

# Anleitung

## zum Versuch

### Messkette

I.	Einleitung .....	1
II.	Was Sie zur Vorbereitung lernen sollten .....	1
III.	Literatur .....	1
IV.	Theoretische und technische Grundlagen .....	2
IV.1.	Theoretische Grundlagen .....	2
IV.1.1.	Statische Charakterisierung .....	2
IV.1.2.	Dynamische Charakterisierung .....	4
IV.2.	Technische Grundlagen .....	6
IV.2.1.	Widerstandstemperatursensor Pt100 und Messplatine .....	6
IV.2.2.	Referenztemperatursensor DS18B20 .....	8
IV.2.3.	Weitere Komponenten des Praktikumsversuchs .....	8
V.	Aufgabenstellung .....	9
V.1.	Statische Charakterisierung .....	9
V.1.1.	Versuchsaufbau und Durchführung .....	9
V.1.2.	Auswertung .....	11
V.2.	Dynamische Charakterisierung .....	13
V.2.1.	Versuchsdurchführung .....	13
V.2.2.	Auswertung .....	14
Anlage A:	Pt100-Kennlinie nach DIN EN 60751 .....	15
Anlage B:	Datenblatt der MAX31865 Messbrücke .....	16
Anlage C:	Datenblatt des DS18B20 Temperatursensors .....	17
Anlage D:	Farbcodierung ohmscher Widerstände .....	18

## **Anleitung zum Versuch Messkette**

### **I. Einleitung**

Eine Messkette ist eine Zusammenschaltung von Übertragungsgliedern eines Messsystems, die ein Gesamtübertragungsverhalten haben, welches sich aus dem der einzelnen Glieder zusammensetzt. Die Charakterisierung von Messketten gehört zu den fundamentalen Aufgaben in der Messtechnik. Erst nach einer detaillierten statischen und dynamischen Charakterisierung können mit einer Messkette sinnvolle Messungen und die zugehörigen Fehlerbetrachtungen vorgenommen werden. Im Versuch soll exemplarisch eine Temperaturmesskette statisch und dynamisch charakterisiert werden, wobei zur Auswertung auch Standardfunktionen üblicher Tabellenkalkulationsprogramme zum Einsatz kommen. Neben der grundlegenden Methodik der statischen und dynamischen Charakterisierung werden im Praktikum auch der Umgang mit Microcontroller-Boards am Beispiel des Arduino und das Messen mit Widerstandsthermometern vertieft.

### **II. Was Sie zur Vorbereitung lernen sollten**

Für die Laborübung **Messkette** müssen Sie sich über die grundlegenden theoretischen Hintergründe zur statischen und dynamischen Charakterisierung informieren. Dazu gehören die Grunddefinitionen der statischen und dynamischen Charakterisierung – z.B. die Begriffe Kennlinie, Empfindlichkeit, PT1-, IT1- und DT1-Glieder, die Sprungantworten verschiedener Übertragungsglieder und die Frage der Linearisierung von Kennlinien. Darüber hinaus müssen Sie mit grundsätzlichen Fragestellungen der Temperaturmessung, der Charakteristik von Temperatursensoren auseinandersetzen. Zusätzlich sind die üblichen Kenntnisse der Fehlerbetrachtung/Fehlerrechnung notwendig. Rekapitulieren Sie zudem den Aufbau von Schaltungen mit dem Microcontroller-Board und dessen Programmierung.

### **III. Literatur**

- Anleitung zur statischen und dynamischen Charakterisierung von Messgliedern
- Anleitung zur Fehlerrechnung
- Anleitung zur Anfertigung von Versuchsprotokollen
- Anleitung Arduino
- Bernhard, F.: Technische Temperaturmessung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2004.

## IV. Theoretische und technische Grundlagen

### IV.1. Theoretische Grundlagen

#### IV.1.1. Statische Charakterisierung

Das Ergebnis einer solchen statischen Charakterisierung ist die sogenannte **Kennlinie**, die den funktionalen Zusammenhang zwischen dem Eingangssignal und dem Ausgangssignal liefert.

Für einzelne Übertragungsglieder wird diesen meist vom Hersteller als Standardkennlinie angegeben. Übertragungsglieder, z.B. Sensoren, die eine geringe Abweichung zu dieser Standardkennlinie aufweisen, sind jedoch relativ kostenintensiv, sodass man für preiswerte Sensoren die Messunsicherheit deutlich senken kann, indem man diese kalibriert. Für Messketten aus mehreren Übertragungsgliedern liegt in der Regel keine Kennlinie vor. Dann ist eine Kalibrierung meist unumgänglich.

Bei den Kennlinien müssen wir zwischen **linearen Kennlinien** – die einen Sonderfall darstellen – und **nicht-linearen Kennlinien** unterscheiden. Bei einer linearen Kennlinie besteht zwischen  $x_e$  und  $x_a$  ein linearer funktionaler Zusammenhang in der Form

$$x_a = E x_e + b \quad (1)$$

wobei E die **Empfindlichkeit** und b den **Offset** der Kennlinie bezeichnen.

Die Empfindlichkeit ihrerseits ist als Änderung des Ausgangssignals mit dem Eingangssignal, also als Ableitung der Kennlinie nach dem Eingangssignal, definiert. Dabei muss, um die Definition allgemein halten zu können, beachtet werden, dass sich bei einer nicht-linearen Kennlinie die Empfindlichkeit mit dem Eingangssignal ändert. Das heißt für nicht-lineare Kennlinien wird die Empfindlichkeit bestimmt als Ableitung der Kennlinie nach dem Eingangssignal, genommen an einem Arbeitspunkt  $x_1$ , an dem später die Messungen durchgeführt werden sollen:

$$E = \left. \frac{dx_a}{dx_e} \right|_{x=x_1} . \quad (2)$$

Nur für lineare Kennlinien ist die Empfindlichkeit konstant.

Da in der Mess- und Automatisierungstechnik die dynamische Charakterisierung von Messgliedern in der Regel über die lineare Systemanalyse betrieben wird, werden nicht-lineare Kennlinien häufig am gewünschten Arbeitspunkt linearisiert. Dies kann entweder über eine **Sekantenlinearisierung** erfolgen, wobei, wie in Abbildung 1 gezeigt, zwei Punkte oberhalb und unterhalb des Arbeitspunkts ausgewählt werden und durch diese die Sekante verläuft. Dieses Verfahren wird häufig eingesetzt, wenn für eine Kennlinie nur wenige diskrete Stützstellen bekannt sind.

Eine Sekantenlinearisierung führt zu einem vergleichsweise großen Arbeitsbereich, in dem eine nur begrenzte Genauigkeit der Annäherung der linearisierten Kennlinie an die reale Kennlinie vorliegt.

