

Leseprobe

Robert Freimann

Hydraulik für Bauingenieure

Grundlagen und Anwendungen

ISBN (Buch): 978-3-446-43799-9

ISBN (E-Book): 978-3-446-43740-1

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-43799-9>

sowie im Buchhandel.

7 Gerinnehydraulik

In einem Übersichtslageplan (*Bild 7.1*) sind der Verlauf eines Flusses, infrastrukturelle Bauwerke wie Straßen, Brücken und Bahndamm sowie die angrenzenden Flächen bei Überschwemmungen – eingebettet in einen Höhenlinienplan – zu erkennen:

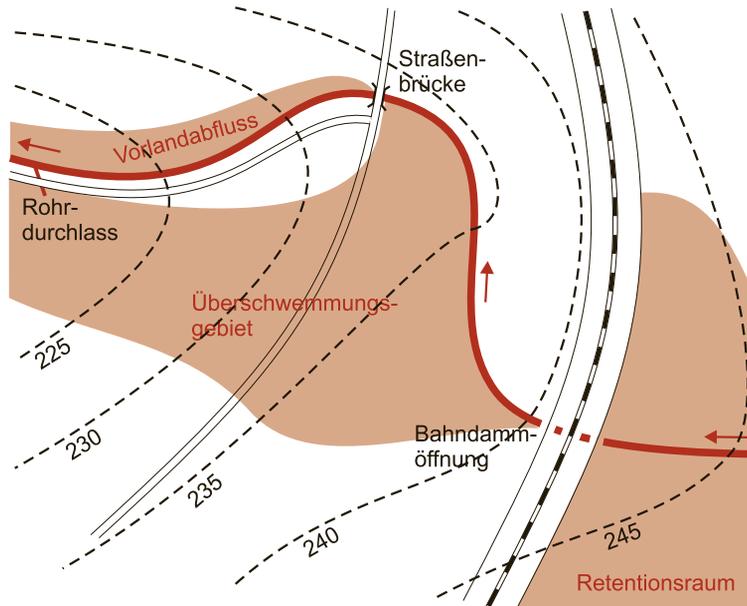


Bild 7.1 Flusslauf mit angrenzenden Überschwemmungs- und Ausweichflächen

In *Bild 7.2* sind mit überhöhtem Gefälle die wesentlichen Formen von Gerinneströmungen zusammengefügt. Darin werden wichtige Aspekte der Gerinnehydraulik in ihrem Zusammenwirken gezeigt. Im Einzelnen sind dies folgende Bereiche, die im vorliegenden Kapitel behandelt werden:

1. Gleichförmige Gerinneströmung bei strömendem Abfluss
2. Senkungslinie bei strömendem Abfluss bei Beschleunigung
3. Beschleunigte Bewegung im Schießen
4. Gleichförmige Strömung bei schießendem Abfluss
5. Reibungstau bei verzögerter Bewegung bei schießendem Abfluss
6. Übergang vom Schießen zum Strömen durch einen Wechselsprung
7. Staulinie bei strömendem Abfluss
8. Überfallströmung

In der Gerinnehydraulik geht es um Strömungsvorgänge mit freiem Wasserspiegel. In natürlichen Systemen kann das Wasser bei zu hohen Abflüssen das Flussbett verlassen und sucht sich Abkürzungen oder Ausweichflächen. In nebenstehender Situation müssen durch hydraulische Untersuchungen Retentionsräume (Speicherräume) ermittelt werden, die Durchströmung von Brücken oder in Rohrdurchlässen ist zu bestimmen und die natürliche Erweiterung des Flussquerschnitts in Form eines Vorlandabflusses muss berechnet werden. Die Basis der gesamten Betrachtungen ist der Wasserspiegelverlauf im Fluss. Dieser wird mittels entsprechender hydraulischer Berechnungen erhalten. In diesem Kapitel werden dazu die hydraulischen Grundlagen vorgestellt.

Die Fließtiefe h in einem Gerinne wird nicht senkrecht zum Wasserspiegel bzw. zur Sohle gemessen, sondern in vertikaler Richtung (vgl. *Bild 7.8*). Der so entstehende Fehler ist wegen der geringen Gefälle von Sohle, Wasserspiegel und Energielinie vernachlässigbar gering.

