

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 91 (1973)  
**Heft:** 1

**Artikel:** Die Traglasttheorie der Statik als mathematisches Modell  
**Autor:** Betten, J.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-71774>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

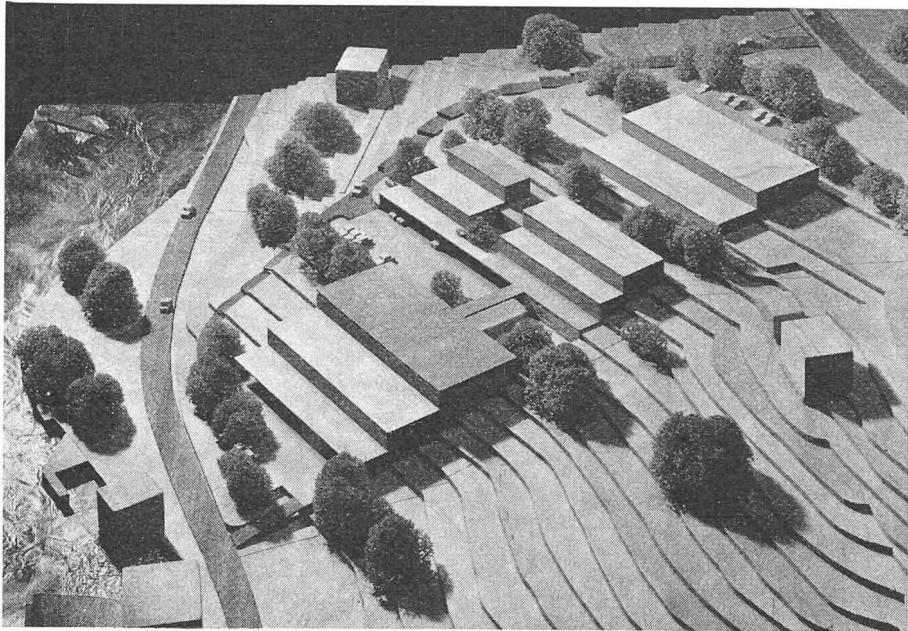
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**



Das künftige Seenforschungsinstitut der EAWAG von Nordosten. Das Bild zeigt den Vollausbau der Anlage zwischen der projektierten Uferstrasse (links) und der vorgesehenen Höhenstrasse (Ecke oben rechts). Unten links das alte hydrobiologische Laboratorium

**Bauherrschaft:** EAWAG, Dübendorf.

**Vertreter der Bauherrschaft:** Delegierter des Schulrates für die Annexanstalten.

**Baufachorgan:** Direktion der Eidg. Bauten, Bern; Bauinspektion V, Zürich.

**Projektverfasser:** Roland Mozzati, Architekt, Luzern; Mitarbeiter: Roman Lüscher, Architekt, Luzern.

**Statik:** Ingenieurgemeinschaft Plüss u. Meyer/E. Zemp, Luzern.

**Baugrunduntersuchung:** VAW-ETH Zürich, Institut für Erd- und Grundbau.

**Elektroanlagen:** Elektr.-Ing. Scherler AG, Luzern.

**Heizungs- und Lüftungsanlagen:** E. Bertsch, Heizung u. Lüftung, Luzern.

**Sanitäranlagen:** Gianotti: u. Schudel, Sanitäringenieure, Winterthur.

## Die Traglasttheorie der Statik als mathematisches Modell

Von J. Betten, Aachen, Mitteilung aus dem Institut für Werkstoffkunde der RWTH Aachen

DK 624.04

In dem vorliegenden Aufsatz wird gezeigt, dass die Traglasttheorie als mathematisches Modell aufgefasst werden kann. Dazu werden zunächst im Sinne der mathematischen Logik der Begriff einer mathematischen Theorie, insbesondere das Wesen einer axiomatisierten Theorie, und der Modellbegriff näher erörtert.

