

Vogel Studienmodule

Jürgen
Bechtloff

Messtechnik

Jürgen Bechtloff
Messtechnik

Professor Dr.-Ing. Jürgen Bechtloff

Messtechnik

Vogel Buchverlag

Professor Dr.-Ing. **JÜRGEN BECHTLOFF**

studierte an der Technischen Universität Braunschweig Maschinenbau und promovierte dort 1992 auf dem Gebiet der Robotik. Er war anschließend in der Entwicklung der Firma Moeller in Bonn tätig, einem Hersteller von Komponenten und Systemen für die Energieverteilung und Automatisierung (Automatisierungstechnik).

Seit 1998 verantwortet Professor JÜRGEN BECHTLOFF an der Fachhochschule Südwestfalen am Standort Meschede die Lehrgebiete Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik sowie die Module Mechatronik, Robotik und Getriebetechnik.

Weitere Informationen:
www.vogel-buchverlag.de

ISBN 978-3-8343-3197-7

1. Auflage. 2011

Alle Rechte, auch der Übersetzung, vorbehalten.
Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Hiervon sind die in §§ 53, 54 UrhG ausdrücklich genannten Ausnahmefälle nicht berührt.

Printed in Germany

Copyright 2011 by

Vogel Business Media GmbH & Co. KG, Würzburg

Vorwort

Ausgangspunkt

Die Grundaufgabe der Messtechnik lautet:

Wieviel Mal ist eine definierte Teilmenge in der zu analysierenden Messgröße enthalten?

In nahezu allen Bereichen des täglichen Lebens begegnet uns diese Grundaufgabe – die Messtechnik spielt eine wichtige, wenn nicht sogar eine entscheidende Rolle. In Naturwissenschaft und Technik bildet die Messtechnik die Basis zur Analyse technischer Systeme. Daher ist dieses innovative Wissensgebiet ein wichtiger Bestandteil technischer Studiengänge. Die Messtechnik kann natürlich nicht für sich alleine betrachtet werden, sondern sie nutzt die Grundlagen aus allen an den Ingenieurwissenschaften beteiligten Disziplinen: Mathematik, Physik, Informatik usw.

Ziel

Allerdings kann in einer Lehrveranstaltung – und somit in diesem Lehrbuch – aus dem breit gefächerten Lehrgebiet Messtechnik, das sich zudem aufgrund der Innovationszyklen sehr dynamisch weiterentwickelt, nur ein begrenzter Bereich dargestellt werden. Deshalb beschränkt sich das Thema auf die Grundprinzipien und die in der Praxis am häufigsten anzutreffenden Beispiele und Lösungen für Sensoren, Messgeräte und Messsysteme.

Aufbau

Zunächst wird das **SI-Einheiten-System** für physikalische Größen eingeführt. Dieses System bildet die Grundlage für die **Grundgleichung der Messtechnik**. Grundlegend für das Verständnis des Aufbaus von Messeinrichtungen ist deren **Signalflussplan**. Die Klassifizierung in verschiedene **Signaltypen** schließt die Einführung ab.

Eine der wichtigsten Fragestellungen in der Messtechnik muss lauten: Wie genau messe ich? Die Betrachtung des **Messfehlers** und die Einführung von **statistischen** Methoden zur Ermittlung der **Messunsicherheit** sind daher sehr wichtig.

Da gewonnene Messdaten zunehmend computergestützt verarbeitbar sind, werden eine Reihe von Methoden zur **Messdatenverarbeitung** behandelt. Aus der numerischen Mathematik werden die wichtigsten Verfahren der **Interpolation** und der **Approximation** praxisnah behandelt.

Bevor die einzelnen Messprinzipien behandelt werden, wird mit Hilfe der **PAYNTERSchen Vierecke** die Analogie der verschiedenen **physikalischen Systeme** als prinzipieller Zugang zu Messprinzipien aufgezeigt.

Auf diesen Grundlagen aufbauend, können nun die **Messverfahren** der verschiedenen für den Maschinenbau wichtigsten physikalischen Größen besprochen werden:

- elektrische Größen,
- Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung,
- Kraft und Drehmoment,
- Temperatur,
- Druck und
- Durchfluss.

Nun schließt sich das Thema der Weiterverarbeitung an. Messsignale müssen oft mittels **Messverstärker** aufbereitet werden. Es werden die Eigenschaften und praktischen Anwendungen für **Operationsverstärker** beschrieben.

Neben den statischen Signalen sind sehr häufig sich zeitlich ändernde Messsignale zu verarbeiten, insbesondere wenn dynamische System untersucht werden müssen. Der Aspekte der **Signalfilterung** werden in ihren Grundlagen besprochen. Eine Vertiefung findet im Fachbuch »Regelungstechnik« statt.

Der heute immer wichtiger werdende Schritt zur Rechnerkopplung setzt die **Analog-Digital-Wandlung** voraus. Die gebräuchlichsten Verfahren runden den Inhalt des Themas ab.

Jedes Kapitel schließt mit **Übungsaufgaben** ab. Im letzten Kapitel dieses Lehrbuches sind die Aufgaben mit ihren Lösungen zu finden.

Voraussetzungen

Das Lehrbuch setzt solide Kenntnisse in den Grundlagenfächern Ingenieur-Mathematik und allgemeine Physik (inkl. Elektrotechnik) voraus. Alle anderen für das Verständnis der einzelnen Messverfahren erforderlichen Grundlagen werden in den einzelnen Abschnitten vermittelt.

