

Druck-Zeit Methode zur Bestimmung absoluter Durchflussmengen an Wasserkraftanlagen und zur Kalibrierung von relativen Messverfahren

Autor*innen: Lukas Zingerle¹, Günther Thurner², Thomas Senfter¹, Manuel Berger¹, Christian Mayerl¹ und Martin Pillei¹

Institutionen: ¹ Department Umwelt-, Verfahrens und Energietechnik, MCI - Die Unternehmerische Hochschule; ² Geschäftsbereich Stromerzeugung, Innsbrucker Kommunalbetriebe (IKB) AG

Abstract: Die Bestimmung des Anlagenwirkungsgrades von hydraulischen Strömungsmaschinen erfolgt durch Ermittlung verschiedener Messgrößen. Mit Ausnahme der thermodynamischen Messung muss hierfür stets der absolute Durchfluss des Maschinensatzes an unterschiedlichen Betriebspunkten bestimmt werden. Diese Aufgabe gestaltet sich teilweise schwierig, da die Rohrleitung der Anlage einer Messung zugänglich sein muss, was durch gegebene bauliche Ausführungen erschwert werden kann. Unter solchen Bedingungen sind Standardmethoden wie Ultraschall-, magnetisch induktive-, bzw. akustische Durchflussmessung nicht durchführbar.

Eine Abhilfe kann das Druck-Zeit Verfahren schaffen. Durch eine transiente Druckmessung an zwei Orten entlang des Kraftabstiegs, kann während einer Abschaltsequenz der absolute Durchfluss zum Zeitpunkt vor der Abschaltung berechnet werden. Im Zuge einer Feldmessung konnten mit dieser Methode an einer mit drei Francis Turbinen ausgestatteten Kraftwerksanlage, die Durchflüsse der angefahrenen Betriebspunkte bestimmt werden. Die so berechneten Werte wurden zur Kalibration der Proportionalitätsfaktoren der WINTER-KENNEDY Methode verwendet, um eine kontinuierliche Durchflussermittlung zu ermöglichen.

Die so erhaltenen Ergebnisse wurden im Folgenden analysiert, was im Besonderen die quantitative Bestimmung von negativen Einflussfaktoren auf die Genauigkeit erfordert, um eine realitätsnahe Aussage über die Ergebnisse zu treffen.

Keywords: Druck-Zeit Methode, WINTER-KENNEDY Methode, Durchflussermittlung;

1 EINLEITUNG

Eine Beurteilung des mechanischen Leistungsniveaus und des daraus abgeleiteten Wirkungsgrades einer hydraulischen Maschine, kann nur mit bekanntem absoluten Durchfluss des Systems erfolgen. Vielfach besteht in der Praxis das Problem der messtechnischen Unzugänglichkeit, welche diese Beurteilung schwierig gestaltet. Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methodik zur Ermittlung des Systemvolumenstroms, konnte diese Hürde genommen werden.

Die verwendeten Methoden sind im Bereich der hydraulischen Strömungsmaschinen üblich, allerdings unterscheiden sich diese in der Art der Anwendung an den verschiedenen Anlagen wesentlich.

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Daniel BERNOULLI veröffentlichte 1738 in seinem Werk *Hydrodynamica* folgenden Zusammenhang [1], welcher sich, erweitert durch den instationären Term, als auch um die Kontinuitätsbedingung, zu folgender Gleichung entlang eines gedachten Stromfadens anschreiben lässt:

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{A_1} \right)^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho \left(\frac{Q}{A_2} \right)^2 + p_v + \rho \int_0^L \left(\frac{dQ}{dt} \right) \frac{dx}{A(x)} \quad (1)$$

Die Variablen sind definiert als der Druck p , die Dichte des Fluids ρ , die Höhe h bezogen auf ein gewähltes Niveau, die örtliche Fallbeschleunigung g , der Volumenstrom Q , die Querschnittsfläche des Strömungsprofils A und die Länge des Messbereiches L . Die Indizes 1,2 definieren den jeweiligen Ort entlang der gedachten Stromlinie, die infinitesimalen Variablen dx und dt sind Längen-, bzw. Zeiteinheiten.