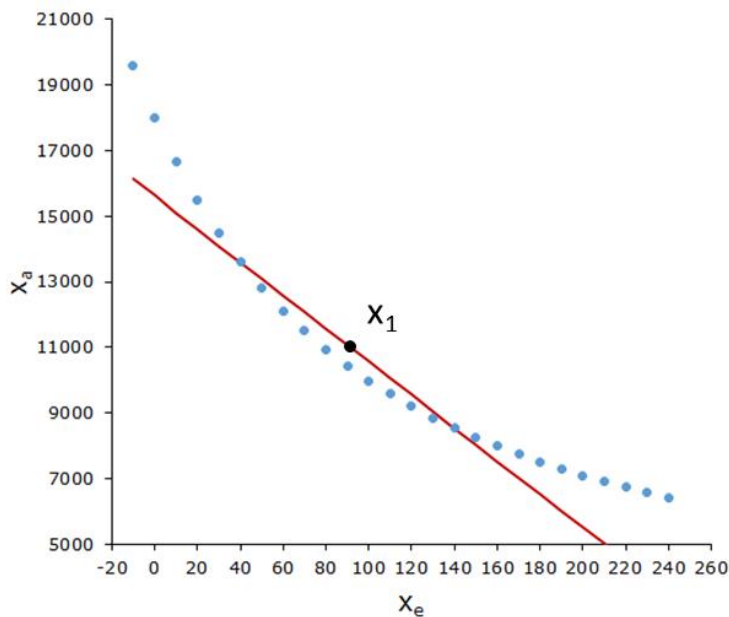


Abb. 1: Sekantenlinearisierung einer nichtlinearen Kennlinie über zwei Punkte oberhalb und unterhalb des Arbeitspunkts  $x_1$ .

In einem kleineren Arbeitsbereich mit höherer Genauigkeit kann die Kennlinie durch eine **Tangentenlinearisierung** genähert werden. Hierzu wird in den Arbeitspunkt eine Tangente an die Kennlinie angelegt. Mathematisch erfolgt dies über eine Taylor-Entwicklung, die nach dem linearen Glied abgebrochen wird.

$$f(x_1 + \Delta x) = f(x_1) + \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{x=x_1} \Delta x \quad (3)$$

Hierbei ist zu beachten, dass sowohl der Funktionswert der Kennlinie als auch die Ableitung der Kennlinie – also die Empfindlichkeit – am Arbeitspunkt verwendet werden müssen, um die entsprechende Tangente zu beschreiben.

Eine weitere wichtige Information, die aus der statischen Charakterisierung gewonnen werden kann, ist die Information über den grundsätzlichen Typ des Übertragungsglieds. Wir unterscheiden an dieser Stelle drei verschiedene Typen von Übertragungsgliedern. **P-Glieder** sind solche, bei denen das Ausgangssignal proportional zum Eingangssignal ist.

$$x_a = K x_e \quad (4)$$

Bei **I-Gliedern** ist das Ausgangssignal proportional zum zeitlichen Integral des Eingangssignals

$$x_a = K_I \int x_e dt \quad (5)$$

und bei D-Gliedern ist  $x_a$  proportional zur zeitlichen Ableitung von  $x_e$

$$x_a = K_D \dot{x}_e \quad (6)$$

Die Bestimmung dieses Grundtyps eines Übertragungsglieds oder in unserem speziellen Fall der gesamten Messkette, stellt die Grundlage für die systemtheoretische Beschreibung der Messkette und damit für ihre dynamische Charakterisierung dar.

#### IV.1.2. Dynamische Charakterisierung

Bei der dynamischen Charakterisierung geht es darum, das zeitliche Verhalten eines Übertragungsglieds bzw. wie hier im Praktikum der gesamten Messkette bei einer Änderung des Eingangssignals zu beschreiben. Die Tatsache, dass überhaupt eine Zeitabhängigkeit des Ausgangssignals oder konkreter ein zeitlicher Verzug der Entwicklung des Ausgangssignals gegenüber Veränderungen des Eingangssignals auftritt, hängt damit zusammen, dass in einem oder mehreren Übertragungsgliedern der Messkette Energie- oder/und Stoffspeicher gefüllt oder entleert werden müssen. Dieses Auffüllen oder Entleeren eines Speichers führt zu einer zeitlichen Verschiebung zwischen Veränderungen des Eingangssignals und Veränderungen des Ausgangssignals.

Eine detaillierte Beschreibung der dynamischen Charakterisierung finden Sie in der **Anleitung statische und dynamische Charakterisierung von Mess- und Übertragungsgliedern**.

Wenn möglich, erfolgt eine dynamische Charakterisierung experimentell über die Auswertung einer Sprungantwort  $h(t)$ . Hierzu wird das Übertragungsglied bzw. die gesamte Messkette einer stufenförmigen Veränderung des Eingangssignals, wie sie in Abbildung 2 gezeigt ist, ausgesetzt.

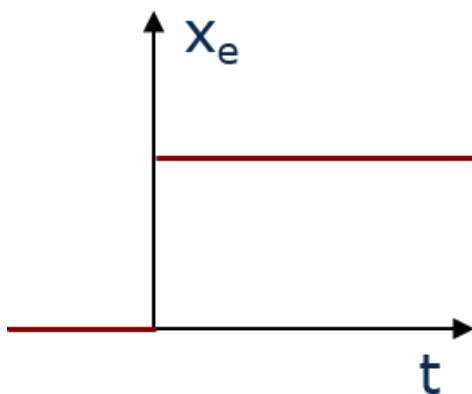


Abb. 2: Sprungfunktion zum Test des dynamischen Verhaltens eines Übertragungsglieds oder einer Messkette.

Durch das Auffüllen bzw. Entleeren des Speichers wird sich das Ausgangssignal  $x_a(t) = h(t)$  zeitlich verzögert dem stationären Endwert annähern. Die Art und Weise wie diese Antwort aussieht hängt maßgeblich davon ab, welchen Grundtyp die Messkette hat.

