



Fachgebiet
Umweltgerechte Produkte und Prozesse

Prof. Dr.– Ing. J. Hesselbach

Praktikum Energiemonitoring in der Praxis

Lehrende: Dipl. Wirtsch. Ing. Heiko Dunkelberg, M. Sc.
Jan–Peter Seevers, M. Sc.

Eingereicht am:

Angefertigt von:

Name, Vorname	Matrikelnummer

Zu den Versuchen

Die durchzuführenden Versuche dienen zur Vertiefung von theoretisch erworbenem Wissen. Durch die Versuchsaufbauten lernt der Lernende die Grundlagen zum Monitoring von Stoff- und Energieströmen. Bei der Entwicklung der Versuche wurde besonderer Wert daraufgelegt, praxisübliche Komponenten und Betriebsmittel einzusetzen.

Zur Versuchsvorbereitung gehört, dass die Versuchsdurchführung genau durchzulesen ist. Unvorbereitete Teilnehmer werden von dem Praktikum ausgeschlossen. Die Vorgehensweise wurde bewusst in knappen Worten gefasst, um den Versuchsaufbau und die Durchführung so transparent wie möglich zu gestalten. Die beschriebene Reihenfolge der Einzelschritte sollte eingehalten werden, um Fehlmessungen und damit Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel und Motivation	4
2	Temperaturmessung mit thermischem Kontakt	5
2.1	Versuchsaufbau	5
2.2	Kalibrierung	6
2.2.1	Durchführung	6
2.2.2	Auswertung	6
2.3	Ansprechzeit	7
2.3.1	Durchführung	7
2.3.2	Auswertung	7
3	Elektrische Leistungsmessung	8
4	Energiemonitoring	9
5	Theorie	10
5.1	Temperaturmessung	10
5.1.1	Allgemein	10
5.1.2	Temperaturerfassung	10
5.1.3	Thermoelemente	11
5.1.4	Widerstandsthermometer	12
5.1.5	Messunsicherheit	15
5.1.6	Kalibrieren von Thermometern	17
5.2	Leistungsmessung	18
	Abbildungsverzeichnis	IV
	Tabellenverzeichnis	IV

1 Ziel und Motivation

Im Kontext von Digitalisierung und Industrie 4.0 auf der einen Seite sowie verschärften rechtlichen Anforderungen zum Nachweis von Energieeffizienzmaßnahmen (u.a. Einführung ISO 50003 & 50006) auf der anderen Seite gewinnt die systematische Energiedatenerfassung und -auswertung im industriellen Umfeld zunehmend an Bedeutung.

Im Zuge des notwendigen Ausbaus einer möglichst umfassenden (alle Prozesse/Anlagen und Energiemedien), detaillierten (hohe Abtastrate) und bezogen auf die Speicherdauer lang zurückreichenden Energiedatenerfassung bedarf es umso mehr einer bewussten Vermeidung möglicher auftretender Fehler in der Energiedatenerfassungskette. Dabei ist das Augenmerk auf den vollständigen Implementierungsvorgang ausgehend von der Auslegung und Installation der Sensorik über die Übertragung der Daten sowie Verrechnungen in der Datenbank bis hin zur Visualisierung in einer Nutzersoftware zu legen.

In der Praxis treten hierbei zahlreiche Fehler auf, die in der Visualisierung, Auswertung und Verwendung der Energiedaten u.a. für Kennzahlen und Simulationsmodelle entweder nicht oder oft erst nach einem längeren Zeitraum entdeckt werden [vgl. Universität Twente (2017)].

Hinsichtlich dieser Thematik ergeben sich verschiedene Forschungsfragen, die in der Veranstaltung „Energiemonitoring in der Praxis“ durch die Studierenden mit einer vorgegebenen entwickelten Forschungsfrage ergänzt werden. Das übergeordnete Ziel der Veranstaltung ist die praktische Umsetzung eines Energiemonitoringsystems ausgehend von der Sensorauswahl, Implementierung und Installation über den soft- und hardwaretechnischen Verbindungs- und Kommunikationsaufbau bis hin zu der Analyse und Bewertung der gewonnenen Daten in verschiedenen Auswertungssoftware-Systemen.

2 Temperaturmessung mit thermischem Kontakt

Im Rahmen des Praktikums des Moduls „Energiemonitoring in der Praxis“ sollen in den hier beschriebenen Versuchen die Grundlagen der Temperaturmessung mit thermischem Kontakt vermittelt werden. Hierbei sollen Temperaturen in Flüssigkeiten und Luftströmen ermittelt werden, um somit die Eigenschaften der Messmittel kennenzulernen. Verglichen werden Thermoelemente und Widerstandsthermometer in den Eigenschaften Genauigkeit und Ansprechzeit.

2.1 Versuchsaufbau

Bei den Versuchen werden drei Thermoelemente (grün) mit den Durchmessern 6mm, 3mm und 1mm und zwei Widerstandsthermometer (orange) mit den Durchmessern 6mm und 3mm verwendet. Die Temperaturen werden in einem Kalibrierbad und in einem von einem Fön verursachten Luftstrom gemessen.

