4. Durchflusssensoren

4.1 Durchflussmessung und Mengenzählung

Die Durchflussmessung nimmt in der industriellen Messtechnik eine Sonderstellung ein, In der Verfahrenstechnik sind die Durchflussmessstellen oft ebenso zahlreich wie die Temperaturmessstellen. Für eine innerbetriebliche Abrechnung der verbrauchten Mengen von Gasen und Flüssigkeiten ist die Durchfluss- und Mengenmessung unentbehrlich. Viele Durchflussmesser arbeiten mit mechanischen Fühlern und nach dem Wirkdruckverfahren. Unter den elektrischen Messfühlern hat sich zum Beispiel der induktive Durchflussmesser (IDM) technische Bedeutung erlangt.

Die Durchflussmessung ermittelt den Quotienten aus

Menge / Zeit = Durchfluss oder
Volumen / Zeit = Durchfluss

Die meisten Messverfahren für die Durchflussmessung Können auch durch Zusatzeinrichtungen zur Mengenzählung gebraucht werden, das Gleiche gilt auch für die Messverfahren der Mengenzählung in Bezug auf die Menge (Differential) = Durchfluss.

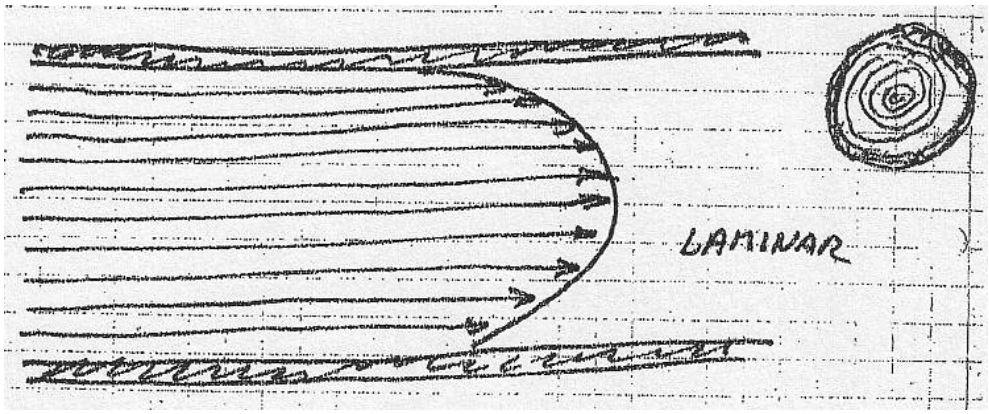
Q_M: Massendurchfluß [kg / Stunde]
Q_V: Volumendurchfluß [m^3 / Stunde]

Entscheidend für die Auswahl des Messverfahrens sind:

- Messbereich
- Genauigkeit
- Zusatzbedingungen (Einbauort, Eigenschaften des Mediums u. a,)
- Kosten
- Einfluss auf das zu messende Medium

4.2 Grundlagen

4.2.1 Laminare und turbolente Strömung

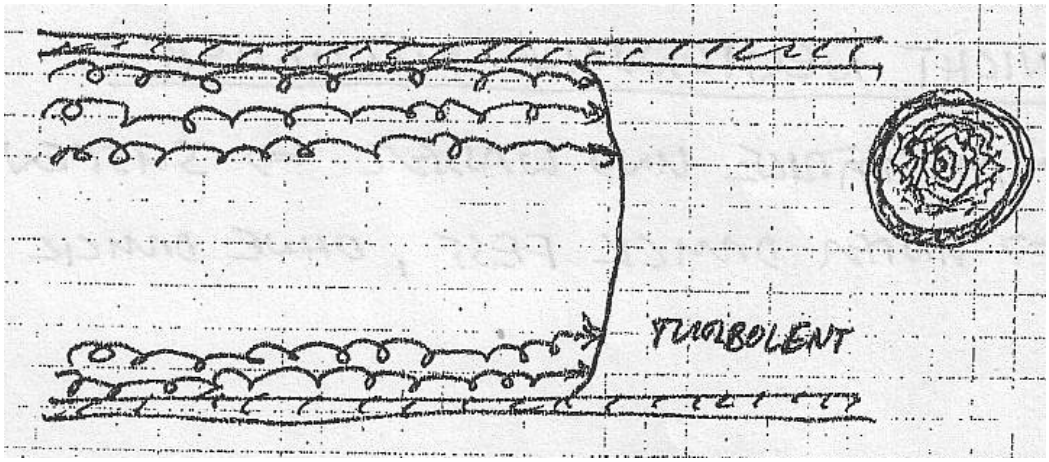


Re < 2320

Das laminare Strömungsprofil kann man sich vorstellen, wie Zylinder die ineinander stehen, analog den Jahresringen eines Baumes. Die einzelnen Strömungsschichten durchmischen sich ggf. nicht.
Es handelt sich also um eine turbulenzlose Strömung eines Fluids in einem Kanal, bei der sich alle strömenden Teilchen parallel in Strömungsrichtung bewegen. Die Strömungsgeschwindigkeit ist in der Strömungsmitte am höchsten und fällt in Richtung Wand bis auf 0 ab. Eine wichtige Kennziffer zur Bestimmung einer laminaren Strömung ist die Reynolds-Zahl (vgl. turbulente Strömung).

Dies ist besonders von Bedeutung, wenn man die Temperaturen des Medium messen möchte. Das Medium kann außen kühler sein als im Zentrum des Strömungsprofiles.

Im Gegensatz zur laminaren Strömung bewegen sich die einzelnen Teilchen in der Strömung nicht parallel, sondern ungeordnet fort. Dies führt zu strömungsbedingten Druckdifferenzen innerhalb des Fluids, was wiederum zu Verwirbelungen (Turbulenzen) führt.
Eine wichtige Kennziffer zur Bestimmung einer turbulenten Strömung ist die Reynolds-Zahl.



Re > 3000

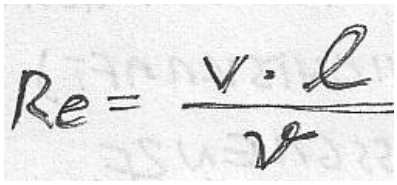
Das turbolente Strömungsprofil ist dadurch gekennzeichnet, dass es keine getrennten Schichten gibt, sondern eine wilde Durchmischung des Mediums. Dies kann bei den meisten Durchflussmessungen zu Problemen führen.

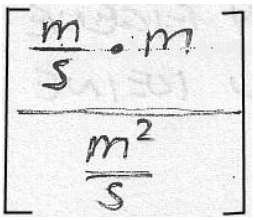
4.2.3 Reynoldszahl und Viskosität

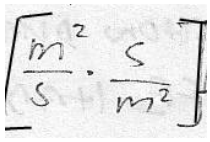
4.2.3.1 Die Reynoldszahl

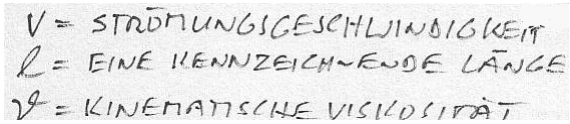
Die Reynoldszahl ist eine wichtige, dimensionslose Kenngröße bei Strömungsvorgängen. Mit Hilfe der Reynolds-Zahl (Re) kann man Angaben über die Art der Strömung machen, denn wenn Re < 2320 dann ist die Strömung laminar, und wenn Re > 3000 dann ist die :Strömung turbulent (s. turbulente Strömung, laminare Strömung).

Dimensionslose Größe









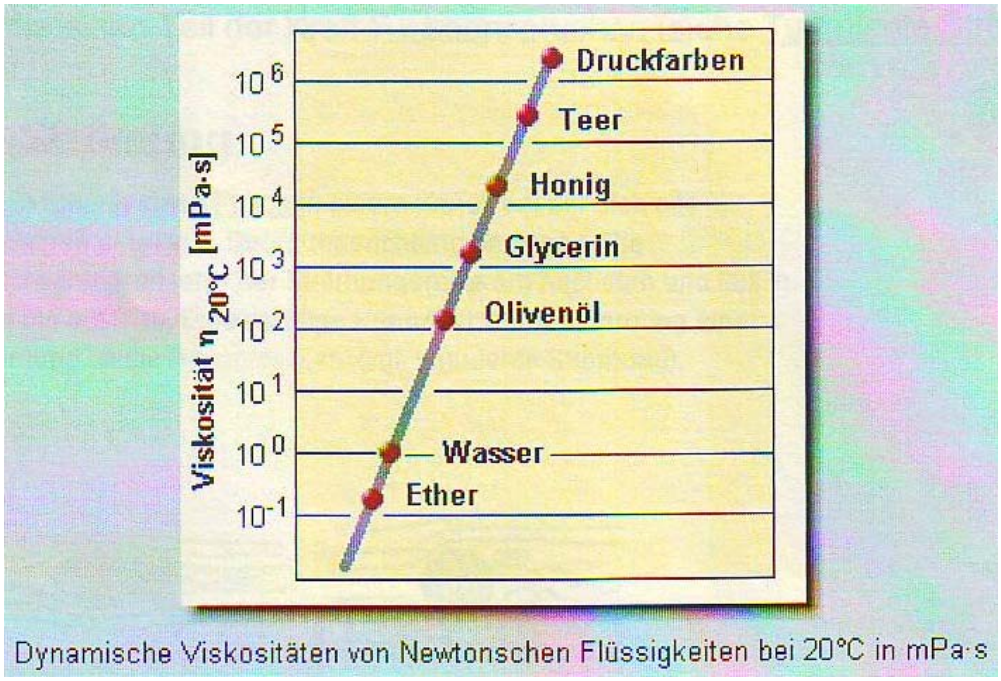
4.2.3.2 Die Viskosität

Viskosität beschreibt die Zähigkeit von Flüssigkeiten und Schmelzen, aber auch von Suspensionen. Sie wird definiert durch den Reibungswiderstand, den eine Flüssigkeit einer Deformation durch eine Druck- oder Schubspannung entgegensetzt.

Die dynamische Viskosität wird gemessen in Pas und meist mit Hilfe eines Rotationsviskosimeters bestimmt. Früher wurde die Viskosität auch in Poise (oder Centipoise) angegeben. Es gelten:

1 Ns/m^2 = 1 Pas = 10 Poise und 1 Centipoise = 1 cP = $10^{-3} Ns/m^2$.

Bei Anstrichstoffen (z. B. Schlichten und Coatings) behilft man sich im Rahmen von betrieblichen Vergleichsmessungen auch oft mit relativen Angaben, die mit Hilfe eines Auslaufbechers (nach DIN 53211 mit einer 4mm-Düse) bestimmt werden. Die hierbei ermittelten Werte (Auslaufzeiten in Sekunden) eignen sich, um reproduzierbare Verdünnungsverhältnisse im Betrieb einzustellen und diese gegebenenfalls durch Zugabe von Wasser oder Lösemittel zu verändern.

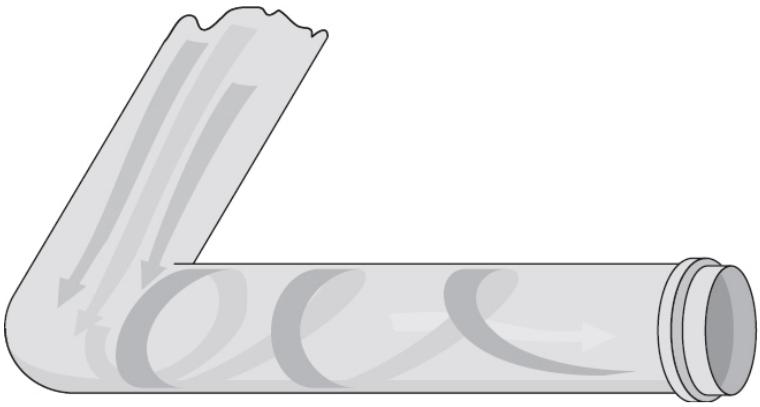


Dynamische Viskositäten von Newtonschen Flüssigkeiten bei 20°C in mPa·s

Die Viskosität bezeichnet das Fließverhalten einer Flüssigkeit. Hohe Viskosität bedeutet **Dickflüssigkeit** eine niedrige dagegen **Dünnflüssigkeit .** Beim Fließen gleiten die Moleküle aneinander vorbei. Dies geht umso schwerer je höher die zwischenmolekularen Kräfte (van-der-waals-Kräfte) sind.

4.2.4 Beruhigungsstrecken

Für manche Durchflussmessgeräte ist es für die Messgenauigkeit bzw. für die Einhaltung der vom Hersteller garantierten Klassengenauigkeit / Garantiefehler-grenze besonders wichtig, dass es sogenannte Beruhigungsstrecken vor und nach dem in der Rohrleitung montierten Messgerät gibt.



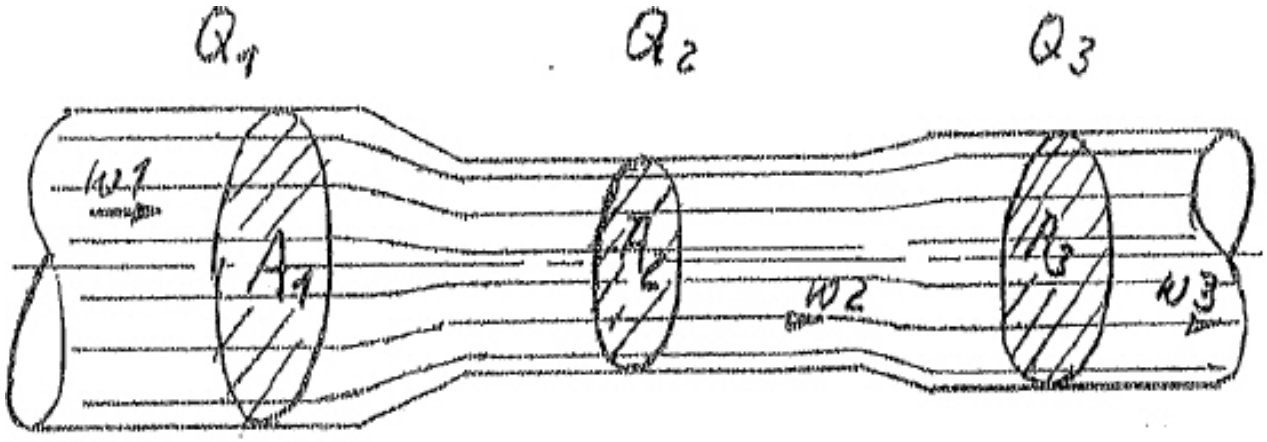
Wirbelmuster in einem Rohr

Diese sogenannten Ein- bzw. Auslaufstrecken haben die Aufgabe dafür zu sorgen, dass aus einer möglicherweise turbolenten Strömung eine laminare Strömung wird. Abhängig vom Messgerätetyp müssen diese Rohrleitungsteilstücke unterschiedlich lang konzipiert sein.

Zwei 90°-Kniee in unterschiedlicher Ebene

4.2.5 Kontinuitätsgleichung

Eine Rohrleitung, die von einem strömenden Medium ausgefüllt ist, zeigt In Jedem Querschnitt den gleichen Durchfluss. Das gilt auch, wenn die Rohrleitung Querschnittsänderungen hat. Deshalb muss sich die Strömungsgeschwindigkeit dem Querschnitt anpassen.



$Q_1 = A_1 * w_1$

$Q_2 = A_2 * w_2$

$Q_3 = A_3 * w_3$

Q = Durchfluss

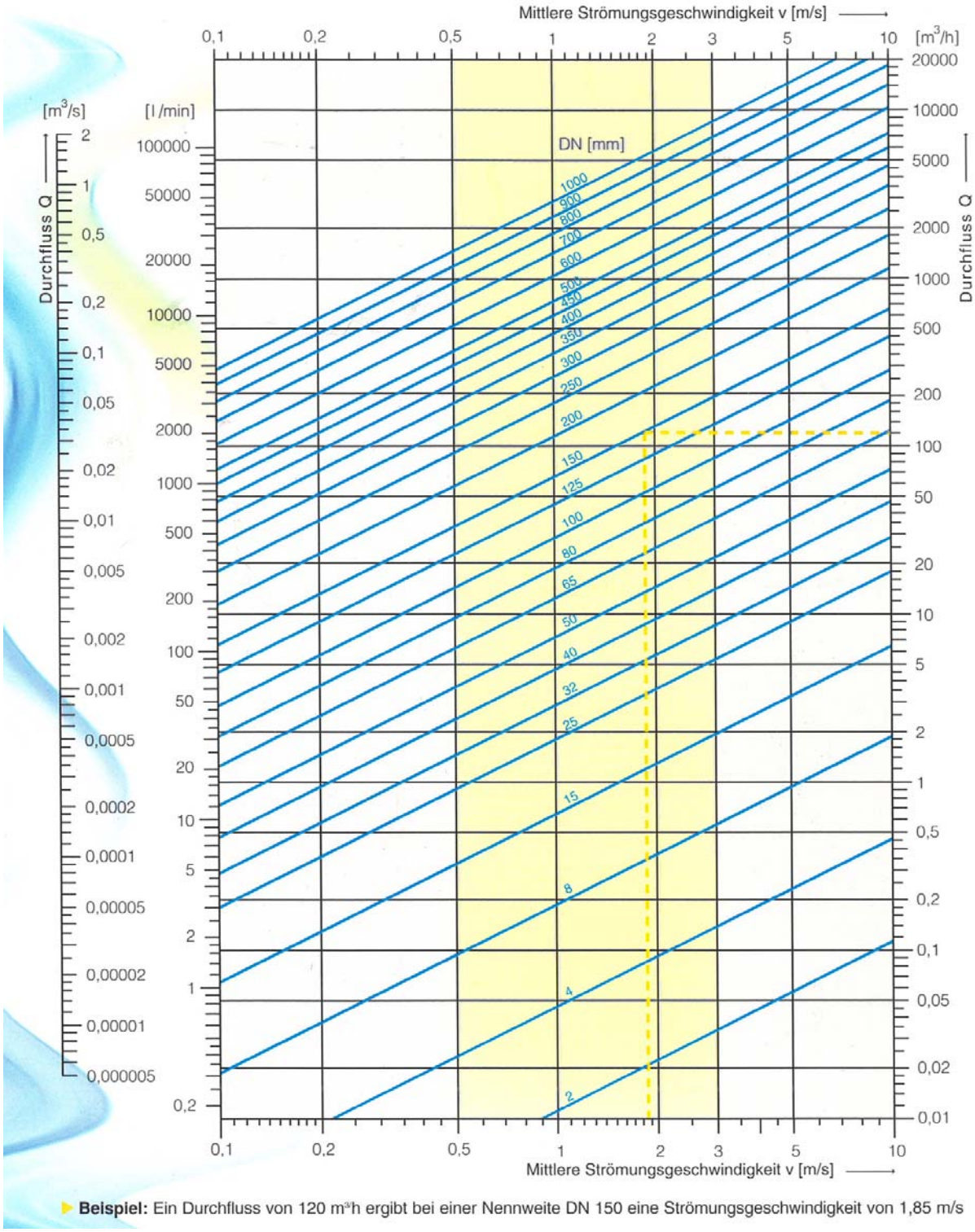
A = Querschnittsfläche

w = Strömungsgeschwindigkeit

$$Q_1 = Q_2 = Q_3$$

$$A_1 * w_1 = A_2 * w_2 = A_3 * w_3$$

4.2.6 Beziehung zwischen Nennweite, Durchfluss und Strömungsgeschwindigkeit



Beispiel: Ein Durchfluss von 120 m³/h ergibt bei einer Nennweite DN 150 eine Strömungsgeschwindigkeit von 1,85 m/s

