

Messleitfaden II zur Messtechnik

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Autorinnen und Autoren: Konstantin Kulterer, David Presch, Marcus Hofmann, Manuel Mitterndorfer Österreichische Energieagentur, unter Mitarbeit von Aaron Biesenberger, Clemens Zehetner, Endress+Hauser

Inhalt: November 2018, Layout: Dezember 2020

Copyright und Haftung:

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des BMK und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgehen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an eebetriebe@energyagency.at

Inhalt

1 Einleitung	7
2 Grundlagen Messtechnik	10
2.1 Einleitung	10
2.2 Begriffsdefinitionen	10
2.3 Grundlagen Messung.....	14
2.3.1 Messaufbau.....	14
2.3.2 Anforderungen an eine Messung	16
2.3.3 Messunsicherheit.....	17
3 Empfohlene Messverfahren für unterschiedliche Einsatzbereiche	25
4 Durchflussmessung	27
4.1 Auswahl des richtigen Messverfahrens.....	28
4.1.1 Wirtschaftlichkeit.....	29
4.1.2 Checkliste für die Installation von Durchflussmessungen.....	30
4.2 Wirkdruckverfahren.....	31
4.2.1 Erklärung Messprinzip	31
4.2.2 Anwendungsgebiet	34
4.2.3 Messaufbau.....	34
4.2.4 Typische Kenngrößen.....	36
4.2.5 Vor- und Nachteile	37
4.2.6 Praxistipps.....	38
4.3 Coriolis-Prinzip	38
4.3.1 Erklärung Messprinzip	38
4.3.2 Anwendungsgebiet	39
4.3.3 Messaufbau.....	39
4.3.4 Typische Kenngrößen.....	41
4.3.5 Vor- und Nachteile	42
4.3.6 Praxistipps.....	42
4.4 Wirbelstraßenprinzip (Vortex).....	42
4.4.1 Erklärung Messprinzip	42
4.4.2 Anwendungsgebiet	44
4.4.3 Messaufbau.....	44
4.4.4 Typische Kenngrößen.....	45
4.4.5 Vor- und Nachteile	47
4.4.6 Praxistipps.....	47
4.5 Flügelrad - Anemometer (mobil)	47

4.5.1	Erklärung Messprinzip	47
4.5.2	Anwendungsgebiet	48
4.5.3	Messaufbau.....	49
4.5.4	Typische Kenngrößen.....	51
4.5.5	Vor- und Nachteile	51
4.5.6	Praxistipps.....	52
4.6	Thermisches Anemometer	52
4.6.1	Erklärung Messprinzip	52
4.6.2	Anwendungsgebiet	54
4.6.3	Messaufbau.....	54
4.6.4	Typische Kenngrößen.....	55
4.6.5	Vor- und Nachteile	56
4.6.6	Praxistipps.....	56
4.7	Schwebekörper Anemometer	57
4.7.1	Erklärung Messprinzip	57
4.7.2	Anwendungsgebiet	58
4.7.3	Messaufbau.....	58
4.7.4	Typische Kenngrößen.....	59
4.7.5	Vor- und Nachteile	60
4.8	Magnetisch induktiv	60
4.8.1	Erklärung Messprinzip	60
4.8.2	Anwendungsgebiet	63
4.8.3	Messaufbau.....	64
4.8.4	Typische Kenngrößen.....	65
4.8.5	Vor- und Nachteile	66
4.8.6	Praxistipps.....	66
4.9	Ultraschall	66
4.9.1	Erklärung Messprinzip	66
4.9.2	Anwendungsgebiet	68
4.9.3	Messaufbau.....	68
4.9.4	Typische Kenngrößen.....	70
4.9.5	Vor- und Nachteile	71
4.9.6	Praxistipps.....	72
5	Temperaturmessung.....	73
5.1	Auswahl des richtigen Messverfahrens.....	73
5.1.1	Wirtschaftlichkeit.....	76
5.1.2	Checkliste für die Installation	77

5.2	Widerstandsthermometer	77
5.2.1	Erklärung des Messprinzips	77
5.2.2	Anwendungsgebiet	82
5.2.3	Messaufbau.....	82
5.2.4	Typische Kenngrößen.....	88
5.2.5	Vor- und Nachteile	88
5.2.6	Praxistipps.....	89
5.3	Thermoelement	89
5.3.1	Erklärung des Messprinzips	89
5.3.2	Anwendungsgebiet	91
5.3.3	Messaufbau.....	92
5.3.4	Typische Kenngrößen.....	93
5.3.5	Vor- und Nachteile	94
5.3.6	Praxistipps.....	94
5.4	Temperaturfühlerkonstruktionen für die Industrie.....	95
5.4.1	Mantel-Temperaturfühler	95
5.4.2	Temperaturfühler mit auswechselbarem Messeinsatz.....	96
5.4.3	Temperaturfühler für hohe Temperaturen	97
5.4.4	Einbaubedingungen	98
5.5	Thermografie	103
5.5.1	Erklärung des Messprinzips	103
5.5.2	Anwendungsgebiet	106
5.5.3	Messaufbau.....	107
5.5.4	Typische Kenngrößen.....	108
5.5.5	Vor- und Nachteile	110
5.5.6	Praxistipps.....	110
5.6	Mobile Messung der Temperatur.....	111
5.6.1	Anwendungsgebiet	111
5.6.2	Messaufbau.....	111
6	Druckmessung.....	113
6.1	Auswahl des richtigen Messverfahrens.....	114
6.1.1	Wirtschaftlichkeit.....	114
6.1.2	Checkliste für die Installation	114
6.2	Federelastische Druckmessgeräte (Manometer)	115
6.2.1	Erklärung des Messprinzips	115
6.2.2	Anwendungsgebiet	117
6.2.3	Messaufbau.....	117

6.2.4	Vor- und Nachteile	118
6.3	Elektrische Druckmessumformer	119
6.3.1	Erklärung des Messprinzips	119
6.3.2	Messaufbau.....	120
6.3.3	Anwendungsgebiet	127
6.3.4	Vor- und Nachteile	127
7	Elektrische Energiemessung.....	128
7.1	Wirtschaftlichkeit.....	128
7.2	Analoge Messgeräte	129
7.2.1	Erklärung des Messprinzips	129
7.2.2	Messaufbau.....	129
7.2.3	Vor- und Nachteile	130
7.3	Digitale Messgeräte	131
7.3.1	Erklärung des Messprinzips	131
7.3.2	Messaufbau.....	131
7.3.3	Qualitätsmerkmale von digitalen Messgeräten	133
7.3.4	Vor- und Nachteile	134
7.3.5	Anwendung von digitalen Multimeter	135
7.3.6	Leistungsmessgeräte	138
8	Leitfäden und Tools	151
	Formelverzeichnis	152
	Tabellenverzeichnis.....	153
	Abbildungsverzeichnis.....	155
	Literaturverzeichnis	158
	Über klimaaktiv	163

1 Einleitung

Um Energieeinsparungen beziehungsweise Energiesparmaßnahmen nachweisen und bewerten zu können, müssen verschiedene energierelevante Messungen im Unternehmen durchgeführt werden. Dieser Leitfaden beschäftigt sich mit der detaillierten Beschreibung der dafür relevanten Messtechnik. Das Dokument soll als Nachschlagwerk für die österreichischen EnergieauditorInnen, EnergiemanagerInnen und Energiedienstleister dienen.

Der Aufbau des Messleitfadens kann in folgende Kapitel eingeteilt werden:

- Einleitung
- Grundlagen Messtechnik
- Empfohlene Messverfahren für unterschiedliche Einsatzbereiche
- Durchflussmessung
- Temperaturmessung
- Druckmessung
- Elektrische Energiemessung

Die Einleitung beschäftigt sich mit den in der Praxis verwendeten Messgeräten, welche zum Nachweis von Energieeinsparungen beziehungsweise Energiesparmaßnahmen eingesetzt werden. Kapitel 2 enthält Begriffsdefinitionen und zu beachtende allgemeine Grundlagen bezüglich Messung (Messaufbau, Messunsicherheit, Anforderungen an eine korrekte Messung und so weiter). Eine Auflistung unterschiedlicher Messverfahren für typische Einsatzbereiche in Industrie und Gewerbe ist in Kapitel 3 zu finden. In den Kapiteln 4 bis 7 folgt eine genaue Beschreibung zu den Themen Durchfluss-, Temperatur-, Druck- und elektrischer Energiemessung.

Nachfolgend ein Überblick über die in der Praxis häufig eingesetzten Messgeräte. Diese Daten beziehungsweise Messgeräte wurden anhand eines Fragebogens beziehungsweise persönlicher Befragungen an EnergieberaterInnen und EnergiemanagerInnen während der klimaaktiv BeraterInnenschulung im April 2015 erhoben (insgesamt circa 20 ausgefüllte Fragebögen). Jede Tabelle deckt eine der Messgrößen ab, ausser Tabelle 6 (Druck, elektrische Leistung et.), welche am häufigsten gemessen werden. Zu jeder Messgrößenkategorie sind eine Reihe von Messgeräten angeführt, die in der Praxis

Verwendung finden, hier handelt es sich vorwiegend um mobile Messgeräte. In der Tabellenüberschrift finden sich die Verweise, welche zu genaueren Informationen bezüglich der angeführten Messgeräte und deren Messprinzipien führen. Diese Tabellen stellen keinen Anspruch auf Vollständigkeit dar, sondern repräsentieren die am häufigsten eingesetzten Messgeräte auf Basis der durchgeführten Befragungen. Bei jenen Herstellern wo keine Type in der nachfolgenden Tabelle angegeben ist, wurde von Seiten der Befragten nicht genauer spezifiziert.

Tabelle 1: Messgröße Druck – siehe Kapitel 6

Messgeräte Hersteller	Type
WIKA	C10
JUMO	MIDAS C08
testo	400
Ahlborn	ALMEMO 710
Endress+Hauser	Keine Angabe

Tabelle 2: Messgröße elektrische Energie – siehe Kapitel 7

Messgeräte Hersteller	Type
FLUKE	1730
PCE	Phase-Power PCE 360
FLUKE	373

Tabelle 3: Messgröße Temperatur – siehe Kapitel 5

Messgeräte Hersteller	Type
FLUKE	975 AirMeter
testo	480
Ahlborn	ALMEMO 710
Bosch	PTD 1

testo	925
Endress+Hauser	Keine Angabe

Tabelle 4: Messgröße Durchfluss Flüssigkeiten – siehe Kapitel 4

Messgeräte Hersteller	Type
Endress+Hauser	Keine Angabe
FLEXIM	FLUXUS F601
taosonics	TUC-2000E

Tabelle 5: Messgröße Durchfluss Gas – siehe Kapitel 4

Messgeräte Hersteller	Type
testo	440
Ahlborn	ALEMEMO 710
Endress+Hauser	Keine Angabe

Tabelle 6: Verschiedene Messgrößen

Messgröße	Messgeräte Hersteller	Type
Sauerstoff im Abgas	testo	340
Laufzeit einer Maschine	FLUKE	1730
Beleuchtungsstärke	EXTECH	LT300

Quelle Tabelle 1-6: AEA, eigene Darstellung, 2015

2 Grundlagen Messtechnik

2.1 Einleitung

Unter Messen versteht man den quantitativen Vergleich physikalischer Größen. Das Ergebnis einer Messung ist der Messwert der physikalischen Größe, dies ist ein Produkt aus zwei Faktoren, nämlich das Produkt aus Zahlenwert und verwendeter Einheit. Auf der Waage vergleicht man z. B. Gewicht (beziehungsweise Masse) mit bekanntem Gewicht, mit dem Maßstab vergleicht man Länge mit bekannter Länge.

Physikalische Größe = Zahlenwert x Einheit

z. B. Länge = 5 m

Ziel einer Messung ist die Übereinstimmung des gemessenen Wertes (oder Anzeigewertes) x_m mit dem „wahren Wert“ der Messgröße x_w . Eine genaue Übereinstimmung wird praktisch nie erreicht (siehe Kapitel 2.3.3 Messunsicherheit).

2.2 Begriffsdefinitionen

Messen ist das Ausführen von geplanten Tätigkeiten zum quantitativen Vergleich einer Messgröße mit einer Einheit (DIN 1319-1/1.95).

Messgröße ist die physikalische Größe, deren Wert durch eine Messung ermittelt werden soll (VDI/VDE 2600).

Der **Messwert** ist ein Wert, der zur Messgröße gehört und der Ausgabe eines Messgerätes oder einer Messeinrichtung eindeutig zugeordnet ist (DIN 1319/1.95).

Das **Messergebnis** ist ein aus Messungen gewonnener Schätzwert für den wahren Wert einer Messgröße (DIN 1319-1/1.95). Dieses setzt sich zusammen aus dem Messwert, einer zufälligen Messabweichung und einer systematischen Messabweichung (siehe Kapitel 2.3.3).

Unter dem **Messbereich** eines Messgeräts versteht man gemäß DIN 1319 jenen Bereich der Messgröße, in dem gefordert wird, dass die Messabweichungen (Messfehler) innerhalb festgelegter Grenzen bleiben. Außerhalb des Messbereiches wird keine Genauigkeit garantiert.

Das **Messprinzip** ist die physikalische Grundlage einer Messung (DIN 1319/1.95).

Ein **Messgerät** ist ein Gerät, das allein oder in Verbindung mit anderen Einrichtungen für die Messung einer Messgröße vorgesehen ist (DIN 1319-1/1.95).

Eine **Messeinrichtung** ist die Gesamtheit aller Messgeräte und zusätzlicher Einrichtungen zur Erzielung eines Messergebnisses (DIN 1319-1/1.95).

Als **Messkette** bezeichnet man eine Folge von Elementen eines Messgeräts oder einer Messeinrichtung, die den Weg des Messsignals von der Aufnahme der Messgröße bis zur Bereitstellung der Ausgabe bildet (DIN 1319-1/1.95).

Hilfsgeräte sind zusätzliche Einrichtungen, die nicht unmittelbar zur Aufnahme, Umformung oder Ausgabe dienen (z. B. Hilfsenergiequellen zur Aufrechterhaltung der Funktion eines Messgerätes, Lupen, Thermostate).

Messsignale stellen Messgrößen im Signalflussweg einer Messeinrichtung durch zugeordnete physikalische Größen gleicher oder anderer Art dar (VDI/VDE 2600).

Ein **Messumformer** ist ein Messgerät, welches ein analoges Eingangssignal in ein eindeutig damit zusammenhängendes analoges Ausgangssignal umformt.

Als **Messwandler** wird ein Messumformer dann bezeichnet, wenn er am Ein- und Ausgang dieselbe physikalische Größe aufweist und ohne Hilfsenergie arbeitet (z. B. Stromwandler, Spannungswandler, Druckwandler, Drehmomentwandler).

Ein **Transmitter** ist ein Messgerät, welches ein analoges Eingangssignal in ein elektrisches Normausgangssignal (z. B. 0 bis 10 V oder 4 bis 20 mA) umformt.

Ein **Normal** ist eine Einrichtung, die einen sehr genau definierten, speziellen Wert einer Größe realisiert (z. B. Spannungsnormal, Normalwiderstand).

Justieren ist das Einstellen oder Abgleichen eines Messgeräts mit dem Ziel, die Anzeige (Angabe) des Messgeräts möglichst nahe an den richtigen Wert der Messgröße anzugleichen.

Kalibrieren ist das Ermitteln des für eine gegebene Messeinrichtung gültigen Zusammenhanges zwischen dem Messwert oder dem Wert des Ausgangssignals und dem konventionell richtigen Wert der Messgröße (VDI/VDE 2600). Durch das Kalibrieren wird somit die „richtige“ Kennlinie eines Messgerätes bestimmt.

Eichen (gesetzlich geschützter Begriff) ist die von der zuständigen Eichbehörde nach den gesetzlichen Vorschriften und Anforderungen vorzunehmende Prüfung und Stempelung von Messgeräten (z. B. Elektrizitäts-, Gas-, Wasser- und Wärmezähler).

Die Vorgangsweise bei einer Messung und die Angabe der Messunsicherheit wurde 1993 im Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Abkürzung GUM) beschrieben. Nachfolgend sind weitere Definitionen im Zusammenhang mit Messfehler / Messunsicherheit angeführt:

Messunsicherheit:

Kennwert, der dem Messergebnis zugeordnet ist und den Bereich der Werte charakterisiert, die der Messgröße (auf Grund der aus der Messung vorhandenen Kenntnisse) vernünftigerweise zugeordnet werden können – im Allgemeinen als Standardabweichung ausgedrückt (Standardmessunsicherheit).

Vertrauensbereich:

Ist jener Wertebereich, in dem der wahre Wert der gemessenen Größe mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit liegen wird (z. B. mit 68,3 %, 90 % oder 95 %). In der Technik wird statt den Prozentangaben auch oft folgende Schreibweise gewählt: $k = 2$ (der Buchstabe k steht für Konfidenzintervall und die Ziffer 2 gibt die Größe des Intervalls an - in diesem Fall steht die Zahl 2 für 95 %).

Fehlergrenze:

Als Fehlergrenze bezeichnet man die maximal zu erwartende Abweichung des Messwerts vom wahren Wert. Gibt der Hersteller eine Fehlergrenze an, so darf kein Messwert vom

wahren Wert der Messgröße über das Maß der Fehlergrenze hinaus abweichen. Die Fehlergrenze beinhaltet sowohl die zufälligen als auch die systematischen Fehler.

Linearitätsfehler:

Dieser beschreibt die Abweichung vom linearen Zusammenhang (Sollkennlinie) zwischen Messgröße (x_e) und Ausgangssignal (x_a) des Sensors.

Hysteresefehler:

Als Hysteresefehler bezeichnet man die bei gleichem Messwert auftretende Differenz zwischen Messungen mit zunehmenden Messwerten und daran anschließenden Messungen mit abnehmenden Messwerten.

Wiederholbarkeit (Repeatability):

Ist die Streuung der Messwerte eines Messgerätes bei mehreren Messungen der gleichen Messgröße unter gleichen Bedingungen. Die Wiederholungen finden hierbei unter einer kurzen Zeitspanne am selben Ort und unter gleichen Bedingungen statt.

Reproduzierbarkeit (Reproducibility):

Ist die Streuung der Messwerte mit verschiedenen Messgeräten unter gleichen Bedingungen.

Messbereichsdynamik:

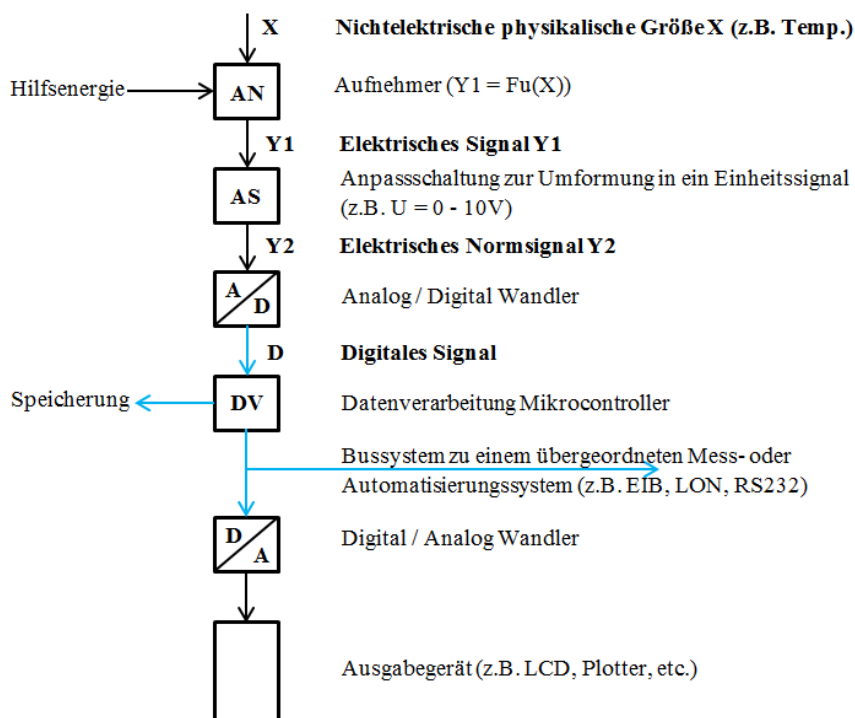
Unter der Dynamik eines Messgerätes versteht man allgemein das Verhältnis von kleinster messbarer Größe zu größter messbarer Größe, z. B. bei der Durchflussmessung also das Verhältnis vom kleinsten zum größten messbaren Durchfluss. Wird ein Durchflussmessgerät mit einer Dynamik von 1:10 und einer unteren Messbereichsgrenze von 1 [m³/h] angegeben, so ergibt sich daraus eine obere Messbereichsgrenze von 10 [m³/h].

2.3 Grundlagen Messung

2.3.1 Messaufbau

In den meisten Fällen wird zur Aufnahme eines Messwertes nicht ein einzelnes Gerät herangezogen, sondern mehrere Elemente benutzt. Die Elemente können entweder baulich in einer Einheit zusammengefasst oder aber auch getrennt (z. B. Temperatursensor stationär in der Rohrleitung eingebaut und Messgerät mobil) angeordnet werden. Der Weg des Messsignals von der Aufnahme der Messgröße bis zur Bereitstellung der Ausgabe wird in diesem Kapitel erläutert. Grundsätzlich setzt sich jeder Messaufbau, unabhängig von der Art der Messung, aus den folgenden Komponenten zusammen:

Abbildung 1: Bestandteile eines typischen Messaufbaus



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Aufnehmer (Sensor, Messfühler, Fühler):

Vom Aufnehmer wird die zu messende Größe (Messgröße) erfasst und in ein elektrisches Signal (z. B. Spannung), oder in ein Signal, das in einer elektrischen Schaltung verwendet werden kann (z. B. Widerstand, Kapazität), umgeformt. Sensoren bedienen sich dabei physikalischer Effekte, z. B. der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes eines bestimmten Materials (= Widerstandstemperaturfühler). Bei passiven Sensoren wird eine externe Hilfsenergie benötigt, aktive Sensoren liefern bereits von sich aus ein elektrisches Signal.

Anpassschaltung (Verstärkung):

Die Anpassschaltung hat die Aufgabe, das elektrische Ausgangssignal des Sensors spannungs- und widerstandsmäßig dem nachgeschalteten Messglied (häufig ein A/D-Wandler) anzupassen. Die Anpassschaltung ist meist als Verstärkerelement ausgeführt. Ausgangsgrößen einer Anpassschaltung sind Strom oder Spannung in Form von Normsignalen. Normsignale liegen für Spannungen in den Bereichen 0 bis 10 V, -5 bis +5 V oder 2 bis 10 V und für Ströme zwischen 0 bis 20 mA und 4 bis 20 mA.

A/D Wandler:

Um die vom Sensor aufgenommenen und von der Anpassschaltung verstärkten Signale weiterbearbeiten beziehungsweise speichern zu können werden diese vom A/D-Wandler in digitale Signale umgewandelt. Die Hauptkenngößen eines A/D Wandlers sind Abtastrate (beziehungsweise Sampling Frequenz) und Auflösung (z. B. 1 Hz Sampling Frequenz und 12 bit Auflösung). Eine weitere Kenngröße ist der Eingangsspannungsbereich, das heißt die Grenzen, in denen sich das zu wandelnde Signal bewegen darf (z. B. 0 – 10 V). Übliche Auflösungen von A/D Wandlern betragen 8, 10, 12, 16, 20 oder 24 bit.

Datenverarbeitung:

Bevor Signale gespeichert oder an einen Regler weitergeleitet werden, müssen die Daten noch in geeigneter Weise verarbeitet werden (z. B. für die Ankopplung an ein Bussystem müssen die digitalen Signale in das Busprotokoll übersetzt werden).

D/A Wandler:

Mit Hilfe des D/A Wandlers werden die digitalen Signale wieder in analoge Signale umgewandelt (umgekehrter Vorgang zur A/D Wandlung). Die dann erhaltenen analogen Signale können wiederum am Bildschirm angezeigt oder auf einem Plotter ausgegeben werden.

2.3.2 Anforderungen an eine Messung

An eine Messung werden grundsätzlich die folgenden vier Anforderungen gestellt:

- Genauigkeit
- Schnelligkeit
- Reproduzierbarkeit
- Einfachheit

Genauigkeit:

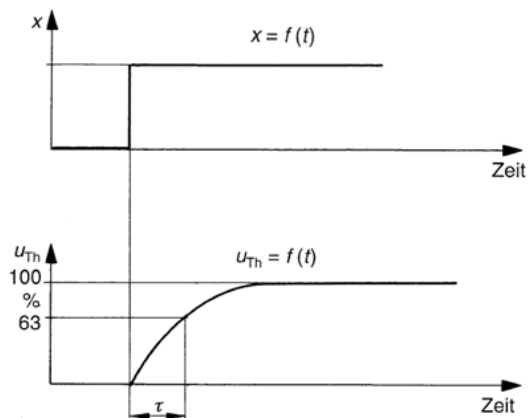
Die Genauigkeit einer Messung sagt aus, wie weit der gemessene Wert x_m vom wahren Wert x_w abweichen kann. Sie wird in Form einer Messunsicherheit (absoluter oder relativer Fehler) angegeben, wobei für die Messunsicherheit ein Vertrauensniveau (Konfidenzniveau) angegeben werden sollte.

Schnelligkeit:

Die Schnelligkeit beschreibt, wie rasch der Messwert dem zu messenden Signal folgt. Die Schnelligkeit wird häufig durch die Zeitkonstante des Messgerätes angegeben. Die Zeitkonstante T sagt aus, nach welcher Zeit 63 % des Endwertes des Ausgangssignals nach sprungförmiger Änderung des Eingangssignals erreicht sind.

Beispiel: $T = 10s \rightarrow$ das bedeutet, dass nach einer sprungförmigen Änderung der Eingangsgröße, 63 % des Endwertes der Ausgangsgröße nach 10 Sekunden erreicht ist. Abbildung 2 veranschaulicht diese Abhängigkeiten: Wobei x die Eingangsgröße darstellt und u die Ausgangsgröße, beide Größen sind abhängig von der Zeit t .

Abbildung 2: Zeitkonstante T



Quelle: Görtler G., 2014, Seite34

Reproduzierbarkeit:

Die Reproduzierbarkeit einer Messung ist eine oft unterschätzte grundlegende Anforderung. Eine Messung ist nur dann etwas wert, wenn sie von anderen Personen nachvollzogen werden kann. Eine lückenlose Dokumentation des Messaufbaus und der Durchführung der Messung ist dafür zwingend erforderlich.

Einfachheit:

Die Einfachheit einer Messung steht meistens in direktem Widerspruch zu den ersten drei Grundanforderungen. In der Einfachheit eines Messaufbaus schlagen sich meist auch die Investitionskosten nieder. Insbesondere aus wirtschaftlichen Aspekten ist daher auch auf die Einfachheit einer Messung zu achten. Im Wesentlichen sollte auf das Ziel einer Messung (Genauigkeit etc.) in den spezifischen Anwendungsfällen geachtet werden.

2.3.3 Messunsicherheit

Einführung

Das Ziel einer Messung ist die Ermittlung des wahren Wertes x_w . Bei jeder Messung entspricht der erzielte Messwert dem wahren Wert immer nur bis auf eine endliche Differenz, diese wird als Messabweichung oder als Fehler bezeichnet.

Die Gründe für Messunsicherheiten sind sehr vielfältig, sie sind teilweise zurückzuführen auf das Messgerät oder auf Umwelteinflüsse wie z. B. Umgebungstemperatur, Luftdruck oder Feuchte. Auch gehen die korrekte Anwendung sowie die Fähigkeit, einen Messwert richtig abzulesen, mit ein. Jede Messung ist mit Unsicherheiten behaftet (fehlerbehaftet). Darum ist bei Angabe des Messwertes neben dem Zahlenwert und der Einheit auch eine Aussage über den Fehler anzugeben. Der jeweiligen Unsicherheit wird weiters ein Vertrauensbereich zugeordnet:

Messergebnis = Messwert \pm Messunsicherheit (Vertrauensniveau)

$$X = x_m \pm \Delta x \quad (\dots\%)$$

Zur Veranschaulichung der korrekten Angabe von Messergebnissen sind nachfolgend zwei Beispiele angeführt:

Formel 1: Temperaturmessung mit Angabe der absoluten Messunsicherheit

$$\vartheta = 20,5 \text{ }^\circ\text{C} \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (95\%)}$$

Dieses Messergebnis wird wie folgt gelesen:

Der gemessene Wert der Temperatur beträgt 20,5 °C. Die Angabe $\pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ mit dem Vertrauensniveau (95 %) bedeutet, dass der wahre Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im Intervall 20,4 °C bis 20,6 °C liegen wird.

Formel 2: Differenzdruckmessung mit Angabe der relativen Messunsicherheit

$$\Delta p = 143 \text{ Pa} \pm 1 \% \text{ (68\%)}$$

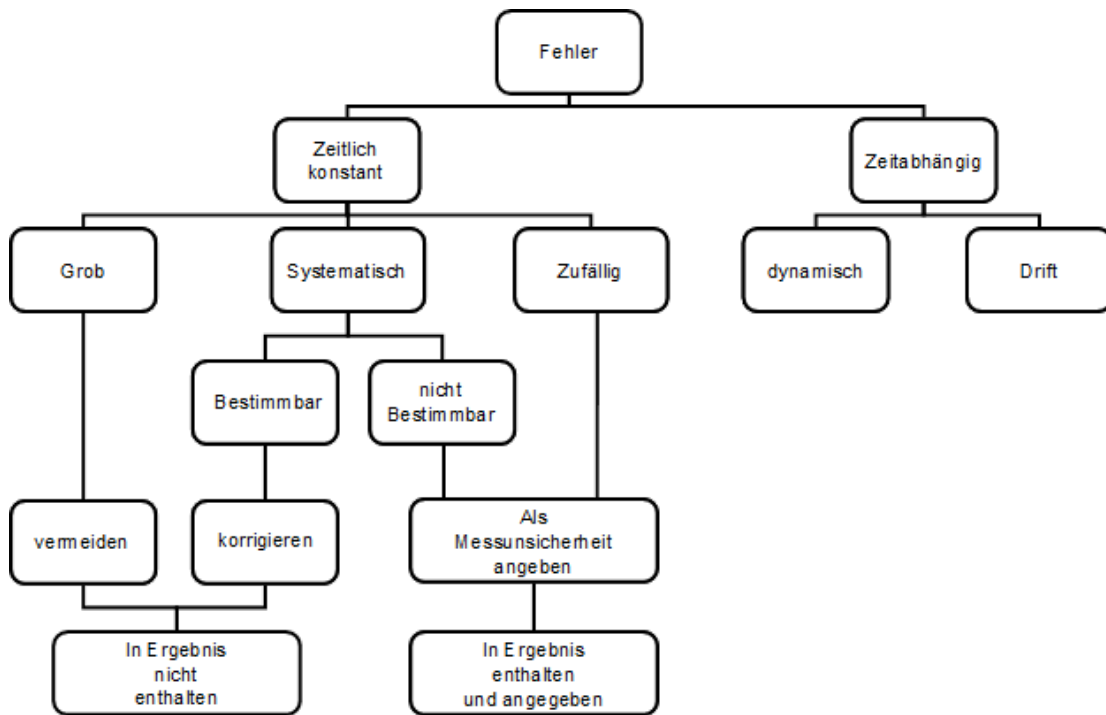
Dieses Messergebnis wird wie folgt gelesen:

Der gemessene Wert des Druckes bei einer Differenzdruckmessung beträgt 143 Pa. Die Angabe $\pm 1 \%$ mit dem Vertrauensniveau (95 %) bedeutet, dass der wahre Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % im Intervall 141,57 Pa bis 144,43 Pa liegen wird. Im

Unterschied zum Temperaturmessungsbeispiel wird hier die Messunsicherheit in % vom Messwert angegeben.

Grundsätzlich wird zwischen zeitlich konstanten und zeitabhängigen Fehlern unterschieden (siehe Abbildung 3). Bei den zeitlich konstanten Fehlern unterscheidet man zwischen groben Messfehlern, systematischen Fehlern und zufälligen Fehlern. Zeitlich abhängige Fehler werden hingegen in dynamische Fehler und Drift unterteilt. Es werden allerdings ausschließlich zufällige Fehler und systematische Fehler (die nicht bestimmbar sind) als Messunsicherheit im Ergebnis angegeben.

Abbildung 3: Arten von Messfehlern

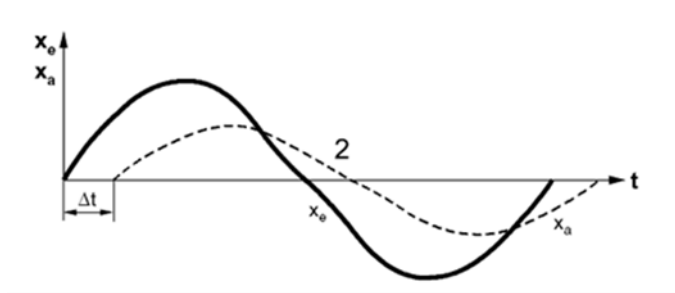


Quelle: Görtler G., 2014, Seite 42

Zeitabhängige Messfehler (Dynamische Fehler und Drift)

Ein dynamischer Fehler entsteht durch das Zeitverhalten des Messgeräts (siehe Abbildung 4). Die Ausgangsgröße x_a folgt der Eingangsgröße x_e stets mit einer zeitlichen Verzögerung. Die Differenz zwischen der Messgröße und dem Messwert, der aus dieser zeitlichen Verzögerung folgt, wird als dynamischer Fehler bezeichnet.

Abbildung 4: Dynamischer Fehler



Quelle: Görtler G., 2014, Seite 44

Als Drift bezeichnet man die maximale Änderung eines messtechnischen Merkmals, z. B. des Nullpunkts unter Referenzbedingungen innerhalb eines definierten Zeitintervalls (z. B. 6 Monate). Der Drift wird auch als Langzeitstabilität eines Messgerätes bezeichnet.

Zeitlich konstante Messfehler (grobe-, systematische- und zufällige Fehler)

Grobe Messfehler entstehen durch unsachgemäße oder falsche Verwendung eines Messgerätes. Beispiele für derartige Messfehler sind:

- Messgröße befindet sich nicht innerhalb des Messbereiches
- Messgerät wurde falsch eingebaut

Systematische Fehler haben einen bestimmten Betrag und ein bestimmtes Vorzeichen, das heißt sie sind entweder positiv oder negativ. Bei Wiederholungsmessungen treten sie stets mit gleichem Betrag und Vorzeichen auf. Die Wiederholungsmessung ergibt keinen Aufschluss über systematische Abweichungen. Erst eine Vergleichsmessung mit einem anderen (genaueren) Messgerät lässt systematische Abweichungen erkennen. Durch die Vergleichsmessung werden systematische Abweichungen erfassbar und korrigierbar. Beispiele für derartige Messfehler sind:

- Erhöhung des Widerstandes eines Metallwiderstandstemperatursensors durch Alterung (Langzeitstabilität)
- Offsetfehler eines Verstärkers
- Temperatureinwirkung auf einen piezoresistiven Drucksensor
- Nicht kalibrierte Messgeräte

Zufällige Fehler sind in Größe und Betrag nicht vorhersehbar. Eine Korrektur ist nicht möglich. Häufige Wiederholung der Einzelmessung oder Herstellerangaben lassen jedoch eine Beurteilung des Messwertes zu. Sie sind mit Methoden der Statistik beschreibbar. Beispiele für zufällige Fehler sind:

- Unvollkommenheiten des Messgerätes: Verformungen, Kippungen, Abnutzungen, Einstellungen, Reibung
- Unbestimmbare Umgebungseinflüsse: Temperaturen, Schwingungen, Verschmutzungen

Angaben der Messunsicherheit

Die Messunsicherheit u_{ges} ist ein Maß dafür, wie „gut“ ein Messergebnis ist. Sie setzt sich durch geometrische Addition aus dem (unbekannten) systematischen Beitrag u_s und dem zufälligen Beitrag u_z zusammen.

Bekannte systematische Abweichungen (Fehler) sollten berücksichtigt und durch Korrektur ausgeglichen werden. Unbekannte systematische Abweichungen u_s können aus Herstellerunterlagen entnommen werden, oder müssen geschätzt werden. Zufällige Abweichungen u_z können durch die Standardabweichung einer Wiederholungsmessungsreihe bestimmt, oder Datenblättern entnommen werden. Die Messunsicherheit wird als Abweichungsbereich mit dem zugehörigen Vertrauensniveau dem Messergebnis x hinzugefügt.

Formel 3: Messergebnis

$$x = \bar{x} \pm u_{ges} \quad (\text{Vertrauensniveau})$$

x	Messergebnis
\bar{x}	Mittelwert der Messungen (oder Einzelmessung)
u_{ges}	gesamte Messunsicherheit

Formel 4: Gesamte Messunsicherheit

$$u_{\text{ges}} = \sqrt{u_s^2 + u_z^2}$$

- u_{ges} gesamte Messunsicherheit
- u_s Messunsicherheit aus systematischen Fehlern
- u_z Messunsicherheit aus zufälligen Fehlern

Bei einer einzelnen Messung kann die Messunsicherheit aus Datenblättern oder aus bereits vorhandenen Messreihen entnommen werden. In manchen Fällen ist im Datenblatt bereits ein Vertrauensniveau angegeben.

Messgeräte werden entsprechend in Genauigkeitsklassen (Güteklassen) eingeteilt (siehe Tabelle 7). Mit der Genauigkeitsklasse 0,2 wird zum Beispiel ausgedrückt, dass der maximale Fehler 0,2 % des Skalenendwertes ist. Der Fehler wird dabei im Sinne einer Fehlergrenze verstanden (eine Fehlergrenze darf vom Messgerät nie überschritten oder unterschritten werden – Vertrauensbereich 100 %). Für die Einteilung entscheidend ist der relative Fehler. Allgemein wird unterschieden zwischen Betriebsmessgeräten (bis ± 5 % Abweichung) und Feinmessgeräte (bis ± 0,5 % Abweichung).

Tabelle 7: verschiedene Genauigkeitsklassen für Feinmessgeräte

Klasse	Zulässiger Anzeigefehler in vom Skalenendwert
0,1	0,1
0,2	0,2
0,5	0,5

Tabelle 8: verschiedene Genauigkeitsklassen für Betriebsmessgeräte

Klasse	Zulässiger Anzeigefehler in vom Skalenendwert
1,0	1,0
1,5	1,5
2,5	2,5

Quelle Tabelle 7 und 8: Görtler G., 2014, Seite 51

Aus der Genauigkeitsklasse lässt sich ein absoluter Messbereichsfehler errechnen.

