

# Assignment AUT21-AS-001

## Piezo-Sensoren

Thema „Anwendung von Piezo-Sensoren in der Prozessmesstechnik“

Name, Vorname:	Lück, Lukas	Studiengang:	Mechatronik-Bachelor of Engineering (B. Eng.)
Immatrikulationsnr.:	██████	Modul:	██████
Adresse:	████████████████████ ██████████	Abgabe am:	██████████
E-Mail:	████████████████████	Dozent:	████████████████



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	1
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	1
1.3 Aufbau der Arbeit . . . . .	1
<b>2 Physikalische Grundlagen</b>	<b>2</b>
2.1 Der piezoelektrische Effekt . . . . .	2
2.2 Grundlagen der Strömungsmechanik . . . . .	3
<b>3 Wirbelfrequenzzähler</b>	<b>5</b>
3.1 Aufbau und Funktionsweise eines Wirbelfrequenzzählers . . . . .	5
3.2 KROHNE OPTISWIRL 4200 . . . . .	6
3.3 Endress+Hauser Prowirl 200 . . . . .	7
3.4 Gegenüberstellung der beiden Messgeräte . . . . .	7
<b>4 Schlussbetrachtung</b>	<b>9</b>
4.1 Zusammenfassung . . . . .	9
4.2 Kritische Reflexion . . . . .	9
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>V</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Darstellung des Piezoeffekts . . . . .	2
2	Kármán'sche Wirbelstraße . . . . .	4
3	Strouhal-Zahl in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl . . . . .	4
4	Aufbau eines Wirbeldurchflussmessers . . . . .	5

## Tabellenverzeichnis

1	Gegenüberstellung von zwei Wirbelfrequenzzählern . . . . .	8
---	--	---

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

In der Prozessautomatisierung spielt die Durchflussmessung, vor allem in Rohrleitungen, eine wichtige Rolle. Hierfür gibt es verschiedene Messprinzipien. In vielen Industriezweigen hat sich der Vortex-Durchflussmesser als Standard etabliert, welcher das Wirbelfrequenzverfahren nutzt. Verschiedene Hersteller bieten diese Messinstrumente an, jedoch gibt es teilweise Unterschiede in der technischen Umsetzung.<sup>1</sup>

## 1.2 Ziel der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung der Anwendung von Piezo-Sensoren in der Prozessmesstechnik anhand von Wirbelfrequenzzählern. Dem Leser wird ein Einblick in die physikalischen und strömungsmechanischen Grundlagen des Messverfahrens gegeben. Die grundlegende Funktion und das Messprinzip eines Wirbelfrequenzzählers soll ebenso dargestellt werden.

## 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit den physikalischen Grundlagen. Dabei wird besonders auf den piezoelektrischen Effekt eingegangen. Zusätzlich werden Grundlagen der Strömungsmechanik behandelt. Anschließend kann der Aufbau und das verwendete Messprinzip eines Wirbelfrequenzzählers erläutert werden.

Im nächsten Schritt sollen Wirbelfrequenzzähler von zwei verschiedenen Herstellern, die nach dem Vortex-Prinzip arbeiten, vorgestellt werden. Im Anschluss können technische Parameter der beiden Messgeräte gegenübergestellt und verglichen werden. Zum Schluss erfolgt die Zusammenfassung sowie die kritische Auseinandersetzung mit dem erarbeiteten Inhalt.

---

<sup>1</sup>vgl. Czichos, 2019, S. 70; vgl. Horlacher; Helbig, 2016, S. 519

## 2 Physikalische Grundlagen

### 2.1 Der piezoelektrische Effekt

Das Wort „*piezo*“ stammt vom griechischen Wort „*piézein* = *drücken*“ ab. Erstmals wurde der piezoelektrische Effekt 1880 durch die Brüder Pierre und Jacques Curie entdeckt.<sup>2</sup>

