment	J_{ax}	0.000717 [kg*m ²]
äquat. Massenträgheitsmoment	$J_{\text{äq}}$	0.000408 [kg*m ²]
polares Massenträgheitsmoment	J_{pol}	0.000767 [kg*m ²]

Leitrad:

Schaufelzahl	z'	18.000000 [-]
Schaufeldicke am Eintritt	S_5	0.011000 [-]
Öffnungswinkel Leitradiffusor	ϑ	8.000000 [°]
Anstellwinkel der Schaufeln	α_{5s}	14.613138 [°]
Innenradius	R_5	1.058200 [-]
Außenradius	R_6	1.600305 [-]
Eintrittshöhe	H_E	0.109590 [-]
Austrittshöhe	H_A	0.214956 [-]
Länge Leitradiffusor / Eintrittshöhe	L / H_E	6.874715 [-]
Länge Leitradiffusor	L	0.753400 [-]
Schaufeldicke am Eintritt	s_5	0.803000 [mm]
Innendurchmesser	d_5	154.497200 [mm]
Außendurchmesser	d_6	233.644466 [mm]

Kennzahlen der Stufe:

Machzahl	M_u	0.838039 [-]
Durchsatzzahl	φ	0.202559 [-]
Durchsatzzahl	φ_1	0.264952 [-]
korrigierte Drehzahl	N_c	37217.860076 [1/min]
korrigierter Massenstrom	\dot{m}_c	0.427699 [kg/s]
Arbeitszahl	λ	0.749801 [-]
Druckzahl	ψ_s	0.635440 [-]
Reaktionsgrad	r	0.663505 [-]
Laufzahl	v	0.887049 [-]
Schluckzahl	μ	0.228351 [-]
Schnellaufzahl	σ	0.230646 [-]
Durchmesserzahl	δ	3.845939 [-]

Auslegungspunkt

Antriebsdaten:

Drehzahl des Laufrades	n	38300.000000 [1/min]
Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt	u_2	292.785963 [m/s]
spezifische aerodynamische Arbeit	\bar{a}_a	64.275620 [kJ/kg]
aerodynamische Leistung	P_a	26.417280 [kW]
spezifische Arbeit	\bar{a}	65.723416 [kJ/kg]
Leistung	P	27.012324 [kW]

Wirkungsgrade:

Stufe:

isentrop aerodynamisch	η_{sa}	0.853808 [-]
aerodynamischer Arbeitswirkungsgrad	η_{sa}^o	0.863448 [-]
aerodyn. Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Stufe	$\eta_{sa}^{(ts)}$	0.788351 [-]
isentrop	η_s	0.834862 [-]
Arbeitswirkungsgrad	η_s^o	0.844428 [-]
Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Stufe	$\eta_s^{(ts)}$	0.770985 [-]

Einlaufbereich:

Strömungs-	η_{DE}	0.991545 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sE}	0.980000 [-]

Laufrad:

Strömungs-	η_D''	0.908493 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa}''	0.894735 [-]

Ausgleichsbereich:

Strömungs-	η_{DA}	0.971872 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{saA}	0.777746 [-]

Wirkungsgrade Leitradeinlauf:

Strömungs-	η_{D55^*}	0.970052 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa55^*}	0.858502 [-]

Wirkungsgrade Leitrad diffusor:

Strömungs-	η_{D5^*A}	0.831260 [-]
isentrop aerodynamisch	η_{sa5^*A}	0.782092 [-]

Wirkungsgrade Leitrad

Strömungs-	η'_D	0.836059 [-]
isentrop aerodynamisch	η'_{sa}	0.800588 [-]

Wirkungsgrade Ausgleichsb. + zusätzl. Verl. + Leitrad

isentrop	η_s^+	0.745682 [-]
----------	------------	--------------

Thermodynamik:

Eintrittszustand:

Temperatur	T_E	32.000000 [°C]
Druck	p_E	0.977110 [bar]
Druck (total)	p_E^o	1.002000 [bar]
Dichte	ρ_E	1.114925 [kg/m³]
Normalenthalpie	j_E	306736.780000 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_E^o	308949.228599 [J/kg]

Zustand am Laufradeintritt:

Temperatur	T_1	30.420233 [°C]
Druck	p_1	0.959163 [bar]
Druck (total)	p_1^o	1.001628 [bar]
Dichte	ρ_1	1.100142 [kg/m³]
Normalenthalpie	j_1	305148.798160 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_1^o	308949.228598 [J/kg]

Zustand am Laufradaustritt:

Temperatur	T_2	70.773705 [°C]
Druck	p_2	1.421385 [bar]
Dichte	ρ_2	1.439014 [kg/m³]
Normalenthalpie	j_2	345712.108637 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_2^o	373224.848945 [J/kg]

Zustand vor Leitrad eintritt ohne zusätzl. Verl.:

Temperatur	T_4	74.237627 [°C]
Druck	p_4	1.460737 [bar]
Dichte	ρ_4	1.464108 [kg/m³]
Normalenthalpie	j_4	349194.042768 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_4^o	373224.848945 [J/kg]

Zustand vor Leitrad eintritt mit zusätzl. Verl.:

Temperatur	T_5	75.664699 [°C]
Druck	p_5	1.460349 [bar]
Dichte	ρ_5	1.457731 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_5	350628.535712 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_5°	374672.644926 [J/kg]
Zustand am Leitrad diffuseinritt:		
Temperatur	T_{5^*}	80.727346 [°C]
Druck	p_{5^*}	1.525034 [bar]
Dichte	ρ_{5^*}	1.500522 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_{5^*}	355717.508655 [J/kg]
totale Normalenthalpie	$j_{5^*}^\circ$	374672.644926 [J/kg]
Zustand am Leitradaustritt:		
Temperatur	T_A	95.329610 [°C]
Druck	p_A	1.704351 [bar]
Druck (total)	p_A°	1.774231 [bar]
Dichte	ρ_A	1.610501 [kg/m ³]
Normalenthalpie	j_A	370395.704003 [J/kg]
totale Normalenthalpie	j_A°	374672.644926 [J/kg]
Druckverhältnisse:		
Leitradaustritt (total) / Eintritt (total)	Π_{EA}°	1.770690 [-]
Leitradaustritt / Eintritt	Π_{EA}	1.744278 [-]
Einlaufbereich	π_{E1}	0.981632 [-]
Leitradaustritt / Laufradeintritt	Π_{1A}	1.776916 [-]
Laufrad	Π''	1.481902 [-]
Ausgleichsbereich	Π_A	1.027686 [-]
Leitradeinlauf	Π_{55^*}	1.044294 [-]
Leitrad diffuseinritt	Π_{5^*A}	1.117582 [-]
Leitrad	Π'	1.167084 [-]
Ausgleichsb. + zusätzl. Verl. + Leitrad	Π^{t*}	1.199078 [-]
Enthalpieänderungen:		
Stufe:		
isentrop	Δh_s	54472.188596 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_a	63799.109861 [J/kg]
isentrop total	Δh_s°	55498.685629 [J/kg]
aerodynamisch total	Δh_a°	64275.620347 [J/kg]
einschl. zusätzlicher Verluste	Δh	65246.905842 [J/kg]
total, einschl. zusätzlicher Verluste	Δh°	65723.416328 [J/kg]