Software-Tools

Zur vereinfachten Berechnung in der Messtechnik und natürlich für alle weiteren ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen haben sich eine Vielzahl von unterstützenden Software-Tools etabliert. Neben der direkten Programmierung in einer Hochsprache, wie C, C++, C#, Pascal, Java usw. eignen sich oftmals auch mathematische Anwendungen wie Maple, Mathlab, Freemath, Scilab, Octave, oder MathCad. Bei der Bearbeitung der praktischen Laboraufgaben sollte unbedingt eines dieser Werkzeuge eingesetzt werden, um praktische Erfahrungen bei der Anwendung dieser mächtigen und in der Praxis immer breiter eingesetzten Werkzeuge zu bekommen. Eine Liste findet sich im Literaturverzeichnis.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einführung in die Messtechnik	13
1.1 Grundbegriffe der Messtechnik	13
1.1.1 Gegenstand der Messtechnik	13
1.1.2 Messtechnische Disziplinen, Aufgaben und Ziele	14
1.2 Einheitensystem	15
1.1.1 Geschichtliches Einheitensystem	15
1.2.2 Normale und SI-Einheiten	15
1.2.3 Abgeleitete SI-Einheiten	16
1.2.4 Vielfache und Teile von SI-Einheiten	17
1.2.5 Größen-, Einheiten- und Zahlenwert-Gleichungen	18
1.2.6 Größengleichungen	18
1.2.7 Zahlenwertgleichungen	19
1.3 Grafisches Darstellen von Messgrößengleichungen	20
1.3.1 Grafisches Darstellen von Messgrößen	20
1.3.2 Grafisches Darstellen von Zahlenwerten	20
1.3.3 Numerisches Darstellen in Tabellenform	21
1.4 Messkettenaufbau, Messkettenelemente	22
1.4.1 Messkette	23
1.5 Signale	27
1.5.1 Einheitssignale	29
1.5.1.1 Nullpunkt	29
1.6 Energieprinzip in der Messtechnik	30
2 Messfehler	33
2.1 Systematische und zufällige Fehler	33
2.2 Statistische Analyse von Messwerten	36
2.2.1 Häufigkeits- und Verteilungsdichte	36
2.2.1.1 Hinweis zur Wahl der Intervalle	38
2.2.1.2 Histogramm	38
2.3 Mittelwert, Erwartungswert, Standardabweichung	39
2.3.1 Kontrollen auf Normalverteilung	41
2.3.2 Statistische Sicherheit, Vertrauensbereich	41
2.3.3 Signifikanztest des Stichprobenmittelwertes	46
2.3.4 χ^2 -Test über die Güte einer Anpassung	48
2.4 Fehlerfortpflanzung	50
2.4.1 Berechnen des erkennbaren systematischen Fehlers	51
2.4.2 Berechnen des korrigierten Mittelwertes	52
2.4.3 Berechnen der wahrscheinlichen Fehlergrenzen	52
3 Verarbeiten von Messdaten	57
3.1 Interpolationsverfahren	58
3.1.1 Lineare Interpolation	58
3.1.2 NEWTON-Interpolation	60

3.1.3	Spline-Interpolation	62
3.2	Approximationsverfahren	68
3.2.1	Regressionsrechnung	68
3.2.1.1	Prinzip der kleinsten Quadrate	68
3.2.1.2	Lineare Regression	69
3.2.1.3	Lineare Regression vom Grad 1	70
3.2.1.4	Allgemeiner Ansatz zur linearen Ausgleichsrechnung	71
3.2.2	Approximierende Spline-Funktionen	74
4	Beschreibung physikalischer Systeme	81
4.1	Allgemeines System	82
4.2	Mechanisch-translatorisches System	83
4.3	Mechanisch-rotatorisches System	84
4.4	Elektrisches System	84
4.5	Fluidisches System	85
4.6	Thermodynamisches System	86
5	Messen elektrischer Größen	89
5.1	Verknüpfungsgesetze	89
5.1.1	Knotenregel	89
5.1.2	Maschenregel	90
5.1.3	Reihenschaltung von Widerständen	91
5.1.4	Parallelschaltung von Widerständen	92
5.2	Spannung	93
5.3	Strom	94
5.4	Widerstand	94
5.5	Einstellbarer Spannungsteiler	95
5.6	Anpassungsschaltung für Widerstände	96
6	Messen geometrischer Größen	99
6.1	Längenmessungen	99
6.1.1	Pneumatisches Prinzip	99
6.1.2	Mechanische Längenmessgeräte	100
6.2	Optische Verfahren	104
6.2.1	Inkrementale Längenmesssysteme	104
6.2.2	Codierte Längenmesssysteme	106
6.2.3	Rotatorische Geber	107
6.2.4	Optische Abstandsmessung durch Pulslaufzeitmessung	108
6.2.5	Triangulationsverfahren	108
6.2.6	Laserinterferometer	109
6.3	Induktive Wegsensoren	109
6.3.1	Differential-Transformator-Wegaufnehmer	110
6.3.2	Kapazitive Wegmesssensoren	112
6.3.3	Wirbelstromsensor	112
6.3.4	Kapazitiver Neigungssensor	113
6.4	HALL-Elemente	114

7	Messen von Drehzahl und Geschwindigkeit	117
7.1	Mechanische Verfahren	117
7.2	Elektrodynamische Verfahren	117
7.2.1	Wirbelstromtachometer	117
7.2.2	Generator	118
7.3	Messen der Drehzahl mittels Zählung	118
7.3.1	Induktive Impulsgeber	119
7.3.2	Optische Drehzahlaufnehmer	119
8	Messen der Beschleunigung	121
8.1	Kapazitive Beschleunigungssensoren	121
8.2	Induktive Beschleunigungsaufnehmer	122
8.3	Silizium-Beschleunigungsaufnehmer	123
8.4	Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer	123
8.4.1	Piezoelektrische Verfahren	124
9	Messen von Kraft und Drehmoment	127
9.1	Dehnungsmessung	127
9.2	Mechanische Dehnungsmessung	127
9.2.1	Dehnungsmessstreifen	127
9.2.1.1	Anordnung von Dehnungsmessstreifen	130
9.2.1.2	Bauformen von Dehnungsmessstreifen	131
9.3	Kraftmessung	132
9.3.1	Kraftmessbügel	132
9.3.2	Hydraulische Kraftmesser	132
9.3.3	Kraftmessung mittels Dehnungsmessstreifen	133
9.3.3.1	Zug- bzw. Druckstab	133
9.3.3.2	Biegebalken	133
9.3.4	Piezoelektrische Verfahren zur Kraftmessung	135
9.4	Drehmomentmessung	135
9.4.1	Statische DMS-Drehmomentmessung	136
9.4.2	Rotierende DMS-Drehmomentmessung	137
10	Messen von Temperaturen	141
10.1	Temperaturmaßstab	141
10.2	Ausdehnungsthermometer	142
10.3	Widerstandsthermometer (nach IEC 751 / DIN EN 60 751)	144
10.3.1	Beschaltung	146
10.3.1.1	2-Leiter-Schaltung	146
10.3.1.2	3-Leiter-Schaltung	147
10.3.1.3	4-Leiter-Schaltung	148
10.4	Thermoelement	148
10.5	Strahlungspyrometer	151
11	Messen von Drücken	155
11.1	Physikalische Grundlagen	155
11.1.1	Messen des Druckes in ruhenden Fluiden	155
11.1.2	Messen des Druckes in bewegten Fluiden	157

