

**Die Zusammenfassungen sind teilweise stark veraltet (Vorlesungsinhalte aus vergangenen Semestern, alte Normen...) und sollten lediglich als Hilfestellung zum Verfassen eigener Zusammenfassungen dienen.**

# Summary: Water Distribution Systems

winter semester 2021-2022

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Fundamentals</b>	<b>1</b>
1.1	Pipe Network . . . . .	1
1.2	Pumps . . . . .	3
1.3	Storage tanks . . . . .	3
1.4	System concepts . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen der Rohrnetz Modellierung</b>	<b>4</b>
2.1	Modellierungsprozess . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Rohrnetzberechnung</b>	<b>7</b>
3.1	Rohrnetzhydraulik . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Wasserbedarf</b>	<b>9</b>
4.1	Löschwasserbedarf . . . . .	10
4.2	Modellierung des Wasserbedarfs . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Wasserverluste</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>Modell Kalibrierung</b>	<b>14</b>
6.1	Vergleichsmessungen . . . . .	16
<b>7</b>	<b>Bemessung</b>	<b>18</b>
7.1	Bemessung von Rohrleitungen (ZW, VW, HW) . . . . .	18
7.2	Bemessung von Speicherbehälter . . . . .	19
7.3	Bemessung von Pumpen/Förderanlagen . . . . .	21
<b>A</b>	<b>Moody Diagramm</b>	<b>22</b>

# 1 Fundamentals

The aim of water supply is to distribute water:

- with perfect quality,
- anytime,
- in sufficient quantity,
- with sufficient supply pressure,
- anywhere within the supply area.

Components of drinking water supply systems:

- **water catchment:** Intake structures from groundwater (spring, well), surface water (lakes, river, dams) or seawater (desalination).
- **treatment:** Central or decentralised waterworks with physical, chemical and biological treatment.
- **pumping:** Transmission of raw and clean water from catchment to treatment to consumer by conveyance facilities (pumps).
- **water storage:** Tanks (high level, low level with booster station, water tower) to cover consumption peaks (including firefighting), downtime of pumps and for pressure stabilisation.
- **distribution system:** Conveyance after treatment to transfer point to the consumer (*regarding DVGW*). Aim: Water transportation.

Water distribution covers all elements of the water supply that have relevance for the conveyance: Pipe network, conveyance facilities (pumps), tanks, valves and other fittings. For calculations the hydraulic respective characteristics are relevant.

## 1.1 Pipe Network

- Transmission mains (ZW, Zubringer-Wasserleitungen)
- Distribution mains (HW, Haupt-Wasserleitungen)
- Supply mains (VW, Versorgungs-Wasserleitungen)
- Service pipes (AW, Anschluss-Wasserleitungen)

There are two different network configurations:

- Branch system (verästelte Netze): Simple system where each consumer is supplied from one direction, simple dimension and calculation, but highly vulnerable.
- Grid system (vermaschte Netze): Each consumer is supplied from at least two directions, increased supply security, pressure equalisation and reduced pipe diameters, but complex for dimension and determination of quantities, now clear flow directions.

## Pipes and Fittings

**Diameter:** Distinguish of outside diameter (OD), inside diameter (ID) and nominal diameter (DN).

**Material:** Several materials are used for different diameters or purposes: Ductile cast iron (GGG, coated with PE, or zinc alloy outside and zink-magnesium inside), steel (ST, coted with ZM inside and PE outside), polyethylen (PE, DN<630), polyvinylchlorid (PVC, DN<400), fiber cement (FZ, DN: 65 – 600), not in use anymore: abestos-cement (AZ) and grey cast (GG).

**Connections** can be characterised by different criteria: Detachable (flanges, sleeves, screw connections), not detachable (welding, brazing, pasting), thrust resistant or not.

**Fittings** are used for several purposes: Diameter change, branches, bends, connections/transitions, ...

**Valves:** There are various valve types: Gate valve, globe valve, ball valve, butterfly valve, diaphragm valve. As well as various applications: Control valve, check valve, air entry and release valve, tank flow valve (for in - and outflow), hydrants.

## Dimensioning

Pipe networks are planned for approx. 50 years. Development of the demand and probable extension/expansion must be considered. The flow rates result from the demands while always peak discharges have to be taken into account. The flow velocities may not be too low (stagnation) or cause damage due to dynamic pressure (pressure surge, water hammer). The pressure may not exceed a maximum within the system but must sustain a minimal service pressure to fulfil the distribution purpose.

⇒ Rules and standards by the DVGW

## 1.2 Pumps

Aim: Overcoming elevation differences or increase supply pressure.

- Suction pump (mainly for water catchment): Physically up to 10 m, practically 5 m bis 6 m.
- Main lift: Pump water in tanks.
- Booster station: Pumping directly in supply network.

Each pump has its pump curve (figure 1) that shows the relationship of pressure head (H) and pump outflow (Q). With the system curve the optimal operation point can be determined. The pump capacity (Förderleistung) is calculated by  $P_Q = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$  and its power demand is defined by  $P_B = P_Q / \eta$  ( $\rho$ : density,  $g$ : gravity force,  $\eta$ : efficiency grade).

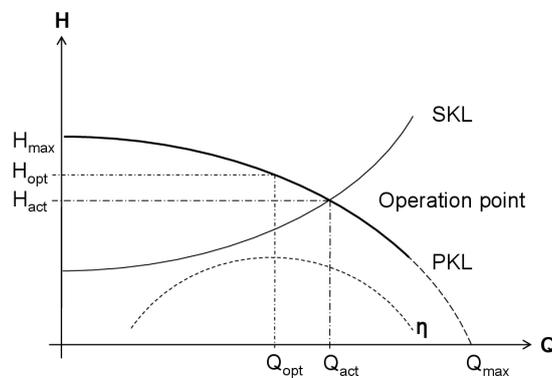


Abbildung 1: Pump characteristic curve (PKL) and system characteristic curve (SKL)

## 1.3 Storage tanks

- Hochbehälter: Wasser gespeichert auf einem höher gelegenen Ort, Zufluss ins Netz über das Potential des Wassers (Gravitation).
- Tiefbehälter: Platziert auf/unter der geod. Höhe des Versorgungsgebiets, Einspeisung über Druckerhöhungsanlagen.
- Wassertürme: Wasser über Geländeneiveau gespeichert im bzw. nah zum Versorgungsgebiet, Einspeisung über Potential (Gravitation).