Wird ein Kristallgitter durch äußeren Druck verformt, entsteht an den Oberflächen eine elektrische Ladung  $Q$ . Dies führt zu einer messbaren Spannung. Die erzeugte Ladung  $Q$  ist direkt proportional zum Druck  $p$ , der einwirkenden Fläche  $A$  sowie dem stoffabhängigen Piezomodul  $k$ :

$$Q = k \cdot A \cdot p \quad (1)$$

In Abbildung 1 ist der Piezoeffekt am Kristallgitter von  $\text{SiO}_2$  dargestellt. Abhängig von der Druckachse zur polaren Achse des Kristalls unterscheidet man zwischen dem longitudinalen (1b) oder dem transversalen Effekt (1c). Vorallem letzterer findet in der Praxis Anwendung. Piezoelektrische Sensoren weisen aufgrund ihrer geringen Temperaturabhängigkeit hohe Messgenauigkeiten auf. Hauptsächlich werden diese Sensoren in dynamischen Messungen mit hohen Messfrequenzen eingesetzt.<sup>3</sup>

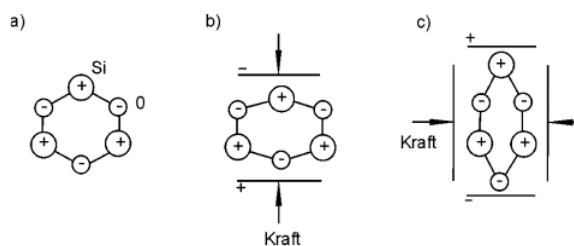


Abbildung 1: Piezoeffekt am Kristallgitter von  $\text{SiO}_2$  <sup>4</sup>

Die Umkehrung des piezoelektrischen Effekts, auch *Elektrostriktion* genannt, ist ebenso möglich. Hier wird eine elektrische Feldstärke  $E$  an einen geeigneten Kristall angelegt. Dies führt zu einer Längenänderung  $\epsilon$ .<sup>5</sup> Die bekannteste Anwendung dieses Effekts

<sup>2</sup>vgl. o.V., 2022c; vgl. o.V., 2022d

<sup>3</sup>vgl. Hesse; Schnell, 2018, S. 260 ff.; vgl. Eichler, 2011, S. 273 f.

<sup>4</sup>Eichler, 2011

<sup>5</sup>vgl. ebd., S. 274

ist der Injektor zum Einspritzen von Dieselmotorkraftstoffen. Hierbei sind mehrere Piezoelemente in Reihe als sogenannte Stacks geschaltet und bewirken bei Anlegung einer Spannung den Nadelhub der Einspritzdüse. Der piezoelektrische Effekt lässt sich somit als Sensor und Aktor nutzbar machen.

## 2.2 Grundlagen der Strömungsmechanik

In der Strömungsmechanik, vor allem in Rohrleitungen, unterscheidet man zwischen laminaren (geschichteten) und turbulenten (ungeordneten) Strömungen. Bei einer laminaren Strömung fließen die Fluidteilchen in Hauptstromrichtung ohne Querbewegungen. In turbulenten Strömungen werden die Fluidteilchen aufgrund von Reibungskräften zusätzlich quer zur Hauptströmung abgelenkt. Dadurch entstehen Wirbel. Für die Beschreibung der Strömung wurde die dimensionslose Reynolds-Zahl  $Re$  eingeführt. Sie beschreibt das Verhältnis der kinetischen Energie und der Reibungsenergie:

$$Re = \frac{\rho \cdot L \cdot u}{\eta} \quad (2)$$

mit :

$$\rho = \text{Dichte}$$

$$L = \text{Länge des umströmten Körpers}$$

$$u = \text{Strömungsgeschwindigkeit}$$

$$\eta = \text{Zähigkeit des Mediums}$$

In Rohrleitungen liegt für kleine Reynolds-Zahlen von  $Re = 100$  bis  $Re_{krit} = 2320$  eine laminare Strömung vor. Für  $Re > 2320$  treten mit steigender  $Re$  immer stärkere Wirbel auf und die Strömung wird turbulent. Für umströmte Profilkörper variiert die kritische Reynolds-Zahl  $Re_{krit}$ .<sup>6</sup>