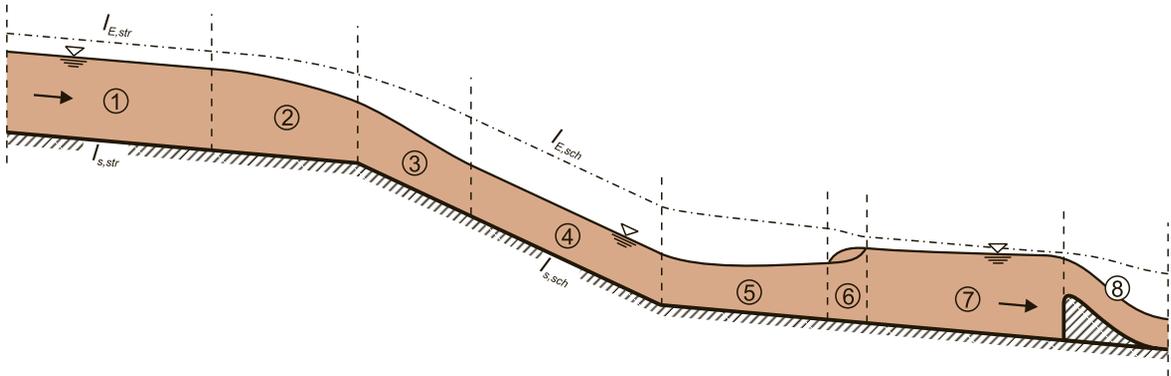


Bild 7.2 Verschiedene Fließzustände in einem Gerinne

7.1 Allgemeine Beziehungen

Kanäle oder teilgefüllte Leitungen werden meistens mit regelmäßigem, über größere Längen konstant bleibendem Fließquerschnitt angelegt. Natürliche Fließgewässer bestehen dagegen aus einem unregelmäßigen Querschnittsverlauf und sind häufig mit Pflanzen bewachsen. Zudem führen Flüsse oftmals Geschiebe aus Kies und Sand mit sich, was die Berechnung der Strömung zusätzlich erschwert.

Unter **Gerinneströmung** oder auch **Freispiegelströmung** ist die Wasserbewegung in einem künstlichen Kanal, einer teilweise gefüllten Rohrleitung oder einem natürlichen Bach- oder Flussbett zu verstehen. Die Strömung im Gerinne hat im Gegensatz zu einer Druckleitung einen **freien Wasserspiegel** (vgl. Bild 5.1). An dieser Trennfläche zwischen Wasser und Luft herrscht überall atmosphärischer Druck. Da die Dichte der Luft wesentlich kleiner als die des Wassers ist (vgl. Tab. 1.2) und zudem der Atmosphärendruck allseitig angreift, kann der Lufteinfluss nahezu immer vernachlässigt werden.

Die **Geschwindigkeitsverteilung** in einer Gerinneströmung ist im Unterschied zum vollgefüllten Kreisrohrquerschnitt asymmetrisch (Bild 7.3). An der Gerinneberandung wird die Strömungsgeschwindigkeit aufgrund der Haftbedingung gleich Null, im Längsschnitt zeigt sich das Geschwindigkeitsprofil in guter Näherung in Form einer logarithmischen Kurve. Die genaue Lage der Maximalgeschwindigkeit v_{max} ist von der Querschnittsgeometrie abhängig. Sie befindet sich überschlägig etwa auf Höhe von 80 % der Wassertiefe h . Gemäß Stromfadentheorie wird die Geschwindigkeit als mittlere Größe $v = Q/A$ angesetzt (Gl. (3.2)).

Während bei Rohrströmungen der **Strömungsquerschnitt vorgegeben** ist und sich je nach Strömungsverhältnissen und Randbedingungen ein bestimmter Druck einstellt (Kapitel 5), haben Gerinneströmungen als Hauptmerkmal einen **variablen Strömungsquerschnitt**. Dem variablen Druck entspricht dabei die veränderliche Wasseroberfläche, da Wasserspiegel und Drucklinie identisch sind (vgl. Abschn. 3.5). Damit haben Gerinneströmungen einen **zusätzlichen Freiheitsgrad**, der die Berechnungen erschwert bzw. aufwendiger gestaltet.