Messung.imp

Seite 7

Laufrad:		
isentrop	$\Delta h''_s$	36293.409698 [J/kg]
aerodynamisch	$\Delta h''_a$	40563.310477 [J/kg]
Ausgleichsbereich:		
isentrop	Δh_{sA}	2708.060250 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{aA}	3481.934131 [J/kg]
Zusätzliche Verluste:		
isentrop	Δh_{sZ}	-26.496217 [J/kg]
absolut	Δh_Z	1434.492945 [J/kg]
Leitradeinlauf:		
isentrop	Δh_{s55^*}	4368.895892 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{a55^*}	5088.972942 [J/kg]
Leitraddiffusor:		
isentrop	Δh_{s5^*A}	11479.699235 [J/kg]
aerodynamisch	Δh_{a5^*A}	14678.195348 [J/kg]
Leitrad:		
isentrop	$\Delta h'_s$	15825.356833 [J/kg]
aerodynamisch	$\Delta h'_a$	19767.168290 [J/kg]
Ausgleichsb. + zusätzl. Verl. + Leitrad:		
isentrop	$\Delta h''_s$	18406.113364 [J/kg]
aerodynamisch	$\Delta h''_a$	24683.595366 [J/kg]
Enthalpiesteigerung durch zusätzliche Verluste:		
Radreibung und Rückströmung	Δh_Z	1447.795981 [J/kg]
Temperaturdifferenzen:		
Einlaufbereich	ΔT_{E1}	-1.579767 [K]
Laufrad	$\Delta T''$	40.353472 [K]
Ausgleichsbereich	ΔT_A	3.463922 [K]
Zusätzliche Verluste	ΔT_{45}	1.427072 [K]
Leitradeintritt	ΔT_{55^*}	5.062647 [K]
Leitraddiffusor	ΔT_{5^*A}	14.602264 [K]
Leitrad	$\Delta T'$	19.664911 [K]
Eintrittszustand - Laufradaustritt	ΔT_{E2}	38.773705 [K]
Eintrittszustand - Leitradeintritt	ΔT_{E5}	43.664699 [K]
Stufe	ΔT_{EA}	63.329610 [K]

Geschwindigkeiten:

Laufraudeintritt:

Geschwindigkeit	C_1	0.297770 [-]
Normalkomponente	C_{1n}	0.297770 [-]
Umfangskomponente	C_{1u}	0.000000 [-]
Relativgeschwindigkeit	W_1	0.540097 [-]
mittlerer Zuströmwinkel	$\bar{\alpha}_1$	90.000000 [°]

Laufradaustritt:

Geschwindigkeit	C_2	0.801183 [-]
Normalkomponente	C_{2n}	0.282300 [-]
Umfangskomponente	C_{2u}	0.749801 [-]
Relativgeschwindigkeit	W_2	0.377217 [-]
mittlerer Abströmwinkel	$\bar{\alpha}_2$	20.631342 [°]

Leitradeintritt - ohne zusätzl. Verl.:

Geschwindigkeit	C_4	0.748771 [-]
Normalkomponente	C_{4n}	0.188138 [-]
Umfangskomponente	C_{4u}	0.724750 [-]
mittlerer Zuströmwinkel	$\bar{\alpha}_4$	14.552195 [°]

Leitradeintritt - mit zusätzl. Verl.:

Geschwindigkeit	C_5	0.748978 [-]
Normalkomponente	C_{5n}	0.188961 [-]
Umfangskomponente	C_{5u}	0.724750 [-]
mittlerer Zuströmwinkel	$\bar{\alpha}_5$	14.613138 [°]

Geschwindigkeit vor Leitrad diffusor C_{5^*} 0.665010 [-]

Geschwindigkeit am Leitradaustritt C_A 0.315887 [-]

Zwischenergebnisse:

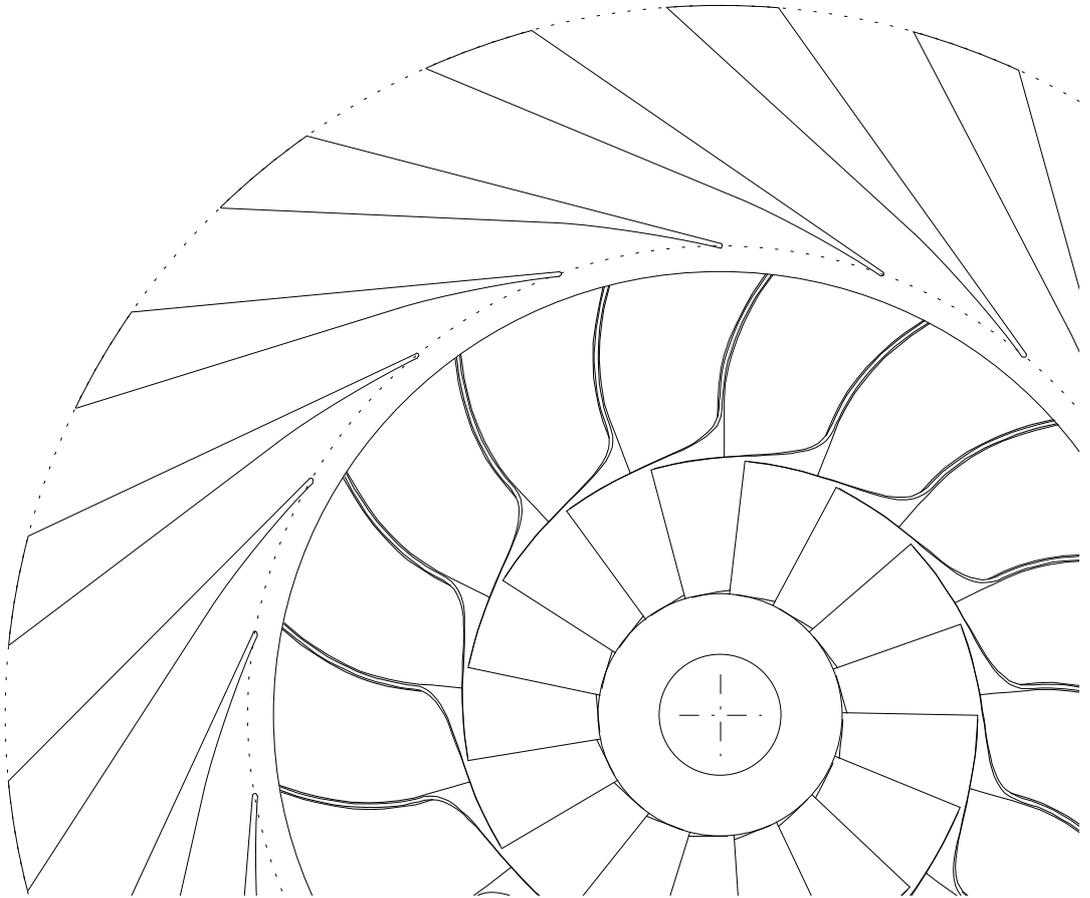
Laufrad:

Versperrung am Austritt durch Totwasser	ε_{t2}	0.186942 [-]
Versperrungsfaktor am Austritt	k_2	0.717532 [-]
Minderleistungszahl	μ	0.895804 [-]
Integral	ϕ_a	5.257826 [-]
Integral	ϕ_k	5.152214 [-]
Reynoldszahl	R_e	158218.817130 [-]

Messung.imp

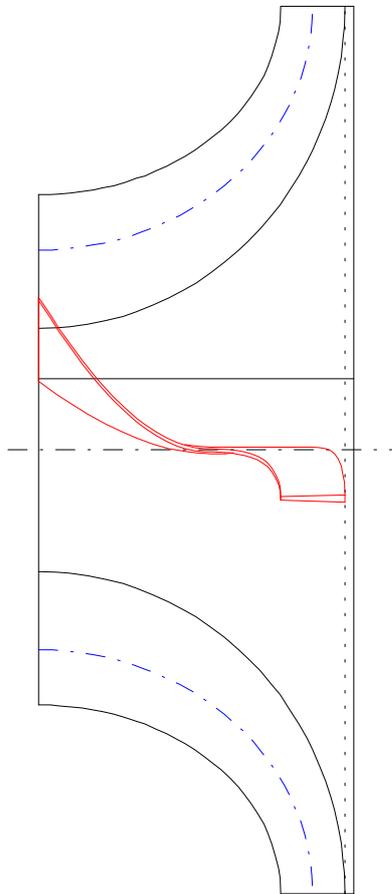
Seite 9

Dissipationskoeffizient Außenwand	C_{da}	0.006640 [-]
Dissipationskoeffizient Schaufeln + Radscheibe	C_{dk}	0.009215 [-]
Stoßverlustkoeffizient	ζ''	0.000000 [-]
Ausgleichsbereich:		
Korrekturfaktor Radreibung	C_M	0.000153 [-]
Verlustkoeffizient Radreibung	ζ_R	0.010547 [-]
Verlustkoeffizient Rückströmung ins Laufrad	ζ_r	0.016032 [-]
Leitrad:		
Umsetzungsgrad Leitrad einlauf	λ_{Dh}	0.318325 [-]
Stoßverlustkoeffizient	ζ'	0.000000 [-]
Versperrung Eintritt Leitrad diffusor	ε_{kE}	0.069573 [-]
Druckrückgewinnbeiwert Leitrad diffusor	C_p	0.590092 [-]
Umsetzungsgrad Leitrad diffusor	λ_{DA}	0.605625 [-]
Versperrung Austritt Leitrad diffusor	ε_{kA}	0.069573 [-]



Messung.imp M 1:1

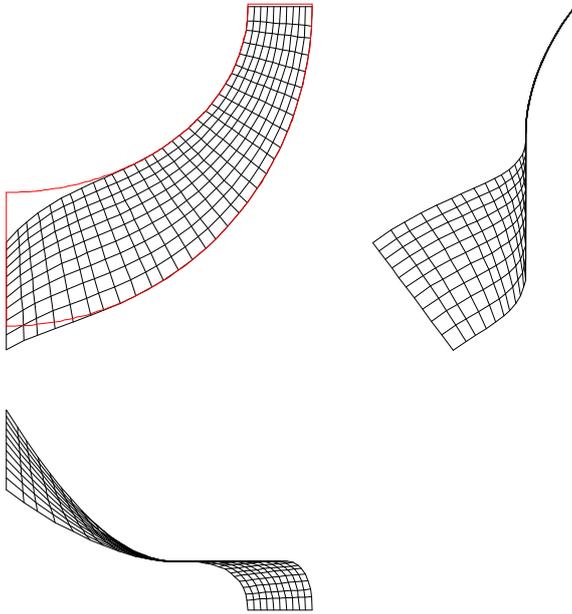
Medium: Luft		z''	17	
\dot{m}	0.411 [kg/s]	β_{2s}	60.000	[°]
p_E°	1.002 [bar]	R_N	0.274	20.000 [mm]
t_E	32 [°C]	R_1	0.451	32.894 [mm]
Π_{EA}°	1.771	R_{1a}	0.575	42.000 [mm]
η_{sa}	0.854	R_2	1	73 [mm]
η_s	0.835	B_2	0.144	10.500 [mm]
P	27.012 [kW]	S_2	0.012	0.876 [mm]
n	38300 [1/min]	z'	18	
u_2	292.786 [m/s]	ϑ	8	[°]
		α_{5s}	14.613	[°]
		S_5	0.011	0.803 [mm]
		R_5	1.058	77.249 [mm]
		R_6	1.600	116.822 [mm]
		H_E	0.110	8.000 [mm]
		L/H_E	6.875	