Abbildung 3 zeigt für PT1-, IT1-, und DT1-Glieder – also Messglieder, die proportional, integral oder differentiell in ihrem Grundtyp sind und die aufgrund eines vorhandenen Energiespeichers ein **T1-Verhalten** aufweisen – die entsprechenden Sprungantworten, zu denen die nachstehend angegebenen Gleichungen (7) gehören.

$$\begin{aligned}
 \text{PT1:} \quad h(t) &= K \left( 1 - e^{-t/T_1} \right) \\
 \text{IT1:} \quad h(t) &= K_I \left( t - T_1 + T_1 e^{-t/T_1} \right) \\
 \text{DT1:} \quad h(t) &= \frac{K_D}{T_1} e^{-t/T_1}
 \end{aligned} \tag{7}$$

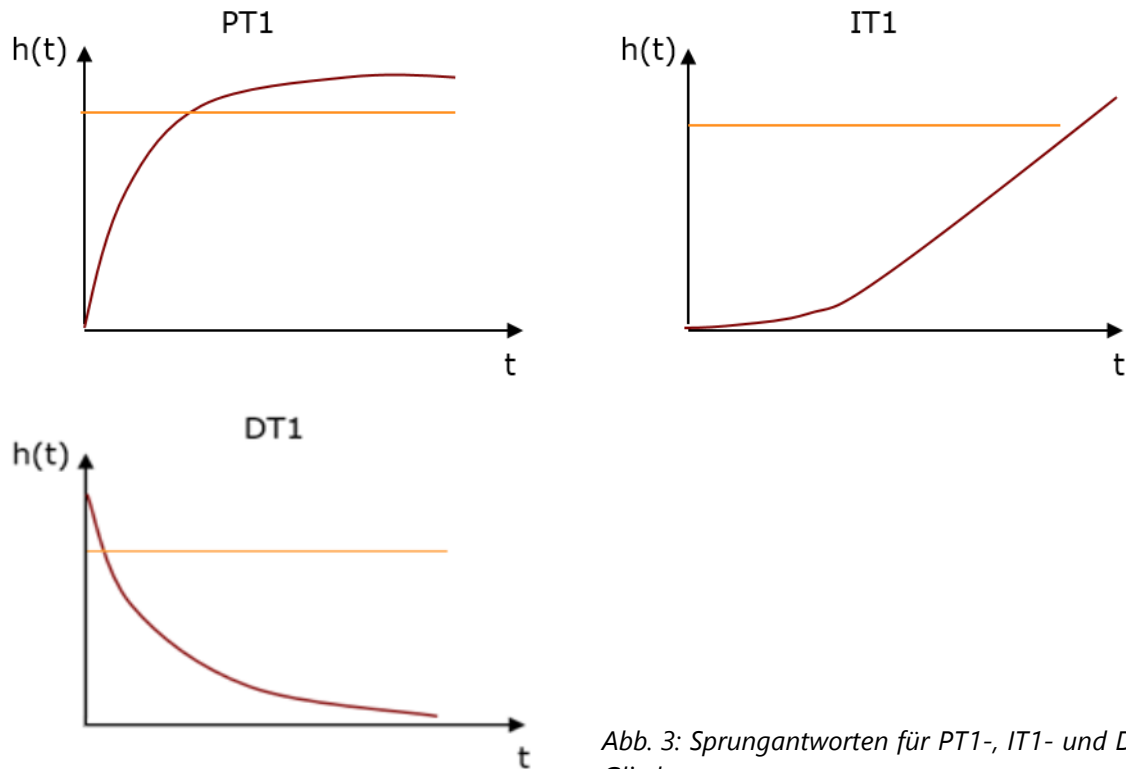


Abb. 3: Sprungantworten für PT1-, IT1- und DT1-Glieder.

Aus den Sprungantworten können eine Reihe von charakteristischen Zeiten, die für die Beschreibung des dynamischen Verhaltens der Messkette wesentlich sind, direkt abgelesen werden. Zunächst kann die Zeit  $T_{0,95}$  bestimmt werden, zu der 95 % des stationären Endwerts des Ausgangssignals erreicht ist. Dies ist in Abbildung 4 für ein PT1-Verhalten skizziert.

Darüber hinaus kann die charakteristische Zeit  $T_1$  des Übertragungsglieds über den Schnittpunkt der Tangente an den Verlauf des Ausgangssignals bei  $t=0$  mit dem stationären Endwert bestimmt werden. Es ist dabei zu beachten, dass Sprungfunktionen sowohl von einem niedrigeren Niveau des Ausgangssignals auf ein höheres Niveau des Ausgangssignals führen können, wie es in Abbildung 4 gezeigt ist, als auch von einem höheren Niveau des Ausgangssignals auf ein tieferes Niveau des Ausgangssignals, wie dies in Abbildung 5 skizziert ist. Die Bestimmung der  $T_1$  und der  $T_{0,95}$  Zeit müssen entsprechend angepasst werden.

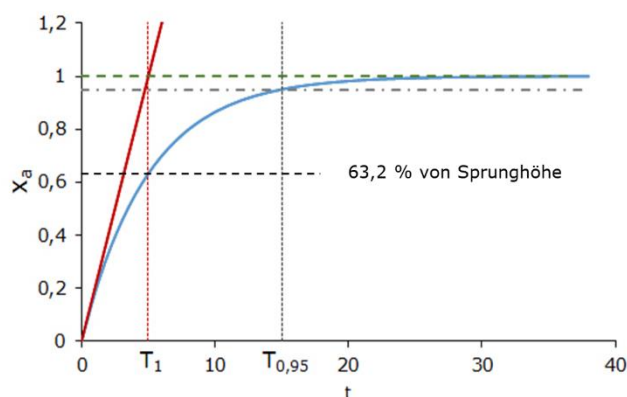


Abb. 4: Sprungantwort für PT1-Glied bei Sprung von einem tieferen auf ein höheres Niveau des Ausgangssignals mit Bestimmung der charakteristischen Zeiten  $T_1$  und  $T_{0,95}$ .

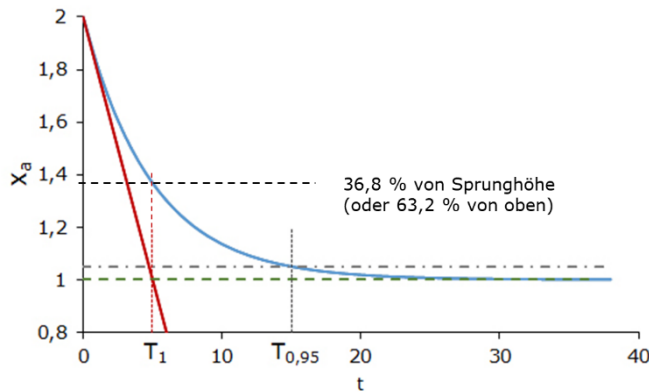


Abb. 5: Sprungantwort für PT1-Glied bei Sprung von einem höheren auf ein tieferes Niveau des Ausgangssignals mit Bestimmung der charakteristischen Zeiten  $T_1$  und  $T_{0,95}$ .

## IV.2. Technische Grundlagen

Im Praktikum werden wir die Charakterisierung einer Messkette speziell für eine **Temperaturmessung** durchführen. Dabei soll sowohl die statische wie die dynamische Charakterisierung vorgenommen werden. Als Sensor wird ein Pt100-Widerstandsthermometer eingesetzt, das über eine Messplatine (AD-Wandler) mit dem Arduino verbunden ist. Gemessen wird die Temperatur in Wasserbädern.

### IV.2.1. Widerstandstemperatursensor Pt100 und Messplatine

In der Messkette werden wir **Widerstandstemperatursensoren** verwenden, bei denen sich der ohmsche Widerstand des Sensors mit der Temperatur verändert, woraus das entsprechende Messsignal entsteht. Bei den Widerstandstemperatursensoren unterscheiden wir zwei Arten von Sensoren: einerseits **Metallsensoren**, andererseits **Halbleitersensoren**.

