Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 67 (1949)
Heft: 13

Artikel: Die Vorausberechnung von Turbinenkennfeldern
Autor: Hausenblas, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-84029

67. Jahrgang Nachdruck von Bild oder Text nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet Nr. 13

Die Vorausberechnung von Turbinenkennfeldern

Von Dr. H. HAUSENBLAS [1)]

DK 621-135
621.438:629.135

1. Einleitung

In den meisten Fällen wird heute das Verhalten von Turbinen in Form einer Wirkungsgradkurve über der Schnelllaufzahl u/c_o angegeben. Wird diese Kurve versuchsmässig bei konstant gehaltener Drehzahl aufgenommen, so genügt dies meist für die üblichen mit Generatoren gekuppelten Dampfturbinen. Soll jedoch die Turbine nicht nur bei verschiedenen Gefällen, sondern auch bei verschiedenen Drehzahlen arbeiten, so stellt man meist die Wirkungsgradkurven bei verschiedenen jeweils konstant gehaltenen Gefällen durch Veränderung der Drehzahl fest. Man erhält dann Kurven des Wirkungsgrades über der Schnellaufzahl u/c_o mit dem an die Turbine angelegten adiabatischen Gefälle oder Druckverhältnis als Parameter. Die so wiedergegebene Gefällsabhängigkeit des Wirkungsgrades ist bei einstufigen Turbinen gering, bei mehr- und vielstufigen Turbinen stärker. Hier bedingt die Gefällsänderung im allgemeinen eine Aenderung der Verhältnisse der spezifischen Volumina der Treibgase in den einzelnen Schaufelkränzen zu deren Anfangswert, was sich in einer Verschiebung der Arbeitspunkte und der Wirkungsgrade der Einzelstufen äussert.

Während also das Kennfeld bezüglich des Wirkungsgrades der Turbine in der oben geschilderten Form bekannt ist, findet man die entsprechende Darstellung für die Durchsatzgewichte kaum. Man arbeitet hier meist lediglich mit dem Dampfkegel. Es fehlt also heute im Turbinenbau noch meist die Vorausberechnung, die versuchsmässige Aufnahme und Anwendung eines auch die Durchsatzgewichte berücksichtigenden Kennfeldes, wie dies z. B. im Wasserturbinen- und Verdichterbau üblich ist. Allerdings hat Sörensen [1] ein derartiges Kennfeld für Dampfturbinen in Anlehnung an die Einheitskennfelder der Wasserturbinen angegeben, doch ist über dessen Anwendung und über die Zweckmässigkeit der gewählten Darstellung mit Ausnahme einiger Ansätze für die Vorausberechnung des inkompressiblen Teiles des Kennfeldes nichts bekannt geworden [2] [3].

In der vorliegenden Arbeit sollen nun die für die Vorausberechnung derartiger Turbinenkennfelder notwendigen Unterlagen geschaffen werden. Ueber die Darstellungsformen und Anwendungsmöglichkeiten der Turbinenkennfelder wurde hier schon berichtet [4].

1) Der Verfasser dieses Aufsatzes ist derzeit bei der Firma Aéroplanes G. Voisin, Groupe Technique, Decize (Nièvre) beschäftigt.

2. Die Grundlagen für die Berechnung eines ruhenden Einzelkranzes bei verlustbehafteter Expansion eines idealen Gases

Wir bezeichnen mit 0 den Gesamtzustand vor dem Kranz, mit 1 den statischen Zustand hinter dem Kranz. Die Expansion im Kranz soll verlustbehaftet, aber ohne äussere Wärmezu- oder -abfuhr vor sich gehen und im folgenden kurz als «verlustbehaftete Strömung» bezeichnet werden (Geschwindigkeitsbeiwert φ).

