
PID-basierte digitale Regelungstechnik

Mit Praxisbeispielen für Raspberry Pi und Arduino Uno



Dogan Ibrahim

● © 2023: Elektor Verlag GmbH, Aachen.

1. Auflage 2023

● Alle Rechte vorbehalten.

Die in diesem Buch veröffentlichten Beiträge, insbesondere alle Aufsätze und Artikel sowie alle Entwürfe, Pläne, Zeichnungen und Illustrationen sind urheberrechtlich geschützt. Ihre auch auszugsweise Vervielfältigung und Verbreitung ist grundsätzlich nur mit vorheriger schriftlicher Zustimmung des Herausgebers gestattet.

Die Informationen im vorliegenden Buch werden ohne Rücksicht auf einen eventuellen Patentschutz veröffentlicht. Die in diesem Buch erwähnten Soft- und Hardwarebezeichnungen können auch dann eingetragene Warenzeichen sein, wenn darauf nicht besonders hingewiesen wird. Sie gehören dem jeweiligen Warenzeicheninhaber und unterliegen gesetzlichen Bestimmungen.

Bei der Zusammenstellung von Texten und Abbildungen wurde mit größter Sorgfalt vorgegangen. Trotzdem können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden. Verlag, Herausgeber und Autor können für fehlerhafte Angaben und deren Folgen weder eine juristische Verantwortung noch irgendeine Haftung übernehmen.

Für die Mitteilung eventueller Fehler sind Verlag und Autor dankbar.

● Erklärung

Autor, Übersetzer und Verlag haben sich nach besten Kräften bemüht, die Richtigkeit der in diesem Buch enthaltenen Informationen zu gewährleisten. Sie übernehmen keine Haftung für Verluste oder Schäden, die durch Fehler oder Auslassungen in diesem Buch verursacht werden, unabhängig davon, ob diese Fehler oder Auslassungen auf Fahrlässigkeit, Versehen oder eine andere Ursache zurückzuführen sind, und lehnen jegliche Haftung hiermit ab.

Umschlaggestaltung: Elektor Media Services, Bild von Shutterstock

● **ISBN 9783895765384** Print

ISBN 9783895765391 eBook

● Übersetzer: Dr. Gunter Spanner

Originaltitel: PID-based Practical Digital Control

Satz und Aufmachung: D-Vision, Julian van den Berg | Oss (NL)

Elektor-Verlag GmbH, Aachen

www.elektor.de

Elektor ist Teil der Unternehmensgruppe Elektor International Media (EIM), der weltweit wichtigsten Quelle für technische Informationen und Elektronik-Produkte für Ingenieure und Elektronik-Entwickler und für Firmen, die diese Fachleute beschäftigen. Das internationale Team von Elektor entwickelt Tag für Tag hochwertige Inhalte für Entwickler und DIY-Elektroniker, die über verschiedene Medien (Magazine, Videos, digitale Medien sowie Social Media) in zahlreichen Sprachen verbreitet werden. www.elektor.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
Kapitel 1 • Regelungssysteme	11
1.1 Offene und geschlossene Regelkreise	11
1.2 Der Mikrocontroller im Regelkreis	12
1.3 Entwurf von Regelungssystemen	15
Kapitel 2 • Sensoren	16
2.1 Sensoren in computerbasierten Regelungen	16
2.2 Temperatursensoren	18
2.2.2 Digitale Temperatursensoren	25
2.3 Positionssensoren	26
2.4 Geschwindigkeits- und Beschleunigungssensoren	29
2.5 Kraftsensoren	30
2.6 Drucksensoren	31
2.7 Flüssigkeitssensoren	33
2.8 Durchflusssensoren	36
Kapitel 3 • Übertragungsfunktionen und Zeitverhalten	38
3.1 Übersicht	38
3.2 Systeme erster Ordnung	38
3.2.1 Zeitverhalten	41
3.3 Systeme zweiter Ordnung	44
3.3.1 Zeitverhalten	47
3.4 Zeitverzögerung	52
3.5 Übertragungsfunktion eines geschlossenen Regelkreises	53
Kapitel 4 • Zeitdiskrete (digitale) Systeme	55
4.1 Übersicht	55
4.2 Der Abtastprozess	55
4.3 Die Z-Transformation	59
4.3.1 Einheitssprungfunktion	59
4.3.2 Einheitenrampenfunktion	60
4.3.3 Tabellen für z-Transformationen	60

4.4 Die z-Transformation einer Funktion, ausgedrückt als Laplace-Transformation.	60
4.5 Inverse z-Transformationen	62
4.6 Impulsübertragungsfunktion und Manipulation von Blockdiagrammen	63
4.6.1 Open-Loop-Systeme	64
4.7 Zeitverhalten im offenen Regelkreis	65
4.8 Zeitverhalten des geschlossenen Regelkreises.	69
Kapitel 5 • Der PID-Regler in zeitkontinuierlichen Systemen	72
5.1 Überblick	72
5.2 Der Proportional-Regler in einem System erster Ordnung	73
5.3 Integral-Regler in einem System erster Ordnung.	74
5.4 Differential-Regler in einem System erster Ordnung	75
5.5 Proportional + Integralregler in einem System erster Ordnung	76
5.6 Proportional- Integral-Differentialregler in einem System erster Ordnung.	77
5.7 Auswirkungen von PID-Parameter-Änderungen	78
5.8 Einstellen eines PID-Reglers	79
5.8.1 Ziegler- und Nichols-Tuning der geöffneten Regelschleife.	80
5.8.2 Open-Loop-Cohen-Coon-PID-Tuning	81
5.8.3 Closed-loop Tuning	86
5.8.4 Praktisches PID-Tuning	88
5.9 Selbstoptimierende PID-Regler	89
5.10 Erhöhen und Verringern von PID-Parametern	89
5.11 Sättigungseffekte und integraler Überlauf.	89
5.12 Differentieller Kick	90
5.13 Verwendung des PID-Regelungssimulators	91
Kapitel 6 • Digitale PID Regler.	93
6.1 Überblick	93
6.2 Digital PID	93
6.3 Auswahl der Abtastzeit T	94
6.4 Implementierung des PID-Algorithmus in Mikrocontrollersystemen	95
Kapitel 7 • Ein-Aus-Temperaturregelung	97
7.1 Überblick	97
7.2 Temperaturregler.	97

