

Duktile Guss- Rohrsysteme für Kleinwasserkraftanlagen

Jürgen Rammelsberg

Since about 40 years ductile cast iron pipe systems are used for water distribution and for small hydroelectric power plants as well. Especially their possible high working pressure capacity and their easy and secure assembly technique made them preferred for extreme difficult pipeline construction sites in alpine terrain. Material properties, system components, jointing technique, structural and hydraulic design are presented as well as some realized projects.

Duktile Guss-Rohrsysteme werden seit 40 Jahren in der Wasserversorgung und ebenso für Kleinwasserkraftwerke eingesetzt. Vor allem ihr möglicher hoher Betriebsdruck und ihre einfache und sichere Montagetechnik machten sie zum bevorzugten Rohrsystem zum Bau von Rohrleitungen unter extrem schwierigen Bedingungen in alpinem Gelände. Materialkennwerte, Systemkomponenten, Verbindungstechnik, Wanddickenberechnung und hydraulische Auslegung werden beschrieben, sowie einige wenige durchgeführte Projekte werden dargestellt.

1 Einleitung

Die Nutzung erneuerbarer Energien durch Wasserkraftanlagen ist ein wesentlicher Aspekt der Zukunftsfähigkeit unserer Volkswirtschaften. Die Anwendung duktiler Guss-Rohrsysteme in Kleinwasserkraftanlagen soll im folgenden Vortrag in das Motto des heutigen Tages eingebunden werden.

2 Geschichtliche Entwicklung und Leistungsbereich

Rohrsysteme aus duktilem Gusseisen werden seit Mitte der 60er Jahre industriell im Schleudergießverfahren hergestellt. Im Vergleich zum Grauguss, dem Rohrmaterial der Industrialisierung, war der neue Werkstoff verformbar. Die gefürchteten Schalenbrüche von Graugussrohren bei Druckstößen oder Erdbewegungen gehörten nun der Vergangenheit an.

Es war nur folgerichtig, dass man bald die Eignung der neuen Rohre beim Bau von Kleinwasserkraftwerken nutzte. Die erste dokumentierte Turbinenleitung aus duktilen Gussrohren DN 500 wurde 1967 im Stuibenkraftwerk Ötztal / Österreich verlegt.

Nach inzwischen mehr als 40 Jahren erfolgreicher Bewährung sind Rohrssysteme aus duktilem Gusseisen beim Bau von Triebwasserleitungen kleiner Wasserkraftwerke nicht mehr wegzudenken.

Die eindrucksvolle Entwicklung der Leitungslängen von Triebwasserleitungen in diesem Zeitraum in Europa zeigt **Abb. 1**. Dabei sind allein in den letzten 5 Jahren 160 km Triebwasserleitungen, vor allem in den Alpen und in Norwegen gebaut worden.

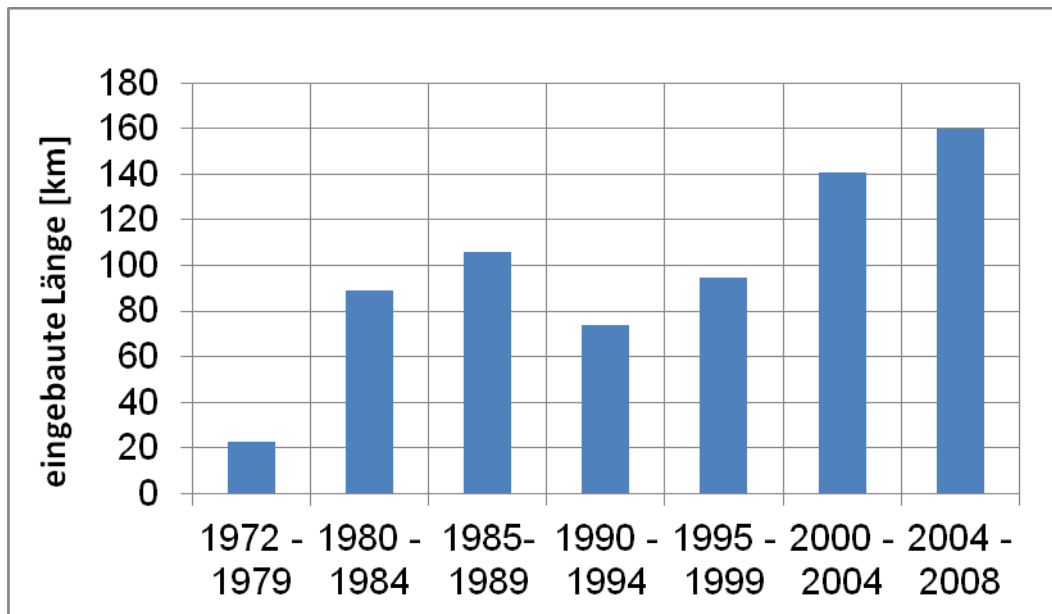


Abb. 1: Entwicklung der Längen von Triebwasserleitungen aus duktilem Gusseisen in Europa in den letzten 40 Jahren

Einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Kraftwerksleistung und dem Durchmesser der Triebwasserleitung zeigt **Abb. 2**. Zwar hängt die Leistung auch von der Fallhöhe des Triebwassers ab, jedoch dürfte der Einfluss der Wassermenge überwiegen.

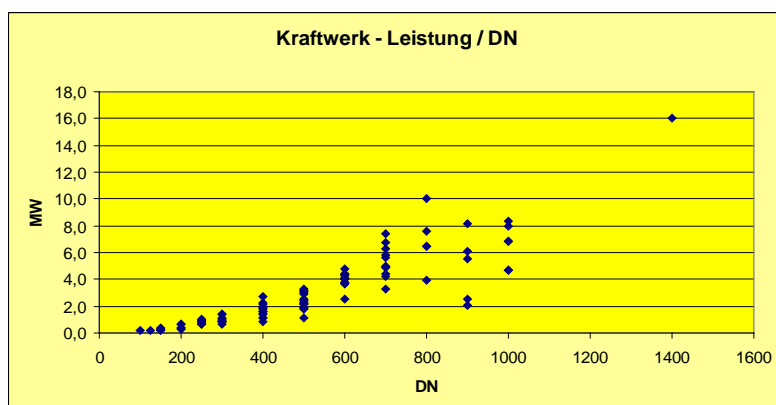


Abb. 2: Zusammenhang zwischen Kraftwerksleistung und Nennweite der Triebwasserleitung

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) hat den Bau von Kleinwasserkraftanlagen stimuliert. Aufgrund der Einspeisevergütung ist es sinnvoll, das vorhandene Potential zu erschließen oder auch ältere Anlagen auf den neuesten Stand der Technik zu bringen.

Die Kosten für den Bau von Wasserkraftanlagen sind grundsätzlich an die Höhe der installierten Leistung gebunden, aber auch abhängig von der Fallhöhe und von den weiteren Standortbedingungen, also meist dem Schwierigkeitsgrad der Leitungstrasse im alpinen Gelände.

Naturgemäß werden Turbinenleitungen in vorwiegend schwierigen Geländeformen eingebaut. Dies bedeutet, dass auch den Einbaukosten dieser Leitungen bei der Auswahl der Rohrmaterialien eine entscheidende Bedeutung zukommt.

Mit ihren geringen Baulängen von 5 oder 6 m, ihrer Druckbeständigkeit sowie der einfach zu montierenden Steckmuffen-Verbindung, die den erreichbaren Betriebsdruck keinesfalls einschränkt, konnten sich duktile Gussrohre in einem bestimmten Leistungsbereich der Kleinkraftwerke einen festen Platz erobern.

3 Systemkomponenten

Duktile Guss-Rohrsysteme für den Bau von Triebwasserleitungen bestehen aus Rohren, Formstücken und Armaturen. Die Rohre mit beweglichen Steckmuffen-Verbindungen werden ausschließlich im Schleudergussverfahren hergestellt, während innerhalb des Krafthauses auch Flanschenrohre vorkommen können, die wie die Formstücke im Sandgussverfahren hergestellt werden.

Werkstoff ist das in EN 545 genormte, überwiegend ferritische duktile Gusseisen mit folgenden typischen Kennwerten:

Zugfestigkeit $R_m \leq 420$ MPa

Bruchdehnung $A \leq 10\%$

0,2%-Dehngrenze $R_{p0,2} \leq 270$ MPa

Für im Sandformguss hergestellte Formstücke mit ferritisch-perlitischem Gefüge liegt die Mindestbruchdehnung bei 5%, während die Festigkeitswerte die Anforderungen an Rohre erfüllen müssen.

Armaturengehäuse als Teile des Maschinenbaus genügen nach EN 1563 ähnlichen Anforderungen. Sie erfüllen auch in großen Talsperren wichtige Absperrfunktionen.