4.2.7 Bleibender Druckverlust

Bernoulli

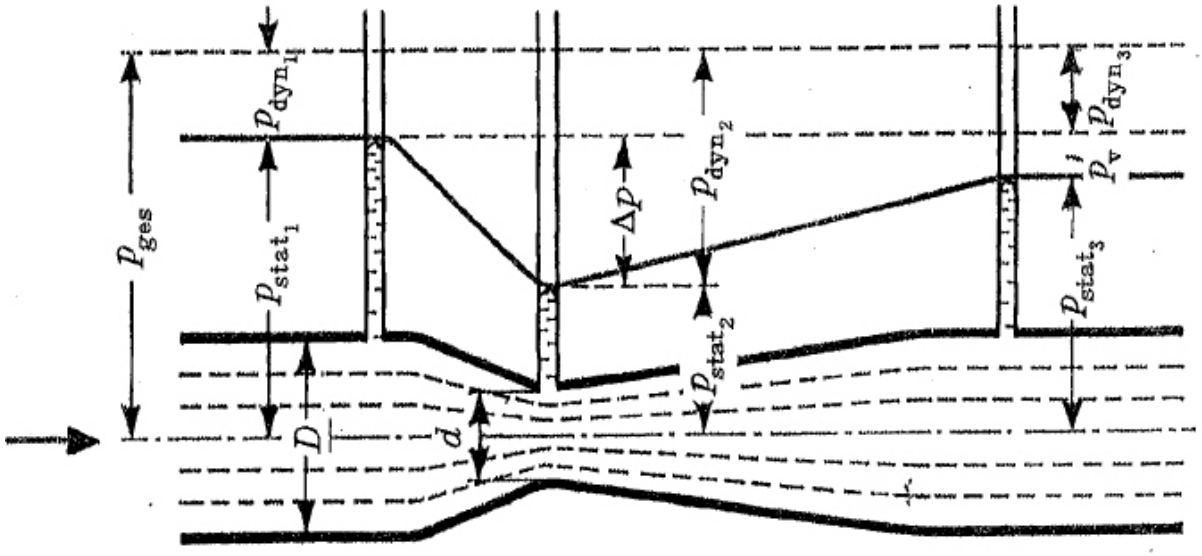
Der Satz von der Erhaltung der Energie lässt folgern, dass in jedem Teil der Rohrleitung die Summe Lageenergie, der Bewegungsenergie und der Energie des Druckes gleich bleiben muss.

$$E_{ges} = m \cdot \sigma \cdot h + 1/2\ m \cdot w^2 + p \cdot V = \text{const.}$$

Wenn die Schwerkraft vernachlässigt wird, weil die Leitung Im betrachteten Bereich kein Gefälle hat und man außerdem die Gleichung durch V teilt, so ergibt sich:

$$p + 1/2 : \sigma \cdot w^2 = \text{const.} \qquad m = V \cdot \sigma$$

Das bedeutet, dass die Geschwindigkeitserhöhung in einer Querschnittsverengung infolge der höherer Bewegungsenergie eine Verminderung der Druckenergie und damit des Druckes verlangt. Vor einem Drosselkörper steigt der statische Druck an, well die einzelnen Masseteilchen, die gebremst werden, von den nachfolgenden, noch schnellen Masseteilchen eine Druckkraft erfahren. Bei dem Wirkdruckverfahren misst man den Druckunterschied zwischen einem Punkt vor dem Drosselkörper und einem Punkt hinter dem Drosselkörper, wo die Strömung Ihren engsten Querschnitt hat.



p_{stat} statischer Druck,
p_{dyn} dynamischer Druck,
$p_{ges} = p_{stat_1} + p_{dyn_1}$ Gesamtdruck,
$\Delta p = p_{stat_1} - p_{stat_2}$ Wirkdruck
$p_v = p_{ges} - (p_{stat_3} + p_{dyn_3})$ bleibender Druckverlust durch den Energieverbrauch der Wirbel vor und hinter der Kontraktion

4.2.8 Stichworte zu Betriebsbedingungen und Forderungen an die Messstelle

Wird eine Messstelle geplant, so ergibt sich deren Notwendigkeit aus dem gewünschten Messeffekt. Das Messgerät soll also entweder selbst etwas aussagen (z. B. örtliche Anzeige) oder eine Funktion unterstützen (z. B. als Istwertgeber für einen Regler). Der Planer beginnt seine Recherchen für die Geräteauswahl bei den Betriebsbedingungen. Er stellt die Fragen nach dem Messstoff, nach den örtlichen Gegebenheiten und stellt die Forderung nach der Darstellung des Messwertes. Dazu nachstehende Stichwortzusammenstellung:

Beschaffenheit des Messstoffes:

- Gas, Dampf: trocken, feucht
- Flüssigkeit: Gasanteil, Feststoffe, ablagernde kristallisierende Inhaltsstoffe, Staub im Gas
- Dichte
- Temperatur, Temperaturänderung, zeitlicher Ablauf
- Viskosität
- elektrische Leitfähigkeit des Messstoffes, der Ablagerung
- chemische Aggressivität, Werkstoffauswahl
- Abriebgefahr

Betriebsbedingungen:

- Verlauf der Rohrleitungen z.B. für Schwebekörperdurchflussmesser
- Nennweite der Rohrleitung
- Ausbildung des Gerinnes, Gefälle, Rückstau
- Druckstufe
- Durchfluss, kleinster, größter Wert; Änderungsgeschwindigkeit (stoßförmige Änderung)

- Strömungsverhältnisse: lineare, turbulente Strömung Geschwindigkeitsverteilung, Drall, Pulsation
- beide Fließrichtungen (Vor-, Rücklauf)
- statischer Druck, Druckstoß, Druckverlust zulässig
- Nahrungsmittelindustrie →Keine Toträume in der Rohrleitung und in den Sensoren und Aktoren

Örtliche Gegebenheiten:

- Umgebungstemperatur
- Feuchtigkeitseinfluss, Schutzart
- Staubeinwirkung, Schutzart
- Vibration
- Leitungsbeschaffenheit vor und hinter der Messstelle
- Explosionsschutz
- Hilfsenergie, Leitungsführung
- Einstreuung elektrischer Störungen
- Befestigungsmöglichkeit

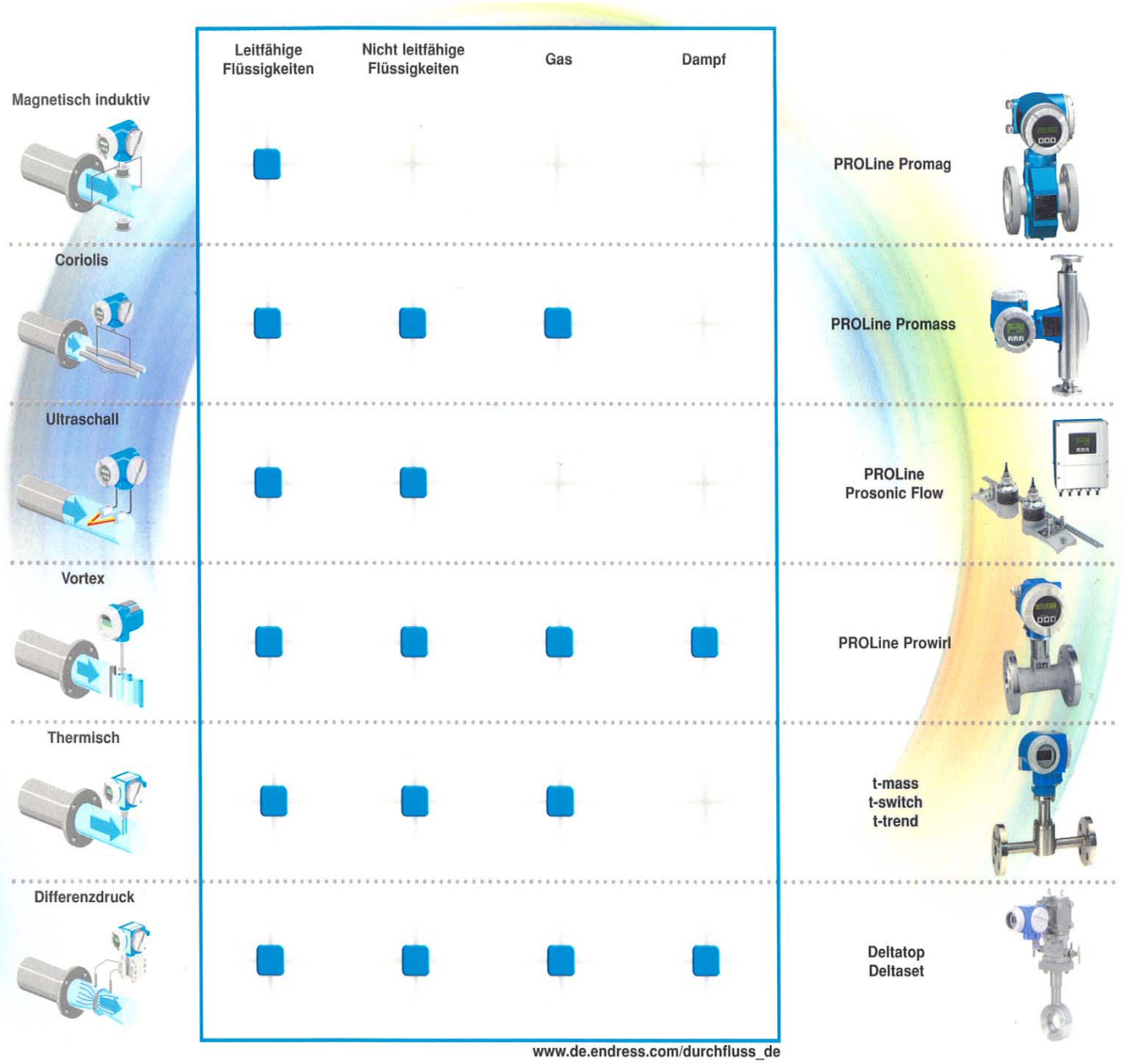
Darstellung des Messwertes:

- Genauigkeit
- fester, einstellbarer Messbereich intern, extern
- interne, externe Kontrollmöglichkeit
- örtliche Anzeige
- Zählung, Integration
- Grenzwertsignal
- analoges Einheitssignal, welche Werte?

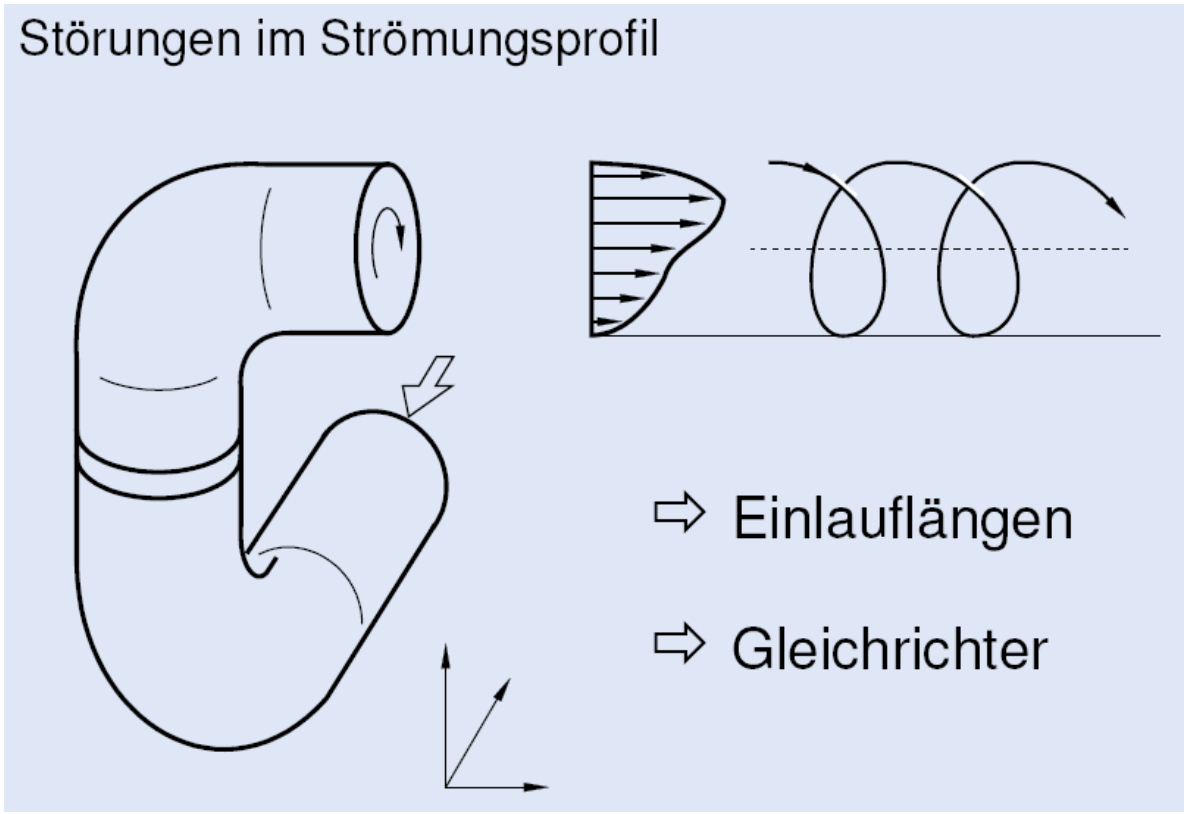
- Impulsausgang zur Fernzählung
- Schnittstelle, welche?
- PROFIBUS
- HART-Protokoll
- Explosionsschutz
- Eichfähigkeit

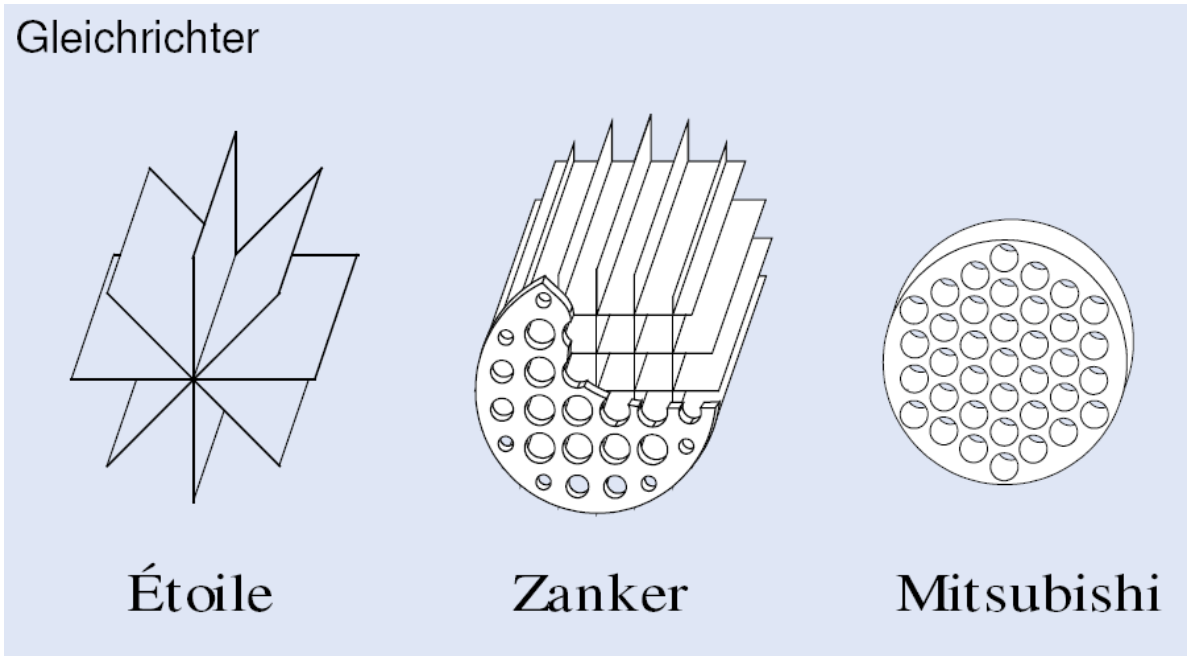
4.2.9 Auswahlmatrix für Durchflussmessgeräte

Eine Auswahlmatrix der Fa. Endress und Hauser. Sie dient als grobe Orientierung für die Einsatzgrenzen der einiger Durchflussmessgeräte.



4.2.10 Strömungsgleichrichter

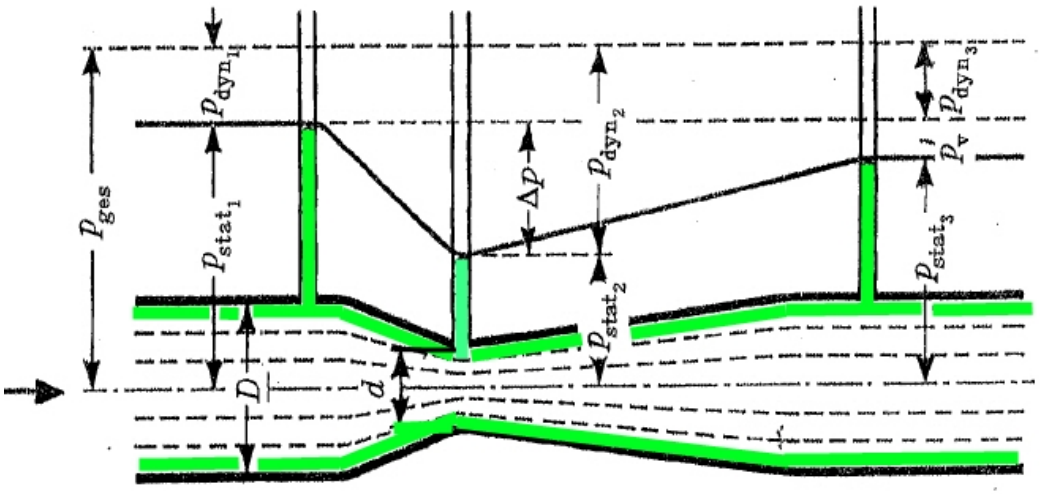




4.3 Durchflussmessgeräte

4.3.1 Wirkdruckmessverfahren

Allen Durchflussmessverfahren nach dem Wirkdruckmessprinzip ist gemein, dass sie den Druckanstieg bzw. den Druckabfall vor und hinter einer Rohreinschnürung, der abhängig vom herrschenden Durchfluss ist, messtechnisch auswerten.



Öffnungsverhältnis – Je stärker die Einschnürung der Strömung ist, um so größer ist der Wirkdruck – also der Messeffekt. Andererseits steigt dadurch der bleibende Druckabfall, der erstens Energieverlust bedeutet und zweitens das Medium so beeinflussen kann, dass die weitere Verarbeitung gestört Ist (Kondensation von Dampf z. B.)
Der bleibende Druckverlust Ist von der Art des Drosselkörpers und vom Öffnungsverhältnis m abhängig.

$$m = (d/D)^2$$

4.3.1.1 Durchflussgleichung

Wie man aus den hier angegebenen Gleichungen entnehmen kann, stehen Druck und Durchfluss in quadratischem Verhältnis zueinander. Dies bedeutet der Wirkdruck steigt nicht proportional zum Durchfluss an. D.h. um ein lineares Verhältnis zu bekommen, muss der Wirkdruck radiziert werden. In den Anfängen der prozesstechnischen Messtechnik, wurde mittels einem sogenanntem Radizierrelais, der Druck radiziert.