Das mathematische Modell der Traglasttheorie beruht auf dem Prinzip der virtuellen Verschiebung an der Versagensgrenze als Axiom. Daraus lassen sich die Traglastsätze ableiten, die eine Eingabelung der Traglast durch eine obere und untere Schranke ermöglichen (Schrankenmethode). Zum mathematischen Modell der Traglasttheorie gehört schliesslich noch die Gruppe der Voraussetzungen, die einerseits über den erforderlichen Rechenaufwand zur Ermittlung der Tragfähigkeit entscheidet und andererseits die Güte des Modells bestimmt.

laufzeiten der Planeten wie die Kuben ihrer grossen Halbachsen verhalten, nur näherungsweise, da die Massen der Planeten relativ zur Sonnenmasse unberücksichtigt bleiben. Weiterhin beinhaltet das erste Keplersche Gesetz, nach dem sich die Planeten auf Ellipsenbahnen um die Sonne (als einen Brennpunkt) bewegen, ein anschauliches Modell des Sonnensystems. Ebenso beruhen vielfach Atomtheorien, wie z.B. die von Rutherford, auf anschaulichen Modellen.

Der Modellbegriff steht somit für die gegenüber der Wirklichkeit vereinfachten, idealisierten Vorstellung einer physikalischen Gegebenheit: Das Modell ist ein idealisiertes Abbild der Wirklichkeit. Es wird entscheidend präzisiert durch die grundlegenden Annahmen und Voraussetzungen des darauf gestützten methodischen Rechenverfahrens (Algorithmus) [3].

### Mathematische Theorie und mathematisches Modell

Mathematische Modelle werden in mathematischen Theorien, meist axiomatisierten Theorien, benutzt. Die Frage «Was ist eine mathematische Theorie?» ist eine metamathematische Frage [4].

Theorie heisst ursprünglich soviel wie Betrachtung ( $\theta\epsilon\omega$ - $\rho\epsilon\nu$  = anschauen). Jedoch hat sich die Auffassung des Begriffs «Theorie» von der Antike (Aristoteles) über das Mittelalter (Pascal) bis zur Jetzzeit (Bolzano, Tarski) gewandelt. Man unterscheidet den klassischen und den modernen Begriff einer mathematischen Theorie [5].

Der klassische Begriff einer mathematischen Theorie geht auf Aristoteles zurück und wurde von Pascal (1655) neu formuliert. Nach der mathematischen Methode von Pascal definiert man alles, was nicht undefinierbar ist, und beweist alles, was

### Allgemeines über den Modellbegriff

Der Begriff des Modells wird häufig auf anschauliche, mitunter verkleinerte bzw. vergrosserte Darstellungen angewandt. In diesem Sinne wird etwa der Architekt das Modell eines auszuführenden Bauwerks herstellen. Ein ähnliches Beispiel ist ein Relief als Modell einer Landschaftsoberfläche. Kein Modell jedoch wird alle Eigenschaften der darzustellenden Wirklichkeit vollständig wiedergeben. Das Modell ist nur Modell in bezug auf bestimmte Eigenschaften und Relationen [1].

In ähnlicher Weise haben die empirischen Wissenschaften Modelle entwickelt, die nur in bezug auf bestimmte Relationen der darzustellenden Erfahrungswirklichkeit mit dieser unter bestimmten Voraussetzungen übereinstimmen [2]. So gilt z.B. das Keplersche Gesetz, nach dem sich die Quadrate der Um-

nicht unbeweisbar ist. Wörter oder Redeweisen sind dann *undefinierbar*, wenn ihre Bedeutungen so klar sind, dass sie einer Präzisierung weder fähig sind noch bedürfen. Eine Aussage soll als *unbeweisbar* gelten, wenn die durch sie ausgedrückte Wahrheit so evident ist, dass sie eines Beweises weder fähig noch bedürftig ist. In der klassischen Theorie werden die Aussagen in der Pascalschen Sprache formuliert, die sich aus *Urwörtern* (undefinierbar) und ihren *Derivaten* (von Urwörtern ableitbar) zusammensetzen. Die Sätze einer mathematischen Theorie im Pascalschen Sinne zerfallen ebenfalls in zwei Klassen: in die Klasse der den Urwörtern entsprechenden *Grundsätze* oder *Prinzipien* (bzw. *Axiome*) und in die Klasse ihrer *Derivate*, die aus den Grundsätzen ableitbar sind und als *Lehrsätze* bezeichnet werden. Grundsätze sind unbeweisbar, d.h., sie sind eines Beweises weder fähig noch bedürftig. Dagegen müssen alle Lehrsätze einer mathematischen Theorie mit Hilfe der Grundsätze beweisbar sein.