Formel 5: Absoluter Messbereichsfehler

$$\Delta x_{\max} = \pm \frac{G_K [\%] x_E}{100 [\%]}$$

Δx_{\max} absoluter maximaler Fehler (Fehlergrenze)
 G_K Genauigkeitsklasse
 x_E Messbereichsendwert

Praxisbeispiele zur Messunsicherheit

Beispiel 1: Messunsicherheit eines Druckmessgerätes

Der Hersteller gibt für ein Luftdruckmessgerät folgende Spezifikationen an:

Genauigkeit: $\pm 0,6$ mb v. M. (Vertrauensniveau 95 %, $k = 2$) bei Bezugstemperatur von 20 °C

Lösung: Die Angabe des Messergebnisses bei einer Anzeige von 1.000 mb lautet:

$$p = 1.000,0 \text{ mb} \pm 0,6 \text{ mb} (k = 2)$$

oder $p = 1.000,0 \text{ mb} \pm 0,6 \text{ mb} (95 \%)$

Beispiel 2: Messunsicherheit eines Durchfluss-Messgerätes

Bei einem Durchflussmessgerät wurden dem Datenblatt folgende Werte entnommen:

Messbereich: 0 – 200 m³/h

Genauigkeitsklasse: 1,5

Bei einer Durchflussmessung wurde ein Messwert $\dot{V} = 35,3 \text{ m}^3 / \text{h}$ aufgezeichnet.

Lösung: Die Messunsicherheit bestimmt sich zu

$$\Delta \dot{V} = \pm \frac{G_K[\%] x_E}{100[\%]} = \frac{1,5 \cdot 200}{100} = 3 \text{ m}^3 / \text{h}$$

Das Ergebnis der Messung lautet:

$$\underline{\underline{\dot{V} = 35,3 \text{ m}^3 / \text{h} \pm 3,0 \text{ m}^3 / \text{h}}} \quad (\text{Fehlergrenze}) \text{ beziehungsweise}$$

$$\underline{\underline{\dot{V} = 35,3 \text{ m}^3 / \text{h} \pm 8,5 \%}} \quad (\text{Fehlergrenze})$$

Angaben von Messunsicherheiten in Datenblättern

Da die Angaben der Messunsicherheit in Datenblättern nicht genormt sind, werden von den Herstellern häufig unterschiedliche technische Daten bereitgestellt. Die Messunsicherheiten können entweder als relative oder absolute Fehler angegeben werden. Diese Fehlerangaben können sich auf den Messbereichsendwert (= Full Scale) oder den aktuellen Messwert beziehen. Meist beziehen sie sich auf den Messbereichsendwert. Problematisch ist hierbei, dass bei kleinen Messwerten der Fehler größer sein kann als der gemessene Wert, da sich dieser auf den Endwert des Messbereichs bezieht.

Meist ist auf Datenblättern kein Vertrauensniveau angegeben. Es handelt sich in solchen Fällen sehr häufig um Fehlergrenzen (Vertrauensbereich 100 %). Gewissheit kann man durch eine Nachfrage beim Hersteller erlangen.

3 Empfohlene Messverfahren für unterschiedliche Einsatzbereiche

In nachfolgenden Tabellen 9 und 10 erfolgt eine Auflistung unterschiedlicher Messverfahren für typische Einsatzbereiche in Industrie und Gewerbe. Hierbei wurde unterschieden zwischen mobilen und stationären Messverfahren:

Tabelle 9: Empfohlene mobile Messverfahren für unterschiedliche Einsatzbereiche

Einsatzbereiche	Durchfluss	Elektrische Leistungsaufnahme	Temperatur
Dampfsysteme	Kein Messverfahren	Kein Messverfahren	Kein Messverfahren
Lüftungsanlage	Flügelradanemometer	Digitales Multimeter	Kein Messverfahren
Pumpensysteme	Ultraschall (Clamp-on-System)	Digitales Multimeter	Kein Messverfahren
Druckluft	Ultraschall (Clamp-on-System)	Digitales Multimeter	Kein Messverfahren
Kälteanlage	Ultraschall (Clamp-on-System)	Digitales Multimeter	Thermoelement, Widerstandsthermometer

Tabelle 10: Empfohlene stationäre Messverfahren für unterschiedliche Einsatzbereiche

Einsatzbereiche	Durchfluss	Druck	Temperatur
Dampfsysteme	Vortex, Wirkdruck, Coriolis	Manometer, Thermischer Drucktransmitter	Thermoelement, Widerstandsthermometer
Lüftungsanlage	Vortex, Wirkdruck, Thermische Massemessung	Kein Messverfahren	Kein Messverfahren
Pumpensysteme	Wirkdruck, Magnetisch induktiv	Kein Messverfahren	Kein Messverfahren

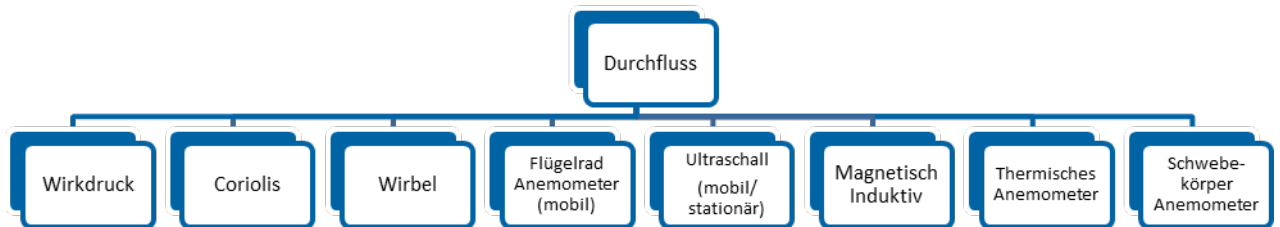
Einsatzbereiche	Durchfluss	Druck	Temperatur
Druckluft	Thermische Massemessung	Manometer, Thermischer Drucktransmitter	Kein Messverfahren
Kälteanlage	Wirkdruck, Magnetisch induktiv, Ultraschall, Vortex	Manometer, Thermischer Drucktransmitter	Thermoelement und Widerstandsthermometer

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4 Durchflussmessung

Der Durchfluss zählt nach Temperatur und Druck zu den wichtigsten Messgrößen in der industriellen Messtechnik. Die nachfolgende Abbildung 5 gibt einen Überblick über die wichtigsten Verfahren zur Messung von Durchfluss:

Abbildung 5: Überblick Durchflussmessverfahren



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Der Volumendurchfluss wird oftmals auch als Volumenfluss oder Volumenstrom und entsprechend der Massendurchfluss als Massenfluss oder Massenstrom bezeichnet.

In vielen Anwendungsfällen ist der Massenstrom die gesuchte Größe. Der Massenstrom in einem geschlossenen System ist konstant, während der Volumenstrom von kompressiblen Fluiden von der Dichte und somit auch vom Druck und der Temperatur abhängt:

Formel 6: Volumenstrom

$$\text{Volumenstrom: } \dot{V} = \frac{dV}{dt}$$

Formel 7: Massenstrom

$$\text{Massenstrom: } \dot{m} = \frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt}$$

4.1 Auswahl des richtigen Messverfahrens

Zentral für jede Messung ist die Auswahl des richtigen Messverfahrens. Als erstes sollten alle nötigen Informationen über den zu messenden Prozess beziehungsweise das Medium gesammelt werden. Folgende Informationen beziehungsweise Kriterien über Medium, Prozess beziehungsweise Messstrecke können aufgelistet werden:

Aggregatzustand: Gasförmig, flüssig, dampfförmig, fest

Eigenschaften der Messstoffe:

- Sauber oder verschmutzt
- Chemisch stark aggressiv
- Enthält dieser Feststoffanteile
- Gasbläschen in der Flüssigkeit
- Elektrische Leitfähigkeit
- Viskosität
- Zweiphasengemisch
- Schlämme
- Abrassiv

Eigenschaften der Messstrecke:

- Anzutreffender Rohrdurchmesser z. B. DIN 25 bis 100
- Druckverlust hoch oder niedrig
- Betriebsdruck z. B. 10 bis 20 bar
- Betriebstemperaturen z. B. -40 bis +400 °C
- Re-Zahlen turbulent, laminar, welcher Bereich circa?
- Ein- und Auslaufstrecken: entsprechende stehen zur Verfügung oder nicht
- Fließrichtung des Mediums nur in eine Richtung?

- Explosionsschutz ja oder nein
- Rohrmaterial Stahl / Kunststoff oder ähnliches
- Einbauort Vergraben / raue Umgebung

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Basierend auf den genannten Kriterien kann mit Hilfe der nachfolgenden Tabelle 11 das geeignete Durchflussmessprinzip für spezifische Anwendungsfälle gewählt werden:

Abbildung 6: Auswahltabelle Durchflussmessverfahren

Messprinzipien	Eingeschaften der Messstoffe										Eigenschaften der Messstrecke u. Messgerät										
	flüssig	gasförmig	Dampf	sauber	verschmutzt	chemisch stark aggressiv	Feststoffanteile	Gasbläschen	keine elektrische Leitfähigkeit	Viskosität	kleiner Rohr Durch. DN 2-25	großer Rohr Durch. DN 200-2500	geringer Druckverlust Δp	hoher Betriebsdruck > 40bar	hohe Betriebstemperatur > 120°C	kleine Re-Zahlen (10-10000)	kurze Ein- und Auslaufstrecken	Messdynamik	Messgenauigkeit	Wiederholbarkeit	Explosionsgefährlicher Umgebung
Magn. Induktiv	1	5	5	1	3	2	1	5	5	5	1	1	1	1	1	1	100/1	0,2-0,5%v.M.	0,1% v.M.	1	
Schwebekörper	1	1	4	1	5	3	5	4	1	5	1	5	2	1	1	3	2	10/1	0,5-1%v.E.	k.A.	4
Blende	1	1	1	1	4	5	4	4	1	5	2	3 ^[1]	4	1	1	3	5	10/1	0,6-2%v.E.	0,5%v.M.	5
Venturi-Rohr	1	5	5	1	2	4	4	k.A.	1	5	2	3 ^[2]	3	1	1	3	5	10/1	0,6-2%v.E.	0,5%v.M.	k.A.
Ultraschall-Laufzeit	1	5	5	1	5	1	3	5	1	5	3	1	1	1	1	3	4	20/1	0,5% v.M. -2%v.E.	0,25%v.M.	k.A.
Ultraschall-Doppler	1	5	5	5	5	1	3	5	1	5	5	1	1	1	1	5	4	20/1	1%v.M.-2%v.E.	0,5%v.M.	k.A.
Coriolis	1	1	1	1	2	1	2	3	1	1	1	4	4	1	1	2	1	100/1	0,05-0,2%v.M.	0,2%v.M.	k.A.
Flügelrad Anemometer	5	1	5	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1	5	1	1	1	k.A.	2	k.A.	k.A.	k.A.	3% v.M.	k.A.	k.A.
Wirbelzähler (Vortex)	1	1	1	1	4	5	5	4	1	5	3 ^[4]	3 ^[5]	3	2	1	3	4	10/1	0,5-1%v.M.	0,2%v.M.	k.A.
Therm. Anemometer	1	1	5	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	1	5			1	5	2	k.A.	k.A.	10/1	1,5%v.M.	k.A.	k.A.

Bewertungsskala

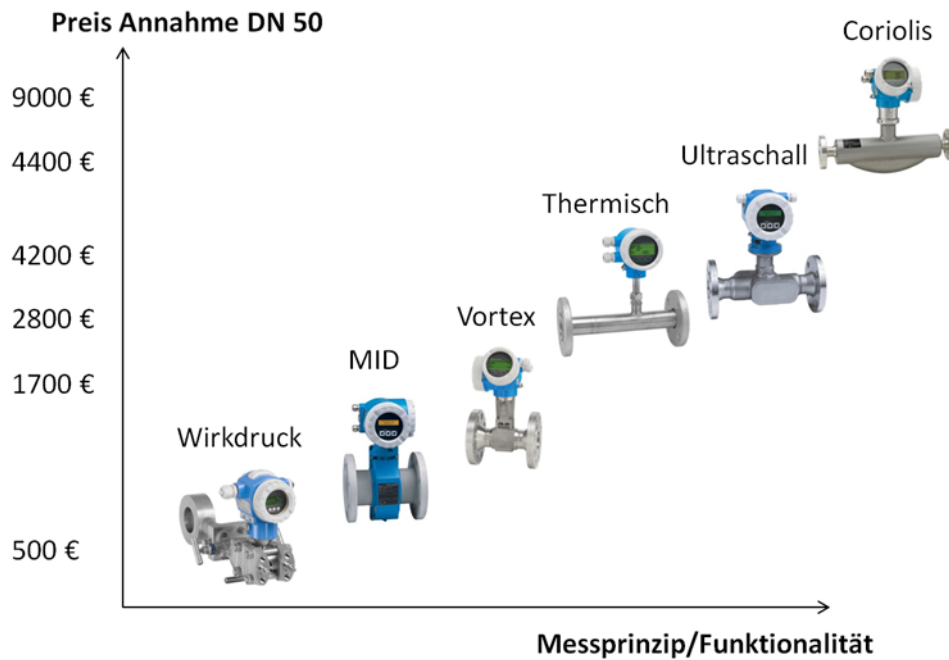
sehr gut	1	[1] bis DN1000, darüber Bewertung: 5
gut	2	[2] bis DN4000
geeignet	3	[3] bis DN150
möglich (bes. Bed.)	4	[4] erst ab DN15, darunter Bewertung: 5
nicht geeignet	5	[5] bis DN400, darüber Bewertung: 5
keine Angabe	k.A.	
vom Endwert	v.E.	
vom Messwert	v.M.	

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4.1.1 Wirtschaftlichkeit

Der Aspekt der Wirtschaftlichkeit entscheidet oftmals darüber, welches Messprinzip schlussendlich verwendet wird. Die Abbildung 7 gibt einen qualitativen Kostenüberblick der verschiedenen Durchflussmesstechnologien:

Abbildung 7: Qualitativer Kostenüberblick von stationären Durchflussmessgeräten



Quelle: Endress+Hauser, 2015

4.1.2 Checkliste für die Installation von Durchflussmessungen

Nachfolgende Aufzählung gibt einen Überblick über Punkte, welche bei der Installation von Durchflussmessungen beachtet werden sollten:

- Ist das Messgerät richtig ausgerichtet (Einbaulage, Einbauposition)?
- Sind genügend lange Ein- und Auslaufstrecken vorhanden?
- Gibt es externe zu dämpfende Vibrationen oder Strömungs-Pulsationen?
- Ist ein Filter oder Strömungsgleichrichter eingebaut? Wenn nein, wo soll er bezüglich des Durchfluss-Messgerätes installiert werden?
- Befindet sich Gas in einer Rohrleitung mit Flüssigkeit oder umgekehrt Flüssigkeit mit Gas (mehrphasige Messstoffe)?
- Müssen Messgeräte parallelgeschaltet werden, um den gesamten Durchflussbereich zu erfassen?
- Ist eine Bypass-Umleitung für regelmäßige Inspektionen erforderlich? Lohnt sich dieser Aufwand?
- Gibt es strömungsabwärts Regelventile und sind Absperrventile für Wartungsarbeiten vorhanden?
- Treten in der Nähe des Messgerätes elektrische Störfelder auf?

- Ist genügend Platz für Wartungsarbeiten oder für einen möglichen Ein- und Ausbau des Messsystems vorhanden?
- Ist das Messsystem richtig geerdet. Signalleitungen richtig geschirmt?
- Ist die Zugänglichkeit zum Gerät bzgl. Ablesen / Bedienung / Parametrierung gewährleistet?
- Speziell bei der Durchflussmessung in Dampfsystemen zu beachten:
 - Ist das Durchflussmessgerät (Steam Meter) an einem vertikalen oder horizontalen Rohrstück angebracht?
 - (Einige Steam Meter müssen horizontal im Rohrsystem eingebaut werden, da diese sonst falsche Messergebnisse liefern – Berechnungsmethode funktioniert dann nicht)
 - Fließt der Dampf abwärts oder aufwärts?
 - Fließt der Dampf nur in eine Richtung oder auch wieder zurück?
 - (Manche Steam Meter können durch Rückflüsse von Dampf stark beschädigt werden)
 - Befinden sich die Dampfmesser in einem tiefen oder hohen Punkt im Rohrsystem?
 - Sind im Dampfsystem ausreichend Belüftungsöffnungen vorhanden beziehungsweise Kondensatableiter?
 - Ist die Reynolds-Zahl ≥ 10.000 ?
 - (Liegt diese darunter kann es zu großen Messfehlern bei der Dampfmessung kommen. Genaue Erklärung der Reynoldszahl siehe **Anhang Kapitel 11**)

In den nachfolgenden Kapiteln wird im Detail auf unterschiedliche Messverfahren zur Durchflussmessung eingegangen.

4.2 Wirkdruckverfahren

4.2.1 Erklärung Messprinzip

Trotz vieler Neuentwicklungen ist nach wie vor das Wirkdruckverfahren das meistverwendete Messverfahren. Das Messprinzip von Wirkdruck-Durchflussmessaufnehmern beruht auf einer durch Verengung des Strömungsquerschnittes verursachten Druckdifferenz, diese ist direkt abhängig vom jeweiligen Durchfluss. Unterschieden wird grundsätzlich zwischen vier verschiedenen Arten von Drosselgeräten, die für das Wirkdruck-Messverfahren eingesetzt werden:

- **Blenden**

Die Messblende erzeugt eine Druckdifferenz durch eine kreisförmige Verengung im Rohrquerschnitt. Durch die damit verbundene Fließgeschwindigkeitserhöhung wird der statische Druck reduziert. Die Druckdifferenz vor beziehungsweise nach der Messblende ist ein Maß für den Durchflussstrom.

- **Düsen**

Durch Verwendung einer Düse als Drossелеlement entstehen geringere Druckverluste wie bei einer Blende. Nachteil der Düsen ist, dass diese schwieriger herzustellen sind als Blenden und somit deutlich teurer sind.

- **Venturi-Rohre**

Bei Verwendung von Venturi-Rohren oder Venturi-Düsen sind nur sehr kleine Druckverluste im Vergleich zu Blenden hinzunehmen. Aufgrund der Herstellungskosten ist der Preis um einiges höher wie der der Blenden.

- **Prandtlsonde (Staudruckrohr)**

Die Prandtlsonde ist ein Messgerät zur mobilen Messung der Fließgeschwindigkeit eines Mediums. Mit Hilfe des Staudruckrohres werden der statische Druck und der Gesamtdruck in z. B. der Luftströmung gemessen. Die Differenz von Gesamtdruck und dem statischen Druck ergibt den dynamischen Druck (= Staudruck), welcher ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit ist.

Nachfolgende Tabelle 12 gibt einen Überblick über den Druckverlust und die allgemeine Preisgestaltung der zuvor beschriebenen Drossелеlemente:

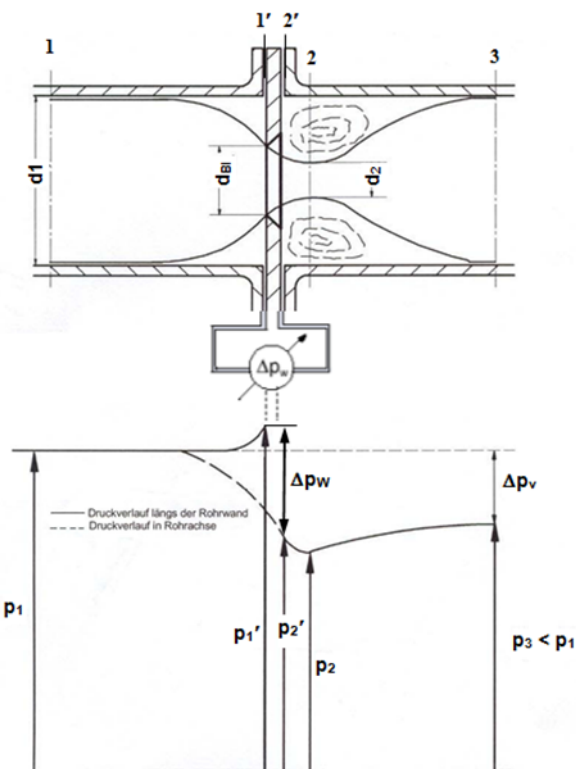
Tabelle 11: Druckverluste

Drosselgeräte	Druckverlust des Wirkdrucks (Differenzdrucks)	Höhe des Druckverlusts	Preis
Normblende	30 bis 80 %	hoch	gering bis mittel
Normdüse	10 bis 15 %	mittel	mittel bis hoch
Venturi-Rohr	5 bis 15 %	sehr klein	sehr hoch
Staudruckrohr	vernachlässigbar	vernachlässigbar	gering

Quelle: TetraTec Instruments, diverse Datenblätter, eigene Darstellung, 2015

Das Messprinzip von Wirkdruck-Durchflussmessaufnehmern wird nachfolgend anhand einer Messblende gezeigt (siehe Abbildung 8). Das Prinzip beruht auf einer durch Verengung des Strömungsquerschnittes verursachten statischen Druckdifferenz $\Delta p_w = p_2' - p_1'$, diese wird Wirkdruck genannt. Basierend darauf kann der Volumenstrom bestimmt werden.

Abbildung 8: Messprinzip Wirkdruckverfahren mit Blende



Quelle: Görtler G., 2014, Seite 123

Der Druckverlauf längs der Rohrwand in Abbildung 7 ist wie folgt zu verstehen: Durch den Staudruck an der Druckentnahmestelle 1' erhöht sich der im Rohr herrschende Druck von p_1 auf p_1' . Die Blende als un stetige Querschnittsverengung bewirkt eine starke Strahlkontraktion. Dadurch sinkt der statische Druck an der Entnahmestelle 2' auf p_2' , es entsteht der Wirkdruck $\Delta p_w = p_2' - p_1'$. Der Querschnitt der Strömung verengt sich noch weiter auf den Durchmesser d_2 und der Druck nimmt auf p_2 ab. Nach der Blende weitet sich der Strömungsquerschnitt wieder auf den Rohrdurchmesser d_1 . Durch Reibungsverluste an der Blende entsteht ein bleibender Druckverlust $\Delta p_v = p_3 - p_1$ (nicht zu verwechseln mit dem Wirkdruck), der bei der Auslegung des Rohrnetzes mitberücksichtigt werden muss.

Mithilfe der Bernoulligleichung kann folgende Abhängigkeit hergestellt werden:

Formel 8: Bernoulligleichung

$$\dot{V} = \alpha \cdot A_{Bl} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_1' - p_2')} = \alpha \cdot A_{Bl} \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p_W}$$

\dot{V}	Volumenstrom [m ³ /s]
α	Durchflusszahl
A_{Bl}	Blendenquerschnitt [m ²]
ρ	Dichte des Fluids [kg/m ³]
p_1'	Statischer Druck im Punkt 1' (Druckentnahmestelle vor der Blende) [Pa]
p_2'	Statischer Druck im Punkt 2' (Druckentnahmestelle nach der Blende) [Pa]
Δp_W	Wirkdruck [Pa], $\Delta p_W = p_1' - p_2'$

Die Formel 8 zeigt, dass der Wirkdruck proportional zum Quadrat des Volumenstroms ist, und somit aufgrund des gemessenen Wirkdrucks der Volumenstrom bestimmt werden kann.

4.2.2 Anwendungsgebiet

Das Wirkdruckmessverfahren ist universell einsetzbar für Flüssigkeiten, Gase und auch Dampf. Ein Hauptanwendungsgebiet ist die Messung in Heißwasser- und Kühlkreisläufen sowie die Erfassung von Dampf und Kondensat bei sehr hohen Temperaturen in Sekundärkreisläufen. Die zur Wirkdruckerzeugung in die Rohrleitung eingebrachten Drosselelemente sind robuste und einfache mechanische Bauteile ohne bewegte Elemente, die harten Betriebsbedingungen ausgesetzt werden können. Insbesondere bei großen Nennweiten wird aufgrund wirtschaftlicher Aspekte - vermehrt auf das Wirkdruckverfahren zurückgegriffen.

4.2.3 Messaufbau

Das Wirkdruck-Messverfahren kann ausschließlich bei eindeutigen Strömungsverhältnissen einwandfrei arbeiten beziehungsweise eingesetzt werden. Ungleichmäßige Geschwindigkeitsprofile verhindern die rotationsymmetrische Strömungseinschnürung im Drosselgerät und verändern dadurch den zu messenden

Wirkdruck. Zu beachten ist, dass das Drosselgerät zwischen zwei geraden zylindrischen Rohrstrecken eingebaut wird, in denen sich keine Hindernisse oder Rohrabweichungen befinden. In der nachfolgenden Abbildung 9 sind Empfehlungen hinsichtlich Einbauerfordernissen zu entnehmen:

Abbildung 9: Ein- und Auslaufstrecken

	Blenden, Düsen, Venturi-Düsen				Klassisches Venturi-Rohr		
	Durchmesser Verhältnis β				Durchmesser Verhältnis β		
	0,2	0,4	0,6	0,8	0,3	0,5	0,75
Einfacher 90°-Krümmer oder T-Stück	10	14	18	46	0,5	1,5	4,5
2 oder mehr 90°-Krümmer in verschiedenen Ebenen	(34)	(36)	48	80	0,5	(8,5)	(29,5) ¹⁾
Diffusor von 0,5 D auf D über eine Länge von 1...2 D	16	16	22	54			
Diffusor von 0,75 D auf D über eine Länge von 1 D					1,5	2,5	6,5
Schieber voll geöffnet	12	12	14	30	1,5	3,5	5,5
Auslaufseite	4	6	7	8	4	4	4

¹⁾ Derartige Störungen können auch nach 40 D nachwirken, daher die Angaben in Klammern.

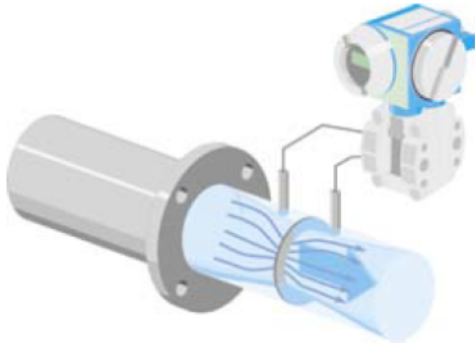
Quelle: Frenzel F. et alii, 2011, Seite 73

Im Falle von Störungen entlang der Messtrecke (Drallströmung etc.) können die empfohlenen Ein- beziehungsweise Auslaufstrecken mit Hilfe eines Strömungsgleichrichters verkürzt werden.

Nachfolgend wird beispielhaft der Messaufbau mit einer Blende erläutert:

Vor und nach der Blende befindet sich jeweils eine Druckmessstelle - hier werden die beiden unterschiedlichen Drücke mit Drucksensoren aufgenommen und über Wirkdruckleitungen an einen Differenzdrucktransmitter beziehungsweise Differenzdruckumformer weitergegeben (siehe Abbildung 10). Der daraus resultierende Differenzdruck wird mithilfe dieser Umformer ermittelt. Durch die gegebene Abhängigkeit des Differenzdruckes vom jeweiligen Volumenstrom berechnet dann der Differenzdruckumformer den Volumenstrom und zeigt ihn auf dem Display an. Für die Durchflussmessung mit einem Venturi-Rohr oder Düse gilt ein ähnlicher Messaufbau.

Abbildung 10: Messaufbau - Wirkdruckmessung mit Blende



Quelle: Endress+Hauser Prospekt – Durchfluss, Seite 18

4.2.4 Typische Kenngrößen

Nachfolgender Tabelle 14 sind typische Kenngrößen zur Durchflussmessung mittels Wirkdruckverfahren zu entnehmen:

Tabelle 12: Wirkdruckverfahren – Merkmale für Messblenden

Messmedium	Flüssigkeiten, Gas, Dampf
Messgenauigkeit (typisch)	0,6 bis 2 % v. E. (vom Endwert daher für geringe Durchflüsse nicht geeignet)
Wiederholbarkeit	0,5 % v. M.
Messdynamik	10:1
Minimal erforderliche Reynoldszahl	3.000
Einbaugrößen	DN 1 bis 1.000
Temperaturbereich	-200 bis 1.000 °C
maximaler Druck	500 bar
Druckverlust bei maximalem Durchfluss Q_{\max}	$8 \times [v^2/(2 \cdot g)]^1$
Einlaufstrecken/Auslaufstrecken	40 x DN / 10 x DN

¹ $[v^2/(2 \cdot g)]$ - dieser Term wird auch als Geschwindigkeitshöhe bezeichnet. Es handelt sich um jenen Anteil der Förderhöhe im System, der die kinetische Energie enthält. Der Term ist mit folgenden Einheiten zu berechnen: v = Fluidgeschwindigkeit in [m/s] und g = Fallbeschleunigung in [m/s²]

Messbereich	0 bis 5.000 t/min; 0 bis 5.000m ³ /h
Kostenspanne	Siehe Abbildung 7

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Tabelle 13: Wirkdruckverfahren – Merkmale für Venturirohre

Messmedium	Flüssigkeiten, Gas
Messgenauigkeit (typisch)	0,6 bis 2 % v. E. (vom Endwert daher für geringe Durchflüsse nicht geeignet)
Wiederholbarkeit	0,5 % v. M.
Messdynamik	10:1
Minimal erforderliche Reynoldszahl	10.000
Einbaugrößen	DN 25 bis 4.000
Temperaturbereich	-200 bis 1.000 °C
maximaler Druck	600 bar
Druckverlust bei maximalem Durchfluss Q_{max}	$4 \times [(v^2 / (2 \cdot g))]$
Einlaufstrecken/Auslaufstrecken	20 x DN / 5 x DN
Messbereich	0 bis 5.000 t/min; 0 bis 5.000m ³ /h
Kostenspanne	Siehe Abbildung 7

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4.2.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Je nach Anwendung kompakte oder getrennte Ausführung wählbar
- Optimiert für minimale Druckverluste, höchste Genauigkeit oder maximale Messdynamik
- Weltweit standardisiertes Messverfahren nach ISO 5167
- Universell einsetzbar für Flüssigkeiten, Gase und Dampf
- Für extreme Prozessbedingungen bis 400 bar und bis 1.000 °C
- Robust, da rein mechanisch und ohne bewegte Teile

- Messumformer während des Betriebes ohne Prozessunterbrechung jederzeit austauschbar (z. B. für Instandhaltung oder zur Modernisierung der Messstelle)
- Erhältlich über einen großen Nennweitenbereich (DN 10...2.000)

Nachteile

- Wirkdruck steigt quadratisch mit dem Durchfluss - Drucksensor braucht also sehr großen Messbereich
- Messbereich im Vergleich zu anderen Durchflussmessgeräten eingeschränkt – Verlust an Genauigkeit im unteren (kleinen) Messbereich
- Druckverlust
- Sehr lange Ein- und Auslaufstrecken erforderlich
- Aufwendige Installation durch Wirkdruckleitung, Armaturen und Messwertaufnehmer
- Wartungsintensiv – regelmäßige Überprüfung der Kantenschärfe erforderlich

4.2.6 Praxistipps

Bei niedrigen Betriebsdrücken ist aufgrund der Messgenauigkeit der Einsatz von Blenden nicht zu empfehlen. Man greift besser auf das Vortex-Prinzip oder die Wirkdruckmessung mit einem Venturirohr zurück (siehe auch Nachteile des Wirkdruck-Messverfahren).

4.3 Coriolis-Prinzip

4.3.1 Erklärung Messprinzip

Das Messprinzip der Coriolis-Durchflussmessgeräte beruht auf der Entstehung von Corioliskräften. Wird eine in Bewegung befindliche Masse einer Schwingung quer zur Bewegungsrichtung ausgesetzt, so treten Corioliskräfte auf. Die Schwingungen sind abhängig vom jeweiligen Massestrom und daher auch in weiterer Folge die Corioliskräfte. Bei einem Coriolis-Massedurchflussmessgerät werden die Messrohre in Schwingung versetzt. Fließt ein Medium (= Masse) durch diese schwingenden Messrohre, so entstehen Corioliskräfte. Die dadurch veränderte Rohrschwingungsgeometrie wird mittels Sensor ein- und auslaufseitig als „Phasendifferenz“ erfasst, vom Messsystem ausgewertet und daraus der Massedurchfluss abgeleitet. Die Schwingfrequenz der Messrohre ist zudem ein direktes Maß für die Messstoffdichte. Für die rechnerische Kompensation von

Temperatureffekten wird zusätzlich die Messrohrtemperatur erfasst. Diese Temperatur entspricht sogleich der Prozesstemperatur.

Formel 9: Berechnung der Corioliskraft

$$\vec{F} = 2m(\vec{\omega} \cdot \vec{v})$$

\vec{F}	Corioliskraft [N]
m	Masse [kg]
$\vec{\omega}$	Winkelgeschwindigkeit [rad/s]
\vec{v}	Geschwindigkeit [m/s]

4.3.2 Anwendungsgebiet

Coriolis-Massedurchflussmessgeräte sind für hohe Drücke und Temperaturen, sowie für den Einsatz in explosionsgefährdeten Bereichen konzipiert. Somit eröffnen sich unter anderem folgende Einsatzgebiete beziehungsweise wird dieses Messprinzip oft verwendet für:

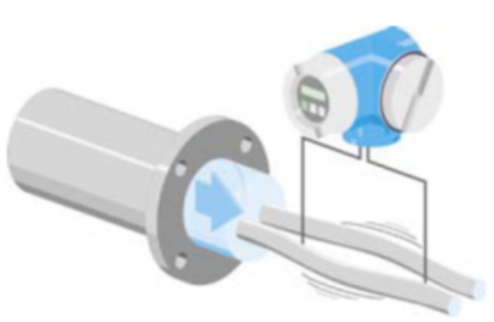
- Erdgaszapfsäulen
- Pipeline-Verrechnungsmessungen
- Dosieranlagen
- Lebensmittelindustrie
- Pharmazie

Die extrem hohe Messgenauigkeit und die oft schwierig zu messenden Produkte sind auch der Grund dafür, dass die Coriolis-Massedurchflussmessgeräte auch hauptsächlich in der Lebensmittelindustrie oder Pharmazie eingesetzt werden.

4.3.3 Messaufbau

Diese speziellen Massedurchflussmesser werden meist aus zwei metallischen Rohren hergestellt, welche die Form eines Bogens, Halbkreises, Deltaform oder Vollkreises haben. Die heutige Gerätegenerationen der Coriolis-Massedurchflussmesser verwendet oft die Geradrohrgeometrie. Die Abbildung 11 zeigt einen derartigen Messaufbau (Geradrohrgeometrie mit dem dazugehörigen Messumformer):

Abbildung 11: Messaufbau Coriolisprinzip



Quelle: Endress+Hauser Prospekt

Nicht nur die Geometrie, sondern auch die Anzahl der Messrohre spielt bei der Coriolis-Massedurchflussmessung eine große Rolle. Es wird zwischen zwei Arten bezüglich des Messaufbaus unterschieden:

- Doppelrohrprinzip
- Einrohrprinzip

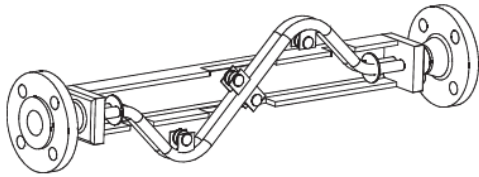
Das Doppelrohrprinzip macht heute circa 80 bis 90 % aller Anwendungen aus. Daher wird nachfolgend auf einen typischen Messaufbau Doppelrohrprinzips eingegangen:

Doppelrohr-Messprinzip

Die überwiegende Zahl der Coriolis-Durchflussmesser folgt heute im Aufbau dem Doppelrohrprinzip mit zwei gebogenen Messrohren (siehe auch Abbildung 12). Der Vorteil dieses Aufbaus ist die Temperaturbeständigkeit und insbesondere die Entkopplung der Messrohrschwingung gegenüber Schwingungen von außen, da die Amplituden der Schwingung, die zur Bestimmung der Phasenverschiebung benötigt werden, zwischen den Messrohren und nicht gegenüber dem Gehäuse gemessen werden. Eventuelle Schwingungen des Gehäuses haben so keinen Einfluss auf das Messergebnis.

Aufgrund des wesentlich stabileren und deutlicheren Signals bietet dieses Messprinzip die genauesten Messungen bei gleichzeitiger Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Einflüssen.

Abbildung 12: Doppelrohrprinzip



Quelle: Frenzel F. et alii, 2011, Seite 143

4.3.4 Typische Kenngrößen

Nachfolgender Tabelle 16 sind typische Kenngrößen zur Durchflussmessung mittels Coriolis Verfahren zu entnehmen:

Tabelle 14: Coriolis Messverfahren – Merkmale

Messmedium	Flüssigkeiten, Gas, Dampf
Messgenauigkeit (typisch)	0,1 bis 0,5 % v. M.
Wiederholbarkeit	0,2 % v. M.
Messdynamik	Über 100:1
Minimal erforderliche Reynoldszahl	1.000
Einbaugrößen	DN 1 bis 150
Temperaturbereich	-200 bis 400 °C
Maximaler Druck	400 bar
Druckverlust bei maximalem Durchfluss Q_{max}	$8 \times [(v^2)/(2 \cdot g)]$
Einlaufstrecken/Auslaufstrecken	0 x DN / 0 x DN
Messbereich	0 bis 4.100 t/h
Kostenspanne	Siehe Abbildung 7

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4.3.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Universelles Messprinzip - fast alle Medien können damit gemessen werden
- Messprinzip unabhängig von den physikalischen Messstoffeigenschaften – direkte Massenmessung
- Sehr hohe Messgenauigkeit (typisch 0,1 % v. M.)
- Verschleißfreiheit und Robustheit des Messsystems – keine beweglichen Teile (Messrohre bewegen sich maximal 30 µm, daher spricht man von keiner Bewegung)
- Unabhängig vom Strömungsprofil
- Keine Ein- und Auslaufstrecken notwendig
- Es besteht die Möglichkeit gleich mehrere Prozessvariablen gleichzeitig zu erfassen (Temperatur, Dichte, Massedurchfluss)

Nachteile

- Relativ hoher Anschaffungspreis
- Einsatzgrenzen bei mehrphasigen Medien oder hohem Gasanteil

4.3.6 Praxistipps

Bei Gefahr von Lufteinschlüssen ist es sinnvoll das Messgerät mit Auslenkung nach unten einzubauen, da Luft nach oben entweichen kann. Falls die Gefahr von Feststoffen besteht, Gerät so installieren, dass die Auslenkungen nach oben zeigen, sodass Feststoffe nach unten entweichen können. Im besten Fall sollte das Messgerät immer senkrecht in die Leitung eingebaut werden, weil dieses dann immer den gesamten Durchfluss erfassen kann und dadurch eine genauere Messung erzielt wird.

4.4 Wirbelstraßenprinzip (Vortex)

4.4.1 Erklärung Messprinzip

Ein modernes Verfahren zur Durchflussmessung von gasförmigen und flüssigen Medien ist das Wirbelstraßenprinzip. Es beruht auf der Existenz einer periodischen Oszillation des Strömungsfeldes hinter einem umströmten Prallelement. Wird also ein starrer Körper von einem Fluid umströmt, so bilden sich an seiner Rückseite diskrete Wirbel. Diese lösen sich

mehr oder weniger regelmäßig vom Prallelement ab und schwimmen mit der Strömung fort. Die Wirbelablösefrequenz ist bei geeigneten Prallelementen (Quaderform, Delta-Störkörper und so weiter) proportional zur Strömungsgeschwindigkeit. Im Nachlauf des Prallelements entsteht ein sogenanntes Stromlinienbild, das als Wirbelstraße bezeichnet wird. Die Frequenz der Wirbelablösung wird als Messeffekt zur Durchflussmessung herangezogen. Die hinter dem Staukörper abgelösten Wirbel erzeugen einen lokalen Unterdruck im Messrohr, der durch einen kapazitiven Sensor erfasst und als digitales, lineares Signal der Elektronik zugeführt wird.