Englische Fachbegriffe:

Durchlass culvert

freie Oberfläche free surface

Fließgewässer

running/flowing waters

Gerinnehydraulik

channel hydraulic

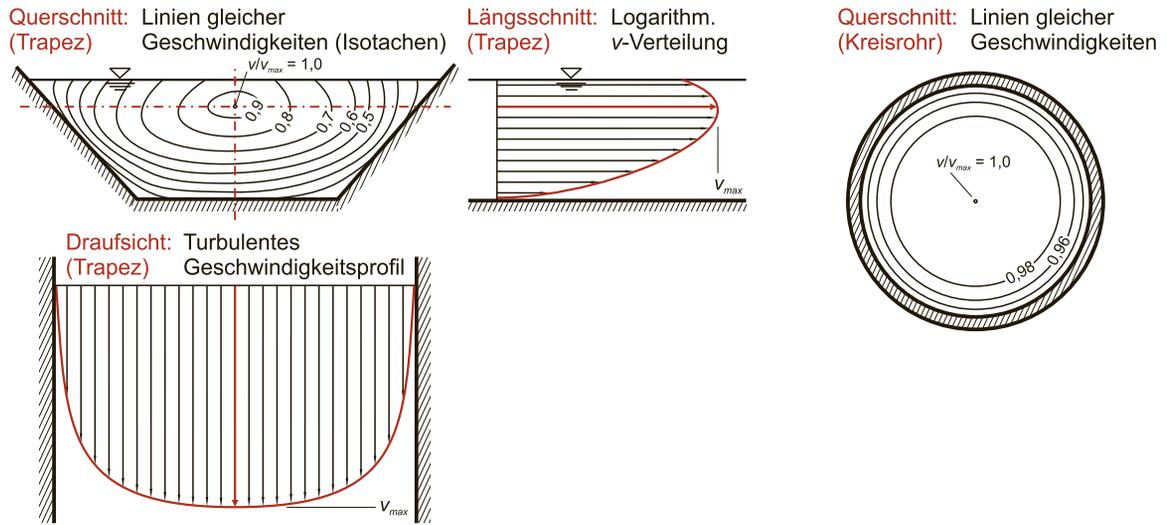


Bild 7.3 Geschwindigkeitsverteilungen in einem Gerinne mit Trapezquerschnitt im Vergleich zum Kreisrohr

Die Querschnittskenngößen zur Beschreibung von Gerinneströmungen sind vom Wasserstand h abhängig. Es sind dies die **durchflossene Fläche** A , der **benetzte Umfang** U sowie die **Wasserspiegelbreite** b . Damit kann der Fließvorgang in einem Gerinneabschnitt mithilfe der in *Abschn.* 3.3.3 eingeführten Beziehungen beschrieben werden:

- Hydraulischer Radius: $r_{hy} = \frac{A}{U}$ (3.11)

- Reynoldszahl: $Re = \frac{v \cdot 4 \cdot r_{hy}}{\nu}$ (3.12)

In *Bild 7.4* sind beispielhaft verschiedene Gerinnequerschnitte mit den wichtigsten Bezeichnungen dargestellt:

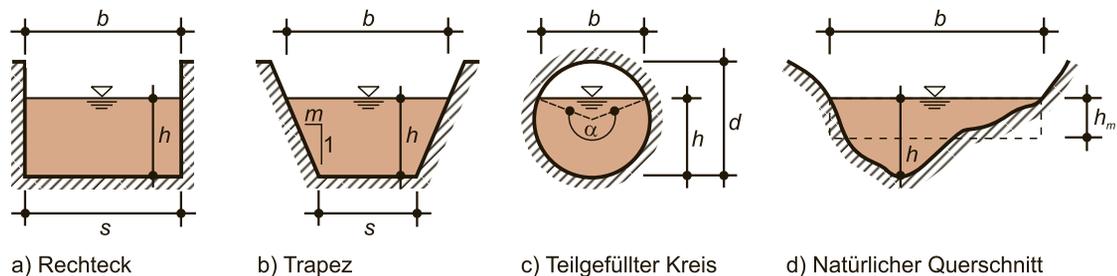


Bild 7.4 Querschnittsgrößen verschiedener Gerinneprofile

- Für einen **Rechteckquerschnitt** erhält man mit *Bild 7.4a*:

$$A = s \cdot h \quad (7.1)$$

$$U = s + 2 \cdot h \quad (7.2)$$

$$r_{hy} = \frac{sh}{s + 2h} = \frac{h}{1 + 2h/s} = \frac{h}{1 + 2h/b} \quad (7.3)$$

Wird die Sohlbreite s zu Null, so beschreiben die *Gln. (7.4) bis (7.6)* einen gleichseitigen dreieckigen Querschnitt. Für $m = 0$ gehen sie in die *Gln. (7.1) bis (7.3)* über.