Wird ein Körper umströmt, so entstehen an seinen Ablösepunkten Wirbelablösungen. Ab einer Reynolds-Zahl von  $Re \approx 40$  bis  $Re = 2 \cdot 10^5$  treten die Wirbel periodisch auf. Dieses Phänomen wird nach seinem Entdecker Theodor von Kármán (1881-1963) auch als Kármán'sche Wirbelstraße bezeichnet (siehe Abbildung 2, Seite 4).<sup>7</sup>

<sup>6</sup>vgl. Eichler, 2011, S. 63; vgl. A. Böge; W. Böge, 2021, S. 342

<sup>7</sup>vgl. Surek; Stempin, 2017, S. 441 f.

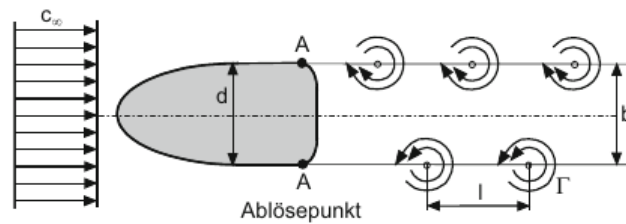


Abbildung 2: Kármán'sche Wirbelstraße an einem umströmten Körper <sup>8</sup>

Eine weitere dimensionslose Zahl ist die Strouhal-Zahl. Sie ist als Verhältnis der lokalen zur konvektiven Beschleunigung definiert:<sup>9</sup>

$$Sr = \frac{f \cdot d}{u} \quad (3)$$

mit :  $f = \text{Ablösefrequenz} \wedge d = \text{Körperdicke} \wedge$   
 $u = \text{Strömungsgeschwindigkeit}$

In Abbildung 3 ist die Abhängigkeit der Strouhal-Zahl  $Sr$  von der Reynolds-Zahl  $Re$  dargestellt. Im Bereich von  $Re \approx 100$  bis  $Re \approx 2 \cdot 10^5$  ist die Strouhal-Zahl  $Sr \approx 0,2$ . Dieser Umstand wird sich bei Wirbelstromzählern zunutze gemacht. Mithilfe der gemessenen Ablösefrequenz  $f$  und der bekannten Staukörperdicke lässt sich die Anströmgeschwindigkeit  $u$  ermitteln.<sup>10</sup>

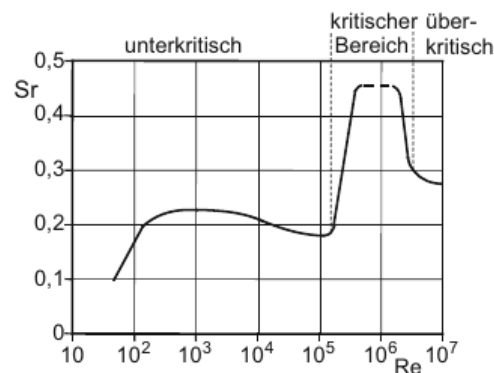


Abbildung 3: Strouhal-Zahl  $Sr$  in Abhängigkeit der Reynolds-Zahl  $Re$  <sup>11</sup>

<sup>8</sup>Surek; Stempin, 2017, S. 442

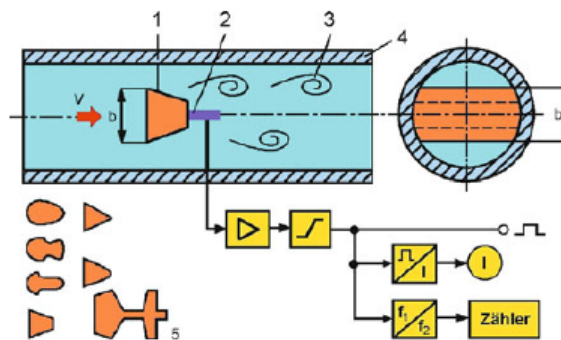
<sup>9</sup>vgl. A. Böge; W. Böge, 2021, S. 352

<sup>10</sup>vgl. Surek; Stempin, 2017, S. 442

<sup>11</sup>ebd.