Um die Berechnung von Kennfeldern zu ermöglichen, soll das bekannte Vorgehen bei den Auslegungsberechnungen von Turbinen auf ihrer Hauptstromfläche (mittleren Durchmessern) unter der Annahme eines konstanten Verhältniswertes $k = c_p/c_v$ formelmässig dargestellt werden. Wir wollen sämtliche Werte in dimensionslose Grössen verwandeln und dazu die entsprechenden Werte für den Gesamtzustand vor dem Kranz (Index 0) und die engste in der betrachteten Beschaufelung vorhandene Durchtrittsfläche F_1 als Bezugsgrössen benutzen. Ferner wollen wir zunächst alle Werte für isentropische Strömung berechnen und dann die entsprechenden Werte für verlustbehaftete Strömung durch Korrekturbeiwerte auf die isentropischen beziehen. Damit ergeben sich die in Tabelle 1 zusammengestellten Beziehungen.

Hierbei wurde in der im Turbinenbau üblichen Art angenommen, dass die den Verlusten entsprechende Wärme am Kranzaustritt bereits völlig an das strömende Medium übertragen sei. Dies trifft erfahrungsgemäss tatsächlich oft nicht zu und bedingt manchmal, dass die so gerechnete «wirksame» Austrittsfläche einer Beschaufelung grösser wird als ihre geometrische. Man hat daher in die Kennfeldberechnungen immer die wirksamen Flächen einzusetzen, die aus Versuchen rückgerechnet werden können, was z. B. auch etwaige Kontraktionseinflüsse berücksichtigt. Ausserdem ist es möglich, in den Zeilen 2 bis 5 der Tabelle 1 für die den Verlusten entsprechenden Temperaturdifferenzen mit einem anderen Geschwindigkeitsbeiwert zu rechnen als für die Geschwindigkeiten.

Die in Zeile 6 der Tabelle 1 angegebene Machzahl wird zum Aufstauen von Geschwindigkeiten benötigt, die man immer in Form einer derartigen Machzahl $M_{1(1)}$ erhält. Man kann also mit Hilfe der Kurve der $M_{1(1)}$-Werte über p_1/p_0 den zugehörigen Gesamtdruck p_0 bestimmen.

Das für die Kennfeldberechnung wichtigste Hilfsmittel ist ein Kurvenblatt der Durchsatzmachzahlen m in Abhängigkeit von p_1/p_0 und φ, wobei sich die in Bild 1 angegebene Darstellungsform als besonders günstig erwiesen hat. Um dies zu verdeutlichen wollen wir kurz den Geschwindigkeitsbeiwert φ betrachten.

Tabelle 1

Zeile	Grösse	dargestellt als	für isentropische Strömung	für verlustbehaftete Strömung	Korrekturbeiwert
1	Geschwindigkeit c_1 am Kranzaustritt	Machzahl c_1/a_0	$M_{1(0)} = \sqrt{\frac{2}{k-1}\left[1-(p_1/p_0)^{\frac{k-1}{k}}\right]}$	$\varphi\, M_{1(0)}$	Geschwindigkeits-Beiwert φ
2	Temperatur T_1 am Kranzaustritt	Temperatur-Verhältnis T_1/T_0	$T_{1\,\mathrm{ad}}/T_0 = (p_1/p_0)^{\frac{k-1}{k}}$	$K_T\,(T_{1\,\mathrm{ad}}/T_0)$	$K_T = \frac{1-\varphi^2}{T_{1\mathrm{ad}}/T_0} + \varphi^2$
3	Schallgeschwindigkeit a_1 am Kranzaustritt	Schallgeschwindigkeits-Verhältnis a_1/a_0	$a_{1\,\mathrm{ad}}/a_0 = \sqrt{T_{1\,\mathrm{ad}}, T_0}$	$K_a\,(a_{1\,\mathrm{ad}}/a_0)$	$K_a = \sqrt{K_T}$
4	Spez. Volumen v_1 am Kranzaustritt	Volumen-Verhältnis v_1/v_0	$v_{1\,\mathrm{ad}}/v_0 = (p_1/p_0)^{-1/k}$	$K_v\,(v_{1\,\mathrm{ad}}/v_0)$	$K_v = K_T$
5	Durchsatzgewicht G des Kranzes	Durchsatzmachzahl $\frac{V_0}{a_0 F_1} = \frac{G\,v_0}{a_0 F_1}$	$m_{\mathrm{ad}} = M_{1(0)}/(v_{1\,\mathrm{ad}}/v_0)$	$m = K_G\, m_{\mathrm{ad}}$	$K_G = \varphi/K_T$
6	Geschwindigkeit c_1 am Kranzaustritt	Machzahl c_1/a_1	$M_{1(1)} = M_{1(0)}/(a_{1\,\mathrm{ad}}/a_0)$	—	—