Der moderne Begriff einer mathematischen Theorie geht auf Bolzano (1837) und Tarski (1935) zurück. Darunter versteht man den «Inbegriff aller mathematischen Wahrheiten», die in einer geeigneten Sprache (Bolzano-Sprache) dieser Theorie dargestellt werden können. Alle Sätze in der mathematischen Bolzano-Sprache sind *axiomatisch-deduktiv* erklärt, d.h. als die Folgerungen (Konsequenzen) einer endlichen Menge mathematischer Aussageformen. Das führt auf den mathematischen Folgerungsbegriff [6]. Somit sind auch im Bolzanoschen Sinne mathematische Theorien axiomatisiert, d.h., in ihrer Darstellung werden gewisse Sätze dieser Theorie als Axiome an den Anfang gestellt, und zwar derart, dass alle übrigen Sätze (*Theoreme* bzw. *Derivate*) der Theorie aus den Axiomen (*Axiomensystem*) gefolgert bzw. abgeleitet werden können. Der wesentliche Unterschied zwischen der klassischen und modernen Auffassung einer mathematischen Theorie liegt in den Anforderungen, die an ein Axiomensystem gestellt werden. Entgegen der klassischen Auffassung brauchen Axiome im modernen Sinne *nicht evident* zu sein [7]. Axiome werden als Aussagen verstanden, die Beziehungen zwischen den Elementen vorgegebener Mengen festlegen. Sie sind nur brauchbar, wenn sich aus ihnen keine Widersprüche herleiten lassen. Ein Axiomensystem ist *widerspruchsvoll*, wenn es zwei Theoreme der Form « $T_i$ » und « $\neg T_i$ » gibt. Im anderen Falle ist es *widerspruchsfrei*. Das Postulat der *Widerspruchsfreiheit* (logische Wahrheit) eines gegebenen Axiomensystems wird durch die Konstruktion eines logischen Modells nachgewiesen, d.h., die Widerspruchsfreiheit eines Systems ist gesichert durch ein mathematisches Modell dieses Systems.

In den bisherigen Ausführungen sind die wesentlichen Merkmale (*Axiome*, *Derivate*) mathematischer Theorien im klassischen und modernen Sinne skizziert. Dabei wurde auf eine dritte Gruppe, nämlich die der Annahmen und Voraussetzungen, die auch zum wesentlichen Inhalt eines mathematischen Modells gehören, nicht näher eingegangen. Um die mathematische Lösung insbesondere technischer Probleme zu ermöglichen, werden Modelle zugrunde gelegt, die Gruppen von sinnvollen Annahmen enthalten. Die Annahmen bestimmen entscheidend die Güte eines Modells: Es ist um so besser, je weniger weit sich die Annahmen von der Wirklichkeit entfernen. Um bessere Übereinstimmung mit Messergebnissen (häufig mit der Wirklichkeit identifiziert!) zu erhalten, können die in den Lösungen auftretenden Parameter bzw. Freiwerte korrigiert werden, so dass sie nicht als physikalische Konstanten und Stoffwerte angesehen werden können. Aus diesem Grunde werden die Modelle immer weiter verfeinert, d.h., man passt die Annahmen immer mehr der Wirklichkeit an, muss aber die dadurch meist auftretenden mathematischen Schwierigkeiten in Kauf nehmen. Dieser Aufwand lohnt sich insbesondere, wenn dadurch die eingeführten Freiwerte den Charakter eines anpassbaren Parameters verlieren und vielmehr physikalische

Konstanten oder Stoffwerte widerspiegeln. Diese Kennwerte können dann und nur dann *unabhängigen Messungen* (Grundversuchen) entnommen und in die gefundenen (aufgestellten) Beziehungen eingesetzt werden.