Das Verhältnis der Wirbelablösefrequenz zur Strömungsgeschwindigkeit wird unter Hinzunahme einer charakteristischen Abmessung des Prallelements über die Strouhal-Zahl beschrieben:

Formel 10: Strouhal-Zahl

$$S = \frac{f \cdot d}{\bar{v}}$$

\bar{v}	Mittlere Anströmgeschwindigkeit des Fluids [m/s]
f	Wirbelablösefrequenz [Hz]
d	Symbolisiert eine senkrecht zur Strömungsrichtung und senkrecht zur Prallelementachse gemessene charakteristische Breite (z. B. Durchmesser) des Prallelements [m]
S	Strouhal-Zahl [-]

Unter der Voraussetzung einer konstanten, von der Reynolds-Zahl unabhängigen Strouhal-Zahl kann mit untenstehender Gleichung der Volumendurchfluss berechnet werden:

Formel 11: Berechnung Volumendurchfluss

$$q_v = \frac{1}{S} \cdot d \cdot A_1 \cdot f$$

\bar{v}	Mittlere Anströmgeschwindigkeit des Fluids [m/s]
f	Wirbelablösefrequenz [Hz]
d	Symbolisiert eine senkrecht zur Strömungsrichtung und senkrecht zur Prallelementachse gemessene charakteristische Breite (z.B. Durchmesser) des Prallelements [m]
S	Strouhal-Zahl [-]
A_1	Querschnittsfläche der Strömung senkrecht zur Strömungsrichtung [m ²]
q_v	Volumendurchfluss [m ³ /s]

4.4.2 Anwendungsgebiet

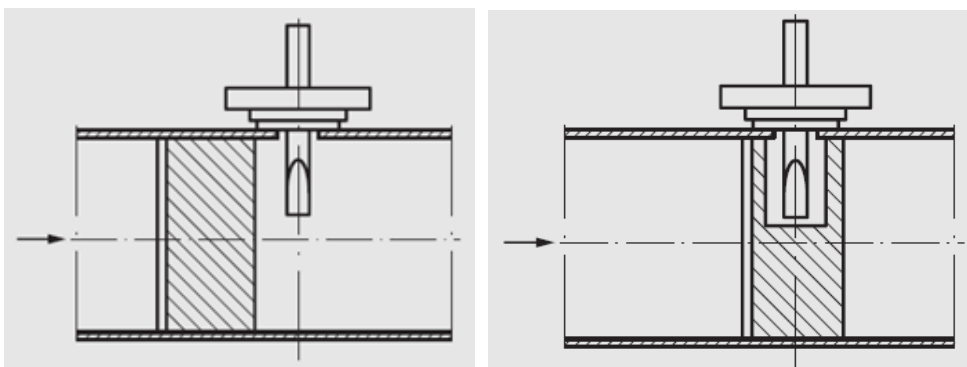
Wirbelzähler werden vorwiegend in der Industrie eingesetzt und eignen sich für die Messung von Gasen, Flüssigkeiten und Dampf. Als eines der wichtigsten Einsatzgebiete des Vortex-Messprinzips hat sich in den letzten Jahren die Dampfmengenmessung herauskristallisiert. Das Messprinzip ist bei der Messung von Dampf, wegen der großen Druck- und Temperaturabdeckung und der einfachen Montage sowie der konstanten Messgenauigkeit über einen weiten Messbereich sehr zu empfehlen.

Da aber Wirbelzähler nur den Volumenstrom messen und Dampfströme meist nach Massemenge auszulegen sind, sind für diesen Anwendungsbereich zusätzlich zur Volumenstrommessung eine Temperaturmessung und/oder eine Druckmessung erforderlich.

4.4.3 Messaufbau

Die Wirbel erzeugen periodische Druck- und Geschwindigkeitsänderungen, diese werden von einem Messwertaufnehmer erfasst. Der Aufnehmer befindet sich meist hinter dem Prallelement oder freischwingend im Prallelement (siehe Abbildung 13). Die Zunge des Prallelements wird durch die Druckunterschiede im Wirbeltakt ausgelenkt. Im Inneren des Sensors (Aufnehmers) wandeln Piezoaufnehmer die entstehenden Auslenkungen in elektrische Größen um, die als Zählimpulse verstärkt werden.

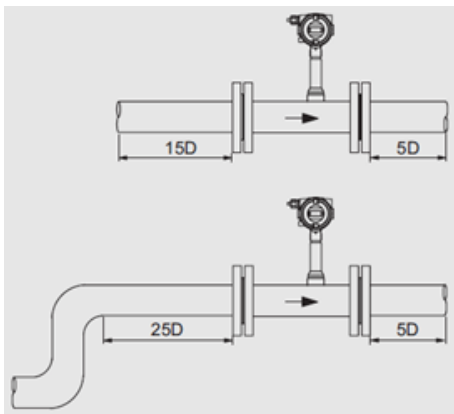
Abbildung 13: Messwertaufnehmer hinter dem Störkörper (links) / freischwingend im Störkörper (rechts)



Quelle: Frenzel F. et alii, 2011, Seite 47

Strömt das Messmedium mit einem gestörten Strömungsprofil (Wirbel, Drall) in die Messstrecke, so können sich die Wirbel nicht sauber ausbilden. Deshalb ist es sehr wichtig, dass die vorgegebenen Ein- und Auslaufstrecken berücksichtigt werden. Deren Länge ist abhängig von der Art der Strömung. Nachfolgende Ein- und Auslaufstrecken (siehe Abbildung 14) sind bei der Installation des Messwertaufnehmers in die Rohrleitung zu berücksichtigen:

Abbildung 14: Erforderliche Ein- und Auslaufstrecken für das Wirbelstraßenprinzip



Quelle: Frenzel F. et alii, 2011, Seite 55

4.4.4 Typische Kenngrößen

Im nachfolgenden Abschnitt wird auf typische Kenngrößen zur Durchflussmessung mittels Wirbelstraßenprinzip eingegangen (siehe Tabelle 15 und Tabelle 16):

Wirbel-Durchflussmesser werden in den Nennweiten DN 15 bis DN 300 gefertigt. Die entsprechenden Messbereiche für die Messmedien Wasser und Gas sind in folgender Tabelle 17 dargestellt:

Abbildung 15: Durchflussmesser, Messbereiche in m³/h

Nennweite		Wasser $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ $\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$	Gas $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ $\eta = 18,2 \cdot 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$
DN	inch	Messspanne [m ³ /h]	Messspanne [m ³ /h]
15	½	0,5...6	4...24
25	1	0,8...18	14...150
40	1½	2,4...48	30...390
50	2	3,0...70	40...500
80	3	8,0...170	90...1200
100	4	10,0...270	150...1900
150	6	30,0...630	300...4500
200	8	70,0...1100	250...8000
250	10	60,0...1700	800...14000
300	12	95,0...2400	1400...20000

Quelle: Frenzel F. et alii, 2011, Seite 52

Nachfolgender Tabelle 18 sind typische Kenngrößen zur Durchflussmessung mittels Vortex- Verfahren (Wirbelzähler) zu entnehmen:

Tabelle 15: Wirbelzähler - Merkmale Vortex-Messverfahren

Messmedium	Flüssigkeiten, Gas, Dampf
Messgenauigkeit (typisch)	0,5 bis 1 % v. M.
Wiederholbarkeit	0,2 % v. M.
Messdynamik	10/1
Minimal erforderliche Reynoldszahl	5.000
Einbaugrößen	DN 15 bis 400
Temperaturbereich	-55 bis +400 °C
Maximaler Druck	250 bar
Druckverlust bei maximaler Durchfluss Q_{\max}	$2 \times [(v^2)/(2 \cdot g)]$
Einlaufstrecken/Auslaufstrecken	25 x DN / 5 x DN
Messbereich	Gas: 4,0 bis 20.000 m ³ /h Flüssigkeiten (Wasser): 0,5 bis 2.400 m ³ /h
Kostenspanne	Siehe Abbildung 6

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4.4.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Universell einsetzbar für Messungen von Flüssigkeiten, Gasen und Dampf
- unabhängig gegenüber Druck-, Temperatur- und Viskositätsänderungen
- Hohe Langzeitstabilität
- Keine beweglichen Teile
- Große Messdynamik
- Großer Temperaturbereich (-200 °C bis +400 °C)

Nachteile

- Lange Ein- und Auslaufstrecken notwendig
- Druckverluste durch Störkörper (Prallelement)

4.4.6 Praxistipps

Damit sich Wirbel lösen können muss eine bestimmte Reynoldszahl vorherrschen (> 20.000). Diese ist eine Kombination aus Dichte des Messstoffes und dessen Fließgeschwindigkeit. Wenn die Fließgeschwindigkeit nicht ausreicht, sollte der Querschnitt verkleinert werden, um die Fließgeschwindigkeit entsprechend zu erhöhen.

Bei heißen Anwendungen (Dampf) sollte besonders auf den Sitz der Elektronik geachtet werden.

4.5 Flügelrad - Anemometer (mobil)

4.5.1 Erklärung Messprinzip

Ein Flügelrad Anemometer ist ein Messgerät, welches die Strömungsgeschwindigkeit über die jeweilige Drehzahl des Flügelrads (Frequenzmessung) ermittelt (siehe Abbildung 16). Das strömende Messmedium setzt das Flügelrad in Bewegung. Über eine induktive Impulzzählung werden, mit Hilfe eines im Messgerät eingebauten Mikrokontrollers, die Umdrehungen des Flügelrades erfasst und als Geschwindigkeit angezeigt.

Abbildung 16: Flügelradanemometer mit Anzeigegerät



Quelle: KIMO Instruments

Die Drehzahl des Flügelrades ist also proportional zur Strömungsgeschwindigkeit des Fluids. Um nun auf den Volumenstrom schließen zu können muss noch die Querschnittsfläche der Leitung beziehungsweise des Kanals, in dem die Messung stattgefunden hat, bekannt sein. Nachfolgend die Formel zur Berechnung des Volumenstroms:

Formel 12: Berechnung Volumenstrom

$$q_V = A \cdot \bar{v}$$

A	Querschnittsfläche der Strömung senkrecht zur Strömungsrichtung [m ²]
q _V	Volumendurchfluss [m ³ /s]
\bar{v}	Mittlere Anströmgeschwindigkeit des Fluids [m/s]

4.5.2 Anwendungsgebiet

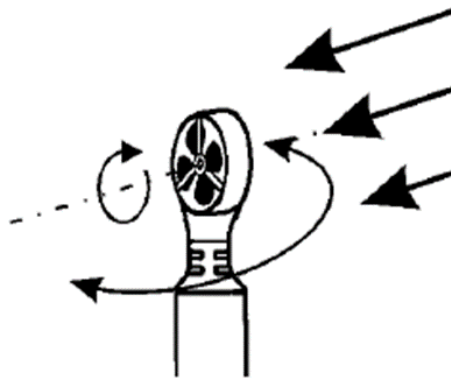
Anwendung finden die Flügelradanemometer vor allem in der Klima- Lüftungs- und Heizungstechnik. Das Messgerät eignet sich hervorragend zur Messung der Geschwindigkeit von Gasen und deren Volumenstrom. Da Flügelradanemometer portable

Messgeräte sind, werden diese sehr häufig für Energieberatungen in der Klima-Lüftungs- und Heizungstechnik verwendet.

4.5.3 Messaufbau

Um mit einer Flügelrad-Messsonde korrekte Messwerte zu erhalten, muss die Flügelradachse parallel zur Strömungsrichtung ausgerichtet sein (siehe Abbildung 17). Wird die Messsonde im Luftstrom leicht gedreht, ändert sich der Anzeigewert am Messgerät.

Abbildung 17: Flügelrad-Ausrichtung



Quelle: Koschke P. et alii, 2011, Seite 19

Die Messsonde ist exakt im Luftstrom positioniert (die meisten Sonden besitzen eine Skalierung, damit die Eintauchtiefe besser bestimmbar ist), wenn der Anzeigewert am größten ist. Die meisten Flügelradanemometer zeigen nach einer fest eingestellten Integrationszeit von circa 3 Sekunden die mittlere Strömungsgeschwindigkeit oder den Volumenstrom an. Große Flügelraddurchmesser (60 bis 100 mm) eignen sich hervorragend für Messungen von turbulenten Strömungen, z. B. an Kanalausritten bei kleinen bis mittleren Geschwindigkeiten. Kleine Durchmesser sind vor allem für Messungen in Kanälen oder Rohren bestimmt. Als Faustformel kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass der Kanal/Rohr-Querschnitt 100-mal größer sein sollte als der Querschnitt der Sonde.

Der Messaufbau kann wie folgt beschrieben werden:

Für den Messaufbau werden ein Messwertumformer/Multifunktionsmessgerät (Eingänge für Sensoren müssen vorhanden sein) und der Messwertaufnehmer (in diesem Fall ist es das Flügelradanemometer) benötigt. Es kann aber auch beides in einem Gerät kombiniert sein:

Flügelradanemometer als Sensor:

Abbildung 18 zeigt einen typischen Messaufbau eines Flügelradanemometers als Sensor (links im Bild das Flügelrad und rechts das Multifunktionsmessgerät)

Abbildung 18: Flügelradanemometer mit Multifunktionsmessgerät der Firma Ahlborn

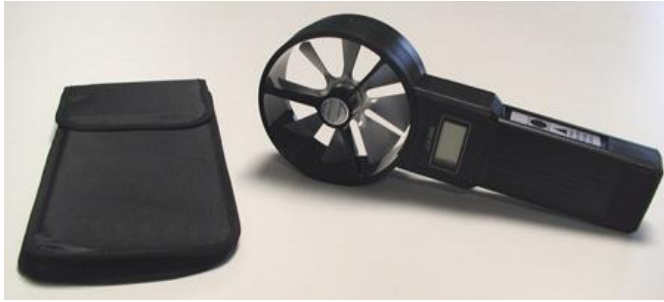


Quelle: FH Burgenland, Laborbericht HKT-Klimaanlage unveröffentlicht, 2014

Flügelradanemometer als Kompaktmessgerät:

Diese Bauweise zeichnet sich dadurch aus, dass der Messwertumformer und der Aufnehmer in einem Gerät kombiniert sind (siehe Abbildung 19). Ein wesentlicher Vorteil des Kompaktmessgerätes ist die „Einhand-Bedienung“.

Abbildung 19: Flügelradanemometer als Kompaktmessgerät



Quelle: deconta GmbH, 2013

4.5.4 Typische Kenngrößen

Nachfolgender Tabelle 16 sind typische Kenngrößen zur Durchflussmessung mittels Flügelradanemometer zu entnehmen:

Tabelle 16: Flügelradanemometer - Merkmale

Genauigkeit	$\pm 1 \% \text{ v. E. } \pm 3 \% \text{ v. M.}$
Messmedium	Gase (meist Luft)
Temperaturbereich	-30 bis +140 °C, in Sonderausführung auch -50 bis +350 °C
Einbaugrößen	tragbares Gerät
Messbereich	In Gasen: 0,2 bis 120 m/s In Flüssigkeiten: 0,01 bis 10m/s
In Flüssigkeiten: 0,01 bis 10m/s	circa 400,00 bis 550,00 €

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4.5.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Genauigkeit bei mittleren Strömungsgeschwindigkeiten und mittleren Umgebungstemperaturen

- Unempfindlich gegen turbulente Strömung, da der Messwert gemittelt wird
- Günstig in der Anschaffung
- Schnelle und einfache Bedienung
- Portables Messprinziperteile

Nachteile

- Richtungsabhängige Messung
- Genauigkeit der Messung sehr stark benutzerabhängig
- Probleme bei Feststoffen - ungenaue Messung
- Empfindlich gegen mechanische Beanspruchung

4.5.6 Praxistipps

Die Messsonde ist dann richtig im Luftstrom positioniert, wenn der Anzeigewert am größten ist. Vor dem Durchführen der Messung sollte immer darauf geachtet werden, dass die Messsonde in die richtige Strömungsrichtung ausgerichtet ist.

4.6 Thermisches Anemometer

4.6.1 Erklärung Messprinzip

Diese Messmethode beruht auf der Abkühlung eines beheizten Sensors durch das ihn umströmende Gas. Diese strömungsabhängige Abkühlung wird als Messeffekt genutzt, dabei ist der Grad der Abkühlung direkt abhängig von der vorbeiströmenden Luft beziehungsweise Gasmasse.

Grundsätzlich spricht man bei dieser Art von Messgerät von einem thermischen Anemometer (griechisch Anemos = Hauch). Die wichtigsten beiden thermischen Messverfahren beruhen auf zwei Sondenbauarten:

Heißfilm (für gasförmige Medien und Flüssigkeiten):

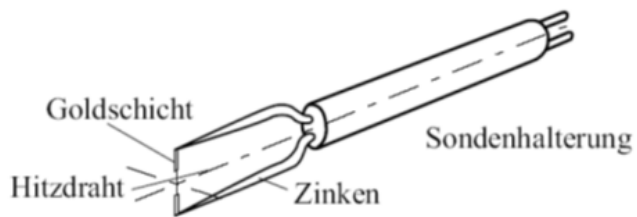
Die Heißfilmsonden verfügen über eine dünne, elektrisch leitfähige Oberflächenbeschichtung und werden entweder oberflächenbündig montiert oder haben

kompakte Sondenkörper. Heißfilmsonden lassen sich bei entsprechendem Aufbau nicht nur für gasförmige Medien einsetzen, sondern auch in Flüssigkeiten.

Hitzdraht (meist nur bei gasförmigen Medien angewandt):

Die Hitzdrahtsonde hat die Form einer Gabel mit zwei Zinken (siehe Abbildung 20). Der Abstand der zwei Zinken, zwischen denen der Hitzdraht gespannt ist, beträgt circa 5 mm. Der übliche Drahtdurchmesser beträgt 5 μm . Drahtsonden werden zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in einem Bereich von 0,1 m/s bis 500 m/s eingesetzt. Außerdem werden diese besonders für stark instationäre Vorgänge zur Messung verwendet, da sie eine sehr hohe zeitliche Auflösung besitzen.

Abbildung 20: Aufbau einer Hitzdrahtsonde



Quelle: Görtler G., 2014, Seite 146

Die zugeführte elektrische Energie wird mit einem Regelkreis so dosiert, dass die Temperatur des Heizelements konstant ist. Das Heizelement ist als ein elektrischer Widerstand ausgeführt. Sind die Temperaturen und andere Stoffwerte des Strömungsmediums konstant, dann besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Strömungsgeschwindigkeit und der dem Hitzdraht zugeführten Energie. Mit nachfolgender Formel 13 kann somit die Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden:

Formel 13: Berechnung Strömungsgeschwindigkeit

$$U^2 = A + B \cdot v^n$$

U	Elektrische Spannung (am Hitzdraht / Heißfilm) [V]
A, B	Empirisch bestimmte Konstante
v	Strömungsgeschwindigkeit des Fluids [m/s]
n	Empirisch bestimmter Koeffizient (meinst n = 0,45)

4.6.2 Anwendungsgebiet

Das kalorimetrische Messprinzip wird vor allem zur genauen Verbrauchsmessung von Druckluft und Gasen (Stickstoff, Sauerstoff, CO₂, und so weiter) eingesetzt.

Hitzdrahtsonden bieten die Möglichkeit, die Strömungsgeschwindigkeit zeitlich hochauflösend zu bestimmen, wie es beispielweise bei den folgenden Bedingungen notwendig ist:

- Instationäre Strömungen:
Die Strömung eines Fluids ist instationär, wenn sich Strömungsgrößen wie Druck und Geschwindigkeit in einem festgelegten Arbeitspunkt zeitlich ändern.
- Grenzschicht (laminar-turbulent):
Die laminare Grenzschicht bei Fluiden ist nur bis zu einer maximalen kritischen Reynoldszahl $Re_{krit.}$ stabil. Ab $Re > Re_{krit.}$ erfolgt der Umschlag laminar-turbulent, dieser ist mit einer starken Erhöhung des Impulses und Wärmeaustausches verbunden.

4.6.3 Messaufbau

Das Messgerät setzt sich aus dem Messwertaufnehmer (Sensor) und dem Messwertumformer zusammen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen stationärem Einsatz und mobilem Einsatz dieser Messmethode.

Abbildung 21 zeigt den stationären Einbau eines derartigen Messgerätes in eine gewöhnliche Rohrleitung:

Abbildung 21: Stationärer Einbau in Rohrleitung - Thermisches Anemometer



Quelle: Messprofi-Katalog, CS Instruments GmbH, 2015, Seite 65

Bezogen auf den mobilen Einsatz des Messgerätes, kann das thermische Anemometer, mit Hilfe von Schnellkupplungen, in den Zuleitungen von diversen Maschinen integriert werden und so der Volumenstrom beziehungsweise Verbrauch ermittelt werden - dieser Messaufbau wird in Abbildung 22 dargestellt.

Abbildung 22: Mobiler Einsatz des Anemometers



Quelle: Messprofi-Katalog, CS Instruments GmbH, 2015, Seite 65

4.6.4 Typische Kenngrößen

Nachfolgender Tabelle 17 sind typische Kenngrößen zur Durchflussmessung mittels thermischem Anemometer zu entnehmen:

Tabelle 17: Thermisches Anemometer – Merkmale

Messmedium	Gase
Messgenauigkeit (typisch)	$\pm 1,5 \% \text{ v. M.}$
Wiederholbarkeit	0,5 %

Messdynamik	10/1
Einbaugrößen	DN 15...1.500
Temperaturbereich	-25 bis 150 °C
Maximaler Druck	16 bar
Druckverlust bei maximalem Durchfluss Q_{max}	vernachlässigbar
Einlaufstrecken/Auslaufstrecken	25 x DN / 5 x DN
Messbereich	Gas (Luft):
Flüssigkeiten (Wasser) :	0,0 bis 160 m/s
Kostenspanne	Siehe Abbildung 6

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4.6.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Auch sehr geringe Luftströmungen messbar (z. B. Zugluftmessungen)
- Richtungsunabhängige Messung möglich
- Durchflussmessung bei instationären Strömungen möglich

Nachteile

- Sensible Sensorik, das heisst empfindlich gegen mechanische Beanspruchung und Verschmutzung
- Hoher Stromverbrauch

4.6.6 Praxistipps

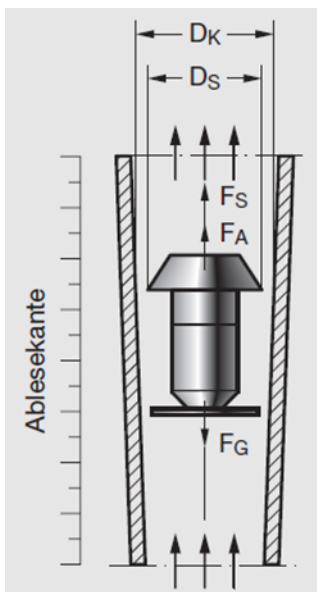
Bei der Anwendung von thermischen Anemometern ist darauf zu achten, dass keine Zweiphasengemische entstehen, da dies zu sehr großen Messfehlern führen kann.

4.7 Schwebekörper Anemometer

4.7.1 Erklärung Messprinzip

Um den Durchfluss von Gasen und Flüssigkeiten einfach und zugleich relativ genau ermitteln zu können, kann das Schwebekörper-Durchflussmessprinzip angewandt werden. Hierbei wird ein senkrecht gestelltes Rohr, das sich nach oben konisch erweitert von unten nach oben durchströmt. Das aufwärtsströmende Messmedium hebt den im Rohr befindlichen Schwebekörper so lange, bis der ringförmige Spalt zwischen Schwebekörper und Rohrwand so groß ist, dass die auf den Schwebekörper wirkenden Kräfte im Gleichgewicht sind und damit ein Schwebezustand erreicht ist. Am meisten verbreitet sind transparente Messrohre, bei denen unmittelbar der Höhenstand des Schwebekörpers als Durchflussinformation abgelesen werden kann (siehe Abbildung 23).

Abbildung 23: Prinzip des Schwebekörper-Durchflussmessers



Quelle: Frenzel F. et alii, 2011, Seite 85

Entsprechend der untenstehenden allgemeinen Durchflussgleichung für Schwebekörper-Durchflussmesser kann der Volumen- beziehungsweise Massendurchfluss berechnet werden:

Formel 14: Volumendurchfluss

$$q_v = \frac{\alpha}{\rho_m} \cdot Ds \cdot \sqrt{g \cdot m_s \cdot \rho_m \cdot \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right)}$$

Formel 15: Massedurchfluss

$$q_m = \alpha \cdot Ds \cdot \sqrt{g \cdot m_s \cdot \rho_m \cdot \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho_s}\right)}$$

q_v	Volumendurchfluss [m ³ /s]
q_m	Massedurchfluss [kg/s]
α	Durchflusszahl [-]
ρ_m	Dichte des Messmediums [kg/m ³]
ρ_s	Dichte des Schwebekörpers [kg/m ³]
Ds	Durchmesser des Schwebekörpers an der Ablesekante [m]
g	Fallbeschleunigung [m/s ²]
m_s	Masse des Schwebekörpers [kg]

4.7.2 Anwendungsgebiet

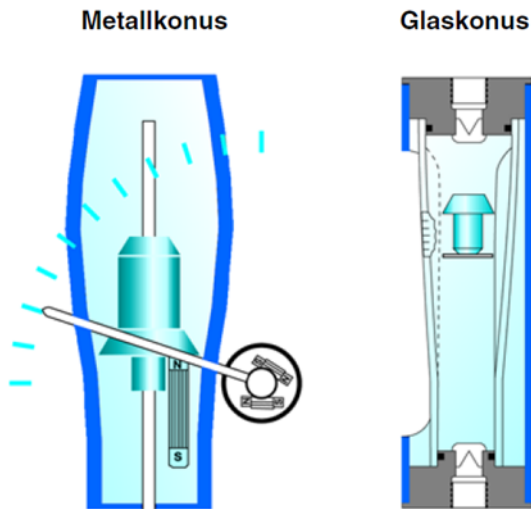
Die einfache und zweckmäßige Konstruktion ermöglicht den Einsatz in verschiedensten Industriebereichen wie zum Beispiel: Apparatebau, Laboranwendungen, Wasseraufbereitungsanlagen, Überwachung von Kühlkreisläufen und Chemie.

4.7.3 Messaufbau

Die am häufigsten angewandten Messaufbauten sind (siehe Abbildung 24):

- Schwebekörperanemometer mit Metallkonus
- Schwebekörperanemometer mit Glaskonus

Abbildung 24: Häufige Messaufbauten von Schwebekörperanemometer



Quelle: Frenzel F. et alii, 2011, Seite 93

Die beiden Bauarten unterscheiden sich durch folgende Merkmale:

Metallkonus

- Hält hohen Druck- und Temperaturbedingungen stand
- Geeignet für undurchsichtige Messmedien
- Wird oft bei Dampfapplikationen verwendet
- Geeignet für hohe Durchflussraten

Glaskonus

- Preisgünstige Lösung
- Visuelle Medienkontrolle
- Geeignet für geringe Drücke
- Geeignet für klare durchsichtige Messmedien

4.7.4 Typische Kenngrößen

Nachfolgender Tabelle 18 sind typische Kenngrößen zur Durchflussmessung von Schwebekörperanemometern zu entnehmen:

Tabelle 18: Schwebekörperanemometer – Merkmale

Messmedium	Flüssigkeiten, Gase
Messgenauigkeit (typisch)	1,6 bis 6 Genauigkeitsklasse, das hei sst 1,6 bis 6 % v. E.
Messdynamik	10/1
Maximaler Druck	38 bar
Messbereich	Gas (Luft) 0,030 bis 17.000 l/h Flüssigkeiten (Wasser) 0,030 bis 17.000 l/h
Kostenspanne	circa 100 - 700 €

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4.7.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Relativ einfach aufgebaut und günstig in der Herstellung
- Benötigen keine externe Energieversorgung
- Vorortanzeige ohne Hilfsenergie
- Unabhängig von elektrischer Leitfähigkeit
- Messung von kleinsten Gas- und Flüssigkeitsvolumenströmen möglich
- Hohe Wiederholgenauigkeit

Nachteile

- Die Durchflusskörper müssen für das entsprechende Fluid kalibriert werden
- Für abweichende Messstoffdaten muss die Skala entsprechend umgerechnet werden
- Nur für senkrechten Einbau von unten nach oben geeignet

4.8 Magnetisch induktiv

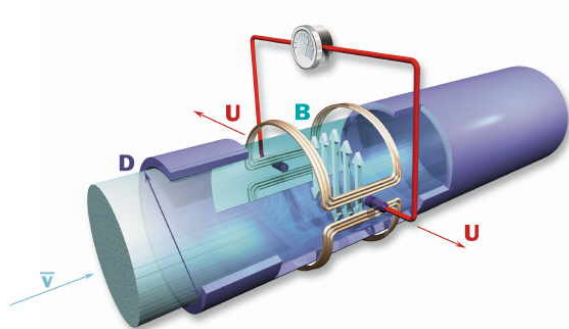
4.8.1 Erklärung Messprinzip

Die Flüssigkeit in einem nicht magnetisierbaren Rohrstück durchströmt ein senkrecht zum Rohr angeordnetes Magnetfeld und erzeugt dabei eine Spannung. Diese Spannung ist dem

Durchfluss proportional. Basierend auf diesem Prinzip kann der Durchfluss gemessen werden.

Das auf dem Faraday'schen Induktionsgesetz basierende Volumendurchflussmessprinzip der magnetisch-induktiven Durchflussmessung (MID) ist für praktisch alle elektrisch leitenden Fluiden einsetzbar. Das Grundprinzip ist in Abbildung 25 verdeutlicht. Eine leitende Flüssigkeit, die durch ein Magnetfeld strömt, verhält sich wie ein räumlich ausgedehnter, bewegter elektrischer Leiter. Im isoliert ausgekleideten Rohr wird die induzierte Spannung U an zwei Elektroden in der Rohrwand abgegriffen.

Abbildung 25: Magnetisch induktiver Durchflussmesser



Quelle: Hofmann F., 2003, Seite 6

Damit eine elektrische Spannung induziert wird, sind drei „Zutaten“ notwendig – ein Magnetfeld, ein Leiter und eine Bewegung. Für die Induktion ist es gleichgültig, ob sich das Magnetfeld bewegt oder der Leiter. Die induzierte Spannung kann angeschrieben werden als Formel:

Formel 16: Induzierte elektrische Spannung

$$U = \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$$

U	Induzierte elektrische Spannung in [V]
\vec{v}	Strömungsgeschwindigkeit des leitenden Fluids in [m/s]
\vec{B}	Magnetische Flussdichte in [Tesla]
l	Leiterlänge in [m]

Steht der Geschwindigkeitsvektor \vec{v} normal auf den Vektor der magnetischen Flussdichte \vec{B} , das heisst gilt $(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$, dann vereinfacht sich die Formel 16 zu:

Formel 17: Vereinfachte Gleichung induzierte elektrische Spannung

$$U = v \cdot B \cdot l = v \cdot B \cdot D$$

In Formel 17 kann die Leiterlänge l durch den Rohrdurchmesser D ersetzt werden, da der Leiter in diesem Fall das Fluid ist, welches durch das Rohr strömt.

Der Volumenstrom des Fluids berechnet sich damit so:

Formel 18: Volumenstrom des Fluids

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = Av = \frac{D^2\pi}{4} \cdot \frac{1}{BD} \cdot U = \frac{D\pi}{4B} \cdot U = k \cdot U$$

\dot{V}	Volumenstrom in [m ³ /s]
A	Durchströmte Fläche in [m ²]
v	Strömungsgeschwindigkeit in [m/s]
D	Rohrdurchmesser in [m]
B	Magnetische Flussdichte in [Tesla]
U	Induzierte elektrische Spannung in [V]
k	Proportionalitätsfaktor

Aus Formel 17 und Formel 18 ist die direkte Proportionalität zwischen Geschwindigkeit beziehungsweise Volumenstrom und gemessener Spannung zu erkennen, welche für die gewünschte lineare Kennlinie des MID verantwortlich ist.

4.8.2 Anwendungsgebiet

Die Voraussetzung für die Anwendung der magnetisch-induktiven Durchflussmesser (MID) ist die elektrische Leitfähigkeit des zu messenden Fluids. Die Herstellerangaben für diese Mindestleitfähigkeit liegen ausführungs-, messstoff- und applikationsabhängig bei 0,05 - 50 [$\mu\text{S}/\text{cm}$]. MID`s sind daher nicht geeignet für die Messung von Kohlenwasserstoffen (Benzin, Öl etc.) oder von Gasen. Unterhalb der angegebenen Mindestleitfähigkeit können messtechnische Probleme auftreten (Messabweichungen, unruhige Anzeige). Höhere Leitfähigkeiten haben keinen Einfluss auf die Eigenschaften des MID.

Im industriellen Umfeld erfolgt der Einsatz von MID`s hauptsächlich in der Wasserwirtschaft, in der Prozessindustrie, im Pharmabereich und in der Lebensmittelindustrie. Aufgrund der robusten Bauweise finden MID`s auch in der Minen- und Bergbauindustrie – unter härtesten Umweltbedingungen – Einsatz. Die Erfassung und Überwachung kontinuierlicher Durchflüsse, Abfüll- und Dosieranwendungen sowie der Einsatz im Eichpflichtigen Verkehr zählen zu den typischen Einsatzbereichen der magnetisch induktiven Durchflussmessung.

Ansonsten sind die Anwendungsgebiete von MID`s aufgrund der nachfolgenden Charakteristika beziehungsweise Eigenschaften sehr breit gefächert.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Charakterisierung verschiedener Rohr- und Auskleidungswerkstoffe.

Abbildung 26: Grob- Charakterisierung verschiedener Rohr- und Auskleidungswerkstoffe von MID`s

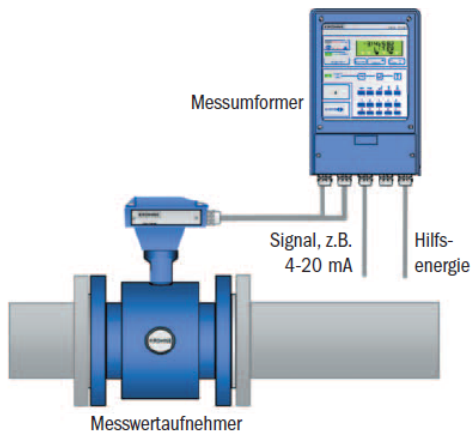
Werkstoff	Max. Medien-temperatur:	Chemische Beständigkeit	Abrasionsfestigkeit	Bleibende Verformung bei Druck / Temperatur	Erhältl. DN-Bereich [mm]	Unterdruck- (Vakuum-) Festigkeit
Fluor-Kunststoffe (z.B. PTFE, PFA)	bis 180°C	von heißen Laugen bis zu heißen konzentrierten Säuren	konstruktionsabhängig gering bis gut	konstruktionsabhängig stark bis gering	2-600	konstruktionsabhängig schwach bis gering
PFA mit eingespritzter Edelstahlverstärkung	bis 180°C	von heißen Laugen bis zu heißen konzentrierten Säuren	gut	gering	2,5-150	sehr gut
ETFE („TEFZEL“)	bis 120°C	von heißen Laugen bis heiße Säuren	sehr gut	gering	200-600	sehr gut
Hartgummi	bis 90°C	geringe Konzentrationen	gering	sehr gering	25-3000	relativ gut
Polypropylen edelstahlverstärkt	bis 90°C	geringe Konzentrationen	gut	gering	25-150	sehr gut
Weichgummi Neopren	bis 60°C	geringe Konzentrationen	gut	gering	25-3000	relativ gut
Polyurethan	bis 60°C	geringe Konzentrationen	hervorragend	gering	50-1600	gut
Aluminium-/ Zirkonoxid-Keramik	bis 180°C	von warmen Laugen (mittlere Konzentration) bis zu konz. Säuren unter 100°C	abrasionsbeständigstes Material	praktisch keine Verformung (hohe Langzeitstabilität auch bei kleinen DN!)	2,5-250	vollkommen unterdruckfest

Quelle: Hofmann F., 2003, Seite 41

4.8.3 Messaufbau

Die nachfolgende Abbildung 27 zeigt eine typische Einbausituation eines MID in Kompaktbauform. Mess-wertaufnehmer und -umformer bilden eine Baueinheit, die einfach und kostensparend einzubauen und anzuschließen ist. Diese Bauform erspart Verlegen und Anschließen spezieller geschirmter Signalleitungen sowie die separate Montage eines getrennten Messumformers.

Abbildung 27: Typische Einbausituation eines MID in Kompaktbauform



Quelle: Hofmann F., 2003, Seite 36

4.8.4 Typische Kenngrößen

Nachfolgender Tabelle 19 sind typische Kenngrößen zur magnetisch induktiven Durchflussmessung zu entnehmen:

Tabelle 19: MID – Merkmale

Messstoff	Flüssig, Gas, Dampf
Messgenauigkeit	0,2 – 1 % v. M.
Wiederholbarkeit	0,1 % v. M.
Messdynamik	>100:1
Nennweite	1 – 3.000 mm
Maximale Temperatur	250 °C
Maximaler Druck	150 bar
Druckverlust	Nahezu 0
Einlauf-/Auslaufstrecken	10 x DN / 5 x DN
Kostenspanne	Siehe Abbildung 6

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4.8.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Messprinzip praktisch unabhängig von Prozessdruck, Temperatur und Viskosität
- Auch feststoffbeladene Flüssigkeiten (z. B. Erzschlämme, Zellstoffbreie) messbar
- Großer Nennweitenbereich verfügbar
- Durchgängiges Messrohr ohne bewegte Teile
- Keine Druckverluste
- Keine Verengung des Rohrquerschnitts (gut reinigbar, molchbar)
- Hohe Messsicherheit und Reproduzierbarkeit, hohe Langzeitstabilität
- Minimaler Wartungs- und Pflegeunterhalt

Nachteile

- Forderung nach einer Mindestleitfähigkeit
- Unterbrechung des Prozesses notwendig für den Einbau des Messgerätes
- Ablagerungen im Messrohr oder auf den Messelektroden können Messfehler verursachen

4.8.6 Praxistipps

- Berücksichtigung der Herstellerangaben hinsichtlich empfohlener Einsatzbereiche
 - Temperaturbereich
 - Druckbereich
 - Messbereich
- Einhaltung der empfohlenen Ein-/Auslaufstrecken

4.9 Ultraschall

4.9.1 Erklärung Messprinzip

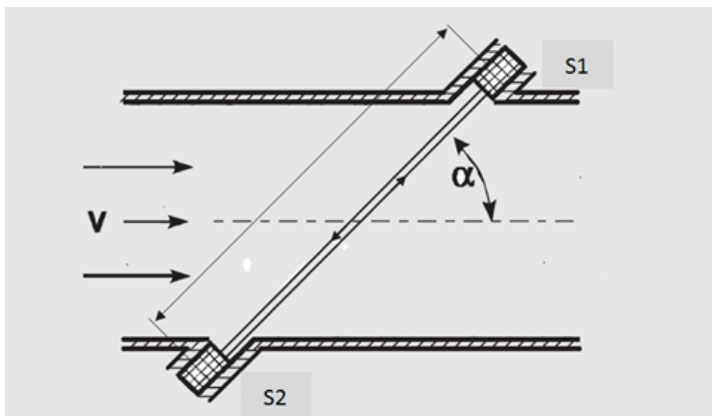
Grundsätzlich unterscheidet man beim Ultraschallverfahren zwischen dem Laufzeit- und dem Dopplerverfahren. Der wesentliche Unterschied der beiden Verfahren wird nachfolgend erklärt.