Bei den Metallwiderstandssensoren wird die Tatsache genutzt, dass mit steigender Temperatur durch eine Erhöhung der Gitterschwingungen des Atomgerüsts des Metalls im Sensor eine Erhöhung des ohmschen Widerstands auftritt.

Die Handelsbezeichnungen solcher Sensoren setzen sich üblicher Weise aus dem verwendeten Metall und dem Widerstand bei einer bestimmten Temperatur zusammen. So ist zum Beispiel ein Pt100 Fühler ein Platin-Fühler, der bei 0°C einen Widerstand von 100  $\Omega$  aufweist. Dieser sehr verbreitete Sensor kommt auch in diesem Praktikum zum Einsatz.

Metallwiderstandssensoren für die Temperaturmessung sind durch eine im Wesentlichen lineare Kennlinie gekennzeichnet

$$R(T) = R_0 (1 + \alpha (T - T_0)) \quad \text{mit } R(T_0) = R_0 \quad , \quad (8)$$

die einen relativ kleinen Temperaturkoeffizienten

$$\alpha = \frac{1}{R_0} \frac{dR}{dT} \quad (9)$$

hat.

Im Gegensatz dazu haben Halbleiterwiderstandssensoren, bei denen die Widerstandsänderung dadurch entsteht, dass Temperaturänderungen zu Veränderungen der Besetzung des Leitungsbandes mit freien Elektronen führen, eine nicht-lineare Kennlinie mit einer in der Regel sehr großen Empfindlichkeit, das heißt einem sehr großen Temperaturkoeffizienten.

Wir unterscheiden hierbei Heißeiter- bzw. **NTC**-Thermistoren (NTC = negative temperature coefficient), deren Kennlinie die Form

$$R(T) = R_0 e^{b\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} = K_0 e^{\frac{b}{T}} \quad (10)$$

hat, und Kaltleiter bzw. **PTC-Thermistoren** (PTC = positive temperature coefficient) mit einer Kennlinie in der Form

$$R(T) = R_0 e^{b(T-T_0)} \quad (11).$$

In diesem Praktikum ist der Temperaturfühler ein Pt100-Sensor. Dieser ist genormt und nähere Spezifikationen können Anlage A entnommen werden.

Bei der Temperaturmessung mit Widerstandstemperatursensoren ist folglich eine Widerstandsmessung durchzuführen. Dies kann z.B. mit einer Wheatstone-Brücke wie im Praktikum **Dehnungsmessung** realisiert werden. Für den Versuch Messkette wird zur Vereinfachung eine Messplatine mit dem AD-Wandler MAX31865 zwischen Sensor und Arduino geschaltet, die den Widerstand in einen Digitalwert  $u$  umwandelt. Dieser Digitalwert hat eine Auflösung von 15 bit und ist die Ausgangsgröße unserer Messkette, die auch bei weitere Übertragung nicht verändert wird. Dieser Wert wird über eine SPI Schnittstelle an den Arduino gesendet. Das Auslesen erfolgt über die externe Software-Bibliothek *Adafruit\_MAX31865*. Der Pt100-Sensor kann an diese Platine in 2-, 3- oder 4-Leiterschaltung angeschlossen werden. Nähere Informationen zum MAX 31865 können Sie Anlage B entnehmen.



#### **IV.2.2. Referenztemperatursensor DS18B20**

Um parallel zur Messung mit der Messkette die Wasserbadtemperatur zu ermitteln, wird ein zweiter Sensor – der digitale Referenzsensor DS18B20 eingesetzt. Dabei handelt es sich ebenfalls um ein weit verbreitetes und kostengünstiges Sensorelement für den Arduino. Die Messunsicherheit von  $\pm 0,5$  K ist für eine Referenzmessung in diesem Temperaturbereich zwar relativ hoch, das Prinzip der Charakterisierung wird davon jedoch nicht beeinträchtigt. Der eigentliche Temperatursensor ist in diesem Falle ein Thermistor, genauer gesagt ein NTC-Halbleiter-Widerstand, der sich durch eine besonders hohe Empfindlichkeit auszeichnet. Zudem hat der Sensor einen integrierten AD-Wandler, der den Widerstand in einen Digitalwert mit einer Auflösung zwischen 9 und 12 Bit (hier 12 Bit) umgewandelt. Dieser Wert wird anschließend über ein 1-Wire-Interface vom Arduino ausgelesen. Mit der Software-Bibliothek *DallasTemperature* wird dieser Wert in eine Temperatur umgerechnet, die vom Messrechner ausgelesen wird. Weitere Informationen zu diesem Sensor finden Sie in Anlage C

#### **IV.2.3. Weitere Komponenten des Praktikumsversuchs**

Wie bei allen Koffer-Praktika ist das Microcontroller-Board *Arduino Uno R3* die zentrale Komponente des Messaufbaus. Bezüglich Aufbau und Funktionsweise des Arduinos und der Arduino-IDE verweisen wir hier auf die separate **Anleitung Arduino**. Für die Arduino-IDE benötigen Sie einen eigenen Rechner mit USB-A-Anschluss. Die erforderlichen Programme sowie eine Protokollvorlage werden auf OPAL bereitgestellt.

Neben den bisher aufgeführten Komponenten werden für dieses Praktikum diverse Kleinteile, die sich im Koffer befinden, sowie zwei Gefäße benötigt, die als Wasserbäder dienen. Für den ersten Teilversuch eignet sich eine Tasse und für den Zweiten ein etwas größeres Gefäß, in das **mindestens 500 ml** heißes Wasser eingefüllt werden kann.

## V. Aufgabenstellung

Die Messkette, die im Rahmen des Praktikums charakterisiert werden soll, ist zunächst aufzubauen. Dafür benötigen Sie folgende Komponenten aus dem Praktikumskoffer, sowie den Messrechner mit Arduino-IDE und die zwei Wasserbäder:

- 1x Arduino Uno R3 (oder baugleich) mit USB-Kabel
- 1x Steckplatine (Breadboard)
- 1x Digitales Eindraht-Thermometer (DS18B20, wasserdicht ummantelt)
- 1x Pt100-Verstärker (Messplatine mit A/D-Wandler MAX31865)
- 1x Pt100-Sensor (wasserdicht ummantelt)
- 1x 100 Ohm Widerstand
- 1x 4,7 kOhm Widerstand
- 1x Drucktaster
- 15x Steckplatinen-Kabel (Stecker/Stecker)
- 1x Klammer

Die Farbcodierung der Widerstände ist in Anlage D dokumentiert.