Andererseits kann gerade durch die Verfeinerung eines Modells eine zunächst als vermeintliche physikalische Konstante oder Stoffeigenschaft eingeführte Größe immer mehr diesen Charakter verlieren und den eines anpassbaren Parameters annehmen. Ein Beispiel ist der von Siebel [9] bei elementaren Berechnungen in der Umformtechnik als Reibungsbeiwert im Coulombschen Sinne benutzte Koeffizient  $\mu$ , der sich mit zunehmender Erweiterung der Rechenmodelle von Formgebungsverfahren mehr als verfahrensabhängiger anpassbarer Parameter und weniger als für verschiedene Werkstoffpaarungen gebildeter Reibungskoeffizient erwiesen hat [10].

### Traglasttheorie und mathematisches Modell

Die Traglasttheorie bemüht sich mit geringem Rechenaufwand um Aussagen über das mechanische Verhalten von Tragwerken. Sie gestattet eine einfache Bestimmung der Tragfähigkeit bzw. der Traglast und gibt Einblick in den wahrscheinlichen Bruchmechanismus.

#### Voraussetzungen in der Traglasttheorie

Die Gruppe der Annahmen und Voraussetzungen in der Traglasttheorie ist im wesentlichen durch folgende Punkte gegeben [8]:

1) Die äusseren Belastungen (im allgemeinen Kräfte  $P_i$  und Momente  $M_i$ ) sollen langsam, stetig und proportional anwachsen (proportionale Belastung zu jedem Zeitpunkt  $t$ ):

$$(1 \text{ a; b}) \quad P_i(t)/P_j(t) = \pi_{ij} = \text{const. bzw.} \\ M_i(t)/M_j(t) = \mu_{ij} = \text{const.},$$

so dass die Angabe irgendeiner beliebigen Kraft  $P_i$  oder eines Momentes  $M_i$  ausreicht, um den Belastungszustand eindeutig zu beschreiben. Der grösste Wert aller  $P_i$  (bzw.  $M_i$ ) im Augenblick des Zusammenbruchs ist die Traglast  $P_T$  (bzw. das Tragmoment  $M_T$ ), die somit den Versagenszustand eindeutig beschreibt:

$$(2 \text{ a; b}) \quad \max(P_i) = P_T \text{ bzw. } \max(M_i) = M_T$$

2) Vom Werkstoff wird idealplastisches Verhalten vorausgesetzt (Prandtl-Reuss-Körper ohne Verfestigung). Für Tragwerke aus verfestigendem Werkstoff ist keine Traglast definiert. Zur Beurteilung der Tragfähigkeit eines Tragwerkes aus verfestigendem Werkstoff ist daher eine Angabe über zulässige Deformationen notwendig.

3) Ausbildung einer begrenzten Anzahl von Fliessgelenken, Fliessgelenklinien oder Fliessbereichen, in denen die Schnittlasten bei Steigerung der äusseren Lasten konstant bleiben.

4) Bei Erreichen der Traglast  $P_T$  haben sich hinreichend viele Fliessstellen gebildet, um das Tragwerk zu einem «Mechanismus» zu machen, der durch Angabe einer einzigen Verschiebung *kinematisch bestimmt* ist. Mit der Entstehung eines neuen Fliessgelenkes während der Belastung des Tragwerkes nimmt der Grad der statischen Unbestimmtheit jeweils um Eins ab, d.h., ein  $n$ -fach statisch unbestimmtes System bricht zusammen, wenn sich  $n + 1$  Fliessgelenke gebildet haben (vollständiger Bruchmechanismus). Das System wird dann *statisch bestimmt* (besser: statisch bestimmbar), d.h., die statischen Grundgleichungen reichen zur Bestimmung der Traglast aus.

