



BACHELORARBEIT

Instandsetzung und Kalibrierung der Messtechnik einer Inselanlage

Cansin Anil Sari

Elektrotechnik B.Sc.
381322

4. April 2023

Fakultät III Prozesswissenschaften
Institut für Energietechnik, KT 2
Maschinen- und Energieanlagentechnik

Fachgebietsleiter & Erstgutachter:
Prof. Dr.-Ing. Felix Ziegler

Zweitgutachter:
Prof. Dr.-Ing. Clemens Gühmann

Betreuung durch:
M.Sc. Maik Haas

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich an Eides statt, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Hilfe Dritter angefertigt zu haben. Gedanken und Zitate, die ich aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommen habe, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen und wurde bisher nicht veröffentlicht.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Technischen Universität Berlin bedanken, die mir im Rahmen meiner Bachelorarbeit geholfen haben. Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Maik Haas, der mir jederzeit bei theoretischen und praktischen Problemen zur Seite stand und mit seinem sehr umfangreichen Wissen in den Ingenieurwissenschaften helfen konnte.

Des weiteren möchte ich beim Fachgebiet für Elektronik und medizinische Signalverarbeitung der TU Berlin für die Betreibung des “Lötlabors“ im EN 444/445, in welcher ich im Zuge meiner Bachelorarbeit Platinen bemessen und eine neue Platine gelötet habe, bedanken. Außerdem bedanke ich mich bei Dr.-Ing. Christian Nayeri, Ansprechpartner für den Großen Windkanal vom Fachgebiet für Experimentelle Strömungsmechanik, sowie bei Dr.-Ing. Stefan Gramm, Ansprechpartner für die Ulbricht-Kugel des Fachgebiets Lichttechnik. Ohne ihre Unterstützung wäre es mir nicht gelungen die Kalibrierung der Messsensoren nach geltenden Normen durchzuführen.

Inhaltsverzeichnis

Glossar	VI
Akronyme	VII
Größenverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	2
1.3 Gliederung der Arbeit	2
2 Grundlagen	3
2.1 Messtechnische Grundlagen	3
2.1.1 Messkurvenparametrisierung	6
2.1.2 Messkette für die Digitalisierung analoger Signale	8
2.2 Allgemeine Übersicht über das Inselsystem	13
2.3 Messtechnik der Inselanlage	14
2.3.1 Messsensoren & Shunt-Widerstände der Inselanlage	15
2.3.2 Übertragungsstrecke der Messsignale	19
2.3.3 Arduino Mega 2560	23
2.4 Normierung	24
3 Durchführung	25
3.1 Untersuchung der Übertragungsstreckenplatine	25
3.2 Umbau zum Tiefpassfilter mit Spannungsfolger	25
3.3 Kalibrierung der Temperatursensoren	28
3.4 Kalibrierung des Windrichtungsgebers	29
3.5 Kalibrierung des Anemometers	30
3.6 Untersuchung nach VDI 3786:2018-05 - Blatt 2	32
3.7 Kalibrierung des Pyranometers	33
3.8 Untersuchung der Shunt-Widerstände	34
3.9 Kalibrierung des Arduinos	35
4 Ergebnisse	37
4.1 Ergebnis der Arduinokalibrierung	37

4.2	Ergebnis der Übertragungsstreckenplatinenuntersuchung	38
4.3	Ergebnis der Temperaturkalibrierung	40
4.4	Ergebnis der Windrichtungsgeberkalibrierung	42
4.5	Ergebnis der Anemometerkalibrierung	45
4.6	Ergebnis der Pyranometerkalibrierung	47
4.7	Ergebnis der Shunt-Widerstände Untersuchung	48
5	Zusammenfassung	50
6	Ausblick	51
A	Anhang	54
A.1	Datenblätter	55
A.1.1	Thies - Anemometer	55
A.1.2	Shunt - Widerstände Weigel	57
A.1.3	Thies - Windrichtungsgeber	58
A.1.4	TMP36 - Temperatursensor	60
A.1.5	CS300 - Pyranometer	63
A.1.6	UNI-T UT139C Multimeter	65
A.1.7	Analog Discovery 2	67
A.1.8	Arduino Mega	68
A.1.9	Atmega 2560	69
A.1.10	Windkanal - Oberschleißheim	70
A.1.11	Drehteller - OWIS	72
A.1.12	Großer Windkanal - TU Berlin	74
A.1.13	ICL7660 - Schaltspannungsregler	75
A.1.14	Peaktech 3430 - Multimeter	76
A.1.15	RTC 158	77
A.1.16	SP-110-SS - Pyranometer	79
A.1.17	Tl071 - OPV	80
A.1.18	UL 1650 - Ulbricht Kugel	81
A.1.19	TP-9 Infrarot-Thermometer	82
A.1.20	Bsp. Werkskalibrierung eines Thies-Gerätes	83
A.2	Beschreibung des digitalen Anhang (letzter Anlage)	84

Glossar

Anemometer - Messsensor zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit in $\frac{m}{s}$.

Ansprechwelle - Windgeschwindigkeit in m/s bei der sich ein Anemometer oder Windrichtungsgeber anfängt sich zu drehen.⁰

Arduino - Board mit einem Mikrocontroller, welcher analoge und digitale Signale messen sowie ausgeben kann.

Dämpfungsgrad - Wert, welcher das Schwingungsverhalten des Windrichtunggebers angibt.⁰

Entfernungskonstante - Wert, welcher das Trägheitsverhalten des Anemometers bei schlagartiger Beschleunigung beschreibt.⁰

Interpolationskurve - Kurve, die so parametrisiert wird, dass sie genau durch Messpunkte verläuft.

Messsensor - Wandelt eine in der Natur vorkommende physikalische Größe meist in ein elektrisches Signal um.

Mikrocontroller - Mikroprozessor mit weiteren möglichen Bestandteilen wie Arbeits- & Programmspeicher, Analog-Digital-Umsetzer, etc.

Norm - In den Ingenieurwissenschaften geltende Richtlinien, an die sich ein Ingenieur (bspw. im Rahmen einer Kalibrierung) zu halten hat.

Pyranometer - Messsensor zur Bestimmung der Lichtintensität $\frac{W}{m^2}$.

Shunt - Widerstand zur Bestimmung von Strömen, indem über ihn die abgefallene Spannung (Potentialdifferenz) gemessen wird.

Regressionskurve - Kurve, die so parametrisiert wird, indem die Approximation dieser Kurve zu einer Vielzahl von Messpunkten möglichst gering ist.

Übertragungsfunktion - Anhand der Übertragungsfunktion kann mathematisch die Signal konditionierung in der Übertragungsstrecke beschrieben werden.

Übertragungsstrecke - Konditioniert ein anliegendes Signal, sodass es am Ausgang gewünschte Signaleigenschaften aufweist. Bspw. kann ein anliegendes Signal verstärkt werden.

Windrichtungsgeber - Messsensor zur Bestimmung der Windrichtung in Gradmaß von 0° bis 360°.

⁰Vgl [VDI18] S.4-5

Akronyme

Abkürzung	Bedeutung
ADU	Analog-Digital-Umsetzer
AMP	Übertragungsstrecke mit Differenzverstärkung, 100mV Offset und Tiefpassfilter ⁰
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DIR	Übertragungsstrecke ohne Signalkonditionierung mit Tiefpassfilter ⁰
DKD	Deutscher Kalibrierdienst
DWD	Deutscher Wetterdienst
EN	Europäische Norm
GND	engl.: ground, deutsch: Masse
ISO	Internationale Organisation für Normung
OPV	Operationsverstärker
PV	Photovoltaik
SHUNT	Übertragungsstrecke mit 240Ω-Shuntwiderstand und Tiefpassfilter ⁰
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VOLDI	Übertragungsstrecke mit Spannungsteiler und Tiefpassfilter ⁰
WK	Windkraft

⁰Vgl. [Ton16] S.VIII-IX

Größenverzeichnis

Symbol	Einheit	Bedeutung
C_b	A	Batteriestrom ⁰
C_{nt}	A	Netzteilstrom ⁰
C_{pv}	A	Photovoltaik-Strom ⁰
C_{wr}	A	Wechselrichterstrom ⁰
C_{wt}	A	Windkraftanlagen-Strom ⁰
D	–	Dämpfungskonstante eines Windrichtunggebers
d_w	°	Windrichtung gemessen mit dem Windrichtungsgeber ⁰
E	m	Entfernungs konstante eines Anemometers
F_g	–	Messabweichung
f_g	Hz	Grenzfrequenz eines Filters. In dieser Arbeit Tiefpassfilter.
I_s	$\frac{W}{m^2}$	Lichtintensität der Sonne gemessen mit einem Pyranometer ⁰
k	–	Erweiterungsfaktor zur Bestimmung der Unsicherheit
τ	s	Zeitkonstante
T_a	°C	Außentemperatur, auf dem Dach des Kerntechnikgebäudes ⁰
T_b	°C	Batterietemperatur, gemessen im Kerntechnikgebäudes ⁰
σ	–	Standardabweichung
u	–	Messunsicherheit
U_{max}	V	ADU-Referenzspannung des Mikrocontrollers
U_s	V	Systemspannung, bzw. Batteriespannung
v_w	$\frac{m}{s}$	Windgeschwindigkeit gemessen mit dem Anemometer ⁰

⁰Vgl. [Ton16] S.X

Abbildungsverzeichnis

2.1	Verteilungsdichtefunktion der Normalverteilung um den Erwartungswert μ ([Mü20] S.25)	5
2.2	Verteilungsdichtefunktion der Gleichverteilung um den Erwartungswert μ ([Mü20] S.26)	6
2.3	Abtastung mit Aliasing-Effekt ([Kis23])	9
2.4	Quantisierungskennlinie ([RW11] S. 326)	10
2.5	Offsetfehler([RW11] S. 333)	11
2.6	Verstärkungsfehler([RW11] S. 333)	11
2.7	DNL-Fehler ([RW11] S. 333)	12
2.8	INL-Fehler ([RW11] S. 333)	12
2.9	Allgemeine Übersicht über die Inselanlage([Ton16] S. 13)	13
2.10	Messtechnik der Inselanlage ([Ene18] S. 24)	14
2.11	Übertragungsstrecken([Ton16] S.36)	19
2.12	DIR Übertragungsstrecke (R steht für Ω)	20
2.13	SHUNT Übertragungsstrecke ([Ton16] S.29)	20
2.14	VOLDI Übertragungsstrecke ([Ton16] S.31)	21
2.15	AMP Übertragungsstrecke (In Anlehnung an [Ton16] S.32)	21
3.1	Tiefpassfilter mit Spannungsfolger	26
3.2	Zusatzplatine mit Spannungsfolgern	27
3.3	Kalibrierung Temperatur	29
3.4	Kalibrierung Windrichtungsgeber	30
3.5	Kalibrierung Anemometer	32
3.6	Kalibrierung Pyranometer in Ulbricht Kugel	34
3.7	Atmega 2560 - Analog to Digital Converter Block Schematic - (Vgl. [Mic] S. 269)	35
3.8	Code Bestimmung 1,1V	36
4.1	Batterietemperatursensorkalibrierung - Kennlinie	40
4.2	Außentemperatursensorkalibrierung - Kennlinie	41
4.3	Windrichtungsgeberkalibrierung - Kennlinie	42
4.4	Dämpfungsgrad - Bestimmung	44
4.5	Anemometerkalibrierung - Kennlinie	45
4.6	Anemometerkalibrierung - Kennlinie - modifiziert	46
4.7	Bestimmung der Entfernungskonstante	47

Tabellenverzeichnis

2.1	Messsensoren & Messwiderstände der Inselanlage (In Anlehnung an [Ton16])	15
2.2	Schalenkreuzanemometer Daten (In Anlehnung an [Ton16])	15
2.3	Windrichtungsgeber Daten (In Anlehnung an [Ton16])	16
2.4	Pyranometer Daten (In Anlehnung an [Ton16])	16
2.5	TMP36 Daten (In Anlehnung an [Ton16])	17
2.6	Shunt Widerstand Weigel Daten & Widerstandswerte (In Anlehnung an [Ton16])	17
2.7	Messgrößen (In Anlehnung an [Ton16])	18
2.8	Messgrößen nach der Übertragungsstrecke (In Anlehnung an [Ton16])	23
2.9	Arduino Mega (In Anlehnung an [Ton16])	23
2.10	ATmega2560 (In Anlehnung an [Ton16])	24
3.1	Stabilitätsuntersuchung Anemometer bei 6m/s	31
3.2	Vergleich Referenzpyranometer und zu kalibrierendem Pyranometer	33
4.1	Verstärkungsfehler Untersuchung 1,1V	37
4.2	Verstärkungsfehler Untersuchung 5V	37
4.3	Ergebnisse der Übertragungsstreckenplatine (in Anlehnung an [Ton16])	38
4.4	Messabweichungen durch die ursprünglichen Skalierungsfaktoren	42
4.5	Vergleich VDI 3786:2018-05 - Blatt 2 Richtlinie mit realer Messung für den Windrichtungsgeber (in Anlehnung an [VDI18])	44
4.6	Vergleich VDI 3786:2018-05 - Blatt 2 Richtlinie mit realer Messung für den Windrichtungsgeber (in Anlehnung an [VDI18])	47
4.7	SHUNT Widerstände - Kalibrierung	48

Abstract

In dieser Arbeit geht es um die Instandsetzung und Kalibrierung der Messtechnik einer 13 Jahre alten Inselanlage, die sich auf dem Dach des Kerntechnikgebäudes der TU Berlin befindet und zuletzt vor etwa 7 Jahren überarbeitet wurde. Zu der Messtechnik gehören meteorologische Messsensoren, welche die Windstärke, Windrichtung, Temperatur und Lichtintensität messen sowie Shunt-Widerstände, die zur Messung der elektrischen Ströme innerhalb der Inselanlage eingesetzt werden. Die analogen Messsignale der Messsensoren und Shunt-Widerstände werden von einer Übertragungsstreckenplatine verstärkt und anschließend in einem Arduino Board digitalisiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jede Komponente der Messtechnik einzeln untersucht. Die Kalibrierung stellt den wesentlichen Kern dieser Arbeit dar und erfolgte nach veröffentlichten Normen des VDI, DIN und der ISO. Die für die Kalibrierung gemachten Messwerte wurden parametrisiert. Es zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen der neu kalibrierten Kennlinie (bzw. dessen Kalibrierfaktor) und der ursprünglichen Kennlinie. Anhand der gemachten Erfahrungen in der Arbeit bzgl. der Kalibrierung und der Instandsetzung ist es empfehlenswert in definierten Zeitintervallen die Messtechnik einer Inselanlage zu warten, um eine korrekte Funktionsweise der Messtechnik zu gewährleisten.

1 Einleitung

1.1 Motivation

~~Die Strompreise stiegen in Deutschland im 1. Halbjahr 2022 gegenüber dem 2. Halbjahr 2021 für private Haushalte um 1,9% und für Nicht Haushalte (zum Beispiel Unternehmen und Behörden) um 19,3%.¹ Eine eigene PV Anlage bzw. Inselanlage ist daher für viele Bewohner und Unternehmer zu einer wirtschaftlich sowie unter dem Aspekt der Ökologie attraktiven Alternative geworden. Die Investitionsbeträge in eine PV Anlage werden getätigt, da bereits nach ein paar Jahren der Ertrag des Stromes der PV Anlage die ursprünglich investierten Kosten ausgleicht. Dies wird in der Wirtschaft auch als Amortisationszeit bezeichnet.² Die Amortisationszeit einer in Nordeuropa installierten PV Anlage (Hinweis: Batterie und Wechselrichter nicht inkludiert) beträgt sich auf etwa 1,1 Jahre³. So entwickelt sich zeitgleich zu den höheren Strompreisen der Trend zu mehr PV Anlagen in Deutschland. Im März 2022 lag die Nennleistung aller in Deutschland montierten PV Anlagen bei ca. 58.400 Megawatt, zehn Prozent mehr zum Vorjahresmonat⁴. Damit der Energieertrag der Inselanlage analysiert werden kann, um damit mathematische Berechnungen bzgl. der Amortisationszeit aufzustellen, ist eine Messtechnik unabdingbar.~~

Die Aufgabe der Messanlage einer Inselanlage ist es den Ist-Zustand der Inselanlage durch interne elektrische sowie äußere meteorologische Messungen zu bestimmen, um die elektrischen Vorgänge innerhalb der Anlage erläutern zu können. Neben den Aussagen bzgl. der Amortisationszeit können mit einer Messanlage Aussagen zum Wirkungsgrad der einzelnen Komponenten, durch einen Vergleich bspw. der durch ein Anemometer gemessenen Windgeschwindigkeit mit der in der WKA umgesetzten Leistung, und am wesentlichsten zum Betriebsverhalten, ob die Batterien durch die Energiequellen geladen oder durch die Verbraucher entladen werden, getroffen werden. Außerdem wird durch die Überprüfung der Temperatur stets gewährleistet, dass keine kritischen Temperaturen überschritten werden und insbesondere bei einem Brand der Inselanlage, sofort die Betreiber alarmiert und einschreiten können.

Das Anbringen der PV-Anlage oder einer WKA-Anlage und einer passenden Messtechnik allein reicht nicht aus. In geregelten zeitlichen Abständen bedarf es einer Wartung der Energiequellen und der Messtechnik, da beim Letzteren elektrische Leitungen & Komponenten sowie mechanische Elemente über die Jahre verschleissen. So schreibt der VDI-Verein in seiner veröffentlichten Richtlinie VDI 2883:2020-01 - Blatt1 zur Instandhaltung von PV-Anlagen vor, dass auch die Messsensorik überprüft und gewartet werden soll.⁵ Dies ist ein erforderlicher Schritt, um zu ge-

¹Vgl. [Sta22a]

²Vgl. [Gab18]

³Vgl. [Fra22]

⁴Vgl. [Sta22b]

⁵Vgl. [VDI20] S.23

1 Einleitung

währleisten, dass die Messwerte stets akkurat sind und somit der Ist-Zustand der Inselanlage korrekt bestimmt werden kann.

1.2 Aufgabenstellung

Problematik

Auf dem Dach des Kerntechnikgebäudes der Technischen Universität Berlin befindet sich eine Inselanlage, welche während des Wintersemesters 2009/2010 von der Projektgruppe des Energieseminars⁶ angelegt wurde.⁷ Die Anlage besteht aus einer 200Wp Photovoltaik- und einer 200Wp starken Windkraftanlage. Des Weiteren wurde von der Projektgruppe des Energieseminars im selben Jahr eine für die Inselanlage passende Messtechnik mit Messsensoren angebracht. Zuletzt wurde die Messtechnik 2016 im Rahmen von der Bachelorarbeit des ehemaligen TU Berlin Studenten Toni Tress grundlegend neu konstruiert und in Betrieb genommen.⁸ Ziel dieser Arbeit ist es die mittlerweile sieben Jahre alte Messtechnik der Inselanlage instand zu setzen und zu kalibrieren.

Im Einzelnen sind folgende Arbeitspakete zu bearbeiten:

- Bestandsaufnahme der vorhandenen Messtechnik
- Kalibrierung und Instandesetzung der Messtechnik
- Messunsicherheit bei der Kalibrierung der Messsensoren
- Diskussion der Ergebnisse

Während der Arbeit soll der Verschleiß der Messtechnik analysiert werden, um somit die Bedeutsamkeit für eine Wartung der Messtechnik einer Inselanlage zu verdeutlichen. Außerdem sollen die Messsensoren Tests unterzogen werden, um zu analysieren, ob sie vordefinierte elektrische sowie mechanische Anforderungen erfüllen. In diesem Zusammenhang soll bspw. die Rotationsdynamik des Windrichtungsgebers analysiert werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Zuallererst werden in dem Kapitel Grundlagen das für diese Arbeit wichtige theoretische Fachwissen sowie eine Übersicht über die Messtechnik vorgestellt. Bei der Durchführung wird die Instandsetzung der Messtechnik und die Kalibrierung der Messsensoren besprochen. Sie bildet den Kern dieser Arbeit. Im Anschluss werden die Ergebnisse der jeweiligen Kalibrierungen dargestellt und es erfolgt eine Fehleranalyse. Den Abschluss bildet die Zusammenfassung, in welcher die von dieser Arbeit gemachten wichtigsten Erkenntnisse wiedergegeben und es erfolgt ein Ausblick auf mögliche weitere zukünftige Projekte.

⁶Das Energieseminar ist eine Lehrveranstaltung an der Technischen Universität Berlin in der praxis- und wissenschaftsrelevante Themen aus dem Bereich der Energietechnik gelehrt und praxisnah umgesetzt werden.

⁷Vgl. [Ene10]

⁸Vgl. [Ton16]

2 Grundlagen

2.1 Messtechnische Grundlagen

Zunächst werden messtechnische Grundlagen, einleitend mit Begriffsdefinitionen, anschließend die Messungenauigkeit, Messkurvenparametrisierung und abschließend die Analog-Digital-Messkette, besprochen.

Begriffe der Messtechnik

Grundlegend ist die Aufgabe einer Messtechnik eine in der Natur vorhandene physikalische Größe als Zahl mit einer ihm vordefinierten Einheit zu erfassen.¹ Die von der Messtechnik erfasste Größe wird im Allgemeinen auch als **Messgröße** bezeichnet. Jedoch kommt es bei jeder Messung durch nicht gewünschte vorliegende Faktoren zu Fehlereinflüssen auf die, welche in Systematische Fehler und Zufällige Fehler klassifiziert werden. Von systematischen Fehler ist deren Ursache bekannt und eindeutig bestimmbar und sie können daher im Vergleich zu den zufälligen Fehlern bereits vor der Messung durch die Anpassung der Messtechnik kompensiert werden. Die zufälligen Fehler hingegen sind nicht erfassbar, da sie bei wiederholten Messungen, unter der Annahme gleicher Bedingungen, nicht konstant bleiben. Für die Fehlereinflüsse bei der Messung gibt es viele verschiedene Ursachen, wie bspw. die **Innere Störgröße**, welche sich innerhalb der verwendeten Messtechnik als Fehler bemerkbar macht. Beispielsweise können die elektrischen sowie mechanischen Komponenten gealtert sein. Die **äußere Störgröße** tritt auf, wenn von außen eine physikalische Größe als unerwünschter Einfluss auf die Messtechnik sich ausübt. Ein unbeliebte äußere Störgröße stellen in der Elektrotechnik das Einwirken von elektromagnetischen Fremdfeldern dar. Beim Ablesen eines Messwerts kann es ebenfalls zu Fehlern kommen, den sogenannten **Beobachtungsfehler**. Die **dynamischen Fehler** treten bei Messtechniken auf, die nicht dafür ausgelegt sind, mehr als zwei verschiedene Messgrößen gleichzeitig zu messen. Da die Messgrößen dann einzeln gemessen werden, ist die Anzeige der Messgröße nicht verzögerungsfrei. Durch das **vereinfachte Modell des Messsystems** kommt es auch zu Fehlern, da die Messung von Systemen durch ideale Komponenten beschrieben wird und in der Realität die Komponenten bspw. temperaturabhängig sein können. Wenn die Messeinrichtung dem zu messenden System Energie entzieht, um z.B. sich selbst in Betrieb nehmen zu können kommt es zum Fehler der **Rückwirkung**. Eine Messtechnik, welche an die Batterie für die Selbstversorgung angeschlossen ist und gleichzeitig die Batteriespannung messen soll, verursacht einen solchen Fehler.

¹Vgl. [UK08] S. 7

Messabweichung

Der angezeigte Wert auf einem Messgerät, bzw. der Messwert y_A abzüglich des zu erwartenden richtigen Wertes y_r entspricht der sogenannten **Messabweichung** F.²

$$F = y_A - y_r \quad (2.1)$$

Üblicherweise steht in dem Datenblatt eines Messgerätes die Messgenauigkeit zu einem bestimmten Messbereich, in dem die zu messende Größe liegen soll. Der abgelesene Messwert ist fehlerbehaftet und der richtige Wert der Messgröße liegt innerhalb der definierten Toleranzen des Messgerätes.

In der Regel reicht es nicht aus, das gesuchte Messergebnis mit dem Messwert des Messgerätes und dessen Messabweichung anzugeben, da häufig das Messergebnis bzw. die Messung in Abhängigkeit von weiteren nicht idealen ~~weiteren~~ Faktoren gemacht wird. Es kommen also nicht nur durch Messgeräte bedingte Fehlerabweichungen zustande, sondern auch durch das Messsystem an sich. Bspw. ist die Windgeschwindigkeit im inneren des Windkanals nicht konstant bei einer Anemometerkalibrierung. Daher ist der zu bestimmende Gesamtfehler bzw. die Gesamt-messabweichung im Worst-Case die Aufaddierung aller Messabweichungen. Explizit am Beispiel: Die Gesamt-messabweichung entspricht dann der maximalen Geschwindigkeitsabweichung von der eingestellten Geschwindigkeit (kann ermittelt werden über ein Staudruckrohr) des Windkanals, und des Anemometers von der Referenzwindgeschwindigkeit. Die Funktion der zu bestimmenden Messgröße, in Abhängigkeit von den Messgrößen x lautet:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(\mathbf{x})$$

Für die Messabweichung Δx ist x_{i0} der gemessene Wert ~~ist~~ und x_i der richtige Wert ~~ist~~

$$\Delta x_i = x_i - x_{i0} \quad (2.2)$$

Mit Hilfe der Taylorapproximation, ergibt sich die Aufaddierung aller Messabweichungen.³

$$y - y_0 = \sum_i \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial x_i} \Bigg|_{x_{i0}} (x_i - x_{i0}) \quad (2.3)$$

Messunsicherheit

Um die zufällige Streuung des Messergebnisses mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit anzugeben, verwendet man die sogenannte Messunsicherheit. Sie gibt ein Intervall um einen Erwartungswert an, in dem der richtige Messwert der Messgröße mit einer vordefinierten Wahrscheinlichkeit, üblicherweise in der Industrie von 95%, liegt.⁴

²Vgl. [Mü20] S.17

³Vgl. [Mü20] S.29

⁴Vgl. [Mü20] S.28

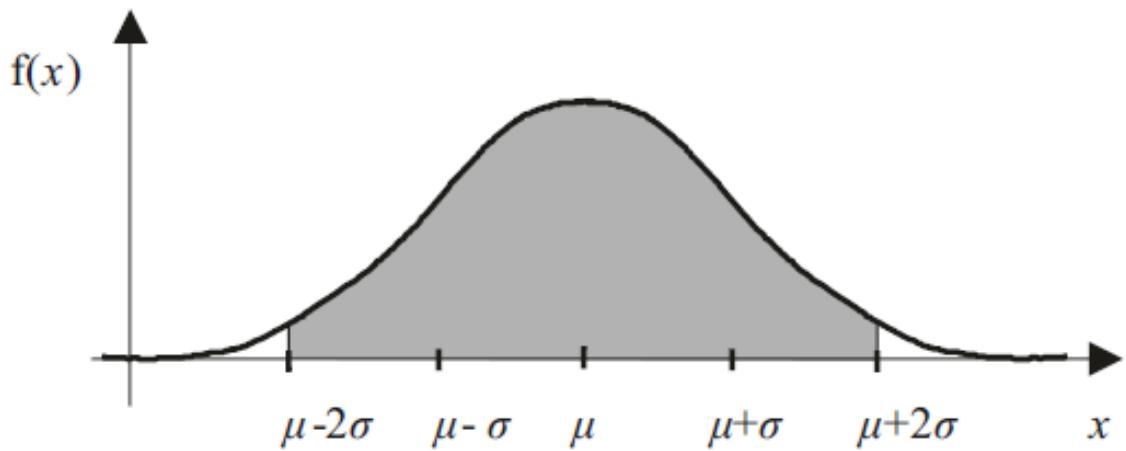


Abbildung 2.1: Verteilungsdichtefunktion der Normalverteilung um den Erwartungswert μ ([Mü20] S.25)

In Abbildung 2.1 ist die Normalverteilung für eine Überdeckungswahrscheinlichkeit von 95% dargestellt. σ entspricht der Standardabweichung der Normalverteilung. Durch die Multiplikation von dem Erweiterungsfaktor k , in diesem Fall gleich zwei, und σ wird die sogenannte erweiterte Unsicherheit bestimmt. $\pm 2\sigma$ stellen die Grenzen der Messunsicherheit dar. Die Standardabweichung kann man über die empirische Varianz bestimmen, also über eine Vielzahl von Messungen N und dem Mittelwert \bar{x} der Messungen.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.4)$$

Zudem gibt es noch die Verteilungsdichtefunktion der Gleichverteilung um den Erwartungswert μ und dessen maximalen Fehlergrenzen d . Die maximalen Fehlergrenzen entsprechen der **Messabweichung**.

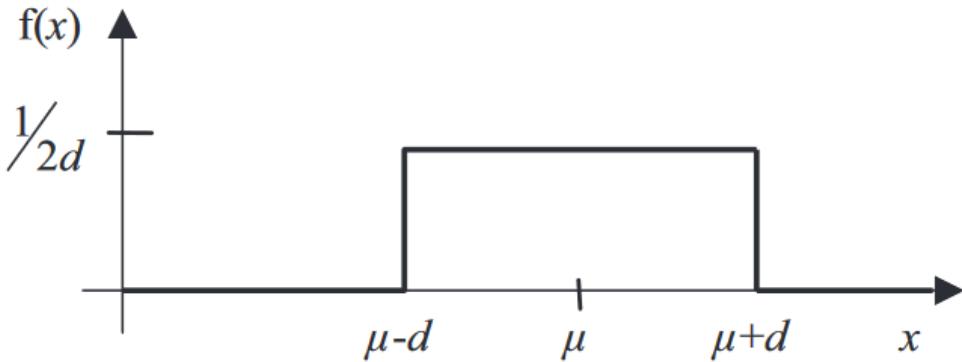


Abbildung 2.2: Verteilungsdichtefunktion der Gleichverteilung um den Erwartungswert μ ([Mü20] S.26)

Die Standardabweichung ergibt sich dann nachfolgender mathematischer Berechnung für Normalverteilungen.

