



PRAKTIKUM THERMISCHE MESSTECHNIK

TEIL 1: TEMPERATURMESSUNG

Lena Völlinger & Marvin Grosch

Praktikumstag: 04.09.2020
Erstabgabe: 05.10.2020
Betreuer: Markus Rusack & Christoph Schmelzer
Studiengang: Master re²
Semester: SoSe 2020
Matrikelnr.: 35597894, 35598242

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
1 Einleitung	1
2 Versuchsauswertung	1
2.1 Teil I: Kalibrierung	1
2.1.1 Fixpunktkalibration an der Wassertripelpunktzelle	1
2.1.2 Vergleichskalibration der Sensoren	1
2.1.3 Vergleich von Pt100 4L und Pt100 2L	2
2.1.4 Spannungsverlauf des Thermoelements	3
2.1.5 Anwendungsgebiete verschiedener Sensoren	3
2.2 Teil II: Identifizierung der Sensoren	4
2.3 Teil III: Wärmebildkamera	4
2.3.1 Berechnung der Emissionsgrade	5
3 Anhang	6
3.1 Teil I: Kalibrierung	6
3.1.1 Fixpunktkalibration an der Wassertripelpunktzelle	6
3.2 Teil III: Wärmebildkamera	6
Literatur	7

Abbildungsverzeichnis

1	Ermittelte Widerstandswerte der untersuchten Temperatursensoren	1
2	Temperaturverlauf des Pt100 Temperatursensors mittels Wassertripelpunktzelle	2
3	Spannungsverlauf des Thermoelements in Abhängigkeit der Temperatur im Bereich von 0 °C bis 80 °C	3
4	Temperaturverlauf des Pt100 Temperatursensors mittels Wassertripelpunktzelle	6
5	Versuchsaufbau Wärmebildkamera: Die unterschiedlichen Probenplatten wurden im selben Wärmebad mit 60,0 °C temperiert.	6
6	Foto der Wärmebildkamera über alle Probenplatten bei gleicher Temperatur.	6
7	Ermitteltes Wärmekamerafoto mit Deckenbeleuchtung als Störfaktor	7
8	Ermitteltes Wärmekamerafoto mit Hand als Störfaktor	7

1 Einleitung

Für den Versuch Temperaturmessung sollten verschiedene Temperatursensoren (Pt100 2L, Pt1000 2L, KTY 2L, NTC 2L) und ein Thermoelement Typ K an einem Metallblockkalibrator mit einem Pt-100 4L Referenzfühler, der zuvor an einer Wassertripelpunktzelle kalibriert wurde, gemessen und deren Genauigkeit beurteilt werden. Die verschiedenen Temperatursensoren wurden anhand von Fixpunkt- und Vergleichsmethode charakterisiert.

Anschließend wurden Widerstandssensoren unterschiedlichen Typs mit einem Multimeter untersucht und Anhand ihrer Kennliniendiagramme identifiziert.

Im dritten Teil wurde sich mit der berührungslosen Temperaturmessung befasst. Es erfolgte die Untersuchung verschiedener Materialien in einem temperierten Wasserbad mithilfe einer Wärmebildkamera. Dabei wurden die Unterschiede der Materialien und ihren Einfluss auf die Messung untersucht und analysiert.

2 Versuchsauswertung

2.1 Teil I: Kalibrierung

2.1.1 Fixpunktkalibration an der Wassertripelpunktzelle

Zunächst wurde der Pt-100 (Vierleiterschaltung) Referenzsensor anhand der Wassertripelpunktzelle (Tripelpunkt bei $0,01^\circ\text{C}$ und $6,1\text{ mbar}$) mittels Fixpunktkalibration kalibriert. Folgende Daten wurden für den Mittelwert, die Standardabweichung und den Offset des Referenzsensors gegenüber der Temperatur der Tripelpunktzelle ermittelt (Temperaturverlaufsgraph s. Anhang):

Tabelle 1: Mittelwert, Standardabweichung und Offset des Pt100 4L Referenzsensors zur Tripelpunktzelle.

Temperatur TP in $^\circ\text{C}$	avg	std	Offset
0,01	0,6691	0,0024	0,6591

Im Folgenden wurden mit dem ermittelten Offset des Referenzsensors dessen Messwert korrigiert und bei den folgenden Berechnungen berücksichtigt und angepasst.