Betriebsweisen von Speicherbehältern:

- **Durchlaufbehälter:** Zwischen Zubringerleitung und Versorgungsleitungen, klare Fließrichtung, hydraulische Trennung von Zubringer und Verteilung, Kompensation von Bedarfsschwankungen, optimale Auslegung der Pumpen des Zubringersystems.
- **Gegenbehälter:** Speisung durch Verteilungsnetz, welches zwischen Zubringer und Behälter liegt, rel. konstante Förderung ins Netz, Füllen bei niedrigem Bedarf, Entleeren bei hohem Bedarf, gleicht Bedarfsschwankungen aus, erhöhte Versorgungssicherheit durch zwei Einspeisepunkte, aber wechselnde Fließrichtungen und Gefahr der Stagnation.
- **Zwischenbehälter:** Kein Zufluss ins Verteilungsnetz, sondern Zwischenspeicherung (z. B. nach Wasserwerk).
- **Zentralbehälter:** Behälter im Versorgungsnetz angeordnet als Durchlauf- oder Gegenbehälter.

## 1.4 System concepts

There are different concepts how to assembly tanks, pumps, transmission and distribution mains:

- Direct pumping into distribution network with counter tank.
- Separation of transmission and distribution network.
- Different pressure zone to address different terrain level and maintain pressure range (2 bar bis 8 bar).
- District metered area (DMA): Areas with defined in- and outputs that can be used for measurements (e. g. water losses).

## 2 Grundlagen der Rohrnetz Modellierung

**Gegebene Parameter:** Netzgraphen, Potentiale (Druckhöhen) an Einspeisepunkten, Entnahmemengen.

**Berechnete Variablen:** Durchfluss (+ Fließgeschwindigkeit), Druckverlust, Druckhöhe, Behälterfüllstände (+ -potentiale).

**Einsatzmöglichkeiten:** Analyse bestehender/geplanter Netze, Lastfallberechnung (inkl. Löschwasser), Berechnung der Durchmischung, Berechnung von Verweilzeiten (Stagnation), ...

Alle Eigenschaften des Netzes werden dem Graph als Attribute zugewiesen: Topologie als Basis, Reservoir-Potential, Verbrauch, Rohrdurchmesser, -länge, -rauheit, Pumpeneigenschaften, Eigenschaften von Armaturen, ...

**Behälter:** Variable Potentialhöhe, Zu- und Abflüsse; Parameter: Geometrie.

**Reservoir:** Variable Einspeisemenge; Parameter: Potentialhöhe.

**Vorgegebene Entnahme:** Bekannter Verbrauch, Variable: Drücke; Parameter: Verbrauch.

**Druck-bezogener Verbrauch:** z. B. Leckage, Löschwasser; Variable: Druck, Entnahme; Parameter: Durchfluss-Druck-Beziehung ( $Q = c * H^\alpha$ ,  $c$  und  $\alpha$  schwer zu bestimmen).

**Armaturen** (Absperr-, Regelarmaturen, ...): Abbildung als Strang, entweder nur der Armatur oder eines ganzen Leitungsabschnitts.

## Graphentheorie

- Ein Graph besteht aus Knoten  $K$ , Strängen  $S$  und der Adjazenzabbildung ( $Ad : S \rightarrow K \times K$ ).
- Ein gerichteter Graph (= Digraph) hat endlich viele  $K$  und  $S$ , wobei jedem  $S$  ein geordnetes Paar aus  $K$  zuordnen lässt (Anfangs- und Endknoten).
- In einem Zusammenhängenden Graphen lässt sich zwischen jedem beliebigen Knotenpaar eine Verbindung herstellen. Ein nicht zusammenhängender Graph besteht aus zusammenhängenden Komponenten.
- Ein Weg ist eine endliche Menge durch Stränge verbundener Knoten. Ein Weg ohne Abzweigungen heißt Pfad.
- Eine Masche (engl. Loop) ist ein Weg, der am selben Knoten anfängt und endet. Ein Graph mit  $n$  Knoten und  $m$  Strängen hat  $I = m - n + 1$  Maschen.
- Ein zusammenhängender Graph ohne Maschen heißt Baum. Ein Baum hat  $m = n - 1$  Stränge. Ein Baum, mit einem hervorgehobenen Knoten (= Wurzel) heißt Wurzelbaum.
- Die Inzidenzmatrix stellt den Graphen dar, wobei  $-1$  ein Anfangs-,  $+1$  ein Endknoten des Strangs abbildet.
- Veränderungen in Leitungsabschnitten finden immer an Knoten statt. Stränge bilden homogene Leitungsbereiche dar.

**Matrizendarstellung des Systems:** Leitungsnetz als Inzidenzmatrix  $A_D$ , Wasserentnahme als Bedarfsvektor  $Q$ , Durchflüsse als Durchflussvektor  $D$  bzw.  $q$ , Druckverluste als Druckhöhenverlustvektor  $h$ , Potentialhöhen als Potentialhöhenvektor  $H$ .

**Integrale Rauheit** wird in Modell angewandt, welche die Rauheit, den tatsächlichen Innendurchmesser und lokale Druckverluste einbindet. Sie wird über die Modellkalibrierung ermittelt (s. Kapitel 6). Mittels Vergleichsmessungen im realen Netz werden Daten zur Modellkalibrierung geschaffen.

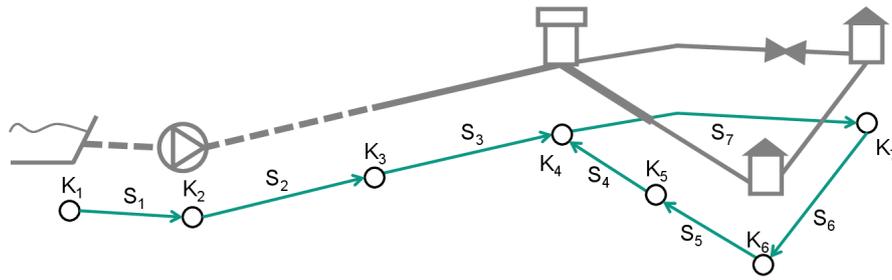


Abbildung 2: Umsetzung eines Verteilungnetzes als Graph.

## 2.1 Modellierungsprozess

1	Aufgaben- definition	Detaillierungsgrad und Genauigkeit, Datengrundlage, Aufwand/Kosten. Entsprechen Daten nicht den Erwartung, ggf. Aufgaben anpassen.
2	Datenerhebung und aufbereitung	Geographische Daten, Systemdaten, Betriebsdaten (Steuerung, Einspeisung), Wasserverbrauchsdaten (Bedarf, Verlust, Ganglinien).
3	Modellerstellung	Abstraktion der Daten, Digitalisierung der Topologie und der Parameter, Anfangsschätzung für Kalibrierung.
4	Kalibrierung	Ermittlung nicht direkt messbarer Daten, Verifizierung/ Evaluierung der Ergebnisse, ggf. Modell überarbeiten.