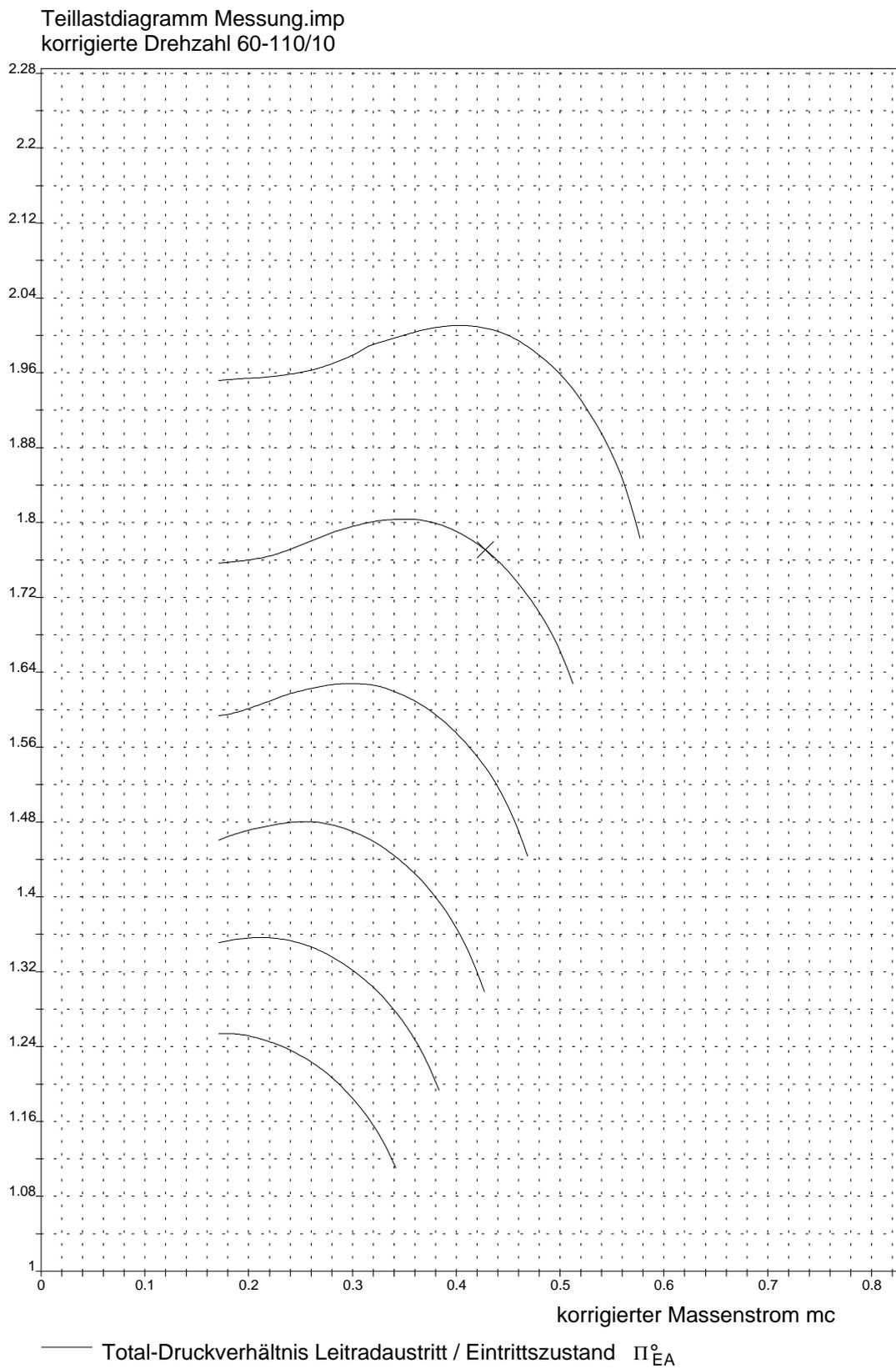


Messung.imp M 1:1

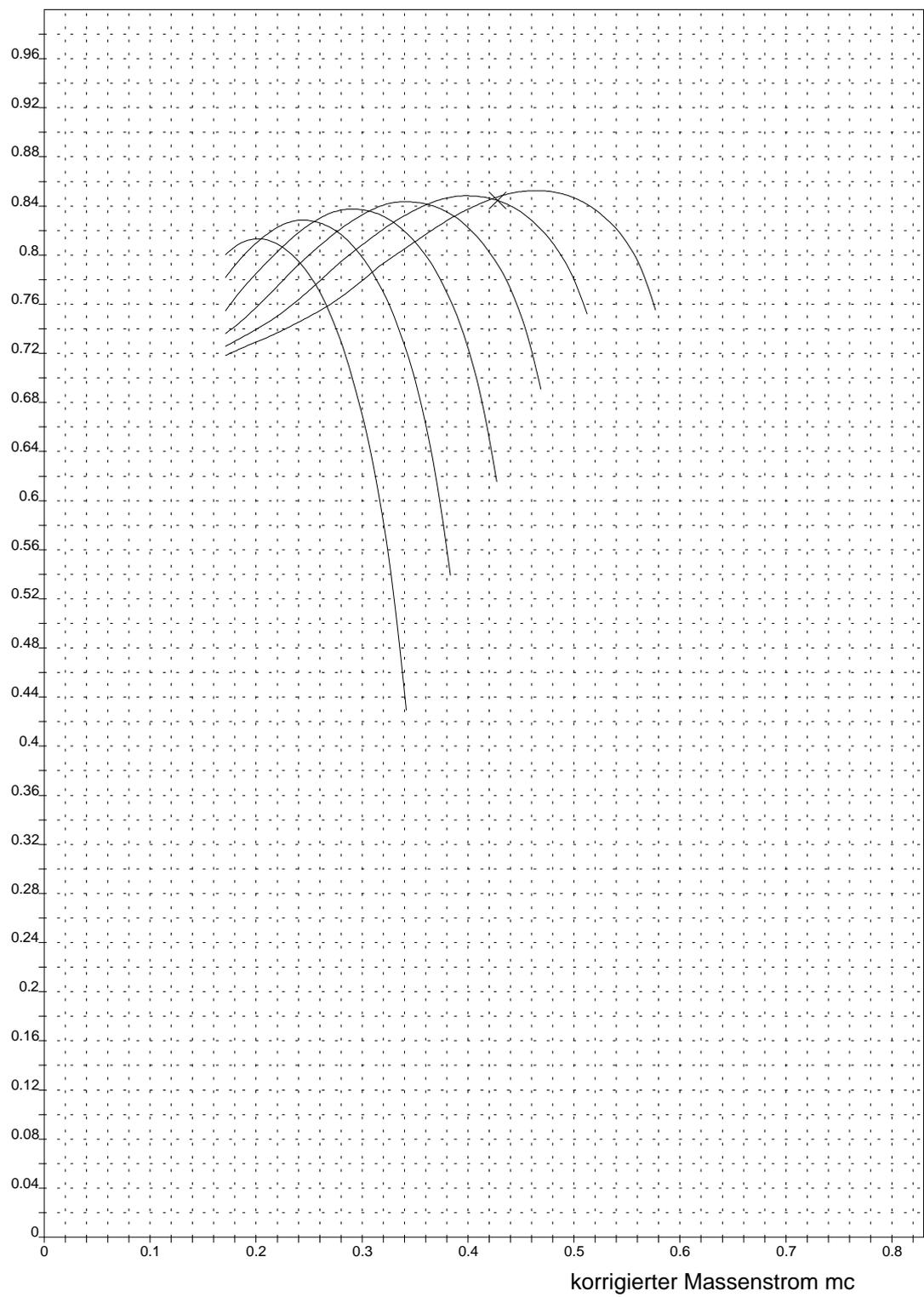
Medium: Luft			z''	17	
\dot{m}	0.411	[kg/s]	β_{2s}	60.000	[°]
p_E°	1.002	[bar]	R_N	0.274	20.000 [mm]
t_E	32	[°C]	R_1	0.451	32.894 [mm]
Π_{EA}°	1.771		R_{1a}	0.575	42.000 [mm]
η_{sa}	0.854		L_{ax}	0.685	50.000 [mm]
η_s	0.835		R_2	1	73 [mm]
P	27.012	[kW]	B_2	0.144	10.500 [mm]
n	38300	[1/min]	S_2	0.012	0.876 [mm]
u_2	292.786	[m/s]	R_5	1.058	77.249 [mm]
			R_6	1.600	116.822 [mm]

