

Andreas Hebestreit

# Aufgabensammlung Mess- und Sensortechnik



2., aktualisierte Auflage

HANSER



## Aufgabensammlung Mess- und Sensortechnik



### Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial.

Geben Sie auf **plus.hanser-fachbuch.de** einfach diesen Code ein:

plus-j2s9w-0zr1b



### Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**



Andreas Hebestreit

# Aufgabensammlung Mess- und Sensortechnik

2., aktualisierte Auflage

HANSER

## Der Autor:

Prof. Dr.-Ing. Andreas Hebestreit, HTWK Leipzig



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag München

Internet: [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelbild: © shutterstock/Sergey Ryzhov

Satz: Eberl & Koesel Studio, Kempten

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47870-1

E-Book-ISBN 978-3-446-47877-0

# Vorwort

*Für Evi, Felix und Ali*

Das Buch richtet sich an Studierende der Fachrichtungen Elektrotechnik, Informationstechnik, Feinwerktechnik, Maschinenbau, Verfahrenstechnik, Systemtechnik und Physikalische Technik, die ihr Wissen auf dem Gebiet der Mess- und Sensortechnik festigen und anwenden möchten.

Im Teil I ist der Schwierigkeitsgrad niedrig. Dieser richtet sich an Anfänger (Studierende im Grundstudium). Teil II ist für Fortgeschrittene (Studierende im Hauptstudium). Auf *plus.hanser-fachbuch.de* finden Sie weitere Aufgaben und Lösungen, die einen noch höheren Schwierigkeitsgrad aufweisen, sowie ein deutsch-englisches Dictionary der wichtigsten Fachbegriffe der Mess- und Sensortechnik. Den Zugangscode finden Sie auf der ersten Seite des Buchs.

Wie jeder weiß, kennt die berufliche Praxis keine Aufgaben im Sinne von gegeben und gesucht. In der Ingenieurpraxis sind nie genau die Werte „gegeben“, die zur Problemlösung benötigt werden. Um der beruflichen Praxis zumindest nahe zu kommen, sind bei manchen Aufgaben Werte gegeben, die für die Lösung nicht erforderlich sind, während bei anderen Aufgaben Zahlenwerte fehlen.

Für Leserhinweise bin ich dankbar.

Leipzig, im März 2023

*Andreas Hebestreit*



# Inhalt

<b>Teil I: Anfänger</b> .....	11
<b>1 Grundlagen</b> .....	12
1.1 Einführung .....	12
1.2 Fragen und Aufgaben .....	12
<b>2 Statische Eigenschaften</b> .....	15
2.1 Einführung .....	15
2.2 Fragen und Aufgaben .....	15
<b>3 Dynamische Eigenschaften</b> .....	20
3.1 Einführung .....	20
3.2 Fragen und Aufgaben .....	20
<b>4 Digitale Messtechnik</b> .....	31
4.1 Einführung .....	31
4.2 Fragen und Aufgaben .....	31
<b>5 Elektrische Größen</b> .....	36
5.1 Einführung .....	36
5.2 Fragen und Aufgaben .....	36
<b>6 Nichtelektrische Größen</b> .....	46
6.1 Einführung .....	46
6.2 Fragen und Aufgaben .....	46
<b>7 Verschiedenes</b> .....	51
7.1 Einführung .....	51
7.2 Fragen und Aufgaben .....	51

---

<b>Teil II: Fortgeschrittene</b> .....	55
<b>8 Signalverarbeitung im Zeitbereich</b> .....	56
8.1 Einführung .....	56
8.2 Fragen und Aufgaben .....	57
<b>9 Spektralanalyse</b> .....	63
9.1 Einführung .....	63
9.2 Fragen und Aufgaben .....	63
<b>10 Ausgewählte Messgrößen der Fertigungstechnik</b> .....	68
10.1 Einführung .....	68
10.2 Fragen und Aufgaben .....	68
<b>11 Prozessmesstechnik und ausgewählte Messgrößen</b> .....	80
11.1 Einführung .....	80
11.2 Fragen und Aufgaben .....	80
<b>12 Versuch und Erprobung</b> .....	93
12.1 Einführung .....	93
12.2 Fragen und Aufgaben .....	93
<b>13 Verschiedenes</b> .....	97
13.1 Einführung .....	97
13.2 Fragen und Aufgaben .....	97
<b>Teil III: Lösungen</b> .....	99
<b>14 Antworten, Lösungen, Erläuterungen</b> .....	100
14.1 Kapitel 1: Grundlagen .....	100
14.2 Kapitel 2: Statische Eigenschaften .....	106
14.3 Kapitel 3: Dynamische Eigenschaften .....	116
14.4 Kapitel 4: Digitale Messtechnik .....	149
14.5 Kapitel 5: Elektrische Größen .....	159
14.6 Kapitel 6: Nichtelektrische Größen .....	183
14.7 Kapitel 7: Verschiedenes .....	199
14.8 Kapitel 8: Signalverarbeitung im Zeitbereich .....	204
14.9 Kapitel 9: Spektralanalyse .....	218
14.10 Kapitel 10: Ausgewählte Messgrößen der Fertigungstechnik .....	226
14.11 Kapitel 11: Prozessmesstechnik und ausgewählte Messgrößen .....	256

---

14.12 Kapitel 12: Versuch und Erprobung .....	294
14.13 Kapitel 13: Verschiedenes .....	304
<b>Glossar</b> .....	307
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	321
<b>Index</b> .....	323

**Inhalte auf *plus.hanser-fachbuch.de***

- 60 Seiten Aufgaben und Lösungen mit einem noch höheren Schwierigkeitsgrad
- deutsch-englisches Dictionary der wichtigsten Fachbegriffe der Mess- und Sensortechnik



# Teil I

Anfänger

# 1

## Grundlagen

Gegenstand dieses Kapitels sind vor allem die Grundbegriffe der Messtechnik, die in allen Bereichen von großer Bedeutung sind.

### ■ 1.1 Einführung

Es ist in der Praxis von großer Wichtigkeit, dass metrologische Begriffe einheitlich verstanden und angewandt werden. Dies gilt unabhängig davon, ob die Messgröße elektrischer oder nichtelektrischer Natur ist, ob diese mit elektrischen oder mit nichtelektrischen Mitteln erfasst wird, ob die Messung analog oder digital erfolgt, ob in der Industrie oder im Forschungslabor gemessen wird, ob sich die Messstelle in der Stückgutfertigung oder in einer verfahrenstechnischen Anlage befindet, ob die Messung der Qualitätssicherung oder der Gefahrenabwehr dient. Entwickler, Planer, Forscher, QM-Beauftragte, Inbetriebnahme-, Produktions- und Vertriebsingenieure müssen die messtechnische Terminologie richtig anwenden können, um einander zu verstehen. Wichtigen Grundbegriffen und Grundlagen der Messtechnik sind deshalb nachfolgende Fragen und Aufgaben gewidmet. Antworten, Lösungen und erläuternde Hinweise sind in Kapitel 14 zu finden.

### ■ 1.2 Fragen und Aufgaben

1. Die statische Kennlinie eines Messgerätes wird aufgenommen. Mit welchem Begriff bezeichnet man diesen Vorgang in der Metrologie? Erläutern Sie die Bedeutung!
2. Wozu benötigt man ein Normal?
3. Wie lange ist eine Kalibrierung gültig?
4. Was unterscheidet das Eichen vom Kalibrieren?
5. Wann ist eine Eichung erforderlich?
6. Was unterscheidet das Justieren vom Kalibrieren?