Laufzeitverfahren:

Beim Laufzeitdifferenzverfahren wird die unterschiedliche Laufzeit von Ultraschall-Messsignalen in Strömungsrichtung und entgegen der Strömungsrichtung des Mediums ausgewertet (siehe Abbildung 28). Aus der Laufzeitdifferenz der Ultraschall-Messsignale lässt sich die Fließgeschwindigkeit und damit bei bekanntem Durchmesser der Rohrleitung der Volumendurchfluss bestimmen.

Eine Grundbedingung für die Laufzeitdifferenzmessung ist die weitgehend akustische Transparenz des Messmediums. Es sollten wenige Festkörper oder Gasblasen im Messmedium vorhanden sein.

Abbildung 28: Schema der Laufzeitdifferenzmessung



Quelle: Frenzel F. et alii, 2011, Seite 138

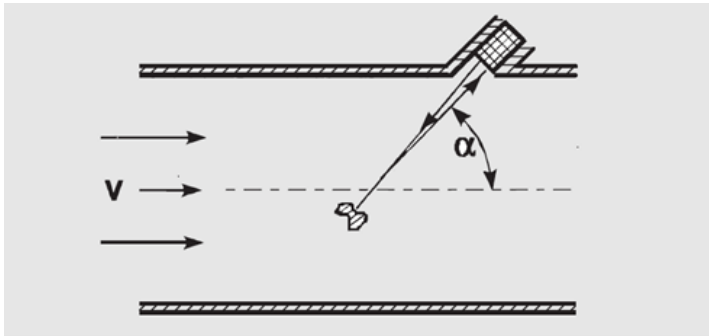
Doppler-Verfahren:

Beim Doppler-Verfahren werden Ultraschall-Messsignale mit einer vorgegebenen Frequenz in das strömende Medium eingekoppelt. Die in dem Medium reflektierten Ultraschall-Messsignale werden ausgewertet. Anhand einer zwischen dem eingekoppelten und dem reflektierten Ultraschall-Messsignal auftretenden Frequenzverschiebung lässt sich die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums beziehungsweise der Volumen- und/oder der Massedurchfluss bestimmen.

Die Voraussetzung für die Anwendung des Doppler-Verfahrens zur Durchflussmessung ist das Vorhandensein von Inhomogenitäten oder Verunreinigungen (= Streuer) im Messmedium (siehe Abbildung 29). Damit ist der Einsatz derartiger Ultraschall-

Durchflussmessgeräte im Vergleich zu den Ultraschall-Durchflussmessgeräten, die nach dem Laufzeitdifferenz-Prinzip arbeiten, relativ stark beschränkt.

Abbildung 29: Schema des Doppler-Prinzips



Quelle: Frenzel F. et alii, 2011, Seite 138

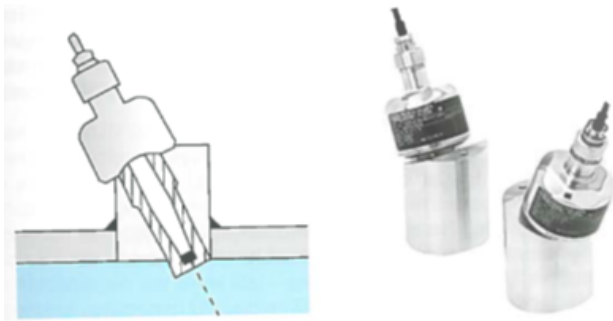
4.9.2 Anwendungsgebiet

Ultraschall-Durchflussmesser zeichnen sich durch einfache Installation und Wartung aus. Die Ultraschall-Durchflussmessung ermöglicht insbesondere das berührungslose Messen von Flüssigkeiten. Das herausragende Merkmal von Ultraschall-Messgeräten ist, dass sie jederzeit von außen auf bestehende Rohrleitungen montiert werden können und dies ohne Prozessunterbrechung (auch nachträglich). Das System eignet sich für Rohrdurchmesser bis 3.000 mm und nahezu alle im Rohrleitungsbau verwendeten Materialien wie z. B. Kunststoff, Kohlenstoffstahl, Gussrohre mit Zement oder Gummi-Auskleidung und so weiter. Das Einsatzspektrum reicht somit von Anwendungen in der Wasser-/Abwassertechnik bis hin zur industriellen Prozess- und Verfahrenstechnik.

4.9.3 Messaufbau

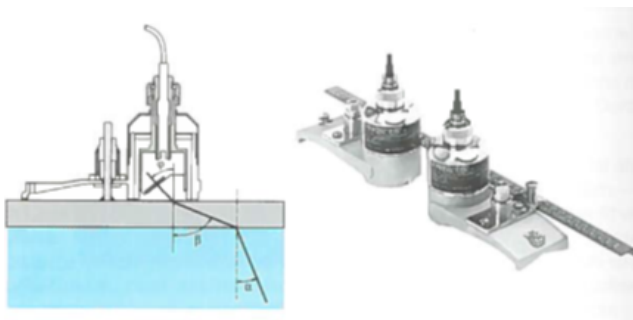
Ultraschall-Durchflussgeräte werden in zwei Varianten angeboten. Es gibt Inline-Systeme (siehe Abbildung 30) und Clamp-on-Systeme (siehe Abbildung 31).

Abbildung 30: Einbausensoren – Inline



Quelle: Altendorf M. et alii, 2003, Seite 135

Abbildung 31: Clamp-on-Sensoren werden von außen direkt auf die Rohrleitung montiert



Quelle: Altendorf M. et alii, 2003, Seite 134

Bei den Inline-Geräten liegen die Ultraschallwandler fest in der Rohrwand und berühren das Messmedium mittelbar oder unmittelbar. Anders ist es bei der sogenannten Clamp-on-Technologie. Hier werden die Ultraschallwandler von außen auf die Rohrleitung aufgesetzt. Der Schallimpuls muss die Rohrwandung und eventuelle Ablagerungen mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten zweimal durchdringen. Aufgrund der relativ stark von dem Medium abhängigen Schallgeschwindigkeit kommt es an der Grenzfläche zweier unterschiedlicher Medien zu einer Brechung der Ultraschall Messsignale. Daher müssen bei der Montage die Brechungs- und Reflexionsgesetze der eingesetzten Materialien beachtet werden.

Für die Ultraschall-Durchflussmessung gilt, dass die Strömungsgeschwindigkeit im engen Bereich des Schallstrahls erfasst wird. Für den gesamten Rohrquerschnitt kann der errechnete Durchfluss nur bei rotationssymmetrischen Strömungsprofil gültig sein. Um das

sicherzustellen, sind Einlaufstrecken von bis zu $15 \times D$ und Auslaufstrecken von bis zu $10 \times D$ erforderlich. Man kann die Empfindlichkeit gegenüber Unsymmetrien in der Strömung dadurch verbessern, indem man mit zwei oder mehr Schallwegen arbeitet, die das Strömungsprofil in mehreren Ebenen abtasten.

4.9.4 Typische Kenngrößen

Nachfolgend wird auf typische Kenngrößen zur Ultraschalldurchflussmessung eingegangen, wobei hier zwischen den beiden Prinzipien Laufzeit (Tabelle 20) und Doppler (Tabelle 21) unterschieden wird:

Tabelle 20: Ultraschall Laufzeit – Merkmale

Messstoff	Flüssig, Gas, Dampf
Messgenauigkeit	0,5 % v. M. – 2 % v. E.
Wiederholbarkeit	0,25 % v. M.
Messdynamik	Über 20:1
Nennweite	> 2 mm
Maximale Temperatur	200 °C
Maximaler Druck	200 bar
Druckverlust	Nahezu 0
Einlauf-/Auslaufstrecken	15 x DN / 5 x DN
Kostenspanne	Siehe Abbildung 6

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Tabelle 21: Ultraschall Doppler – Merkmale

Messstoff	Flüssig, Gas
Messgenauigkeit	1 % v. M. – 2 % v. E.
Wiederholbarkeit	0,5 % v. M.
Messdynamik	Über 20:1

Nennweite	> 5 mm
Maximale Temperatur	200 °C
Maximaler Druck	200 bar
Druckverlust	Nahezu 0
Einlauf- / Auslaufstrecken	20 x DN / 5 x DN
Kostenspanne	siehe Abbildung 6

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

4.9.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Auch bei sehr großen Nennweiten einsetzbar (DN > 600)
- Extrem korrosive Messstoffe ohne direkten Kontakt messbar
- Keine Druckverluste
- Hohe Lebensdauer
- Minimale Zeitkonstante: 1 – 20 ms bei leistungsstarken Messgeräten
- Ultraschallsensoren können auch nachträglich jederzeit montiert oder in die Rohrleitung eingeschweißt werden
- Messprinzip ist bei homogenen Medien unabhängig von den physikalischen Messstoffeigenschaften

Nachteile

- Messergebnis stark vom Strömungsprofil abhängig, da die Mediumsgeschwindigkeit nur auf einem schmalen Pfad oder in einem kleinen Bereich bestimmt wird
- Mäßige bis geringe Messgenauigkeit. Stark abhängig von den Messstoffeigenschaften (akustische Transparenz)
- Ablagerungen führen zu Messfehlern und Ausfällen
- Doppler-Verfahren nur in speziellen Anwendungen einsetzbar (z. B. für Durchflussüberwachung)
- Hoher Anschaffungspreis

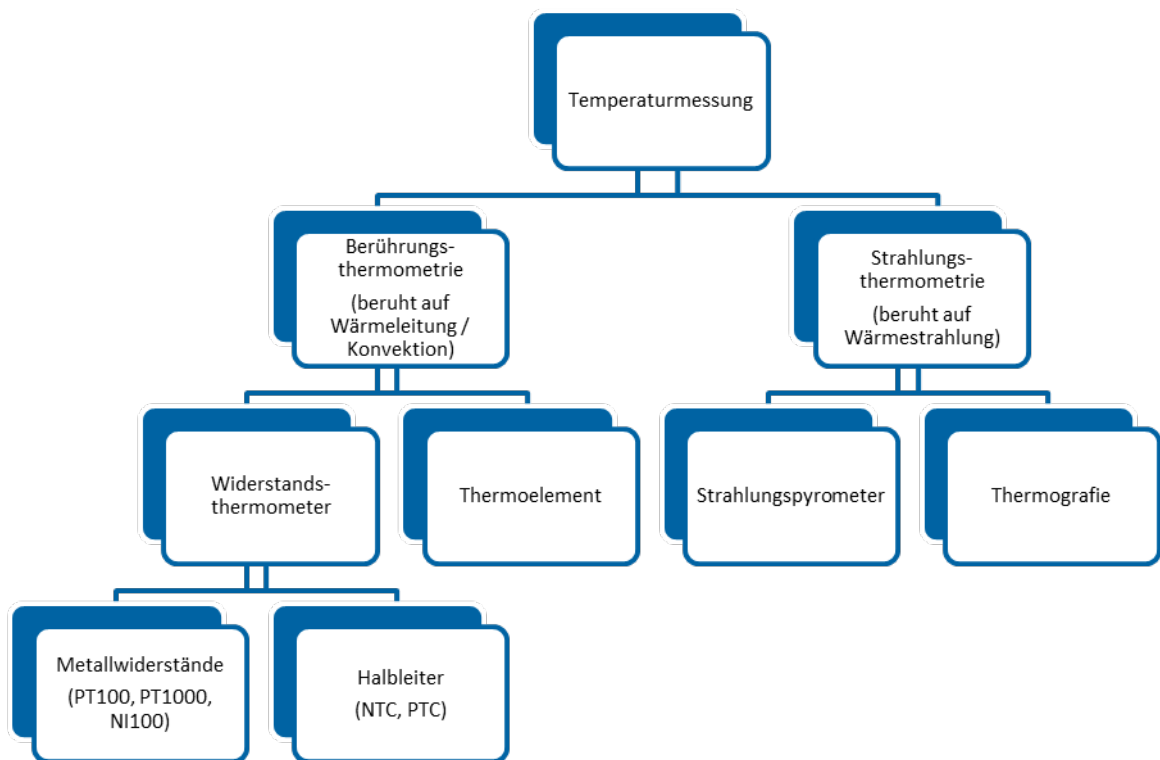
4.9.6 Praxistipps

- Bei der Anbringung eines Clamp-on-Systems ist auf eine saubere Rohroberfläche zu achten
- Berücksichtigung der Brechungs- und Reflexionsgesetze beim Einsatz von Clamp-on Systemen:
 - Der Schallimpuls muss die Rohrwandung und eventuelle Ablagerungen mit unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten zweimal durchdringen. Aufgrund der relativ stark von dem Medium abhängigen Schallgeschwindigkeit kommt es an der Grenzfläche zweier unterschiedlicher Medien zu einer Brechung der Ultraschall Messsignale. Besonders problematisch gestaltet sich die Ein- und Auskopplung der Ultraschall- Messsignale, wenn die Rohrleitung aus Metall gefertigt ist und in der Rohrleitung ein gasförmiges Medium strömt. Da die Schallgeschwindigkeit eines Metalls und eines Gases üblicherweise einen Unterschied von einer Größenordnung aufweisen, wird an der Grenzfläche sowohl beim Einkoppeln als auch beim Auskoppeln ein Großteil der Ultraschall-Messsignale rückreflektiert. Der rückreflektierte Anteil ist so groß, dass mit einem konventionellen Ultraschallsensor keine verlässliche Durchflussmessung möglich ist. Daher sollten bei der Auswahl des Messgerätes die jeweiligen Gegebenheiten (Rohr und Fluid) berücksichtigt werden.
- Allgemein sollten die Herstellerangaben hinsichtlich empfohlener Einsatzbereiche berücksichtigt werden:
 - Temperaturbereich
 - Druckbereich
 - Messbereich
- Einhaltung der empfohlenen Ein-/Auslaufstrecken
- Die Vermeidung von Luftansammlung ist wichtig da es sonst zu einer Zerstreuung der Ultraschallsignale kommt. Für eine funktionierende Messung sollte ein Luftanteil von 2 % und ein Feststoffanteil von 5 % nicht überschritten werden.

5 Temperaturmessung

Die Temperaturmessung stellt eine der häufigsten Anwendungen der industriellen Messtechnik sowie der Verfahrenstechnik dar. Nachfolgend wurde eine Einteilung unterschiedlicher Prinzipien zur Temperaturmessung getroffen (siehe Abbildung 32):

Abbildung 32: verschiedene Temperaturmessverfahren



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

In den nachfolgenden Abschnitten werden Widerstandsthermometer, Thermoelemente sowie die Thermografie im Detail beschrieben.

5.1 Auswahl des richtigen Messverfahrens

Die nachfolgende Tabelle 22 soll bei der Wahl des geeigneten Messverfahrens abhängig vom Temperaturbereich sowie der gewünschten Genauigkeit unterstützen:

Tabelle 22: Messmethoden für Widerstandsthermometer mit Metallmesswiderständen

Messmethode	Temperatur von	Temperatur bis	Fehlergrenzen
Pt-Widerstandsthermometer	-200	1.000	0,3...4,6 °C je nach Temperatur (nach EN 60751)
Ni-Widerstandsthermometer	-60	250	0,4...2,1 °C je nach Temperatur (nach DIN 43760)

Quelle: VDI/VDE 3511, Blatt 1, 1996

Tabelle 23: Messmethoden für Widerstandsthermometer mit Halbleiter-Messwiderständen

Messmethode	Temperatur von	Temperatur bis	Fehlergrenzen
Heißleiter-Widerstandsthermometer, Thermistoren	-40 -60 -100	180 200 400	0,1...1 °C; 0,5...2,5 °C je nach Temperatur
Kaltleiter-Widerstandsthermometer	kein Wert	200	2...10 °C
Silizium-Messwiderstände	-70	175	0,2...1 °C

Quelle: VDI/VDE 3511, Blatt 1, 1996

Tabelle 24: Messmethoden für Thermoelemente

Messmethode	Temperatur von	Temperatur bis	Fehlergrenzen
Cu-CuNi, Typ U, T	-200	600	0,75 % des Sollwertes der Temperatur, mindestens nach EN 60584
Fe-CuNi, Typ L, J	-200	900	0,75 % des Sollwertes der Temperatur, mindestens nach EN 60584

Messmethode	Temperatur von	Temperatur bis	Fehlergrenzen
NiCr-Ni, Typ K, NiCrSi-NiSi, Typ N	0	1.300	0,75 % des Sollwertes der Temperatur, mindestens nach EN 60584
PtRh-Pt, Typ R, S	0	1.600	0,5 % des Sollwertes der Temperatur, mindestens nach EN60584
10 % Rh (S); 13 % Rh (R)	0	1.800	0,5 % des Sollwertes der Temperatur, mindestens nach EN60584

Quelle: VDI/VDE 3511, Blatt 1, 1996

Tabelle 25: Messmethoden für Strahlungsthermometer

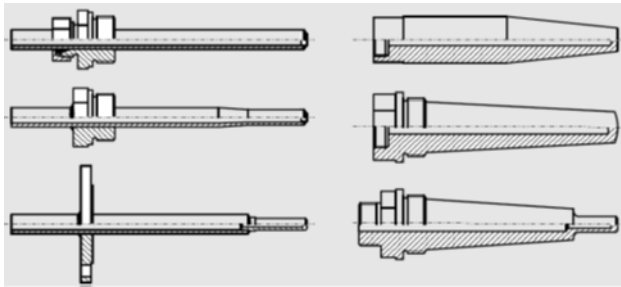
Messmethode	Temperatur von	Temperatur bis	Fehlergrenzen
Spektralpyrometer	20	5.000	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C
Bandstrahlungspyrometer	-100	2.000	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C
Gesamtstrahlungspyrometer	-100	2.000	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C
Verhältnisprometer	150	3.000	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C
Thermografie-Geräte	-50	1.500	0,5...1,5 % der Temperatur, mindestens jedoch 0,5...2 °C im Bereich von -100...400 °C

Quelle: VDI/VDE 3511, Blatt 1, 1996

Neben den Temperaturniveaus und der gewünschten Messgenauigkeit sind außerdem die Prozesseigenschaften (Vibrationen, Druck etc.) bei der Wahl des Messverfahrens zu berücksichtigen. Für den Einsatz unter besonders rauen Messbedingungen (aggressives

Medium, Abrasion, Korrosion etc.) können Schutzrohre zum Schutz der Messfühler eingesetzt werden. Die nachfolgende Abbildung 33 zeigt diverse Schutzrohrbauarten die in der Praxis angewendet werden können:

Abbildung 33: Verschiedene Schutzrohrbauarten



Quelle: Ehinger K. et alii., 2013, Seite 89

Die nachfolgende Tabelle 26 gibt einen Überblick für welche Messverfahren derartige Schutzrohre eingesetzt werden können und somit für rauere Messbedingungen geeignet sind:

Tabelle 26: Verwendung von Schutzrohren

Messverfahren	Ja / Nein
Widerstandsthermometer mit Metallmesswiderständen	Ja
Widerstandsthermometer mit Halbleiter-Messwiderständen	Ja
Thermoelemente	Ja
Strahlungsthermometer	Nein

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

5.1.1 Wirtschaftlichkeit

Die günstigste Variante unter den Temperaturmessprinzipien ist der Nickel beziehungsweise Platin Widerstandsthermometer, dicht gefolgt von den verschiedenen Thermoelementen (es gibt natürlich auch spezielle Thermoelemente welche noch

günstiger als die Widerstandsthermometer sind). Thermografie ist hingegen ziemlich kostenintensiv. Anbei erfolgt eine Aufreihung der zuvor genannten Positionen:

Nickel → Pt100 → Typ K → Typ N → Typ R, S → Typ B → Thermografie

5.1.2 Checkliste für die Installation

Bei der Installation von Messgeräten zur Temperaturmessung sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Ist das Messgerät richtig ausgerichtet (Einbaulage, Einbauposition)?
- Stimmt die Eintauchtiefe des Temperaturfühlers?
- Wurde der richtige Temperaturmessbereich gewählt?
- Wurde die Materialbeständigkeit bezogen auf das zu messenden Medium beachtet (richtiges Schutzrohr verwendet)?
- Mögliche Einflüsse vom Medium (z. B. Prozessdruck, Temperatur) auf das Messgerät?
- Richtiger Prozessanschluss?
- Berücksichtigung der maximalen Betriebstemperatur der Elektronik?
- Treten in der Nähe des Messgerätes elektrische Störfelder auf?
- Ist genügend Platz für Wartungsarbeiten sowie für einen möglichen Ein- und Ausbau des Messsystems vorhanden?
- Ist das Messsystem richtig geerdet?
- Sind die Signalleitungen richtig geschirmt?

In den nachfolgenden Kapiteln wird im Detail auf ausgewählte Verfahren beziehungsweise Prinzipien zur Messung von Temperatur eingegangen.

5.2 Widerstandsthermometer

5.2.1 Erklärung des Messprinzips

Widerstandsthermometer werden in die Kategorie der passiven Sensoren zur Messung von Temperatur eingeordnet, das bedeutet, dass diese Sensoren Hilfsenergie benötigen um ein elektrisches Ausgangssignal zu generieren. Die Funktion von Widerstandsthermometern ist auf die grundlegende Beziehung zwischen dem elektrischen Widerstand eines Leiters und dessen Temperatur zurückzuführen, das heißt

ändert sich die Temperatur des Leiters so ändert sich auch sein elektrischer Widerstand. Im Allgemeinen ist dieser Effekt nicht linear. Durch Einsatz von speziellen Materialien kann für einen eingeschränkten Bereich (Messbereich des Gerätes) ein linearer Zusammenhang hergestellt werden.

Bei den Widerstandsthermometern unterscheidet man grundsätzlich zwischen metallischen Temperatursensoren (z. B. Pt100, Ni100) und Halbleiter Temperatursensoren:

Metallische Temperatursensoren:

Der Zusammenhang von Widerstand und Temperatur kann durch ein Polynom n-ter Ordnung beschrieben werden. Für die Temperaturmesstechnik reicht bei Verwendung von speziellen Metallen wie Platin oder Nickel ein Näherungspolynom zweiter Ordnung, um die (statische) Kennlinie gleichungsgemäß darzustellen:

Formel 19: Widerstand bei Temperatur ϑ in Ω bei metallischen Temperatursensoren

$$R[\Omega] = R_0[1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0) + \beta(\vartheta - \vartheta_0)^2 + \dots]$$

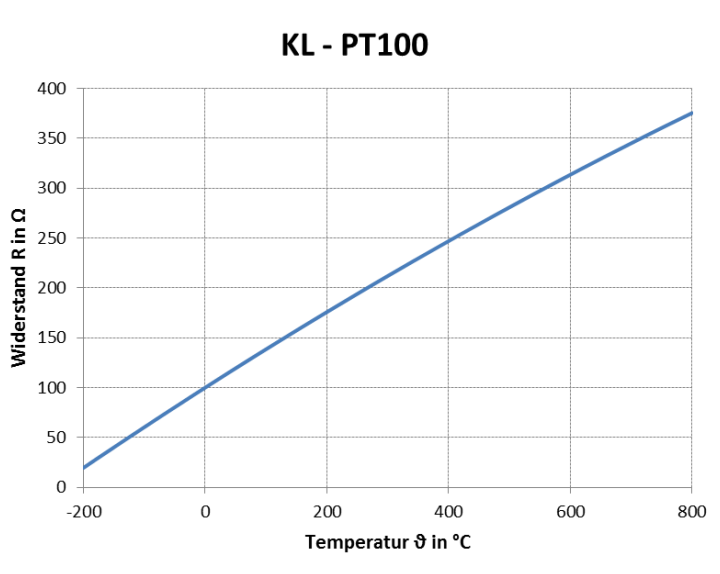
R	Widerstand bei Temperatur ϑ in Ω
R_0	Widerstand bei Referenztemperatur in Ω
ϑ_0	Referenztemperatur (meistens 0 °C) in °C
α, β	Koeffizienten in 1/K bzw. 1/K ²

Für die gebräuchlichen Pt100 Sensoren lauten die Zahlenwerte entsprechend DIN EN 60751 wie folgt:

$$R_0 = 100 \Omega, \quad \vartheta_0 = 0 \text{ °C}, \quad \alpha = 3,908 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}, \quad \beta = -0,58 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}^2$$

Mit den gegebenen Werten kann die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur in einem Diagramm veranschaulicht werden (siehe Abbildung 34).

Abbildung 34: Kennlinie eines Pt100



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Der Widerstand ändert sich in Abhängigkeit der Temperatur. Um das Ausgangssignal zu erfassen, wird der Sensor von einem konstanten Messstrom I gespeist (= Hilfsenergie) und der Spannungsabfall U_m am Widerstand (z. B. Pt100) gemessen. Zur Übertragung dieser Messspannung sowie zur Auswertung und Anzeige unterscheidet man drei Anschlusstechniken (auf diese wird im Kapitel Messaufbau näher eingegangen).

Halbleiter Temperatursensoren:

Halbleitersensoren sind kostengünstiger als metallische Temperatursensoren und lassen sich wie folgt unterteilen:

- NTC (Negative Temperature Coefficient)
- PTC (Positive Temperature Coefficient)

NTC:

Durch ihre günstigen Kosten sind die NTC – Temperatursensoren weit verbreitet. Für NTC - Sensoren kann folgende Gleichung für die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes angeführt werden:

Formel 20: Widerstand bei Temperatur T in Ω für NTC-Sensoren

$$R = R_0 e^{B \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}$$

R	Widerstand bei Temperatur T in Ω
R_0	Widerstand bei Referenztemperatur in Ω
T_0	Referenztemperatur in K
T	Messtemperatur in K
B	materialspezifischer Koeffizient in K

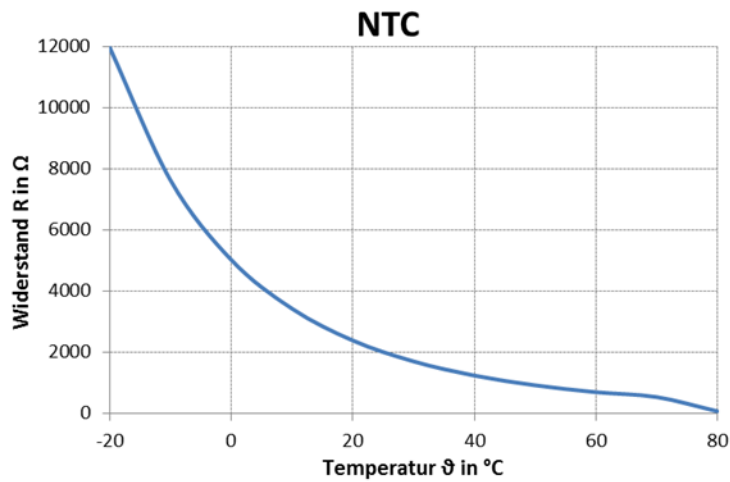
Beispielwerte für einen NTC-Messwiderstand:

$$R_0 = R_{15} = 2.000 \, \Omega, \quad B = 3.000 \, \text{K}, \quad T_0 = 288,15 \, \text{K}$$

Abbildung 35 zeigt beispielhaft die exponentielle Form der Kennlinie eines handelsüblichen NTC. Vergleicht man die untenstehende Kennlinie mit jener eines Pt100, fällt sowohl der große Unterschied im absoluten Widerstand als auch die wesentlich größere Empfindlichkeit des Halbleitersensors sowie dessen Nichtlinearität² auf.

² Nichtlinearität bedeutet, dass z. B. eine Temperaturänderung von 10 °C (in einem bestimmten Temperaturbereich) nicht immer dieselbe Widerstandsänderung bei einem Widerstandsthermometer hervorruft.

Abbildung 35: : Kennlinie eines NTC



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

PTC:

Für PTC – Sensoren kann folgende Gleichung für die Abhängigkeit des Widerstandes von der Temperatur angeführt werden:

Formel 21: Widerstand bei Temperatur T in Ω für PTC-Sensoren

$$R = R_0 e^{b(T-T_0)}$$

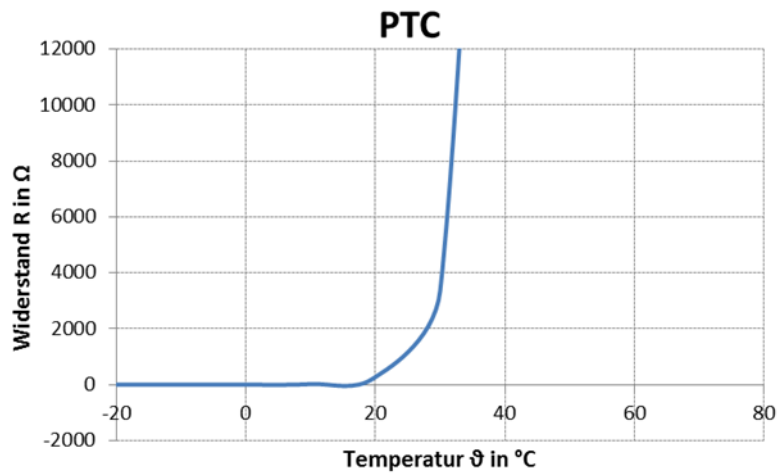
- R Widerstand bei Temperatur T in Ω
- R₀ Widerstand bei Referenztemperatur in Ω
- T₀ Referenztemperatur in K
- T Messtemperatur in K
- b Materialspezifischer Koeffizient in K⁻¹

Beispielswerte für einen PTC-Messwiderstand sind:

$$R_0 = R_{25} = 1.000 \Omega, \quad b = 0,25 \text{ K}^{-1}, \quad T_0 = 298,15 \text{ K}$$

Abbildung 32 zeigt beispielhaft die exponentielle Form der Kennlinie eines handelsüblichen PTC. Auch hier ist die Nichtlinearität des Halbleitersensors zu erkennen.

Abbildung 36: Kennlinie eines PTC



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

5.2.2 Anwendungsgebiet

Widerstandsthermometer sind genauer als Thermoelemente. Diese haben im Allgemeinen eine größere Zeitkonstante T und ermöglichen keine punktförmige Temperaturmessung. Neuere Spezialbauformen von Widerstandsthermometern sind jedoch sehr wohl in der Lage beinahe eine punktförmige Messung der Temperatur zu ermöglichen. Eine große Zeitkonstante T bedeutet, dass es länger dauert bis 63 % des Endwerts des Ausgangssignals (Widerstandswert) nach einer sprungförmigen Eingangsgrößenänderung (Temperaturänderung) erreicht wird. Somit ergibt sich eine gewisse Trägheit bei der Messung mit Widerstandsthermometern. Außerdem ist deren Einsatzbereich auf maximal 850 $^{\circ}\text{C}$ begrenzt. Für die Messung höherer Temperaturen muss auf Thermoelemente zurückgegriffen werden.

5.2.3 Messaufbau

Häufig werden Platin-Messwiderstände verwendet. Man unterscheidet hier zwischen Metalldraht- und Metallschichtwiderständen. Diese können in weitere Untergruppen unterteilt werden. Als Basismaterial dienen meist Keramik-, Glas- oder Kunststoff-Trägerkörper.

Metalldrahtwiderstände

Die Bauformen der Metalldrahtwiderstände können in folgende Kategorien unterteilt werden:

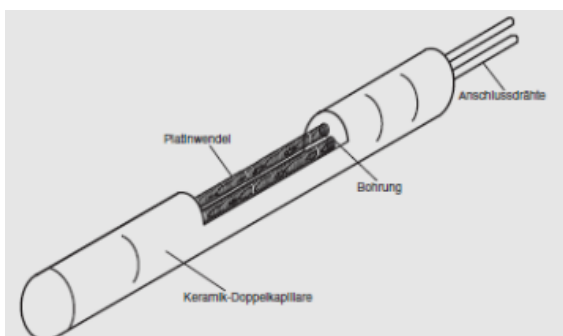
- Keramikwiderstände
- Glas-Messwiderstände
- Nuten-Widerstandsthermometer
- Folien-Temperatursensoren

Aufgrund der Einsatzhäufigkeit wird nachfolgend der Aufbau von Metalldrahtwiderständen **anhand eines Keramikwiderstandes** und eines **Folien-Temperatursensors** dargestellt.

Keramikwiderstand

Aufbau: Eine auf den Nennwert abgeglichene Platinwendel mit Anschlussdrähten wird in die Längsbohrungen einer Keramik-Doppelkapillare eingezogen. In die Kapillarbohrungen wird Glasurfrittenpulver eingerüttelt. Die beiden Enden des Keramikkörpers werden ebenfalls mit Glasurfritte verschlossen. Nach Aufschmelzen der Glasurfritte sind die Anschlussdrähte und die Platinwendel fixiert. Abbildung 37 zeigt schematisch den Aufbau eines derartigen Keramikwiderstandes.

Abbildung 37: Keramik-Metalldrahtwiderstand



Quelle: Ehinger K. et alii, 2013, Seite 69

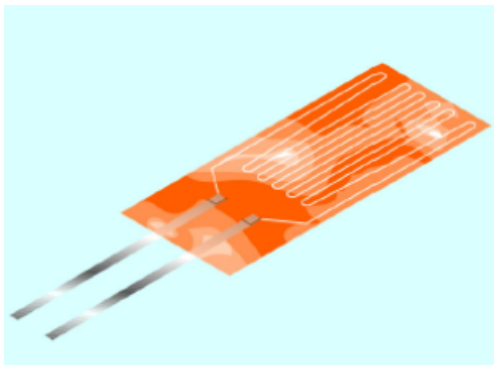
Die äußeren Abmessungen variieren im Durchmesser zwischen 0,9 bis 4,9 mm und in der Länge zwischen 7 und 32 mm.

Einsatz: Eingesetzt wird dieser Sensortyp bei anspruchsvollen Mess- und Regelaufgaben in der Verfahrenstechnik sowie in Laboranwendungen. Diese Bauform wird meist für Doppel-Pt100 Messfühler verwendet. Ein großer Nachteil dieser Bauart ist die Vibrationsempfindlichkeit.

Folien-Temperatursensoren

Aufbau: Die Platin-Messwicklung ist zwischen zwei Polyamidfolien eingebettet und mit Anschlussdrähten verbunden (siehe Abbildung 38).

Abbildung 38: Folien-Temperatursensor



Quelle: Platin-Folien-Temperatursensor-Typenblatt, JUMO GmbH, 2015, Seite 1

Die Dicke eines derartigen Sensors beträgt circa 0,17 mm.

Einsatz: Der Folien-Temperatursensor wird häufig bei der Messung an Rohroberflächen und an schwer zugänglichen Stellen eingesetzt.

Metallschichtwiderstände

Anstelle der Messdrähte werden dünne Platinschichten als temperaturempfindliche Elemente verwendet. Die Schichten sind auf flachen Keramikträgern aufgebracht.

Die Metallschichtwiderstände können in folgende Unterkategorien eingeteilt werden:

- Platin-Dickfilm-Messwiderstände
- Platin-Dünnschicht-Messwiderstände (Flachtypen)

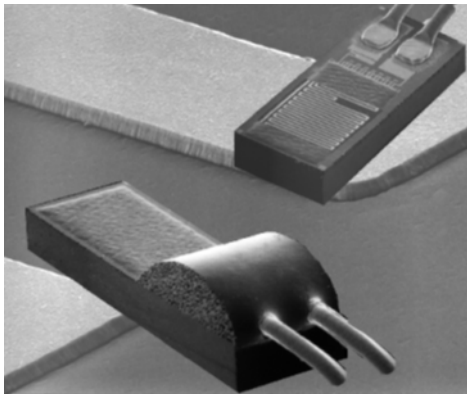
- Dünnschicht-Röhrentypen

Aufgrund der Einsatzhäufigkeit wird nachfolgend der Aufbau von Metallschichtwiderständen ausschließlich anhand eines **Platin-Dünnschicht-Messwiderstandes (Flachtypen)** dargestellt.

Platin-Dünnschicht-Messwiderstände (Flachtypen)

Aufbau: Temperatursensoren in Dünnschichttechnik bestehen aus einem Al₂O₃ (Aluminiumoxid) – Trägersubstrat, auf dem eine dünne Platinschicht aufgebracht ist. Diese wird durch Laser oder mittels Schablone so strukturiert, dass der gewünschte Nennwiderstand erreicht wird. Weiters wird die Platinschicht durch eine glaskeramische Isolierschicht geschützt. Die Anschlüsse bestehen meist aus Ag5Pd. Oftmals werden diese Sensortypen auch als SMD³ - Bauteile hergestellt.

Abbildung 39: Dünnschicht-Messwiderstand



Quelle: Ehinger K. et alii, 2013, Seite 71

Die geometrischen Abmessungen derartiger Flachtypen reichen von 1,4 x 4,6 mm bis zu 2 x 10 mm, die Substratdicken von 0,25 bis 0,65 mm.

³ Surface mounted device

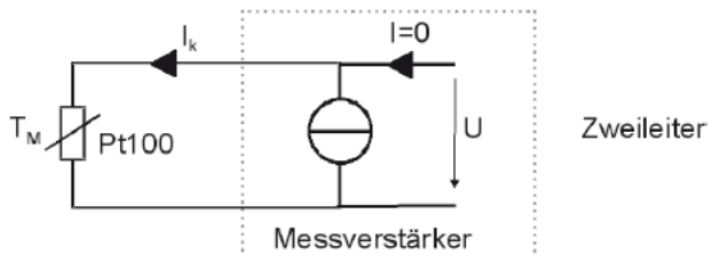
Einsatz: Platin-Dünnschicht-Messwiderstände werden vor allem bei der Temperaturmessung an Oberflächen verwendet. Dieser Sensortyp ist universell einsetzbar und ist in den unterschiedlichsten Anwendungsgebieten zu finden.

Beim Einsatz von Widerstandsthermometern zur Temperaturmessung wird das Messergebnis durch den Widerstand der gewählten Zuleitung beeinflusst. Zur Berücksichtigung dieses Widerstands unterscheidet man zwischen den nachfolgenden drei üblichen Schaltungen für den Messgerätanschluss.

