Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 59 (1968)

Heft: 11

Artikel: Bestimmung der Energielinie im Unterwasser von Kaplanturbinen

Autor: Meier, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-916046

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: 09.08.2025

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

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Gemeinsames Publikationsorgan des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE)

Bestimmung der Energielinie im Unterwasser von Kaplanturbinen

Von *W. Meier*, Zürich

621.224.35

In Niederdruckanlagen mit Fallhöhen unter 10...20 m beträgt der Anteil der kinetischen Austrittsenergie am Saugrohrende bei Vollast mehrere Prozente. Deshalb ist bei Abnahmeversuchen der genauen Ermittlung der am Turbinenaustritt noch vorhandenen Energie alle Aufmerksamkeit zu schenken. In den neuen CEI- und SEV-Regeln wird als Bezugsquerschnitt eindeutig der Saugrohraustritt festgelegt, während ältere Regeln auch Bezugsebenen hinter dem Saugrohraustritt zulassen. Die Energieverluste infolge der plötzlichen Querschnittserweiterung nach dem Saugrohrende gehen nicht zu Lasten des Turbinenwirkungsgrades, sondern müssen bei der Berechnung des Anlagenwirkungsgrades berücksichtigt werden.

Dans les installations à basse pression avec des chutes de 10 à 20 m, la part d'énergie cinétique à la sortie du tuyau d'aspiration atteint à pleine charge plusieurs pour-cents. Il est de ce fait indispensable de vouer, lors des essais de réception, une attention particulière à la détermination exacte de toute l'énergie encore disponible à la sortie de la turbine. Les nouvelles règles de la CEI et de l'ASE fixent nettement comme section de référence la sortie du tube d'aspiration, alors que des règles plus anciennes admettaient également d'autres plans de référence situés après la sortie du tube d'aspiration. Les pertes d'énergie engendrées par le brusque élargissement à la sortie du tuyau d'aspiration ne doivent pas intervenir dans le calcul du rendement de la turbine, mais seulement dans celui du rendement de l'installation.

Verwendete Bezeichnungen

H_{stat}	statische (geodätische) Fallhöhe in m
H	Nettofallhöhe in m
z	Lagenhöhe in m
p/γ	statische Druckhöhe in m
$v^2/2g$	Geschwindigkeitshöhe in m
$v = Q/A$	Strömungsgeschwindigkeit in m/s
Q	Durchflussmenge in m^3/s
A	Fläche der Bezugsquerschnitte in m^2
D_s	Durchmesser des Saugrohres beim Eintritt in m
g	Erdbeschleunigung in m/s^2
H_v	Verlusthöhe in m
u	Überdeckung des Saugrohraustrittes in m
$Q_{1s} = \frac{Q}{\sqrt{H} \cdot D_s^2}$	spezifische Durchflussmenge (Q in Lit./s)
Index e	Eintritt
Index a	Austritt

Die Fallhöhe einer Wasserturbine wird definiert als die Differenz der Energielinien vor und nach der Turbine. Die Energielinie stellt dabei die Summe aus den Energien der Lage über einer beliebigen Bezugsebene, des Druckes und der Geschwindigkeit dar. Mit den Bezeichnungen gemäss Fig. 1 ergeben sich, bei freien Wasserspiegeln, für die beiden Ebenen e am Eintritt und a am Austritt, welche den eigentlichen Verantwortungsbereich der Turbinenlieferanten begrenzen, folgende Energielinien, wobei hier die Energie in m angegeben wird, als dem Arbeitsvermögen pro Gewichtseinheit (mkp/kp):

$$H_e = z_e + \frac{v_e^2}{2g} \quad \text{(m)}$$

$$H_a = z_a + \frac{v_a^2}{2g} \quad \text{(m)}$$

und daraus die Fallhöhe (= Nettofallhöhe):