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Gi}}^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot f(x) dx = \int_{-\mu-d}^{\mu+d} x^2 \cdot \frac{1}{2d} dx = \frac{1}{6d} [x^3]_{-\mu-d}^{\mu+d} = \frac{1}{3} d^2 \\ \sigma_{\text{Gl}} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot d\end{aligned}\quad (2.5)$$

Ist eine Vielzahl von Messungen nicht möglich, kann angenommen werden, dass die Messwerte sich normal verteilen.⁵

Ähnlich wie bei der Messabweichung, werden zur Bestimmung der Gesamtunsicherheit alle einzelnen Unsicherheiten aufaddiert, jedoch im Quadrat. Die Formel wird auch Gaußsche Fehlerfortpflanzung genannt:⁶

$$\sigma_y^2 = \sum_i \left[\frac{\partial f(\mathbf{x}_0)}{\partial x_i} \right]^2 \sigma_{x_i}^2 \quad (2.6)$$

Um die abschließende Messunsicherheit u anzugeben für ein bestimmtes Überdeckungsintervall, muss die Abweichung mit dem Erweiterungsfaktor k multipliziert werden:

$$u = k \cdot \sigma_y \quad (2.7)$$

2.1.1 Messkurvenparametrisierung

Wenn eine Vielzahl von Messwerten zu verschiedenen Zuständen aufgenommen wurde, dann kann diese Anzahl an stationären Punkten durch eine Parametrisierung in eine analytische Form gebracht werden. Ziel der Parametrisierung ist es einen Zusammenhang zwischen der Eingangsgröße und der Ausgangsgröße zu schaffen. Die **Interpolation** und **Minimierung der Fehlerquadrat**e sind die gängigsten Methoden für die mathematische Parametrisierung. Die Interpolation

⁵Vgl. [Mü20] S.26

⁶Vgl. [Mü20] S.30

darf angewendet werden, wenn für den Grad des gesuchten Polynoms für die Parametrisierung $\text{Grad}\{p(u)\}$ und der Anzahl der Messpunkte n, folgende Bedingung herrscht:⁷

$$\text{Grad}\{p(u)\} \leq n - 1 \quad (2.8)$$

Bei der Interpolation wird sichergestellt, dass die schlussendlich parametrisierte Kurve durch die Messpunkte verläuft. Die Abweichung der Messpunkte zu der parametrisierten idealen Kennlinie ist daher null. Für die Parametrisierung mit einem Polynom ersten Grades werden in der Regel lineare Interpolationen verwendet. Diese werden in der analytischen Form von linearen Gleichungen dargestellt:

$$f(x) = mx + b \quad (2.9)$$

und

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (2.10)$$

Für Polynome höheren Grades werden im Ingenieurwesen Spline-Interpolationen verwendet.

Liegt andererseits eine Vielzahl von Messwerten vor und die zu parametrierende Messkurve soll möglichst nah zu den Messpunkten verlaufen, dann wird die **Minimierung der Fehlerquadrate** verwendet. Die erhaltene analytische Form verläuft im Vergleich zur Interpolation nicht durch die Messpunkte, sondern sie wird so angenähert, sodass der entstandene Fehler bzw. Abweichung möglichst gering ausfällt. In der Regel wird eine lineare Form gesucht für die Parametrisierung, welches u.a. auch als Regressionsgerade bezeichnet wird. Die Form der Regressionsgerade für den Polynomgrad 1, entspricht der linearen Glg.:

$$\hat{y}(u) = a_1 u + a_0 \quad (2.11)$$

Allgemein werden mithilfe der Minimierung der Fehlerquadrate, wobei die Summe der Approximationsfehlerquadrate verwendet wird, die unbekannten Parameter a_1 und a_0 bestimmt. y_k und u_k stellen hierbei ideale Punkte auf der zu noch zu bestimmenden Regressionskurve dar. Q ist in diesem Fall das sogenannte Gütemaß und gibt die Varianz der Messpunkte zu der idealisierten Messkurve an:⁸

$$Q = \sum_{k=0}^{n-1} (y_k - a_1 u_k - a_0)^2 \quad (2.12)$$

In diesem Fall wird die Gleichung so umgestellt, sodass es in differentieller Form steht. Sie werden mit null gleichgesetzt, damit die Abweichungen sehr gering ausfallen und die Approximation somit möglichst hoch ist.

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{da_1} &= -2 \sum_{k=0}^{n-1} u_k (y_k - a_1 u_k - a_0) = 0 \\ \frac{dQ}{da_0} &= -2 \sum_{k=0}^{n-1} (y_k - a_1 u_k - a_0) = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

⁷Vgl. [UK08] S.13

⁸Vgl. [UK08] S.19

2 Grundlagen

Die große Reihe wird in mehrere kleinen Reihen unterteilt, gemäß der Summenregel für Reihen:

$$\begin{aligned} a_1 \sum_{k=0}^{n-1} u_k^2 + a_0 \sum_{k=0}^{n-1} u_k &= \sum_{k=0}^{n-1} u_k y_k, \\ a_1 \sum_{k=0}^{n-1} u_k + n a_0 &= \sum_{k=0}^{n-1} y_k, \end{aligned} \quad (2.14)$$

Schlussendlich muss noch nach den gesuchten Parametern a_0 und a_1 umgestellt werden.

$$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} y_k - a_1 \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} u_k, \\ a_1 &= \frac{n \cdot \sum_{k=0}^{n-1} u_k y_k - \sum_{k=0}^{n-1} u_k \sum_{k=0}^{n-1} y_k}{n \cdot \sum_{k=0}^{n-1} u_k^2 - \left(\sum_{k=0}^{n-1} u_k \right)^2}. \end{aligned} \quad (2.15)$$

Die Gleichung beinhaltet den Term $\frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} u_k$ was dem Mittelwert von u entspricht.

Hystereseffekt

Zusätzlich wird in der Messtechnik der sogenannte Hysteresis-Effekt von Bauteilen untersucht. Der Hysteresis-Effekt tritt auf, wenn die Messgröße zunächst von einem Messanfang gesteigert wird und dann anschließend gesenkt wird, um diesen sogenannten Punkt beim Messanfang wieder zu erreichen. Es wird beobachtet, dass die Messwerte eine Differenz zum ursprünglichen Messwert am Anfang oder zwischenzeitlich aufweisen.⁹

2.1.2 Messkette für die Digitalisierung analoger Signale

Die Aufgabe einer Messkette zur Digitalisierung analoger Signale ist es die von einem Messsystem gemessenen analogen Zeitwerte zu digitalisieren, um entsprechende Berechnungen damit zu machen oder es auf einem Display anzuzeigen. Der Messsensor nimmt zunächst den Messwert analog auf. Anschließend wird das Messsignal verstärkt bzw. so konditioniert, damit es sich in dem gewünschten Spannungsbereich befindet. Danach passiert das Messsignal einen Anti-Aliasing-Filter. In der Regel ist dieser ein Tiefpassfilter, der die nicht gewünschten hochfrequenten Signale oberhalb der Grenzfrequenz, welche selbst von der Auslegung des Widerstandes und Kondensators abhängt, filtert. Der Anti-Aliasing-Filter verhindert den sogenannten Aliasing-Effekt, welcher auftritt, wenn das Messsignal Frequenzanteile oberhalb der halben Abtastfrequenz besitzt. Die Abtastfrequenz wird in der Signalverarbeitung als die Frequenz bezeichnet mit der ein zeitkontinuierliches analoges Signal zu diskreten Zeitpunkten, den Abtastintervallen, erfasst wird. Die Werte zwischen den Abtastintervallen gehen verloren.¹⁰

⁹Vgl. [UK08] S.41

¹⁰Vgl. [UK08] S.246

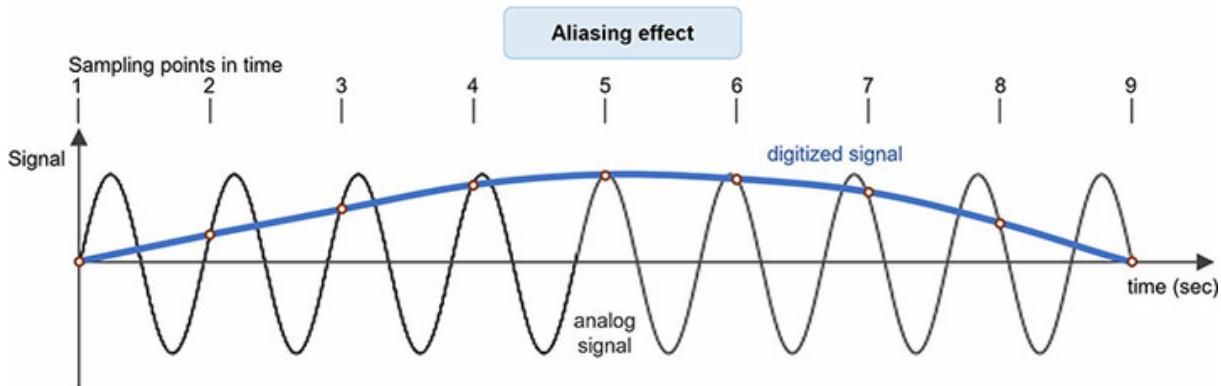


Abbildung 2.3: Abtastung mit Aliasing-Effekt ([Kis23])

Der Aliasing-Effekt äußert sich dadurch, dass die Frequenzanteile des Signals wegen der niedrigen Abtastfrequenz als Signale tieferer Frequenz interpretiert werden. Wie in der Abbildung 2.3 zu sehen ist, entspricht die Frequenz des abgetasteten Signals (in blau) nicht mehr dem ursprünglichen Signal (in schwarz) beim Aliasing-Effekt. Außerdem werden die Zeitwerte zwischen den abgetasteten Signalwerten nicht berücksichtigt bzw. nicht digitalisiert. Damit dieser Effekt nicht eintritt, muss das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem, welches besagt, dass die Abtastfrequenz größer als mindestens die 2-fache Frequenz des abzutastenden Signals ist, eingehalten werden.

$$f_{abtast} > 2 \cdot f_{signal} \quad (2.16)$$

Die Abtastung geschieht durch ein Abtasthalteglied. Abschließend passiert das gehaltene und gefilterte Signal den ADU in dem er in festgelegten Abtastintervallen das Messignal von einem analogen Signal in eine binäre Zahl codiert. Dies wird in der Elektrotechnik auch als Quantisierung bezeichnet. Das digitale Signal wird dann vom Mikroprozessor ausgelesen.

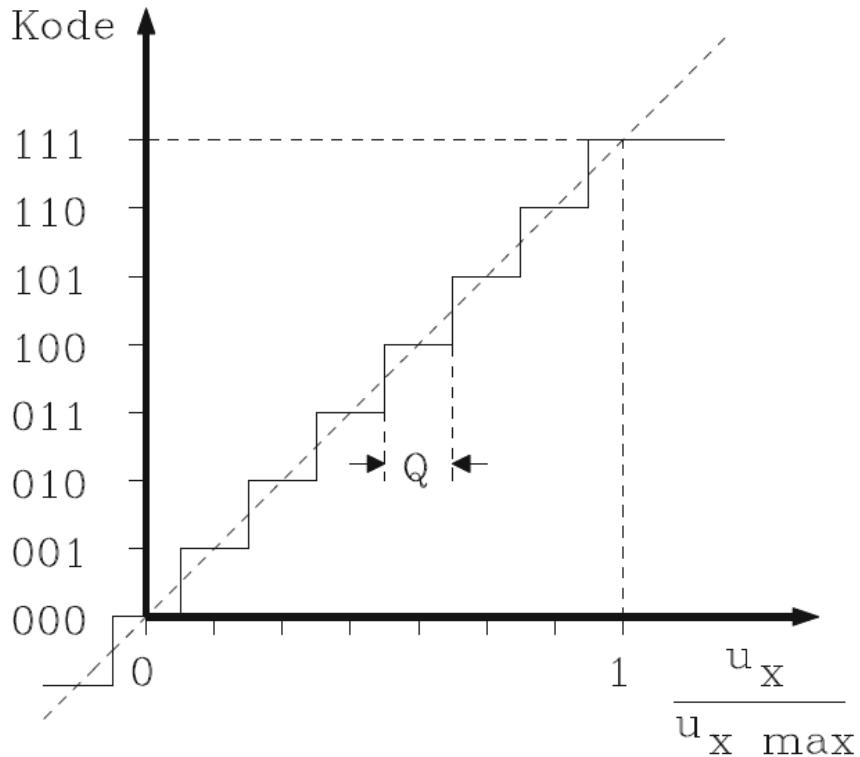


Abbildung 2.4: Quantisierungskennlinie ([RW11] S. 326)

Die Quantisierung der Eingangsspannung zu einer Binärzahl ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Quantisierungskennlinie verläuft idealerweise mittig genau durch die Quantisierungsstufe. Die Quantisierungsintervallbreite Q der einzelnen Stufen wird wie folgt berechnet:¹¹

$$Q = \frac{\text{Aussteuerbereich}}{2^n} = \frac{U_{\max}}{2^n} \quad (2.17)$$

Die Zahl n stellt hierbei die Auflösung des ADUs dar und gibt die max. Anzahl der Bits, die zum Digitalisieren verwendet werden. Je höher also die Auflösung ist, umso genauer wandelt der ADU das analoge Signal in eine ihm entsprechende Binär-Zahl um. Der Aussteuerbereich ist die maximale Spannung U_{\max} , die der ADU noch als Binärzahl angeben kann.

In der Realität ist die Quantisierung fehlerbehaftet. Die Fehlerabweichungen der Kennlinie werden in der Regel in LSB angegeben und stehen im Datenblatt des für die Digitalisierung verwendeten Mikrocontrollers. LSB steht für Least significant bit und stellt die Bit-Stelle dar, der die geringste Bedeutung in einer Bitzahl hat. In der Abbildung 2.4 entspricht es in der 3-stelligen Bitcodierung der ersten Bitstelle von rechts dar. Die Fehler werden also als Bitzahl ausgedrückt, somit relativ zur y-Achse von Abb.: 2.4. Zudem kann man in der Abbildung sehen, wie die Steigung der Quantisierungskennlinie bei einem LSB pro Quantisierungsintervallbreite Q liegt. Im Folgenden werden die Fehler kurz vorgestellt.

¹¹Vgl. [RW11] S.300

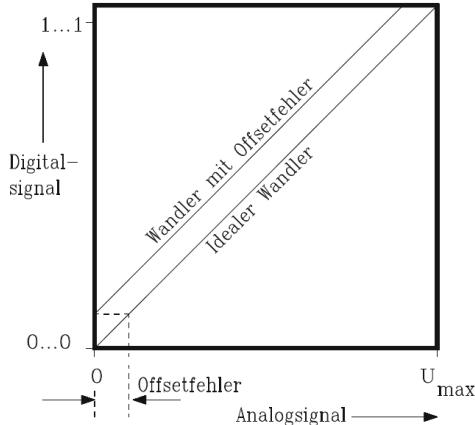


Abbildung 2.5: Offsetfehler([RW11] S. 333)

Der in der Abbildung 2.5 dargestellte Offsetfehler, verursacht eine Parallelverschiebung der Kennlinie. Es sich hierbei um einen konstanten absoluten Fehler, der sich über den gesamten Aussteuerbereich sich streckt.¹² Beim Anlegen einer Eingangsspannung von 0V kann der Offsetfehler durch das Ablesen des Binär Codes gut bestimmt werden.

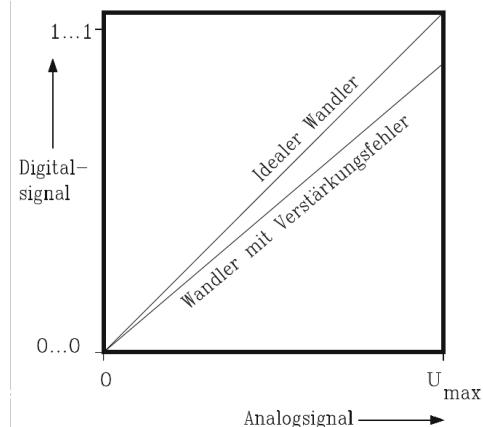


Abbildung 2.6: Verstärkungsfehler([RW11] S. 333)

Bei dem Verstärkungsfehler ist die Steigung der Quantisierungskennlinie nicht mehr gleich eins. Der Fehler ist definiert als die Spannungsdifferenz vom ersten Übergang von 0bit zu 1bit bei $0,5 \cdot Q$ und dem letzten bei $U_{max} - 1,5 \cdot Q$ vom jeweiligen idealen Wert auf der Quantisierungskennlinie.

¹²Vgl. [RW11] S.300

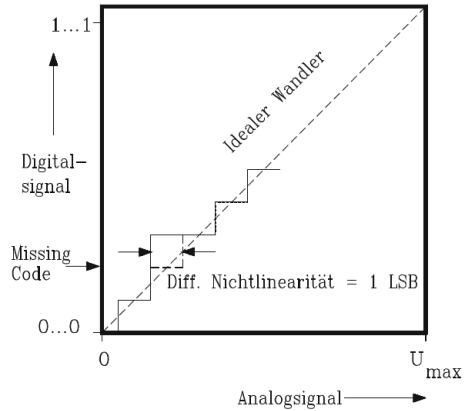


Abbildung 2.7: DNL-Fehler ([RW11] S. 333)

Die differenzielle Nichtlinearität (DNL) liegt vor, wenn die Quantisierungskennlinie um die Breite von **mind.** einem Quantisierungsintervall LSB vom Idealwert abweicht. Grundsätzlich wird bei der DNL die größtmögliche Abweichung zu der idealisierten Quantisierungskennlinie angegeben. Wenn im Datenblatt eines ADUs die DNL als ± 1 LSB aufgeführt ist, dann liegen die digitalisierten Messwerte in einem Quantisierungsintervall von 1 ± 1 .

Quantisierungsrauschen

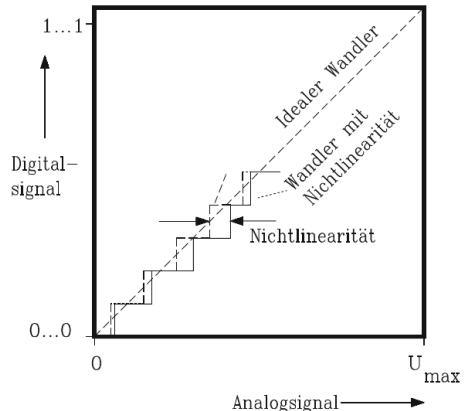


Abbildung 2.8: INL-Fehler ([RW11] S. 333)

Durch ungleichgroße Quantisierungsintervalle kommt es zu Fehlern der integralen Nichtlinearität. Im Kennliniendiagramm äußert sie sich durch die Abweichung der Übertragungsfunktion des nichtlinearen ADUs von einer idealen geraden Linie. Die im Datenblatt angegebene INL entspricht der größtmöglichen Abweichung des Ausgangswerts vom idealen Ausgangswert und wird ebenfalls in LSB angegeben.

2.2 Allgemeine Übersicht über das Inselsystem

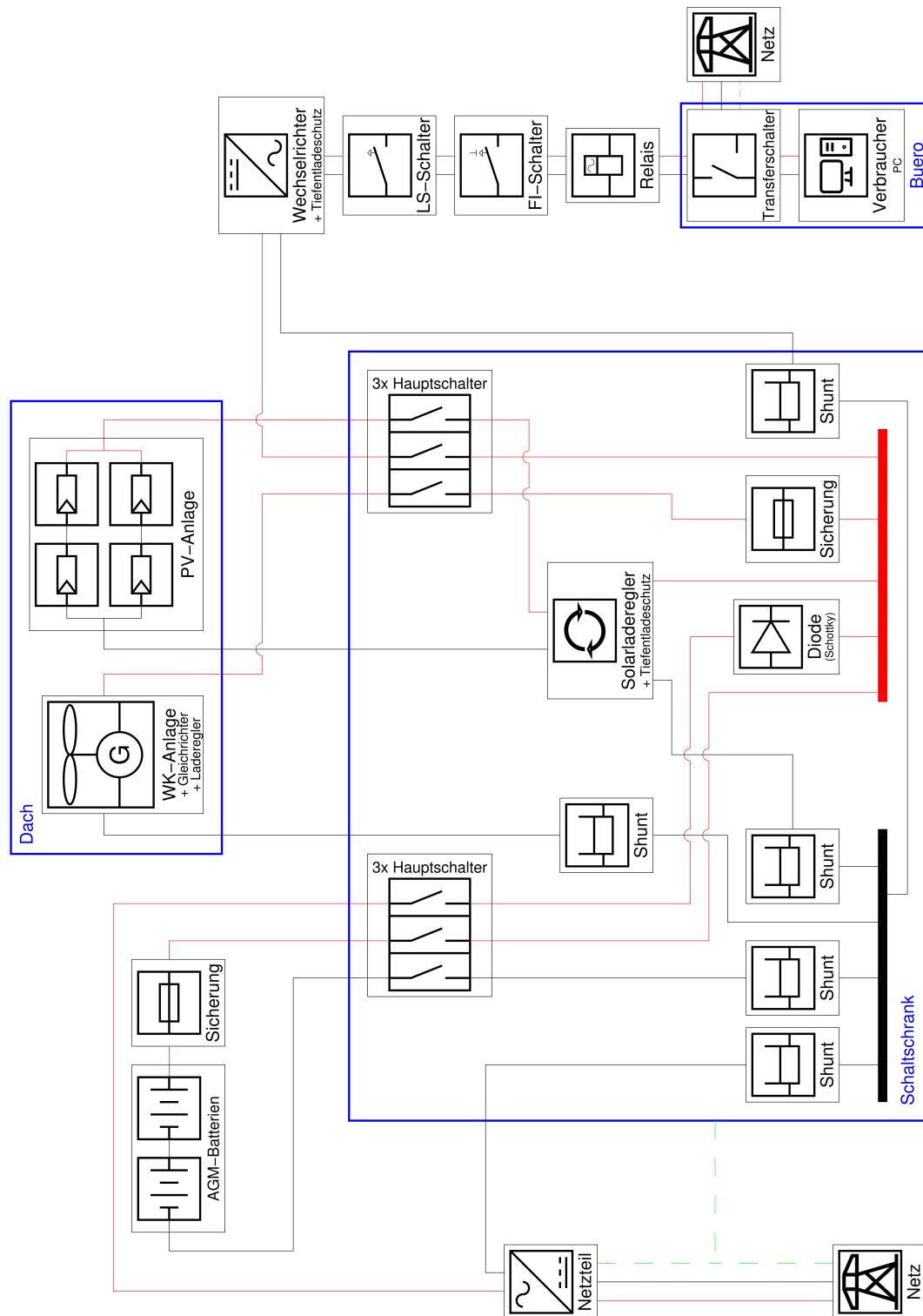


Abbildung 2.9: Allgemeine Übersicht über die Inselanlage([Ton16] S. 13)

2 Grundlagen

In der Abbildung 2.9 sieht man den Aufbau der gesamten Inselanlage ohne die Komponenten der Messtechnik. Jede Energiequelle besitzt am negativen bzw. schwarzem Kabel einen sogenannten Shunt-Widerstand. Diese Widerstände sind besonders niederohmig, und werden zur Messung von Spannungen verwendet, da bei einem positivem Stromfluss über dem Kabel, gemäß des ohmschen Gesetzes $U = R \cdot I$, eine Spannung über dem Widerstand abfällt. Diese Spannung wird von der Messtechnik weiterverarbeitet.

2.3 Messtechnik der Inselanlage

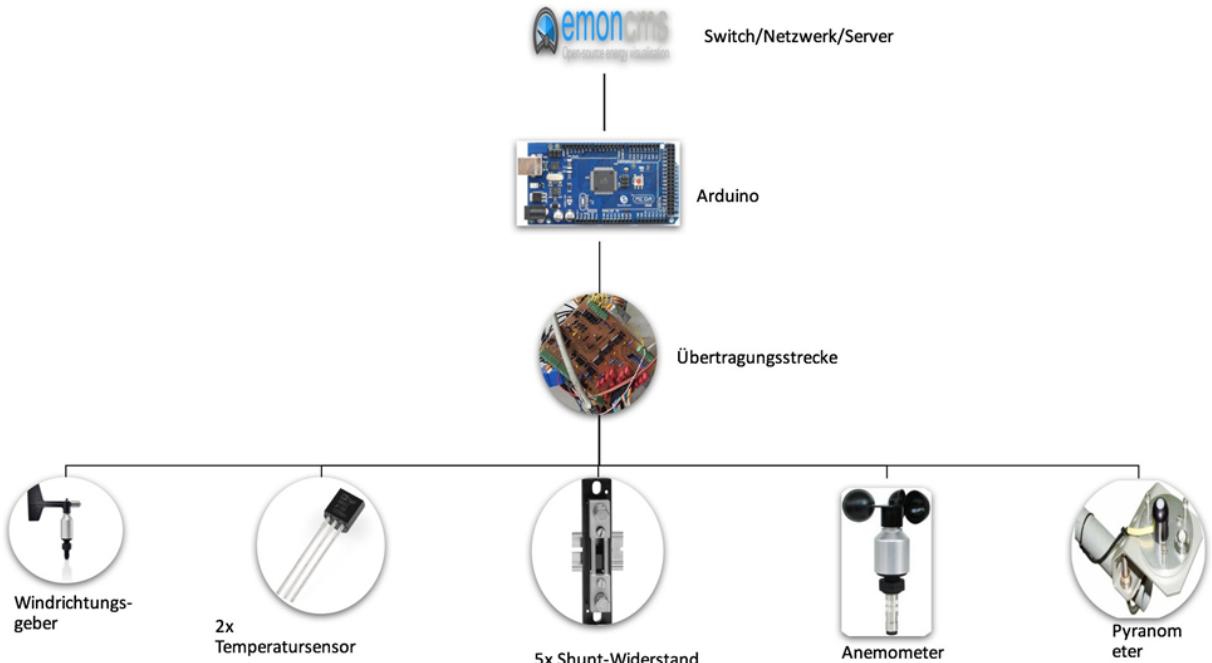


Abbildung 2.10: Messtechnik der Inselanlage ([Ene18] S. 24)

Die Messanlage (Abbildung 2.10) besitzt fünf Messsensoren und fünf Shunt Widerstände (auf der untersten Ebene). Die Messwerte werden weitergeleitet an eine Übertragungsstrecke, die diese Messwerte in einen gewünschten Spannungsbereich verstärkt und tiefpassfiltert. Danach werden die analogen Messsignale vom Arduino board digitalisiert. Diese Daten werden dann im Emoncms gespeichert, welches als open source Web-app zur Darstellung von Messdaten dient. In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Komponenten näher vorgestellt.

2.3.1 Messsensoren & Shunt-Widerstände der Inselanlage

Anzahl	Sensor	Name	Hersteller	Anhang
5	Shunt	Shunt Class 0.5	Weigel	A.1.2
1	Anemometer	compact	Thies	A.1.1
1	Windrichtungsgeber	compact	Thies	A.1.3
2	Temperatursensor	TMP36G	Analog Devices	A.1.4
1	Pyranometer	CS300	Campbell Scientific, Inc.	A.1.5

Tabelle 2.1: Messsensoren & Messwiderstände der Inselanlage (In Anlehnung an [Ton16])

Das Anemometer wird zur Messung von Windgeschwindigkeiten von 0m/s-50m/s verwendet. Bei dem vorliegenden Modell handelt es sich um ein sogenanntes Schalenkreuzanemometer. Es ist aufgebaut durch drei halbkugelförmige Schalen, welche bei anliegendem Wind um die vertikale Achse rotieren. Die Geschwindigkeit, der sich drehenden halbkugelförmigen Schalen wird über eine optoelektronische Einheit im Inneren des Anemometers bestimmt, indem über die Abtastung einer Rotationsfrequenz ermittelt wird. Anschließend wird dieses Signal in ein analoges Signal 4-20mA umgewandelt wird.¹³ Der Schalenstern besteht aus Kunststoff und das Gehäuse aus Aluminium.

Charakteristik	Wert
Messgröße	Windgeschwindigkeit
Messbereich	0 – 50 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Auflösung	0, 1 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Messsignal	analoge Stromstärke
Wertebereich	4 – 20 mA
Genauigkeit	0, 5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
Modellnummer	4.3519.00.141

Tabelle 2.2: Schalenkreuzanemometer Daten (In Anlehnung an [Ton16])

Mit dem Windrichtungsgeber wird die Richtung des vorkommenden Windes gemessen. Die auf einer vertikalen Achse liegende Windfahne besteht aus Kunststoff und ist sehr trägeheitsarm, sodass sie sich entsprechend der Windrichtung dreht. Eine optoelektronische Einheit liest im Inneren des Windrichtunggebers die Position auf einer Codescheibe, welche mit einem Gray Code codiert ist, aus.¹⁴

¹³Vgl. [Thi23a] S.5¹⁴Vgl. [Thi23b] S.5

2 Grundlagen

Charakteristik	Wert
Messgröße	Windrichtung
Messbereich	0 – 360°
Auflösung	0,4°
Messsignal	analoge Stromstärke
Wertebereich	4 – 20 mA
Genauigkeit	2°
Modellnummer	4.3129.60.141

Tabelle 2.3: Windrichtungsgeber Daten (In Anlehnung an [Ton16])

Das Pyranometer misst durch eine kleine Potovoltaikzelle die Lichtintensität in $\frac{W}{m^2}$. Wenn Sonnenstrahlen, also elektromagnetische Strahlung, auf das Pyranometer trifft, werden wie in einer kommerziellen Solarzelle, freie Ladungsträger (Elektronen und Löcher) erzeugt.¹⁵ Es fließt ein Strom bzw. es liegt eine Spannung an. Das Pyranometer hat den Vorteil, dass es keine Spannungsversorgung benötigt.

Charakteristik	Wert
Messgröße	Lichtintensität
Messbereich	0 – 2000 $\frac{W}{m^2}$
Auflösung	0,2mV / $\frac{W}{m^2}$
Messsignal	analoge Spannung
Wertebereich	0 – 400mV
Genauigkeit	5%
Modellnummer	CS300

Tabelle 2.4: Pyranometer Daten (In Anlehnung an [Ton16])

Der vorliegende TMP36 ist ein sogenannter Halbleiter-Widerstandsthermoeter. Halbleiter besitzen die physikalische Eigenschaft, dass sie nach der umliegenden Temperatur Nichtleiter oder Leiter sind.¹⁶ Mit steigender Temperatur können die Elektronen ins Leitungsband aufsteigen, dies wird auch als thermische Anregung bezeichnet. Die Zahl der Elektronen im Leitungsband und die Zahl der Löcher nimmt also mit steigender Temperatur zu. Die Anzahl der freien Ladungsträger steigt somit, sodass der ohmsche Widerstand sinkt. Infolgedessen sinkt auch die Spannung über dem Widerstandsthermometer. Diese Sensoren werden als Sensoren mit negativen Temperaturkoeffizienten bezeichnet. In der Industrie können auch Sensoren mit positiven Temperaturkoeffizienten hergestellt werden, wie der in der Arbeit zu kalibrierende TMP36, welche mit steigender Temperatur höhere Spannungen am Ausgang liefern.