7.3 Projekt 1: EIN-AUS-Temperaturregelung mit Arduino Uno	98
7.4 Projekt 2: EIN-AUS-Temperaturregelung mit Hysterese und Arduino Uno	103
7.5 Projekt 3: EIN-AUS-Temperaturregelung mit Tastensteuerung – Arduino Uno	105
7.6 Projekt 4: EIN-AUS-Temperaturregelung mit Drehgeber und Arduino Uno	108
7.7 Projekt 5: EIN-AUS-Temperaturregelung mit Raspberry Pi 4	113
Kapitel 8 • PID-Temperaturregelung mit dem Raspberry Pi	124
8.1 Überblick	124
8.2 Projekt 1 – Temperaturbestimmung mit einem Thermistor	124
8.3 Projekt 2: Open-Loop-Zeitantwortfunktion für einen Eingangssprung	128
8.4 Projekt 3: PI Temperaturregelung	136
8.5 Projekt 4: PID-Temperaturregelung	142
8.6 Benutzung von PID Regelschleifen-Simulatoren	148
Kapitel 9 • PID-Temperaturregelung mit dem Arduino Uno	150
9.1 Überblick	150
9.2 Projekt 1: Auslesen der Temperatur eines Thermistors	150
9.3 Projekt 2: PID Temperaturregelung	152
9.4 Projekt 3: PID-Temperaturregelung mit Arduino Uno und Timer-Interrupt	158
9.5 Projekt 4: PID-Temperaturregelung mit der Arduino Uno PID-Bibliothek	161
Kapitel 10 • Drehzahlregelung von Gleichstrommotoren mit Arduino und Raspberry Pi	166
10.1 Überblick	166
10.2 Elektromotortypen	166
10.3 Bürsten-Gleichstrommotoren	167
10.3.1 Gleichstrommotoren mit Permanentmagneten	168
10.3.2 Gleichstrommotoren mit Serienwicklung	168
10.3.3 Nebenschluss-Motoren	169
10.3.4 Doppelschluss-Motoren	169
10.3.5 Fremderregte BDC-Motoren	170
10.3.6 Servomotoren	170
10.3.7 Schrittmotoren	171
10.4 Bürstenlose Gleichstrommotoren	172
10.5 Auswahl von Motoren	172

10.6 Übertragungsfunktion eines Gleichstrom-Bürstenmotors.	172
10.7 Der in den Projekten verwendete Gleichstrommotor.	175
10.8 Projekt 1: Motorgeschwindigkeits- und Richtungssteuerung unter Verwendung einer integrierten H-Brücke	177
10.9 Projekt 2: Anzeige der Motordrehzahl mit Arduino Uno.	184
10.10 Projekt 3: Anzeige der Motordrehzahl auf einem LCD mit Arduino Uno.	188
10.11 Projekt 4: Anzeige der Motordrehzahl mit dem Raspberry Pi	191
10.12 Projekt 5: Anzeige der Motordrehzahl auf einem LCD mit dem Raspberry Pi . . .	193
10.13 Projekt 6: Charakterisierung des Gleichstrommotors mit einem Raspberry Pi . .	196
10.14 Projekt 7: PID-Motordrehzahlregelung mit Raspberry Pi	198
10.15 Projekt 8: PID-Motordrehzahlregelung mit einem Arduino Uno	202
Kapitel 11 • Wasserstandskontrolle.	207
11.1 Überblick	207
11.2 Ultraschall-Sender-Empfänger-Modul	207
11.3 Projekt 1: Entfernungsmessung mit dem Ultraschallmodul HC-SR04 und einem Arduino Uno	207
11.4 Projekt 2: Entfernungsmessung mit dem Ultraschallmodul HC-SR04 und einem Raspberry Pi	211
11.5 Projekt 3: Sprungantwort des Systems mit einem Raspberry Pi.	214
11.6 Projekt 4: PID-basierte Wasserstandsregelung mit einem Raspberry Pi	218
11.7 Projekt 5: PID-basierte Wasserstandsregelung mit einem Arduino Uno.	224
Kapitel 12 • PID-basierte LED-Helligkeitsregelung	229
12.1 Überblick	229
12.2 Projekt 1: Sprungantwortverhalten der LED-Helligkeitssteuerung mit einem Raspberry Pi	229
12.3 Projekt 2: PID-basierte LED-Helligkeitsregelung mit dem Raspberry Pi.	233
12.4 Projekt 3: PID-basierte LED-Helligkeitssteuerung mit dem Arduino Uno	238
12.5 Projekt 4: PID-basierte LED-Helligkeitssteuerung mit der Arduino Uno-Bibliothek	241
Index	244

Vorwort

Mikrocontroller sind äußerst beliebte integrierte Systeme, die in elektronischen Überwachungs- und Steuerungsanwendungen in Haushalt, Gewerbe und in der Industrie umfangreiche Anwendung finden. Es wird geschätzt, dass in Industrieländern in jedem Haushalt mehr als 50 Mikrocontroller vorhanden sind. Haushaltsgeräte mit integrierten Mikrocontrollern umfassen Mikrowellenherde, Drucker, Tastaturen, Computer, Tablets, Waschmaschinen, Geschirrspüler, Smart-TVs, Smartphones und vieles mehr.

Der Arduino Uno ist ein Open-Source-Mikrocontroller-Entwicklungssystem, das Hardware, eine integrierte Entwicklungsumgebung (IDE) und eine große Anzahl von Bibliotheken zur Verfügung stellt. Der Arduino Uno wird von einer großen Gemeinschaft von Programmierern, Elektronikingenieuren, Enthusiasten und Akademikern unterstützt. Es gibt viele verschiedene Varianten des einfachen Arduino Uno-Boards. Obwohl sie für verschiedene Arten von Anwendungen gedacht sind, können sie alle mit derselben IDE programmiert werden. Im Allgemeinen können Programme zwischen den verschiedenen Boards ausgetauscht werden. Dies mag einer der Gründe für die Popularität der Arduino-Familie sein, die durch unzählige Softwarebibliotheken viele Peripheriegeräte unterstützt, welche sich so problemlos in fertige Programme integrieren lassen. Diese Bibliotheken machen das Programmieren zum Kinderspiel und verkürzen die Entwicklungszeiten. Die Verwendung von Bibliotheken erleichtert auch das Testen der Programme, da die Bibliotheken meistens bereits vollständig getestet und funktionsfähig sind.

Der Raspberry Pi 4 ist ein neuer und sehr populärer Computer in Kreditkartengröße, der in vielen Anwendungen eingesetzt werden kann, z. B. als Audio- und Video-Mediathek, als Desktop-Computer, in Industriesteuerungen, Robotik, Spielen und vielen weiteren privaten und kommerziellen Anwendungen. Zusätzlich zu den zahlreichen Funktionen, die in Raspberry Pi-Computern zu finden sind, bietet der Raspberry Pi 4 auch Wi-Fi- und Bluetooth. Dadurch wird die Integration in ferngesteuerte und internetbasierte Steuerungs- und Überwachungsanwendungen sehr einfach.

