

Masterarbeit

Tobias Schwinghammer

Elektrochemische Impedanzspektroskopie in Fahrzeug- batterien - Einfluss von parallelgeschalteten Zellen

Tobias Schwinghammer

Elektrochemische Impedanzspektroskopie in Fahrzeugbatterien

-

Einfluss von parallelgeschalteten Zellen

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung
im Studiengang Master of Science Informations- und Kommunikationstechnik
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr.-Ing. Karl-Ragnar Riemschneider

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Ralf Wendel

Eingereicht am: 21. Februar 2024

Tobias Schwinghammer

Thema der Arbeit

Elektrochemische Impedanzspektroskopie in Fahrzeugbatterien - Einfluss von parallelgeschalteten Zellen

Stichworte

Elektrochemische Impedanzspektroskopie, Fahrzeugbatterien, Zellmodule, Lithium-Ionen-Batterie, Parallelgeschaltete Zellen, Batterie-Management-System, Zellspannung, Batterie-Lebensdauer, Zellalterung, Fehlererkennung, Zelltemperatur, Elektrische Impedanz

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Parallelschaltung von Lithium-Ionen-Batteriezellen und deren Auswirkung auf die elektrochemische Impedanzspektroskopie. Hierzu wird ein mechanischer Testaufbau einem kommerziellen Zellpaket nachempfunden und für Laborzwecke erweitert. Es wird eine Simulationsgrundlage geschaffen, um das elektrische Verhalten der Schaltung zu untersuchen und praktische Messungen mit den Simulationsergebnissen verglichen.

Tobias Schwinghammer

Title of Thesis

Electrochemical impedance spectroscopy in vehicle batteries - Influence of cells connected in parallel

Keywords

electrochemical impedance spectroscopy, vehicle batteries, cell modules, lithium-ion battery, parallel connected cells, battery management system, cell voltage, battery life, cell aging, fault detection, cell temperature, electrical impedance

Abstract

This thesis engages with the parallel connection of lithium-ion battery cells and its impact on electrochemical impedance spectroscopy. To achieve this, a mechanical test setup is designed to replicate a commercial cell pack and expanded for laboratory purposes. A simulation framework is established to investigate the electrical behavior of the circuit, and practical measurements are compared with the simulation results.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung	1
1.2. Gliederung	2
2. Grundlagen	3
2.1. Lithium-Ionen-Akkumulatoren	3
2.1.1. Mechanischer Aufbau	4
2.1.2. Chemischer Aufbau	5
2.1.3. Lebensdauer und Alterung	6
2.1.4. Ersatzschaltbilder	7
2.1.5. Verwendung von Li-Ion-Zellen in der Automobilbranche	7
2.2. Elektrochemische Impedanzspektroskopie	8
2.2.1. Methoden	8
2.2.2. Zielsetzung	9
2.3. Knotenpotentialanalyse	9
3. Konstruktion	12
3.1. Betrachtung des Gesamtkonzepts	12
3.2. Modulrahmen	13
3.3. Zellverbinder	13
3.4. Zelldummy	14
3.5. Endplatte	15
3.6. Platinenmontageplatte	15
4. Modellbildung und Simulationsgrundlagen	16
4.1. Modellparameter	16
4.1.1. Übergangswiderstände	16
4.1.2. Zellimpedanz	17
4.2. Mathematische Betrachtung mittels Knotenpotentialanalyse	18
4.3. Auswahl des Simulationstools	23
4.3.1. AWR Microwave Office	23

4.3.2. P-SPICE - LT-SPICE	23
4.3.3. Matlab Simulink	24
4.3.4. Vergleich der Simulationssoftware	24
4.3.5. Entscheidung für das Simulationstool PySpice	25
4.4. Simulationsaufbau	26
5. Simulation	28
5.1. Simulation des idealen Falls	28
5.2. Simulation des nicht idealen Falls	29
5.2.1. Auswahl der Szenarien	29
5.2.2. Zellalterung	30
5.2.3. Temperaturänderung	36
6. Experimente	39
6.1. Vermessung des Serienmoduls	39
6.1.1. Einzelnes Modul	39
6.1.2. Einzellzelle Molicell 21700-P45B	40
6.1.3. Temperaturabhängigkeit der Molicell 21700-P45B	41
6.2. Vermessung des Modulprototypen	43
6.2.1. Vermessung der Zellnachbildung	43
6.2.2. Vermessung der 3s36p-Verschaltung	45
6.2.3. Vermessung im präparierten Fall mit einer gealterten Zelle	45
6.2.4. Vermessung im präparierten Fall mit einem Temperaturgradienten	46
7. Auswertung	49
7.1. Bewertung der Konstruktion	49
7.2. Vergleich der Ergebnisse	50
7.2.1. Ideales Verhalten	50
7.2.2. Zellalterung	50
7.2.3. Temperaturänderung	52
8. Zusammenfassung und Perspektive	55
8.1. Fazit	55
8.2. Ausblick	56
Abkürzungsverzeichnis	57
Abbildungsverzeichnis	58

Tabellenverzeichnis	60
Literatur	60
Anhang	62
A. Simulation eines Batteriemodells mit RC-Gliedern	64
B. Knotenpotentialanalyse	66
C. Python Include-Datei für die SPICE-Simulationen	67
D. Script ideale 3s36p-Verschaltung R-RC Simulation	68
E. Script ideale 3s36p-Verschaltung ohmsche Simulation	73
F. Script Zellalterung 3s36p-Verschaltung Simulation	79
G. Script Temperaturänderung 3s36p-Verschaltung Simulation	86
H. Fuelcon Eis-Meter Datenverarbeitung	92
I. Messergebnisse	96
I.1. EIS-Messungen des originalen 36p-Zellmodul	96
I.2. EIS-Messungen der Temperaturveränderung der Molicell 21700-P45B . . .	105
J. Auswertung Zellalterung	146
K. Datenblätter	153
K.1. Wieland-W55	154
K.2. Messingblech CW508L (CuZn37)	156
K.3. Widerstand WLAR010FET	160
L. CD-Struktur	162

1. Einleitung

Lithium-Ionen-Akkumulatoren befinden sich mittlerweile in einer Vielzahl unserer elektronischen Geräte. Aus vielen Bereichen des Alltags sind diese Akkumulatoren nicht mehr wegzudenken. Auch im Bereich der Mobilität nimmt der Einfluss von leistungsstarken und hochenergetischen Batterien immer weiter zu. Nicht nur der PKW-Branche, sondern auch der Bereich der Nutzfahrzeuge setzen immer mehr Hersteller auf die Lithium-Ionen-Technologie. Auf lange Sicht sollen die Verbrennungsmotoren durch effiziente und CO₂-neutrale Elektromotoren abgelöst werden. Hierfür bilden Lithium-Ionen-Batterien zum aktuellen Zeitpunkt die Grundlage des Energiespeichers. Es werden viele einzelne Zellen benötigt, welche zu Modulen verschaltet werden. Elektroautos haben, limitiert durch den Akkumulator, nur eine begrenzte Lebensdauer. Hinzu kommt, dass die Leistungsfähigkeit einer Batterie im Laufe des Betriebs abnimmt [7, vgl. S. 408].

Die Forschungsgruppe Sensorik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) Hamburg hat sich unter anderem zur Aufgabe gemacht, die Überwachung von Batteriezellen zu verbessern und dadurch die Lebenszeit dieser zu verlängern. Hierfür setzt das Forschungsteam auf die Analyse der komplexen Impedanzantwort der Zelle, welche mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie (EIS) ermittelt werden kann. Die aktuell hierfür auf dem Markt erhältlichen Geräte sind meist großformatige und kostspielige Labormessinstrumente. Diese Geräte sind üblicherweise auf Einzelzellmessungen ausgelegt, was jedoch bei einer Vielzahl an verschalteten Zellen nicht sinnvoll umzusetzen ist. Die Forschungsgruppe ist aktuell in der Entwicklung eines kleinen und kompakten Messinstruments zur elektrochemischen Impedanzspektroskopie (EIS)-Messung direkt an den Zellen eines Elektrofahrzeugs.

1.1. Zielsetzung

An diesem Punkt setzt diese Masterarbeit an. Es wird ein von einem Batteriezulieferer zur Verfügung gestelltes Batteriemodul untersucht werden. Hierbei soll analysiert werden, wie die Parallelverschaltung von Zellen sich auf das Messverfahren der EIS auswirkt. Es soll ein mechanischer Nachbau des Moduls entstehen, an dem verschiedene elektrische

Veränderungen und Alterungszustände praktisch nachgestellt werden können. Es ist ein geeignetes Simulationsverfahren zu wählen um hiermit die Zellverschaltung nachzubilden. Typische bzw. signifikante Situationen sollen sowohl am Nachbau als auch in der Simulation nachgestellt und verglichen werden.

1.2. Gliederung

Diese Arbeit ist in sechs Abschnitte gegliedert. Kapitel 1 bildet die Einleitung und die Zielsetzung der Arbeit. In Kapitel 2 werden grundlegende technische Zusammenhänge erläutert, welche zum Verständnis der Arbeit beitragen. Kapitel 3 befasst sich mit dem mechanischen Aufbau der Batteriemodule und deren Konstruktion. Abschnitt 4 handelt von den gegebenen elektrischen Parametern und deren Einordnung in der Simulation. Ebenso wird hier die Auswahl des Simulationstools beschrieben und der grundlegende Simulationsaufbau erläutert. In Kapitel 5 wird der Versuchsaufbau simuliert, sowie verschiedene Parameteränderungen simulativ überprüft. In Kapitel 6 werden die zuvor simulierten Ergebnisse am praktischen Versuchsaufbau nachgestellt. Das Kapitel 7 befasst sich mit der Auswertung der Simulations- und Versuchsergebnisse und dessen Einordnung in den Gesamtzusammenhang. Auch gibt dieses Kapitel einen Überblick über die Verbesserungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel werden Hintergrund- und Basisinformationen zu den in der Arbeit verwendeten Themengebieten vermittelt.

2.1. Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Seit Mitte der 90er Jahre werden Lithium-Ionen (Li-Ion)-Akkumulatoren in kommerziellen Geräten verwendet, zunächst im Bereich der tragbaren Geräte. Durch die hohe Energiedichte und die gute Strombelastbarkeit dieser Zellen ist die Li-Ion-Technologie zum aktuellen Zeitpunkt fast konkurrenzlos in die Elektromobilität eingezogen. Um hier Strom und Spannung in ausreichendem Maße zur Verfügung zu stellen, werden viele hundert, teilweise sogar tausend Zellen in Reihen- und Parallelschaltung zusammengeschaltet, um die nötige Kapazität, Spannung und Abgabeleistung vorzuhalten. Nicht nur in der Elektromobilität sind Li-Ion-Batterien beliebt. Auch im Bereich der Energiespeicherung sind Li-Ion-Batterien vielfach im Einsatz. Durch den starken Ausbau der erneuerbaren Energien werden Speichersysteme immer interessanter. Sowohl im großen Stil mit Speicheranlagen für Solaranlagen mit Leistungen von 5 - 10 kWh als auch für kleine Balkonkraftwerke oder mobile Powerstations mit Leistungen zwischen 0,2 kWh - 3 kWh sind Batterien der Li-Ion-Technologie zu finden.

Kommerzielle Lithium-Ionen-Zellen bieten eine hohe Energiedichte und eine Nennspannung von 3,6 bis 3,7 Volt [11]. Es gibt verschiedene chemische Zusammensetzungen, welche verschiedene Vor- und Nachteile bieten und Einfluss auf die Eigenschaften der Zelle haben. Jedoch haben diese Zellen eins gemeinsam, einige der chemischen Bestandteile sind giftig für die Umwelt und müssen ordnungsgemäß recycelt werden. Auch ist die Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien begrenzt. Es muss über die Betriebszeit mit Kapazitätsverlusten gerechnet werden, bis die Zelle nach maximal 15 Jahren nicht mehr sinnvoll eingesetzt werden kann [8, vgl. S.144]. Um einer frühzeitigen Verkürzung der Lebensdauer vorzubeugen, ist eine Überwachung und Steuerung der Lade- und Entladezyklen nötig.

2.1.1. Mechanischer Aufbau

Es gibt verschiedene Bauarten von Lithium-Ionen-Zellen, welche elektrische, mechanische sowie thermische Vor und Nachteile besitzen [10].

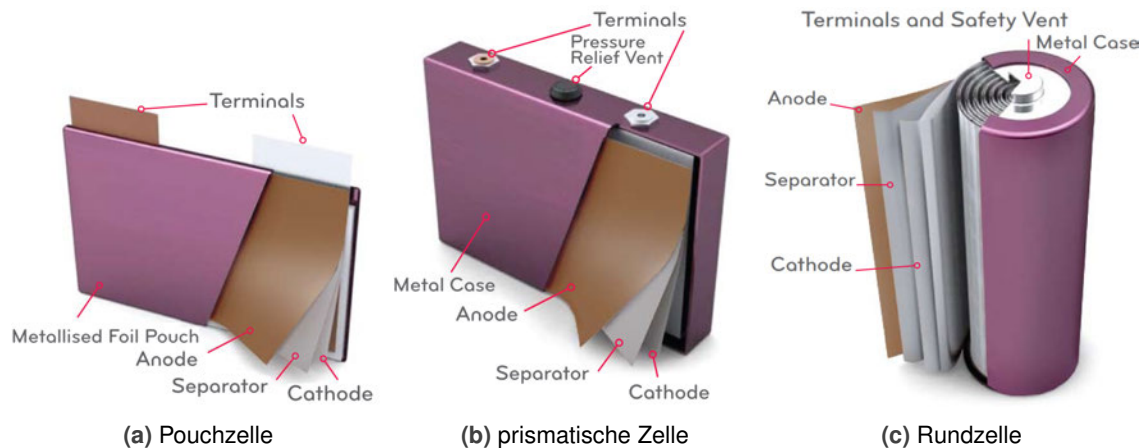


Abbildung 2.1.: Verschiedene Zelltypen im Vergleich [2]

Pouchzellen

Pouchzellen (Abbildung 2.1 a) haben eine sehr hohe Energiedichte und sie haben ein weiches Gehäuse aus Folie. Dies macht diese Zellen zu einem leichter als andere Bauformen, auf der anderen Seite aber auch anfälliger für mechanische Beschädigungen. Die Elektroden werden meist auf der gleichen Seite herausgeführt. Durch das dünne Foliengehäuse ist eine Kühlung der Zellen einfach umzusetzen. Eingesetzt wird diese Zellenform viel in mobilen Geräten, da die Größe der Zellen flexibel gestaltet werden kann.

Prismatische Zelle

Prismatische Zellen (Abbildung 2.1 b) haben im Vergleich zu den anderen Bauarten die geringste Energiedichte. Durch ihre feste rechteckige Bauform ist die mechanische Verschaltung der Zellen deutlich einfacher. Durch die rechteckige Form können diese ohne Zwischenräume aneinander platziert werden. Die Kühlung dieser Zellen ist durch das feste Gehäuse jedoch schwieriger als bei Pouchzellen.

Rundzellen

Bei Pouchzellen und prismatischen Zellen werden in der Produktion mehrere Lagen rechteckiger Abschnitte der Materialien aufeinander platziert. Rundzellen (Abbildung 2.1 c) wer-

den nach einem anderen Prinzip gefertigt. Bei diesen wird ein langer Streifen der Materialien aufgerollt. Diese Rolle wird dann in deinem festen Zylindergehäuse eingesetzt. Durch das runde Format ist diese Zelle gegen äußere mechanische Beanspruchung sehr robust. Die Kühlung des Kerns einer Rundzelle ist nicht so einfach umzusetzen, da dieser von vielen Lagen Material umgeben ist. Beim Bau von Zellpaketen kann der Freiraum zwischen den Rundzellen jedoch gut für die Kühlung der Rundzellen genutzt werden.

2.1.2. Chemischer Aufbau

Der Zusammenbau einer elektrochemischen Zelle besteht aus vier Hauptbestandteilen. Neben der Kathode und der Anode sind vor allem das Elektrolyt und der Separator aus vielerlei Hinsicht interessant und werden hier betrachtet. Der Schlüssel einer gut funktionierenden und sicheren Lithium-Ionen-Zelle ist eine gut aufeinander abgestimmte Wahl der Materialien.

Kathode Die Kathode ist die positive Elektrode der Zelle und das in kommerziellen Zellen wahrscheinlich „am weitesten verbreitete Kathodenmaterial ist Lithium-Kobaltoxid (LiCoO_2)“ [7, S. 32]. Dieses Material wird auf einen metallischen Stromableiter aufgebracht. Dieser ist vorrangig aus Aluminium, da dieses Metall eine gute elektrische Leitfähigkeit aufweist und eine alternative aus Kupfer korrodieren würde.

Anode Die Anode ist die negative Elektrode der Zelle. Das gebräuchlichste Material in kommerziellen Zellen ist Graphit. Das Stromableitermaterial der Anode besteht hingegen aus Kupfer, da Aluminium bei niedrigem Potential mit dem Lithium reagieren würde und dies sich daher nicht als Legierung für die Anode eignet.

Elektrolyt Der Elektrolyt befindet sich als Leiter zwischen den Elektroden und ermöglicht den Elektronenfluss durch die Zelle. Bei Lithium-Ionen-Zellen handelt es sich um eine Lösung aus Lithium-Salz und einem organischen Lösungsmittel. Dies ermöglicht die Bewegung der Lithium-Ionen zwischen den Elektroden [7, Kap. 3.3]. Dieser Elektrolyt muss eine hohe chemische Stabilität aufweisen und gut kompatibel mit den anderen Zellmaterialien sein. Hierfür wird zur Zeit fast ausschließlich Lithium-Hexafluorophosphat (LiPF_6) eingesetzt [7, Kap. 6.2.2].

Separator Um einen direkten Kontakt der Elektroden zu verhindern, wird zwischen diesen eine Membran eingefügt. Diese Membran ist mikroporös und somit für die Lithium-

Ionen durchlässig. Verwendete Materialien hierfür sind Kunststoffe. Zum Beispiel Polyethylen [7, Kap. 3.3].

2.1.3. Lebensdauer und Alterung

Die Lebensdauer einer Zelle hängt maßgeblich von der Chemie und der mechanischen Fertigung der Zelle ab. Wie lange die Kapazität einer Lithium-Ionen-Zelle zur Verfügung steht, hängt aber ebenso von Ihrer Belastung und Lagerung ab. Unterschieden wird im Bereich der Alterung in zwei Kategorien. Die kalendarische Alterung und die zyklische Alterung.

Kalendarische Alterung Die kalendarische Alterung findet immer statt, egal ob die Zelle verwendet wird oder nicht. Dies bedeutet jedoch nicht, dass diese umweltunabhängig ist. Die Geschwindigkeit der Alterung wird maßgeblich durch die Lagertemperatur und den State of Charge (SoC) während der Lagerung beeinflusst werden. Bei hohen Temperaturen ist die elektrochemische Zelle reaktionsfreudiger. Dies führt zu einem schnelleren Ablaufen von Nebenreaktionen. Die vermehrte Bildung einer Solid Electrolyte Interphase (SEI)-Schicht ist der Prozess, welcher den größten Einfluss auf die Lebensdauer hat. Eine Verdickung dieser Schicht sorgt für einen höheren Zelleninnenwiderstand und kann im fortlaufenden Betrieb zu weiteren Problemen führen. Auch der SoC während der Lagerung spielt hierbei eine Rolle, da bei hohen Spannungen die Nebenreaktionen im Elektrolyten verstärkt auftreten [3].

Zyklische Alterung Die zyklische Alterung beschreibt die Alterung in Abhängigkeit der Verwendung der Zelle. Entscheidende Faktoren für die zyklische Alterung sind die Umgebungstemperatur sowie die Art der Entladung selber. Die Temperatur verhält sich gegensätzlich zur Lagertemperatur. So ist das geringste Altern der Zelle in einem Temperaturbereich von 15-25 °C zu beobachten. Der einflussreichste Faktor auf die zyklische Alterung ist die Zykluskapazität. Hiermit ist die Differenz des SoC zwischen Beginn und Ende des Zyklus zu verstehen. Je geringer die Zykluskapazität ist, desto geringer ist die Alterung der Zelle. Rekuperation trägt dazu bei die Zykluskapazität und somit die, der Batterie absolut entnommenen, Energie gering zu halten und trägt damit dazu bei die Zellalterung zu minimieren [8].

2.1.4. Ersatzschaltbilder

Elektrische Ersatzschaltbilder sind neben chemischen und bilanzierenden Modellen eine Möglichkeit, Zellen und deren Effekte nachzubilden. Da in dem Projekt die elektrischen und messtechnischen Schwierigkeiten betrachtet werden, ist diese Methode der Nachbildung am besten geeignet. Je nach gewünschter Genauigkeit und Geschwindigkeit gibt es verschiedene Batteriemodelle, die das dynamische Verhalten der Zelle nachbilden. Hierbei stehen Genauigkeit und Geschwindigkeit im Gegensatz zueinander [9]. Die in der Elektrochemie am häufigsten verwendeten Ersatzschaltbilder sind verschiedene Formen des Randles-Netzwerks.

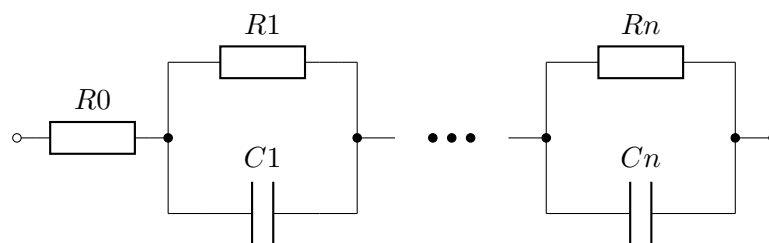


Abbildung 2.2.: RC-Glied nach Randles

Wie in Abbildung 2.2 zu sehen, besteht das Randles-Netzwerk aus einem Reihenwiderstand und dazu in Reihe geschalteten Blöcken aus parallelen Widerständen und Kondensatoren. Die Menge an RC-Gliedern hängt hierbei von der Art des elektrochemischen Systems und der gewünschten Nachbildungsgenauigkeit ab [1]. Wenn nur ein RC-Glied verwendet wird, wird in der Literatur häufig von dem Thevenin-Modell gesprochen [4].

2.1.5. Verwendung von Li-Ion-Zellen in der Automobilbranche

Neben der Auswahl der passenden Zellchemie stellt sich der Automobilsektor immer wieder weitere große Fragen im Bereich des Akkumulators für Elektrofahrzeuge. Vor einigen Jahren war die Rundzelle die am weitesten entwickelte Bauform der Lithium-Ionen-Zellen. Diese hochentwickelten Zellen zeichnen sich durch ihre hohe Energiedichte aus. Mittlerweile liefert die Pouchzelle ähnlich gute Werte in der Energiedichte und zeigt aufgrund der großen Oberfläche ein besseres thermisches Verhalten [vgl. 6, S. 20 f.]. Es darf jedoch nicht nur die einzelne Zelle berücksichtigt werden, sondern es muss bereits bei der Entscheidung des Batterieformats der gesamte Modul- und Systemaufbau betrachtet werden. Die Kühlung und Montage von prismatischen Zellen unterscheidet sich grundlegend von der Kühlung von Pouchzellen oder Rundzellen [vgl. 6, S. 22, Abbildung 11].

2.2. Elektrochemische Impedanzspektroskopie

Die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) ist ein Verfahren zur Bestimmung des Frequenzverhaltens von Systemen. Dieses Verfahren findet im Bereich der Batterietechnik ein großes Anwendungsfeld. Über das Frequenzverhalten der Zelle im Millihertz- bis Kilohertz-Bereich und damit der komplexen Impedanz lassen sich verschiedene Rückschlüsse über die internen Prozesse und den Zustand der vermessenen Zelle treffen.

2.2.1. Methoden

Es gibt zwei verschiedene Messmethoden in der Impedanzspektroskopie. Die potentiostatische Messmethode verwendet zur Anregung des Systems eine Wechselspannung und wertet die Systemantwort in Form des Stroms aus. Die zweite Methode nennt sich galvanostatisch. Bei dieser Methode wird ein Wechselstrom in das System gespeist und die Spannungsantwort ausgewertet. Bei beiden liefert die Division der Signale die frequenzabhängige Impedanz als komplexen Wert zurück.

$$Z(\omega) = \frac{V(\omega)}{I(\omega)} \quad (2.1)$$

Diese Impedanzmessung wird in der Regel mit vielen verschiedenen Frequenzen durchgeführt. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt entweder als Bode-Plot wie in Abbildung 2.3 oder häufiger verwendet in der Nyquist-Darstellung wie in Abbildung 2.4.

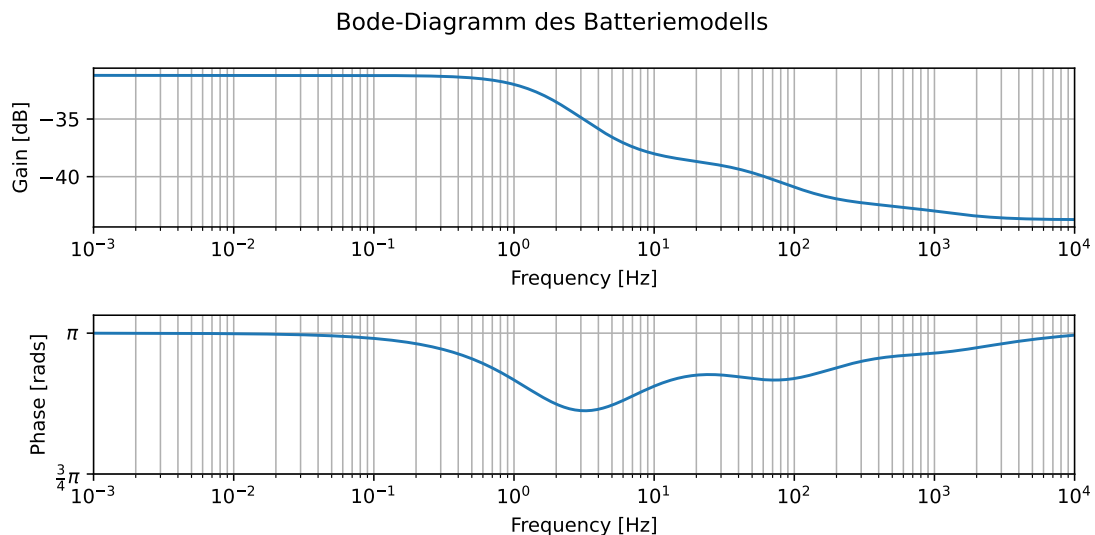


Abbildung 2.3.: Bodediagramm eines Li-Ion-Batteriemodells mit 3 RC-Gliedern

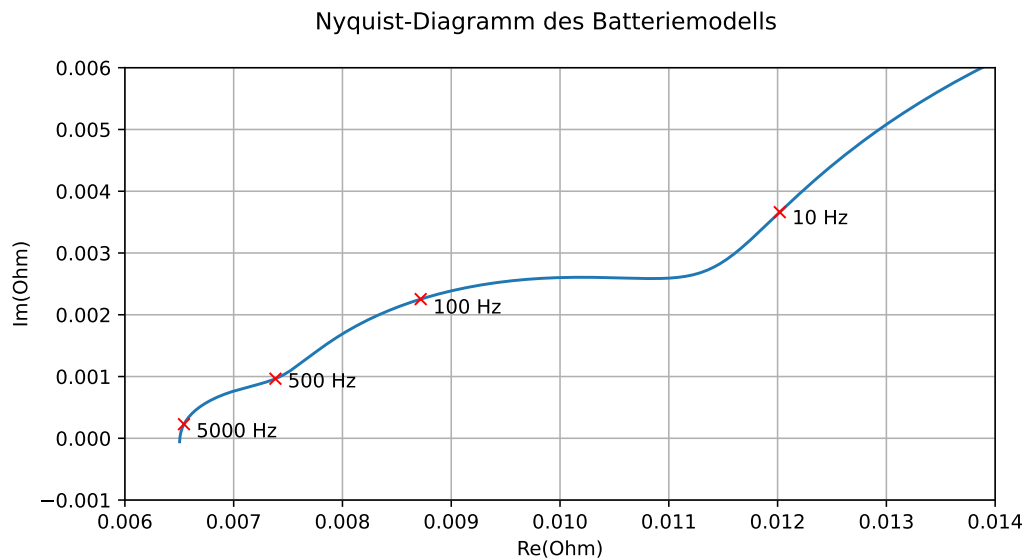


Abbildung 2.4.: Nyquistdiagramm eines Li-Ion-Batteriemodells mit 3 RC-Gliedern

2.2.2. Zielsetzung

Ziel der Impedanzspektroskopie in der Batterietechnik ist unter anderem die Überwachung der Zellzustände und somit ein frühzeitiges Identifizieren von problematischen Zuständen einzelner Zellen. Im Laborbereich dient die Impedanzspektroskopie innerhalb der Forschung und Entwicklung zum Erfassen von Zellparametern und deren Analyse. Aber auch im Bereich der Automobilindustrie kann die EIS Anwendung finden. So kann z.B. die Lebensdauer von Batterien deutlich gesteigert werden, wenn die Zellzustände genau und engmaschig überwacht werden. Auch wäre es denkbar, im Fehlerfall die Einzelzelle oder das fehlerhafte Modul zu identifizieren und bei Bedarf auszutauschen, sodass die Gesamtbatterie ein zweites oder verlängertes Leben erhält.