### 3 Rohrnetzrechnung

Fließen wird in laminar und turbulent sowie in stationär und instationär unterschieden. Fließen bezeichnet dabei das Bewegen des Wasser in festen Wandungen. Stürzen ist die Bewegung des Wassers im offenen, luftgefüllten Raum.

#### Wichtige Formeln

Massenerhaltung	$Q_1 = Q_2 \iff v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2.$	
Energieerhaltung, Bernoulli-Gleichung	$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{p}{\rho \cdot g} + h = const.;$ $z$ : geod. Höhe, $h$ : Verlusthöhe.	
Darcy-Weisbach-Gleichung (kontinuierlicher Druckverlust)	$h = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g};$ $\lambda$ : Reibungsbeiwert [-], $L$ : Rohrlänge [m], $D$ : Durchmesser/hydr. Radius [m].	
Reynolds Zahl	$Re = \frac{v \cdot D}{\nu},$ $D$ : Rohrdurchmesser [m], $\nu$ : Kinematische Viskosität ca. $10^{-6} m^2/s,$ $Re_{crit} = 2320$ (ca. 2000)	
Strömungszustand	Bereich	Abhängigkeit Reibungsbeiwert
$Re < 2000$ (laminar)	-	Re
$Re > 2000$ (turbulent)	hydraulisch glatt	Re ( $k < \text{viskose Unterschicht}$ )
	Übergangsbereich	Re, $k/D$
	hydraulisch rau	$k/D$ ( $k > \text{viskose Unterschicht}$ )

#### Verluste

- Es existieren Tabellenwerte für  $k_S$ -Werte von Rohren, Rauheit wird aber auch durch Fluideigenschaften, äußere Einflüsse und Alter der Rohe bestimmt. Daher Tabellenwerte bedingt nutzbar.
- Vergleichsmessungen ermöglichen Bestimmung der (integralen) Rauheit.
- Lokale Druckverluste bestimmbar durch  $h_l = \zeta \cdot \frac{v^2}{2g},$   $\zeta$ : Koeffizient für lok. Widerstand [-].

### 3.1 Rohrnetzhydraulik

#### Formeln

Widerstandsgesetz, Kontinuierlicher Druckverlust (Strangbedingung)		$h = R \cdot Q^e$ ; $h$ : Druckverlusthöhe, $R$ : Koeffizient für Rohrreibungswiderstand [-], $Q$ : Durchfluss, $e$ : Exponent [-].
Massenerhaltung, Kirchhoffsches Gesetz (Knotenbedingung)	1.	Summe der Zuflüsse = Summe der Abflüsse: $\sum_{S=1}^n q_{S,K} - Q_K = 0$ ; $q$ : Zuflüsse, $Q$ : Entnahme, $K$ : Knoten.
Energieerhaltung		Die Potentialdifferenz zwischen zwei Knoten ist für jeden Pfad gleich groß. Für alle Stränge ist der Druckhöhenverlust gleich der Potentialdifferenz: $H_{AK,S} = H_{EK,S} + h_S$ ; $H$ : Potentialhöhe, $h$ : Verlust.
Energieerhaltung, Kirchhoffsche Gesetz (Maschenbedingung)	2.	Die Summe der Druckhöhenverluste in einer Masche bei vorgegebener Richtung ist 0: $\sum_{S=1}^n h_{S,M} = 0$ ; $h_S, M$ : Druckhöhenverlust im Strang S der Masche M.

Formulierung als Gleichgewicht in Matrizen/Vektor-Form:

- $\mathbf{h} = f(\mathbf{q})$ , Widerstandsgesetz (Strangbedingung),
- $\mathbf{Q} = \mathbf{A}^T \cdot \mathbf{q}$ , Kontinuitätsgleichung (Knotenbedingung),
- $\mathbf{h} + \mathbf{A} \cdot \mathbf{H} = -\mathbf{A}_P \cdot \mathbf{H}_P$ , Kompatibilitätsbedingung (Maschenbedingung).

Stationäre Berechnung von einfach verästelten Rohrnetzen ( $\mathbf{A}$  = quadratisch/invertierbar):

- Entnahme und Einspeisepotential ( $\mathbf{H}_P$ ) gegeben,
- Flussverteilung  $\mathbf{q}$  direkt ermittelbar (Massenerhaltung),
- Mit Widerstandsgesetz lässt sich aus Flussverteilung die Druckhöhenverluste  $\mathbf{h}$  berechnen,
- Mit bekannten Potentialhöhen ( $\mathbf{H}_P$ ) und Druckhöhenverluste ( $\mathbf{h}$ ) lassen sich andere Potentialhöhen  $\mathbf{H}$  ermitteln.

Bei vermaschten Netzen bzw. mit mehr als einem Einspeisepotential muss die Ermittlung iterativ erfolgen.

#### Zeitabhängige Rohrnetzrechnung

**Ziel:** Durchflüsse und Druckhöhen unter zeitlichen Veränderungen ermitteln.

**Zeitabhängige Parameter:** Gangline Wasserverbrauch und -einspeisung. Steuervorgaben. **Variablen:** Druckverteilung, Flussverteilung, Fließgeschwindigkeiten, Zustände von Armaturen, Füllstände, Ausbreitung/Konzentration, Verweilzeit.

## Quasi-stationäre Berechnung

Beschleunigungskräfte werden aufgrund geringer Fließgeschwindigkeiten vernachlässigt, Zeitraum und veränderliche Parameter werden diskretisiert. Die Berechnung in jedem Zeitschritt erfolgt dabei stationär. Zeitliche Änderungen werden als Abfolge stationärer Berechnungen ermittelt.

## 4 Wasserbedarf

**Wasserverbrauch:** Tatsächliche in einer bestimmten Zeitspanne im Rahmen der Wasserversorgung abgegebene Wassermenge.

**Wasserbedarf:** Planungswert für die in einer bestimmten Zeitspanne benötigte Wassermenge, die ein Wasserversorgungssystem unter Einhaltung der Versorgungskriterien liefern muss.

**Einflussfaktoren:** Klima, Dargebot, sonstige Bezugsquellen, Wasserqualität, Wasserpreis, Kontrolle der Abnahme, Kanalisation, Lebensstandard, Größe des Versorgungsgebiets.

