

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 50 (1959)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Modellversuche und Abnahmeversuche am Modell hydraulischer Maschinen  
**Autor:** Gerber, H.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1059455>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 03.04.2025

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

# Modellversuche und Abnahmeversuche am Modell hydraulischer Maschinen

Aus dem Einführungsvortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung vom 13. Februar 1959 in Zürich<sup>1)</sup>,  
von H. Gerber, Zürich

621. 22. 001. 57

*Nach einem Rückblick auf die Entstehung internationaler und nationaler Empfehlungen bzw. Regeln für hydraulische Maschinen werden die Gründe erläutert, welche die am Bau und der Verwendung solcher Maschinen interessierten Stellen dazu veranlassen, die Durchführung von Abnahmeversuchen am Modell zu verwirklichen.*

*Après un aperçu de l'élaboration de Recommandations ou Règles internationales et nationales concernant les machines hydrauliques, l'auteur expose les motifs qui inciterent les milieux intéressés à la construction et à l'utilisation de ces machines à procéder à des essais de construction et de réception sur modèles réduits.*

Man kann sich fragen, warum in neuester Zeit den Modellversuchen für hydraulische Maschinen so grosse Bedeutung beigemessen wird. Es soll deshalb versucht werden, zu zeigen, wie es zu dem Entwurf zu internationalen Empfehlungen über Abnahmeversuche am Modell hydraulischer Maschinen gekommen ist, einem Entwurf, mit dem sich das Fachkollegium 4 (Wasserturbinen) des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES) gegenwärtig zu beschäftigen hat.

Wenn eine Arbeitsmaschine (z. B. Kolbenmotor, Elektromotor, Pumpe) oder ein Apparat fertig erstellt ist, kann er in der Mehrzahl der Fälle beim Hersteller ohne besondere Schwierigkeiten allen Versuchen, z. B. Dauerläufen, unterworfen werden, die man als nötig erachtet. Sogar grosse Dampfturbinen können oft in der Werkstatt fertig zusammengebaut und mit dem Fabrikdampfkessel wenigstens im Leerlauf betrieben werden. Bei hydraulischen Maschinen ist das — aus naheliegenden Gründen — höchstens bei derart kleinen Abmessungen möglich, dass die Ergebnisse meist wenig interessant sind und sich der Aufwand nur in besonderen Fällen lohnt.

Die Nachprüfung der bei der Bestellung festgelegten Garantie-Werte kann deshalb erst im Kraftwerk selbst erfolgen, nämlich in Form von sogenannten Abnahmeversuchen. Es liegt auf der Hand, dass sich der Versuchsingenieur da immer vor neuen Situationen befindet, weil nicht nur die Hauptdaten kaum je gleich, sondern auch die örtlichen Messbedingungen ständig verschieden sind. Und liegen schliesslich Zahlenwerte bezüglich Klemmenleistungen, sekundlicher Wassermengen, Drücke oder Spiegelhöhen vor, so ist noch lange nicht gesagt, dass man in der Interpretation dieser Zahlenwerte einig sein muss. Darunter ist die Übereinstimmung zwischen Lieferant und Kunde zu verstehen.

Es gab eine Zeit, die erst wenige Jahrzehnte zurückliegt, da gehörte es fast zum guten Ton, dass jedes Kraftwerk beispielsweise eine möglichst originelle Definition des Nutzgefälles sein eigen nannte. Aber auch der Vertreter des Turbinenlieferanten suchte sich möglichst günstig zu betten, etwa dadurch, dass er nicht gerade die «ungünstigste» Überfallformel zu benutzen trachtete. Diese Unterschiede in den Auffassungen konnten sich aber bereits bei der Vergebung

eines Auftrages entscheidend auswirken, je nachdem, auf welchen Definitionen des Gefälles, der Leistungen usw. die Garantiewerte basierten. Es waren also genügend Gründe vorhanden, um eine Regelung oder Vereinheitlichung als wünschenswert zu erachten, und zwar möglichst auf internationaler Basis.