2.3. Knotenpotentialanalyse

Die Knotenpotentialanalyse oder das Knotenpotentialverfahren ist eine mathematische Methode, um Zweigströme in komplexen Netzwerken zu ermitteln. Hierfür werden Zweige zusammengefasst und Spannungsquellen in äquivalente Stromquellen umgewandelt. Die Lösung der Zweigströme besteht anschließend aus dem Anwenden des Knotensatzes. Zugrunde liegen dieser Methode die Kirchhoffschen Gesetze 1 und 2: Die Knotenregel nach Gleichung 2.2 besagt, dass an einem elektrischen Verbindungspunkt (Knoten) wie in

Abbildung 2.5a die eingehenden Ströme immer den ausgehenden Strömen entsprechen müssen. Umgeformt zu Null ergibt die Knotenregel die Gleichung 2.3.

$$\sum I_{\text{zu}} = \sum I_{\text{ab}} \quad (2.2)$$

$$0 = I_0 + I_1 + \dots + I_n \quad (2.3)$$

Die Maschenregel in Gleichung 2.4 gibt vor, dass die Summe aller Spannungen in einem kreisförmigen Stromweg (Masche) wie in Abbildung 2.5b Null ergeben müssen.

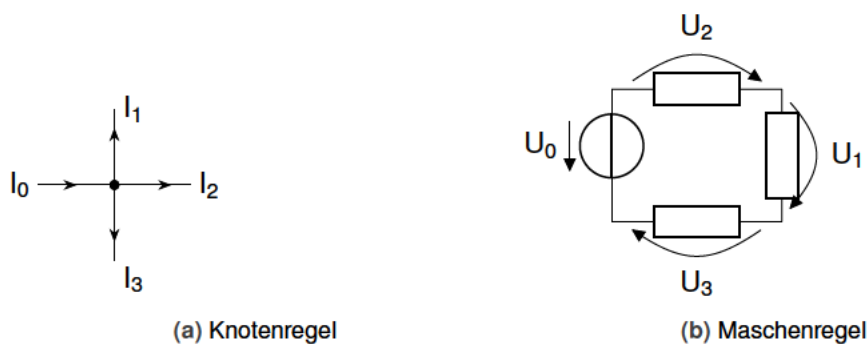


Abbildung 2.5.: Kirchhoffsche Gesetze

$$0 = U_0 + U_1 + \dots + U_n \quad (2.4)$$

Die Gesetze der Gleichungen 2.4 und 2.2 beruhen beide auf dem Erhaltungssatz der Energie.

Das Knotenpotentialverfahren ermöglicht die Bestimmung der Ströme aller Teilzweige eines elektrischen Netzwerks mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems. Dies hat gegenüber der normalen Netzwerkanalyse den Vorteil, dass weniger Gleichungen aufgestellt und gelöst werden müssen. Das Gleichungssystem besteht aus einer Leitwertmatrix, wie in Gleichung 2.5 zu sehen, einem Potentialvektor dargestellt in Gleichung 2.6 und einem Stromvektor, zu sehen in Gleichung 2.7. Die Leitwertmatrix beinhaltet alle Beziehungen der Knotenpunkte zueinander und zu sich selbst. Der Potentialvektor ist das Ergebnis des

Gleichungssystem und liefert uns die Knotenspannungen. Der Stromvektor beinhaltet die Knotenströme des Systems.

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & G_{nn} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

$$U = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

$$I = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Das Gleichungssystem sieht dann aus, wie in 2.9 dargestellt. Zu beachten beim Aufstellen der Leitwertmatrix ist, dass die Koppelleitwerte als negative Werte eingetragen werden.

$$G \cdot U = I \quad (2.8)$$

$$\begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & \dots & G_{1n} \\ G_{21} & G_{22} & \dots & G_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{n1} & G_{n2} & \dots & G_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

3. Konstruktion

Das zu untersuchende Batteriepaket stammt von einem Automobilzulieferer. Es handelt sich um 36 Rundzellen des Formats 21700, welche parallel verschaltet werden. Um mehr Freiheiten und Möglichkeiten in der Untersuchung und Vermessung des Batteriemoduls zu erhalten, ist ein Nachbau dieses Moduls sinnvoll. Dies eröffnet die Möglichkeit, Zellverbinder einzeln zu vermessen oder Einzelzellen gegen gealterte oder anderweitig veränderte Zellen oder Batteriedummys auszutauschen, um die Verschaltung der Zellen und deren Auswirkungen auf die EIS genauer zu betrachten. Auch ermöglicht es das Bestücken eines ganzen Zellmoduls mit Dummy-Zellen, um für Messungen einen fest definierten Zustand herzustellen.

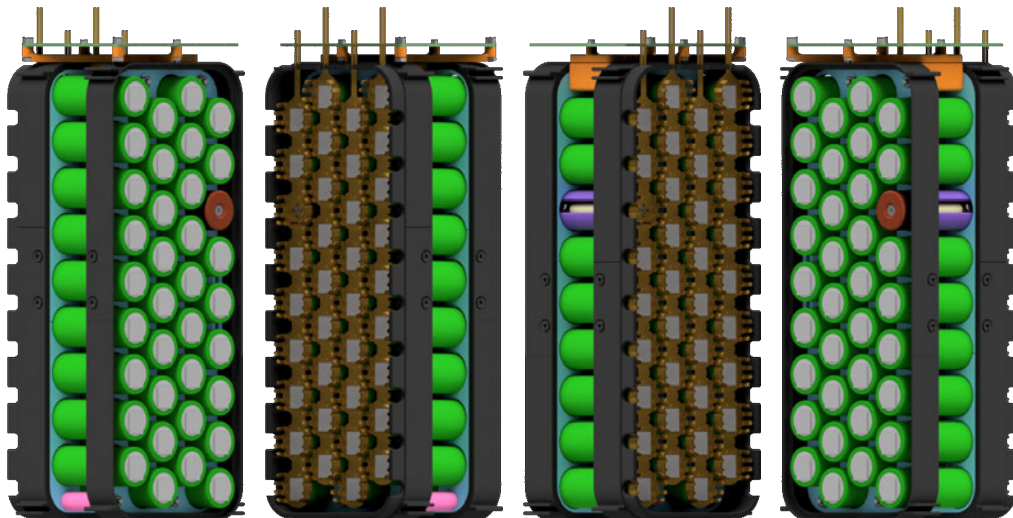


Abbildung 3.1.: Rendering des nachgebauten Batteriemoduls

3.1. Betrachtung des Gesamtkonzepts

Das Batteriemodul, das in Abbildung 3.1 zu sehen ist, ist ein steckbar, erweiterbares System. In diesem System können je nach Anwendung mehrere Module parallel und in Reihe geschaltet werden. Dieses System besteht aus den Zellmodulen und Endplatten, welche

die Stromentnahme ermöglichen. Auf den Zellmodulen sind jeweils 4 Seitenabgriffe vorgesehen, um Messelektronik anzuschließen. Wie diese Elektronik zur Zeit aussieht, ist der Forschungsgruppe nicht bekannt, jedoch wird diese bei der Überwachung mittels EIS auch nicht verwendet. Das Modul selber besteht aus 4 Teilen. Das Gehäuse ist ein mittels Spritzguss gefertigter **Kunststoffrahmen**. Dieser sieht Führungen vor, um mehrere Module aneinander zu reihen sowie zu stapeln. In dem Zellrahmen sitzen die 36 **Einzelzellen** im Format 21700 ohne Lötflächen oder Nickelbänder. Ein **Polystyrolkern** umfasst die Einzelzellen und hält diese fest in Position. Dies geschieht allein durch die Klemmung der Zellen im Schaumkern. Die elektrische Verbindung der Zellmodule wird durch 4 **Zellverbinder** hergestellt. Hierbei handelt es sich um jeweils 9 Zellen mit auf dem positiven Pol aufgeschweißten Metallstreifen. Diese bilden mit ihrer kronkorkenartigen Struktur die Verbindung zu den negativen Polen der Zellen des darüberliegenden Moduls. Die Zellverbinder bilden auch den Seitenabgriff am Modul.

3.2. Modulrahmen

Für den Nachbau des Modulrahmens wurden bei dem Projektpartner eine entsprechende technische Zeichnungen angefragt. Anhand der Zeichnung wurde ein Modulrahmen konstruiert, der so modifiziert wurde, dass er einfach mittels 3D-Druckverfahrens zu fertigen ist und die Möglichkeit bietet, alle Zellen einzeln zu erreichen. Hierzu wurde der Rahmen in eine Oberseite und eine Unterseite geteilt. Ebenfalls wurde der Kern, der die Position der Zellen vorgibt, mit in den Modulrahmen integriert. Dies ermöglicht Zugriff auf den Mittelteil der Zelldummys.

Da der zur Verfügung stehende 3D-Drucker vom Bauraum begrenzt ist und das Modul zu groß ist, um im Ganzen gedruckt werden zu können, wurde eine Zerteilung der Ober- und Unterhälfte in jeweils 2 Teile vorgenommen, welche anschließend mit Schrauben verbunden werden. Die zwei Hälften werden mit ebenfalls 3D-gedruckten Abstandshülsen und entsprechend langen Schrauben auf das korrekte Maß montiert.

3.3. Zellverbinder

Die originalen Zellverbinder sind aus einem speziell für Steckverbinder gefertigtem Material Wieland-K55. Hierbei handelt es sich um eine spezielle Kupferlegierung $CuNi3Si1Mg$ das Datenblatt ist im Anhang auf Seite 154 zu finden. Dieses Material kombiniert die guten elektrischen Eigenschaften von Kupfer mit einer erhöhten Korrosionsbeständigkeit und

einem für Steckverbinder geeigneten Elastizitätsmodul. Da dieses Material nicht handelsüblich in Kleinstmengen zu beschaffen ist, wurden die Zellverbinder des Nachbaus aus Messingblech gefertigt. Die Materialstärke beträgt wie bei dem Original 0,5 mm. Durch die Verwendung von Messing ist in den Messungen mit einem leicht erhöhten Widerstand zu rechnen. Es wurde eine Blechbiegekonstruktion angefertigt. Die Abwicklung dieser wurde anschließend mittels Wasserstrahlschneidens extern gefertigt. Für die Prototypen werden die Biegungen der kronenartigen Struktur von Hand vorgenommen. Auch dieses Bauteil musste für Vermessungszwecke modifiziert werden. So wurden für die Montage der Zelldummys Bohrungen für Schrauben vorgesehen. Da die Zellen im Original mit dem Zellverbinder verschweißt sind, diese technische Möglichkeit an der HAW jedoch nicht besteht, wurde der Zellverbinder um einen Schlitz erweitert, welcher es ermöglicht, eine Zelle mit Lötflanke an diesen anzulöten. Auch wurde für weitere Messungen zwischen jeder Zelle ein Messabgriff mittels Flachstecker vorgesehen.

3.4. Zelldummy

Um gezielte Veränderungen oder einen definierten Zustand im Modul vornehmen zu können, werden Zelldummys konstruiert. Diese sitzen im Modul an der Position der Einzelzelle und bilden den gleichen elektrischen Kontakt zu anderen Modulen oder dem Zellverbinder wie die originale Zelle. Die Dummys ermöglichen aber das Herausführen der einzelnen Pole aus dem Modul. Die Endstücke sind aus Kupfer gefertigte Drehteile, die wie in Abbildung 3.2 mittels Schrauben und eines Kunststoffdistanzhalters nicht elektrisch leitend miteinander verbunden werden. Direkt an die Kupferkontakte werden Lötösen verschraubt, um die Anbringung von Kabeln oder elektrischen Dummyelementen zu ermöglichen. So ist innerhalb des Zelldummys beispielsweise genug Platz, um eine ohmsche Zellenachbildung zu integrieren.

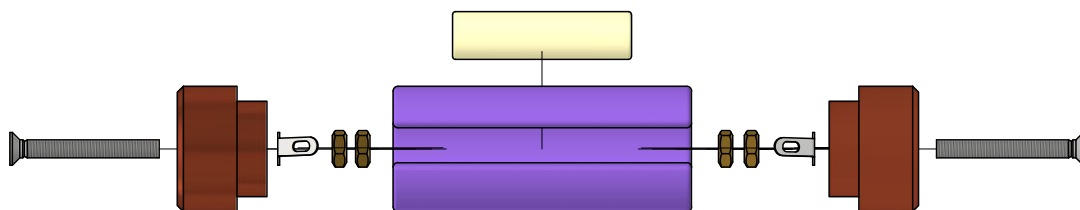


Abbildung 3.2.: Zelldummy als Explosionszeichnung

3.5. Endplatte

Die Endplatte der Module ermöglicht im Original die elektrische Verbindung mehrerer übereinander liegender Module. Auch ermöglicht diese Platte den Hochstromabgriff für das Fahrzeug. Da sich die Vermessung zunächst auf ein Modul begrenzt, werden die Endplatten so konstruiert, dass die Zellen eines Moduls daran angeschlossen werden können. Für den negativen Pol werden Zellverbinder verwendet und diese auf eine Kupferplatte mit 2 mm Dicke verschraubt. Am positiven Pol besitzen die Module den Zellverbinder. Um zu diesen Kontakt herzustellen, werden Kupferdummys ähnlich zu den Zelldummys auf die Kupferplatte verschraubt.

3.6. Platinenmontageplatte

Um die Platine mit der Messelektronik an dem Batteriemodul zu montieren, bedarf es einer passenden Halterung. Da die Platine an die Seitenabgriffe der Zellverbinder angeschlossen werden soll, wird diese auf der schmalen Seite des Moduls montiert. Der hierfür konstruierte Halter ersetzt die Abstandshalter zwischen den Modulhälften. Er benötigt dadurch keine weiteren Montagelöcher. Der Halter selbst besteht aus zwei Teilen, um eine vereinfachte Fertigung mit dem 3D-Drucker zu ermöglichen.

4. Modellbildung und Simulationsgrundlagen

4.1. Modellparameter

In diesem Abschnitt werden die Modellparameter anhand des originalen Zellmoduls ermittelt und anschließend mit denen des nachgebauten Zellmoduls verglichen.

4.1.1. Übergangswiderstände

Der Projektpartner hat in Gesprächen Daten bezüglich der zu erwartenden Übergangswiderstände zwischen den Zellen bereit gestellt. Bei parallelgeschalteten Zellen über den Kronenstreifen sind Übergangswiderstände zwischen $0,5\text{ m}\Omega$ und $1\text{ m}\Omega$ zu erwarten. Bei in Serie geschalteten Zellen beträgt der Übergangswiderstand $0,1\text{ m}\Omega$.

Die Übergangswiderstände des original Kronenstreifens wurden nachgemessen, um diese mit den Werten des Nachbaus zu vergleichen. Gemessen wurde mit einer 4-Leiter-Messung und einem Messstrom von 1 Ampere. In Tabelle 4.1 sind die Widerstände zwischen den Anbindungspunkten des positiven Pols der Zelle zu sehen. Es wurden jeweils die Widerstände zwischen jeder Zelle ermittelt.

Tabelle 4.1.: Übergangswiderstände des original Kronenstreifens in Milliohm [$\text{m}\Omega$]

	Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3	Zelle 4	Zelle 5	Zelle 6	Zelle 7	Zelle 8
Zelle 1	0	0,365	0,715	1,080	1,423	1,755	2,111	2,477
Zelle 2	0,365	0	0,364	0,713	1,083	1,433	1,746	2,111
Zelle 3	0,715	0,364	0	0,374	0,716	1,060	1,428	1,779
Zelle 4	1,080	0,713	0,374	0	0,378	0,724	1,044	1,402
Zelle 5	1,423	1,083	0,716	0,378	0	0,373	0,664	1,009
Zelle 6	1,755	1,433	1,060	0,724	0,373	0	0,377	0,740
Zelle 7	2,111	1,746	1,428	1,044	0,664	0,377	0	0,379
Zelle 8	2,477	2,111	1,779	1,402	1,009	0,740	0,379	0

Die gleiche Messung wurde auch mit dem nachgebauten Kronenstreifen aus Messing durchgeführt. In Tabelle 4.2 sind die Messergebnisse zu sehen. Zu erkennen ist im Vergleich zum Original ein leicht erhöhter Übergangswiderstand über alle Messungen hinweg.

Tabelle 4.2.: Übergangswiderstände des Messing-Kronenstreifens in Milliohm [$\text{m}\Omega$]

	Zelle 1	Zelle 2	Zelle 3	Zelle 4	Zelle 5	Zelle 6	Zelle 7	Zelle 8
Zelle 1	0	0,435	0,885	1,331	1,791	2,239	2,690	2,477
Zelle 2	0,435	0	0,432	0,883	1,333	1,782	2,232	2,111
Zelle 3	0,885	0,432	0	0,441	0,892	1,338	1,787	1,779
Zelle 4	1,331	0,883	0,441	0	0,438	0,899	1,345	1,402
Zelle 5	1,791	1,333	0,892	0,438	0	0,445	0,902	1,009
Zelle 6	2,239	1,782	1,338	0,899	0,445	0	0,443	0,740
Zelle 7	2,690	2,232	1,787	1,345	0,902	0,443	0	0,440
Zelle 8	3,133	2,678	2,231	1,793	1,345	0,896	0,440	0

Jedoch liegen auch die Messergebnisse des nachgebauten Kronenstreifens unter den Angaben des Projektpartners. In der Simulation wird ein Übergangswiderstand von $0,5 \text{ m}\Omega$ angenommen. Dies entspricht dem Minimalwert des Partners und liegt leicht über den ermittelten Werten des Nachbaus.

4.1.2. Zellimpedanz

Die Innenwiderstände der Lithium-Ionen-Zellen wurden selbst ermittelt. Zunächst wurden Datenblattangaben verschiedener 21700er Zellen verglichen, um einen Erwartungswert zu erhalten. Anschließend wurden die für den Batteriedummy zur Verfügung stehenden Zellen mittels eines EIS-Meters vermessen. Nach Angaben des Produktionspartners hat die Einzelzelle selbst einen Innenwiderstand von $9 \text{ m}\Omega$ bei 1 kHz . Die im Versuchsaufbau verwendeten Zellen haben nach Datenblatt einen Innenwiderstand von $8 \text{ m}\Omega$ bei 1 kHz .

Eine Vermessung mittels EIS-Meter der uns zur Verfügung stehenden Molicell 21700-P45B hat der Projektpartner bereits durchgeführt. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die in Tabelle 4.3 gezeigten Werte für eine R-RC-Nachbildung der Zelle ermittelt.

Tabelle 4.3.: Parameter für das R-RC-Modell der Molicell 21700-P45B

R_0	$6,5 \text{ m}\Omega$
R_1	$3,9 \text{ m}\Omega$
C_1	$455,3 \text{ mF}$

Im weiteren Verlauf der Arbeit werden, wenn nichts Abweichendes beschrieben ist, diese Werte für Simulationen mit einem R-RC-Glied verwendet. Alle Simulationen, die auf

einer rein ohmschen Darstellung der Zelle basieren, werden mit einem Zelleninnenwiderstand von $11\text{ m}\Omega$ durchgeführt. Dieser Wert ergibt sich aus den Messdaten des ohmschen Zelldummys des Versuchsaufbaus aus Kapitel 6.2.1.

4.2. Mathematische Betrachtung mittels Knotenpotentialanalyse

Die Betrachtung mittels Knotenpotentialanalyse wird zunächst an einem vereinfachten Beispiel durchgeführt. Um es zunächst übersichtlich zu gestalten, wird eine Zellanordnung von 3×3 Zellen verwendet. Hierbei wird angenommen, dass jeweils drei der Zellen in einem Zellmodul in der selben logischen Zelle verbaut sind und somit mit dem Zellverbinder verbunden sind. Drei dieser Module sind wiederum zu einem String über die Zellverbinder verbunden. An den Kopfenden wird von einer idealen Endplatte ohne Innenwiderstand ausgegangen. Eine weitere Vereinfachung, die vorgenommen wird, ist die Annahme einer Wechselstromanalyse. Dies bedeutet, dass alle reinen DC-Spannungsquellen aus der Schaltung entfallen. Auch wird das einfachste Batteriemodell verwendet, indem nur ein rein ohmscher Innenwiderstand angenommen wird.

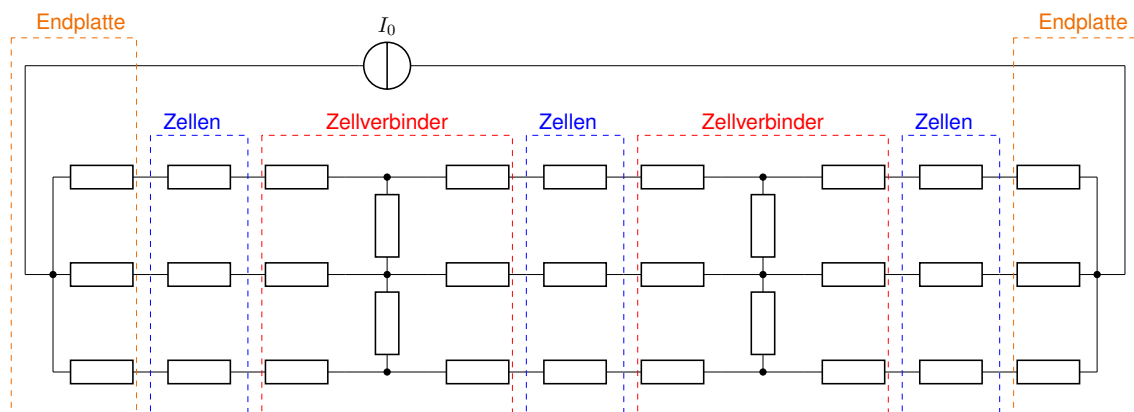


Abbildung 4.1.: Vereinfachtes Zellschaltbild mit 3 mal 3 Zellen und idealen Endplatten

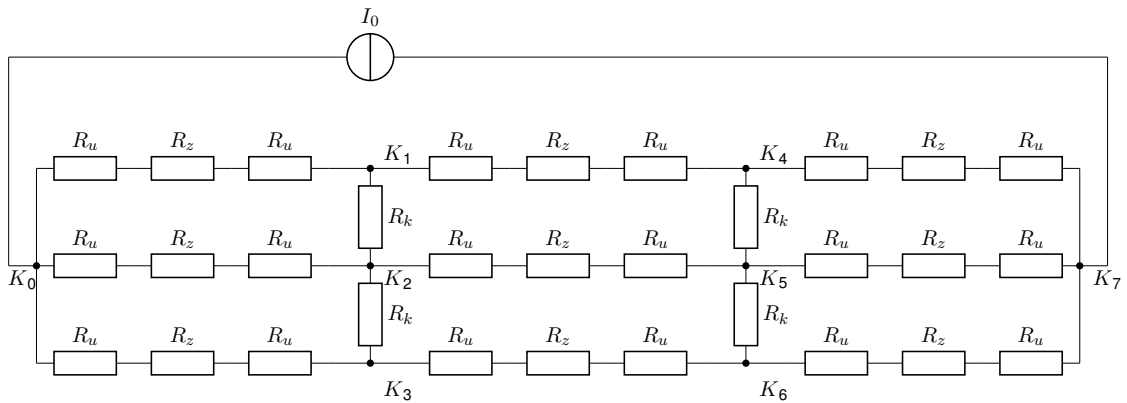


Abbildung 4.2.: Schaltung des mittels Knotenpotentialverfahren zu berechnenden Netzwerks

Im Rahmen der Vereinfachung wird in Abbildung 4.2 zunächst angenommen, dass alle Widerstände identisch sind. Dies ermöglicht die Zusammenfassung der Zellinnenwiderstände mit den Übergangswiderständen wie in Gleichung 4.1, sodass eine kompaktere Schaltung, wie in Abbildung 4.3 zu sehen, entsteht.

$$R_e = R_u + R_z + R_u = 2 \cdot R_u + R_z \quad (4.1)$$

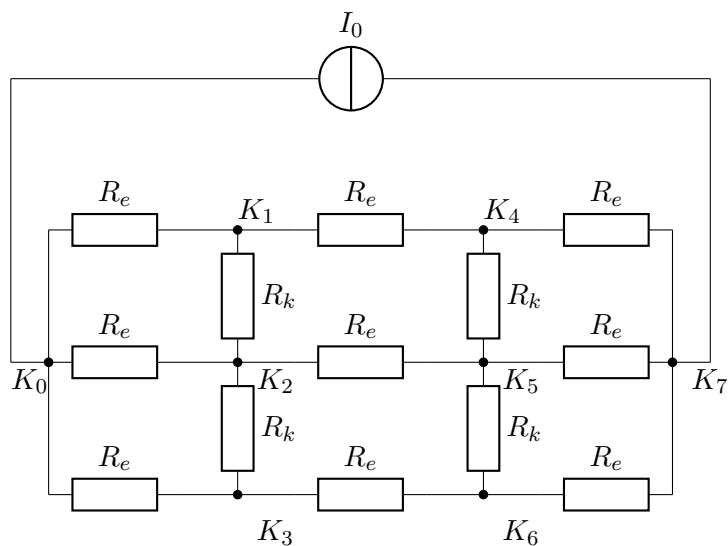


Abbildung 4.3.: Vereinfachte Schaltung mit zusammengefassten Widerständen

Aus dieser Schaltung lässt sich nun die Leitwertmatrix erstellen und der Stromvektor bestimmen. Das Ergebnis aus dem so entstehenden linearen Gleichungssystem (LGS) ist der Spannungsvektor mit den Knotenspannungen, wie in Gleichung 4.4 gezeigt.

$$G_e = \frac{1}{R_e} \quad G_k = \frac{1}{R_k} \quad (4.2)$$

$$G \cdot U = I \quad (4.3)$$

$$\begin{pmatrix} 3 \cdot G_e & -G_e & -G_e & -G_e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G_e & 2 \cdot G_e + G_k & -G_k & 0 & -G_e & 0 & 0 & 0 \\ -G_e & -G_k & 2 \cdot G_e + 2 \cdot G_k & -G_k & 0 & -G_e & 0 & 0 \\ -G_e & 0 & -G_k & 2 \cdot G_e + G_k & 0 & 0 & -G_e & 0 \\ 0 & -G_e & 0 & 0 & 2 \cdot G_e + G_k & -G_k & 0 & -G_e \\ 0 & 0 & -G_e & 0 & -G_k & 2 \cdot G_e + 2 \cdot G_k & -G_k & -G_e \\ 0 & 0 & 0 & -G_e & 0 & -G_k & 2 \cdot G_e + G_k & -G_e \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -G_e & -G_e & -G_e & 3 \cdot G_e \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{I_0}{2 \cdot G_u + G_z} \\ \frac{2 \cdot I_0}{3 \cdot (2 \cdot G_u + G_z)} \\ \frac{2 \cdot I_0}{3 \cdot (2 \cdot G_u + G_z)} \\ \frac{2 \cdot I_0}{3 \cdot (2 \cdot G_u + G_z)} \\ \frac{I_0}{3 \cdot (2 \cdot G_u + G_z)} \\ \frac{I_0}{3 \cdot (2 \cdot G_u + G_z)} \\ \frac{I_0}{3 \cdot (2 \cdot G_u + G_z)} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Aus dem Ergebnis kann man erkennen, dass der Widerstand R_k keinen Einfluss auf die Knotenspannungen hat. Dies liegt an dem symmetrischen Aufbau der Verschaltung und der angenommenen idealen Gleichheit der Bauelemente. Es ergeben sich vier Spannungsniveaus, die von links nach rechts über die Schaltung gleichmäßig abfallen. Da Zellen und Übergangswiderstände immer fehlerbehaftet sind, muss in der originalen Zellverschaltung von Spannungsunterschieden ausgegangen werden.

Wenn man nun die mittlere Batteriezelle der Matrix verändert, um zum Beispiel eine frühzeitige Alterung zu simulieren, ist in der Lösung des LGS zu erkennen, wie sich an den Knoten unterschiedliche Potentiale einstellen. Diese haben Ausgleichsströme zwischen den Zellen zur Folge.

Da das LGS deutlich umfangreicher wird, je mehr Zellen das Netzwerk enthält und je mehr Parameter sich individuell verändern und auch das Eintragen der Werte in die Matrix sehr fehleranfällig und unübersichtlich ist, werden für größere Netzwerke andere Tools verwendet. Es bietet sich eine Simulation mit grafischen Tools an, um die Übersicht zu behalten. Viele dieser Tools basieren im Hintergrund jedoch auf diesem mathematischen Modell des LGS.

Beispielhaft wird die Schaltung bestehend aus 3 mal 3 Zellen, um ein komplexes Batteriemodell nach Thevenin ergänzt. Dies bedeutet, jede Zelle wird mit einem komplexen Widerstand, bestehend aus einer R-RC-Schaltung, nachgebildet.

$$R_z = Z_z = R_0 + \frac{R_1 \cdot Z_c}{R_1 + Z_c} \quad (4.5)$$

$$Z_c = -j \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (4.6)$$

Der Widerstand R_z , der die Zelle nachgebildet hat, wird nun substituiert mit der komplexen Impedanz Z_z , wie in Gleichung 4.5 dargestellt. Diese Substitution macht das Modell frequenzabhängig. Die Leitwertmatrix wird dadurch zu umfangreich, um diese hier darzustellen. Als Ausschnitt wird in Gleichung 4.7 die erste Position der Matrix dargestellt. Die gesamte Matrix ist im Anhang auf Seite 66 zu finden.

$$G_{11} = \frac{3}{R_0 + 2 \cdot R_u + \frac{R_1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi \cdot \left(R_1 + \frac{1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi} \right)}} \quad (4.7)$$

Wenn die zu betrachtende Schaltung seine Symmetrie verliert und die Elemente sich von einander unterscheiden, werden die Ergebnisse des Gleichungssystems entsprechend komplexer. Auch das Aufstellen der Leitwertmatrix ist dann anspruchsvoller und neigt schnell zu Eingabe- und Übertragungsfehlern.

4.3. Auswahl des Simulationstools

Für die Arbeit muss abgewägt werden, welches Simulationstool für die Fragestellung in Frage kommt. Zur Auswahl hierbei stehen diverse freie oder auch kommerzielle Tools für die Schaltungssimulation. In die nähere Auswahl wurden 3 Programme gezogen, mit denen der Umgang bereits zumindest in geringem Umfang bekannt ist. Jedes dieser Programme basiert auf einer anderen Art der Simulation.