¹⁵Die Funktionsweise einer Potovoltaikzelle ist komplexer als hier dargestellt. An dieser Stelle soll nur das Ursache- und Wirkungsprinzip, also die Kausalitätskette, verdeutlicht werden

¹⁶Vgl. [Deu18] S.27

Charakteristik	Wert
Messgröße	Temperatur
Messbereich	40 – 150°C
Auflösung	10mV/°C
Messsignal	analoge Spannung
Wertebereich	100 – 2000mV
Genauigkeit	2°C
Modellnummer	TMP36

Tabelle 2.5: TMP36 Daten (In Anlehnung an [Ton16])

Die Shunt Widerstände wurden nach der DIN 43 703 hergestellt und besitzen nach dieser Normierung eine Widerstandsungenauigkeit von 0.5%. Die Widerstandsstäbe bestehen aus Manganin. In dem unteren Abschnitt der unteren Tabelle sind die Ohmschen Werte der einzelnen Shunt-Widerstände der Energiequellen dargestellt.

Charakteristik	Wert
Messgröße	Stromstärke
Messbereich	–10 – 10A
	–20 – 20 A
	–25 – 25A
Messsignal	analoge Spannung
Wertebereich	–300 – 300mV
Genauigkeit	0,5%
PV-Shunt	0,03Ω
WK-Shunt	0,015Ω
Netzteil-Shunt	0,03Ω
Batterie-Shunt	0,012Ω
Wechselrichter-Shunt	0,03Ω

Tabelle 2.6: Shunt Widerstand Weigel Daten & Widerstandswerte (In Anlehnung an [Ton16])

In der unteren Tabelle 2.7 sind alle Messgrößen mit ihren zugeordneten Symbolen, Messbereichen und Ausgangssignalbereichen dargestellt. Die Messgrößen die den Großbuchstaben C als Symbol haben, werden über die Shunts ermittelt.

2 Grundlagen

Messgröße	Symbol	Messbereich	Signalbereich
Systemspannung	U_s	20 – 32 V	
PVA-Strom	C_{pv}	0 – 10 A	0 – 300mV
WKA-Strom	C_{wt}	0 – 20 A	0 – 300mV
Wechselrichter-Strom	C_{wr}	0 – 10 A	0 – 300mV
Netzteil-Strom	C_{nt}	0 – 10 A	0 – 300mV
Batterie-Strom	C_b	-25 – 25 A	-300 – 300mV
Windgeschwindigkeit	v_w	0 – 50 $\frac{m}{s}$	4 – 20 mA
Windrichtung	d_w	0 – 360°	4 – 20 mA
Sonnenlichtintensität ¹⁷	I_s	0 – 1000 $\frac{W}{m^2}$	0 – 200mV
Außentemperatur	T_a	-40 – 50°C	100 – 1000mV
Batterietemperatur	T_b	-40 – 50°C	100 – 1000mV

Tabelle 2.7: Messgrößen (In Anlehnung an [Ton16])

¹⁷Die maximale Sonnenintensität beträgt 1000 $\frac{W}{m^2}$ - Vgl. A.1.5

2.3.2 Übertragungsstrecke der Messsignale

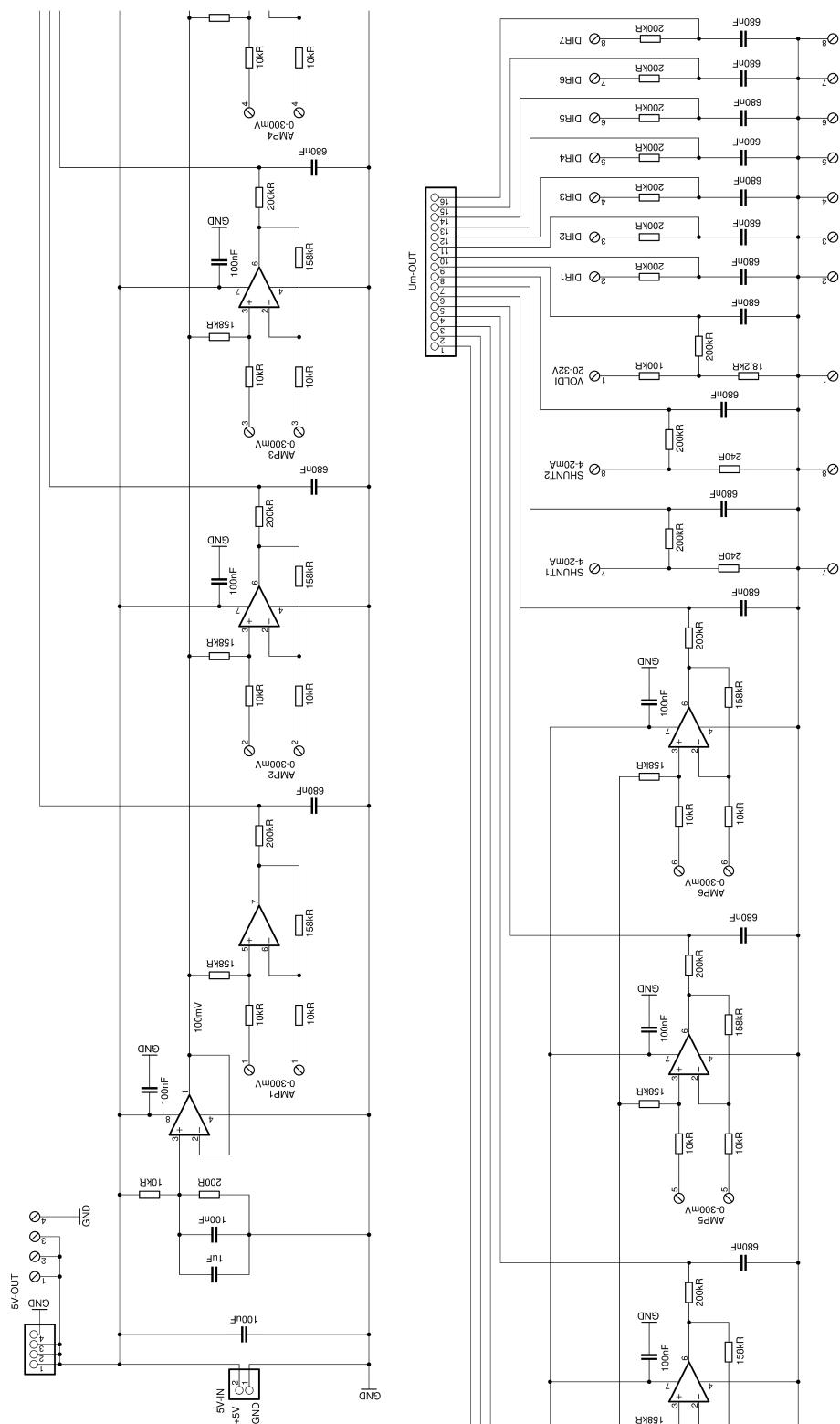


Abbildung 2.11: Übertragungsstrecken([Ton16] S.36)

2 Grundlagen

Insgesamt gibt es vier verschiedene Übertragungsstrecken mit den folgenden Bezeichnungen: DIR, SHUNT, VOLTDI, AMP, welche im Folgenden einzeln vorgestellt werden.¹⁸

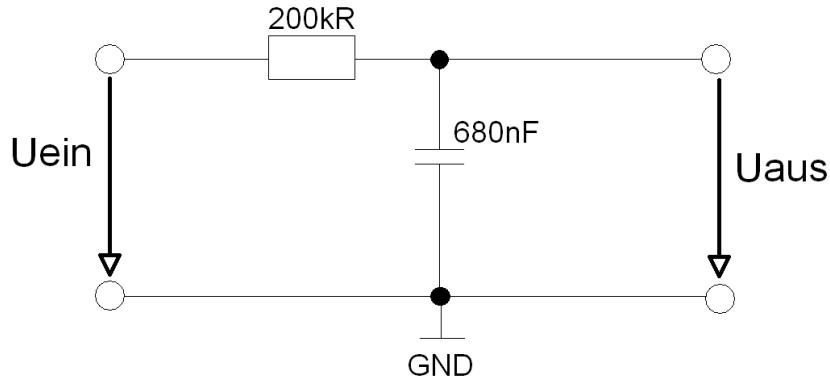


Abbildung 2.12: DIR Übertragungsstrecke (R steht für Ω)

Die DIR Übertragungsstrecke hat den Aufbau eines Tiefpassfilters. Ein $200\text{k}\Omega$ Widerstand und ein 680nF Kondensator sind parallel zueinander geschaltet. Nach der Grenzfrequenz Formel für Tiefpassfilter

$$f_G = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.18)$$

filtert die Schaltung Frequenzanteile eines anliegenden Signals, welche oberhalb der Grenzfrequenz von $1,17\text{Hz}$ liegen. Die Schaltung dient auch als Anti-Aliasing Filter, somit werden alle Frequenzanteile, welche unter der halben Abtastfrequenz liegen, gefiltert. Das Pyranometer und die Temperatursensoren, welche beide eine Spannung als Messgröße ausgeben, sind an die DIR Übertragungsstrecken angeschlossen.

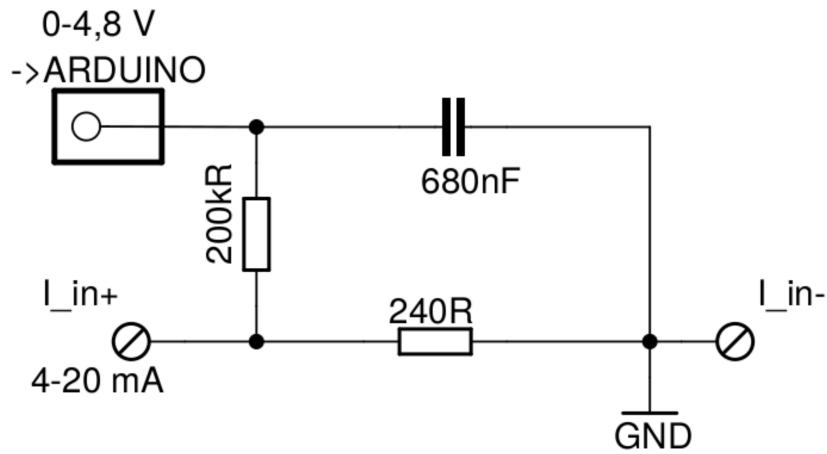


Abbildung 2.13: SHUNT Übertragungsstrecke ([Ton16] S.29)

¹⁸Die Übertragungsstrecken hat Herr Toni Tress in seiner Bachelorarbeit entworfen. Für die Übersicht über die Komponenten, werden in dieser Arbeit die selben Namen für die Übertragungsstrecken verwendet.

Da das Anemometer und der Windrichtungsgeber einen Ausgangstrom von 4mA bis 20mA ausgeben und der Arduino Ströme nicht messen kann, fließt in der SHUNT-Übertragungsstrecke der Strom über einen 240Ω Widerstand, sodass die Spannung, die über diesen SHUNT Widerstand abfällt, vom Arduino gemessen werden kann. Gemäß des ohmschen Gesetzes $U = R \cdot I$, bzw. in diesem Fall $U = 240 \cdot I$, ergibt sich der Wert für die Spannung. Das Signal wird zusätzlich tiefpassgefiltert.

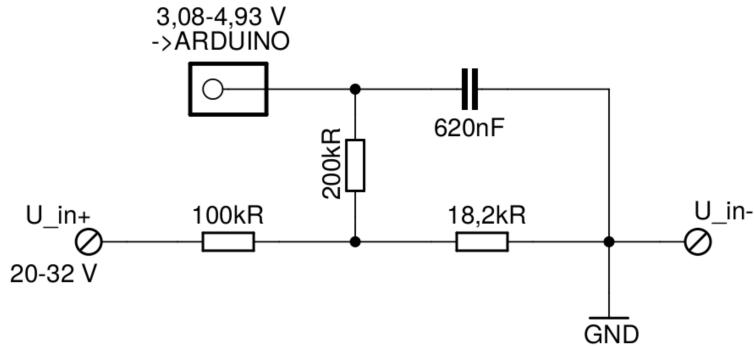


Abbildung 2.14: VOLTDI Übertragungsstrecke ([Ton16] S.31)

Die Batterie hat in der Regel eine Spannung zwischen 24V und 30V. Diese Spannung ist zu groß für den Messbereich des Arduinos. Mit dem Spannungsteiler der VOLTDI-Übertragungsstrecke wird die Eingangsspannung in den Bereich der Messspannung des Arduinos konditioniert. Gemäß der Formel:

$$\frac{U_{mess}}{U_{ein}} = \frac{18,2k\Omega}{18,2k\Omega + 100k\Omega} \quad (2.19)$$

Anschließend wird das Signal tiefpassgefiltert.

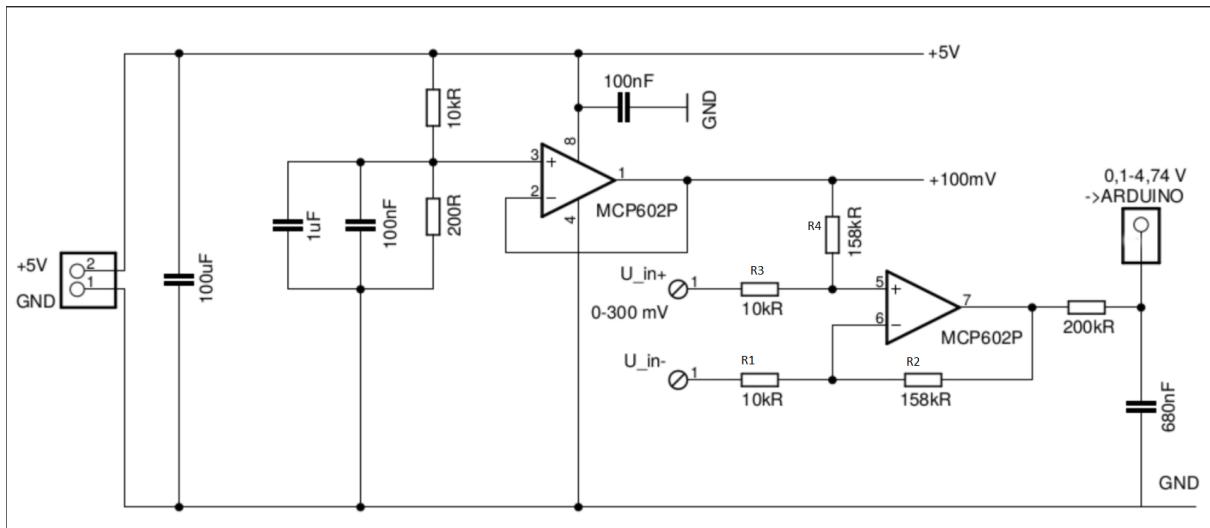


Abbildung 2.15: AMP Übertragungsstrecke (In Anlehnung an [Ton16] S.32)

Die Shunt Widerstände, welche zur Messung der Energiequellen verwendet werden, haben einen Spannungsbereich von 0 bis 300mV. Da die Auflösung des Arduinos gering ist, sollte der

2 Grundlagen

Spannungsbereich der Shunts auf einen größeren Spannungsbereich verstärkt werden, um somit präziser mit dem Arduino messen zu können. Diese Aufgabe übernimmt die AMP Übertragungsstrecke. In der AMP Übertragungsstrecke, links in der Abbildung 2.15, ist ein Spannungsteiler, bestehend aus einem 200Ω und $10k\Omega$ Widerstand, welcher zunächst eine Spannung von 5V auf 100mV abschwächt. Anschließend wird diese Spannung durch einen OPV, wessen Ausgang zum negativen Eingang zurückgeführt wird, konstant gehalten. Diese Verschaltung des OPVs wird in der Elektrotechnik als Spannungsfolger oder auch als Impedanzwandler bezeichnet.¹⁹ Die Eingangsspannung eines OPVs wird sehr wenig belastet, da sein Eingangswiderstand sehr hochohmig ist. Der Ausgang hingegen ist sehr niederohmig, sodass die Ausgangsspannung des OPVs beliebig stark belastet werden kann. So kann durch einen Spannungsfolger gewährleistet werden, dass die Ausgangsspannung stets der Eingangsspannung folgt, ohne hierbei die Quelle der Eingangsspannung zu belasten. Die Rückführung zum negativen Eingang des OPVs bewirkt, dass der OPV die anliegende Potentialdifferenz des positiven und negativen Eingangs auf null regelt, die Spannungsverstärkung zwischen Ausgang und Eingang gleich eins ist. Die Ausgangsspannung des Spannungsfolgers beträgt daher 100mV und liegt an dem positiven Eingang eines weiteren OPVs an. Dieser OPV ist als Differenzverstärker verschaltet und verstärkt somit die am Eingang anliegende Potentialdifferenz vom positiven und negativen Eingang des OPVs. Es gilt allg. folgende Glg.:²⁰

$$U_a = U_{e+} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_3 + R_4} - U_{e-} \frac{R_2}{R_1} \quad (2.20)$$

In diesem Fall ist $R_1 = R_3 = 10k\Omega$ und $R_2 = R_4 = 158k\Omega$ ²¹. Also vereinfacht sich die Formel zu:

$$U_a = \frac{R_2}{R_1} (U_{e+} - U_{e-}) = \frac{158k\Omega}{10k\Omega} (U_{e+} - U_{e-}) \quad (2.21)$$

Zusätzlich werden die 100mV am positiven Eingang des OPVs vom Ausgang des Spannungsfolgers in Form eines Offsets an den Ausgang des Differenzverstärkers weitergeleitet. Für den Fall, dass keine Spannung über dem SHUNT abfällt, liegt also die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers bei 100mV. Zum Schluss durchläuft das Signal den Tiefpassfilter.

¹⁹Vgl. [Zas13] S. 103

²⁰Vgl. [Zas13] S. 117

²¹Die Widerstände $R_1 - R_4$ sind markiert in der Abbildung 2.15, U_{e+} und U_{e-} stellen Eingänge des OPVs dar

Messgröße	Messbereich	Signalbereich, urspr.	$U_m(S)$	Signalbereich, modifiziert
U_s	$20 - 32 \text{ V}$		$\frac{18,2}{118,2} \cdot S$	$3,08 \text{ V} - 4,93 \text{ V}$
C_{pv}	$0 - 10A$	$0 - 300\text{mV}$	$15,8 \cdot S + 0,1V$	$0,1 \text{ V} - 4,84 \text{ V}$
C_{ut}	$0 - 20A$	$0 - 300\text{mV}$	$15,8 \cdot S + 0,1V$	$0,1 \text{ V} - 4,84 \text{ V}$
C_{vr}	$0 - 10A$	$0 - 300\text{mV}$	$15,8 \cdot S + 0,1V$	$0,1 \text{ V} - 4,84 \text{ V}$
C_{nt}	$0 - 10A$	$0 - 300\text{mV}$	$15,8 \cdot S + 0,1V$	$0,1 \text{ V} - 4,84 \text{ V}$
C_b	$-25 - 25A$	$-300 - 300\text{mV}$	$15,8 \cdot S + 0,1V$	$0,1 \text{ V} - 4,84 \text{ V}$
v_w	$0 - 50\frac{m}{5}$	$4 - 20mA$	$240 \cdot S$	$0,96 \text{ V} - 4,8 \text{ V}$
d_w	$0 - 360^\circ$	$4 - 20mA$	$240 \cdot S$	$0,96 \text{ V} - 4,8 \text{ V}$
I_s	$0 - 1000\frac{W}{m^2}$	$0 - 200\text{mV}$		
T_a	$-40 - 50^\circ C$	$100 - 1000\text{mV}$		
T_i	$-40 - 50^\circ C$	$100 - 1000\text{mV}$		

Tabelle 2.8: Messgrößen nach der Übertragungsstrecke (In Anlehnung an [Ton16])

In der Tabelle sind alle Messgrößen in ihrem ursprünglichen Signalbereich sowie durch die Übertragungsstrecke modifiziertem Signalbereich (aufgrund der Übertragungsfunktion) dargestellt.

2.3.3 Arduino Mega 2560

Arduino Mega 2560

Der Arduino Mega 2560 ist ein Board mit einem Mikrocontroller, welcher analoge und digitale Signale messen sowie ausgeben kann.²² Zur Programmierung des Arduinos wird die Arduino IDE Entwicklungsumgebung verwendet.

Charakteristik	Wert
Mikrocontroller	ATmega2560
Arbeitsspannung	5 V
Eingangsspannung	7 – 12 V
Digital I/O Pins	54
Analog Input Pins	16
Flash Speicher	256kB
SRAM	8 KB
Taktrate	16MHz
max. Abtastrate	10kHz

Tabelle 2.9: Arduino Mega (In Anlehnung an [Ton16])

Die maximale Abtastfrequenz des Arduino Mega beträgt 10kHz.²³ Nach dem Shannon-Nyquist Kriterium (Glg. 2.16) kommt es nicht zum Aliasing-Effekt, da der Anti-Aliasing-Filter (Tiefpass-

²²Vgl. A.1.8

²³Vgl. [Ard] - analogread()

2 Grundlagen

filter mit der Grenzfrequenz von 1,17Hz), alle Frequenzanteile eines Signals oberhalb der halben Abtastfrequenz, also 5kHz, filtert.

Auf dem Arduino Board befindet sich der Mikrocontroller ATmega 2560, welcher das anliegende analoge Messsignal zu einer Binärzahl quantisiert. Wie zuvor in dem Kapitel 2.1.2 Messkette für die Digitalisierung analoger Signale vorgestellt, unterliegen Quantisierungsfehlern. Die Fehler der Quantisierung mit einem ATmega2560 wurden unten in die Tabelle aufgetragen.²⁴

Charakteristik	Wert
Auflösung	10 Bit
absoluter Fehler	max 3LSB
INL	1,25LSB
DNL	0,5LSB
Offset-Fehler	-2LSB
Verstärkung-Fehler	2LSB
Taktrate	50kHz – 1MHz
interne Referenzspannung	1,1 V/2,56 V

Tabelle 2.10: ATmega2560 (In Anlehnung an [Ton16])

2.4 Normierung

Normen sind Vorschriften für unsere Gesellschaft, um eine bestimmte Aktion nach vordefinierten Regeln umzusetzen. Eine Normierung bzw. Kalibrierung ist dem sehr ähnlich. So gibt es auch bei der Kalibrierung Regeln bzw. Anforderungen, an die man sich während der Messungen zu halten hat, um eine gute Kalibrierung zu erzielen.

Die Normen, anhand derer die meisten Kalibrierungen erfolgte, werden im Folgenden Kapitel unter der Durchführung mit den für die spezifische Kalibrierung der Messgeräte relevanten Abschnitten/Kapitel zusammenfassend und gekürzt wiedergegeben.²⁵

²⁴Vgl. A.1.9

²⁵Bspw. beinhaltet die Norm für die Kalibrierung der Pyranometer einen Abschnitt zur Kalibrierung im Außenbereich und einen im Innenbereich. Es wurde jedoch nur eine Innenbereich vorgenommen, sodass eine Erwähnung der Außenbereich Kalibrierung unbedeutsam wäre.

3 Durchführung

3.1 Untersuchung der Übertragungsstreckenplatine

Die Übertragungsstreckenplatine befindet sich vom optischen Zustand her in einem guten Zustand. Die mechanischen Komponenten wie Schrauben und andere Bauteile sind nicht lose und sitzen fest. Es gibt keine Aufzeichnungen, darüber ob die Platine für einen Schutz mit einem Lack beschichtet wurde. Es konnte aber festgestellt werden, dass die Platinenoberfläche durch Anlegen einer Spannung an eine Kupferleiterbahn, nicht leitfähig ist. An anderen Stellen ist die Platine etwas bräunlicher und etwas matter. Es konnte festgestellt werden, dass sie an diesen Stellen leitfähig ist. In diesem Zusammenhang ist anzunehmen, dass die Platine mit einem Lack beschichtet worden ist, um sie vor Korrosion zu schützen. Dieser allerdings etwas an Schutzfunktion verloren hat.

Für die Untersuchung wurden Testspannungen und Testströme an die Platine angeschlossen, um das Übertragungsstreckenverhalten zu analysieren. Es wurde der Offsetfehler durch das Anlegen von 0V untersucht. Während der Untersuchung fiel auf, dass die Ausgangsspannung der DIR, VOLDI, und SHUNT Übertragungsstrecke nicht linear mit höherer Eingangsspannung verliefen und starke Abweichungen aufwiesen.¹ Grund hierfür ist der Verschleiß der Übertragungsstreckenplatine. Alle elektrischen Leitungen, und somit auch die Kupferbahnen der Übertragungsstreckenplatine, sind ohmsche Widerstände im Messsystem und tragen dazu bei, dass das Messsignal geschwächt ankommt am ADU. Die in die Jahre gekommene Übertragungsstreckenplatine besitzt nun einen höheren inneren Widerstand, was nach dem ohmschen Gesetz $U = R \cdot I$ zu einem höheren Spannungsabfall über der Übertragungsstreckenplatine führt.² Um dem Spannungsabfall entgegenzuwirken, wurden OPVs als Spannungsfolger nach den Tiefpassfiltern der Übertragungsstrecken VOLDI, SHUNT, DIR angeschlossen.

3.2 Umbau zum Tiefpassfilter mit Spannungsfolger

Die Spannungsfolger dienen dazu die Ausgangsspannung der Messsensoren für das Messgerät zu stabilisieren, sowie dem Spannungsabfall durch die widerstandsbehaftete Übertragungsstreckenplatine entgegenzuwirken. Außerdem besteht ein weiterer Vorteil darin, dass die Tiefpassfilterung exakter ist, da nun keine Verbindung bzw. keine Kopplung zwischen dem verwendeten Messgerät (dessen innerem ohmschen Widerstand) sowie dem eigl. Tiefpass, wie in der DIR Übertragungsstrecke, besteht.

¹Hinweis: Diese werden in den Ergebnissen zum Schluss vorgestellt

²Es sei angemerkt, dass es bei Messungen von Spannungen immer zu Strömen in Messsystemen kommt, aufgrund der Tatsache, dass es keine unendlich hohen Widerstände gibt und der Strom somit nie null ist, nach $I = \frac{U}{R}$

3 Durchführung

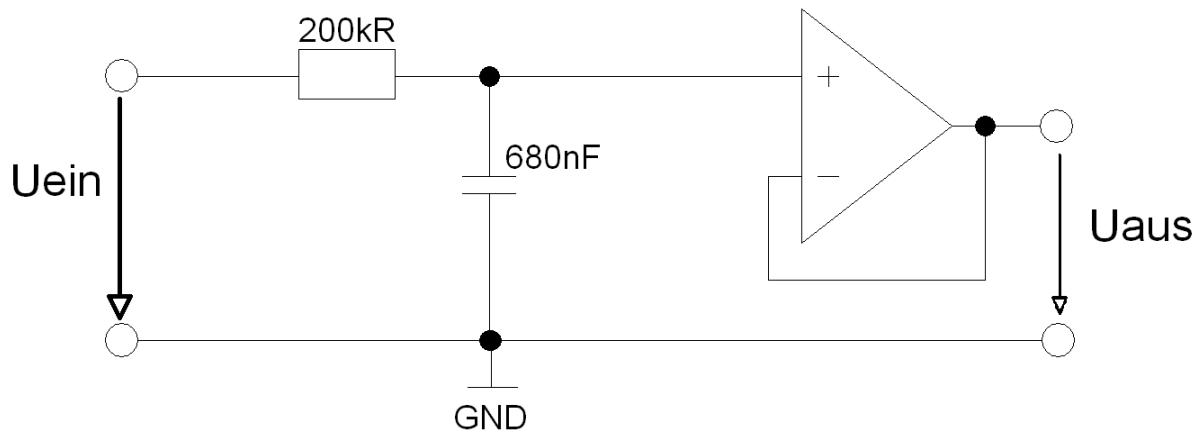


Abbildung 3.1: Tiefpassfilter mit Spannungsfolger

3.2 Umbau zum Tiefpassfilter mit Spannungsfolger

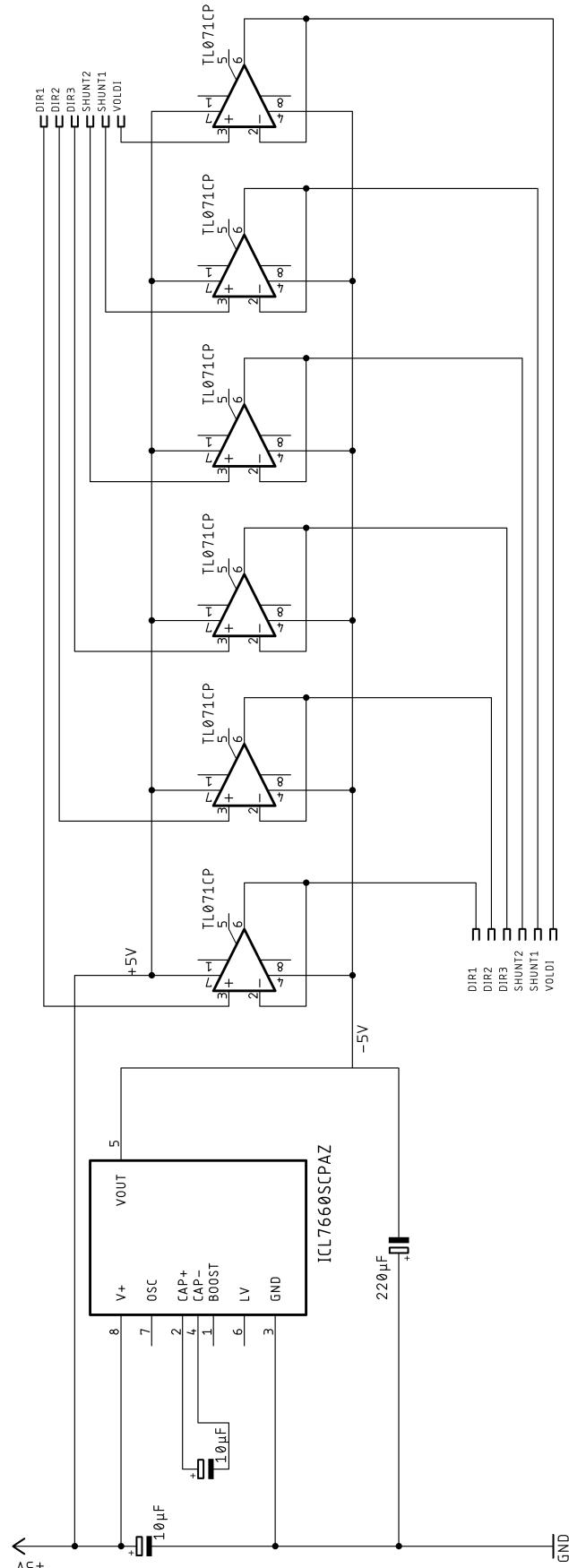


Abbildung 3.2: Zusatzplatine mit Spannungsfolgern

3 Durchführung

In der oberen Abbildung 3.2 ist die im Rahmen der Arbeit entstandene Zusatzplatine als Schema zu sehen. Die verwendeten Spannungsfolger sind TL071 OPVs.³ Bei ihnen handelt es sich um rail to rail und dual supply OPVs. Rail to rail heißt, dass ihre Ausgangsspannung ungefähr die Versorgungsspannung erreicht. Dual supply bedeutet, dass es zwei Versorgungsspannungen, allg. eine positive und eine negative Versorgungsspannung, für den Betrieb benötigt. In der Regel sollten die zwei Versorgungsspannungen betragsmäßig gleich groß sein. In der Messanlage gibt es keine negative Versorgungsspannung, deswegen wurde ein Schaltspannungsregler mit der Modellnummer: ICL7660SCPAZ verbaut, welche eine negative 5V Spannung aus einer anliegenden 5V Spannung erzeugt und diese an die OPVs weiterleitet.⁴ Die Ausgänge der Übertragungsstreckenplatine werden mit den Eingängen der Zusatzplatine verbunden und bilden somit die gesamte neue Übertragungsstrecke.⁵ Die Kalibrierung aller Messensoren erfolgte mit der neuen gesamten Übertragungsstrecke.