In diesem Buch geht es um die Verwendung sowohl des Raspberry Pi 4 als auch des Arduino Uno in PID-basierten Regelungsanwendungen. Das Buch beginnt mit der grundlegenden Theorie der Regelsysteme und der Signlrückkopplung. Es werden funktionierende und getestete Projekte zur Steuerung realer Systeme mit PID-Reglern vorgestellt. Das Open-Loop-Sprungantwortverhalten, die Abstimmung der PID-Parameter und das Closed-Loop-Zeitverhalten der entwickelten Systeme werden zusammen mit den Blockdiagrammen, Schaltplänen, PID-Regleralgorithmen und den vollständigen Programmlistings sowohl für den Raspberry Pi als auch den Arduino Uno ausführlich besprochen. Die im Buch vorgestellten Projekte sollen Theorie und Anwendung von PID-Reglern erläutern. Sie lassen sich leicht für andere Anwendungen modifizieren. Die für den Raspberry Pi 4 entwickelten Projekte sollten auch mit allen anderen Modellen der Raspberry Pi-Familie funktionieren.

Es wird erwartet, dass die Leser einige Programmiererfahrung mit dem Arduino Uno unter Verwendung der Arduino IDE haben. Dasselbe gilt für den Raspberry Pi und die Programmiersprache Python 3. Einige grundlegende Erfahrungen mit elektronischer Hardware und

Kenntnisse in grundlegender Mathematik sind ebenfalls nützlich.

Alle im Buch behandelten Programme sind in einer Archivdatei enthalten, die Sie kostenlos von der Elektor-Webseite herunterladen können. Besuchen Sie hierfür

www.elektor.de/books

und geben Sie den Buchtitel in das Suchfeld ein.

Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Lesen des Buches, dem Erlernen der theoretischen Grundlagen und dem praktischen Anwenden der PID-Regler.

Dogan Ibrahim
London, 2022

Kapitel 1 • Regelungssysteme

1.1 Offene und geschlossene Regelkreise

Die Regelungstechnik befasst sich mit der Kontrolle dynamischer Systeme, Anlagen oder Prozesse. Dabei kann es sich um ein mechanisches, ein elektrisches, ein thermisches, oder auch ein Fluidsystem beziehungsweise eine Kombination solcher Systeme handeln.

Die Systeme können einen oder mehrere Eingänge und einen oder mehrere Ausgänge haben. Ihr dynamisches Verhalten wird durch Differentialgleichungen beschrieben. Wenn das Modell (oder die Differentialgleichungen), die Eingangswerte und die Anfangsbedingungen einer Anlage vorliegen, können die Ausgangsgrößen leicht berechnet werden. Im Allgemeinen werden zeitkontinuierliche Systeme betrachtet, deren Ein- und Ausgänge ebenfalls zeitkontinuierlich sind. Beispielsweise ist ein elektrischer Motor ein zeitkontinuierliches System, dessen Eingangsgrößen (z. B. Spannung oder Strom) und Ausgangswerte (z. B. Geschwindigkeit oder Position) ebenfalls zeitkontinuierlich sind.

Die Regelungstechnik basiert auf den Theorien der Systemmodellierung, Rückkopplung, Systemreaktion und Stabilität. Dadurch ist die Regelungstechnik nicht nur auf eine Ingenieurdisziplin beschränkt, sondern auch auf Bereiche wie Maschinenbau, Chemie, Luftfahrt, Bauwesen und Elektrotechnik anwendbar.

Normalerweise besteht eine Anlage oder ein System aus einem **offenem Regelkreis** (Abbildung 1.1), bei dem ein Stellglied verwendet wird, um das System direkt, d. h. ohne Rückwirkung zu steuern. Zum Beispiel wird erwartet, dass sich ein Motor dreht, wenn eine Spannung an seine Eingangsklemmen angelegt wird. Man weiß jedoch nicht genau, wie schnell sich der Motor dreht, wenn seine Drehzahl nicht gemessen wird. Wenn die Motorwelle belastet und der Motor deshalb langsamer wird, gibt es dazu keine genauen Informationen. Wie in Abbildung 1.1 gezeigt, kann eine Anlage auch externen Störungen unterliegen, die ihr Verhalten beeinflussen. In einem System mit offenem Regelkreis gibt es dann keine Möglichkeit, solche Störungen zu erkennen oder zu minimieren.

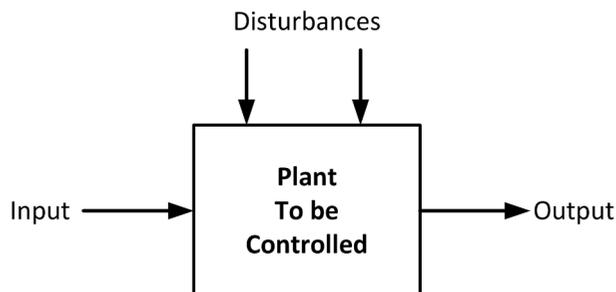


Abbildung 1.1: Offene Regelschleife

Im Gegensatz zum offenen Regelkreis („Open-Loop-Control“) wird bei einem **geschlossenen Regelkreissystem** („Closed-Loop-Control“, Abbildung 1.2) die tatsächliche Ausgangsgröße gemessen und mit dem gewünschten Wert verglichen. Der Ausgabewert wird also als Rückkopplungssignal verwendet. Die Differenz zwischen der gewünschten Aus-

gangsgröße, dem sogenannten Sollwert und dem tatsächlichen Ausgangswert wird als **Fehlersignal (error signal)** bezeichnet. Das Fehlersignal wird verwendet, um die Systemausgabe auf einen Arbeitspunkt zu zwingen, an dem der gewünschte und der tatsächliche Ausgabewert gleich sind, und das Fehlersignal Null ist. Ein Vorteil der Closed-Loop- oder Rückkopplungssteuerung ist die Möglichkeit, Störungen zu kompensieren und selbst bei Vorhandensein von Störeinflüssen die gewünschten Ausgabewerte zu liefern. Die Systemgrößen pendeln sich auf den Sollwert ein und bleiben auf diesem gewünschten Wert. Beispielsweise bleibt bei einem Motorregler die Drehzahl des Motors gleich, auch wenn eine Last auf die Motorwelle wirkt. Üblicherweise wird ein Regler also dazu verwendet, um das Fehlersignal auszulesen und die Anlage so anzusteuern, dass der Fehler gegen Null geht.

Zur Messung von Ausgangsgrößen werden Sensoren verwendet. Ein Thermistor dient beispielsweise zur Messung von Temperaturen. Er kann daher für die Konstanzhaltung einer Temperatur in einem geschlossenem Regelkreis verwendet werden. In ähnlicher Weise kann ein Tachometer oder ein Encoder verwendet werden, um die Drehzahl eines Motors zu messen und diese über einen geschlossenem Regelkreis zu stabilisieren. Dabei ist zu beachten, dass in elektrischen Systemen nach dem Digital-Analogwandler (DAC) eventuell ein Leistungsverstärker erforderlich ist, um das System zu steuern.