7. Warum ist es nicht möglich, durch beliebig viele Wiederholmessungen die Unsicherheit eines Messergebnisses beliebig zu verringern?
8. Welche Messabweichungen werden durch eine Justierung beeinflusst?
9. Für Sensoren eines bestimmten Typs ist im Datenblatt angegeben: Empfindlichkeitstoleranz 1 %. Dennoch können Sie mit einem solchen Sensor Messunsicherheiten besser 0,1 % erzielen. Wie ist das möglich?
10. Warum ist die Bezeichnung Autokalibrierung für Systeme, die sich selbst nachjustieren, unkorrekt?
11. Was versteht man unter dem „Anschluss von Messgeräten“?
12. Wann sind Kalibrierungen rückführbar?
13. Welche Messergebnisse sind rückführbar?
14. Wie lautet Name und Abkürzung des nationalen metrologischen Instituts in Deutschland?
15. Von einer Messeinrichtung ist bekannt, dass diese eine unzulängliche Langzeitstabilität aufweist. Was ist zu tun, wenn diese Messeinrichtung verwendet wird, um die Qualität von Produkten nach DIN ISO 9001 zu sichern?
16. Welche Größe ist am genauesten und am einfachsten messbar und wie haben sich Messgerätehersteller darauf eingestellt?
17. Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist eine Naturkonstante und wird mit 9 Ziffern exakt ohne jede Unsicherheit (!) angegeben. Hat man die Lichtgeschwindigkeit ohne jede Abweichung gemessen?
18. Die PTB gibt für ihre Normalzeit eine Unsicherheit von  $1,5 \cdot 10^{-14}$  an. Welche Zeit muss verstreichen, bis die absolute Unsicherheit eine Sekunde beträgt?
19. Wodurch ist ein frequenzanaloges Messsignal gekennzeichnet? Nennen Sie ein Beispiel!
20. Wofür dienen statische Kenngrößen?
21. Wofür dienen dynamische Kenngrößen?
22. Woraus bestehen eine Wheatstonesche Viertel-, eine Halb- und eine Vollbrücke?
23. Zeichnen Sie die statischen Kennlinien der Wheatstoneschen Voll-, Halb- und Viertelbrücke und diskutieren Sie diese!
24. Geben Sie die üblicherweise verwendeten Brückengleichungen für die Voll-, Halb- und Viertelbrücke an!
25. Erläutern Sie den Begriff Messprinzip an einem Beispiel!
26. Was sind wichtige elektrische Einheitssignale und in welchen Bereichen liegen deren Hauptanwendungen?
27. Was versteht man unter „eingepprägter Spannung“?
28. Was versteht man unter „eingepprägtem Strom“?
29. Was ist die Voraussetzung für eine eingepprägte Spannung?
30. Was ist die Voraussetzung für einen eingepprägten Strom?
31. Was ist ein live-zero-Signal und worin liegt dessen Vorteil?

32. Warum unterscheidet man zufällige und systematische Messabweichungen?
33. Was sagt die Unsicherheit eines Messergebnisses aus? Geben Sie ein Beispiel!
34. Was versteht man unter einfacher und was unter erweiterter Messunsicherheit?
35. Worin besteht das Wesen der Ausschlagmethode, das der Differenzmethode und das der Kompensationsmethode?
36. Ein Widerstand wird mit der Ausschlagmethode gemessen. Eine Konstantstromquelle prägt hierzu einen Strom von 1 mA in diesen ein. Der Spannungsabfall am Widerstand verhält sich proportional zu diesem und wird mit einem Voltmeter erfasst. Wie groß ist die Messabweichung, wenn die Unsicherheit des Konstantstromes 0,5% beträgt?
37. Ein Widerstand wird mit der Ausschlagmethode gemessen. Eine Konstantstromquelle prägt hierzu einen Strom von 1 mA in diesen ein. Der Spannungsabfall am Widerstand verhält sich proportional zu diesem und wird mit einem analogen Voltmeter (Messbereich 5 V, Fehlerklasse 2) erfasst (Messwert 2,8 V). Geben Sie den Widerstandswert und die Unsicherheit absolut und relativ an, die infolge der Ungenauigkeit des Voltmeters auftreten!
38. Warum können mit der Wheatstone-Brücke kleinste Widerstandsänderungen gemessen werden?
39. Wie kann man mit einer Wheatstone-Brücke die Wirkung von Einflussgrößen auf den Messwert unterdrücken?
40. Was ist bezüglich der Speisespannung einer Wheatstone-Brücke zu beachten, wenn die beiden darin befindlichen messgrößenempfindlichen Elemente kapazitiv oder induktiv sind?
41. Was ist erforderlich, damit bei Wechselspannungsspeisung einer Wheatstone-Brücke, die Vorzeicheninformation erhalten bleibt?
42. Was ist der Informationsparameter des Ausgangssignals eines induktiven inkrementellen Drehzahlsensors?
43. Welche Parameter einer Rechteckspannung können Informationsparameter sein?
44. Was ist der Informationsparameter des Ausgangssignals eines Widerstandsthermometers?

# 2

## Statische Eigenschaften

Unter den statischen Eigenschaften werden jene verstanden, die das Verhalten einer Messeinrichtung für den Fall beschreiben, dass die Messgröße konstant ist und sich das Ausgangssignal eingeschwungen hat, das heißt ebenfalls einen konstanten Wert angenommen hat.

### ■ 2.1 Einführung

Alle Arten von Messgeräten, beginnend von einfachen Sensoren bis hin zu vielkanaligen Messwerterfassungssystemen, werden u. a. anhand der statischen Eigenschaften charakterisiert. Diese sind im Datenblatt zu finden. Um das geeignete Messgerät auszuwählen, muss man imstande sein, die Angaben im Datenblatt interpretieren zu können. Zu den statischen Eigenschaften gehören unter vielen anderen der Messbereich, die Empfindlichkeit, der Temperatureinflusskoeffizient und die Linearitätsabweichung. In den nachfolgenden Fragen und Aufgaben spielen statische Kenngrößen sowie die statische Kennlinie eine wesentliche Rolle.

Von Studierenden wird oft fälschlicherweise angenommen, dass statische Kenngrößen das Adjektiv „statisch“ tragen, weil sie konstant im Sinne von zeitinvariant sind. Das hat nichts miteinander zu tun!

### ■ 2.2 Fragen und Aufgaben

1. Was beschreiben statische Kenngrößen?
2. Nennen Sie mindestens drei statische Kenngrößen!
3. Was ist die korrekte Bezeichnung der statischen Kennfunktion von Messeinrichtungen?
4. Zeichnen Sie die statische Kennlinie eines Messsystems, dessen Empfindlichkeit vom Wert der Eingangsgröße abhängt!

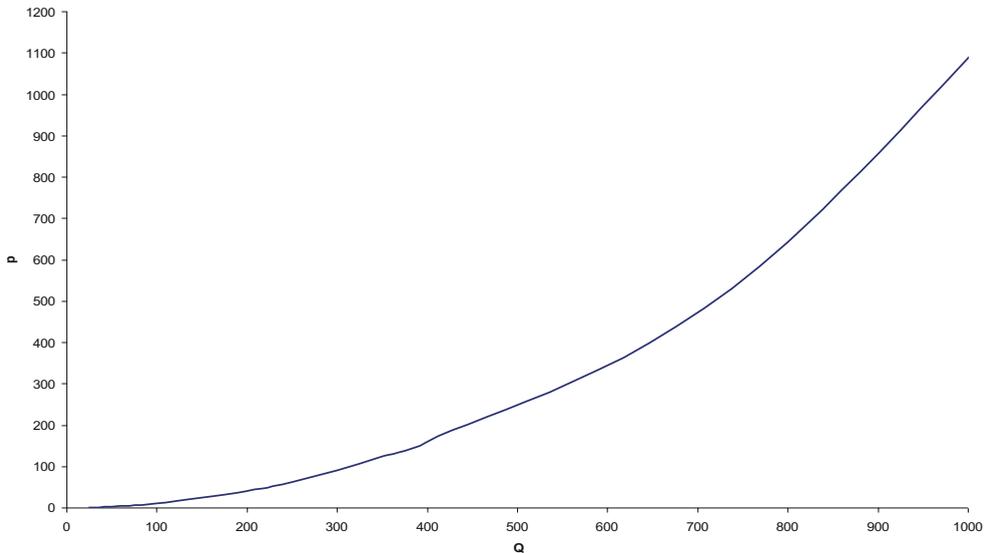
5. Worin unterscheiden sich additive von multiplikativen Fehlern? Nennen Sie je ein Beispiel!
6. Warum sind additive Fehler gefährlicher als multiplikative?
7. Mit welchen Parametern werden quantitativ eine Parallelverschiebung und eine Anstiegsänderung der statischen Kennlinie infolge Temperaturänderung beschrieben?
8. Ein Messsignal soll mit einem ADU (Messbereich von 0 bis 10 V) digitalisiert werden. Der Linearitätsfehler darf 10 mV nicht überschreiten. Geben Sie die zulässige Linearitätsabweichung (Bezugsgerade durch Anfangs- und Endpunkt) des ADU in Prozent an!
9. Was sagt die Auflösung eines Messgeräts über den Wahrheitsgehalt des Messergebnisses aus?
10. Welche praktische Bedeutung hat die relative Abweichung?
11. Berechnen Sie die Empfindlichkeit eines Spannungs-Strom-Wandlers, von dem folgender Zusammenhang zwischen Ein- u. Ausgangsgrößen bekannt ist:

Eingangsspannung in V	-10	10
Ausgangsstrom in mA	4	20

Zeichnen Sie die statische Kennlinie! Geben Sie eine Gleichung für diese an!