In Abbildung 4 ist der typische Aufbau eines Wirbelfrequenzzählers, auch Wirbeldurchflussmesser genannt, dargestellt. Im Wesentlichen besteht dieser aus einem Messrohr(4), in dem ein Staukörper(1) mit bestimmter Geometrie(5) eingelassen ist. Hinter diesem ist ein Wirbeldruckabnehmer (2) verbaut. Das erzeugte Signal wird von einer Auswertelektronik verarbeitet und dem Anwender ausgegeben.<sup>12</sup>



Das Messprinzip beruht auf der Kármán'schen Wirbelstraße. Durch den Staukörper entstehen bei strömenden Medien sich periodisch abwechselnde Wirbel. Diese erzeugen hinter der Staugeometrie einen Unterdruck, der ebenso periodisch variiert. Die Druckschwankung bringt den Wirbeldruckabnehmer in Schwingung. Mithilfe eines Sensorelements wird die Frequenz  $f$  der Schwingung in ein elektrisch auswertbares Signal umgewandelt. Dies kann mechanisch, akustisch oder optisch erfolgen.<sup>14</sup>

$$f = K_1 \cdot u \quad (4)$$

<sup>12</sup>vgl. Tränkler; Reindl, 2018, S. 803 ff.

<sup>13</sup>Hesse; Schnell, 2018, S. 291

<sup>14</sup>vgl. Tränkler; Reindl, 2018, S. 803

Desweiteren gilt für den Volumenstrom  $Q_v$  folgende Abhängigkeit:

$$Q_v = u \cdot A \quad (5)$$

mit :  $A = \text{Messrohrquerschnitt}$

Der Messrohrquerschnitt  $A$  ist bei dem jeweiligen Wirbelfrequenzzähler konstant, sodass sich für den Kalibrierfaktor  $K$  eines Wirbelzählers folgender Zusammenhang besteht:

$$f = K \cdot Q_v \quad (6)$$

Somit kann der Volumenstrom direkt aus der gemessenen Ablösefrequenz  $f$  und des Kalibrierfaktors  $K$  berechnet werden. Setzt man Formel (4) in die Formel (3), Seite 4 ein, erhält man für den Proportionalitätsfaktor  $K_1$ :

$$S_r = K_1 \cdot d \quad (7)$$

Da die Strouhal-Zahl  $S_r$  in einem bestimmten Bereich der Reynolds-Zahl  $Re$  nahezu konstant ist, kann der Proportionalitätsfaktor  $K_1$  und damit auch der Kalibrierfaktor  $K$  bestimmt werden. In der Regel wird dieser jedoch nicht berechnet, sondern direkt vom Hersteller kalibriert.<sup>15</sup>

### 3.2 KROHNE OPTISWIRL 4200

Der *OPTISWIRL* 4200 der Firma *KROHNE* arbeitet nach dem Prinzip der Kármán'schen Wirbelstraße. Die Sensoreinheit zur Erfassung der Wirbelfrequenz ist im Benutzerhandbuch nicht näher ausgeführt, jedoch sind im Kapitel „*Statusmeldungen und Diagnose-Informationen*“, Seite 96 des Benutzerhandbuches unter der Ereignisgruppe „*Sensor*“ Fehlermeldungen beschrieben, die sich auf ein Piezoelement beziehen. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die primäre Messgröße (Anzahl der abgelösten Wirbel) mithilfe eines Piezoelements erfasst wird. Die periodische Druckschwankung wirkt auf das Piezoelement und erzeugt ein periodisch schwankendes, elektrisches Potenzial, welches der Wirbelfrequenz entspricht. Als sekundäre Messgröße gibt der

<sup>15</sup>vgl. Tränkler; Reindl, 2018, S. 806 f.