- AWR Microwave Office
- Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (SPICE)
- Matlab Simulink

4.3.1. AWR Microwave Office

Bei AWR Microwave Office handelt es sich um ein vielseitig einsetzbares Simulationstool des Herstellers Cadence. Als Multi-Solver-Lösung bietet es die Möglichkeit, sowohl Finite Elemente Methode (FEM) Simulationen durchzuführen als auch Harmonic-Balance (HB)-Simulationen für elektrische Schaltkreise. Mit diesem Programm ist es somit möglich, von der Luftanströmung eines Flugzeugs bis hin zu internen Verschaltungen von integrierten Schaltkreisen (ICs) in einem Programm abzuwickeln. Leider ist der Umgang mit diesem Programm entsprechend aufwendig und die Bedienung sehr umfangreich. Da es dort viele Funktionen gibt, welche für diese Arbeit nicht benötigt werden, wird dieses Programm aus der engeren Auswahl ausgenommen.

4.3.2. P-SPICE - LT-SPICE

Es handelt sich bei P-SPICE beziehungsweise LT-SPICE um ein Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis. Diese Simulatoren haben ihren Ursprung in der Schaltungssimulation seit 1973. Es basiert auf dem algorithmischen Lösen von Differentialgleichungen, die das System und deren Elemente als Näherungslösung beschreiben. Diese basieren auf den Kirchhoff-Gesetzen sowie dem Verfahren der Knotenpotentialanalyse. P-SPICE

ist die von Cadence Design Systems entwickelte Version des Simulators. Diese wird im kommerziellen Vertrieb angeboten. LT-Spice hingegen wird von Analog Devices kostenlos zur Verfügung gestellt [14].

4.3.3. Matlab Simulink

Simulink ist eine von The MathWorks entwickelte Simulationsumgebung, die auf Matlab als Basis zurückgreift. Matlab ist ein numerischer Löser von mathematischen Problemen. Simulink erlaubt die Simulation von Systemen aller Art und unterstützt dafür verschiedene Solver. Durch die Erweiterung um Simscape und die Möglichkeit des Einbindens von Toolboxes bildet Simulink ein vielseitiges Werkzeug zur Simulation physikalischer Vorgänge und Probleme.

4.3.4. Vergleich der Simulationssoftware

Um einen direkten Vergleich der Möglichkeiten zu erhalten, wird in den Programmen LT-Spice und Matlab Simulink eine anwendungsnahe Simulation aufgebaut. In dieser Simulation soll das Warburg-Modell einer Einzellzelle untersucht werden. Ausgewertet werden soll die Impedanz dieser Zelle in einem Frequenzbereich von 10 mHz bis 10 kHz. Dafür wird in beiden Programmen eine Minimalschaltung, wie in Abbildung 4.4 zu sehen, aufgebaut.

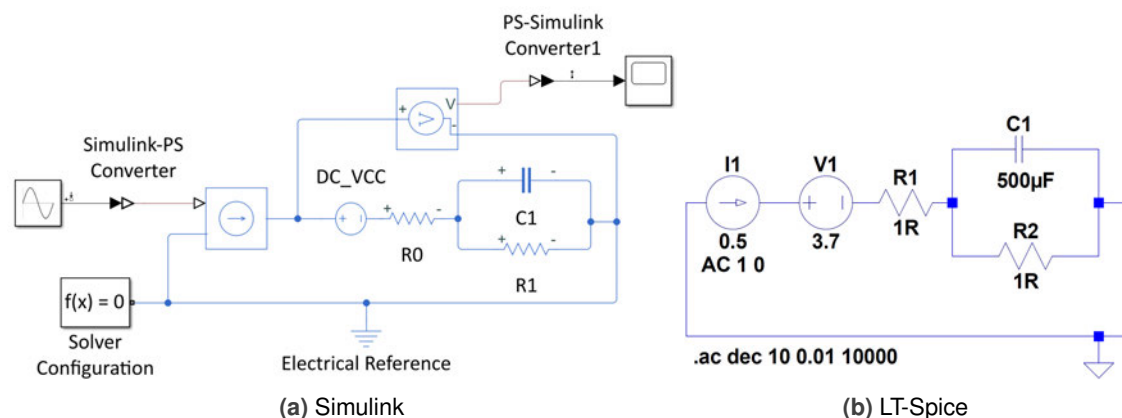


Abbildung 4.4.: Schaltpläne der Simulationsprogramme

In beiden Programmen wird die Batteriezelle durch ein vereinfachtes Ersatzschaltbild nach Randles nachgebildet. Dieses besteht aus einem Serienwiderstand und der Parallelschaltung aus einem Widerstand und einer Kapazität. Dieses Ersatzschaltbild erzeugt

in der Impedanzortskurve einen Halbkreis. Um den DC-Offset einer Batterie zu berücksichtigen, wird in beiden Simulationen eine ideale Spannungsquelle vorgeschaltet. Die Vermessung der Impedanz erfolgt in beiden Simulationen mittels einer AC-Stromquelle mit einem Amplitudenstrom von einem Ampere.

LT-SPICE In LT-SPICE wird die Simulationsoption AC-Analyse gewählt. Diese ermöglicht eine Frequenzanalyse der Schaltung innerhalb der eingestellten Grenzen. Das Ergebnis der Simulation lässt sich anschließend in der grafischen Oberfläche auswerten oder die berechneten Einzelwerte für jede Frequenz in eine Textdatei exportieren. Eine direkte Weiterverarbeitung der Daten ist hier nur sehr eingeschränkt möglich.

Simulink In Simulink wurde zunächst eine AC-Simulation aufgebaut, indem ein in Matlab erzeugtes Sinus-Signal in der Stromquelle verwendet wird. Dieses Signal wird in einer Time-Domain-Simulation durchlaufen und aus der schnellen Fourier Transformation (FFT) der Ausgangsdaten kann im Anschluss die frequenzabhängige Impedanz bestimmt werden. Dieses Vorgehen war jedoch fehlerbehaftet, sodass im Ergebnis reale Impedanzen zu sehen waren, die den positiven Wertebereich verlassen. Da dieses Ergebnis nicht zufriedenstellend ist, wurde nach alternativen Simulationsmethoden in Simulink gesucht. Es wurden weitere Möglichkeiten der Simulation von elektrischen Simulink-Modellen gefunden und diese liefern die erwarteten Ergebnisse, jedoch waren diese aufwendig in der Umsetzung und deren Funktionsweise im Hintergrund nicht vollends nachvollziehbar. Die Ergebnisse aller Methoden lassen sich in Simulink darstellen oder aber auch mit Matlab direkt weiterverarbeiten und auswerten.

4.3.5. Entscheidung für das Simulationstool PySpice

Da es sich bei der Simulation um elektronische Schaltungen handelt und Simulink hierbei doch einige Probleme und Schwachstellen aufweist, ist die beste Wahl des Simulationstools ein SPICE-Engine basierter Simulator. Das naheliegendste und weitverbreitete Programm LT-Spice bietet leider keine ausreichende Möglichkeit, die Simulationsergebnisse zu verarbeiten und auszuwerten. Gesucht wird ein Programm mit SPICE und guten Auswertungsmöglichkeiten auf Matlab-Niveau. PySpice bietet hier einen guten Kompromiss. PySpice ist ein Interface-Modul zur Nutzung von Ngspice in Python. Dieses Modul erlaubt es, in Python SPICE-Simulationen durchzuführen und eine direkte Weiterverarbeitung der simulierten Ergebnisse mit in Python häufig verwendeten Methoden sowie beispielsweise die Darstellung der Werte mit dem Modul Matplotlib.

Nachteil der Simulation mit PySpice PySpice bietet keine grafische Benutzeroberfläche, um Schaltungsdiagramme zu erzeugen. Netlisten können hier nur mit Funktionsaufrufen erzeugt werden oder eine bereits bestehende Netliste geladen werden.

Die Toolchain Um das Schaltungsdiagramm in einer grafischen Benutzeroberfläche zu erstellen, wird dieses mit LT-Spice erzeugt und anschließend exportiert. Diese erzeugte Netzliste wird in Python eingelesen und von PySpice verarbeitet und mit Ngspice simuliert. Die Ergebnisse werden anschließend in Python mittels Matplotlib ausgewertet.

4.4. Simulationsaufbau

Um einen Zellstack mit 36 Zellen untersuchen zu können, wird eine Simulation mit 3 Stacks aufgebaut. Dies ist notwendig, da die Stacks am Rand des Strings mit Endplatten abgeschlossen sind. Diese Endplatten verändern die Übergangswiderstände der Zellen und somit das Verhalten auf die EIS.

4 Modellbildung und Simulationsgrundlagen

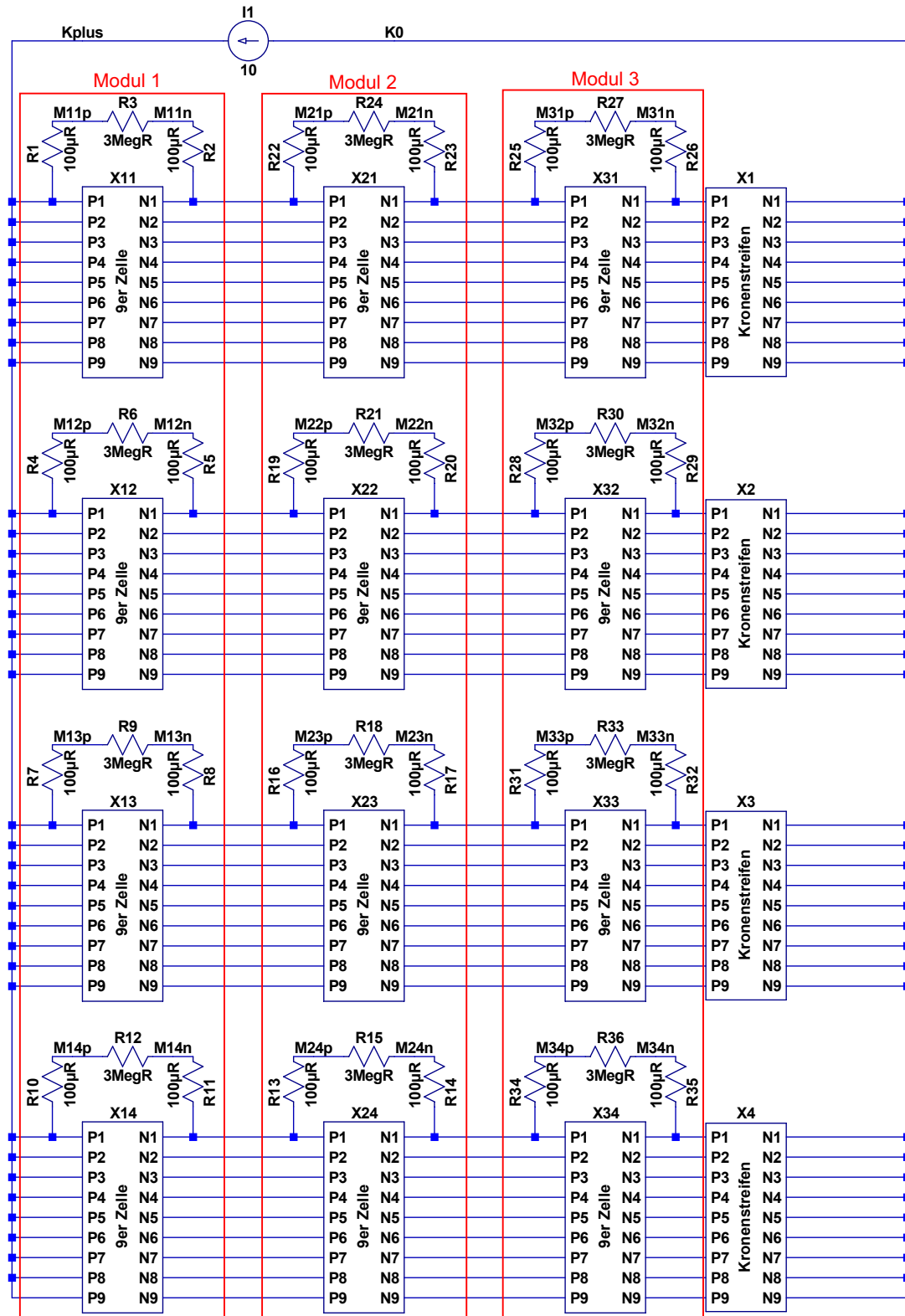


Abbildung 4.5.: Simulationsaufbau - Überblick

5. Simulation

In diesem Kapitel wird zunächst die ideale Verschaltung der Zellen simuliert. Anschließend werden Simulationsszenarien ausgewählt und evaluiert. Alle Simulationen werden, solange nicht anders beschrieben, mit einem Anregungsstrom von 10 A über die gesamte Schaltung simuliert.

5.1. Simulation des idealen Falls

Der ideale Fall wird anhand des in Abbildung 4.5 gezeigten Simulationsaufbaus simuliert. Hierbei handelt es sich um 3 Batteriemodule mit den jeweils 36 Zellen. Die äußeren Module sind mit Endplatten abgeschlossen. Das Testobjekt ist das mittlere Modul. Es wird zunächst eine Frequenzanalyse mit den in Kapitel 4.1.2 ermittelten Werten für eine R-RC-Nachbildung der Einzelzelle durchgeführt.

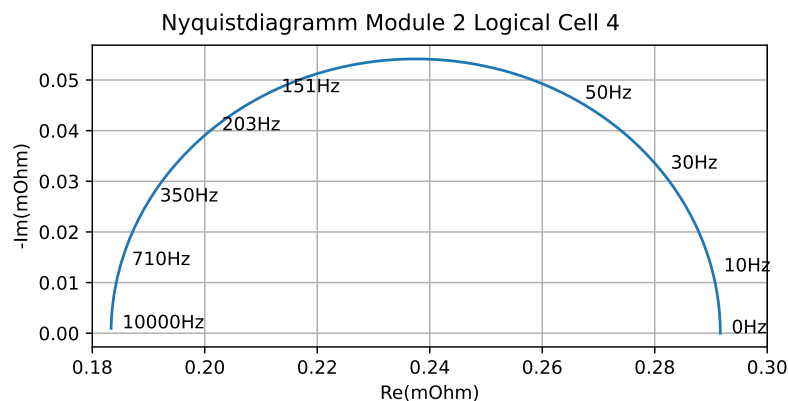


Abbildung 5.1.: Nyquistplot von Zellstring 4 in Modul 2

Im Anhang in Abbildung D.1 ist zu sehen, dass alle gemessenen Stränge der Simulation die gleichen Ergebnisse liefern. Detailliert ist der Nyquistplot in Abbildung 5.1 zu sehen. Hier zeigt sich bei hohen Frequenzen ein Realteil von 0,18 m Ω , dies ergibt sich aus dem R_0 und der Parallelschaltung von 36 Zellen.

$$R_{f \gg 1 \text{ kHz}} = \frac{R_0}{\text{Zellenzahl}} = \frac{6,5 \text{ m}\Omega}{36} = 0,18056 \text{ m}\Omega \quad (5.1)$$

Bei der Frequenz Null ist der reale Widerstand die Summe von den Widerständen R_0 und R_1 durch 36 Zellen.

$$R_{f=0} = \frac{R_0 + R_1}{\text{Zellenzahl}} = \frac{6,5 \text{ m}\Omega + 3,9 \text{ m}\Omega}{36} = 0,2889 \text{ m}\Omega \quad (5.2)$$

Diese Werte ergeben die zwei Punkte auf der realen Achse des Nyquistplots. Die Höhe des Bogens ergibt sich aus dem Wert des Kondensators. Bezogen auf die reale Zelle ergibt sich der Bogen aus der Kapazität der Zelle.

Als zweite Simulation wird der ideale Fall mit einer rein ohmschen Nachbildung der Zelle durchgeführt. Der Widerstandswert ist, wie in Kapitel 4.1.2 ermittelt, auf 11 m Ω festgelegt.

In der Simulation werden die Spannungslevel eines Kronkorkenverbinders dargestellt. Betrachtet wird hierbei das Element X24 aus Abbildung 4.5. Die Spannungspegel wurden immer zwischen P_n und N_n abgegriffen. Die V_{Ref} zeigt den Spannungspegel von P_1 zu N_1 des Elements X21 und beträgt 3,083 mV. Da alle Zellen der Schaltung den gleichen Widerstandswert haben, gibt es keine unterschiedlichen Spannungspegel. Die Spannung liegt bei allen Zellen bei 3,083 mV.

5.2. Simulation des nicht idealen Falls

5.2.1. Auswahl der Szenarien

Es sollen zwei verschiedene Szenarien simuliert werden. Zum einen soll überprüft werden, ob eine starke Alterung einer Einzelzelle erkannt werden kann. Zum anderen sollen die Auswirkungen eines Temperaturunterschieds der Zellen analysiert werden.

Zellalterung

In diesem Szenario soll die Alterung einer Einzelzelle nachgestellt werden. Es soll untersucht werden, wie gut ein Zellschaden oder eine stark gealterte Zelle erkannt werden kann und wie viel Einfluss die Positionierung der Messleitung auf die Messung hat. Es soll die nötige Messgenauigkeit ermittelt werden, die benötigt wird, um im schlechtesten Messfall

den Defekt zu erkennen. In dieser Simulation wird die Zelle mit einem rein ohmschen Widerstand dargestellt. Durch die Alterung wird der Innenwiderstand der Zelle größer. Diese Simulation wird in einer 3s36p-Verschaltung durchgeführt. Als gealterte Zelle wird eine Widerstandsänderung von 11 mΩ auf 50 mΩ angenommen. Dieser Wert ist bewusst so hoch gewählt, um im Anschluss den Einfluss der Messposition zu ermitteln.

Nachdem die am schlechtesten zu detektierende Konstellation gefunden wurde, wird jetzt getestet, wie viel schlechter der Widerstand der gealterten Zelle sein muss, um für die Messtechnik detektierbar zu sein. Es wird davon ausgegangen, dass die Messschaltung eine Auflösung von 14 Bit hat und der Messbereich von 0 - 3,3 Volt abgedeckt wird. In Gleichung 5.3 wird die Messgenauigkeit ΔA der Schaltung berechnet.

$$\Delta A = \frac{3,3 \text{ V}}{2^{14}} = \frac{3,3 \text{ V}}{16384} = 201,41 \mu\text{V} \quad (5.3)$$

Temperaturabweichung

Das zweite zu untersuchende Szenario soll die Auswirkungen von Temperaturunterschieden zwischen den Zellen sichtbar machen. Es soll angenommen werden, dass sich die Temperatur innerhalb der Zellmodule um 0,5 °C pro Zelle unterscheidet. Dies soll als Temperaturgradient von unten nach oben über die Strings des Moduls erfolgen. Durch die Anzahl von neun Zellen pro String ergibt sich ein Temperaturgefälle von 4,5 °C im gesamten Modul. Auch in dieser Simulation wird die Zelle als rein ohmscher Widerstand simuliert. Eine Li-Ion-Zelle wird mit zunehmender Temperatur niederohmiger. Bei einer Temperaturabnahme von 5 °C kann eine Halbierung des Innenwiderstands angenommen werden [13, vgl. Fig. 1]. Somit wird für eine Temperaturzunahme von 0,5 °C eine Innenwiderstandsänderung von 10 % angenommen [12].

5.2.2. Zellalterung

Für die Zellalterung wird eine einzelne Zelle „gealtert“. Dies geschieht in der Simulation durch eine Erhöhung des Innenwiderstandes. In der ersten Simulation wird angenommen, dass die Zelle 9 aus Abbildung 5.2 des Korkenstreifens X24 aus Abbildung 4.5 einen erhöhten Widerstand von 50 mΩ aufweist.

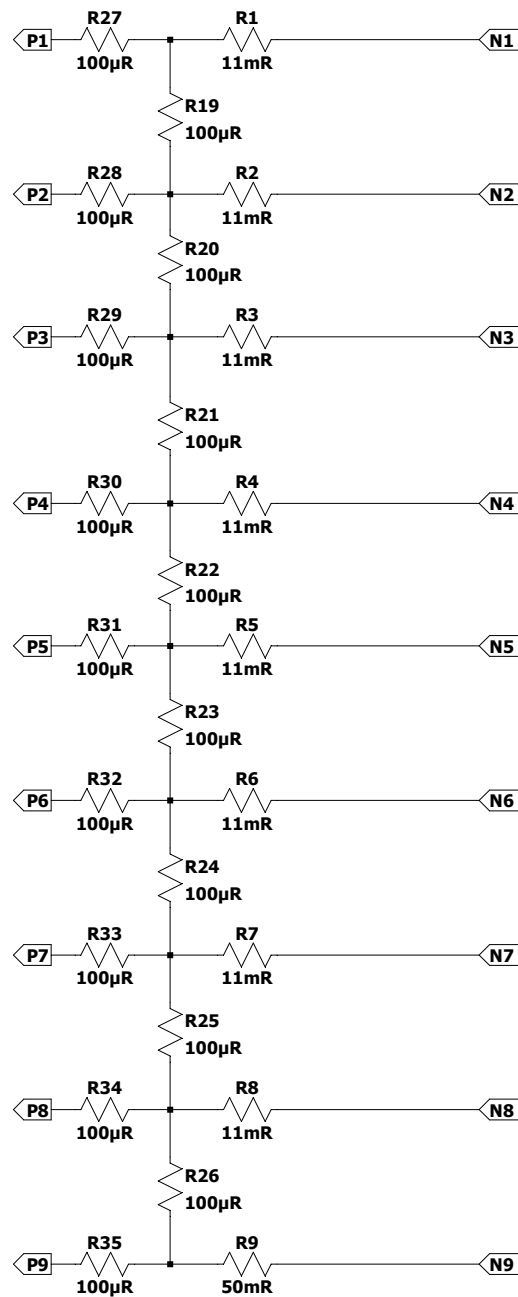


Abbildung 5.2.: Element X24 aus Abbildung 4.5 mit Darstellung der Einzelzellen als Innenwiderstände. R9 mit einem Innenwiderstand von 50 mΩ

Das Ergebnis dieser Simulation ist das folgende Diagramm 5.3. In diesem ist zu erkennen, welche Spannungspegel messbar sind, wenn die Positionierung der Messleitung an dem

Kronenstreifen verändert wird. Je näher der Messabgriff an die gealterte Zelle heranrückt, desto deutlicher ist dies in der Messung durch Erhöhung des Pegels zu erkennen.

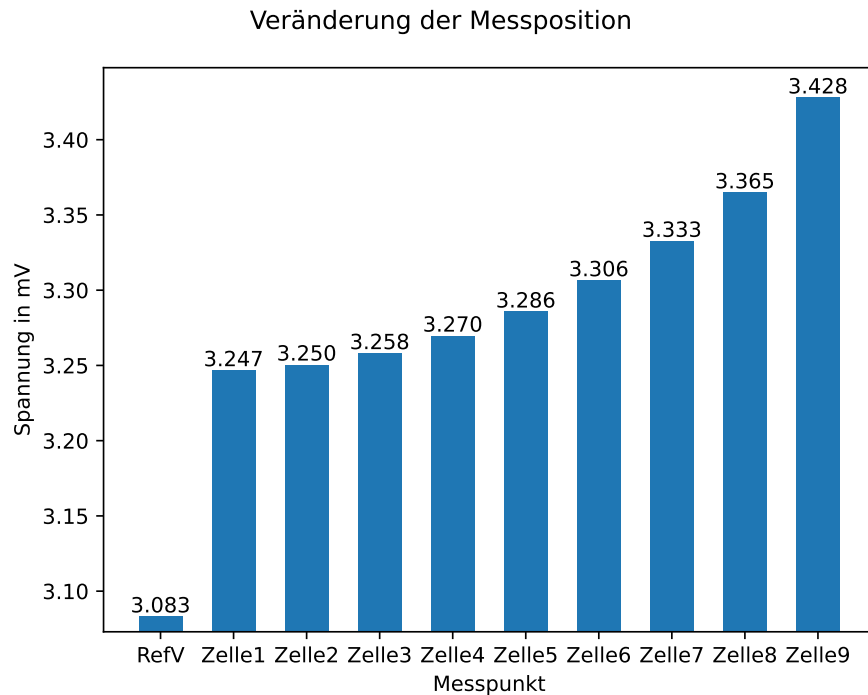


Abbildung 5.3.: Spannungspegel an den unterschiedlichen Messabgriffen des Kronenstreifens bei gealterter Zelle 9

Es ist zu erkennen, dass durch die Positionierung der Messleitung ein Pegelhub von 0,181 mV erzeugt werden kann. Dies führt im schlimmsten Fall jedoch dazu, dass eine gealterte Zelle nur schwer erkannt werden kann, wenn sich diese weit von dem Messpunkt entfernt befindet.

Im folgenden Simulationsfall wird angenommen, dass die Messung am ungünstigsten Punkt durchgeführt wird. Die gealterte Zelle bleibt Zelle 9 und die Messung erfolgt an der ersten Zelle.

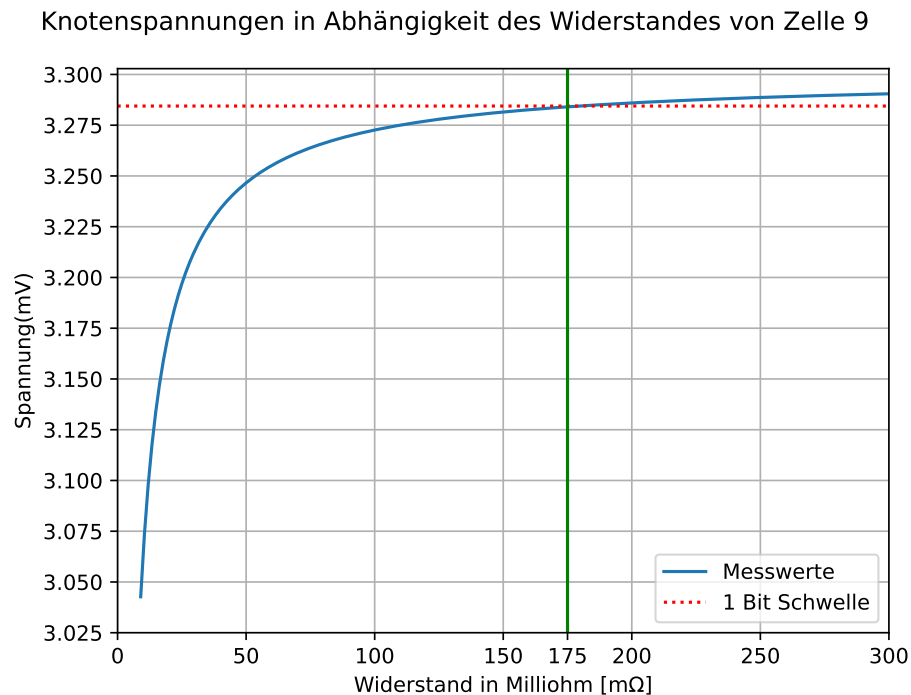


Abbildung 5.4.: Spannungspegel an Zelle 1 bei zunehmendem Widerstand der Zelle 9

In Abbildung 5.4 ist der Spannungspegel an Zelle 1 in Abhängigkeit des Widerstandes der Zelle 9 dargestellt. Es ist ebenfalls eine Linie dargestellt, welche zeigt, ab wann die Pegeländerung mithilfe eines 14-Bit-Analog-Digital-Converters (ADCs) zu erkennen ist. Es ist erst ab einem Widerstand von 175 mΩ möglich, die Alterung mit dieser Messung zu erkennen, da die Messauflösung im Verhältnis zum Spannungslevel sehr gering ist. Eine Verbesserung der Genauigkeit wären durch eine Erhöhung des Anregestroms oder eine andere Positionierung des Messabgriffs möglich.

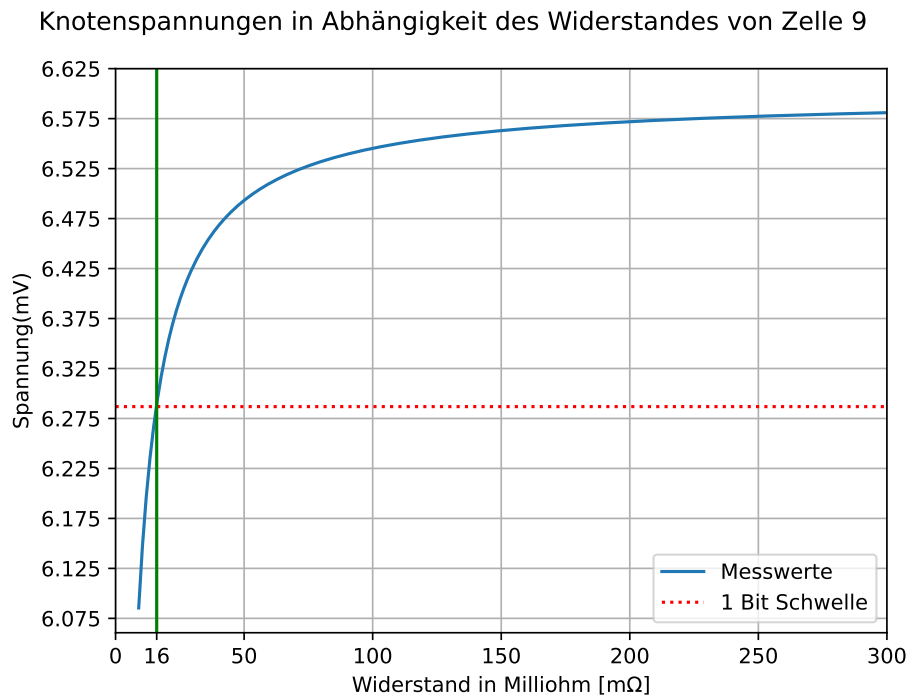


Abbildung 5.5.: Spannungspegel an Zelle 1 bei zunehmendem Widerstand der Zelle 9 bei 20 Ampere Anregestrom

In der Simulation in Abbildung 5.5 wurde der Anregestrom von 10 Ampere auf 20 Ampere verdoppelt. Dies führt zu höheren Signalpegeln in der Messung und ermöglicht eine Detektion der defekten Zelle mit dem ADC ab einem Zellenwiderstand von 16 mΩ.