12. Die statische Kennlinie eines fiktiven Temperatursensors mit Spannungsausgang wird durch folgende Gleichung beschrieben:  $U = f(T) = T^2 \cdot 0,001 \text{ mV/K}^2$ . Zeichnen Sie die statische Kennlinie für den Temperaturbereich von 200 bis 400 K! Berechnen Sie hierfür fünf Stützstellen. Berechnen Sie die Empfindlichkeit für eine Temperatur von 300 K mit Hilfe der Infinitesimalrechnung!
13. Ein resistiver Sensor (dessen Widerstand  $R_s$  verhält sich proportional zur Messgröße  $x$ ) wird in Reihe zu einem Widerstand  $R_v = 500 \Omega$  an eine konstante Spannung  $U_0 = 5 \text{ V}$  angeschlossen. Auf diese Weise wird der Widerstand  $R_s$  in eine Spannung  $U_s$  umgewandelt (R/U-Wandlung), die über dem Sensor abfällt. Worin besteht der Nachteil gegenüber einem Konstantstrom, der den Widerstand gemäß des Ohmschen Gesetzes in eine Spannung umwandelt? Geben Sie die Funktion  $U_s = f(R_s)$  als Gleichung an! Zeichnen Sie die statische Kennlinie dieses R/U-Wandlers für den Wertebereich 0 bis 1000  $\Omega$ ! Falls  $R_s$  nur Werte annehmen würde, die kaum von 500  $\Omega$  abweichen; welche lineare Gleichung könnte man verwenden, um die Abhängigkeit der Ausgangsspannung vom Sensorwiderstand  $R_s$  zu beschreiben?

14. Dargestellt ist die statische Kennlinie eines Wirkdruckgebers.



**Bild 2.1** Nichtlineare Kennlinie eines Wirkdruckgebers

Dessen Ausgangssignal (Differenzdruck  $p$ ) ist quadratisch vom Durchfluss  $Q$  abhängig. Ein Differenzdruckmessumformer mit linearer Kennlinie wandelt das Drucksignal proportional in eine Spannung um. Damit ein nachfolgendes Digitaldisplay den Durchfluss ziffernrichtig anzeigen kann, ist dem Display ein Spannungswandler mit gekrümmter Kennlinie vorzuschalten. Zeichnen Sie die statische Kennlinie des Spannungswandlers!

15. Von einem Widerstandsthermometer sind Nullpunkt ( $R_0 = 100 \Omega$  bei  $0^\circ\text{C}$ ) und Empfindlichkeit ( $\Delta R/R_0 = 0,004 \text{ K}^{-1}$ ) bekannt. An dieses wird ein zweiadriges Messkabel (jede Ader hat  $5 \Omega$ ) angeschlossen. Geben Sie die Veränderung der Empfindlichkeit (in %) mit Vorzeichen an!

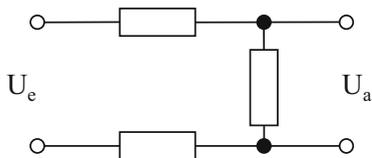
Entsteht durch den Zuleitungswiderstand eine Messabweichung?

16. Ein Flüssigkeitsausdehnungsthermometer kann folgende Imperfektionen aufweisen:

- Röhrchen zu weit oben an der Skala befestigt
- Innendurchmesser des Röhrchens ist über der Länge nicht konstant
- Innendurchmesser des Röhrchens ist zu groß

Welche Auswirkungen auf die statische Kennlinie erwachsen daraus? Begründen Sie Ihre Antworten und benutzen Sie dabei die Begriffe Empfindlichkeitsabweichung, Nullpunktabweichung und Linearitätsabweichung!

17. Die im Bild dargestellte Spannungsteilerschaltung ist Teil eines Messgeräts.

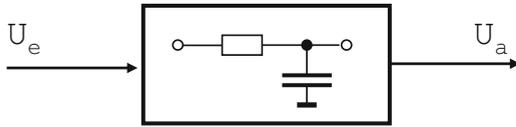


**Bild 2.2**

Spannungsteiler bestehend aus drei Widerständen

- Alle Widerstände betragen  $100\ \Omega$  und haben einen Temperaturkoeffizienten von  $0,01\ 1/K$ . Leiten Sie eine Gleichung für die statische Kennlinie her! Geben Sie den Temperaturkoeffizienten des Nullpunkts und den der Empfindlichkeit an!
18. Ein Druckmessumformer wurde bei  $20\ ^\circ\text{C}$  so justiert, dass dieser Drücke von 0 bis 100 bar in Spannungen von 0 bis 10 V umwandelt. Bekannt sind aus dem Datenblatt dessen Maximalwerte der Temperaturkoeffizienten für den Nullpunkt und für die Empfindlichkeit, die beide  $\pm 0,5\%/10\ \text{K}$  betragen. Zeichnen Sie die statische Kennlinie des Messumformers für  $20\ ^\circ\text{C}$  sowie die möglichen Extremfälle für eine Temperatur von  $100\ ^\circ\text{C}$ !
19. Ein Einheitsspannungssignal (0 bis 10 V) soll in ein Einheitsstromsignal (4 bis 20 mA) gewandelt werden. Wo muss der Nullpunkt (Offset) liegen und welche Empfindlichkeit muss der Spannungs-Strom-Wandler haben?
20. Die statische Kennlinie eines Temperatur-Messumformers ist linear. Bei  $0\ ^\circ\text{C}$  prägt dieser 4 mA und bei  $100\ ^\circ\text{C}$  prägt dieser 20 mA in die Stromschleife ein. Zeichnen Sie die statische Kennlinie einer angeschlossenen Digitalanzeige (Stromeingang), die ziffernrichtig die Temperatur in  $^\circ\text{C}$  anzeigt. Geben Sie auch die Gleichung für die Kennlinie der Digitalanzeige an!
21. Ein Messsystem wandelt Abstände von 0 bis 100 mm in Spannungen von 0 bis 10 V. Die statische Kennlinie ist linear und weist bei  $20\ ^\circ\text{C}$  keine Abweichungen auf. Außerdem sind die Temperaturkoeffizienten des Systems mit Betrag und Vorzeichen bekannt:  $\text{TKN} = +2\%/10\ \text{K}$ ,  $\text{TKE} = -4\%/10\ \text{K}$ . Diese sind ungewöhnlich groß und wurden mittels Temperaturprüfschrank experimentell bestimmt. Zeichnen Sie die statischen Kennlinien für die Temperaturen von  $20\ ^\circ\text{C}$  und  $70\ ^\circ\text{C}$ !
22. Ein Druckmessumformer (0 ... 6 bar entsprechen 0 ... 10 V) soll an ein DVM (Messbereich = 20 V,  $R_i = 1\ \mu\Omega$ ) angeschlossen werden. Der Druck soll vom DVM ziffernrichtig angezeigt werden. Zeichnen Sie den Schaltplan einer geeigneten passiven Anpassschaltung! Geben Sie Werte für die Bauelemente an!
23. Das Tachometer eines PKW darf nicht zu wenig anzeigen. Es darf aber 4 km/h und zusätzlich 10% der Istgeschwindigkeit zuviel anzeigen. Zeichnen Sie die ideale statische Kennlinie sowie die Kennlinie mit der größten noch erlaubten Messabweichung in ein Diagramm (Messbereich 240 km/h)! Geben Sie die maximal erlaubte Messabweichung (absolut und relativ) für eine Geschwindigkeit von 130 km/h an!
24. Ihre Messkette besteht aus Sensor, Messverstärker, ADU und PC. Nennen Sie wichtige Eigenschaften der einzelnen Glieder, welche für das Auftreten von statischen Messabweichungen relevant sind!