Mittlerer Tagesbedarf (inkl. Kleingewerbe) $Q_{dm}$ [ $m^3/d$ ]	$Q_{dm} = \frac{Q_a}{365} = \frac{q_{dm} \cdot E}{1000}$ ; $q_{dm}$ : L/(E * d), $Q_a$ : Jährlicher Wasserbedarf [ $m^3/a$ ], $E$ : Einwohner. $q_{dm}$ (mittlerer einwohnerbezogene Tagesverbrauch) in Deutschland 90 – 140 l/(E*d), mittel: 120, Extrem: 60 – 500.
Tagesspitzenfaktor $f_d$ [-]	$f_d = \frac{Q_{d,max}}{Q_{dm}}$ ; $Q_{d,max}$ : Maximaler Tagesbedarf in einem Gebiet in einem Betrachtungszeitraum, zwischen 0 und 24 Uhr [ $m^3/d$ ], $Q_{dm}$ : Mittlerer Tagesbedarf [ $m^3/d$ ].
Tageszeitabhängiger Lastfaktor $f(h)$ [-]	$f(h) = \frac{Q(h)}{Q_{hm}}$ , $Q_{hm} = \frac{Q_{dm}}{24} = \frac{Q_a}{365 \cdot 24}$ ; $Q(h)$ : Tageszeit abhängiger Stundenbedarf [ $m^3/h$ ], $Q_{hm}/Q_{dm}/Q_a$ : Mittlerer Stunden-/Tages-/Jahresbedarf.
Stundenspitzenfaktor $f_h$ [-]	$f_h = \frac{Q_{h,max}}{Q_{hm}}$ : Maximaler Stundenbedarf/Mittlerer Stundenbedarf (im Betrachtungszeitraum) bzw. $f_h = f(h)_{max} \cdot f_d$ .
$Q_{hmax,dm}$	Maximaler Stundenbedarf an Tag mit Durchschnittsbedarf [ $m^3/h$ ].
$Q_S$	Spitzendurchfluss

Für Wasserbedarf sonstiger Einrichtungen (Gewerbe, Büro, Schulen, Krankenhäuser, ...) gibt es Richt- bzw. Schätzwerte in der Literatur.

### Wasserbedarfsermittlung

Im Ist-Zustand: Verbrauchsabrechnungen, Messkampagnen, kontinuierliche Messungen + jeweilige Umrechnung auf Bezugszeit.

Zukünftiger Bedarf: Richtwerte für häuslichen und industriellen Bedarf (DVGW W410).

Bei kleinen Siedlungen ist ein höherer Bedarf pro Einwohner anzusetzen, da die Gleichzeitigkeit den Spitzenwert stärker beeinflusst.

#### 4.1 Löschwasserbedarf

Bedarf abhängig von Siedlungsform (Wohn-/Gewerbe-/Misch-Gebiet), Geschossanzahl, Geschossflächenzahl, Baumassenzahl, Brandausbreitungsgefahr, ... In Praxis: Bedarf wird meist von Feuerwehr benannt. Wasserversorger muss Bereitstellung sichern.

**Richtwerte** ( $24 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $48 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $96 \text{ m}^3/\text{h}$  und  $192 \text{ m}^3/\text{h}$ ) sind in Abhängigkeit von Siedlungsform und Brandausbreitungsgefahr aus Listen entnehmbar.

Annahmen zur Löschwasser Bedarfsplanung:

- Löschwasserentnahme während max. Stundenbedarf an Durchschnittstag ( $Q_{hmax, dm}$ ),
- Alle Hydranten im Umkreis von 300 m werden für 2 Stunden mit mindestens  $24 \text{ m}^3/\text{h}$  beansprucht, min. Betriebsdruck = 1,5 bar.
- Löschwasserbedarf kann nicht immer über Trinkwassernetzwerk abgedeckt werden (Überdimensionierung, Stagnation/Kontamination). In diesem Fall muss Ersatz geschaffen werden (Löschteich&/-tank, Grundwasser-Entnahme, Tank-Löschfahrzeug, ...).

#### 4.2 Modellierung des Wasserbedarfs

Sinnvoll: Basisbedarf = mittl. Tagesbedarf ( $Q_{dm}$ ), Skalierung mit Tagesganglinie ( $f_t$ ) und konstanter Skalierungsfaktor ( $f_d$ ) für max. Tagesbedarf.

Ermittlung Bedarf pro Knoten:

- Lage und Verbrauch der Hausanschlüsse bekannt: Zuordnung zu Knoten und Durchschnittswert je Hausanschluss ermitteln, ggf. Zusammenfassen.
- Hausanschlüsse nicht bekannt: Ermittlung von Durchschnittswerten/Person und Personen/Knoten:

Über Knoteneinzugsflächen und Bevölkerungsdichte (effizientes, automatisierbares Verfahren, genaue Bebauung wird nicht betrachtet).

Über Wohneinheiten o. Ä. (genaues Verfahren, aufwendig und schwierige Datenermittlung).

Über Knotenanzahl linear (ungenau und einfaches, schnelles, automatisierbares Verfahren).

- Sonstiger Bedarf (Industrie, Schule, ...) über je extra Knoten oder an anderen Knoten anbinden. Bedarf individuell bestimmen.
- Ganglinien über Messungen (Großwasserzähler), Literatur/Technische Regelwerke bestimmen.

## 5 Wasserverluste

Definition etwas unterschiedlich je nach Quelle (IWA, DVGW, andere nationale Regelwerke).

Rohrnetz-Einspeisung $Q_N$	Rohrnetz-Abgabe $Q_A$	In Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe $Q_{AI}$	In Rechnung gestellte & gemessene Rohrnetzabgabe	In Rechnung gestellte Wasserabgabe $Q_{IR}$	
			In Rechnung gestellte & nicht gemessene Rohrnetzabgabe		
	Nicht in Rechnung gestellte Rohrnetzabgabe $Q_{AN}$		Nicht in Rechnung gestellte und gemessene Rohrnetzabgabe	Nicht in Rechnung gestellte Wasserabgabe $Q_{NR}$	
			Nicht in Rechnung gestellte und auch nicht gemessene Rohrnetzabgabe		
	Wasserverluste $Q_V$	Scheinbare Wasserverluste $Q_{VS}$			Wasserdiebstahl
					Mess- und Ablesefehler
					Schleichverluste
		Reale Wasserverluste $Q_{VR}$			Zubringer- und Verteilungsleistungen
	Behälter				
		Hausanschlussleitungen bis zum Wasserzähler			

Löschwasser ist nicht standardisiert einordenbar: Entweder „nicht in Rechnung gestellt und nicht gemessene Rohrnetzabgabe“ oder „in Rechnung gestellte und nicht gemessene Rohrnetzabgabe“ (pauschale Bezahlung).