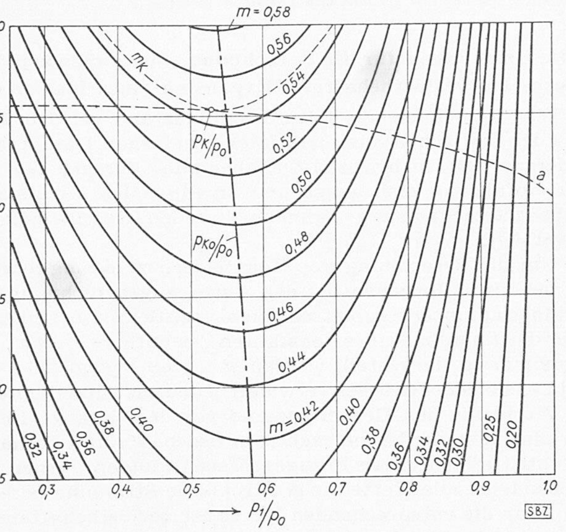

Bild 1. Durchsatz-Machzahlen in Funktion des Druckverhältnisses. a Beispiel einer Kurve für α_0 = konst.

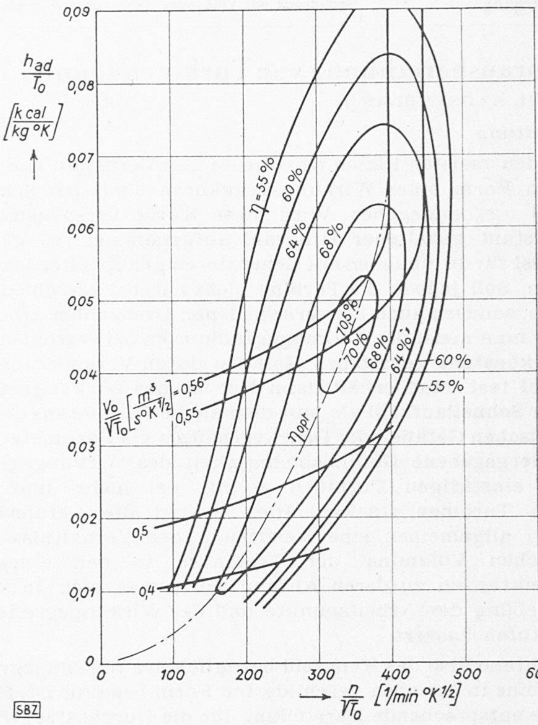

Bild 2. Beispiel eines gerechneten Turbinenkennfeldes

Für ein bestimmtes Gitter wird bekanntlich der Geschwindigkeitsbeiwert vom Zuströmwinkel α_0 zum Gitter (d. h. dem Winkel zwischen der Richtung des dem Gitter zuströmenden Gases und der Gitterfront), der Machzahl und der Reynolds'schen Zahl abhängen. Da der normalerweise interessierende Arbeitsbereich der betrachteten Turbine ziemlich begrenzt ist, sind die bei einer bestimmten Machzahl auftretenden verschiedenen Reynolds'schen Zahlen nicht allzu unterschiedlich und man wird daher berechtigt sein, den Geschwindigkeitsbeiwert φ mit genügender Annäherung als nur vom Zuströmwinkel α_0 und dem Druckverhältnis p_1/p_0 abhängig zu betrachten (vgl. z. B. für die Abhängigkeit vom Druckverhältnis [5] und [6, S. 67], für die Abhängigkeit vom Zuströmwinkel [7, 8], der letztgenannte Aufsatz mit Näherungsformeln), so dass es möglich wird, in das Kurvenblatt der Durchsatzmachzahlen m Kurven der Geschwindigkeitsbeiwerte φ des betrachteten Kranzes mit dem Zuströmwinkel α_0 als Parameter einzutragen (Beispiel in Bild 1).