25. Wie sieht die statische Kennlinie des abgebildeten RC-Glieds im Eingangsbereich von -10 V bis +10 V aus?



**Bild 2.3**  
RC-Glied

# 3

## Dynamische Eigenschaften

Dynamische Eigenschaften beschreiben das Verhalten einer Messeinrichtung für den Fall, dass die Messgröße veränderlich ist. Diese Eigenschaften sind insbesondere dann von Bedeutung, wenn die Messgröße soeben erst zugeschaltet bzw. an den Eingang des Messgerätes angelegt wurde, oder für den Fall, dass sich die Messgröße so schnell ändert, dass die Messeinrichtung diesen Änderungen nicht leicht folgen kann.

### ■ 3.1 Einführung

Immer dann, wenn ein Messergebnis schnell gewonnen werden muss oder im Messsignal hohe Frequenzen enthalten sind, kommt es auf die dynamischen Eigenschaften der Messkette an. Wichtige dynamische Eigenschaften (z. B. Einschwingzeit oder Bandbreite) sind im Datenblatt angegeben und für die Konfigurierung der Messeinrichtung von essentieller Bedeutung. Der Anwender muss sich der Bedeutung dynamischer Kenngrößen bewusst sein, sobald die Messgröße nicht konstant ist. Es ist zudem offenkundig, dass viele Messgrößen zeitvariant sind – man denke z. B. an die Geschwindigkeit eines Autos. Nachfolgende Fragen und Aufgaben setzen sich mit dynamischen Kenngrößen und Kennfunktionen auseinander. Bei einigen Aufgaben treten diese Kenngrößen und -funktionen nur hintergründig auf.

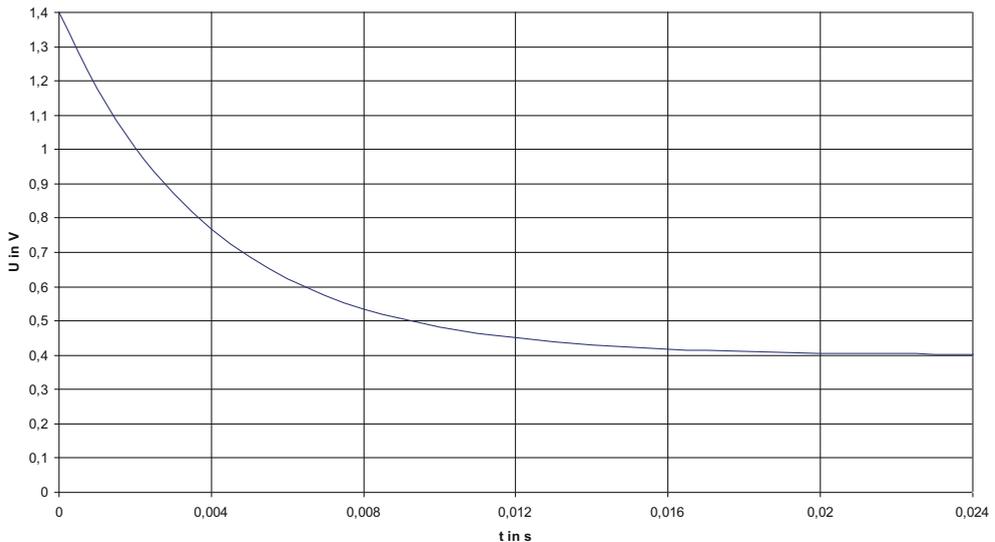
Von Studierenden wird oft fälschlicherweise angenommen, dass dynamische Kenngrößen das Adjektiv „dynamisch“ tragen, weil sie variabel sind. Das stimmt nicht! Dynamische Kenngrößen sind meist ebenso zeitinvariant wie statische.

### ■ 3.2 Fragen und Aufgaben

1. Nennen Sie vier Kenngrößen und Kennfunktionen, welche die dynamischen Eigenschaften von Messeinrichtungen beschreiben!
2. In welchem Zusammenhang stehen Frequenzgang und Übertragungsfunktion?

3. Geben Sie die Formeln an, mit denen aus der Übertragungsfunktion der Amplitudengang und der Phasengang berechnet werden kann!
4. Was beschreibt der Amplitudengang?
5. Ist die Frequenz des Ausgangssignals mit der Frequenz des Eingangssignals identisch?
6. Nennen Sie ein praktisches Beispiel für die Entstehung nichtlinearer Verzerrungen aus dem Bereich Audiotechnik?
7. Was beschreibt der Phasengang?
8. Ein Sensor mit  $PT_1$ -Verhalten hat eine Empfindlichkeit von einem mV/K und eine Zeitkonstante von 0,5 s. Das Messsignal am Eingang springt von 20 °C auf 100 °C. Um wie viel mV hat sich das Ausgangssignal nach 1 s geändert?
9. Unter welchen Umständen ist die obere Grenzfrequenz von Bedeutung?
10. Unter welchen Umständen entstehen dynamische Messabweichungen?
11. Das zu messende Signal enthält Frequenzanteile, die nur ein klein wenig niedriger sind als die Grenzfrequenz der Messeinrichtung. Was bedeutet das für die messtechnische Praxis? Legen Sie bei der Beantwortung der Frage die allgemein übliche Konvention für die Grenzfrequenz zugrunde!
12. Das anliegende Signal enthält Frequenzanteile, die über der Grenzfrequenz Ihrer Messeinrichtung liegen. Was bedeutet das für die messtechnische Praxis?
13. Das Messsignal ist sinusförmig und hat eine Frequenz von 1500 Hz. Ihr DAQ-System zeichnet das Signal auf. Ein unbedarfter Kollege, hat dessen Filter verstellt, so dass die Grenzfrequenz nur 1 kHz beträgt. Kann man die Frequenz des Messsignals so ermitteln?
14. Im Messsignal sind Störungen (50 Hz Netzbrummen) enthalten. Diese sollen durch Zuschalten eines Tiefpasses (2. Ordnung, Grenzfrequenz 40 Hz) „weggefiltert“ werden. Wie beurteilen Sie die Erfolgsaussichten?
15. Was sollten Sie beachten, wenn Sie obere Grenzfrequenzen verschiedener Geräte untereinander vergleichen?
16. Woraus besteht der Frequenzgang?
17. Welche wichtige Kenngröße kann man aus dem Amplitudengang ablesen?
18. Skizzieren Sie den Frequenzgang eines  $T_1$ -Systems ( $R = 169 \Omega$ ,  $C = 4,7 \mu\text{F}$ )! Berechnen Sie die obere Grenzfrequenz und geben Sie diese in den Diagrammen an!
19. Welche Testfunktion benutzen Sie, um die Einschwingzeit zu ermitteln und welches Problem kann dabei in der experimentellen Praxis auftreten?
20. Was müssen Sie beachten, wenn Sie Einschwingzeiten von Messgeräten verschiedener Hersteller vergleichen?
21. Zeichnen Sie die Übergangsfunktion eines  $T_1$ -Systems ( $R = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $C = 5 \mu\text{F}$ )! Berechnen Sie die Zeitkonstante und die 95%-Einschwingzeit! Tragen Sie beide Systemparameter (Zeitkonstante und Einschwingzeit) in das Diagramm ein!
22. Welchen Zusammenhang gibt es zwischen Einschwingzeit und Grenzfrequenz?

23. Von einem Tiefpass 1. Ordnung haben Sie die Sprungantwort aufgenommen und aus dieser die 95 %-Einschwingzeit mit 0,3 s abgelesen. Wie groß ist die Grenzfrequenz?
24. In einem Messgerät wurde ein Tiefpassfilter aktiviert, um das Netzbrummen abzuschwächen. Es wurde eine Filterfrequenz von 20 Hz gewählt. Auf welchen Wert ist die Einschwingzeit gestiegen?
25. Sie haben den abgebildeten Verlauf des Ausgangssignals aufgenommen, indem Sie die Eingangsspannung sprunghaft von  $-2,8$  auf  $-0,8$  V erhöhten. Wie groß ist die Empfindlichkeit des Systems? Bestimmen Sie die Einschwingzeit für die 5% Toleranzgrenze.

