

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 56 (1965)
Heft: 5

Artikel: Instationäre Probleme bei der Pumpspeicherung
Autor: Weber, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916348>

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: 15.01.2026

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

Instationäre Probleme bei der Pumpspeicherung

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 11. November 1964 in Zürich,
von P. Weber, Arn-Horgen

621.221.4

Instationäre Vorgänge in hydraulischen Anlagen ganz allgemein können ausgelöst werden entweder durch äussere und innere Störungen oder durch Anpassungsvorgänge in Bezug auf Leistung oder Frequenz.

Die äusseren und inneren Störungen sind ungewollt und dementsprechend schwer oder nicht beherrschbar, während die Anpassungsvorgänge gewollt und dementsprechend beherrschbar sind. Zu den äusseren Störungen gehören z. B. Blitzschläge, Steinschläge, Explosionswirkungen usw. Zu den inneren Störungen zählt man alle Ereignisse, die durch menschliches Ungenügen oder Versagen auf irgend einer Stufe, d. h. bei der Projektierung, bei der Berechnung, bei der Ausführung oder bei der Bedienung auftreten können. Wir denken bei dieser Gruppe etwa an den Ausfall von elektrischen Schaltelementen, an das Versagen hydraulischer Steuerungen durch Bruch einzelner Elemente oder durch Luft einschüsse, oder an menschlich falsche Sekundärreaktionen nach primär aufgetretenen äusseren Störungen. Zur Illustrierung dieser Gruppe der inneren Störungen seien die folgenden zwei Beispiele aus der Praxis angeführt:

In einer ersten Anlage wurde am Ende einer Entlüftungsleitung ein unter dem innern Überdruck schliessendes Federventil angeordnet, welches bei jedem Entlüftungsvorgang zu so starken Druckschwingungen führte, dass der Betrieb der Anlage nicht möglich war. In diesem Fall lag das menschliche Versagen darin, dass eine an sich bekannte Tatsache — jedes unter Innendruck schliessende elastische Organ führt zu angefachten Schwingungen (man denke nur an die ausgeleierten Hahnen in Hauswasserleitungen!) — gänzlich übersehen wurde. In einer zweiten Anlage, einem Werk mit zweiflutigen Francisturbinen, waren die Schaufeln des Doppellaufrades nicht versetzt zueinander angeordnet worden, obwohl die Vorausberechnung die Wahrscheinlichkeit der Superposition der bei jedem Durchgang einer Laufschaufel hinter einer Leitschaufel auftretenden Druckstösse ergeben hatte. Obwohl die Turbine an sich vollkommen ruhig lief, ergaben sich so starke Resonanzschwingungen im Druckleitungssystem, dass die Anlage erst nach Ersatz des Doppellaufrades durch ein neues mit versetzten Schaufeln betriebssicher war. In diesem zweiten Fall lag das menschliche Versagen darin, dass auf eine einwandfrei laufende Referenzanlage mit «praktisch» derselben Turbine (gleiche Schaufelzahlen, gleiche Drehzahl) abgestellt wurde. Dass die Superpositionswahrscheinlichkeit ausser von den Schaufelzahlen und von der Drehzahl noch wesentlich von der Radgrösse abhängt, wurde nicht berücksichtigt.

Zur Gruppe der gewollten Anpassungsvorgänge gehören sämtliche Bewegungen von Reglern und Regulierorganen der Maschinen sowie das Öffnen und das Schliessen irgendwelcher Abschlussorgane bzw. Schalter. Die sämtlichen erwähnten Störungen und gewollten Bewegungen können in hydraulisch-elektrischen Anlagen die folgenden Erscheinungen auslösen:

1. Langsame Schwingungen der Wassermassen zwischen Speicherbecken und Wasserschloss, bzw. zwischen Wasserschloss und Unterwasserbecken. Diese Schwingungen sind meist periodisch und ihre Schwingungszeit beträgt normalerweise mehrere Minuten.

2. Rasche Druck- und Geschwindigkeitsänderungen im Druckleitungssystem der Anlage, sog. Druckstösse, die, falls periodisch, Schwingungszeiten von normalerweise einigen Sekunden aufweisen. In kurzen Neben- und Steuerleitungen können jedoch Frequenzen bis zu mehreren 100 Hz auftreten. Den Druckstössen analog entstehen auf der elektrischen Seite die Wanderwellen, wobei der Wassergeschwindigkeit der Strom und dem Druck die Spannung entspricht.