Die Daten werden über ADAM 6015 und 6018 Messwandler-Modul die Einbindung in die Monitoringsoftware bereitgestellt.

Die folgende Abbildung zeigt den skizzenhaften Versuchsaufbau.

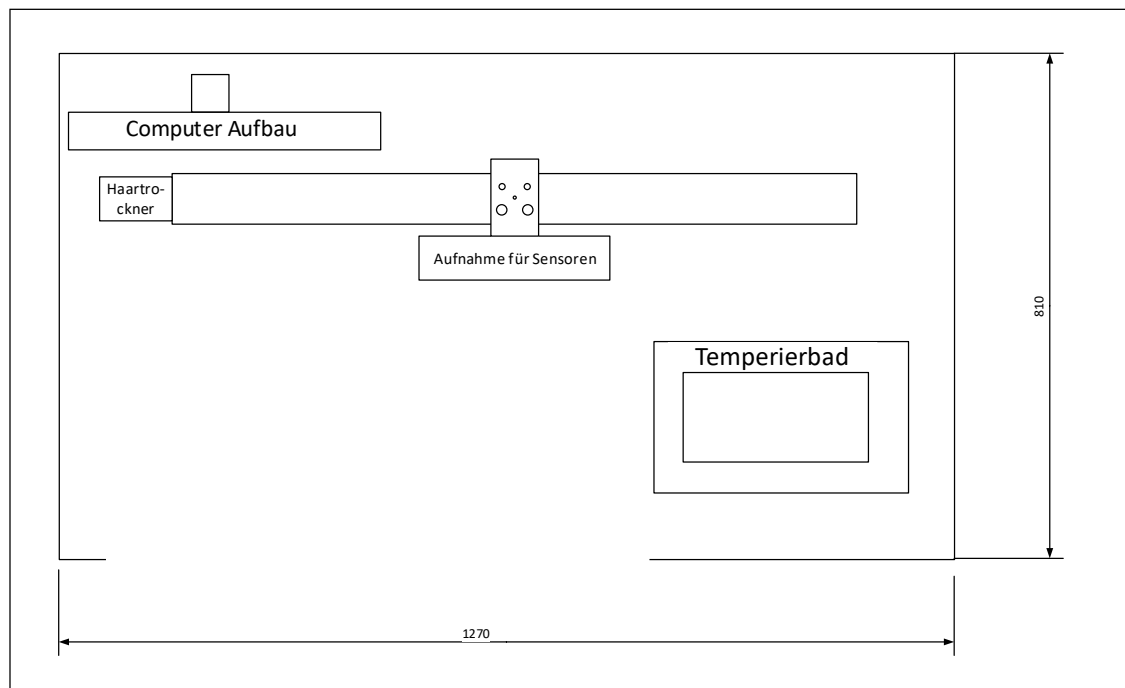


Abbildung 1: Versuchsstand

2.2 Kalibrierung

Im Versuch Kalibrierung soll die bekannte systematische Messabweichung identifiziert und in einer Kalibriergeraden dargestellt werden. Die Messgeräte liefern Ergebnisse, welche von den tatsächlichen Messgrößen abweichen, wobei die Abweichung, je nach Hersteller oder Art des Messgeräts, stark oder schwach ausfallen kann. Ziel ist es mit den gewonnenen Daten eine Kalibrierung der Messgeräte in der Monitoringsoftware vorzunehmen und somit die um die systematischen Messabweichungen bereinigte Temperatur darzustellen. Hierzu sind der Offset und die Steigung zu ermitteln.

2.2.1 Durchführung

Um die Kalibriergerade und die Abweichungen der einzelnen Messgeräte zu bestimmen, werden mindestens zwei Bezugstemperaturen benötigt. Deutlich besser geeignet sind drei oder mehr Bezugstemperaturen.

Ein Kalibriergerät sorgt für die gewünschte exakte Bezugstemperatur. Die Datenerfassung und Darstellung der Werte erfolgt über die Software.

Als sinnvolle Bezugstemperaturen haben sich 25°C, 40°C und 55°C erwiesen. Dies muss aber nicht so sein.

2.2.2 Auswertung

Für die Auswertung soll nun die Differenz zum jeweiligen Bezugswert (die drei Bezugstemperaturen) jeweils für die einzelnen Messinstrumente gebildet und anschließend die Kalibriergerade erstellt werden. Die Messungen und Beobachtungen sollen interpretiert und diskutiert werden.