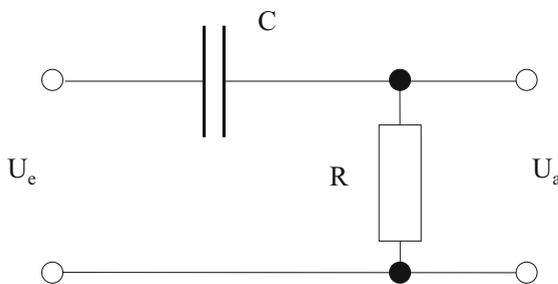


**Bild 3.1** Ausgangssignal (Sprungantwort)

26. Wie kann man die Zeitkonstante eines  $T_1$ -Glieds grafisch aus der Übergangsfunktion bestimmen?
27. Unter welchen Umständen sind dynamische Kenngrößen von Messeinrichtungen relevant?
28. Welche Testsignale kennen Sie? Worin liegt der praktische Nutzen?
29. Wie kann mit einem Voltmeter und einem Sinusspannungsgenerator der Amplitudengang eines Messverstärkers ermittelt werden?
30. Erläutern Sie, wie der Frequenzgang eines Messverstärkers experimentell aufgenommen werden kann!
31. Zeichnen Sie den Frequenzgang eines idealen Spannungsteilers, der aus zwei ohmschen Widerständen mit jeweils  $100\ \Omega$  besteht!
32. Wie groß ist die Zeitkonstante des RC-Tiefpasses bestehend aus  $R = 1\ \text{k}\Omega$  und  $C = 470\ \text{nF}$ ? Geben Sie die Sprungantwort für das Eingangssignal  $U_e(t \leq 0) = 0\ \text{V}$ ,  $U_e(t > 0) = 5\ \text{V}$  als Gleichung an und zeichnen Sie den Verlauf! Zeichnen Sie an die Sprungantwort eine Tangente im Zeitpunkt 0, so dass die Zeitkonstante grafisch erkennbar ist!

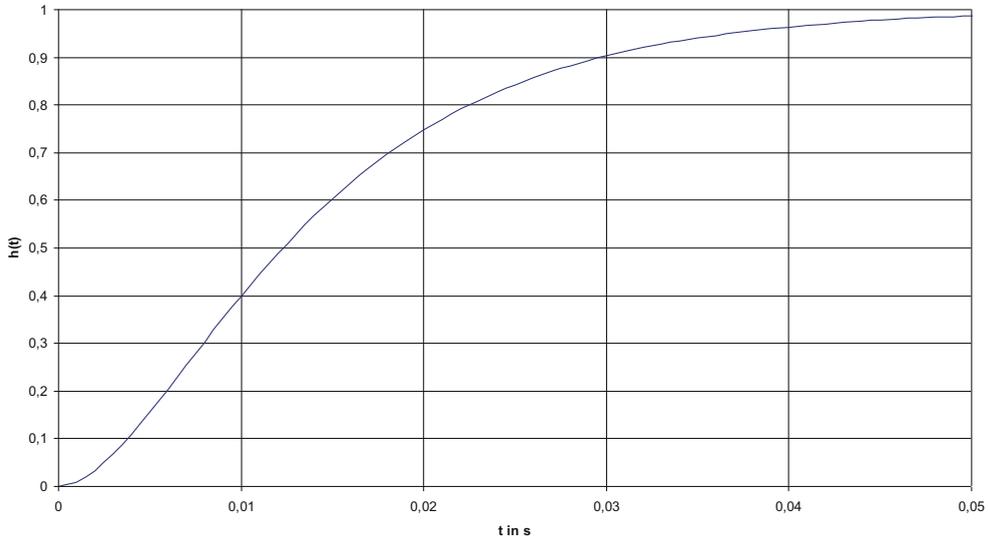
33. Legen Sie nun anstelle der Tangente durch den Nullpunkt eine Tangente im Zeitpunkt 0,5 ms an, so dass wiederum die Zeitkonstante ablesbar ist.
34. Ein Tiefpassfilter 1. Ordnung hat eine 95%-Einschwingzeit von 4 s. Stellen Sie den Amplitudengang logarithmisch über mindestens drei Dekaden im Sperrbereich dar! Lesen Sie aus dem Amplitudengang ab, wie stark Frequenzen von 100 Hz unterdrückt werden!
35. Von einem System ist bekannt, dass dessen Ausgangssignal bei einer Frequenz von 10 Hz um  $180^\circ$  gegenüber dem Eingangssignal in der Phase verschoben ist. Wie groß ist die Phasenlaufzeit?
36. Das Eingangssignal eines Messsystems ändert sich mit Frequenzen, die auch die obere Grenzfrequenz des Systems erreichen. Erläutern Sie die Konsequenzen für die MSR-Praxis!
37. Wann ist die Phasenverschiebung von Messsignalen von Bedeutung?
38. Ihre Messkette besteht aus Sensor, Messverstärker und ADU. Welche Eigenschaften müssen die einzelnen Übertragungsglieder haben, damit auch schnelle Messgrößenänderungen erfasst werden können?
39. Geben Sie eine Näherungsgleichung für die Umrechnung der oberen Grenzfrequenz in die Einschwingzeit an! Was ist bei deren Verwendung zu beachten?
40. Ein Messgerät verfügt über einen verstellbaren Tiefpassfilter. Dessen Frequenz wurde vom Bediener auf 0,1 Hz eingestellt, um das „Zappeln“ der Anzeige einzudämmen und so eine leichtere Ablesbarkeit zu erreichen. Wie lange dauert es, bis nach einer sprunghaften Änderung der Messgröße die dynamische Messabweichung kleiner als 5% ist?
41. Ihr Auftraggeber fordert von Ihnen, Druckspitzenwerte in einer Anlage zu messen. Vor Ort stehen Ihnen ein Oszilloskop und zwei Druckmessumformer mit Spannungsausgang zur Verfügung. In den technischen Daten ist für den Messumformer A angegeben: obere Grenzfrequenz 1 kHz (-3 dB). Für den Messumformer B ist angegeben: obere Grenzfrequenz 1 kHz (-1 dB). Welchen Messumformer benutzen Sie? Begründen Sie Ihre Antwort!
42. Von einer Messeinrichtung mit Tiefpassverhalten 1. Ordnung wurde die 95%-Einschwingzeit experimentell mit 0,6 s bestimmt. Berechnen Sie die Zeitkonstante in ms und die 3-dB-Grenzfrequenz in Hz!
43. Die obere Grenzfrequenz eines Messsystems beträgt 10 Hz (-3 dB). Der Wert der Messgröße springt von 3 auf 5 V. Wie lange dauert es, bis die Abweichung vom stationären Endwert nur noch 100 mV beträgt? Welchen Wert hat das Ausgangssignal des Messsystems, wenn man nach dem Sprung die 95%-Einschwingzeit abwartet?
44. Am Eingang eines Systems springt die Spannung von 3 V auf 5 V. Zeichnen Sie die Sprungantwort unter der Annahme, dass sich das System (95%-Einschwingzeit = 45 ms) wie ein Tiefpass 1. Ordnung verhält! Geben Sie die zu Zeitkonstante und Einschwingzeit gehörenden Spannungswerte an! Zeichnen Sie außerdem die Übergangsfunktion!