2.1.2 Vergleichskalibration der Sensoren

Die Vergleichskalibration der unterschiedlichen Sensoren erfolgte in einem Temperaturbereich von 0°C bis 80°C , für die Messungen wurden über den Pt100 4L die Temperaturen 0°C , 20°C , 40°C und 80°C ausgewählt und über den Metallblockkalibrator eingestellt. In der folgenden Abbildung 1 sind die Widerstände der einzelnen Temperatursensoren gegen die ausgewählten Temperaturen aufgetragen.

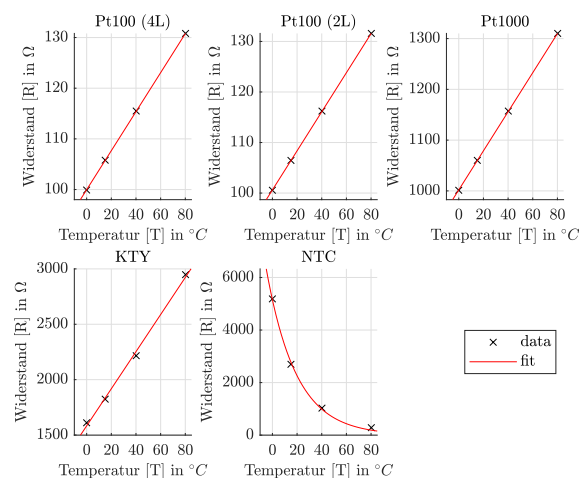


Abb. 1: Ermittelte Widerstandswerte der untersuchten Temperatursensoren (Pt100 4L, Pt100 2L, Pt1000, KTY, NTC) bei den Temperaturen 0°C , 20°C , 40°C und 80°C im Metallblockkalibrator eingestellt über den Pt100 4L Referenzsensor.

In der folgenden Tabelle werden die Regressionsfunktion der verschiedenen Fits aufgelistet.

Tabelle 2: Fitfunktionen der Temperatursensoren.

Sensortyp	Regressionsfunktion	Koeff a	Koeff b	R^2
Pt100 (4L)	$ax + b$	$0,3849 \pm 0,0048$	$99,9695 \pm 0,2168$	1
Pt100 (2L)	$ax + b$	$0,3864 \pm 0,0049$	$100,62 \pm 0,22$	1
Pt1000	$ax + b$	$3,8471 \pm 0,0525$	1002 ± 2	1
KTY	$ax + b$	$16,749 \pm 2,723$	$1582,7 \pm 123,8$	0,9972
NTC	a^{bx}	$5149,3 \pm 391,4$	$-0,0411 \pm 0,0075$	0,9988

Die Temperatursensoren Pt100 4L, Pt100 2L, Pt1000 und KTC zeigen lineare Widerstandsverläufe positiver Steigung bei Erhöhung der Temperatur. Das Heißleiter-Thermometer (NTC-negative temperature coefficient) zeigt aufgrund seines negativen Temperaturkoeffizienten ein exponentiell abfallendes Verhalten.

2.1.3 Vergleich von Pt100 4L und Pt100 2L

Bei der Messung wurden unter anderem ein Pt100 in Vierleiterschaltung und ein Pt100 in Zweileiterschaltung verwendet. Die beiden Thermometer unterscheiden sich in ihrer Anschlussart. Bei Widerstandsthermometern wird die Messgenauigkeit durch den Leitungswiderstand der Kabel stark beeinflusst (dieser wird mit zunehmender Kabellänge größer). Bei einem Pt 100 der Klasse B können pro Meter Leitungslänge ungefähr 0,4 K Messfehler berechnet werden. Eine höhere Genauigkeitsklasse des Thermometer könnte an dieser Stelle keine Verbesserung der Messung hervorrufen, da der größere Messfehler durch das Anschlusskabel entsteht. Dieser Fehler wird bei Drei- oder Vierleiterschaltungen durch eine andere Verdrahtung im Anschluss kompensiert. Bei der Vierleitermessung wird der Messstrom über zwei Adern durch den Messwiderstand gespeist und der Spannungsabfall über die beiden anderen Adern bestimmt. Hierdurch kann der Eigenwiderstand der Leitung kompensiert werden.

Die folgende Abbildung 2 zeigt die Messung der beiden Pt100 Temperatursensoren in Zwei- und Vierleiterschaltung mit gleicher Kabellänge im Vergleich. Die Kennlinie des Pt100 in Zweileiterschaltung (unkompensiert) liegt infolge des zuvor beschriebenen Phänomens höher, als die des Pt100 in Vierleiterschaltung.