11.2	Unmittelbare Druckmessung	158
11.2.1	Druckmessfühler für die Druckmessung in strömenden Fluiden	158
11.2.2	U-Rohr-Manometer	159
11.2.3	Deformations-Druckmessgeräte	159
11.2.4	Druckmessgeräte mit Dehnungsmessstreifen	160
12	Messen von Durchflüssen	161
12.1	Messen von Durchflüssen durch energetische Beziehungen einer Strömung	161
12.2	Volumenzähler	162
12.3	Schwabekörper-Durchflussmessung	163
12.4	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser	165
13	Messverstärker	167
13.1	Lineare Messverstärker mit Operationsverstärker	167
13.1.1	Eigenschaften eines Operationsverstärkers	167
13.1.2	Prinzip der Gegenkopplung	169
13.1.3	Spannungsverstärker mit Stromausgang	171
13.1.4	Reiner Stromverstärker	172
13.1.5	Stromverstärker mit Spannungsausgang	172
13.1.6	Messsignalverarbeitung mit Operationsverstärkern	173
13.1.6.1	Addierer	173
13.1.6.2	Subtrahierer	174
13.1.6.3	Integrator	175
13.2	Messverstärker	176
13.2.1	Frequenzabhängigkeit der Verstärkung	177
13.2.2	Verstärkerbauarten	178
13.2.2.1	Gleichspannungsverstärker	178
13.2.2.2	Ladungsverstärker	178
13.2.2.3	Trägerfrequenzverstärker	179
14	Messen zeitlich veränderlicher Signale	183
15	Rechnerkopplung	191
15.1	Grundlagen	191
15.1.1	Digitalisierung	191
15.1.2	Abtasttheorem	191
15.1.3	Tiefpassfilter/Anti-Aliasing-Filter	193
15.1.4	Sample&Hold-Stufe	194
15.2	Analog/Digital-Umsetzer	195
15.2.1	Prinzip der Digitalisierung	196
15.2.2	Parallel-A/D-Umsetzer	197
15.2.3	Sukzessive Approximation-A/D-Wandler	198
15.2.4	Dual-Slope-A/D-Umsetzer	201
15.2.5	D/A-Umsetzer	202
15.2.5.1	R-2R-D/A-Umsetzer	202

16	Lösungen zu den Aufgaben	205
	Literaturverzeichnis	231
	Stichwortverzeichnis	233

1 Einführung in die Messtechnik

1.1 Grundbegriffe der Messtechnik

Da das **Messen**, also das **quantitative Ermitteln einer Größe** unter Anwendung mathematischer Methoden bei den Entwicklungsaufgaben in Naturwissenschaft und Technik eine zentrale Rolle spielt, hat die Messtechnik in nahezu allen Bereichen unserer modernen Zivilisation eine tragende Bedeutung erlangt. Erwähnt seien:

- Forschung und Entwicklung,
- Industrielle Produktion,
 - Prozessautomatisierung,
 - Qualitätssicherung,
- Verkehrstechnik,
 - Kraftfahrzeuge,
 - Flugzeuge,
 - Eisenbahn,
- Medizin,
- Umweltschutz.

Nachstehend wird das Messen physikalischer Größen unter Verwendung von Sensoren, in denen ein von der Messgröße abhängiges Messsignal erzeugt wird, behandelt, wobei das Messsignal in analoger oder digitaler Form ausgegeben wird. Ausgangspunkt sind die jeweiligen physikalischen Effekte, auf denen die Messumformung beruht. Besondere Bedeutung kommt der **Signalaufbereitung** und der **Signalweiterverarbeitung** zu.

1.1.1 Gegenstand der Messtechnik

Der Messvorgang dient dem Erfassen und dem Darstellen physikalischer Größen und dem Zuordnen einer Maßzahl. Der Größe G wird die Maßzahl $\{G\}$ als Vielfaches der Einheitsgröße $[G]$ zugeordnet. $[G]$ wird durch ein Messnormal verkörpert:

$$G = \{G\} \cdot [G] \quad (\text{Gl. 1.1})$$

Diese Gleichung wird als **Grundgleichung der Messtechnik** bezeichnet. Hierbei müssen allerdings zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

- Die zu messende Größe muss qualitativ eindeutig bestimmt sein.
- Das Messnormal muss durch Konvention (\rightarrow Einheitendefinition) festgelegt sein.

Beide Voraussetzungen sind nicht trivial: Größen wie etwa die „Behaglichkeit“ in der Klimatechnik, die „Klugheit“ oder die „Attraktivität“ sind nicht allgemein anerkannt definiert und somit nicht messbar.

Fast jede physikalische Größe kann die zu messende Größe sein. Allerdings können die meisten physikalischen Größen nicht direkt gemessen werden, sondern sie müssen unter Verwenden **physikalischer Modelle** und daraus abgeleiteter Formeln aus anderen gemessenen Daten berechnet werden. Ein Beispiel ist das Messen der Geschwindigkeit eines Gegenstandes durch das Messen seiner Position zu zwei verschiedenen Zeitpunkten und Berechnen des Quotienten aus der zurückgelegten Strecke und der benötigten Dauer.

1.1.2 Messtechnische Disziplinen, Aufgaben und Ziele

Eine Unterteilung der (angewandten) Messtechnik kann wie folgt vorgenommen werden:

- **Betriebsmesstechnik**, die den Bereich des betrieblichen Messwesens für kontinuierliche und quasikontinuierliche Prozesse (Verfahrens-, Energie-, Kraftwerkstechnik) umfasst.
- **Labormesstechnik**, die sich auf nicht-fertigungsgebundene Messprozesse in besonderen Räumen und mit unterstellter höherer Präzision bezieht.
- **Fertigungsmesstechnik**, die vor allem Längen- und Gestaltmesstechnik ist, d.h., es geht um das Erfassen der Geometrie zu fertigender Objekte in der metallverarbeitenden Industrie.