Zweileiterschaltung

Bei der Zweileiterschaltung speist die Stromquelle den temperaturabhängigen Widerstand und die gemessene Spannung U setzt sich aus dem Spannungsabfall am Messwiderstand und den Spannungsabfällen der Anschlusskabel zusammen. Die Spannung U wird dadurch zu groß gemessen und das Messergebnis wird verfälscht. Dieser Einfluss kann jedoch durch einen Abgleichwiderstand kompensiert werden. Abbildung 36 zeigt einen typischen Messaufbau in Zweileitertechnik mit einem Pt100 Messwiderstand:

Abbildung 40: Anschluss Widerstandsthermometer – Zweileiterschaltung

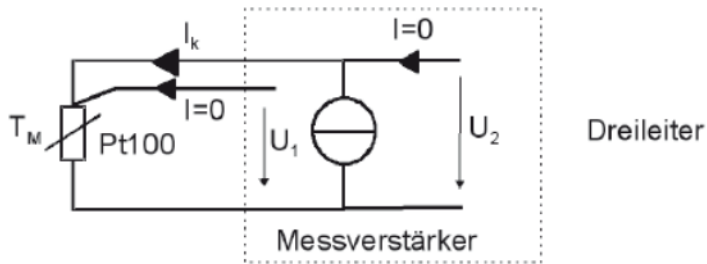


Quelle: Metzger K., 2015, Seite 1

Dreileiterschaltung

Eine bessere Methode bietet die Dreileiterschaltung. Durch Messung von U_1 und U_2 lässt sich der Einfluss durch die Zuleitungswiderstände eliminieren. Die Voraussetzung ist, dass sowohl Hin- als auch Rückleiter gleich lang und von gleichem Material sind. Aus Kenntnis von U_1 und U_2 lässt sich bei gleichartigen Zuleitungen der Widerstand des Pt100 ermitteln (Strom I_k bekannt). Abbildung 41 zeigt einen typischen Messaufbau in Dreileitertechnik mit einem Pt100 Messwiderstand:

Abbildung 41: Anschluss Widerstandsthermometer – Dreileiterschaltung



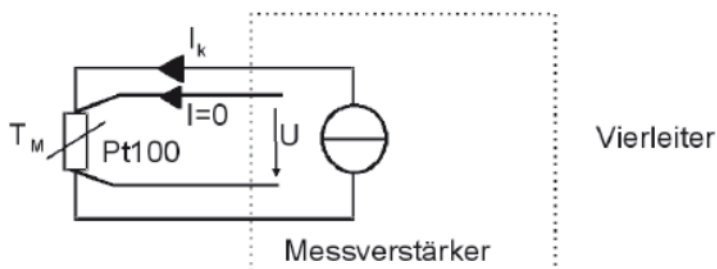
Quelle: Metzger K., 2015, Seite 1

Vierleiterschaltung

Die exakteste Messung gewährleistet die Vierleiterschaltung (siehe Abbildung 42). Da bei dieser Anschlussart die Spannung U stromlos gemessen werden kann, ist sowohl die Spannung am Messwiderstand als auch der Strom I_k durch den Messwiderstand bekannt und damit der Widerstand des Pt100 bestimmbar.

Hier können weder der Zuleitungswiderstand noch die Umgebungstemperatur der Anschlussleitungen einen Einfluss auf das Messergebnis ausüben. Abbildung 42 zeigt einen typischen Messaufbau in Vierleitertechnik mit einem Pt100 Messwiderstand:

Abbildung 42: Anschluss Widerstandsthermometer – Vierleiterschaltung



Quelle: Metzger K., 2015, Seite 1

5.2.4 Typische Kenngrößen

Nachfolgender Tabelle 27 sind typische Kenngrößen zur Temperaturmessung mittels Widerstandsthermometern zu entnehmen:

Tabelle 27: Widerstandsthermometer – Merkmale

Messmedium	Flüssigkeiten, Gas, Dampf, Stäube, feinkörnige Feststoffe mit geringer Abrasivität (vom Schutzrohr abhängig)
Messgenauigkeit (typisch)	0,1 bis 10 °C
Messdynamik	Abhängig vom verwendeten Auswerteverfahren
Einbaugrößen	Kompakt (Transmitter direkt angebaut) oder modulare (Transmitter im Anschlusskopf möglich) Bauform möglich
Maximaler Druck	Vom Schutzrohr und Mediumstyp abhängig, Drücke größer 500 bar möglich
Druckverlust bei maximaler Durchfluss Q_{\max}	Abhängig vom Schutzrohr
Messbereich	-200 bis 850 °C
Kostenspanne	Abhängig vom Schutzrohr, Material und Bauform (kompakt oder mit tauschbarem Transmitter) von wenigen Euro bis mehreren hundert Euro

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

5.2.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Vibrationsfestigkeit (ausgenommen Keramikwiderstand)
- Langzeitstabilität
- Hohe Robustheit
- Hohe Genauigkeit

Nachteile

- Größere Zeitkonstante

- Ermöglichen keine punktförmige Temperaturmessung mit Ausnahme von Spezialausführungen
- Begrenzter Messbereich bis $T_{\max} = 850 \text{ °C}$
- Teurer als Thermoelemente

5.2.6 Praxistipps

Beachtung des vom Hersteller angegebenen Temperaturmessbereichs, um große Messfehler beziehungsweise Messungenauigkeit zu vermeiden. Bei Prozessen bei denen es zu einer starken Fluktuation der Temperatur kommt, ist darauf zu achten, dass der jeweilige verwendete Temperatursensor eine kurze Ansprechzeit besitzt, da nur so genaue Messergebnisse geliefert werden können. Besonders beim Einsatz von Flachsensoren ist auf eine saubere Messoberfläche und einen guten Wärmeübergang zu achten.

Bei einem Pt100 ist vor allem auf den richtigen Einbau und ein entsprechendes Schutzrohr zu achten. Der Pt100 muss vom Medium geschützt sein, die Ansprechzeit sollte aber nicht zu sehr darunter leiden. Je robuster und damit dicker ein Schutzrohr ist, desto höher ist die Ansprechzeit. Darunter leiden vor allem Regelkreise, bei denen die Temperatur eine entscheidende Rolle spielt. Zur Einbausituation ist zu sagen, dass vor allem der Abstand zur Rohr/Behälterwand eine Rolle spielt. Ist dieser Abstand zu klein, kann die Temperatur nicht mit der erwarteten hohen Genauigkeit gemessen werden, sondern wird durch die Umgebungstemperatur, die über das Halsrohr und den Anschlusskopf „eingeschleppt“ wird, verfälscht.

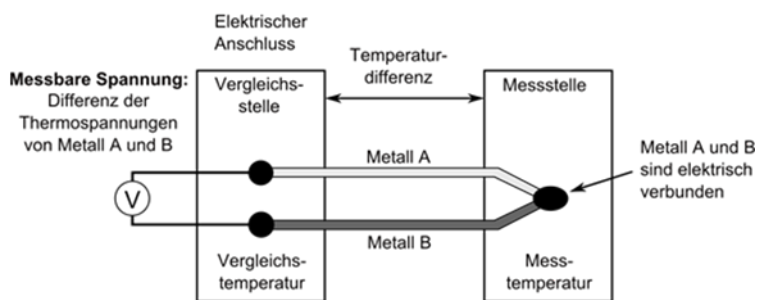
5.3 Thermoelement

5.3.1 Erklärung des Messprinzips

Thermoelemente zählen zu den aktiven Bauelementen in der Sensorik. Unter einem „aktiven“ Bauelement versteht man ein Element, das in der Lage ist ohne Hilfsenergie ein Spannungssignal zu generieren. Der einfache Aufbau und der große Messbereich (-200 °C bis 1.800 °C) sind Vorteile von Thermoelementen. Außerdem eignen sich diese sehr gut für Messungen in hohen Temperaturbereichen ($T_{\max} = 1.800 \text{ °C}$). Ein Thermoelement besteht aus zwei verschiedenen Metalldrähten, die am Messpunkt elektrisch zusammengeführt sind.

Das Prinzip (siehe Abbildung 43) beruht auf dem thermoelektrischen Effekt, auch Seebeck Effekt genannt. Die Menge freier Elektronen ist bei verschiedenen Metallen unterschiedlich groß. Durch die Verbindung diffundieren aus dem Metall mit der größeren Menge freier Ladungsträger Elektronen in das Metall mit einer geringeren Anzahl an freien Ladungsträgern. Es entsteht eine Potentialtrennung und damit eine kleine, aber darstellbare Spannung. Der Wert dieser Spannung ist proportional zur Temperaturdifferenz und zur Materialpaarung. Ein wesentlicher Unterschied zu den Widerstandstemperatursensoren liegt darin, dass Thermoelemente nicht die absolute Temperatur, sondern Temperaturdifferenzen messen. Eine Thermospannung tritt nur dann auf, wenn eine Temperaturdifferenz vorhanden ist. Daher muss bei der Messung mit Thermoelementen die Temperatur der Vergleichsstelle bekannt sein, um eine Aussage über die Temperatur an der Messstelle treffen zu können.

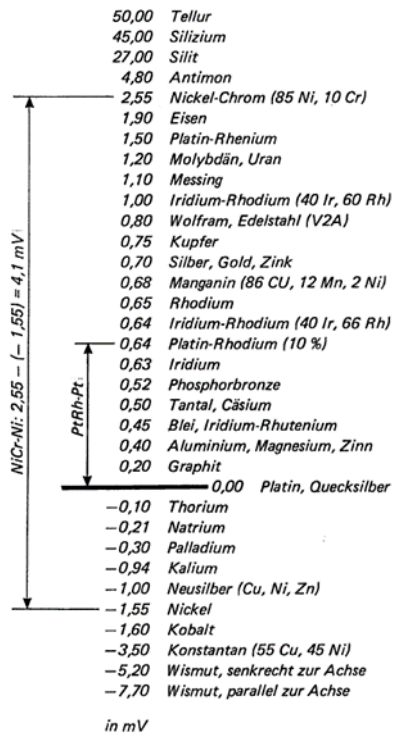
Abbildung 43: Funktionsweise – Thermoelement



Quelle: Görtler G., 2014, Seite 95

Der Zusammenhang zwischen der Thermospannung und der Temperaturdifferenz ist von der Werkstoffkombination abhängig. Die Thermospannungen der industriell genutzten Werkstoffkombinationen liegen im Bereich von circa $5\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$ bis circa $100\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$. Die zur Temperaturmessung geeigneten Werkstoffe lassen sich nach Thermospannungen geordnet in der sogenannten thermoelektrischen Spannungsreihe, meist gegen Platin als Referenzmetall, darstellen – siehe Abbildung 44.

Abbildung 44: Thermoelektrische Spannungsreihe



Quelle: VDI/VDE 3511 Blatt 2, 1996, Seite 18

Häufig sind in der Praxis größere Entfernungen zwischen Messort und Vergleichsstelle zu überbrücken. Ideal wäre es, die Einzelschenkel jedes Thermopaars als „Thermoleitung“ aus den gleichen Materialien bis zur Vergleichsstelle zu führen. Aus Kostengründen, werden jedoch Ersatzwerkstoffe mit einem vergleichbaren thermoelektrischen Verhalten verwendet. Diese Zuleitungen bis zur Vergleichsstelle werden „Ausgleichsleitungen“ genannt.

5.3.2 Anwendungsgebiet

Aufgrund des sehr hohen aber auch großen Messbereichs der Thermoelemente werden diese vermehrt im Hochtemperaturbereich eingesetzt. Aufgrund des Kostenvorteils gegenüber Widerstandsthermometern kommen diese aber auch in vielen anderen Bereichen der Temperaturmessung breit zum Einsatz.

5.3.3 Messaufbau

Die einfachste Form der Thermoelemente stellen Thermopaare aus isolierten Thermodrahnten dar. Als Isolationswerkstoffe werden ublicherweise Glasseide, Mineralfasern, PVC, Silikongummi, PFA oder Keramik verwendet. Entsprechend EN 60584/IEC 584 werden Thermoelemente allgemein in zwei Gruppen unterteilt:

- Edelmetall-Thermopaare (Typ S, R und B)
- Unedelmetall-Thermopaare (Typ E, J, K, N und T)

Eine Übersicht der genormten Thermopaare und ihre wichtigsten Eigenschaften beziehungsweise Kennzahlen werden in der nachfolgenden Tabelle 32 dargestellt. Die Grafik beinhaltet Informationen über den Typ des jeweiligen Thermopaars, den Temperaturbereich in dem es eingesetzt wird (Messbereich) und die jeweiligen Toleranzklassen⁴. Die am häufigsten verwendeten Typen sind K und J.

Tabelle 28: Genormte Thermopaare

Typ	Temperaturbereich °C (dauernd)	Temperaturbereich °C (kurzfristig)	Toleranzklasse 1 (°C)	Toleranzklasse 2 (°C)
K	0 bis +1.100	-180 bis +1.300	± 1,5 zwischen -40 °C und 375 °C ± 0,004 x T zwischen 375 °C und 1.000 °C	± 2,5 zwischen -40 °C und 333 °C ± 0,0075 x T zwischen 333 °C und 1.200 °C
J	0 bis +750	-180 bis +800	± 1,5 zwischen -40 °C und 375 °C ± 0,004 x T zwischen 375 °C und 750 °C	± 2,5 zwischen -40 °C und 333 °C ± 0,0075 x T zwischen 333 °C und 750 °C
N	0 bis +1.100	-270 bis +1.300	± 1,5 zwischen -40 °C und 375 °C ± 0,004 x T zwischen 375 °C und 1.000 °C	± 2,5 zwischen -40 °C und 333 °C ± 0,0075 x T zwischen 333 °C und 1.200 °C
R	0 bis +1.600	-50 bis +1.700	± 1,0 zwischen 0 °C und 1.100 °C	± 1,5 zwischen 0 °C und 600 °C

⁴ Die Toleranzklassen geben die maximale Abweichung in Grad Celsius eines Thermoelementes von den genormten Grundwerten an. Es sind drei Toleranzklassen genormt, die als Klasse 1, 2 und 3 bezeichnet werden, wobei in der Klasse 1 die geringsten Abweichungen zugelassen sind.

Typ	Temperaturbereich °C (dauernd)	Temperaturbereich °C (kurzfristig)	Toleranzklasse 1 (°C)	Toleranzklasse 2 (°C)
			$\pm [1 + 0,003 \times (T-1100)]$ zwischen 1.100 °C und 1.600 °C	$\pm 0,0025 \times T$ zwischen 600 °C und 1.600 °C
S	0 bis +1.600	-50 bis +1.750	$\pm 1,0$ zwischen 0 °C und 1.100 °C $\pm [1 + 0,003 \times (T-1100)]$ zwischen 1.100 °C und 1.600 °C	$\pm 1,5$ zwischen 0 °C und 600 °C $\pm 0,0025 \times T$ zwischen 600 °C und 1.600 °C
B	+200 bis +1.700	0 bis +1.820	Nicht verfügbar	$\pm 0,0025 \times T$ zwischen 600 °C und 1.700 °C
T	-185 bis +300	-250 bis +400	$\pm 0,5$ zwischen -40 °C und 125 °C $\pm 0,004 \times T$ zwischen 125 °C und 350 °C	$\pm 1,0$ zwischen -40 °C und 133 °C $\pm 0,0075 \times T$ zwischen 133 °C und 350 °C
E	0 bis +800	-40 bis +900	$\pm 1,5$ zwischen -40 °C und 375 °C $\pm 0,004 \times T$ zwischen 375 °C und 800 °C	$\pm 2,5$ zwischen -40 °C und 333 °C $\pm 0,0075 \times T$ zwischen 333 °C und 900 °C

Quelle: Görtler G., 2014, Seite 97

5.3.4 Typische Kenngrößen

Nachfolgender Tabelle 33 sind typische Kenngrößen zur Temperaturmessung mittels Thermoelementen zu entnehmen:

Tabelle 29: Thermoelemente – Merkmale

Messmedium	Flüssigkeiten, Gas, Dampf, Stäube, Feinkörnige Feststoffe mit geringer Abrasivität (vom Schutzrohr abhängig)
Messgenauigkeit (typisch)	0,75 % des Sollwertes der Temperatur, mindestens nach EN 60584; 0,5 % des Sollwertes der Temperatur, mindestens nach EN 60584
Messdynamik	Abhängig vom verwendeten Auswerteverfahren

Einbaugrößen	Abhängig vom Schutzrohr
Maximaler Druck	Abhängig vom Schutzrohr
Messbereich	-200 bis 1.800 °C
Kostenspanne	Vor allem Abhängig vom verwendeten Schutzrohr. Erst bei sehr hohen Temperaturen (ab 1.400 °C), auch vom Thermoelement abhängig (alle Platin Thermoelemente)

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

5.3.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Sehr großer Messbereich (-200 °C bis über 1.000 °C)
- Schnelle Ansprechzeiten
- Kleine Bauformen
- Extreme Erschütterungsfestigkeit
- Langzeitstabilität
- Hohe Robustheit
- Kostengünstig

Nachteile

- Genauigkeit geringer als bei Widerstandsthermometern
- Anfällig für Drift
- Hochtemperaturmessungen sind herausfordernd
- Ausgleichsleitungen müssen verwendet werden

5.3.6 Praxistipps

Wichtig: Eine ausreichende Eintauchtiefe des Thermoelements ist erreicht, wenn weiteres Eintauchen nicht mehr zu einer Veränderung der angezeigten Temperatur führt. Eine weit verbreitete Regel besagt, dass die Mindesteintauchtiefe eines Thermometers 15 Mal dem Außendurchmesser plus der eineinhalbfachen Länge des Messwiderstandes entspricht.

5.4 Temperaturfühlerkonstruktionen für die Industrie

Um die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Messprinzipien auf Sensorebene (Widerstandsthermometer und Thermoelement) einsetzen zu können, wird nachfolgend auf den Messaufbau in der Praxis eingegangen. Temperaturfühler (Thermoelemente oder Widerstandsthermometer) können im Aufbau auf drei Grundversionen zurückgeführt werden – diese werden in den nachfolgenden Kapiteln erläutert.

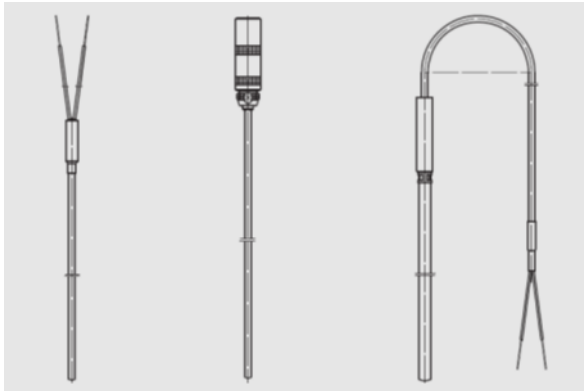
5.4.1 Mantel-Temperaturfühler

Mantel-Temperaturfühler (siehe Abbildung 45) bestehen aus einem metallischen Rohr mit innenliegenden Drähten, die in ein Isolationspulver eingebettet sind. An einem Ende ist das Messelement gekapselt angefügt, am anderen Ende das Anschlussstück, das aus einem Kabel, Stecker oder Anschlusskasten besteht. Das Messelement kann entweder ein Widerstandsthermometer oder ein Thermoelement sein. Die häufigsten Anwendungsbereiche dieser Ausführung sind:

- Lagertemperaturmessungen
- Heißgaskanäle
- Offene Behälter
- Labors
- Prüfstände
- und so weiter

Außerdem werden Mantel-Temperaturfühler zum Messen an schwer zugänglichen Stellen eingesetzt.

Abbildung 45: Temperaturfühler in der Bauart Mantelthermometer zum direkten Kontakt mit dem Medium



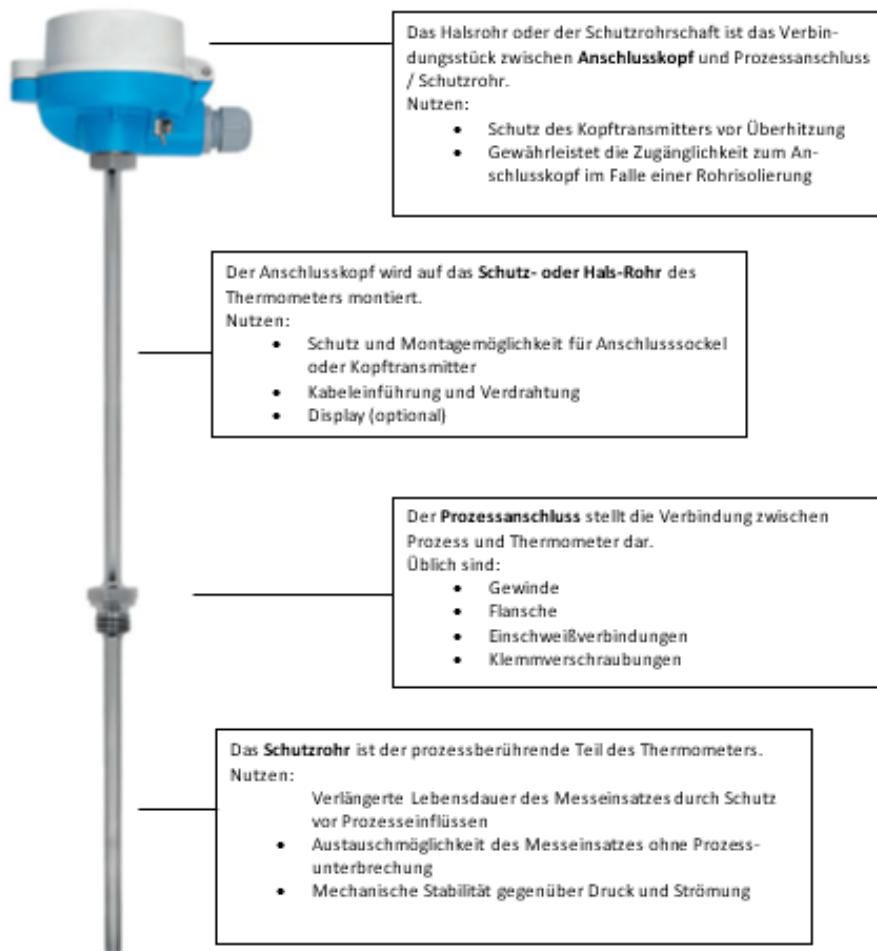
Quelle: Ehinger K. et. Al., 2013, Seite 77

5.4.2 Temperaturfühler mit auswechselbarem Messeinsatz

Temperaturfühler mit auswechselbarem Messeinsatz (siehe Abbildung 46) beinhalten als Messelement eine Einheit gleichen Aufbaus wie bei Mantel-Temperaturfühler. Das Anlussteil besteht in der Regel aus einem Keramiksockel mit Schraubklemmen. Um einen Austausch ohne Unterbrechung des laufenden Prozesses zu ermöglichen und die Messeinheit vor den Prozessbedingungen zu schützen, wird diese in eine Schutzarmatur eingebaut. Diese besteht aus einem Schutzrohr mit Prozessanschluss (z. B. Flansch, Gewinde) und einem Anschlusskopf, der den notwendigen Anschluss externer Kabel ermöglicht. Die Anschlussköpfe und Schutzrohre sind entsprechend genormt⁵.

⁵ DIN 43729 für Anschlussköpfe, DIN 43772 für Schutzrohre

Abbildung 46: Messaufbau Temperaturmessung stationär



Quelle: Temperaturmesstechnik - Thermometer und Transmitter für die Prozessindustrie, E&H AG, 2015, Seite 4

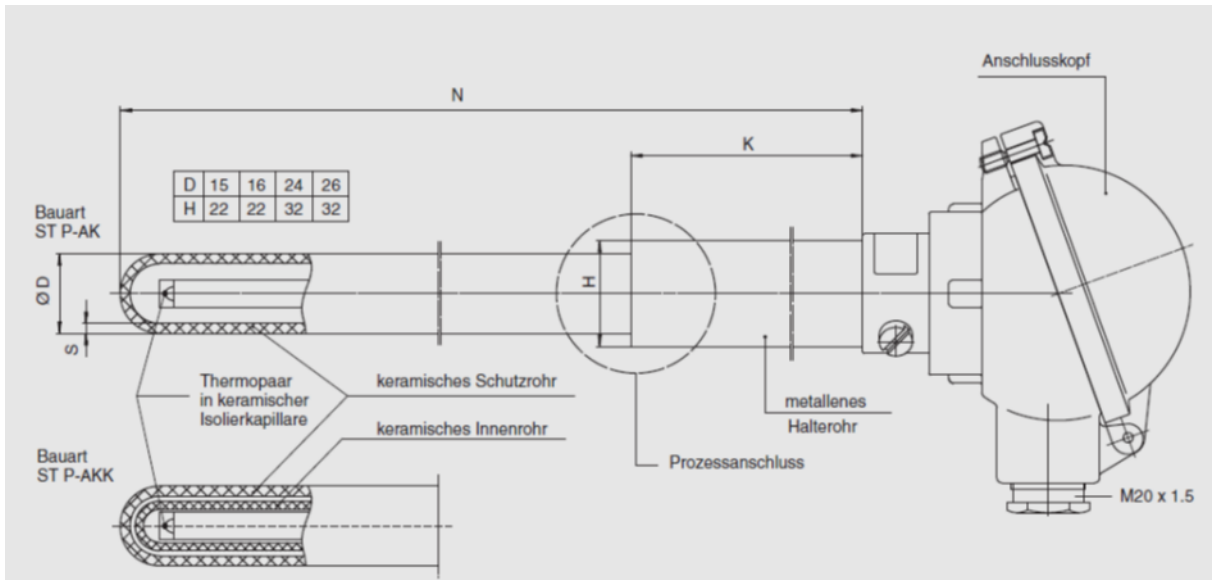
5.4.3 Temperaturfühler für hohe Temperaturen

Diese Bauart wird ebenfalls mit austauschbarem Messeinsatz konstruiert. Aufgrund des Einsatzes bei hohen Temperaturen (bis 1.800 °C), besitzt diese Art von Fühlern einige bauliche Besonderheiten:

- Messeinsatz → Thermopaardrähte mit großem Leiterquerschnitt im Keramik-Isolierstab
- Schutzrohr → Aus hitzebeständigen Metall- beziehungsweise Keramikschutzrohr

Nachfolgende Abbildung 47 zeigt ein Beispiel für einen Temperaturfühler in einer Bauart für hohe Temperaturen:

Abbildung 47: Temperaturfühler für hohe Temperaturen



Quelle: Ehinger K. et alii, 2013, Seite 81

5.4.4 Einbaubedingungen

In der Industrie gibt es vielfältige Anwendungen der Temperatur-Messtechnik. Daher lassen sich nicht immer standardisierte Temperaturfühler verwenden. Es sind häufig Sonderausführungen erforderlich, um die Messung zu optimieren, z. B. Messfühler mit extrem kurzer Sensorlänge oder –Schutzrohre mit geringer Masse.

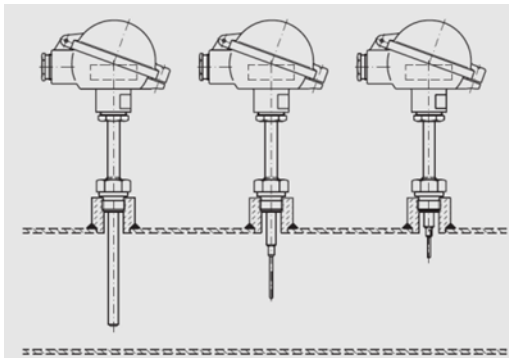
Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den verschiedenen Einbaubedingungen der zuvor beschriebenen Temperaturfühler. Außerdem wird hier auch auf die am häufigsten verwendeten Prozessanschlussarten eingegangen und sonstige wichtige Informationen bezüglich Einbau bereitgestellt.

Einbau mit Schutzrohr

Steht die rechnerisch benötigte Einbaulänge für den Temperaturfühler nicht zur Verfügung, können durch konstruktive Maßnahmen am Fühler oder an der Einbaustelle günstigerer Verhältnisse geschaffen werden:

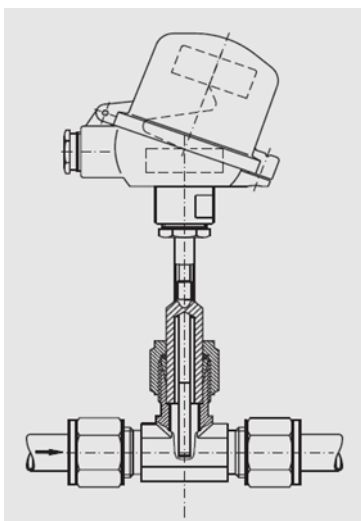
- Eine verjüngte Schutzrohrspitze verkürzt die erforderliche Einbaulänge um circa 30 %
- in Rohrleitungen mit geringem Durchmesser (DN 10...DN 20) kann das Schutzrohr zu einem Teil des Stutzens gemacht werden.

Abbildung 48: Kürzere Einbaulängen durch reduzierte Schutzrohrspitze oder freiliegenden Messeinsatz



Quelle: Ehinger K. et alii, 2013, Seite 83

Abbildung 49: Temperatureinbau in Rohrleitungen mit geringem Durchmesser (Stutzen Teil des Schutzrohrs)

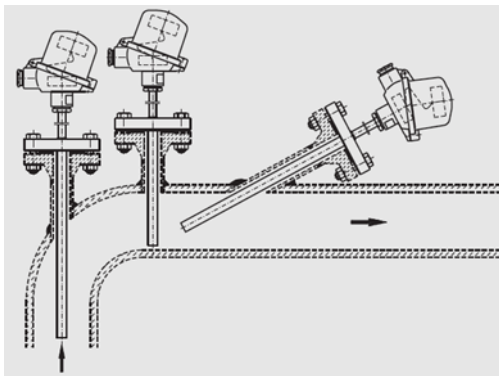


Quelle: Ehinger K. et alii, 2013, Seite 83

Durch die Wahl der Stutzenposition kann die für den Fühler notwendige Einbaulänge geschaffen werden. Folgende Varianten sind möglich:

- Verlängerung des Rohrstutzens für den Fühler (siehe Abbildung 49)
- Erweiterung der Rohrleitung
- Schräge Einbau
- Einbau in einen Rohrkrümmer (diese Einbauart ist vorzuziehen, da sie die geringste Versperrung des Querschnittes und geringste Schutzrohrbelastung ergibt (siehe Abbildung 50).

Abbildung 50: Verschiedene Einbaupositionen von Temperaturfühlern in Rohrleitungen



Quelle: Ehinger K. et alii, 2013, Seite 84

Einbau ohne Schutzrohr

Der Vorteil dieser Einbauweise besteht darin, dass eine schnellere Ansprechzeit und wegen des geringeren Durchmessers (möglich: 2, 3, 6 mm) stark verkürzte Einbaulängen realisiert werden können. Bei Thermoelementen hat man im Vergleich zu Widerstandsthermometern eine punktförmige Messstelle, so dass extrem kurze Einbaulängen möglich sind. Nachfolgender Tabelle 30 sind die empfohlenen Einbaulängen unterschiedlicher Durchmesser von Temperaturfühlern zu entnehmen.

Tabelle 30: Empfohlene Mindesteinbaulängen in mm für direkt eintauchende (ohne Schutzrohr) Temperaturfühler

Medium	Durchmesser 1,5 mm	Durchmesser 3 mm	Durchmesser 6 mm
Gasförmig	30 mm	60 mm	100 mm
Flüssig	8 mm	30 mm	60 mm
Fest	5 mm	20 mm	30 mm

Quelle: Ehinger K. et alii, 2013, Seite 84

Für Widerstandsthermometer, muss bei der Mindesteinbaulänge zwischen circa 7 und 30 mm hinzuaddiert werden, da diese im Gegensatz zu den Thermoelementen im Normalfall keine punktförmigen Messstellen aufweisen und so deren Einbaulänge etwas länger sein muss.

Prozessanschlussarten

Der Einbau in Rohrleitungen und Behälter erfolgt vorwiegend über Gewinde-, Flansch- oder Schweißanschluss. Nachfolgend wird auf die häufigsten Anschlussarten eingegangen:

- **Einschraubanschluss:**
Bei zylindrischen Gewinden erfolgt die Abdichtung durch die am Dichtbund eingelegte Dichtung. Je nach dort anstehender Temperatur und Aggressivität des Mediums können Dichtungen aus Fluor-Kunststoffen, Kupfer oder Edelstahl ausgewählt werden. Die dichtbaren Drücke sollen maximal 100 bar betragen.
Bei konischen Gewinden erfolgt die Abdichtung im Gewinde durch formschlüssige Verbindungen ohne weitere Dichtung. Dadurch wird die Dichtfläche durch die gesamte Gewindelänge gebildet und der dichtbare Druck ist größer. Je nach Herstellungsverfahren des Gewindes für Einschraubstutzen und -zapfen sowie Materialfestigkeit können Dichtdrücke von 300 bis 400 bar erreicht werden.
- **Flanschanschluss:**
Hier bestimmt der Flansch-Nenndruck den maximalen Druck. Es gibt Druckstufen bis zu 160 bar, die bei geringem Druck mit Flachdichtungen, bei größeren Druckstufen durch Rundschnurringe im Nut-Feder-System gedichtet werden.

Es gilt: je kleiner die projizierte Fläche der Dichtung, desto höher der Dichtdruck, da durch das Zusammenschrauben beider Teile eine höhere spezifische Flächenpressung erreicht wird.

- **Einschweißanschluss:**

Im Bereich bis 700 bar werden häufig Einschweiß-Schutzrohre verwendet. Bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten ist darauf zu achten, dass die Verbindung Stutzen/Schutzrohr als Passung ausgeführt ist, um Schäden wie Schutzrohrabrisse durch Resonanzschwingung vorzubeugen.

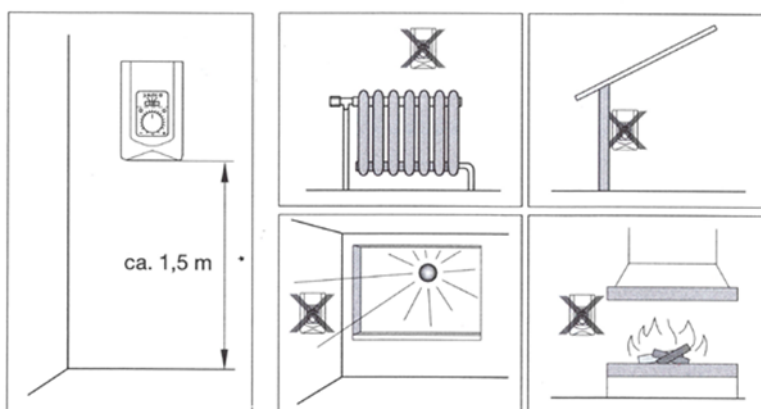
- **Konus-und Linsenanschluss:**

Für Hochdruckanwendungen (bis maximal 4.000 bar) in der Gassynthese, bei denen der Fühler schnellansprechend und austauschbar sein muss, verwendet man konusförmige Dichtsysteme.

Sonstiges

Beim Einbau von Temperatursensoren ist drauf zu achten, dass die Messstelle repräsentativ für die zu messende Größe ist. Ein Großteil der groben Messfehler ist auf eine falsche oder schlechte Positionierung des Sensors zurückzuführen. Am Beispiel einer Raumtemperaturmessung in Abbildung 51 kann dies recht einfach nachvollzogen werden. Der Sensor soll möglichst so platziert werden, dass er die gefühlte Raumtemperatur erfasst (Abstand vom Boden circa 1,5 m). Ein häufiger Fehler ist die fehlende oder ungenügende Abschirmung von Sonneinstrahlung oder sonstigen Störeinflüssen.

Abbildung 51: Richtige Positionierung von Raum –Temperatursensoren



Quelle: Görtler G., 2014, Seite 102

Beim Einbau von Temperaturfühlern in Rohrleitungen sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Guter Wärmeübergang zwischen Fühler und zu messendes Fluid
- Möglichst geringe Wandstärke des Schutzrohres
- Einbau senkrecht oder gegen die Strömungsrichtung
- Ausreichende Strömungsgeschwindigkeit
- Vermeidung von Kaltwasserzonen
- Geeignete Einbaulänge
- Wärmeisolierung gegenüber Umgebung

5.5 Thermografie

5.5.1 Erklärung des Messprinzips

Infrarot-Thermografie ist ein kontaktloses und visualisierendes Temperaturmessverfahren zur Anzeige der Oberflächentemperaturen von Objekten. Dabei wird die Intensität der Infrarotstrahlung, die von einem Punkt ausgeht, als Maß für dessen Temperatur herangezogen.

Das Prinzip der Thermografie beruht auf dem physikalischen Phänomen, dass jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes ($-273,15\text{ °C}$) elektromagnetische Strahlung aussendet. Die in der Praxis vorkommenden Körper weisen sehr vielfältige Strahlungseigenschaften auf. So hat es sich bewährt, zunächst die vereinfachten Gesetzmäßigkeiten für einen Modellkörper mit idealen Strahlungseigenschaften zu beachten, um sie dann auf die real vorkommenden Objekte anzuwenden. Hier spricht man vom sogenannten schwarzen Strahler. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass er von allen Körpern gleicher Temperatur die größtmögliche Intensität der ausgesandten Strahlung aufweist. Die spektrale Verteilung der von einem schwarzen Strahler ausgesandten Strahlung wird durch das Planck'sche Strahlungsgesetz beschrieben. Jeder Körper mit einer Temperatur größer als der absolute Nullpunkt sendet elektromagnetische Strahlung aus, die in Relation zur Temperatur des Körpers und zur Wellenlänge steht (Planck'sches Strahlungsgesetz):

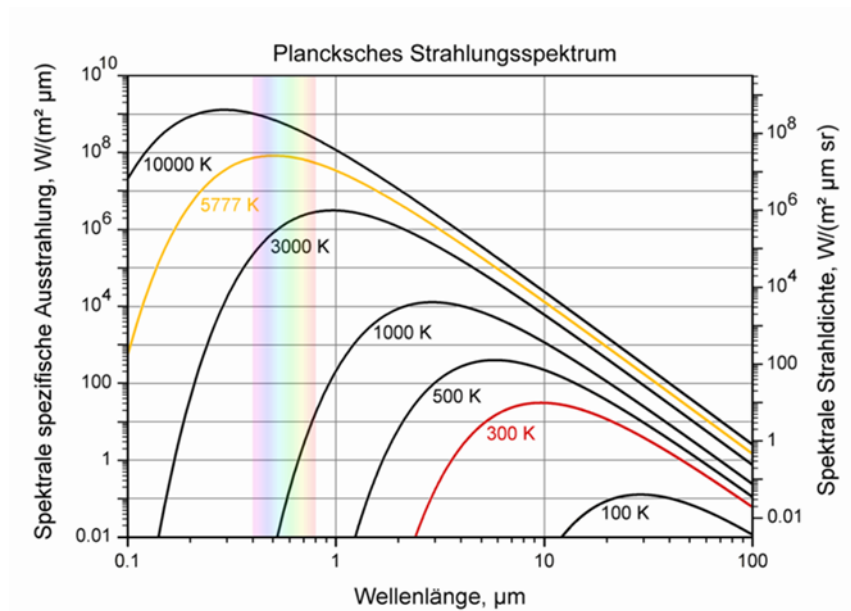
Formel 22: Planck'sches Strahlungsgesetz

$$\omega_\nu = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3 \left(e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1 \right)^{-1}}$$

ω_ν	Energiedichte
h	$6,626176 \cdot 10^{-34}$ Js (Planck'sches Wirkungsquantum)
ν	Frequenz
c	Lichtgeschwindigkeit
k	$1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K (Boltzmann-Konstante)
T	Temperatur

Das plancksche Strahlungsgesetz verdeutlicht, dass mit höheren Temperaturen das Maximum der spektralen Emission zu kürzeren Wellenlängen verschoben wird. Dieses Verhalten ist in Abbildung 52 dargestellt:

Abbildung 52: Verschiebung des Maximums der spektralen Emission zu kürzeren Wellenlängen



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Diese Verschiebung lässt sich mathematisch durch das wiensche Verschiebungsgesetz (durch Differentiation aus der planckschen Gleichung abgeleitet) beschreiben:

Formel 23: Wiensche Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{max} \cdot T = 2896 \mu m \cdot K$$

λ_{max} Wellenlänge, bei der die Intensität pro Wellenlängenintervall maximal ist
T Absolute Temperatur der strahlenden Fläche

Je geringer die Temperatur des zu messenden Objektes ist, desto weiter verschiebt sich dessen Strahlungsmaximum hin zu größeren Wellenlängen. In der Nähe der Raumtemperatur liegt dieses etwa bei 10 μm .