Folgende Terme werden definiert:

- statische Druckdifferenz: $\Delta p_s = p_2 - p_1 + \rho g h_2 - \rho g h_1 \quad (2)$

- dynamische Druckdifferenz: $\Delta p_d = \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{Q}{A_2} \right)^2 - \left(\frac{Q}{A_1} \right)^2 \right] \quad (3)$

- Druckverlust: $p_v = \sum \frac{1}{2} \rho v^2 \zeta \quad (4)$

- Penstockfaktor: $F_{PS} = \int_0^L \frac{dx}{A(x)} \quad (5)$

ζ ist definiert als der dimensionslose Verlustbeiwert. Δp Terme sind Differenzdrücke zwischen den Enden der definierten Messstrecke 1 und 2 – siehe Gl. 1. Es lässt sich die BERNOULLI-Gleichung als Differentialgleichung erster Ordnung anschreiben:

$$\rho F_{PS} \frac{dQ}{dt} + \Delta p_s + \Delta p_d + \Delta p_v = 0 \quad (6)$$

Durch Trennung der Variablen und Zeitintegration, gelangt man zur Durchflussgleichung der Druck-Zeit Methode (DZM):

$$Q_{t_0} = \frac{1}{\rho F_{PS}} \int_{t_0}^{t_{Ende}} (\Delta p_s + \Delta p_d + \Delta p_v) dt + Q_{t_{Ende}} \quad (7)$$

Die somit berechenbaren absoluten Durchflüsse wurden über eine Potenznaherungen mit den Beziehungen aus [2] zur Kalibrierung der Proportionalitätsfaktoren K,N (siehe Gl. 8) des relativen Durchflusses der WINTER-KENNEDY Methode (WKM) verwendet, welche auf folgendem Prinzip beruht: Ein Wasserteilchen innerhalb einer gekrümmten Rohrströmung erfährt eine Zentrifugalkraft, welche eine mit zunehmendem Radius (siehe Abb. 1) lokale Druckerhöhung zur Folge hat. Zu Positionen kleinerer Radien ergibt sich somit eine Druckdifferenz, welche dem relativen Durchfluss proportional ist [5]:

$$Q_{rel} = K \Delta p^N \quad (8)$$

Durch den an den Spiralgehusen der Turbinen gemessenen Diff.-Druck $\Delta p = p_{Au\ss en} - p_{Innen}$ kann nach erfolgter Kalibrierung der Koeffizienten der Maschinendurchfluss kontinuierlich während des Betriebs bestimmt werden.

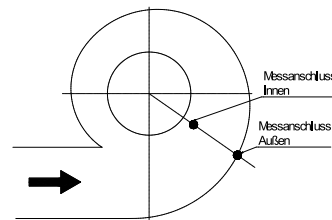


Abb 1. Messanschlüsse WKM am Spiralgehäuse zur Bestimmung des Differenzdrucks;

3 METHODIK

Für die vorliegende Arbeit wurde aufgrund mangelnder Zugänglichkeit die Messstrecke zwischen einem Entluftungspunkt im Krafthaus und dem Pegel am Oberwasserbecken gewählt. Die Messung wurde laut Abb. 2 aufgebaut, wodurch die drei Turbinen M1,2,3

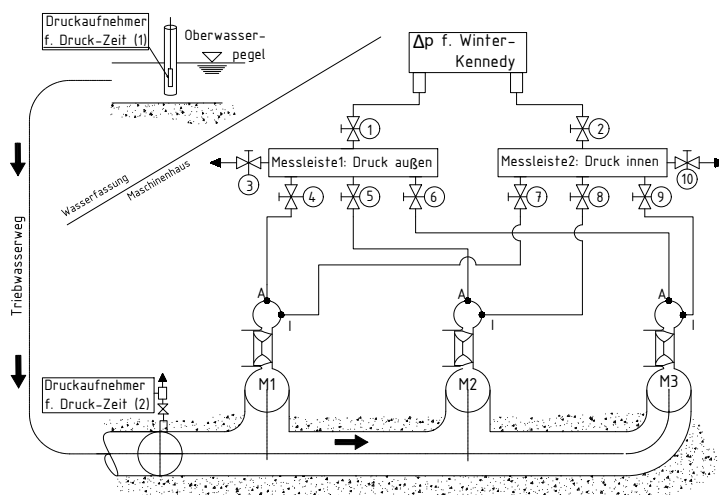


Abb. 2. Messaufbau Durchflussbestimmung WKM und DZM

mit demselben Differenzdrucksensor für die WINTER-KENNEDY Methode gemessen werden konnten [6]. Hierfür werden die beiden Messleisten mittels Ventilen mit den 3 Turbinen gema\ss Abb. 2 verbunden. Am Ende jeder Aufzeichnung wurde ein Lastabwurf des jeweiligen Maschinensatzes für die DZM durchgeführt,

wodurch sich jedem gemessenen Betriebspunkt ein absoluter Durchflusswert zuordnen lässt. Nach Gl. 7 ergibt sich Q_{t_0} zum Maschinendurchfluss des jeweiligen Betriebspunktes.