Dabei spielt eine Zuordnung der physikalischen Größen hier keine Rolle.

In Tabelle 1.1 sind die **Messaufgaben** für die industrielle Messtechnik zusammengefasst.

Tabelle 1.1 Messaufgaben der industriellen Messtechnik [HOF07]

Informationsgewinnung für	Anwendung, Ziel
Energieumwandlung und -verteilung	Überwachen und Steuern von energetischen Umwandlungsprozessen in Kraftwerken; Überwachen und Steuern des Transports (Verteilungsnetze) von Elektroenergie, von Gas und Kohlenwasserstoffen (Erdöl, Heizöl, Benzin); Energieabrechnung und -verkauf
Prozesssteuerung	Prozesssteuerung von Hand (Anzeige für Bedienpersonal), durch Regler (Verwendung von Einheitssignalen) oder durch Rechner (Prozessleitsysteme)
Prozessanalyse	Untersuchungen von Prozessen zur quantitativen Beschreibung und mathematischen Modellierung (Erstellen von Streckenmodellen)
Produktanalyse	Bestimmen von Zusammensetzung und Konzentrationen in Produkten der Verfahrenstechnik
Fertigungstechnik	Fertigungskontrolle und -steuerung, vorwiegend über geometrische Größen (Länge, Winkel, Gestalt, Oberfläche) im Maschinen- und Gerätebau
Qualitätsüberwachung und -sicherung	Eingangskontrolle für Einsatzmaterialien und -produkte (z.T. Stichprobenkontrolle); Überwachen der Qualität von Halbfertig- und Fertigprodukten; Basis für Gewährleistung und Haftung
Logistik, Warenverkehr	Lagerhaltung, Bilanzierung, Abrechnung; Kauf, Verkauf; Transport- und Dienstleistungen; Dokumentation
Betriebstechnik	Gebäudeleittechnik (Heizung, Lüftung, Klima, Versorgung, Kommunikation), Sicherheitstechnik, Brandwarnung und Brandschutz; Umweltschutz

1.2 Einheitensystem

Messen heißt, durch Vergleichen feststellen, wie oft in einer physikalischen Größe eine vereinbarte Maßeinheit der gleichen physikalischen Art enthalten ist. Basis jeden Messens ist daher das Bereitstellen **klar definierter Grundeinheiten**, aus denen sich nach einfachen Gesetzen Maßeinheiten für komplexere physikalische Größen zusammensetzen lassen.

1.2.1 Geschichtliches Einheitensystem

Länge, Gewichts- und Zeiteinheiten waren dem menschlichen Erfahrungsraum entnommen und nur wenig genau reproduzierbar (**Elle, Fuß, Zoll, Schritt, Lot, Pfund usw.**).

In Deutschland ist die **Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)** die technische Oberbehörde, die für das Eichwesen zuständig ist. Sie hat vor allem die Aufgabe der Festlegung von Einheiten und Einheitensystemen, der Festlegung des Umfangs staatlicher Einflussnahmen (z.B. Eichpflicht) und der Durchführung von Eichungen und anderen amtlichen Überwachungen.

1.2.2 Normale und SI-Einheiten

Die sieben zu den Grundnormalen gehörenden Basiseinheiten des internationalen Einheitensystems SI (Systeme International des l'Unites) [PTB07] sind:

Länge: Meter [m]

Die Längeneinheit Meter wurde definiert als die Länge der Wegstrecke, die Licht im Vakuum während der Dauer von $1/299\,794\,458$ Sekunden durchläuft.

Masse: Kilogramm [kg]

Das Grundnormal der Masse wird durch den in Sèvres/Frankreich aufbewahrten Platin-Iridium-Zylinder, das sog. internationale Kilogramm, repräsentiert. In den einzelnen Ländern werden aus praktischen Gründen Ersatznormale aufbewahrt, die auf einige Teile von 10^{-9} genau geeicht sind.

Zeit: Sekunde [s]

Die Zeitspanne 1 Sekunde entspricht der $9,192\,631\,770 \cdot 10^9$ -fachen Resonanzschwingung des Atoms ^{133}Cs (Caesium). Caesium-Strahlresonatoren reproduzieren die entsprechende Frequenz mit einer Genauigkeit besser als 10^{-12} .

Stromstärke: Ampere [A]

Unter der Stromstärke 1 A (Ampere) wird die Größe eines zeitlich unveränderlichen elektrischen Stromes verstanden, der – durch zwei im Vakuum parallel im Abstand von 1 m voneinander angeordnete, geradlinige, unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem, kreisförmigem Querschnitt fließend – zwischen diesen Leitern pro 1 m Leiterlänge elektrodynamisch die Kraft $0,2 \cdot 10^{-6}$ N hervorrufen würde.

Temperatur: Kelvin [K]

Die Einheit 1 K (1 Kelvin) ist definiert als der 273,16. Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes von Wasser. Im Weiteren gilt die Einheitengleichung 1°C (Grad Celsius) = 1 K. Der Nullpunkt der Celsius-Skala liegt 0,01 K unter dem Tripelpunkt von Wasser. Damit gilt zwischen Kelvin- und der Celsius-Skala die Beziehung:

$$\vartheta[^{\circ}\text{C}] = T[\text{K}] - 273,15 [\text{K}] \quad (\text{Gl. 1.2})$$

Lichtstärke: Candela [cd]

Die Einheit der Lichtstärke Candela ist definiert als die Lichtstärke in einer bestimmten Richtung einer Strahlenquelle, die die monochromatische Strahlung der Frequenz $540,10^{12}$ Hertz aussendet und deren gemessene Strahlstärke in dieser Richtung $1/683$ Watt/Steradian beträgt.

Stoffmenge: Mol [mol]

1 Mol ist die Stoffmenge eines Systems bestimmter Zusammensetzung, das aus ebenso vielen Teilchen besteht, wie Atome in 12 g des Nuklids ^{12}C enthalten sind.

1.2.3 Abgeleitete SI-Einheiten

Die abgeleiteten SI-Einheiten werden kohärent aus den Basiseinheiten abgeleitet. Das heißt, man benötigt keine Umrechnungsfaktoren. Schlichtes Multiplizieren oder Dividieren von Basiseinheiten genügt. Dabei werden für die Einheiten die gleichen algebraischen Beziehungen verwendet, die auch für die jeweils zugeordneten Größen gelten.