45. Ein Spannungs-Strom-Wandler (Versorgungsspannung 230 V) hat eine Zeitkonstante von 2 ms. Die statische Kennlinie geht durch den Nullpunkt. Die Empfindlichkeit beträgt 2 mA/V. Zeichnen Sie die Sprungantwort für eine Änderung der Messgröße von 2 auf 10 V. Welchen Wert hat das Messsignal 6 ms nach dem Sprung? Wie groß sollte der Eingangswiderstand des Wandlers sein? Wie groß sollte der Ausgangswiderstand des Wandlers sein? Begründen Sie die letzten beiden Antworten!
46. Wofür benutzen Messtechniker Tiefpässe?
47. Das Widerstandsthermometer eines Herstellers vom Typ Pt100 hat drei Zeitkonstanten mit den Werten 10 s, 0,8 s und 0,3 s. Es wird einem Temperatursprung von 0 auf 100 °C ausgesetzt. Zeichnen Sie die Sprungantwort (Widerstandssignal) unter vereinfachenden Annahmen! Schätzen Sie auf einfachstem Weg die Grenzfrequenz ab!
48. Zeichnen Sie den Frequenzgang eines Hochpasses (1. Ordnung, Grenzfrequenz 10 Hz)!
49. Wann ist es günstig, einen Hochpass zu verwenden? Beschreiben Sie einen Anwendungsfall!
50. Welche Sensoren weisen Hochpassverhalten auf? Was bedeutet das für die messtechnische Praxis?
51. Ein Spannungsteiler besteht aus zwei ohmschen Widerständen (je 1 kΩ). Wie groß sind Empfindlichkeit, Totzeit und Zeitkonstante?
52. Welche dynamischen Kenngrößen kann man direkt aus der Sprungantwort entnehmen?
53. Wie kann man die Zeitkonstante grafisch aus der Übergangsfunktion eines  $PT_1$ -Systems ermitteln?
54. Muss die Tangente im Nullpunkt angelegt werden, um aus der Übergangsfunktion die Zeitkonstante zu ermitteln?
55. Zeichnen Sie die Übergangsfunktion des dargestellten Systems (RC-Glied,  $RC = 0,1$  s).



**Bild 3.2**  
RC-Glied

56. Ein Sensor besitzt die dargestellte Übergangsfunktion. Für  $t = \infty$  ist  $h(t) = 1$ . Welches Übertragungsverhalten hat der Sensor?



**Bild 3.3** Übergangsfunktion eines Sensors

57. Welches Testsignal wird benutzt, um den Frequenzgang eines Systems aufzunehmen? Welcher Parameter des Testsignals wird dabei konstant gehalten und welcher wird verändert?
58. Am Eingang eines Messsystems liegt ein sinusförmiges Signal mit einer Frequenz von 1 kHz. Das Ausgangssignal ist um  $90^\circ$  gegenüber dem Eingangssignal in der Phase verschoben. Berechnen Sie die Phasenlaufzeit!
59. Über ein Messgerät ist bekannt: obere Grenzfrequenz = 10 kHz (-1 dB) bzw. = 15 kHz (-3 dB). Geben Sie die Einschwingzeit des Geräts in  $\mu\text{s}$  an! Wie groß ist die dynamische Messabweichung in Prozent, wenn die Frequenz des Eingangssignals 10 kHz und wenn die Frequenz des Eingangssignals 15 kHz beträgt? Welchen Charakter haben diese Messabweichungen?
60. Geben Sie eine Gleichung für das Ausgangssignal eines Messgeräts an. Bekannt sind: untere Grenzfrequenz = 0 Hz, obere Grenzfrequenz = 1 kHz (-1 dB) bzw. = 1,5 kHz (-3 dB), Empfindlichkeit = 100. Das Eingangssignal hat den Verlauf

$$U(t) = 1 \text{ mV} + 1 \text{ mV} \cdot \sin(2\pi \cdot 1 \text{ kHz} \cdot t).$$

61. Die obere Grenzfrequenz eines Messsystems mit  $T_1$ -Verhalten beträgt 20 Hz (-3 dB). Der Wert der Messgröße springt von 10 auf 12 V. Wie lange dauert es, bis 11,9 V erreicht sind? Angenommen, der Wert der Messgröße würde von 10 auf 0 V springen; welche Amplitude hätte das Ausgangssignal des Messsystems, wenn die 95%-Einschwingzeit verstrichen ist?

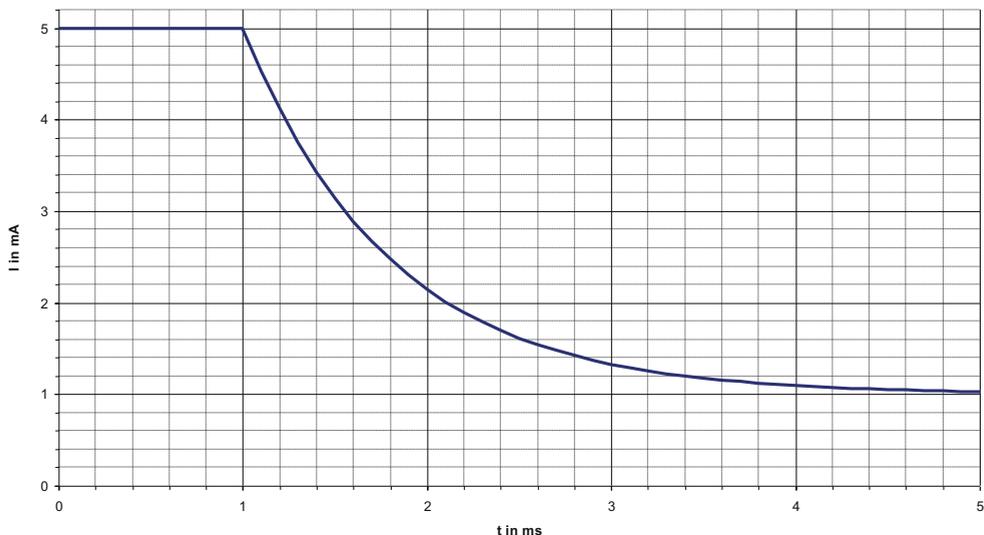
62. Gegeben ist die nachfolgende Gleichung (Betrag der Übertragungsfunktion):

$$|G(j\omega)| = \frac{2}{\sqrt{1 + (\omega \cdot 0,004s)^2}}$$

Berechnen Sie die 3-dB-Grenzfrequenz!

63. Woran kann man erkennen, ob es sich bei einer Frequenzangabe um die Frequenz oder um die Kreisfrequenz handelt?

64. Im Zeitpunkt  $t = 0$  ms springt das Eingangssignal eines Übertragungssystems von  $15 \Omega$  auf  $3 \Omega$ . Das Diagramm zeigt den Verlauf des Ausgangssignals. Ermitteln Sie die Totzeit, die Zeitkonstante, die 95%-Einschwingzeit und die 3-dB-Grenzfrequenz des Systems! Geben Sie eine Gleichung für die statische Kennlinie an!



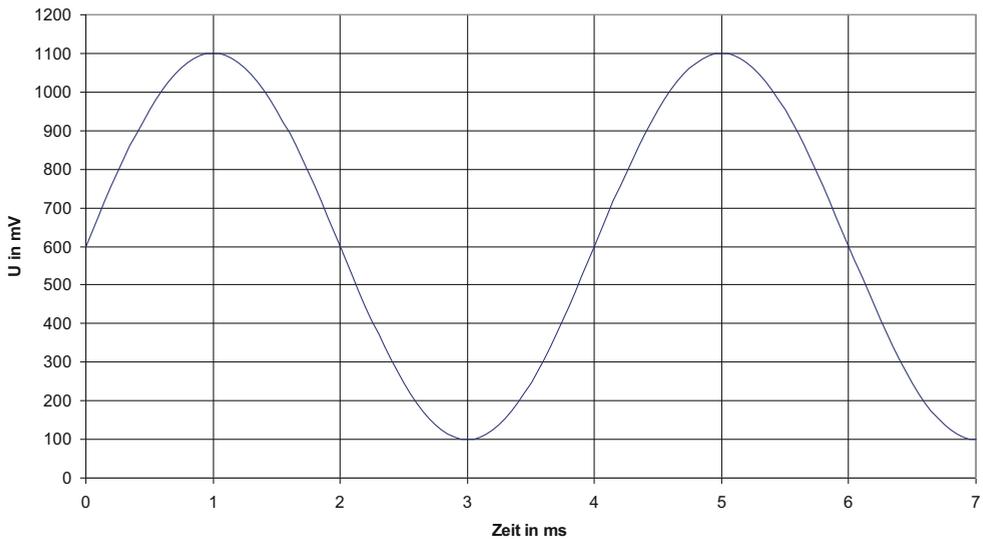
**Bild 3.4** Ausgangssignal (Sprungantwort)

65. Ein aktiver Spannungs-Strom-Wandler (Versorgungsspannung 24 VDC) mit  $PT_1$ -Verhalten hat eine Zeitkonstante von einer Millisekunde. Dessen statische Kennlinie verläuft durch den Nullpunkt. Die Empfindlichkeit beträgt  $2 \text{ mA/V}$ . Die Eingangsspannung springt von  $10 \text{ V}$  auf  $4 \text{ V}$ . Welchen Wert hat das Stromsignal drei Millisekunden nach dem Sprung?

