

# Die Zweifelsche Kennzahl: und andere Kennzahlen im Turbinenbau (Reminiszenzen)

Autor(en): **Seippel, Claude**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **94 (1976)**

Heft 30

PDF erstellt am: **28.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73134>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## Zum 65. Geburtstag von Professor Otto Zweifel

DK 92

Am 29. Juli dieses Jahres feiert Prof. O. Zweifel seinen 65. Geburtstag. Er kann auf 23 Jahre erfolgreiche Lehrtätigkeit an der ETH zurückblicken. Mit seiner Berufung zum Professor für Maschinen im Bau- und Transportwesen übernahm er im Jahre 1953 die nicht einfache Aufgabe, Bau- und Kultur-Ingenieure in eine Materie einzuführen, die ein volles Studium in Anspruch nehmen könnte. Dank seiner besonderen Fähigkeit, Probleme auf das Grundsätzliche zurückzuführen, ist es ihm gelungen, seine Vorlesungen für die Studenten attraktiv und gleichzeitig lehrreich zu gestalten. Die Ergänzung seiner Vorlesungen mit Demonstrationen und Übungen im Laboratorium förderten das Verständnis für eine Materie, die den meisten Studenten der zwei Abteilungen fremd ist. Sein persönliches Engagement im Unterricht und sein Interesse für die Probleme der Studenten haben ihn zu einem geschätzten Lehrer gemacht.

In seiner Forschungstätigkeit fand das Gebiet des Seilbahnbaues seine besondere Vorliebe. In dem von ihm aufgebauten Institut für Bau- und Transportmaschinen hat er die Forschung auf diesem Gebiet aufgegriffen und auf einen hohen Stand gebracht. Seine persönlichen Beiträge und seine Fähigkeit, jüngere Ingenieure dafür zu interessieren, sie mit wertvollem Rat zu leiten und ihnen beizustehen, haben zur Bildung einer Forschungsgruppe geführt, die nicht nur im nationalen Rahmen sondern auch international Anerkennung findet.

Obwohl von seiner Ausbildung her Maschineningenieur, hat sich Otto Zweifel sehr rasch mit den Problemen der Ausbildung von Bau- und Kulturingenieuren vertraut gemacht. Seine Mitwirkung bei der Gestaltung des Unterrichts und den übrigen Problemen der Abteilungen wurde von seinen Kollegen sehr geschätzt und gesucht.

In den Jahren 1958 bis 1962 bekleidete er auch das Amt des Vorstandes der Abteilung für Kulturingenieurwesen.

Sein Bestreben war immer, junge Absolventen unserer Abteilungen zu Ingenieuren zu erziehen. Dabei kam ihm seine langjährige Erfahrung aus der Praxis zugute.

Otto Zweifel hat im Jahre 1936 das ETH-Diplom als Masch.-Ing. erhalten. Nach zweijähriger Tätigkeit als Assistent bei Prof. G. Eichelberger hat er die ETH verlassen. Die nächsten neun Jahre verbrachte er bei der Firma AG Brown Boveri & Cie. in Baden. Das war eine schöpferische Zeit, an die er immer wieder gerne zurückdenkt. Zu der Zeit wurde er in der Fachwelt durch seine Arbeiten auf dem Gebiet der Turbinenbeschaukelungen bekannt. Im Jahre 1946 übernahm er die Leitung des technischen Büros der SIG-Waggonfabrik, deren Direktionsmitglied er im Jahre 1948 wurde. Eine Fülle neuer technischer Probleme und organisatorischer Aufgaben stellte seine vielseitigen Begabungen auf Probe.

Zu jener Zeit liess er sich am Ufer des Rheins häuslich nieder, der ihm viele Stunden der Erholung bot. Auch nach seiner Berufung an die ETH hat er seinen Wohnsitz in Neuhausen beibehalten, von wo aus er mit seinem Weidling die schöne Rheinlandschaft geniessen kann.