Betrachten wir nun einen Kranz, in dessen Beschaufelung die engste vorhandene Durchtrittsfläche F_1 die Austrittsfläche ist, so erkennt man, dass als kritisches Druckverhältnis p_k/p_0 für einen bestimmten Zuströmwinkel α_0 jenes zu bezeichnen ist, bei dem die zugehörige φ-Linie in Bild 1 die höchstmögliche m-Linie berührt. Da in der Nähe dieses kritischen Punktes meist $\partial \varphi / \partial (p_1/p_0)$ klein ist, wurde in Bild 1 als erster Anhalt die Linie der kritischen Druckverhältnisse p_{k0}/p_0 für den Sonderfall $\partial \varphi / \partial (p_1/p_0) = 0$ (worauf der Index $_0$ bei p_k hinweisen soll) eingetragen. Dabei erhält man p_{k0}/p_0 als Lösung der Gleichung:

$$\frac{1-x}{x} \, \frac{1+\varphi^2 x}{1-\varphi^2 x} = \frac{2k}{k-1}$$

wobei $x = 1 - (p_{k0}/p_0)^{\frac{k-1}{k}}$ bedeuten soll.

Ueberschreitet das an den oben genannten Kranz angelegte Druckverhältnis seinen kritischen Wert p_k/p_0, so ist der Durchsatz mit der zu p_k/p_0 und dem dort vorhandenen φ gehörigen Durchsatzmachzahl m_k zu rechnen, während man den Austrittswinkel $\alpha_1{}^*$ der abgelenkten Strömung aus dem nicht durch Ablenkung beeinflussten Winkel α_1 in bekannter Weise aus:

$$\sin \alpha_1{}^* = \frac{m_k}{m_{\ddot{u}k}} \sin \alpha_1$$

erhält. Dabei bedeutet $m_{\ddot{u}k}$ die zum überkritischen Druckverhältnis und zu dem dabei unter Voraussetzung eines unveränderten Zuströmwinkels α_0 dem Kranz entsprechenden Geschwindigkeitsbeiwert gehörige Durchsatzmachzahl.

Diese Berechnung ist jedoch bekanntlich (vgl. [6], S. 68 ff.) nur bis zu jenem Druckverhältnis möglich, bei dem eine Strömung entsprechend der Strömung nach Prandtl-Meyer um eine Ecke erreicht ist, da von da ab zusätzliche Schwingungsverluste auftreten und berücksichtigt werden müssen. Festgestellt werden kann das Erreichen dieser Ablenkung dadurch, dass die Umfangskomponente der Austrittsgeschwindigkeit aus dem Kranz ein Maximum erreicht. Für die Ueberschreitung dieser Ablenkung sollen Berechnungsunterlagen hier nicht mehr gegeben werden, da derartig starke Ueberschreitungen des kritischen Druckverhältnisses praktisch wohl kaum in Frage kommen werden; die Umfangsleistung der Turbine würde — falls dies an der Laufbeschaufelung der Turbine eintreten sollte — bei gegebener Umfangsgeschwindigkeit und gegebenen Anfangsbedingungen bei weiterer Absenkung des Gegendruckes nicht mehr ansteigen.

Sollte der engste Durchtrittsquerschnitt des Kranzes schon vor seinem Austritt erreicht werden, es sich also um de Laval-Düsen handeln, so ist auch in diesem Falle der Durchsatz mit dem kritischen Wert m_k und dem engsten Querschnitt der Düse zu berechnen, jedoch für die Berechnung der Austrittablenkung nicht vom kritischen, sondern von dem zur gewählten Erweiterung der de Laval-Düse passenden Druckverhältnis auszugehen.