	PT100_3mm	PT100_6mm	TE_1mm	TE_3mm	TE_6mm
Wasser (T=25°C)					
Wasser (T=40°C)					
Wasser (T=55°C)					

Tabelle 1: Bezugswerte zur Kalibrierung

2.3 Ansprechzeit

Jedes Messsystem besitzt eine bestimmte Trägheit, sodass das Ausgangssignal dem Eingangssignal nicht in einer beliebig kurzen Zeit folgen kann. Das dynamische Verhalten eines Messsystems beschreibt die Abhängigkeit der Ausgangsgröße von der Eingangsgröße bis zum Erreichen des stationären Zustandes. In diesem Versuch soll das dynamische Verhalten der Messgeräte über die Ansprechzeit untersucht werden. Dabei ist die Ansprechzeit die Summe der Totzeit und der Einstellzeit. Ziel ist es herauszufinden wie viel Zeit benötigt wird, bis sich die jeweiligen Sensoren der Messinstrumente im thermischen Gleichgewicht befinden.

2.3.1 Durchführung

Zunächst sollen die Sensoren senkrecht durch die Rohrwand geführt werden. Mit Hilfe des Föns werden zu Beginn des Versuches alle Messfühler **kalt** angeströmt. Dies stellt sicher, dass alle Messfühler auf demselben Temperaturniveau sind. Anschließend wird das Rohr mit **heißer** Luft durchströmt. Mit dem Einschalten des Föns, um die Messsensoren zu erwärmen, sollte gleichzeitig die Stoppuhr starten. Die gemessenen Temperaturverläufe der einzelnen Leiter werden durch die Software aufgezeichnet. Bei der ersten Änderung der Temperaturkurve wird die Zeit gestoppt. Die gestoppte Zeit entspricht der Totzeit. Diese Messung sollte mindestens fünfmal wiederholt werden, um ein repräsentatives Ergebnis zu erlangen. Gleiches gilt hierbei für die Messung der Einstellzeit.

2.3.2 Auswertung

Bei der Auswertung sind die jeweiligen Start- und Endtemperaturen sowie die Ansprechzeit der einzelnen Sensoren zu ermitteln. Die Messung und Beobachtung soll interpretiert und diskutiert werden.

	Starttemperatur [°C]	Endtemperatur [°C]	Ansprechzeit [Sek.]
PT100_3mm			
PT100_6mm			
TE_1mm			
TE_3mm			
TE_6mm			

Tabelle 2: Ansprechzeiten

3 Elektrische Leistungsmessung

Im Versuch sollen die elektrischen Betriebsdaten (Strom, Spannung, Wirk-, Blind- und Scheinleistung) eines mit Dreiphasenwechselstrom betriebenen Kunststoff-Granulattrockners Typ Arburg THERMOLIFT mit einer Gesamtanschlussleistung von 6,2 kW gemessen werden. Oftmals brauchen größere Maschinen nur ca. 75% ihrer Nennleistung im Normalbetrieb. Im Allgemeinen ist eine vorherige Abschätzung eines realistischen Leistungsbedarfs einer Maschine auch mit Hilfe von Expertenmeinungen wichtig, um gravierende Messfehler unmittelbar zu erkennen.

Zu Beginn der Versuchsdurchführung müssen die Spannungsabgriffe, Stromwandler und Kabel an das Messgerät und an die jeweiligen Messadapter angeschlossen werden. Bei den Stromwandlern ist auf die Flussrichtung am Messadapter zu achten. Unter anderem werden folgende Produkte der Fa. Janitza verwendet:

- UMG 512-PRO Leistungsqualitäts-Analysator (Leistungsmessgerät); Janitza-Katalog S.113ff.
- UMG 605-PRO Leistungsqualitäts-Analysator (Leistungsmessgerät); Janitza-Katalog S.53ff.
- Stromwandler und Rogowski-Spule unterschiedlicher Typen und Maße

Bitte lesen Sie sich schon einmal ein in die entsprechenden Beschreibungen zu den angegebenen Geräten. Zudem hilfreich ist der Technische Anhang ab S. 337.

Durchführung des Versuchs

Schließen Sie alle Komponenten an. Fahren Sie den Trockner in verschiedenen Betriebsmodi. Der Granulattrockner beinhaltet drei Hauptaggregate, welche unabhängig voneinander über das Bedienfeld zu- und abgeschaltet werden können: Gebläse, Heizung und Lufttrockner. Im Versuch wird zunächst das Gebläse gestartet, welches für die Funktion von Heizung und Trockner aktiviert sein muss und daher dauerhaft eingeschaltet bleibt. Daraufhin wird zuerst der Deckel geöffnet, dann jeweils einzeln Heizung und Gebläse zugeschaltet, um die betreffenden Leistungsänderungen anhand der Gesamtleistung ermitteln zu können.

4 Energiemonitoring

Die Datenübertragung von Messgerät zu Monitoring-Software GridVis sowie é.VISOR erfolgt über eine Ethernet-Verbindung. Die Einstellungen zum Anlegen eines „Datenpunktes“ (Bezeichnung für Messgerät-Verbindung in é.VISOR) bzw. zum Anlegen eines „Gerätes“ (Bezeichnung für Messgerät-Verbindung in GridVis) führen die Studenten selbst durch. Bitte machen Sie sich dazu im Vorfeld mit den Handbüchern von é.VISOR und GridVis vertraut, die während des Praktikums als Nachschlagewerke gedacht sind. Innerhalb der beiden Systeme werden planmäßig am zweiten Tag Kennzahlen gebildet, Berichte erstellt und weiterführende Datenanalyse betrieben. Im Folgenden wird beispielhaft der grundlegende Ablauf in éVISOR erläutert (inkl. Seitenangaben aus dem éVISOR Handbuch, Version 3.8).