Nun verlässt unser lieber Kollege Zweifel auf Ende September die Hochschule, um in den Ruhestand zu treten. Wir alle wünschen ihm noch viele schöne Jahre, in welchen er mit Musse und im Kreise seiner Familie seinen vielseitigen humanistischen Interessen nachgehen kann.

Prof. Dr. Th. Dracos, ETHZ, Vorstand Abteilung II

## Die Zweifelsche Kennzahl

### Und andere Kennzahlen im Turbinenbau (Reminiszenzen)

DK 62-135

Frühzeitig wurden im Turbinenbau Kennzahlen eingeführt, indem einige der in einem Problem erscheinenden variablen oder konstanten Grössen zu einem Ausdruck vereinigt werden, der den Einfluss der Grössen zusammenfasst und daher gestattet, die Anzahl der zu behandelnden Werte zu beschränken. Dabei geniesst der Fachmann eine gewisse Freiheit. Als Beispiel nehmen wir die Reynoldssche Zahl  $Re = wd\rho/\eta$  und die Machzahl  $Ma = w/a$  (die Symbole sind geläufig), welche zur Erfassung kompressibler, viskoser Ströme allgemein verwendet werden. Jede Kombination

$$K = \alpha Re^\beta Ma^\gamma$$

bei der  $\alpha, \beta, \gamma$  beliebige Zahlen sind, ist eine zulässige Kennzahl, die an Stelle einer bisherigen treten kann.  $K = a d\rho/\eta$  ist eine solche. Die Wahl unter den Möglichkeiten ist eine Frage der Zweckmässigkeit, man möchte sagen der Ästhetik eines Textes und auch eine Aufgabe der Verständigung im Fach. Heute werden ausschliesslich dimensionslose Kennzahlen anerkannt, das heisst solche, deren Zahlenwert in jedem konsistenten Masssystem derselbe ist. Oft gestattet eine einfache Dimensionsanalyse, geeignete Kennzahlen zu finden.

Nicht immer waren die gebräuchlichen Kennzahlen dimensionslos. Den Zusammenhang zwischen der Gasarbeit  $y$  einer Stufe (dem Stufengefälle) und der Umfangsgeschwindigkeit  $u$  kennzeichneten die Aktionsturbinen-Fachleute stets mit dem dimensionslosen  $u/c$ , wo  $c = \sqrt{2y}$  (früher schrieb man im «technischen» Masssystem  $c = \sqrt{2gh/A}$ !). Die Erbauer der Reaktionsturbinen verwendeten dagegen die Parsonsche Kennzahl  $\omega = u^2/h$ , wo unter  $h$  das Stufengefälle in kcal/kg «Gewicht» zu verstehen war.  $\omega$  war nicht aus physikalischen Gründen dimensionsbehaftet, sondern wegen des inkonsistenten Masssystems, mit dem man heute hoffentlich aufgeräumt hat. Schon anfangs Jahrhundert führte Rateau im Kompressorbau ein dimensionsloses  $\mu = y/u^2$  ein. Später fand die Kennzahl  $\psi = (y/u^2)/2$  Anklang. Selbstverständlich ist auch diese zulässig. Die ältere Form hat jedoch folgenden Vorteil: Neben dem Stufengefälle ist die Stufenarbeit  $a$  je Masseinheit von Interesse. Diese beträgt bei einer Axialturbine

$$a = u \cdot \Delta w_t$$

wo  $\Delta w_t$  die tangentielle Ablenkung ist. Neben  $\mu$  definiert man

$$\mu_a = \eta \cdot \mu = \frac{a}{u^2}$$

und man erhält  $\mu_a = \Delta w_t / u$ . Daher ist  $\mu_a$ , neben dem Verhältnis der Normal- zur Umlaufgeschwindigkeit  $\varphi = w_n / u$  im Geschwindigkeitsdiagramm (Bild 1) gut zu interpretieren.