3. Aufstellung des Turbinenkennfeldes für eine Turbine bei idealem Gas [2])

Die Berechnung eines Turbinenkennfeldes wird nun so durchgeführt, dass man zunächst den Zustandsverlauf der Treibgase in den einzelnen Kränzen der Turbine von Turbinenein- nach Turbinenaustritt fortschreitend unter Benützung der in Abschnitt 2 dargelegten Unterlagen für eine Reihe von Umfangsmachzahlen $M_u = u/a_{0\,\mathrm{I}}$ (u = Umfangsgeschwindigkeit am Bezugsdurchmesser, $a_{0\,\mathrm{I}}$ = Schallgeschwindigkeit für Gesamtzustand vor der ersten Turbinenstufe) für verschiedene Druckverhältnisse am ersten Leitkranz der Turbine so bestimmt, wie er sich aus Kontinuitätsgründen einstellen muss. Dabei sind diese Unterlagen für jeden der Leitkränze jeweils bei Bezugnahme auf den Gesamtzustand vor ihm und seine engste Durchtrittsfläche ohne weiteres direkt gültig. Bei den Laufkränzen muss man als Bezugszustand den durch Aufstau der relativen Eintrittgeschwindigkeit zum jeweiligen Laufkranz erhaltenen Gesamtzustand benützen. Ausserdem muss bei den Laufkränzen das bei der Berechnung der relativen Austrittsgeschwindigkeit auftretende Glied, das eine etwaige Aenderung des mittleren Durchmessers zwischen Laufkranzein- und -austritt berücksichtigt, vernachlässigt werden, eine Vernachlässigung, die normalerweise ohne zu grosse Ungenauigkeit möglich ist. Um jeweils das Durchsatzmachzahlenblatt auf den folgenden Kranz anwenden zu können, ist es erforderlich, die Durchsatzmachzahl des ersten Leitkranzes auf den Gesamtzustand vor dem betrachteten Kranz und dessen

[2]) Die Einzelheiten des Rechnungsganges findet man in dem Aufsatz «Le calcul de champs de caractéristiques de turbines» desselben Verfassers in «Technique et Science Aéronautiques», Jg. 1948, Nr. 4, S. 227/239.

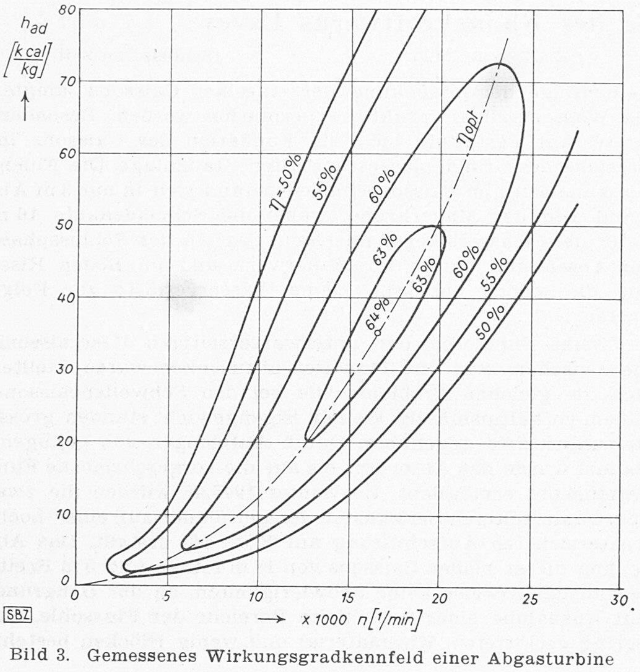

Bild 3. Gemessenes Wirkungsgradkennfeld einer Abgasturbine

Durchtrittsfläche umzurechnen. Ausserdem muss die relative Zuströmrichtung zum betrachteten Kranz durch Berechnung des vorhergehenden Geschwindigkeitsdreiecks bekannt sein.

Voraussetzung für diese Berechnungsart ist die Kenntnis der wirksamen Austrittsflächen sämtlicher Kränze und der Austrittswinkel der Strömung aus ihnen. Ebenso muss das Verhalten des Geschwindigkeitsbeiwertes eines jeden Kranzes abhängig vom Zuströmwinkel und dem an den Kranz angelegten Druckverhältnis angenommen werden. Es sei noch erwähnt, dass die hier beschriebene Methode auch die Berücksichtigung einer Veränderung der Strömungswinkel am Kranzaustritt für die verschiedenen Zuströmwinkel und angelegten Druckverhältnisse gestattet.