66. Die Antwort eines Messumformers auf den Sprung von  $0$  auf  $1 \text{ V}$  lautet  $I(t) = 20 \text{ mA} (1 - e^{-t/2s})$ . Berechnen Sie die Empfindlichkeit des Messumformers! Welchen Wert hat das Ausgangssignal  $3 \text{ s}$  nach dem Sprung? Berechnen Sie  $\omega_g$  und  $f_g$ .

67. Die obere Grenzfrequenz eines Messsystems beträgt  $10 \text{ kHz}$  ( $-3 \text{ dB}$ ). Das Messsystem hat zwei Zeitkonstanten die gleich groß sind (Tiefpass 2. Ordnung). Beschreiben Sie verbal den Amplitudengang! Wenn das Eingangssignal eine Frequenz von  $100 \text{ kHz}$  hat, ist dann diese Frequenz im Ausgangssignal zu erkennen?

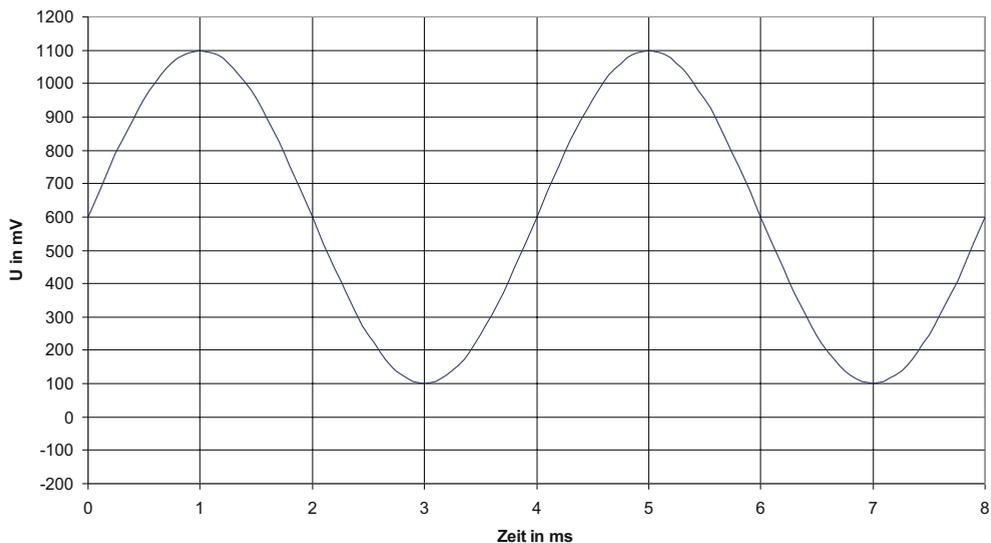
68. Ab welcher Frequenz sperrt ein Tiefpass 1. Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 1 kHz vollständig?
69. Berechnen Sie ausgehend von der Übertragungsfunktion die Amplitude des Ausgangssignals eines Verstärkers ( $E = 1000$ ,  $PT_1$ -Verhalten,  $f_{g,3dB} = 15$  kHz), wenn an dessen Eingang eine Spannung mit einer Amplitude von einem Millivolt und einer Frequenz von 30 kHz anliegt!
70. Die obere Grenzfrequenz eines Messsystems beträgt 250 Hz (-1 dB). Die Phasenlaufzeit beträgt 1 ms. Das Messsystem hat den im Diagramm dargestellten Verlauf aufgezeichnet:



**Bild 3.5** Ausgangssignal eines Messsystems

Zeichnen Sie den wahren Verlauf des ursprünglichen Signals (Input) in das Diagramm ein!

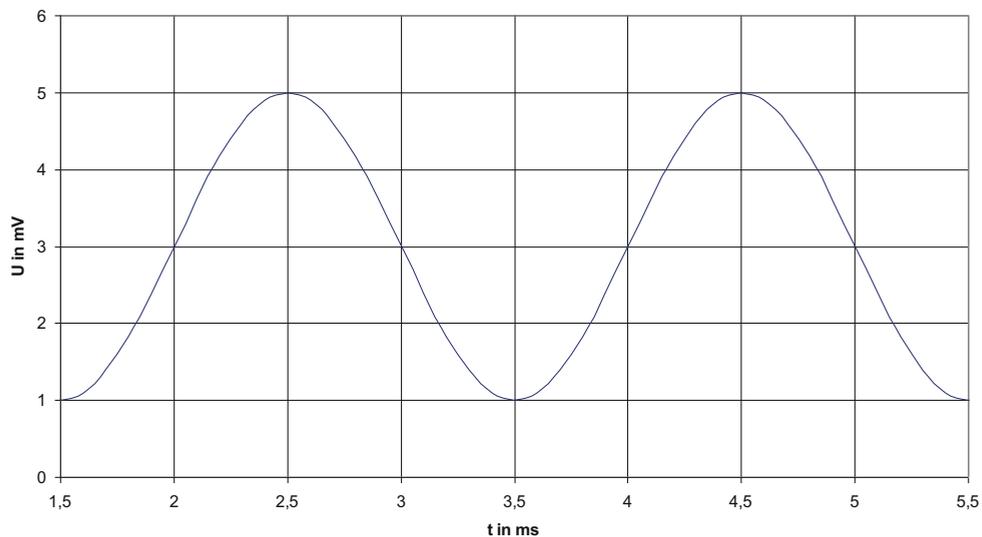
71. Das abgebildete periodische Signal liegt an den Übertragungsgliedern a und b (siehe Bild 3.6) an. Zeichnen Sie das Ausgangssignal der Übertragungsglieder mit in das Diagramm ein. Die Phasenlage bei dieser ist nicht von Interesse.



**Bild 3.6** Eingangssignal an den Gliedern a und b

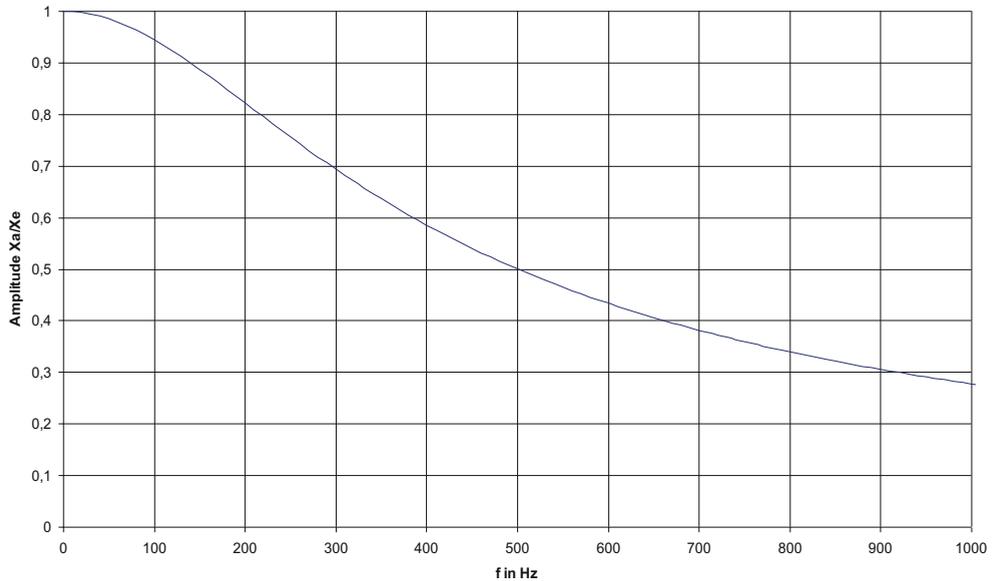
- a. Übertragungsglied ist Reihenstruktur aus Tiefpass 4. Ordnung ( $f_g = 0,05$  Hz) und Spannungsteiler ( $E = 0,5$ )
- b. Übertragungsglied ist Reihenstruktur aus Spannungsteiler ( $E = 0,2$ ) und Hochpass ( $f_g = 1$  Hz)