1. Einrichtung eines Messobjektes, innerhalb dessen die verschiedenen Datenpunkte (Messpunkte) wie z.B. Strom Leiter 1 - Leiter 3 für das jeweilige Messobjekt inbegriffen sind.
→ Hinzufügen eines „Bereiches“ (S. 52f.)
2. Einrichtung von beliebig vielen Datenpunkten für jedes Messobjekt. Ein Datenpunkt kann dabei sowohl ein elektrischer Parameter als auch eine Temperatur in Kelvin sein (S. 55–69).
3. Erstellung von Kennzahlen: Mit Hilfe der Kennzahlen können verschiedene Datenpunkte, die ihrerseits unterschiedlichen Bereichen angehören können, verrechnet werden (S. 70–75).
4. Erstellung von Verhältniszahlen, Parametern und Auswerte-Cockpits (S. 76–84).
5. Datenexport nach Excel (S. 85ff.)

Für Janitza und die Software GridVis sollen Sie dann ähnlich verfahren und Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen den Systemen herausarbeiten. Zudem sollte nicht vergessen werden, dass die Visualisierung in den beiden Monitoring-Systemen vor allem auch dazu dienen soll, die unterschiedliche Messhardware hinsichtlich der Auswahl und Installation der korrekten Stromwandler miteinander zu vergleichen.

5 Theorie

5.1 Temperaturmessung

5.1.1 Allgemein

„Die Erfassung der Temperatur ist in zahlreichen Prozessen von überragender Bedeutung. Ca. 45 % aller benötigten Messstellen fallen dabei auf die Temperatur. Man denke an Schmelzen, chemische Reaktionen, Lebensmittelverarbeitung, Energiemessung und Klimatisierung. So unterschiedlich die genannten Bereiche sind, so verschieden sind auch die Aufgabenstellungen an die Temperatursensoren, ihre physikalischen Wirkungsprinzipien und technische Ausführung.

In Industrieprozessen ist der Messort vielfach weit vom Ort der Anzeige entfernt, da beispielsweise bei Schmelz- und Glühöfen die Prozessbedingungen dies erfordern oder eine zentrale Messwerterfassung gewünscht ist. Oft ist auch eine weitere Verarbeitung des Messwertes in Reglern oder Registriergeräten gefordert. Hier eignen sich keine direkt anzeigenden Thermometer, wie man sie aus dem Alltag kennt, sondern nur solche, welche die Temperatur in ein anderes, ein elektrisches Signal umformen. Übrigens spricht man auch bei diesen elektrischen Messwertaufnehmern weiterhin von Thermometern, wobei streng genommen immer der Messwertgeber, bestehend aus Sensorelement und die ihn umgebende Schutzarmatur, gemeint ist.

In der industriellen elektrischen Temperaturmessung sind Pyrometer, Widerstandsthermometer und Thermoelemente üblich. Daneben existieren noch Erfassungssysteme wie Schwingquarz-Sensoren und faseroptische Systeme, denen bislang der Einzug in die Industrie jedoch noch nicht gelungen ist."

5.1.2 Temperaturerfassung

Die Temperatur ist eine Größe von außerordentlicher Bedeutung für technische Prozesse. Von der Temperatur hängen sehr viele Stoffeigenschaften ab. Der thermische Zustand eines Stoffes kann grundsätzlich nach zwei physikalischen Prinzipien bestimmt werden:

- Kontaktthermometrie
- Pyrometrie

Bei der Thermometrie wird der Temperatursensor mit dem Medium oder der Oberfläche des Körpers, deren Temperatur bestimmt werden soll, ins thermodynamische Gleichgewicht gebracht. Anschließend wird die Temperatur des

Sensoren mit einem temperaturabhängigen Effekt ermittelt. Der Temperatureausgleich erfolgt über Konvektion, Wärmeleitung oder Wärmestrahlung.

Bei der Pyrometrie wird die Wärmestrahlung eines gasförmigen, flüssigen oder festen Körpers verwendet, um den Temperatursensor zu erwärmen. Aus der Temperatur, welche der Temperatursensor annimmt, wird auf die Temperatur der Wärmestrahlungsquelle geschlossen. Im industriellen Bereich werden Pyrometer für Temperaturen über 800 °C eingesetzt. Es ist aber auch möglich, mit diesem Prinzip Temperaturen bis - 100 °C zu messen, beispielsweise bei schlecht zugänglichen Messstellen oder an bewegten Teilen.

Der Begriff „Temperatursensor“ fasst alle Sensoren zusammen, die der Temperaturmessung dienen. Als Messeffekt kommen folgende Erscheinungen in Frage:

- Ausdehnung von festen, flüssigen oder gasförmigen Körpern in Abhängigkeit von der Temperatur (Ausdehnungsthermometer).
- Änderung des Widerstandes bzw. der elektrischen Leitfähigkeit (Widerstandsthermometer).