M 1:1





Teillastdiagramm Messung.imp
korrigierte Drehzahl 60-110/10



— Arbeitswirkungsgrad der Stufe η_s°

Literaturverzeichnis

- [Bus28] BUSEMANN, A.: *Das Förderhöhenverhältnis radialer Kreiselpumpen mit logarithmisch-spiraligen Schaufeln*. ZAMM 8, 372-384, 1928.
- [Gö80] GÖTZ, KARL: *Vorlesungsskriptum Strömungsmaschinen I*. Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, 1980.
- [RDD75] RUNDSTADLER, P. W., DOLAN, F. X. und DEAN, R. C.: *Diffuser Data Book*. Creare Tech. Note 186, Hannover/New Hampshire, 1975.
- [Sch82] SCHAUT, EDMUND: *Auslegung von Turboverdichtern radialer Bauweise über ein Rechnerprogramm*. Diplomarbeit, Fachhochschule Ravensburg-Weingarten, 1982.
- [Sig84] SIGLOCH, HERBERT: *Strömungsmaschinen, Grundlagen und Anwendung*. Carl Hanser, München Wien, 1984.
- [Tra88] TRAUPEL, WALTER: *Thermische Turbomaschinen, erster Band: Thermodynamisch-strömungstechnische Berechnung*. Springer, Berlin, dritte, neubearbeitete und erweiterte Auflage, 1988.
- [WW80] WACHTER, J. und WÖHRL, B.: *Einfluß der Reynoldszahl auf den Wirkungsgrad einer Radialverdichterstufe*. VDI-Berichte Nr. 361, 1980.

Formelzeichen, Stichwortverzeichnis

- B_2 Breite am Laufradaustritt, 22, 23
 B_{5^*} Breite am Leitraddiffusoreintritt, 26
 C_1 Geschwindigkeit am Laufradeintritt, 18
 C_2 Geschwindigkeit am Laufradaustritt, 18
 C_5 Geschwindigkeit am Leitradeintritt, 25
 C_A Geschwindigkeit am Leitraddiffusoraustritt, 32
 C_M Korrekturfaktor Radreibungsverlust, 46
 C_p Druckrückgewinnbeiwert, 30, 31
 C_{1n} Normalkomponente der Geschwindigkeit am Laufradeintritt, 38
 C_{1u} Umfangskomponente der Geschwindigkeit am Laufradeintritt, 17
 C_{2n} Normalkomponente der Geschwindigkeit am Laufradaustritt, 16
 C_{2u} Umfangskomponente der Geschwindigkeit am Laufradaustritt, 16
 C_{4n} Normalkomponente der Geschwindigkeit am Ende des Ausgleichsbereiches, 25
 C_{4u} Umfangskomponente der Geschwindigkeit am Ende des Ausgleichsbereiches, 25
 C_4 Geschwindigkeit am Ende des Ausgleichsbereiches, 25
 C_{5^*} Geschwindigkeit am Leitraddiffusoreintritt, 29
 C_{5n} Normalkomponente der Geschwindigkeit am Leitradeintritt, 25
 C_{5u} Umfangskomponente der Geschwindigkeit am Leitradeintritt, 25
 H_A Höhe am Leitraddiffusoraustritt, 30
 H_E Höhe am Leitraddiffusoreintritt, 26, 27
 L Länge des Leitraddiffusors, 30
 L_{ax} axiale Länge des Laufradkanals, 14
 M_u Machzahl, 37
 N_c korrigierte Drehzahl, 37
 R Gaskonstante, 5
 R_1 Eulerradius, 18
 R_4 Radius am Ende des Ausgleichsbereiches, 23
 R_5 Radius am Leitradeintritt, 25
 R_6 Radius am Leitradaustritt, 36
 R_A Radius am Leitraddiffusoraustritt, 36
 R_N Nabenverhältnis, 18
 R_{1a} Außenradius am Laufradeintritt, 18
 R_{3^*} ab diesem Radius ausgeglichene Strömung, 48
 T_1 Temperatur am Laufradeintritt, 21
 T_2 Temperatur am Laufradaustritt, 22
 T_4 Temperatur am Ende des Ausgleichsbereiches, 24
 T_A Temperatur am Leitraddiffusoraustritt, 33
 T_E Umgebungstemperatur, 20
 T_{5^*} Temperatur am Leitraddiffusoreintritt, 30
 U_1 Umfangsgeschwindigkeit am Laufradeintritt, 18
 $U_2 = 1$ Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt, 15
 W_1 Relativgeschwindigkeit am Laufradeintritt, 17, 39
 W_2 Relativgeschwindigkeit am Laufradaustritt, 17