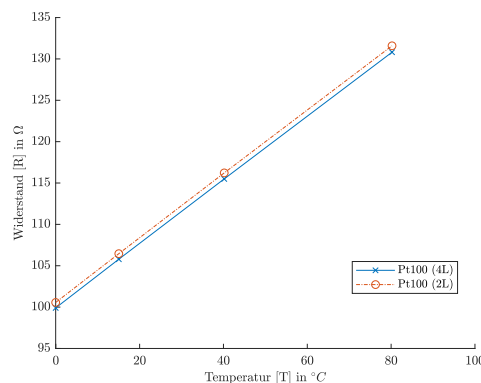


Abb. 2: Temperaturverlauf des Pt100 Temperatursensors mittels Wassertripelpunktzelle im Metallblockkalibrator.

In folgender Tabelle sind die Differenzen des Pt100 in Zwei und Vierleiter für die Messpunkte aufgetragen.

Tabelle 3: Differenz der Widerstände der Temperatursensoren von Zwei- und Vierleiterschaltung bei den eingestellten Temperaturpunkten und der gewichtete Mittelwert über den Messbereich.

Temperatur in °C	0 °C	20 °C	40 °C	80 °C	avg
ΔR in Ω	0,6582	0,6688	0,7259	0,7259	0,7071

Aus den berechneten Differenzen für die Widerstandswerte lässt sich erkennen, dass der Leitungswiderstand mit steigenden Temperaturen zunimmt. Dieses Verhalten ist nach den physikalischen Gesetzmäßigkeiten zu erwarten. Da das Anschlusskabel nur eine definierte Länge aufweist, wurde für die Abschätzung der

Kabellänge der Mittelwert über die Messwerte gebildet und die Kabellänge unter der Annahme der Temperaturunabhängigkeit des Widerstandes berechnet.

Nach folgender Gleichung 1 kann daraus die Länge des Anschlusskabels berechnet werden. Die Angaben für den spezifischen Widerstand der Kabelader und der Kabelquerschnitt wurden den Praktikumsunterlagen entnommen. Das Ergebnis wird halbiert, da sich die Widerstände beider Adern addieren:

$$l_{Kabel} = \frac{\Delta R \cdot A_{Quer}}{2 \cdot \rho} = \frac{0,7071 \Omega \cdot 0,1 \text{ mm}^2}{2 \cdot 0,0278 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}} = 1,25 \text{ m} \quad (1)$$

l_{Kabel} : Länge des Anschlusskabels des Temperatursensors des Pt100, ΔR : gemittelte Differenz der Widerstandswerte des Pt100 4L und Pt100 2L, A_{Quer} : Querschnittfläche des Kabels, ρ : spezifischer Widerstand einer Ader des Kabels.

Die berechnete Kabellänge für den Anschluss beträgt 1,25 m.

2.1.4 Spannungsverlauf des Thermoelements

Bei dem Versuch wurde unter anderem ein Thermoelement vermessen. In der folgenden Abbildung 3 ist der Spannungsverlauf des Thermoelements in Abhängigkeit der Temperatur im Bereich von 0 °C bis 80 °C aufgetragen. Es wurde für den Zusammenhang folgende Regressionsfunktion ermittelt:

Lineare Regressionsfunktion der Spannung:

$$U(T) = 3,997 \cdot 10^{-5} \cdot T - 0,001066$$

$$R^2 = 0,9998$$

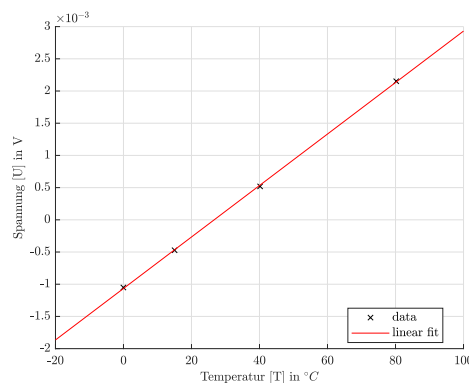


Abb. 3: Spannungsverlauf des Thermoelements in Abhängigkeit der Temperatur im Bereich von 0 °C bis 80 °C.

2.1.5 Anwendungsgebiete verschiedener Sensoren

Die verschiedenen Temperatursensoren finden im Alltag und der Technik verschiedenste Anwendungsfelder und decken damit individuell optimal verschiedenste Anforderungen ab.