In der nächsten Simulation wird die Positionierung der Messleitung geändert. Um möglichst von allen 9 Zellen des Strings gute Werte zu erhalten, wird die Messleitung in der Mitte positioniert. Der Abgriff wird zwischen Zelle vier und fünf realisiert.

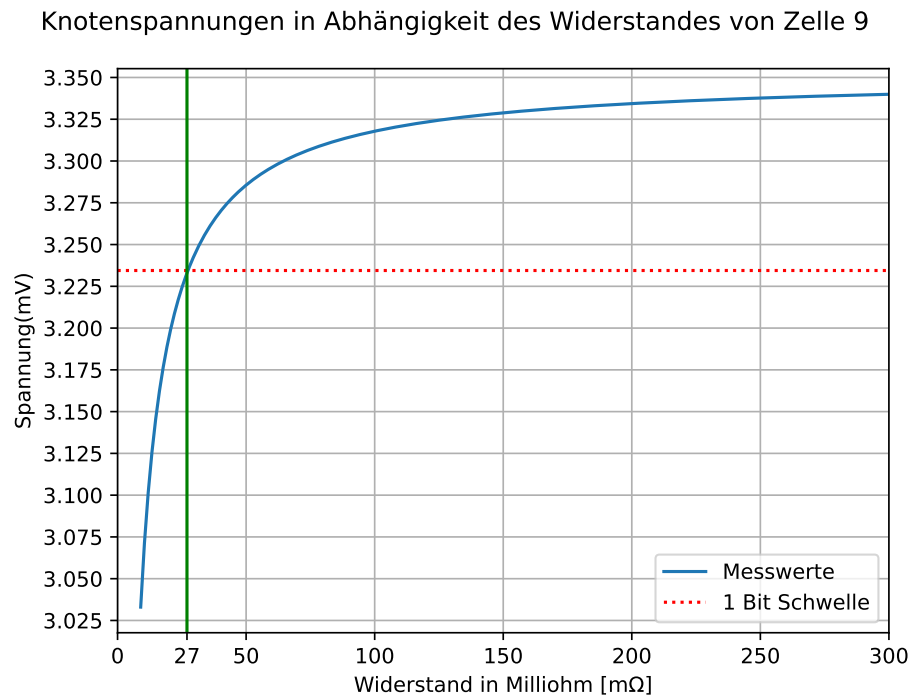


Abbildung 5.6.: Spannungspegel bei mittigem Abgriff und zunehmendem Widerstand der Zelle 9 bei 10 Ampere Anregestrom

In Abbildung 5.6 ist die Spannungskurve in Abhängigkeit des Widerstandes der Zelle 9 zu sehen, wenn die Messung in der Mitte des Kronenstreifens erfolgt. Man erkennt eine deutliche Verbesserung im Vergleich zu Abbildung 5.4, jedoch liegt die 1-Bit-Schwelle noch immer bei 27 mΩ.

In Abbildung 5.7 ist ein Anregestrom von 20 A verwendet worden. Diese Abbildung zeigt, dass bereits eine Widerstandsänderung auf 14 mΩ detektierbar ist. 22 mΩ entspricht einer Änderung von 100 %. Die 2-Bit-Schwelle ist bei einem Zellwiderstand von 28 mΩ erreicht.

Knotenspannungen in Abhängigkeit des Widerstandes von Zelle 9

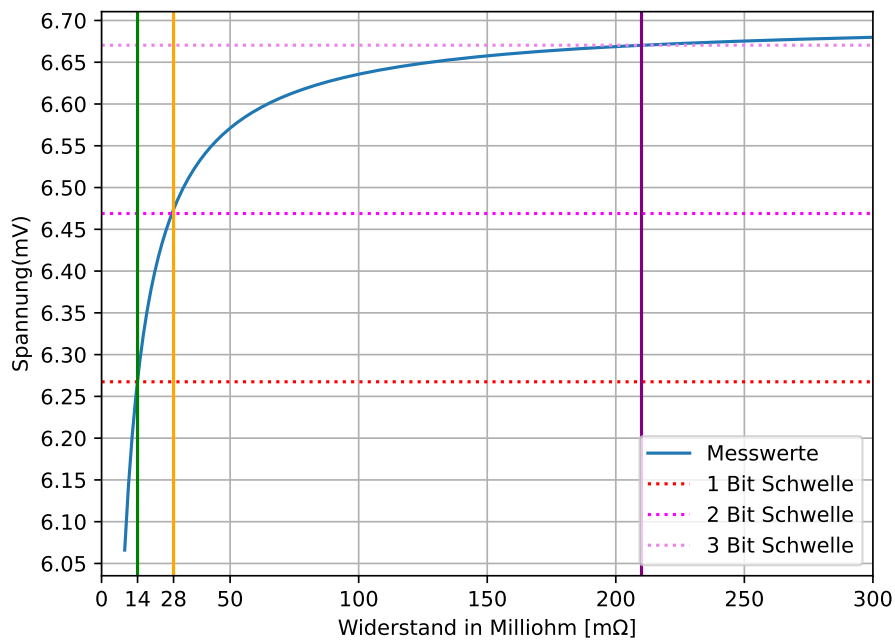


Abbildung 5.7.: Spannungspegel bei mittigem Abgriff und zunehmendem Widerstand der Zelle 9 bei 20 Ampere Anregestrom

5.2.3. Temperaturänderung

Um eine Temperaturänderung von der obersten zur untersten Zelle von ca. 5 °C zu simulieren, wird der Innenwiderstand um ungefähr 10 % pro Zelle verändert. Um die Simulationsergebnisse besser mit den Experimenten an den Zelldummys vergleichen zu können, wurde sich zusätzlich an erzeugbaren Widerstandswerten orientiert und daher teilweise eine schrittweise Veränderung der Werte vorgenommen. Die gewählten Innenwiderstände des modifizierten Strings aus 9 Zellen und die ideal errechneten Widerstände sind in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1.: Widerstände der Zellenachbildung zur Simulation eines Temperaturgefälles

Zelle	gewählter Widerstand	idealer Widerstand
1	11,00 mΩ	11,00 mΩ
2	11,00 mΩ	9,90 mΩ
3	9,00 mΩ	8,91 mΩ
4	8,50 mΩ	8,02 mΩ
5	7,50 mΩ	7,22 mΩ
6	6,00 mΩ	6,50 mΩ
7	6,00 mΩ	5,85 mΩ
8	5,00 mΩ	5,26 mΩ
9	5,00 mΩ	4,74 mΩ

Der Abgriff der Messleitung erfolgt bei dieser Simulation zunächst über alle Zellen, um den Unterschied der Spannungsdifferenz zum idealen Fall sichtbar zu machen.

Zunächst wurde die Simulation über das gesamte Modul durchgeführt. Hierbei wurden die Spannungen an den vorgesehenen Messabgriffen des Strings aus 9 Zellen betrachtet. Die Abgriffe sind wie in Abbildung 4.5 bezeichnet.

Tabelle 5.2.: Spannungen in der Simulation eines Temperaturgefälles

Abgriff	M21	M22	M23	M24
Spannung	2,986 mV	2,986 mV	2,986 mV	2,363 mV

Zu sehen ist, dass die Spannungsantwort des gesamten Moduls leicht abgesunken ist von 3,083 mV auf 2,986 mV. Die Spannung an dem veränderten String ist mit 2,363 mV jedoch noch einmal deutlich niedriger und klar identifizierbar. Als nächstes kann die Spannung an den unterschiedlichen Abgriffspunkten an dem präparierten String aus 9 Zellen betrachtet werden. In Tabelle 5.3 sind die Werte der Simulation abzulesen.

Tabelle 5.3.: Spannungen in der Simulation eines Temperaturgefälles am String aus 9 Zellen

Abgriff	Spannung
MP1	2,363 mV
MP2	2,347 mV
MP3	2,308 mV
MP4	2,263 mV
MP5	2,209 mV
MP6	2,149 mV
MP7	2,105 mV
MP8	2,061 mV
MP9	2,044 mV
Ref	3,083 mV

Hierbei zeigt sich in der Gegenüberstellung der Zellinnenwiderstände und des Simulationsergebnisses in Abbildung 5.8, dass der Gradient messbar, die Sprünge zwischen den Zellen jedoch nicht mehr erkennbar sind. Die Differenz zwischen Messpunkt 1 und der Referenzspannung in Tabelle 5.3 zeigt, dass eine Temperaturänderung von ca. 5 °C ausreicht, um eine erkennbare Veränderung in der Messung zu erzeugen.

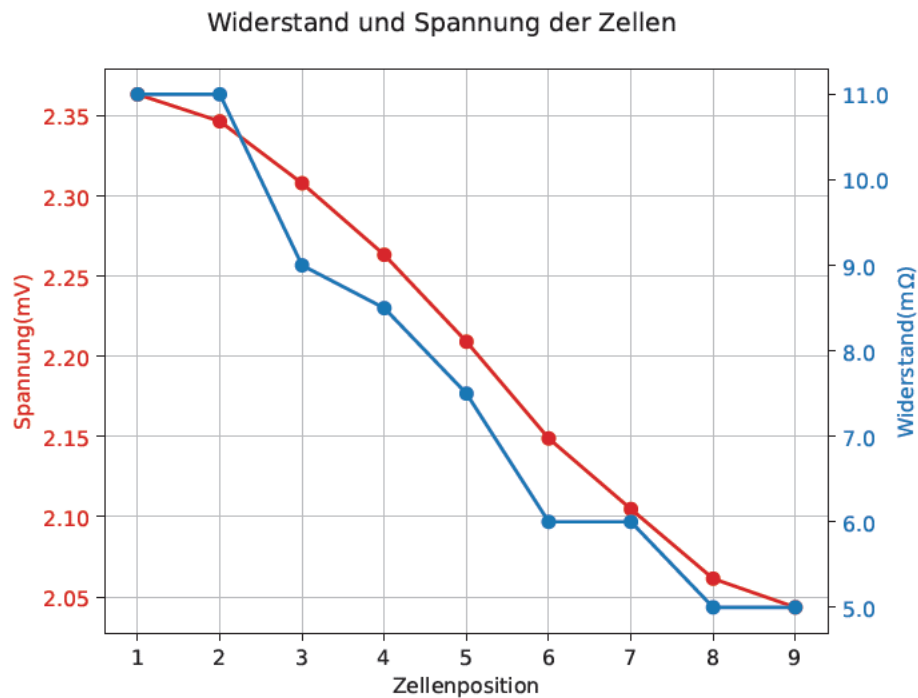


Abbildung 5.8.: Spannungspegel an den verschiedenen Abgriffen über den String aus 9 Zellen und entsprechend die Widerstände der Zellen in der Simulation

6. Experimente

In diesem Kapitel werden die Simulationen an dem realen Modell überprüft. Zunächst wird das Serienmodul des Projektpartners mittels EIS vermessen. Anschließend wird eine Auswahl von einzelnen Dummyzellen vermessen, diese Werte geben einen Einblick in die Nachbildungsgenauigkeit und lassen die Fertigungstoleranzen beurteilen. Die in der Simulation ermittelten Werte werden abschließend mit realen Messwerten des entwickelten Modulprototypen verglichen.

6.1. Vermessung des Serienmoduls

Das zur Verfügung stehende Serienmodul wird zunächst einzeln vermessen. Zusätzlich werden die uns zur Verfügung stehenden Einzelzellen vermessen. Zur Vermessung dient das Fuelcon 100/100 EIS-Meter. Anschließend an die Messungen bei Raumtemperatur wird das Temperaturverhalten der Einzelzelle vermessen.

6.1.1. Einzelnes Modul

Das Einzelmodul wird mit Endplatten abgeschlossen. An diese Platten wird die Anregung sowie die Messleitung angeschlossen.

Es werden drei verschiedene Messungen durchgeführt. Zunächst wurde ein Anregestrom von 1 A verwendet. Anschließend wurde der Anregestrom auf 10 A erhöht. Dies brachte in den Messergebnissen keine deutliche Veränderung. Abschließend wurde die Position der Anregung und der Messung aus der Mitte der Endplatte an die Ecke versetzt. Da der Nulldurchgang der darauf folgenden Messung, in Abbildung 6.1 die grüne Kurve, geringer ausfällt als zuvor, widerspricht dies der Vermutung, dass die Übergangswiderstände im Randbereich zu einer Erhöhung des Gesamtwiderstandes beitragen. Es lässt eher vermuten, dass die Kontaktierung der Messleitungen in der Mitte des Moduls hohe Übergangswiderstände erzeugt haben.

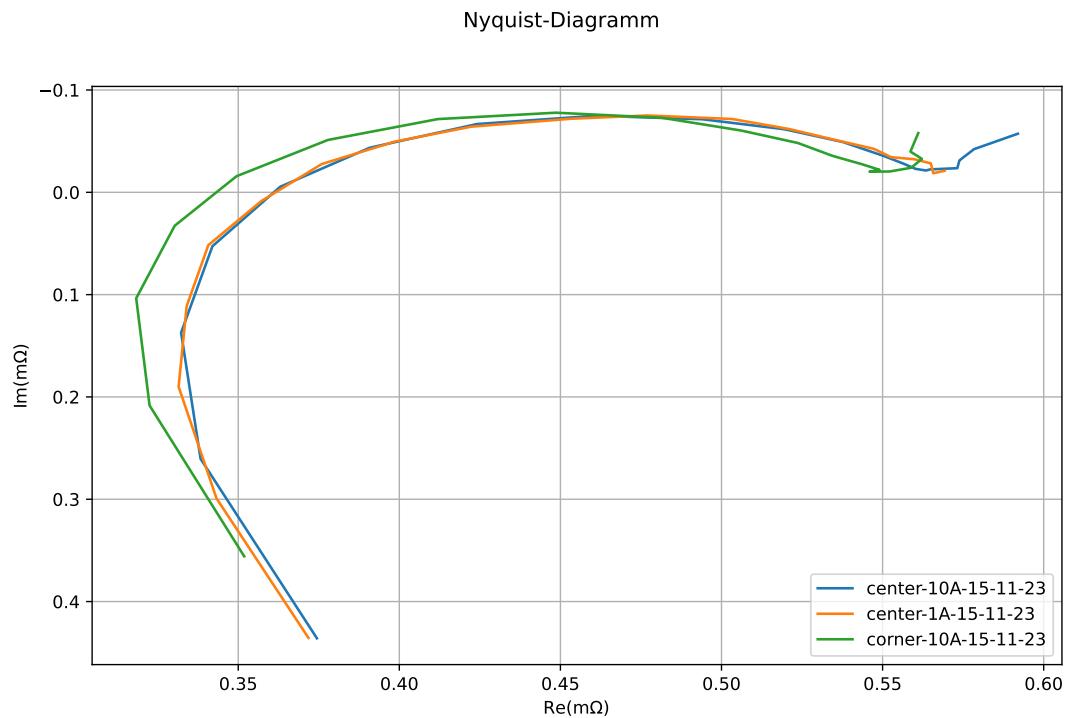


Abbildung 6.1.: Nyquistplot der Eis-Meter Messungen des Serienmoduls

6.1.2. Einzellzelle Molicell 21700-P45B

Mit der Einzellzelle werden mehrere Messungen durchgeführt. Alle Aufnahmen werden mit dem Messgerät der Marke Fuelcon mit einem Messstrom von 1 A durchgeführt. Drei Messungen werden mit Anrege- und Messleitung an einer Schraube am Ende des Zelltabs durchgeführt. Für zwei weitere Messungen werden die Messleitungen auf dem Zelltab so nah an die Zelle geführt wie möglich. Hierdurch ergibt sich, wie in Abbildung 6.2 zu sehen, eine deutliche Verringerung des realen Innenwiderstandes um 2,5 mΩ.

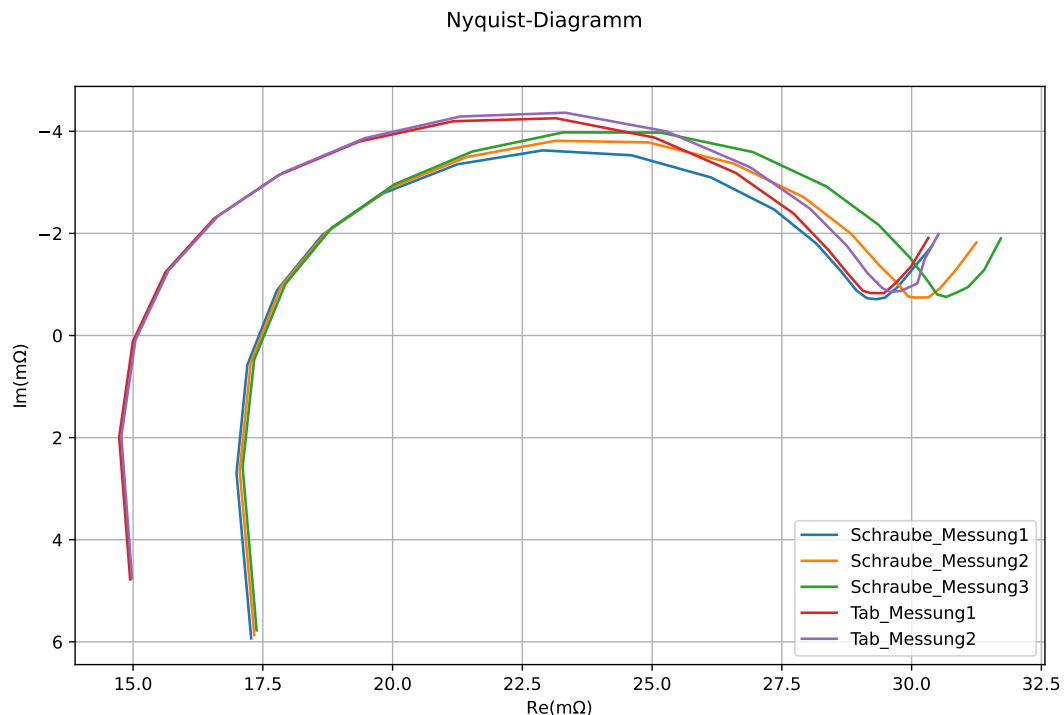


Abbildung 6.2.: Nyquistplot der Eis-Meter Messungen der Einzelzelle

6.1.3. Temperaturabhängigkeit der Molicell 21700-P45B

Die Temperatureigenschaften einer Zelle hängen von vielen verschiedenen Faktoren ab. In diesem Versuch soll der Temperaturgang der Molicell 21700-P45B ermittelt werden. Diese Messung dient der Einordnung der Simulation und der Überprüfung der Werteanahmen für diese und die gewählten Werte für den Versuch des Temperaturgradienten.

Es werden 4 Zellen in einem Klimaschrank des Modells ARU-0680 der Marke Thermo TEC vermessen. Der Temperaturbereich wird zwischen 15 °C und 40 °C in 5 °C Schritten variiert. Um eine homogene Temperatur innerhalb der Zelle zu gewährleisten, wird diese je Stufe 2 Stunden ruhen gelassen, bevor die Messung durchgeführt wird. Für die Vermessung der Zelle wird das EIS-Meter Fuelcon Typ 100/100 verwendet.

Die verwendete Kontaktierung der Zelle für die Messung wird mittels Pogo-Pins über ein Klemmverfahren realisiert. Dieser Messaufbau fügt der Zellmessung einen absoluten Messfehler von 1,2 mΩ hinzu und muss bei der Auswertung berücksichtigt werden. Die Zellen werden für die Messung aus dem Klimaschrank entnommen, sodass diese während der Messung nicht temperiert werden. Die Messdauer beträgt knapp 4 Minuten.

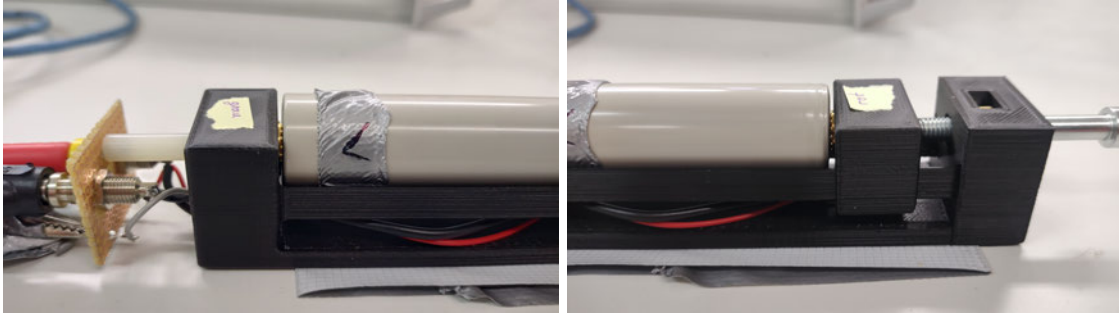


Abbildung 6.3.: Aufbau für die Messung der Molicell P45B

Die Messung wurde mit einem Frequenz-Sweep von 100 mHz bis 1 kHz durchgeführt. In diesem Bereich wurden mit logarithmischer Aufteilung 20 Messpunkte aufgezeichnet.

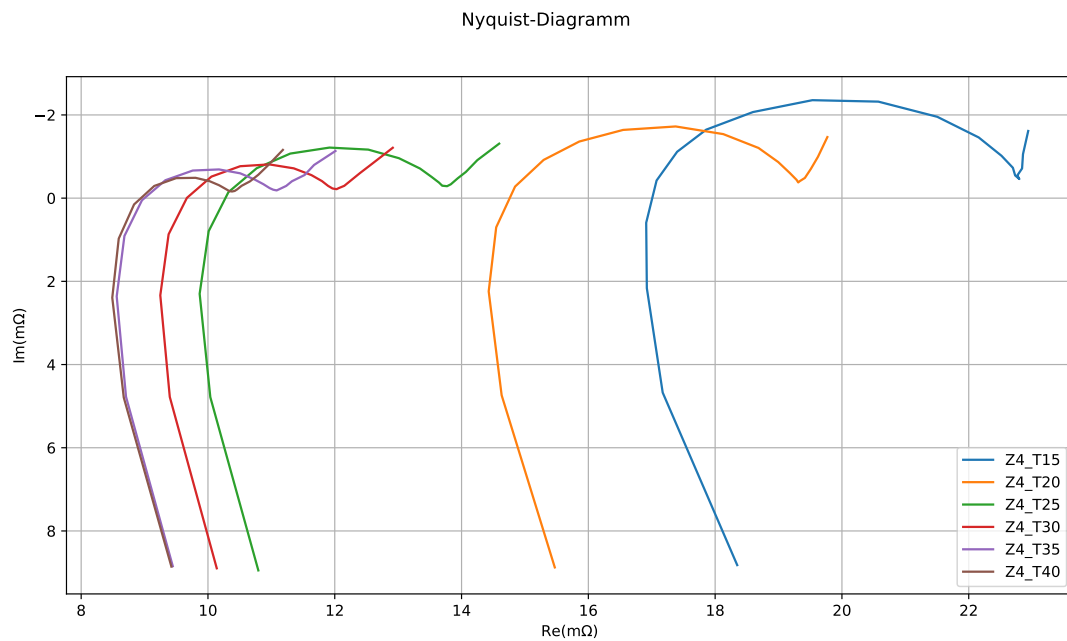


Abbildung 6.4.: Nyquistplot der Messergebnisse der Zelle 4 der P45B Messreihe

In Abbildung 6.4 ist das Messergebnis der Zelle 4 als Nyquistplot zu sehen. Leider sind die Messergebnisse der anderen Zellen abweichend von der Erwartung. Die Messwerte sind bei höherer Temperatur deutlich höher. Dies ist ein implausibles Verhalten und ist vermutlich auf den Messaufbau und deren Kontaktstellen zurückzuführen. Um Messfehler zu verringern beziehungsweise diese konstant zu halten, um die Messergebnisse in Abhängigkeit der Temperatur und relativ zum Absolutwert betrachten zu können, wird die Messreihe mit einer weiteren Zelle durchgeführt.

In dieser Messung bleibt die Zelle durchgehend in dem Messaufbau eingespannt. Die Leitungen des Fuelcon EIS-Meter werden in den Klimaschrank geführt und nur zu Beginn der Messreihe an den Messaufbau angeschlossen. Um sicherzustellen, dass eine gute Kontaktierung gegeben ist, wird eine initiale Messung durchgeführt.

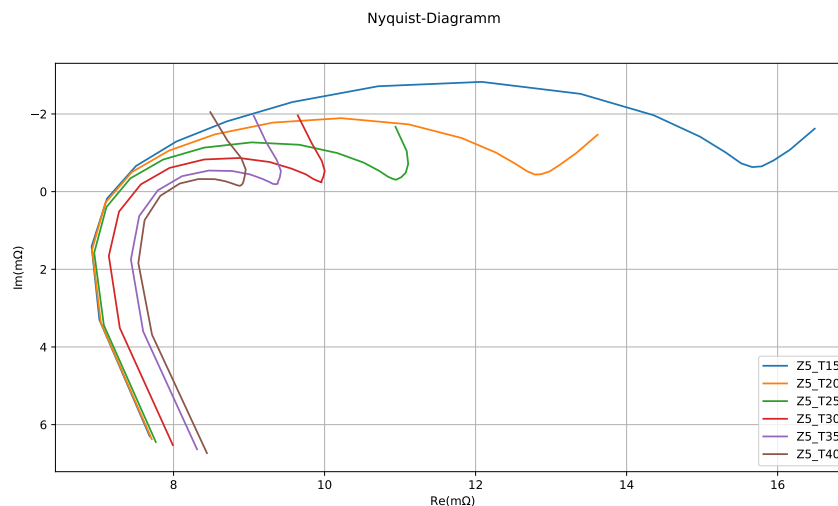


Abbildung 6.5.: Nyquistplot der Messergebnisse der Zelle 5

In Abbildung 6.5 ist der Nyquistplot der Messergebnisse zu sehen. Dieser weist eine deutlich geringere Verschiebung der einzelnen Messkurven auf, jedoch steigt auch über den gesamten Verlauf der Kurve bei steigender Temperatur der Realteil der Messung um ca. 1 mΩ. Dies könnte auf die metallischen Kontaktierungen des Messaufbaus zurückzuführen sein. Der zu erwartende Effekt ist in der Messung zu erkennen. Durch steigende Temperatur sinkt der Innenwiderstand der Zellen bei niedriger Frequenz. Die Veränderung der Kurve im obersten Zweig lässt eine Verringerung des SoCs vermuten. Jedoch ist die Steigung größer 90° dadurch nicht zu erklären [5, vgl. S. 71 Fig. 6.4].

6.2. Vermessung des Modulprototypen

6.2.1. Vermessung der Zellnachbildung

Vermessen wurde die in Abbildung 3.2 gezeigte Zellnachbildung mit einem THT-Drahtwiderstand mit einem Widerstandswert von 10 mΩ (Datenblatt Anhang Seite 160).

Tabelle 6.1.: Widerstand der Einzelzelle

Strom	Spannung	Widerstand
0,100 A	1,108 mV	11,080 mΩ
1,000 A	11,009 mV	11,009 mΩ
2,004 A	22,254 mV	11,105 mΩ
3,007 A	33,355 mV	11,092 mΩ
4,006 A	44,686 mV	11,155 mΩ
4,967 A	55,881 mV	11,250 mΩ

In Tabelle 6.1 sind die Messergebnisse der ersten Zelnachbildung zu sehen. Es wurde mittels 4-Leiter-Messung der Widerstand zwischen den Polen der Nachbildung ermittelt. Hierfür wurde ein Messstrom angelegt und der Spannungsabfall zwischen den Kupferkontakten gemessen. Im Mittel hat die vermessene Zelle einen Innenwiderstand von 11,103 mΩ. Um diesen Wert zu bestätigen, werden weitere 9 Zelnachbildungen vermessen. Da der Unterschied über den Messstrom gering ausfällt, werden alle weiteren Zellen nur mit 1 A vermessen.

Tabelle 6.2.: Stichprobenmessung des Widerstands der Einzelzelle (Prüfstrom 1 Ampere)

Zelle	Widerstand	Zelle	Widerstand	Zelle	Widerstand
1	11,009 mΩ	6	11,294 mΩ	11	11,327 mΩ
2	11,314 mΩ	7	11,278 mΩ	12	11,240 mΩ
3	11,298 mΩ	8	11,295 mΩ	13	11,270 mΩ
4	11,409 mΩ	9	11,165 mΩ	14	11,346 mΩ
5	11,332 mΩ	10	11,259 mΩ	15	11,244 mΩ

In Tabelle 6.2 sind die Messergebnisse der Zelnachbildungen zu sehen. Abbildung 6.6 zeigt die Verteilung der Messergebnisse.

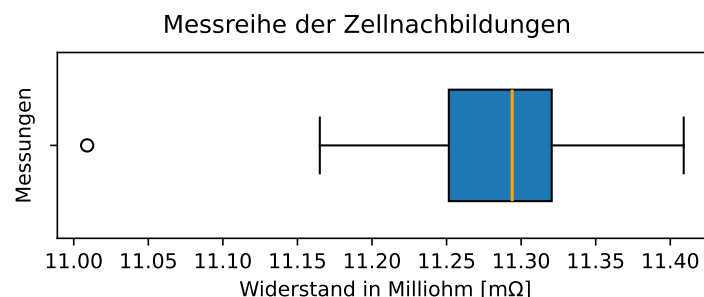


Abbildung 6.6.: Boxplot der Messergebnisse der Zelnachbildungen

6.2.2. Vermessung der 3s36p-Verschaltung

Für die Vermessung der 3s36p Verschaltung werden 3 Modulgehäuse mit je 36 Zelldummys voll bestückt. Je 9 Stück werden über einen Zellverbinder verbunden. Diese 3 Module werden zusammengesteckt und mit Endplatten an den Enden verbunden. An den Endplatten wird der Anregestrom von 10,005 A für die Messung eingespeist. Gemessen werden die Spannungen, welche über das mittlere Modul abfallen. Hierbei wird der Unterschied zwischen den vier Strings aus 9 Zellen überprüft. Die Messergebnisse sind der Tabelle 6.3 zu entnehmen.