$$H = H_e - H_a = z_e - z_a + \frac{v_e^2 - v_a^2}{2g} \quad \text{(m)}$$

Die genaue Ermittlung der Energielinien ist bei Niederdruckturbinen mit Fallhöhen unter 10...20 m in der Praxis nicht so einfach. Während die Bestimmung der Energielinie am Turbineneintritt, am Einlauf in die Spirale hinter dem Rechen, wegen der hier herrschenden relativ niedrigen Strömungsgeschwindigkeit und der an dieser Stelle der Strömung aufgezwungenen Beschleunigung gewöhnlich keine Schwierigkeiten bereitet, gibt die Festlegung der Energielinie am Turbinenaustritt immer wieder Anlass zu Diskussionen. Hinter dem Saugrohr einer Niederdruckturbine herrscht eine stark durchwirbelte, brodelnde Strömung, und die Geschwindigkeitsverteilung über Höhe und Breite des Saugrohraustrittes ist unregelmässig. Die Abströmverhältnisse ändern sowohl mit der Belastung der zu messenden Turbine, wie auch mit der Belastung allfälliger Nachbarmaschinen. Sie werden zudem beeinflusst durch das Ausmass der Überdeckung des Saugrohres, d. h. dem kleinsten Abstand vom Unterwasserspiegel bis zur obersten Kante des Saugrohraustrittes (Fig. 1).

Unmittelbar nach dem Laufrad einer Kaplan-Niederdruckturbine beträgt bei Vollast der kinetische Anteil bis zu 50% der totalen zur Verfügung stehenden Energie. Dieser beachtliche Anteil wird im nachfolgenden Saugrohr (Saugkrümmer) durch Abbau der Geschwindigkeit wieder weitgehend als potentielle Energie zurückgewonnen. Über die Grössenordnung der am Saugrohraustritt noch vorhandenen kinetischen Energie orientieren Fig. 2 und 3. Bei spezifisch schnellaufenden Niederdruckturbinen mit spezifischen Durchflussmengen über $Q_{1s} = 2000$ Lit./s beträgt dieser Anteil an kinetischer Energie mehrere Prozente der Fallhöhe. Der Übergang von Saugrohr zum Abfluss erfolgt aus hydraulischen und reguliertechnischen Gründen im allgemeinen mit einer plötzlichen Querschnittserweiterung. Die Abflussgeschwindigkeit im Unterwasser ist deshalb meistens beträchtlich niedriger als beim Saugrohraustritt. Aus der Geschwindigkeitsdifferenz ergeben sich infolge Durchwirbelung