3.1 Verbindungen

Das herausragende Charakteristikum duktiler Gussrohre ist ihre Verbindungstechnik. Die bewegliche Steckmuffen-Verbindung – ob längskraftschlüssig oder nicht – erlaubt eine schnelle und sichere Montage, gerade in schwierigem Gelände, an Steilhängen oder unzugänglichen Orten. Diese einfache Technik unterstützt die so genannte „Auf-Zu-Methode“, wenn nur der Graben für ein einziges Rohr geöffnet werden soll. Beim Bau von Turbinenleitungen im alpinen Gelände ergeben sich meist auch noch zusätzliche erschwerte Bedingungen wie z. B. eine Bauzeit meistens nur zwischen Mai und September. Nach Einbau eines jeden Rohres muss der Rohrgraben sofort wieder verfüllt und abgedeckt und mit der alten Flora versehen werden, damit sich im Fall eines Regens keine Schlammlawine bilden kann.

Mit diesem Bauverfahren entfällt der ohnehin schwierige Transport des Aushubmaterials an eine geeignete Stelle, zum anderen wird das Risiko von Murenabgängen angesichts des oft im Gebirge schnell umschlagenden Wetters minimiert.

Die Abmessungen und zulässigen Abweichungen der in **Abb. 3** dargestellten gummigedichteten TYTON[®]-Verbindung sind so gewählt, dass selbst unter ungünstigsten Bedingungen (bei maximaler Dezentrierung und gleichzeitig auftretenden Scherlasten) über die gesamte Funktionsdauer Dichtheit gewährleistet ist. EN 545 enthält entsprechende Funktionsanforderungen.

Die Verbindung nimmt keine axialen Kräfte auf, wie sie an Richtungsänderungen oder Endverschlüssen aus dem Wasserinnendruck

entstehen. Diese Kräfte sind durch Betonwiderlager oder mit längskraftschlüssigen Verbindungen in den Baugrund einzuleiten.

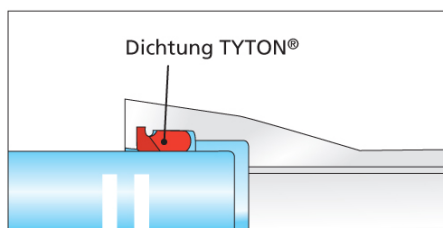


Abb. 3: Steckmuffen-Verbindung TYTON®

Längskraftschlüssige Muffen-Verbindungen bieten den Vorteil, dass alle Kräfte aus dem Innendruck von den Verbindungen aufgenommen und über Erddruckaktivierung und Reibung in den Baugrund eingetragen werden können.

Abb. 4 zeigt zwei typische kraftschlüssige Verbindungen:

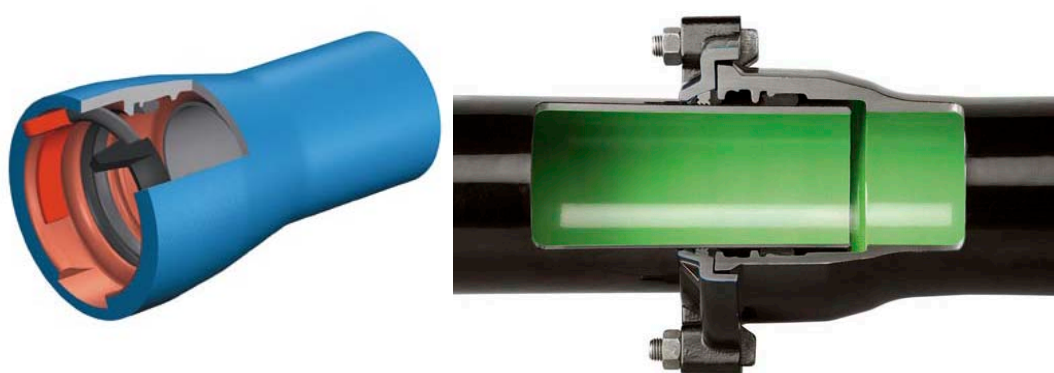


Abb. 4: kraftschlüssige Muffen-Verbindungen

Links im Bild stützen sich Verriegelungselemente einerseits formschlüssig an einer Schweißraupe auf dem Einsteckende ab und übertragen die Längskraft auf der anderen Seite auf eine Sicherungskammer in der Muffe. Die rechte Bildhälfte zeigt eine außenliegende reibschlüssige Verbindung, bei der gehärtete Zahnsegmente die Kraft über Reibung auf das Einsteckende übertragen.