- $\Delta\alpha_{5s}$ Winkeldifferenz, 27
 Δh Enthalpieänderung der Stufe, 8
 Δh° totale Enthalpieänderung der Stufe, 8
 Δh_Z Energieverlust durch zusätzliche Verluste, 25
 Δh_a aerodynamische Enthalpieänderung der Stufe, 8
 $\Delta h_a''$ aerodynamische Enthalpieänderung im Laufrad, 22
 Δh_a° aerodynamische totale Enthalpieänderung der Stufe, 8
 Δh_s isentrope Enthalpieänderung der Stufe, 7
 $\Delta h_s''$ isentrope Enthalpieänderung im Laufrad, 22
 Δh_s° isentrope totale Enthalpieänderung der Stufe, 8
 Δh_{a55^*} aerodynamische Enthalpieänderung im Einlaufbereich des Leitrades, 30
 Δh_{a5^*A} aerodynamische Enthalpieänderung im Leitrad diffusor, 33
 Δh_{aA} aerodynamische Enthalpieänderung im Ausgleichsbereich, 24
 Δh_{aE} aerodynamische Enthalpieänderung im Einlaufbereich, 21
 Δh_{dC_p} Verlust im Leitrad diffusor, wenn lediglich C_p berücksichtigt wird, 32
 $\Delta h_{d\Delta\alpha}$ Stoßverlust durch unregelmäßige Zuströmrichtung, 28
 $\Delta h_{d\alpha}$ Stoßverlust im Leitrad, bedingt durch nicht optimale Zuströmrichtung, 28
 Δh_{d55^*} Gesamtverlust im Einlaufbereich des Leitrades, 29
 Δh_{d5^*A} Gesamtverlust im Leitrad diffusor, 32
 Δh_{dC} Energieverlust durch Carnot-Stoß am Laufradaustritt, 23
 Δh_{dR} Reibungsverlust im Einlaufbereich des Leitrades, 28
 Δh_{s55^*} isentrope Enthalpieänderung im Einlaufbereich des Leitrades, 30
 Δh_{s5^*A} isentrope Enthalpieänderung im Leitrad diffusor, 32
 Δh_{sA} isentrope Enthalpieänderung im Ausgleichsbereich, 24
 Δh_{sE} isentrope Enthalpieänderung im Einlaufbereich, 21
 Ω Ringquerschnitt, 9, 45
 Ω_2 Ringquerschnitt am Laufradaustritt, 9
 α_5 Zuströmwinkel des Mediums am Leitrad eintritt, 26
 α_{5s} Anstellwinkel der Leitrad schaufeln, 27
 β_{2s} Schaufelwinkel am Laufradaustritt, 14
 δ Durchmesserzahl, 10
 \dot{m} Massenstrom, 38
 η_{paA} polytroper aerodynamischer Wirkungsgrad des Ausgleichsbereiches, 24
 η_{saA} isentroper aerodynamischer Wirkungsgrad des Ausgleichsbereiches, 24
 η_p polytroper Wirkungsgrad, 6
 η_s isentroper Wirkungsgrad, 6
 η_s° Arbeitswirkungsgrad der Stufe, 7
 $\eta_s^{(ts)}$ Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Verdichterstufe, 7
 η_{sa55^*} isentroper Wirkungsgrad im Einlaufbereich des Leitrades, 30
 η_{sa5^*A} isentroper Wirkungsgrad im Leitrad diffusor, 33
 η_{sa} isentroper aerodynamischer Wirkungsgrad der Stufe, 7, 33
 η_{sa}'' isentroper aerodynamischer Wirkungsgrad des Laufrades, 23
 η_{sa}° aerodynamischer Arbeitswirkungsgrad der Stufe, 7
 $\eta_{sa}^{(ts)}$ aerodynamischer Arbeitswirkungsgrad der frei ausblasenden Verdichterstufe, 7
 η_s isentroper Wirkungsgrad der Stufe, 7

- κ Isentropenexponent, 5
 λ Arbeitszahl, 9
 μ Minderleistungszahl, 17
 μ Schluckzahl, 10
 ν Laufzahl, 9
 ψ_s Druckzahl, 9
 ρ_4 Dichte am Ende des Ausgleichsbereiches, 24
 ρ_1 Dichte am Laufradeintritt, 22
 ρ_2 Dichte am Laufradaustritt, 22
 ρ_5 Dichte am Leitradeintritt, 25
 ρ_A Dichte am Leitraddiffusoraustritt, 31, 32
 ρ_E Dichte des Umgebungszustandes, 21
 ρ_{5^*} Dichte am Leitraddiffusoreintritt, 30
 σ Schnellaufzahl, 10
 ε_{kE} Grenzschichtversperrungsmaß am Leitraddiffusoreintritt, 27
 ε_{kA} Grenzschichtversperrungsmaß am Leitraddiffusoraustritt, 30
 ε_{v2} Versperrungsmaß durch Verdrängungsdicke am Laufradaustritt, 15
 φ Durchsatzzahl, 9
 φ_1 Durchsatzzahl, 37, 38
 ϑ Öffnungswinkel des Diffusors, 26
 ξ Verzögerungsverhältnis W_2/W_1 , 14, 39
 $\zeta''_{Sto\beta}$ Stoßverlustkoeffizient des Laufrades, 47
 $\zeta'_{Sto\beta}$ Stoßverlustkoeffizient des Leitrades, 29
 c_d Dissipationskoeffizient, 28
 c_f Reibungskoeffizient, 28, 46
 e_2 Versperrungsmaß durch endliche Schaufeldicke, 15
 j_1 Normalenthalpie am Laufradeintritt, 21
 j_1° totale Normalenthalpie am Laufradeintritt, 8, 21, 22
 j_2 Normalenthalpie am Laufradaustritt, 22
 j_2° totale Normalenthalpie am Laufradaustritt, 22
 j_4 Normalenthalpie am Ende des Ausgleichsbereiches, 24
 j_4° totale Normalenthalpie am Ende des Ausgleichsbereiches, 24
 j_5 Normalenthalpie am Leitradeintritt, 25, 26
 j_5° totale Normalenthalpie am Leitradeintritt, 25
 j_A Normalenthalpie am Leitraddiffusoraustritt, 31, 32
 j_A° totale Normalenthalpie am Leitraddiffusoraustritt, 31
 j_E Normalenthalpie des Umgebungszustandes, 20
 j_E° totale Normalenthalpie des Umgebungszustandes, 20
 j_{5^*} Normalenthalpie am Leitraddiffusoreintritt, 29
 $j_{5^*}^\circ$ totale Normalenthalpie am Leitraddiffusoreintritt, 29
 k_2 Versperrungsfaktor am Laufradaustritt, 16
 n_k Polytropenexponent, 6
 p_1 Druck am Laufradeintritt, 21
 p_1° Totaldruck am Laufradeintritt, 8
 p_2 Druck am Laufradaustritt, 22
 p_4 Druck am Ende des Ausgleichsbereiches, 24
 p_5 Druck am Leitradeintritt, 25, 26
 p_A Druck am Leitraddiffusoraustritt, 30, 32
 p_A° Totaldruck am Leitradaustritt, 8
 p_E Umgebungsdruck, 20
 p_{5^*} Druck am Leitraddiffusoreintritt, 29
 r Reaktionsgrad, 8
 r_2 Radius am Laufradaustritt, 22
 u_2 Umfangsgeschwindigkeit am Laufradaustritt, 20, 38
 v_1 spezifisches Volumen am Laufradeintritt, 22
 v_2 spezifisches Volumen am Laufradaustritt, 22

v_4 spezifisches Volumen am Ende des
Ausgleichsbereiches, 24
 v_A spezifisches Volumen am Leitrad-
diffusoraustritt, 33
 v_E spezifisches Volumen des Umgebungs-
zustandes, 21
 v_{5^*} spezifisches Volumen am Leitrad-
diffusoreintritt, 30
 z'' Laufschaufelzahl, 14, 15
 z' Leitschaufelzahl, 26
 $\bar{\lambda}_{Dh}$ Umsetzungsgrad Ausgleichsbereich
+ Leitrad-einlauf, 27
 \dot{m}_c korrigierter Massenstrom, 37

Leitrad-diffusor, 30
Leitrad-einlauf, 26

Theoretische Untersuchung des Teillastverhaltens einer Radialverdichterstufe

Copyright (C) 1998 Nikolaus Langert

Diese Diplomarbeit untersteht der nachfolgend abgedruckten
GNU GENERAL PUBLIC LICENSE, mit Ausnahme der folgenden Abbildungen:
1.1, 1.2, 2.4, 4.5. Diese unterliegen dem Copyright des jeweiligen Verlages.