### V.1. Statische Charakterisierung

#### V.1.1. Versuchsaufbau und Durchführung

Eine Kennlinie wird experimentell ermittelt, indem man die Eingangsgröße  $x_e$  mit einem oder mehreren hinreichend genauen Kalibriernormalen vorgibt und die Ausgangsgröße  $x_a$ , die sich nach einem Einschwingvorgang einstellt, protokolliert. Diese beiden Größen werden anschließend gegeneinander aufgetragen. Durch diese Punktwolke wird eine geeignete Fitfunktion gelegt, welche die Kennlinie darstellt. Anstelle von Kalibriernormalen kann man auch den Wert der Eingangsgröße mit einer Referenzmessung ermitteln, wie es in diesem Praktikum der Fall ist.

Im Praktikum ist die Eingangsgröße die Temperatur. Unterschiedliche Temperaturen werden realisiert, indem man heißes Wasser abkühlen lässt und dabei die Ausgangsgröße der Messkette, also den Digitalwert  $u$ , sowie die Temperatur des Wassers mit dem Referenzsensor DS18B20 misst. In dem Arduino-Programm *kalib.ino* ist eine Standardkennlinie für die Messkette hinterlegt, die zudem den Widerstand und eine Temperatur der unkalibrierten Messkette als Zusatzinformation ausgibt.

Bauen Sie die Schaltung entsprechend Abb. 6 auf und verbinden Sie den Arduino über das USB-Kabel mit Ihrem Rechner. Achten Sie auf eine vollständige Kontaktierung der

Pins. Gegebenenfalls kann bei Neuteilen die Erstmontage schwergängig sein. Der Pt100-Sensor wird über die Schraubklemmen an der Messplatine angeschlossen. Hierfür benötigen Sie einen kleinen Kreuzschlitzschraubendreher. Öffnen Sie das Programm *kalib.ino*, welches beide Sensoren abfragt, und vollziehen Sie anhand der Kommentare Aufbau und Funktionsweise des Programms nach. Das Programm stellt die notwendige Grundfunktionalität her, ist aber nicht zwangsläufig die beste Lösung für die Problemstellung. So werden beispielsweise durch die konstante Abtastrate deutlich mehr Daten aufgezeichnet als notwendig, gerne können Sie Anpassungen und Erweiterungen am Programm vornehmen. Testen Sie Soft- und Hardware und installieren Sie ggf. fehlende Bibliotheken, auf die am Anfang des Quellcodes verwiesen ist.

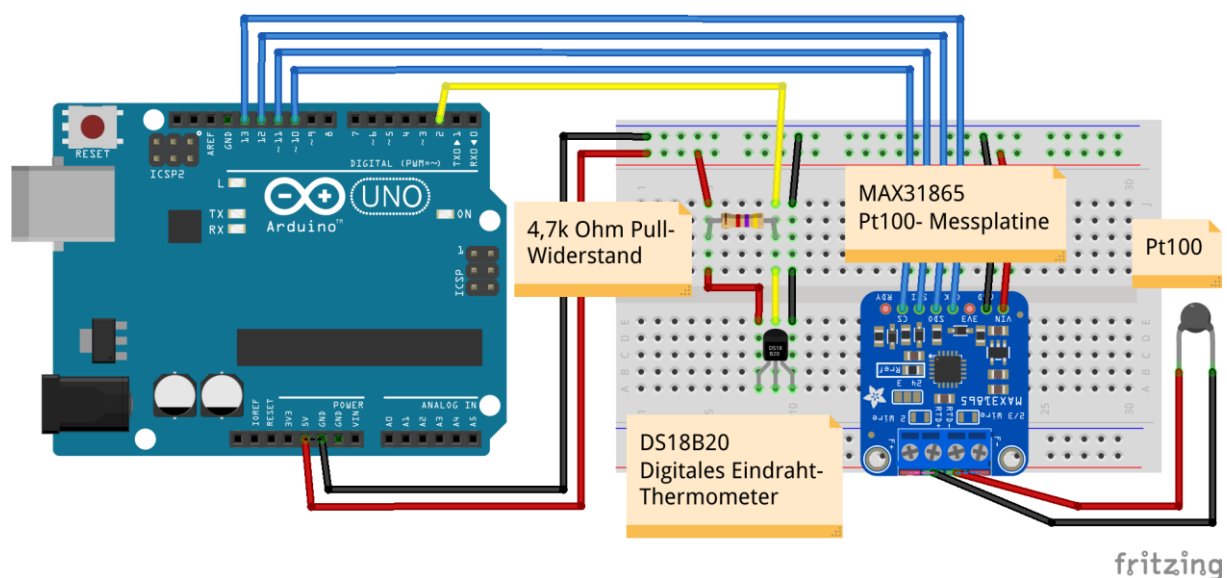


Abbildung 6: Messaufbau für die statische Charakterisierung

Nehmen Sie nun das erste Gefäß – wir empfehlen eine Tasse mit einem Fassungsvermögen von ca. 200 ml – wärmen dies am besten noch vor und füllen kochend heißes Wasser hinein. Anschließend positionieren Sie den Pt100-Sensor und den Referenzsensor in diesem Gefäß. Achten Sie also darauf, dass sich die Sensoren an möglichst derselben Stelle befinden und dort verbleiben. Dazu bietet sich ein Fixieren mit der Klammer an. Achten Sie dabei darauf, dass alle anderen Bauteile – insbesondere das Arduino-Board und die Steckplatine – nicht mit dem Wasser in Berührung kommen. Unter der Annahme, dass beide Sensoren nun die gleiche Temperatur haben, gibt der D18B20S die Temperatur aus während gleichzeitig der Pt100 über die Messplatine einen Digitalwert liefert.

Nach dem Hochladen des Programms werden die Daten im seriellen Monitor der Arduino IDE ausgegeben. Die gemessenen Daten können Sie im Anschluss an die Messung

aus dem seriellen Monitor des Programms kopieren und in dem Tabellenkalkulationsprogramm einfügen.

- Fertigen Sie ein Foto des Versuchsaufbaus an und fügen Sie dieses in der Protokolldatei ein.
- Führen Sie die Messung in einem möglichst breiten Temperaturbereich durch! Dabei sollten Sie eine Starttemperatur von 85°C nicht unterschreiten und eine Endtemperatur von 25°C nicht überschreiten. Bei höheren Raumtemperaturen kann ggf. durch Zugabe von Eis die Temperatur weiter und schneller abgesenkt werden. Notieren Sie die verwendete Wassermenge, die Messzeit und die Raumtemperatur. **Typischer Weise dauert die Messung 2-3 Stunden.** Bedenken Sie dies bei Ihrer Versuchsplanung.

### **V.1.2. Auswertung**

Berücksichtigen Sie bei der Protokollerstellung die Anleitung *Anfertigung von Versuchsprotokollen*, welcher Ihnen über die Lehrplattform OPAL zur Verfügung gestellt wird. Nutzen Sie für die Datenauswertung eine Software ihrer Wahl. Dabei kann es sich zum Beispiel um *Microsoft Excel*, *LibreOffice Calc\**, *Matlab*, *Python\** usw. handeln (\* *kostenfrei und open source*).