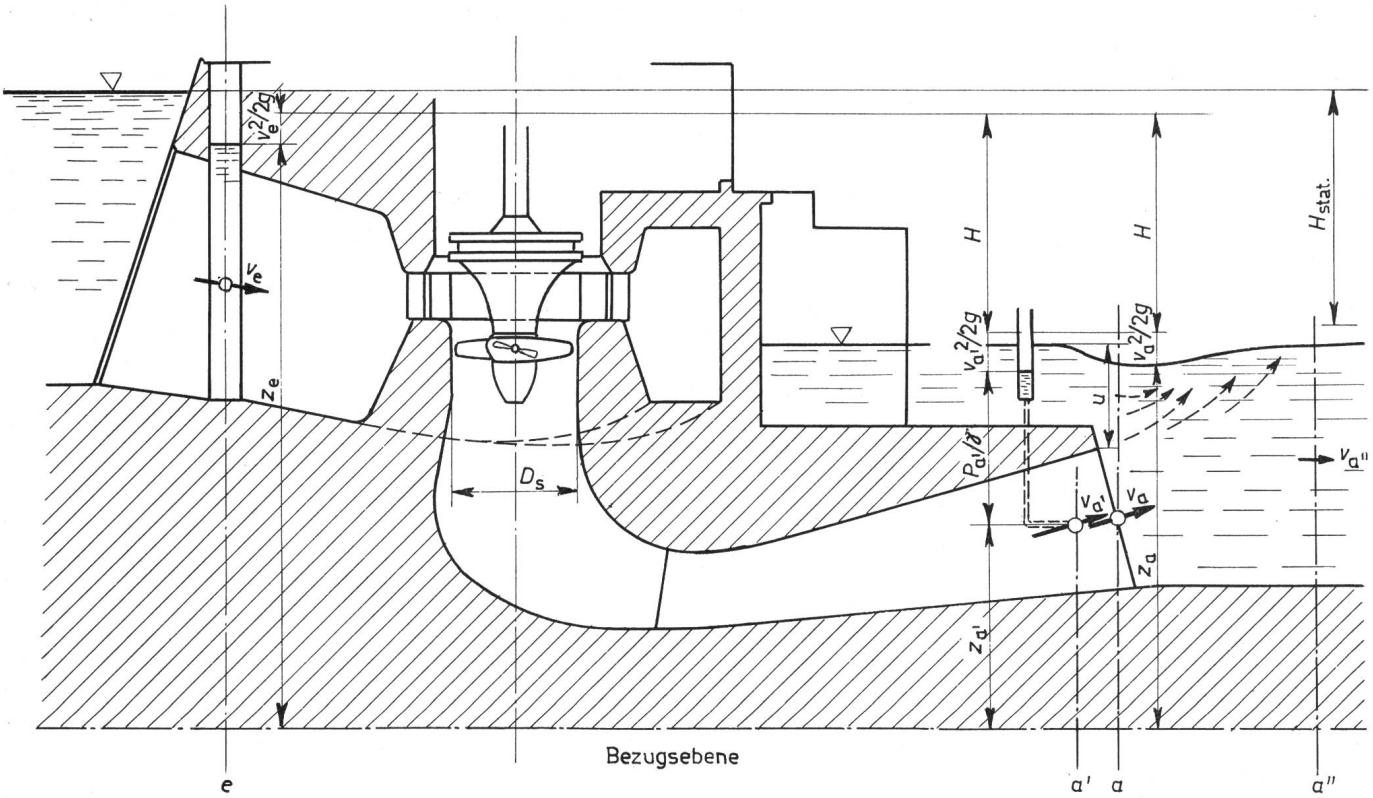

Fig. 1
Schematischer Längsschnitt durch eine Niederdruckanlage mit Kaplanturbine

Bei Abnahmeversuchen wird die Fallhöhe H als Differenz der Energielinien zwischen Turbineneintritt (in der Dammbalkennut hinter dem Rechen) und Turbinenaustritt (Saugrohrende) bestimmt. Die Energielinie am Saugrohraustritt ist nach den neuen CEI- und SEV-Abnahmeregeln möglichst durch Druckmessungen in der Ebene a' oder bei geringer Überdeckung u durch Spiegelabstiche in der Ebene a unter Berücksichtigung der Geschwindigkeitshöhe $v_{a'}^2/2g$ bzw. $v_a^2/2g$ zu ermitteln

Weitere Bezeichnungen siehe im Text

der beiden ungleich rasch fliessenden Wassermassen Verluste (Umwandlung kinetischer Energie in Wärme). In der Strömungslehre sind diese Verluste als Borda-Carnot-Verluste [1; 2][1]) bekannt, die aus dem Impulssatz berechnet werden können zu (Fig. 4):

$$H_{V(a'\ldots a'')} = \frac{(v_a' - v_a'')^2}{2g} \quad \text{(m)}$$

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Es ist ersichtlich, dass die vor dem Saugrohraustritt noch vorhandene kinetische Energie vollständig verloren ginge, wenn das Saugrohr, reichlich überdeckt, z. B. in einen See einmünden würde, wenn also $v_a'' = 0$ wäre. Solche Verhältnisse liegen selbstverständlich praktisch nie vor. Es ist jedoch auch ganz selten der Fall, dass $v_a' = v_a''$ gesetzt werden kann. Deshalb geht mit $v_a' \neq v_a''$ immer ein gewisser Anteil der kinetischen Austrittsenergie verloren, welcher den Anlagenwir-

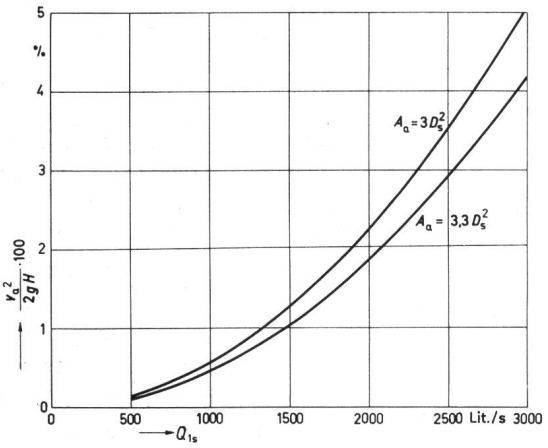

Fig. 2
Anteil der kinetischen Austrittsenergie

Er beträgt bei Niederdruckanlagen mit spezifischen Durchflussmengen Q_{1s} über 2000 Lit./s mehr als 2 % der Nettofallhöhe H. Durch Vergrösserung der Saugrohraustrittsfläche A_a oder durch günstige bauliche Gestaltung der Abströmung kann dieser Anteil reduziert werden