This program is free software; you can redistribute it and/or modify it under the terms of the GNU General Public License as published by the Free Software Foundation; either version 2 of the License, or (at your option) any later version.

This program is distributed in the hope that it will be useful, but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the GNU General Public License appended below for more details.

GNU GENERAL PUBLIC LICENSE Version 2, June 1991

Copyright (C) 1989, 1991 Free Software Foundation, Inc.
675 Mass Ave, Cambridge, MA 02139, USA
Everyone is permitted to copy and distribute verbatim copies of this license document, but changing it is not allowed.

Preamble

The licenses for most software are designed to take away your freedom to share and change it. By contrast, the GNU General Public License is intended to guarantee your freedom to share and change free software--to make sure the software is free for all its users. This General Public License applies to most of the Free Software Foundation's software and to any other program whose authors commit to using it. (Some other Free Software Foundation software is covered by the GNU Library General Public License instead.) You can apply it to your programs, too.

When we speak of free software, we are referring to freedom, not price. Our General Public Licenses are designed to make sure that you have the freedom to distribute copies of free software (and charge for this service if you wish), that you receive source code or can get it if you want it, that you can change the software or use pieces of it in new free programs; and that you know you can do these things.

To protect your rights, we need to make restrictions that forbid anyone to deny you these rights or to ask you to surrender the rights. These restrictions translate to certain responsibilities for you if you distribute copies of the software, or if you modify it.

For example, if you distribute copies of such a program, whether gratis or for a fee, you must give the recipients all the rights that you have. You must make sure that they, too, receive or can get the source code. And you must show them these terms so they know their rights.

We protect your rights with two steps: (1) copyright the software, and (2) offer you this license which gives you legal permission to copy, distribute and/or modify the software.

Also, for each author's protection and ours, we want to make certain that everyone understands that there is no warranty for this free software. If the software is modified by someone else and passed on, we want its recipients to know that what they have is not the original, so that any problems introduced by others will not reflect on the original authors' reputations.

Finally, any free program is threatened constantly by software patents. We wish to avoid the danger that redistributors of a free program will individually obtain patent licenses, in effect making the program proprietary. To prevent this, we have made it clear that any patent must be licensed for everyone's free use or not licensed at all.

The precise terms and conditions for copying, distribution and modification follow.

GNU GENERAL PUBLIC LICENSE
TERMS AND CONDITIONS FOR COPYING, DISTRIBUTION AND MODIFICATION

0. This License applies to any program or other work which contains

a notice placed by the copyright holder saying it may be distributed under the terms of this General Public License. The "Program", below, refers to any such program or work, and a "work based on the Program" means either the Program or any derivative work under copyright law: that is to say, a work containing the Program or a portion of it, either verbatim or with modifications and/or translated into another language. (Hereinafter, translation is included without limitation in the term "modification".) Each licensee is addressed as "you".

Activities other than copying, distribution and modification are not covered by this License; they are outside its scope. The act of running the Program is not restricted, and the output from the Program is covered only if its contents constitute a work based on the Program (independent of having been made by running the Program). Whether that is true depends on what the Program does.

1. You may copy and distribute verbatim copies of the Program's source code as you receive it, in any medium, provided that you conspicuously and appropriately publish on each copy an appropriate copyright notice and disclaimer of warranty; keep intact all the notices that refer to this License and to the absence of any warranty; and give any other recipients of the Program a copy of this License along with the Program.

You may charge a fee for the physical act of transferring a copy, and you may at your option offer warranty protection in exchange for a fee.

2. You may modify your copy or copies of the Program or any portion of it, thus forming a work based on the Program, and copy and distribute such modifications or work under the terms of Section 1 above, provided that you also meet all of these conditions:

a) You must cause the modified files to carry prominent notices stating that you changed the files and the date of any change.

b) You must cause any work that you distribute or publish, that in whole or in part contains or is derived from the Program or any part thereof, to be licensed as a whole at no charge to all third parties under the terms of this License.

c) If the modified program normally reads commands interactively when run, you must cause it, when started running for such

interactive use in the most ordinary way, to print or display an announcement including an appropriate copyright notice and a notice that there is no warranty (or else, saying that you provide a warranty) and that users may redistribute the program under these conditions, and telling the user how to view a copy of this License. (Exception: if the Program itself is interactive but does not normally print such an announcement, your work based on the Program is not required to print an announcement.)

These requirements apply to the modified work as a whole. If identifiable sections of that work are not derived from the Program, and can be reasonably considered independent and separate works in themselves, then this License, and its terms, do not apply to those sections when you distribute them as separate works. But when you distribute the same sections as part of a whole which is a work based on the Program, the distribution of the whole must be on the terms of this License, whose permissions for other licensees extend to the entire whole, and thus to each and every part regardless of who wrote it.

Thus, it is not the intent of this section to claim rights or contest your rights to work written entirely by you; rather, the intent is to exercise the right to control the distribution of derivative or collective works based on the Program.

In addition, mere aggregation of another work not based on the Program with the Program (or with a work based on the Program) on a volume of a storage or distribution medium does not bring the other work under the scope of this License.

3. You may copy and distribute the Program (or a work based on it, under Section 2) in object code or executable form under the terms of Sections 1 and 2 above provided that you also do one of the following:

- a) Accompany it with the complete corresponding machine-readable source code, which must be distributed under the terms of Sections 1 and 2 above on a medium customarily used for software interchange; or,
- b) Accompany it with a written offer, valid for at least three years, to give any third party, for a charge no more than your cost of physically performing source distribution, a complete machine-readable copy of the corresponding source code, to be distributed under the terms of Sections 1 and 2 above on a medium customarily used for software interchange; or,

c) Accompany it with the information you received as to the offer to distribute corresponding source code. (This alternative is allowed only for noncommercial distribution and only if you received the program in object code or executable form with such an offer, in accord with Subsection b above.)

The source code for a work means the preferred form of the work for making modifications to it. For an executable work, complete source code means all the source code for all modules it contains, plus any associated interface definition files, plus the scripts used to control compilation and installation of the executable. However, as a special exception, the source code distributed need not include anything that is normally distributed (in either source or binary form) with the major components (compiler, kernel, and so on) of the operating system on which the executable runs, unless that component itself accompanies the executable.

If distribution of executable or object code is made by offering access to copy from a designated place, then offering equivalent access to copy the source code from the same place counts as distribution of the source code, even though third parties are not compelled to copy the source along with the object code.

4. You may not copy, modify, sublicense, or distribute the Program except as expressly provided under this License. Any attempt otherwise to copy, modify, sublicense or distribute the Program is void, and will automatically terminate your rights under this License. However, parties who have received copies, or rights, from you under this License will not have their licenses terminated so long as such parties remain in full compliance.