Abbildung 48 zeigt außerdem, dass die spektrale Zusammensetzung der ausgesandten Strahlung mit der Objekttemperatur variiert. So senden beispielsweise Körper mit Temperaturen von rund 500 °C (rund 770 K) auch Strahlungsanteile im sichtbaren Bereich aus.

Unter Infrarotstrahlung versteht man nun jenen Teil des elektromagnetischen Spektrums, der sich an der langwelligen Seite des sichtbaren Spektrums an das rote Licht bei einer Wellenlänge von circa 760 nm anschließt und sich bis zu etwa 1 mm Wellenlänge erstreckt.

Für die technische Temperaturmessung ist dabei der Bereich bis etwa 20 μm Wellenlänge von Bedeutung. Eine Thermografie-Kamera wandelt die für das menschliche Auge unsichtbare Infrarotstrahlung in elektrische Signale um. Daraus erzeugt die Kamera ein Bild in Falschfarben beziehungsweise für thermographische Zwecke eher seltener ein monochromes Graustufenbild.

Einflüsse durch das Messobjekt

Da praktische Messobjekte jedoch mehr oder minder stark vom Modell des schwarzen Strahlers abweichen, ist es erforderlich, diesen Einfluss bei der Messung zu berücksichtigen. Dies bewerkstelligt man mit dem Emissionsgrad (ϵ). Dieser Parameter ist ein Maß für das Vermögen des Körpers Infrarotstrahlung auszusenden. Der Schwarze Strahler besitzt mit dem Wert 1 den größtmöglichen Emissionsgrad, welcher zudem

unabhängig von der Wellenlänge ist. Im Gegensatz dazu kann der Emissionsgrad realer Messobjekte eine mehr oder minder starke Abhängigkeit von der Wellenlänge aufweisen. Zudem ist ein Einfluss weiterer Parameter möglich:

- Materialzusammensetzung
- Oxidschicht auf der Oberfläche
- Rautiefe der Oberfläche
- Winkel zur Flächennormalen
- Temperatur (relevant ab einer Oberflächentemperatur von rund 100 °C)
- Polarisationsgrad

Eine Vielzahl nichtmetallischer Stoffe weist - zumindest im langwelligen Spektralbereich - unabhängig von ihrer Oberflächenbeschaffenheit einen hohen und relativ konstanten Emissionsgrad auf. Hierzu gehören unter anderem die meisten mineralischen Bau- und Anstrichstoffe. Demgegenüber haben Metalle in der Regel einen niedrigen, stark von der Oberflächenbeschaffenheit abhängigen und zu größeren Wellenlängen hin, abfallenden Emissionsgrad.

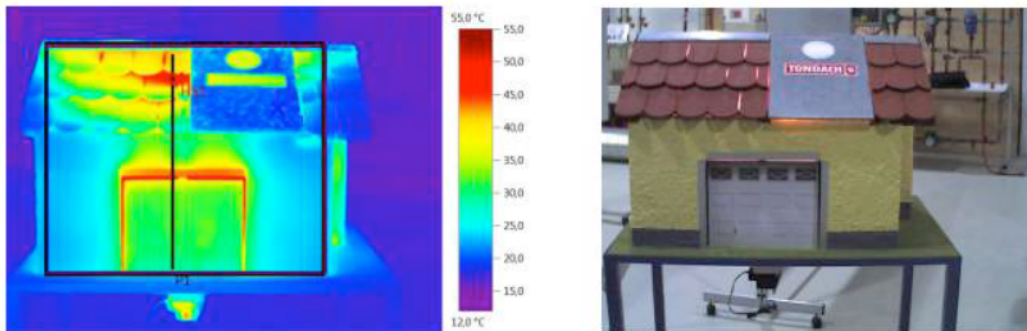
5.5.2 Anwendungsgebiet

Die Thermografie findet in industriellen Prozessen vor allem Anwendungen in den Bereichen:

- Wartung und Instandhaltung zur Leckagenortung, z. B. von Rohrleitungen
- Überprüfung von Wärmedämmungen, z. B. von Rohrleitungen oder Kessel/Reaktoren in der chemischen Industrie
- Temperaturprofil von Gebäuden

Abbildung 53 zeigt das Temperaturprofil eines Modellhauses, welches mit einer Thermografiekamera erstellt wurde. Mit dieser Messung kann sofort erkannt werden, wo die meiste Wärme verloren geht (Garagentor, Dachziegel) und es können dadurch gezielt Gegenmaßnahmen getroffen werden.

Abbildung 53: Temperaturprofil eines Modellhauses mit einer Thermografiekamera aufgenommen



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

5.5.3 Messaufbau

Es gibt viele verschiedene Bauformen von Thermografiekameras auf dem Markt. Tragbare Geräte wie in Abbildung 50 erfreuen sich großer Beliebtheit und werden daher sehr oft zur Temperaturmessung verwendet.

Abbildung 54: Typischer Aufbau einer Thermografiekamera



Quelle: Testo, 2015

Es erfolgt eine kurze Anleitung zur Temperaturmessung mit einer Thermografiekamera:

- Vorwählen des Emissionsgrads des zu messenden Objekts an der Kamera
- Wellenlänge an Kamera einstellen
- Foto des zu messenden Objekts erstellen unter Berücksichtigung des Abstands zwischen Kamera und Objekt: nicht durch Glas messen und aus nicht aus zu weiter Entfernung
- Übertragen der Daten der Kamera auf den PC
- Datenauswertung mittels Analyse-Software

5.5.4 Typische Kenngrößen

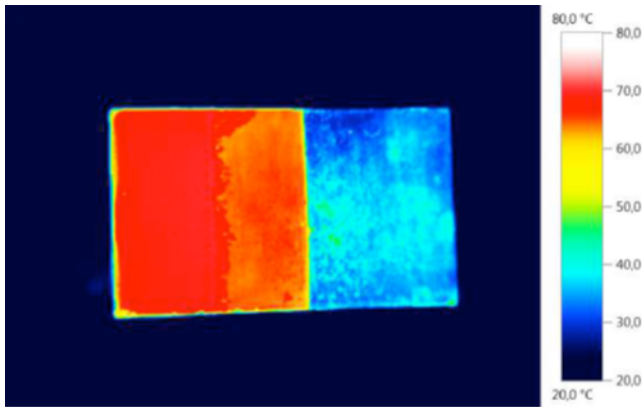
Die wichtigsten Kenngrößen bei der Messung mit einer Thermografiekamera sind die Infrarotauflösung, die thermische Empfindlichkeit und der eingestellte Emissionsgrad ϵ . Diese werden im folgenden Abschnitt genauer erläutert.

Emissionsgrad ϵ :

Der Emissionsgrad ϵ ist eine der wichtigste Kenngrößen in der Thermografie. Wird dieser falsch bei z. B. der Thermografiekamera eingestellt, so kann es zu groben Messfehlern kommen. Es folgt ein Beispiel anhand eines erhitzten Aluminiumblocks:

Die linke Hälfte ist mit Klarlack überzogen, um eine raue Oberfläche zu generieren. Die rechte Seite ist blank poliert und stellt somit eine metallisch glatte Oberfläche dar. Zuerst wurde eine Aufnahme, mit einem Emissionsgrad $\epsilon = 0,9$ (muss auf der Thermografiekamera eingestellt werden), vom Aluminium Block gemacht. In Abbildung 55 sind die unterschiedlichen Oberflächen zu erkennen. Das Temperaturspektrum liegt zwischen 20 °C bis 80 °C. Da der Emissionsgrad für raue Oberflächen eingestellt ist, wird die glatte Oberfläche falsch dargestellt.

Abbildung 55: Falsches Temperaturprofil eines Aluminiumblocks zurückzuführen auf die falsche Annahme des Emissionsgrads ϵ



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Um das gesamte Temperaturprofil (glatte und raue Oberfläche) des erhitzten Aluminiumblocks korrekt erfassen zu können, müssten folgende Emissionsgrade abwechselnd eingestellt werden (siehe Tabelle 31).

Tabelle 31: Verschiedene Oberflächen und ihre Emissionsgrade bei erhitztem Aluminiumblock

Emissionsgrad ϵ	Oberfläche
0,90	Klarlack, rau
0,26	Metall, glatt

Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Im Idealfall (Emissionsgrad $\epsilon = 1$) entspricht das Spektrum der ausgesandten Strahlung dem eines schwarzen Strahlers, bei realen Oberflächen weicht es ab. Bei polierten Metallflächen sinkt ϵ im IR-Bereich auf Werte unter 0,1. Bei üblichen Baumaterialien gilt $\epsilon \sim 0,9$.

Infrarotauflösung

Die Infrarotauflösung beschreibt dabei die Anzahl der Temperaturmesswerte, welche eine Wärmebildkamera erfassen kann. Das heißt z. B.: eine Wärmebildkamera mit einer Auflösung von 160 x 120 Pixel erfasst 19.200 Temperaturmesswerte.

Thermische Empfindlichkeit

Mit thermischer Empfindlichkeit ist die Temperaturdifferenz gemeint, die eine Kamera erkennen kann. Je besser die thermische Empfindlichkeit, desto kleiner die Temperaturdifferenzen, die eine Wärmebildkamera erkennen und darstellen kann.

5.5.5 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Visualisierendes Verfahren
- Einfache Bedienung der Kameras

Nachteile

- Methode ist geeignet zu Ortung von Leckagen beziehungsweise zum Aufzeigen mangelhafter Wärmedämmungen, aber nicht um den Energieverlust damit zu berechnen (z. B. Druckluftleckagen)
- Die Temperatur von Oberflächen mit geringem Emissionsgrad lässt sich mit Thermografie nicht verlässlich bestimmen
- Einsatz bei Objekten mit unterschiedlicher Oberflächenstruktur: ein Teil der Oberfläche ist oxidiert, der andere poliert; das ergibt unterschiedliche Emissionsgrade
- Einsatz bei polierten Oberflächen schwierig, dass sie einen geringen Emissionsgrad aufweisen
- Zuordnung der Fotos zu den Messstellen manuell schwierig und nimmt ohne zusätzlicher technischer Lösungen und einer Analysesoftware viel Zeit in Anspruch
- Teuer im Gegensatz zu den Berührungsthermometern

5.5.6 Praxistipps

Bei der Verwendung von Thermografiekameras ist darauf zu achten, dass der Winkel zwischen Messfläche und Kamera nie größer als 45° ist. Weiters ist es von großer

Wichtigkeit den richtigen Emissionsgrad, welcher abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des jeweiligen Messobjektes ist, voreinzustellen.

5.6 Mobile Messung der Temperatur

Aufgrund der besonderen Bedeutung von mobilen Messverfahren zur Messung von Einsparungen beziehungsweise für die Durchführung von Energieaudits wird im folgenden Kapitel spezifisch auf die mobile Messung der Temperatur eingegangen.

5.6.1 Anwendungsgebiet

Mobile Temperaturmessgeräte werden vorwiegend bei Einsparungsmessungen beziehungsweise bei der Durchführung von Energieaudits verwendet, da diese folgenden Vorteile aufweisen:

- Diese können überall mitgenommen werden und man ist somit nicht zwingend an die jeweilige Messstelle gebunden
- Finden Messungen am laufenden Prozess statt, so muss dieser meist nicht unterbrochen werden
- Anpassungsfähigkeit aufgrund der verschiedenen Sonden und Sensoren die ganz einfach beim mobilen Messgerät angesteckt beziehungsweise ausgewechselt werden können.
- Keine Installation erforderlich - zeitlicher Aufwand weitaus geringer als bei der stationären Messung

Die Messprinzipien bleiben dieselben (Widerstandsthermometer, Thermoelemente und so weiter), der Unterschied liegt im Messaufbau auf welchen nachfolgend eingegangen wird.

5.6.2 Messaufbau

Grundsätzlich besteht jede mobile Messung aus zwei Grundelementen:

- Messgerät: Das Messgerät dient zur Umwandlung, Auswertung und Anzeige der vom Sensor/Fühler aufgenommenen Messwerte. Auch dient es als eine Art Schnittstelle zwischen User und Messung: Der User kann z. B. aus verschiedenen Messoptionen wählen beziehungsweise wichtige Einflussparameter für die Messung festlegen.

- **Sensor/Fühler:** Der Sensor oder auch Fühler genannt, hat die Aufgabe den Messwert zu erfassen. Der Vorteil eines Sensors für den mobilen Bereich liegt darin, dass dieser austauschbar ist, dadurch ergibt sich die Möglichkeit für verschiedene spezifische Anwendungsfälle genauestens dafür abgestimmte Sensoren beziehungsweise Fühler bereitstellen zu können ohne das Messgerät ändern zu müssen.

Man unterscheidet bei den mobilen Messaufbauten grundsätzlich zwischen Messgeräten mit festen Fühlern und Messgeräten mit austauschbaren Fühlern. Abbildung 56 zeigt jeweils ein Messgerät mit festem und eines mit austauschbarem Fühler.

Abbildung 56: Messgerät mit festem Fühler (rechts) und Messgerät mit austauschbarem Fühler (links)

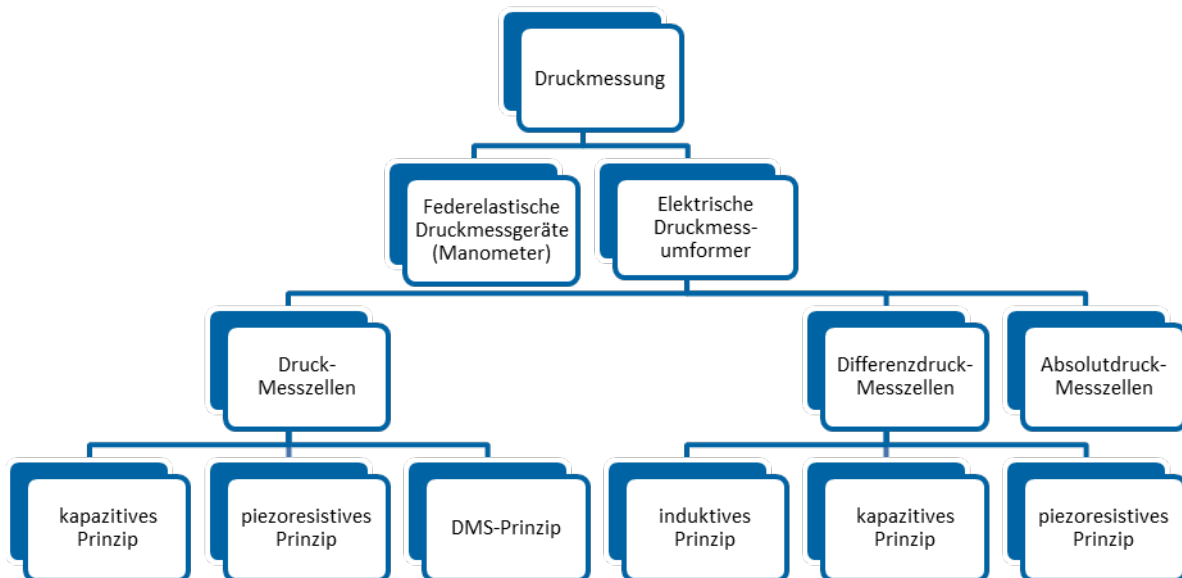


Quelle: Testo 925 & 905 – Produktbroschüre, Testo AG, 2015, Seite 1

6 Druckmessung

Die Druckmessung wird nicht nur zur Bestimmung des Zustandes eines thermodynamischen Systems, sondern auch sehr häufig zur Überwachung von Anlagenteilen wie Pumpen oder Druckbehältern in der industriellen Messtechnik sowie der Verfahrenstechnik herangezogen. Abbildung 57 zeigt die geläufigsten Druckmessverfahren:

Abbildung 57: Verschiedene Verfahren zur Druckmessung



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

Häufig wird die Druckmessung nicht ausschließlich dafür herangezogen, um Prozessdruck zu erfassen, sondern aus dem gemessenen Druck, wird jene Größe abgeleitet die gesucht wird. Ein Beispiel dafür ist z. B. die Durchflussmessung nach dem Wirkdruckverfahren (Differenzdruckverfahren).

6.1 Auswahl des richtigen Messverfahrens

Die folgende Auflistung von Faktoren soll als Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Druckmessgeräte dienen. Sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, da im konkreten Einsatzfall die Anforderungen sehr spezifisch ausfallen können:

- Beachtung des Messbereichs
- Welche Druckart soll gemessen werden: Überdruck, Differenzdruck, Absolutdruck
- Höhe des zu messenden Druckes
- Zeitliches Verhalten des Druckes: ruhend, veränderlich, Druckspitzen
- Gewünschte Anzeige: Zifferblatt, Zeiger, analog, digital
- Zusatzeinrichtungen für Fernübertragung: Bussystem Grenzwertkontakte, Widerstandsferngeber
- Art des Messmediums: gasförmig, flüssig, verunreinigt, korrosiv, giftig etc.
- Anwendung: Betriebsmessgerät, Feinmesstechnik, Innen- oder Freilufteinsatz
- Verschiedene Umwelteinflüsse erfordern bestimmte Einbaulagen (z. B. Schalttafeleinbau oder Wandmontage, freistehend)
- Welcher Anschluss wird zur Signal- beziehungsweise Datenübertragung verwendet?
- Genauigkeit und Fehlerklasse des Messgeräts
- Sind Zusatzeinrichtungen für die Anbringung des Messgeräts erforderlich?
- Sicherheitsanforderungen

6.1.1 Wirtschaftlichkeit

Die federelastischen Druckmessgeräte (Manometer) sind günstiger als deren elektronische Variante, die elektrischen Druckmessumformer. Der Unterschied ist jedoch häufig minimal, da sich die Kosten für Elektronikbauteile und die Produktionskosten der elektrischen Druckumformer immer weiter verringern.

6.1.2 Checkliste für die Installation

Nachfolgende Aufzählung gibt einen Überblick über Punkte, welche bei der Installation von Druckmessgeräten beachtet werden sollten:

- Ist das Messgerät richtig ausgerichtet (Einbaulage, Einbauposition)?
- Handelt es sich um ein ruhendes beziehungsweise in Bewegung befindliches Messmedium?

- Sind die Messleitungen von der Druckentnahmestelle zum Anzeigegerät hinsichtlich Länge richtig dimensioniert (elektromagnetische Störungen)?
- Bei Druckmessung in flüssigen Medien-Druckentnahmestellen unterhalb der Leitung positionieren, damit eventuell aufsteigendes Gas nicht zum Sensor gelangt und die Messung verfälscht
- Bei Druckmessung in gasförmigen Medien - Druckentnahmestellen oberhalb der Leitung positionieren, damit eventuell kondensierendes Wasser nicht zum Sensor gelangt und die Messung verfälscht
- Druckentnahmebohrung senkrecht zur Rohrwand anordnen, damit nur der statische Druck gemessen wird
- Gibt es externe Vibrationen, die zur Beeinflussung des Drucksensors führen können?
- Ist eine Bypass-Umleitung für regelmäßige Inspektionen erforderlich? Lohnt sich dieser Aufwand?
- Sind Absperrventile für Wartungsarbeiten vorhanden?
- Treten in der Nähe des Messgerätes elektrische Störfelder auf?
- Ist genügend Platz für Wartungsarbeiten oder für einen möglichen Ein- und Ausbau des Messsystems vorhanden?
- Ist das Messsystem richtig geerdet? Sind die Signalleitungen richtig geschirmt?

In den nachfolgenden Kapiteln wird im Detail auf unterschiedliche Messverfahren zur Druckmessung eingegangen. Hierbei wurde grundsätzlich unterschieden zwischen federelastischen Druckmessgeräten und elektrischen Druckmessumformern.

6.2 Federelastische Druckmessgeräte (Manometer)

6.2.1 Erklärung des Messprinzips

Die federelastischen Druckmessgeräte beruhen auf dem mechanischen Verfahren der Druckmessung. Durch den zu messenden Druck wird eine Feder, ein Federbalg, eine Plattenfeder oder ein Federrohr ausgelenkt, die daraus resultierende Verformung liefert die Messgröße für den Druck. Die Auslenkung wird in weiterer Folge meist auf einen Zeiger übertragen und der Druck als Weg oder Winkel auf einer Skala abgebildet. Handelsübliche Messbereiche gehen von wenigen Millibar bis zu einigen tausend Bar. Diese Messgeräte sind preiswert und robust.

Die federelastischen Druckmessgeräte (Manometer) können in folgende Kategorien unterteilt werden:

- Kolbenmanometer
- Federbalgmanometer
- Kapselfedermanometer
- Plattenfedermanometer
- Federrohrmanometer

Das Messprinzip von federelastischen Druckmessgeräten (Manometer) wird anhand des Federrohrmanometers erklärt (siehe Abbildung 58).

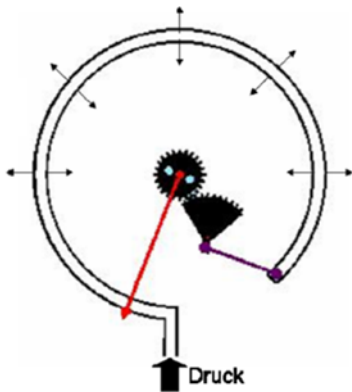
Abbildung 58: Federrohrmanometer



Quelle: WIKA Datenblatt, 2011, Seite 1

Rohrfederdruckmesser bestimmen die Druckdifferenz zwischen dem Messdruck und dem Bezugsdruck, der normalerweise der Atmosphärendruck ist. Die übliche Bauform ist ein flachgedrücktes und zu einem Kreisbogen von 270° gekrümmtes Metallrohr. Die Bewegung des verschlossenen Federendes ist ein Maß für den zu bestimmenden Druck. Unter dem Innendruck strebt sein ovaler Querschnitt der Kreisform zu und biegt das Rohr auf (Abbildung 59).

Abbildung 59: Funktionsweise – Federrohrmanometer



Quelle: Görtler G., 2014, Seite 108

6.2.2 Anwendungsgebiet

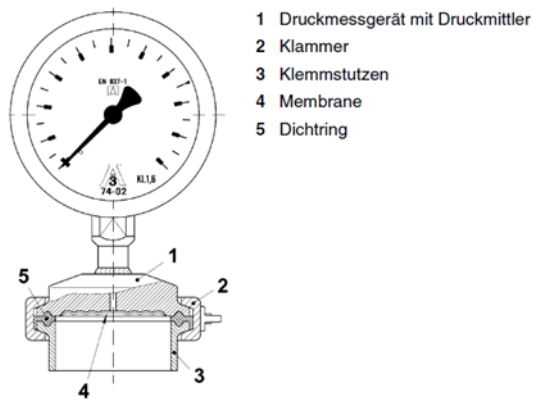
Immer mehr Lebensbereiche werden digitalisiert, jedoch verzeichnen viele Hersteller mechanischer Druckmessgeräte weiterhin steigende Absatzzahlen. Das liegt daran, dass die Manometer in den Punkten Sicherheit und Wirtschaftlichkeit äußerst konkurrenzfähig sind.

Manometer liefern ohne Fremdenergie ein Messergebnis, das auf einen Blick ablesbar ist. Selbst wenn die Stromversorgung ausfällt, erfüllen sie weiterhin ihre Messaufgabe und zeigen den Wert vor Ort an. Daher werden Manometer meist zur vor Ort Überwachung von verschiedensten Prozessen verwendet.

6.2.3 Messaufbau

Abbildung 56 zeigt den Messaufbau eines Federrohrmanometers mit Clamp-Druckmittler. Unter einem Druckmittler (siehe Abbildung 60) versteht man eine Vorrichtung, die in der Druckmesstechnik sehr oft eingesetzt wird. Dieser verhindert das Vordringen des Messtoffes in das Druckmessglied.

Abbildung 60: Messaufbau Federrohrmanometer mit Clamp-Druckmittler



Quelle: Betriebsanleitung für Rohrfederanometer, AFRISO EURO-INDEX, 2007, Seite 18

Abbildung 61: Druckmittler mit Clamp-Anschluss



Quelle: Datenblatt für Membran-Druckmittler, labom – Industrielle Messtechnik, 2015, Seite 1

6.2.4 Vor- und Nachteile

Vorteile

- preisgünstig
- robustes Druckmessgerät
- weite Verbreitung
- bei Verwendung von Spiralfedern beziehungsweise Schraubfedern bis zu sehr hohen Drücken verwendbar
- großer Messbereich
- keine Fremdenergie notwendig

Nachteile

- empfindlich gegen Überlastung
- es muss ein Kompromiss zwischen Messgenauigkeit und Reproduzierbarkeit eingegangen werden

6.3 Elektrische Druckmessumformer

6.3.1 Erklärung des Messprinzips

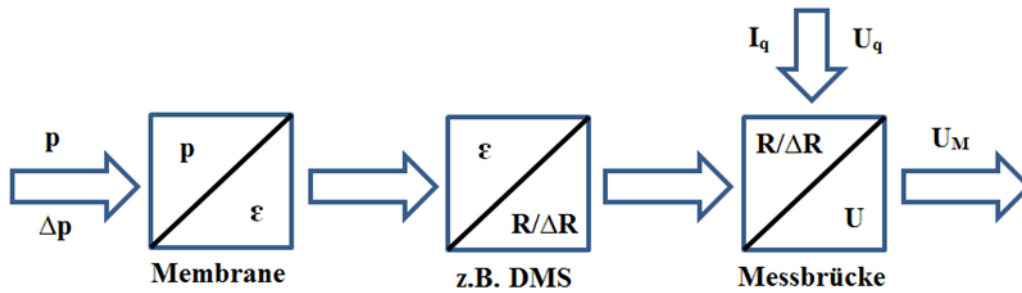
Das Messprinzip elektrischer Druckmessumformer beruht auf der Änderung der elektrischen Eigenschaften von Widerständen, Kondensatoren und Spulen in Abhängigkeit des Druckes. Sie eignen sich vor allem zum Messen schnell veränderlicher Drücke. Die Verarbeitung des Messsignals erfolgt durch geeignete Messverstärker.

Allgemeines Funktionsprinzip

Der Druck wirkt auf eine definierte Membranfläche ein, welche sich (elastisch) verformt. Diese Verformungen werden mit Hilfe von speziellen Materialien in elektrische Widerstände umgeformt. Auf Grund dieser Verformung kann über die Spannung auf die einwirkenden Kräfte und somit auf den Druck geschlossen werden.

Das allgemeine Funktionsprinzip eines Druckmessumformers zeigt Abbildung 58. Eingangs wird der Druck p oder Differenzdruck Δp in eine Kraft umgewandelt, welche eine Membran dehnt (Dehnung ϵ). Diese Gestaltänderung wird mit Hilfe von speziellen Materialien in einen elektrischen Widerstand R beziehungsweise eine elektrische Widerstandsänderung ΔR umgewandelt (z. B. mit Hilfe eines Dehnmessstreifens). Über eine Messbrücke, die mit einer Hilfsenergie (Strom I_q oder Spannung U_q) versorgt wird, kann die Messspannung U_M abgegriffen werden.

Abbildung 62: Allgemein Funktionsprinzip eines Druckmessumformers



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

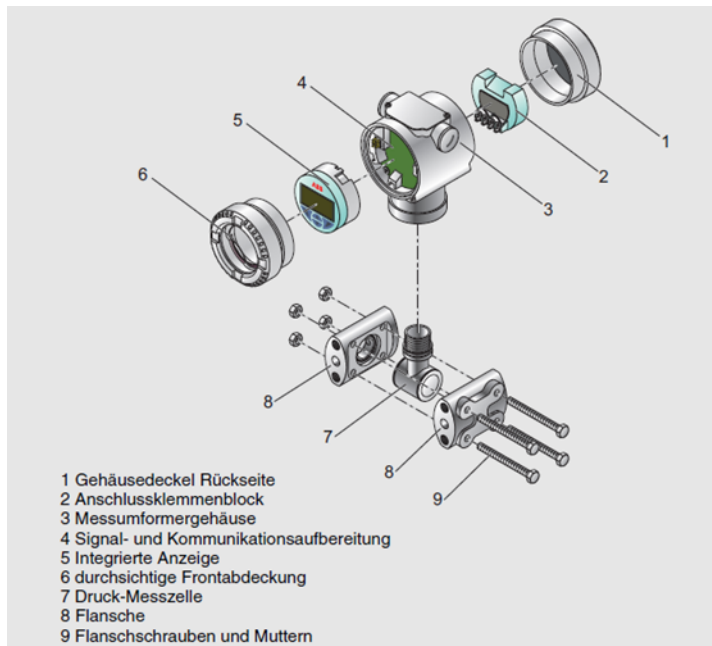
6.3.2 Messaufbau

Druckmessumformer bestehen im Allgemeinen aus den folgenden Hauptkomponenten:

- Druck-Messzelle mit Drucksensor (auch Druckaufnehmer genannt), die den Druck in ein mechanisches oder elektrisches Signal umsetzt
- Elektronik (meist Messbrücken), die das Signal des Drucksensors aufbereitet und in ein Standard-Übertragungssignal umwandelt
- Gehäuse und Prozessanschlüsse

Der Aufbau eines Druck-Messumformers ist in Abbildung 63 zu Illustration angeführt.

Abbildung 63: Druck-Messumformer und seine Komponenten



Quelle: Lütkepohl G. et alii, 2012, Seite 21

Druckmessumformer können mit verschiedenen Druck-Messzellen bestückt werden, welche wiederum mit unterschiedlichen Messprinzipien arbeiten. Je nach Art des zu messenden Drucks wird in folgende Messzellenarten unterschieden:

- Druck-Messzellen (Überdruck-Messzellen)
- Differenzdruck-Messzellen
- Absolutdruck-Messzellen

In diesem Dokument wird vor allem auf die Druck-Messzellen mit DMS-, piezoresistiven- und kapazitivem Prinzip eingegangen. Weiters werden die Differenzdruck-Messzellen mit induktivem und kapazitivem Prinzip genauer beschreiben. Aufgrund des selteneren Einsatzes werden die Absolutdruck-Messzellen und deren Messprinzipien hier nicht weiter ausgeführt.

Druckmesszellen (Überdruck-Messzellen)

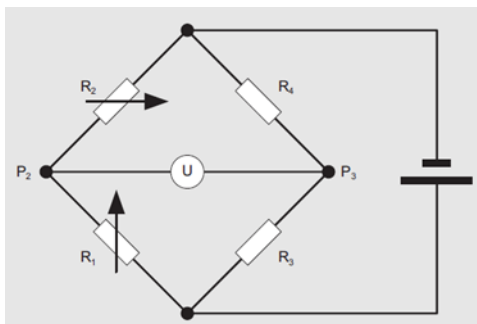
Druckmesszellen oder auch Überdruck-Messzellen genannt, messen gegenüber dem Atmosphärendruck p_{amb} sowohl positive als auch negative Überdrücke. Der Druck wird über den Prozessanschluss in die Messzelle eingeleitet, während der als Bezugsdruck

dienende Atmosphärendruck p_{amb} die Messzelle ohne besondere Zuführung einfach von außen umgibt. Die verschiedenen Messprinzipien bezogen auf die Druckmesszellen werden folgend erläutert:

DMS-Prinzip

Bei Verwendung von Dehnungs-Messtreifen als Drucksensoren ist die Messanordnung so aufgebaut, dass die eigentlichen Sensoren einer mechanischen Spannung ausgesetzt werden, die sich durch den Druck verändert. Das wiederum führt dazu, dass sich der spezifische Widerstand des Drucksensors verändert. Die daraus resultierende Widerstandsänderung kann elektrisch gemessen werden, wenn z. B. die Drucksensoren zu einer Brücke (Wheatstone-Brücke) verschalten sind (siehe Abbildung 64).

Abbildung 64: Wheatstone-Halbbrücke

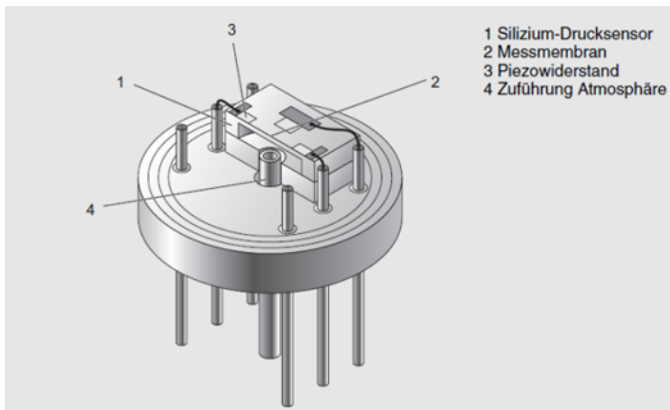


Quelle: Lütkepohl G. et alii, 2012, Seite 30

Piezoresistives Prinzip

Abbildung 61 zeigt eine Druckmesszelle, welche mit dem piezoresistivem Prinzip arbeitet. Der Drucksensor basiert auf einem Silizium-Chip, in dessen Zentrum (einem dünnen Bereich) die Messmembran situiert ist. Je nach Durchmesser und Dicke kann dieser dem gewünschten Messbereich angepasst werden. Auf der Membran sind sogenannte Piezowiderstände in das Silizium implantiert. Ein anstehender Druck erzeugt im Silizium mechanische Spannungen, die wiederum zur Änderung des spezifischen Widerstandes führen.

Abbildung 65: Drucksensor nach dem piezoresistivem Prinzip

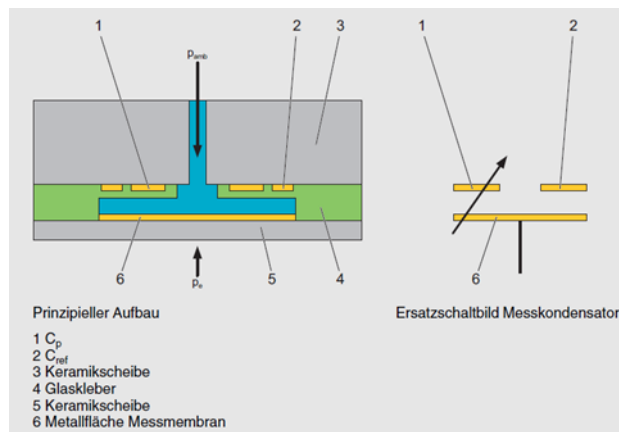


Quelle: Lütkepohl G. et alii, 2012, Seite 32

Kapazitives Prinzip

Diese Drucksensoren sind so aufgebaut, dass sich durch eine Druckänderung eine elektrische Kapazität verändert. Der Kern des Sensors besteht aus einer Keramikscheibe, auf der in geringem Abstand eine keramische Messmembran angebracht ist. Beide Teile sind an bestimmten Stellen mit Metall beschichtet, so dass sich zwischen Scheibe und Membran zwei Plattenkondensatoren bilden. Eine Isolierschicht aus Glas verhindert Kurzschlüsse. Durch Druck wird eine geringe elastische Durchbiegung der Membran hervorgerufen und durch die damit verbundene Abstandsänderung eine Kapazitätsänderung des Kondensators C_p hervorgerufen. Der Referenzkondensator C_{ref} bleibt unverändert. Diese druckproportionale Kapazitätsänderung wird durch die im Messumformer vorhandene Elektronik in ein digitales Einheitssignal zur Weiterverarbeitung umgewandelt (siehe Abbildung 66).

Abbildung 66: Drucksensor nach dem kapazitivem Prinzip



Quelle: Lütkepohl G. et alii, 2012, Seite 31

Differenzdruck-Messzellen

Differenzdruck-Messzellen besitzen zwei Druckanschlüsse für zwei unterschiedliche Drücke, aus denen sie dann die Differenz bilden. Moderne Differenzdruck-Messzellen bestehen im Prinzip aus dem eigentlichen Messzellenkörper und den beiden damit über zwei O-Ring-Dichtungen druckdicht verschraubten Druckkappen. Die Druckkappen bilden zusammen mit den Membrankörpern oder Trennmembranen die Messkammern, in die das Messmedium eingeleitet wird.

- Differenzdruck-Messzellen weisen folgende Merkmale auf:
- Glatte Trennmembranen, an denen sich keine Schwebstoffe absetzen können
- Werkstoffe auswählbar, entsprechend der Aggressivität des Messmediums
- Hohe Überlastsicherheit

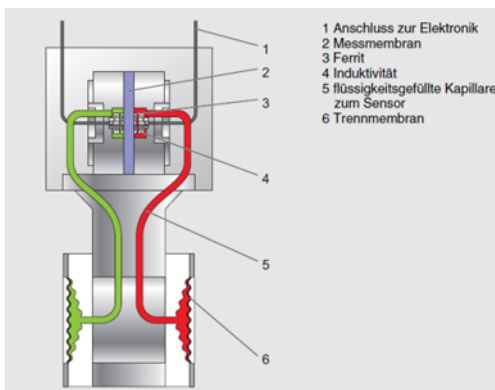
Die verschiedenen Messprinzipien bezogen auf die Differenzdruck-Messzellen werden nun erläutert.

Differenzdruck-Messzelle mit induktivem Abgriffsystem

Diese Messzelle besteht aus einem flüssigkeitsgefüllten Zweikammersystem mit glatten Trennmembranen und innenliegender Messmembran. Das Kernstück des induktiven Abgriffsystems ist die Messkapsel mit einer mittig eingespannten Messmembran. Abgeschlossen wird das Innere der Messzelle gegen das Messmedium durch zwei hochelastische Trennmembranen. Die Messmembran teilt den Innenraum der Messzelle

in zwei Kammern auf. Man spricht hier von einer sogenannten Zweikammer-Messzelle. Eine hydraulische Kopplung zwischen den Trennmembranen und der Messmembran stellt eine Ölfüllung dar. Der jeweilige Messbereich des Systems wird mechanisch durch die Dicke und die radiale Vorspannung der Messmembran festgelegt. Auf beiden Seiten der Messmembran ist je eine Ferritscheibe aufgesetzt. Gegenüber diesen Scheiben ist je eine Spule angebracht. Der zu messende Differenzdruck verursacht eine proportionale Auslenkung der Messmembran – dadurch verändern sich die Positionen der Ferritscheiben zu den gegenüberliegenden Spulen und damit die Induktivität der Spulen. Abbildung 67 zeigt eine Druckmesszelle mit induktivem Prinzip zur Messung des Differenzdruckes.