Für das Ende der Messung nach der DZM benötigt man einen Zeitpunkt, bei welchem man das verbleibende Q_{t_Ende} kennt. Das bedeutet, dass man den Schließvorgang des Absperrorgans abwarten muss. Durch die abrupte Änderung der Strömungsgeschwindigkeit zum Zeitpunkt „Absperrklappe geschlossen“ (siehe Abb. 3), folgt gemäß dem instationären Term der BERNOULLI-Gleichung (Gl. 1) ein erneuter Druckanstieg. Der Endzeitpunkt muss nach [3] derart gewählt werden, dass sich die Flächen der gedämpften Schwingung, welche um $p_v=0$ oszilliert, aufheben (siehe Abb. 3).

4 ERGEBNISSE UND INTERPRETATION

Da der gesuchte Durchfluss in den Drucktermen von Gl. 7 und somit im gesuchten Ergebnis enthalten ist, kann diese nur iterativ gelöst werden. Ein anfänglich gewählter Erwartungswert wird zur Berechnung des Ergebnisses verwendet, wobei als erste Schätzfunktion linear zwischen angenommenem Anfangsdurchfluss und Q_{t_Ende} approximiert wird [7]. Die Iteration kann abgebrochen werden, sobald die Veränderung im Ergebnis annähernd null wird.

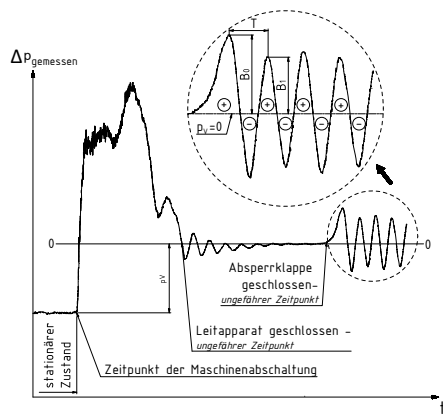


Abb. 3. Gemessene Differenzdruckkurve der Maschinenabschaltung M1

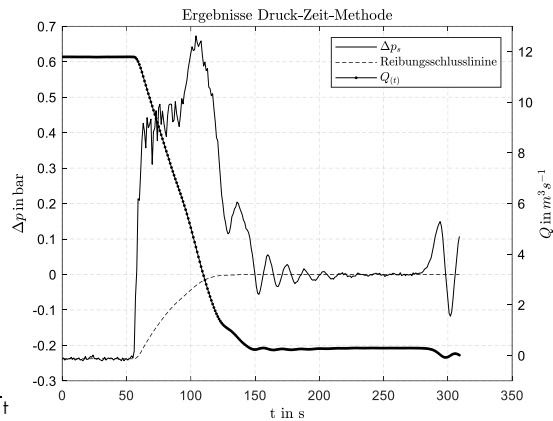


Abb. 4. Auswertung nach der DZM M1; Primärachse: Differenzdruck und Reibungsschlusslinie; Sekundärachse: berechneter zeitlicher Durchflussverlauf

Die Änderung des Durchflusses über die Zeit $\frac{dQ}{dt}$, (Gl. 6) wird im konkreten Fall durch den Notschluss der jeweiligen Turbine eingeleitet. Die sich im Zuge der Durchflussverringern durch die Abschaltung ebenfalls verringernden Höhenverluste, werden für den jeweiligen Iterationsschritt berechnet ($\sim \frac{Q(t)^2}{Q_0^2}$). So ergibt sich für jeden Zeitschritt der Verlustanteil und es zeichnet sich die sogenannte Reibungsschlusslinie. Die integrierte Fläche ergibt sich schließlich zwischen Δp_s und der Reibungsschlusslinie.