Q_M: Massendurchfluß [kg / Stunde]
Q_V: Volumendurchfluß [m^3 / Stunde]

$$Q_M = 0{,}01252 \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot m \cdot D_t^2 \cdot \sqrt{\sigma_t \cdot h}$$

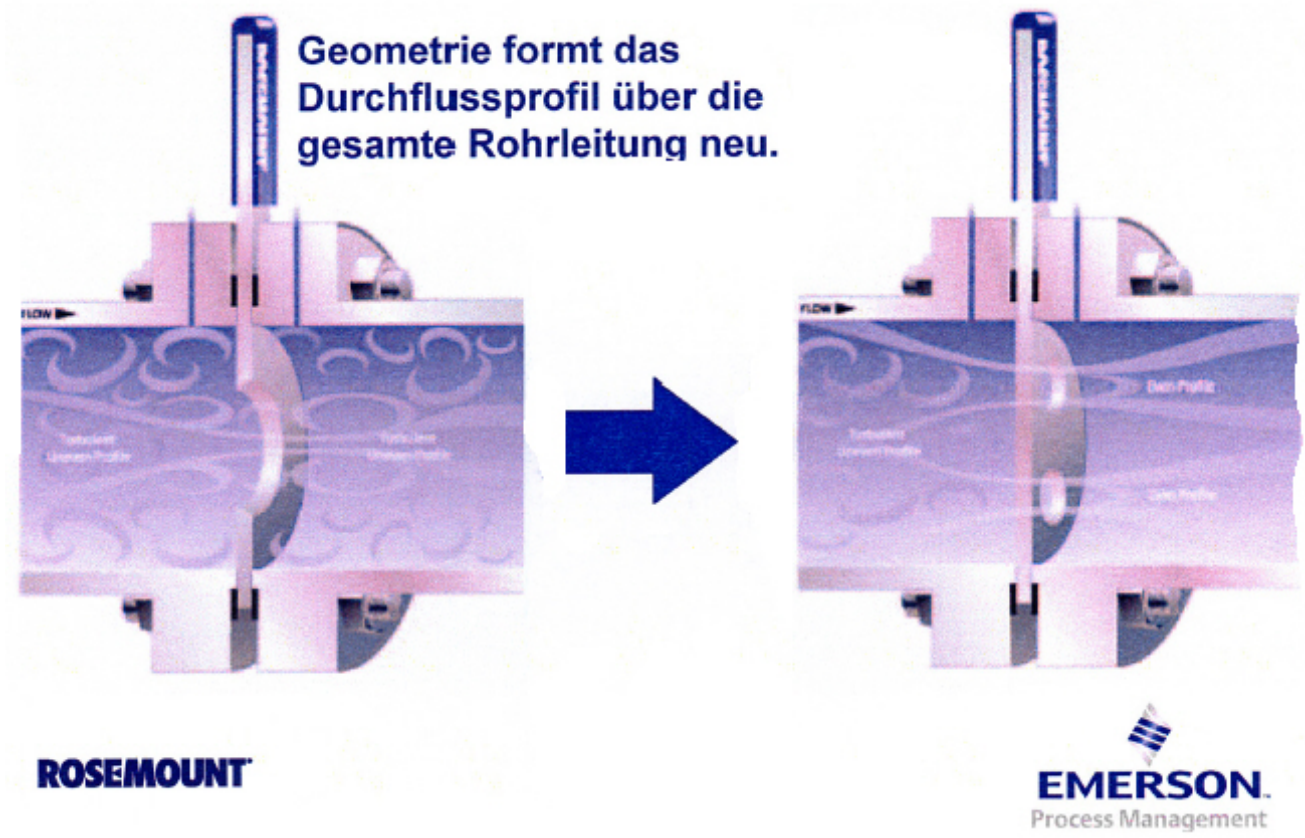
$$Q_V = 0{,}01252 \cdot \alpha \cdot \epsilon \cdot m \cdot D_t^2 \cdot \sqrt{\frac{h}{\sigma_t}}$$

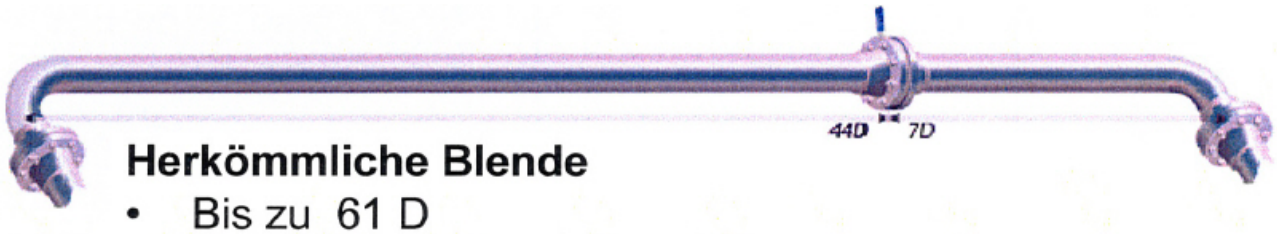
D_t: Wahrer, temperaturbedingter Rohrdurchmesser
σ_t: Dichte des Medium
$h = \Delta p$: Druckunterschied an der Blende (Kontraktionsstelle) Wirkdruck
m: Öffnungsverhältnis $(d/D)^2$
α: Durchflußzahl
ϵ: Expansionszahl (Dichteveränderung von Gasen und Dämpfen)
p_v: Bleibender Druckverlust

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\sqrt{h_1}}{\sqrt{h_2}}$$

Pneumatische Relais für Rechenoperationen und für Zeitfunktionen

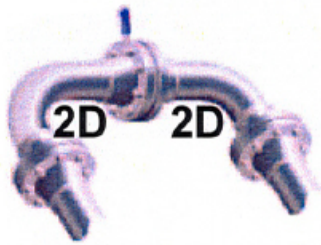
Die Vierlochblende (Bild rechts) hat im Vergleich zur klassischen Einlochblende den Vorteil der kürzeren Ein- und Auslaufstrecken.





Herkömmliche Blende

- Bis zu 61 D
- Durchflussgenauigkeit: ±1.0%



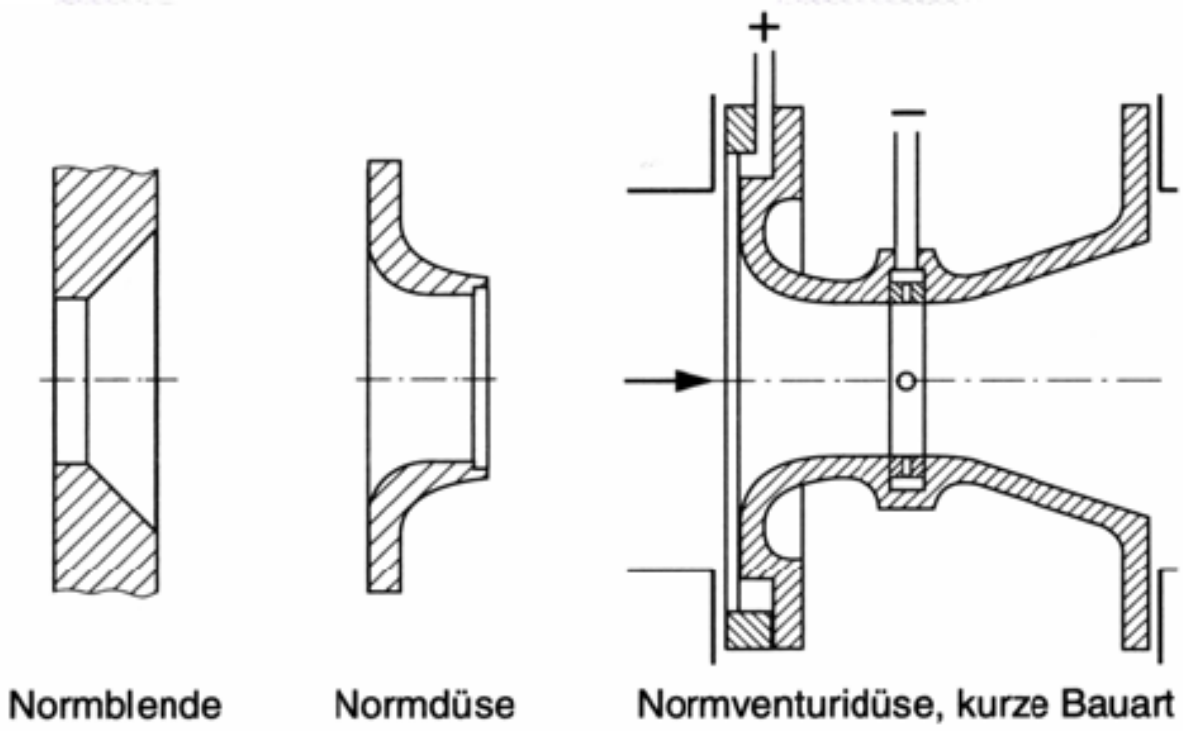
4 – Loch Blende

- 4 D
- Durchflussgenauigkeit: ±0.7%

4.3.1.2 Vergleich von genormten Drosselorganen

Vergleich der genormten Drosselorgane

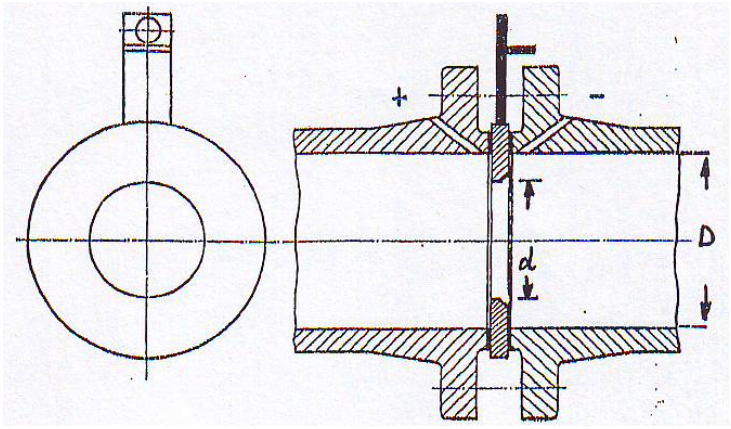
	Blende	Normdüse	Venturirohr	Venturidüse
Herstellungsaufwand	sehr gering	mittel	aufwendig	sehr aufwendig
Baulänge des Drosselgerätes	sehr kurz	kurz	lang ca. 10 D	mittel ca. 5 D
Gesamte Einbaulänge (Ein- und Auslaufstrecke)	relativ groß bis 50 D	relativ groß bis 50 D	relativ klein	relativ groß
bleibender Druckverlust	hoch	mittel (ca. 40% Blende)	klein (20% von Blende)	klein (20% von Blende)
Strömungs-Energieaufwand	hoch	mittel	niedrig	niedrig
Anfälligkeit gegen Verschmutzung	relativ hoch (Sedimentation)	mittel	klein	klein
Standzeit bei korrosiven und abrasiven Medien	niedrig	mittel	hoch	hoch



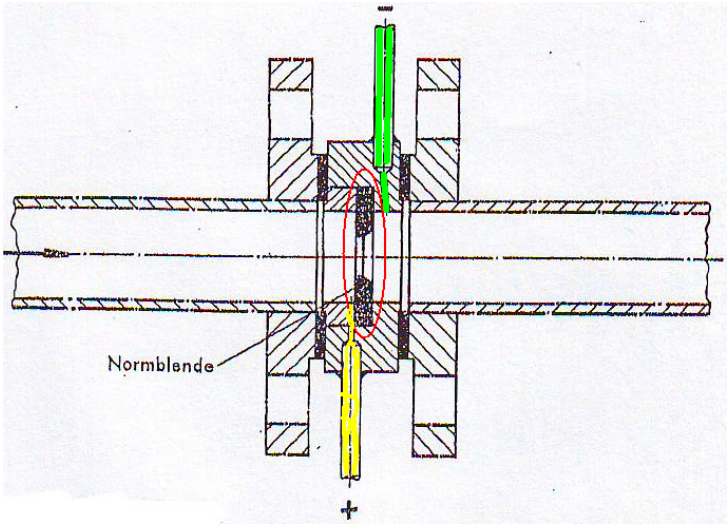
Normblende Normdüse Normventuridüse, kurze Bauart

4.3.1.3 Messblenden-Typen:

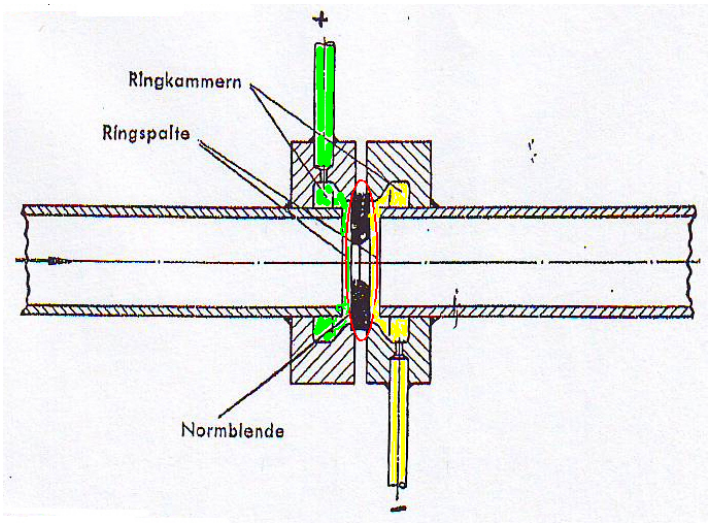
Normblende



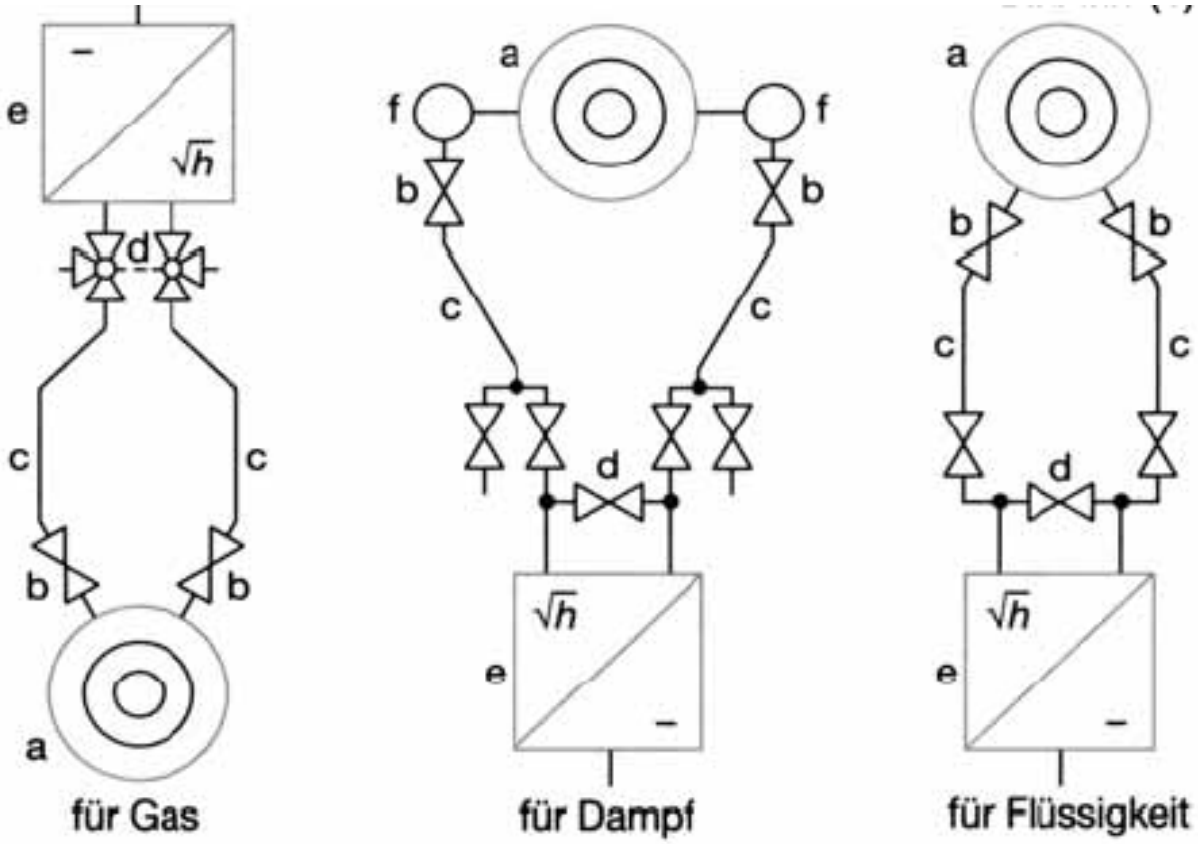
Messflansch mit Normblende und Einzelanbohrung



Messrohr mit Normblende und Ringkammer



4.3.1.4 Anordnung von Durchflussmessern nach dem Wirkdruckverfahren



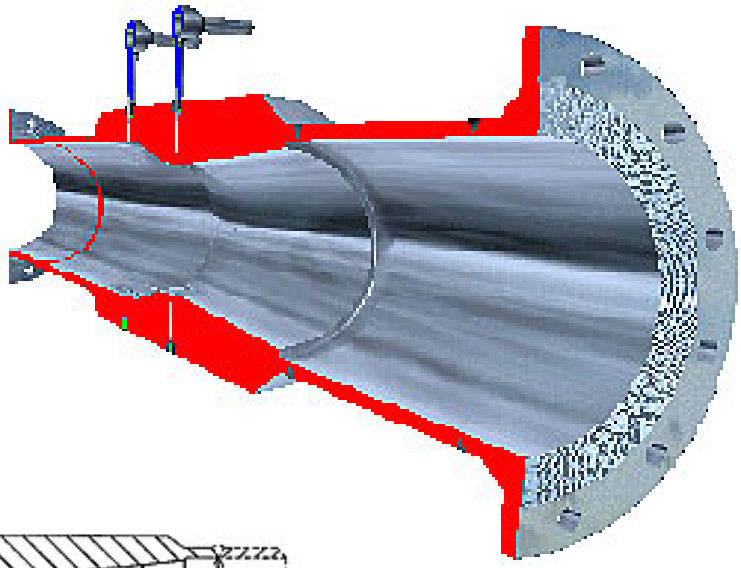
Eine vollständige Anordnung zur Durchflussmessung mit Wirkdruckverfahren besteht aus:

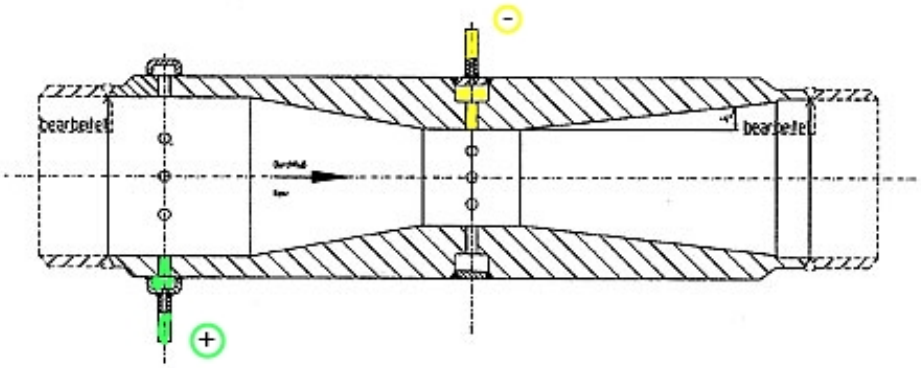
- Wirkdruckgeber (Drosselgerät)
- Wirkdruckleitungen (+ und -)
- Differenzdruck-Messumformer.