Das Comité d'Etudes 4 der Commission Electrotechnique Internationale (CEI) hat vor über 30 Jahren schon einen solchen Entwurf zu internationalen Empfehlungen aufgestellt, der 1927 in Rom angenommen und 1928 publiziert wurde<sup>2)</sup>. Diesen Empfehlungen kann man auch heute noch den Vorwurf nicht ersparen, dass sie alle diejenigen Punkte meiden, die häufig zu Diskussionen Anlass geben können, dafür aber Definitionen enthalten, die als selbstverständlich, ja banal oder trivial bezeichnet werden müssen. Die Empfehlungen von 1928 waren daher praktisch wertlos; sie wurden kaum jemals angewandt.

Dagegen wurden in verschiedenen Ländern nationale Regeln aufgestellt, die zum Teil weite Verbreitung fanden. Die wichtigsten waren zweifellos der Power Test Code der ASME<sup>3)</sup> und die Regeln für Abnahmeversuche an Wasserturbinen des VDI<sup>4)</sup>. Aber auch in Frankreich, Italien und der Tschechoslowakei wurden solche Regeln aufgestellt, während man sich in Grossbritannien begnügte, die Empfehlungen der CEI auf das Format der British Standards Institution umzudrucken.

In der Schweiz war es zunächst der Schweizerische Ingenieur- und Architekten-Verein (SIA), der anfangs der zwanziger Jahre eine Kommission damit beauftragte, sich vorerst des besonderen Gebietes der Wassermengenmessung anlässlich von Abnahmeversuchen anzunehmen. Neben dem allgemeinen Studium der vorhandenen Messmethoden wurden sowohl im Maschinenlaboratorium der ETH als auch im Kraftwerk Ackersand der Lonza, Elektrizitätswerke und chemische Fabriken AG, Basel, Versuche aller Art durchgeführt. Das Ergebnis dieser Untersuchungen führte schliesslich dazu, dass im Jahre 1924 die Normen für Wassermessungen erschienen, in welchen die drei Methoden Behältermessung, Überfallmessung und Flügelmessung beschrieben waren, mit einem Anhang über Fehlerbestimmung. An der Ausarbeitung dieser Normen hatte auch das Eidg. Amt für Wasserwirtschaft massgebenden Anteil. Insbesondere aber sind die For-

<sup>1)</sup> Diskussionsversammlung über «Modellversuche für hydraulische Maschinen», veranstaltet vom Institut für hydraulische Maschinen und Anlagen der ETH, vom SEV, vom Schweizerischen Wasserwirtschafts-Verband und von der Fachgruppe für Maschineningenieure des Schweizerischen Ingenieur- und Architekten-Vereins.

<sup>2)</sup> «Fascicule de la CEI relatif aux essais des turbines hydrauliques», 1<sup>re</sup> édition, 1928 (Publication 41 de la CEI).

<sup>3)</sup> American Society of Mechanical Engineers.

<sup>4)</sup> Verein Deutscher Ingenieure.

meln bekannt geworden, die als Beiwert für die Berechnung von sekundlichen Wassermengen aus Überfallmessungen wichtig sind. Wenn man in der Literatur und sonst überall von der Bazin-Formel, derjenigen von *Hégly*, *Rehbock* und anderen spricht, so gehört es sich, einmal hier festzuhalten, dass die SIA-Überfallformeln von Professor *R. Dubs* aufgestellt wurden, der damals Oberingenieur in der Firma Escher Wyss war. Diese SIA-Überfallformeln im besonderen sind in die meisten ausländischen Regeln übernommen worden; sie figurieren auch in den neuen internationalen Entwürfen und gehören zweifellos heute noch zu den zuverlässigsten Berechnungsunterlagen für Messüberfälle.