### Scheinbare Wasserverluste

Scheinbare Wasserverluste treten nicht durch Leckagen sondern, das Wasser erreicht den Kunden, kann aber nicht abgerechnet werden:

- Wasserdiebstahl (illegaler Anschluss, manipulierte/überbrückte Zähler, illegale Entnahme an Hydranten),

- Messfehler (defekte/fehldimensionierte/ungenau Zähler, Alterung und mangelnde Wartung) und Schleichverluste (Durchfluss unterhalb Anlaufdurchfluss des Messgeräts),
- Ablesefehler und Datenhandhabungsfehler (logische Fehler bei Verarbeitung/Rechnungsstellung, pauschal Tarife),
- Abgrenzungsfehler (durch unterschiedliche Ablesezeiträume).

### Reale Wasserverluste

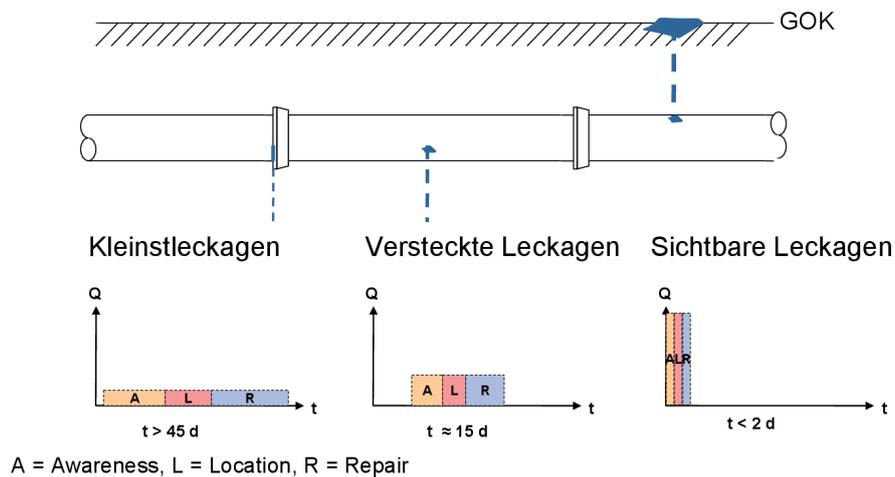
In Zubringer-, Verteilungs- und Hausanschlussleitungen (Leitung, Verbindung, Schieber, Formstücke) sowie bei Behältern (Überlauf durch defekten Schwimmer, Leckagen, ...).

**Ursachen:** Material, Alter, Qualität, Verkehrslast, Druck, Boden, Dritte, ...

**Leckage-Gleichung** mit allgemeiner, empirischer Blenden-Gleichung:  $q = c \cdot h^\alpha$  (q: Durchfluss, c: Leckagekoeffizient [-], h: Druckdifferenz,  $\alpha$ : Leckageexponent,  $\alpha$  gibt Sensitivität bzgl. Druck an (Größe/Form Leckage, Strömungszustand, Elastizität des Rohrs (Aufweitung unter Druck), Umgebung)).

System-Druck beeinflusst stark Leckagen: Verbrauch  $\searrow$  = Druck  $\nearrow$  = Verlust  $\nearrow$  (daher Druck-Management, Druck gering halten).

Kleinstleckagen	Versteckte Leckagen	Sichtbare Leckagen
Dichtungen, Formstücke, nicht gemeldet ( $Q < 0,25 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ ), nicht detektierbar (akustisch).	Verteilungs- und Hausanschlussleitungen, kein sichtbarer Wasseraustritt, akustisch detektierbar.	Zubringer- und Hauptleitungen, gemeldet von Bevölkerung / Personal.



## Indikatoren

Prozentualer Wasser- verlust $Q_{VR\%}$		$Q_{VR\%} = \frac{Q_{VR}}{Q_N} \cdot 100\%$ ( $Q_{VR}$ : Jährlicher realer Wasserverlust [m <sup>3</sup> /a], $Q_N$ : Rohrnetzeinspeisung [m <sup>3</sup> /a]).
Spezifische Wasserverluste [m <sup>3</sup> /(km *h)]	reale $q_{VR}$	$q_{VR} = \frac{Q_{VR}}{K \cdot L_N}$ ( $K$ : Anzahl Stunden pro Jahr [h/a], $L_N$ : Netzlänge ohne AW [km]).
Current Annual Real Losses $CARL$ [l/(HA * d)]		$CARL = \frac{Q_{VR} \cdot 10^3}{N_C \cdot N_{dwsp}}$ ( $N_C$ : Anzahl Hausanschlussleitungen [-], $N_{dwsp}$ : Anzahl Tage an dem das Netz unter Druck ist).
Unavoidable Annual Real Losses $UARL$ [l/(HA * d)]		$UARL = (18 \cdot L_M + 0.8 \cdot N_C + 25 \cdot L_P) \cdot P_A$ ( $L_M$ : Gesamtlänge Zu- bringerleitungen [km], $L_P$ : Gesamtlänge Hausanschlussleitungen [km], $P_A$ : Durchschn. Versorgungsdruck [m]).
Infrastructure Leaka- ge Index $ILI$		$ILI = \frac{CARL}{UARL}$ (spiegelt Reduktionspotential wider).

## Auswirkungen von Wasserverlusten

- Ökonomisch: Kosten für Gewinnung, Aufbereitung, Verteilung, Reparatur, Versorgungsausfälle; Kosten durch Schädigung der Umgebung durch Rohrbrüche.
- Technisch: Eingeschränktes Wasserangebot, intermittierende Versorgung, Schäden am Leitungsnetz (Druckstöße), mangelnde Wasserqualität (Unterdrücke, Hausbehälter).
- Sozial: Mangelhafte Versorgung, mangelnde Zahlungsbereitschaft, schlechte Reputation, ggf. Gesundheitsrisiken.
- Ökologisch: Unnötige Ausbeutung Wasserressourcen, Energieverbrauch, Emissionen, keine nachhaltige Bewirtschaftung.

## Methoden der Wasserverlustreduktion

- **Druckmanagement:** Reduzierung des Versorgungsdrucks auf Minimum um Verluste an Leckagen/Rohrbrüchen zu vermeiden, Rate von Rohrbrüchen mindern, Druckschwankungen mindern.
- **Aktive Leckkontrolle:** Konstante Messung von DMAs (district metered areas) und Lecksuche (akustisch, Bodenradar, Tracer-Gas), Reduzierung von Verschwendung und Schäden.
- **Infrastrukturmanagement:** Bessere Instandhaltungs-Planung mit Ziel Gesamtnetzustand zu erhalten/verbessern und Leckagehäufigkeit gering halten.

- **Schnelligkeit und Qualität der Reparatur:** Schnellere Erkennung, Ortung und Reparatur sowie gute Qualität der Reparatur mit dem Ziel Verlustmengen und Leckagehäufigkeit gering halten.