5) Bis zum Erreichen der Traglast  $P_T$  seien die Verformungen so klein, dass die geometrischen Änderungen des Tragwerkes weder in die Gleichgewichtsbedingungen noch in die Randbedingungen eingehen (*Theorie erster Ordnung*). Gleichgewichts- und Randbedingungen werden daher anstatt auf den verformten Körper stets auf den noch unverformten Körper bezogen.

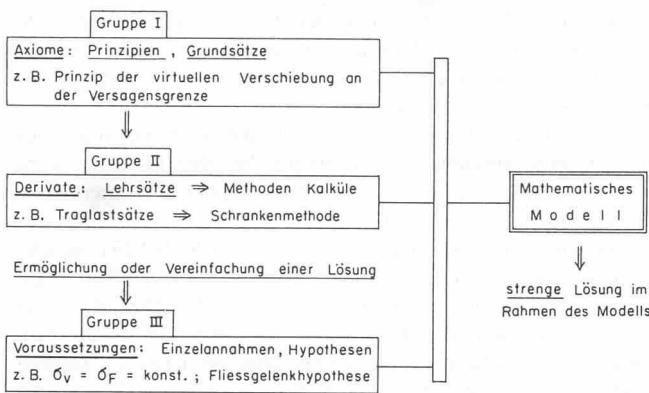


Bild 1. Traglasttheorie als mathematisches Modell der Statik

6) Die Instabilität durch Knicken und Beulen muss gesondert untersucht werden und kann die Tragfähigkeit begrenzen.

Die Voraussetzungen 3), 4) und 5) enthalten die Fließgelenkhypothese!

#### Sätze der Traglasttheorie

##### Satz 1:

Die einem *statisch zulässigen* Spannungsfeld entsprechende äussere Last(gruppe)  $P_s$  ist kleiner als die Traglast  $P_T$

$$(3a) \quad P_s < P_T$$

##### Satz 2:

Die einem *kinematisch zulässigen*, aber statisch unzulässigen Geschwindigkeitsfeld oder Bruchmechanismus entsprechende äussere Last(gruppe)  $P_K$  ist grösser als die Traglast  $P_T$ :

$$(3b) \quad P_K > P_T$$

Mithin lassen sich beide Sätze durch die Ungleichung

$$(4) \quad P_s < P_T < P_K$$

zusammenfassen. Als Folgesatz gilt:

Die zu einem *statisch zulässigen und kinematisch möglichen* Bruchmechanismus gehörige Gruppe der äusseren Kräfte ist die Traglastgruppe.

Ein statisch zulässiges Spannungsfeld liegt dann vor, wenn die Gleichgewichtsbedingungen, die statischen Randbedingungen und im plastischen Bereich die Fließbedingungen erfüllt sind. Dagegen brauchen beim kinematisch zulässigen Geschwindigkeitsfeld die Gleichgewichtsbedingung nicht erfüllt zu sein, wenn nur die Kompatibilitätsbedingungen, die kinematischen Randbedingungen und die Kontinuitätsbedingungen eingehalten werden.

Die formulierten Sätze der Traglasttheorie grenzen die Traglast  $P_T$  durch eine untere Schranke  $P_s$  und eine obere Schranke  $P_K$  gemäss der Ungleichung (4) ein. Dabei gewinnt man die untere bzw. die obere Schranke aus einem «erratenen» statisch zulässigen Spannungsfeld bzw. kinematisch zulässigen Geschwindigkeitsfeld. Somit kann auf der Basis der Traglastsätze die *strenge Lösung* nach oben und unten abgeschätzt werden. Dieses sogenannte Schrankenverfahren bietet insbesondere auch in der Kontinuumsmechanik Vorteile: Eine strenge Lösung, zu der das statisch zulässige Spannungsfeld und das kinematisch zulässige Geschwindigkeitsfeld gehören, kann z.B. über die Plastizitätstheorie meist nur unter erheblichem mathematischem Aufwand gefunden werden, wenn überhaupt eine strenge Lösung in analytisch geschlossener Form möglich ist. Um diese Schwierigkeiten zu umgehen, benutzt man u.a. die Schrankenmethode.