Tabelle 6.3.: Messergebnisse des mittleren Moduls an den oberen Messabgriffen bei 10,005 A Anregestrom

Messpunkt	MP21	MP22	MP23	MP24
Spannung	3,169 mV	3,160 mV	3,185 mV	3,182 mV

Die gemessenen Spannungen liegen leicht über den Werten der Simulation von 3,083 mV. Dies könnte der Streuung der Innenwiderstände der Zellnachbildungen geschuldet sein.

6.2.3. Vermessung im präparierten Fall mit einer gealterten Zelle

Die Vermessung des Zelldummys im präparierten Fall der gealterten Zelle erfolgt mit einem Messstrom von 10 A über die 3s36p-Verschaltung. Hierbei wird eine einzelne Zelle eines Strings mit einem höheren Widerstand versehen.

Tabelle 6.4.: Messung: Zellalterung durch Erhöhung des Innenwiderstands

Zellwiderstand	Abgriff			
	M21	M22	M23	M24
11 mΩ	3,169 mV	3,160 mV	3,185 mV	3,182 mV
21 mΩ	3,159 mV	3,164 mV	3,171 mV	3,214 mV
31 mΩ	3,184 mV	3,185 mV	3,204 mV	3,248 mV
41 mΩ	3,181 mV	3,184 mV	3,205 mV	3,252 mV
51 mΩ	3,145 mV	3,161 mV	3,172 mV	3,267 mV
501 mΩ	3,186 mV	3,184 mV	3,209 mV	3,282 mV
OL	3,155 mV	3,157 mV	3,189 mV	3,284 mV

Die Messergebnisse aus Tabelle 6.4, welche in Abbildung 6.7 dargestellt werden, zeigen verlaufstechnisch ein sehr ähnliches Ergebnis zur Simulation. Die gemessenen Werte sowie der Spannungshub weichen jedoch von der Simulation ab.

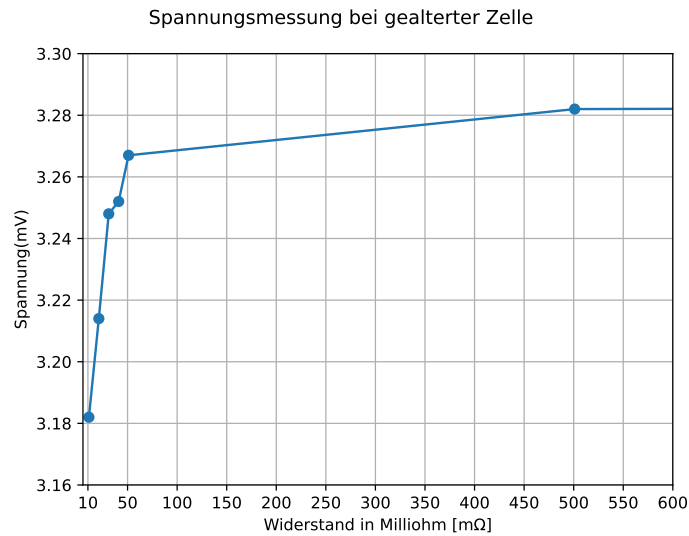


Abbildung 6.7.: Messergebnisse am String der gealterten Zelle

Zu erkennen ist, dass im Vergleich zum idealen Fall selbst bei dem Entfernen eines Zelldummys die gemessene Spannung nur um 102 mV ansteigt. Dies liegt an der Parallelschaltung der Zellen und wird in Kapitel 7 weiter erläutert.

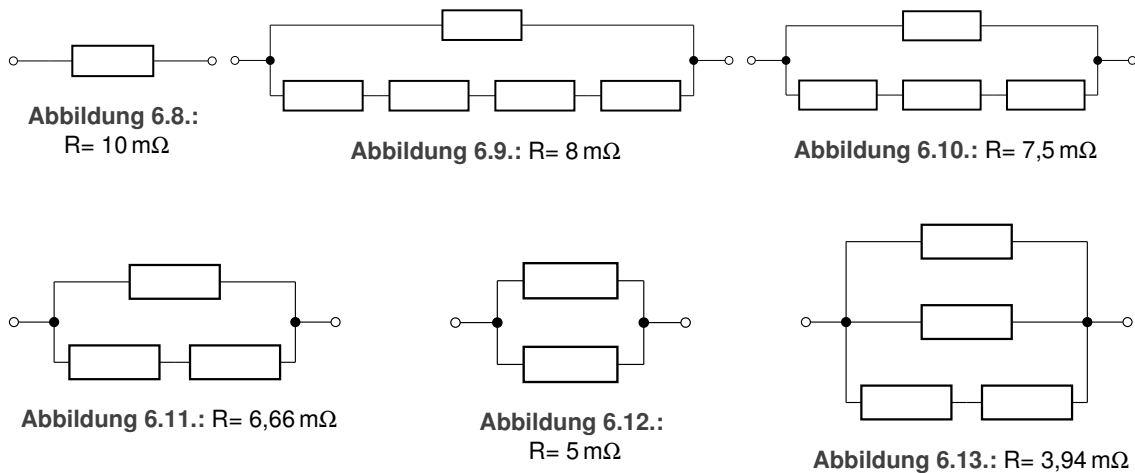
6.2.4. Vermessung im präparierten Fall mit einem Temperaturgradienten

Für den präparierten Fall des Temperaturgradienten wurden Widerstandswerte gewählt, die nahe an den Werten der Simulation liegen. Die Werte ergeben sich aus den in den Abbildungen 6.8 - 6.13 zu sehenden Verschaltungen von Widerständen mit 10 mΩ. Hinzu kommt der Anschlusswiderstand der Widerstände an die Zelldummys von ca. 1 mΩ.

Tabelle 6.5.: Widerstände der Zellenachbildung zur Simulation eines Temperaturgefälles

Zelle	Widerstand	Gesamtwiderstand Zelle
1	10,00 mΩ	11,00 mΩ
2	10,00 mΩ	11,00 mΩ
3	8,00 mΩ	9,00 mΩ
4	7,50 mΩ	8,50 mΩ
5	6,66 mΩ	7,66 mΩ
6	5,00 mΩ	6,00 mΩ
7	5,00 mΩ	6,00 mΩ
8	3,94 mΩ	4,94 mΩ
9	3,94 mΩ	4,94 mΩ

6 Experimente



Die Widerstandsverschaltungen mit diesen Werten werden in einen String aus 9 Zellen des mittleren Zellmoduls der 3s36p-Verschaltung eingelötet. Die so modifizierte Schaltung wird mit 10 A angeregt und der Spannungsabfall gemessen. Zunächst werden die Werte des Strings aus 9 Zellen in Tabelle 6.6 aufgezeichnet. Anschließend werden die Auswirkungen auf die benachbarten Stränge gemessen. Die Messergebnisse sind in Tabelle 6.7 zu sehen.

Tabelle 6.6.: Messergebnisse des Temperaturgradienten am Batteriedummy bei 10,06 A Anregestrom

Abgriff	Spannung
MP1	2,750 mV
MP2	2,618 mV
MP3	2,545 mV
MP4	2,503 mV
MP5	2,334 mV
MP6	2,252 mV
MP7	2,181 mV
MP8	2,120 mV
MP9	2,049 mV
Ref	3,169 mV

Tabelle 6.7.: Messergebnisse des mittleren Moduls an den oberen Messabgriffen bei 10,06 A Anregestrom

Messpunkt	MP21	MP22	MP23	MP24
Spannung	3,055 mV	3,058 mV	3,067 mV	2,750 mV

Der messbare Spannungsfall zwischen dem idealen Fall an den oberen Abgriffspunkten und dem mit dem Temperaturgradienten modifizierten String beträgt 419 μV . Der Spannungsfall zwischen der obersten und der untersten Zelle des betroffenen Strings beträgt

701 μV . Dieses Spannungsgefälle zeigt die Schwierigkeit in der Position der Spannungsmessung am Batteriemodul.

7. Auswertung

In diesem Kapitel wird zunächst die Konstruktion auf Grundlage ihres Einsatzzwecks bewertet. Danach erfolgt eine detaillierte Analyse der Simulationsergebnisse sowie der experimentellen Messergebnisse im Kontext der elektrochemischen Impedanzspektroskopie an Zellmodulen. Die Auswertung bezieht sich auf die gemessenen Kenngrößen, um eine umfassende Bewertung der erzielten Resultate zu ermöglichen.

Die Simulationsergebnisse werden einer sorgfältigen Überprüfung unterzogen und mit den tatsächlich gemessenen Werten verglichen. Dabei werden Abweichungen und Übereinstimmungen identifiziert, um mögliche Diskrepanzen zu erklären oder Verbesserungspotenziale aufzuzeigen. Diese Bewertung bildet die Grundlage für Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Zuverlässigkeit und Präzision der Simulation als Modellierungsinstrument.

7.1. Bewertung der Konstruktion

Die erstellte Konstruktion des Zellmoduls Abbildung 3.1 ermöglicht wie gefordert eine Nachbildung der 3s36p-Verschaltung und bietet die Möglichkeit der Vermessung aller Übergangswiderstände zwischen den Zellen. Bestückt werden kann das Modul durch die Modifikationen mit echten Lithium-Ionen-Zellen oder mit Dummyzellen.

Zur Verbindung der Zellmodule dient der Zellverbinder. Dieser Verbinder hat einen vom Original abweichenden Widerstand, da er aus Messing gefertigt ist. Die Widerstandsdifferenz zum Original lässt sich in der Simulation berücksichtigen und stellt dadurch kein Problem für die Vergleichbarkeit dar. Durch die geringere Federwirkung des genutzten Messingblechs kann es nach mehrfachem Stecken der Module zu schlechten Kontaktbedingungen führen. Ein Nachbiegen der Kontakte kann diesem vorbeugen. Dies führt auf lange Sicht jedoch zu Materialermüdung. Für einen Versuchsaufbau und Prototypen sind diese Schwierigkeiten hinnehmbar. Die Tauglichkeit der steckbaren Abgriffe zwischen den Einzellzellen sowie die Verwendbarkeit der oberen Fähnchen als Lötflächen wurde während der Masterarbeit nicht getestet, da diese Funktionen zunächst nicht benötigt wurden.

Die Zelldummys erlauben ein Bestücken des Zellmoduls mit unterschiedlichen Innenwiderständen. Diese können sowohl rein ohmsch als auch durch den Anschluss von ande-

ren Bauteilkonstellationen komplexe Impedanzen darstellen. Der Anschluss der Bauteile erfolgt über Lötflächen, um die nötige Niederohmigkeit sicherzustellen. Die Messungen in Abschnitt 6.2.1 haben ergeben, dass die Dummyzellen bestückt mit einem Widerstand mit $10\text{ m}\Omega$ im Mittel einen Gesamtwiderstand von $11,1\text{ m}\Omega$ aufweisen. Der Zelldummy selbst besitzt somit einen Innenwiderstand von $1,1\text{ m}\Omega$. Dies wurde in der Simulation berücksichtigt, da die Ergebnisse sonst nicht vergleichbar sind.

Alle Einzelteile des Zellmoduls, welche aus Kunststoff gefertigt werden, sind mit dem 3D-Drucker ohne Stützstruktur fertigbar und müssen dadurch fast nicht nachbearbeitet werden. Die Fertigung des Zellverbinders hingegen ist sehr aufwendig, da nach dem Schneiden im Wasserstrahlverfahren zunächst der Grad entfernt werden muss und die Biegungen der Kronen von Hand durchgeführt werden. Für die Fertigung einer höheren Stückzahl sollte hierfür ein Biegewerkzeug konstruiert werden.

7.2. Vergleich der Ergebnisse

Die geringen Werteänderungen in der Simulation zeigen in beiden Simulationsfällen deutlich, wie schwierig es ist, Veränderungen der vorliegenden Parallelschaltung mittels eines Einzelabgriffs zu ermitteln. Sowohl die Positionierung des Messabgriffes als auch der verwendete Anregestrom sind ausschlaggebend für die Messung der Veränderung.

7.2.1. Ideales Verhalten

Bei der Betrachtung der Ruhespannungen der Simulation und des Zellnachbaus in Kapitel 5.1 sowie 6.2.2 zeigt sich für die Simulation eine Spannung von $3,083\text{ mV}$ und bei der Messung $3,160\text{ mV}$ bis $3,182\text{ mV}$. Dies ist eine Differenz von bis zu $99\text{ }\mu\text{V}$. Diese kann aus Bauteiltoleranzen in den Innenwiderständen des Zelldummys sowie aus Fehlannahmen der Übergangswiderstände resultieren. Es könnte sich jedoch ebenso um einen systematischen Fehler in der Simulation handeln, der aus der Vernachlässigung oder Nichtbeachtung von Widerständen oder Effekten resultiert.

7.2.2. Zellalterung

Bei einer Innenwiderstandserhöhung einer Einzelzelle, welches das gewählte Szenario für eine Zellalterung ist, wurden in Simulation und Messung vergleichbare Ergebnisse erzielt.

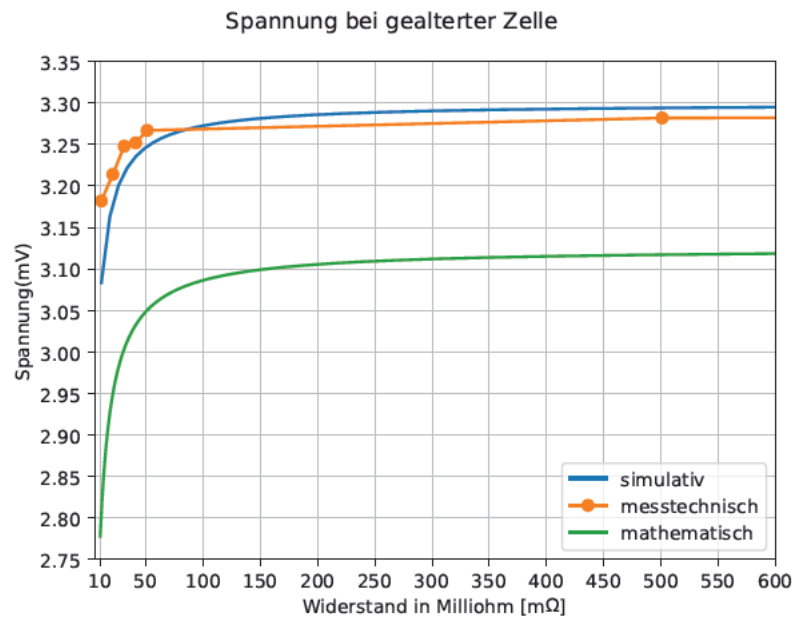


Abbildung 7.1.: Vergleich der Spannungen aus Simulation, Messung und vereinfachtem mathematischem Modell

Die Abbildung 7.1 zeigt die Ergebnisse der Simulation und der Messung. Hierbei ist gut zu erkennen, um wie viel besser die Simulationsergebnisse gegenüber einer groben mathematischen Abschätzung sind. Die hier eingefügte mathematische Kurve ist die Rechnung paralleler Zelleninnenwiderstände ohne Übergangswiderstände zwischen den Zellen.

Abbildung 7.2 zeigt noch einmal genauer die Abweichungen zwischen Messung und Simulation. Obwohl die Graphen so dicht beieinander liegen, führt eine geringe Fehlmessung durch die Steilheit der Kurve im zweistelligen Milliohmbereich zu hohen Widerstandsdifferenzen.

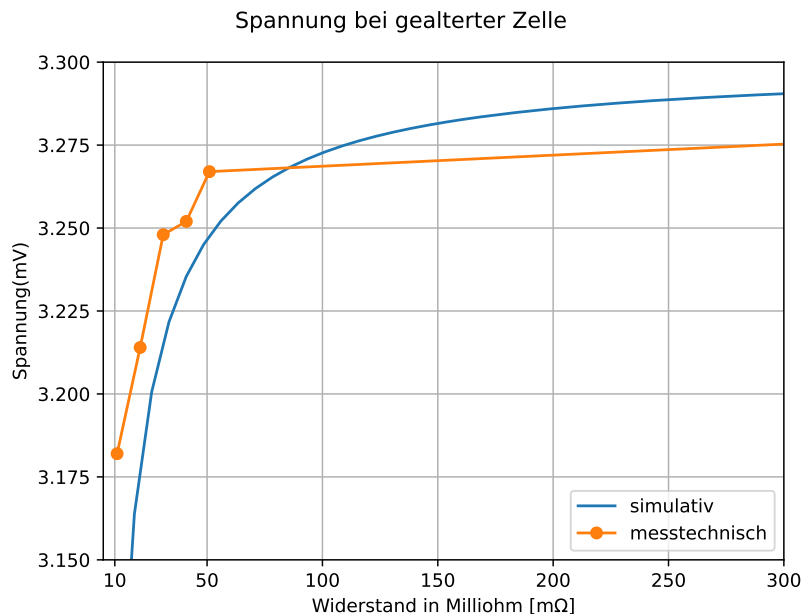


Abbildung 7.2.: Vergleich der Spannungen der Simulation und Messung

Um die Kurve der Simulation den realen Messungen noch weiter anzupassen, müssen die Annahmen der Übergangswiderstände angepasst werden. Gut zu sehen ist in Abbildung 7.1, wie sich der Kurvenverlauf vom mathematischen Modell ohne Übergangswiderstände zu der Simulation mit Übergangswiderständen geändert hat. Eine Erhöhung der Übergangswiderstände würde zu einer weiteren Anhebung der Ausgangsspannungslage führen. Dies würde die Simulationskurve bei 11 mΩ weiter in Richtung Messung anheben, ohne dass sich die maximale Spannungslage bei hohen Innenwiderständen stark verändert.

Somit ist davon auszugehen, dass die Übergangswiderstände des Simulationsmodells nicht exakt mit denen des realen Modells zusammenpassen. Um die Genauigkeit weiter zu erhöhen, könnte zunächst untersucht werden, ob das Simulationsmodell konstruktive Fehler aufweist. Alternativ könnte ein Fitting der Übergangswiderstände mit Hilfe der Messungen durchgeführt werden, um die Simulationsparameter genau abzustimmen.

7.2.3. Temperaturänderung

Durch die angenommene Temperaturänderung des Strings wurde eine Verringerung der Zellinnenwiderstände angenommen. Da eine Temperaturänderung nur selten punktuell auftritt, sondern meist auch eine Auswirkung auf umliegende Zellen hat, wurde für einen String aus 9 Zellen ein Temperaturgradient angenommen. Eine Halbierung des Wider-

7 Auswertung

standes an der untersten Zelle mit einem Temperaturgradienten zur obersten Zelle wurde simuliert und anschließend vermessen. Der Vergleich der Messung mit der Simulation zeigt einen ähnlichen Trend wie zuvor schon in der nachgestellten Zellalterung. In der Simulation zeigt sich an dem betroffenen String eine Spannungsänderung von 3,083 mV auf 2,363 mV und in der Messung wurde eine Spannungsänderung von 3,169 mV auf 2,750 mV festgestellt. Die Differenzen betragen somit 710 μ V in der Simulation und 419 μ V in der Messung.

Zusätzlich zum oberen Messabgriff wurden auch die Spannungen zwischen den Einzelzellen am Zellverbinder gemessen und simuliert. In der Simulation ergibt sich zwischen der Messung an der obersten Zelle und der untersten Zelle ein Spannungsunterschied von 319 μ V. In der experimentellen Vermessung ergab sich dort ein Wert von 701 μ V.

Wenn man nun die Veränderung der Spannung der untersten Zelle im Vergleich zum ideal ausgeglichenen Fall betrachtet, ergibt sich für die Simulation ein Wert von 1,029 mV und für die Messung 1,120 mV. Die an dem Punkt doch sehr ähnlichen Ergebnisse lassen auch hier die Ursache für die Messunterschiede in den gewählten Übergangswiderständen der Zellverbinder vermuten. Wenn die Widerstände höher gewählt werden steigt auch die Spannung, die an den oberen Zellen gemessen wird, sodass sich Simulation und Messung annähern.

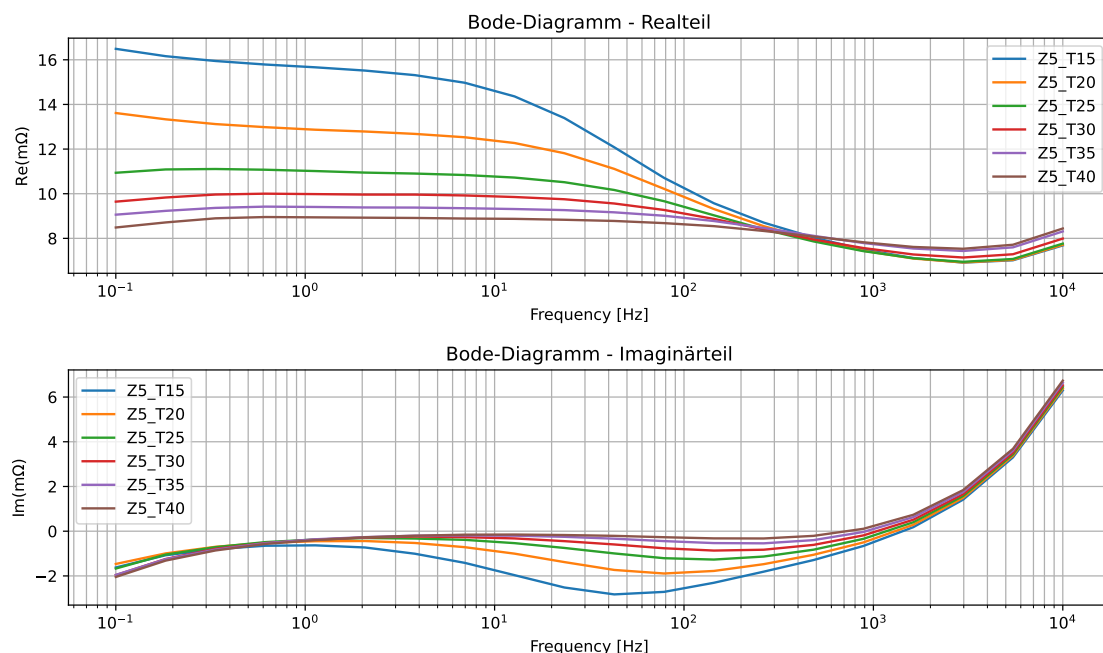


Abbildung 7.3.: Bodeplot der Messergebnisse der Zelle 5

Die Vermessung der Molicell 21700-P45B hat, wie in Abbildung 7.3 zu sehen, eine geringere Widerstandsänderung über die Temperatur als zunächst angenommen. Eine Halbierung des Innenwiderstandes ist dennoch durchaus realistisch, jedoch nicht im Bereich der optimalen Betriebstemperatur einer Zelle. Die Widerstandsänderungen sind bei geringer Temperatur deutlich größer als bei hohen Temperaturen. Somit ist eher mit einer Verdoppelung des Innenwiderstandes durch Kälte unter 0 °C zu rechnen, als mit einer Halbierung des Widerstandes durch Temperaturen über 15 °C.

Die Gründe für die doch sehr geringe temperaturabhängige Veränderung können vielfältig sein und müssen für eine genauere Bewertung näher betrachtet werden. Mögliche Ursachen sind die Art des Messaufbaus, die nicht vollständig DC-freie Messung des Fuelcon-Eis-Meters oder eine ungleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb der Zelle.

Ein weiterer Grund für eine fehlerhaften Messungen könnte der nicht abgeschlossene Formierungsprozess der werksneuen Lithium-Ionen-Zellen sein. In der Doktorarbeit [5, S. 52 f] wird dieses Verhalten beschrieben. Es geht hierbei um die nach dem Herstellungsprozess häufig noch nicht vollständig abgeschlossene Bildung der SEI-Schichten innerhalb der Zelle. Durch die Formierung verändern sich die Eigenschaften der Zelle in den ersten Ladezyklen, sodass es bei EIS-Messungen zu fehlerhaften Interpretationen führen kann.

8. Zusammenfassung und Perspektive

In diesem Kapitel wird zunächst ein Gesamtfazit der Arbeit in Bezug auf die gelieferten Erkenntnisse präsentiert.

Abschließend erfolgt ein Ausblick auf die Fortsetzung der Untersuchungen. Es werden potenzielle Forschungsrichtungen und weiterführende Analysen skizziert, um die Erkenntnisse der Abschlussarbeit zu vertiefen. Dabei werden auch mögliche Erweiterungen des experimentellen Aufbaus oder die Integration zusätzlicher Parameter in die Simulation berücksichtigt. Diese Ausblicke zeigen Möglichkeiten auf, um innerhalb der Forschungsgruppe das Verständnis der elektrochemischen Impedanzspektroskopie auf Modulebene, bezogen auf die Parallelschaltung von Zellen, weiter auszubauen.

8.1. Fazit

In dieser Arbeit wurde der Einfluss von parallelgeschalteten Zellen auf die Vermessung mittels elektrochemischer Impedanzspektroskopie betrachtet, indem ein mechanischer Nachbau eines konventionellen Akkumulators entwickelt wurde. Anschließend wurde eine Simulation von Veränderungen innerhalb der Parallelschaltung durchgeführt und diese mit experimentellen Messungen verglichen.

Mit der mechanischen Konstruktion des Zellmoduls ist ein Modell entstanden, dass gut mit dem Original vergleichbar ist. Es ist zudem mit dem kommerziellen Modul kompatibel und mit diesem kombinierbar. Für den Laborbetrieb ist die Konstruktion modular mit Zellen oder Zelldummys erweiter- und modifizierbar. Die Dummyzellen mit den ohmschen Innenwiderständen haben auf elektrischer Ebene die Möglichkeit eröffnet, Modifikationen für die Messungen durchzuführen. Die Zellverschaltung konnte hierdurch in einen fest definierten Zustand gebracht werden, sodass das Modul unter bekannten Modellparametern vermessen und mit der Simulation verglichen werden konnte.

Die elektrische Simulation der Parallelschaltung erfolgte auf rein ohmscher Ebene und liefert zuverlässige Ergebnisse die mit den Messungen vergleichbar sind. Die angenommenen Modifikationsparameter wurden an Parametern realer Lithium-Ionen-Zellen angelehnt und anschließend durch Messungen an diesen mit den Untersuchungsergebnissen

verglichen. Die Simulation auf Basis der SPICE-Umgebung lieferte hierbei quantitativ gut interpretierbare Ergebnisse.

Auch eine Simulation mit komplexeren R-RC-Modellen lieferte in der Simulation erste Ergebnisse. Diese konnten jedoch zunächst nicht durch ein Experiment mit realen Zellen überprüft werden.

Die Messergebnisse zeigen die Schwierigkeiten auf, die durch die nicht ideale Parallelschaltung entstehen. Eine Parameterveränderung ist mittels EIS-Messung je nach Größe detektierbar, jedoch mit nur einem Messabgriff nicht einer bestimmten Zelle zuzuordnen. Eine Identifikation der Einzelzelle ist somit nicht möglich. Um Veränderungen in einem String aus 9 Zellen bereits bei kleinen Werteveränderungen zu erkennen, wird empfohlen, wenn es technisch möglich ist, die Messleitung in der Mitte des Strings anzubringen.

Da die Simulationen und Messungen nur auf ohmscher Ebene durchgeführt wurden, können die Einflüsse der Verbindungselemente auf die komplexe Impedanz nicht beurteilt werden.

8.2. Ausblick

Die Simulation ermöglicht es, Veränderungen an Zellen nachzubilden und deren Auswirkung auf die EIS-Messung zu untersuchen, ohne reale Lithium-Ionen-Zellen zu modifizieren. Um dieses Einsatzgebiet weiter zu vertiefen, sollte die Simulation weiter auf das reale Zellmodul abgestimmt werden. Dies kann durch Parameterfitting geschehen.

Die Simulation kann weiter ausgebaut werden und die Zelle durch ein weitreichenderes Modell nachgebildet werden, um Einflüsse auf die komplexe Impedanz zu ermitteln. Auch wäre eine erweiterte Modellierung der Übergangsverbindungen möglich.

Das entwickelte Zellmodul bietet die Möglichkeit, für weitere Versuche und Messungen mit modifizierten Zellen bestückt zu werden. Auch können Teilbestückungen oder Mischbestückungen durchgeführt werden. Die zusätzlichen Messabgriffe bieten hier die Möglichkeit, weitere Erkenntnisse innerhalb eines Moduls oder Strings zu gewinnen. Messungen können hierbei laufend mit der Simulation verglichen werden.

Das Simulationsgerüst bietet nicht nur die Möglichkeit einzelne Zellen zu verändern, auch können die Netzlisten an zukünftige Verschaltungsmodelle angepasst werden, um die Unterschiede verschiedener Zellstacks zu analysieren.