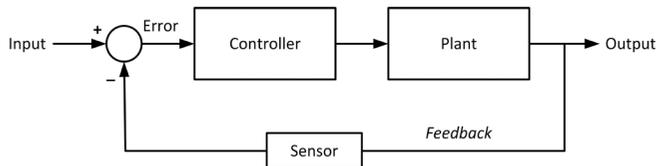


Abbildung 1.2: Geschlossenes Regelungssystem

Wie in einem späteren Kapitel gezeigt wird, sind die meisten Sensoren analoge Komponenten, die kontinuierliche Spannungs- oder Stromwerte liefern. Solche Sensoren können direkt in analogen Systemen verwendet werden, in welchen die Eingänge, die Steuerungsgrößen und die Ausgangswerte alle analoge Variablen sind.

1.2 Der Mikrocontroller im Regelkreis

Heutzutage sind praktisch alle Steuerungssysteme mikrocontrollerbasiert, wobei der Mikrocontroller als zentrales Steuergerät dient. Einige Sensoren (z. B. für Temperatur, Druck, Feuchtigkeit usw.) bieten digitale Ausgänge und können direkt an einen Mikrocontroller angeschlossen werden. Rein analoge Sensoren können nicht direkt an einen Mikrocontroller angeschlossen werden. Hier wird ein Analog-Digital-Wandler (ADC) benötigt, um das analoge Signal in eine digitale Form umzuwandeln, bevor es dem Controller zugeführt werden kann.

Abbildung 1.3 zeigt ein digitales Steuerungssystem, bei dem angenommen wird, dass der Eingang und der Ausgang des Sensors analog ist. Der ADC wird verwendet, um das Fehlersignal zu in festen Zeitabständen digitalisieren. Dieses wird dann einem digitalen Controller, üblicherweise einem Mikrocontroller zugeführt. Der Mikrocontroller enthält einen geeigneten Steueralgorithmus wie z. B. ein PID-Regelungssystem. Dessen Ausgang wird unter Verwendung eines Digital-Analog-Wandlers (DAC) in eine analoge Form umgewandelt, um

die Anlage zu steuern. So kann der Systemausgang auf den gewünschten Wert gehalten werden.

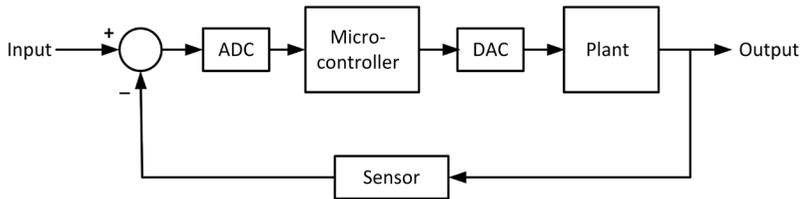


Abbildung 1.3: Digitales Steuersystem

Abbildung 1.4 zeigt das Blockschaltbild eines digitalen Regelsystems, mit einem ADC als Messwandler. Die meisten Mikrocontroller enthalten integrierte ADC- und DAC-Wandler, so wie in Abbildung 1.4 dargestellt.

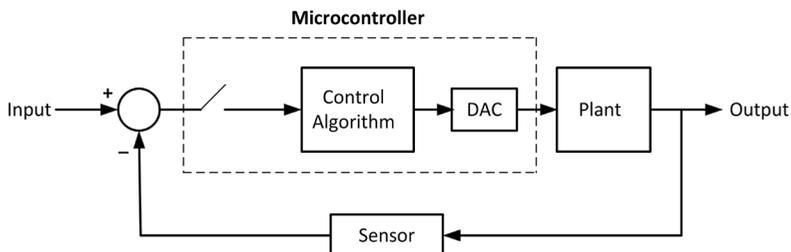


Abbildung 1.4: Blockdiagramm eines digitalen Steuersystems

In Abbildung 1.4 führen sowohl der Eingang als auch der Sensorausgang analoge Signale. Eine Variante dieses Systems ist in Abbildung 1.5 dargestellt. Dort erfolgt die Eingabe digital und ist in der Mikrocontroller-Software fest codiert. Alternativ können Größen unter Verwendung eines geeigneten Eingabegeräts, wie einer Tastatur, eingegeben werden. Zudem kommt ein Sensor mit digitalem Ausgang zum Einsatz, welcher direkt an den Mikrocontroller angeschlossen ist.

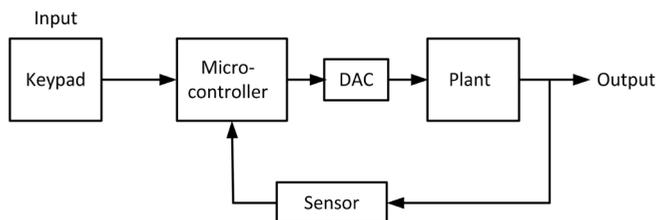


Abbildung 1.5: Weitere Variante einer digitalen Steuerung

Abbildung 1.6 zeigt ein typisches analoges Drehzahlregelungssystem. Hier wird die gewünschte Drehzahl über ein Potentiometer eingestellt. Die Drehzahl des Motors wird mit einem Tachometersystem gemessen und auf einen Differenzverstärker zurückgeführt. Der Ausgang dieses Verstärkers liefert das Fehlersignal, welches in einen analogen Regler eingespeist wird. Der Analogregler besteht in diesem Fall aus einem Operationsverstärker.

Der Ausgang des Controllers wiederum steuert über einen Leistungsverstärker den Motor um so die gewünschte Geschwindigkeit einzustellen.

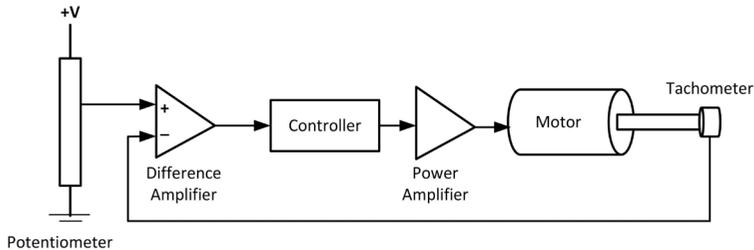


Abbildung 1.6: Analoges Geschwindigkeitsregelsystem

Abbildung 1.7 zeigt das digitale Äquivalent zu Abbildung 1.6. Hier misst ein digitaler Encoder die Motordrehzahl und leitet diesen Wert an den Mikrocontroller weiter. Die Soll-Drehzahl wird über eine Tastatur eingegeben. Der Mikrocontroller enthält das Steuerprogramm und sendet seine Ausgabe in Form eines pulswidenmodulierten (PWM) Signals an den Leistungsverstärker, der wiederum den Motorstrom steuert, und so die Drehzahl auf den gewünschten Wert bringt.