- Ein symmetrischer **Trapezquerschnitt** wird gemäß *Bild 7.4b* durch folgende Gleichungen beschrieben:

$$A = s \cdot h + m \cdot h^2 \quad (7.4)$$

$$U = s + 2h \cdot \sqrt{1 + m^2} \quad (7.5)$$

$$r_{hy} = \frac{sh + mh^2}{s + 2h \cdot \sqrt{1 + m^2}} \quad (7.6)$$

Der **Zentriwinkel** α steht in Beziehung mit der bezogenen Wasserspiegelbreite

$$\frac{b}{d} = \sin \frac{\alpha}{2}$$

sowie mit der bezogenen Fließtiefe

$$\frac{h}{d} = \sin^2 \left(\frac{\alpha}{4} \right).$$

- Etwas komplexer sind die geometrischen Verhältnisse beim **teilgefüllten Kreisquerschnitt** gemäß *Bild 7.4c*. Die Größe α ist der im Bogenmaß einzusetzende Zentriwinkel zur Erfassung der Wassertiefe:

$$A = \frac{d^2}{8} \cdot (\alpha - \sin \alpha) \quad (7.7)$$

$$U = \frac{d}{2} \cdot \alpha \quad (7.8)$$

$$r_{hy} = \frac{d}{4} \cdot \frac{\alpha - \sin \alpha}{\alpha} \quad (7.9)$$

- Für manche Berechnungen werden sehr breite Gerinne als **breites Rechteck** angenähert. Mit dieser Annäherung wird ein erster Überblick über die hydraulischen Geschehnisse gewonnen. Mit der mittleren Fließtiefe h_m gemäß *Bild 7.4d*

$$h_m = \frac{A}{b} \quad (7.10)$$

Viele „großen“ natürlichen Gerinnequerschnitte können in guter Näherung als breites Rechteck betrachtet werden.

kann für sehr große Breiten b und damit $h_m/b \rightarrow 0$ in *Gl. (7.3)* eingesetzt der hydraulische Radius erhalten werden zu

$$r_{hy} = \frac{h_m}{1 + 2 \cdot 0} = h_m \quad (7.11)$$

Beispiel 7.1

In einer durchströmten Kreisrohrleitung mit $d = 2,0$ m liegt die Wassertiefe $h = 1,5$ m vor. Zu ermitteln ist der hydraulische Radius r_{hy} .

Mit der bezogenen Fließtiefe $h/d = 0,75$ errechnet sich der Zentriwinkel zu

$$\alpha = \left(\arcsin\left(\sqrt{\frac{h}{d}}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \right) \cdot 4 = 240^\circ.$$

Eingesetzt im Bogenmaß kann mit Gl. (7.9) schließlich der hydraulische Radius berechnet werden:

$$r_{hy} = \frac{2,0}{4} \cdot \frac{4,189 - \sin(4,189)}{4,189} = 0,603 \text{ m}$$

7.2 Strömen und Schießen

Ausgehend vom Einschlagspunkt eines Steines in ein Gewässer breiten sich **kreisförmige Oberflächenwellen** aus. In einem stehenden Gewässer sind diese Wellen als konzentrisch sich ausbreitende Kreise zu beobachten (*Bild 7.5a*). In einem langsam fließenden Fluss „schwimmen“ die Wellen mit der Strömung mit, wobei sich ein Teil der exzentrischen Wellenkreise gegen die Fließrichtung bewegt (*Bild 7.5b*). Bei schnell fließenden Flüssen werden die wiederum exzentrischen Wellenkreise vollständig in Fließrichtung mittransportiert (*Bild 7.5d*) und „schwimmen“ von der Einschlagstelle des Steines davon. Dazwischen gibt es einen Strömungszustand, der durch eine oberwasserseitig stehende Wellenfront auf Höhe der Einschlagstelle des Steins gekennzeichnet ist (*Bild 7.5c*).

Stellen Sie sich vor, Sie stehen auf einer Brücke über einem Fluss, werfen einen Stein ins Gewässer und beobachten die weiteren Geschehnisse in der Strömung. Was passiert?