Abkürzungsverzeichnis

- AC** Wechselstrom/Wechselspannung (engl. alternating current)
ADC Analog-Digital-Converter
DC Gleichstrom/Gleichspannung (engl. direct current)
EIS elektrochemische Impedanzspektroskopie
FEM Finite Elemente Methode
FFT schnelle Fourier Transformation (engl. fast Fourier transform)
HAW Hochschule für Angewandte Wissenschaften
HB Harmonic-Balance
IC integrierten Schaltkreis (engl. integrated circuit)
LGS lineares Gleichungssystem
LiCoO₂ Lithium-Kobaltoxid
Li-Ion Lithium-Ionen
LiPF₆ Lithium-Hexafluorophosphat
PKW Personenkraftwagen
SEI Solid Electrolyte Interphase
SoC State of Charge
SPICE Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis
THT Durchsteckmontage (engl. through-hole-technology)

Abbildungsverzeichnis

2.1. Verschiedene Zelltypen im Vergleich [2]	4
2.2. RC-Glied nach Randles	7
2.3. Bodediagramm eines Li-Ion-Batteriemodells mit 3 RC-Gliedern	8
2.4. Nyquistdiagramm eines Li-Ion-Batteriemodells mit 3 RC-Gliedern	9
2.5. Kirchhoffsche Gesetze	10
3.1. Rendering des nachgebauten Batteriemoduls	12
3.2. Zelldummy als Explosionszeichnung	14
4.1. Vereinfachtes Zellschaltbild mit 3 mal 3 Zellen und idealen Endplatten . .	18
4.2. Schaltung des mittels Knotenpotentialverfahren zu berechnenden Netzwerks	19
4.3. Vereinfachte Schaltung mit zusammengefassten Widerständen	19
4.4. Schaltpläne der Simulationsprogramme	24
4.5. Simulationsaufbau - Überblick	27
5.1. Nyquistplot von Zellstring 4 in Modul 2	28
5.2. Element X24 aus Abbildung 4.5 mit Darstellung der Einzelzellen als Innen- widerstände. R9 mit einem Innenwiderstand von 50 m Ω	31
5.3. Spannungspegel an den unterschiedlichen Messabgriffen des Kronenstrei- fens bei gealterter Zelle 9	32
5.4. Spannungspegel an Zelle 1 bei zunehmendem Widerstand der Zelle 9 . . .	33
5.5. Spannungspegel an Zelle 1 bei zunehmendem Widerstand der Zelle 9 bei 20 Ampere Anrege Strom	34
5.6. Spannungspegel bei mittigem Abgriff und zunehmendem Widerstand der Zelle 9 bei 10 Ampere Anrege Strom	35
5.7. Spannungspegel bei mittigem Abgriff und zunehmendem Widerstand der Zelle 9 bei 20 Ampere Anrege Strom	36
5.8. Spannung und Widerstand bei Temperaturänderung in Simulation	38
6.1. Nyquistplot der Eis-Meter Messungen des Serienmoduls	40
6.2. Nyquistplot der Eis-Meter Messungen der Einzelzelle	41

6.3. Aufbau für die Messung der Molicell P45B	42
6.4. Nyquistplot der Messergebnisse der Zelle 4 der P45B Messreihe	42
6.5. Nyquistplot der Messergebnisse der Zelle 5	43
6.6. Boxplot der Messergebnisse der Zellnachbildungen	44
6.7. Messergebnisse am String der gealterten Zelle	46
6.8. $R = 10 \text{ m}\Omega$	47
6.9. $R = 8 \text{ m}\Omega$	47
6.10. $R = 7,5 \text{ m}\Omega$	47
6.11. $R = 6,66 \text{ m}\Omega$	47
6.12. $R = 5 \text{ m}\Omega$	47
6.13. $R = 3,94 \text{ m}\Omega$	47
7.1. Vergleich der Spannungen aus Simulation, Messung und vereinfachtem mathematischem Modell	51
7.2. Vergleich der Spannungen der Simulation und Messung	52
7.3. Bodeplot der Messergebnisse der Zelle 5	53

Tabellenverzeichnis

4.1. Übergangswiderstände des original Kronenstreifens in Milliohm [$m\Omega$]	16
4.2. Übergangswiderstände des Messing-Kronenstreifens in Milliohm [$m\Omega$]	17
4.3. Parameter für das R-RC-Modell der Molicell 21700-P45B	17
5.1. Widerstände der Zellnachbildung zur Simulation eines Temperaturgefälles .	37
5.2. Spannungen in der Simulation eines Temperaturgefälles	37
5.3. Spannungen in der Simulation eines Temperaturgefälles am String aus 9 Zellen	37
6.1. Widerstand der Einzelzelle	44
6.2. Stichprobenmessung des Widerstands der Einzelzelle (Prüfstrom 1 Ampere)	44
6.3. Messergebnisse des mittleren Moduls an den oberen Messabgriffen bei 10,005 A Anrege Strom	45
6.4. Messung: Zellalterung durch Erhöhung des Innenwiderstands	45
6.5. Widerstände der Zellnachbildung zur Simulation eines Temperaturgefälles .	46
6.6. Messergebnisse des Temperaturgradienten am Batteriedummy bei 10,06 A Anrege Strom	47
6.7. Messergebnisse des mittleren Moduls an den oberen Messabgriffen bei 10,06 A Anrege Strom	47

Literatur

- [1] Seyed Mohammad Mahdi Alavi u. a. *Identifiability of Generalized Randles Circuit Models*. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 6. Nov. 2017. DOI: 10.1109/TCST.2016.2635582.
- [2] axeon. *Our Guide to Batteries*. URL: <https://www.altomelbilen.dk/presentationer/Guide%20To%20Batteries.pdf> (besucht am 20. 10. 2023).
- [3] BatteryMinds. *Alterung von Lithium-Ionen Zellen*. URL: <https://www.batteryminds.de/alterung> (besucht am 23. 09. 2023).
- [4] Xiaofeng Dinga u. a. *An Improved Thevenin Model of Lithium-ion Battery with High Accuracy for Electric Vehicles*. Applied Energy, Volume 254. 1. Nov. 2019. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113615.
- [5] Sophia Gantenbein. *Impedanzbasierte Modellierung von Lithium-Ionen Zellen und deren Degradationsverhalten*. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffe der Elektrotechnik. 16. Sep. 2019.
- [6] Tim Hettesheimer u. a. *Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionen-Batterien in der Elektromobilität*. Studie. Fraunhofer-Allianz Batterien. 2017.
- [7] Reiner Korthauer Hrsg. *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*. Springer-Vieweg, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-30653-2.
- [8] Peter Keil. *Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*. Dissertation. Technische Universität München, 19. Apr. 2017.
- [9] Peter Keil und Andreas Jossen. *Aufbau und Parametrierung von Batteriemodellen*. Bericht. Technische Universität München. URL: <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1162416/> (besucht am 23. 09. 2023).
- [10] Christiane Köllner. *Was sind die Vor- und Nachteile verschiedener Zellformate?* URL: <https://www.springerprofessional.de/batterie/energiespeicher/was-sind-die-vor--und-nachteile-verschiedener-zellformate-/19085588> (besucht am 23. 09. 2023).
- [11] Elektronik Kompendium. *Lithium-Ionen-Akkus*. URL: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/bau/0810281.htm> (besucht am 23. 09. 2023).

-
- [12] Johannes Schmalstieg. *Physikalisch-elektrochemische Simulation von Lithium-Ionen-Batterien*. Dissertation. RWTH Aachen. 2017.
- [13] Jan Philipp Schmidt u. a. *Measurement of the internal cell temperature via impedance: Evaluation and application of a new method*. Journal of Power Sources 243, S. 110-117. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.013>.
- [14] ROHM Semiconductor. *Was ist SPICE?* URL: <https://www.rohm.de/electronics-basics/spice/what-is-spice> (besucht am 08. 11. 2023).

Anhang

A. Simulation eines Batteriemodells mit RC-Gliedern

Python-Script der Simulation

```
1  """
2  RRC-Sim
3  Masterarbeit
4  Tobias Schwinghammer
5  10.10.2023
6  """
7  #####
8
9  from pathlib import Path
10 import os.path
11
12 import matplotlib.pyplot as plt
13 from PySpice.Plot.BodeDiagram import bode_diagram
14 import numpy as np
15 import math
16 #####
17
18 import PySpice.Logging.Logging as Logging
19 logger = Logging.setup_logging()
20
21 #####
22
23 from PySpice.Doc.ExampleTools import find_libraries
24 from PySpice.Probe.Plot import plot
25 from PySpice.Spice.Library import SpiceLibrary
26 from PySpice.Spice.Netlist import SubCircuitFactory
27 from PySpice.Spice.Parser import SpiceParser
28 from PySpice.Unit import *
29
30 #####
31
32 libraries_path = find_libraries()
33 spice_library = SpiceLibrary(libraries_path)
34
35 #####
36 #Read the generated netlist.
37 directory_path = Path().resolve()
38 kicad_netlist_path = directory_path.joinpath('RRC-Netlist.net')
39 parser = SpiceParser(path=str(kicad_netlist_path))
40
41 #Build the circuit and translate the ground (6 to 0).
42 circuit = parser.build_circuit(ground=6)
43 circuit.SinusoidalCurrentSource('1', '1', circuit.gnd, amplitude=1@u_A)
44
45 #Perform a ac simulation.
46 simulator = circuit.simulator(temperature=25, nominal_temperature=25)
47 analysis = simulator.ac(start_frequency=1@u_mHz, stop_frequency=20@u_kHz, number_of_points=101, variation='dec')
48
49 #Plot Nyquistplot
50 fig, ax = plt.subplots(figsize=(8, 4))
```

A Simulation eines Batteriemodells mit RC-Gliedern

```
51 fig.suptitle("Nyquist-Diagramm des Batteriemodells")
52 ax.plot(np.real(-analysis['1']), np.imag(analysis['1']))
53 ax.set_xlim(0.006, 0.014)
54 ax.set_ylim(-0.001, 0.006)
55 ax.grid(True)
56 ax.grid(True, which='minor')
57 ax.set_xlabel("Re(Ohm)")
58 ax.set_ylabel("Im(Ohm)")
59
60
61 datapoints = np.real(-analysis['1'])
62 datapoints2 = np.imag(analysis['1'])
63
64 ax.text(datapoints[0], datapoints2[0], str(analysis.frequency[0]))
65 ax.plot(datapoints[404], datapoints2[404], marker="x", color="red")
66 ax.text(datapoints[404], datapoints2[408], " " + str(round(analysis.frequency[404])) + " Hz")
67 ax.plot(datapoints[505], datapoints2[505], marker="x", color="red")
68 ax.text(datapoints[505], datapoints2[515], " " + str(round(analysis.frequency[505])) + " Hz")
69 ax.plot(datapoints[576], datapoints2[576], marker="x", color="red")
70 ax.text(datapoints[576], datapoints2[600], " " + "500" + " Hz")
71 ax.plot(datapoints[677], datapoints2[677], marker="x", color="red")
72 ax.text(datapoints[677], datapoints2[720], " " + "5000" + " Hz")
73
74 plt.savefig("Impedanzspektrum.pdf")
75 plt.show(block=False)
76
77 #Plot Bodeplot
78 figure, axes = plt.subplots(2, figsize=(8, 4))
79 figure.suptitle("Bode-Diagramm des Batteriemodells")
80 axes[0].set_xlim(0.001, 10000)
81 axes[0].set_xscale("log")
82 axes[0].semilogx(analysis.frequency, 20*np.log10(np.absolute(analysis['1'])))
83 axes[0].grid(True)
84 axes[0].grid(True, which='minor')
85 axes[0].set_xlabel("Frequency [Hz]")
86 axes[0].set_ylabel("Gain [dB]")
87
88 axes[1].semilogx(analysis.frequency, np.angle(analysis['1'], deg=False))
89 axes[1].set_xlim(0.001, 10000)
90 axes[1].set_ylim(math.pi/4*3, math.pi+0.1)
91 axes[1].grid(True)
92 axes[1].grid(True, which='minor')
93 axes[1].set_xlabel("Frequency [Hz]")
94 axes[1].set_ylabel("Phase [rads]")
95 axes[1].set_yticks((math.pi/4*3, math.pi), (r"$\frac{3}{4}\pi$", r"$\pi$"))
96
97 plt.tight_layout()
98 plt.savefig("Bodeplot.pdf")
99 plt.show()
```

In der Simulation verwendete Netzliste

```
1 * RRC-Netlist.net
2 * Masterarbeit
3 * Tobias Schwinghammer
4
5 * Netlist:
6 R1 1 3 6.5mR
7 R2 2 3 4mR
8 C1 2 3 600mC
9 C2 2 4 150mC
10 R3 2 4 1mR
11 C3 4 5 5C
12 R4 4 5 16mR
13 L1 5 6 1nH
14
15 .tran 3m startup
16 .end
```

B. Knotenpotentialanalyse

Matrizen zu der Berechnung der komplexen Knotenpotentialanalyse aus Kapitel 4.2:

$$G = \begin{pmatrix} G_{11} & G_a & G_a & G_a & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_a & G_{22} & G_b & 0 & G_a & 0 & 0 & 0 \\ G_a & G_b & G_{33} & G_b & 0 & G_a & 0 & 0 \\ G_a & 0 & G_b & G_{44} & 0 & 0 & G_a & 0 \\ 0 & G_a & 0 & 0 & G_{55} & G_b & 0 & G_a \\ 0 & 0 & G_a & 0 & G_b & G_{66} & G_b & G_a \\ 0 & 0 & 0 & G_a & 0 & G_b & G_{77} & G_a \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_a & G_a & G_a & G_{88} \end{pmatrix} \quad (\text{B.1})$$

$$G_a = -\frac{1}{R_0 + 2 \cdot R_u + \frac{R_1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi \cdot \left(R_1 + \frac{1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi}\right)}} \quad (\text{B.2})$$

$$G_b = -\frac{1}{R_k} \quad (\text{B.3})$$

$$G_{11} = G_{88} = \frac{3}{R_0 + 2 \cdot R_u + \frac{R_1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi \cdot \left(R_1 + \frac{1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi}\right)}} \quad (\text{B.4})$$

$$G_{22} = G_{44} = G_{55} = G_{77} = \frac{1}{R_k} + \frac{2}{R_0 + 2 \cdot R_u + \frac{R_1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi \cdot \left(R_1 + \frac{1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi}\right)}} \quad (\text{B.5})$$

$$G_{33} = G_{66} = \frac{2}{R_k} + \frac{2}{R_0 + 2 \cdot R_u + \frac{R_1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi \cdot \left(R_1 + \frac{1}{2 \cdot C \cdot f \cdot j \cdot \pi}\right)}} \quad (\text{B.6})$$

C. Python Include-Datei für die SPICE-Simulationen

```
1  '''
2  Includes fuer das Projekt Batteriemodell
3  Tobias Schwinghammer
4  Masterarbeit
5  10.10.2023
6  '''
7  #####
8
9  from pathlib import Path
10 import os.path
11
12 import matplotlib.pyplot as plt
13 from PySpice.Plot.BodeDiagram import bode_diagram
14 import numpy as np
15 import math
16 import pandas as pd
17 #####
18
19 import PySpice.Logging.Logging as Logging
20 logger = Logging.setup_logging()
21
22 #####
23
24 from PySpice.Doc.ExampleTools import find_libraries
25 from PySpice.Probe.Plot import plot
26 from PySpice.Spice.Library import SpiceLibrary
27 from PySpice.Spice.Netlist import Circuit, SubCircuit, SubCircuitFactory
28 from PySpice.Spice.Parser import SpiceParser
29 from PySpice.Unit import *
30
31 #####
```

D. Script ideale 3s36p-Verschaltung R-RC Simulation

Python-Script der Simulation

```
1 #####
2 """
3 3s36p_normal_transient
4 Masterarbeit
5 Tobias Schwinghammer
6 09.10.2023
7 Subcircuit Probleme geloeset mit https://github.com/PySpice-org/PySpice/issues/291
8 """
9 #####
10 # Alle Imports ausgelagert!
11 from includes import *
12
13 #####
14 libraries_path = find_libraries()
15 spice_library = SpiceLibrary(libraries_path)
16
17 #####
18 # r# We read the generated netlist.
19 directory_path = Path().resolve()
20 netlist_path = directory_path.joinpath('edit_3s36p_normal_circuit.net')
21 parser = SpiceParser(path=str(netlist_path))
22
23 #####
24 # modify Netlist
25 with open(netlist_path, 'r') as netlist:
26     netlistdata = netlist.read()
27
28     netlistdata = netlistdata.replace('mu', 'u')
29
30     with open(netlist_path, 'w') as netlist:
31         netlist.write(netlistdata)
32 #####
33
34
35 # r# We build the circuit and translate the ground (5 to 0).
36 circuit = parser.build_circuit(ground='K0')
37
38 # r# We perform a transient simulation.
39 simulator = circuit.simulator(temperature=25, nominal_temperature=25)
40 analysis = simulator.transient(step_time=1 @ u_us, end_time=2 @ u_ms, use_initial_condition=True)
41 # analysis = simulator.ac(start_frequency=1@u_mHz, stop_frequency=100@u_kHz, number_of_points=101, variation='dec')
42
43 fig, ax = plt.subplots()
44 fig.suptitle("Knotenspannungen des 3s36p Aufbaus")
45 ax.plot((analysis['M1p']))
46 ax.plot(analysis['M2p'])
47 ax.plot(analysis['M3p'])
48 ax.legend(['M1p', 'M2p', 'M3p'])
49 ax.grid(True)
50 ax.grid(True, which='minor')
```

```
51 ax.set_xlabel("Sampels")
52 ax.set_ylabel("Spannung(V)")
53
54 plt.show()
```

Ausgelagerte Python Plotfunktion

```
1 #####
2 """
3 ploty
4 Masterarbeit
5 Tobias Schwinghammer
6 10.10.2023
7 Plotfunktionen werden hierdrin definiert
8 """
9 import matplotlib.pyplot as plt
10
11 #####
12 # Alle Imports ausgelagert!
13 from includes import *
14
15
16 #####
17
18 def nyquist(vlow, vhigh, label, frequencies):
19     fig = plt.figure(label)
20     ax = fig.add_subplot(1,1,1)
21     fig.suptitle("Nyquistdiagramm " + label)
22     voltage = vhigh - vlow
23     ax.plot(np.real(voltage), np.imag(-voltage))
24     ax.grid(True)
25     ax.grid(True, which='minor')
26     ax.set_xlabel("Re(Ohm)")
27     ax.set_ylabel("-Im(Ohm)")
28
29     numberofsamples = len(voltage)
30     textpos = np.linspace(start=numberofsamples-1, stop=1, num=4, dtype=int)
31     volt = np.real(voltage)
32     volt2 = np.imag(-voltage)
33     for pos in textpos:
34         ax.text(volt[pos], volt2[pos], str(frequencies[pos]))
35     plt.show(block=False)
36
37
38 def subnyquist(vlow, vhigh, label, frequencies, plth, pltv, pltn):
39     fig = plt.figure('Nyquist')
40     fig.set_size_inches(11, 11)
41     fig.subplots_adjust(left=0.05,
42                         bottom=0.05,
43                         right=0.95,
44                         top=0.9,
45                         wspace=0.4,
46                         hspace=0.5)
47     ax = fig.add_subplot(plth, pltv, pltn)
48     fig.suptitle("Nyquistdiagramme ")
49     ax.set_title(label)
50     voltage = vhigh - vlow
51     ax.plot(np.real(voltage), np.imag(-voltage))
52     ax.ticklabel_format(axis='both', style='sci', scilimits=(0, 0))
53     ax.grid(True)
54     ax.grid(True, which='minor')
55     ax.set_xlabel("Re(Ohm)")
56     ax.set_ylabel("-Im(Ohm)")
57
58     numberofsamples = len(voltage)
59     textpos = [0, 405, 452, 475, 523, 536, 560, 591, 707]
60     volt = np.real(voltage)
61     volt2 = np.imag(-voltage)
62     for pos in textpos:
```

D Script ideale 3s36p-Verschaltung R-RC Simulation

```
63         ax.text(volt[pos], volt2[pos], str(round(frequencies[pos])) + "Hz")
64     plt.show(block=False)
```

In der Simulation verwendete Netzliste

```
1 * .\edit_3s36p_normal_circuit.net
2 XX11 K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9er_string_mit_korken
3 XX12 K10 K11 K12 K13 K14 K15 K16 K17 K18 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9er_string_mit_korken
4 XX13 N037 N040 N043 N046 N049 N052 N055 N058 N061 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9
   er_string_mit_korken
5 XX14 N064 N067 N070 N073 N076 N079 N082 N085 N088 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9
   er_string_mit_korken
6 I1 K0 Kplus 10
7 XX21 N001 N003 N005 N007 N009 N011 N013 N015 N017 K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 9er_string_mit_korken
8 XX22 N019 N021 N023 N025 N027 N029 N031 N033 N035 K10 K11 K12 K13 K14 K15 K16 K17 K18 9er_string_mit_korken
9 XX23 N038 N041 N044 N047 N050 N053 N056 N059 N062 N037 N040 N043 N046 N049 N052 N055 N058 N061 9er_string_mit_korken
10 XX24 N065 N068 N071 N074 N077 N080 N083 N086 N089 N064 N067 N070 N073 N076 N079 N082 N085 N088 9er_string_mit_korken
11 XX31 N002 N004 N006 N008 N010 N012 N014 N016 N018 N001 N003 N005 N007 N009 N011 N013 N015 N017 9er_string_mit_korken
12 XX32 N020 N022 N024 N026 N028 N030 N032 N034 N036 N019 N021 N023 N025 N027 N029 N031 N033 N035 9er_string_mit_korken
13 XX33 N039 N042 N045 N048 N051 N054 N057 N060 N063 N038 N041 N044 N047 N050 N053 N056 N059 N062 9er_string_mit_korken
14 XX34 N066 N069 N072 N075 N078 N081 N084 N087 N090 N065 N068 N071 N074 N077 N080 N083 N086 N089 9er_string_mit_korken
15 XX1 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N002 N004 N006 N008 N010 N012 N014 N016 N018 9er_korken
16 XX2 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N020 N022 N024 N026 N028 N030 N032 N034 N036 9er_korken
17 XX3 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N039 N042 N045 N048 N051 N054 N057 N060 N063 9er_korken
18 XX4 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N066 N069 N072 N075 N078 N081 N084 N087 N090 9er_korken
19 R1 M11p Kplus 100uR
20 R2 M11n K1 100uR
21 R3 M11n M11p 3MegR
22 R4 M12p Kplus 100uR
23 R5 M12n K10 100uR
24 R6 M12n M12p 3MegR
25 R7 M13p Kplus 100uR
26 R8 M13n N037 100uR
27 R9 M13n M13p 3MegR
28 R10 M14p Kplus 100uR
29 R11 M14n N064 100uR
30 R12 M14n M14p 3MegR
31 R13 M24p N064 100uR
32 R14 M24n N065 100uR
33 R15 M24n M24p 3MegR
34 R16 M23p N037 100uR
35 R17 M23n N038 100uR
36 R18 M23n M23p 3MegR
37 R19 M22p K10 100uR
38 R20 M22n N019 100uR
39 R21 M22n M22p 3MegR
40 R22 M21p K1 100uR
41 R23 M21n N001 100uR
42 R24 M21n M21p 3MegR
43 R25 M31p N001 100uR
44 R26 M31n N002 100uR
45 R27 M31n M31p 3MegR
46 R28 M32p N019 100uR
47 R29 M32n N020 100uR
48 R30 M32n M32p 3MegR
49 R31 M33p N038 100uR
50 R32 M33n N039 100uR
51 R33 M33n M33p 3MegR
52 R34 M34p N065 100uR
53 R35 M34n N066 100uR
54 R36 M34n M34p 3MegR
55
56 * block symbol definitions
57 .subckt 9er_string_mit_korken N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
58 R1 N001 N002 13mR
59 R2 N003 N004 13mR
60 R3 N005 N006 13mR
61 R4 N007 N008 13mR
62 R5 N009 N010 13mR
```

D Script ideale 3s36p-Verschaltung R-RC Simulation

```
63 R6 N011 N012 13mR
64 R7 N013 N014 13mR
65 R8 N015 N016 13mR
66 R9 N017 N018 13mR
67 R10 N1 N001 2mR
68 C1 N1 N001 600mC
69 R11 N2 N003 2mR
70 R12 N3 N005 2mR
71 R13 N4 N007 2mR
72 R14 N5 N009 2mR
73 R15 N6 N011 2mR
74 R16 N7 N013 2mR
75 R17 N8 N015 2mR
76 R18 N9 N017 2mR
77 C2 N2 N003 600mC
78 C3 N3 N005 600mC
79 C4 N4 N007 600mC
80 C5 N5 N009 600mC
81 C6 N6 N011 600mC
82 C7 N7 N013 600mC
83 C8 N8 N015 600mC
84 C9 N9 N017 600mC
85 R19 N002 N004 100uR
86 R20 N004 N006 100uR
87 R21 N006 N008 100uR
88 R22 N008 N010 100uR
89 R23 N010 N012 100uR
90 R24 N012 N014 100uR
91 R25 N014 N016 100uR
92 R26 N016 N018 100uR
93 R27 N002 P1 100uR
94 R28 N004 P2 100uR
95 R29 N006 P3 100uR
96 R30 N008 P4 100uR
97 R31 N010 P5 100uR
98 R32 N012 P6 100uR
99 R33 N014 P7 100uR
100 R34 N016 P8 100uR
101 R35 N018 P9 100uR
102 .ends 9er_string_mit_korken
103
104 .subckt 9er_korken N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
105 R19 N1 N2 100uR
106 R20 N2 N3 100uR
107 R21 N3 N4 100uR
108 R22 N4 N5 100uR
109 R23 N5 N6 100uR
110 R24 N6 N7 100uR
111 R25 N7 N8 100uR
112 R26 N8 N9 100uR
113 R27 N1 P1 100uR
114 R28 N2 P2 100uR
115 R29 N3 P3 100uR
116 R30 N4 P4 100uR
117 R31 N5 P5 100uR
118 R32 N6 P6 100uR
119 R33 N7 P7 100uR
120 R34 N8 P8 100uR
121 R35 N9 P9 100uR
122 .ends 9er_korken
123
124 .backanno
125 .end
```

Plots der R-RC Simulation

Nyquistdiagramme

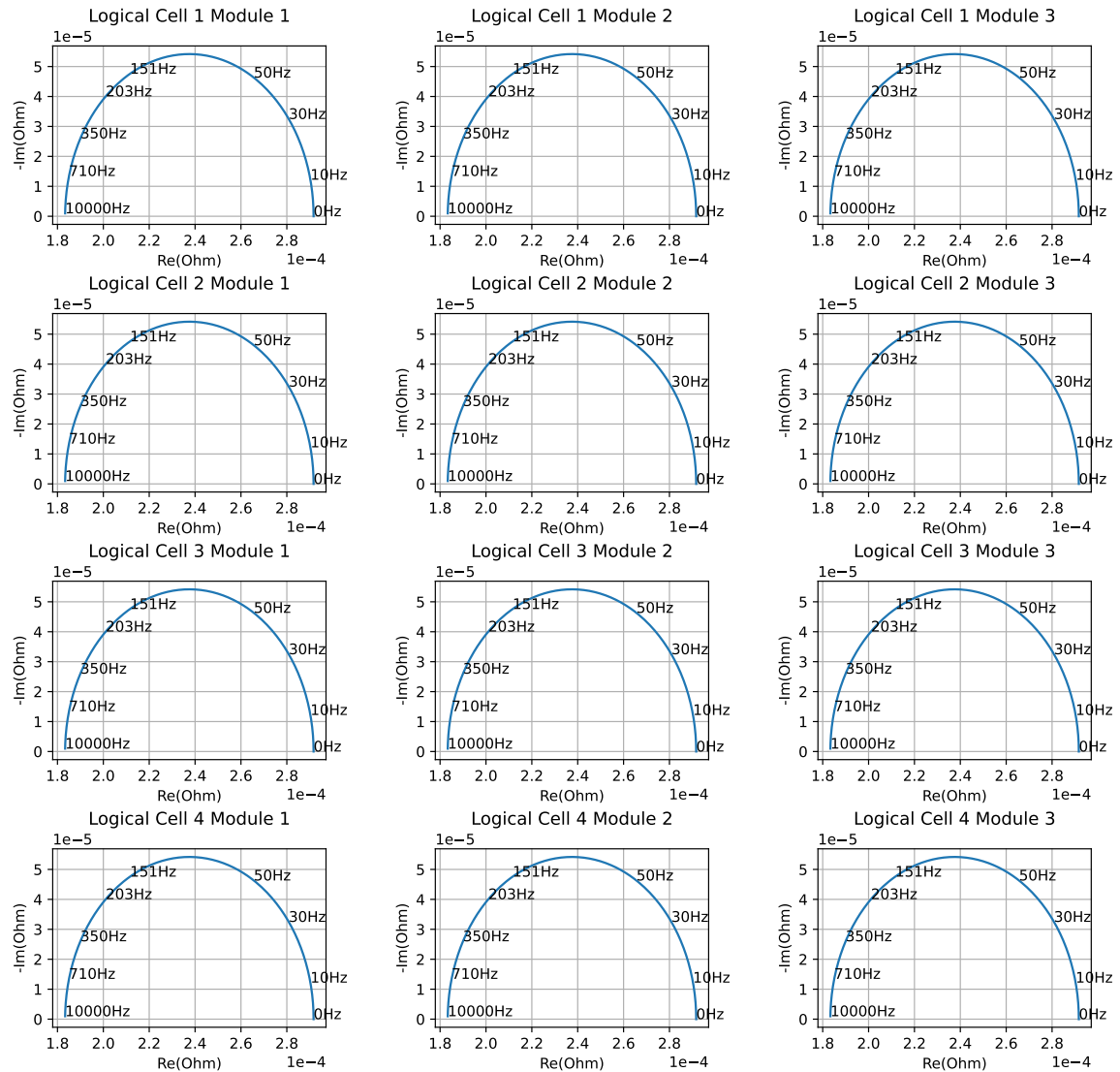


Abbildung D.1.: Nyquistplots der Zellstränge in den Modulen

E. Script ideale 3s36p-Verschaltung ohmsche Simulation

Python-Script der Simulation

```
1 #####
2 """
3 3s36p_alterung_ohmsch
4 Masterarbeit
5 Tobias Schwinghammer
6 25.10.2023
7 Subcircuit Probleme geloest mit https://github.com/PySpice-org/PySpice/issues/291
8 """
9 import matplotlib.pyplot as plt
10
11 #####
12 # Alle Imports ausgelagert!
13 from includes import *
14
15 #####
16 libraries_path = find_libraries()
17 spice_library = SpiceLibrary(libraries_path)
18
19 #####
20 # Read the generated netlist.
21 directory_path = Path().resolve()
22 netlist_path = directory_path.joinpath('3s36p_circuit_11mR.net')
23 parser = SpiceParser(path=str(netlist_path))
24
25 #####
26 # Modify Netlist
27 with open(netlist_path, 'r') as netlist:
28     netlistdata = netlist.read()
29
30 netlistdata = netlistdata.replace('mu', 'u')
31
32 with open(netlist_path, 'w') as netlist:
33     netlist.write(netlistdata)
34 #####
35
36
37 # Build the circuit and translate the ground (5 to 0).
38 circuit = parser.build_circuit(ground='K0')
39
40 # Perform a transient simulation.
41 simulator = circuit.simulator(temperature=25, nominal_temperature=25)
42 analysis = simulator.transient(step_time=1 @ u_us, end_time=2 @ u_ms, use_initial_condition=True)
43
44 fig, ax = plt.subplots()
45 fig.suptitle("Knotenspannungen des 3s36p Aufbaus")
46 fig.subplots_adjust(left=0.15,
47                     bottom=0.12,
48                     right=0.95,
49                     top=0.9,
50                     wspace=0.4,
```