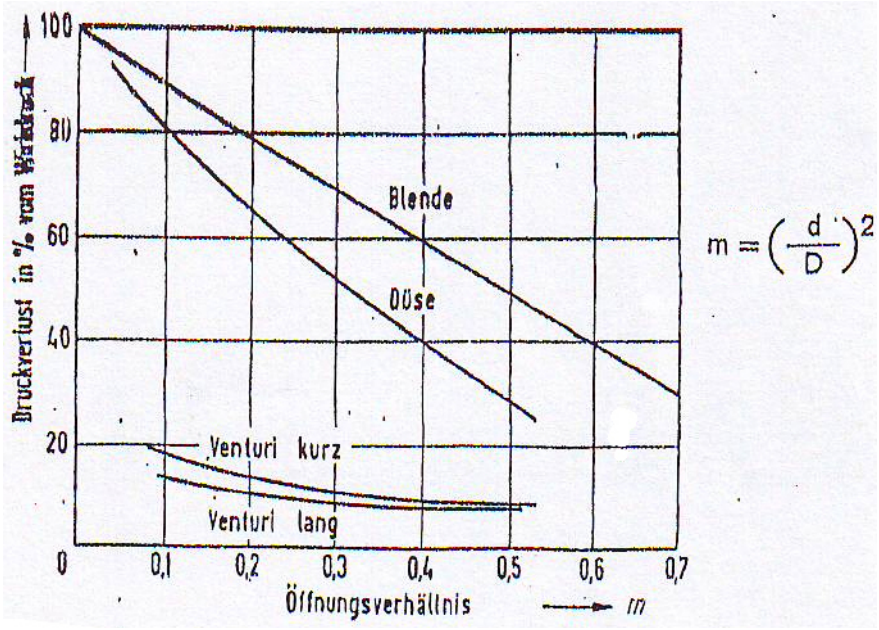
Anordnung Differenzdruck-Transmitter an Blenden für Flüssigkeiten, Gase und Dampf

a) Drosselorgan
b) Anschlussarmatur Blende
c) Wirkdruckleitung
d) Anschlussarmatur Messumformer
e) Differenzdruck-Messumformer
f) Kondensatgefäß

4.3.1.5 Venturirohr







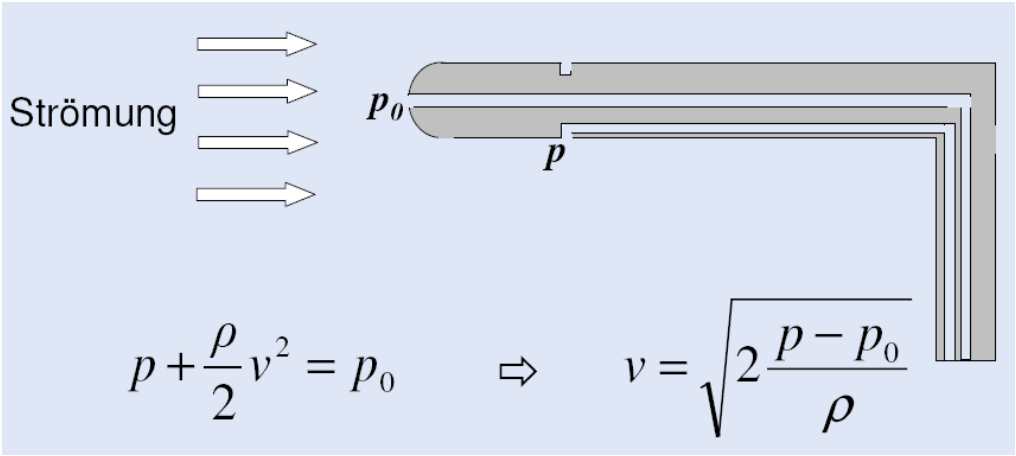
Druckverlust an Drossel-Geräten in Abhängigkeit vom Öffnungsverhältnis m.

Probleme und Messunsicherheiten bei Wirkdruckmessungen

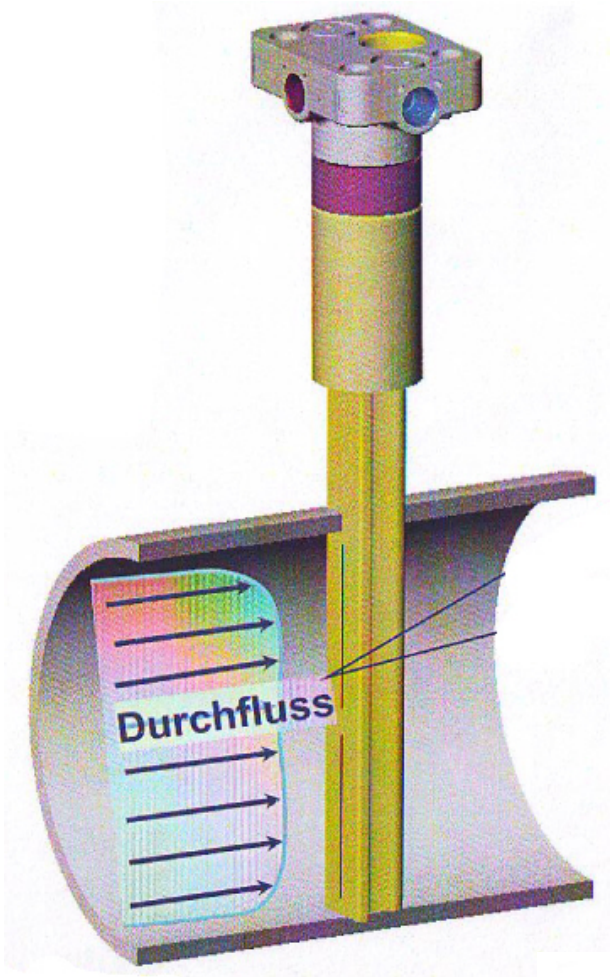
- Trotz des sehr einfachen Messaufbaus sind auf Grund der umfassenden Korrekturfaktoren für Messmedium und Messanordnung einschließlich Rohrleitung prinzipiell geringe Messabweichungen möglich.
- Geringe Messanweichungen stellen aber sehr hohe Ansprüche an die Gleichmäßigkeit der Strömung und fordert daher vor und hinter dem Wirkdruckgeber sehr lange gerade Ein- und Auslaufstrecken. (siehe ISO 5167)
- Besonders kritisch sind Drallströmungen, d. h. schraubenförmig fließende Medien. Hier sind Strömungsgleichrichter vor die Drosselstelle einzubauen.
- Bei Blenden spielt die Schärfe der Abrisskante für die Messabweichung eine entscheidende Rolle. → Die Kantenschärfe kann durch mitgeführte abrasive Begleitstoffe oder korrosive Medien zerstört werden! →Führt zu schleichend eintretenden Messabweichungen.
- Eine Verschmutzung des Mediums, insbesondere durch vor der Blende sedimentierende Feststoffe führt zu Messabweichungen.
- Ein Schwachpunkt der Wirkdruckmessung ist der enge Messbereich, innerhalb dessen sich eine vernünftige Genauigkeit erzielen lässt.
- Übliche Druckmessumformer besitzen wie die meisten anderen Transmitter eine Messspanne von typisch 1: 10. Bedingt durch Radizierung des Differenzdruckes → erzielbare Messspanne für den Volumen- oder Massendurchfluss nur bei etwas über 1:3.
- In kritischen Fällen kann man zwei oder mehr Differenzdruck-Messumformer mit gestaffelten Messbereichen parallel an einer Blende betreiben und von den Signalen das jeweilig geeignete nutzen. Achtung: Gerät mit der kleineren Messspanne muss nach Überlast in Höhe des 10fachen seiner Nenndruckdifferenz noch arbeiten!
- Bei Durchflussmessungen von Flüssigkeiten mittels Blenden muss der Querschnitt des Produktrohres vollständig gefüllt sein.
- Ist dies im Betrieb nicht sicher gewährleistet, muss die Messstrecke in eine senkrechte Leitung eingebaut sein, wobei der statische Druck aufgrund ungleicher Entnahmehöhe von Plus- und Minusseite zu berücksichtigen ist.

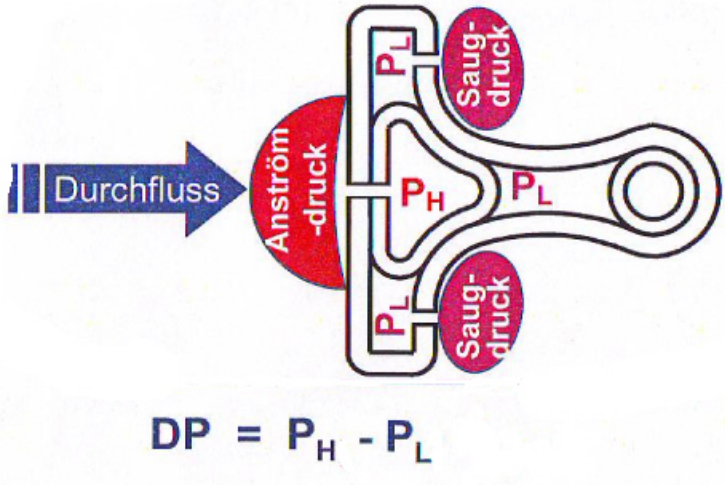
$$q \sim \sqrt{\Delta p}$$

4.3.1.6 Staudrucksonde



Nennbereiche:	beliebig
Nenndurchmesser:	DN 20 ... ?
Vorteile:	preisgünstig
	nur Sonde im Messrohr
Nachteile:	große Ein- und Auslaufstrecken
	nicht lineare Kennlinie
	Empfindlich gegen Abnutzung
	geringe Messspanne

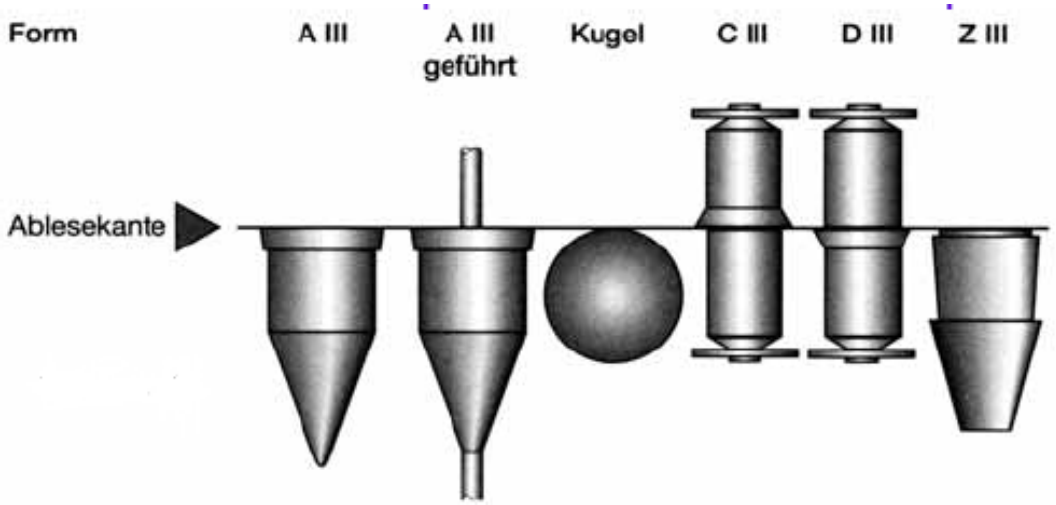

Durchfluss


Durchfluss
Anström -druck
PL
Saug- druck
PH
PL
PL
Saug- druck

$$DP = P_H - P_L$$

4.3.2 Schwebekörperdurchflussmesser (SKDM)

4.3.2.1 Schwebekörperformen



$$\rightarrow \dot{q}_{Vb} = \frac{\pi}{4}\left(D_k^2 - D_S^2\right)\cdot\alpha\cdot\sqrt{\frac{2\cdot m_s\cdot g}{A_s\cdot\rho_S}}\cdot\sqrt{\frac{\rho_S-\rho_b}{\rho_b}}$$

mit D_S^2 = konstant $\rightarrow \dot{q}_{Vb} \sim D_k^2 \sim h$ = Höhe Schwebekörper

ρ_s Dichte des Schwebekörpers

ρ_b Dichte des Betriebsmediums (Fluid)

c_w Strömungswiderstandszahl

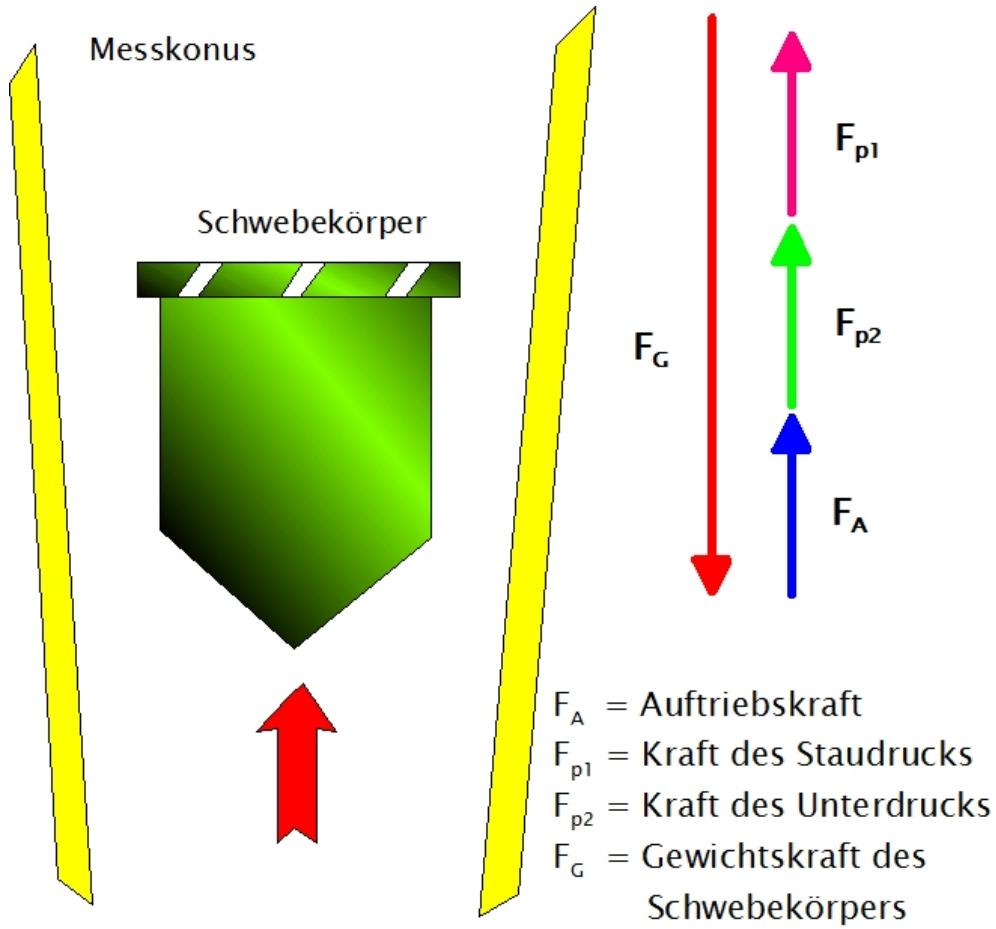
A_s $D_S^2 \cdot \pi/4$ = Fläche des Schwebekörpers an der Ablesekante

D_s größter Durchmesser des Schwebekörpers

D_k Durchmesser des Konus in Höhe des Schwebekörpers

Umrechnung auf verschiedene Betriebsmedien

- Schwebekörper-Durchflussmesser werden für die verschiedensten Fluide (Flüssigkeiten und Gase) eingesetzt.
- Beim Hersteller werden sie ersatzweise mit den Standardmedien Wasser bzw. Luft unter Normbedingungen kalibriert.
- Die Kalibrierung muss auf den jeweiligen Betriebsstoff umgerechnet werden!
  →Anwender kann in Wasser bzw. Luft kalibrierte Geräte für andere Medien und Betriebszustände umrechnen!
- Weicht die Viskosität des Betriebsmediums nicht stark von der des Kalibriermediums ab → α ~konstant, folgt:

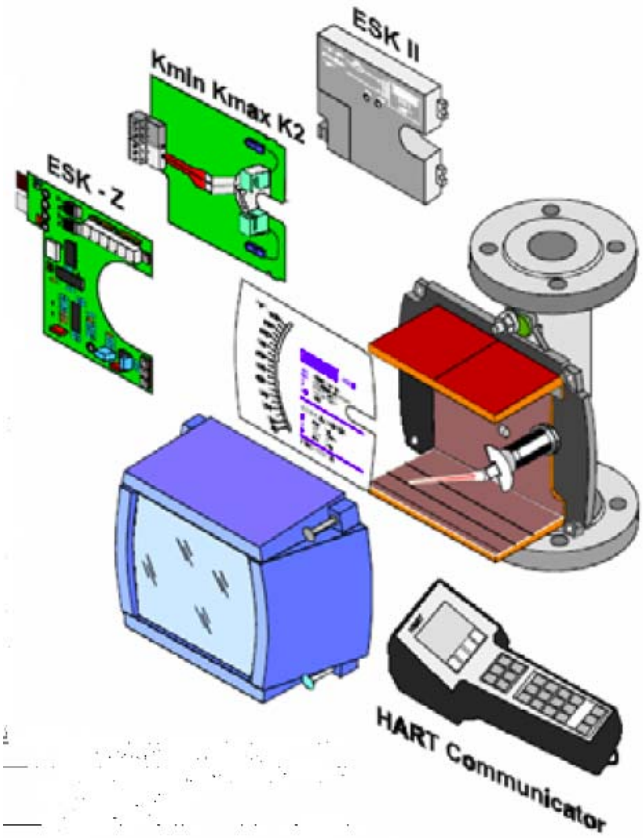


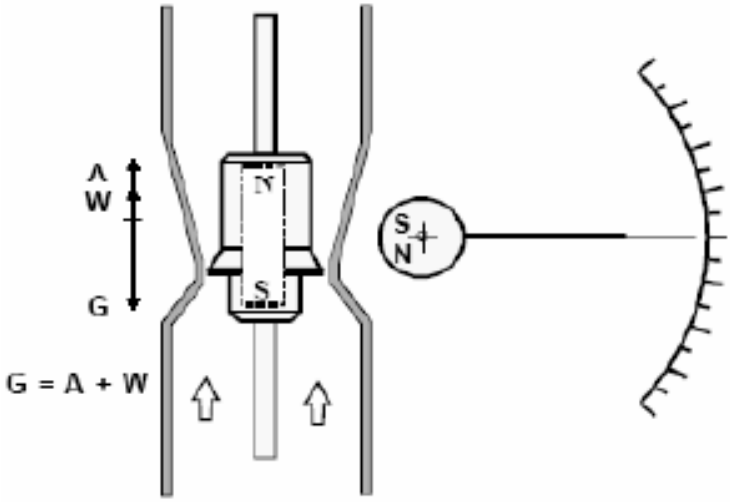
F_A = Auftriebskraft
F_{p1} = Kraft des Staudrucks
F_{p2} = Kraft des Unterdrucks
F_G = Gewichtskraft des Schwebekörpers

$$F_G = m * g$$
$$F_A = Rho * g * V$$
$$F_{p1} = p_ü * A1$$
$$F_{p2} = p_u * A2$$

$$F_G = F_A + F_{p1} + F_{p2}$$

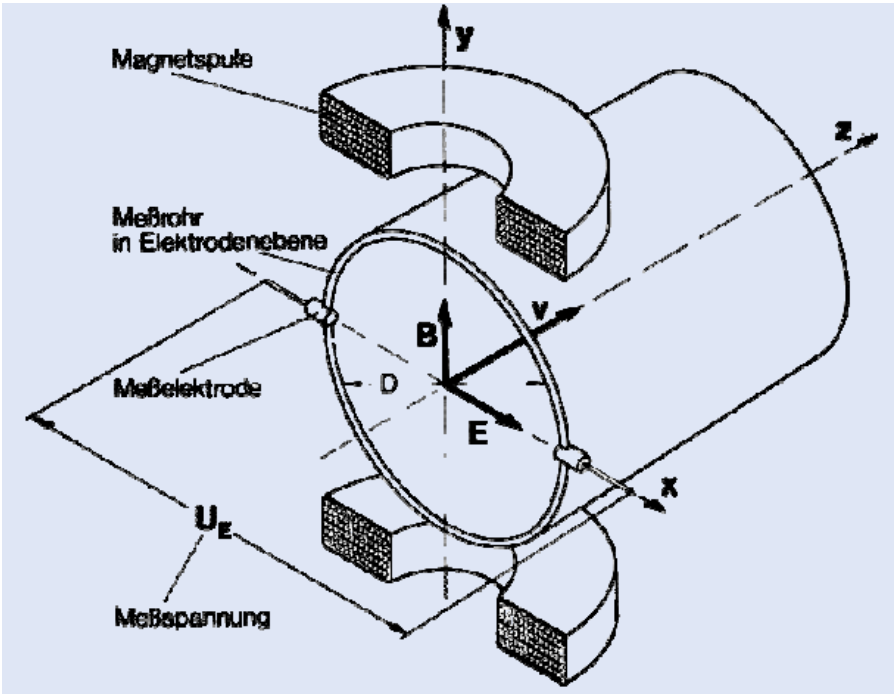
4.3.2.2 Schebekörperdurchflussmessumformer