3. Periodische oder aperiodische Drehzahl- bzw. Frequenzänderungen.

4. Mechanische Biegs- oder Torsionsschwingungen, meist angeregt durch die hydraulischen instationären Vorgänge.

Die richtige Erfassung all dieser Schwingungs-, Stoss- und Bewegungsabläufe im einzelnen, sowie ihre Zusammenwirkung ist ein unbedingtes Erfordernis zur Erzielung der Sicherheit und Regulierfähigkeit in hydraulischen Anlagen, wobei der Begriff der «Regulierfähigkeit» im weitesten Sinne verstanden werden muss, also nicht nur das Teilproblem der Stabilität umfasst.

In Bezug auf Pumpspeicheranlagen im besonderen gilt es nun abzuklären, welche Einzelercheinungen oder Kombinationen dort besonderes Gewicht erhalten. Gemäss ihren Ursachen kann man drei Problemgruppen unterscheiden:

1. Die durch den häufigen Betriebswechsel von Turbinen auf Pumpbetrieb und umgekehrt bedingten Erscheinungen;

2. die von den klassischen Maschinen abweichende Art der Regulierung mit ihren Folgen, und

3. Auswirkungen abweichender Maschinencharakteristiken, speziell bei Pumpenturbinen.

Bevor wir auf die einzelnen Gruppen eingehen, seien hier noch einige Bemerkungen zum Anlagen-Charakter gemacht. Besonders in der Schweiz werden wir uns nicht nur mit neu zu planenden Anlagen für ausschliesslich künstliche Speicherung zu befassen haben.

Wir werden auch neue Anlagen mit teils natürlicher und teils künstlicher Speicherung erstellen. Ferner werden wir bereits bestehende Turbinenanlagen zu Pumpspeicheranlagen erweitern. Es ist klar, dass die einwandfreie Beherrschung der instationären Vorgänge bei neu zu planenden Gesamtanlagen einfacher ist als bei Umbau- oder Erweiterungsanlagen. Am einfachsten sind die Verhältnisse bei Neuanlagen mit nur künstlicher Speicherung, da dort schon aus wirtschaftlichen Gründen keine oder nur kurze Stollen, demzufolge keine oder nur kleine Wasserschlässe, möglichst kurze Druckleitungen und wenn möglich keine Druckregler vorgesehen werden können oder müssen; alles Faktoren, die in Bezug auf Druckstösse günstig sind. Schon schwierigere Probleme ergeben sich bei Neuanlagen mit gemischt künstlicher und natürlicher Speicherung, bei denen sich längere Leitungen und Stollen aus hydrologischen und geologisch-geographischen Gründen kaum vermeiden lassen; der gemischte Betrieb kann jedoch auch hier noch vom Anfang der Projektierung an richtig berücksichtigt werden. Die grössten Aufgaben stellen zweifelsohne Erweiterungsanlagen, bei denen nicht bereits beim Bau der Turbinenanlage an spätere Erweiterung gedacht wurde. Für solche Anlagen empfehlen wir eine peinlich genaue Vorabklärung der instationären Erscheinungen und Auswirkungen. Wir können uns vorstellen, dass bei solchen Anlagen die Massnahmen für Sicher-

heit und Regulierfähigkeit die Erweiterung aus wirtschaftlichen Gründen in Frage stellen können.