Beiläufig hat Rateau auch eine weitere dimensionslose Volumen Kennzahl

$$\delta = \frac{V}{u^2 R}$$

eingeführt, die sich im Verdichterbau als äusserst fruchtbar erwies. Verhältnismässig spät erkannten die Turbinenbauer den Wert dieser Kennzahl und deren Zusammenhang mit den «Endverlusten» der Turbinenschaufeln.

Eine besonders glückliche Hand hatte Zweifel, zur Zeit als wir das Vergnügen hatten, ihn im Turbinenbureau von Brown Boveri zu haben, mit der Einführung einer Kennzahl, welche die aerodynamische Belastung der Turbinenschaufeln erfasst. Vom Tragflügel wusste man, dass er unter Überlastung plötzlich absackt. Von Anfang an schenkte man den Auftriebs- und Widerstandskennzahlen  $C_A$ ,  $C_W$  für die Kräfte senkrecht und parallel zur Flugrichtung die nötige Aufmerksamkeit. Auch beim Axialkompressor stellte man dieses Absacken fest. Es verursacht das «Pumpen» des Verdichters bei Überlastung. Daran scheiterten zweifellos die ersten Axialkompressoren von Parsons. Anders bei der Turbine: Mit steigender aerodynamischer Belastung fallen die Schaufelkräfte nicht plötzlich zusammen, sondern es sinkt der Wirkungsgrad, was weniger dramatisch ist. Daher übersah man die Bedeutung der aerodynamischen Belastung lange Zeit, eben bis Zweifel sich ihrer annahm.

Den Auftrieb und den Widerstand des Einzelflügels bezieht man auf das Quadrat der Fluggeschwindigkeit, oder wenn

der Flügel feststeht, die relative Strömungsgeschwindigkeit in grossem Abstand vom Flügel, die wir mit  $w_\infty$  bezeichnen. Sie ist vor und hinter dem Flügel gleich. Ist der Flügel jedoch in einem Gitterverband, so ist der Geschwindigkeitsvektor vor und hinter dem Gitter ungleich. Das Strömungsfeld eines Gitters kann man als eine Superposition einer ebenen Parallelströmung und eines Feldes von Wirbelfäden, die längs der Schaufelkonturen verlaufen, betrachten. Entfernt man die Wirbel, so verbleibt die Parallelströmung, und man weist leicht nach, dass sie das vektorielle Mittel aus den Geschwindigkeiten vor und nach dem Gitter ist. Da sie unbegrenzt ist, bezeichnen wir sie auch mit  $w_\infty$ . Es ist  $w_\infty = (\vec{w}_1 + \vec{w}_2) / 2$ . Man weist leicht nach, dass die Gitterkraft senkrecht zu  $w_\infty$  keine Energiedissipation erzeugt und daher mit Auftrieb bezeichnet werden kann. Die Kraftkomponente parallel zu  $w_\infty$  ist hingegen für die Dissipation verantwortlich und ist der Widerstand. Sowohl für den Einzelflügel wie für das Flügelgitter definiert man die Kennzahlen  $C_A$ ,  $C_W$  folgendermassen:

$$\begin{aligned} \text{Auftrieb } A &= C_A F \frac{\rho}{2} w_\infty^2 \\ \text{Widerstand } W &= C_W F \frac{\rho}{2} w_\infty^2 \end{aligned} \quad (1)$$

Das Verhältnis  $W:A$ , welches dem Winkel eines Gleitfluges entspricht, nennt man die Gleitzahl  $\epsilon$ . Die Auftriebskennzahl  $C_A$  misst die aerodynamische Belastung der Tragfläche. Am tiefsten ist die Gleitzahl eines Flügels, wenn der Auftriebsbeiwert in der Gegend von 0,7 bis 1,0 liegt. Darunter hat der Flügel unnötig viel reibende Fläche, darüber treten auf dem Schaufelrücken Übergeschwindigkeiten und Ablösungen auf. Das gleiche gilt für lichte Tragflügelgitter in Kompressor oder Turbine, die den Strom nur schwach ablenken sollen. Stark ablenkende Turbinengitter ertragen dagegen wesentlich stärkere Auftriebsbeiwerte ohne Schaden. Damit verliert aber  $C_A$  seinen Wert als Kennzahl zur Beurteilung der Belastung. Zweifel schlägt daher folgenden Weg ein [1]: Er definiert eine Belastungsziffer  $\psi$  als das Verhältnis der Tangentialkraft der Schaufel zu einer ideellen Tangentialkraft, welche entstehen würde, wenn auf der ganzen Gitterbreite hohlseitig der Gesamtdruck des Austrittsstromes, rückenseitig dessen statischer Druck herrschen würde. In den Geschwindigkeiten ausgedrückt:

$$(2) \quad \psi = \frac{2 w_n \Delta w_t}{w_2^2} \frac{t}{b}$$

$w_n$  ist die Normalkomponente des Stromes

$\Delta w_t$  die tangentielle Ablenkung

$w_2$  die Austrittsgeschwindigkeit

$b$  die axiale Gitterbreite

$t$  die Schaufelteilung

Das Verhältnis des Auftriebsbeiwertes zu  $\psi$  ist (approximativ)  $C_A / \psi = w_2^2 / w_\infty^2$ , ist bei schwacher Ablenkung ungefähr 1, beträgt bei der starken Ablenkung in Bild 1 z. B. 5.  $\psi$  ist also eine ganz andere Kennzahl als  $C_A$ . Die Formel (2) liefert nicht etwa eine Theorie der Belastbarkeit, sondern sie liefert als Kennzahl, gewissermassen eine Perspektive, in welcher man die Wirklichkeit betrachten kann, insbesondere, um Anhaltspunkte für die Wahl der günstigsten Teilungen zu erhalten. Das Ergebnis, das Zweifel vermutet hatte und bestätigt fand, und welches auch heute noch gilt, ist, dass die günstigsten  $\psi$ -Werte im Bereich von 0,7 bis 1,0 liegen, wie das  $C_A$  der Einzelflügel, in anderen Worten, dass man die Schaufeln mit nahezu dem Staudruck der Austrittsgeschwindigkeit belasten kann.

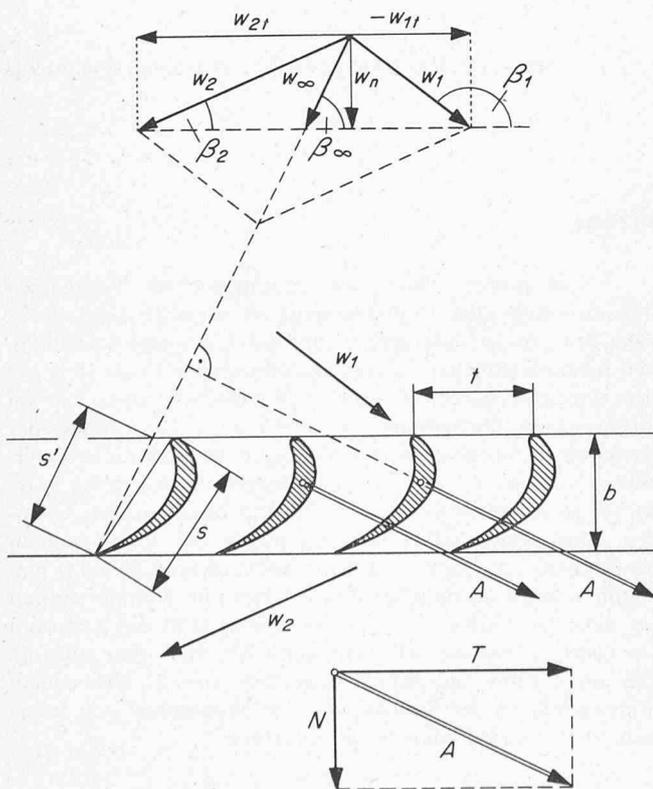


Bild 1. Geschwindigkeiten und Kräfte bei verlustfreier Strömung durch ein Schaufelgitter nach Zweifel [1]. Die resultierende Auftriebskraft  $A$  steht senkrecht auf der ideellen Anströmgeschwindigkeit  $w_\infty$