Wird ein Kranz kritisch, so ändern sich bei weiterer Gefällsteigerung die Zustände in den vorhergehenden Kränzen nicht mehr und die Durchsatzmachzahl des ersten Leitkranzes und damit der gesamten Turbine bleiben konstant. Die Linien konstanter Umfangsmachzahl in der Kennfelddarstellung nach [4] werden vom kritischen Punkt ab Vertikale. Wird dann das an die Turbine angelegte Druckverhältnis weiter gesteigert, so ist der überkritisch werdende Kranz nach der oben angegebenen Methode zu behandeln. Dabei kann es dann vorkommen, dass nach dem zuerst kritisch gewordenen Kranz nach und nach noch weitere Kränze kritisch werden, was in der Berechnung keine weiteren Schwierigkeiten bereitet.

Bei der Berechnung des für die Wirkungsgradbestimmung notwendigen, an die Turbine angelegten isentropischen Gesamtgefälles (in Form eines Machzahlquadrates) hat es sich aus Gründen der Rechengenauigkeit als günstiger erwiesen, diese Grösse durch entsprechende Addition der (isentropischen) Machzahlquadrate der Einzelkränze festzulegen, als sie aus dem an die Turbine angelegten gesamten Druckverhältnis zu berechnen. Dabei ist dann allerdings nach durchgeführter Addition ein entsprechender (für endliche Stufenzahl gerechneter) Wärmerückgewinnungsfaktor zu berücksichtigen. Die auch als Machzahlquadrate erhaltenen von den Einzelstufen erzeugten Leistungen werden dann ebenfalls addiert und am einfachsten mit einem konstanten Abminderungsfaktor multipliziert, um die mechanischen und Spaltverluste, sowie eine etwaige Kühlluftförderleistung bei gekühlten Laufschaufeln zu berücksichtigen. Damit können dann die in [4] angegebenen, das Verhalten der Gesamtturbine kennzeichnenden Kennzahlen berechnet werden.

4. Der inkompressible Teil des Kennfeldes

Für die kleinen Gefälle liefert die bisher beschriebene kompressible Kennfeldrechnung zu ungenaue Werte. Man wird daher vorteilhafterweise der kompressiblen Kennfeldrechnung eine inkompressible Rechnung anschliessen, um das zwischen beiden liegende Gebiet entsprechend interpolieren zu können. Die inkompressible Rechnung soll hier nur kurz gestreift werden, da die einzelnen Rechnungsgänge sehr einfach sind.

Bei der Berechnung des inkompressiblen Kennfeldes ist es von Vorteil, alle Geschwindigkeiten durch die Umfangsgeschwindigkeit $u_{1\mathrm{I}}$ zwischen Leit- und Laufrad der ersten Stufe dimensionslos zu machen, also z. B. statt mit c_1 mit $c_1/u_{1\mathrm{I}}$ zu rechnen. Entsprechend sind dann alle Gefälle durch das Gefälle $u_{1\mathrm{I}}^2/2g$ dimensionslos zu machen, das zur Erzeugung von $u_{1\mathrm{I}}$ nötig wäre, sofern $u_{1\mathrm{I}}$ durch verlustlose Expansion erzeugt würde.

Da bei der Annahme inkompressibler Treibgase die Verluste auf die spezifischen Volumina der Treibgase keinen Einfluss haben, kann man sofort aus der absoluten Austrittsgeschwindigkeit $c_{1\mathrm{I}}$ des ersten Leitrades, dargestellt in der Form $c_{1\mathrm{I}}/u_{1\mathrm{I}}$, sämtliche andern Leitrad-Austrittsgeschwindigkeiten $c_1/u_{1\mathrm{I}}$ und die relativen Laufrad-Austrittsgeschwindigkeiten $w_2/u_{1\mathrm{I}}$ durch Umrechnung entsprechend den Querschnitts- und Durchsatzgewichtsverhältnissen erhalten. Die weitere Rechnung spielt sich dann in der selben Weise ab wie bei der kompressiblen Rechnung.