3.3 Kalibrierung der Temperatursensoren

Die Temperatursensoren wurden zunächst mit der Übertragungsstrecken DIR1 und DIR2 verbunden und es wurde die Ausgangsspannung mit einem Analog Discovery 2 (Hersteller Diligent) aufgezeichnet. Für die Kalibrierung des Temperatursensors wurden die ~~zwei~~ Temperatursensoren TMP36 in Kupferfolie (für eine bessere Wärmeleitfähigkeit & Kontakt) umwickelt und in den Temperaturkalibratorblock des Modells RTC-158 der Marke Metec eingeführt und mit einem PT100 als Referenzgerät kalibriert. Hierzu wurden die Temperaturen von -10°C, 20°C, 40°C, 20°C und -10°C (im Folgenden als Kalibrierreferenztemperaturen bezeichnet) mit dem Temperaturkalibratorblock angesteuert. Es wurde also nicht nur die Temperatur erhöht, sondern auch reduziert, um die Hystereseeigenschaften zu analysieren. In den Einstellungen wurde festgelegt, dass die maximalen Stabilitätstoleranzen während der Kalibrierung an einer zu bestimmenden Messtemperatur maximal $\pm 0,1^\circ\text{C}$ betragen sollen. Immer wenn der Temperaturkalibratorblock die Kalibrierreferenztemperatur erreicht hatte, wurde für 10min die Temperatur vom Kalibratorblock gehalten und ~~es wurde~~ die Spannung der Temperatursensoren gemessen (ebenfalls für 10min - mit dem Analog Discovery 2). Zum Schluss der Kalibrierung wurden auf dem Display des Kalibratorblockes der Durchschnittswert der Kalibrierreferenztemperaturen des PT100, welche vom Kalibratorblock für die 10 min Haltezeit ermittelt wurde, angezeigt.

³Vgl. A.1.17

⁴Vgl. A.1.13

⁵Die Eingänge und Ausgänge sind beschriftet mit den Namen der Übertragungsstrecken



Abbildung 3.3: Kalibrierung Temperatur

3.4 Kalibrierung des Windrichtungsgebers

Bei der Kalibrierung des Windrichtungsgebers wurde nach “DIN EN 61400-12-1:2017-12 Anhang N (informativ) Windkanal-Kalibrierverfahren für Windrichtungsaufnehmer“ vorgegangen.⁶ Jede einzelne Anforderung der Norm in dieser Arbeit zu nennen und einzuhalten, würde den Rahmen dieser überschreiten. Deswegen werden im Folgenden unter dem Abschnitt “Umsetzung“ und “Kalibrierverfahren“ nur die Punkte genannt, die während der Kalibrierung eingehalten worden sind. Es wurde versucht die grundlegendsten Anforderungen zu erfüllen.

Umsetzung nach DIN EN 61400-12-1:2017-12 Anhang N (informativ) Windkanal-Kalibrierverfahren für Windrichtungsaufnehmer

Gemäß der DIN EN 61400-12-1:2017-12 Anhang N wurde die Kalibrierung in einem Windkanal durchgeführt.⁷ Der Windrichtungsgeber wurde an der Spitze eines Rohrs angebracht, welches selbst unten an einem Drehteller verbunden (Owis DMT 200N-D70-HiSM) war. Der Drehteller besaß ein integriertes Winkelmesssystem, welches während der Kalibrierung als Referenz dienen sollte. Hierbei ist zu betonen, dass das Referenzwinkelmesssystem und der Windrichtungsgeber spielfrei voneinander entkoppelt waren. Beim Anbringen wurde mit einer Wasserwaage sichergestellt, dass der Windrichtungsgeber horizontal mit einer Linie zum Windkanal stand. Anschließend wurde mithilfe eines Lasers versucht die Nordrichtung des Windrichtungsgebers auf eine Linie mit der Bezugslinie des Windkanals zu bringen.

⁶Diese Norm ist informativ und nicht normativ. Trotzdem bietet diese Norm eine gute Orientierung zur Normierung von Windrichtungsgebern. Vgl. [DIN17] Anhang N (informativ)

⁷Beim deutschen Wetterdienst in Oberschleißheim

3 Durchführung

Kalibrierverfahren nach DIN EN 61400-12-1:2017-12 Anhang N (informativ) Windkanal-Kalibrierverfahren für Windrichtungsaufnehmer

Der Windrichtungsgeber wurde zunächst mit der Übertragungsstrecke SHUNT1 verbunden und es wurde die Ausgangsspannung gemessen. Bei einer festgelegten Windgeschwindigkeit des Windkanals wurde durch den Drehteller das Rohr, auf dem der Windrichtungsgeber montiert wurde, axial gedreht. Während sich das Rohr drehte, zeigte der Windrichtungsgeber stets weiterhin in die Richtung der Windkanalöffnung bzw. zu dessen Bezugslinie. In 3° Schritten (wie nach der Norm gefordert) wurde das Rohr schrittweise axial gedreht. Es wurde zu jedem eingestellten Winkel durch den Drehteller die Ausgangsspannung des Windrichtungsbetriebs notiert.

Schwierigkeiten

Zum Zeitpunkt der Kalibrierung stand kein funktionierendes Gerät zum zeitlichen Aufnehmen von Messwerten zur Verfügung.⁸ Weswegen zum Ablesen der Ausgangsspannungen das Multimeter UNI-T UT139C verwendet wurde. Um die Messschwankungen möglichst gering zu halten, bzw. das Schwingverhalten des Windrichtungsbetriebs, erfolgte die Kalibrierung bei 2 m/s.

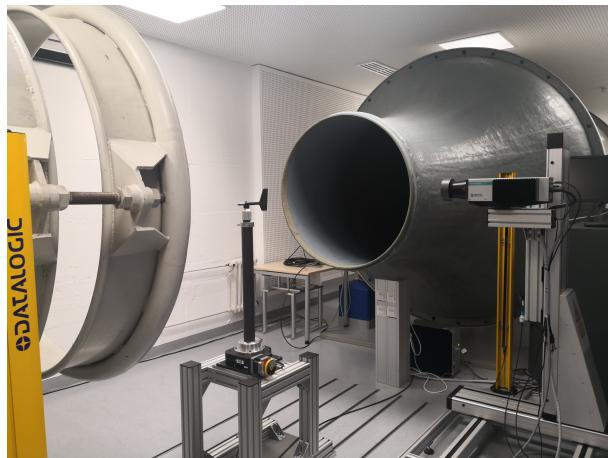


Abbildung 3.4: Kalibrierung Windrichtungsgeber

3.5 Kalibrierung des Anemometers

Bei der Kalibrierung des Anemometers wurde nach "DIN EN 61400-12-1:2017-12 Anhang F (normativ) Kalibrierverfahren für Anemometer im Windkanal" vorgegangen.⁹ Auch in diesem Fall werden nur die Punkte der DIN Norm genannt, die während der Kalibrierung eingehalten worden sind.

Umsetzung nach DIN EN 61400-12-1:2017-12 Anhang F (normativ)

Die Kalibrierung wurde im Großen Windkanal der TU Berlin durchgeführt. Für die Bestimmung der Referenzgeschwindigkeit wurde ein Staudruckrohr vom Typ NPL mit Ellipsoidkopf so nah wie

⁸Das zeitliche Aufnehmen des Messwertes war eine Forderung der Norm

⁹Vgl. [DIN17] Anhang F (normativ)

möglich an das zu kalibrierende Anemometer befestigt. Das Anemometer wurde in einer 2m mal 1,4m großen Messbox innerhalb des Windkanals aufgestellt. Und war somit einer Querschnittsfläche eines Luftstromes von $2,8m^2$ ausgesetzt.¹⁰ Die Montagesystem- plus der Anemometerfläche betrug max $0,001m^2$ (wobei max. 20cm Länge und 50cm Höhe angenommen wurden). Die Blockierungsfläche des Anemometers im Windkanal betrug somit weniger als 0,05. Daher konnte gewährleistet werden, dass das Strömungsfeld nicht durch das Anemometer beeinflusst wurde. Zusätzlich wurde im Rahmen der Kalibrierung die Stabilität der Anströmung untersucht. So ist nach der Norm gefordert, dass 10 mal 30s lang die Windgeschwindigkeit aufgezeichnet wird. Anschließend sollen die Mittelwerte für jede dieser 10 Messungen bestimmt werden. Die berechneten Mittelwerte dürfen maximal um 0,5% von ihrem Gesamtmittelwert sich unterscheiden. Der Versuch wurde bei 6m/s durchgeführt. Es ergaben sich folgende Werte für einen ermittelten Gesamtmittelwert von $\bar{v}_w = 5,95m/s$:¹¹

	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8	Nr. 9	Nr. 10
$\bar{v}_{w,i}$ in m/s	5,98	5,76	6,01	6,01	5,99	6,03	6,02	6,02	5,65	6,01
σ_{vw} in m/s	0,05	0,22	0,02	0,02	0,09	0,02	0,02	0,02	0,19	0,02
$\frac{\bar{v}_w - \bar{v}_{w,i}}{\bar{v}_w}$ in %	-0,55	3,25	-1,13	-1,12	-0,83	-1,27	-1,19	-1,23	5,11	-1,02

Tabelle 3.1: Stabilitätsuntersuchung Anemometer bei 6m/s

Somit konnte festgestellt werden, dass die Anforderung von der DIN bzgl. der Stabilität der Anströmung nicht erfüllt werden kann. Die Mittelwerte aus Nr.2 und Nr.5 weisen die größte Abweichung zum Gesamtmittelwert auf. Zusätzlich fällt auf, dass diese besonders hohe Standardabweichungen besitzen im Vergleich zu den anderen. Der Effekt des Abfallens der Windgeschwindigkeit um mehr als 0,3m/s konnte bei der Messung mit dem Staudruckrohr nicht beobachtet werden. Da es sich hierbei um einen sporadischen und **zufälligen Fehler** handelt, wurde für die Auswertung der Kalibrierung (im Ergebnis-Kapitel) veranlasst, die aufgezeichneten Spannungsmittelwerte rauszunehmen die eine hohe Standardabweichung besitzen.

Kalibrierverfahren nach DIN EN 61400-12-1:2017-12 Anhang F (normativ)

Das Anemometer wurde mit der Übertragungsstrecke SHUNT2 verbunden und es wurde die Ausgangsspannung mit einem Analog Discovery 2 aufgezeichnet. Zunächst wurde das Schalenkreuzanemometer für mind. 5 min bei 10m/s eingelaufen. Anschließend wurden Kalebriermessungen im Bereich von 4m/s bis 16 m/s in Kalibrierintervallen von 1 m/s durchgeführt. Am Anfang mit steigenden Geschwindigkeiten und danach mit Fallenden. Beim Ändern der Windgeschwindigkeit wurde ausreichend lange gewartet, damit die Windgeschwindigkeit im Windkanal sowie das Ausgangssignal sich eingependelt haben. Das Ausgangssignal des Anemometers sollte für 30s aufgezeichnet werden und mit der Referenzgeschwindigkeit des Staudruckrohrs verglichen werden.

¹⁰Vgl. A.1.12

¹¹Es wurden die gemessenen Spannungen in die später vorgestellte Kalibrierlg.4.13 des Anemometers eingesetzt, um die Geschwindigkeit zu bestimmen.

3 Durchführung

Schwierigkeiten Analog Discovery 2

Es fiel während der Auswertung auf, dass das verwendete Messgerät Analog Discovery 2 trotz eingestellter 30s zur Messung der Spannungen, etwa 22s lang Werte aufgenommen hat. Die Ursache dafür ist nicht bekannt. Zusätzlich wurde festgestellt, dass die gemessene Spannung mit dem Analog Discovery 2 bei jedem Neuanschluss an die Versorgungsquelle, meist der Laptop, nicht konstant war. Es kam zu Offset Abweichungen von $\pm 10mV$. Entsprechend wurden mit dem UNI-T UT139C Multimeter die Spannungen überprüft und in der **Auswertung erfolgte eine Korrektur der Offsetabweichung des Analog Discovery 2.**

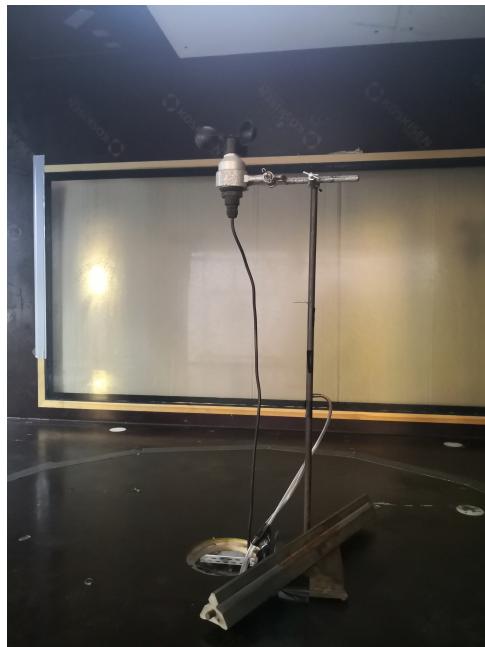


Abbildung 3.5: Kalibrierung Anemometer

3.6 Untersuchung nach VDI 3786:2018-05 - Blatt 2

Zusätzlich wurden die beiden Windmessgeräte im Rahmen von VDI 3786:2018-05 - Blatt 2 dynamischen Tests unterzogen.¹² So wurde beim Anemometer überprüft, wie groß die Entfernungskonstante und Ansprechwelle ist. Die Entfernungskonstante wird bestimmt, indem man das angehaltene Anemometer bei anliegendem Strömungswind im Windkanal schlagartig loslässt. Sie ist also ein Maß dafür, wie schnell das Anemometer die Ausgangsgeschwindigkeit erreicht. Die Ansprechwelle gibt an, ab welcher Windgeschwindigkeit, dass Anemometer anfängt sich zu drehen. Beim Windrichtungsgeber wurde der Anlaufwert untersucht, indem sie um 90° zum Windkanal ausgelenkt wurde und geprüft wurde, ab welcher Windgeschwindigkeit sie anfängt sich der Windkanalöffnung hinzurichten. Zudem wurde der Dämpfungsgrad untersucht, bei welchem die Fahne um 10° ausgelenkt wurde im Wandkanal und dann schlagartig losgelassen wurde. Es wurde analysiert, wie weit die Fahne nach dem Loslassen gependelt hat.

¹²Vgl. [VDI18] S. 23

3.7 Kalibrierung des Pyranometers

Die Pyranometer Kalibrierung erfolgte nach der in der englischen Sprache verfassten ISO 9847:1992-07-01 mit dem Titel Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. Im Detail erfolgte die Kalibrierung nach der beschriebenen Ausführung im Abschnitt 5.3.1 Integrating sphere calibration (with pyranometer horizontal: type Ila and with pyranometer tilted: type IIb) unter dem Kapitel 5.3 Indoor calibration (type II).¹³ Eine integrating sphere, im deutschen auch als Ulbricht-Kugel bezeichnet, ist eine Hohlkugel, die auf der Innenseite mit einer möglichst perfekt diffus remittierenden Beschichtung aufgetragen ist, so dass einfallendes Licht durch diffuse Reflexion gleichmäßig über die innere Kugeloberfläche sich verteilt.¹⁴ So kann gewährleistet werden, dass das zu kalibrierende Pyranometer an jedem Aufstellort innerhalb der Kugel dieselbe Lichtintensität misst.

Umsetzung nach ISO 9847:1992-07-01 - Abschnitt 5.3.1

Die Pyranometer Kalibrierung erfolgte in der Ulbricht Kugel UL 1650 des Herstellers LMT am Fachgebiet für Lichttechnik an der TU Berlin. Für die Kalibrierung wurde ein Referenzpyranometer benötigt, welches vom selben Typ des zu kalibrierenden Pyranometers CS300 sein sollte.¹⁵ Bei dem CS300 handelt es sich um eine Ausläufermodell, weswegen im Rahmen der Kalibrierung nach anderen Referenzpyranometern gesucht wurde. Es wurde ein SP-110-SS vom Hersteller Apogee Instruments ausgeliehen, welches sehr ähnliche Charakteristiken zum kalibrierenden Pyranometer besitzt.¹⁶ Zur Veranschaulichung soll die untere Tabelle dienen. Einzig die Höhe ist verschieden.

Charakteristik	SP-110-SS (Referenz)	CS 300 (zu kalibrieren)
Messspektrum	360 bis 1120 nm	360 bis 1120 nm
Kalibrierfaktor	$5 \frac{W}{m^2} pro mV$	$5 \frac{W}{m^2} pro mV$
Ausgangsempfindlichkeit	$0,2 \frac{mV}{W}$	$0,2 \frac{mV}{W}$
Reaktionszeit	weniger als 1ms	weniger als 1ms
Temperaturreaktion	$0,004 \pm 0,04 pro ^\circ C$	$0,004 \pm 0,04 pro ^\circ C$
Höhe	3,3cm	2,5cm

Tabelle 3.2: Vergleich Referenzpyranometer und zu kalibrierendem Pyranometer

Nach der Norm sollen nur Mikrovolt-Messgeräte verwendet werden, die eine Messgenauigkeit von $\pm 0,1\%$ besitzen.¹⁷ In dieser Hinsicht wurde die Norm nicht eingehalten, da das verwendete Analog Discovery 2 für den in der Pyranometerkalibrierung verwendeten Messbereich eine Messgenauigkeit von $\pm 10mV \cdot Messwert \pm 0,5\% \cdot Messbereich$ besitzt.¹⁸ Bspw. liegt die geforderte

¹³Vgl. [ISO92]

¹⁴Vgl. [Doh14] S. 60

¹⁵Vgl. A.1.5

¹⁶Vgl. A.1.16

¹⁷Vgl. [ISO92] S.2

¹⁸Vgl. A.1.7

3 Durchführung

Messabweichung nach der Norm für eine 50mV Messspannung bei 0,05mV. Das Analog Discovery 2 würde für diesen Messwert nach folgender Berechnung, diese Messabweichung besitzen:

$$F_g = \pm 10mV \pm 0,5\% \cdot 500mV = 12,5mV \quad (3.1)$$

Kalibrierverfahren nach ISO 9847:1992-07-01 - Abschnitt 5.3.1

Die beiden Pyranometer wurden mit der Übertragungsstreckenplatine DIR1 und DIR2 verbunden und es wurde die Ausgangsspannung mit einem Analog Discovery 2 aufgezeichnet. Nach der ISO-Norm wurde zunächst das Referenzpyranometer mit dem zu kalibrierenden Pyranometer auf demselben Geräteträger installiert (in diesem Fall ein Stück Holz, mit Panzerband befestigt). Unter das zu kalibrierende Pyranometer wurde, um die Höhe zum Referenzpyranometer auszugleichen, 7mm mehr Holz gepackt. Beim Montieren wurde darauf geachtet, dass die beiden Geräte nach dem Einbringen in die Ulbricht Kugel dieselbe Orientierung zur Lichtquelle haben. Anschließend wurde die in der Ulbricht Kugel mittig liegende Lichtquelle eingeschaltet, in diesem Fall eine 500W Glühbirne. Innerhalb der Einlaufszeit von 30min wurden die Positionen der Pyranometer einmal getauscht, um zu gucken, ob die Pyranometer positionsabhängig andere Spannungen messen. Dies war nicht der Fall. Zudem wurde die Temperatur der beiden Pyranometer und die Innenseite der Ulbrichtkugel mit dem TP9 Infrarotthermometer (Hersteller: Trotec) gemessen. Nach der 30 min Einlaufszeit, wurden die Ausgangsspannungen aufgenommen. Es wurden mind. 5 Messungen mit einer Messzeit von 7:30min für die beiden Pyranometer vorgenommen. Am Ende der Messungen wurden erneut die Temperaturen gemessen.

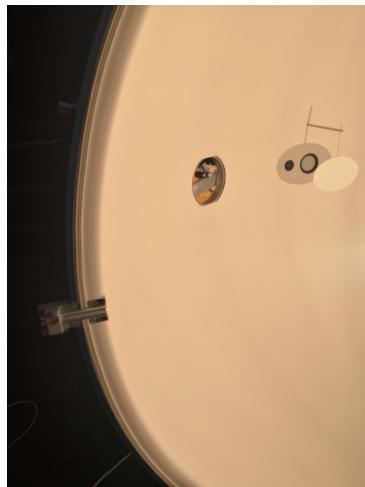


Abbildung 3.6: Kalibrierung Pyranometer in Ulbricht Kugel

3.8 Untersuchung der Shunt-Widerstände

Um die Shunt-Widerstände (der Energiequellen) zu kalibrieren, wurden Ströme von 1A bis 5A an die Shunts über Hirschmann Klemmen angelegt. Zuvor wurde der Ausgang der Stromquelle immer mit dem UNI-T UT139C Multimeter überprüft. Es wurde die Ausgangsspannung mit demselben Multimeter gemessen.

3.9 Kalibrierung des Arduinos

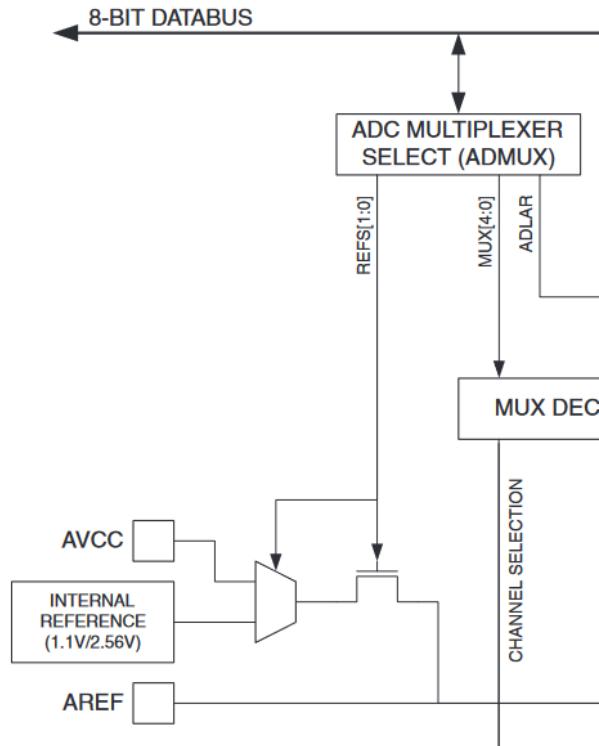


Abbildung 3.7: Atmega 2560 - Analog to Digital Converter Block Schematic - (Vgl. [Mic] S. 269)

In Abbildung 3.7 ist ein Teilausschnitt des ATMEGA 2560 dargestellt, wo die Quantisierung der Eingangsspannung zu einer Binärzahl erfolgt. Um genau zu sein, sieht man wie der ADC Multiplexer SELECT einen Multiplexer ansteuert, wo je nach dem anliegenden Steuersignal, entweder der Wert von AVCC oder der internen 1,1V/2,56V Spannung an den ADU weitergeleitet wird.¹⁹ Das weitergegebene Signal gibt somit die maximale Spannung vor, die der ADU zu einer binären Zahl quantisieren kann. AVCC ist hierbei die Versorgungsspannung des ADUs. Sie ist verbunden mit der Versorgungsspannung des ATMEGA 2560, in diesem Fall 5V.²⁰ Der AREF Pin ist ein Pin auf dem Arduino Board und dient als externer Analoger Referenzpin für die ADU. Gemäß der Formel, kann somit auch die Quantisierungsintervallbreite bestimmt werden.

$$Q = \frac{U_{\max}}{2^n} \quad (3.2)$$

Entsprechend ist die Quantisierungsbreite geringer für kleinere Spannungen und es kann somit eine höhere Genauigkeit der Messung eines analogen Signals erzielt werden. Da die AVCC Spannung der Versorgungsspannung des Arduinos entspricht, kann sie über den 5V Pin (Versorgungsspannung) des Arduinos bestimmt werden. Während des Versuchs, indem mit dem UNI-T

¹⁹Multiplexer, in der Abbildung als Trapez dargestellt, sind Bauteile der Mikroprozessortechnik, die aus mehreren anliegenden Signalen, ein Signal weiter zum Ausgang leiten. Die Auswahl erfolgt über das sogenannte Steuersignal.

²⁰Vgl. [Mic] S. 9

3 Durchführung

UT139C die Messspitzen an 5V und GND gehalten wurden, wurde eine Spannung von 3,3V gemessen. Es fiel auf, dass zuletzt am Arduino ein Netzteil verwendet wurde, welches eine Ausgangsspannung von 5V und 350mA besitzt. Allerdings benötigt der Arduino nach dem Datenblatt eine Eingangsspannung von 7V-12V.²¹ Entsprechend wurde dieses gegen ein anderes Netzteil 12V ausgetauscht.

```
1 void setup() {
2     // Referenz auf die interne int. 1V1 setzen
3     ADMUX = ADMUX | (1 << REFS1) ;
4     ADMUX = ADMUX & ~(1 << REFS0) ;
5 }
6 void loop() {
7
8 }
```

Abbildung 3.8: Code Bestimmung 1,1V

Um die 1,1V Referenzspannung zu bestimmen, wurde der ~~der~~ dafür eigens erstellte Programmcode in C++ aus Abbildung 3.8 in den Arduino hochgeladen. Dieser steuert den ADMUX aus Abbildung 3.7 an. In der ersten Zeile wird das Steuerregister von REFS1 durch eine Veroderung auf eins gesetzt.²² REFS1 steuert hierbei den MUX an, der bestimmt, ob AVCC oder die interne Referenzspannung am ADU anliegen sollen.²³ In der zweiten Zeile wird die Bitposition des REFS0 Steuerregisters angesteuert durch den Linksshift um 1. Anschließend wird die Bitzahl durch den bitweise not Operator “~“ negiert. Sodass am Ende das Steuerregister von REFS0 durch die Verundung mit ADMUX auf null gesetzt wird und die 1,1V Spannung durch den MUX angesteuert wird, statt der 2,56V.²⁴ Schlussendlich lag die 1,1V Spannung am AREF Pin an.

Zusätzlich wurde der Offsetfehler durch das Anlegen von einer Spannung von 0V untersucht. Des Weiteren wurde der Verstärkungsfehler untersucht, indem die in den Grundlagen beschriebene Spannung von $0,5Q$ und $Q - 1,5Q$ angelegt worden ist (siehe hierzu auch Abb.: 2.6) Für diesen Versuch wurde eine Spannungsquelle verwendet und zusätzliche Widerstände, mit denen Spannungsteiler gebildet worden, da die Spannung besonders gering sein mussten ($0,5Q$). Die an das Arduino angelegte Spannung wurde mit dem UNI-T UT139C Multimeter geprüft.

²¹Vgl. A.1.8

²²Der senkrechte Strich “|“ist der Oder Strich. “<<“ist das bitweise links shiften. REFS1 entspricht der Bit Position des Steuerregisters. Vgl. [Ard]

²³Vgl. [Mic] S.281

²⁴Vgl. [Mic] S.281

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnis der Arduinokalibrierung

Die gemessene Referenzspannung für “1,1V“ betrug 1,089V und die andere für “AVCC“ 4,998V. Der Arduino hat eine Auflösung von 10bit. Somit ergibt sich für die Quantisierungsintervallbreite:

$$\begin{aligned} Q_{1,1V} &= \frac{U_{max}}{2^N} = \frac{1,089V}{1024} = 1,063mV \\ Q_{5V} &= \frac{U_{max}}{2^N} = \frac{4,998V}{1024} = 4,881mV \end{aligned} \quad (4.1)$$

Durch die Funktion `analogReference()` ist die Referenzspannung für den ADU festlegbar.¹ Mit der `analogRead()` Funktion wird die Spannung an einem gewähltem PIN gemessen. Die Ausgabe der `analogRead()` Funktion ist eine 10 Bit Zahl. Entsprechend der Funktion:

$$\text{gemessene Spannung} = \frac{\text{Bitzahl}}{2^N} \cdot U_{max} \quad (4.2)$$

kann die quantisierte Zahl als Spannung angegeben werden.² Diese Funktion wurde real umgesetzt, um den Offsetfehler und den Verstärkungsfehler zu bestimmen. So wurde bei der Bestimmung des Offsetfehlers keine Abweichung nach dem Anschluss von 0V festgestellt.

Für die Bestimmung des Verstärkungsfehlers ergaben sich folgende Werte:³

U_{ein}	$U_{mess,Arduino}$	Abweichung in LSB
$0,5Q_{1,1V} \approx 0,5mV$	0V	0,5
$U_{max} - 1,5Q_{1,1V} \approx 1,087V$	1,089V	2

Tabelle 4.1: Verstärkungsfehler Untersuchung 1,1V

Es konnte in beiden Versuche bestätigt werden, dass ein positiver maximaler Verstärkungsfehler von etwa 2LSB vorliegt, wie es im Datenblatt geschrieben ist (Vgl. Tabelle: 2.10).