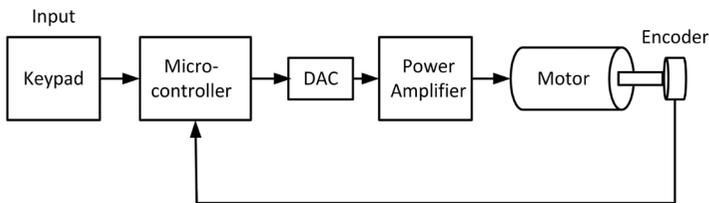


Abbildung 1.7: Digitales Geschwindigkeitsregelungssystem

Da Anlagen auch mit analogen Reglern gesteuert werden können, kann man sich fragen, warum digitale Regelkreise überhaupt erforderlich sind? In den 1960er Jahren waren Computer und Mikrocontroller noch sperrige und sehr teure Geräte und ihre Verwendung als digitale Steuerungen war nicht gerechtfertigt. Sie wurden nur in großen und teuren Anlagen wie komplexen chemischen Fabriken oder Öltraffinerien eingesetzt. Seit der Einführung von Mikrocontrollern in den 1970er Jahren sind die Kosten und die Größe digitaler Controller jedoch dramatisch gesunken. Infolgedessen, aber auch durch den Preisverfall anderer digitaler Komponenten wie Speichereinheiten etc. ist das Interesse an der Verwendung digitaler Steuerungen in den letzten Jahrzehnten stark gestiegen.

Digitale Regler haben gegenüber analogen Reglern mehrere Vorteile:

- Eine verbesserte Benutzeroberfläche. Digitale Controller können die Systemparameter und das Systemverhalten grafisch auf einem Monitor anzeigen.
- Digitale Regler können sehr anpassungsfähig konstruiert werden. Auch komplexe Regelalgorithmen lassen sich deshalb mit digitalen Reglern sehr einfach realisieren.

- Die Kosten für digitale Regler sind geringer als für analoge, insbesondere wenn dem System später zusätzliche Regelkreise hinzugefügt werden müssen.
- Digitale Regler sind einfach justierbar. Dazu müssen lediglich entsprechende Parameter in der Software geändert werden.
- Digitale Regler sind zuverlässiger als analoge und werden nicht von Umwelteinflüssen wie Bauteilalterung, Bauteiltoleranzen usw. beeinflusst.
- Digitale Controller sind einfach über Softwareänderungen modifizierbar. Die Anpassung eines analogen Reglers erfordert dagegen normalerweise eine Neuverdrahtung oder die Verwendung anderer bzw. zusätzlicher Komponenten.

Aus diesen Gründen wurden nahezu alle analogen Regelungen im Laufe der Zeit durch digitale ersetzt.

1.3 Entwurf von Regelungssystemen

Der Entwurf von Regelsystemen ist eine Ingenieursaufgabe und muss systematisch durchgeführt werden. Die wichtigsten Schritte für den Entwurf eines physikalischen Regelsystems können zu den folgenden Punkten zusammengefasst werden:

- Definieren der Eingangs- und Ausgangsgrößen
- Definieren der zu steuernden Größen
- Aufstellen eines mathematischen Modells des Systems (Differentialgleichungen)
- Entscheiden, ob eine analoge oder digitale Regelung verwendet werden soll
- Auswahl geeigneter Sensor
- Auswahl eines Mikrocontrollers (falls eine digitale Steuerung verwendet werden soll)
- Auswahl andere Komponenten wie Netzteil, Operationsverstärker, Leistungsverstärker usw.
- Anfertigen eines Blockschaltbilds zum System
- Beschreiben des zu verwendenden Reglers und Entwicklung des Regelalgorithmus
- Anpassen der Parameter des gewählten Regelungssystems
- Simulation des Gesamtsystems (falls Simulationswerkzeuge wie MATLAB verfügbar sind)
- Aufbauen des System und Überprüfung seines Verhaltens
- Arbeitet das System wie gewünscht, ist das Projekt abgeschlossen. Wenn sich der Regler dagegen nicht wie gewünscht verhält, muss man eine andere Reglerstruktur wählen oder die Kontroll-Parameter neu einstellen, neu simulieren und das System erneut testen.

Kapitel 2 • Sensoren

2.1 Sensoren in computerbasierten Regelungen

Sensoren sind wichtige Bestandteile aller Regelungssysteme. Ein Sensor ist eine Einheit, welche die Erfassung einer physikalischen Größe gestattet (d. h. der Ausgabewert ist eine Funktion dieser Größe). Als Messgrößen kommen z. B. Temperatur, Feuchtigkeit, Geschwindigkeit, Kraft, Vibration, Druck, Verschiebung, Beschleunigung, Drehmoment, Strömung, Licht oder Schall in Frage. Sensordaten werden in geschlossenen Regelkreisen als Rückkopplungsgrößen verwendet. Sie liefern Informationen über die tatsächliche Ausgangsgröße des Systems, an das sie angeschlossen sind. Beispielsweise gibt ein Geschwindigkeitssensor ein Signal aus, das proportional zur Geschwindigkeit eines Motors ist. Dieses Signal wird von der gewünschten Sollgeschwindigkeit subtrahiert, um so ein Fehlersignal zu erhalten. In ähnlicher Weise gibt ein Flüssigkeitsstandsensoren ein Signal aus, das proportional zum Flüssigkeitsstand in einem Behälter ist. Ein derartiger Sensor wird etwa zum Steuern des Füllstands einer Flüssigkeit in einem Behälter verwendet.

Sensoren können in zwei Gruppen eingeteilt werden: analog oder digital. Analoge Sensoren sind weit verbreitet und liefern kontinuierliche Signale (z. B. Spannungen oder Ströme), welche proportional zu physikalischen Messgröße sind. Die meisten realen Umweltvariablen sind von Natur aus analog, beispielsweise Temperatur, Feuchtigkeit, Druck usw. Ein analoger Temperatursensoren gibt eine Spannung aus, die direkt proportional zur gemessenen Temperatur ist. Analoge Sensoren können nur über ADC-Wandlermodule an einen Mikrocontroller angeschlossen werden.

Digitale Sensoren sind weniger verbreitet und liefern digitale Signale, die direkt an einen Computer angeschlossen werden können. Der Vorteil digitaler Sensoren besteht darin, dass sie genauer und stabiler arbeiten als analoge Systeme und dass sie direkt an einen Computer angeschlossen werden können. Digitale Sensoren sind jedoch meist teurer als ihre analogen Äquivalente.

Die Wahl eines Sensors für eine bestimmte Anwendung hängt von mehreren Faktoren wie Verfügbarkeit, Kosten, Genauigkeit, Präzision, Auflösung, Reichweite und Linearität des Sensors ab. Nachfolgend werden einige wichtige sensorspezifische Parameter beschrieben.