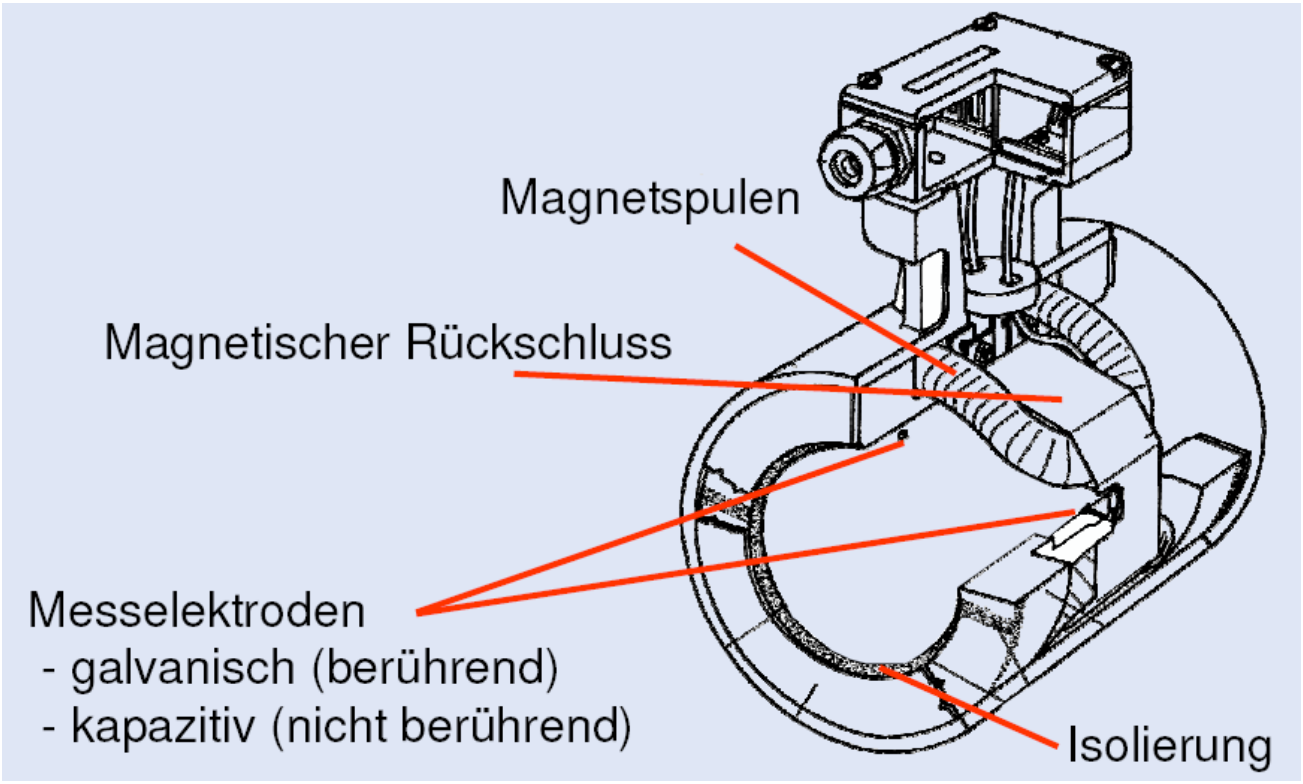




ESK-Z
Durchfluss- / Summenzähler
Kmin Kmax K2
Grenzwertsignalgeber
ESKII
Normsignalerzeugung
4..20mA~Durchfluss
Fernsteuer-Anschluss
für HART-Protokoll

4.3.3 Magnetisch induktiver Durchflussmesser (MID)





Zusammenhang zwischen Durchfluss Q und induzierter Spannung U

$$Q = \frac{D^2\pi}{4} v = \frac{\pi}{4} \frac{D}{B} U.$$

Q = Durchfluss
D = Rohrinnendurchmesser
B = Magnetische Induktion
U = Induzierte Spannung
v = Strömungsgeschwindigkeit

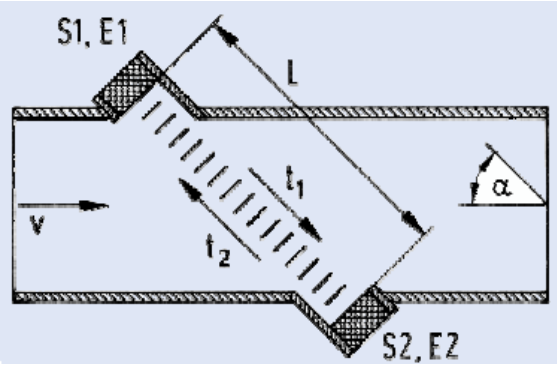
Beispiel:

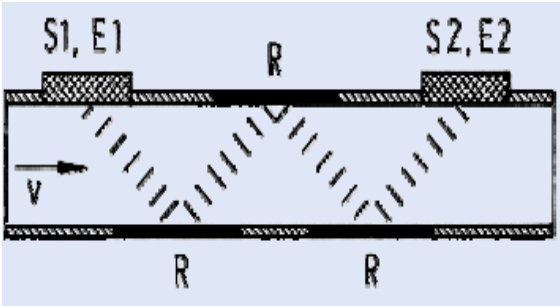
Für eine magnetische Induktion von 0,3 T und einem Rohrdurchmesser von 50mm, sowie einer Strömungsgeschwindigkeit von 100 mm/s, ergibt sich eine induzierte Spannung von nur 1,5mV.

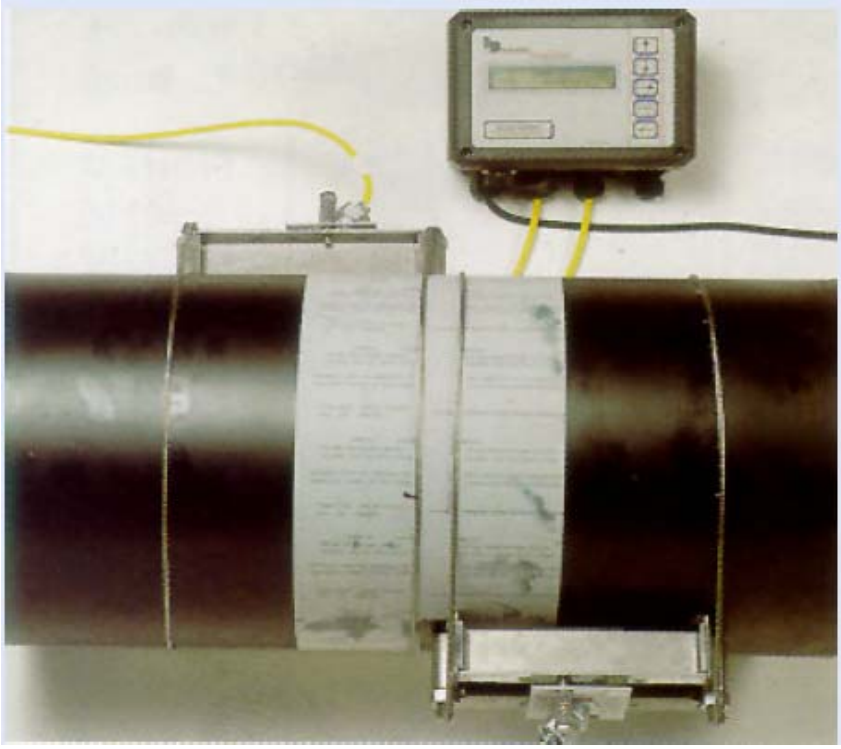
Nennweite		Meßbereichsendwert $Q_{100\%}$	
DN mm	Zoll	kleinster (v = 0,3 m/s)	größter (v = 12 m/s)
2,5	1/10	5,301 l/h	212,1 l/h
4	1/8	13,56 l/h	542,9 l/h
6	1/4	30,54 l/h	1,221 m³/h
10	3/8	84,83 l/h	3,392 m³/h
15	1/2	190,9 l/h	7,634 m³/h
20	3/4	339,3 l/h	13,57 m³/h
25	1	530,2 l/h	21,20 m³/h
32	1 1/4	868,6 l/h	34,74 m³/h
40	1 1/2	1,358 m³/h	54,28 m³/h
50	2	2,121 m³/h	84,82 m³/h
65	2 1/2	3,584 m³/h	143,3 m³/h
80	3	5,429 m³/h	217,1 m³/h
100	4	8,483 m³/h	339,2 m³/h
125	5	13,26 m³/h	530,1 m³/h
150	6	19,09 m³/h	763,4 m³/h

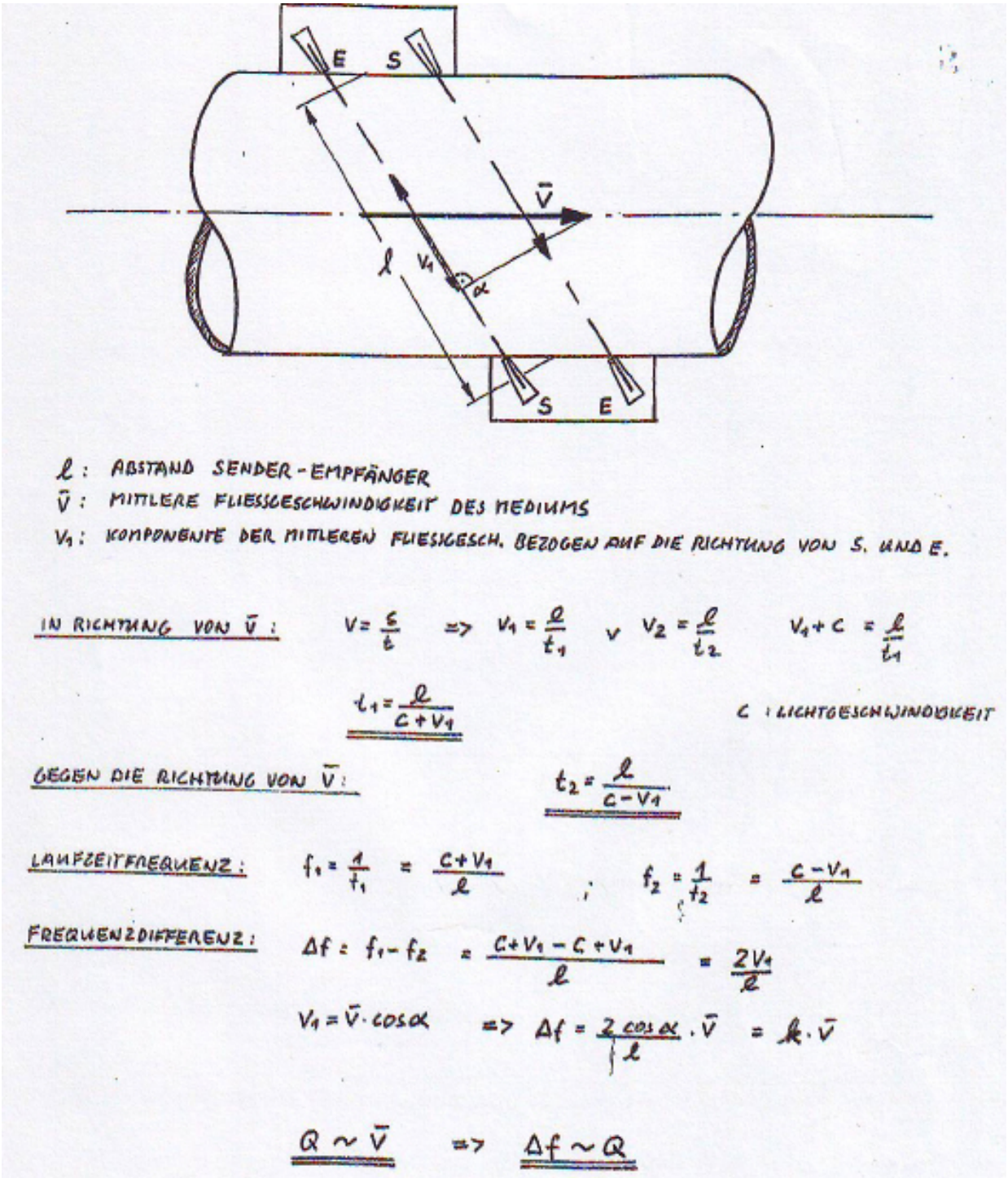
Muster einer Durchflusstabelle (Herstellerangabe)

4.3.4 Ultraschalldurchflussmesser



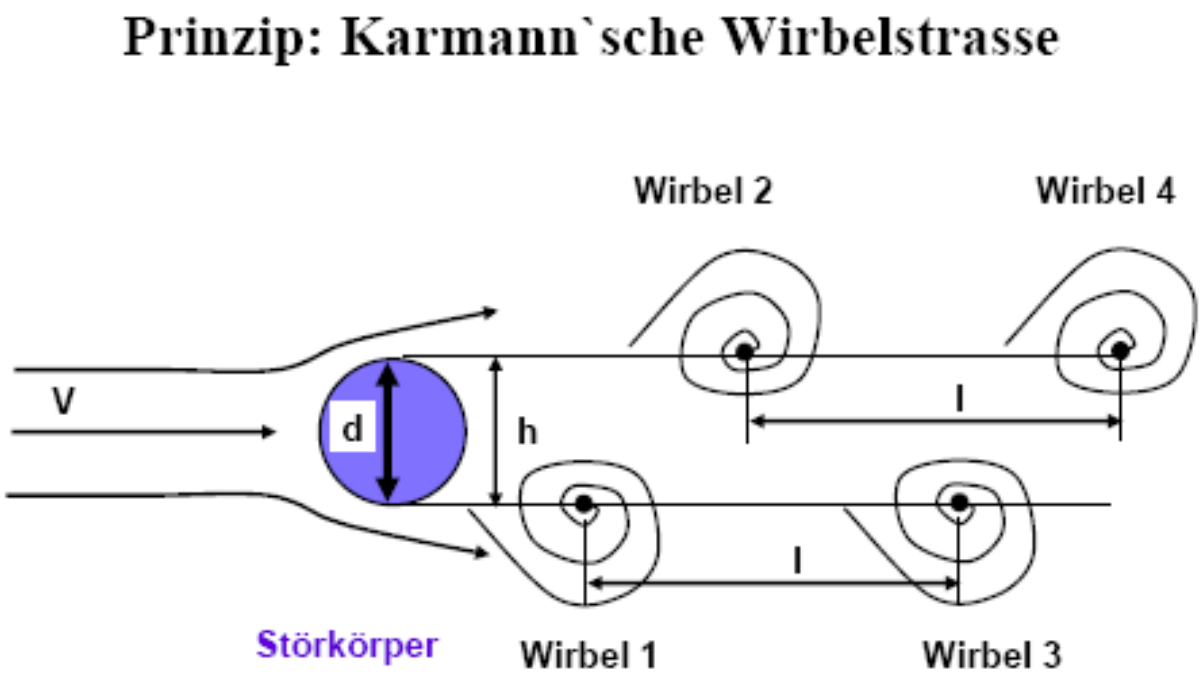


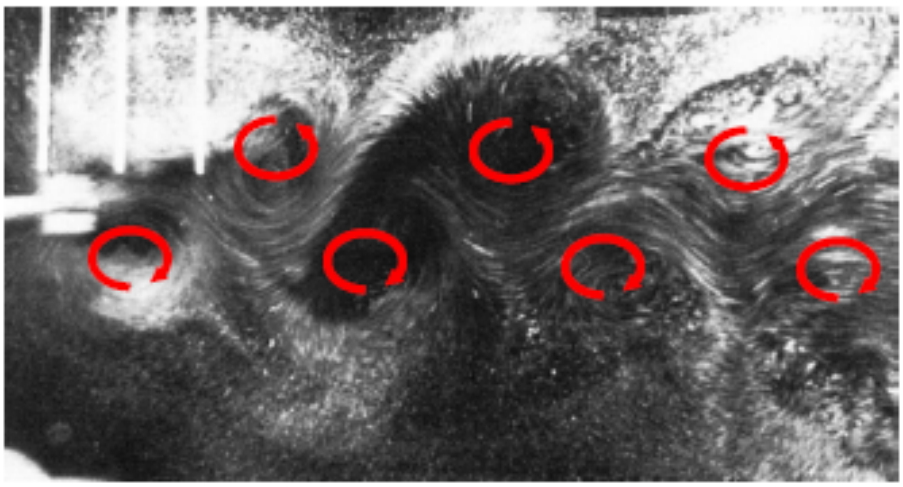




In Durchflussrichtung breitet sich die Schallwelle schneller aus als gegen die Durchflussrichtung!

4.3.5 Wirbeldurchflussmessgeräte





Karmann`sche Wirbelstrasse im Strömungskanal

Die Messung der Wirbelfrequenz erfolgt über Drucksensoren oder Temperatursensoren am Störkörper. Es lassen sich Genauigkeiten von 0,5 % bei Messbereichen von 1:10 bis 1:30 erzielen.

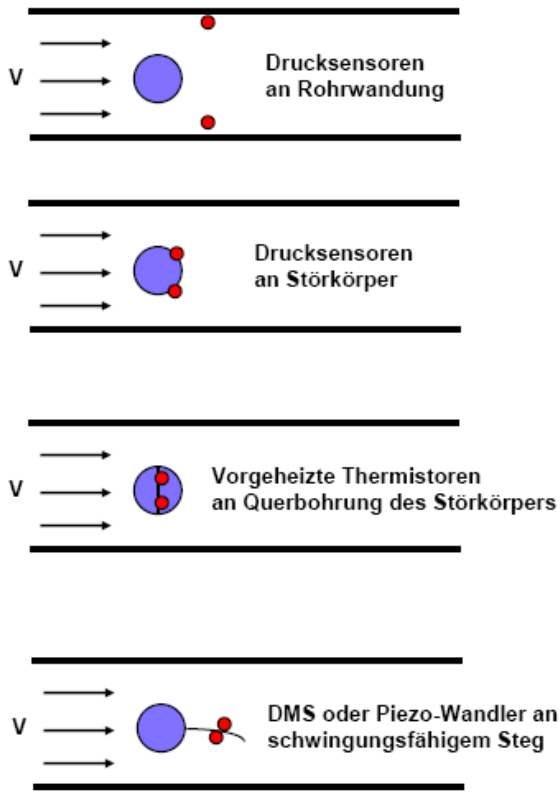
Vorteile der Wirbelfrequenz – Durchflussmesser sind:

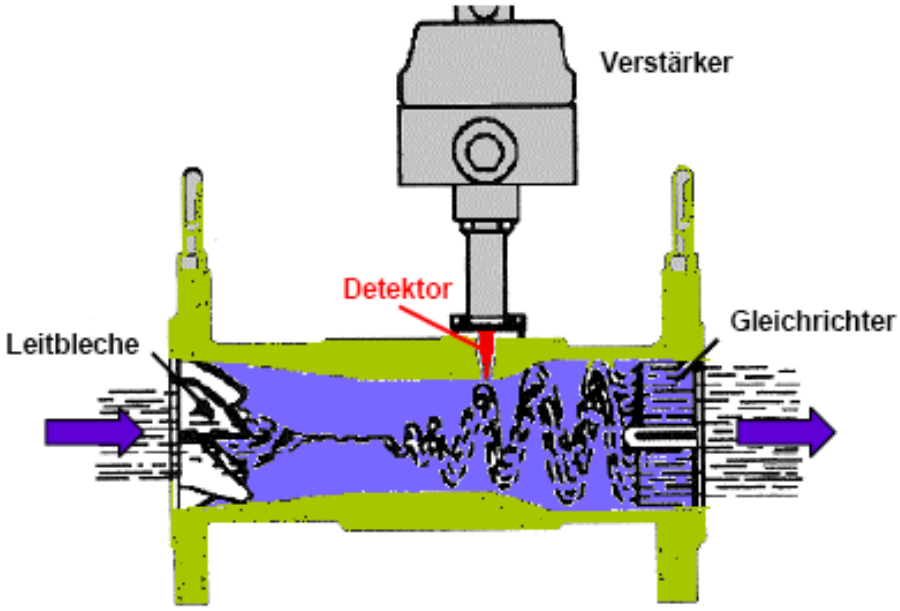
- Keine mechanisch bewegten Teile im Messgerät, dadurch robust
- Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung
- Linearer Zusammenhang zwischen f und v
- Gleicher Kalibrierfaktor für alle Medien
- Beliebige Einbaulage
- Großer Dynamikbereich

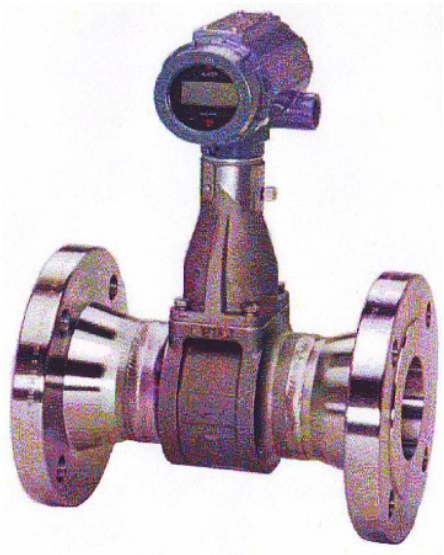
Als Nachteile sind zu nennen:

- Lange Einbaustrecke
- Druckverluste durch Störkörper
- Beschränkung im Bereich der Reynoldszahl (Viskosität)

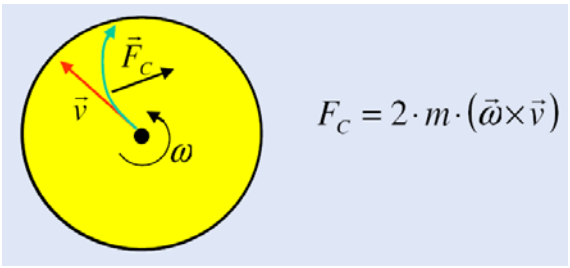
Messanordnungen

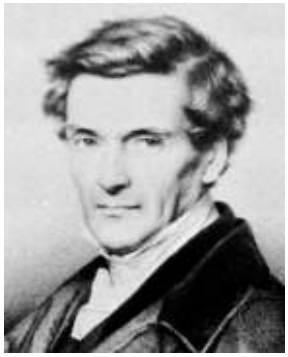


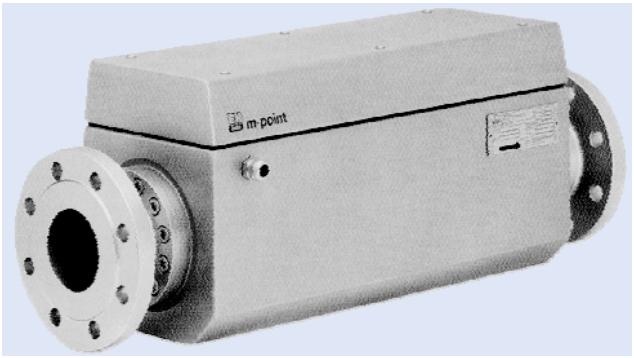


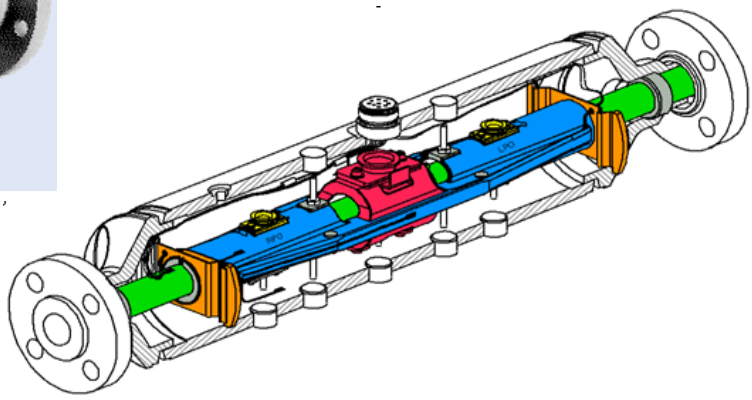


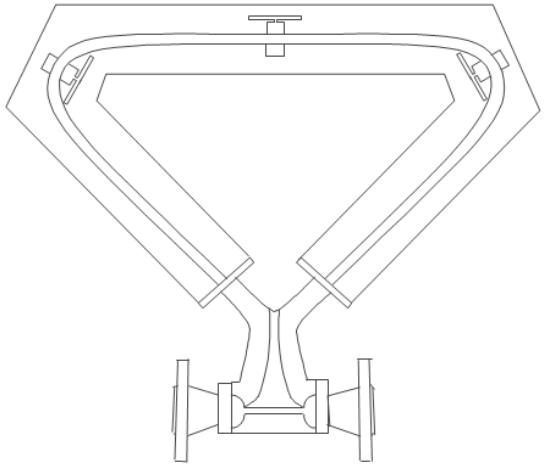
4.3.6 Massedurchflussmesser, Coriolisprinzip

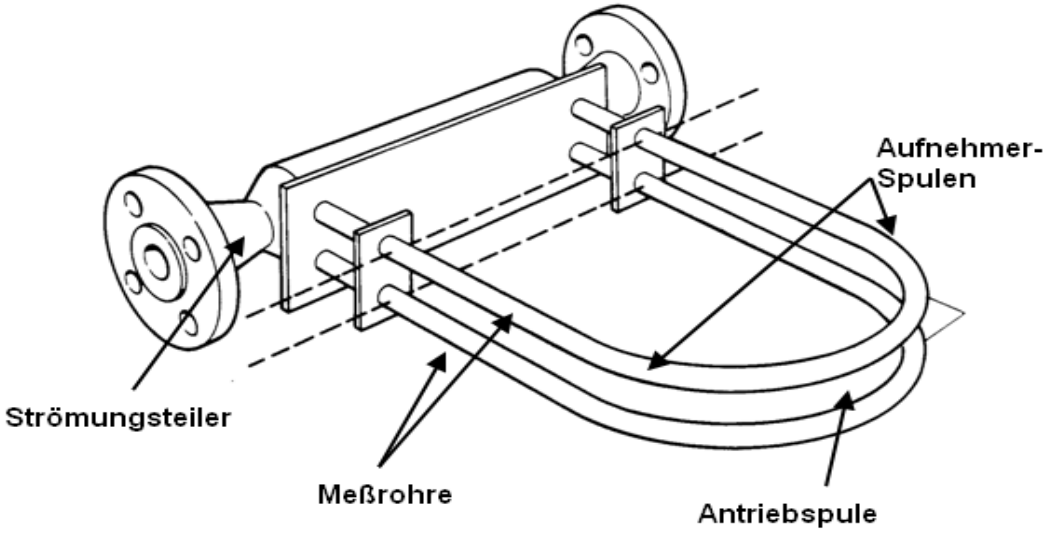




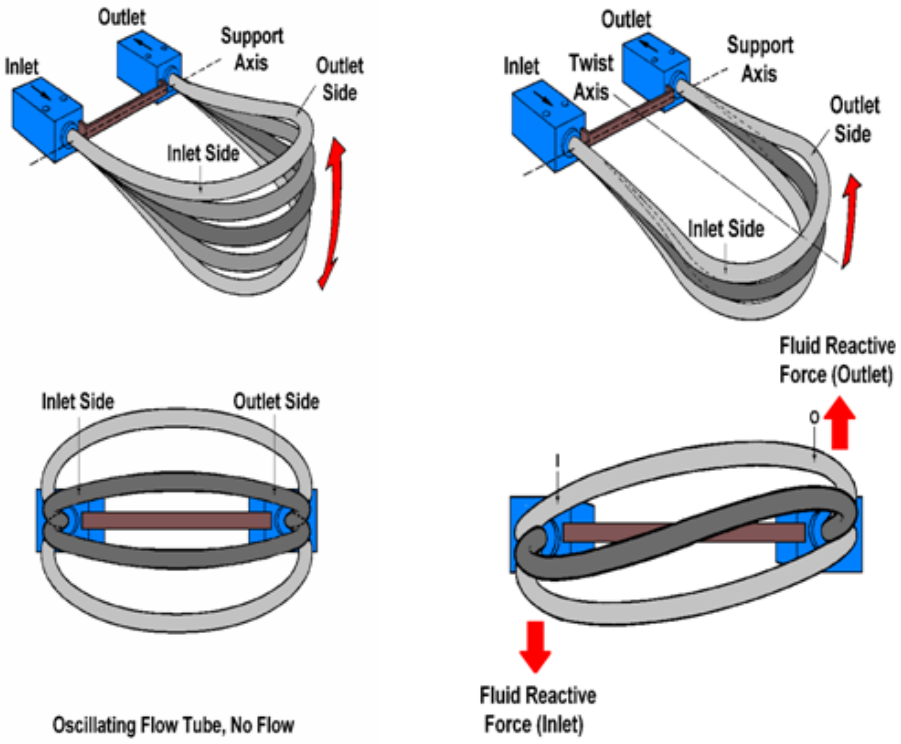






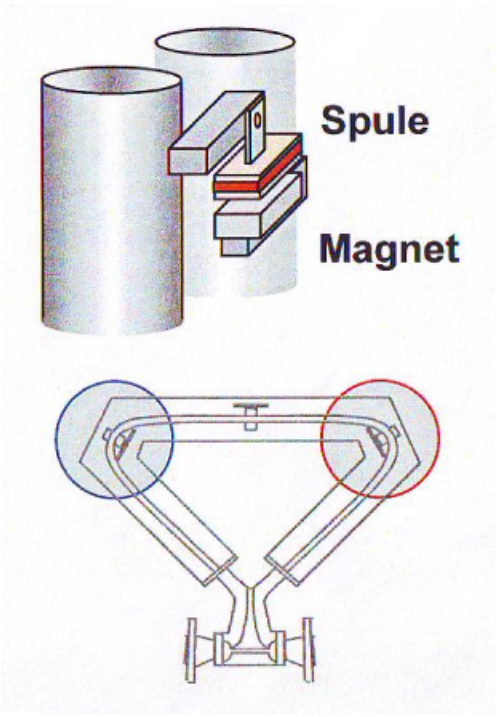


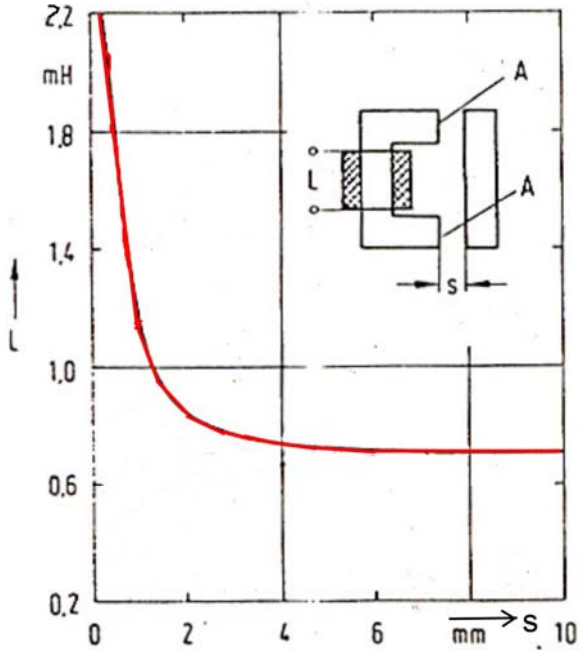
ohne Durchfluß **mit Durchfluß**

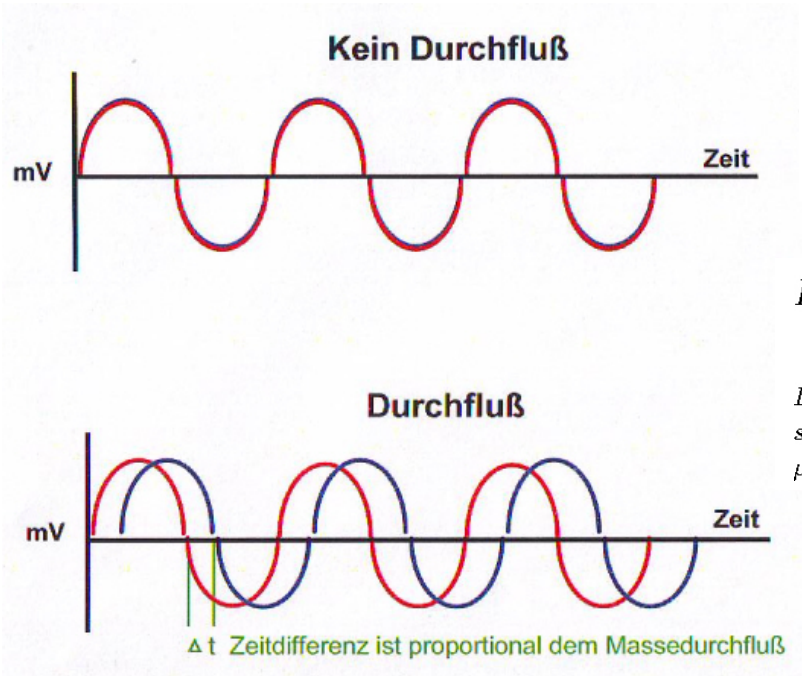


Vereinfachte Darstellung mit einem Meßrohr

Funktionsprinzip







Induktivität:

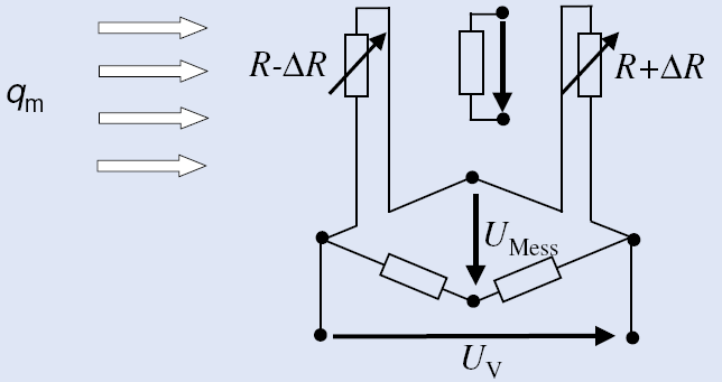
$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{s}$$

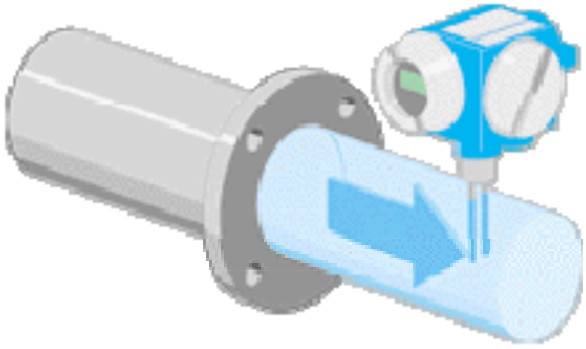
N ... Windungszahl
s ... Weglänge der magnetischen Feldlinien
A ... von den Feldlinien durchsetzte Fläche
μ ... Permeabilität

$$L(s) = \frac{L_0}{1+\mu_r \frac{2s}{s_E}}$$

L_0 ... Induktivität bei $s = 0$
s_E ... mittlere Feldlinienlänge im Eisen
μ_r ... Permeabilität des Eisens

4.3.7 Thermische Durchflussmesser





Das thermische Messprinzip beruht auf der Abkühlung eines beheizten Temperatursensors, dem durch das vorbeiströmende Medium Wärme entzogen wird. Im Messgerät strömt das Medium dazu an zwei PT100 - Temperatursensoren vorbei.
Der eine Sensor misst die aktuelle Prozesstemperatur als Referenz. Der zweite Sensor dient als Heizelement und wird - entsprechend der Abkühlung - auf eine exakt definierte Temperaturdifferenz aufgeheizt.
Je größer der Massefluss ist, der über den aufgeheizten Temperatursensor strömt, desto größer ist dessen Abkühlung und desto größer ist der erforderliche Heizstrom zur Aufrechterhaltung der Temperaturdifferenz.
Der gemessene Heizstrom ist somit ein Maß für den Gas-Massefluss.

Nennbereiche:	0 ... 10.000 kg/h
Nenndurchmesser:	beliebig (Sonden)
Vorteile:	Preisgünstig (KFZ-Sensor)
	direkt in Elektronik integrierbar
Nachteile:	hauptsächlich für Gase
	Empfindlich gegen Verschmutzung

4.4 Volumetrische Durchfluss-/ Mengenmessungen

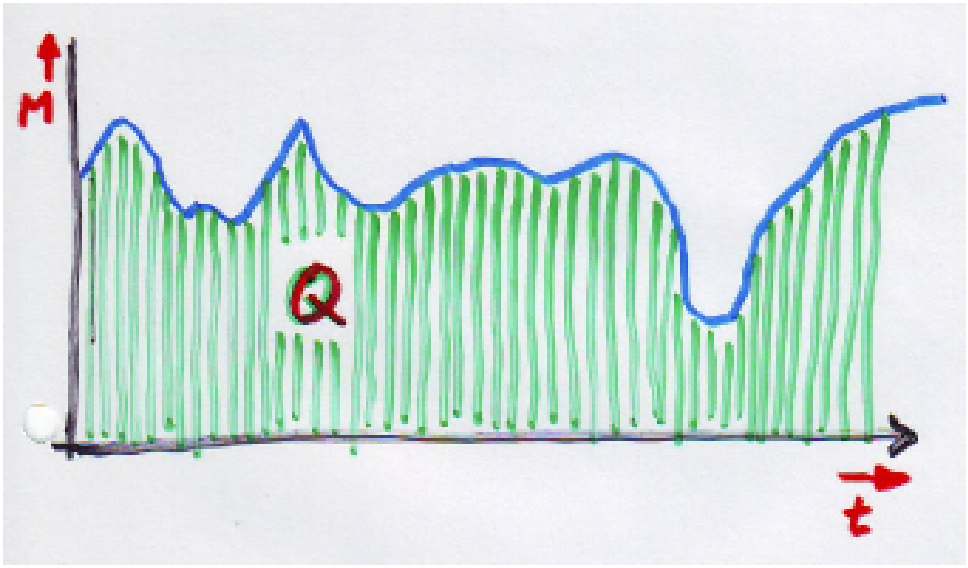
Auf den folgenden Seiten werden Flüssigkeitszähler mit beweglichen Trennwänden bzw. beweglichen Messkammern beschrieben. Das Gemeinsame dieser Zähler ist, dass bei jedem Hub oder jeder Drehung ein bestimmtes Volumen abgeteilt wird.

Auch wenn der Massemesser nach dem Coriolisprinzip einige dieser betriebsbewährten Messverfahren verdrängt hat, so gibt es immer noch genügend Applikationen in denen diese Messgeräte zum Einsatz kommen.