Die Protokollvorlage, die Sie ebenfalls im OPAL—Kurs finden, enthält unter anderem den *Dokumentenkopf*, in dem Sie folgende Daten eintragen: jeweils Vorname, Name, Matrikelnummer und Studienrichtung aller Bearbeiter:innen sowie das Datum der Protokollanfertigung. Außerdem sind Koffernummer und Durchführungsort anzugeben. Beschreiben Sie die *Auswerteverfahren* präzise und orientieren Sie sich an den Methoden, die in der Vorlesung behandelt werden. Sonstige Auswerteverfahren sind zu erläutern und ggf. mit Quelle zu benennen. Beschreiben und dokumentieren Sie ihr Handeln knapp und präzise und begründen Sie Ihre Entscheidungen. Beachten Sie bei der Darstellung von Diagrammen: Beschreibung, Titel, Achsenbeschriftung (inkl. Einheiten) und Achsenformatierung, Legende, übersichtliche Darstellung (Farbauswahl, Linienart, Markierungen und Beschriftungen, Skalierung).

Bei *Tabellen* sind die wesentlichen Bestandteile: Beschreibung, Titel, Zeilen- und Spaltenbeschriftung inkl. Einheiten, Formatierung, übersichtliche Darstellung.

- Tragen Sie im Protokoll die Basisdaten (Messzeit, Raumtemperatur, etc.) für die statische Charakterisierung ein.
- Stellen Sie den zeitlichen Verlauf der Eingangs- und Ausgangsgröße beider Sensoren in einem Diagramm dar.
- Tragen Sie nun Eingangs- und Ausgangsgröße der Messkette gegeneinander auf und fügen Sie dieses Diagramm in das Protokoll ein
- Die Verteilung der Datenpunkte ist zunächst ungleichmäßig, d.h. für niedrige Temperaturen existieren wesentlich mehr Datenpunkte als für hohe Temperaturen. Dies würde eine Kurvenanpassung verfälschen. Definieren Sie deshalb 10 Stützpunkte (X,Y) mit annähernd gleichem Abstand auf der Temperaturachse, die Sie durch Mittelwertbildung aus je 10 Messwerten ermitteln. Stellen Sie in einer Beispielrechnung dar, wie Sie Mittelwert sowie Standardabweichung berechnen und notieren Sie diese Werte für alle Stützstellen/-werte.
- Stellen Sie im Kalibrierbereich einen linearen Zusammenhang zwischen der Referenztemperatur und den gemessenen Digitalwerten her. Nennen Sie den Funktionsansatz, die Koeffizienten sowie deren absoluten wahrscheinlichen Fit-Fehler. Stellen Sie die Stützwerte als Punkte mit Fehlerbalken (doppelte Standardabweichung) und die Kennlinie als Linie graphisch dar.
- Berechnen Sie den absoluten wahrscheinlichen Fehler der gesamten Messkette mit Pt100-Sensor im Kalibrierbereich. Dieser setzt sich aus dem Fit-Fehler und der Messunsicherheit des Referenzsensors laut Datenblatt im Anhang (*sollte in K entsprechend DIN 1345 angegeben werden*) zusammen. Nehmen Sie für den Fit-Fehler die doppelte Standardabweichung an (entspricht 95% Überdeckungswahrscheinlichkeit).
- Rechnen Sie die Ausgangsgröße  $u$  durch Umstellen der zuvor ermittelten Kennlinie für den gesamten Kalibrierbereich in eine Temperatur um. Berechnen Sie die Differenz zwischen dieser Temperatur und der aus der Standardkennlinie (*in K entsprechend DIN 1345*). Stellen sie Differenz mit Fehlerbalken in einem Diagramm über dem gesamten Temperaturbereich dar, um deutlich zu machen was Sie durch die Kalibrierung gewinnen.

## V.2. Dynamische Charakterisierung

### V.2.1. Versuchsdurchführung

Im zweiten Teil des Praktikums soll der Pt100-Sensor einer dynamischen Charakterisierung unterzogen werden. Hierfür wird der Pt100-Sensor in ein Wasserbad mit heißem Wasser fallen gelassen. Die Messwertaufnahme wird in diesem Versuch durch einen Drucktaster gestartet. Daher ist eine Anpassung der Schaltung notwendig. Das Schaltbild ist in Abbildung 7 dargestellt.

- Bauen Sie diese Schaltung auf und fertigen Sie wieder ein Foto des Versuchsaufbaus an, welches Sie in das Protokoll einfügen.

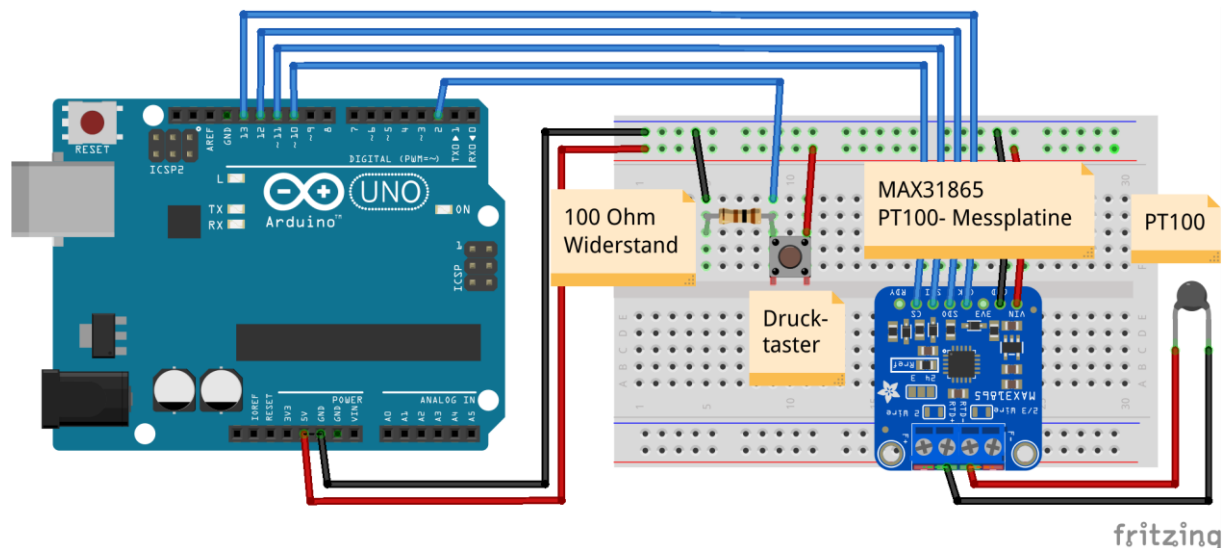


Abbildung 7: Messaufbau für die dynamische Charakterisierung

Stellen Sie nun ein das zweite Wasserbad mit mindestens 500 ml heißem Wasser bereit. Die Temperatur sollte mindesten 30 K über Raumtemperatur betragen. Für den folgenden Sprungversuch verwenden Sie bitte das Programm *sprung.ino*. Denken Sie sich anhand der Kommentare in das Programm ein und nehmen Sie ggf. Anpassungen vor.