Messbereich: Der Messbereich eines Sensors gibt die oberen und unteren Grenzen an, die vom Sensor gemessen werden können. Wenn der Messbereich eines Temperatursensors beispielsweise mit 10 – 60 °C angegeben ist, sollte der Sensor nur zum Messen von Temperaturen innerhalb dieses Bereichs verwendet werden.

Auflösung: Als Auflösung eines Sensors wird die größte Änderung des Messwerts angegeben, die nicht zu einer Änderung des Sensorausgangs führt. D. h. der Messwert kann sich um diesen Betrag ändern, bevor diese Änderung vom Sensor erfasst werden kann. Im Allgemeinen ist der Sensor umso besser, je kleiner seine Auflösung ist. Sensoren mit großen Messbereich haben eine geringere Auflösung. Beispielsweise ist ein Temperatursensoren mit einer Auflösung von 0,01 °C besser als ein Sensor mit einer Auflösung von 0,1 °C.

Empfindlichkeit: Die Empfindlichkeit eines Sensors ist definiert als die Steigung seiner Ausgangskennlinie. Allgemeiner ausgedrückt ist es die minimale Änderung der physikalischen Messgröße, die eine nachweisbare Ausgabeänderung erzeugt. Beispielsweise kann ein typischer Temperatursensor eine Empfindlichkeit von $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ haben. Das bedeutet, dass sich die Ausgangsspannung nicht ändert, wenn die Temperaturänderung weniger als $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt.

Genauigkeit: Die Genauigkeit eines Sensors ist die maximale Differenz, zwischen dem tatsächlichen Wert und dem angezeigten Wert am Ausgang des Sensors. Die Genauigkeit kann entweder als Prozentsatz des Skalenendwerts oder absolut ausgedrückt werden.

Wiederholbarkeit: Die Wiederholbarkeit eines Sensors ist die Schwankung der Ausgangswerte, die zu erwarten ist, wenn der Sensor dieselbe physikalische Größe unter denselben Bedingungen misst. Wenn beispielsweise die Spannung an einem Widerstand mehrmals gemessen wird, erhält man eventuell leicht unterschiedliche Ergebnisse.

Linearität: Ein idealer Sensor sollte eine lineare Übertragungsfunktion aufweisen. D. h. es wird erwartet, dass die Sensorausgabe genau proportional zum gemessenen Wert ist. Beispielsweise liefert der Ausgang des LM35-Temperatursensors ein lineares Signal von $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$. Bei $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt die Ausgangsspannung 100 mV , bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 200 mV und so weiter. In der Praxis weisen jedoch alle Sensoren abhängig von Herstellungstoleranzen und Messbedingungen ein gewisses Maß an Nichtlinearität auf.

Offsetfehler: Der Offsetfehler eines Sensors ist derjenige Ausgangswert, der vorhanden ist, auch wenn die Eingangsgröße Null beträgt. So sollte beispielsweise die Ausgabe eines Kraftsensors Null sein, wenn keine Kraft auf den Sensor ausgeübt wird.

Dynamik: Die Dynamik eines Sensors gibt die Grenzen der Sensorcharakteristik an, wenn der Sensor einer sinusförmigen Frequenzänderung ausgesetzt ist. Beispielsweise kann die dynamische Reaktion eines Mikrofons in Form der 3-dB-Bandbreite ihres Frequenzgangs ausgedrückt werden.

Reaktionszeit: Sensoren ändern ihre Ausgangszustände nicht sofort nach Veränderung der Eingangsparameter. Beispielsweise liefert ein Temperatursensor nicht unverzüglich neue Messwerte, sobald sich die Temperatur ändert, sondern es dauert einige Zeit, bis sich die Ausgabe ändert. Die Ansprechzeit kann je nach verwendetem Sensor Mikrosekunden, Millisekunden oder Sekunden betragen. Sensoren mit kurzen Reaktionszeiten werden in den meisten Anwendungen bevorzugt, obwohl sie teurer sind.

Eigenerwärmung: Die Innentemperatur einiger Sensoren kann bei längerem Dauerbetrieb ansteigen, was als Selbst- oder Eigenerwärmung bezeichnet wird. Eine Selbsterwärmung ist nicht wünschenswert, da sie dazu führen kann, dass sich die Ausgabe des Sensors ändert. Beispielsweise kann ein Temperatursensor mit Selbsterwärmung falsche und schwankende Ausgänge liefern, wenn der Sensor längere Zeit verwendet wird.

Physische Größe: Die Größe eines Sensors kann in einigen Anwendungen wichtig sein. Der Anwender sollte die Abmessungen eines Sensors überprüfen, bevor er für die Verwendung in Betracht gezogen wird.

Betriebsspannung: Auch diese ist ein wichtiger Faktor, der vor dem Einsatz eines Sensors zu berücksichtigen ist. Vor dem Einsatz eines Sensors sollten die Betriebsspannung sowie die minimal und maximal an den Sensor anlegbaren Spannungen bekannt sein. Ist die Betriebsspannung beispielsweise mit +3,3 V angegeben, darf dieser Wert nicht überschritten werden.

Im weitere Verlauf dieses Kapitels wird der Betrieb und die Eigenschaften einiger gängiger Sensoren besprochen.

2.2 Temperatursensoren

Die Temperatur ist eine der grundlegenden physikalischen Variablen in den meisten chemischen Prozessen und Prozesssteuerungen. Eine genaue und zuverlässige Messung der Temperatur ist in allen Prozesssteuerungen wichtig. Die Wahl eines Temperatursensors hängt von der erforderlichen Genauigkeit, dem Temperaturbereich, der Reaktionszeit, den Kosten und der Umgebung ab, in der er verwendet wird (z. B. chemisch, elektrisch, mechanisch, umwelttechnisch usw.). Temperatursensoren sind sowohl in analoger als auch in digital Ausführung erhältlich. Beide Sensortypen werden in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben.