Abbildung 67: Differenzdruck-Messzelle nach dem induktivem Prinzip

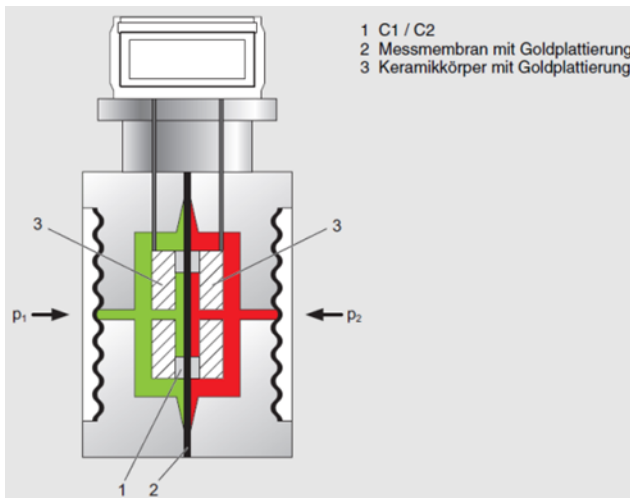


Quelle: Lütkepohl G. et alii, 2012, Seite 36

Differenzdruck-Messzelle mit kapazitivem Abgriffsystem

Der Aufbau einer Differenzdruckmesszelle mit kapazitivem Prinzip ist in Abbildung 68 zu sehen. Hier besitzt die Messmembran einen kapazitiven Abgriff. Das Abgriffsystem befindet sich in einer Messkapsel aus Aluminiumoxidkeramik. Die Messkapsel besteht aus zwei durchbohrten Keramikscheiben zwischen denen eine Messmembran, ebenfalls aus Keramik, druckdicht befestigt ist. Die Keramikscheibe und die Messmembran sind teilweise mit Metall beschichtet, sodass zwischen Scheibe und Membran Plattenkondensatoren gebildet werden. Eine Isolierschicht aus Glas verhindert Kurzschlüsse. Wird nun die Messmembran von einem Druck durchgebogen, so führen die Abstandsveränderungen zwischen Scheiben und Membran zu den entsprechenden Kapazitätsveränderungen.

Abbildung 68: Differenzdruck-Messzelle nach dem kapazitivem Prinzip



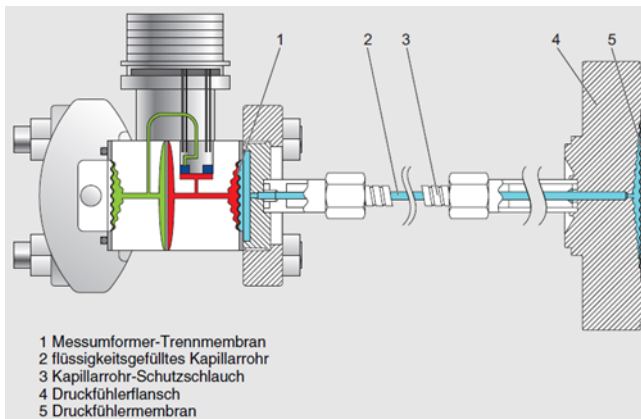
Quelle: Lütkepohl G. et alii, 2012, Seite 37

Druckfühler

Unter der Bezeichnung Druckfühler versteht man Trennmembransysteme, die einerseits an eine Prozessleitung oder einen Behälter und andererseits an einen Druckmessumformer oder Differenzdruck-Messumformer angeschlossen werden. Sie übertragen den an der Trennmembran anstehenden Prozessdruck über ein flüssigkeitsgefülltes Kapillarrohr zum Messumformer (siehe Abbildung 69).

Hohe Temperaturen, zähflüssige und/oder korrosive Messmedien setzen dem Anwendungsbereich von Messgeräten in Standardausführung Grenzen. In solchen Fällen können Druckfühler eingesetzt werden. Diese verhindern, dass das Messmedium mit dem Messumformer in Berührung kommt.

Abbildung 69: Differenzdruck-Messzelle mit Druckfühler mit Kapillarrohr



Quelle: Lütkepohl G. et alii, 2012, Seite 45

6.3.3 Anwendungsgebiet

Grundsätzlich gibt es keine großen Unterschiede bei den Anwendungsgebieten von Manometern (siehe Kapitel 6.2.2) und elektrischen Druckmessumformern. Ist eine elektronische Verarbeitung beziehungsweise Speicherung des Messsignals vorgesehen, werden jedoch fast ausschließlich Druckmessumformer verwendet.

6.3.4 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Hohe Messgenauigkeit
- Flexible Skalierung
- Einheitenumrechnung
- Große Druckmessbereiche möglich
- Gut für dynamische Messungen geeignet

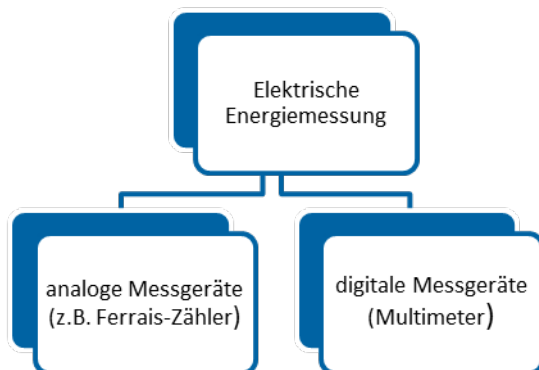
Nachteile

- Hilfsenergie für den Betrieb benötigt
- Teurer als Manometer

7 Elektrische Energiemessung

Für die Kategorisierung von Messgeräten zur Messung elektrischer Größen kann man sich zwischen stationär installierten Messgeräten und mobilen Messgeräten unterscheiden. Für ingenieurstechnische Messanwendungen zur Bestimmung elektrischer Kenngrößen im Falle einer Energieberatung werden hauptsächlich mobile Geräte Verwendung finden. Diese werden für die erforderliche Zeitdauer zur Erfassung eines vollständigen Betriebszyklus installiert. Im Hinblick auf ein aufbauendes Energiemonitoring kann im Anschluss entschieden werden die Messgeräte stationär zu belassen. Weiters können Messgeräte zur elektrischen Energiemessung vom Messprinzip in analoge und digitale Messgeräte unterschieden werden (siehe Abbildung 70). Zu den stationär installierten analogen Messgeräten zählen auch die klassischen EVU Ferrais-Zähler, die in weiterer Folge durch digitale Smart Meter ersetzt werden.

Abbildung 70: Elektrische Energiemessung – Einteilung



Quelle: AEA, eigene Darstellung, 2015

7.1 Wirtschaftlichkeit

Die Kosten eines digitalen Leistungsmessgerätes beginnen mit ausreichender Qualität für ingenieurstechnische Anwendungen bei circa 600 Euro. High End Geräte bewegen sich normalerweise zwischen 1.500 - 2.000 Euro. Dazu kommen noch Kosten für das Zubehör (Strommesszangen, industrielle Messfühlerspitzen, Spannungs- und Durchgangstester, Krokodilklemmen, Greifklemmen, Hakenklemmen etc.).

Digitale Multimeter die für die Messung von Strom, Spannung und Phasenwinkel für einphasige Systeme verwendet werden können, bewegen sich zwischen 150 und 600 Euro.

Als laufende Kosten wären die Rekalibrierungskosten zu nennen, die im Idealfall jährlich durchgeführt werden müssen, da Hersteller die Genauigkeit der Messgeräte immer nur für den Kalibrierungszeitraum von einem Jahr garantieren. In der Regel liegen die Kosten zwischen 7-15 % des Anschaffungswertes.

7.2 Analoge Messgeräte

7.2.1 Erklärung des Messprinzips

Analoge Messgeräte wandeln den Messwert in einen Zeigerausschlag. Mit Hilfe der Skala kann der Messwert abgelesen werden. Die Messung ist analog, weil der Zeigerausschlag sich kontinuierlich zu der zu messenden Größe ändert.

7.2.2 Messaufbau

Abbildung 71 veranschaulicht ein analoges Messgerät zur Messung von Strom, Spannung und Widerstand.

Abbildung 71: Analoges Messgerät, Elenco Modell M-106



Quelle: Elektronik-Kompodium, Elektrische Messgeräte, 2015

Abbildung 72 zeigt ein weiteres analoges Messgerät, den sogenannte Ferraris-Zähler. Der Ferraris-Zähler, benannt nach Galileo Ferraris, ist ein elektromechanisches Messgerät für elektrische Energie, umgangssprachlich Stromzähler, welcher zur Anzeige der konsumierten, selten auch der eingespeisten, elektrischen Energie bei ein- oder mehrphasiger Wechselspannung im Bereich von Niederspannungsnetzen verwendet wird. Er arbeitet mit zwei um 90 Grad versetzten Spulen, einer Spannungsspule und einer Stromspule. Die Spulen sind wie bei einem Leistungsmesser geschaltet. Durch die Induktion der Wirbelströme wird die Zählerscheibe in Drehung versetzt. Wegen dieses Prinzips werden solche Zähler auch Induktionszähler genannt. In der Zählerscheibe wird ein Drehmoment erzeugt, das proportional der Verbrauchsleistung ist.

Neben den klassischen mechanischen Stromzählern gibt es inzwischen auch intelligente, digitale Stromzähler für das sogenannte Smart Metering, das in Zusammenhang mit der automatischen Zählerablesung (AMR) und dem Smart Grid zu sehen ist.

Abbildung 72: Ferraris-Zähler



Quelle: OSTRON - Messtechnik/Funktechnik/Bauelemente, 2015

7.2.3 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Überwachung von kleinsten Messgrößenänderungen
- Feststellen von schwankenden Messgrößen
- Messwertänderungen sind leichter abzulesen

- Pulsierende Spannungen lassen sich besser beobachten (bis 40 kHz)

Nachteile

- Geringe Messgenauigkeit
- Ablesefehler durch Parallaxe
- Manuelle Messbereichsänderung ist notwendig (Zuordnung von Messbereich und Skala muss beachtet werden)
- Empfindliche Messwerke z. B. durch magnetische Felder
- Eingangswiderstand kann die Schaltung und somit die Messung beeinflussen
- Gefahr für das Messwerk – z. B. durch falschen Anschluss an die DC-Polarität, durch falsches Einstellen des Messbereichs
- Null-Abgleich im Ohm-Bereich erforderlich
- Kein Überlastschutz

7.3 Digitale Messgeräte

7.3.1 Erklärung des Messprinzips

Bei den heutzutage üblicherweise eingesetzten Messgeräten zum Messen von elektrischen Größen handelt es sich um digitale Messgeräte. Digitale Messgeräte basieren auf digitalen Schaltungen und wandeln den Messwert in einen Zahlenwert um der anschließend als Ziffernfolge ausgegeben wird (digital). Der Messwert wird dann eine Sieben-Segment-Anzeige oder ein LCD angezeigt⁶.

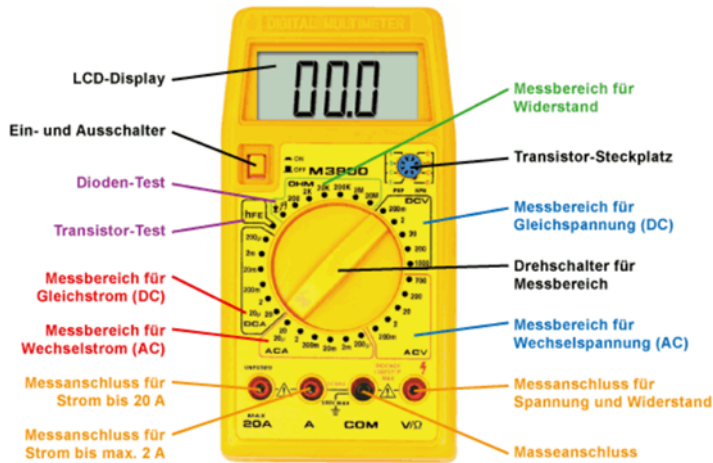
7.3.2 Messaufbau

Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Fabrikaten und Typen. Je nach Typ weichen Art, Anordnung und Zahl der Bedienelemente ab. Ein digitales Messgerät wird auch als Digitalmultimeter (DMM), kurz Multimeter, bezeichnet. Das Wort „Multi“ deutet darauf hin, dass mit einem Multimeter unterschiedliche Messgrößen erfasst werden können. Für die Messung der verschiedenen Größen gibt es unterschiedliche Eingangsbuchsen. Um die

⁶ Eine der weit verbreitetsten Segmentanzeigen ist die sogenannte Sieben-Segmet-Anzeige. Diese wird z. B. in Digitaluhren verwendet um alle Ziffern von 0 bis 9 aus bis zu sieben einzelnen „Strichen“ zusammensetzen.

Zahl der benötigten Buchsen zu reduzieren, wird eine gemeinsame Masse-Buchse (COM → Common = gemeinsame Leitung) für alle Messgrößen verwendet.

Abbildung 73: Beispiel für ein digitales Messgerät, Digital Multimeter M3800



Quelle: Elektronik-Kompodium, Elektrische Messgeräte, 2015

Einfache digitale Messgeräte haben einen Drehschalter, mit dem die Messbereiche umgeschaltet werden. Bessere und teurere digitale Messgeräte haben nur einen Drehschalter um Spannungs-, Strom- oder Widerstandsmessung einzustellen. Diese stellen den Messbereich automatisch ein (Auto Range). Außerdem wird die Polarität der anliegenden Messgröße selbständig ausgewertet. Eine negative Spannung wird durch ein Minuszeichen vor dem Messwert angezeigt.

Blockschaltbild eines einfachen Digitalvoltmeters

Die meisten digitalen Messsysteme bestehen aus einem Sensor mit elektronischer Nachverarbeitung (Verstärker und Filter) zur Umformung der zu messenden physikalischen Größe in eine Spannung, einem Analog/Digital-Umsetzer (ADU) und einer nachfolgenden digitalen Verarbeitung (Zähler) und Ausgabe der Messdaten (Digitalanzeige). Das einfachste System ist ein Digitalvoltmeter zur Spannungsmessung.

Moderne digitale Multimeter (siehe Abbildung 74) können zusätzlich Temperaturen, Kapazitäten oder Induktivitäten messen. Über eine Hold-Taste kann der aktuelle Messwert festgehalten werden. Der zeitliche Verlauf einer Spannung lässt sich mit einem internen

Speicher aufzeichnen und über die USB-Schnittstelle am Computer-Monitor oder Drucker ausgeben.

Abbildung 74: Digitales Multimeter mit Messspeicher und Grafikdisplay



Quelle: Elektrotechnik Fachbuch, die Messung elektrischer Grundgrößen, 2012

7.3.3 Qualitätsmerkmale von digitalen Messgeräten

Ein wesentliches Qualitätsmerkmal eines Messgerätes ist die Genauigkeit. Bei der Ermittlung der Genauigkeit ist zwischen der Genauigkeit und der Auflösung zu unterscheiden. Genauigkeit bedeutet wie weit der gemessene Wert vom wahren Wert abweicht. Bei der Angabe der Genauigkeit kann sich diese auf den Messbereich oder auf den Messwert beziehen. Genauigkeitsangaben mit Bezug auf den Messwert sind vorzuziehen. Übliche Genauigkeitsvorgaben für digitale Multimeter für ingenieurstechnische Anwendungen bewegen sich zwischen 0,05 – 0,025 %.

Neben der Genauigkeit sollten noch auf die folgenden Qualitätsmerkmale geachtet werden. Diese wirken sich dementsprechend auf den Preis aus:

- Ausreichender Messbereich⁷
- Konfidenzniveau und Genauigkeit (bei 30.000 Anzeigen 0,05 %)

⁷ Welcher Messbereich wird von Ihnen benötigt? Normalerweise weisen qualitativ hochwertigere Geräte zumindest folgenden Messbereich auf: 200 mV bis 1.000 V, 200 Ohm bis 20 Megaohm, einige μ A bis 20 A

- Eingangswiderstand > 10 Megaohm
- Eigene Eingänge für Volt, Ohm und Ampere – keine kombinierten – mit Bereichssperren
- keramische Schmelzsicherungen
- Datenloggerfunktion
- Batterielebenszeit 300-500 h am besten 1.000 h
- Getrennte Kammer für Batterie und Sicherungen
- Geschlossene Anschlussbuchsen
- Funktion für relative Messanzeige
- Auto-Hold Funktion
- Temperaturmessungsfunktion
- Sicherheit für Hochspannung CAT 3
- TRUE RMS Messgerät
- Tiefpassfilter (für Motoren mit hochfrequenten Störungen)

7.3.4 Vor- und Nachteile

Vorteile

- Hoher Eingangsspannungsbereich und dadurch geringe Beeinflussung der Schaltung und der Messung
- Kaum Ablesefehler möglich
- Automatische Polaritätserkennung und –anzeige
- Automatische Messbereichserkennung (Zusatzfunktion bei teureren Geräten)
- Kein Null-Abgleich bei der Ohm-Messung erforderlich
- Weniger empfindlich
- Größere Genauigkeit
- Billiger in der Herstellung wegen geringerem mechanischem Anteil

Nachteile

- Betriebsspannung für Display notwendig
- Kurzzeitig hohe Spannungsimpulse können das Messwerk zerstören
- Ungenaue Wechselspannungsmesswerte bei höheren Frequenzen

Für alle Multimeter gilt: Es kann nur eine elektrotechnische Größe gemessen werden. Sollen gleichzeitig unterschiedliche Größen eines Stromkreises (z. B. Strom und Spannung)

gemessen werden, werden mehrere Messgeräte oder ein mehrphasiges Leistungsmessgerät benötigt.

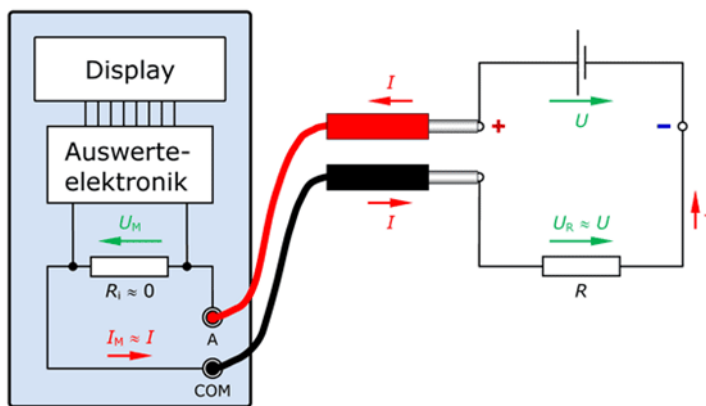
7.3.5 Anwendung von digitalen Multimeter

In den nachfolgenden Kapiteln wird auf die Strom- und Spannungsmessung mittels digitalem Multimeter eingegangen.

Strommessung mittels digitalem Multimeter

Um die Größe eines Stromes ermitteln zu können, müssen sich die Ladungsträger durch das Messgerät hindurchbewegen. Das Messgerät wird somit in Serie zu dem elektrischen Verbraucher geschaltet. Es ist normalerweise erforderlich, den Stromkreis aufzutrennen und anschließend über die beiden Pole des Amperemeters wieder zu schließen.

Abbildung 75: Prinzip der Strommessung mit einem Amperemeter beziehungsweise digital Multimeter



Quelle: Elektrotechnik Fachbuch, die Messung elektrischer Grundgrößen, 2012

Damit die Strommessung nicht verfälscht wird, darf das Messgerät den fließenden Strom nicht hemmen. Der Widerstand sollte idealerweise 0Ω betragen. In der Praxis muss das Amperemeter aber einen kleinen Innenwiderstand besitzen, damit der Strom an ihm einen Spannungsfall verursachen kann.

Die Auswertelektronik benötigt diese zum Strom proportionale Spannung, um sie mit einer Referenzspannung vergleichen und das Messergebnis bestimmen zu können. Der Innenwiderstand beträgt bei einem guten Multimeter circa 2Ω .

Ist der Stromweg nur sehr schwer aufzutrennen, kann der Strom mit Hilfe indirekten Stromwandlern (Strommessschlaufen, Stromzangen etc.) gemessen werden.

Abbildung 76: Stromzangen und Stromschleife zur indirekten Strommessung



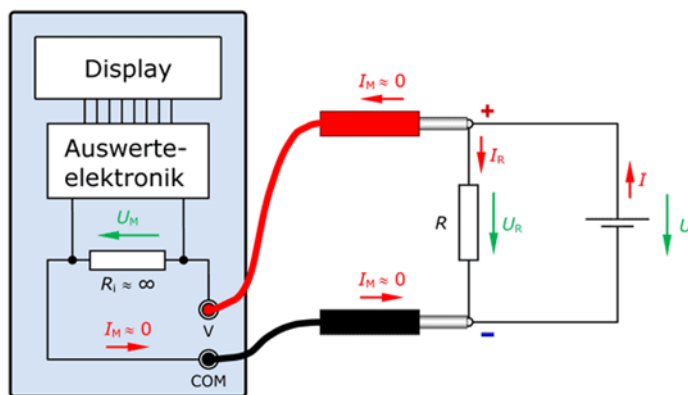
Quelle: Elektrotechnik Fachbuch, die Messung elektrischer Grundgrößen, 2012

Strommesszangen sind leicht zu handhaben und erfordern kein Auftrennen der Leitungen. Es ist jedoch stets auf die Genauigkeit der eingesetzten Messwandler im zu messenden Bereich zu achten. Eine Stromzange mit einem Messbereich bis 1.000 A wird bei Strömen von 2 A nicht mehr sehr genau sein. Kalibrierungsmessungen haben zudem gezeigt, dass mit verschiedenen Messsystemen erzielte Ergebnisse leicht um bis zu 10 % abweichen und somit bereits in der Größenordnung anvisierter Energieeinsparungen liegen können. Auch ist zu beachten, dass Messzangen eine eigene Phasenverschiebung verursachen, folglich das Messergebnis verfälschen können. So hatten beispielsweise hochwertige Messzangen bei Kalibrierungsmessungen im mittleren bis oberen Messbereich weniger als 1° und am Messbereichsbeginn circa 8° Phasenabweichung. Als ungünstigster Wert an einer minderwertigen Zange wurden 20° Phasenabweichung gemessen. Stehen keine Daten aus dem Kalibrierungsblatt zu Verfügung, kann eine einfache Überprüfung an einem rein ohmschen Verbraucher (Widerstand, Wasserkocher) durchgeführt werden.

Spannungsmessung mittels digitalem Multimeter

Die Spannungsmessung ist nur dort möglich, wo es zwei unterschiedliche Potenziale und somit eine Potenzialdifferenz gibt. Zwischen diesen unterschiedlichen Potenzialen darf das Voltmeter keinen Stromfluss verursachen, der einen Ladungsträgerausgleich und somit eine Verringerung der Spannung bewirken könnte. Das Messgerät wird zu dem Verbraucher parallelgeschaltet. Idealerweise muss der Innenwiderstand des Voltmeters daher unendlich hoch sein.

Abbildung 77: Prinzip der digitalen Spannungsmessung mit einem Voltmeter beziehungsweise digitalem Multimeter



Quelle: Elektrotechnik Fachbuch, die Messung elektrischer Grundgrößen, 2012

Da aber auch hier eine elektrische Spannung für die Auswertung benötigt wird, hat der Innenwiderstand des Spannungsmessers einen endlichen Wert. Er liegt bei einem besseren Multimeter bei mindestens 10 MΩ. Es fließt ein sehr geringer Strom, der an dem sehr hohen Innenwiderstand eine kleine Spannung erzeugt, die wiederum mit einem Referenzwert verglichen und ausgewertet wird. Für die Spannungsmessung ist ein Auftrennen des Stromkreises nicht erforderlich.

Die Messung der Spannung ist nur durch einen direkten Abgriff möglich, das heißt, es muss ein Kontakt mit der Ader des zu messenden Kabels hergestellt werden. Deshalb ist es notwendig, sich mit dem Gefährdungspotenzial elektrischer Spannungen auseinander zu setzen. Spannungen kleiner als 42 V werden als Kleinspannungen bezeichnet und als ungefährlich eingestuft. Höhere Spannungen bergen bereits gesundheitliche Risiken. Die in herkömmlichen Niederspannungsdrehstromnetzen vorkommenden Spannungen von fast 600 V können tödlich sein.

Deshalb ist im Allgemeinen zum Anschluss der Spannungsmessung eine autorisierte Elektrofachkraft hinzuzuziehen. Sind die zu untersuchenden Objekte per CEE-Stecker an das Drehstromnetz angeschlossen, stehen jedoch Lösungen zur Verfügung, mittels dazwischen gestecktem „Messkoffer“ die Messungen (Strom und Spannung) gefahrlos durchzuführen.

7.3.6 Leistungsmessgeräte

Energieverbraucher zahlen für die verbrauchte elektrische Energie (Arbeit) an die Energieversorgungsunternehmen (EVU). Die elektrische Energie ist umso größer, je größer die aufgenommene elektrische Leistung ist und je länger die Leistungsaufnahme dauert. Der elektrischen Leistungsmessung kommt in diesem Zusammenhang daher eine besondere Bedeutung zu. Die elektrische Energie (W) ist das Produkt aus Leistung (P) und Zeit (t), ihre Einheit ist die Wattsekunde (Ws) oder das Joule (J).

Umgangssprachlich werden elektrische Leistungsmessgeräte auch als Wattmeter bezeichnet. Die elektrische Leistung kann theoretisch bei symmetrischen Netzen auch über Strom- und Spannungsmessung mittels eines digitalen Multimeters ermittelt werden. Auf Grund eines nicht symmetrischen Stromnetzes (Blindströme und Oberwellen durch induktive und kapazitive Verbraucher) ist für eine ausreichende Genauigkeit eine mehrphasige Messung notwendig. Je nach Netzart können dabei drei oder vier Phasen gemessen werden. Würden digitale Multimeter zum Einsatz kommen wären für eine Messung drei oder vier Messgeräte notwendig und die Berechnung der einzelnen Leistungen müsste im Anschluss erfolgen, was bei reinen Leistungsmessgeräten bereits intern automatisch durchgeführt wird.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen digitalen Multimetern und Leistungsmessgeräten liegt in der Abtastfrequenz. Digitale Multimeter arbeiten mit deutlich geringeren Abtastfrequenzen, was aber speziell bei nicht symmetrischen Sinussignalen ein wesentlicher Parameter für die resultierende Messgenauigkeit darstellt. Standardleistungsmessgeräte haben eine Abtastfrequenz die einem Vielfachen der Netzfrequenz entspricht (z. B. 1 MHz Abtastfrequenz, was bedeuten würde, dass für jede Mikrosekunde ein Messpunkt aufgezeichnet wird).

Üblicherweise können mit modernen Leistungsmessgeräten elektrische Signale bis zu 1.000 V Wechsel- und 1.500 V Gleichspannung gemessen werden. Höhere Signale können nur mit Spezialmessgeräten gemessen werden.

Abbildung 78: Digitales Wattmeter für Wirk-, Schein- und Blindleistung



Quelle: ITWissen, 2015

Neben den analog anzeigenden Wattmetern werden heutzutage hauptsächlich Digital-Wattmeter eingesetzt. Diese arbeiten mit A/D-Wandlern, die die Augenblickswerte des Stroms und der Spannung digitalisieren und über einen Mikroprozessor die verschiedenen Leistungswerte errechnen. Wattmeter haben umschaltbare Messbereiche und können Leistungen von einigen Milliwatt (mW) bis hin zu einigen Kilowatt (kW) messen. Ein Qualitätszeichen von Leistungsmessgeräten ist eine hohe Präzision im Milliwattbereich.

Abbildung 79: Fluke 1730 Three-Phase Energy Logger mit Stromschlaufen



Quelle: Fluke, 2015

Moderne Leistungsmessgeräte werten circa 255 unterschiedliche elektrische Messgrößen und bis zur 50. harmonischen Oberwelle aus. Leistungsmessgeräte für ingenieurtechnische Anwendungen und zum Zweck der Messung von Leistungs- und

Energieverbräuchen sind ab circa 600 Euro erhältlich. Diese Mehrkanalmessgeräte sind in der Regel mit internen Speichern (Datenloggern) ausgestattet, womit eine Aufzeichnung der Leistung über einen längeren Zeitraum (meist mehrere Wochen) beziehungsweise eine Aufzeichnung des Energieverbrauchs (Lastgangs) ermöglicht wird.

Hochwertigere Geräte bieten neben weiteren Zusatzfunktionen ebenfalls die Möglichkeit Messungen im Bereich der Netzqualität (Spannungs-Unsymmetrie und Oberschwingungen) durchzuführen. Die Kosten für diese Messgeräte bewegen sich circa bei 1.500 bis 2.000 Euro.

Grundlagen der Leistungsmessung

Netzarten: Je nach Ausführung des Neutral- beziehungsweise Null- und Erdungsleiters im Stromnetz und auf Anlagenseite können prinzipiell folgende Netzarten unterschieden werden:

- TT-System
- TN-Systeme
 - TN-C System
 - TN-S-System
 - TN-C-S System
- IT-System

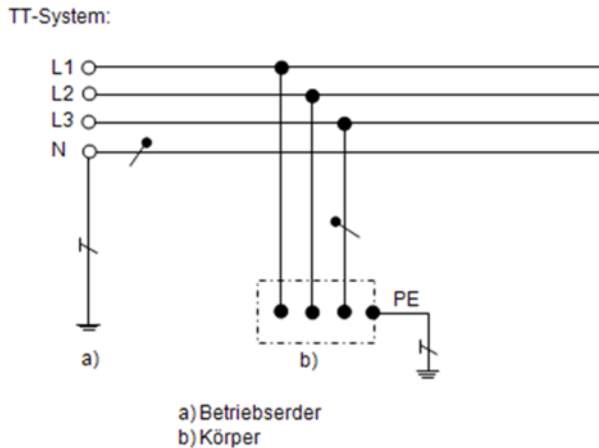
Im nun Folgenden wird kurz auf die unterschiedlichen Netzarten eingegangen.

TT-System (Französisch: Terre Terre - System)

Im TT-System (siehe Abbildung 76) sind der Sternpunkt des einspeisenden Transformators (Betriebserder) und das elektrisch leitfähige Gehäuse des Betriebsmittels (Anlagenerder) in der Verbraucheranlage separat geerdet. Somit ist der Anlagenerder vom Betriebserder im Verteilernetz getrennt.

Die fehlende Verbindung zwischen Betriebserde des Erzeugers und der Erde der Verbraucheranlagen bietet bei sorgfältiger Ausführung den Vorteil, dass keine Ausgleichsströme zwischen den besagten Erdungspunkten auftreten können.

Abbildung 80: TT-System



Quelle: Präsentation, Neumann-Messgeräte, 2015, Seite 16

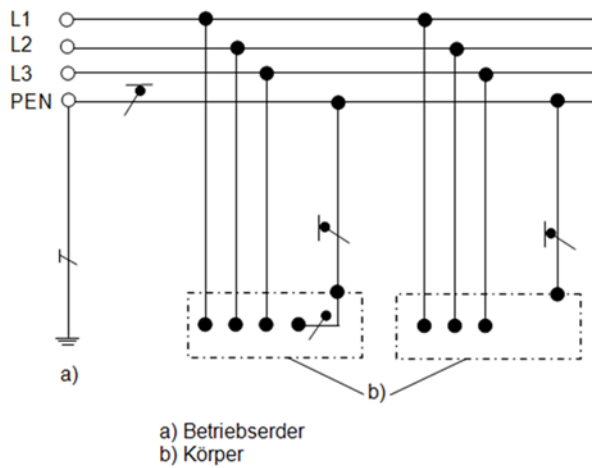
TN-System (Französisch: Terre Neutre -System)

Im Unterschied zum TT-System wird im TN-System eine Erdung vom Sternpunkt des Transformators im Niederspannungsnetz bis in die Anlage des Kunden durchgeführt. Je nach Ausführung des Erdleiters werden dabei folgende Varianten unterschieden:

TN-C-System (Französisch: Terre Neutre Combiné -System)

Hier wird ein sogenannter PEN-Leiter eingesetzt, der gleichzeitig Schutzleiter (PE) und Neutralleiter (N) ist (siehe Abbildung 81). Dieses System wird auch als „klassische Nullung“ beziehungsweise „Nullung ohne besonderen Schutzleiter“ bezeichnet. Es ist wohl das älteste Schutzsystem und birgt enormes Gefahrenpotenzial. Wenn der PEN-Leiter unterbrochen wird und der Außenleiter weiterhin mit einem Verbrauchsmittel verbunden ist, liegt an berührbaren Gehäusen die Spannung des Außenleiters gegen Erde an, also in der Regel 230 V. Auch im normalen Betrieb liegt an den Gehäusen eine gewisse Spannung gegen Erde an, die nach dem Ohm'schen Gesetz durch den Widerstand des PEN-Leiters und den durch ihn fließenden Strom verursacht wird. In mehrphasigen Installationen kommt es außerdem bei ungleichmäßiger Belastung der Außenleiter zu Nullpunktverschiebungen. Dies ist dem Spannungsabfall auf dem Nullleiter geschuldet. Bei Unterbrechung des Nullleiters kann die volle Spannung zwischen den Außenleitern (bis zu 400 V) am Gerät anliegen.

Abbildung 81: TN-C-System

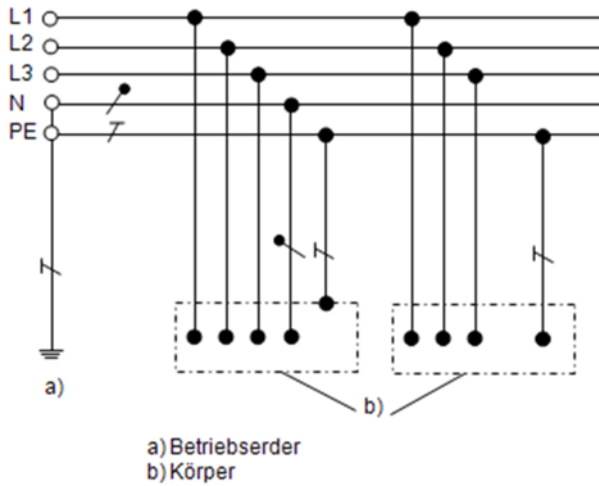


Quelle: Präsentation, Neumann-Messgeräte, 2015, Seite 19

TN-S-System (Französisch: Terre Neutre Séparé -System)

Hier wird ein separater Neutralleiter und Erdungsleiter vom Transformator bis zu den Verbrauchern geführt. Dieses System wird umgangssprachlich als „stromlose“ oder "Moderne Nullung" bezeichnet und muss seit 2008 verpflichtend bei Neuanlagen sowie teilweise bestehenden Anlagen umgesetzt werden. Ein TN-S-System ist sicherer als das TN-C- beziehungsweise TN-C-S-System. Die Probleme, die dort aus einem unterbrochenen PEN-Leiter resultieren können, treten hier nicht auf, der Schutz ist erheblich besser gewährleistet (siehe Abbildung 82).

Abbildung 82: TN-S-System

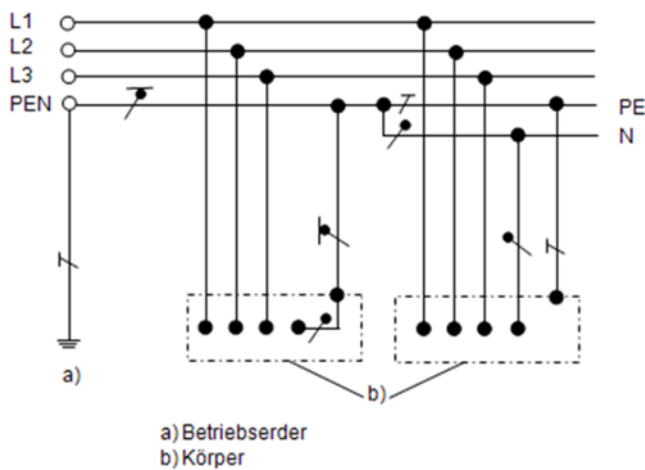


Quelle: Präsentation, Neumann-Messgeräte, 2015, Seite 17

TN-C-S-System (Französisch: Terre Neutre Combiné Séparé -System) - (Deutsch: Erde Neutral kombiniert separat- System)

Setzt sich aus einem TN-C-System vorzugsweise für das Verteilungsnetz und einem TN-S-System in der Kundenanlage zusammen (siehe Abbildung 83).

Abbildung 83: TN-C-S-System



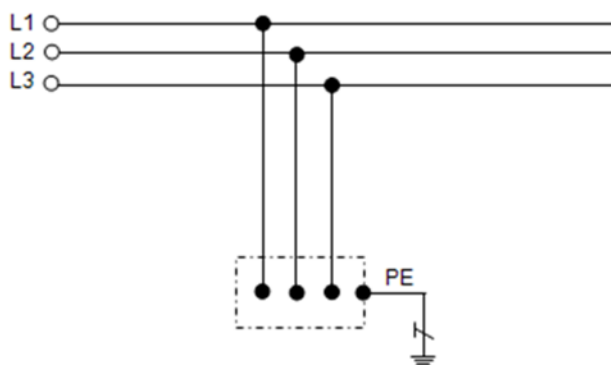
Quelle: Präsentation, Neumann-Messgeräte, 2015, Seite 18

IT-System (Französisch: Isolé Terre -System)

Das IT-System (siehe Abbildung 84) gewährleistet eine erhöhte Ausfallsicherheit bei Erdschlussfehlern. Bei Erdschluss erfolgt also keine sofortige Abschaltung des Netzes, daher kommt dieses System oft in der Industrie beispielsweise in Krankenhäusern zur Anwendung. Zu beachten ist jedoch, dass die Trafoseite hier nicht geerdet ausgeführt ist.

Abbildung 84: IT-System

IT-System:

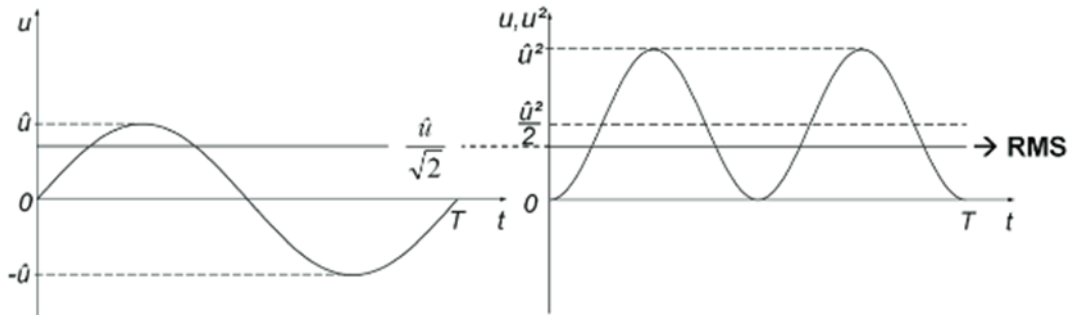


Quelle: Präsentation, Neumann-Messgeräte, 2015, Seite 15

Leistungsbegriffe in der Wechselstromtechnik

Wechselstrom setzt sich aus zeitlich veränderlichen Größen zusammen, welche sinusförmig periodisch um den Nullwert pendeln. Da eine einfache, arithmetische Mittelwertbildung zwischen den positiven und negativen Werten stets Null ergeben würde, müssen für Strom und Spannung Effektivwerte berechnet werden (siehe Abbildung 85). Effektivwerte sind quadratische Mittelwerte (RMS, englisch Root Mean Square) und stellen zu Gleichstrom und -spannung äquivalente Werte dar, was eine Vergleichbarkeit ermöglicht. Während einige Messinstrumente aufgrund ihrer Konstruktionsweise diese Effektivwerte anzeigen können, müssen bei der eingesetzten digitalen Messtechnik n Einzelwerte mit möglichst konstantem Zeitabstand innerhalb einer Periode T aufgezeichnet werden, um daraus Effektivwerte zu berechnen.