Betrachten wir nun die drei oben erwähnten Problemgruppen — Betriebswechsel, Art der Regulierung, Maschinencharakteristiken — im einzelnen. Zur ersten Gruppe ist folgendes zu bemerken. Jeder Wechsel der Betriebsart hat im Endeffekt eine Umkehr der Strömungsrichtung und in der Übergangsphase eine Serie von Wasserschoßschwingungen und Druckstößen sowie Drehzahlvariationen zur Folge. Es wächst damit nicht nur die Beanspruchung von Regulier- und Maschinenteilen, sondern auch diejenige der Druckleitungen, Druckstollen und Wasserschlösser. Letzteres muss besonders bei der Projektierung auf der Bauseite berücksichtigt werden. Es darf nicht wie bei Normalanlagen ein wahrscheinlich ungünstiger Fall der Berechnung zu Grunde gelegt werden, sondern der effektiv mögliche ungünstigste Fall. Ferner ist in Bezug auf Drosselung der Wasserschlösser zu beachten, dass von den Druckstößen umso mehr in den Stollen übergeht, sowohl positiv wie negativ, je steiler die Stossfronten sind; und sie sind eben steiler bei Pumpenanlagen. Als Beispiel aus der Praxis sei die Erweiterung der Anlage Oberems/Ilsee erwähnt, bei der die flach liegende Stollenleitung bei Pumpenbetrieb hydraulisch von der Druckleitung getrennt werden musste, da der Stossdurchgang am Wasserschoßabzweig bei Pumpenabschaltungen ein Vielfaches vom Durchgang bei Turbinenbetrieb betragen hätte, womit sich eine Gefährdung der Stollenstrecke errechnen liess. Im weiteren möchten wir darauf hinweisen, dass bei automatisch umschaltenden Anlagen ohne weiteres von einem Betrieb in den anderen genau in dem Zeitpunkt umgeschaltet wird, in dem die Wasserschoßschwingung, die noch lange nicht abgeklungen zu sein braucht, in ihrer ungünstigsten Phase ist. Bei Anlagen mit mehreren Maschinengruppen gilt das bezüglich des ungünstigsten Falles gesagte ebenfalls in Bezug auf die Hauptabsperrorgane, sofern deren Steuerungen nicht zwangsläufig so getrennt sind, dass eine gleichzeitige Störung an allen Absperrorganen vollständig ausgeschlossen ist. Besonders aufmerksam machen möchten wir auf die Gefahr von Lufteinschlüssen mit darauf folgenden Luftausbrüchen, die zwangsläufig grosse Druckstöße erzeugen. Dies gilt vor allem für Anlagen, die für den Pumpenanlauf mit Druckluft entleert werden müssen. Wir möchten anregen, dass beim Wechsel der Betriebsart und bei Abschaltungen die üblichen Registrierinstrumente für Druck und Drehzahl automatisch, beispielsweise bei einer Drehzahlabweichung von 1 %, ihre Vorschubgeschwindigkeit vergrössern, so dass später eine Rekonstruktion und für den Betrieb eine ständige Kontrolle möglich ist. Die bei den Abnahmeversuchen mit speziellen Instrumenten für ausgesuchte Fälle aufgenommenen Kurven genügen erfahrungsgemäss nicht für die einwandfreie Beurteilung der betriebsmässigen Vorgänge über längere Zeitspannen.

Bei der zweiten Problemgruppe, die Art der Regulierung betreffend, müssen wir unterscheiden zwischen Anlagen mit vollständig getrennten Maschinensätzen, Anlagen mit Motor-generator aber getrennten hydraulischen Einheiten und Pumpturbinenanlagen. Bei Anlagen mit vollständig getrennten Maschinensätzen werden die einzelnen Gruppen wie bei klassischen Maschinen reguliert, und es können die Zeitpunkte für die Umschaltung so gewählt werden, dass in Bezug auf instationäre Vorgänge ein Optimum erreicht wird. Bei den

Gruppen mit Motor-generator und zwei hydraulischen Maschinen entfernen wir uns zwangsläufig, was die instationären Vorgänge anbelangt, vom Optimum. Dies gilt speziell für die Umschaltzeiten und für die maximalen Drehzahlen. Die grössten Abweichungen verglichen mit der getrennten Anordnung treten jedoch bei den Umkehrmaschinen auf. Bei diesen Maschinen ist die Art der Regulierung vor allem von der Höhe des Gefälles resp. der Förderhöhe abhängig. Für kleine Gefälle haben sich Maschinen mit Laufschaufelregulierung am Turbineneintritt bewährt, für mittlere Gefälle Radialmaschinen mit Leitschaufelregulierung am Turbineneintritt und für höhere Gefälle ein- und mehrstufige Maschinen mit festen Leit- und Laufschaufeln, bei denen somit nur mit den Abschlussorganen reguliert werden kann. Die instationären Vorgänge und ihre Auswirkungen bei diesen Umkehrmaschinen besprechen wir zusammen mit den Problemen der dritten Gruppe.

Abweichungen der Durchfluss- und Drehzahlcharakteristiken sowie des Momentenverlaufes können bereits die Motor-generatorgruppen mit getrennten hydraulischen Einheiten aufweisen. Bei diesen Gruppen sind die Einflüsse noch relativ einfach erfassbar und führen normalerweise zu keinen Komplikationen in der Berechnung der instationären Vorgänge. Bei Pumpturbinengruppen sind die Abweichungen je nach Art der Regulierung bedeutend einschneidender. Positiv ist vor allem die sowohl im Pumpen- wie im Turbinenbetrieb kleinere Durchbrenndrehzahl der Gruppe, wobei jedoch darauf geachtet werden muss, dass der die Durchbrenndrehzahl vergrössernde Einfluss der instationären Durchflussverhältnisse richtig berücksichtigt wird. Negativ ist die Tatsache, dass bei wirtschaftlich noch tragbaren Druckstößen, die Durchbrenndrehzahl oder Drehzahlen in der Nähe der Durchbrenndrehzahl häufiger erreicht werden, als bei Gruppen mit getrennten Einheiten. Dies gilt speziell für nicht regulierte Gruppen, bei denen die Schieberschliesszeiten nie so kurz gewählt werden können, dass normale Drehzahlanstiege resultieren.