Hersteller zusätzlich den Betriebs-, Norm-, Volumen- und -Massedurchfluss an. Weiterhin kann die Temperatur und optional der Druck erfasst werden. Den *OPTISWIRL4200* gibt es in verschiedenen Ausführungen, die sich nach dem jeweiligen Einsatzzweck richten.<sup>16</sup>

### 3.3 Endress+Hauser Prowirl 200

Die Firma *Endress+Hauser* stellt ebenso ein Wirbeldurchflussmessgerät her, welches das Prinzip der Kármán'schen Wirbelstraße nutzt. Die Wirbelfrequenz wird beim *Proline Prowirl F 200* mithilfe eines kapazitiven Sensors in ein elektrisch auswertbares Signal umgewandelt. Vereinfacht dargestellt, besteht dieser Sensor aus zwei parallel gegenüberliegenden Kondensatorplatten. Der Abstand zwischen den Kondensatorplatten kann durch äußere Einwirkungen variieren. Dadurch verändert sich die Kapazität des Kondensators, die messtechnisch erfasst und ausgewertet wird. Zusätzliche Messgrößen können wie beim *OPTISWIRL4200* ebenso erfasst werden. Als Alleinstellungsmerkmal bewirbt *Endress+Hauser* den *Proline Prowirl F 200* mit einer integrierten Nassdampferkennung. Die Kalibrierung des Proportionalitätsfaktors  $K$  ist für nicht abrasive Medien auf „Lebenszeit“ angegeben, da der Sensor keinem Langzeit- oder Nullpunktdrift unterliegt. In abrasiven Medien kann sich jedoch die Geometrie des Staukörpers geringfügig ändern. Dies verändert den  $K$  – Wert, sodass eine Neukalibrierung nach bestimmten Zeitabständen erforderlich ist.<sup>17</sup>

### 3.4 Gegenüberstellung der beiden Messgeräte

In Tabelle 1, Seite 8 sind die wichtigsten technischen Eigenschaften der beiden Hersteller gegenübergestellt. Als Nennweite wurde *DN25* gewählt. Diese Kenngröße ist ein typisches Merkmal von Rohrleitungssystemen. Sie folgt der *DIN EN ISO 6708* und stellt sicher, dass zueinander gehörende Bauteile bei Rohrleitungssystemen passgenau sind. Die Innendurchmesser sind annähernd gleich. Dadurch ist der Vergleich und die Leistungsbeurteilung der einzelnen Messgeräte möglich.<sup>18</sup>

<sup>16</sup>vgl. KROHNE, 2022, S. 96, 107 f.

<sup>17</sup>vgl. Tränkler; Reindl, 2018, S. 476 f.; vgl. Endress+Hauser, 2020, S. 4 f.

<sup>18</sup>vgl. Hoischen; Fritz, 2017, S. 399

Die Einsatztemperatur ist für beide Geräte annähernd gleich. Trotzdem ist der *Prowirl F 200* für höhere Messstofftemperaturen geeignet. Bei der Durchflussgeschwindigkeit weist der *OPTISWIRL* ein kleineres Spektrum auf als das Konkurrenzprodukt. Für geringere Durchflussgeschwindigkeiten von Gasen und Dämpfen ist der *Prowirl F 200* aufgrund der minimalen Fließgeschwindigkeit von  $0,7 \frac{m}{s}$  geeignet. Jedoch liegt die maximale Durchflussgeschwindigkeit beim *Prowirl F 200* unter dem Wert des zweiten Produkts. Der maximale Messdruck sowie die Genauigkeit der ermittelten Messwerte ist bei beiden gleich. Die Versorgungsspannung kann beim *Prowirl F 200* um 5V höher bei maximal 35V liegen. Beide Messgeräte unterstützen die gängigen Kommunikationsschnittstellen für den Industriegebrauch, der *Prowirl F 200* verfügt zusätzlich über eine von *Endress+Hauser* entwickelte Serviceschnittstelle. Für den *OPTISWIRL 4200* lässt sich dazu im Benutzerhandbuch keine Information finden.<sup>19</sup>