5. You are not required to accept this License, since you have not signed it. However, nothing else grants you permission to modify or distribute the Program or its derivative works. These actions are prohibited by law if you do not accept this License. Therefore, by modifying or distributing the Program (or any work based on the Program), you indicate your acceptance of this License to do so, and all its terms and conditions for copying, distributing or modifying the Program or works based on it.

6. Each time you redistribute the Program (or any work based on the Program), the recipient automatically receives a license from the

original licensor to copy, distribute or modify the Program subject to these terms and conditions. You may not impose any further restrictions on the recipients' exercise of the rights granted herein. You are not responsible for enforcing compliance by third parties to this License.

7. If, as a consequence of a court judgment or allegation of patent infringement or for any other reason (not limited to patent issues), conditions are imposed on you (whether by court order, agreement or otherwise) that contradict the conditions of this License, they do not excuse you from the conditions of this License. If you cannot distribute so as to satisfy simultaneously your obligations under this License and any other pertinent obligations, then as a consequence you may not distribute the Program at all. For example, if a patent license would not permit royalty-free redistribution of the Program by all those who receive copies directly or indirectly through you, then the only way you could satisfy both it and this License would be to refrain entirely from distribution of the Program.

If any portion of this section is held invalid or unenforceable under any particular circumstance, the balance of the section is intended to apply and the section as a whole is intended to apply in other circumstances.

It is not the purpose of this section to induce you to infringe any patents or other property right claims or to contest validity of any such claims; this section has the sole purpose of protecting the integrity of the free software distribution system, which is implemented by public license practices. Many people have made generous contributions to the wide range of software distributed through that system in reliance on consistent application of that system; it is up to the author/donor to decide if he or she is willing to distribute software through any other system and a licensee cannot impose that choice.

This section is intended to make thoroughly clear what is believed to be a consequence of the rest of this License.

8. If the distribution and/or use of the Program is restricted in certain countries either by patents or by copyrighted interfaces, the original copyright holder who places the Program under this License may add an explicit geographical distribution limitation excluding those countries, so that distribution is permitted only in or among

countries not thus excluded. In such case, this License incorporates the limitation as if written in the body of this License.

9. The Free Software Foundation may publish revised and/or new versions of the General Public License from time to time. Such new versions will be similar in spirit to the present version, but may differ in detail to address new problems or concerns.

Each version is given a distinguishing version number. If the Program specifies a version number of this License which applies to it and "any later version", you have the option of following the terms and conditions either of that version or of any later version published by the Free Software Foundation. If the Program does not specify a version number of this License, you may choose any version ever published by the Free Software Foundation.

10. If you wish to incorporate parts of the Program into other free programs whose distribution conditions are different, write to the author to ask for permission. For software which is copyrighted by the Free Software Foundation, write to the Free Software Foundation; we sometimes make exceptions for this. Our decision will be guided by the two goals of preserving the free status of all derivatives of our free software and of promoting the sharing and reuse of software generally.

NO WARRANTY

11. BECAUSE THE PROGRAM IS LICENSED FREE OF CHARGE, THERE IS NO WARRANTY FOR THE PROGRAM, TO THE EXTENT PERMITTED BY APPLICABLE LAW. EXCEPT WHEN OTHERWISE STATED IN WRITING THE COPYRIGHT HOLDERS AND/OR OTHER PARTIES PROVIDE THE PROGRAM "AS IS" WITHOUT WARRANTY OF ANY KIND, EITHER EXPRESSED OR IMPLIED, INCLUDING, BUT NOT LIMITED TO, THE IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY AND FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. THE ENTIRE RISK AS TO THE QUALITY AND PERFORMANCE OF THE PROGRAM IS WITH YOU. SHOULD THE PROGRAM PROVE DEFECTIVE, YOU ASSUME THE COST OF ALL NECESSARY SERVICING, REPAIR OR CORRECTION.

12. IN NO EVENT UNLESS REQUIRED BY APPLICABLE LAW OR AGREED TO IN WRITING WILL ANY COPYRIGHT HOLDER, OR ANY OTHER PARTY WHO MAY MODIFY AND/OR REDISTRIBUTE THE PROGRAM AS PERMITTED ABOVE, BE LIABLE TO YOU FOR DAMAGES, INCLUDING ANY GENERAL, SPECIAL, INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES ARISING OUT OF THE USE OR INABILITY TO USE THE PROGRAM (INCLUDING BUT NOT LIMITED TO LOSS OF DATA OR DATA BEING RENDERED INACCURATE OR LOSSES SUSTAINED BY YOU OR THIRD PARTIES OR A FAILURE OF THE PROGRAM TO OPERATE WITH ANY OTHER

PROGRAMS), EVEN IF SUCH HOLDER OR OTHER PARTY HAS BEEN ADVISED OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

END OF TERMS AND CONDITIONS

Appendix: How to Apply These Terms to Your New Programs

If you develop a new program, and you want it to be of the greatest possible use to the public, the best way to achieve this is to make it free software which everyone can redistribute and change under these terms.

To do so, attach the following notices to the program. It is safest to attach them to the start of each source file to most effectively convey the exclusion of warranty; and each file should have at least the "copyright" line and a pointer to where the full notice is found.

```
<one line to give the program's name and a brief idea of what it does.>  
Copyright (C) 19yy <name of author>
```

```
This program is free software; you can redistribute it and/or modify  
it under the terms of the GNU General Public License as published by  
the Free Software Foundation; either version 2 of the License, or  
(at your option) any later version.
```

```
This program is distributed in the hope that it will be useful,  
but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of  
MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. See the  
GNU General Public License for more details.
```

```
You should have received a copy of the GNU General Public License  
along with this program; if not, write to the Free Software  
Foundation, Inc., 675 Mass Ave, Cambridge, MA 02139, USA.
```

Also add information on how to contact you by electronic and paper mail.

If the program is interactive, make it output a short notice like this when it starts in an interactive mode:

```
Gnomovision version 69, Copyright (C) 19yy name of author  
Gnomovision comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY; for details type 'show w'.  
This is free software, and you are welcome to redistribute it  
under certain conditions; type 'show c' for details.
```

The hypothetical commands 'show w' and 'show c' should show the appropriate parts of the General Public License. Of course, the commands you use may be called something other than 'show w' and 'show c'; they could even be mouse-clicks or menu items--whatever suits your program.

You should also get your employer (if you work as a programmer) or your school, if any, to sign a "copyright disclaimer" for the program, if necessary. Here is a sample; alter the names:

Yoyodyne, Inc., hereby disclaims all copyright interest in the program
'Gnomovision' (which makes passes at compilers) written by James Hacker.

<signature of Ty Coon>, 1 April 1989
Ty Coon, President of Vice

This General Public License does not permit incorporating your program into proprietary programs. If your program is a subroutine library, you may consider it more useful to permit linking proprietary applications with the library. If this is what you want to do, use the GNU Library General Public License instead of this License.