### **Modellierung von Wasserverlusten**

**Scheinbare Wasserverluste:** Aufteilung der bekannten Menge auf Verbrauchsknoten der Nutzer, ggf. mit gleicher Bedarfslinie.

**Reale Wasserverluste im Netz:** Entstehung im Netz, Menge aus Bilanz berechenbar, druckabhängige Verluste.

- Emitter-Knoten: Druckabhängig, Lage und Anzahl annehmen, Hoher Aufwand: Druck-Abfluss-Beziehung bestimmen, viele Knoten.
- Entnahme-Knoten: Verteilung proportional (Durchfluss, Leitungslänge, ...), Druckabhängigkeit über zeitliche Skalierung, große Knotenanzahl.
- An Verbrauchsknoten: Verteilung entsprechend Verbrauch, Druckabhängigkeit über zeitliche Skalierung.
- Verluste an Behältern: Als eigener Entnahmeknoten bzw. als Verlust im Verteilungsnetz.

## **6 Modell Kalibrierung**

**Kalibrierung:** Abgleichen von Modell-Rechenergebnissen mit gemessenen Betriebszuständen, sowie Anpassung der Modellparameter um Ergebnisse anzugleichen.

**Vergleichsmessung:** Messen von Betriebszuständen für die Kalibrierung.

Genügend genau messbare Parameter:

- Lage der Leitungen,
- Geometrie der Behälter,
- Pumpencharakteristika, Steuervorgaben.
- Wasserverbrauch von Großabnehmern.
- *Wasserverbrauch von Haushalten ist u. U. nur ungenügend genau messbar, da Verbrauchsmessung nicht zeitlich hoch genug aufgelöst.*

Nicht direkt messbare Parameter::

- Rauheit und Innendurchmesser der Leitungen,
  - lokale Druckverluste,
- ⇒ *integrale Rauheit*
- Wasserverluste.

**Integrale Rauheit:** Verbindet alle Druck mindernde Einflüsse (kontinuierlicher Druckverlust, lokaler Druckverlust, fehlerhafte Eingangsdaten wie Innendurchmesser, Leitungslänge). Die tatsächliche Rauheit wird über die Lebensdauer (50 – 200 Jahre) erhöht, z. B. durch Ablagerungen, Inkrustationen, Korrosion und verringert durch z. B. Spülen, Molchen, Innenbeschichten. Daher ist sie Änderungen unterlegen.

### Grobkalibrierung

⇒ Identifizieren und Bereinigen von groben Fehlern.

Abgleichen der Rechenergebnisse mit Vergleichsmessungen. Große Diskrepanzen erkennen und Schlüsse ziehen (z. B. große Leckagen, geschlossene Armaturen, falsche Annahmen: Leitungslängen, Durchmesser, geod. Höhen).

### Feinkalibrierung

⇒ Anpassung der integralen Rauheit (und ggf. weitere Parameter) bis Modell/Messungsabweichungen unterhalb zulässigem Wert sind. Max. Abweichung (DVGW):  $|a| \leq 0.02 \cdot H_{stat} \leq 2$  m mit  $a$ : Zulässige Abweichung und  $H_{stat}$ : Ruhedruck.

### Vorgehen Feinkalibrierung::

- Iterative Verfahren (automatisiert): Automatisierte Anpassung der Parameter, ggf. schlechte Konvergenz.
- Explizite Verfahren: Lösung des hydraulischen Gleichgewichts (Anzahl Parameter  $\leq$  Anzahl Messungen).
- Implizite Verfahren: Optimierungsaufgabe mit Zielfunktion (quadratische Abweichungen, absolute Abweichungen, ...).
- Manuell (iterativ): Annahmen treffen (Rauheit  $k$ )  $\rightarrow$  Ergebnisse vergleichen (i.d.R. Druckhöhen  $H$ , in Ausnahmen Durchfluss  $Q$ )  $\rightarrow$  Toleranzen festlegen und kontrollieren  $\rightarrow$  Rauheit anpassen.

Im Gesamtmodell: Aufwändig, unübersichtlich, viele Randbedingungen einstellen.

Einzelmodell für Messabschnitt/-bereich: Übersichtlich, einfach einstellbar, extra Modell nötig.

Separate Berechnung für Messabschnitt/-bereich: U. U. praktikabel und sinnvoll, aber zeitaufwendig.

Ermittelte Rauheiten sind auf ähnliche Leitungen übertragbar: Leitungsgruppen erstellen nach Werkstoff, Durchmesser, Altersklasse, Vermaschungsgrad, Wasserqualität, ...

## 6.1 Vergleichsmessungen

Mittels Vergleichsmessungen lassen sich Werte zur Berechnung der integralen Rauheit  $k$  generieren. Dafür sind Druck- und Durchflussmessungen nötig. Reale Verbraucher sollten möglichst von der Messstrecke abgeschnitten werden (Schieber schließen, Strecke anpassen) oder zumindest mit eingerechnet werden (Verbrauch erfassen/schätzen). Auch Wasserverluste (Größe und Lage) beeinflussen die Messungen und können in die Rechnung miteinbezogen werden. Bei vermaschten Netzen sind mind. 2 Fließzustände (Änderung  $Q$ ) nötig zur Kalibrierung.

**Komplexität/Probleme in realen Systemen:** Viele Vermaschungen, Variation der Rohrparameter (DN, Material, Länge, ...), instationäre Bedarfsentnahmen, Wasserverluste, ...

$\Rightarrow$  Mehrere Messungen zur Bestimmung Rauheit und Aufteilung in Messabschnitte.

**Vorgehen:** Festlegen der nötigen Modellqualität  $\rightarrow$  Wahl der Messabschnitte/-bereiche  $\rightarrow$  Vergleichsmessungen  $\rightarrow$  Grob-/Makro-Kalibrierung  $\rightarrow$  Fein-/Mikro-Kalibrierung.

## Messabschnitt/-bereich

	Vermaschte Versorgungszone	Unvermaschte Versorgungszone
Durchflussmessungen	Einspeisung, Export,	gezielte Entnahmen
Wasserbedarf	entsprechend angenommener Bedarfsverteilung	wenn möglich stilllegen, ansonsten Bedarfsverteilung annehmen
Druckmessungen	Gleichmäßig über Netz verteilt (Anzahl je nach Netzlänge), enge Besetzung in maßgebendem Leitungsabschnitt	Entnahme, Export, Leitungsänderung.  Rauheit eindeutig bestimmbar → Übertragung auf andere Leitungen möglich.