Bezeichnungen siehe im Text

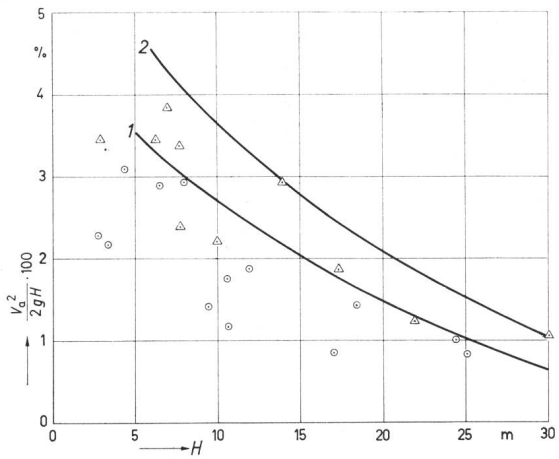

Fig. 3
Anteil der kinetischen Austrittsenergie bei Niederdruckanlagen mit Fallhöhen unter 10...20 m

⊙ Kinetischer Anteil der Austrittsenergie einiger Anlagen für Vollast bei der Fallhöhe mit Bestwirkungsgrad (Begrenzungskurve 1)

△ Kinetischer Anteil der Austrittsenergie für Vollast bei der Fallhöhe mit grösstem Wasserdurchfluss (Begrenzungskurve 2)

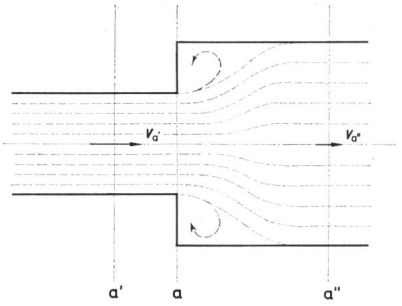

Fig. 4
Strömungsmodell einer plötzlichen Erweiterung
Die durch Verwirbelung entstehenden Verluste von a' bis a'' sind vom Geschwindigkeitsunterschied abhängig. Beim Saugrohraustritt gehen diese Verluste zu Lasten des Anlagenwirkungsgrades. Um den Turbinenwirkungsgrad unbeeinflusst von diesen Einflüssen messen zu können, ist die Energielinie am Turbinenaustritt nicht in der Ebene a'', sondern in a oder a' (vgl. Fig. 1) zu bestimmen
Bezeichnungen siehe im Text

kungsgrad verringert. Um diese Austrittsverluste niedriger zu halten, müsste die Saugrohraustrittsfläche vergrössert werden. Dies könnte durch eine stärkere Erweiterung oder durch eine Saugrohrverlängerung erreicht werden. Bei zu starker Erweiterung oder zu grosser Saugrohrlänge besteht jedoch die Gefahr von Strömungsablösungen; zudem steigen die Reibungsverluste im Saugrohr mit zunehmender Länge an. Ferner muss die Wassermasse im Saugrohr aus reguliertechnischen Gründen innerhalb gewisser Grenzen gehalten werden. Nicht zuletzt sind auch bauliche und ökonomische Gesichtspunkte massgebend.

Die in den Schweizerischen Regeln für Wasserturbinen des SEV [3] enthaltene Bestimmung:

$$S = A_a \geqq 3\ D_s^2$$

hat sich als zweckmässig erwiesen, denn durch diese Formel werden zu grosse Austrittsverluste vermieden. Mit der weiteren Steigerung der spezifischen Durchflussmengen wird es notwendig, die Saugrohraustrittsfläche eher zu vergrössern. Es wäre ferner zu empfehlen, dass Hersteller und Abnehmer von Wasserturbinen bereits in der Projektierungsphase sich über die noch zulässigen Austrittsverluste rechtzeitig aussprechen. Durch zweckmässige Gestaltung der Abströmung, d. h. durch Vermeidung von unnötig grossen Querschnittdifferenzen kann der Austrittsverlust reduziert werden. Es muss deshalb innerhalb der möglichen Grenzen eine zweckmässige Formgebung festgelegt werden.

Die erwähnten Regeln des SEV [3] enthalten unter Ziff. 155 eine Reihe von Empfehlungen zur Bestimmung der Energielinie nach der Turbine. Dabei sind folgende Messarten zugelassen:

a) Messung im Unterwasser nach dem Saugrohraustritt. Berechnung der Geschwindigkeitshöhe für die betreffende Stelle unter Berücksichtigung des Querschnittanteiles (Fig. 1: Messebene a″).

b) Messung über dem Saugrohraustritt. Die Geschwindigkeitshöhe wird für den Saugrohraustrittsquerschnitt berechnet (Fig. 1: Messebene a).

c) Messung nach a) oder b), jedoch Druckmessungen an Stelle von Spiegelabstichen.

d) Druckmessung im Inneren des Saugrohres vor dem Saugrohraustrittsquerschnitt (Fig. 1: Messebene a′).