Positiver Temperaturkoeffizient: Metalle bereichsweise linear, keramische Halbleiter stark nichtlinear

Negativer Temperaturkoeffizient: Keramische Halbleiter nichtlinear

- Potentialdifferenz am Kontakt zweier Metalle mit verschiedener Thermospannung (Thermoelemente, bereichsweise linear)
- Änderung der Eigenfrequenz schwingender Quarze als Funktion der Temperatur
- Emission und Absorption einer Infrarotstrahlung.“

5.1.3 Thermoelemente

„Thermoelemente eignen sich für Temperaturmessungen im Bereich von -200°C bis nahezu +2000°C. Sie sind damit auch zur Messung sehr hoher Temperaturen geeignet. Physikalisch ist der Thermoeffekt, früher auch Seebeck-Effekt bezeichnet, ein Ladungsträgerdiffusionseffekt, bei dem sich die Ladungsträger, im Metall die Elektronen, entsprechend dem Temperaturgradienten auf dem Leiter verteilen. Die Elektronen werden aus Bereichen höherer Temperatur zu Bereichen niedrigerer Temperatur gedrängt, wodurch sich ein elektrisches Feld aus-

bildet. Werden eine geschlossene Leiterschleife aus zwei unterschiedlichen Materialien gebildet und die Verbindungsstellen auf verschiedene Temperaturen gebracht, so ergeben sich auf jedem Leiter als Längsintegral Spannungen und an einer beliebigen Trennstelle der Schleife aus beiden eine Spannungsdifferenz, die Thermospannung. Die Enden der Trennstelle müssen auf gleicher Temperatur sein! Bei zwei gleichen Materialien ist die Spannungsdifferenz null! Das Werkstoffleiterpaar bezeichnet man als Thermopaar oder Thermoelement. Thermoelemente können nur Temperaturdifferenzen messen. Um damit eine Temperatur zu messen, bringt man die eine Verbindungsstelle, die Messstelle, auf die unbekannte Temperatur und die andere auf eine bekannte, z.B. 0°C, die auch Vergleichsstelle genannt wird (elektronische Vergleichsstellen).“

Thermoelementwerkstoffe

„Die Abhängigkeit der Thermospannung von der Temperatur (–Differenz) ist leider nichtlinear. Für eine ganze Reihe von Werkstoffpaarungen sind diese Abhängigkeiten in sogenannten Grundwertreihen genormt, DIN IEC 584. Oft werden das Eisen–Konstantan–Thermoelement, bezeichnet mit Typ J, und das Nickelchrom–Nickel–Thermoelement, Typ K. Typ J hat eine hohe Thermospannung/°C (Temperaturkoeffizient), kann aber nur bis etwa 700°C ohne Einschränkung eingesetzt werden. Außerdem hat es ein ungünstiges Langzeitverhalten. Das weitaus am häufigsten eingesetzte Thermoelement ist der Typ K. Es hat einen sehr großen Messbereich von –200°C bis etwa 1000°C (mit Einschränkungen auch darüber) und ist wenig nichtlinear. Für höhere Temperaturen setzt man Thermoelemente aus Edelmetallen ein, z.B. aus Platinrhodium–Legierungen und Platin, Typ R.“

Norm	Element	Maximaltemperatur	definiert bis
	Fe-CuNi J	750°C	1200°C
	Cu-CuNi T	350°C	400°C
	NiCr-Ni K	1200°C	1370°C
DIN EN 60 584	NiCr-CuNi E	900°C	1000°C
	NiCrSi-NiSi N	1200°C	1300°C
	Pt10Rh-Pt S	1600°C	1540°C
	Pt13Rh-Pt R	1600°C	1760°C
	Pt30Rh-Pt6Rh B	1700°C	1820°C

Tabelle 3: Thermoelemente nach DIN EN 60 584

5.1.4 Widerstandsthermometer

„Die elektrische Leitfähigkeit eines Metalls basiert auf der Beweglichkeit der Leitungselektronen, dem so genannten Elektronengas. Wird eine Spannung an die Enden eines Metalls gelegt, bewegen sich die Elektronen zum Pluspol. Fehler in der Kristallstruktur des Metalls stören diese Bewegung. Hierzu zählen fremde

oder fehlende Gitteratome, Korngrenzen und Atome auf Zwischengitterplätzen. Da diese Fehlstellen temperaturunabhängig sind, ergeben sie einen konstanten Widerstand. Mit wachsender Temperatur schwingen die Atome des Metallgitters verstärkt um ihre Ruhelage und behindern dadurch die Bewegung der Leitungselektronen. Da diese Bewegung linear mit der Temperatur zunimmt, hängt die dadurch verursachte Widerstandszunahme in erster Näherung direkt von der Temperatur ab, man spricht von einem positiven Temperaturbeiwert oder –koeffizienten, einem PTC-Widerstand.