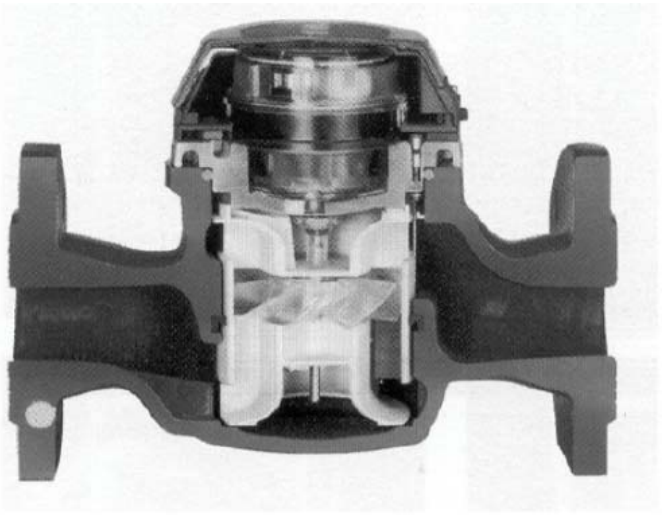
$$M = \int_0^T Q \cdot dt$$

M = Menge
Q = Durchfluss

Planimetrieren = Flächeninhaltsberechnung in der Ebene

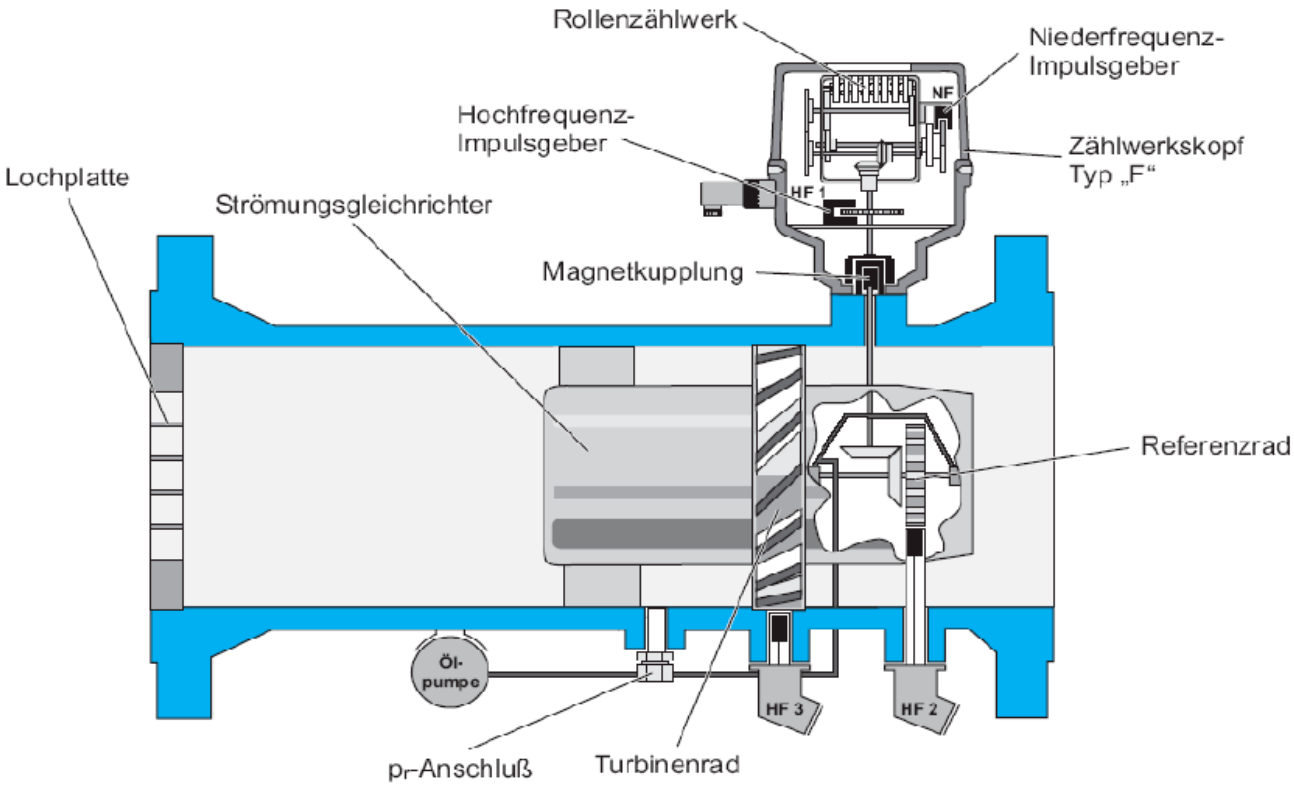


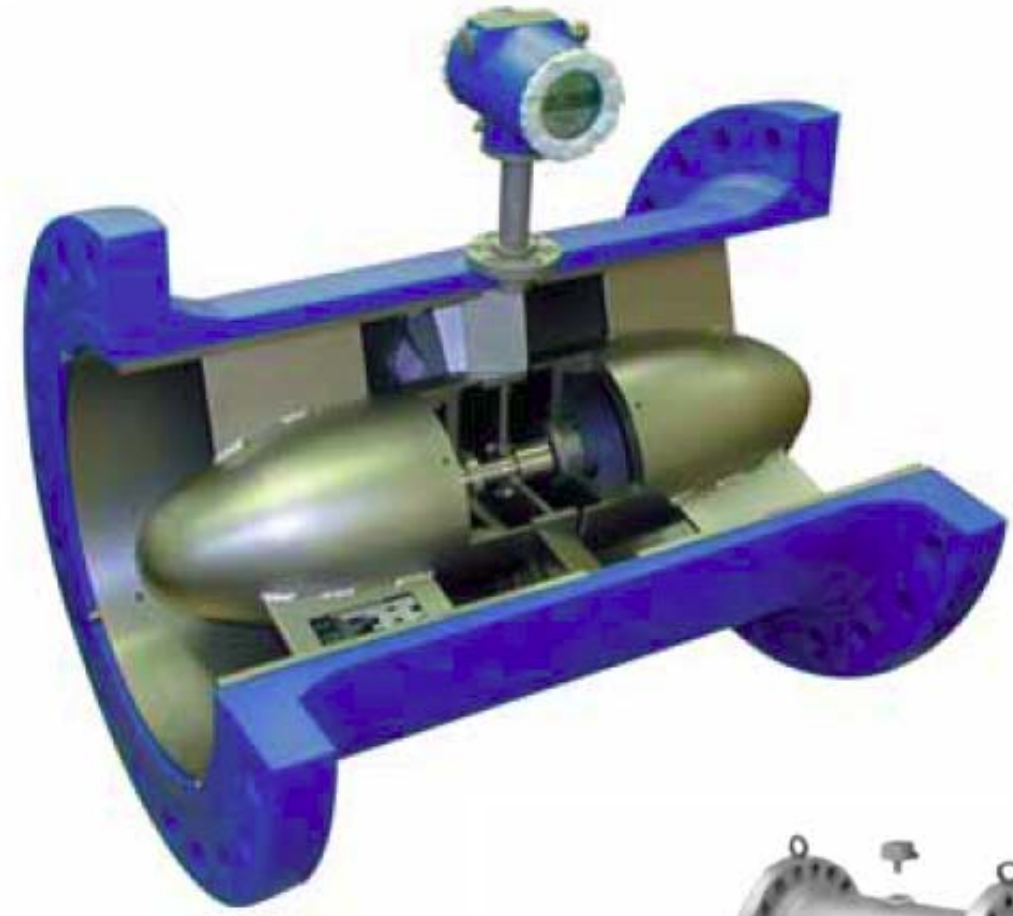
4.4.1 Turbinenrad-Zähler



Woltmannzähler-Senkrechtläufer

Woltmannzähler-Parallelläufer

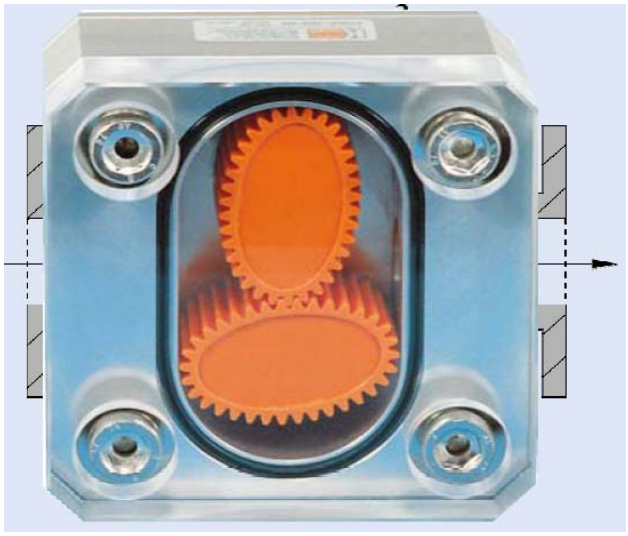




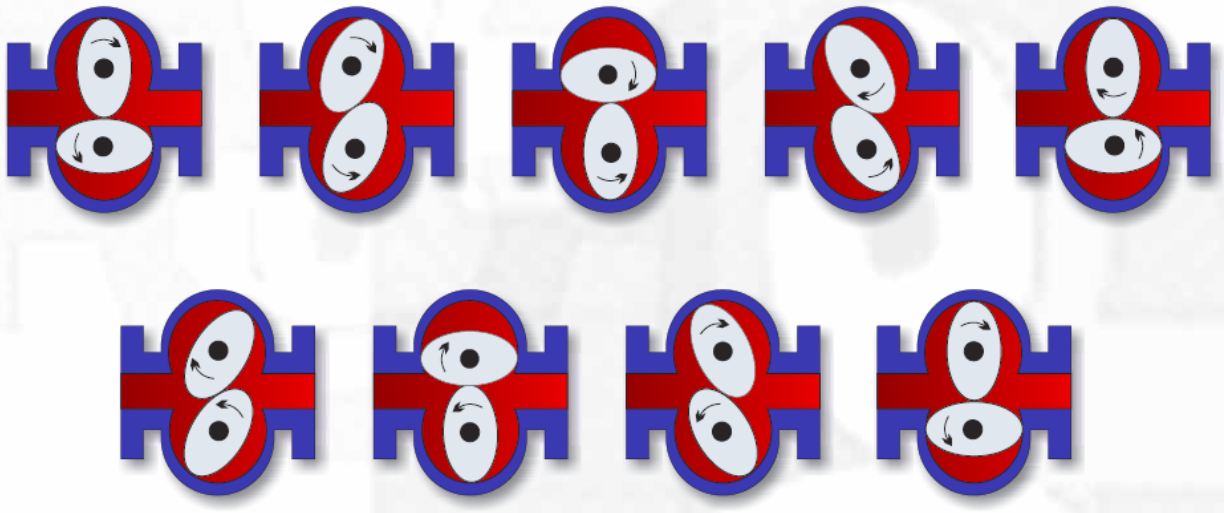
4.4.2 Flügelradzähler

4.4.3 Ovalradzähler

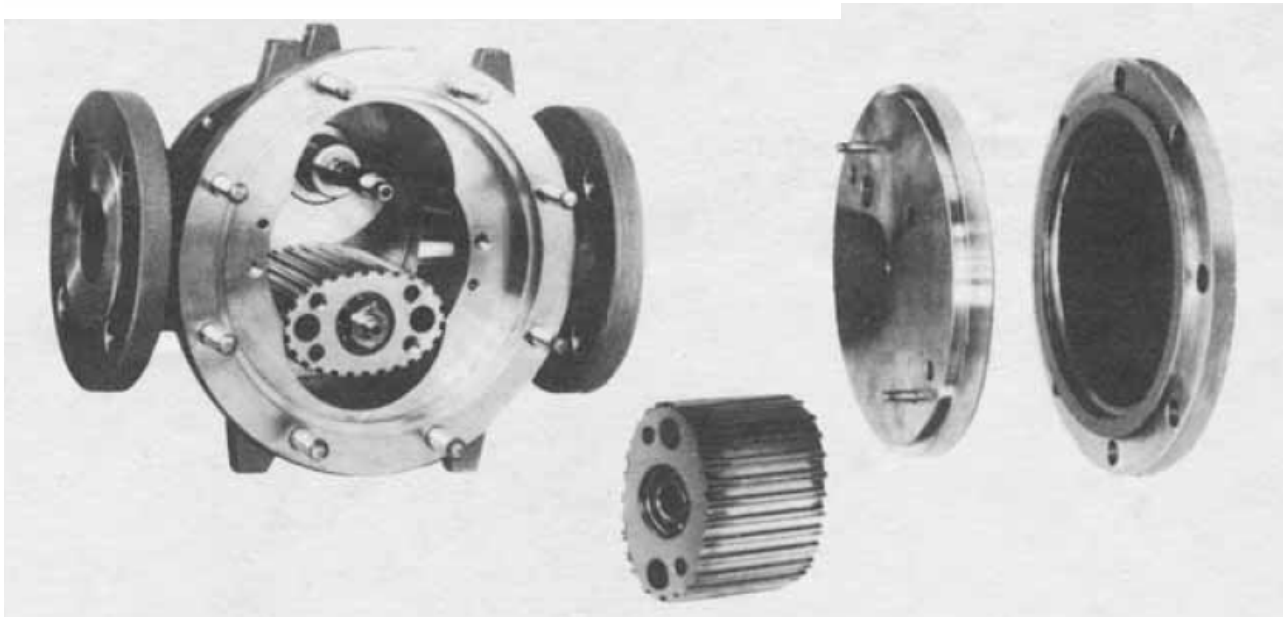
$$q_V = n \cdot V$$



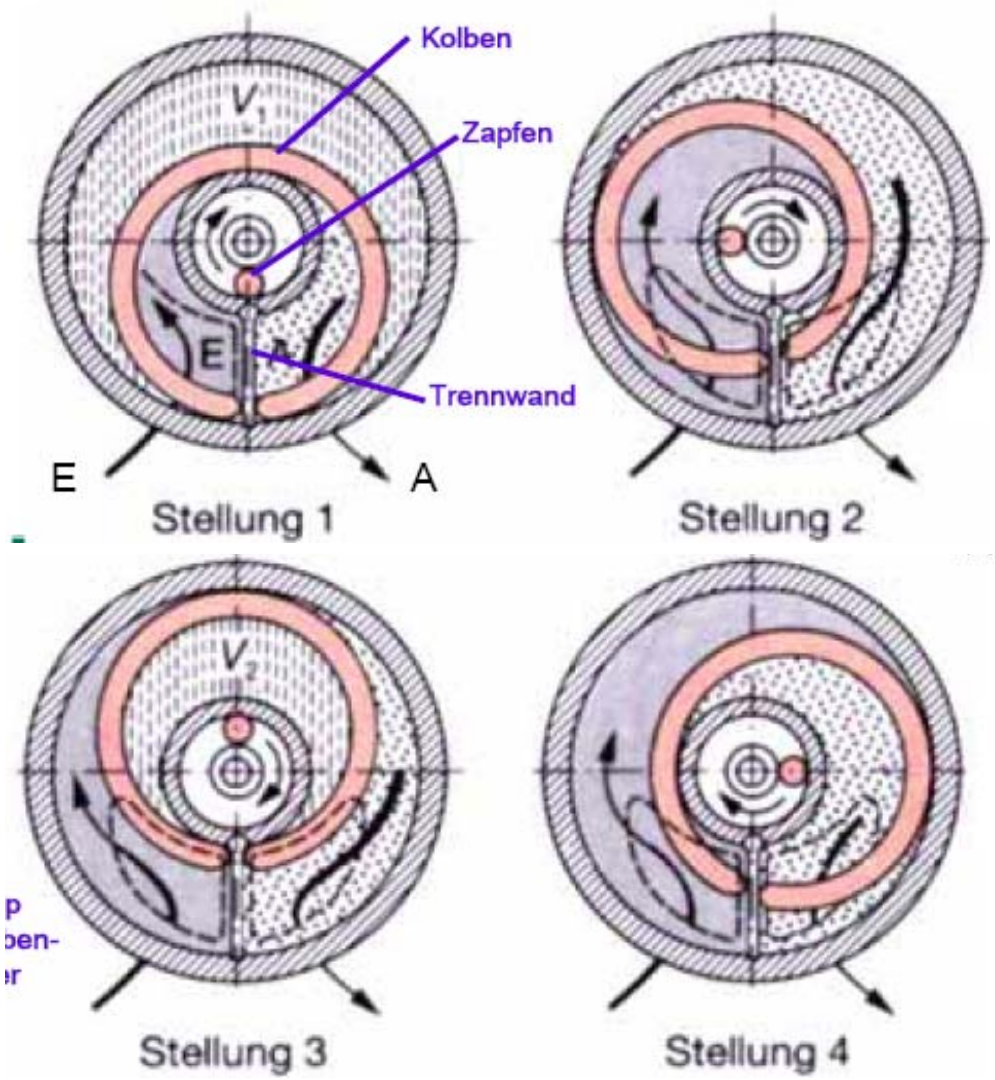
Ovalradzähler sind unmittelbare Volumenzähler. Ihr Messelement besteht aus zwei verzahnten Präzisions - Ovalrädern, die vom Flüssigkeitsdruck angetrieben, aufeinander abrollen. Dadurch wird bei jeder Umdrehung des Ovalrad-Paares eine definierte Menge Flüssigkeit durch den Zähler transportiert.



Die Anzahl der Umdrehungen ist ein genaues Maß für die durchgeflossene Menge.



4.4.4 Ringkolbenzähler



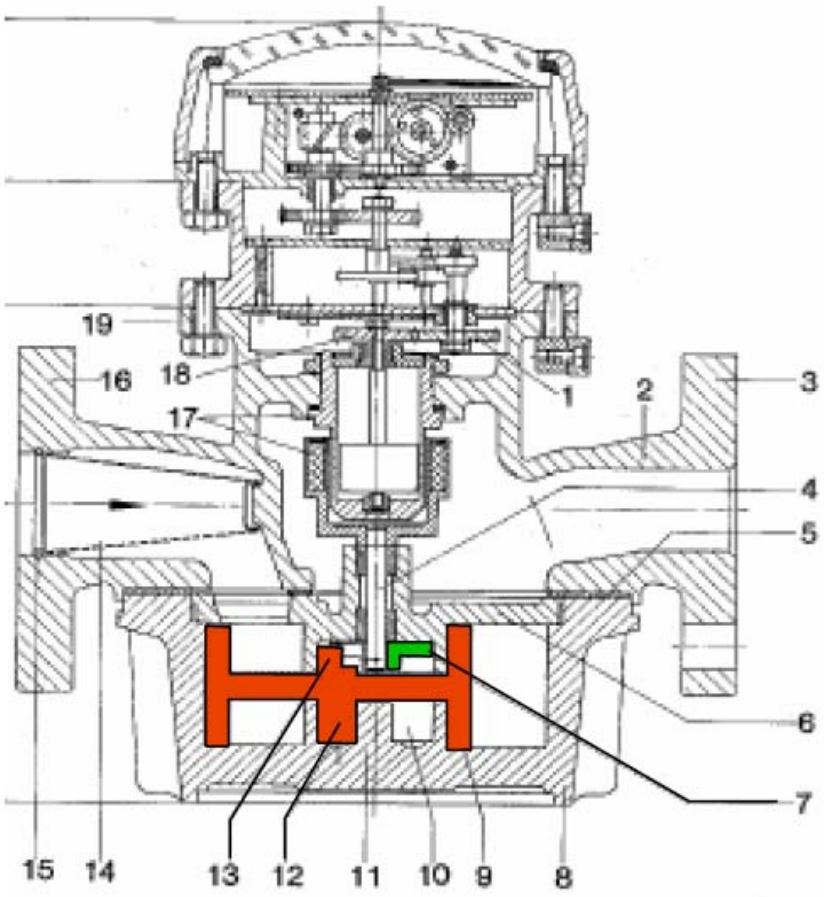
Funktion in einzelnen Phasen:

Stellung 1: Der linke Teil des inneren Volumens V_2 wird durch E gefüllt, der rechte durch A geleert. Strömungskurzschluss vom Eingang zum Ausgang wird dadurch verhindert, dass der Ringkolben am inneren Kreis des Gehäuses anliegt. Das äußere Volumen V_1 ist in dieser Stellung vollständig abgeschlossen.

Stellung 2: Das innere Volumen V_2 ist fast vollständig vom Austrittsspalt getrennt, während der Inhalt des großen Volumens V_1 ausgetragen wird.

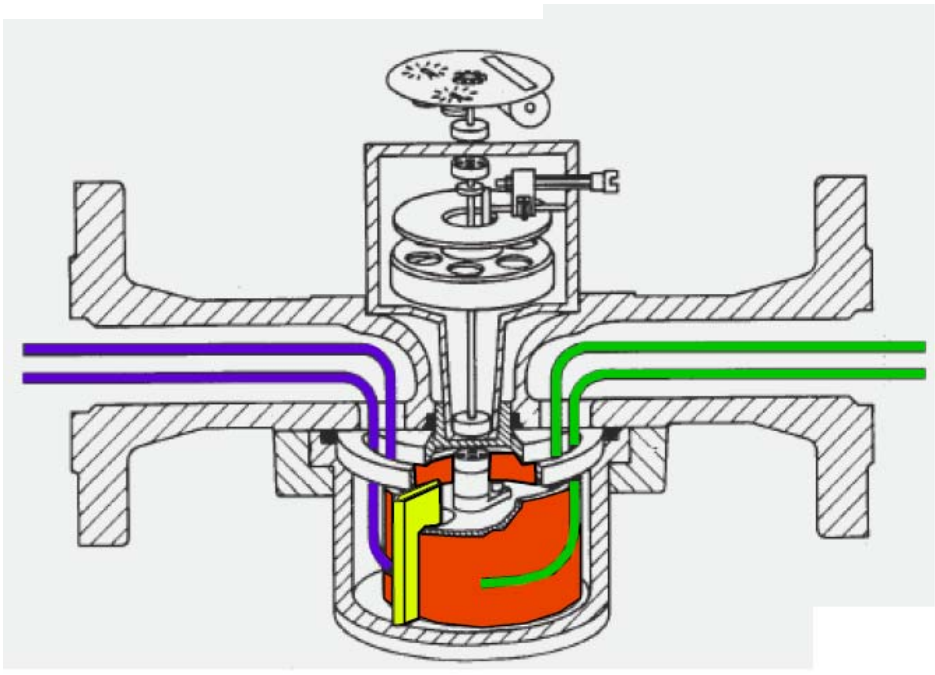
Stellung 3: Das innere Volumen V_2 ist maximal gefüllt und gegen Ein- und Austrittsspalt abgegrenzt. Der linke Teil von V_1 wird gefüllt, der rechte entleert.