NTCs zeichnen sich durch ihren negativen Temperaturkoeffizienten aus. Ihr Widerstand sinkt bei steigender Temperatur. Sie finden häufig Anwendung in der Medizintechnik, beispielsweise in Dialysegeräten, DNA-Sequenzierern und Blutanalysegeräten und können auch noch optimal in Temperaturbereichen bis zu −150 °C betrieben werden. Sie finden zusätzlich Anwendung in Küchenherden, Haushaltsgeräten oder bei der Regelung von Akkutemperaturen für Elektroautos.[1]

Thermoelemente zeichnen sich in der Anwendung bei extremen Temperaturen und Umweltbedingungen aus. Sie können häufig Temperaturen von bis zu 1700 °C betrieben werden.[1]

Platin-Temperatursensoren zeichnen sich durch ihren linearen Widerstand über einen großen Temperaturbereich aus (−200 °C bis 1000 °C), was eine sehr stabile Temperaturmessung über sehr große Messbereiche ermöglicht. Sie finden häufig Anwendung in Lebensmittelverarbeitungsanlagen, in der Raumfahrt oder zur Messung von Abgastemperaturen in der Automobilindustrie. Platin ist quasi chemisch inert, sodass es selbst bei Feuchte, korrosiver Umgebung und weiteren extremeren Umweltbelastungen zuverlässig funktionieren kann.[1]

In großen Fertigungsanlagen war es früher üblich kostengünstigere Thermometer in Zweileiter-Schaltung anzuschließen. Die durch den Leitungswiderstand entstehende Messfehler wurden tabellarisch aufgeführt und die systematischen Fehler mithilfe der Korrektur-Tabellen angepasst. Mit heutiger digitaler Technik können diese Werte direkt bei der Messung voreingestellt und automatisch korrigiert werden. Bei langen Messstrecken mit zwei Adern empfiehlt es sich, Sensoren mit möglichst großen Widerständen zu nutzen, um den anteiligen Fehler durch den Leitungswiderstand gering zu halten. Im Bereich 0..100°C sind hierbei KTY bzw. NTCs denkbar.

2.2 Teil II: Identifizierung der Sensoren

Für die Identifizierung der Temperatursensoren unterschiedlicher Typen stand ein Multimeter und die Kennliniendiagramme verschiedener Widerstandssensoren aus dem Praktikumsskript zur Verfügung. Die verschiedenen Temperatursensoren wurden jeweils an das Multimeter angeschlossen und ihr Widerstand bei Raumtemperatur (ca. 23 °C) ermittelt. Anschließend wurde der jeweilige Sensor mit der Hand erwärmt, was zu einem Temperaturanstieg und der Veränderung des Widerstands führte. Anhand der erhaltenen Widerstandswerte wurde mithilfe der Kennliniendiagramme der jeweilige Sensor identifiziert. Folgende Sensoren wurden anhand dieser Methode identifiziert:

Sensor 1: NTC	Sensor 3: PT1000 2L	Sensor 5: Pt100 2L
Sensor 2: Thermoelement	Sensor 4: KTY	Sensor 6: Pt100 4L

2.3 Teil III: Wärmebildkamera

Für den Versuch Wärmebildkamera wurde die verschiedenen Probenplatten (s. Abb. 5) in dem temperierten Wasserbad mit der Einstellung von 60 °C mittels einer Wärmebildkamera des Typs E60 der Firma FLIR verwendet. Für die Wärmebildkamera muss vor der Messung ein Emissionsgrad eingestellt werden. Hierfür wurde ein Emissionsgrad von $\epsilon = 0,95$ gewählt, der den Punkten auf den Proben entspricht. Die Wärmebildkamera kann bei korrekter Benutzung die Temperatur auf eine Genauigkeit von $\Delta T = \pm 2^\circ\text{C}$ ermitteln.

In der folgende Tabelle sind die Probenmaterialien und die mithilfe der Wärmebildkamera und dem Temperaturfühler ermittelten Temperaturen aufgeführt.

Tabelle 4: Verwendete Probenmaterialien und ermittelte Temperatur durch Wärmebildkamera und Temperaturfühler.