5 MESSUNSICHERHEIT

Einer der Haupteinflussfaktoren für die Messunsicherheit nach der DZM ist lt. IEC 60041 [5] die Geometrie zwischen den beiden Messquerschnitten. Da für die vorliegende Arbeit der gesamte Triebwasserweg als Messbereich gewählt werden musste, ergibt sich ein höherer Wert dieses Anteils im Vergleich zu einer Variante, in der beide Messpunkte auf einem zylindrischen Rohrabschnitt liegen (siehe Gl. 5). Durch Berücksichtigung aller unabhängigen Einzelunsicherheiten erhält man die zu erwartende Messunsicherheit zur Durchflussbestimmung nach der DZM von $\sum f_{DZM} = 1,95\%$ [5].

Für die Veranschaulichung der Messgenauigkeit nach WK wurden obige Ergebnisse als wahrer Wert angenommen und die WK-Messpunkte als Abweichung in % dazu aufgetragen:

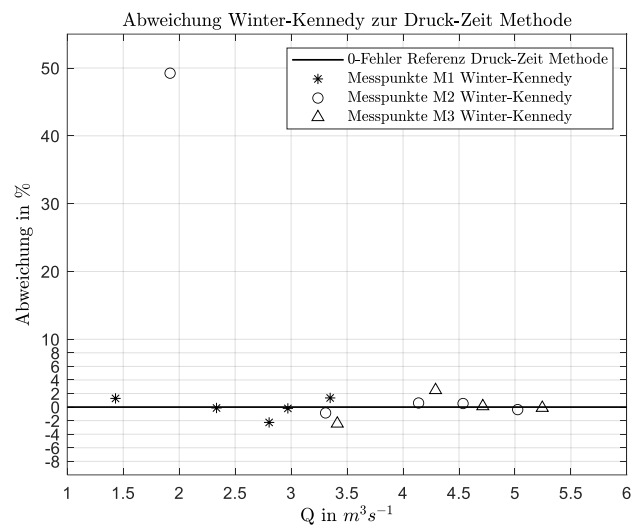


Abb. 5. Ergebnisse der Messunsicherheit WKM der drei Turbinen M1,2,3

Laut Literatur [2] ist die Bestimmung der WK-Koeffizienten bei kleinen Werten des Differenzdrucks, sprich kleinen Durchflüssen, sehr sensibel, was eine Erklärung für den Messausreißer im unteren Durchflussbereich sein kann.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es konnte mit Hilfe der vorgestellten Methoden eine Genauigkeit erreicht werden, die im Bereich jener der Standardmethoden liegt. Der Messaufbau der vorgestellten Verfahren, beschränkte sich auf jeweils zwei Druckmesspunkte entlang des Kraftabstieges bzw. an der Spirale, was enorme Vorteile bietet. Nach [4] werden das Design der Messanschlüsse an der Spirale, die Anzahl der Messpunkte und Sekundärströmungen im Messbereich als Fehlerquelle für die WKM vermutet. Letztere beeinflussen auch die Genauigkeit der DZM und könnten künftig wie in [8] vorgeschlagen durch numerische CFD-Simulationen minimiert werden.

7 REFERENZEN

- [1] N. MEYESTRE: Hydraulische Maschinen, Escher Wyss AG, Zürich
- [2] T. RAU; M. EISSNER: "Experience with WINTER-KENNEDY coefficients on hydraulic identical units", IGHEM conference paper, Brasilien 2014
- [3] A. ADAMKOWSKI; W. JANICKI: "Selected Problems in calculation procedures for the Gibson discharge measurement method", IGHEM conference paper, Indien 2010
- [4] B. BAIDAR: "A Sensitivity Analysis of the WINTER-KENNEDY Method", Licentiate Thesis, TU-Lulea, Schweden 2018
- [5] IEC 60041, Field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines, International Electrotechnical Commission, 3. Auflage 1991-11
- [6] L. ZINGERLE: Anlagen- und Wirkungsgradmessung am Wasserkraftwerk Mühlen, Bachelorarbeit MCI 2022
- [7] G. THURNER: Durchflussmessung nach dem Druck-Zeitverfahren: Messungen und Auswertungen an einem Modellversuch und an dem Druckabstieg des Kraftwerkes Obere Sill, Masterarbeit TU-Graz 2019
- [8] A. ADAMKOWSKI, Z. KRZEMIANOWSKI, W. JANICKI: Flow rate measurement using the pressure time method in a hydropower plant curved penstock