Die untere und die obere Schranke können auch allgemein über Leistungsbetrachtungen aus angenommenem Spannung- und Geschwindigkeitsfeld im kritischen Querschnitt eines Tragwerkes gefunden werden. Die Grundlage hierzu sind folgende Sätze:

1) Von sämtlichen angenommenen statisch zulässigen Spannungsfeldern liefert das wirklich vorhandene ein Maximum der Verformungsleistung  $L_S$ .

2) Von sämtlichen kinematisch zulässigen Geschwindigkeitsfeldern ergibt das wirklich vorhandene ein Minimum an Verformungsleistung  $L_K$ .

Mithin gilt:

$$(5) \quad \begin{cases} L_T = \max. (L_S) \text{ und } L_T = \min. (L_K) \\ \text{bzw. } L_S \leq L_T \leq L_K \end{cases}$$

Wie weit der Bereich ist, in dem die strenge Lösung liegt, hängt von der Wahl des angenommenen Spannungs- und Geschwindigkeitsfeldes ab. Je grösser der Rechenaufwand ist, den man in Kauf nimmt, um so enger liegen die Grenzwerte beieinander. Die strenge Lösung ist dann gegeben, wenn obere und untere Schranke zusammenfallen. In [8] wird ein Beispiel zum Schrankenverfahren durchgerechnet.

#### Axiom der Traglasttheorie

Die erwähnten Traglastsätze sind als Lehrsätze oder Theoreme aufzufassen, die man aus dem Grundsatz bzw. der Grundgleichung der Traglasttheorie ableiten kann. Als Grundsatz bzw. Grundgleichung wird der Traglasttheorie das *Prinzip der virtuellen Verschiebung an der Versagensgrenze* vorangestellt, das folgendermassen formuliert werden kann:

$$(6) \quad \delta A^{(e)} = \int (P_T)_i \delta(V_T)_i - \sum_{j=1}^n (M_T^*)_j \delta \varphi_j = 0$$

Darin bedeuten  $\delta A^{(e)}$  die virtuelle Arbeit,  $(P_T)_i$  die Traglastgruppe (Einzelkräfte, Lastverteilungen, allgemeine äussere Belastungen an der Versagensgrenze),  $(M_T^*)_j$  die in den Fließgelenken angebrachten Schnittmomente im Versagenszustand und  $\delta(V_T)_i$  bzw.  $\delta \varphi_j$  virtuelle Verschiebungen bzw. virtuelle Verdrehungen,  $\int$  *Stieljes*-Integral.

Der erste Term auf der rechten Seite in Gl. (6) umfasst alle äusseren Belastungen, während die zweite Summe über Schnittgrössen im Innern des Körpers erstreckt wird.

Das Prinzip der virtuellen Verschiebung ist ein Axiom, nach dem ein mechanisches System sich im Gleichgewicht befindet, wenn die Gesamtarbeit der eingeprägten Kräfte für jede (denkbar) mögliche Verschiebung verschwindet. Das Prinzip umgeht die Gleichgewichtsbedingungen.

Im Sinne der mathematischen Logik ist die Traglasttheorie eine *axiomatische Theorie*. Als Axiom wird das *Prinzip der virtuellen Verschiebung an der Versagensgrenze* benutzt. Die daraus ableitbaren Lehrsätze bzw. Theoreme sind die Traglastsätze, die eine Eingabelung der Traglast nach der Schrankenmethode gestatten. Die Fließgelenkhypothese gehört zur *Gruppe der Annahmen* in der Traglasttheorie.

Somit kann die Traglasttheorie als *mathematisches Modell in der Statik* (Bild 1) [11] aufgefasst werden, das eine Beschreibung des funktionellen Versagens von Tragwerken gestattet. Im Rahmen dieses Modells sind alle nach dem Traglastverfahren ermittelten Ergebnisse *strenge Lösungen*.