Um diesen Effekt zur Temperaturmessung verwenden zu können, ist ein großer Temperaturkoeffizient, d. h. eine möglichst große Änderung des Widerstandes mit der Temperatur, ideal. Andererseits sollen sich die charakteristischen Eigenschaften des Metalls nach Möglichkeit auch in langen Zeiträumen wenig ändern. Der Temperaturkoeffizient sollte weiterhin möglichst temperatur- und druckunabhängig sowie durch chemische Einflüsse nicht beeinflussbar sein.

Der Zusammenhang zwischen der Temperatur und dem elektrischen Widerstand ist allgemein nicht direkt proportional, sondern wird durch ein Polynom höherer Ordnung beschrieben:

Formel 14:
$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot T^3 + \dots)$$

Der Widerstand R_0 bildet den Nennwiderstand und wird bei einer noch festzulegenden Temperatur bestimmt. Die Terme höherer Ordnung (T^2 , T^3 ...) werden je nach Genauigkeit der Messung berücksichtigt. Die Koeffizienten A, B usw. hängen vom Widerstandsmaterial ab und beschreiben die Temperatur-/Widerstandsabhängigkeit eindeutig.“

Platinwiderstände

„Als Widerstandsmaterial hat sich in der industriellen Messtechnik Platin durchgesetzt. Zu seinen Vorteilen zählen die hohe chemische Beständigkeit, vergleichsweise leichte Bearbeitbarkeit (insbesondere zur Drahtherstellung), die Möglichkeit der hochreinen Darstellung und die gute Reproduzierbarkeit der elektrischen Eigenschaften. Diese Eigenschaften werden in der europäischen Norm DIN EN 60 751 vollständig festgelegt, sodass für den Platinmesswiderstand wie kaum einen anderen Temperatursensor eine universelle Austauschbarkeit besteht.

Zu diesen Festlegungen zählen die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes, die in einer Grundwertreihe festgeschrieben ist, der Nennwert sowie die zugehörige Bezugstemperatur und die zulässigen Grenzabweichungen. Auch der Temperaturbereich wird in der Norm festgelegt, er reicht von -200 bis $+850^{\circ}\text{C}$. Bei der Festlegung der Grundwertreihe unterscheidet man zwei Temperaturbereiche:

- -200°C bis 0°C ,
- 0°C bis 850°C .

Widerstand/Ohm

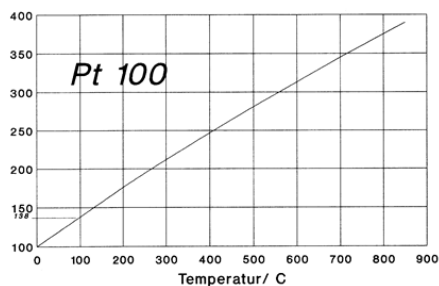


Abbildung 2: Kennlinie eines Pt 100–Temperatursensors

Für den Temperaturbereich von $-200 \dots 0^{\circ}\text{C}$ gilt ein Polynom dritten Grades:

Formel 15:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2 + C \cdot [T - 100^{\circ}\text{C}] \cdot T^3)$$

Für den Bereich von 0 bis 850°C gilt ein Polynom zweiten Grades:

Formel 16:

$$R(T) = R_0(1 + A \cdot T + B \cdot T^2)$$

Für die Koeffizienten gilt:

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

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

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-4}$$

Die Größe R_0 wird als Nennwert oder Nennwiderstand bezeichnet und ist der Widerstandswert bei 0°C . Gemäß DIN EN 60 751 ist für den Nennwert ein Wert von $100\ \Omega$

definiert, man spricht daher vom Pt 100-Widerstand. Zulässig sind auch die Vielfachen von diesem Wert, so werden Messwiderstände mit Nennwerten von $500\ \Omega$ und $1000\ \Omega$ angeboten. Ihr Vorteil liegt in einer höheren Empfindlichkeit, das heißt einer stärkeren Änderung ihres Widerstandes mit der Temperatur (Pt 100: ca. $0,4\ \Omega/\text{K}$;

Pt 500: ca. $2,0\ \Omega/\text{K}$; Pt 1000: $4,0\ \Omega/\text{K}$).

Weiterhin ist in der Norm ein Pt 10-Widerstand definiert, der wegen seiner geringen Empfindlichkeit jedoch relativ selten Anwendung findet und dessen Einsatztemperatur oberhalb 600°C liegt. Zumeist findet man kleinere Nennwerte (z. B.: $25\ \Omega$, $10\ \Omega$, $2,5\ \Omega$ oder $0,25\ \Omega$) bei Präzisionsthermometern, die aber dann die Forderungen der ITS 90 erfüllen und für Messungen mit sehr kleinen Messunsicherheiten eingesetzt werden. Auf Grund ihres filigranen und mechanisch sehr empfindlichen Aufbaus können diese Thermometer nicht im industriellen Bereich eingesetzt werden.“