Erst zu Anfang des zweiten Weltkrieges wurde vom Schweizerischen Elektrotechnischen Komitee das Fachkollegium 4 gebildet, welches unter dem Vorsitz von Professor *R. Dubs* die schweizerischen Regeln für Wasserturbinen des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins ausarbeitete. Wie schon der Name besagt, sind es nicht nur eigentliche Messregeln, sondern sie behandeln auch gewisse vertragliche Punkte, die auf den Zustand der Maschinen und ihr Verhalten Bezug haben. Es ist wohl nicht zuviel gesagt, wenn die schweizerischen Regeln für Wasserturbinen auch deshalb einen besonderen Anklang fanden, weil gerade diese oft strittigen Punkte darin enthalten sind.

1952/53 wurde das Comité d'Etudes 4 der CEI für Wasserturbinen sozusagen dadurch reaktiviert, dass Ingenieur *Logan Kerr* (USA) den Vorsitz übernahm. Dieser hatte als Mitglied und Leiter des USA-Komitees für den Standard Test Code bereits während Jahrzehnten Erfahrungen gesammelt, was sich sofort in sehr positiver Arbeit auswirkte. An den Tagungen der CEI von 1954 in Philadelphia, 1956 in München und 1957 in Zürich konnte tatsächlich ein vollständiger Entwurf für einen Code betreffend Abnahmeversuche an Wasserturbinen ausgearbeitet und durchbesprochen werden, und es ist zu erwarten, dass die erste verbindliche Auflage dieser international so erwünschten Messregeln im Juli dieses Jahres an der Tagung in Madrid verabschiedet werden kann. Dieser Code wird schon beim Vergleichen von Angeboten aus verschiedenen Ländern sehr nützliche Dienste leisten, indem er die technischen Garantien auf gleiche Basis stellt.

In der Zwischenzeit hat nun eine Neuentwicklung eingesetzt, die das Comité d'Etudes 4 der CEI zwang, sein Tätigkeitsgebiet auf dasjenige der Modellversuche auszudehnen. Die Modellversuche waren früher in jeder Beziehung eine fabrikinterne Angelegenheit, auf alle Fälle was die direkte Kostendeckung betraf. Für die Kundschaft zählte nur, was an der grossen Maschine an Ort und Stelle durch Messungen ermittelt wurde. Mit der Zunahme der Maschinengrösse wurden diese Abnahmeversuche jedoch immer kostspieliger, ausserdem betriebstörend und zeitraubend. Diese Feststellungen betreffen vor allem die grossen Niederdruck-Kraftwerke. Dazu kommt, dass immer häufiger keine Prüffeldwirkungsgrade der Generatoren mehr vorliegen und deren Nachprüfung im Kraftwerk schwierig

und nicht besonders genau wird, wenn die Turbinenlaufräder nicht abgekuppelt werden können. Das gilt insbesondere für Generatoren mit Kettenläufern. Schliesslich werden die Abnahmeversuche jeweils bei einem ganz bestimmten Gefälle durchgeführt, welches zur Zeit der Versuche gerade vorhanden ist. Aber sowohl in den Niederdruck-Laufwerken, als auch in den Hochdruck-Speicherwerken sind heute die Gefällsvariationen häufig sehr gross, absolut und prozentual zum Gefälle gesehen, und so werden immer mehr Garantien für verschiedene Gefälle verlangt. Abnahmeversuche liefern aber zunächst nur den Vergleich mit den Garantien bei einem bestimmten Gefälle, welches aus Betriebsgründen auch nicht immer ausgesucht werden kann. Wiederholungen bei anderen Gefällen wird man sich kaum erlauben, und die Reproduktion anderer Gefälle durch Veränderung der Betriebsdrehzahl bedingt ebenfalls allerlei Umtriebe und Einrichtungen.

Bei dieser Sachlage begannen die Abnehmer sich um die Modellversuche zu interessieren, insbesondere auch dadurch, dass sie sich bereits bei der Projektierung an den Kosten solcher Versuche beteiligten. Es war dann naheliegend, auch gleich die Abnahmeversuche an der wirklichkeitsgetreuen Modellturbine durchzuführen und so das Verhalten der zukünftigen Maschinen bei allen Gefällen und Öffnungen zu kennen.