#### Literaturverzeichnis

- [1] Frey, G.: Die Mathematisierung unserer Welt. Urban Bücher, Die Wissenschaftliche Taschenbuchreihe, Band 105, 1967.
- [2] Franz, W.: Modell, Anschauung und Wirklichkeit in der Physik, Math.-Phys. Semesterberichte 4 (1953), S. 48–56.
- [3] Bachmann, H.: Die Arbeit des Ingenieurs zwischen Wirklichkeit und Algorithmus. «Schweiz. Bauzeitung», 88 (1970), H. 49, S. 1133–1139.

- [4] Lorenzen, P.: Metamathematik, B-I-Hochschultaschenbuch, Band 25, 1962.
- [5] Scholz, H.: Der klassische und der moderne Begriff einer mathematischen Theorie. Math.-Phys. Semesterberichte 3 (1953), S. 30–47.
- [6] Tarski, A.: Über den Begriff der logischen Folgerung. «Actual. scient. ind.» Nr. 394, S. 1–11, Paris, 1936.
- [7] Leinfellner, W.: Einführung in die Erkenntnis- und Wissenschaftstheorie. B-I-Hochschultaschenbuch, Band 41, 2. Aufl., 1967.
- [8] Betten, J.: Fliessgelenkhypothese zur Beschreibung des funktionellen Versagens von Tragwerken. «Zeitschrift Konstruktion», im Druck.
- [9] Siebel, E.: Die Formgebung im bildsamen Zustand. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1932.
- [10] Troost, A., und Betten, J.: Über den Einfluss der Reibung und der Schubspannung auf die bildsame Formgebung. «Archiv f. d. Eisenhüttenwesen», 40 (1969), S. 387–394.
- [11] J. Betten: Habilitationsvortrag, Aachen, 1971, unveröffentlicht.

Adresse des Verfassers: Privatdozent Dr.-Ing. J. Betten, Institut für Werkstoffkunde, Rhein.-Westf. Technische Hochschule Aachen, D-51 Aachen.

## Die Verlustanalyse als Mittel zur Bemessung des Spiraleintrittdurchmessers von Wasserturbinen

Von Prof. J. Osterwalder, Darmstadt

### Zusammenfassung

Bei der Projektierung von Wasserkraftanlagen ist man bestrebt, die Hauptabmessungen und insbesondere die Breite der jeweiligen Spirale klein zu halten, da dieses Mass den Abstand von Turbine zu Turbine (Achsanstand) und somit die Baukosten erheblich beeinflussen kann. Bei der Festlegung der Strömungsquerschnitte und des Eintrittsdurchmessers  $D_E$  ist aber auch darauf zu achten, dass unzulässige Verluste vermieden werden. Im vorliegenden Beitrag werden die Spiralverluste abgeleitet und formelmässig angegeben; es lässt sich damit der Durchmesser  $D_E$  für einen bestimmten, als zulässig erachteten Verlust berechnen und für Turbinen verschiedener Schnellläufigkeit angeben.

\*

Der Beitrag veranschaulicht die Bedeutung der Verlustanalyse als Mittel zur Bemessung von Turbinenspiralen mit kreisförmigen Strömungsquerschnitten. Zur Vereinfachung der Problemstellung werden folgende Annahmen getroffen:

- Lineare Abhängigkeit des Spiralquerschnittes  $A_\varphi$  vom Zentriwinkel  $\varphi$ , was in vielen Fällen den Tatsachen entspricht (Bild 1).
- In allen Querschnitten  $A_\varphi$  herrscht die gleiche mittlere Geschwindigkeit ( $c_\varphi = c_E = \text{konst.}$ ), was bei umfangssymmetrischer Abströmung durch die Stützschaukelkanäle und dem erwähnten linearen Verlauf  $A_\varphi \sim \varphi$  zutrifft.
- Die Strömungsverluste werden in Anlehnung an die Widerstandsgesetze der Rohrströmung ermittelt, wobei der Reibungsbeiwert  $\lambda$  als ein für die Spiralenströmung repräsentativer Mittelwert anzusehen ist.