Bei den Methoden b) und d) muss die Bedingung $A_a \geqq 3\ D_s^2$ erfüllt sein.

Die Methode a) weist bei spezifisch schnellaufenden Niederdruckturbinen verschiedene Unzulänglichkeiten auf, die zu Fehlmessungen führen können. Oft kann die Bezugsfläche der Messebene a″ nicht genau berechnet werden, denn es ist schwierig bei mehreren Gruppen die Wirkbreite des abströmenden Wassers pro Turbine abzuschätzen. Vor allem ergeben sich aber je nach Flächenverhältnis A_a''/A_a ungleiche Borda-Carnot-Verluste, die, wie erwähnt, zusätzlich von der Überdeckung des Saugrohres abhängig sind. Auch der Einfluss von allfällig seitlich einfliessendem Wasser ist schwer abzuschätzen. Der Turbinenwirkungsgrad kann deshalb nach dieser Methode nicht genau ermittelt werden. So ergaben sich bei Wirkungsgradmessungen an einer Anlage, in deren Verlauf die Belastung der Nachbarmaschinen des Prüflings systematisch geändert wurden, beachtliche Unterschiede, die teilweise der unsicheren Bestimmung der Energielinie im Unterwasser zugeschrieben werden mussten [4]. Es ist deshalb anzustreben, bei Wirkungsgradmessungen diese unerwünschten Fehlerquellen so weit als möglich auszuschalten.

Es ist zu empfehlen die Energielinie im Unterwasser von Turbinen im Prinzip für den Saugrohraustritt zu bestimmen. Die zuverlässigste Messmethode ist die Druckmessung unmittelbar vor dem Saugrohraustritt. Dann ergibt sich für die Energielinie am Austritt:

$$H_a' = z_a' + \frac{p_a'}{\gamma} + \frac{v_a'^2}{2g}$$

Können keine Druckmessanschlüsse angebracht werden, so ist der Unterwasserspiegel unmittelbar über dem Saugrohraustritt abzustechen, wobei diese Methode nur zuverlässige Resultate ergibt, wenn die Überdeckung des Saugrohraustrittes klein ist und kein Wasser seitlich in den Abstichquerschnitt einströmt.

Die 1963 und 1965 erschienenen internationalen Regeln der CEI [5; 6] führen das Prinzip der Bestimmung der Unterwasserenergielinie für den Saugrohraustritt vor.

Die je nach Abströmbedingungen ungleichen Borda-Carnot-Verluste beeinflussen wie die Rechenverluste am Turbineneintritt, letztere allerdings in weitaus geringerem Mass, den Anlagenwirkungsgrad. Bei Niederdruckanlagen sollten diese Faktoren bei der Berechnung der Jahresarbeiten zumindest angenähert berücksichtigt werden.

Diese Hinweise auf die Bedeutung der Bestimmung der Energielinie im Unterwasser gelten insbesondere auch für Rohrturbinen, bei denen die spezifischen Durchflussmengen im Vergleich zu den vertikalen Kaplanturbinen noch stärker gesteigert wurden.

Literatur

[1a] *R. Dubs:* Angewandte Hydraulik. Zürich, Rascher, 1947, S. 202...203.
[1b] *B. Eck:* Technische Strömungslehre. 4. Auflage. Berlin/Göttingen/Heidelberg, Springer, 1954.
[2] *R. P. Benedict, N. A. Carlucci* and *S. D. Swetz:* Flow losses in abrupt enlargements and contractions. Transaction of the American society of mechanical engineers, series A: Journal of engineering for power 88(1966), S. 73...80.
[3] Schweizerische Regeln für Wasserturbinen. 3. Auflage. Publ. des SEV 0178.1957.
[4] *G. Schloffer:* Quantitative Hydraulik in Wasserkraft-Niederdruckanlagen. Bull. SEV 47(1956), S. 977...1006.
[5] Code international concernant les essais de réception sur place des turbines hydrauliques. Publication CEI 41. Genève 1963.
[6] Code international concernant les essais de réception sur modèle des turbines hydrauliques. Publication CEI 193. Genève 1965.

Adresse des Autors:
Walter Meier, Dipl. Ingenieur ETH, Escher Wyss AG, Postfach, 8023 Zürich.