Wir sprachen eben von «wirtschaftlich tragbaren» Druckstößen. Dazu sei noch folgendes ausgeführt: Wie andere Referenten noch ausführen werden, besteht vielfach der Wunsch nach möglichst kurzen Umschaltzeiten vom Turbinen- in den Pumpenbetrieb und umgekehrt. Die Minimalzeit ist gegeben durch die zum Wechsel der Wassergeschwindigkeit in der Druckleitung von $+v_T$ auf $-v_P$, also um $[v_T + v_P]$ bei einem vorgeschriebenen maximalen Druckstoss notwendige Zeit. Bei den heutigen Geschwindigkeitsverhältnissen beträgt diese Zeit bei 10 % Druckstossgrenze und optimalem Wechselvorgang etwa eine halbe Minute. Das Optimum lässt sich jedoch technisch nie erreichen, so dass heute bei einer 10 %-Grenze etwa mit 2...3 min gerechnet werden muss. Bei 20 % zulässigem Stoss halbiert sich diese Zeit ungefähr. Wir sehen also, dass besonders bei Altanlagen, die mit kleinem Druckstosszuschlag projektiert wurden, schon aus rein stosstechnischen Gründen die minimalen Wechselzeiten der Anlage stark begrenzt sind, und dass eine Reduktion der Wechselzeit praktisch bei allen Anlagen zwangsläufig zu einer Verteuerung führt, da die Anlagen für höhere zulässige Druckstöße zu projektieren sind.

Zum Schluss seien noch drei Bemerkungen gemacht. Erstens sind die vorangehenden Ausführungen in keiner Weise vollständig; es handelte sich vielmehr darum, einen

Überblick zu bieten. Zweitens möchten wir daran erinnern, dass dank der elektronischen Berechnung die Lösung von instationären Problemen heute auch dort möglich geworden ist, wo sie früher infolge ungeheuren notwendigen Zeitaufwandes nicht möglich war. Von der Möglichkeit elektronischer Berechnung sollte in stets wachsendem Masse Gebrauch gemacht werden. Drittens darf gesagt werden, dass die künst-

liche Speicherung, vor allem die Speicherung mit Pumpenturbinen, wohl neue instationäre Probleme aufwirft, dass die heutige Wissenschaft und Praxis jedoch in der Lage ist, die gestellten Aufgaben einwandfrei zu lösen.

Adresse des Autors:

P. Weber, dipl. Physiker ETH, Institut für hydraulische Maschinen und Anlagen der ETH, Sonneggstrasse 3, 8006 Zürich.

JOHANN WILHELM HITTORF

1824—1914

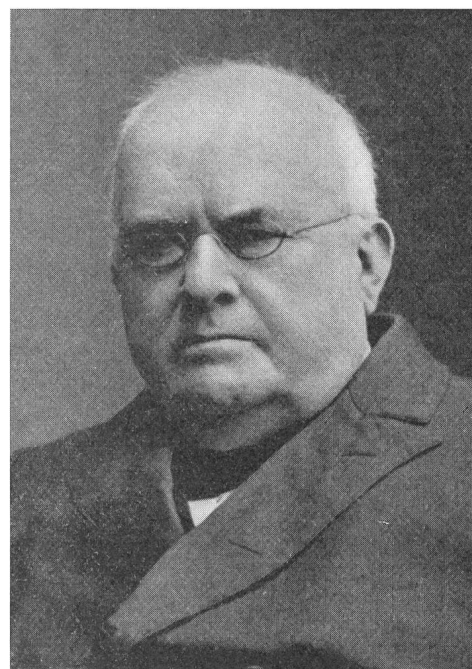
Hittorf wurde am 27. März 1824 als Sohn eines Kaufmannes in Bonn geboren. Er studierte in Bonn, wo er Schüler Plückers war. Mit 22 Jahren doktorte er und etablierte sich als Privatdozent an der Universität zu Münster in Westfalen. 1852 wurde er dort Professor der Chemie und Physik, welche Stellung er bis 1912 behielt und das wohl seltene Ereignis der 60jährigen Tätigkeit als Professor feiern konnte. Am 28. November 1914 starb er in Münster in Westfalen.