U_{ein}	$U_{mess,Arduino}$	Abweichung in LSB
$0,5Q_{5V} \approx 2,4mV$	0V	0,5
$U_{max} - 1,5Q_{5V} \approx 4,991V$	4,998V	2

Tabelle 4.2: Verstärkungsfehler Untersuchung 5V

¹Vgl. [Ard]

² U_{max} ist hierbei die gemessene Spannung der einzelnen Referenzspannungen, aus dem Schritt zuvor

³In den Grundlagen wurde festgehalten, dass die Quantisierungsintervallbreite proportional zu LSB sich verhielt
- siehe Abb.: 2.4

4.2 Ergebnis der Übertragungsstreckenplatinenuntersuchung

		Teststrom [mA]					
Strecke	M(U_a)	3,848	7,862	11,79	15,823	19,893	
SHUNT1	$\frac{U_a + 0,00385}{240}$	3,845	7,858	11,779	15,823	19,862	
Teststrom [mA]							
Strecke	M(U_a)	3,905	7,946	11,894	15,938	19,985	
SHUNT2	$\frac{U_a + 0,00446}{240}$	3,91	7,935	11,852	15,898	19,964	
Testspannung [V]							
Strecke	M(U_a)	20	21,99	23,98	25,98	27,98	29,98
VOLDI	$U_a \left(\frac{118,2}{18,2} \right) + 0,001$	20	21,99	23,98	25,98	27,98	29,98
Testspannung [mV]							
Strecke	M(U_a)	49	99	150	199	250	300
AMP1	$\frac{U_a - 105}{15,8}$	48	97	146	195	244	293
AMP2	$\frac{U_a - 119}{15,8}$	48	97	146	195	244	293
AMP3	$\frac{U_a - 120}{15,8}$	48	97	147	195	245	294
AMP4	$\frac{U_a - 103}{15,8}$	48	97	146	195	245	293
AMP5	$\frac{U_a - 124}{15,8}$	48	97	146	195	245	293
AMP6	$\frac{U_a - 122}{15,8}$	48	97	146	195	245	293
Testspannung [mV]							
Strecke	M(U_a)	99	1000	2004	3000	4000	4901
DIR1	$U_a + 4$	99	1000	2004	3000	4000	4901
DIR2	$U_a + 4$	99	1000	2004	3000	4000	4901
DIR3	U_a	99	1000	2004	3000	4000	4900
Testspannung [mV]							
Strecke	M(U_a)	100	1000	1999	2998	3996	4897
DIR4	U_a	98	978	1955	2926	3901	4780
DIR5	U_a	98	978	1956	2926	3901	4780
DIR6	U_a	98	978	1956	2926	3901	4780
DIR7	U_a	98	978	1956	2926	3901	4780

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Übertragungsstreckenplatine (in Anlehnung an [Ton16])

Die aufgenommenen Spannungen von der Übertragungsstreckenplatine wurden mathematisch so umgerechnet, dass die Werte in der oberen Tabelle in Beziehung zu ihren Eingangsgrößen stehen. Es wurde an manchen Stellen der Offsetfehler korrigiert (bspw. an den AMP-Steckern). Wie bereits in der Durchführung erwähnt, hatte die DIR Strecke besonders große Abweichungen/Spannungsabfälle wegen der widerstandsbehafteten Kupferbahnen. Man erkennt dies an den Strecken von DIR 4-7, da sie in ihrer ursprünglichen Form gehalten worden sind und keine Spannungsfolger angeschlossen wurden. Es zeigt sich bei ihnen ein Linearitätsfehler.

Messabweichung

Zur Berechnung der maximalen Messabweichung werden alle absoluten Fehler zusammengezählt gemäß der Taylor Glg.2.3 aus der Einleitung. In diesem Fall gibt es die Messabweichung des Multimeter und durch die Platine entstandene Verlustabweichung, welche aber später beim Anschließen an das Arduino als Messabweichung verstanden werden kann. Es handelt sich in diesem Sinne um eine **Innere Störgröße** der Messtechnik.

Für die kommenden Messabweichungen wurde wie folgt vorgegangen. Die Eingangsspannung und die Ausgangsspannungen wurden mit je einem Peaktech 3430 gemessen. Die Messabweichungen dieser werden als $F_{g,eingang}$ & $F_{g,ausgang}$ bezeichnet. Ihre Fehler ergeben sich nach dem Datenblatt des Peaktech 3430, indem die Messabweichung wie folgt berechnet wird, nach:⁴

$$\pm \text{prozentualer Fehler} \cdot \text{ausgewählter Messbereich} + \text{def. Zahl} \cdot \text{niedrigster Auflösung} \quad (4.3)$$

Hinzu kommt die Abweichung der Übertragungsstreckenplatine $F_{g,maxAbweichung}$, die ermittelt wird nach der Tabelle 4.3, indem der maximale Abweichungswert des Eingangs- und Ausgangswertes gesucht wird.

DIR

$$\begin{aligned} F_{g,eingang} &= 0,05\% \cdot 22 \text{ V} + 3 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 0,014 \text{ V} \\ F_{g,maxAbweichung} &= 1mV \\ F_{g,ausgang} &= 0,05\% \cdot 22 \text{ V} + 3 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 0,014 \text{ V} \\ F_{max} &= F_{g,eingang} + F_{g,maxAbweichung} + F_{g,ausgang} = 0,029V \end{aligned} \quad (4.4)$$

AMP Strecke

$$\begin{aligned} F_{g,eingang} &= 0,05\% \cdot 22 \text{ V} + 3 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 0,014 \text{ V} \\ F_{g,maxAbweichung} &= 7mV \\ F_{g,ausgang} &= 0,05\% \cdot 22 \text{ V} + 3 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 0,014 \text{ V} \\ F_{max} &= F_{g,eingang} + F_{g,maxAbweichung} + F_{g,ausgang} = 0,035V \end{aligned} \quad (4.5)$$

VOLDI Strecke

$$\begin{aligned} F_{g,eingang} &= 0,05\% \cdot 220 \text{ V} + 3 \cdot 10^{-2} \text{ V} = 0,14 \text{ V} \\ F_{g,maxAbweichung} &= 0mV \\ F_{g,ausgang} &= 0,05\% \cdot 22 \text{ V} + 3 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 0,014 \text{ V} \\ F_{max} &= F_{g,eingang} + F_{g,maxAbweichung} + F_{g,ausgang} = 0,154V \end{aligned} \quad (4.6)$$

⁴Vgl. A.1.14

4 Ergebnisse

SHUNT Strecke

$$\begin{aligned}
 F_{g,eingang} &= 0,8\% \cdot 22 \text{ mA} + 4 \cdot 10^{-6} \text{ mA} = 0,176 \text{ mA} \\
 F_{g,maxAbweichung} &= 0,024mA \\
 F_{g,ausgang} &= 0,05\% \cdot 22 \text{ V} + 3 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 0,014 \text{ V} \\
 F_{max} &= F_{g,eingang} + F_{g,maxAbweichung} + F_{g,ausgang} = 0,014V + 0,024mA + 0,176mA = 0,014V + 0,2mA \\
 F_{max} &= 0,014V + 0,2mA \cdot 240 = 0,052V
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

4.3 Ergebnis der Temperaturkalibrierung

Für die Batterietemperatursensorkalibrierung wurde durch Interpolation der aufgezeichneten Spannungsmittelwerte in Abhängigkeit der Referenztemperaturen bei -10° und 40° eine lineare Funktion ermittelt (siehe Glg. 2.10). Anschließend wurde von dieser die Umkehrfunktion aufgestellt, um die Temperatur in Abhängigkeit von der gemessenen Spannung anzugeben. Die Kalibriergleichung lautet:

$$T_b = \frac{103,534^\circ C}{V} \cdot U_{mess} - 53,108^\circ C \tag{4.8}$$

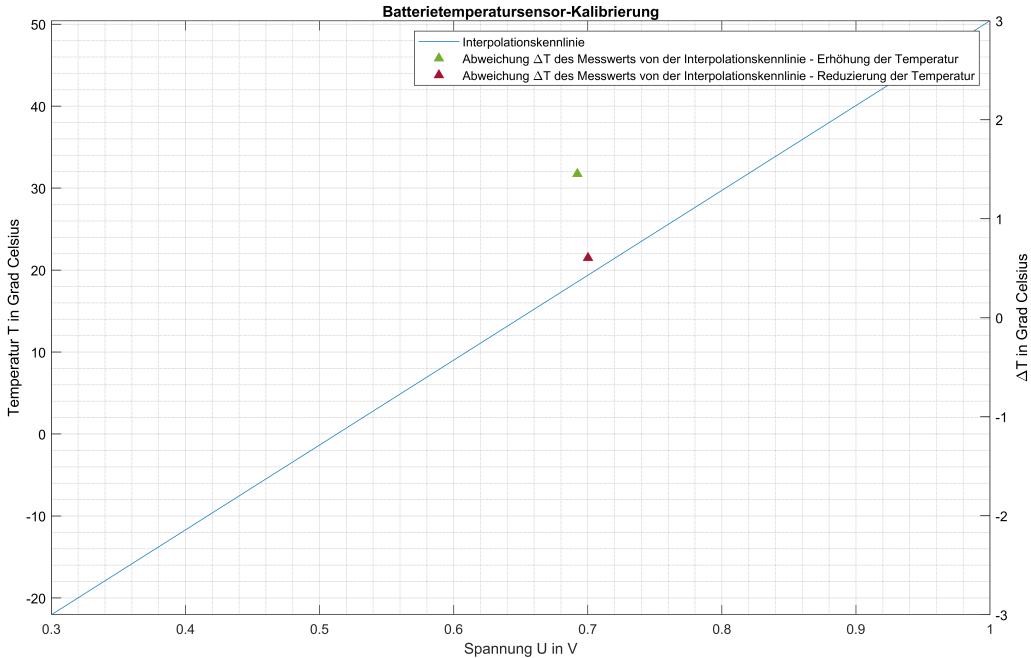


Abbildung 4.1: Batterietemperatursensorkalibrierung - Kennlinie

In der oberen Abbildung kann festgestellt werden, dass es zu einem Hystereseffekt kommt, da die Abweichung zu der idealisierten Geraden bei der Reduzierung der Temperatur von 40° auf 20° unter der Abweichung zu der idealisierten Geraden bei der Erhöhung der Temperatur von

4.3 Ergebnis der Temperaturkalibrierung

-10° auf 20° liegt. Der Effekt ist hoch, da die Summe dieser beiden Abweichungen bei etwa 1° liegt.

Für den Außentemperatursensor wurde dasselbe Verfahren zur Ermittlung der Kalibriergleichung durchgeführt. Die Kalibriergleichung lautete:

$$T_a = \frac{109,305^\circ C}{V} \cdot U_{mess} - 56,300^\circ C \quad (4.9)$$

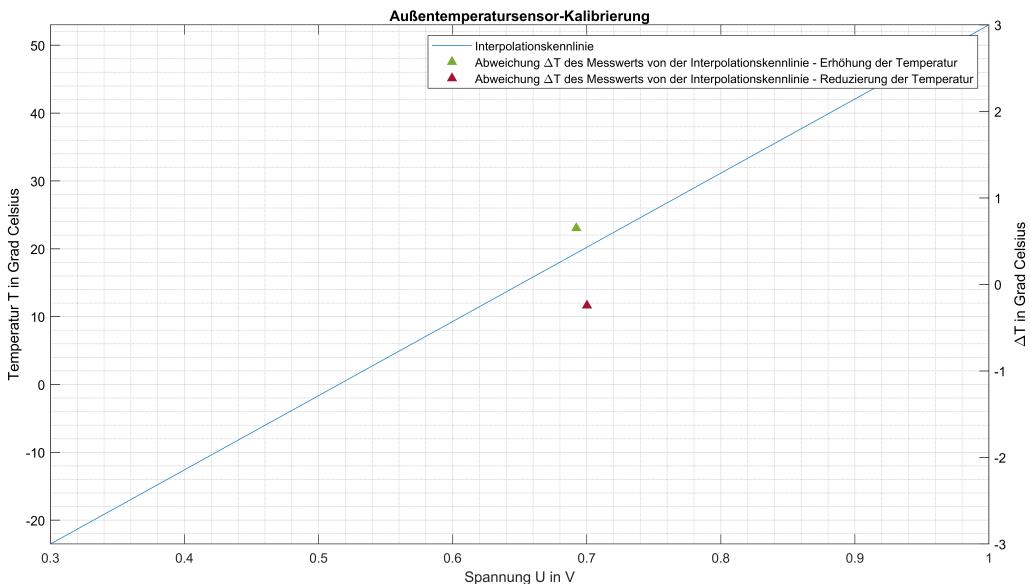


Abbildung 4.2: Außentemperatursensorkalibrierung - Kennlinie

Auch bei der Außentemperatursensor Kalibrierung gibt es einen leichten Hystereseffekt. Hier liegt der Abweichungswert bei der Reduzierung der Temperatur ebenfalls unter dem der Erhöhung. Außerdem ist noch festzuhalten, dass die beiden ermittelten Glg. etwas verschieden sind, da der Außentemperatursensor zum Schutz vor Regen in ein Gewebe gewickelt ist.

Ursprünglich wurde die Temperatur mit den Skalierungsfaktoren aus dem Datenblatt des TMP36 berechnet:⁵

$$T_{Datenblatt} = \frac{U - 0,5V}{\frac{0,01V}{^\circ C}} = \frac{100^\circ C}{V} \cdot U - 50^\circ C \quad (4.10)$$

Es ist festzuhalten, dass die neuen kalibrierten Skalierungsfaktoren mit denen aus dem Datenblatt verschieden sind. Anhand eines Beispiels für $20^\circ C$ soll dies besser verdeutlicht werden. Hierzu wird zunächst über die Umkehrfunktion von der kalibrierten Temperaturfunktionen T die Spannung für $20^\circ C$ ermittelt und dann in die Gleichung von 4.10 eingesetzt. Anschließend wird die Temperaturdifferenz von $20^\circ C$ und dem vorherigen berechneten Wert gebildet.

⁵Offset Voltage (0,5V) & Output Voltage Scaling ($\frac{0,01V}{^\circ C}$) - Vgl. A.1.4

4 Ergebnisse

	Außentemperatursensor	Batterietemperatursensor
$U(T_{b,a})$	0,698V	0,706V
$T_{Datenblatt}$	19,8°C	20,6°C
$ \Delta T = T_{20} - T_{Datenblatt} $	0,2°C	0,6°C

Tabelle 4.4: Messabweichungen durch die ursprünglichen Skalierungsfaktoren

Die reale Messabweichung, würde somit 0,6°C für den Batterietemperatursensor bei 20°C betragen. Im Vergleich zum Hystereseffekt, zeigt sich somit, dass die Messabweichung nicht **relativ** groß gewesen wäre, wenn mit den alten Skalierungsfaktoren gerechnet wird.

4.4 Ergebnis der Windrichtungsgeberkalibrierung

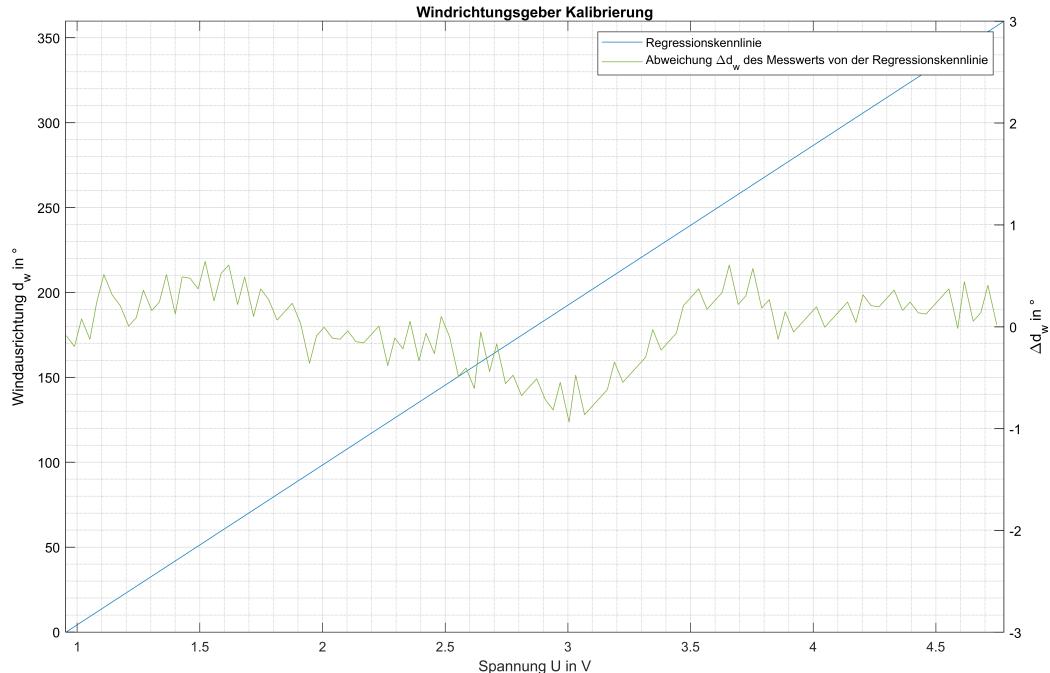


Abbildung 4.3: Windrichtungsgeberkalibrierung - Kennlinie

Für die Ermittlung einer Regressionskurve, wurde die Hilfsfunktion “polyfit()“ verwendet, welche nach der Methode der Minimierung der Fehlerquadrate Koeffizienten für die lineare Regression gemäß Glg.2.11(aus dem Grundlagen Kapitel) bestimmt.⁶ Diese Funktion wurde so angewandt, indem die notierten Spannungen in Abhängigkeit der festgelegten Referenzgrade als Argumente in die Funktion eingesetzt wurden. Anschließend wurde die Umkehrfunktion aufgestellt, um die

⁶Vgl. [Matb]

4.4 Ergebnis der Windrichtungsgeberkalibrierung

Winkelausrichtung in Abhängigkeit der Spannung zu erhalten. Es wurde folgende Gleichung ermittelt.

$$d_w = \frac{94,117^\circ}{V} \cdot U_{mess} - 89,889^\circ \quad (4.11)$$

Es kann in der oberen Abbildung festgestellt werden, dass die Kalibrierung erfolgreich war, da die maximale Abweichung des Messwertes die Regressionkennlinie nicht 1° überschreitet. Im Hause des Herstellers des Windrichtunggebers (Thies Clima) wird bei der Auslieferung eines ihrer Geräte zusätzlich ein Kalibrierzertifikat, in dem die für das Gerät eigens ermittelter Kalibrierkennline notiert ist, ausgehändigt.⁷ Es konnte weder ein Kalibrierzertifikat noch eine Kalibrierkennline gefunden werden, weswegen hier ein Vergleich zwischen ermittelter Kalibrierkennline und ursprünglicher entfällt. Für die Unsicherheitsanalyse der Messungen wurde die Standardabweichung der Messwertabweichungen von der Regressionskennlinie ermittelt. Diese lag bei $0,356^\circ$. Dieser Wert wird unter der Annahme, dass eine Normalverteilung vorliegt (erkennbar daran, dass sich der Wert um 0° zentriert, statt an den Rändern von $\pm 1^\circ$), mit dem Erweiterungsfaktor $k=1,96$ multipliziert, um zu gewährleisten, dass 95% aller Messwerte in dieser Toleranz liegen.⁸ Die Unsicherheit für die Kalibrierung ist somit $\pm 0,7^\circ$.

Im Rahmen des VDI 3786:2018-05 - Blatt 2 wurde die Ansprechwelle des Windrichtunggebers untersucht. So wurde der Windrichtungsgeber im 90° zum Windkanal gestellt.⁹ Anschließend wurde der Wind langsam erhöht. Es konnte festgestellt werden, dass bei einer Windgeschwindigkeit unter 1,5 m/s der Windrichtungsgeber begonnen hat sich zu drehen. Zudem wurde der Dämpfungsgrad analysiert, indem der Windrichtungsgeber um 10° ausgelenkt worden ist. Der Dämpfungsgrad wird nachfolgender Glg. ermittelt:¹⁰

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi}{\ln \frac{a_1}{a_3}} \right)^2}} \quad (4.12)$$

a1 und a3 sind hierbei die Amplitudenschwingungen des Gerätes zur gleichen Seite. Sie sind in der unteren Abbildung gekennzeichnet. Die Amplituden werden ermittelt, indem sie von der eingeschwungenen Windrichtung, bei $100,888^\circ$ in diesem Fall, abgezogen werden. Für diesen Versuch wurde eine Dämpfungskonstante von 0,248 ermittelt.

⁷Vgl. A.1.20

⁸Vgl. [Mü20] S.25

⁹Vgl. [VDI18] S.23

¹⁰Vgl. [VDI18] S.41

4 Ergebnisse

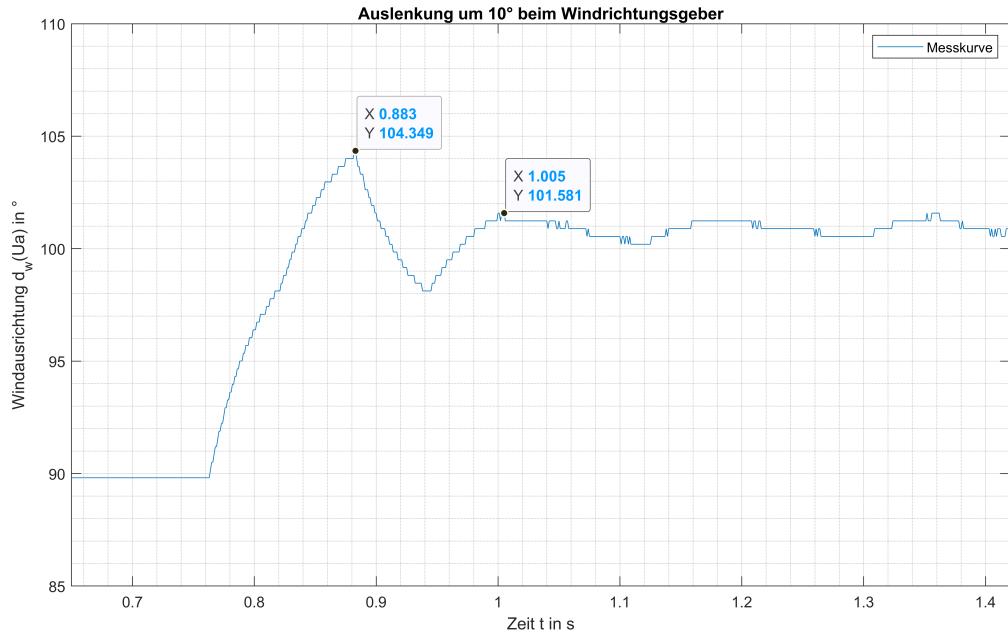


Abbildung 4.4: Dämpfungsgrad - Bestimmung

	Richtlinie VDI	Messung - Thies Windrichtungsgeber
Dämpfungsgrad	0,2 bis 0,3 bei 10° Auslenkung	0,248
Anlaufwert	bei 90° Auslenkung, $v \leq 0, 2 \frac{m}{s}$	$0,15 \frac{m}{s}$

Tabelle 4.5: Vergleich VDI 3786:2018-05 - Blatt 2 Richtlinie mit realer Messung für den Windrichtungsgeber (in Anlehnung an [VDI18])

Aus der Tabelle kann entnommen werden, dass der Windrichtungsgeber die Anforderungen erfüllt.

4.5 Ergebnis der Anemometerkalibrierung

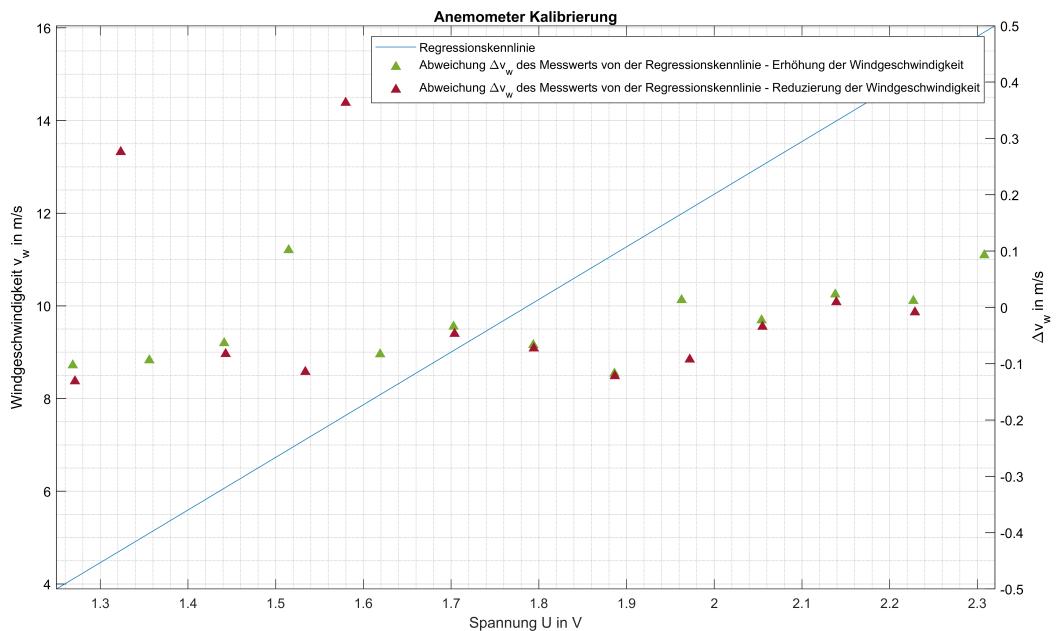


Abbildung 4.5: Anemometerkalibrierung - Kennlinie

Wie bei der Windrichtungsgeberkalibrierung wurde bei der Anemometerkalibrierung eine Regressionskurve über die “polyfit()“ Funktion aufgestellt, indem die Mittelwerte der aufgezeichneten Spannung jeweils in Abhängigkeit zu den dazugehörigen Windgeschwindigkeiten als Argumente in die Funktion eingesetzt wurde.¹¹ Für die Anemometerkalibrierung sollte die Regressionsgerade nach der DIN EN 61400-12-1:2017-12 Anhang F Norm die Bedingung erfüllen, dass der Korrelationskoeffizient über 0,99995 liegen soll. Mit der “corrcoef()“ wurde der Korrelationskoeffizient für die Kalibrierung bestimmt. In die Funktion wurden als Parameter die gemessenen Spannungen (als Mittelwerte) und die Geschwindigkeitswerte, bei denen kalibriert wurde eingesetzt. Die Funktion bestimmte dann die Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden Parametern, wobei eins als Ausgabe die größte Korrelation darstellt. ¹² Es wurde ein Korrelationskoeffizient von R=0,9996 ermittelt.

Der Effekt, dass die gemessene Windgeschwindigkeit/Spannung plötzlich fällt, setzt sich hier fort (wie bereits in der Durchführung). Da es sich hierbei um einen sporadischen Effekt handelte und systematisch nicht bestimmbar war, stellt dieser somit einen **zufälligen Fehler** dar, welcher als **innere Störgröße** Einfluss auf die Messung nimmt. Es konnte festgestellt werden, dass die Standardabweichung bei diesen Ausreißern besonders hoch war. Dem zu Grunde liegend wurde die Kennlinie danach modifiziert Messreihen einer Geschwindigkeit, die eine hohe Standardabweichung besitzen, nicht in der “Polyfit()“Funktion mit auszuwerten.

¹¹Vgl. [Matb]

¹²Vgl. [Mata]

4 Ergebnisse

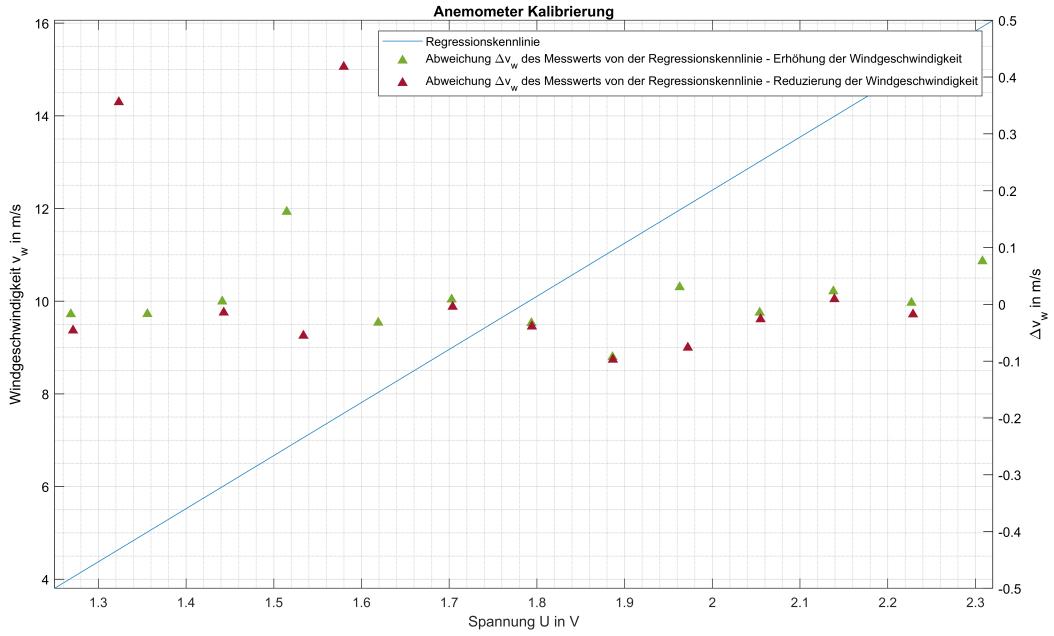


Abbildung 4.6: Anemometerkalibrierung - Kennlinie - modifiziert

Die obere Kennlinie stellt die modifizierte Kennlinie dar. Es ist erkennbar wie die aufgetragenen Abweichungen der Mittelwerte zu der idealisierten Kennlinie nun kompakter um die auf der rechten y-Achse mittig liegenden null Achse liegen. Es konnte folgende Gleichung ermittelt werden:

$$v_w = 11,456 \frac{m}{V_s} \cdot U_{mess} - 10,516 \frac{m}{s} \quad (4.13)$$

Der Korrelationskoeffizient lag in diesem Fall bei $R=0.99994$. Auch hier kann wie beim Windrichtungsgeber nicht die ermittelte Kalibrierkennlinie zu der ursprünglichen verglichen werden, da es keine Aufzeichnungen über die ursprüngliche Kennlinie gibt. Abschließend soll noch erwähnt, dass die Ursache für das plötzliche Fallen der Spannung nicht bekannt ist. Es wurde untersucht, ob der Effekt auch mit anderen Spannungsmessgeräten wie dem UNI-T UT139C auftritt (im Windkanal beim DWD in Oberschleißheim). Dies war nicht der Fall. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass das Gerät einwandfrei funktioniert und an dem Tag der Kalibrierung evt. das Netzteil oder Analog Discovery 2 Probleme in der Messung bereitet hat. Die Unsicherheitsanalyse für die Anemometerkalibrierung entfällt, da es beim Fachgebiet für Experimentelle Strömungsmechanik keine Messunsicherheit zu der Bestimmung der Referenzgeschwindigkeit mit dem Staudruckrohr gibt, also ist die Bestimmung nach der Unisicherheitsfortpflanzung nicht möglich. Es liegen auch wenige Messwerte vor für eine arithmetische Bestimmung der Unsicherheit.