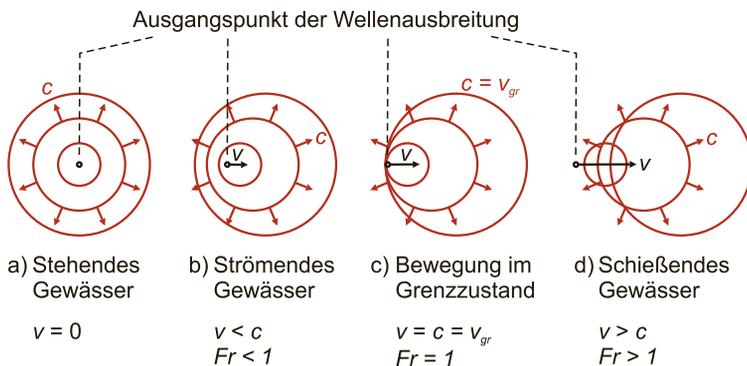


Bild 7.5 Ausbreitung von Oberflächenwellen

Englische Fachbegriffe:
natürlicher Querschnitt

natural cross-section

Oberflächenwelle surface wave

Schießen supercritical flow

Strömen subcritical flow

Die Größe c kann auch als Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner Störungen aufgefasst werden, im Fall von *Bild 7.5* ausgelöst durch das Werfen des Steines.

Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** c der zu beobachtenden Oberflächenwellen errechnet sich mit der Wassertiefe h zu

$$c = \sqrt{g \cdot h} \quad (7.12)$$

Durch das Verhältnis der Hauptströmungsgeschwindigkeit v zur Störungsausbreitungsgeschwindigkeit c können die in *Bild 7.5* dargestellten Situationen mithilfe der dimensionslosen Kennzahl nach FROUDE (1810–1879, Schiffsbauer) beurteilt werden:

$$Fr = \frac{v}{c} \quad (7.13)$$

- $Fr < 1$, strömender Abfluss: Im **Strömen** breiten sich Störungswellen sowohl stromaufwärts als auch stromabwärts aus, also mit der und gegen die Hauptfließrichtung.
- $Fr = 1$, Grenzzustand: Bei **Grenzverhältnissen** bildet sich eine stationäre Wellenfront aus, die kreisförmigen Wellen schwimmen nicht nach unterstrom ab, sondern werden Richtung stromabwärts größer.
- $Fr > 1$, schießender Abfluss: Im **Schießen** schwimmen die Störungswellen mit der Hauptströmung vollständig stromabwärts ab, es entsteht eine kegelförmige Wellenfront.

Wie kommt es zu **Strömen**, **Grenz Zustand** und **Schießen**? Neben lokal begrenzten Querschnittsänderungen durch Bodenwellen, Wehre oder Pfeiler hängt der Strömungszustand in langgestreckten, also gleichförmigen Gerinneströmungen vom Sohlgefälle I_s ab. *Bild 7.6* soll dies verdeutlichen:

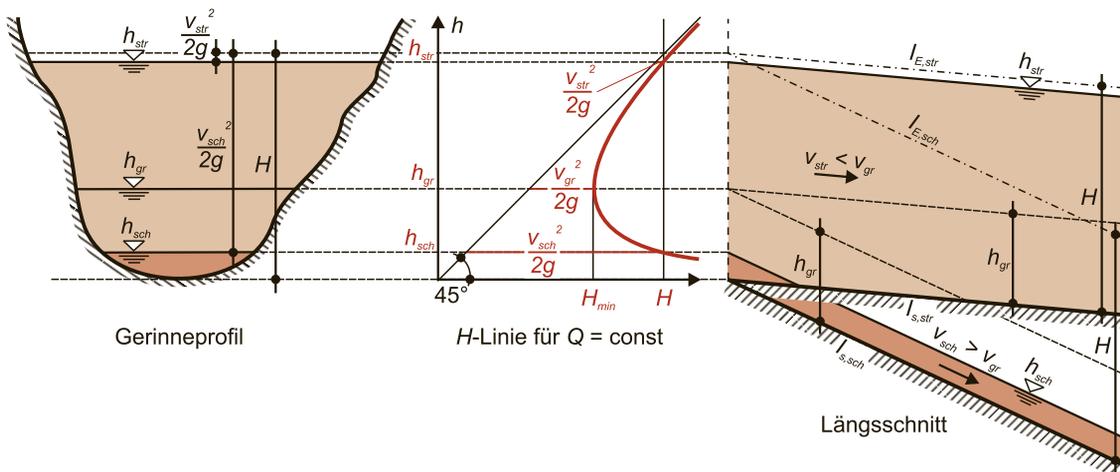


Bild 7.6 Gerinneströmung bei zwei verschiedenen Sohlneigungen für $H = \text{const}$ und $Q = \text{const}$