Sind Arduino und Aufbau vorbereitet, laden Sie das Programm auf den Arduino und öffnen Sie wieder den seriellen Monitor.

- Starten Sie die Messung mittels Drucktaster und lassen Sie den Pt100-Sensor anschließend vorsichtig in das Wasserbad fallen. Warten Sie bis sich eine konstante Temperatur am Sensor einstellt. Eine kleine Wassermenge führt in der Regel zu einer sichtbaren Überlagerung des Sprungversuches des Sensors mit der Abkühlkurve des Wasserbades. Daher ist hier eine größere Wassermenge sowie eine etwas geringere Temperaturdifferenz zu wählen, sodass der thermische Gradient im Wasserbad verringert wird.

**V.2.2. Auswertung**

1. Tragen Sie wieder die Basisdaten des Versuchs in das Protokoll ein.
2. Stellen Sie den zeitlichen Verlauf der Temperatur (unkalibriert und kalibriert) im ges. Messzeitraum in einem Diagramm dar.
3. Ermitteln Sie durch geeignete Kriterien den Start- und Endzeitpunkt des Sprunges. Benennen Sie die gewählten Kriterien. Beziffern Sie die Dauer der Messung, in welcher Sie die Auswertung vornehmen. Geben Sie außerdem die Umgebungs- und Wassertemperatur an.
4. Ermitteln Sie die  $T_1$ -Zeit sowie die  $T_{0,95}$ -Zeit sowie die zugehörigen Temperaturen. Diskutieren Sie die verschiedenen Varianten zur Bestimmung dieser Kennzahlen und begründen Sie die Wahl Ihrer Vorzugsvariante.
5. Zeigen Sie in einem Diagramm den zeitlichen Verlauf des gemessenen Sprungs mit der normierten Sprunghöhe (im Intervall [0:1]) neben einer PT1-Sprungkennlinie mit gleicher  $T_1$ -Zeit. Ermitteln Sie im Diagramm die  $T_1$ -Zeit sowie die  $T_{0,95}$ -Zeit des Pt100-Sensors grafisch und geben Sie die Formel für die PT1-Kennlinie an! Diskutieren Sie das Sensorverhalten im Vergleich zum idealen PT1-Verhalten.

## Anlage A: Pt100-Kennlinie nach DIN EN 60751

Für den Temperaturbereich –200 °C bis 0 °C:

$$R_t = R_0 [1 + A \times t + B \times t^2 + C (t - 100 \text{ °C}) t^3] \quad (12)$$

Für den Temperaturbereich von 0 °C bis +850 °C:

$$R_t = R_0 (1 + A \times t + B \times t^2) \quad (13)$$

Dabei ist  $R_t$  der Widerstand bei der gemessenen Temperatur  $t$  in °C;  $R_0$  der Widerstand in Ohm bei  $t = 0$  °C. Die Werte der Konstanten in dieser Gleichung sind:

$$A = 3,908\,3 \times 10^{-3} \text{ °C}^{-1}$$

$$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ °C}^{-2}$$

$$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ °C}^{-4}$$

Diese Gleichungen und Koeffizienten wurden verwendet, um die Tabelle der Widerstandswerte, Tabelle 1, für einen Platin-Widerstand mit  $R_0 = 100 \, \Omega$  zu berechnen.

Tabelle 1: Auszug aus DIN EN 60751: Widerstand eines Pt100 von 0 °C bis 100 °C in Ohm

t/°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100,00	100,39	100,78	101,17	101,56	101,95	102,34	102,73	103,12	103,51
10	103,90	104,29	104,68	105,07	105,46	105,85	106,24	106,63	107,02	107,40
20	107,79	108,18	108,57	108,96	109,35	109,73	110,12	110,51	110,90	111,29
30	111,67	112,06	112,45	112,83	113,22	113,61	114,00	114,38	114,77	115,15
40	115,54	115,93	116,31	116,70	117,08	117,47	117,86	118,24	118,63	119,01
50	119,40	119,78	120,17	120,55	120,94	121,32	121,71	122,09	122,47	122,86
60	123,24	123,63	124,01	124,39	124,78	125,16	125,54	125,93	126,31	126,69
70	127,08	127,46	127,84	128,22	128,61	128,99	129,37	129,75	130,13	130,52
80	130,90	131,28	131,66	132,04	132,42	132,80	133,18	133,57	133,95	134,33
90	134,71	135,09	135,47	135,85	136,23	136,61	136,99	137,37	137,75	138,13



## Anlage B: **Datenblatt der MAX31865 Messbrücke**

<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31865.pdf>

### MAX31865

### RTD-to-Digital Converter

#### General Description

The MAX31865 is an easy-to-use resistance-to-digital converter optimized for platinum resistance temperature detectors (RTDs). An external resistor sets the sensitivity for the RTD being used and a precision delta-sigma ADC converts the ratio of the RTD resistance to the reference resistance into digital form. The MAX31865's inputs are protected against overvoltage faults as large as  $\pm 45V$ . Programmable detection of RTD and cable open and short conditions is included.

#### Applications

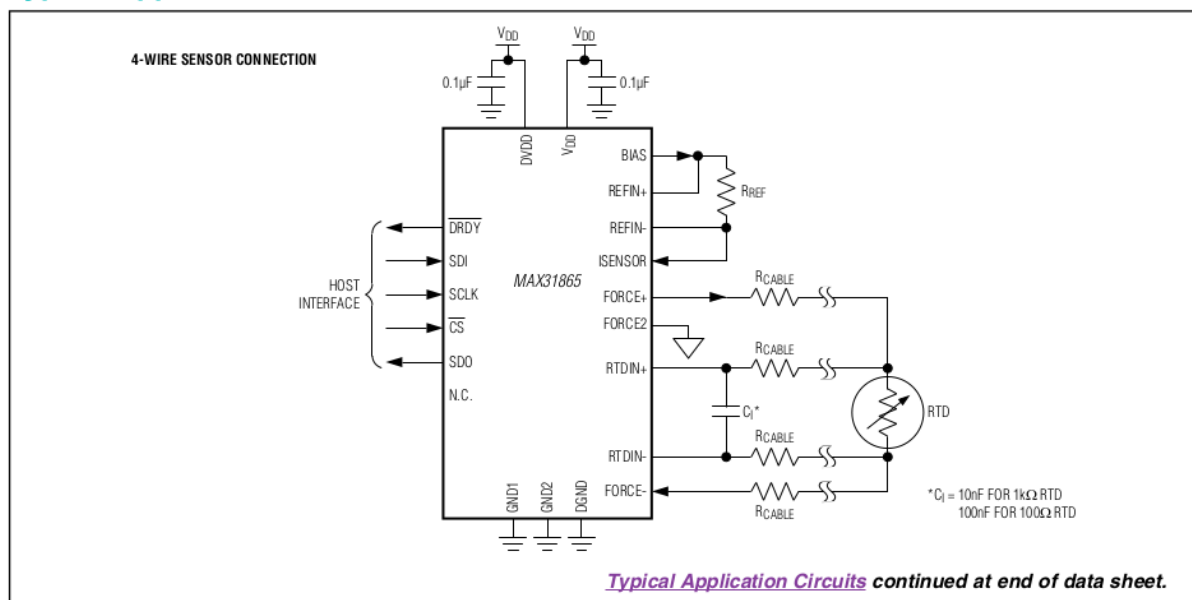
- Industrial Equipment
- Medical Equipment
- Instrumentation