Sensor	Temperatur-bereich (°C)	Genauigkeit (± °C)	Kosten	Robustheit
Thermoelement	-270 ... +2600	1	niedrig	sehr hoch
RTD	-200 ... +600	0.2	mittel	hoch
Thermistor	-50 ... +200	0.2	niedrig	mittel
IC	-40 ... +125	1	niedrig	niedrig

Tabelle 2.1: Analoge Temperatursensoren

Thermoelemente

Thermoelemente (Abbildung 2.1) eignen sich am besten für Messungen bei sehr niedrigen und sehr hohen Temperaturen. Sie haben den Vorteil, dass sie kostengünstig, sehr robust und in chemisch aggressiver Umgebung einsetzbar sind. Die typische Genauigkeit eines Thermoelements beträgt ± 1 °C. Thermoelement-Sensoren können aus verschiedenen Leitermaterialien für unterschiedliche Temperaturbereiche und Ausgangscharakteristiken hergestellt werden. Thermoelemente werden über einzelnen Buchstaben identifiziert. Abbildung 2.1 zeigt die Temperaturbereiche verschiedener Thermoelemente. Beachten Sie, dass zur Identifizierung von Thermoelementen Farbkodierungen verwendet werden. Die zur Herstellung von Thermoelementen verwendeten Materialien sind in Abbildung 2.2 dargestellt. Eines der häufig verwendeten und kostengünstigen Thermoelemente ist beispielsweise der Typ K, der aus einem Chromel/Alumel-Legierung besteht, mit grüner Farbe gekennzeichnet ist und einen Temperaturbereich von -180 °C bis $+1300$ °C aufweist.

Thermocouple Type	Temperature Range (°C)				
	Short Term Use	Continuous Use	Class 1 Tolerance*	Class 2 Tolerance*	Class 3 Tolerance*
Type E	-40 to +900	0 to +800	-40 to +800	-40 to +900	-200 to +40
Type J	-180 to +800	0 to +750	-40 to +750	-40 to +750	N/A
Type K	-180 to +1300	0 to +1100	-40 to +1000	-40 to +1200	-200 to +40
Type N	-270 to +1300	0 to +1100	-40 to +1000	-40 to +1200	-200 to +40
Type R	-50 to +1700	0 to +1600	0 to +1600	0 to +1600	N/A
Type S	-50 to +1750	0 to +1600	0 to +1600	0 to +1600	N/A
Type T	-250 to +400	-185 to +300	-40 to +350	-40 to +350	-200 to +40
Type B	0 to +1820	+200 to +1700	N/A	+600 to +1700	+600 to +1700

Thermocouple Tolerances: IEC 60584-2:1982 / BS EN 60584-2:1993

*Thermocouples of this tolerance class can be used outside this range, but no tolerance is defined outside these limits.

Abbildung 2.1: Thermoelementtypen

Thermocouple	Material (+ / -)
Type E	Chromel / Constantan
Type J	Iron / Constantan
Type K	Chromel / Alumel
Type N	Nicrosil / Nisil
Type R & Type S	Platinum-Rhodium / Platinum
Type T	Copper / Constantan
Type B	Platinum-Rhodium / Platinum-Rhodium

Abbildung 2.2: In verschiedenen Thermoelementen verwendete Materialien

Um Temperaturen mit einem Thermoelement zu messen, wird im Allgemeinen ein Thermoelementverstärker verwendet. Der Ausgangswert des Verstärkers hängt von der Spannung der Referenz ab. Die Spannung an der Referenzstelle hängt von der Temperaturdifferenz zwischen der Vergleichsstelle und der Thermostelle ab. Daher muss die Temperatur an der Referenzstelle bekannt sein. Das Thermoelement-Verstärkermodul MAX6675 (Abbildung 2.3) verfügt über einen integrierten Temperatursensor zur Messung der Temperatur an der Vergleichsstelle und verstärkt auch die kleine Thermoelementspannung an der Referenzstelle, sodass sie mit einem Mikrocontroller ausgelesen werden kann.

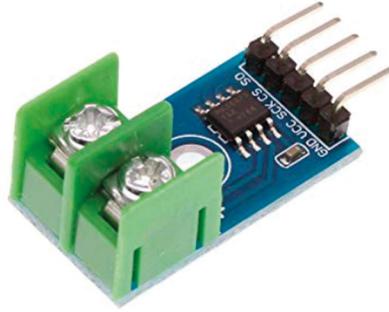


Abbildung 2.3: Thermoelement-Verstärkermodul MAX6675

Thermoelemente sind in verschiedenen Formen und Varianten erhältlich. Einige Sensoren sind mit 2-Weg-Steckern ausgestattet, um den Anschluss an ein Messgerät zu erleichtern. Abbildung 2.3 zeigt einige der allgemein erhältlichen Thermoelemente.



Abbildung 2.4: Einige Thermoelemente

RTDs

RTDs (Resistance Temperature Detector) sind Sensorelemente, deren Widerstand sich mit der Temperatur ändert. Der Widerstand steigt mit steigender Temperatur des Sensors an. Die Beziehung zwischen Widerstand und Temperatur ist gut bekannt und auch über längere Zeit hinweg hervorragend reproduzierbar. RTDs sind passive Komponenten und erzeugen keine eigene Ausgangsspannung. Normalerweise wird der Widerstand eines RTD über einen kleinen elektrischen Strom und den resultierenden Spannungsabfall gemessen. Es sollte darauf geachtet werden, keine zu großen Ströme verwendet werden, da es sonst zu einer Eigenerwärmung des Sensors kommen kann. Typischerweise wird ein Strom maximal 1 mA verwendet. Abbildung 2.5 zeigt einige RTD-Sensoren. RTDs haben ausgezeichnete Genauigkeiten, auch über weite Temperaturbereiche hinweg. Einige RTDs erzielen Genauigkeiten von besser als 0,001 °C. Ein weiterer Vorteil der RTDs besteht darin, dass sie eine Drift von weniger als 0,1 °C/Jahr aufweisen.



Abbildung 2.5: Einige RTDs

Um eine hohe Stabilität und Genauigkeit zu erreichen, müssen RTD-Sensoren frei von Kontaminationen bleiben. Unter etwa 250 °C ist die Kontamination kein großes Problem. Darüber sind spezielle Herstellungstechniken erforderlich, um Kontaminationen zu minimieren. RTD-Sensoren werden normalerweise in zwei Formen hergestellt: Drahtgewickelt oder als Dünnschicht. Drahtgewickelte RTDs werden hergestellt, indem ein sehr feiner Platindraht in Spulenform um ein nichtleitendes Material gewickelt wird, bis der erforderliche Widerstand erreicht ist. Dünnschicht-RTDs werden hergestellt, indem eine Platinschicht in einem Widerstandsmuster auf einem Keramiksubstrat abgelagert wird. Der am häufigsten verwendete RTD-Standard ist IEC 751, welcher auf Platin mit einem Widerstand von 100 Ω bei 0 °C basiert.

Für eine hohe Genauigkeit wird empfohlen, ein RTD-zu-Digital-Wandlermodul wie das MAX31865-Modul zu verwenden (Abbildung 2.6). Dieser Chip ist für Platin-RTDs optimiert. Hierfür wird ein genauer Referenzwiderstand verwendet, um die Empfindlichkeit für den RTD einzustellen. Ein On-Chip-ADC gibt das Verhältnis des RTD-Widerstands zum Referenzwiderstand als digitales Signal zurück. Wenn man den Referenzwiderstand kennt, kann der RTD-Widerstand und damit die gemessene Temperatur entweder aus Temperatur-Widerstands-Tabellen oder mithilfe einer Bibliotheksfunktion einfach berechnet werden.