Zusätzlich wurde auch in diesem Versuch geprüft, ob das Anemoeter die Anforderungen nach VDI 3786:2018-05 - Blatt 2 erfüllt. Diesbezüglich wurde die Ansprechwelle ermittelt und die Entfernungskonstante. Die Entfernungskonstante wird ermittelt über die Zeitkonstante τ . Diese entspricht der zeitlichen Differenz zu den Werten wo der Wert dem 0,3 und 0,74 fachen Wert

4.6 Ergebnis der Pyranometerkalibrierung

der Endgeschwindigkeit entspricht. τ lag für 5,01 m/s bei 0,846 und bei 10,08m/s τ bei 0,698. Die Formel für die Bestimmung der Entfernungskonstante lautet:¹³

$$d = v \cdot \tau \quad (4.14)$$

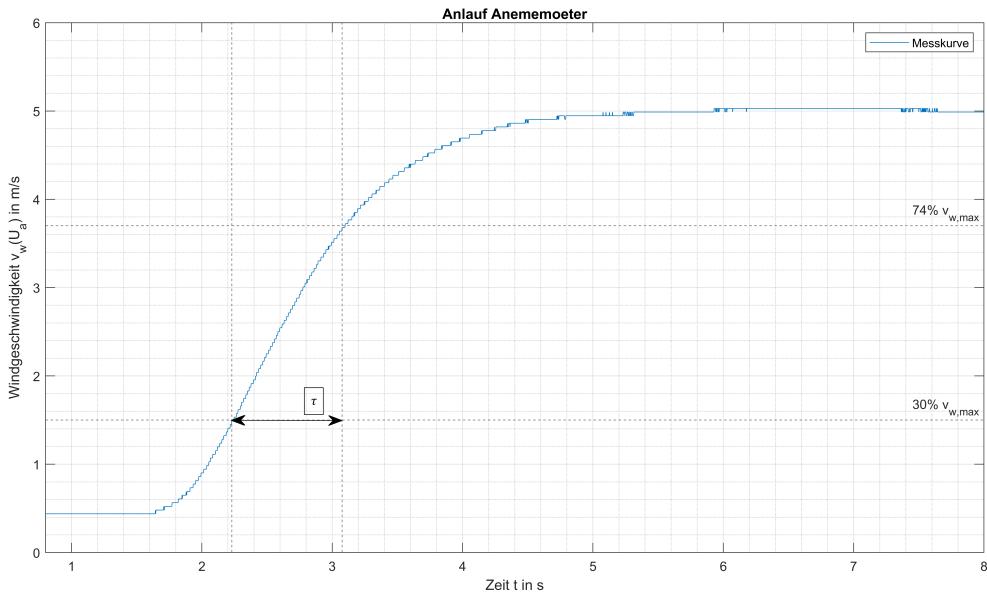


Abbildung 4.7: Bestimmung der Entfernungskonstante

	Richtlinie VDI	Messung - Thies Anemometer
Entfernungskonstante	$\leq 4\text{m bis } 5\text{m}$	4,23m bei 5m/s & 7,04m bei 10m/s
Ansprechwelle	$\leq 0,15\frac{\text{m}}{\text{s}}$	0,248

Tabelle 4.6: Vergleich VDI 3786:2018-05 - Blatt 2 Richtlinie mit realer Messung für den Windrichtungsgeber (in Anlehnung an [VDI18])

4.6 Ergebnis der Pyranometerkalibrierung

Die Bestimmung des Kalibrierfaktors erfolgte nach der ISO 9847:1992. So wurde im ersten Schritt für jeder der 5 Messreihen Referenzpyranometer Spannung (im Folgenden als $V_R(ij)$ bezeichnet) ins Verhältnis zu den Spannungen des zu kalibrierenden Pyranometers ($V_F(ij)$) gesetzt und mit dem Kalibrierfaktor des Referenzpyranometers ($F_R = 5 \frac{W}{m^2} \text{ pro mV}$) multipliziert:¹⁴

$$F(ij) = \frac{V_R(ij)}{V_F(ij)} F_R \quad (4.15)$$

Da die beiden Pyranometer sehr ähnliche Charakteristiken aufweisen, muss der Kalibrierfaktor

¹³Vgl. [VDI18] S.31

¹⁴Formel Vgl. [ISO92] S.5, Kalibrierfaktor Vgl. A.1.16

4 Ergebnisse

des Referenzpyranometer F_R nicht angepasst werden (bspw. durch die Temperaturreaktion).¹⁵ Anschließend wurde zu jeder der 5 Messreihen die Summe der Referenzpyranometerspannungen gebildet (im folgenden $\sum_{i=1}^n V_R(ij)$) und ins Verhältnis zu der Summe der Referenzpyranometerspannungen ($V_F(ij)$) gesetzt und mit dem Kalibrierfaktor des Referenzpyranometers ($F_R = 5 \frac{W}{m^2}$ pro mV) multipliziert:

$$F(j) = \frac{F_R \sum_{i=1}^n V_R(ij)}{\sum_{i=1}^n V_F(ij)} \quad (4.16)$$

Danach wurde untersucht, ob es in dem Vektor von $F(ij)$ aus Glg. 4.15 Werte gibt, die um $\pm 2\%$ von $F(j)$ aus Glg. 4.16 abweichen. Für Werte aus $F(ij)$ konnte dies nicht festgestellt werden. Um Aussagen bzgl. der Stabilität der Messung zu treffen, wurde die Standardabweichung der 5 $F(ij)$ Werte-Vektoren bestimmt. Die Abweichung lag maximal bei $0,028 \frac{W}{m^2}$ pro mV. Die Temperaturen des Referenzpyranometers und des zu kalibrierenden Pyranometers lagen beide vor und nach der Messung bei etwa $40^\circ C$. Die Temperatur der Innenseite der Ulbrichtkugel lag bei ca. $30^\circ C$. Es waren folglich keine große Temperaturschwankung vorhanden. Da das Referenzpyranometer und das zu kalibrierende Pyranometer dieselbe Temperaturreaktion besitzen, wurde kein Temperatur korrigierter Final Kalibrierungsfaktor berechnet.¹⁶ Der finale Kalibrierfaktor wurde bestimmt, indem aus den fünf $F(j)$ Mittelwerten, der Gesamtmittelwert bestimmt wurde.

$$F = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m F(j) \quad (4.17)$$

So ergab sich ein Kalibrierfaktor von $5,501 \frac{W}{m^2}$ pro mV für das unkalibrierte Pyranometer. Im Vergleich dazu war der Kalibrierfaktor des Referenzpyranometer bei $5 \frac{W}{m^2}$ pro mV. Also gibt das unkalibrierte Pyranometer bei gleicher Bestrahlung eine niedrigere Spannung als das Referenzpyranometer aus. Abschließend ist noch zu erwähnen, dass nach der ISO für da korrekte Einhalten der Richtlinien und explizit für das Messen von 5mal etwa 8min (in dieser Arbeit 7:30min) eine Messgenauigkeit von 0,25% Prozent und Messunsicherheit von 0,25% allgemein angenommen werden darf. In dieser Arbeit sei aber angemerkt, dass die Anforderungen bzgl. des Messgerätes nicht eingehalten werden konnten (beschrieben in der Durchführung).¹⁷

4.7 Ergebnis der Shunt-Widerstände Untersuchung

	Batterie 0, 12Ω	Wind - 0, 15Ω	PV - 0, 03Ω	Wechselrichter - 0, 03Ω	Netzteil - 0, 03Ω
1A	12mV	15mV	30mV	30mV	30mV
3A	36mV	45mV	90mV	90mV	90mV
5A	60mV	75mV	149V	150mV	149mV

Tabelle 4.7: SHUNT Widerstände - Kalibrierung

¹⁵Vgl. [ISO92] S.5

¹⁶Vgl. [ISO92] S.5

¹⁷Vgl. [ISO92] S.4

4.7 Ergebnis der Shunt-Widerstände Untersuchung

Bei der Shunt Widerständen Kalibrierung wurde festgestellt, dass sie ihre Funktion ordentlich erfüllen. Die Spannungen, die über ihnen abfallen, entsprechen dem Ideal. Es wird keine genauere Kalibrierung benötigt.

5 Zusammenfassung

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass jede Komponente der Messtechnik erfolgreich kalibriert worden ist. So lag der Fokus bei der Kalibrierung von den Messsensoren darauf, sie nach bestehenden Normen zu kalibrieren, welches bis auf ein paar Unregelmäßigkeiten geglückt ist. In dieser Arbeit konnte grundlegend festgestellt werden, dass die Wartung der Messtechnik der Inselanlage ein notwendiger Schritt war, da die Messabweichungen vom wahren Wert der Messgröße ohne die Instandsetzung und Kalibrierung signifikant gewesen wären. So zeigte sich auch, dass man die Messtechnik komponentenweise (also aufgeteilt in Messsensoren und Messgerät) kalibrieren sollte, da sich sonst die Messabweichungen, bedingt durch den unkalibrierten Zustand, nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz im Worst Case addieren. Abschließend ist zu erwähnen, dass man definierte Wartungsintervalle speziell für die Messtechnik der Inselanlage vereinbaren sollte, um stets den Ist-Zustand der Inselanlage durch die elektrischen Messungen richtig zu bestimmen.

6 Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wird noch die Übertragungsstreckenplatine mit einem zusätzlichen Lack besprüht, um sie besser vor Korrosion und Feuchtigkeit zu schützen. Zusätzlich werden alle ungecrimpten Leitungen gecrimpt und es wird die Inselanlage, mitsamt der nun neu kalibrierten Messanlage, nach längerer Zeit wieder in Betrieb genommen.

Speziell kann die Messanlage noch auf Elektromagnetische Verträglichkeit untersucht werden. Außerdem kann untersucht werden, ob die 24V-30V Gleichspannung von der Batterie einen Einfluss auf die Übertragungstreckenplatine ausübt, da sie direkt an dieser über die VOLDI Übertragungstrecke angeschlossen ist. Da nun alle Messsensoren kalibriert worden sind, können die Wirkungsgrade der Energiequellen der Inselanlage bestimmt werden, in dem die erzielte Leistung der Energiequellen in Bezug zu den gemessenen meteorologischen Größen gesetzt wird.

Literaturverzeichnis

- [Ard] ARDUINO: *Arduino Reference*. <https://www.arduino.cc/reference/en/>, Abruf: 20.02.2023
- [Deu18] DEUTSCHER KALIBRIERDIENST: *Richtlinie DKD-R 5-1 Kalibrierung von Widerstandsthermometern*. <https://oar.ptb.de/resources/show/10.7795/550.20180828AC>. Version: September 2018, Abruf: 20.11.2022
- [DIN17] *Windenergieanlagen Teil 12-1: Messung des Leistungsverhaltens von Windenergieanlagen (IEC 61400-12-1:2017); Deutsche Fassung EN 61400-12-1:201*. 2017 (DIN EN 61400-12-1 (VDE 0127-12-1):2017-12)
- [Doh14] DOHLUS, Rainer: *Lichtquellen*. De Gruyter, 2014. – ISBN 9783110351422
- [Ene10] ENERGIESEMINAR WINTERSEMESTER 2009/2010: *Stromerzeugung aus Wind Sonne Bau eines Inselsystems aus Wind- und Sonnenenergie*. Februar 2010
- [Ene18] ENERGIESEMINAR WINTERSEMESTER 2017/2018: *Abschlussbericht zum Energieseminar Insel fitness - caution electrifying Wintersemester 2017/18*. Februar 2018
- [Fra22] FRAUNHOFER INSTITUTE FOR SOLAR ENERGY SYSTEMS: *PHOTOVOLTAICS REPORT*. <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>. Version: September 2022, Abruf: 20.11.2022
- [Gab18] GABLER WIRTSCHAFTSLEXIKON: *Amortisation Begriffsdefinition*. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/amortisation-30226>. Version: Februar 2018, Abruf: 20.11.2022
- [ISO92] *Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer*. 1992 (ISO 9847:1992-07)
- [Kis23] *Sampling rate and aliasing effect*. <https://www.kistler.com/DE/en/sampling-rate-and-aliasing-effect/C00000151>. Version: 2023, Abruf: 20.02.2023
- [Mata] MATLAB: *Matlab - corrcoeff Funktionsbeschreibung*. https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/corrcoef.html?searchHighlight=corrcoef&s_tid=srchttitle_corrcoef_1, Abruf: 20.02.2023
- [Matb] MATLAB: *Matlab polyfit Funktionsbeschreibung*. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>, Abruf: 20.02.2023

- [Mic] MICROCHIP: *ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V Datasheet*. <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/0TH/ProductDocuments/DataSheets/ATmega640-1280-1281-2560-2561-Datasheet-DS40002211A.pdf>, Abruf: 20.11.2022
- [Mü20] MÜHL, Thomas: *Elektrische Messtechnik Grundlagen, Messverfahren, Anwendungen*. 6. Springer, 2020. – ISBN 978-3-658-29116-7
- [RW11] ROLAND WOITOWITZ, Winfried G. Klaus Urbanski U. Klaus Urbanski: *Digitaltechnik Ein Lehr- und Übungsbuch*. 6. Springer, 2011. – ISBN 978-3-642-20872-0
- [Sta22a] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Pressemitteilung Nr. 460 vom 31. Oktober 2022*. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/10/PD22_460_61243.html. Version: Oktober 2022, Abruf: 20.11.2022
- [Sta22b] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Pressemitteilung Nr. N 037 vom 21. Juni 2022*. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/06/PD22_N037_43.html. Version: Juni 2022, Abruf: 20.11.2022
- [Thi23a] THIES CLIMA: *Anemometer – compact Bedienungsanleitung*. https://www.thiesclima.com/db/dnl/4.3519.xx.140-961_WG-compact_analog_de.pdf. Version: 2023, Abruf: 20.02.2023
- [Thi23b] THIES CLIMA: *Windrichtungsgeber – compact Bedienungsanleitung*. https://www.thiesclima.com/db/dnl/4.3129.0x.140-941_Wind-Direction-Transmitter-compact_analogue_deu.pdf. Version: 2023, Abruf: 20.02.2023
- [Ton16] TONI TRESS: *Entwicklung und Implementierung einer Messeinrichtung für ein elektrisches aus erneuerbaren Energien gespeistes Inselsystem auf Grundlage von Open-Source Projekten*. September 2016
- [UK08] UWE KIENCKE, Ralf E.: *Messtechnik - Systemtheorie für Elektrotechniker*. 7. Springer, 2008. – ISBN 9783540784296
- [VDI18] *Umweltmeteorologie Meteorologische Messungen Wind*. 2018 (VDI 3786:2018-05)
- [VDI20] *Instandhaltung von PV-Anlagen (Fotovoltaikanlagen) Grundlagen*. 2020 (VDI 2883:2020-01)
- [Zas13] ZASTROW, Dieter: *Elektronik Ein Grundlagenlehrbuch für Analogtechnik, Digitaltechnik und Leistungselektronik*. 6. Vieweg, 2013. – ISBN 978-3-663-01107-1

A Anhang

A.1 Datenblätter

A.1.1 Thies - Anemometer



WIND-MESSTECHNIK

Windgeber compact

Bestellnummer: 4.3519.00.xxx

Messwertgeber zur Messung der horizontalen Windgeschwindigkeit mit Analogausgang . Geeignet für Datalogger. Der Schalenstern besteht aus Kunststoff, das Gehäuse aus eloxiertem Aluminium und Kunststoff. Zur Montage hat das Gerät einen Gewindezapfen Pg 21 mit 2 Muttern.



Technische Daten

Bestellnummer: 4.3519.00.xxx

Windgeschwindigkeit

Messbereich	siehe Varianten
Auflösung	0,1 m/s
Genauigkeit	±3 % vom Messwert oder ± 0,5 m/s

Betriebsspannung

Stromaufnahme	50 mA
Heizung	24 V AC/DC, max 20 W

Allgemein

Umgebungstemp.	-40 ... +70 °C
Elektrischer Anschluss	12 m cable, LiyCY 5 x 0,25 mm ²
Schutzklasse	IP 55

Varianten

wie 4.3519.00.xxx, jedoch:

Artikelnummer 4.3519.00.140

Windgeschwindigkeit

Messbereich	0,5 ... 50 m/s
-------------	----------------

A Anhang



Datenausgabe analog

Windgeschwindigkeit	0 ... 20 mA
Current output	max. 500

Betriebsspannung

Elektronik	13 ... 30 V DC or 24 V AC
------------	------------------------------

Allgemein

Elektrischer Anschluss	12 m cable, LiyCY 5 x 0,25 mm ²
Abmessungen	Ø 135 x 165 mm
Gewicht	0,75 kg

Artikelnummer 4.3519.00.141

Windgeschwindigkeit

Messbereich	0,5 ... 50 m/s
-------------	----------------

Datenausgabe analog

Windgeschwindigkeit	4 ... 20 mA
Current output	max. 500

Betriebsspannung

Elektronik	13 ... 30 V DC or 24 V AC
------------	------------------------------

Allgemein

Elektrischer Anschluss	12 m cable, LiyCY 5 x 0,25 mm ²
Abmessungen	Ø 135 x 165 mm
Gewicht	0,75 kg

Artikelnummer 4.3519.00.161

Windgeschwindigkeit

Messbereich	0,5 ... 50 m/s
-------------	----------------

Datenausgabe analog

Windgeschwindigkeit	0 ... 10 V
Current output	min. 1 k

Betriebsspannung

Elektronik	13 ... 30 V DC or 24 V AC
------------	------------------------------

A.1.2 Shunt - Widerstände Weigel

Anwendung

Nebenwiderstände (Shunts) werden zur Messung von Gleichströmen verwendet, speziell bei hohen Stromstärken. Am Nebenwiderstand fällt eine dem Strom proportionale Spannung ab, die dann z.B. mit einem Drehspulinstrument angezeigt werden kann.

Die Nebenwiderstände werden in Klasse 0,5 nach DIN 43 703 gefertigt mit Nennströmen im Bereich von 1 A bis 15.000 A und einem Spannungsabfall von 60 mV oder 150 mV, auf Wunsch auch mit abweichendem Spannungsabfall und/oder Nennstrom.

Abhängig vom Nennstrom werden die Nebenwiderstände in drei verschiedenen Bauformen ausgeführt.

Funktionsprinzip

Der den Nebenwiderstand durchfließende Strom erzeugt einen Spannungsabfall, der mit einem parallel geschalteten Meßgerät gemessen wird.

Nebenwiderstände werden so abgeglichen, daß beim Nennstrom eine genau definierte Spannung (z.B. 60 mV, 150 mV) abfällt.

Allg. Technische Daten

Bauform A	mit Isoliersockel für Normschienen- oder Wandmontage (bis 25 A / 60, 100, 150 oder 300 mV); ohne Isoliersockel (30 ... 150 A)
Bauform B	L-Profil
Bauform C	T-Profil
Material	Manganin
Widerstandsstäbe	
Anschlußstücke	
Bauform A	Messing
Bauform B/C	Kupfer
Sockelmaterial	Lexan, schwarz
Bauform A	selbstverlöschend nach UL 94 V-0
Anschlüsse	Gewindeschrauben
Strom	siehe Maßbilder
Spannung	M5x8
Befestigung	Schraubbefestigung (max M8) oder Schnappbefestigung auf Tragschiene nach DIN EN 50 022 – 35
Bauform A	
Schutzart	IP 00
Abmessungen	siehe Maßbilder
Gewicht	siehe Tabelle
Nennstrom ♦	Gewicht ca. für Nennspannungsabfall ♦ 60 mV 100 mV ¹⁾ 150 mV 300 mV ¹⁾
1 A	0,12 kg
1,5 A	0,13 kg
2 A ¹⁾ 2)	0,13 kg
2,5 A	0,12 kg
3 A ¹⁾ 2)	0,12 kg
4 A	0,13 kg
5 A ¹⁾ 2)	0,12 kg
6 A	0,12 kg
8 A ¹⁾ 2)	0,13 kg
10 A	0,13 kg
12 A ¹⁾ 2)	0,13 kg
15 A	0,13 kg
20 A ¹⁾ 2)	0,13 kg
25 A	0,13 kg
30 A ¹⁾ 2)	0,12 kg
40 A	0,12 kg
50 A ¹⁾ 2)	0,12 kg

♦ siehe auch Sonderausführungen

Nennstrom ♦	Gewicht ca. für Nennspannungsabfall ♦			
	60 mV	100 mV ¹⁾	150 mV	300 mV ¹⁾
60 A	0,12 kg	0,14 kg	0,17 kg	0,20 kg
80 A ¹⁾ 2)	0,12 kg	0,15 kg	0,18 kg	0,20 kg
100 A	0,12 kg	0,17 kg	0,20 kg	0,25 kg
150 A	0,13 kg	0,20 kg	0,23 kg	0,30 kg
200 A ¹⁾ 2)	0,13 kg	0,23 kg	0,26 kg	0,40 kg
250 A	0,61 kg	0,65 kg	0,68 kg	0,80 kg
300 A ¹⁾ 2)	0,61 kg	0,68 kg	0,72 kg	0,90 kg
400 A	0,83 kg	1,00 kg	1,05 kg	1,30 kg
500 A ¹⁾ 2)	0,83 kg	1,10 kg	1,15 kg	1,40 kg
600 A	0,85 kg	1,11 kg	1,16 kg	1,60 kg
800 A ¹⁾ 3)	0,90 kg	1,12 kg	1,30 kg	1,80 kg
1.000 A	1,45 kg	2,00 kg	2,15 kg	2,8 kg
1.200 A ¹⁾ 2)	1,45 kg	2,10 kg	2,25 kg	3,1 kg
1.500 A	1,96 kg	2,5 kg	3,1 kg	3,7 kg
2.000 A ¹⁾ 3)	2,3 kg	2,8 kg	4,0 kg	4,4 kg
2.500 A	2,9 kg	3,2 kg	5,2 kg	6,0 kg
3.000 A ¹⁾ 3)	3,0 kg	3,5 kg	7,0 kg	6,9 kg
4.000 A	4,25 kg	5,8 kg	8,3 kg	13,1 kg
5.000 A ¹⁾ 3)	4,3 kg	7,3 kg	10,6 kg	13,9 kg
6.000 A	10,5 kg	12,0 kg	15,0 kg	17,7 kg
8.000 A ¹⁾ 3)	12,0 kg	—	25,0 kg	—
10.000 A	21,0 kg	—	28,0 kg	—
15.000 A	32,0 kg	—	—	—
20.000 A ¹⁾	44,0 kg	—	—	—

1) außerhalb der DIN – Reihe

2) Maße wie nächsthöherer Nennstrom

3) Maße wie nächstkleinerer Nennstrom

Überlastgrenze (nach DIN EN 60 051)

dauernd 1,2-fach

max. 5s 5-fach

>2.000 ... 10.000 A 2-fach

Umgebungstemperatur 23 °C ± 1K

Umgebungsverhalten

Klimaeignung	Klimaklasse 3 nach VDE/VDI 3540
Arbeits – temperaturbereich	-10 ... +55 °C
Lager – temperaturbereich	-25 ... +65 °C
Relative Luftfeuchte	≤ 75% im Jahresmittel, keine Betauung

Vorschriften

DIN 43 703	Nebenwiderstände
DIN EN 60 051	Direkt wirkende anzeigen elektrische Meßgeräte und ihr Zubehör
DIN EN 50 022	Tragschienen

Sonderausführungen

Nennspannungsabfall	nach Angabe
Nennstrom	nach Angabe
Genaugigkeit	Klasse 0,2
Isoliersockel	für Nebenwiderstände 30 ... 200 A / 60 mV, für andere auf Anfrage

Nebenwiderstände
nach Kundenwunsch

Quelle: https://www.weigel-messgeraete.de/wp-content/uploads/2020/02/09-02-01_SHUNTS_d.pdf - Abrufdatum: 02.03.2023

A.1.3 Thies - Windrichtungsgeber



WIND-MESSTECHNIK Windrichtungsgeber Compact

Bestellnummer: 4.3129.60.xxx

Messwertgeber zur Messung der horizontalen Windrichtung, mit digitalem oder analogem Ausgangssignal. Die Windfahne besteht aus glasfaserverstärktem Kunststoff, das Gehäuse aus eloxiertem Aluminium und Kunststoff.

Zur Montage hat das Gerät einen Gewindezapfen PG 21 mit 2 Muttern.



Technische Daten

Bestellnummer: 4.3129.60.xxx

Windrichtung

Messbereich	0 ... 360 °
Auflösung	0,4 °
Genauigkeit	±2 °

Betriebsspannung

Elektronik	8 ... 30 V DC oder 24 V AC
Heizung	24 V AC/DC, max 20 W

Allgemein

Umgebungstemp.	-30 ... +70 °C
Elektrischer Anschluss	12 m Kabel LiYCY 6 x 0,25 mm²
Schutzklasse	IP 55

Varianten

wie 4.3129.60.xxx, jedoch:

Artikelnummer 4.3129.60.140

Datenausgabe analog



Wind direction	0 ... 20 mA (Bürde max. 500 Ω)
Betriebsspannung	
Elektronik	> 12 V DC or 24 V AC
Allgemein	
Elektrischer Anschluss	12 m Kabel LiYCY 6 x 0,25 mm ²
Abmessungen	Ø 330 x 220 mm
Gewicht	1,1 kg

Artikelnummer 4.3129.60.141**Datenausgabe analog**

Wind direction	4 ... 20 mA (Bürde max. 500 Ω)
Betriebsspannung	
Elektronik	> 12 V DC or 24 V AC
Allgemein	
Elektrischer Anschluss	12 m Kabel LiYCY 6 x 0,25 mm ²
Abmessungen	Ø 330 x 220 mm
Gewicht	1,1 kg

Artikelnummer 4.3129.60.161**Datenausgabe analog**

Wind direction	0 ... 10 V
Spannungsausgang	min. 1000
Betriebsspannung	
Elektronik	> 12 V DC or 24 V AC
Allgemein	
Elektrischer Anschluss	12 m Kabel LiYCY 6 x 0,25 mm ²
Abmessungen	Ø 330 x 220 mm
Gewicht	1,1 kg

Artikelnummer 4.3129.60.167**Datenausgabe analog**

Wind direction	0 ... 2 V
Spannungsausgang	min. 1000

A.1.4 TMP36 - Temperatursensor


**ANALOG
DEVICES**

Low Voltage Temperature Sensors

Data Sheet
TMP35/TMP36/TMP37

FEATURES

- Low voltage operation (2.7 V to 5.5 V)
- Calibrated directly in °C
- 10 mV/°C scale factor (20 mV/°C on **TMP37**)
- ±2°C accuracy over temperature (typ)
- ±0.5°C linearity (typ)
- Stable with large capacitive loads
- Specified -40°C to +125°C, operation to +150°C
- Less than 50 µA quiescent current
- Shutdown current 0.5 µA max
- Low self-heating
- Qualified for automotive applications

APPLICATIONS

- Environmental control systems
- Thermal protection
- Industrial process control
- Fire alarms
- Power system monitors
- CPU thermal management

GENERAL DESCRIPTION

The **TMP35/TMP36/TMP37** are low voltage, precision centigrade temperature sensors. They provide a voltage output that is linearly proportional to the Celsius (centigrade) temperature. The **TMP35/TMP36/TMP37** do not require any external calibration to provide typical accuracies of ±1°C at +25°C and ±2°C over the -40°C to +125°C temperature range.

The low output impedance of the **TMP35/TMP36/TMP37** and its linear output and precise calibration simplify interfacing to temperature control circuitry and ADCs. All three devices are intended for single-supply operation from 2.7 V to 5.5 V maximum. The supply current runs well below 50 µA, providing very low self-heating—less than 0.1°C in still air. In addition, a shutdown function is provided to cut the supply current to less than 0.5 µA.

The **TMP35** is functionally compatible with the LM35/LM45 and provides a 250 mV output at 25°C. The **TMP35** reads temperatures from 10°C to 125°C. The **TMP36** is specified from -40°C to +125°C, provides a 750 mV output at 25°C, and operates to 125°C from a single 2.7 V supply. The **TMP36** is functionally compatible with the LM50. Both the **TMP35** and **TMP36** have an output scale factor of 10 mV/°C.

FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM

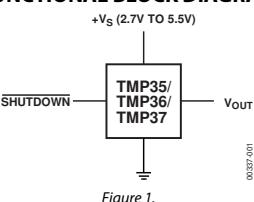


Figure 1.

PIN CONFIGURATIONS

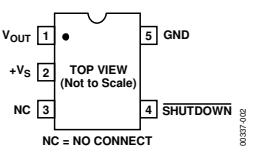


Figure 2. RJ-5 (SOT-23)

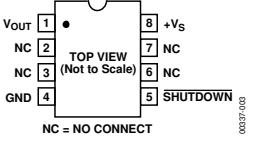


Figure 3. R-8 (SOIC_N)

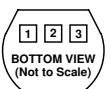


Figure 4. T-3 (TO-92)

Rev. H

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

Document Feedback

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 ©1996–2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.
www.analog.com

Quelle: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/TMP35_36_37.pdf- Abrufdatum: 02.03.2023

Data Sheet

TMP35/TMP36/TMP37

SPECIFICATIONS

$V_S = 2.7 \text{ V to } 5.5 \text{ V}$, $-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.

Table 1.