Eigenschaft		Proline Prowirl F 200 CA DN25	OPTISWIRL 4200 DN25C
Temperatur	Umgebung	-40...80 °C	-40...85 °C
	Messstoff	-40...260 °C, bis 400 °C möglich	-40...240 °C
Durchflussgeschwindigkeit	Flüssigkeit	0,14...9 m/s	0,3...7 m/s
	Gase/ Dämpfe	0,7...77 m/s	2...80 m/s
max. Messstoffdruck		100 bar	100 bar
Versorgungsspannung		12...35 VDC	12...30 VDC
Genauigkeit		0,1 % v.M.	0,1 % v.M.
Schnittstellen		-Profibus -Foundation Fieldbus -HART -Serviceschnittstelle CDI	-Profibus -Foundation Fieldbus -HART

Tabelle 1: Technische Eigenschaften der einzelnen Messgeräte<sup>20</sup>

Die Preise für die jeweiligen Wirbelfrequenzzähler sind öffentlich nicht einsehbar. Gebrauchte Geräte auf dem freien Markt lassen allerdings die Schlussfolgerung zu, dass das Messgerät der Firma *Endress+Hauser* deutlich höher ausfällt, als das Modell des Konkurrenten. Welches Messgerät besser ist, lässt sich pauschal jedoch nicht feststellen, da der Einsatzzweck, das verwendete Medium und der Kostenrahmen in der Regel die entscheidenden Faktoren sind.<sup>21</sup>

<sup>19</sup>vgl. Endress+Hauser, 2020, S. 9 ff.; vgl. KROHNE, 2022, S. 108 ff.

<sup>20</sup>vgl. Endress+Hauser, 2020, S. 9 ff.; vgl. KROHNE, 2022, S. 108 ff.

<sup>21</sup>vgl. o.V., 2022a; vgl. o.V., 2022b

---

## 4 Schlussbetrachtung

### 4.1 Zusammenfassung

In diesem Assignment wurde die Anwendung von Piezo-Sensoren in der Prozessmesstechnik beschrieben. Dazu wurde zuerst der piezoelektrische Effekt dargestellt. Anschließend erfolgte eine Einführung in die Grundlagen der Strömungsmechanik. Besondere Beachtung fand dabei die Reynolds-Zahl, die Kármán'sche Wirbelstraße und die Strouhal-Zahl. Mit den erarbeiteten physikalischen Grundlagen konnte die Anwendung von Piezo-Sensoren in der Prozessmesstechnik anhand des Wirbelfrequenzzählers beschrieben werden. Dazu wurde im ersten Schritt der allgemeine Aufbau und die Funktionsweise dieses Messgerätes erarbeitet. Anschließend wurden Wirbelfrequenzmessgeräte der Hersteller *KROHNE* und *Endress+Hauser* als Beispiel näher beschrieben. Hierbei wurde bereits festgestellt, dass die Messgrößenerfassung nur bei der Firma *KROHNE* auf einem Piezoelement beruht. Als Abschluss dieses Assignment wurden die beiden Messgeräte gegenübergestellt und markante technische Daten verglichen.

### 4.2 Kritische Reflexion

Bei der Literaturrecherche wurde bereits deutlich, dass es eine Vielzahl von physikalischen Prinzipien zur Durchflussmessung gibt. Genauso vielfältig sind auch die Sensoren zur Erfassung der Messgrößen. Dementsprechend müssten die physikalischen Grundlagen auf weitere Gesetzmäßigkeiten ausgeweitet werden. Beispielsweise wird bei dem *Prowirl F 200* ein kapazitiver Sensor verwendet. Hier konnte aufgrund des Umfangs des Assignments nur auf Piezo-Sensoren eingegangen werden. Die technischen Eigenschaften der Wirbelfrequenzzähler wurde nur sehr allgemein betrachtet. Heutige Messgeräte umfassen deutlich mehr Parameter. Mit Blick auf die Industrie 4.0 wird sich in Zukunft der Funktionsumfang von Messgeräten zusätzlich steigern. Auch hier würde eine detaillierte Beschreibung den Umfang des Assignments übersteigen. Abschließend kann festgehalten werden, dass die Ausarbeitung einen guten Einblick in die komplexe Thematik der Anwendung von Piezo-Sensoren in der Prozesstechnik gibt.