**Entscheidungskriterien Messung:** Aufgabendefinition, verfügbare Messgeräte (fest/mobil), verfügbare Messstellen/Installations-Stellen, Zeit, Erwartung der Ergebnisse, homogene Leitungsabschnitte (→ Übertragbarkeit).

**Genauigkeit Anforderungen:** Geod. Höhe für Netzdruck  $\pm 0,5$  m, geod. Höhe für Druckverluste  $\pm 1,0$  m, Wasserspiegel in Behälter  $\pm 0,1$  m, Druckabfall während Messung  $> 1,5$  bar bzw.  $> 20$  %.

## Messgeräte

	Durchflussmessgeräte	Druckmessgeräte
Fest eingebaut	magnetisch-induktiv (MID) Großwasserzähler	Drucklogger Manometer
Mobil	Standrohr mit MID Standrohr mit Zähler	Drucklogger (Bajonett) Drucklogger (Gewinde)
In Behälter	Ultraschall Clamp-on Volumenänderung	Manometer (Gewinde) Füllstandsänderung

## Messzeitraum

- An Wochentagen: Typischer Wasserverbrauch (Wochenende hat untypischen Verbrauch).
- Nachtmessung: Verbrauch im Bereich vermutlich geringer. Ggf. Überprüfung der geod. Höhen über Ruhedruck.
- Messzeiten: Lang genug wählen, um stationären Strömungszustand annehmen zu können.

## 7 Bemessung

Ziele:

- Hohe Versorgungssicherheit,
- Gesamt-Wirtschaftlichkeit (Anschaffung, Betrieb, Instandhaltung),
- Einfache Überwachung, einfache Erweiterung,
- keine nachteilige Beeinflussung des Trinkwassers.

**Planungshorizont:** Leicht austauschbare Anlagen (Pumpen) - 10 Jahre, leicht erweiterungsfähige Anlagen (Druckerhöhungsanlagen) - 10 – 15 Jahre, langfristige Anlagen (Leitungen, Behälter) - 50+ Jahre.

Bemessung auf max. Durchfluss führt zu Überbemessung, daher **Spitzendurchfluss mit Bezugszeit:** Spitzendurchfluss  $Q_S$  ist der Durchfluss, der nur über die Dauer der Bezugszeit  $t_B$  überschritten wird. Da oft keine Messungen vorliegen → Spitzenfaktoren.

Anlagenart	Belastung	Bezugszeit
AW	Spitzendurchfluss	10 s
ZW, VW, HW	Spitzendurchfluss	1 h
Pumpen, Druckminderer	Spitzendurchfluss	1 h
Behälter	Spitzenbedarf = $Q_{d,max}$	1 d
Theorie: An einem Tag/Jahr reicht Tankgröße nicht aus.		
Praxis: Spitzenbedarf selten erreicht, Ausgleich über (Pumpen-) Steuerung möglich.		

### 7.1 Bemessung von Rohrleitungen (ZW, VW, HW)

Zielgröße:	Eingangsparameter:	Planungskriterien:
Durchmesser	Bedarf/Bemessungsdurchfluss	Min. und max. Fließgeschwindigkeit
	Rauheit/Rohrmaterial	Druckhöhe/Versorgungsdruck
	Leitungsführung und Netzform	Wirtschaftlichkeit

Systembetriebsdruck $DP$	Höchster festgelegter Betriebsdruck ohne Druckstoß.
Höchster Systembetriebsdruck $MDP$	Höchster festgelegter Betriebsdruck mit angenommenen ( $MDP_a$ ) bzw. berechnetem ( $MDP_c$ ) Druckstoß.
Betriebsdruck $OP$	Innendruck an best. Stelle zu best. Zeitpunkt.
Versorgungsdruck $SP$	Innendruck an HA bei keinem Verbrauch des HA.

**Versorgungsdruck (SP) für VW, HW:** Minimaler Druck (bei maßgebenden Bedarf: Max. Stundenbedarf an max.-Tag  $Q_{h,max} = f_h \cdot Q_{hm}$ ) ist abhängig von überwiegender Geschosshöhe: 2,0 bar (nur EG) + 0,5 bar/0,35 bar je Geschoss (neue bzw. alte Netze, entsprechend mehr oder weniger Leckagen sprich Druckminderungen).

Maximaler Versorgungsdruck (Ruhedruck,  $Q(h) = 0$ ) = 8 bar (empfohlener max. Druck: 6 bar);

**Maximaler Systembetriebsdruck (MDP):** Komponenten (ZW, HW, VW) sind auszulegen auf mind. 10 bar (Ruhedruck + 2 bar Puffer für Druckstoß).

**Druck für Löschwasser:** Mind. 1,5 bar bei max. Stundenbedarf an Tag mit mittlerem Verbrauch (s. Kapitel 4.1).

### Fließgeschwindigkeiten

**Max. Geschwindigkeiten:** Je nach Leitung 1 m/s bis 2 m/s bei  $Q_{h,max}$  (max. Stundenverbrauch bei max. Tagesverbrauch).

**Min. Geschwindigkeiten:** Für HW/VW 0,005 m/s bei  $Q_{hm}$  (durchschnittlicher Stundenverbrauch).

**Wirtschaftlichkeit:** Durchmesser  $\nearrow \Rightarrow$  Investition  $\nearrow$ , Betriebskosten  $\searrow$ ; also Optimum finden. Faustformel für Wirtschaftlichkeit:  $DN_{wirt.} = \mu \cdot Q^{0.5} \cdot 1000$ ;  $\mu$ : Anpassungsfaktor (1,3 kleines Q, 1,0 großes Q, Q: Durchfluss [m<sup>3</sup>/s]).

## 7.2 Bemessung von Speicherbehälter

Zielgröße	Eingangsparameter	Planungskriterien
Speicherinhalt	Bewirtschaftungszeitraum (z. B. 1 Tag) Zufluss (z. B. über ZW) Entnahme (Bedarf Versorgungsnetz) Geometrie	Min. Volumen (Nutzinhalt + Reserven) Wassertiefe

**Aufgaben:**

- Ausgleich Verbrauchsschwankungen und -spitzen,
- Erhaltung des erforderlichen Drucks,
- Vorhalten von Reserven für Störungen/Ausfälle/Brandbekämpfung,
- Druckzoneneinteilung, Misch-, Filter und Absetzbecken.

**Anforderungen:**

- Lage (Nähe zu Versorgungsschwerpunkt),
- Wasserqualität (keine negative Beeinflussung: Baumaterialien, Durchmischung, Temperatur, Belüftung, Tageslicht),
- Erscheinungsbild (in Landschaft, architektonisch),
- Versorgungssicherheit (mind. 2 Kammern, Zulauf-/Entnahme-/Entleerungs-Einrichtung, Überlauf mit Ablauf zu Vorfluter, Energieversorgung, Reinigung/Desinfektion/Probennahme, Blitzschutz, Datenerfassung).