Zum Beispiel ist die Geschwindigkeit gleich Länge durch Zeit. Die SI-Einheit der Geschwindigkeit ist demnach gleich dem Quotienten aus den SI-Einheiten Länge und Zeit: Meter durch Sekunde. Verschiedene abgeleitete Einheiten haben besondere Namen erhalten (z.B. Hertz, Newton, Volt, Ohm). Sie können ihrerseits dazu verwendet werden, weitere abgeleitete Einheiten auf einfachere Weise zu bilden, als wenn man von den Basiseinheiten ausgeht (siehe Tabelle 1.2).

Tabelle 1.2 Abgeleitete SI-Einheiten

Physikalische Größe	Name	Einheitenzeichen	Formelzeichen	Beziehung
Kraft	Newton	N	F	$1 \text{ N} = 1 \text{ kgms}^{-2}$
Druck (mechanisch) Druck (fluidisch, pneumatisch)	Pascal Bar	Pa bar	p ρ	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ Nm}^{-2}$ $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
mechanische Spannung	Megapascal	MPa N/mm ²	σ	$1 \text{ MPa} = 1 \text{ Nmm}^{-2}$
Arbeit Energie Wärmemenge	Joule Joule Joule	J J J	W W Q	$1 \text{ J} = 1 \text{ Nm}$ $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws}$ $1 \text{ J} = 1 \text{ kgm}^2\text{s}^{-2}$
Leistung Energiestrom, Wärmestrom	Watt	W	P	$1 \text{ W} = 1 \text{ Nm/s}$ $1 \text{ W} = 1 \text{ kgm}^2\text{s}^{-3}$
Drehmoment Biegemoment	–	Nm	M_t M_b	$1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$
Entropie Wärmekapazität	–	J/K	C	$1 \text{ J/K} = 1 \text{ Nm/K}$
Wärmeleitfähigkeit	–	WK ⁻¹ m ⁻¹	λ	$1 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1} = 1 \text{ NK}^{-1}\text{s}^{-1}$
Wärmeübergangskoeffizient	–	WK ⁻¹ m ⁻²	α	$1 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-2} = 1 \text{ NK}^{-1}\text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$
dynamische Viskosität	Pascal- sekunde	Pas	η	$1 \text{ Pas} = 1 \text{ Nsm}^{-2}$
kinematische Viskosität (dichtebezogen)	–	m ² /s	ν	$1 \text{ m}^2\text{s}^{-1} = 1 \text{ Pas m}^3\text{kg}^{-1}$
Aktivität einer radioaktiven Substanz	–	s ⁻¹	A	s ⁻¹
Beleuchtungsstärke	Lux	lx	E_v	$1 \text{ lx} = 1 \text{ lmm}^{-2}$
Leuchtdichte	–	cdm ⁻²	L_v	1 cdm^{-2}
Lichtstrom	Lumen	Lm	Φ_v	$1 \text{ lm} = 1 \text{ cds}$
magnetische Flussdichte	Tesla	T	B	$1 \text{ T} = 1 \text{ Vsm}^{-2}$
magnetische Feldstärke	–	A/m	H	$1 \text{ A/m} = 1 \text{ NV}^{-1}\text{s}^{-1}$

1.2.4 Vielfache und Teile von SI-Einheiten

Bei der Angabe von Maßzahl und Einheit ist es üblich, der Einheit ein Kurzzeichen voranzustellen. Das vorangestellte Kurzzeichen und das Einheitszeichen bilden eine eigene, geschlossene neue Einheit (Tabelle 1.3).

Tabelle 1.3 Vielfache und Teile

Yotta	Y	10 ²⁴	Dezi	d	10 ⁻¹
Zetta	Z	10 ²¹	Zenti	c	10 ⁻²
Exa	E	10 ¹⁸	Milli	m	10 ⁻³
Peta	P	10 ¹⁵	Mikro	μ	10 ⁻⁶
Tera	T	10 ¹²	Nano	n	10 ⁻⁹
Giga	G	10 ⁹	Pico	p	10 ⁻¹²
Mega	M	10 ⁶	Femto	f	10 ⁻¹⁵
Kilo	k	10 ³	Atto	a	10 ⁻¹⁸
Hekto	h	10 ²	Zepto	z	10 ⁻²¹
Deka	da	10 ¹	Yokto	y	10 ⁻²⁴

1.2.5 Größen-, Einheiten- und Zahlenwert-Gleichungen

Im Rahmen der Ingenieur Tätigkeit hat man es vorzugsweise mit physikalischen Messgrößen zu tun. Die Messaufgabe lautet daher (**Grundgleichung der Messtechnik**):

$$G = \{G\} \cdot [G] \quad (\text{Gl. 1.3})$$

mit:

- G physikalische Messgröße
- $\{G\}$ Zahlenwert, der angibt, wie oft die Einheit in der Messgröße enthalten ist
- $[G]$ Einheit der gleichen physikalischen Art wie die Messgröße



Beispiel

Schwungscheibe mit der trägen Masse

$$\{m\} = 500 \text{ kg}$$

$$\{m\} = 500$$

$$[m] = \text{kg}$$

Zahlenwert und Einheit stellen selbstständige unabhängige Faktoren dar!

Falsche Schreibweise: $m = 500 [\text{kg}] \quad \rightarrow \quad \text{VERMEIDEN!}$

RICHTIG: $m = \{m\} \cdot [m] = 500 \text{ kg}$

Wird nach dem Zahlenwert einer Messgröße gefragt, dann gilt:

$$\{G\} = \frac{G}{[G]}$$

Wird nach der Einheit einer Messgröße gefragt, dann gilt:

$$[G] = \frac{G}{\{G\}}$$

1.2.6 Größengleichungen

In der Technik tragen meist mehrere Teilkomponenten zum Bilden einer Messgröße bei, die auf Grund einer physikalischen Gesetzmäßigkeit miteinander verbunden sind. Der Zusammenhang wird durch eine Größengleichung beschrieben:

$$G = f(G_1; G_2; \dots; G_n) \quad (\text{Gl. 1.4})$$

Beispiel

Inhalt eines Kegels

$$V_{Kegel} = \frac{\pi}{3} r^2 \cdot h \quad (\text{Gl. 1.5})$$

Größengleichungen sind unabhängig von der Wahl der Einheiten, in denen die Teilkomponenten gemessen oder angegeben werden.