Es sei noch erwähnt, dass man durch entsprechende Weiterentwicklung der Gedankengänge von Bidard [3] nachweisen kann, dass die Linien konstanter Umfangsmachzahl im inkompressiblen Teil des nach [4] aufgetragenen Kennfeldes Geraden sind, die alle durch den selben Punkt der negativen Ordinatenaxe gehen. Dieser Punkt liegt — wie M. Lamblin, ein Mitarbeiter des Verfassers, ableitete — umso tiefer, je grösser die Stufenzahl der Turbine ist. Dadurch werden die im Bereich positiver Leistungen von der Turbine aufnehmbaren Durchsatzänderungen umso kleiner, je höher die Stufenzahl der Turbine wird.

5. Beispiel eines gerechneten Turbinenkennfeldes

In Bild 2 ist als Beispiel ein gerechnetes Turbinenkennfeld wiedergegeben [3]). Neben der bekannten Veränderung des Wirkungsgrades mit der Schnellaufzahl, also der Drehzahl, bei festgehaltenem Gefälle erkennt man auch die Veränderung des Wirkungsgrades mit dem an die Turbine angelegten Gefälle. Zum Vergleich dazu ist in Bild 3 ein gefahrenes Wirkungsgradkennfeld einer Abgasturbine wiedergegeben, das offenbar die selben wesentlichen Züge aufweist, wie das gerechnete. Da das gefahrene Kennfeld in der hier wiedergegebenen Darstellungsart vorlag, wurde für das gerechnete Kennfeld die selbe Auftragungsweise und nicht die in [4] angegebene gewählt. Aus dem selben Grunde entsprechen die eingetragenen Wirkungsgrade der im Dampfturbinenbau üblichen Definition.

Ein entsprechender Vergleich für das Durchsatzkennfeld $V_0/\sqrt{T_0}$ ist dem Verfasser leider nur für niedrige Gefälle zugänglich gewesen und zeigte ebenfalls gute Uebereinstimmung mit dem vorausberechneten Kennfeld. Interessant ist das Verhalten der Turbine in der Umgebung jener Linien, an denen Leit- bzw. Laufrad kritisch werden. Leider sind dazu versuchsmässige Unterlagen dem Verfasser noch nicht bekannt geworden. Oberhalb der kritischen Linie für das Laufrad sinken jedenfalls die Wirkungsgrade der Turbine stark ab, wobei der Abfall bei Erreichung der Prandtl-Meyerschen Ablenkung so stark wird, dass auch bei weiterer Absenkung des Gegendruckes und sonst konstant gehaltenen Bedingungen die effektive Leistung der Turbine nicht mehr weiter ansteigt.

Literaturverzeichnis

[1] Sörensen, Einheitsdiagramme für Dampfturbinen. Z. VDI, Bd. 83/1939, S. 565 ff.

[2] Bammert-Korbacher, Die Kennfelder einstufiger Ueberdruckturbinen. Die Technik, Jg. 1/1946, S. 233 ff. und 295 ff.

[3] René Bidard, Leçons sur la propulsion thermique des avions et les turbomachines, S. 125.

[4] Hausenblas, Ueber Turbinenkennfelder. SBZ 1948, Nr. 8, S. 108*, oder
Hausenblas, Considérations sur les champs de caractéristiques de turbines. Technique et Science Aéronautiques, No 1/1948, S. 50 ff.

[5] Wewerka-Schmidt, Untersuchung von Lavaldüsen und Mündungen. Forschungsbericht Nr. 1409 der Deutschen Luftfahrtforschung.

[6] Flügel, Die Dampfturbinen, Leipzig 1931.

[7] Knörnschild-Leist, Untersuchungen an Turbinenschaufelgittern. Jahrbuch 1939 der Deutschen Luftfahrtforschung, S. II 204 ff., Abb. 20 und 22.

[8] Hausenblas, Versuche an Turbinenlaufschaufelgittern. (Wird demnächst erscheinen.)

[3]) Das Kennfeld wurde von A. Pfleghaar, einem Mitarbeiter des Verfassers, gerechnet.