1852 entdeckte er, dass die Leitfähigkeit des Selens zunimmt, je heller es beleuchtet wird. Er ging dieser Sache aber nicht nach. Erst *Arthur Korn* und *Alexander Graham Bell* begannen diese Eigenschaft des Selens auszuwerten.

Die grössten Verdienste erwarb sich Hittorf auf dem Gebiete der Elektrochemie. Von 1853 bis 1859 widmete er sich Arbeiten über die Elektrolyse. Er untersuchte und erklärte die Ionenwanderung unter dem Einfluss des elektrischen Stromes.

Zusammen mit seinem früheren Lehrer *Plücker* wies er 1864 nach, dass der gleiche Stoff bei verschiedenen Temperaturen Licht anderer spektraler Zusammensetzung aussendet. Offenbar durch *Plücker* angeregt, der 1859 die Kathodenstrahlen entdeckt hatte, befasste sich dann auch Hittorf mit diesen Strahlen und fand 1869, dass sie sich durch Magnetfelder ablenken lassen und sich dabei ähnlich verhalten wie stromdurchflossene Leiter.

H. W.



Deutsches Museum, München

Commission internationale de réglementation en vue de l'approbation de l'Équipement Electrique (CEE)

Tagung in Mailand vom 5. bis 15. Oktober 1964

Die CEE hielt ihre Herbsttagung 1964 auf Einladung des italienischen Nationalkomitees zum dritten Mal in Italien ab; nach Florenz (1951) und Neapel (1956) war diesmal Mailand als Tagungsort gewählt worden. Wiederum waren 10 volle Arbeitstage mit in Serie durchgeführten Sitzungen ausgefüllt. Nachdem zuerst 2 neugebildete technische Komitees, nämlich für Fehlerstromschutzschalter und für Temperaturregler, erstmals zusammentraten, tagten das Zulassungsbüro¹⁾ und die technischen Komitees für Motorapparate und für Wärmeapparate. Den Abschluss der Tagung bildete die Sitzung der Plenarversammlung. Die Teilnahme war mit etwa 150 Delegierten aus 15 Ländern normal; Australien und die USA hatten Beobachter gesandt. Das CES war durch Teilnehmer aus der Industrie, sowie der technischen Prüfanstalten und des Sekretariates des SEV wiederum erfreulich gut vertreten.

Technisches Komitee für Fehlerstrom-Schutzschalter (CT 227)

Dieses neugebildete Komitee hielt am 5. und 6. Oktober 1964 unter dem Vorsitz seines Präsidenten G. Biegelmeier (Österreich) seine erste Sitzung ab. Es lag ein bereits auf Grund einer internationalen Vorbesprechung entstandener erster Entwurf zu An-

forderungen an Fehlerstrom-Schutzschalter vor, der aber noch nicht zur Beratung kam, sondern als Unterlage für die Behandlung einiger besonders wichtiger und umstrittener Fragen diente. Nach einer längeren Eingangsdiskussion über die Grundsätze und die verschiedenen Systeme der Fehlerstrom-Schutzschaltung, insbesondere auch über die höchstzulässige Abschaltzeit, wurde diese vorläufig bei 0,2 s gelassen.

In der anschliessenden Diskussion über die zulässige Erwärmung gewann die auch von der Schweiz verfolgte Bestrebung, bei höherem als dem Nennstrom zu prüfen und dafür auch höhere Erwärmungen zuzulassen, die Oberhand; da verschiedene prüftechnische Fragen, u. a. die Querschnitte der bei der Prüfung anzuschliessenden Leiter, noch unabgeklärt sind, sollen mehrere Länder, darunter auch die Schweiz, Erwärmungsversuche durchführen.

Auch die Behandlung der Frage nach einer realistischen Zuverlässigkeitsprüfung führte zum Ergebnis, dass hier noch Untersuchungen nötig sind. Der schweizerische Vorschlag, statt einer einmaligen Lagerung bei einer bestimmten Temperatur, zyklische Prüfungen vorzunehmen und die Auslöseprüfung mit dem Auslösenennstrom statt einem erhöhten Strom durchzuführen, fand eine gute Aufnahme. Über die Zweckmässigkeit verschiedener vorgeschlagener Prüfmethode, darunter auch derjenigen nach

¹⁾ Der Bericht über die Sitzung des Zulassungsbüros folgt später.