Die Anzahl der zu sichernden Verbindungen neben einer Richtungsänderung wird nach DVGW-Arbeitsblatt GW 368 berechnet.

3.2 Rohrwanddicke

Die Rohrwanddicke wird in Abhängigkeit von Durchmesser und Bauteilbetriebsdruck PFA mit der Kesselformel (1) in EN 545 Anhang A berechnet,

$$PFA = \frac{20 \cdot e_{\min} \cdot R_m}{(DE - e_{\min}) \cdot S_F} \quad (1)$$

in der

R_m die Mindestzugfestigkeit in Megapascal ($R_m \leq 420$ MPa),

e_{\min} die Mindestwanddicke des Rohres in mm,

DE der Nennaußendurchmesser des Rohres in mm,

S_F ein Sicherheitsfaktor von 3

sind. Für die Mindestzugfestigkeit von 420 MPa nimmt die Kesselformel folgende Gestalt an:

$$PFA = \frac{20 \cdot e_{\min} \cdot 420}{(DE - e_{\min}) \cdot 3} \quad (2)$$

oder, mit der Mindestwanddicke als abhängiger Variablen als Funktion des zulässigen Bauteilbetriebsdruckes PFA für einen bestimmten Rohraußendurchmesser DE

$$e_{\min} = \frac{3 \cdot PFA \cdot DE}{8400 + 3 \cdot PFA} \quad (3)$$

3.3 Außenschutz

Für alle Bodenarten haben duktile Guss-Rohrssysteme passende Außenschutzarten; sie stellen eine Nutzungsdauer von 100 Jahren sicher.

Die Standardlösung entsprechend EN 545 ist aktiver Korrosionsschutz mit einer metallischen Zink-Auflage (200 g/m²) und Deckbeschichtung aus Bitumen bzw. Epoxid- oder Polyurethanharz (PUR). Dickbeschichtungen auf Basis PUR nach EN 15189 und eine Zementmörtel-Umhüllung nach EN 15542 sind für hohe Bodenaggressivitäten möglich. Formstücke und Armaturen werden standardmäßig nach EN 14901 mit einer sowohl außen als auch innen aufgetragenen Epoxidharzpulverbeschichtung geliefert.

3.4 Auskleidungen und Hydraulik

Üblich sind Auskleidungen aus Zementmörtel und Polyurethanharz. Diese Auskleidungen sind gegenüber allen vorkommenden Wässern beständig.

Die Durchmesser, Wanddicken und Auskleidungsdicken der Rohre sind so festgelegt, dass bei Nennweiten über DN 150 der lichte Durchmesser mindestens gleich oder größer als die Nennweite ausfällt. Mit den genormten

Auskleidungen wird eine Konstanz der hydraulischen Rauigkeit über die gesamte Betriebsdauer und Leitungslänge erreicht, wobei vor allem Inkrustationen nachhaltig vermieden werden.

Druckverluste im Leitungssystem werden in erster Linie durch die Rohrverbindungen und die Anzahl der verwendeten Formstücke bei Richtungsänderungen beeinflusst. Die Wandrauigkeit ist von nachrangiger Bedeutung. Nach DVGW Arbeitsblatt W 302 ist bei Einsatz duktiler Gussrohre in Turbinenleitungen (gestreckte Leitungsführung) eine Rohrrauigkeit von $k_1 = 0,1$ mm anzusetzen.

4 Besondere Projekte

4.1 Kraftwerk Dorferbach in Osttirol

- Bauherr: TIWAG
- Duktile Druckrohre DN 800 mit Zementmörtel-Auskleidung und längskraftschlüssiger BLS[®] - Steckmuffen-Verbindung
- Wanddickenklasse K 9 bis K 18 (Wanddicke bis 23,4 mm)
- Leitungslänge: 4.400 m
- Höhendifferenz: 760 m

Dieses Projekt ist die weltweit erste Triebwasserleitung aus duktilem Gusseisen im Durchmesser von 800 mm, die mit einem Prüfdruck von 93 bar abgenommen wurde.

4.2 Kraftwerk Furkelbach in Südtirol

- Bauherr: Gemeinde Trafoi
- Duktile Druckrohre DN 400 mit längskraftschlüssiger BLS[®] - Steckmuffen-Verbindung
- Wanddickenklasse K 9 bis K 14 (Wanddicke bis 12,6 mm)
- Leitungslänge: 2.500 m
- Höhendifferenz: 480 m

Bei diesem Projekt musste etwa ein Drittel der Rohrtrasse mittels Sprengvortrieb bearbeitet werden. Die Rohre und Formstücke wurden mittels einer mobilen Standseilbahn an ihren Einbauort in dem teils unwegsamen Gelände gebracht. Die steilsten Teilstücke der Leitung wiesen eine Neigung bis zu 65° auf.