Zahlenwert und Einheit der Gesamtmessgröße ergeben sich aus der Größengleichung, also z.B.:

$$V_{Kegel} = \{V_{Kegel}\} [V_{Kegel}] = \frac{\pi}{3} \{r\}^2 \cdot \{h\} \cdot [r]^2 \cdot [h] = \frac{\pi}{3} \{r\}^2 \cdot \text{mm}^2 \cdot \{h\} \cdot \text{m} \quad (\text{Gl. 1.6})$$

1.2.7 Zahlenwertgleichungen

Die Grundgleichung muss auch in ihren Zahlenwerten erfüllt sein:

$$\{G\} = f(\{G_1\}; \{G_2\}; \dots; \{G_n\}) \quad (\text{Gl. 1.7})$$

In dieser Zahlenwertgleichung haben die Teilkomponenten lediglich die Bedeutung von Zahlenwerten.

Beispiel

Wärmemenge

$$Q_W = m \cdot c (\vartheta_2 - \vartheta_1); c \triangleq \text{spezifische Wärme}$$

$$\{Q_W\} = \frac{Q_W}{[Q_W]} = \frac{m}{[m]} \cdot \frac{c}{[c]} \cdot \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{[\vartheta_2; \vartheta_1]}$$

$$\frac{Q_W}{[Q_W]} = \frac{m}{\text{kg}} \cdot \frac{c}{\frac{\text{J}}{\text{g}} \cdot \text{K}} \cdot \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{\text{K}} = \frac{Q_W}{\text{J} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{g}}} = \frac{Q_W}{\text{kJ}} = \frac{Q_W}{\text{kWs}}$$

Für die Messergebnisse

$$m = 2,5 \text{ kg}$$

$$c = 4,1855 \frac{\text{J}}{\text{g}} \cdot \text{K}_{(\text{Wasser})}$$

$$\vartheta_1 = 15,5 \text{ }^\circ\text{C}; \vartheta_2 = 16,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

ergibt sich:

$$\frac{Q_W}{[Q_W]} = 2,5 \cdot 4,1855 \cdot (16,5 - 15,5) = 10,46375$$

Zahlenwertgleichungen werden bevorzugt benutzt, wenn man die Abhängigkeit einer Messgröße von ihren Teilkomponenten in Tabellenform darstellen möchte.

1.3 Grafisches Darstellen von Messgrößengleichungen

Nicht immer ist die Größengleichung für eine Messgröße und ihre Abhängigkeit von ihren Teilkomponenten mathematisch exakt zu fassen. Insbesondere beim gleichzeitigen Einwirken von Störgrößen, Nichtlinearitäten usw. können idealisierte Zusammenhänge unübersehbar kompliziert werden.



Beispiel

Freier Fall

$$s = \frac{1}{2} gt^2 \text{ (idealisierte Beziehung)}$$

Diese Beziehung ist nur gültig

- a) im Vakuum,
- b) in einem konstanten Beschleunigungsfeld.

Beides ist in der Praxis jedoch nicht vorhanden!

Statt komplizierter mathematischer Beschreibungen der Störeinflüsse ist eine grafische Darstellung vorzuziehen. Vorgeschrieben sind zwei prinzipielle Darstellungsformen im Koordinatensystem (siehe Abschnitte 1.3.1 und 1.3.2).

1.3.1 Grafisches Darstellen von Messgrößen

$$G = f(G_v) \tag{Gl. 1.8}$$

Hierbei (Bild 1.1) sind die Koordinaten mit einer Skala geeigneter Teilung zu versehen, die Teilstriche mit Zahlenwerten zu kennzeichnen und anstelle des vorletzten Zahlenwertes in jeder Koordinate die Einheit einzusetzen. Die Koordinatenpfeile sind als gesonderte Pfeile neben die Achsen zu setzen bzw. die Achsen mit Pfeilspitzen zu versehen. Die Messgröße wird neben bzw. unter die **Koordinatenpfeile** gesetzt.

1.3.2 Grafisches Darstellen von Zahlenwerten

$$\{G\} = f(\{G_v\}) \tag{Gl. 1.9}$$

Hierbei (Bild 1.2) erscheint die Einheit als Divisor unter der Messgröße. Die Koordinatenachsen werden durchgehend mit Zahlenwerten gekennzeichnet.