E Script ideale 3s36p-Verschaltung ohmsche Simulation

```
51         hspace=0.5)
52
53 ax.plot(analysis['M23p']-analysis['M23n'], linestyle = '-.')
54
55 ax.plot(analysis['MP1p']-analysis['MP1n'])
56 ax.plot(analysis['MP2p']-analysis['MP2n'])
57 ax.plot(analysis['MP3p']-analysis['MP3n'])
58 ax.plot(analysis['MP4p']-analysis['MP4n'])
59 ax.plot(analysis['MP5p']-analysis['MP5n'])
60 ax.plot(analysis['MP6p']-analysis['MP6n'])
61 ax.plot(analysis['MP7p']-analysis['MP7n'])
62 ax.plot(analysis['MP8p']-analysis['MP8n'])
63 ax.plot(analysis['MP9p']-analysis['MP9n'])
64
65 ax.legend(['String3', 'Zelle1', 'Zelle2', 'Zelle3', 'Zelle4', 'Zelle5', 'Zelle6', 'Zelle7', 'Zelle8', 'Zelle9'])
66 ax.grid(True)
67 ax.grid(True, which='minor')
68 ax.set_xlabel("Sampels")
69 ax.set_ylabel("Spannung(V)")
70
71 plt.savefig('Spannungslevel_zellen.pdf')
72 plt.show(block=False)
73
74 # Ref from earlier simulation
75 refV = 0.003083
76 measV = np.empty([10])
77 measV[0] = refV
78 measV[1] = float(np.mean(analysis['MP1p']-analysis['MP1n']))
79 measV[2] = float(np.mean(analysis['MP2p']-analysis['MP2n']))
80 measV[3] = float(np.mean(analysis['MP3p']-analysis['MP3n']))
81 measV[4] = float(np.mean(analysis['MP4p']-analysis['MP4n']))
82 measV[5] = float(np.mean(analysis['MP5p']-analysis['MP5n']))
83 measV[6] = float(np.mean(analysis['MP6p']-analysis['MP6n']))
84 measV[7] = float(np.mean(analysis['MP7p']-analysis['MP7n']))
85 measV[8] = float(np.mean(analysis['MP8p']-analysis['MP8n']))
86 measV[9] = float(np.mean(analysis['MP9p']-analysis['MP9n']))
87
88 print(measV)
89
90 names = np.array(['RefV', 'Zelle1', 'Zelle2', 'Zelle3', 'Zelle4', 'Zelle5', 'Zelle6', 'Zelle7', 'Zelle8', 'Zelle9'])
91 print(names[1])
92
93 measV = measV*1000
94
95
96 fig2, chart = plt.subplots()
97 fig2.suptitle("Veraenderung der Messposition")
98 fig2.subplots_adjust(left=0.15,
99                      bottom=0.12,
100                     right=0.95,
101                     top=0.9,
102                     wspace=0.4,
103                     hspace=0.5)
104
105 bar_container = chart.bar(names, measV, width=0.6)
106 chart.set_ylabel("Spannung in mV")
107 chart.set_xlabel("Messpunkt")
108 chart.set_ylim(measV[0]-0.01, measV[9]+0.02)
109 chart.bar_label(bar_container, fmt='%3f')
110 plt.savefig('Spannungslevel_barchart.pdf')
111 plt.show()
```

In der Simulation verwendete Netzliste

```
1 * ./3s36p_circuit_11mR.net
2 XX11 K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9er_string_mit_korken
3 XX12 K10 K11 K12 K13 K14 K15 K16 K17 K18 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9er_string_mit_korken
4 XX13 N037 N040 N043 N046 N049 N052 N055 N058 N061 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9
   er_string_mit_korken
```

E Script ideale 3s36p-Verschaltung ohmsche Simulation

```
5 XX14 N064 N067 N070 N073 N076 N079 N082 N085 N088 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9
   er_string_mit_korken
6 I1 K0 Kplus 10
7 XX21 N001 N003 N005 N007 N009 N011 N013 N015 N017 K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 9er_string_mit_korken
8 XX22 N019 N021 N023 N025 N027 N029 N031 N033 N035 K10 K11 K12 K13 K14 K15 K16 K17 K18 9er_string_mit_korken
9 XX23 N038 N041 N044 N047 N050 N053 N056 N059 N062 N037 N040 N043 N046 N049 N052 N055 N058 N061 9er_string_mit_korken
10 XX31 N002 N004 N006 N008 N010 N012 N014 N016 N018 N001 N003 N005 N007 N009 N011 N013 N015 N017 9er_string_mit_korken
11 XX32 N020 N022 N024 N026 N028 N030 N032 N034 N036 N019 N021 N023 N025 N027 N029 N031 N033 N035 9er_string_mit_korken
12 XX33 N039 N042 N045 N048 N051 N054 N057 N060 N063 N038 N041 N044 N047 N050 N053 N056 N059 N062 9er_string_mit_korken
13 XX34 N066 N069 N072 N075 N078 N081 N084 N087 N090 N065 N068 N071 N074 N077 N080 N083 N086 N089 9er_string_mit_korken
14 XX1 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N002 N004 N006 N008 N010 N012 N014 N016 N018 9er_korken
15 XX2 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N020 N022 N024 N026 N028 N030 N032 N034 N036 9er_korken
16 XX3 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N039 N042 N045 N048 N051 N054 N057 N060 N063 9er_korken
17 XX4 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N066 N069 N072 N075 N078 N081 N084 N087 N090 9er_korken
18 R1 M11p Kplus 100uR
19 R2 M11n K1 100uR
20 R3 M11n M11p 3MegR
21 R4 M12p Kplus 100uR
22 R5 M12n K10 100uR
23 R6 M12n M12p 3MegR
24 R7 M13p Kplus 100uR
25 R8 M13n N037 100uR
26 R9 M13n M13p 3MegR
27 R10 M14p Kplus 100uR
28 R11 M14n N064 100uR
29 R12 M14n M14p 3MegR
30 R16 M23p N037 100uR
31 R17 M23n N038 100uR
32 R18 M23n M23p 3MegR
33 R19 M22p K10 100uR
34 R20 M22n N019 100uR
35 R21 M22n M22p 3MegR
36 R22 M21p K1 100uR
37 R23 M21n N001 100uR
38 R24 M21n M21p 3MegR
39 R25 M31p N001 100uR
40 R26 M31n N002 100uR
41 R27 M31n M31p 3MegR
42 R28 M32p N019 100uR
43 R29 M32n N020 100uR
44 R30 M32n M32p 3MegR
45 R31 M33p N038 100uR
46 R32 M33n N039 100uR
47 R33 M33n M33p 3MegR
48 R34 M34p N065 100uR
49 R35 M34n N066 100uR
50 R36 M34n M34p 3MegR
51 R13 MP1n MP1p 3MegR
52 R14 MP1p N064 100uR
53 R15 MP1n N065 100uR
54 XX24 N065 N068 N071 N074 N077 N080 N083 N086 N089 N064 N067 N070 N073 N076 N079 N082 N085 N088 9er_string_mit_korken
55 R37 MP2p MP2n 3MegR
56 R38 MP2n N068 100uR
57 R39 MP2p N067 100uR
58 R40 MP3p MP3n 3MegR
59 R41 MP3n N071 100uR
60 R42 MP3p N070 100uR
61 R43 MP4p MP4n 3MegR
62 R44 MP4n N074 100uR
63 R45 MP4p N073 100uR
64 R46 MP5p MP5n 3MegR
65 R47 MP5n N077 100uR
66 R48 MP5p N076 100uR
67 R49 MP6p MP6n 3MegR
68 R50 MP6n N080 100uR
69 R51 MP6p N079 100uR
70 R52 MP7p MP7n 3MegR
71 R53 MP7n N083 100uR
72 R54 MP7p N082 100uR
73 R55 MP8p MP8n 3MegR
74 R56 MP8n N086 100uR
```

E Script ideale 3s36p-Verschaltung ohmsche Simulation

```
75 R57 MP8p N085 100uR
76 R58 MP9p MP9n 3MegR
77 R59 MP9n N089 100uR
78 R60 MP9p N088 100uR
79
80 * block symbol definitions
81 .subckt 9er_string_mit_korken N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
82 R1 N1 N001 11mR
83 R2 N2 N002 11mR
84 R3 N3 N003 11mR
85 R4 N4 N004 11mR
86 R5 N5 N005 11mR
87 R6 N6 N006 11mR
88 R7 N7 N007 11mR
89 R8 N8 N008 11mR
90 R9 N9 N009 11mR
91 R19 N001 N002 100uR
92 R20 N002 N003 100uR
93 R21 N003 N004 100uR
94 R22 N004 N005 100uR
95 R23 N005 N006 100uR
96 R24 N006 N007 100uR
97 R25 N007 N008 100uR
98 R26 N008 N009 100uR
99 R27 N001 P1 100uR
100 R28 N002 P2 100uR
101 R29 N003 P3 100uR
102 R30 N004 P4 100uR
103 R31 N005 P5 100uR
104 R32 N006 P6 100uR
105 R33 N007 P7 100uR
106 R34 N008 P8 100uR
107 R35 N009 P9 100uR
108 .ends 9er_string_mit_korken
109
110 .subckt 9er_korken N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
111 R19 N1 N2 100uR
112 R20 N2 N3 100uR
113 R21 N3 N4 100uR
114 R22 N4 N5 100uR
115 R23 N5 N6 100uR
116 R24 N6 N7 100uR
117 R25 N7 N8 100uR
118 R26 N8 N9 100uR
119 R27 N1 P1 100uR
120 R28 N2 P2 100uR
121 R29 N3 P3 100uR
122 R30 N4 P4 100uR
123 R31 N5 P5 100uR
124 R32 N6 P6 100uR
125 R33 N7 P7 100uR
126 R34 N8 P8 100uR
127 R35 N9 P9 100uR
128 .ends 9er_korken
129
130 .backanno
131 .end
```

Zusätzliche Simulationsplots der idealen 3s36p-Verschaltung

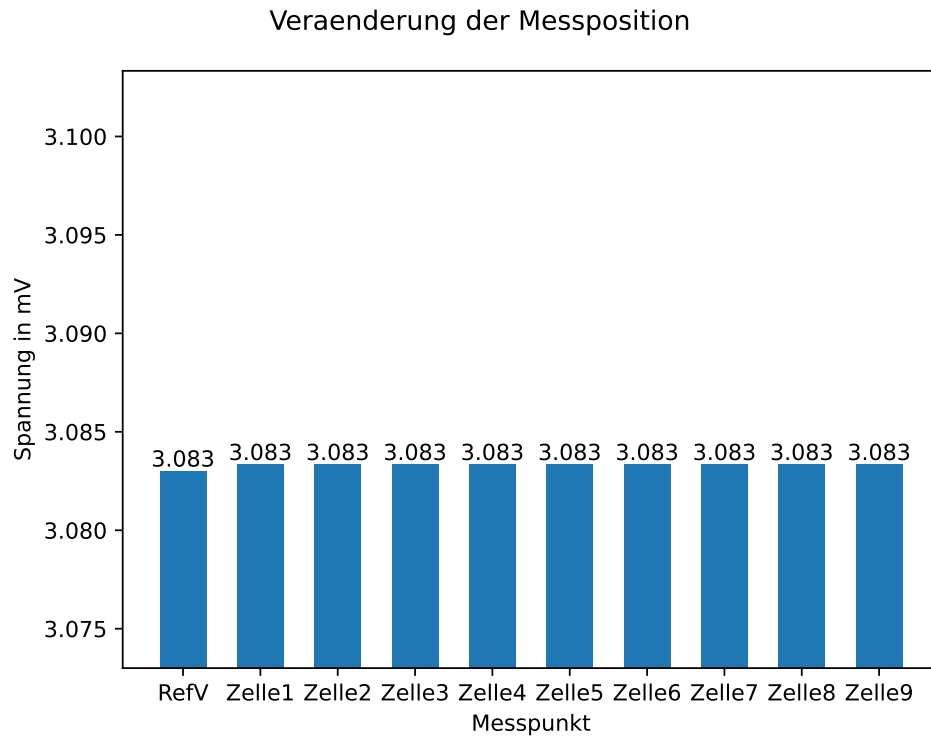


Abbildung E.1.: Spannungen der Zellen als Balkendiagramm

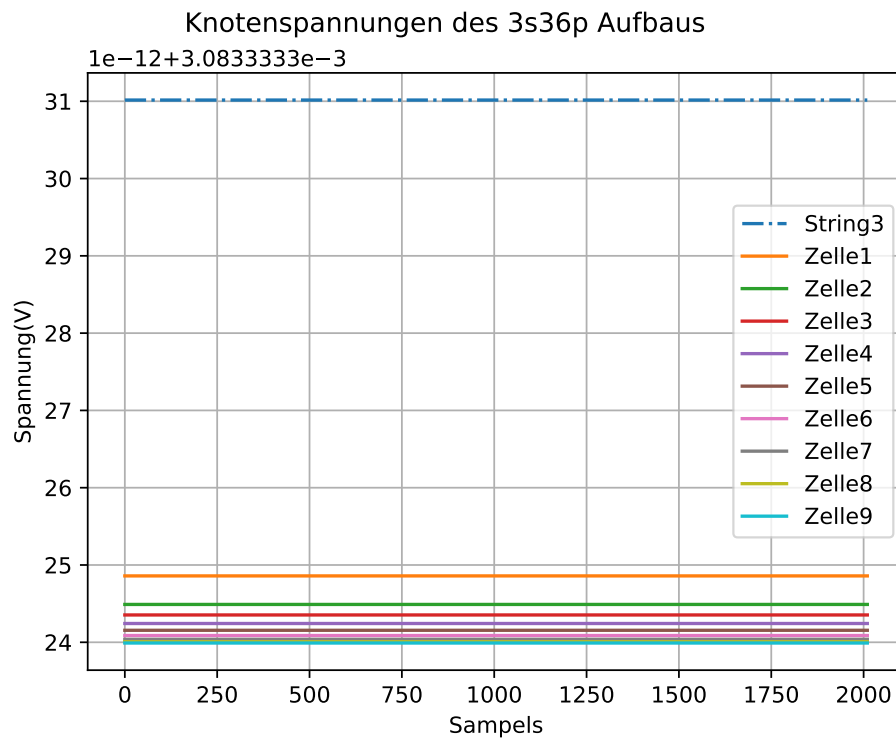


Abbildung E.2.: Spannungen der Zellen als Liniendiagramm

F. Script Zellalterung 3s36p-Verschaltung Simulation

Python-Script der Simulation

```
1 #####
2 """
3 alterung_ohmsch_res_sweep.py
4 Masterarbeit
5 Tobias Schwinghammer
6 25.10.2023
7 Subcircuit Probleme geloeset mit https://github.com/PySpice-org/PySpice/issues/291
8 """
9 import matplotlib.pyplot as plt
10
11 #####
12 # Alle Imports ausgelagert!
13 from includes import *
14 import csv
15
16 #####
17 libraries_path = find_libraries()
18 spice_library = SpiceLibrary(libraries_path)
19
20 #####
21 # r# We read the generated netlist.
22 directory_path = Path().resolve()
23 netlist_path = directory_path.joinpath('alterung_circuit_sweep_11mR.net')
24
25
26 #####
27 # modify Netlist
28 with open(netlist_path, 'r') as netlist:
29     netlistdata = netlist.read()
30
31     netlistdata = netlistdata.replace('mu', 'u')
32
33 # Einstellen des Stroms fuer die Simulation
34 netlistdata = netlistdata.replace('I1 K0 Kplus 20', 'I1 K0 Kplus 10')
35 with open(netlist_path, 'w') as netlist:
36     netlist.write(netlistdata)
37 #####
38 sweep = np.linspace(11, 3000, 400)
39 volt_values = []
40
41 # Manuelles ueberschreiben der gealterten Zelle um einen Widerstands-Sweep zu erzeugen.
42 # begin sweep loop
43 for sweepvar in sweep:
44
45     with open(netlist_path, 'r') as netlist:
46         lines = netlist.readlines()
47
48         new_lines = []
49         for number, line in enumerate(lines):
50             if number not in [138]:
```

F Script Zellalterung 3s36p-Verschaltung Simulation

```
51         new_lines.append(line)
52     else:
53         text = str(sweepvar)
54         new_lines.append("R9 N9 N009 " + "" + text + "" + "mR \n")
55
56     with open(netlist_path, 'w') as netlist:
57         netlist.writelines(new_lines)
58
59     # Build the circuit and translate the ground.
60     parser = SpiceParser(path=str(netlist_path))
61     circuit = parser.build_circuit(ground='K0')
62
63     # Perform a transient simulation.
64     simulator = circuit.simulator(temperature=25, nominal_temperature=25)
65     analysis = simulator.transient(step_time=1 @ u_us, end_time=2 @ u_ms, use_initial_condition=True)
66
67     volt_values.append(float(np.mean(analysis['MP1p']-analysis['MP1n'])))
68     # Fuer Mittenabgriff:
69     # volt_values.append(float(np.mean(analysis['MP5p'] - analysis['MP5n'])))
70
71 # end of sweep loop
72
73 volt_values = np.multiply(volt_values, 1000) # Umrechnung in Millivolt
74
75 fig, ax = plt.subplots()
76 fig.suptitle("Knotenspannungen in Abhaengigkeit des Widerstandes von Zelle 9")
77 fig.subplots_adjust(left=0.15,
78                     bottom=0.12,
79                     right=0.95,
80                     top=0.9,
81                     wspace=0.4,
82                     hspace=0.5)
83
84 ax.plot(sweep, volt_values)
85 ax.axhline(volt_values[0]+0.20146, color="red", linestyle='dotted')
86 # Weitere Bitschwellen
87 # ax.axhline(volt_values[0]+0.20146+0.20146, color="magenta", linestyle='dotted')
88 # ax.axhline(volt_values[0]+0.20146+0.20146+0.20146, color="violet", linestyle='dotted')
89
90 ax.axvline(16, color="green")
91 # Linien fuer Bitschwellen
92 # ax.axvline(28, color="orange")
93 # ax.axvline(210, color="purple")
94 plt.xticks(list(plt.xticks()[0]) + [16])
95 plt.yticks(np.arange(min(volt_values)-0.0104, max(volt_values)+0.05, 0.05))
96
97
98 with open("Alterung_Ergebnisse.csv", "w", newline="") as file:
99     writer = csv.writer(file)
100     writer.writerow(np.stack((sweep, volt_values), axis=1))
101
102 ax.grid(True)
103 ax.grid(True, which='minor')
104 ax.set_xlim(0.0, 300)
105 ax.set_xlabel("Widerstand in Milliohm [mOhm]")
106 ax.set_ylabel("Spannung(mV)")
107 ax.legend(['Messwerte', '1 Bit Schwelle'])
108 # Beschriftung fuer weitere Schwellen:
109 # , '2 Bit Schwelle', '3 Bit Schwelle'
110
111 plt.savefig('Zelle9_res_sweep.pdf')
112 plt.show()
```

In der Simulation verwendete Netzliste

```
1 * ./alterung_circuit_sweep_11mR.net
2 XX11 K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9er_string_mit_korken
3 XX12 K10 K11 K12 K13 K14 K15 K16 K17 K18 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9er_string_mit_korken
```

F Script Zellalterung 3s36p-Verschaltung Simulation

```
4 XX13 N037 N040 N043 N046 N049 N052 N055 N058 N061 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9
   er_string_mit_korken
5 XX14 N064 N067 N070 N073 N076 N079 N082 N085 N088 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9
   er_string_mit_korken
6 I1 K0 Kplus 10
7 XX21 N001 N003 N005 N007 N009 N011 N013 N015 N017 K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 9er_string_mit_korken
8 XX22 N019 N021 N023 N025 N027 N029 N031 N033 N035 K10 K11 K12 K13 K14 K15 K16 K17 K18 9er_string_mit_korken
9 XX23 N038 N041 N044 N047 N050 N053 N056 N059 N062 N037 N040 N043 N046 N049 N052 N055 N058 N061 9er_string_mit_korken
10 XX31 N002 N004 N006 N008 N010 N012 N014 N016 N018 N001 N003 N005 N007 N009 N011 N013 N015 N017 9er_string_mit_korken
11 XX32 N020 N022 N024 N026 N028 N030 N032 N034 N036 N019 N021 N023 N025 N027 N029 N031 N033 N035 9er_string_mit_korken
12 XX33 N039 N042 N045 N048 N051 N054 N057 N060 N063 N038 N041 N044 N047 N050 N053 N056 N059 N062 9er_string_mit_korken
13 XX34 N066 N069 N072 N075 N078 N081 N084 N087 N090 N065 N068 N071 N074 N077 N080 N083 N086 N089 9er_string_mit_korken
14 XX1 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N002 N004 N006 N008 N010 N012 N014 N016 N018 9er_korken
15 XX2 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N020 N022 N024 N026 N028 N030 N032 N034 N036 9er_korken
16 XX3 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N039 N042 N045 N048 N051 N054 N057 N060 N063 9er_korken
17 XX4 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N066 N069 N072 N075 N078 N081 N084 N087 N090 9er_korken
18 R1 M11p Kplus 100uR
19 R2 M11n K1 100uR
20 R3 M11n M11p 3MegR
21 R4 M12p Kplus 100uR
22 R5 M12n K10 100uR
23 R6 M12n M12p 3MegR
24 R7 M13p Kplus 100uR
25 R8 M13n N037 100uR
26 R9 M13n M13p 3MegR
27 R10 M14p Kplus 100uR
28 R11 M14n N064 100uR
29 R12 M14n M14p 3MegR
30 R16 M23p N037 100uR
31 R17 M23n N038 100uR
32 R18 M23n M23p 3MegR
33 R19 M22p K10 100uR
34 R20 M22n N019 100uR
35 R21 M22n M22p 3MegR
36 R22 M21p K1 100uR
37 R23 M21n N001 100uR
38 R24 M21n M21p 3MegR
39 R25 M31p N001 100uR
40 R26 M31n N002 100uR
41 R27 M31n M31p 3MegR
42 R28 M32p N019 100uR
43 R29 M32n N020 100uR
44 R30 M32n M32p 3MegR
45 R31 M33p N038 100uR
46 R32 M33n N039 100uR
47 R33 M33n M33p 3MegR
48 R34 M34p N065 100uR
49 R35 M34n N066 100uR
50 R36 M34n M34p 3MegR
51 R13 MP1n MP1p 3MegR
52 R14 MP1p N064 100uR
53 R15 MP1n N065 100uR
54 XX24 N065 N068 N071 N074 N077 N080 N083 N086 N089 N064 N067 N070 N073 N076 N079 N082 N085 N088 9
   er_string_mit_korken_cell9_alt
55 R37 MP2p MP2n 3MegR
56 R38 MP2n N068 100uR
57 R39 MP2p N067 100uR
58 R40 MP3p MP3n 3MegR
59 R41 MP3n N071 100uR
60 R42 MP3p N070 100uR
61 R43 MP4p MP4n 3MegR
62 R44 MP4n N074 100uR
63 R45 MP4p N073 100uR
64 R46 MP5p MP5n 3MegR
65 R47 MP5n N077 100uR
66 R48 MP5p N076 100uR
67 R49 MP6p MP6n 3MegR
68 R50 MP6n N080 100uR
69 R51 MP6p N079 100uR
70 R52 MP7p MP7n 3MegR
71 R53 MP7n N083 100uR
```

F Script Zellalterung 3s36p-Verschaltung Simulation

```
72 R54 MP7p N082 100uR
73 R55 MP8p MP8n 3MegR
74 R56 MP8n N086 100uR
75 R57 MP8p N085 100uR
76 R58 MP9p MP9n 3MegR
77 R59 MP9n N089 100uR
78 R60 MP9p N088 100uR
79
80 * block symbol definitions
81 .subckt 9er_string_mit_korken N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
82 R1 N1 N001 11mR
83 R2 N2 N002 11mR
84 R3 N3 N003 11mR
85 R4 N4 N004 11mR
86 R5 N5 N005 11mR
87 R6 N6 N006 11mR
88 R7 N7 N007 11mR
89 R8 N8 N008 11mR
90 R9 N9 N009 11mR
91 R19 N001 N002 100uR
92 R20 N002 N003 100uR
93 R21 N003 N004 100uR
94 R22 N004 N005 100uR
95 R23 N005 N006 100uR
96 R24 N006 N007 100uR
97 R25 N007 N008 100uR
98 R26 N008 N009 100uR
99 R27 N001 P1 100uR
100 R28 N002 P2 100uR
101 R29 N003 P3 100uR
102 R30 N004 P4 100uR
103 R31 N005 P5 100uR
104 R32 N006 P6 100uR
105 R33 N007 P7 100uR
106 R34 N008 P8 100uR
107 R35 N009 P9 100uR
108 .ends 9er_string_mit_korken
109
110 .subckt 9er_korken N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
111 R19 N1 N2 100uR
112 R20 N2 N3 100uR
113 R21 N3 N4 100uR
114 R22 N4 N5 100uR
115 R23 N5 N6 100uR
116 R24 N6 N7 100uR
117 R25 N7 N8 100uR
118 R26 N8 N9 100uR
119 R27 N1 P1 100uR
120 R28 N2 P2 100uR
121 R29 N3 P3 100uR
122 R30 N4 P4 100uR
123 R31 N5 P5 100uR
124 R32 N6 P6 100uR
125 R33 N7 P7 100uR
126 R34 N8 P8 100uR
127 R35 N9 P9 100uR
128 .ends 9er_korken
129
130 .subckt 9er_string_mit_korken_cell9_alt N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
131 R1 N1 N001 11mR
132 R2 N2 N002 11mR
133 R3 N3 N003 11mR
134 R4 N4 N004 11mR
135 R5 N5 N005 11mR
136 R6 N6 N006 11mR
137 R7 N7 N007 11mR
138 R8 N8 N008 11mR
139 R9 N9 N009 3000.0mR
140 R19 N001 N002 100uR
141 R20 N002 N003 100uR
142 R21 N003 N004 100uR
```

```

143 R22 N004 N005 100uR
144 R23 N005 N006 100uR
145 R24 N006 N007 100uR
146 R25 N007 N008 100uR
147 R26 N008 N009 100uR
148 R27 N001 P1 100uR
149 R28 N002 P2 100uR
150 R29 N003 P3 100uR
151 R30 N004 P4 100uR
152 R31 N005 P5 100uR
153 R32 N006 P6 100uR
154 R33 N007 P7 100uR
155 R34 N008 P8 100uR
156 R35 N009 P9 100uR
157 .ends 9er_string_mit_korken_cell9_alt
158
159 .backanno
160 .end