72. Das Eingangssignal eines Übertragungsglieds ist im Diagramm dargestellt.

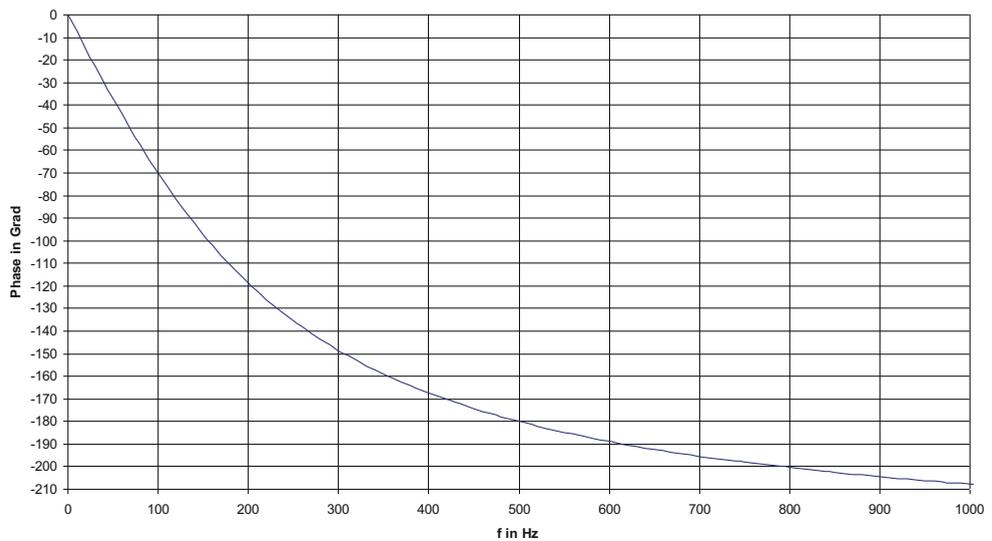


**Bild 3.7** Eingangssignal eines Übertragungsglieds

Den Frequenzgang des Übertragungsglieds zeigen die beiden Diagramme.



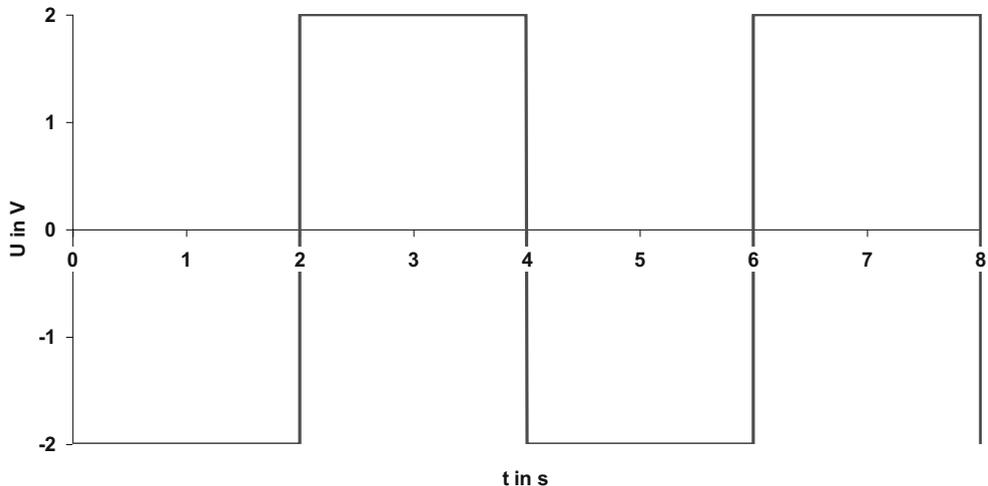
**Bild 3.8** Frequenzgang (AFK) des Übertragungsglieds



**Bild 3.9** Frequenzgang (PFK) des Übertragungsglieds

Zeichnen Sie den Verlauf des Ausgangssignals!

73. Eine Rechteckspannung (Ausschnitt ist dargestellt in Bild 3.10) liegt am Eingang eines Übertragungsglieds mit  $PT_1$ -Verhalten an. Dieses hat die Empfindlichkeit  $-0,5$ . Dessen 3-dB-Grenzfrequenz beträgt  $0,25$  Hz. Zeichnen Sie das Ausgangssignal mit in das Diagramm ein!



**Bild 3.10** Rechteckspannung

74. Eine Messkette besteht aus Sensor und Verstärker. Beide Glieder haben eine Zeitkonstante von  $15$  ms. Geben Sie die Übertragungsfunktion an. Skizzieren Sie die Übergangsfunktion.
75. Zeichnen Sie die vereinfachte Darstellung des Amplitudengangs einer Messkette bestehend aus Sensor und Verstärker! Beide Glieder der Messkette besitzen genau eine Zeitkonstante. Die Zeitkonstanten betragen  $1$  ms und  $10$  ms.
76. Ein Messsystem besteht aus zwei linearen, rückwirkungsfrei in Serie geschalteten Übertragungsgliedern. Beide Übertragungsglieder haben eine Empfindlichkeit von  $1$ , ein Tiefpassverhalten 1. Ordnung und eine Grenzfrequenz von  $200$  Hz. Am Eingang des ersten Übertragungsglieds liegt das periodische Signal  $U(t) = 1 \text{ V} + 1 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 100 \text{ Hz} \cdot t)$  an. Zeichnen Sie das Eingangssignal, das Ausgangssignal des 1. Glieds und das Ausgangssignal des zweiten Glieds in ein Diagramm.
77. Ihre Messkette besteht aus Drucksensor ( $T_{E,95\%} = 50 \mu\text{s}$ ), Messverstärker ( $f_{g0} = 1 \text{ kHz}$ ) und ADU ( $f_A = 100 \text{ kHz}$ ). Wie groß ist etwa die Bandbreite der Messeinrichtung?
78. Zeichnen Sie die Übergangsfunktion sowie den Amplitudengang eines Sensors, der folgende Eigenschaften hat:  $T_2$ -Verhalten, Dämpfungsgrad  $= 0,1$ , Eigenfrequenz  $= 100$  Hz!

# 4

## Digitale Messtechnik

Gegenstand dieses Kapitels sind digitale Verfahren der Zeit- und der Frequenzmessung sowie Analog-Digital-Umsetzer. Beim Einsatz digitaler Verfahren treten ganz praktische Probleme auf, die hier thematisiert werden.

### ■ 4.1 Einführung

Moderne Zeit- und Frequenzmessverfahren haben das Ziel, der Messgröße einen Digitalwert zuzuordnen. Diese Verfahren spielen demzufolge auch bei der Umsetzung analoger Signale in digitale Signale eine wichtige Rolle. Unabhängig davon, welches Verfahren im AD-Umsetzer realisiert ist, hat dieser sowohl statische als auch dynamische Eigenschaften. Diese bestimmen Auflösung und Messrate und vieles mehr.

### ■ 4.2 Fragen und Aufgaben

1. Warum sind bei der digitalen Frequenzmessung mit Zähler, Zeitgeber/Frequenzgenerator und Tor hohe Zählergebnisse anzustreben!
2. Beschreiben Sie verbal zwei Möglichkeiten, die Frequenz einer rechteckförmigen Wechselspannung mittels Zähler, Zeitgeber (bzw. Frequenzgenerator) und Tor (elektronischer Schalter) in einen Zahlenwert umzusetzen!
3. Das Messsignal hat eine Frequenz von 500 Hz und liegt am Toreingang an. Die Torzeit beträgt 2 s. Wie groß ist der Zählerstand, wenn die 0/1-Flanken gezählt werden? Wie groß ist die relative Messabweichung?
4. Welchen Vorteil hätte es, nicht nur die 0/1-, sondern auch die 1/0-Flanken zu zählen?
5. Welche Torzeit ist beim Frequenzmessverfahren zu wählen, wenn der Zählerstand ziffernrichtig die unbekannte Frequenz in Hz anzeigen soll.
6. Was trägt neben dem digitalen Restfehler (Zählfehler von  $\Delta z = 1$ ) noch zur Messunsicherheit bei?