Stellung 4: Während sich das äußere Volumen V1 vollends füllt, wird das innere Volumen V2 entleert.

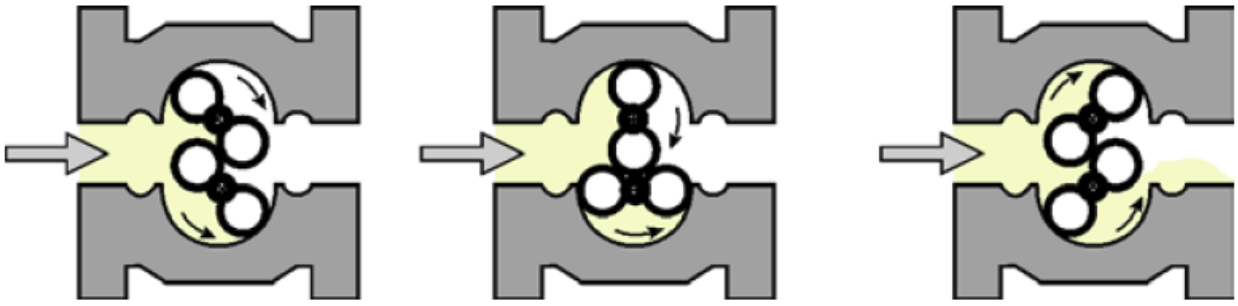


1 Wechselrad am Umsetzungswerk
2 Gehäuseoberteil
3 Flansch
4 Messwerkswelle
5 Gehäusedichtung
6 Messkammerdeckel
7 Mitnehmer
8 Gehäuseunterteil
9 Ringkolben

10 Führungsnut
11 Messkammerzapfen
12 Langer Kolbenzapfen
13 Kurzer Kolbenzapfen
14 Sieb
15 Sprengring
16 Flansch
17 Magnetkupplung
18 Wechselrad am Messwerk
19 Befestigungsflansch



4.4.5 Drehkolbenzähler

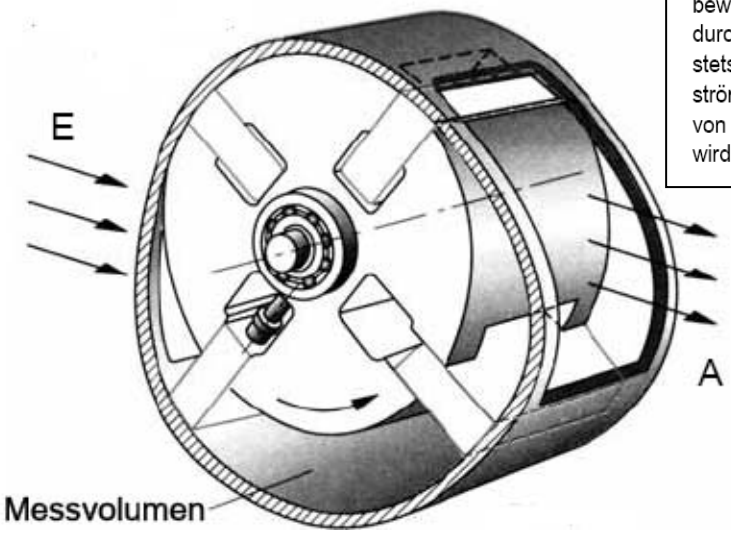


Die Messeinheit besteht aus zwei "8"-förmigen Kolben, welche zusammen mit dem Gehäuse 4 Messkammern pro Umdrehung bilden, die periodisch gefüllt und entleert werden.
Die Anzahl der Umdrehungen ist proportional zu dem gemessenem Volumen. Die Drehungen werden über ein Getriebe auf ein mechanisches Zählwerk übertragen, welches dann das Volumen registriert.

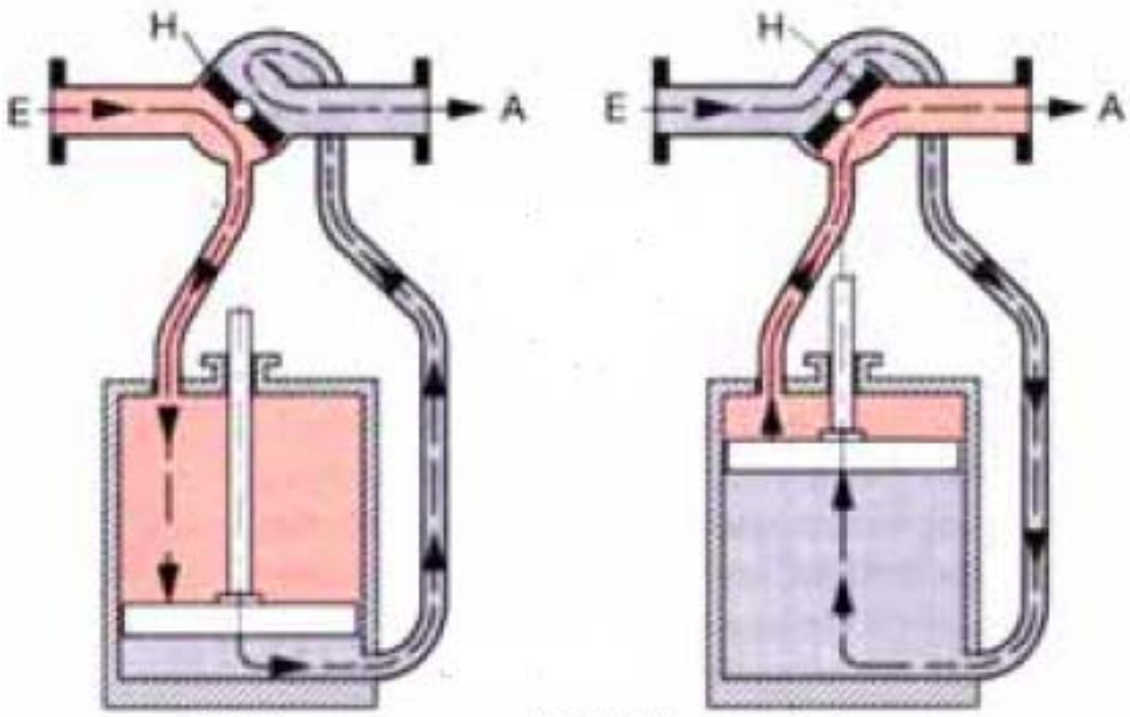
4.4.6 Treibschieber-Zähler

Ein drehbarer Rotor mit 2 Scheibenpaaren wird durch das Medium bewegt. Die hydrodynamisch gleitende Scheiben bilden 4 Messkammern, die pro Umdrehung reproduzierbares Volumen ergeben. Die Umdrehung werden durchführungsfrei über eine Magnetkupplung an ein Zählwerk oder einen Impulsgeber übertragen. Aufgrund dieser patentierten Konstruktion ermöglicht dieses Messprinzip hochgenaue viskositätsunabhängi Durchflussmessungen.

Besonders für größere Flüssigkeitsströme in der Mineralöl-industrie wird der Dreh- oder Treibschieberzähler angewandt. Er besteht er aus einem exzentrischen Rotor mit vier darin beweglichen Schiebern, von denen je zwei gegenüberliegende durch Federn miteinander gekoppelt sind. Sie werden dadurch stets an die Gehäusewand gedrückt und trennen somit das strömende Fluid in diskrete Volumina. Treibt man den Rotor von außen an, so kann man das Fluid fördern. Arbeitsprinzip wird in der Vakuumtechnik bei Drehschieberpumpen genutzt.



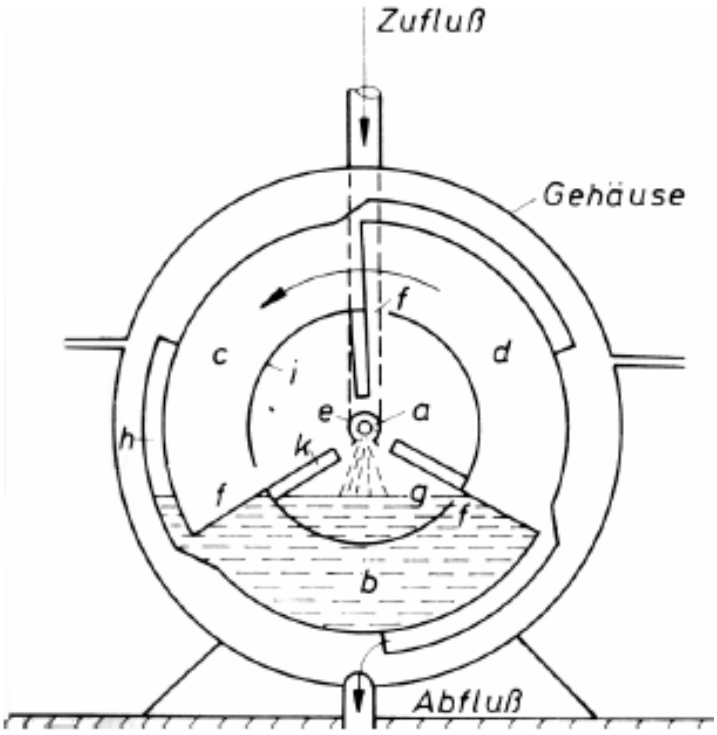
4.4.7 Hubkolben-Zähler

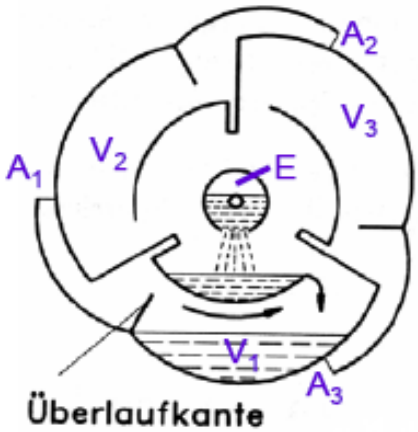


H Umsteuerventil, E Eintritt, A Austritt

Hubkolbenzähler mit Umsteuerventilen finden vor allem in der Mineralölindustrie Verwendung (Mengenmessung). Sie lassen sich gleichzeitig auch zum Fördern der Flüssigkeiten nutzen. Arbeitsprinzip: Synchron zur Bewegung des Kolbens wird ein Umschaltventil gesteuert, so dass sich die beiden Kammern abwechselnd füllen und leeren. Die Anzahl der Hübe ist ein Maß für das Volumen.

4.4.8 Trommel-Zähler





E Eintritt Flüssigkeit
A_1, A_2, A_3 Austritt Flüssigkeit
V_1, V_2, V_3 Messvolumina

- größte Bedeutung unter Auslaufzählern
- gestattet auch Messung stark verschmutzter Flüssigkeiten
- geringe Druckverluste
- Medium sollte nicht zu große Viskosität besitzen, damit Messgut schnell genug entleert werden kann
- Genauigkeiten bis zu 0,1% erzielbar (Fehlerkurve hängt u.a. von Oberflächen-spannung der Flüssigkeit ab)

SITRANS F R Trommelzähler

Ein hochgenaues Gerät für das Messen von Alkohol-Wasser-Gemischen und für das Bestimmen des Alkoholgehalts – das einzige Gerät mit einer Zulassung der Bundesmonopolverwaltung.

4.5 Zusammenfassung der Vor- und Nachteile

4.5.1 Ovalradzähler, Ringkolbenzähler

Vorteile:

- gute Genauigkeit
- einsetzbar für Flüssigkeiten mit großer Viskosität
- arbeitet in beiden Fließrichtungen (Vor- und Rücklauf)
- kein Strömungsprofileinfluss, daher keine Beruhigungsstrecke
- keine Hilfsenergie
- eichamtlich zugelassen

Einschränkungen:

- Volumenzähler
- nur für Flüssigkeiten
- großer Druckverlust
- bewegliche Teile, Verschleiß
- bei kleiner Viskosität Fehlervergrößerung durch Spaltverluste
- empfindlich gegen Verschmutzung, Filter erforderlich
- Durchflussblockade bei Stillstand durch Verschmutzung
- empfindlich gegen Überlastung
- Überwachung und Wartung

4.5.2 Drehkolbenzähler

Vorteile:

- hervorragende Genauigkeit für die Gasmessung
- keine Beruhigungsstrecken
- keine Hilfsenergie
- eichamtlich zugelassen

Einschränkungen:

- Volumenzähler
- ausschließlich für Gase
- bewegliche Teile, Verschleiß
- Durchflussblockade bei Stillstand durch Verunreinigung
- träge gegenüber schnellen Änderungen
- aber auch empfindlich gegenüber schnellen Änderungen bei großem Differenzdruck, Gefahr des Überdrehens
- Überwachung

4.5.3 Turbinenzähler

Vorteile:

- keine Hilfsenergie bei Flügelrad und Woltman
- eichamtliche Zulassung für Wasser bei Flügelrad und Woltman
- Turbinenrad verwendbar für cryogene Flüssigkeit
- Turbinenrad einsetzbar bei extremen Temperaturen und Drücken
- eichamtliche Gas-Zulassung für Turbinenrad

Einschränkungen:

- begrenzte Werkstoffauswahl
- nur für niedrige Viskositäten
- bewegliche Teile, Verschleiß
- empfindlich gegen Verschmutzung
- axial in Strömungsrichtung liegende Zähler sind Strömungsprofil-abhängig
- Beruhigungsstrecke (nicht bei Flügelrad)
- empfindlich gegen Überlast und schnelle Änderung bei großem Differenzdruck, Gefahr des Überdrehens
- empfindlich gegen Vibration

4.5.4 Wirbeldurchflussmesser

Vorteile:

- keine beweglichen Teile
- robuster Aufbau
- einsetzbar bei Flüssigkeit, Gas, Dampf
- leicht sterilisierbar
- unabhängig von Druck-, Temperatur-, Dichteänderung
- lineares Verhältnis zwischen Durchfluss und Messwert

Einschränkungen:

- Beruhigungsstrecken
- Mindest-Reynoldszahl erforderlich

4.5.5 Drall-Durchflussmesser

Vorteile:

- keine beweglichen Teile
- keine Beruhigungsstrecken
- einsetzbar bei Flüssigkeit, Gas, Dampf
- hervorragende Reproduzierbarkeit
- unabhängig von Druck-, Temperatur-, Dichteänderung

Einschränkungen:

- Druckverlust
- Mindest-Reynoldszahl erforderlich

4.5.6 Wirkdruck-Messverfahren

Vorteile:

- universell verwendbar für Flüssigkeit, Gas, Dampf
- auch in Extremfällen, z. B. Viskosität, einsetzbar wegen unterschiedlicher Varianten
- Berechnungsmöglichkeiten für außergewöhnliche Fälle
- einsetzbar bei extremen Temperaturen und Drücken
- Bereichsänderung möglich
- niedriger Druckverlust in Düsen

Einschränkungen:

- quadratischer Zusammenhang zwischen Durchfluss und
- Messgröße Wirkdruck, daher kleine Spanne
- Einfluss von Druck- und Dichteänderung
- Druckverlust bei Blende
- Kantenschärfe der Blende muss sichergestellt sein, daher keine Feststoffe oder Verschmutzung
- sehr lange Beruhigungsstrecken
- aufwendige Installation durch Wirkdruckleitung, Armaturen
- und Messwertwandler
- Montage- und Wartungserfahrung zweckmäßig
- wartungsintensiv

4.5.7 Schwebekörper-Durchflussmesser

Vorteile:

- preiswert
- keine Hilfsenergie bei örtlicher Anzeige
- einsetzbar bei Flüssigkeit, Gas, Dampf
- keine Beruhigungsstrecke
- einfacher Geräteaufbau, daher montage- und wartungsfreundlich
- Anzeige auch bei undurchsichtigen Flüssigkeiten
- Metallkonusgerät mit Messumformer
- Metallkonusgerät sterilisierbar, CIP-geprüft

Einschränkungen:

- senkrechte Einbaulage
- konstanter Druckverlust
- Einfluss von Dichte-, Temperatur-, Viskositätsänderungen
- Feststoffe beschädigen Messkante, ansonsten leichte Verschmutzung zulässig
- empfindlich gegen Pulsation und Vibration
- teuer bei Verwendung exotischer Werkstoff

4.5.8 Magnetisch-induktive-Durchflussmesser

Vorteile:

- freier Rohrquerschnitt ohne hereinragende Teile
- keine beweglichen Teile
- kein zusätzlicher Druckverlust
- weitgehend strömungsunabhängig, deshalb geringe Beruhigungsstrecke
- kein Einfluss der Änderung von Temperatur, Dichte, Viskosität, Konzentration, elektr. Leitfähigkeit

- günstige Werkstoffwahl bei chemisch aggressiven und bei abrasiven Messstoffen
- unempfindlich gegen Verschmutzung, Sedimentation
- besonders geeignet für hydraulischen Feststofftransport
- sterilisierbar, CIP-geprüft
- linearer Zusammenhang zwischen Durchfluss und Messgröße
- arbeitet in beiden Fließrichtungen (Vor-, Rücklauf)
- Messbereich optimierend einstellbar
- wartungsarm, aber trotzdem wartungsfreundlich
- eichamtlich zugelassen

Einschränkungen:

- nur bei Flüssigkeiten
- untere Leitfähigkeitsgrenze 0,05 ..[S/cm
- Gasanteile verursachen Fehler

4.5.9 Ultraschall-Durchflussmesser

Vorteile:

- freier Rohrquerschnitt
- keine beweglichen Teile
- kein zusätzlicher Druckverlust
- günstige Werkstoffauswahl bei chemisch aggressiven Flüssigkeiten
- linearer Zusammenhang zwischen Durchfluss und Messgröße
- wartungsarm
- arbeitet in beiden Fließrichtungen (Vor-, Rücklauf)
- beim Laufzeitverfahren kein Einfluss von Temperatur, Dichte, Konzentration
- nachträglicher Einbau ins Rohr mit Einzelelementen möglich, aber örtliche Kalibrierung

Einschränkungen:

- für Flüssigkeiten, Gasmessung noch anfällig
- Schallstrahl muss querschnittsrepräsentativ messen, deshalb sehr strömungsprofilabhängig. Lange Beruhigungsstrecke
- Fehler bei Ablagerungen
- Laufzeitverfahren nur bei sauberen Flüssigkeiten
- Dopplerverfahren nur bei leichter Verschmutzung oder
- mit wenig Gasblasen
- beim Dopplerverfahren Einfluss von Schallgeschwindigkeitsänderungen durch Temperatur, Dichte, Konzentration
- ungeeignet für stark verschmutzte Flüssigkeiten
- Fehler durch Gasblasen

4.5.10 Masse-Durchflussmesser nach dem Coriolis-Prinzip

Vorteile:

- echte Massemessung
- zusätzliche Temperatur- und Dichtemessung
- sehr gute Genauigkeit für Masse-Durchfluss
- hochgenaue Dichtemessung
- unabhängig von Druck, Temperatur, Viskosität
- keine Beruhigungsstrecken
- arbeitet in beide Fließrichtungen (Vor-, Rücklauf)
- sterilisierbar, CIP-geprüft, **EHEDG** zertifiziert
- Messbereiche für Durchfluss und Dichte optimierend einstellbar
- selbstentleerend

Einschränkungen:

- nur für Flüssigkeiten
- Gasanteile stören
- vibrationsempfindlich bei unsachgemäßer Befestigung
- Werkstoffauswahl begrenzt
- Nennweitenbegrenzung nach oben

4.5.11 Masse-Durchflussmesser, thermisch

Vorteile:
direkte Massemessung für Gase

- keine Druck- und Temperaturkompensation
- sehr geringer Druckverlust
- hohe Messgenauigkeit
- große Messspanne
- keine beweglichen Teile
- robuster Aufbau
- schnelle Ansprechzeit
- leicht sterilisierbar

Einschränkungen:

- nur für Gase
- Beruhigungsstrecken