Parameter ¹	Symbol	Test Conditions/Comments	Min	Typ	Max	Unit
ACCURACY						
TMP35/TMP36/TMP37 (F Grade)		$T_A = 25^\circ\text{C}$		± 1	± 2	$^\circ\text{C}$
TMP35/TMP36/TMP37 (G Grade)		$T_A = 25^\circ\text{C}$		± 1	± 3	$^\circ\text{C}$
TMP35/TMP36/TMP37 (F Grade)		Over rated temperature		± 2	± 3	$^\circ\text{C}$
TMP35/TMP36/TMP37 (G Grade)		Over rated temperature		± 2	± 4	$^\circ\text{C}$
Scale Factor, TMP35		$10^\circ\text{C} \leq T_A \leq 125^\circ\text{C}$	10			$\text{mV}/^\circ\text{C}$
Scale Factor, TMP36		$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$	10			$\text{mV}/^\circ\text{C}$
Scale Factor, TMP37		$5^\circ\text{C} \leq T_A \leq 85^\circ\text{C}$	20			$\text{mV}/^\circ\text{C}$
		$5^\circ\text{C} \leq T_A \leq 100^\circ\text{C}$	20			$\text{mV}/^\circ\text{C}$
		$3.0 \text{ V} \leq V_S \leq 5.5 \text{ V}$				
Load Regulation		$0 \mu\text{A} \leq I_L \leq 50 \mu\text{A}$		6	20	$\text{m}^\circ\text{C}/\mu\text{A}$
		$-40^\circ\text{C} \leq T_A \leq +105^\circ\text{C}$		25	60	$\text{m}^\circ\text{C}/\mu\text{A}$
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$-105^\circ\text{C} \leq T_A \leq +125^\circ\text{C}$		30	100	$\text{m}^\circ\text{C}/\text{V}$
Linearity		$T_A = 25^\circ\text{C}$		50		$\text{m}^\circ\text{C}/\text{V}$
Long-Term Stability		$3.0 \text{ V} \leq V_S \leq 5.5 \text{ V}$		0.5		$^\circ\text{C}$
		$T_A = 150^\circ\text{C}$ for 1000 hours		0.4		$^\circ\text{C}$
SHUTDOWN						
Logic High Input Voltage	V_{IH}	$V_S = 2.7 \text{ V}$	1.8			V
Logic Low Input Voltage	V_{IL}	$V_S = 5.5 \text{ V}$			400	mV
OUTPUT						
TMP35 Output Voltage		$T_A = 25^\circ\text{C}$		250		mV
TMP36 Output Voltage		$T_A = 25^\circ\text{C}$		750		mV
TMP37 Output Voltage		$T_A = 25^\circ\text{C}$		500		mV
Output Voltage Range			100		2000	mV
Output Load Current	I_L		0		50	μA
Short-Circuit Current	I_{SC}	Note 2			250	μA
Capacitive Load Driving	C_L	No oscillations ²	1000		10000	pF
Device Turn-On Time		Output within $\pm 1^\circ\text{C}$, $100 \text{ k}\Omega 100 \text{ pF}$ load ²	0.5		1	ms
POWER SUPPLY						
Supply Range	V_S		2.7		5.5	V
Supply Current	$I_{SY}(\text{ON})$	Unloaded			50	μA
Supply Current (Shutdown)	$I_{SY}(\text{OFF})$	Unloaded		0.01	0.5	μA

¹ Does not consider errors caused by self-heating.

² Guaranteed but not tested.

TMP35/TMP36/TMP37

Data Sheet

FUNCTIONAL DESCRIPTION

An equivalent circuit for the TMP35/TMP36/TMP37 micropower, centigrade temperature sensors is shown in Figure 22. The core of the temperature sensor is a band gap core that comprises transistors Q1 and Q2, biased by Q3 to approximately 8 µA. The band gap core operates both Q1 and Q2 at the same collector current level; however, because the emitter area of Q1 is 10 times that of Q2, the V_{BE} of Q1 and the V_{BE} of Q2 are not equal by the following relationship:

$$\Delta V_{BE} = V_T \times \ln\left(\frac{A_{E,Q1}}{A_{E,Q2}}\right)$$

Resistors R1 and R2 are used to scale this result to produce the output voltage transfer characteristic of each temperature sensor and, simultaneously, R2 and R3 are used to scale the V_{BE} of Q1 as an offset term in V_{OUT} . Table 4 summarizes the differences in the output characteristics of the three temperature sensors.

The output voltage of the temperature sensor is available at the emitter of Q4, which buffers the band gap core and provides load current drive. The current gain of Q4, working with the available base current drive from the previous stage, sets the short-circuit current limit of these devices to 250 µA.

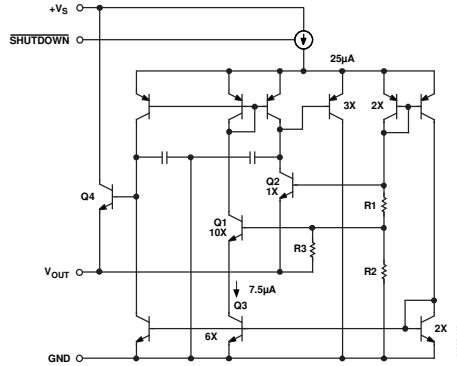


Figure 22. Temperature Sensor Simplified Equivalent Circuit

Table 4. TMP35/TMP36/TMP37 Output Characteristics

Sensor	Offset Voltage (V)	Output Voltage Scaling (mV/°C)	Output Voltage at 25°C (mV)
TMP35	0	10	250
TMP36	0.5	10	750
TMP37	0	20	500

A.1.5 CS300 - Pyranometer



Accurate and Dependable

Ideal for long-term deployment
in harsh conditions

Overview

The CS300, manufactured by Apogee Instruments, measures total sun and sky solar radiation for solar, agricultural, meteorological, and hydrological applications. Its spectral range of 360 to 1120 nanometers encompasses most of the

shortwave radiation that reaches the Earth's surface. This pyranometer connects directly to our dataloggers. Its output can be measured by all of our dataloggers.

Benefits and Features

- Compatible with most Campbell Scientific data loggers
- Designed for continuous, long-term, unattended operation in adverse conditions
- Measurement waveband of 360 to 1120 nm
- Dome-shaped head prevents water from accumulating on the sensor head

Technical Description

The CS300 uses a silicon photovoltaic detector mounted in a cosine-corrected head to provide solar radiation measurements for solar, agricultural, meteorological, and hydrological applications. Calibrated against a Kipp & Zonen CM21 thermopile pyranometer, the CS300 accurately measures sun plus sky radiation for the spectral range of 360

to 1120 nm. Sensors calibrated to this spectral range should not be used under vegetation or artificial lights.

The standard output is 0.2 mV per W m^{-2} , which provides a signal of 200 mV in full sunlight (1000 W m^{-2}). All of our dataloggers, including the CR200(X) series, can measure this output.

Specifications

Spectral Range	360 to 1120 nm (wavelengths where response is 10% of maximum)
Measurement Range	0 to 2000 W/m^2 (full sunlight $\approx 1000 \text{ W/m}^2$)
Absolute Accuracy	$\pm 5\%$ for daily total radiation

Sensitivity	5 mV/Wm^{-2}
Calibration Factor	5 $\text{W/m}^2/\text{mV}$
Cosine Correction Error	$\pm 5\%$ at 75° zenith angle; $\pm 2\%$ at 45° zenith angle
Temperature Response	$0.04 \pm 0.04\%$ per $^{\circ}\text{C}$

For comprehensive details, visit: www.campbellsci.eu/cs300-pyranometer

Quelle: https://s.campbellsci.com/documents/eu/product-brochures/b_cs300.pdf - Ab-rufdatum: 02.03.2023

A Anhang

Response Time	< 1 ms	Output Sensitivity	0.2 mV/W/m ²
Long-Term Stability	< 2% per year	Diameter	2.4 cm (0.9 in.)
Operating Temperature Range	-40° to +70°C	Height	2.5 cm (1.0 in.)
Relative Humidity Range	0 to 100%	Weight	65 g (2.3 oz) with 2-m (6.6-ft) lead wire



**CAMPBELL
SCIENTIFIC**

80 Hathern Road, Shepshed, LE12 9GX UK | +(0)1509 828888 | sale@campbellsci.co.uk | www.campbellsci.eu
AUSTRALIA | BRAZIL | CANADA | CHINA | COSTA RICA | FRANCE | GERMANY | INDIA | SOUTH AFRICA | SPAIN | THAILAND | UK | USA

© 2020 Campbell Scientific, Ltd. | 07/28/2020

For comprehensive details, visit: www.campbellsci.eu/cs300-pyranometer

Quelle: https://s.campbellsci.com/documents/eu/product-brochures/b_cs300.pdf - Ab-rufdatum: 02.03.2023

A.1.6 UNI-T UT139C Multimeter

Technische Daten

Allgemein

- Betriebsspannung: 3 V_{DC}
- Batterien: 2x Mignon (AA)
- Überspannungskategorie: CAT III 600 V
- Schutzklasse: II
- Display: 6000 Zähleinheiten (Counts)
Bei Frequenz- und Kapazitätsmessung 9999 Zähleinheiten
- Messgeschwindigkeit: 2...3 Messungen/Sekunde
- Feinsicherungen: F1: FF 0,6 A H 600 V, 6x32 mm (øxL) (mA/µA-Bereich)
F2: F 10 A H 600 V, 6x25 mm (øxL) (A-Bereich)
- Automatische Abschaltung: 15 Minuten
- Betriebstemperatur: 0...40 °C
- Lagerungstemperatur: -10...50 °C
- Betriebsluftfeuchtigkeit: ≤ 75 % RH (0...30 °C), ≤ 50 % RH (30...40 °C)
- Maße (LxBxH): 175x80x45 mm
- Gewicht: ca. 350 g (inkl. Batterien)

Messbereiche

Die nachfolgenden Werte gelten bei einer Betriebstemperatur von 23 °C ± 5 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von ≤ 75 %.

1. Gleichspannung (DC)

Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
60,00 mV	0,01 mV	± (0,5 % + 2 Digits)
600,0 mV	0,1 mV	
6,000 V	0,001 V	± (0,7 % + 3 Digits)
60,00 V	0,01 V	
600,0 V	0,1 V	
600 V	1 V	

Max. Eingangsspannung: ± 600 V_{DC}

Eingangsimpedanz: 10 MΩ

2. Wechselspannung (AC)

Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
60,00 mV	0,01 mV	± (1,0 % + 3 Digits)
600,0 mV	0,1 mV	
6,000 V	0,001 V	± (0,8 % + 3 Digits)
60,00 V	0,01 V	
600,0 V	0,1 V	
600 V	1 V	
V.F.C. 200...600 V	0,1/1 V	± (4,0 % + 3 Digits)

Max. Eingangsspannung 600 V_{AC}

Eingangsimpedanz: 10 MΩ

Frequenzbereich: 45 Hz...1 kHz (V.F.C.: 45...400 Hz)

A Anhang

Spannungsbereich (Frequenzmessung):
 0...100 kHz: 0,1...30 V~
 100 kHz...1 MHz: 0,2...30 V~
 1...5 MHz: 0,5...30 V~
 5...10 MHz: 0,9...30 V~
 Frequenzbereich (Tastgradmessung): 0...100 kHz
 Spannungsbereich (Tastgradmessung): 0...60 V==

7. Temperaturmessung

Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
-40...0 °C / -40...32 °F	1 °C / 1 °F	± 3 Digits / ± 5 Digits
1...100 °C / 33...212 °F		± (1,0 % + 3 Digits) / ± (1,5 % + 5 Digits)
101...1000 °C / 213...1832 °F		± (2,0 % + 3 Digits) / ± (2,5 % + 5 Digits)

Eingangssicherung: 600 V (PTC)

8. Gleichstrommessung (DC)

Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
600,0 µA	0,1 µA	± (0,7 % + 2 Digits)
6000 µA	1 µA	
60,00 mA	0,01 mA	
600,0 mA	0,1 mA	
6,000 A	0,001 A	
10,00 A	0,01 A	

9. Wechselstrommessung (AC)

Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
600,0 µA	0,1 µA	± (1,0 % + 3 Digits)
6000 µA	1 µA	
60,00 mA	0,01 mA	
600,0 mA	0,1 mA	
6,000 A	0,001 A	
60,00 A	0,01 A	

Frequenzbereich: 45 Hz...1 kHz

10. Strommessung über Messzange

Messbereich	Auflösung	Genauigkeit
60 A ==		
60 A~	0,01 A	± 5 %

A.1.7 Analog Discovery 2

Analog Inputs

- Channels: 2
- Channel type: differential
- Resolution: 14-bit
- Absolute Resolution (scale $\leq 0.5V/div$): 0.32mV
- Absolute Resolution (scale $\geq 1V/div$): 3.58mV
- Accuracy (scale $\leq 0.5V/div$, $V_{inCM} = 0V$): $\pm 10mV \pm 0.5\%$
- Accuracy (scale $\geq 1V/div$, $V_{inCM} = 0V$): $\pm 100mV \pm 0.5\%$
- CMMR (typical): $\pm 0.5\%$
- Sample rate (real time): 100 MS/s
- Input impedance: $1M\Omega || 24pF$
- Scope scales: 500uV to 5V/div
- Analog bandwidth with Discovery BNC adapter: 30+ MHz @ 3dB, 10 MHz @ 0.5dB, 5 MHz @ 0.1dB
- Analog bandwidth with included flywires: 9 MHz @ 3dB, 2.9 MHz @ 0.5dB, 0.8 MHz @ 0.1dB
- Input range: $\pm 25V$ ($\pm 50V$ diff)
- Input protected to: $\pm 50V$
- Buffer size/channel: Up to 16k samples
- Triggering: edge, pulse, transition, hysteresis, etc.
- Cross-triggering with Logic Analyzer, Waveform Generator, Pattern Generator, or external trigger
- Sampling modes: average, decimate, min/max
- Mixed signal visualization (analog and digital signals share same view pane)
- Real-time views: FFTs, XY plots, histograms, and other
- Multiple math channels with complex functions
- Cursors with advanced data measurements
- Captured data files can be exported in standard formats
- Scope configurations can be saved, exported, and imported

Arbitrary Waveform Generator

- Channels: 2
- Channel type: single ended
- Resolution: 14-bit
- Absolute Resolution (amplitude $\leq 1V$): 166 μ V
- Absolute Resolution (amplitude $> 1V$): 665 μ V
- Accuracy - typical ($|V_{out}| \leq 1V$): $\pm 10mV \pm 0.5\%$
- Accuracy - typical ($|V_{out}| > 1V$): $\pm 25mV \pm 0.5\%$
- Sample rate (real time): 100 MS/s
- AC amplitude (max): $\pm 5 V$
- DC Offset (max): $\pm 5 V$
- Analog bandwidth with Discovery BNC adapter: 12 MHz @ 3dB, 4 MHz @ 0.5dB, 1 MHz @ 0.1dB
- Analog bandwidth with included flywires: 9 MHz @ 3dB, 2.9 MHz @ 0.5dB, 0.8 MHz @ 0.1dB
- Slew rate (10V step): 400V/ μ s
- Buffer size/channel: up to 16k samples
- Standard waveforms: sine, triangle, sawtooth, etc.
- Advanced waveforms: Sweeps, AM, FM.
- User-defined arbitrary waveforms: defined within WaveForms software user interface or using standard tools (e.g. Excel)

Quelle: <https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/specifications> - Abrufdatum: 02.03.2023

A.1.8 Arduino Mega

Tech specs

Microcontroller	ATmega2560
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	54 (of which 15 provide PWM output)
Analog Input Pins	16
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	256 KB of which 8 KB used by bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	101.52 mm
Width	53.3 mm
Weight	37 g

Quelle: <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3> - Abrufdatum: 02.03.2023

A.1.9 Atmega 2560

31.8 ADC Characteristics – Preliminary Data

Table 31-9. ADC Characteristics, Singel Ended Channels

Symbol	Parameter	Condition	Min. (1)	Typ. (1)	Max. (1)	Units
	Resolution	Single Ended Conversion		10		Bits
	Absolute accuracy (Including INL, DNL, quantization error, gain and offset error)	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{CC} = 4V,$ $CLK_{ADC} = 200kHz$		2.25	2.5	LSB
		Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{CC} = 4V,$ $CLK_{ADC} = 1MHz$		3		
		Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{CC} = 4V,$ $CLK_{ADC} = 200kHz$ Noise Reduction Mode		2		
		Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{CC} = 4V,$ $CLK_{ADC} = 1MHz$ Noise Reduction Mode		3		
	Integral Non-Linearity (INL)	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{CC} = 4V,$ $CLK_{ADC} = 200kHz$		1.25		
	Differential Non-Linearity (DNL)	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{CC} = 4V,$ $CLK_{ADC} = 200kHz$		0.5		
	Gain Error	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{CC} = 4V,$ $CLK_{ADC} = 200kHz$		2		
	Offset Error	Single Ended Conversion $V_{REF} = 4V, V_{CC} = 4V,$ $CLK_{ADC} = 200kHz$		-2		
	Conversion Time	Free Running Conversion	13		260	μs
AVCC	Clock Frequency	Single Ended Conversion	50		1000	kHz
	Analog Supply Voltage		$V_{CC} - 0.3$		$V_{CC} + 0.3$	V
	V_{REF}	Reference Voltage	1.0		AVCC	
	V_{IN}	Input Voltage	GND		V_{REF}	
V _{INT1}	Input Bandwidth			38,5		kHz
	Internal Voltage Reference	1.1V	1.0	1.1	1.2	V
	V _{INT2}	Internal Voltage Reference	2.56V	2.4	2.56	
	R _{REF}	Reference Input Resistance			32	k Ω
R _{AIN}	Analog Input Resistance				100	M Ω

Note: 1. Values are guidelines only.

A.1.10 Windkanal - Oberschleißheim

Teilprozess DG1540 Kalibrierung Az: 03.19.02	Verfahrensanweisung 04 zum QM-Handbuch Kalibrierlaboratorien (QMH-KAL) DG1540 Kalibrierung	Deutscher Wetterdienst Wetter und Klima aus einer Hand 
--	--	---

1.1.2 Der Windkanal bei TI35

Hersteller:	Turbo Lufttechnik GmbH
Baujahr:	1974, Antrieb und Steuerung wurden 2010 erneuert
Maximalgeschwindigkeit:	62 m/s ohne Kalibiergegenstand
Durchmesser Düse:	1 m
Durchmesser Kollektor:	1,2 m
Form Düse und Kollektor:	rund
Pos. Gebläse und Motor:	in Strömungsrichtung kommt erst der Motor und dann das Gebläse, Strecke Gebläse – Düse ca. 23m
Kontraktionsverhältnis:	6 zu 1
Turbulenzgrad:	Im technischen Bericht wurde bei 50 ms^{-1} etwa eine Abweichung von 0.1 ms^{-1} ermittelt, was einer Abweichung von 0,2 % entspricht.
Flügelverstellung:	Einstellmöglichkeit nicht vorhanden
Länge der Messstrecke:	1,82 m



Quelle: DWD - Niederlassung München Oberschleißheim

Teilprozess
DG1540
Kalibrierung
Az: 03.19.02

Verfahrensanweisung 04
zum QM-Handbuch
Kalibrierlaboratorien (QMH-KAL)
DG1540 Kalibrierung

Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand

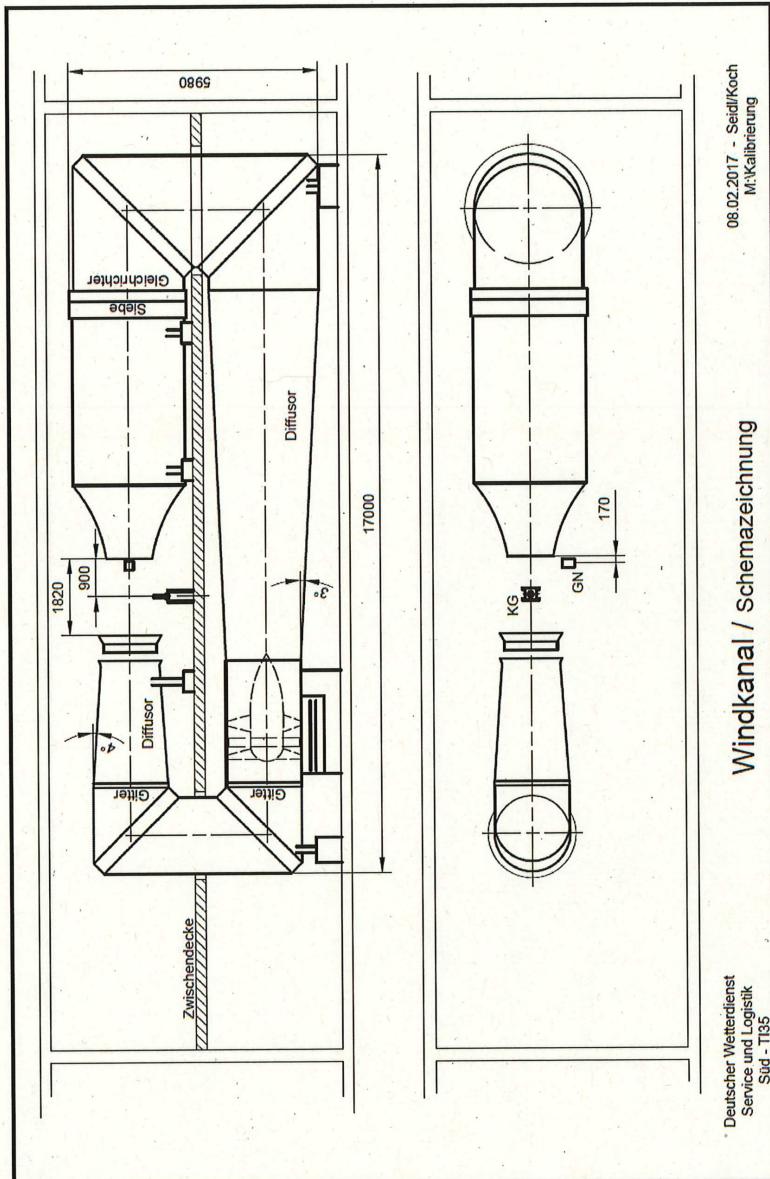


Abbildung 3: Zeichnung des Windkanals bei TI35



Quelle: DWD - Niederlassung München Oberschleißheim

A.1.11 Drehteller - OWIS

PRODUKTINFORMATION PRODUCT INFORMATION



DMT 200N

Drehmesstische Rotary Measuring Stages

9012.0308 / 11.04.2022

- verzugsarmes Aluminium
- reflexionsarm,
schwarz eloxiert
- Präzisions-Schrägkugellager
- vorgespanntes
Schneckengetriebe
- Drehteller mit Apertur
- Hall-Effekt oder mechanischer
Referenzschalter
- 2-Phasen-Schrittmotor oder
DC-Motor mit Encoder
- mit OWISid
- deformation-resistant
aluminium
- reflection-poor,
black anodized
- precision angular contact
ball bearings
- preloaded worm gear
- rotary table with aperture
- Hall-effect or mechanical
reference switch
- 2-phase step motor or
DC motor with encoder
- with OWISid

Option

- Ausführung mit integriertem
Winkelmesssystem
(DMT 200N-IMS)
- version with integrated
angular measuring system
(DMT 200N-IMS)

Die Präzisions-Drehmesstische DMT 200N gestatten unbegrenzte Drehwinkel und sind sowohl für waagerechte als auch für senkrechte Drehachsen geeignet.

Das Präzisions-Kugellager und der Schneckenantrieb sind vorgespannt für nahezu spielfreies Positionieren.

Die Drehmesstische DMT 200N sind mit verschiedenen Motorisierungen lieferbar und als DMT 200N-IMS mit integriertem Winkelmesssystem erhältlich.

Alle Aluminiumteile haben eine hochwertige schwarze Eloxal-Schutzschicht.



The DMT 200N precision rotary measuring stages allow unlimited rotation angles and are suitable for horizontal and vertical rotation axes.

The precision ball bearings and the worm gear drive are preloaded, to allow a nearly backlash-free positioning.

The DMT 200N rotary measuring stages are available with different motorizations and as DMT 200N-IMS also available with integrated angular measuring system.

All aluminium parts have a top quality black anodized protective coating.

OWIS GmbH

Im Gaisgraben 7
79219 Staufen i. Br. (Germany)

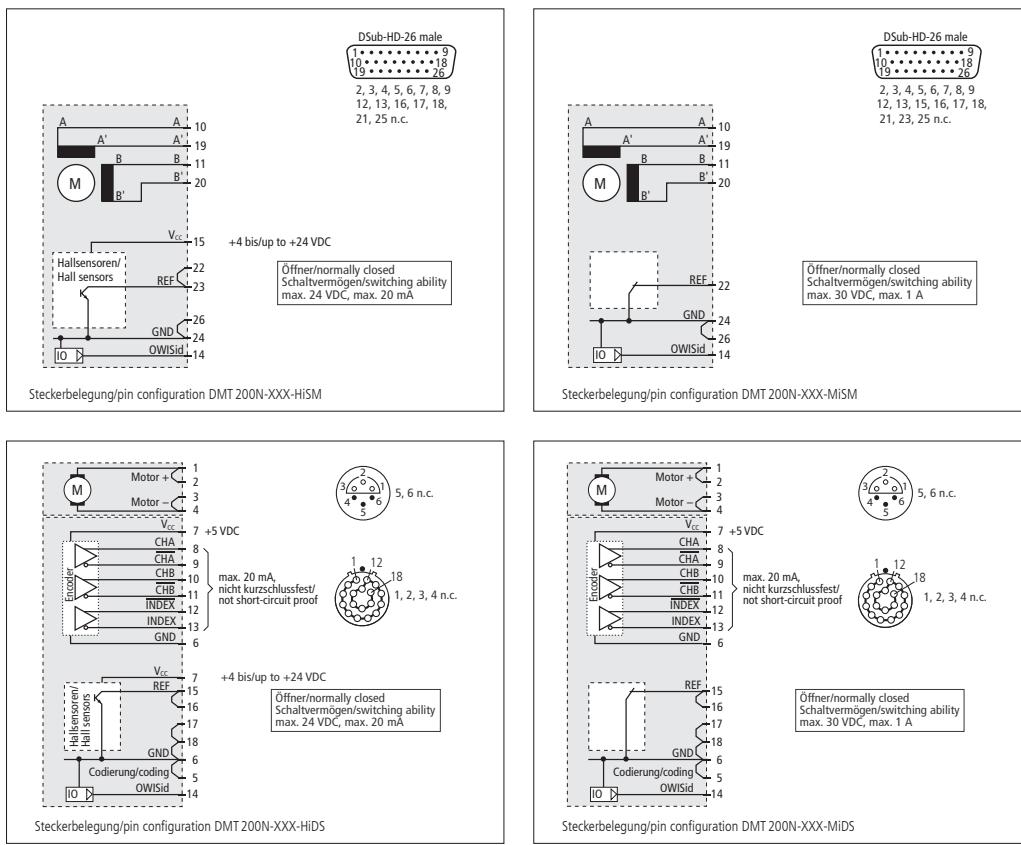
Tel. +49 (0) 76 33 / 95 04-0
Fax +49 (0) 76 33 / 95 04-440

info@owis.eu
www.owis.eu

M1

Quelle: https://www.owis.eu/uploads/tx_aimeos/1./files/d/1/d1490e1f_pi-dmt-200n.pdf - Abrufdatum: 02.03.2023

A.1 Datenblätter



Technische Daten/Technical Data DMT 200N (bei 20 °C/@ 20 °C, ohne Last/no load)

	Schrittmotor step motor	DC-Servomotor DC servo motor
Rotationswinkel	angle of rotation	unbegrenzt/unlimited
Wiederholfehler (bidirektional)	repeatability (bidirectional)	< 0,01 °
Geschwindigkeit	speed	max. 30 max. 65 °/s
Untersetzung	reduction	180:1
Drehmoment	drive torque	max. 30 Nm
Tragkraft, radial	load capacity, radial	1000 N
Tragkraft, axial	load capacity, axial	1000 N
Kippmoment	moment of tilt	70 Nm
Motorspannung	motor voltage	max. 50 max. 48 V
Motorstrom	motor current	max. 3,2 ¹⁾ max. 6,8 A
Schritte/Impulse pro Motorumdrehung	steps/pulses per motor revolution	200 ²⁾ 20000
Gewicht	weight	~14,0 kg
Betriebsumgebungstemperatur ⁴⁾	ambient operating temperature ⁴⁾	+10 bis/up to +50 °C
Lagerungstemperatur ⁴⁾	storage temperature ⁴⁾	-20 bis/up to +70 °C

¹⁾ pro Phase/per phase ²⁾ im Vollschrittbetrieb/in full-step mode ³⁾ pro Encoder Impuls/per encoder pulse ⁴⁾ ohne Betäubung/without condensation

Alle technischen Daten sind abhängig von Einbaulage, Anwendung und eingesetzter Steuerung.

All technical data depend on orientation, application and used control unit.

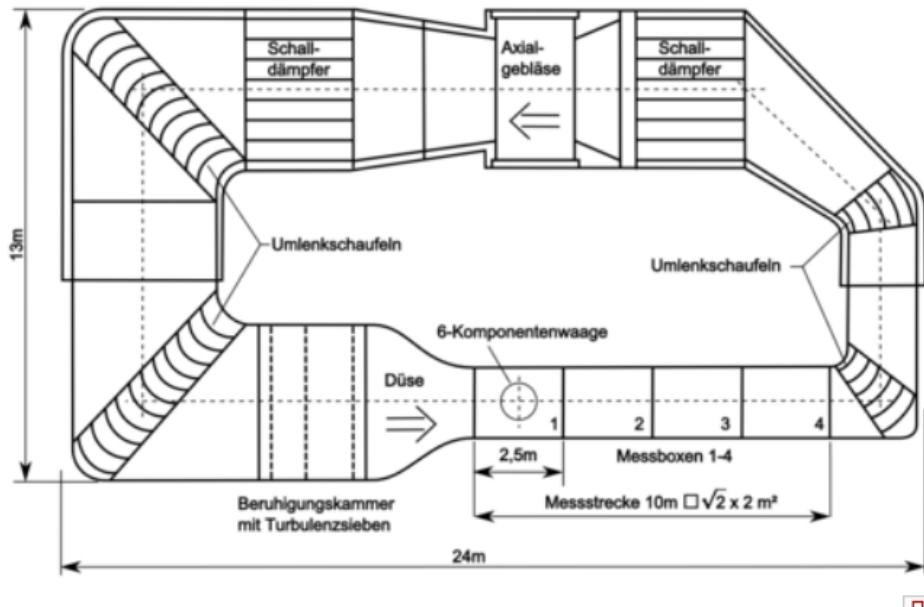
M3

Quelle: https://www.owis.eu/uploads/tx_aimeos/1./files/d/1/d1490e1f_pi-dmt-200n.pdf - Abrufdatum: 02.03.2023

A.1.12 Großer Windkanal - TU Berlin

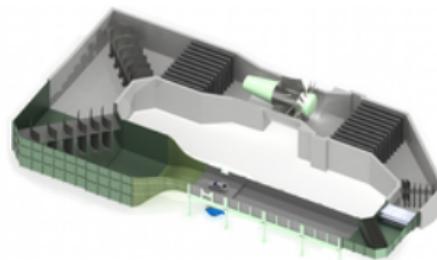
Großer Windkanal (GroWiKa)

"GroWiKa" ist das Akronym für "großer Windkanal" und tatsächlich ist der GroWiKa im HFI-Gebäude des Fachgebietes Experimentelle Strömungsmechanik **der größte Niedergeschwindigkeitswindkanal** in der Region Berlin/Brandenburg.