**Speicherinhalt:**

- Speicherinhalt: Nutzbares Volumen des Speichers (Boden – Überlauf).
- Fluktuierendes Volumen: Differenz zwischen gewöhnlichem max. und min. Pegel.
- Betriebsreserven/Löschwasserreserven: Zur Erfüllung des Betriebs bei Spitzenverbrauch/Störung/Brand.
- Nutzinhalt: Summe aus flukt. Volumen und Reserven.

**Techn. Regeln für Nutzinhalt:** Kategorisierung entsprechend  $Q_{dm}$ , in kleinen Gebieten zusätzliche Löschwasser-Reserven, i.d.R. Nutzinhalt =  $Q_{dmax}$ , in großen Gebieten weniger. Nutzinhalt von Wassertürme ist deutlich geringer (Wirtschaftlichkeit, ca. 0,2 bis  $0,35 \cdot Q_{dmax}$ ). Wassertiefe ca. 2,5 m bis 8 m (Wasserbehälter) bzw. 5 m bis 8 m (Wassertürme).

**Berechnung flukt. Volumen:** Entspricht Füllstandsschwankungen. Ableitung aus Summenlinie für Zufluss und Abfluss für  $Q_{dmax}$ .

### 7.3 Bemessung von Pumpen/Förderanlagen

Zielgröße	Eingangsparameter	Planungskriterien
Betriebspunkt Pumpe (Q, H)	Förderhöhe Förderstrom	Förderanlagen (in Behälter) Druckerhöhungsanlagen (Netz) Betriebszeiten (kont./zeitl. begrenzt) Pumpenanordnung (einzel, Serie, parallel)

**Aufgaben:** Drucksteigerung, Förderung in höher gelegenes Versorgungsgebiets, Erhöhung des Förderstroms.

**Kavitation ist zu Vermeiden:** Mindestdruck an Ansaugseite ist zu gewährleisten (NPSH - Net positive Suction Head, NPSHA: available, Druck der auf der Saugseite zur Verfügung steht; NPSHR: required, Druck, bei dem Kavitation entsteht, Angabe von Pumpenhersteller), Angabe von Pumpenhersteller.

**Bedingung:**  $NPSHA \geq (NPSHR + 0,5 \text{ m})$ .  $NPSHA \approx z + 10 - h_{v,saug}$  (z: Differenz Pumpe zu WSP im Saugbecken,  $h_{v,saug}$ : Verlusthöhe Saugleitung).

# A Moody Diagramm

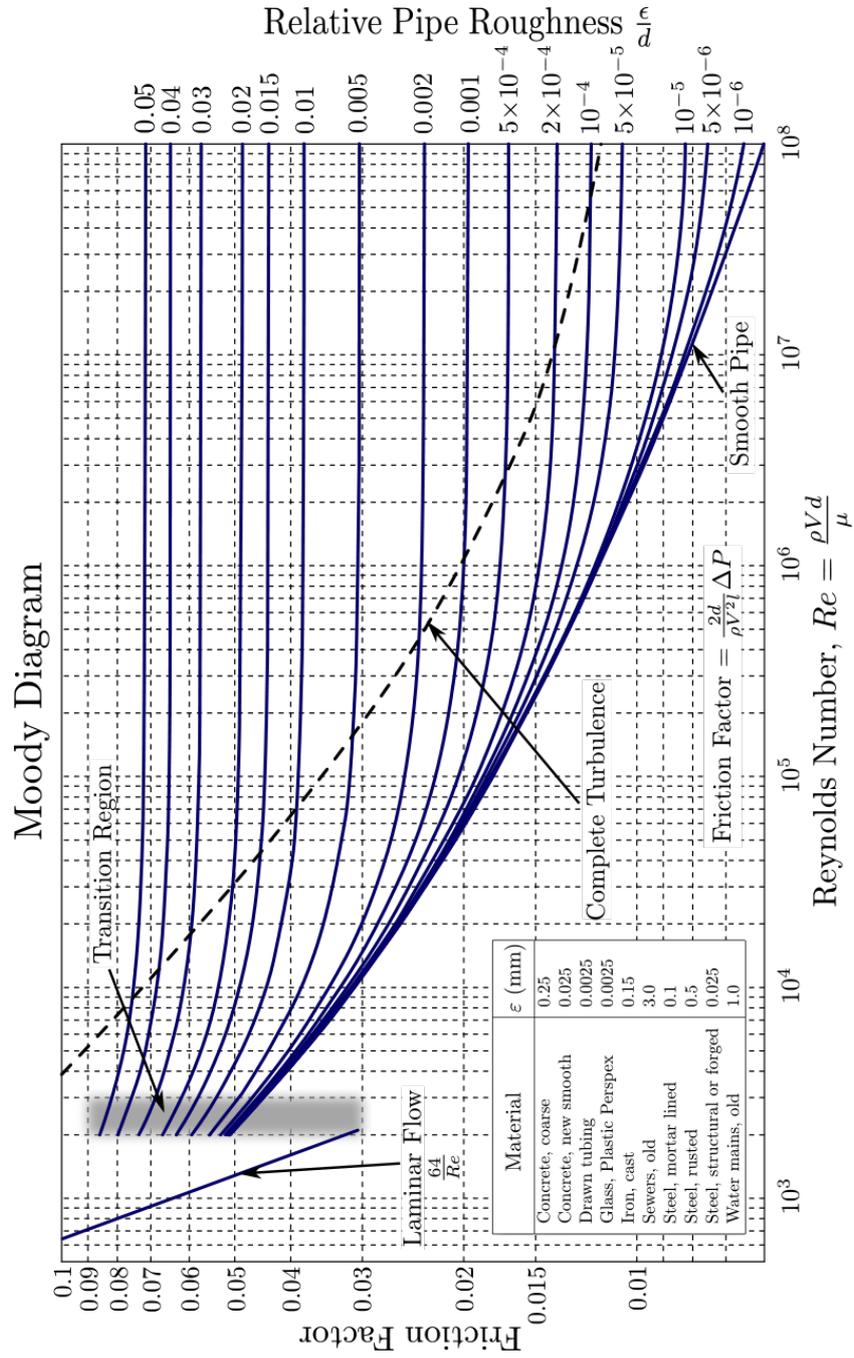


Abbildung 3: Moody Diagramm,

Quelle: Donebythesecondlaw, wikimedia, [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moody\\_EN.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moody_EN.svg)