5.1.5 Messunsicherheit

Fehler durch die Auswertelektronik

„Temperatursensoren sind stets analog, d.h. Temperaturmessung ist nur indirekt und analog möglich. Das Sensorsignal muss erst analog aufbereitet werden, bis es digital umgesetzt werden kann. Digitale Temperaturmessung ist streng genommen nicht möglich. Man darf sich durch hohe digitale Auflösungen nicht täuschen lassen, die Messunsicherheit wird nicht verbessert. Sie kann nie besser als der Sensor mit der analogen Signalaufbereitung sein!“

Eigenerwärmungsfehler

„Ein nur bei Widerstandsthermometern auftretender Fehler ist der Eigenerwärmungsfehler. Da die Messung eines elektrischen Widerstandes nur über den Spannungsabfall eines Messstromes am Widerstand möglich ist, ist es unvermeidbar, dass durch Strom eine Leistung (Energie) in den Widerstand eingebracht wird. Diese Messleistung entspricht einer Wärmequelle im Inneren des Thermometers und erzeugt einen Wärmestrom in seine Umgebung und damit eine Übertemperatur des Sensors.“

„Falsche“ Kennlinien

„Sowohl Thermoelemente und Widerstandsthermometer als auch Pyrometer haben nichtlineare Kennlinien. Gern werden in Messformen Linearisierungen der Kennlinien vorgenommen, sodass das Ausgangssignal temperaturproportional wird. Bei Thermoelementen die Nichtlinearität des Thermoelements berücksichtigen muss, wenn die Vergleichsstellentemperatur einen anderen Wert als 0°C hat!

Die Nichtlinearität der Kennlinien wird bei der Weiterverarbeitung unterschiedlich behandelt. Bei geringen Nichtlinearitäten und kleineren Messbereichen genügt oft eine gewisse Zahl von Stützstellen und dazwischen stückweise Geraden, um die entstehende Abweichung innerhalb der geforderten maximal zulässigen Abweichung zu halten. Mit den zunehmenden Möglichkeiten der modernen Elektronik und entsprechendem Einsatz leistungsfähiger Mikro-Controller werden immer häufiger Algorithmen programmiert, die die Kennlinien mathematisch annähern, meist durch Potenzfunktionen.“

Fehler durch schnelle Gasströmung

„Der Standardeinbau eines Thermometers erfolgt quer zur Strömungsrichtung (günstiges Zeitverhalten!), womit es ein Hindernis für die Strömung darstellt. An der Oberfläche staut sich das Medium zur Geschwindigkeit $w = 0$, seine kinetische Strömungsenergie wird in eine Temperaturerhöhung umgewandelt. Bei idealem adiabatem Verhalten dieser Umwandlung wäre die Temperaturerhöhung dem Quadrat der Strömungsgeschwindigkeit proportional, aber leider ist durch Reibungseffekte und Wärmeleitung nur ein schwer berechenbarer Teil am Thermometer wirksam. Dieser Effekt wird, nicht ganz korrekt, mit Recovery-Effekt bezeichnet. Der Anteil beträgt je nach Konstruktion der Thermometer zwischen 60 und 90% der adiabaten Erhöhung. Bei hohen Geschwindigkeiten kann der Fehler beträchtlich sein, z.B. beträgt die adiabate Temperaturerhöhung bei $w = 50 \text{ m/s}$ $1,2^{\circ}\text{C}$.

Bei Präzisionsmessungen muss dieser Effekt also auch bei niedrigeren Geschwindigkeiten berücksichtigt werden. Für sehr hohe Geschwindigkeiten umhüllt man die Thermometer mit einer kammerartigen großen Geschwindigkeitsbereich etwa konstant hält, so dass man diesen rechnerisch leicht berücksichtigen kann. Man kann auch die Geschwindigkeit gesondert messen und den Messwert entsprechend der (bekannten) Umwandlungscharakteristik korrigieren.“

5.1.6 Kalibrieren von Thermometern

"Im Laufe der Betriebsdauer eines Thermometers ergeben sich infolge chemischer und mechanischer Einflüsse sowie Alterungserscheinungen wie Rekristallisationen und Diffusionen, Änderungen der Kennlinie gegenüber dem Auslieferungszustand. Auch geringfügig unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten des Träger- und des Widerstandsmaterials lassen die Kennlinie driften. Die Größe der Änderung hängt sehr stark von der Art dieser Belastungen und der Konstruktion selbst ab. Um eine Drift berücksichtigen und kompensieren zu können, muss das Thermometer in regelmäßigen Zeitabständen kalibriert werden. Eine derartige Kalibrierung bedeutet eine Überprüfung der angezeigten Temperaturwerte und gegebenenfalls die Festschreibung der Werte, um die sie von den tatsächlichen Messtemperaturen abweichen. (...)