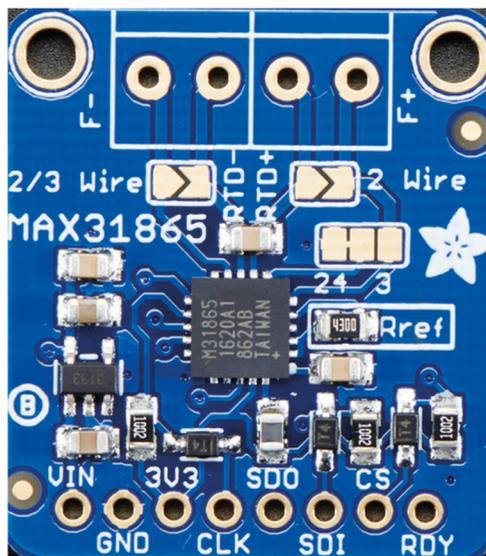


Abbildung 2.6: RTD-Wandlermodul MAX31865

Thermistoren

Der Name „Thermistor“ leitet sich von den Wörtern thermisch und Resistor (engl. f. „Widerstand“) ab. Thermistoren sind temperaturempfindliche passive Halbleiter, die eine große Änderung des elektrischen Widerstands zeigen, wenn sie einer kleinen Temperaturänderung ausgesetzt werden. Thermistoren werden in einer Vielzahl von Größen und Formen hergestellt (Abbildung 2.7). Kügelchen, Scheiben, beilagscheibenförmige Komponenten, Wafer und Chips sind die am häufigsten verwendeten Thermistortypen.



Abbildung 2.7: Verschiedene Formen von Thermistoren

Thermistoren sind in zwei Varianten erhältlich: mit negativem (NTC) oder mit positivem Temperaturkoeffizienten (PTC). PTC-Thermistoren werden im Allgemeinen als Einschaltstromschutz in der Leistungselektronik verwendet. NTC-Thermistoren weisen viele erwünschte Eigenschaften für die Temperaturmessung auf. Ihr elektrischer Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab (Bild 2.8), die Widerstands-Temperatur-Beziehung ist jedoch sehr nichtlinear. Der Nennwiderstand eines Thermistors wird auf 25 °C bezogen. Für die meisten Typen liegt der Widerstand bei diesem Temperaturwert zwischen 100 Ω und 100 kΩ.

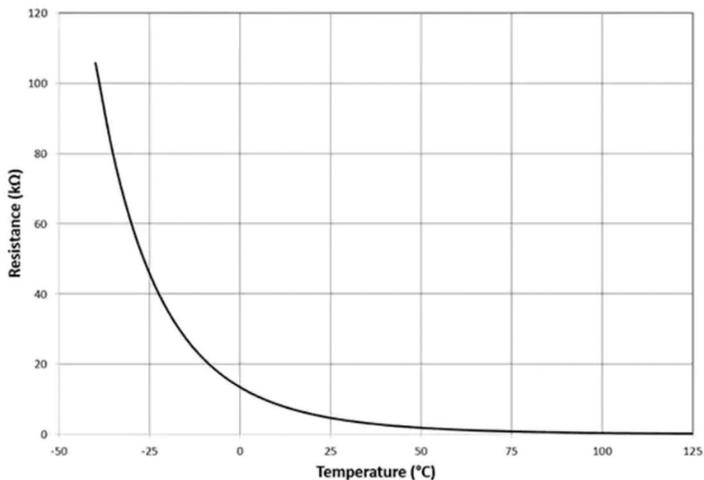


Abbildung 2.8: Typische Thermistor-R/T-Charakteristik

Die Vorteile von NTC-Thermistoren sind:

Empfindlichkeit: Einer der Vorteile von Thermistoren im Vergleich zu Thermoelementen und RTDs ist ihre große Widerstandsänderung mit der Temperatur, typischerweise -5% pro $^{\circ}\text{C}$.

Kleine Größe: Thermistoren sind sehr klein. Dies erlaubt sehr schnelle Reaktionen auf Temperaturänderungen. Dieses Merkmal ist sehr in Temperaturregelungssystemen, bei welchen eine schnelle Reaktion erforderlich sein kann.

Robustheit: Die meisten Thermistoren sind robust und können mechanischen und thermischen Stößen und Vibrationen besser standhalten als andere Arten von Temperatursensoren.

Fernmessung: Thermistoren können verwendet werden, um die Temperatur an entfernten Orten über lange Kabel zu messen, da der Widerstand eines langen Kabels im Vergleich zum relativ hohen Widerstand eines Thermistors unbedeutend ist.

Kostengünstig: Thermistoren kosten weniger als die meisten anderen Arten von Temperatursensoren.

Austauschbarkeit: Thermistoren können mit sehr engen Toleranzen hergestellt werden. Dadurch ist es möglich, Thermistoren auszutauschen, ohne das Messsystem neu kalibrieren zu müssen.

Thermistoren können aufgrund des durch sie fließenden Stroms unter Selbsterhitzungsproblemen leiden. Wenn sich ein Thermistor selbst erwärmt, fällt der Widerstandswert relativ zu seinem wahren Wert ab, was zu Fehlern in der gemessenen Temperatur führt. Es ist daher wichtig, den elektrischen Strom durch einen Thermistor zu minimieren.

Thermistoren können in Schaltungen in Reihe mit einem bekannten genauen Festwiderstand verwendet werden. Wird die Spannung über dem Thermistor gemessen, kann sein Widerstand berechnet werden. Alternativ können Konstantstrom-, Brücken- oder Operationsverstärkerschaltungen entwickelt werden, um den Widerstand eines Thermistors zu messen. Nachdem der Widerstand eines Thermistors ermittelt wurde, kann die Temperatur mithilfe von Tabellen (falls verfügbar) oder einer Bibliotheksfunktion (falls verfügbar) berechnet werden oder es kann die hier angegebene Standard-Steinhart-Hart-Gleichung verwendet werden:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right)$$

oder

$$T = \frac{1}{1/B \ln(R/R_0) + 1/T_0}$$

Dabei ist T_0 die Raumtemperatur in K (298,15), B die Temperaturkonstante des Thermistors, R_0 der Thermistorwiderstand bei Raumtemperatur und R der gemessene Widerstand des Thermistors. Hier ein Beispiel dazu:

Beispiel

Die Temperaturkonstante eines Thermistors ist $B = 2910$. Außerdem beträgt sein Widerstand bei Raumtemperatur (25 °C) 1 kΩ. Dieser Thermistor wird in einem elektrischen Schaltkreis verwendet, um die Temperatur zu messen, und es wurde festgestellt, dass der