Dieses Vorgehen aber bedingt die genaue Kenntnis der Modellgesetze. Für die rein geometrische Umrechnung der Drehzahl und der sekundlichen Wassermengen sind diese Gesetze erfreulich gut bekannt. Etwas anderes ist es jedoch mit den Einzelverlusten, welche zusammen den Gesamtwirkungsgrad der Turbine ergeben. Es sind diesbezüglich eine grössere Zahl von sogenannten Aufwertungsformeln bekannt, die zum Teil auf theoretischen Überlegungen, zum andern Teil auf statistischen Unterlagen basieren. Sie betreffen zur Hauptsache nur die Überdruckturbinen und auch dort nur diejenigen Betriebspunkte, welche mit verhältnismässig wenig Austrittsrotation arbeiten, also kurz gesagt, die Gebiete der relativ besten Wirkungsgrade. Bei der Kaplan-turbine mit verstellbaren Laufschaufeln kann dieses Gebiet naturgemäss etwas weiter gefasst werden. Für die Freistrahlturbinen jedoch sieht man in Bezug auf die Umrechnung der Wirkungsgrade noch gar nicht klar: während bei Teillast offenbar eine Aufwertung eintritt, muss man bei voll offenen Düsen und insbesondere bei hohen Gefällen froh sein, dass nicht eine gewisse Abwertung eintritt.

Bereits bei der Behandlung der 3. Auflage der Regeln für Wasserturbinen des SEV stellte sich deshalb für das schweizerische Fachkollegium 4 das Problem, ob Hinweise auf allfällige Abnahmeversuche am Modell aufzunehmen seien. Man hat sie auf ein Minimum beschränkt. Die gleichen Überlegungen wurden im Schosse des VDI-Ausschusses anlässlich der Neubearbeitung der Regeln für Abnahmeversuche des VDI angestellt. Auch dort ist das Kapitel «Abnahmeversuche am Modell» verhältnismässig kurz behandelt. Das Problem ist aber so wichtig geworden, dass an der Tagung der CEI vom Oktober 1957 in Zürich

eine besondere Arbeitsgruppe unter der Leitung von Professor Hooper (USA) aufgestellt wurde. Dieser Arbeitsgruppe gehörten an P. Bourguignon, Ingenieur en chef au Service des études et recherches, Electricité de France, Dr.-Ing. habil. R. Dziallas, Oberingenieur, J. M. Voith GmbH, Heidenheim (Deutschland), Dr. S. P. Hutton, Head of Fluid Mechanics Division, Mechanical Engineering Research Laboratory, East Kilbride (Schottland), H. Hansson, Oberingenieur der Kristinehamn Mekaniska Werkstaden in Schweden. Sie hat ausserordentlich speditive Arbeit geleistet, indem bereits nach einem Jahr ein Entwurf vorliegt, der nun Gegenstand der Diskussionsversammlung vom 13. Februar 1959 war. Das Fachkollegium 4 des CES hat diesen Entwurf bereits unter seinen Mitgliedern zirkulieren lassen und ist gehalten, den schweizerischen Standpunkt an die CEI weiterzuleiten, so dass auch über seine allfälligen Anträge an der Tagung 1959 der CEI in Madrid diskutiert werden kann.

Um den Teilnehmern an der Diskussionsversammlung ihre Überlegungen beim Anhören der Referate und der Diskussions-Beiträge etwas zu erleichtern, wurde eine Vergleichstabelle ausgearbeitet, auf welcher die in den vorliegenden internationalen Empfehlungen, sowie in den deutschen und schweizerischen Regeln bereits enthaltenen Daten zusammengestellt und mit den Dimensionen der Modellturbinen verglichen sind, die das Institut für hydraulische Maschinen und Anlagen an der ETH besitzt (Tab. I).