Eine Kalibrierung ist gleich bedeutend mit einer individuell für jedes Thermometer geprüften und gemessenen Genauigkeit. Für die Langzeitstabilität dieser Werte kann allerdings vom Hersteller keine Garantie übernommen werden, da er die zukünftigen Einsatzgebiete bzw. -häufigkeiten und die damit verbundenen Belastungen auf das Thermometer nicht voraussehen kann. Eine Gültigkeitsdauer der Kalibrierung oder eine turnusmäßige Kontrolle durch die DKD sind nicht vorgeschrieben. Anfangs sollte ein Thermometer jährlich kalibriert werden und die Messergebnisse mit den vergangenen Daten verglichen werden. So wird im Lauf der Zeit eine Historie des Thermometers gewonnen, aus der dessen Stabilität ersichtlich wird. Bei einer für den Anwendungsfall genügenden Reproduzierbarkeit der Messdaten kann dann auf eine kürzere oder längere Wiederholungszeit der Kalibrierung geschlossen werden.

Die Frage nach dem Ablauf und der Genauigkeit einer Kalibrierung lässt sich nicht generalisierend beantworten. Es findet stets eine Abstimmung zwischen dem Anwender und der Kalibrierstelle statt, wobei Temperaturbereiche und Messpunkte festgelegt werden. Die Messgenauigkeit wird durch die Art der Messung und den Prüfling bestimmt.

Zur Kalibrierung wird das zu prüfende Thermometer auf eine bekannte Temperatur gebracht, der von ihm verursachte Wert (Widerstand, Thermospannung...) ermittelt und mit dem zu erwartenden Wert verglichen. Zur Temperierung werden je nach gefordertem Bereich flüssigkeitsgefüllte Thermostatbäder, Öfen o-

der Fixpunktzellen benutzt. Die Temperatur wird dabei mit einem Normalthermometer gemessen, wobei während der Vergleichsmessung darauf geachtet werden muss, dass kein Temperaturunterschied zwischen Prüfling und Normalthermometer entsteht. Bei einer Fixpunktzelle stellt sich die genau bekannte Temperatur des Phasenwechsels ein; ein Vergleich mit einem Normalthermometer entfällt. Fixpunktzellen bieten eine größere Genauigkeit; bei Tripelpunktzellen mit Wasser lässt sich eine Messunsicherheit unter 5 mK erreichen.“

5.2 Leistungsmessung

Siehe im Allgemeinen: **Technischer Anhang des Janitza-Katalogs ab S.337**. An dieser Stelle sind lediglich die physikalischen Grundlagen eines Hall-Sensors aufgezeigt:

„Der Hall-Effekt besagt: Wird ein stromdurchflossenes Halbleiter-Plättchen (GaAs, InAs) senkrecht von einem Magnetfeld durchsetzt, dann werden die Ladungsträger aus ihrer waagerechten Bahn abgelenkt, womit an den Seitenflächen eine Hallspannung U_2 auftritt, siehe Abbildung.

Beim unbelastetem Ausgang mit $I_2=0$ erscheint die Leerlauf-Hallspannung U_{20} nach:

$$U_{20} = K_{B0} \cdot B \cdot I_1$$

Mit der Leelaufempfindlichkeit K_{B0} in $V/(A \cdot T)$, der magnetischen Induktion (Flussdichte) B in T (Tesla) und dem Eingangs-Steuerstrom I_1 in mA. Hinweis: 1 Tesla = 1 T = 1 Vs/m². Wirkt das Magnetfeld nicht senkrecht, sondern unter einem Winkel α , dann gilt:

$$U_{20} = K_{B0} \cdot B \cdot I_1 \cdot \cos\alpha$$

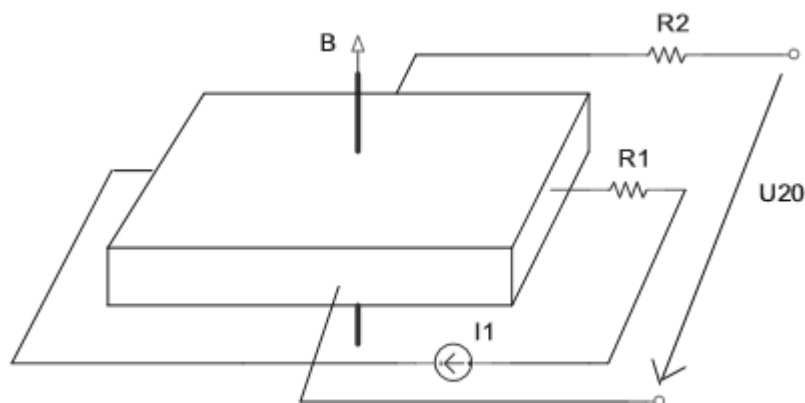


Abbildung 3: Prinzipielle Darstellung des Hallsensors“ (Ausgewählte Sensorschaltungen – Baumann)

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Versuchsstand	5
Abbildung 2: Kennlinie eines Pt 100–Temperatursensors	14
Abbildung 3: Prinzipielle Darstellung des Hallsensors“ (Ausgewählte Sensorschaltungen – Baumann)	18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bezugswerte zur Kalibrierung	6
Tabelle 2: Ansprechzeiten	7
Tabelle 3: Thermoelemente nach DIN EN 60 584	12