Daten

- Ringkanal mit geschlossener Messstrecke
- Messquerschnitte:
 - Klein: 2 m x 1,4 m
 - Groß: 4,2 m x 4,2 m
- Länge der Messstrecken:
 - Klein: 5 bis 10 m
 - Groß: 2,5 bis 10 m
- max. Strahlgeschwindigkeit:
 - Kleiner Querschnitt: 70 m/s
 - Großer Querschnitt: 11 m/s
- Kontraktion: 6,25 : 1
- Arbeitsleistung: 450 kW
- Beruhigungskammer
 - Messquerschnitt: 4,2 m x 4,2 m
 - Länge: 5 m
- Externe 6-Komponentenwaage zur Messung aller aerodynamischen Kräfte und Momente auf umströmte Körper



CAD-Modell des GroWiKa



Großer Windkanal (GroWiKa) in der Halle des HFI

A.1.13 ICL7660 - Schaltspannungsregler

ICL7660, ICL7660A

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage	
ICL7660	+10.5V
ICL7660A	+13.0V
LV and OSC Input Voltage	-0.3V to (V+ +0.3V) for V+ < 5.5V (Note 2) (V+ -5.5V) to (V+ +0.3V) for V+ > 5.5V
Current into LV (Note 2)	20µA for V+ > 3.5V
Output Short Duration (V _{SUPPLY} ≤ 5.5V)	Continuous

Thermal Information

	θ _{JA} (°C/W)	θ _{JC} (°C/W)
PDIP Package*	110	N/A
SOIC Package	160	N/A
Maximum Storage Temperature Range	-65°C to 150°C	
Maximum Lead Temperature (Soldering, 10s) 300°C	
(SOIC - Lead Tips Only)		

*Pb-free PDIPs can be used for through hole wave solder processing only. They are not intended for use in Reflow solder processing applications.

Operating Conditions

Temperature Range	
ICL7660C, ICL7660AC	0°C to 70°C
ICL7660AI	-40°C to 85°C

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTE:

1. θ_{JA} is measured with the component mounted on an evaluation PC board in free air.

Electrical Specifications ICL7660 and ICL7660A, V+ = 5V, T_A = 25°C, C_{OOSC} = 0, Test Circuit Figure 11
Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	ICL7660			ICL7660A			UNITS
			MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
Supply Current	I+	R _L = ∞	-	170	500	-	80	165	µA
Supply Voltage Range - Lo	V _{L+}	MIN ≤ T _A ≤ MAX, R _L = 10kΩ, LV to GND	1.5	-	3.5	1.5	-	3.5	V
Supply Voltage Range - Hi	V _{H+}	MIN ≤ T _A ≤ MAX, R _L = 10kΩ, LV to Open	3.0	-	10.0	3	-	12	V
Output Source Resistance	R _{OUT}	I _{OUT} = 20mA, T _A = 25°C	-	55	100	-	60	100	Ω
		I _{OUT} = 20mA, 0°C ≤ T _A ≤ 70°C	-	-	120	-	-	120	Ω
		I _{OUT} = 20mA, -55°C ≤ T _A ≤ 125°C	-	-	150	-	-	-	Ω
		I _{OUT} = 20mA, -40°C ≤ T _A ≤ 85°C	-	-	-	-	-	120	Ω
		V ⁺ = 2V, I _{OUT} = 3mA, LV to GND 0°C ≤ T _A ≤ 70°C	-	-	300	-	-	300	Ω
		V ⁺ = 2V, I _{OUT} = 3mA, LV to GND, -55°C ≤ T _A ≤ 125°C	-	-	400	-	-	-	Ω
Oscillator Frequency	f _{OSC}		-	10	-	-	10	-	kHz
Power Efficiency	P _{EF}	R _L = 5kΩ	95	98	-	96	98	-	%
Voltage Conversion Efficiency	V _{OUT} EF	R _L = ∞	97	99.9	-	99	99.9	-	%
Oscillator Impedance	Z _{OSC}	V ⁺ = 2V	-	1.0	-	-	1	-	MΩ
		V = 5V	-	100	-	-	-	-	kΩ
ICL7660A, V⁺ = 3V, T_A = 25°C, OSC = Free running, Test Circuit Figure 11, Unless Otherwise Specified									
Supply Current (Note 3)	I+	V ⁺ = 3V, R _L = ∞, 25°C	-	-	-	-	26	100	µA
		0°C < T _A < 70°C	-	-	-	-	-	125	µA
		-40°C < T _A < 85°C	-	-	-	-	-	125	µA
Output Source Resistance	R _{OUT}	V ⁺ = 3V, I _{OUT} = 10mA	-	-	-	-	97	150	Ω
		0°C < T _A < 70°C	-	-	-	-	-	200	Ω
		-40°C < T _A < 85°C	-	-	-	-	-	200	Ω
Oscillator Frequency (Note 3)	f _{OSC}	V ⁺ = 3V (same as 5V conditions)	-	-	-	5.0	8	-	kHz
		0°C < T _A < 70°C	-	-	-	3.0	-	-	kHz
		-40°C < T _A < 85°C	-	-	-	3.0	-	-	kHz

A.1.14 Peaktech 3430 - Multimeter

2.2. Bereiche

Gleichspannung

Bereiche	Auflösung	Genauigkeit
220 mV	10 µV	± 0,05% v. M. + 3 St.
2,2 V	100 µV	
22 V	1 mV	
220 V	10 mV	
1000 V	0,1 V	

Überlastschutz: 1000 V DC/AC_{eff}

Eingangswiderstand: 9 MΩ

Wechselspannung

Bereiche	Auflösung	Genauigkeit
220 mV	10 µV	± 0,8% v. M. + 4 St.
2,2 V	100 µV	
22 V	1 mV	
220 V	10 mV	
750 V	0,1 V	

Überlastschutz: 750 V DC/AC_{eff}

Eingangswiderstand: 9 MΩ

Frequenzbereich: 40 ... 400 Hz

Gleichstrom

Bereiche	Auflösung	Genauigkeit
220 µA	10 nA	± 0,8% v. M. + 4 St.
2200 µA	0,1 µA	
22 mA	1 µA	
220 mA	10 µA	
10 A	1 mA	

Überlastschutz: 250 mA/1000 V

10 A/1000 V

max. Eingangsstrom: µA/mA-Bereich: 250 mA

10- A-Bereich: 10 A

A.1.15 RTC 158



Spezifikationen

Funktionale Spezifikationen

Temperatureinheit im Display

Vom Benutzer wählbar: °C, °F, or K

Radiale Homogenität (Differenz zw. den Bohrungen)

RTC-158 bei -22°C/-8°F, Block	0.03°C/0.05°F
RTC-158 bei 155°C/311°F, Block	0.05°C/0.09°F
RTC-158 bei Bereich, Bad	0.015°C/0.03°F
RTC-250 bei Bereich, Bad	0.05°C/0.09°F
RTC-250 bei Bereich, Bad	0.015°C/0.03°F

Heizzeit

RTC-158	-22 bis 23°C/-8 bis 73°F.....	9 Minuten
	23 bis 100°C/73 bis 212°F.....	23 Minuten
	100 bis 155°C/212 bis 311°F.....	28 Minuten
RTC-250	28 bis 100°C/82 bis 212°F.....	3 Minuten
	50 bis 100°C/122 bis 212°F.....	2 Minuten
	100 bis 250°C/212 bis 482°F.....	9 Minuten

Kühlzeit

RTC-158	155 bis 100°C/311 bis 212°F.....	9 Minuten
RTC-250	200 bis 100°C/482 bis 212°F.....	24 Minuten
In einfügen, Mit Einsatz kalibriert.	23 bis 0°C/73 bis 32°F.....	15 Minuten
RTC-158	0 bis -15°C/32 bis 5°F.....	21 Minuten
RTC-250	250 bis 100°C/482 bis 212°F.....	27 Minuten
Im Badezimmer, Mit Einsatz kalibriert.	100 bis 50°C/212 bis 122°F.....	27 Minuten
RTC-158	50 bis 28°C/122 bis 82°F.....	28 Minuten
RTC-250	250 bis 100°C/482 bis 212°F.....	28 Minuten

Zeit bis zur Stabilisierung (ca.)

RTC-158	RTS-250	15 Minuten
	RTS-250	15 Minuten
	Alle Temperaturen	15 Minuten
	Die Messzeit beträgt 30 Minuten.	
	Auflösung (vom Benutzer wählbar)	
	Alle Temperaturen	1° or 0.1° or 0.01° or 0.001°

Input Spezifikationen

Alle Input Spezifikationen beziehen sich auf den Trockenblockbetrieb des Kalibrators bei der jeweiligen Temperatur (stabil plus eine zusätzliche Periode von 20 Minuten).

Alle Input Spezifikationen gelten sowohl für den RTC-158 und RTC-250.

RTD Referenzeingang (nur Modelle B & C)

Typ 4-Leiter RTD mit "True Ohm"-Messung (1)
EW/Endwert) 400 ohm
Genauigkeit (12 mon) ±(0.0012% v.Mw. + 0.0005% v.Ew.)

RTD Typ

RTD Typ	Temperatur °C	Temperatur °F	Genauigkeit °C	Genauigkeit °F
Pt100	-22	-8	± 0.008	± 0.015
Referenz	0	32	± 0.008	± 0.015

(1) "True Ohm"-Messung ist eine effektive Methode zur Bereitstellung von indizierten, thermoelektrischen Spannungen.

DLC Sensoreingang (nur Modelle B & C)

DLC Typ	Temperatur °C	Temperatur °F	Genauigkeit °C	Genauigkeit °F
DLC 155	-22	-58	± 0.014	± 0.028
Referenz	0	32	± 0.010	± 0.018

bei 0.00 °C / 0.00 °F DLC Messwert.

Eintauchtiefe

RTC-158/250 inkl. Isolierungsstecker	180 mm/7.1 in
RTC-158/250 Bad-Version	150 mm/5.9 in



Spezifikationen



RTD Prüflingeingang (nur Modell B)

EW (Bereich) 400 ohm
Genaugkeit (12 mon.) $\pm 0.002\%$ Rdg.+0.002% F.S.
EW (Bereich) 4000 ohm
Genaugkeit (12 mon.) $\pm 0.005\%$ Rdg.+0.005% F.S.
Genaugkeit (12 mon.) $\pm (0.005\% \text{ v.Mw.} + 0.005\% \text{ F.S.})$
2-Leiter add 50 mOhm

Temperatur			
RTD Typ	°C	°F	12 Monate
Pt100	-22	-8	$\pm 0.025 \pm 0.045$
	0	32	$\pm 0.026 \pm 0.047$
	28	82	$\pm 0.026 \pm 0.047$
Pt500	155	311	$\pm 0.030 \pm 0.054$
	250	482	$\pm 0.033 \pm 0.060$
Pt1000	-22	-8	$\pm 0.113 \pm 0.203$
	0	32	$\pm 0.116 \pm 0.209$
	28	82	$\pm 0.118 \pm 0.212$
	155	311	$\pm 0.129 \pm 0.232$
	250	482	$\pm 0.131 \pm 0.236$
	-22	-8	$\pm 0.063 \pm 0.114$
	0	32	$\pm 0.064 \pm 0.115$
	28	82	$\pm 0.066 \pm 0.119$
	155	311	$\pm 0.075 \pm 0.135$
	250	482	$\pm 0.082 \pm 0.148$

Thermoelementeingang

Bereich $\pm 78 \text{ mV}$
EW (Endwert) $\pm 78 \text{ mV}$
Genaugkeit (12 mon.) $\pm (0.005\% \text{ v.Mw.} + 0.005\% \text{ v.Ew.})$
Genaugkeit (12 mon.) $\pm 0.005\% \text{ v.Mw.} + 0.005\% \text{ v.Ew.}$
Genaugkeit (12 mon.) add 50 mOhm

Temperatur			
TC Typ	°C	°F	12 Monate*
E	-50	-58	$\pm 0.09 \pm 0.17$
	0	32	$\pm 0.06 \pm 0.11$
	155	311	$\pm 0.06 \pm 0.11$
	320	608	$\pm 0.07 \pm 0.13$
J	-50	-58	$\pm 0.10 \pm 0.18$
	0	32	$\pm 0.08 \pm 0.14$
	155	311	$\pm 0.09 \pm 0.16$
	320	608	$\pm 0.09 \pm 0.16$
K	-50	-58	$\pm 0.14 \pm 0.24$
	0	32	$\pm 0.10 \pm 0.19$
	155	311	$\pm 0.11 \pm 0.20$
	320	608	$\pm 0.11 \pm 0.20$
T	-50	-58	$\pm 0.15 \pm 0.26$
	0	32	$\pm 0.10 \pm 0.18$
	155	311	$\pm 0.08 \pm 0.15$
	320	608	$\pm 0.08 \pm 0.15$
R	-50	-58	$\pm 1.30 \pm 2.35$
	0	32	$\pm 0.78 \pm 1.40$
	155	311	$\pm 0.47 \pm 0.84$
	320	608	$\pm 0.40 \pm 0.72$

Transmitterversorgung

Ausgangsspannung 24VDC $\pm 10\%$
Ausgangstrom Maximum 28 mA
Bereich $\pm 0.005\% \text{ v.Mw.} + 0.010\% \text{ v.Ew.}$
Genaugkeit (12 mon.) $\pm 0.005\% \text{ v.Mw.} + 0.010\% \text{ v.Ew.}$
Bereich 0 bis 24 mA
Genaugkeit (12 mon.) $\pm 0.005\% \text{ v.Mw.} + 0.010\% \text{ v.Ew.}$
Bereich 0 bis 12 VDC
Genaugkeit (12 mon.) $\pm 0.005\% \text{ v.Mw.} + 0.010\% \text{ v.Ew.}$

Spannungseingang VDC (nur Modell B)

Bereich 0 bis 24 mA
Genaugigkeit (12 mon.) $\pm 0.005\% \text{ v.Mw.} + 0.010\% \text{ v.Ew.}$
Bereich 0 bis 12 VDC
Genaugigkeit (12 mon.) $\pm 0.005\% \text{ v.Mw.} + 0.010\% \text{ v.Ew.}$
Bereich 0 bis 5 VDC
Prüfspannung Maximum 5 VDC
Prüfstrom Maximum 2.5 mA
Spannung 50/60 Hz (47-63 Hz)
Frequenz, nicht bei US Lieferungen 50/60 Hz (47-63 Hz)
Frequenz, US Lieferungen 60 Hz (57-63 Hz)
Leistungsaufnahme (max.), RTC-158 400 W
Leistungsaufnahme (max.), RTC-250 1150 W
LAN SD * für zukünftige Erweiterungen.

Schaltereingang (nur Modell B)

Potentiometrische Schalterkontakte
Prüfspannung Maximum 5 VDC
Prüfstrom Maximum 2.5 mA
Spannung 115V (90-127) / 230V (180-254)
Frequenz, nicht bei US Lieferungen 50/60 Hz (47-63 Hz)
Frequenz, US Lieferungen 60 Hz (57-63 Hz)
Leistungsaufnahme (max.), RTC-158 400 W
Leistungsaufnahme (max.), RTC-250 1150 W
Serialer Schnittstellenport USB 2.0 Gerät report
Serialer Schnittstellenport USB 2.0 2-fach Gerät report*
LAN Ethernet MAC 10/100 Base-T*
SD SD-Steckplatz*

* Exkl. Kaltstellenkompensation Genaugigkeit $\pm 0.3^\circ \text{ C} / \pm 0.54^\circ \text{ F}$.
Für zukünftige Erweiterungen.
Sonstiges
Betriebstemperatur 0 bis $40^\circ \text{ C} / 32$ bis 104° F
Lagertemperatur -20 bis $50^\circ \text{ C} / -4$ bis 122° F
Feuchtigkeit 0 bis 90% rel. Feuchte
Schutzklasse IP-10



A.1.16 SP-110-SS - Pyranometer



SILICON-CELL PYRANOMETERS

SP-100, SP-200, & SP-400 Series

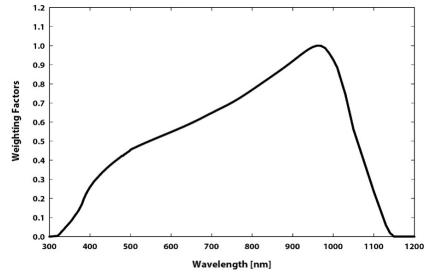
Accurate and stable global shortwave (solar) radiation measurement

Output Options

- 0 to 350 mV
- 0 to 5 V
- USB
- Modbus
- 0 to 2.5 V
- 4 to 20 mA
- SDI-12
- Hand-held meter



Spectral Response



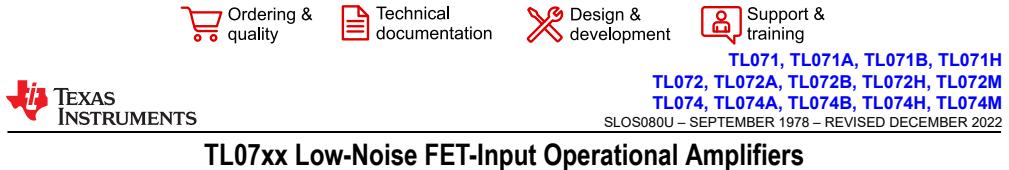
Spectral response estimate of Apogee silicon-cell pyranometers.

Product Specifications

	SP-110-SS	SP-212-SS	SP-214-SS	SP-215-SS	SP-230-SS	SP-420	SP-421-SS	SP-422-SS								
ISO 9060:2018	Class C (fast response)															
Power Supply	Self-powered	5 to 24 V DC	7 to 24 V DC	5.5 to 24 V DC	12 V DC for heater	5 V USB	5.5 to 24 V DC									
Current Draw	—	300 µA	22 mA maximum, 2 mA quiescent	300 µA	15.4 mA	61 mA when logging	1.5 mA (quiescent); 1.9 mA (active)	RS-232 37 mA; RS-485 quiescent 37 mA, active 42 mA								
Output (sensitivity)	0.2 mV per W m ⁻²	1.25 mV per W m ⁻²	0.008 mA per W m ⁻²	2.5 mV per W m ⁻²	0.2 mV per W m ⁻²	USB	SDI-12	Modbus								
Calibration Factor (reciprocal of output)	5 W m ⁻² per mV	0.8 W m ⁻² per mV	125 W m ⁻³ per mA, 4 mA offset	0.4 W m ⁻² per mV	5 W m ⁻² per mV	Custom for each sensor and stored in firmware										
Calibration Uncertainty at 1000 W m ⁻²	Less than 3 %															
Measurement Repeatability	Less than 1 %															
Long-term Drift	Less than 2 % per year															
Non-linearity	Less than 1 % up to 2000 W m ⁻²															
Response Time	Less than 1 ms				Updates every second	Less than 0.6 s	Less than 200 ms									
Field of View	180°															
Spectral Range	360 to 1120 nm															
Directional (Cosine) Response	± 5 % at 75° zenith angle															
Temperature Response	0.04 ± 0.04 % per C															
Operating Environment	-40 to 70 C; 0 to 100 % relative humidity; can be submerged in water up to 30 m															
Dimensions	24 mm d; 33 mm h	30.5 mm diameter, 37 mm height				24 mm d; 33 mm h	30.5 mm diameter, 37 mm height									
Mass (with 5 m of cable)	90 g	140 g			90 g											
Cable	5 m of shielded, twisted-pair wire; TPR jacket (high water resistance, high UV stability, flexibility in cold conditions); pigtail lead wires															
Warranty	4 years against defects in materials and workmanship															

Quelle: <https://www.apogeeinstruments.com/sp-110-ss-self-powered-pyranometer/#product-tab-description> - Abrufdatum: 02.03.2023

A.1.17 TL071 - OPV



TL07xx Low-Noise FET-Input Operational Amplifiers

1 Features

- High slew rate: 20 V/μs (TL07xH, typ)
- Low offset voltage: 1 mV (TL07xH, typ)
- Low offset voltage drift: 2 μV/°C
- Low power consumption: 940 μA/ch (TL07xH, typ)
- Wide common-mode and differential voltage ranges
 - Common-mode input voltage range includes V_{CC}
- Low input bias and offset currents
- Low noise: $V_n = 18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ (typ) at $f = 1 \text{ kHz}$
- Output short-circuit protection
- Low total harmonic distortion: 0.003% (typ)
- Wide supply voltage: $\pm 2.25 \text{ V}$ to $\pm 20 \text{ V}$, 4.5 V to 40 V

2 Applications

- Solar energy: string and central inverter
- Motor drives: AC and servo drive control and power stage modules
- Single phase online UPS
- Three phase UPS
- Pro audio mixers
- Battery test equipment

3 Description

The TL07xH (TL071H, TL072H, and TL074H) family of devices are the next-generation versions of the industry-standard TL07x (TL071, TL072, and TL074) devices. These devices provide outstanding value for cost-sensitive applications, with features including low offset (1 mV, typical), high slew rate (20 V/μs), and common-mode input to the positive supply. High ESD

(1.5 kV, HBM), integrated EMI and RF filters, and operation across the full -40°C to 125°C enable the TL07xH devices to be used in the most rugged and demanding applications.

Device Information

PART NUMBER ⁽¹⁾	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
TL071x	PDIP (8)	9.59 mm × 6.35 mm
	SC70 (5)	2.00 mm × 1.25 mm
	SO (8)	6.20 mm × 5.30 mm
	SOIC (8)	4.90 mm × 3.90 mm
	SOT-23 (5)	1.60 mm × 1.20 mm
TL072x	PDIP (8)	9.59 mm × 6.35 mm
	SO (8)	6.20 mm × 5.30 mm
	SOIC (8)	4.90 mm × 3.90 mm
	SOT-23 (8)	2.90 mm × 1.60 mm
	TSSOP (8)	4.40 mm × 3.00 mm
TL072M	CDIP (8)	9.59 mm × 6.67 mm
	CFP (10)	6.12 mm × 3.56 mm
	LCCC (20)	8.89 mm × 8.89 mm
TL074x	PDIP (14)	19.30 mm × 6.35 mm
	SO (14)	10.30 mm × 5.30 mm
	SOIC (14)	8.65 mm × 3.91 mm
	SOT-23 (14)	4.20 mm × 2.00 mm
	SSOP (14)	6.20 mm × 5.30 mm
	TSSOP (14)	5.00 mm × 4.40 mm
TL074M	CDIP (14)	19.56 mm × 6.92 mm
	CFP (14)	9.21 mm × 6.29 mm
	LCCC (20)	8.89 mm × 8.89 mm

(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

Logic Symbols

⚠ An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

Quelle: https://www.ti.com/lit/ds/slos080u/slos080u.pdf?ts=1680449339769&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F - Abrufdatum: 02.03.2023

A.1.18 UL 1650 - Ulbricht Kugel

INTEGRATING SPHERE LMT UL 1650



Large object luminous flux measurement

The LMT UL 1650 is an integrating sphere with a diameter of 1650 mm for measurement of large lighting devices.

A variety of additional equipment is available to adjust it to advanced luminous flux measurements.

Features

- Uniform spectral response and throughput across the visible spectrum due to LMT® PHP coating formula
- Precision SP 30 SCT photometer head with U 1000 readout unit
- Quality index for adoption to $V(\lambda)$ by means of LMT Mosaic Filtering® typically $\leq 0.8\%$
- Minimum spectral mismatch indices against both conventional and LED light sources
- Absorption correction with auxiliary lamp in accordance with CIE 084.

Options

- Exterior mounted bench for testing of light sources emitting into 2π solid angle
- Flexible baffle system to adjust 2π -port for various shapes
- Spectroradiometric assessment with LMT SM 8000 UL
- Colorimetric evaluation with LMT C1210 or C3300

⇒ Integrating Spheres

Quelle: <https://www.lmt.de/integrating-sphere-lmt-ul-1650/> - Abrufdatum: 02.03.2023

A.1.19 TP-9 Infrarot-Thermometer

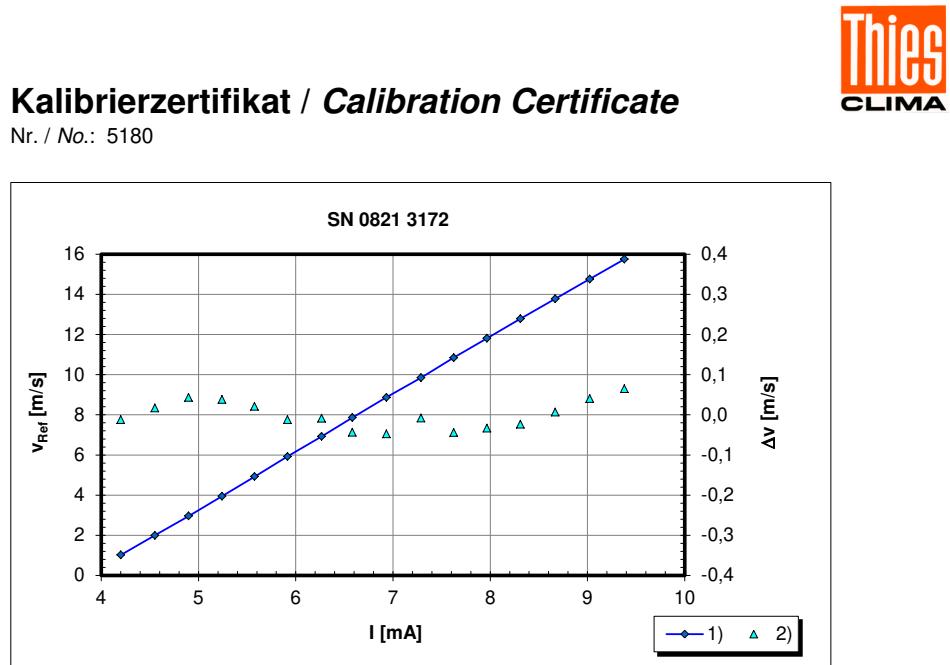
15. Technische Daten

Technische Daten		Infrarot-Thermometer
Temperaturbereich		-50 °C bis +1.600 °C (-58 °F bis +2.912 °F)
Auflösung	≤ 1000 °C (°F)	0,1 °C (0,1 °F)
	> 1000 °C (°F)	1 °C (1 °F)
Zielanzeige		Laser Klasse 2 (II), 630 ~ 670 nm, < 1 mW
Genauigkeit (bei Umgebungs-temperaturen von 23 bis 25 °C (73 bis 77 °F)	-50 °C bis 20 °C (-58 °F bis 68 °F)	± 2,5 °C (4,5 °F)
	21 °C bis 400 °C (69 °F bis 752 °F)	± 1 % ± 1 °C (1,8 °F)
	401 °C bis 800 °C (753 °F bis 1.472 °F)	± 1,5 % ± 2 °C (3,6 °F)
	800 °C bis 1.600 °C (1.473 °F bis 2.912 °F)	± 2,5 %
Reproduzier- barkeit	-50 °C bis 20 °C (-58 °F bis 68 °F)	± 1,3 °C (2,3 °F)
	21 °C bis 1.200 °C (69 °F bis 2.192 °F)	± 0,8 % ± 0,5 °C (0,9 °F)
	1.201 °C bis 1.600 °C (2.193 °F bis 2.912 °F)	± 1,2 % ± 1,0 °C (1,8 °F)
Emissionsgrad		einstellbar von 0,10 bis 1,0
Ansprechzeit		150 ms
Spektrale Empfindlichkeit		8 ~14 µm
Optische Auflösung (D:S)		50:1
Kleinster Messfleck-Ø		25,4 mm
Automatische Abschaltung		nach ca. 7 Sekunden
Betriebsbedingungen		0 °C bis 50 °C (32 °F bis 122 °F), 10 % bis 90 % r.F.
Lagerbedingungen		-10 °C bis 60 °C (-2 °F bis 140 °F), < 80 % r.F.
Spannungsversorgung		9V-Blockbatterie
Gewicht		290 g
Abmessungen		220 x 120 x 56 mm

 Neben dem im Lieferumfang enthaltenen Kontaktensor lassen sich auch andere Typ-K Temperaturfühler mit Minatur-Flachstecker an das Messgerät anschließen. Das Infrarot-Thermometer kann die Messdaten des externen Sensors in einem Messbereich von -50 °C bis 1.370 °C verarbeiten und anzeigen.

Technische Daten	Kontaktensor Typ-K
Temperaturbereich	-50 °C bis +300 °C (-58 °F bis +572 °F)
Auflösung	0,1 °C (0,1 °F)
Genauigkeit	± 1,5 % ± 3°C (5 °F)
Reproduzierbarkeit	± 1,5 %
Betriebsbedingungen	0 °C bis 50 °C (32 °F bis 122 °F), 10 % bis 90 % r.F.
Lagerbedingungen	-10 °C bis 60 °C (-2 °F bis 140 °F), < 80 % r.F.

A.1.20 Bsp. Werkskalibrierung eines Thies-Gerätes



Ergebnis lineare Regression / Linear regression result	
$a = 2,86098 \text{ (m/s)/(mA)} \pm 0,00569 \text{ (m/s)/(mA)}$	Steigung / Slope
$b = -11,012 \text{ m/s} \pm 0,040 \text{ m/s}$	Achsenabschnitt / Axis intercept
$\text{St.err.(Y)} = 0,036 \text{ m/s}$	Standardfehler / Standard error
$r = 0,999972$	Korrelationskoeffizient / Correlation coefficient
$v \text{ [m/s]} = a \cdot I \text{ [mA]} + b$	

References

- [1] IEC 61400-12-1 (2005-12) Power performance measurements of electricity producing wind turbines
- [2] THIES - QM References Windtunnel 601_0100
- [3] THIES - MU_Windtunnel_WS_Rev01

A.2 Beschreibung des digitalen Anhang (letzter Anlage)

Im digitalen Anhang befindet sich die verfasste Bachelorarbeit als PDF Datei, sowie alle Messwerte, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind. Zusätzlich befinden sich dort Matlab Dateien, in welchen die Auswertung der Messwerte und die Erstellung der Grafiken erfolgte.