Unter diesen Voraussetzungen können die bezogenen Spiralverluste wie folgt hergeleitet werden:

$$dH_V = \frac{\bar{c}_\varphi^2}{2 g} \lambda \frac{dl}{D_\varphi} = \frac{c_E^2}{2 g} \lambda \frac{R_\varphi d_\varphi}{D_\varphi}$$

$$\frac{R_\varphi}{D_\varphi} = \frac{a D_1 + 0,5 D_\varphi}{D_\varphi} = \frac{a D_1}{D_\varphi} + 0,5$$

$$\frac{R_\varphi}{D_\varphi} = \frac{a D_1 (2 \pi)^{1/2}}{D_E \varphi^{1/2}} + 0,5$$

$$dH_V = \frac{c_E^2}{2 g} \lambda \left[ \frac{a D_1 (2 \pi)^{1/2}}{D_E \varphi^{1/2}} + 0,5 \right] d\varphi$$

$$\frac{H_V}{H} = K_{cE}^2 \lambda \cdot \left[ \frac{a D_1 (2 \pi)^{1/2}}{D_E} \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} \varphi^{-1/2} d\varphi + \int_{\varphi=0}^{\varphi=2\pi} 0,5 d\varphi \right]$$

$$\frac{H_V}{H} = K_{cE}^2 \lambda \left[ \frac{a D_1 (2 \pi)^{1/2}}{D_E} \frac{(2 \pi)^{1/2}}{D_E} + \pi \right]$$

$$(1) \quad \frac{H_V}{H} = K_{cE}^2 \lambda \pi \left( \frac{4 a D_1}{D_E} + 1 \right)$$

Anhand von Formel (1) kann der Verlust einer gegebenen Turbine mit bekannten Daten  $Q$ ,  $H$ ,  $D_1$ ,  $D_E$ ,  $a$  wie folgt ermittelt werden:

*Beispiel:* Kaplan-Spiralturbine mit 6 Laufschaufeln bei Vollast

$$\frac{D_1}{D_E} = 0,82; \quad a = 0,756;$$

$$Q_{11}^* = \frac{Q}{D_1^2 (2 g H)^{1/2}} = 0,30$$

$$\lambda = 0,014$$

$$K_{cE} = \frac{c_E}{(2 g H)^{1/2}} = \frac{4 Q}{\pi D_E^2 (2 g H)^{1/2}} = \frac{4 Q}{\pi (D_E/D_1)^2 D_1^2 (2 g H)^{1/2}}$$

$$K_{cE} = \frac{4 Q_{11}^*}{\pi} \left( \frac{D_1}{D_E} \right)^2 = \frac{4 \cdot 0,3}{\pi} \cdot 0,82^2 \cdot 0,256$$

$$\frac{H_V}{H} = 0,256^2 \cdot 0,014 \cdot \pi \cdot (4 \cdot 0,756 \cdot 0,82 + 1) = 0,01$$

Mit Formel (1) lässt sich ferner der bezogene Spiraldurchmesser  $D_E/D_1$  für einen bestimmten, als tragbar erachteten

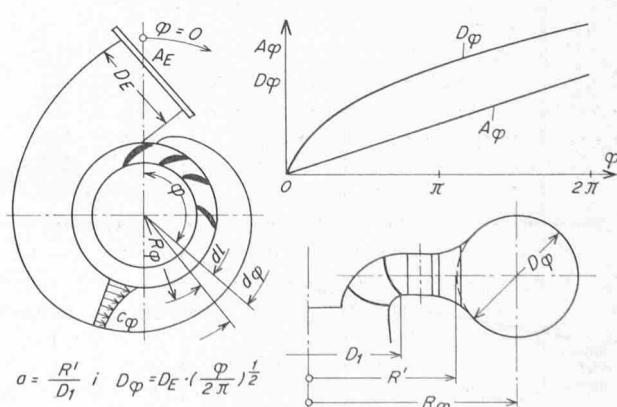


Bild 1. Schematische Darstellung des Spiralgehäuses einer Francis-turbine mit Angabe der verwendeten Rechnungsgrößen