4.3 Trinkwasserkraftwerke

Trinkwasserkraftwerke haben in der Schweiz lange Tradition. Seit 1990 wurden etwa 100 Trinkwasserkraftwerke gebaut; sie erzeugen heute rund 100 Mio. kWh/a Elektrizität. Damit lassen sich 112.000 Haushalte versorgen. Die Vorteile für den Betreiber liegen auf der Hand. Der in Trinkwasserkraftanlagen erzeugte Strom wird lokal produziert, die Natur und der Wasserkreislauf bleiben praktisch unberührt, und mit relativ geringen Kosten kann ein wichtiger Beitrag im Sinne der Energie- und Klimapolitik geleistet werden. **Abb. 5** zeigt das Anlagenprinzip:



Abb. 5: Prinzip eines Trinkwasserkraftwerks

Zur Stromerzeugung wird die Fallhöhe zwischen der Wasserfassung und dem Trinkwasserbehälter der Gemeinde im Tal ausgenutzt. Mit der üblichen Einspeisevergütung amortisiert sich die Anlage innerhalb weniger Jahre.

4.4 Kraftwerk Holzerbach in Südtirol

- Duktile Druckrohre DN 300 mit Zementmörtel-Auskleidung und längskraftschlüssiger BLS[®] - Steckmuffen-Verbindung
- Wanddickenklasse K 9 (Wanddicke = 7,2 mm)
- Leitungslänge: 1.400 m
- Höhendifferenz: 380 m

Dieses Beispiel steht für die Lösung der Aufgabe, der Triebwasserleitung Teilmengen für andere Rechtsträger (Beregnung, Löschwasser) zu entnehmen. Häufig werden für diese zusätzlichen Entnahmen Hydrantenanschlüsse eingerichtet. Die Abgänge mit diversen Messeinrichtungen werden in Armaturenschächten untergebracht. **Abb. 6** zeigt einen beispielhaften Armaturenschacht, wie er in der Triebwasserleitung zum Kraftwerk Holzerbach in Südtirol eingebaut wurde.



Abb. 6: Armatureschacht für mehrere Leitungsabhänge

4.5 Sanierung eines Ringkolbenventils in der Talsperre Wendefurth

Die Überarbeitung eines 40 t schweren Ringkolbenventils DN 2000 nach 40 Betriebsjahren erwies sich wirtschaftlicher und nachhaltiger als die Herstellung einer neuen Armatur. **Abb. 7** zeigt das Ventil beim Ausbau aus der Talsperre.



Abb. 7: Ausbau eines Ringkolbenventils DN 2000

5 Ausblick

Der künftige Bau von Kleinwasserkraftwerken wird sicher entscheidend von der Energiepolitik der Länder bzw. der EU beeinflusst werden. Da die einfachsten und rentabelsten Projekte wahrscheinlich schon realisiert sind, wird sich der mögliche weitere Ausbau der Wasserkraft in Richtung höherer Anforderungen an das Rohrmaterial und Einbausituationen entwickeln.

Literatur

Rammelsberg, J. und Titze, E.: Ductile iron pipe systems for hydropower plants, Posterpräsentation auf der hidroenergia 2010, Lausanne

Moser, A.: Neubau von Triebwasserleitungen für Kleinwasserkraftwerke.
In: GUSS-ROHRSYSTEME 45(2011), S. 67

Aebi, R.: Stromgewinnung durch Ausnutzung der Wasserkraft hat Zukunft
In: GUSS-ROHRSYSTEME 44(2010), S. 62

Hammer, Th.: Armaturen aus duktilem Gusseisen - eine Investition in die Zukunft
In: GUSS-ROHRSYSTEME 44(2010), S. 49

Bildnachweis

Abb. 1, 2: Harzwasserwerke; alle anderen vom Verfasser.

Autor:

Dr.-Ing. Jürgen Rammelsberg,
Fachgemeinschaft Guss-Rohrsysteme (FGR / EADIPS) e. V.
Im Leuschnerpark 4
64347 Griesheim 7 / Deutschland
Tel.: +49 – 6155 – 605-225
Fax: +49 – 6155 – 605-226
rammelsberg@arcor.de