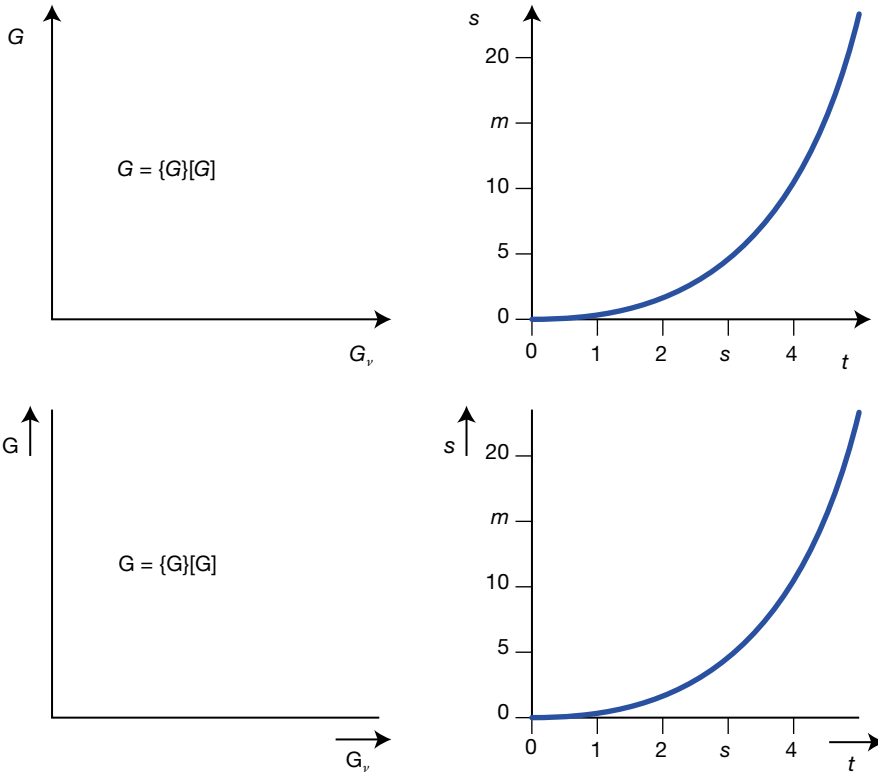


Bild 1.1 Grafische Darstellung von Messgrößen

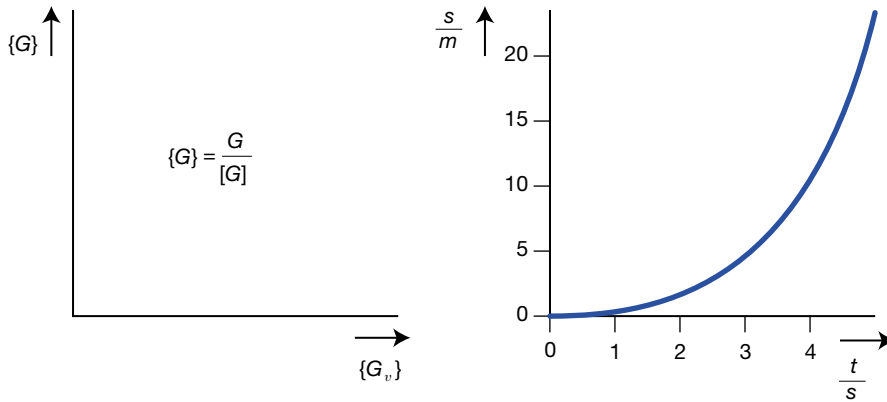


Bild 1.2 Grafische Darstellung von Zahlenwerten

1.3.3 Numerisches Darstellen in Tabellenform

Für das numerische Darstellen des Zusammenhanges zwischen Messgröße und Teilkomponente ist ausschließlich die Zahlenwertform zu verwenden.

$G/[G]$	$\{G\}_1$	$\{G\}_2$	$\{G\}_3$
$G_r/[G_r]$	$\{G_r\}_1$	$\{G_r\}_2$	$\{G_r\}_3$



Beispiel

s/m	0	4,92	19,1	41,3
t/s	0	1	2	3

1.4 Messkettenaufbau, Messkettenelemente

Die menschlichen Sinnesorgane sind nur in Ausnahmefällen zum Messen geeignet und dann nur zum groben Messen. In der Technik werden praktisch immer **Messeinrichtungen** eingesetzt, die aus Einzelementen bestehen. Dabei stellen die Blöcke Sensor/Aufnehmer, Anpasser und Ausgeber **Messgeräte** dar. Eine Messeinrichtung, auch **Messkette** genannt, besteht aus mindestens diesen drei Messgeräten (Bild 1.3).

Messobjekt

Dem **Messobjekt**, auch Messgegenstand und/oder Prüfling (in der Regelungstechnik Regelstrecke) benannt, wird in geeigneter Weise die interessierende **Messgröße** entnommen und dem ersten Messgerät, dem **Aufnehmer** bzw. dem **Sensor**, zugeführt.

Sensor/Aufnehmer

Der **Aufnehmer** formt aufgrund eines physikalischen Effektes die **Messgröße** in ein **Messsignal** um. Dabei sollte er die Einflüsse von **Störgrößen** möglichst gut unterdrücken.

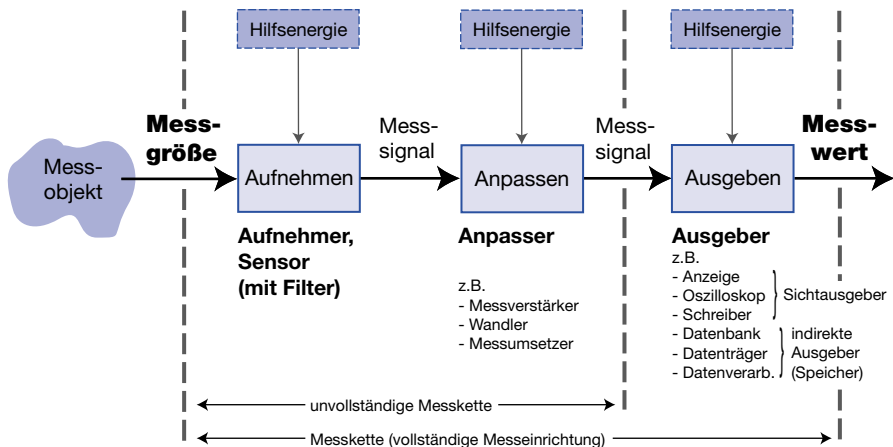


Bild 1.3 Das Prinzip einer Messkette im Signalflussplan

- ❑ Aktive Aufnehmer:
 - Sie entnehmen die Leistung des Messsignals dem Messobjekt
 - (z.B. Thermoelement).
- ❑ Passive Aufnehmer:
 - Die Messgröße steuert einen Hilfsenergiestrom, um die Leistung zu gewinnen
 - (z.B. Drosselklappe als Winkelaufnehmer).

Anpasser

Der **Anpasser** hat die Aufgabe, durch Umformung, Wandlung usw. des vom Aufnehmer gelieferten Messsignals, in ein leistungsfähiges Signal zur Bildung eines Messwertes im nachgeschalteten Ausgabegerät zu erzeugen.

Messverstärker

Die Energie des Eingangssignals steuert einen Hilfsenergiestrom so, dass ein leistungsverstärktes Ausgangsmesssignal erzeugt wird.

Messumformer

Er formt ein analoges Signal in ein eindeutig damit zusammenhängendes Signal um (z.B. Faltenbalg als Druck-Kraft-Aufnehmer)

Messwandler

Haben Eingangs- und Ausgangssignal bei einem Messumformer gleiche physikalische Natur und arbeitet der Messumformer ohne Hilfsenergie, so spricht man von einem Messwandler:

- Hebel als Kraftverstärker,
- Getriebe als Drehmomentwandler,
- Transformator als Spannungswandler.

Ausgeber

Vom letzten Anpasser einer Messkette gelangt das Ausgangssignal auf den **Ausgeber**. Dieser hat die Aufgabe, den von der Messeinrichtung gebildeten **Messwert** entweder direkt (als Sichtgeber)

- Drehspulanzeige
- Oszilloskop
- Digitalanzeiger
- Signallampen,
- usw.

oder indirekt als

- Datenbank,
- Datenspeicher (Festplatte),
- usw.

auszugeben.