## Literaturverzeichnis

- Böge, Alfred; Böge, Wolfgang (2021)** in: Handbuch Maschinenbau, Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 24., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Czichos, Horst (2019)** in: Mechatronik, Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme, 4., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Eichler, Jürgen (2011)** in: Physik, für das Ingenieurstudium - prägnant mit knapp 300 Beispielaufgaben, 4., aktualisierte und überarbeitete Auflage, Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden
- Endress+Hauser (2020)** in: Technische Information Proline Prowirl F200, Wirbelfrequenz-Durchflussmessgerät, Auflage TI01333D/06/DE/04.20, Endress+Hauser, o.O.
- Hesse, Stefan; Schnell, Gerhard (2018)** in: Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation, Funktion - Ausführung - Anwendung, 7., ergänzte und durchgesehene Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden
- Hoischen, Hans; Fritz, Andreas (2017)** in: Technisches Zeichnen, Grundlagen, Normen, Beispiele, Darstellende Geometrie, 35., überarbeitete und erweiterte Auflage, Cornelsen Verlag GmbH, Berlin
- Horlacher, Hans-Burkhard; Helbig, Ulf (2016)** in: Rohrleitungen 1, 2. Auflage, Springer Vieweg, Berlin
- KROHNE (2022)** in: OPTISWIRL 4200 Handbuch, Wirbelfrequenz-Durchflussmessgerät, Elektronikrevision: bis zu ER 2.0.8\_, KROHNE Messtechnik GmbH, Duisburg
- o.V. (2022a)**, [https://www.ebay.de/sch/i.html?\\_from=R40&\\_trksid=p2334524.m570.11313&\\_nkw=krohne+optiswirl+4200&\\_sacat=0&LH\\_TitleDesc=0&\\_odkw=krohne+optiswirl+4200+DN25&\\_osacat=0](https://www.ebay.de/sch/i.html?_from=R40&_trksid=p2334524.m570.11313&_nkw=krohne+optiswirl+4200&_sacat=0&LH_TitleDesc=0&_odkw=krohne+optiswirl+4200+DN25&_osacat=0) (besucht am 17. 06. 2022)
- o.V. (2022b)**, [https://www.ebay.de/itm/114814255674?chn=ps&norover=1&mkevt=1&mkrid=707-134425-41852-0&mkcid=2&itemid=114814255674&targetid=1297988890964&device=c&mktype=pla&googleloc=9043186&poi=&campaignid=10203814767&mkgroupid=121830191665&rlsarget=pla-1297988890964&abcId=1145991&merchantid=110006280&gclid=EAIaIQobChMI\\_YTMkKW1-AIVSuN3Ch37TAZKEAQYBCABEGJI\\_D\\_BwE](https://www.ebay.de/itm/114814255674?chn=ps&norover=1&mkevt=1&mkrid=707-134425-41852-0&mkcid=2&itemid=114814255674&targetid=1297988890964&device=c&mktype=pla&googleloc=9043186&poi=&campaignid=10203814767&mkgroupid=121830191665&rlsarget=pla-1297988890964&abcId=1145991&merchantid=110006280&gclid=EAIaIQobChMI_YTMkKW1-AIVSuN3Ch37TAZKEAQYBCABEGJI_D_BwE) (besucht am 17. 06. 2022)
- o.V. (2022c)** in: Duden, [https://www.duden.de/rechtschreibung/piezo\\_](https://www.duden.de/rechtschreibung/piezo_) (besucht am 04. 05. 2022)

**o.V. (2022d)** in: Spektrum, <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/piezoelektrischer-effekt/11270> (besucht am 21.06.2022)

**Surek, Dominik; Stempin, Silke (2017)** in: Technische Strömungsmechanik, Für Studium, Examen und Praxis, 3., überarbeitete und erweiterte Auflage, Springer Vieweg, Wiesbaden

**Tränkler, Hans-Rolf; Reindl, Leonhard M. (2018)** in: Sensortechnik, Handbuch für Praxis und Wissenschaft, 2., völlig neu bearbeitete Auflage, Springer Vieweg, Heidelberg