Nr.	Bezeichnung	Gruppe	Messpunkt	$T_{WBK} \text{ in } ^\circ\text{C}$	$T_{F\ddot{u}hler} \text{ in } ^\circ\text{C}$
1	Alu. silber eloxiert	Metall	Nein	57,5	55,6
2	Kupfer glänzend	Metall	Nein	27,8	56,9
3	POM weiß	Kunststoff	Ja	54,5	50,3/50,8
4	Alu. rau	Metall	Nein	32,0	56,4
5	Alu. glänzend	Metall	Ja	27,5/58,0	57,2/56,9
6	POM schwarz	Kunststoff	Nein	53,7	51,5

Es wurden folgende Beobachtungen gemacht (aufgenommene Bilder s. Anhang):

- Mit einem für die Wärmebildkamera voreingestellten Emissionsgrad von $\epsilon = 0,95$ können die Temperaturen der Kunststoffe (3 und 6) und des eloxierten (beschichteten) Aluminium (1) annähernd gut ermittelt werden. Da der Emissionsgrad ϵ der Metalle geringer ist, erscheinen sie in Betrachtung durch die Wärmebildkamera kälter.
- Der POM-Messpunkt ist bei Probe 3 (schwarzer Punkt auf weißem Kunststoff) nicht zu erkennen, bei Probe 5 (schwarzer Kunststoffpunkt auf Metall) hingegen schon. Der Emissionsgrad ist demzufolge material- aber nicht farbabhängig. Diese Beobachtung deckt sich zusätzlich mit der direkten Messung der aus dem selben Material bestehenden Kunststoffproben unterschiedlicher Farbe (3 und 6).
- Der schwarze Kunststoffpunkt auf dem Metall (Probe 5) weist nach der Wärmebildkamera und dem Temperaturfühler eine größere Temperatur auf als der schwarze Kunststoffpunkt auf Kunststoffprobe 3. Dies liegt daran, dass sich der Punkt nur soweit erwärmen kann, wie das Material, auf dem der jeweilige Punkt angebracht worden ist. Das Metall hat eine geringere spezifische Wärmekapazität als der Kunststoff, sodass weniger Energie nötig ist, um die Temperatur des Aluminiums zu erhöhen. Dadurch, dass die Probenmaterialien die gleiche Zeit im temperierten Wasserbad lagen, ist das Aluminiumblech wärmer als

die Kunststoffprobe. Dadurch, dass die Kunststoffpunkte nicht im direkten Kontakt mit dem Wasserbad stehen, können sie auch nur auf die Temperatur der Fläche auf der sie aufgebracht wurden erlangen. Daher kommt der Temperaturunterschied zwischen den beiden schwarzen Messpunkten 3 und 5 zustande.

- Steht die Kamera korrekt (senkrecht, ca. 1 m über dem Messobjekt) können sich teilweise die Wärmeabstrahlung der Deckenbeleuchtung oder Wärmeabstrahlung von beispielsweise Händen, welche senkrecht über die Kamera gehalten werden, von dieser zusätzlich durch Reflexion an beispielsweise den Metallproben erfasst werden, sodass auf dem Foto der Wärmebildkamera zusätzlich zum Messobjekt die Lampe oder die Hand zu sehen ist.
- Wird der Winkel oder die Entfernung der Wärmebildkamera zum Messobjekt verändert, kann diese die Temperatur nicht mehr optimal ermitteln. Durch Spiegelungen und Reflexionen erscheinen die Materialien teilweise wärmer oder kälter, auch innerhalb einer Materialprobe.

2.3.1 Berechnung der Emissionsgrade

Die mit dem Messfühler ermittelte Temperatur der Proben wird im folgenden als die wahre Temperatur angenommen. Über die mit der Wärmebildkamera ermittelte Temperatur und der Angabe der Umgebungstemperatur, kann über folgende Formel der Emissionsgrad des jeweiligen Materials bestimmt werden.

$$\epsilon = \frac{T_A^4 - T_U^4}{T_M^4 - T_U^4} \quad (2)$$

ϵ : Emissionsgrad

T_A : angezeigte Temperatur

T_U : Umgebungstemperatur

T_M : Messobjekttemperatur

In der folgenden Tabelle sind die nach Gleichung 2 berechneten Emissionsgrade angegeben.

Tabelle 5: Berechnete Emissionsgrade für die Probenmaterialien.

	ϵ		ϵ		ϵ
Probe 1	1,06	Probe 3	1,16	Probe 5	0,13
Probe 2	0,14	Probe 4	0,25	Probe 6	1,08

Die physikalisch unsinnigen Emissionsgrade über 1 kommen dadurch zustande, dass die gemessenen Temperaturen durch die Wärmekamera für diese Proben höher war als die mit dem Messfühler ermittelte Temperatur.

3 Anhang

3.1 Teil I: Kalibrierung

3.1.1 Fixpunktkalibration an der Wassertripelpunktzelle

In der folgenden Abbildung 4 wird der Temperaturverlauf in Abhängigkeit der Zeit (die Scanrate beträgt 1 s) für den Pt-100 Sensor abgebildet.