1.4.1 Messkette

Eine Messkette kann in unterschiedlicher Weise dargestellt werden. Die Darstellung als Signalfussplan ist die abstrakteste Darstellung, die eine unmittelbare ma-

thematische Behandlung erlaubt.

Der **Signalflussplan** besteht aus **Signalübertragungsblöcken**, die einen linearen oder nichtlinearen funktionalen Zusammenhang beschreiben.

Darüber hinaus, insbesondere bei zeitlich veränderlichen Signalen, wird das Übertragungsverhalten z.B. mit Hilfe von Differentialgleichungen (Bild 1.4) beschrieben.

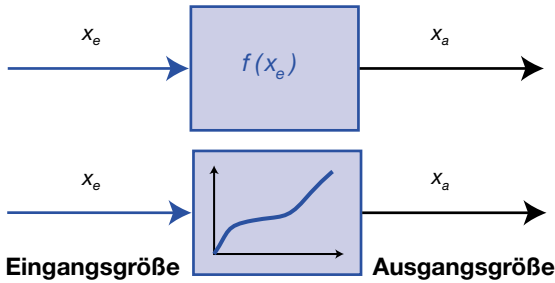


Bild 1.4 Signalblock

Die Ausgangsgröße ist

$$x_a = f(x_e) \quad (\text{Gl. 1.10})$$

2 Beispiele sollen das erläutern.



Beispiel 1

Messkette eines Druckaufnehmers

In Bild 1.5 ist das Messprinzip eines einfachen Druckaufnehmers wiedergegeben.

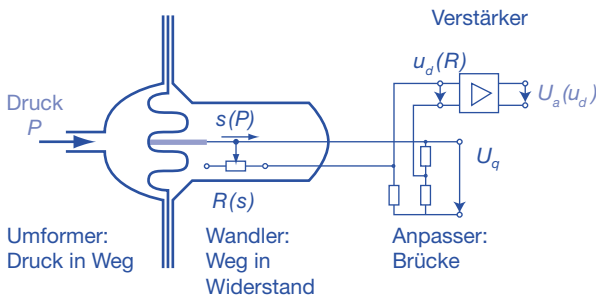


Bild 1.5 Prinzipskizze eines Druckaufnehmers

Die (unvollständige) Messkette des Druckaufnehmers ist in Bild 1.6 gezeigt.

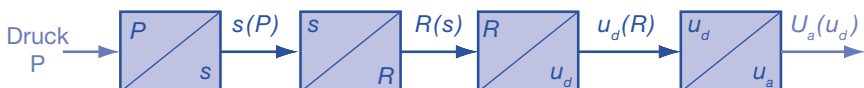


Bild 1.6 Signalflussplan der unvollständigen Messkette

Beispiel 2

Oberflächen-Messeinrichtung

Es soll eine Oberflächen-Messeinrichtung konzipiert werden, die Unebenheiten einer gehobelten Oberfläche nach Lage und Größe bestimmt. Dabei ist die **Messgröße** = örtliche Längenabweichung in z-Richtung, die die Oberfläche an einem Punkt gegenüber einer Fläche aufweist, die im Abstand von der ebenen Werkstückauflage als Bezugsfläche entsteht:

$$s_z(x, y) = L_z(x, y) - L_0 \quad (\text{Gl. 1.11})$$

Messbereiche: In der Praxis liegen die Maximalwerte $|s_z|_{\max}$ beim Feinstlappen und Polieren im Bereich $0,05 \text{ mm} \pm 0,1 \text{ } \mu\text{m}$, beim Drehen, Fräsen, und Hobeln bei $1 \text{ mm} \pm 50 \text{ } \mu\text{m}$.

Wahl des Aufnehmers: Messschieber und Mikrometerschraube sind für diese Aufgabe denkbar ungeeignet, da damit keine Relativmessung mit automatischer Registrierung der Messwerte möglich ist. Deshalb soll hier ein elektrischer Wegaufnehmer eingesetzt werden, da er vorschubproportional registrieren kann. Bei einem elektrischen Wegaufnehmer führen die Stiftverlagerungen, die einen Eisenkern aus der Mittelstellung zwischen zwei Magnetspulen verschieben, zu gegensinnigen Induktivitätsänderungen. Hierbei handelt es sich um einen „passiven Aufnehmer“, weil die Induktivitäten erst gemessen werden können, wenn sie mit elektrischer Hilfsenergie (Spannung) aus einem Hilfsgerät („Oszillator“) gespeist werden. An der Mittelanzapfung der Induktivitäten kann eine Spannung u_z als Messsignal abgegriffen werden.

1. Anpasser: Nullabgleich

Um in der nachfolgenden Messschaltung nur die Messgröße „Lageabweichung s_z “ zu erfassen, ist mittels Nullabgleich dafür zu sorgen, dass das mittels einer Einstellmöglichkeit auf null abgeglichen wird. Zu diesem Zweck wird der Aufnehmer parallel zu einem Potentiometer geschaltet. Der Abgriff wird so lange verschoben, bis er dieselbe Spannung u_0 liefert wie der Mittelabgriff des auf L_0 stehenden Tasters:

$$u_{z_0} - u_0 = 0 \quad (\text{Gl. 1.12})$$

Als Messsignal liefert sie dann bei Höhenänderungen des Tasters die dazu proportionale Spannung

$$u_m = u_z - u_0 \quad (\text{Gl. 1.13})$$

2. Anpasser: Messverstärker

Die Messspannung u_m ist viel zu klein, um direkt mit dem X-Y-Schreiber aufgezeichnet zu werden. Deshalb wird sie mit einem Messverstärker verstärkt, der von einem Hilfsgerät mit Spannung versorgt werden muss.

3. Anpasser: Gleichrichter

Die Induktivitäten müssen mit Wechselspannung gespeist werden, der X-Y-Schreiber benötigt aber eine Gleichspannung. Deshalb muss die verstärkende Messspannung u_m zuvor gleichgerichtet werden. Dieses Gleichrichten hat phasenempfindlich zu erfolgen, damit positive und negative Höhenänderungen unterschieden werden können.