In den Figuren, welche Zweifel für die Darstellung der Verluste in Funktion von  $\psi$  verwendet, werden die Verluste auf die Austrittsenergie bezogen oder durch die Gleitzahl  $\varepsilon$  ausgedrückt. Der Verlust  $i$  je Masseneinheit

$$i = \zeta \frac{w_2^2}{2}$$

oder, wie man aus den Formeln des Artikels von Zweifel ableitet

$$(3) \quad i = \varepsilon \frac{\Delta w_t}{w_n} w_\infty^2$$

Die Kennzahlen  $\zeta$  und  $\varepsilon$  sind zwar geeignet, um die relative Güte von Gittern verschiedener Teilungen zu beurteilen; für die absolute Güte sind sie kein Mass. Beispielsweise ist  $\zeta$  für ein stark umlenkendes, gutgeformtes Gitter ein Mehrfaches des  $\zeta$  für schwache Ablenkung. Von  $\varepsilon$  gilt dies in geringerem Masse ebenfalls. Daher hat man später in Fortsetzung der Zweifel'schen Gedankengänge geeignetere Kennzahlen für die Erfassung der Verluste gesucht. Eine solche ist die «mittlere Gleitzahl  $\bar{\varepsilon}$ ». Sie wird durch eine Integration von Teilablenkungen gewonnen und liefert

$$(4) \quad i = \bar{\varepsilon} \frac{\Delta w_t}{w_n} \left[ w_\infty^2 + \frac{1}{12} (\Delta w_t)^2 \right]$$

Die mittlere Gleitzahl ist seit vielen Jahren bei Brown Boveri in Gebrauch. Da anderswo wenig beachtet, wurde sie in einer kürzlichen Abhandlung in Erinnerung gerufen und begründet [2]. Es ist ohne Gegenstand, zu prüfen, ob die mittlere Gleitzahl richtig oder falsch sei. Sie ist die zulässige, freie Wahl einer Kennzahl und kann, wenn man mit konsistenten Mittelwerten rechnet [3] auf jederlei Gitter angewendet werden. Richtig oder falsch ist nur die Behauptung, sie sei ein bequemes Mass für die Beurteilung der Güte von Gittern mit sehr verschiedenen Strömungswinkeln. Der Ausdruck (4) unterscheidet sich vom Ausdruck (3) durch das 2. Glied in der Klammer. Bei schwacher Umlenkung kann dieser vernachlässigt werden. Im Falle des Bildes 1 ist aber bereits  $\Delta w_t/w_\infty = 3$  und das Glied von Gewicht.

#### Literaturverzeichnis

- [1] O. Zweifel: Die Frage der optimalen Schaufelteilungen von Turbomaschinen, insbesondere bei grosser Umlenkung in der Schaufel. «Brown Boveri-Mitteilungen» 1945, S. 436.
- [2] C. Seippel: Über den Reaktionsgrad der Turbinen. «Brown Boveri-Mitteilungen» 1975, S. 92.
- [3] L. S. Dzung: Konsistente Mittelwerte in der Theorie der Turbomaschinen für kompressible Medien. «Brown Boveri-Mitteilungen» 1971, S. 485.

Adresse des Verfassers: Dr. Ing. Claude Seippel, Arterstrasse 28, 8032 Zürich.