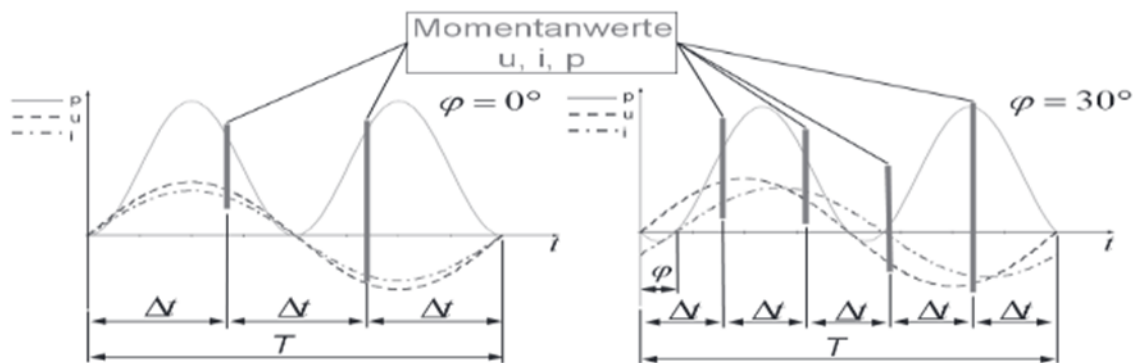
Abbildung 85: : Quadratischer Mittelwert für Spannung (RMS)



Quelle: Paetzold, J., Messung elektrischer Energie – Grundlagen und Erfahrungen, 2013, Seite 37

Diese Zeitspanne beziehungsweise Integrationszeit entspricht dem Aktualisierungsintervall der Messung (ein ausgegebener Messwert je Zeitspanne) und kann an den meisten Messgeräten eingestellt werden. Die Anzahl der aufgenommenen Momentanwerte während einer Zeitperiode entspricht der Abtastrate und ist oft eine gerätespezifische Konstante. Wie Abbildung 86 zudem veranschaulicht, liefert eine höhere Abtastrate ein genaueres Abbild des Strom- beziehungsweise Spannungsverlaufes. Je nach möglicher Abtastrate, das heißt Diskretisierungsintervall des Signals, steht somit eine unterschiedliche Anzahl digitaler Momentanwerte für Strom U und Spannung I zur Berechnung weiterer Größen zur Verfügung.

Abbildung 86: Momentanwerte für Spannung, Strom und Leistung



Quelle: Paetzold, J., Messung elektrischer Energie – Grundlagen und Erfahrungen, 2013, Seite 37

Die Wirkleistung P kann durch arithmetische Mittelwertbildung (siehe Formel 24)

Formel 24: Wirkleistung P

$$P = \overline{p(t)} = \overline{u(t) \cdot i(t)}$$

oder Integration der Momentanleistung p innerhalb einer Zeitperiode T (siehe Formel 25)

Formel 25: Momentanleistung

$$P = \frac{1}{T} \int_T (u(t) \cdot i(t)) dt$$

berechnet werden. Durch Aufsummierung dieser Wirkleistungen P ergibt sich die Wirkenergie eines Zeitraums T_0 bis T_n (siehe Formel 26):

Formel 26: Wirkenergie

$$E = W = \int_{T_0}^{T_n} P(t) dt$$

Das Produkt aus U_{eff} und I_{eff} liefert ebenfalls eine Leistung, welche als Scheinleistung S bezeichnet wird:

Formel 27: Scheinleistung

$$S = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}}$$

Bei Gleichstromanwendungen entspricht die Scheinleistung der Wirkleistung. In Wechselstromnetzen schwingen Spannung und Strom nicht immer in gleicher Phasenlage. Zu dieser Phasenverschiebung φ kommt es infolge kapazitiver (Spannung eilt Strom nach - negativer Phasenwinkel) oder induktiver (Strom eilt Spannung nach - positiver

Phasenwinkel) Lasten. Diese Lasten können Energie (zwischen-)speichern, ohne dass diese gleich in Arbeit umgesetzt wird. Diese zwischen Erzeuger und Verbraucher pendelnde Leistung wird als Pendelleistung, Verschiebungsblindleistung (QV) oder meist vereinfacht nur als Blindleistung Q bezeichnet. Mit dem Wissen um die Phasenverschiebung sinusförmig schwingender Wechselströme und -spannungen vorausgesetzt, ist auch eine Berechnung von P und Q über die Effektivwerte von U und I möglich:

Formel 28: Berechnung von P und Q über die Effektivwerte von U und I

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi$$

Formel 29: Blindleistung

$$Q = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \sin \varphi$$

Weitere wichtige Kennwerte sind die Leistungsfaktoren λ und $\cos(\varphi)$, welche das Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung angeben, wobei

Formel 30: Leistungsfaktor λ

$$\lambda = \frac{|P|}{S}$$

allgemein gilt, und für sinusförmige Spannungen und Ströme

Formel 31: Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}$$

da in diesem Fall der Leistungsfaktor dem Cosinus des Phasenwinkels entspricht. Da die Scheinleistung nie kleiner als die Wirkleistung sein kann, sind Leistungsfaktoren nie größer als 1.

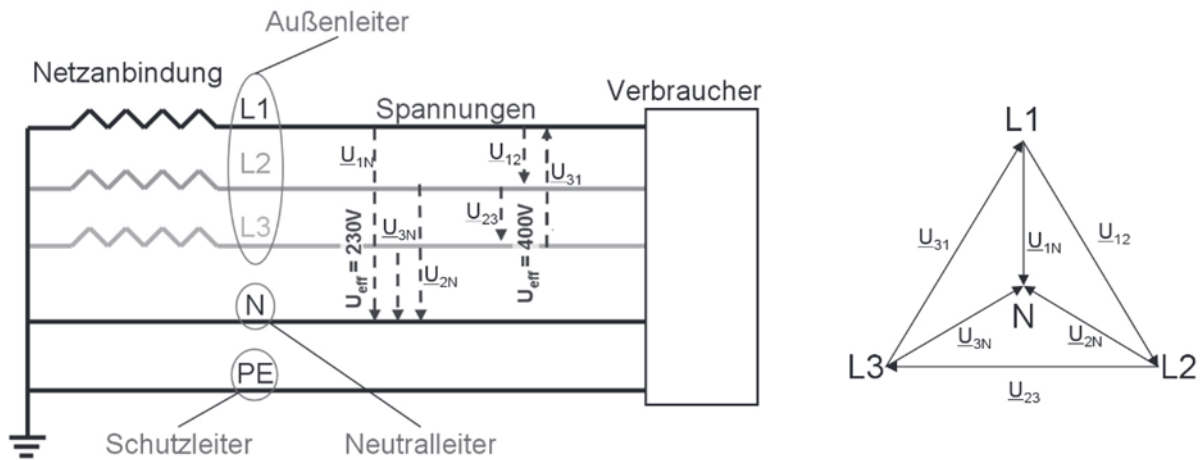
Ein Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ von 0,87 ist durchaus normal für kleine bis mittlere, industriell eingesetzte Elektromotoren. Dabei erreicht die Blindleistung circa 58 % der Wirkleistung. Bei einem $\cos(\varphi)$ von 0,7 ($\varphi = 45^\circ$) sind Wirk- und Blindleistung bereits gleich groß und bei kleinen Elektromotoren nicht ungewöhnlich. Bei einer (theoretischen) Phasenverschiebung von 90° gibt es nur noch Blindleistung und keine Wirkleistung mehr. Blindleistung belastet das Netz ohne Nutzarbeit zu verrichten. Sie erfordert dadurch teurere, leistungsstärkere Stromnetze, führt zu höheren Wärmeverlusten in den Leitungen und kann vom Energieversorger in Rechnung gestellt werden. Blindleistung kann jedoch kompensiert werden, indem beispielsweise der durch Elektromotoren erzeugten induktiven Last eine durch Kondensatoren produzierte kapazitive Last entgegenwirkt.

Leistungsmessung im Drehstromsystem

Symmetrische Dreiphasensysteme, auch Drehstromsysteme genannt, sind dreiphasige Wechselstromsysteme mit symmetrischen Spannungen, die den gleichen Betrag und 120° Phasenverschiebung zueinander haben. Abbildung 87 zeigt beispielsweise den grundlegenden Aufbau eines TN-S-System Niederspannungsdrehstrom-netzes. Das Leitungsnetz besteht aus den drei Strom führenden Leitern L1, L2, L3 (auch Phasen genannt), einem Neutraleiter N (Nullleiter) und einem Schutzleiter PE.

Die maximale Spannung \hat{u} zwischen den Leitern L1, L2 und L3 beträgt jeweils 565 V, was einem Effektivwert U_{eff} von 400 V entspricht. Zwischen L1, L2, L3 und dem Nullleiter gilt jeweils $\hat{u} = 325$ V und $U_{\text{eff}} = 230$ V. Die Phasenlage der drei Leiter ist dabei um jeweils 120° versetzt.

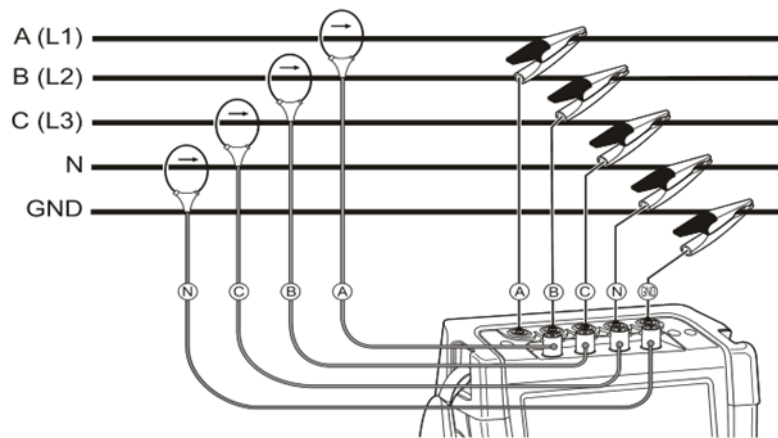
Abbildung 87: Dreiphasiges Niederspannungsdrehstromnetz



Quelle: Paetzold, J., Messung elektrischer Energie – Grundlagen und Erfahrungen, 2013, Seite 44

In der Praxis liegt jedoch aus verschiedenen Gründen weder ein symmetrisches Netz noch ein reines Sinussignal vor. Weiters kann es durch unsymmetrische Lasten und/oder Oberwellen zu einem belasteten Nullleiter kommen. Daher müssen für eine exakte Messung eines Systems jeweils alle Phasen und der Nullleiter gemessen werden. Moderne Standardleistungsmessgeräte unterstützen eine mehrphasige Messung und haben bereits alle möglichen Netzstrukturen hinterlegt. Daher erfordert eine fachgerechte Messung in der Praxis „nur noch“ die Auswahl eines geeigneten Messpunktes, das korrekte Anschließen der Spannungs- und Stromfühler in der Anlage sowie die Auswahl des entsprechenden Netzsystems in den Softwareeinstellungen des Messgerätes. Bei der Messung von Leistung und Energieverbrauch eignet sich ein Platzieren des Messgerätes am Schaltschrank der Anlage. Die jeweils richtige Anschlussart am Messgerät ist der Bedienungsanleitung zu entnehmen. Die nachfolgende Abbildung 88 veranschaulicht dies exemplarisch für den Fluke 434-II.

Abbildung 88: Anschluss des Fluke 434-II an ein dreiphasiges Stromverteilungssystem (TN-S)



Quelle: Fluke, 2015

Wurden Verbraucher identifiziert, die einzeln gemessen werden sollen, so gilt es zu beachten, dass sich die Einspeiseseite von Motoren besser als die Ausgangsseite zur Messung eignet. Auf der Ausgangsseite können Oberwellen oder andere Störsignale bestehen, die nur durch den Einsatz eines geeigneten Tiefpassfilters neutralisiert werden können. Auf der Einspeiseseite ist eine Messung in der Regel nicht so aufwendig.

Wenn der Motor immer nur mit einer konstanten Last arbeitet, ist nur eine Messung in diesem Belastungspunkt durchzuführen. Wenn der Motor in zwei oder drei unterschiedlichen Lastpunkten arbeitet, werden Messungen an jedem dieser Lastpunkte benötigt, da die Strom- und Leistungsfaktor-Werte variieren. Bei mehreren Lastpunkten wird ein gewichteter Leistungsdurchschnitt berechnet. Motordrehzahl und Arbeitsmaschinen-Geschwindigkeiten sollten so genau wie möglich gemessen werden, am besten mit einem Stroboskoptachometer. Die Drehzahl des Motors ist eine wichtige Messgröße. Bei Tausch eines Motors durch ein effizienteres Gerät muss darauf geachtet werden dass dieser dieselbe Drehzahl im Lastpunkt bereitstellt. Vor allem bei zentrifugalen Anwendungen (Ventilatoren und Pumpen), ist die Motorlast sehr empfindlich in Bezug auf die Betriebsdrehzahl. Ein energieeffizienter Motor arbeitet üblicherweise bei einer etwas höheren Drehzahl als ein Standardmotor. Die höhere Geschwindigkeit kann zu einer Erhöhung der drehzahlempfindlichen Last führen (Affinitätsgesetze). Dies kann Einsparungen, die durch den Einsatz des effizienteren Motors zustande kommen zu Nichte machen beziehungsweise ineffizienter gestalten. Ein Drehzahlvergleich ist nötig, um den Effekt der Effizienzmaßnahme zu garantieren.

8 Leitfäden und Tools

Um Betriebe bei der Optimierung häufig genutzter Technologien zu unterstützen, wurden im Programm klimaaktiv Energieeffiziente Betriebe weitere Leitfäden zu folgenden Querschnittstechnologien erstellt:

- Optimierung der Abwärmenutzung
- Optimierung von Druckluftsystemen
- Optimierung von Pumpensystemen
- Optimierung von Ventilatoren und Lüftungssystemen
- Optimierung von Dampfsystemen
- Optimierung von Kältesystemen
- Optimierung von Beleuchtungssystemen
- Messleitfaden I zur Bewertung von Energieeinsparungen
- Messleitfaden II zur Messtechnik
- Optimierung der Wärmeverteilung und Hydraulik
- Technische Isolierung

Weiters bietet klimaaktiv Schulungen und Webinare, in denen Grundlagen und Lösungen zur Optimierung betrieblicher Systeme vermittelt werden. Aktuelle Termine finden Sie auf klimaaktiv.at/betriebe-schulungen.html oder im Energieeffiziente Betriebe Newsletter. Sie können sich unter klimaaktiv.at/service/newsletter-an-abmeldung.html anmelden.

ProTool

Das klimaaktiv ProTool ist ein Tool, das für eine umfassende Erstanalyse der Energieeffizienz im Betrieb eingesetzt werden kann und ermöglicht rasch Einsparpotenziale zu identifizieren.

Pinch Tool

Die Pinch-Analyse ermöglicht eine rasche und unkomplizierte Bestimmung der optimalen Abwärmenutzung. Dieses Werkzeug erleichtert es, ein Wärmetauschernetzwerk basierend auf realen Betriebsdaten von Prozessströmen und Abwärmeströmen aus der Energieversorgung zu kreieren und zu bewerten.

Formelverzeichnis

Formel 1: Temperaturmessung mit Angabe der absoluten Messunsicherheit	18
Formel 2: Differenzdruckmessung mit Angabe der relativen Messunsicherheit	18
Formel 3: Messergebnis	21
Formel 4: Gesamte Messunsicherheit	22
Formel 5: Absoluter Messbereichsfehler	23
Formel 6: Volumenstrom	27
Formel 7: Massenstrom	28
Formel 8: Bernoulligleichung	34
Formel 9: Berechnung der Corioliskraft	39
Formel 10: Strouhal-Zahl	43
Formel 11: Berechnung Volumendurchfluss.....	43
Formel 12: Berechnung Volumenstrom	48
Formel 13: Berechnung Strömungsgeschwindigkeit.....	54
Formel 14: Volumendurchfluss	58
Formel 15: Massedurchfluss	58
Formel 16: Induzierte elektrische Spannung	62
Formel 17: Vereinfachte Gleichung induzierte elektrische Spannung.....	62
Formel 18: Volumenstrom des Fluids	62
Formel 19: Widerstand bei Temperatur ϑ in Ω bei metallischen Temperatursensoren	78
Formel 20: Widerstand bei Temperatur T in Ω für NTC-Sensoren.....	80
Formel 21: Widerstand bei Temperatur T in Ω für PTC-Sensoren	81
Formel 22: Planck'sches Strahlungsgesetz	104
Formel 23: Wiensche Verschiebungsgesetz.....	105
Formel 24: Wirkleistung P	146
Formel 25: Momentanleistung.....	146
Formel 26: Wirkenergie.....	146
Formel 27: Scheinleistung	146
Formel 28: Momentanleistung.....	147
Formel 29: Blindleistung.....	147
Formel 30: Leistungsfaktor λ	147
Formel 31: Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$	147

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Messgröße Druck – siehe Kapitel 6	8
Tabelle 2: Messgröße elektrische Energie – siehe Kapitel 7	8
Tabelle 3: Messgröße Temperatur – siehe Kapitel 5.....	8
Tabelle 4: Messgröße Durchfluss Flüssigkeiten – siehe Kapitel 4.....	9
Tabelle 5: Messgröße Durchfluss Gas – siehe Kapitel 4	9
Tabelle 6: Verschiedene Messgrößen	9
Tabelle 7: verschiedene Genauigkeitsklassen für Feinmessgeräte.....	22
Tabelle 8: verschiedene Genauigkeitsklassen für Betriebsmessgeräte	22
Tabelle 9: Empfohlene mobile Messverfahren für unterschiedliche Einsatzbereiche	25
Tabelle 10: Empfohlene stationäre Messverfahren für unterschiedliche Einsatzbereiche	25
Tabelle 11: Auswahltablelle Durchflussmessverfahren	29
Tabelle 12: Druckverluste.....	32
Tabelle 13: Ein- und Auslaufstrecken	35
Tabelle 14: Wirkdruckverfahren – Merkmale für Messblenden.....	36
Tabelle 15: Wirkdruckverfahren – Merkmale für Venturirohre	37
Tabelle 16: Coriolis Messverfahren – Merkmale	41
Tabelle 17: Durchflussmesser, Messbereiche in m ³ /h.....	46
Tabelle 18: Wirbelzähler - Merkmale Vortex-Messverfahren	46
Tabelle 19: Flügelradanemometer - Merkmale	51
Tabelle 20: Thermisches Anemometer – Merkmale.....	55
Tabelle 21: Schwebekörperanemometer – Merkmale	60
Tabelle 22: Grob- Charakterisierung verschiedener Rohr- und Auskleidungswerkstoffe von MID`s	64
Tabelle 23: MID – Merkmale	65
Tabelle 24: Ultraschall Laufzeit – Merkmale	70
Tabelle 25: Ultraschall Doppler – Merkmale.....	70
Tabelle 26: Messmethoden für Widerstandsthermometer mit Metallmesswiderständen	74
Tabelle 27: Messmethoden für Widerstandsthermometer mit Halbleiter- Messwiderständen	74
Tabelle 28: Messmethoden für Thermoelemente	74
Tabelle 29: Messmethoden für Strahlungsthermometer	75
Tabelle 30: Verwendung von Schutzrohren	76
Tabelle 31: Widerstandsthermometer – Merkmale	88
Tabelle 32: Genormte Thermopaare.....	92
Tabelle 33: Thermoelemente – Merkmale.....	93

Tabelle 34: Empfohlene Mindesteinbaulängen in mm für direkt eintauchende (ohne Schutzrohr) Temperaturfühler	101
Tabelle 35: Verschiedene Oberflächen und ihre Emissionsgrade bei erhitztem Aluminiumblock	109

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestandteile eines typischen Messaufbaus.....	14
Abbildung 2: Zeitkonstante T	17
Abbildung 3: Arten von Messfehlern	19
Abbildung 4: Dynamischer Fehler	20
Abbildung 5: Überblick Durchflussmessverfahren.....	27
Abbildung 6: Qualitativer Kostenüberblick von stationären Durchflussmessgeräten.....	30
Abbildung 7: Messprinzip Wirkdruckverfahren mit Blende.....	33
Abbildung 8: Messaufbau - Wirkdruckmessung mit Blende.....	36
Abbildung 9: Messaufbau Coriolisprinzip.....	40
Abbildung 10: Doppelrohrprinzip.....	41
Abbildung 11: Messwertaufnehmer hinter dem Störkörper (links) / freischwingend im Störkörper (rechts)	44
Abbildung 12: Erforderliche Ein- und Auslaufstrecken für das Wirbelstraßenprinzip.....	45
Abbildung 13: Flügelradanemometer mit Anzeigegerät.....	48
Abbildung 14: Flügelrad-Ausrichtung.....	49
Abbildung 15: Flügelradanemometer mit Multifunktionsmessgerät der Firma Ahlborn....	50
Abbildung 16: Flügelradanemometer als Kompaktmessgerät.....	51
Abbildung 17: Aufbau einer Hitzdrahtsonde.....	53
Abbildung 18: Stationärer Einbau in Rohrleitung - Thermisches Anemometer	55
Abbildung 19: Mobiler Einsatz des Anemometers.....	55
Abbildung 20: Prinzip des Schwebekörper-Durchflussmessers.....	57
Abbildung 21: Häufige Messaufbauten von Schwebekörperanemometer	59
Abbildung 22: Magnetisch induktiver Durchflussmesser	61
Abbildung 23: Typische Einbausituation eines MID in Kompaktbauform	65
Abbildung 24: Schema der Laufzeitdifferenzmessung.....	67
Abbildung 25: Schema des Doppler-Prinzips	68
Abbildung 26: Einbausensoren – Inline.....	69
Abbildung 27: Clamp-on-Sensoren werden von außen direkt auf die Rohrleitung montiert.....	69
Abbildung 28: verschiedene Temperaturmessverfahren	73
Abbildung 29: Verschiedene Schutzrohrbauarten.....	76
Abbildung 30: Kennlinie eines Pt100.....	79
Abbildung 31: : Kennlinie eines NTC	81
Abbildung 32: Kennlinie eines PTC.....	82
Abbildung 33: Keramik-Metalldrahtwiderstand	83

Abbildung 34: Folien-Temperatursensor	84
Abbildung 35: Dünnschicht-Messwiderstand	85
Abbildung 36: Anschluss Widerstandsthermometer – Zweileiterschaltung	86
Abbildung 37: Anschluss Widerstandsthermometer – Dreileiterschaltung	87
Abbildung 38: Anschluss Widerstandsthermometer – Vierleiterschaltung.....	87
Abbildung 39: Funktionsweise – Thermoelement	90
Abbildung 40: Thermoelektrische Spannungsreihe	91
Abbildung 41: Temperaturfühler in der Bauart Mantelthermometer zum direkten Kontakt mit dem Medium.....	96
Abbildung 42: Messaufbau Temperaturmessung stationär	97
Abbildung 43: Temperaturfühler für hohe Temperaturen	98
Abbildung 44: Kürzere Einbaulängen durch reduzierte Schutzrohrspitze oder freiliegenden Messeinsatz	99
Abbildung 45: Temperaturfühlereinbau in Rohrleitungen mit geringem Durchmesser (Stutzen Teil des Schutzrohrs).....	99
Abbildung 46: Verschiedene Einbaupositionen von Temperaturfühlern in Rohrleitungen.....	100
Abbildung 47: Richtige Positionierung von Raum –Temperatursensoren.....	102
Abbildung 48: Verschiebung des Maximums der spektralen Emission zu kürzeren Wellenlängen.....	104
Abbildung 49: Temperaturprofil eines Modellhauses mit einer Thermografiekamera aufgenommen	107
Abbildung 50: Typischer Aufbau einer Thermografiekamera	107
Abbildung 51: Falsches Temperaturprofil eines Aluminiumblocks zurückzuführen auf die falsche Annahme des Emissionsgrads ϵ	109
Abbildung 52: Messgerät mit festem Fühler (rechts) und Messgerät mit austauschbarem Fühler (links).....	112
Abbildung 53: Verschiedene Verfahren zur Druckmessung	113
Abbildung 54: Federrohrmanometer	116
Abbildung 55: Funktionsweise – Federrohrmanometer	117
Abbildung 56: Messaufbau Federrohrmanometer mit Clamp-Druckmittler.....	118
Abbildung 57: Druckmittler mit Clamp-Anschluss	118
Abbildung 58: Allgemein Funktionsprinzip eines Druckmessumformers	120
Abbildung 59: Druck-Messumformer und seine Komponenten	121
Abbildung 60: Wheatstone-Halbbrücke.....	122
Abbildung 61: Drucksensor nach dem piezoresistivem Prinzip	123
Abbildung 62: Drucksensor nach dem kapazitivem Prinzip	124

Abbildung 63: Differenzdruck-Messzelle nach dem induktivem Prinzip	125
Abbildung 64: Differenzdruck-Messzelle nach dem kapazitivem Prinzip	126
Abbildung 65: Differenzdruck-Messzelle mit Druckfühler mit Kapillarrohr.....	127
Abbildung 66: Elektrische Energiemessung – Einteilung	128
Abbildung 67: Analoges Messgerät, Elenco Modell M-106	129
Abbildung 68: Ferraris-Zähler.....	130
Abbildung 69: Beispiel für ein digitales Messgerät, Digital Multimeter M3800.....	132
Abbildung 70: Digitales Multimeter mit Messspeicher und Grafikdisplay	133
Abbildung 71: Prinzip der Strommessung mit einem Amperemeter beziehungsweise digital Multimeter	135
Abbildung 72: Stromzangen und Stromschleife zur indirekten Strommessung.....	136
Abbildung 73: Prinzip der digitalen Spannungsmessung mit einem Voltmeter beziehungsweise digitalem Multimeter.....	137
Abbildung 74: Digitales Wattmeter für Wirk-, Schein- und Blindleistung	139
Abbildung 75: Fluke 1730 Three-Phase Energy Logger mit Stromschleifen	139
Abbildung 76: TT-System.....	141
Abbildung 77: TN-C-System.....	142
Abbildung 78: TN-S-System	143
Abbildung 79: TN-C-S-System.....	143
Abbildung 80: IT-System.....	144
Abbildung 81: : Quadratischer Mittelwert für Spannung (RMS).....	145
Abbildung 82: Momentanwerte für Spannung, Strom und Leistung.....	145
Abbildung 83: Dreiphasiges Niederspannungsdrehstromnetz	149
Abbildung 84: Anschluss des Fluke 434-II an ein dreiphasiges Stromverteilungssystems (TN-S).....	150

Literaturverzeichnis

AFRISO EURO-INDEX (Mess-, Regel- und Überwachungsgeräte für Haustechnik, Industrie und Umweltschutz), 2015: Betriebsanleitung Rohrfedermanometer Typ: D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, abgerufen am 19.08.2015 um 14:17 Uhr:
[reitze.com/tradepro/shop/artikel/docs/AFRISO Rohrfedermanometer.pdf](http://reitze.com/tradepro/shop/artikel/docs/AFRISO_Rohrfedermanometer.pdf)

Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, 2015: Messgerätedatenblatt, abgerufen am 28.07.2015 um 8:55 Uhr: ahlborn.com/getfile.php?1659.pdf

Altendorf M. et alii: Durchfluss Handbuch, Endress+Hauser Flowtec AG, 2003

Colucci G.: Temperaturmessung im Griff (Broschüre), Endress+Hauser, 2008

Conrad Österreich, 2015: Onlinemessgerätekatalog, Preise, und so weiter, abgerufen am 14.08.2015 um 10:50 Uhr:
conrad.at/ce/de/Search.html?search=fl%C3%BCgelradanemometer&sort=Price-desc

CS Instruments GmbH, 2015: Messprofi-Katalog 2014/2015 (Messtechnik für Druckluft und Gase)

Deconta GmbH (Ausrüster der Sanierer: Gerätetechnik, Verbrauchsartikel, persönliche Schutzausrüstung), 2015: Flügelrad – Anemometer, abgerufen am 29.07.2015 um 15:15 Uhr: deconta.eu/deutsch/fluegelradanemometer.html

DirectIndustry – Die online Industriemesse, 2015: Produkte, Flügelrad – Anemometer der Firma KIMO, abgerufen am 28.07.2015 um 7:55 Uhr:
directindustry.de/prod/kimo/fluegelrad-anemometer-11846-380119.html

Ehinger K. et. al.: Industrielle Temperatur-Messtechnik Grundlagen und Praxis, ABB Automation Products GmbH, 2013

Elektronik-Kompodium, 2015: Elektrische Messgeräte – Digitale Messgeräte, abgerufen am 02.09.2015 um 08:14 Uhr: elektronik-kompodium.de/sites/grd/1011071.htm

Elektronik-Kompodium, 2015: Elektrische Messgeräte, abgerufen am 25.08.2015 um 11:13 Uhr: elektronik-kompodium.de/sites/grd/0211231.htm

Elektrotechnik-Fachbuch, 2015: Grundlagen der Elektrotechnik, abgerufen am 26.08.2015 um 14:11 Uhr: bildung-niedersachsen.de/elektrotechnik/e_grundlagen_kap_04_5v5.html

Endress+Hauser AG, 2015: Dokumentation: Computer-Automation-Temperatur, abgerufen am 10.08.2015 um 12:12 Uhr: portal.endress.com/wa001/dla/5000213/1606/000/00/ComputerAutomationTemperatur.pdf

Endress+Hauser AG, 2015: Temperaturmesstechnik - Thermometer und Transmitter für die Prozessindustrie (Katalog)

Endress+Hauser AG (Füllstand, Durchfluss, Druck, Temperatur – Messtechnik), 2015: e-direct (High Quality – Low Price!) Messgeräte, abgerufen am 14.08.2015 um 09:45 Uhr: e-direct.endress.com/at/de

EPHY MESS - Gesellschaft für Elektro-Physikalische Messgeräte mbH, 2015: Dokumentation: Nutzenwiderstandsthermometer, abgerufen am 04.08.2015 um 11:12 Uhr: ephy-mess.de/fileadmin/Daten/Downloads/Produktkataloge_DE/EPHYMESS_GmbH_Katalog_Nutzenwiderstandsthermometer.pdf

EPHY MESS GmbH (Gesellschaft für Elektro-Physikalische Messgeräte mbH), 2015: Nutzenwiderstandsthermometer (Katalog)

Frenzel F. et alii: Industrielle Durchfluss-Messtechnik Grundlagen und Praxis, ABB Automation Products GmbH, 2011

Görtler G.: Skriptum Angewandte Messtechnik, Fachhochschul- Bachelorstudiengang Energie- und Umweltmanagement, Wintersemester 2014/15

Hoffman J.: Handbuch der Messtechnik, 3 Auflage, Verlag: Hanser, 2006

Hofmann F.: Grundlagen Magnetisch-Induktive Durchflussmessung, Krohne Messtechnik GmbH & Co. KG, 2003

Höntzsch GmbH (Messtechnik für Durchfluss, Massenstrom & Strömungsgeschwindigkeit), 2015: Flügelrad FA, abgerufen am 08.07.2015 um 09:22: hoentzsch.com/de/produkte/kategorien/m/fluegelrad-fa/

ITWissen (Das große Online-Lexikon für Informationstechnologie), 2015: Erklärung Wattmeter, abgerufen am 08.09.2015 um 15:15 Uhr: itwissen.info/definition/lexikon/Wattmeter-wattmeter.html

JUMO Mess- und Regelgeräte GmbH, 2015: Platin-Folien-Temperatursensor-Typenblatt

JUMO Mess- und Regelgeräte GmbH, 2015: Produkte, Dokumentationen über Durchfluss und Druck, abgerufen am 05.08.2015 um 15:30 Uhr: jumo.at/

JUMO Mess- und Regelgeräte GmbH, 2015: Typenblatt: Platin – Folien – Temperatursensor nach DIN EN 60 751, abgerufen am 05.08.2015 um 16:16 Uhr: google.at/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CDAQFjAAahUKEwiNudLJ9frGhUqF9sKHQojBPQ&url=http%3A%2F%2Fwww.jumo.net%2Fattachments%2FJUMO%2Fattachmentdownload%3Fid%3D4990&ei=NO-1VY3PBaqu7AaKxpCgDw&usg=AFQjCNFSfD5R09OdoXQ9jnQ6UHtifC5LnA

Koschke P. et. al.: ALMEMO®-Handbuch, Fa. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH, 2011

Kottonau AG (Messtechnik und Automatisierungstechnik in Industrie und Forschung), 2015: Strömungssensor – Flügelrad, Thermoanemometer, Vortex und Ultraschall, abgerufen am 06.07.2015 um 15:33: kottonau.ch/kome/?linker=stroemungssensoren

Kottonau AG (Messtechnik und Automatisierungstechnik in Industrie und Forschung), 2015: Strömungs- und Durchflussmessung – FA: Flügelrad-Anemometer, abgerufen am 03.08.2015 um 11:32 Uhr: kottonau.ch/kome/?linker=fluegelrad_fa

Kundert Ingenieure AG (Beratung–Projektierung–Realisation), 2015: Wirkdruckgeber nach DIN/EN/ANSI/BS, abgerufen am 01.07.2015 um 12:30 Uhr: kundert-ing.ch/display.cfm/id/103598/disp_type/display/filename/dosch

Lütkepohl G. et. al.: Industrielle Druck-Messtechnik Grundlagen und Praxis, ABB Automation Products GmbH, 2012

Meyer N. et. al.: The Engineer's Guide to Industrial Temperature Measurement, ROSEMOUNT Inc., 2013

OMEGA Engineering GmbH (eine gute Adresse für Mess- und Regeltechnik aus einer Hand), 2015: Onlinemess-gerätekatalog, Electromagnetic Flow Meters, abgerufen am 21.07.2015 um 16:32 Uhr: omega.de/pptst/FV100.html

OSTRON (Messtechnik, Funktechnik, Bauelemente), 2015: Funktion und Innenaufbau eines Energiezählers, abgerufen am 26.08.2015 um 16:01 Uhr: ostron.de/sonstiges/Funktion-und-Innenaufbau-eines-Energiezaehlers.html

Recknagel H. et. al.: Taschenbuch für Heizung und Klima Technik, 2011

Ristimäki T.: Energieeffizienz durch drehzahlgeregelte Antriebe mit Frequenzumformern, Honeywell GmbH, 2015, abgerufen am 14.09.2015 um 15:46 Uhr: centraline.com/de/deutsch/paper/title/energieeffizienz-durch-drehzahlgeregelte-antriebe-mit-frequenzumformern.html

ROSEMOUNT TEMPERATURE GmbH, 2001: Widerstandsthermometer und Thermoelemente – Montage- und Betriebsanleitung

Scholzen GmbH (Engineering, Industrie-Armaturen, Regelsysteme), 2015: Blendenmessung, abgerufen am 01.07.2015 um 11:22 Uhr: scholzen.com/durchflussmessung-datenblatt.html

SCHWING Verfahrenstechnik GmbH, 2015: Volumendurchfluss – Dampf – Messblenden und Venturirohre für Flüssig-, Gas- und Dampf Anwendungen, abgerufen am 07.07.2015 um 13:55 Uhr: pmt.de/index.php?Produkt/Volumendurchfluss/Dampf/Messblenden_und_Venturirohre_fuer_Fluessig-Gas-Dampf_Anwendung.html

Sigloch H.: Technische Fluidmechanik, 9. Auflage, Verlag: Springer, 2014

Tecmara GmbH (task – technology – solution/ Pumpenschutz und Förderkreislauf Equipment), 2015: Magneti-sche-induktive Durchflussmessung, abgerufen am 22.07.2015 um 10:15 Uhr: tecmara.com/produkte/durchfluss-messung/elektronisch/aufbau-und-funktion.html

Testo AG, 2015: Produkte für Temperaturmessung, abgerufen am 10.08.2015 um 09:09 Uhr: testo.de/produkte/temperatur/index.jsp

Testo AG, 2015: Produkte, testo 410-2 (Flügelrad - Anemometer), abgerufen am 03.08.2015 um 14:54 Uhr:
testo.de/produkte/produktdetailseite.jsp?productNo=0560+4102

Testo AG, 2015: Produkte, testo-882 Wärmebildkamera, abgerufen am 18.08.2015 um 10:10 Uhr: testo.at/produktdetails/0560+0882/testo-882-Waermebildkamera

Testo AG, 2015: Testo 905 und 925 – Produktbroschüre

TetraTec Instruments GmbH (Precise Flow, Calibration, Test Equipment), 2015: Messtechnik, H800 Klassische Venturirohre, abgerufen am 22.07.2015 um 14:56 Uhr: tetratec.de/messtechnik/durchfluss-elemente/drosselgeraete/h800-venturirohr/

WIKA Alexander Wiegand SE & Co. KG, 2011: Mechanische Druckmesstechnik - WIKA Datenblatt PM 06.02: Druckmessgerät mit Kapsel Feder Typ 612.20, Robustausführung, abgerufen am 24.08.2015 um 07:44 Uhr: de-de.wika.de/upload/DS_PM0602_D_3844.pdf

Über klimaaktiv

klimaaktiv ist die Klimaschutzinitiative des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Seit 2004 bietet sie in den Themenschwerpunkten „Bauen und Sanieren“, „Energiesparen“, „Erneuerbare Energie“ und „Mobilität“ ein umfassendes, ständig wachsendes Spektrum an Information, Beratung sowie Weiterbildung und setzt Standards, die international Vorbildcharakter haben.

klimaaktiv zeigt, dass jede Tat zählt: jede und jeder in Kommunen, Unternehmen, Vereinen und Haushalten kann einen aktiven Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Damit trägt die Initiative zur Umsetzung des nationalen Energie- und Klimaplanes (NEKP) für Österreich bei. Näheres unter klimaaktiv.at

Das klimaaktiv Programm Energieeffiziente Betriebe setzt gezielt Impulse zur Erhöhung der Energieeffizienz in österreichischen Produktions- und Gewerbebetrieben und unterstützt diese auf Ihrem Weg in Richtung Klimaneutralität. Informationen, Angebote und Good Practice Beispiele von umgesetzten Maßnahmen finden Sie unter klimaaktiv.at/effizienz

Kontakt

Strategische Gesamtsteuerung klimaaktiv

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie

Abt. VII/3 – Nachhaltige Finanzen und Standortpolitik

Stubenbastei 5, 1010 Wien

Programmmanagement klimaaktiv Energieeffiziente Betriebe

Österreichische Energieagentur

Petra Lackner

eebetriebe@energyagency.at

klimaaktiv.at/effizienz

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und
Technologie**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)