werden: Sind die in dem Entwurf enthaltenen Vorschriften über die Grösse der Modelle und die Höhe der Versuchsgefälle notwendig und genügend oder drängen sich andere Vorschläge auf? Wenn diese Vorschläge als in Ordnung befunden werden, wie steht es dann mit den heute in der Schweiz vorhandenen Laboratorien der Industrie und anderswo? Genügen insbesondere auch die vorhandenen Messeinrichtungen, um die in dem Regelentwurf enthaltenen Vorschriften bezüglich Messgenauigkeit zu erfüllen? Schliesslich ergibt sich die Hauptfrage: Wie sind die Ergebnisse der Modellturbinen auf die Grossausführungen zu übertragen, insbesondere in Bezug auf Wirkungsgrade und Kavitationsverhältnisse?

Diese Fragen stellten sich nicht nur bei uns. In den USA erschien kürzlich eine Druckschrift mit folgendem Titel: «Symposium on Laboratory Testing of Hydraulic Turbine Models in Relation to Field Performance». Dieser Sonderdruck aus den ASME-Transactions, vom Oktober 1958, ist genau dem Gegenstand der Diskussionsversammlung vom 13. Februar 1959 gewidmet. Aus einem Schreiben aus Schweden geht hervor, dass die Schwedische Wasserfallsdirektion, also der Staat, seit einigen Monaten eine eigene Versuchsanlage für Abnahmeversuche am Modell besitzt. Man ist überdies überzeugt, dass sich auch die Privatabnehmer dieser Entwicklung anschliessen werden.

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, dass alle diese Probleme selbstverständlich auch für die Spei-

Vergleich der Daten über Versuche an Wasserturbinen, enthalten in den Empfehlungen der CEI, in den Regeln des VDI, in den Regeln des SEV (Publ. Nr. 0178.1957 des SEV), und an den Modellen der ETH

Tabelle I

	Bauart der Turbine											
	Freistrahlf, Pelton				Francis				Kaplan, Propeller			
	CEI	VDI	SEV	ETH-Modell	CEI	VDI	SEV	ETH-Modell	CEI	VDI	SEV	ETH-Modell
Laufrad-Durchmesser [mm]	—	—	>300	a) 400 b) 450	>250	>250	—	a) 250 b) 490	a) 250 b) $500/\sqrt{h}$	>250	—	a) 225 b) 450
Saugrohr-Durchmesser [mm]	—	—	—	—	—	—	>300	a) 240 b) 450	—	—	>300	a) 225 b) 450
Becherbreite [mm]	>80	—	—	a) 140 b) 144	—	—	—	—	—	—	—	—
Strahl-Durchmesser (bei Vollast) [mm]	—	>25	>30	a) 50 b) 53	—	—	—	—	—	—	—	—
Versuchsgefälle $h$ [m]	—	>30	—	a) 40 b) 80	—	—	—	a) 20 b) 4,5	a) $\geq 4$ b) $1 \dots x$	—	—	a) 10 b) 3,5
Modell-Maßstab	—	$> \frac{1}{25}$	—	—	—	$> \frac{1}{25}$	$> \frac{1}{25}$	—	—	$> \frac{1}{25}$	$> \frac{1}{25}$	—

a) Modellgrösse mindestens 250 mm.  
b) Ist das Modell grösser als 250 mm, so kann das Versuchsgefälle  $h$  unter 4 m sinken, entsprechend Formel b).

Es ist klar, dass sich je nach dem Standpunkt, den man gegenüber den vorgeschlagenen Versuchsbedingungen einnimmt, die Frage stellt, was allenfalls in Bezug auf Grösse und Ausrüstung der vorhandenen Laboratorien geschehen soll. Es soll hier nicht der materiellen Behandlung dieses Regelentwurfes vorgegriffen, sondern nur auf einige wesentliche Punkte hingewiesen

cherpumpen gelten, die in Zusammenarbeit mit thermischen Kraftwerken immer grössere Bedeutung erlangen.

**Adresse des Autors:**

Prof. H. Gerber, Vorstand des Institutes für hydraulische Maschinen und Anlagen der ETH, Sonneggstrasse 3, Zürich 6.