## Prof. O. Zweifel und die Seilbahnbauer

### Beitrag zur Geschichte der starren Trageilverankerung

Von A. Schönholzer, Thun

DK 92:625.97

Es war einfacher, den ehrenvollen Auftrag zur Abfassung eines Beitrages für diese Sonderausgabe anzunehmen, als das gegebene Versprechen rechtzeitig einzulösen. Schön wäre es, die Verdienste Prof. Zweifel's auf dem Gebiete des Seilbahnbaues in einer anspruchsvollen und auf seinen Forschungen fussenden Arbeit zu würdigen, doch war dies in der vorgegebenen Zeit einfach nicht möglich. Näher lag daher, den Ausweg in Form einer Berichterstattung über die praktischen Auswirkungen seiner theoretischen Untersuchungen auf dem Gebiet der Seilstatik zu suchen. Aber es fiel mir schwer, zu diesem Thema die gebotene Distanz zu wahren, und das eigene Engagement gebührend in den Hintergrund zu drängen. Dafür erlauben die freie Gestaltung des Beitrages und mein ungefähr gleicher Jahrgang einen herzhaften Blick rückwärts in die Vorgeschichte und die Reminiszenzen.

Wer sind sie überhaupt, diese Seilbahnbauer, die ich mit Prof. O. Zweifel und seinem Lehrstuhl an der ETH in Beziehung setzen möchte? Die Frage mag befremdlich anmuten, sie ist aber durchaus berechtigt, denn die Gilde der Seilbahnbauer bestand früher und besteht zum Teil auch heute noch aus sehr unterschiedlich gearteten und voneinander weit entfernten Zweigen. Man konnte etwa vereinfacht von Theoretikern und Praktikern sprechen, doch wurde diese Definition der tatsächlichen Situation nie gerecht.

Rückblickend darf gesagt werden, dass vor 30 Jahren eigentlich nur die Konstrukteure von grossen oder industriellen Transportanlagen als zünftige Seilbahnbauer galten, obwohl erst wenige Anlagen gebaut waren. Daneben, sozusagen auf der minderen Seite, befanden sich die Handwerker, die reinen Praktiker, eben die berufsmässigen Seilbahnbauer. Ihre Tätigkeit war, im Gegensatz zu derjenigen der Zünftigen, von Vorschriften und technischen Normen kaum gehemmt; kantonale Reglemente schränkten ihre Tätigkeit nur unwesentlich

ein, einzig die Bundesverordnung über den gewerbmässigen Personentransport in Kabinen mit mehr als 4 Personen Fassung setzte eine Grenze.

Zwischen diesen beiden Zweigen des Faches gab es keine Verbindung, es gab keine gemeinsamen Grundlagen, so wenig wie die Fakultät der Seilbahnbauer an der ETH vertreten waren. Während die Zünftigen da und dort viel bewunderte Bahnen schufen, geprüft und abgenommen durch das Eidg. Post- und Eisenbahndepartement, bauten die Minderen ihre Bahnen zu Dutzenden in der Stille. Sie hatten ihre eigene Technologie entwickelt, sie transportierten Lasten bis zu 3 t (entsprechend 40 Personen bei den Zünftigen), und mit zum Teil beachtlichen und höchst zweckmässig ausgebildeten Einzelteilen. Vielerorts kam ein erstaunliches Gefühl für richtige und harmonische Konstruktionen zum Ausdruck.

Intuitiv und augenfällig schön ausgebildete Teile sind ja meistens, ich wage dies zu behaupten, gut konstruiert, selbst wenn sich das Gefühl für Harmonie nur in zierlich geschmiedeten Gestängen manifestierte.

Sie erschlossen mit ihren Bahnen auf denkbar wirtschaftliche Art abgelegene Siedlungen und unzugängliche Waldungen, und trugen wesentlich dazu bei, dem heute für unseren Landschaftscharakter als notwendig erkannten Bergbauernstand das Ausharren auf den abgelegenen Höfen zu erleichtern. Aber, da eine anerkannte technische Aufsicht fehlte, haftete diesen sogenannten «kantonalen Bahnen» der Geruch der Gefährlichkeit, des Unzuverlässigen an. Vor ihrer Benutzung wurde regelrecht gewarnt, nicht immer ganz zu Unrecht. Aber die liebevolle Pflege durch die Besitzerfamilien überbrückte da und dort technische Mängel.

Worin unterschieden sich denn diese beiden Traditionen eigentlich, die der zünftigen Seilbahnindustrie und die der Seilbahnbauer? In die Augen springend war jedenfalls die