*Ordering Information appears at end of data sheet.*

#### Benefits and Features

- Integration Lowers System Cost, Simplifies Design Efforts, and Reduces Design Cycle Time
  - Simple Conversion of Platinum RTD Resistance to Digital Value
  - Handles  $100\Omega$  to  $1k\Omega$  (at  $0^\circ C$ ) Platinum RTDs (PT100 to PT1000)
  - Compatible with 2-, 3-, and 4-Wire Sensor Connections
  - SPI-Compatible Interface
  - 20-Pin TQFN and SSOP Packages
- High Accuracy Facilitates Meeting Error Budgets
  - 15-Bit ADC Resolution; Nominal Temperature Resolution  $0.03125^\circ C$  (Varies Due to RTD Nonlinearity)
  - Total Accuracy Over All Operating Conditions:  $0.5^\circ C$  (0.05% of Full Scale) max
  - Fully Differential  $V_{REF}$  Inputs
  - 21ms (max) Conversion Time
- Integrated Fault Detection Increases System Reliability
  - $\pm 45V$  Input Protection
  - Fault Detection (Open RTD Element, RTD Shorted to Out-of-Range Voltage, or Short Across RTD Element)

#### Typical Application Circuits



## Anlage C: sensors

## Datenblatt des DS18B20 Temperatur-

<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>

### DS18B20

### Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer

#### General Description

The DS18B20 digital thermometer provides 9-bit to 12-bit Celsius temperature measurements and has an alarm function with nonvolatile user-programmable upper and lower trigger points. The DS18B20 communicates over a 1-Wire bus that by definition requires only one data line (and ground) for communication with a central microprocessor. In addition, the DS18B20 can derive power directly from the data line ("parasite power"), eliminating the need for an external power supply.

Each DS18B20 has a unique 64-bit serial code, which allows multiple DS18B20s to function on the same 1-Wire bus. Thus, it is simple to use one microprocessor to control many DS18B20s distributed over a large area. Applications that can benefit from this feature include HVAC environmental controls, temperature monitoring systems inside buildings, equipment, or machinery, and process monitoring and control systems.

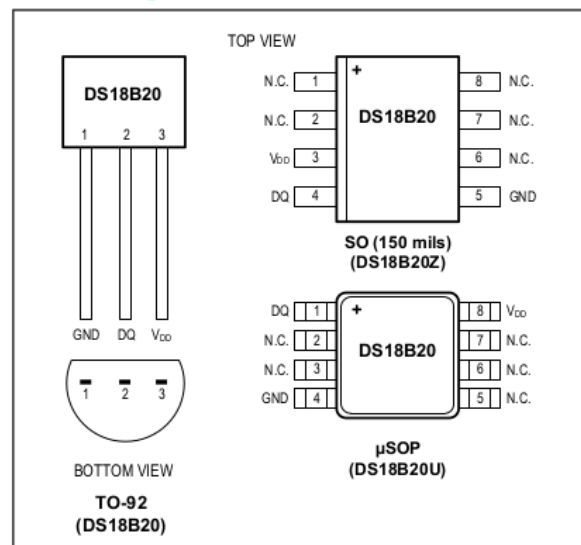
#### Applications

- Thermostatic Controls
- Industrial Systems
- Consumer Products
- Thermometers
- Thermally Sensitive Systems

#### Benefits and Features

- Unique 1-Wire® Interface Requires Only One Port Pin for Communication
- Reduce Component Count with Integrated Temperature Sensor and EEPROM
  - Measures Temperatures from -55°C to +125°C (-67°F to +257°F)
  - ±0.5°C Accuracy from -10°C to +85°C
  - Programmable Resolution from 9 Bits to 12 Bits
  - No External Components Required
- Parasitic Power Mode Requires Only 2 Pins for Operation (DQ and GND)
- Simplifies Distributed Temperature-Sensing Applications with Multidrop Capability
  - Each Device Has a Unique 64-Bit Serial Code Stored in On-Board ROM
- Flexible User-Definable Nonvolatile (NV) Alarm Settings with Alarm Search Command Identifies Devices with Temperatures Outside Programmed Limits
- Available in 8-Pin SO (150 mils), 8-Pin µSOP, and 3-Pin TO-92 Packages

#### Pin Configurations



**Ordering Information** appears at end of data sheet.

1-Wire is a registered trademark of Maxim Integrated Products, Inc.













## Anlage D: Farbcodierung ohmscher Widerstände

Der Widerstandswert in Ohm kann über den Farbcode nach Tabelle 1 auf den Bauelementen bestimmt werden. Der Nennwert wird entsprechend Gleichung (14) gebildet und die Toleranz ist durch den 4. Ring spezifiziert. Ein Beispiel für einen 100 Ohm Widerstand (braun, schwarz, braun, gold) ist in Abbildung 7 und Gleichung (15) gegeben.

$$(10A + B)C \quad (14)$$

$$(10 \cdot 1 + 0) \cdot 10 \pm 5 \% \quad (15)$$

Tabelle 1: Widerstandsbestimmung (4 Ringe) bei Kohleschichtwiderständen

Ringfarbe	1. Ring (A)	2. Ring (B)	3. Ring (Multiplikator) (C)	4. Ring (Toleranz) (D)
 schwarz	0	0	-	-
 braun	1	1	x 10	1,00 %
 rot	2	2	x 100	2,00 %
 orange	3	3	x 1.000	-
 gelb	4	4	x 10.000	-
 grün	5	5	x 100.000	0,50 %
 blau	6	6	x 1.000.000	0,25 %
 violett	7	7	x 10.000.000	0,10 %
 grau	8	8	-	-
 weiß	9	9	-	-
 gold	-	-	x 0,1	5,0 %
 silber	-	-	x 0,01	10,0 %