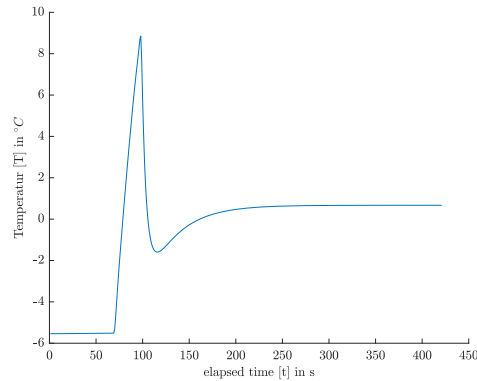


Abb. 4: Temperaturverlauf des Pt100 Temperatursensors mittels Wassertripelpunktzelle im Metallblockkalibrator.

3.2 Teil III: Wärmebildkamera

Aufgenommene Bilder des Versuchsstandes und Bilder der Wärmebildkamera.

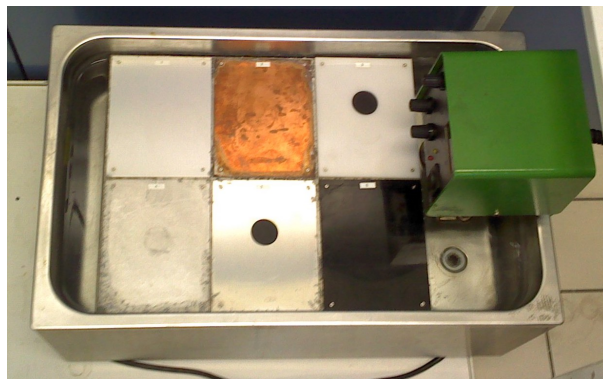


Abb. 5: Versuchsaufbau Wärmebildkamera: Die unterschiedlichen Probenplatten wurden im selben Wärmebad mit 60,0°C temperiert.

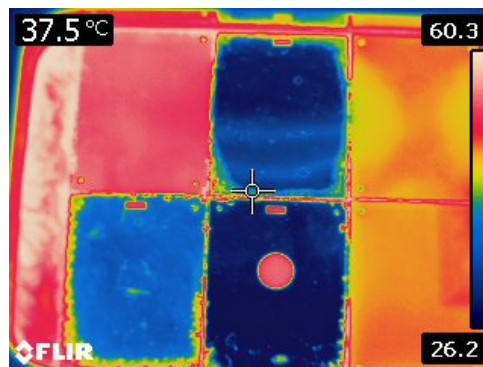


Abb. 6: Foto der Wärmebildkamera über alle Probenplatten bei gleicher Temperatur.

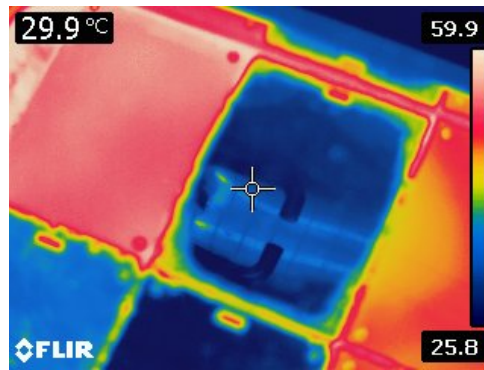


Abb. 7: Ermitteltes Wärmekamerafoto mit Deckenbeleuchtung als Störfaktor.

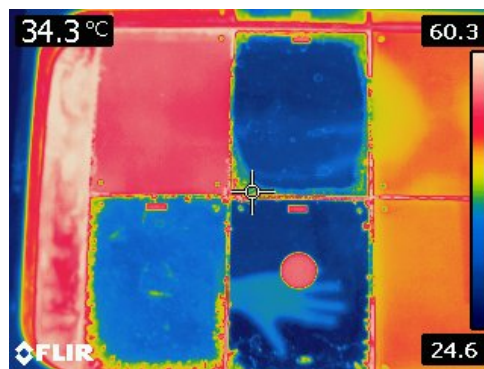


Abb. 8: Ermitteltes Wärmekamerafoto mit Hand als Störfaktor.

Literatur

- [1] TE Connectivity Corporation. *Einblick in die verschiedenen Arten von Temperatursensoren*. URL: <https://www.te.com/deu-de/industries/sensor-solutions/insights/temperature-sensor-insights.html> (besucht am 04.10.2020).