```

Zusätzliche Simulationsplots der 3s36p-Verschaltung mit Zellalterung

Knotenspannungen des 3s36p Aufbaus mit gealterter Zelle

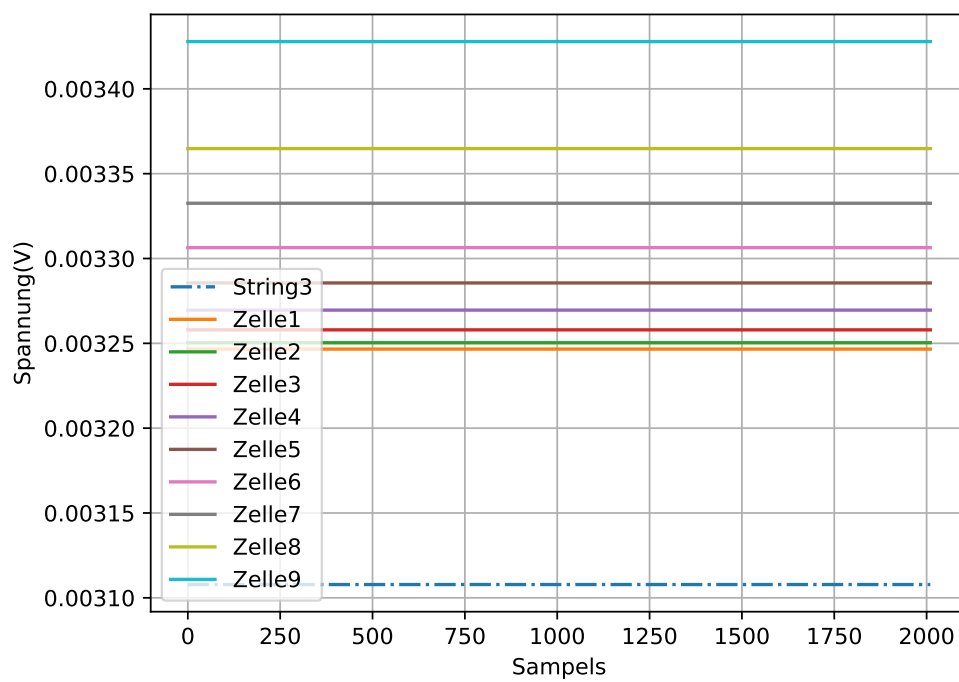


Abbildung F.1.: Spannungen der Zellen als Liniendiagramm

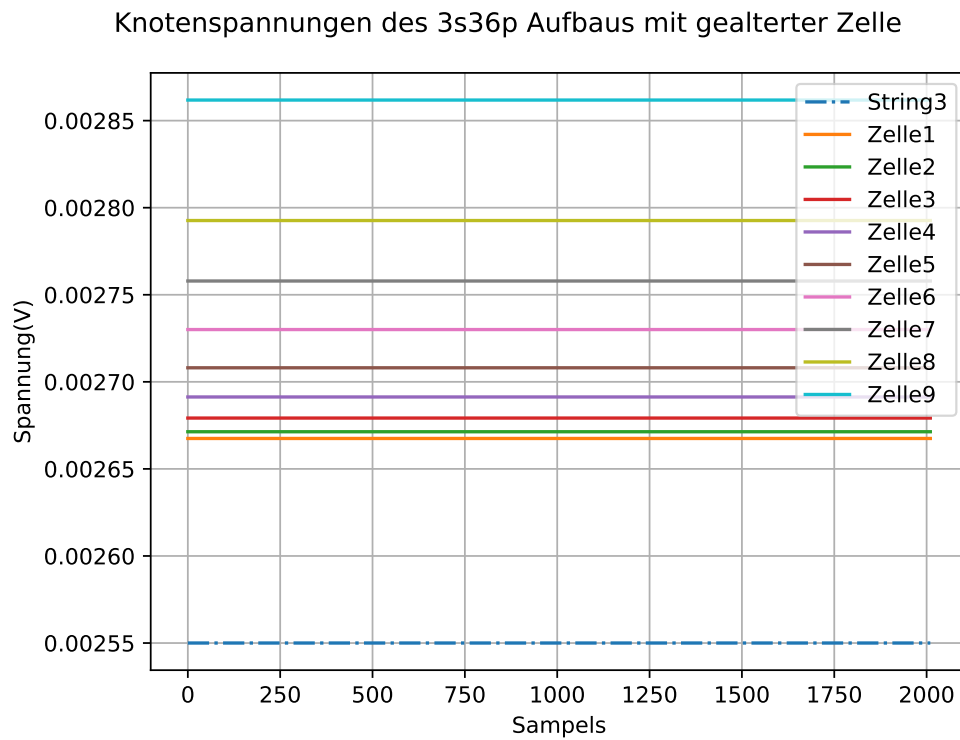


Abbildung F.2.: Spannungen der Zellen als Liniendiagramm

Veränderung der Messposition bei Zelle9 = 60mΩ

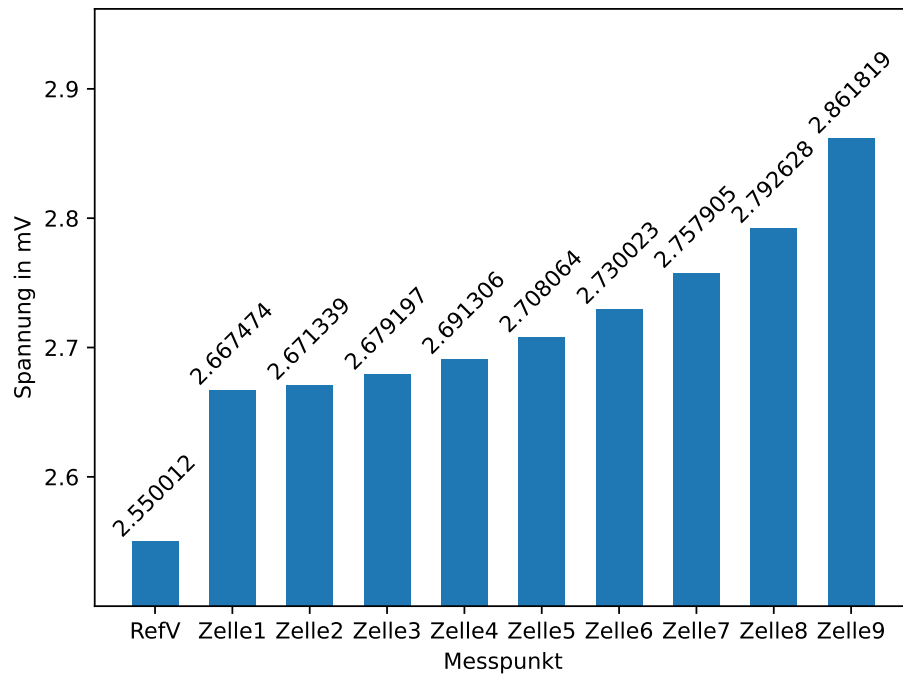


Abbildung F.3.: Spannungen der Zellen als Balkendiagramm

G. Script Temperaturänderung 3s36p-Verschaltung Simulation

Python-Script der Simulation

```
1 #####
2 """
3 3s36p_temperatur_ohmsch_multimesung
4 Masterarbeit
5 Tobias Schwinghammer
6 01.12.2023
7 Subcircuit Probleme geloest mit https://github.com/PySpice-org/PySpice/issues/291
8 """
9
10 #####
11 # Alle Imports ausgelagert!
12 from includes import *
13
14
15 #####
16 libraries_path = find_libraries()
17 spice_library = SpiceLibrary(libraries_path)
18
19 #####
20 # r# We read the generated netlist.
21 directory_path = Path().resolve()
22 netlist_path = directory_path.joinpath('temperatur_circuit_11mR.net')
23 parser = SpiceParser(path=str(netlist_path))
24
25 #####
26 # modify Netlist
27 with open(netlist_path, 'r') as netlist:
28     netlistdata = netlist.read()
29
30 netlistdata = netlistdata.replace('mu', 'u')
31
32 with open(netlist_path, 'w') as netlist:
33     netlist.write(netlistdata)
34 #####
35
36
37 # r# We build the circuit and translate the ground (5 to 0).
38 circuit = parser.build_circuit(ground='K0')
39
40 # r# We perform a transient simulation.
41 simulator = circuit.simulator(temperature=25, nominal_temperature=25)
42 analysis = simulator.transient(step_time=1 @ u_us, end_time=2 @ u_ms, use_initial_condition=True)
43 # analysis = simulator.ac(start_frequency=1@u_mHz, stop_frequency=100@u_kHz, number_of_points=101, variation='dec')
44
45 fig, ax = plt.subplots()
46 fig.suptitle("Knotenspannungen des 3s36p Aufbaus mit Temperaturerhoehung")
47 fig.subplots_adjust(left=0.15,
48                     bottom=0.12,
49                     right=0.95,
50                     top=0.9,
```

G Script Temperaturänderung 3s36p-Verschaltung Simulation

```
51         wspace=0.4,
52         hspace=0.5)
53
54 ax.plot((analysis[ 'M23p' ] - analysis[ 'M23n' ]) * 1000, linestyle='-.')
55
56 ax.plot((analysis[ 'MP1p' ] - analysis[ 'MP1n' ]) * 1000)
57 ax.plot((analysis[ 'MP2p' ] - analysis[ 'MP2n' ]) * 1000)
58 ax.plot((analysis[ 'MP3p' ] - analysis[ 'MP3n' ]) * 1000)
59 ax.plot((analysis[ 'MP4p' ] - analysis[ 'MP4n' ]) * 1000)
60 ax.plot((analysis[ 'MP5p' ] - analysis[ 'MP5n' ]) * 1000)
61 ax.plot((analysis[ 'MP6p' ] - analysis[ 'MP6n' ]) * 1000)
62 ax.plot((analysis[ 'MP7p' ] - analysis[ 'MP7n' ]) * 1000)
63 ax.plot((analysis[ 'MP8p' ] - analysis[ 'MP8n' ]) * 1000)
64 ax.plot((analysis[ 'MP9p' ] - analysis[ 'MP9n' ]) * 1000)
65
66 ax.legend([ 'String3 ', 'Zelle1 ', 'Zelle2 ', 'Zelle3 ', 'Zelle4 ', 'Zelle5 ', 'Zelle6 ', 'Zelle7 ', 'Zelle8 ', 'Zelle9 '])
67 ax.grid(True)
68 ax.grid(True, which='minor')
69 # ax.set_ylim(0.0036388, 0.003639)
70 ax.set_xlabel("Sampels")
71 ax.set_ylabel("Spannung(mV) ")
72 ax.yaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%.2f'))
73
74 plt.savefig('Spannungslevel_zelle_temp.pdf')
75 plt.show(block=False)
76
77 refV = 0.003083
78 # Wert stammt aus vorherigen Simulationen ohne Gradienten
79 # float(np.mean(analysis[ 'M23p' ] - analysis[ 'M23n' ]))
80 measV = np.empty([10])
81 measV[0] = refV
82 measV[1] = float(np.mean(analysis[ 'MP1p' ] - analysis[ 'MP1n' ]))
83 measV[2] = float(np.mean(analysis[ 'MP2p' ] - analysis[ 'MP2n' ]))
84 measV[3] = float(np.mean(analysis[ 'MP3p' ] - analysis[ 'MP3n' ]))
85 measV[4] = float(np.mean(analysis[ 'MP4p' ] - analysis[ 'MP4n' ]))
86 measV[5] = float(np.mean(analysis[ 'MP5p' ] - analysis[ 'MP5n' ]))
87 measV[6] = float(np.mean(analysis[ 'MP6p' ] - analysis[ 'MP6n' ]))
88 measV[7] = float(np.mean(analysis[ 'MP7p' ] - analysis[ 'MP7n' ]))
89 measV[8] = float(np.mean(analysis[ 'MP8p' ] - analysis[ 'MP8n' ]))
90 measV[9] = float(np.mean(analysis[ 'MP9p' ] - analysis[ 'MP9n' ]))
91
92 print(measV)
93
94 names = np.array([ "RefV", "Zelle1", "Zelle2", "Zelle3", "Zelle4", "Zelle5", "Zelle6", "Zelle7", "Zelle8", "Zelle9" ])
95 print(names[1])
96
97 measV = measV * 1000
98
99 with open("Temperatur_Ergebnisse_string.csv", "w", newline="") as file:
100     writer = csv.writer(file)
101     writer.writerows(np.stack((names, measV), axis=1))
102
103 fig2, chart = plt.subplots()
104 fig2.suptitle("Veraenderung der Messposition")
105 fig2.subplots_adjust(left=0.15,
106                     bottom=0.12,
107                     right=0.95,
108                     top=0.9,
109                     wspace=0.4,
110                     hspace=0.5)
111
112 bar_container = chart.bar(names, measV, width=0.6)
113 chart.set_ylabel("Spannung in mV")
114 chart.set_xlabel("Messpunkt")
115 chart.set_ylim(measV[9] - 0.05, measV[0] + 0.1)
116 chart.bar_label(bar_container, fmt='%.3f')
117 plt.savefig('Spannungslevel_zelle_temp_barchart.pdf')
118 plt.show()
```

In der Simulation verwendete Netzliste

```
1 * ./temperatur_circuit_11mR.net
2 XX11 K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9er_string_mit_korken
3 XX12 K10 K11 K12 K13 K14 K15 K16 K17 K18 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9er_string_mit_korken
4 XX13 N037 N040 N043 N046 N049 N052 N055 N058 N061 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9
   er_string_mit_korken
5 XX14 N064 N067 N070 N073 N076 N079 N082 N085 N088 Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus Kplus 9
   er_string_mit_korken
6 I1 K0 Kplus 10
7 XX21 N001 N003 N005 N007 N009 N011 N013 N015 N017 K1 K2 K3 K4 K5 K6 K7 K8 K9 9er_string_mit_korken
8 XX22 N019 N021 N023 N025 N027 N029 N031 N033 N035 K10 K11 K12 K13 K14 K15 K16 K17 K18 9er_string_mit_korken
9 XX23 N038 N041 N044 N047 N050 N053 N056 N059 N062 N037 N040 N043 N046 N049 N052 N055 N058 N061 9er_string_mit_korken
10 XX31 N002 N004 N006 N008 N010 N012 N014 N016 N018 N001 N003 N005 N007 N009 N011 N013 N015 N017 9er_string_mit_korken
11 XX32 N020 N022 N024 N026 N028 N030 N032 N034 N036 N019 N021 N023 N025 N027 N029 N031 N033 N035 9er_string_mit_korken
12 XX33 N039 N042 N045 N048 N051 N054 N057 N060 N063 N038 N041 N044 N047 N050 N053 N056 N059 N062 9er_string_mit_korken
13 XX34 N066 N069 N072 N075 N078 N081 N084 N087 N090 N065 N068 N071 N074 N077 N080 N083 N086 N089 9er_string_mit_korken
14 XX1 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N002 N004 N006 N008 N010 N012 N014 N016 N018 9er_korken
15 XX2 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N020 N022 N024 N026 N028 N030 N032 N034 N036 9er_korken
16 XX3 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N039 N042 N045 N048 N051 N054 N057 N060 N063 9er_korken
17 XX4 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 K0 N066 N069 N072 N075 N078 N081 N084 N087 N090 9er_korken
18 R1 M11p Kplus 100uR
19 R2 M11n K1 100uR
20 R3 M11n M11p 3MegR
21 R4 M12p Kplus 100uR
22 R5 M12n K10 100uR
23 R6 M12n M12p 3MegR
24 R7 M13p Kplus 100uR
25 R8 M13n N037 100uR
26 R9 M13n M13p 3MegR
27 R10 M14p Kplus 100uR
28 R11 M14n N064 100uR
29 R12 M14n M14p 3MegR
30 R16 M23p N037 100uR
31 R17 M23n N038 100uR
32 R18 M23n M23p 3MegR
33 R19 M22p K10 100uR
34 R20 M22n N019 100uR
35 R21 M22n M22p 3MegR
36 R22 M21p K1 100uR
37 R23 M21n N001 100uR
38 R24 M21n M21p 3MegR
39 R25 M31p N001 100uR
40 R26 M31n N002 100uR
41 R27 M31n M31p 3MegR
42 R28 M32p N019 100uR
43 R29 M32n N020 100uR
44 R30 M32n M32p 3MegR
45 R31 M33p N038 100uR
46 R32 M33n N039 100uR
47 R33 M33n M33p 3MegR
48 R34 M34p N065 100uR
49 R35 M34n N066 100uR
50 R36 M34n M34p 3MegR
51 R13 MP1n MP1p 3MegR
52 R14 MP1p N064 100uR
53 R15 MP1n N065 100uR
54 R37 MP2p MP2n 3MegR
55 R38 MP2n N068 100uR
56 R39 MP2p N067 100uR
57 R40 MP3p MP3n 3MegR
58 R41 MP3n N071 100uR
59 R42 MP3p N070 100uR
60 R43 MP4p MP4n 3MegR
61 R44 MP4n N074 100uR
62 R45 MP4p N073 100uR
63 R46 MP5p MP5n 3MegR
64 R47 MP5n N077 100uR
65 R48 MP5p N076 100uR
66 R49 MP6p MP6n 3MegR
67 R50 MP6n N080 100uR
```

G Script Temperaturänderung 3s36p-Verschaltung Simulation

```
68 R51 MP6p N079 100uR
69 R52 MP7p MP7n 3MegR
70 R53 MP7n N083 100uR
71 R54 MP7p N082 100uR
72 R55 MP8p MP8n 3MegR
73 R56 MP8n N086 100uR
74 R57 MP8p N085 100uR
75 R58 MP9p MP9n 3MegR
76 R59 MP9n N089 100uR
77 R60 MP9p N088 100uR
78 XX5 N065 N068 N071 N074 N077 N080 N083 N086 N089 N064 N067 N070 N073 N076 N079 N082 N085 N088 9
    er_string_mit_korken_cell9_temp
79
80 * block symbol definitions
81 .subckt 9er_string_mit_korken N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
82 R1 N1 N001 11mR
83 R2 N2 N002 11mR
84 R3 N3 N003 11mR
85 R4 N4 N004 11mR
86 R5 N5 N005 11mR
87 R6 N6 N006 11mR
88 R7 N7 N007 11mR
89 R8 N8 N008 11mR
90 R9 N9 N009 11mR
91 R19 N001 N002 100uR
92 R20 N002 N003 100uR
93 R21 N003 N004 100uR
94 R22 N004 N005 100uR
95 R23 N005 N006 100uR
96 R24 N006 N007 100uR
97 R25 N007 N008 100uR
98 R26 N008 N009 100uR
99 R27 N001 P1 100uR
100 R28 N002 P2 100uR
101 R29 N003 P3 100uR
102 R30 N004 P4 100uR
103 R31 N005 P5 100uR
104 R32 N006 P6 100uR
105 R33 N007 P7 100uR
106 R34 N008 P8 100uR
107 R35 N009 P9 100uR
108 .ends 9er_string_mit_korken
109
110 .subckt 9er_korken N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
111 R19 N1 N2 100uR
112 R20 N2 N3 100uR
113 R21 N3 N4 100uR
114 R22 N4 N5 100uR
115 R23 N5 N6 100uR
116 R24 N6 N7 100uR
117 R25 N7 N8 100uR
118 R26 N8 N9 100uR
119 R27 N1 P1 100uR
120 R28 N2 P2 100uR
121 R29 N3 P3 100uR
122 R30 N4 P4 100uR
123 R31 N5 P5 100uR
124 R32 N6 P6 100uR
125 R33 N7 P7 100uR
126 R34 N8 P8 100uR
127 R35 N9 P9 100uR
128 .ends 9er_korken
129
130 .subckt 9er_string_mit_korken_cell9_temp N1 N2 N3 N4 N5 N6 N7 N8 N9 P1 P2 P3 P4 P5 P6 P7 P8 P9
131 R1 N1 N001 11mR
132 R2 N2 N002 11mR
133 R3 N3 N003 9mR
134 R4 N4 N004 8.5mR
135 R5 N5 N005 7.5mR
136 R6 N6 N006 6mR
137 R7 N7 N007 6mR
```

```
138 R8 N8 N008 5mR
139 R9 N9 N009 5mR
140 R19 N001 N002 100uR
141 R20 N002 N003 100uR
142 R21 N003 N004 100uR
143 R22 N004 N005 100uR
144 R23 N005 N006 100uR
145 R24 N006 N007 100uR
146 R25 N007 N008 100uR
147 R26 N008 N009 100uR
148 R27 N001 P1 100uR
149 R28 N002 P2 100uR
150 R29 N003 P3 100uR
151 R30 N004 P4 100uR
152 R31 N005 P5 100uR
153 R32 N006 P6 100uR
154 R33 N007 P7 100uR
155 R34 N008 P8 100uR
156 R35 N009 P9 100uR
157 .ends 9er_string_mit_korken_cell9_temp
158
159 .backanno
160 .end
```

Nicht verwendeter Plot

Knotenspannungen des 3s36p Aufbaus mit Temperaturerhöhung

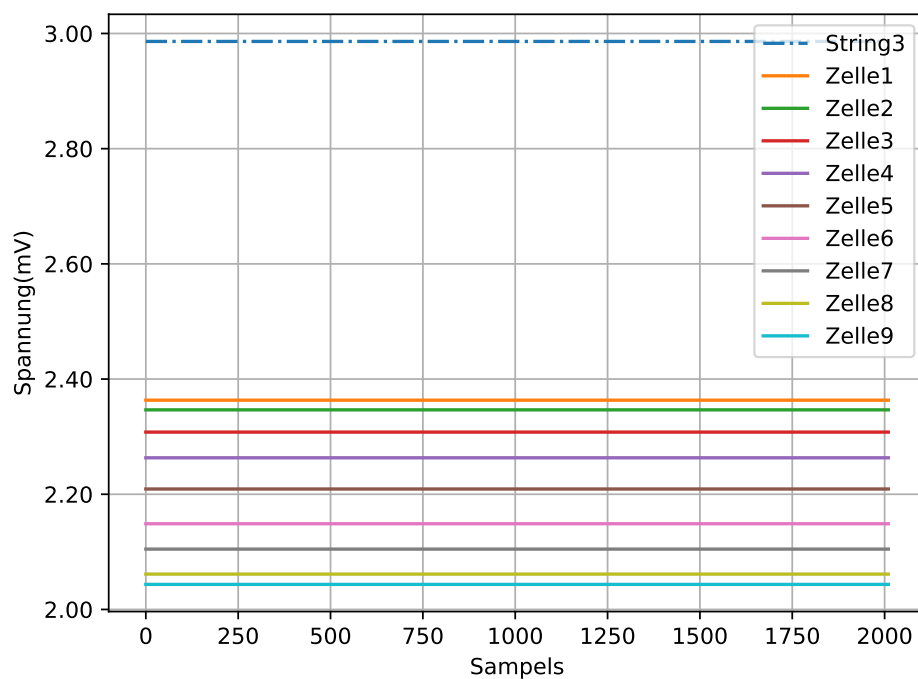


Abbildung G.1.: Spannungen der Zellen als Liniendiagramm

CSV-Datenexport

```
1 RefV,3.0829999999999997
2 Zelle1 ,2.3633467004000526
3 Zelle2 ,2.346538968363447
4 Zelle3 ,2.3079094863896823
5 Zelle4 ,2.263300682992569
6 Zelle5 ,2.209132423872227
7 Zelle6 ,2.1488144981625825
8 Zelle7 ,2.1047778183274213
9 Zelle8 ,2.0613832806613006
10 Zelle9 ,2.0435055046044526
```

H. Fuelcon Eis-Meter Datenverarbeitung

Python-Script der Simulation

```
1 #####
2 """
3 main-pyscript-fuelcon-eis-plotter
4 Masterarbeit
5 Tobias Schwinghammer
6 15.11.2023
7 """
8 import glob
9
10 #####
11 # includes / imports
12 from pathlib import Path
13 import os
14 import datetime
15 import pandas
16 import numpy as np
17 import matplotlib.pyplot as plt
18 # matplotlib.use("pdf")
19 # needed for creating .exe deactivate output figures!
20
21 #####
22 # functions
23
24
25 def search_files():
26     directory_path = os.getcwd()
27     search_pattern = os.path.join(directory_path, '*.csv')
28     new_dir = os.path.join(directory_path, "result_" + datetime.datetime.now().strftime('%Y-%m-%d_%H-%M-%S'))
29     os.mkdir(new_dir)
30
31     for file in glob.glob(str(search_pattern)):
32         new_file = os.path.join(new_dir, Path(file).name)
33         if os.name == 'nt': # Windows
34             os.popen('copy "%s" "%s"' % (file, new_file))
35         else: # Unix/Linux
36             os.popen('cp "%s" "%s"' % (file, new_file))
37
38     return glob.glob(str(search_pattern)), new_dir
39
40
41 def get_file_data(dirs):
42     file_data = []
43     for csv_file in dirs:
44         temp = pandas.read_csv(csv_file, header=None)
45         temp = temp.truncate(before=0, after=2, axis="columns")
46         temp = temp.rename(columns={0: 'frequency', 1: 'real_impedance', 2: 'imag_impedance'})
47         file_data.append(temp)
48     # with open(csv_file, newline=' ') as file:
49     #     filereader = csv.reader(file, delimiter=',')
50     #     for row in filereader:
51     print(file_data)
52     return file_data
53
54
```

```
55 def single_nyquistplots(file_data):
56     for counter, file in enumerate(file_data):
57         fig, ax = plt.subplots(figsize=(7, 4), num=Path(csv_file_dirs[counter]).stem + "_nyquistplot.pdf")
58         fig.subplots_adjust(left=0.08,
59                             bottom=0.12,
60                             right=0.975)
61         fig.suptitle("Nyquist-Diagramm")
62         ax.plot(file['real_impedance'], file['imag_impedance'], label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
63         plt.legend()
64         ax.grid(True)
65         ax.grid(True, which='minor')
66         ax.invert_yaxis()
67         ax.set_xlabel("Re(m$\Omega$)")
68         ax.set_ylabel("Im(m$\Omega$)")
69         plt.savefig(os.path.join(directory_path, Path(csv_file_dirs[counter]).stem + "_nyquistplot.pdf"))
70         plt.show(block=False)
71
72
73
74 def multi_nyquistplot(file_data):
75     fig, ax = plt.subplots(figsize=(10, 6), num="nyquistplot_overview.pdf")
76     fig.subplots_adjust(left=0.055,
77                         bottom=0.08,
78                         right=0.99)
79     fig.suptitle("Nyquist-Diagramm")
80     for counter, file in enumerate(file_data):
81         ax.plot(file['real_impedance'], file['imag_impedance'], label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
82     plt.legend()
83     ax.grid(True)
84     ax.grid(True, which='minor')
85     ax.invert_yaxis()
86     ax.set_xlabel("Re(m$\Omega$)")
87     ax.set_ylabel("Im(m$\Omega$)")
88     plt.savefig(os.path.join(directory_path, "nyquistplot_overview.pdf"))
89     plt.show(block=False)
90
91
92 def single_bodeplots_abs_phase(file_data):
93     for counter, file in enumerate(file_data):
94         figure, axes = plt.subplots(2, figsize=(10, 6),
95                                     num=Path(csv_file_dirs[counter]).stem + "_bodeplot_abs_phase.pdf")
96         figure.suptitle("Bode-Diagramm")
97         axes[0].set_xscale("log")
98         impedance = file['real_impedance'] + 1j*file['imag_impedance']
99         axes[0].semilogx(file['frequency'], 20 * np.log10(np.absolute(impedance)), label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
100         axes[0].grid(True)
101         axes[0].grid(True, which='minor')
102         axes[0].set_xlabel("Frequency [Hz]")
103         axes[0].set_ylabel("Gain [dB]")
104         axes[0].legend()
105         axes[1].semilogx(file['frequency'], np.angle(impedance, deg=False), label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
106         axes[1].grid(True)
107         axes[1].grid(True, which='minor')
108         axes[1].set_xlabel("Frequency [Hz]")
109         axes[1].set_ylabel("Phase [rads]")
110         axes[1].legend()
111
112         plt.tight_layout()
113         plt.savefig(os.path.join(directory_path, Path(csv_file_dirs[counter]).stem + "_bodeplot_abs_phase.pdf"))
114         plt.show(block=False)
115
116
117 def single_bodeplots_real_imag(file_data):
118     for counter, file in enumerate(file_data):
119         figure, axes = plt.subplots(2, figsize=(10, 6),
120                                     num=Path(csv_file_dirs[counter]).stem + "_bodeplot_real_imag.pdf")
121         axes[0].set_xscale("log")
122         axes[0].set_title("Bode-Diagramm - Realteil")
123         axes[0].semilogx(file['frequency'], file['real_impedance'], label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
124         axes[0].grid(True)
```

```

125     axes[0].grid(True, which='minor')
126     axes[0].set_xlabel("Frequency [Hz]")
127     axes[0].set_ylabel("Re(m$\Omega$)")
128     axes[0].legend()
129     axes[1].set_title("Bode-Diagramm - Imaginaerteil")
130     axes[1].semilogx(file['frequency'], file['imag_impedance'], label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
131     axes[1].grid(True)
132     axes[1].grid(True, which='minor')
133     axes[1].set_xlabel("Frequency [Hz]")
134     axes[1].set_ylabel("Im(m$\Omega$)")
135     axes[1].legend()
136
137     plt.tight_layout()
138     plt.savefig(os.path.join(directory_path, Path(csv_file_dirs[counter]).stem + "_bodeplot_real_imag.pdf"))
139     plt.show(block=False)
140
141
142 def multi_bodeplot_abs_phase(file_data):
143     figure, axes = plt.subplots(2, figsize=(10, 6),
144                                num="bodeplot_abs_phase_overview.pdf")
145     figure.suptitle("Bode-Diagramm")
146     axes[0].set_xscale("log")
147     axes[0].grid(True)
148     axes[0].grid(True, which='minor')
149     axes[0].set_xlabel("Frequency [Hz]")
150     axes[0].set_ylabel("Gain [dB]")
151     axes[1].grid(True)
152     axes[1].grid(True, which='minor')
153     axes[1].set_xlabel("Frequency [Hz]")
154     axes[1].set_ylabel("Phase [rads]")
155
156     for counter, file in enumerate(file_data):
157         impedance = file['real_impedance'] + 1j * file['imag_impedance']
158         axes[0].semilogx(file['frequency'], 20 * np.log10(np.absolute(impedance)),
159                          label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
160         axes[1].semilogx(file['frequency'], np.angle(impedance, deg=False), label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
161
162     axes[0].legend()
163     axes[1].legend()
164     plt.tight_layout()
165     plt.savefig(os.path.join(directory_path, Path("bodeplot_abs_phase_overview.pdf")))
166     plt.show(block=False)
167
168
169 def multi_bodeplot_real_imag(file_data):
170     figure, axes = plt.subplots(2, figsize=(10, 6),
171                                num="bodeplot_real_imag_overview.pdf")
172     axes[0].set_xscale("log")
173     axes[0].set_title("Bode-Diagramm - Realteil")
174     axes[0].grid(True)
175     axes[0].grid(True, which='minor')
176     axes[0].set_xlabel("Frequency [Hz]")
177     axes[0].set_ylabel("Re(m$\Omega$)")
178     axes[1].set_title("Bode-Diagramm - Imaginaerteil")
179     axes[1].grid(True)
180     axes[1].grid(True, which='minor')
181     axes[1].set_xlabel("Frequency [Hz]")
182     axes[1].set_ylabel("Im(m$\Omega$)")
183
184     for counter, file in enumerate(file_data):
185         axes[0].semilogx(file['frequency'], file['real_impedance'], label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
186         axes[1].semilogx(file['frequency'], file['imag_impedance'], label=Path(csv_file_dirs[counter]).stem)
187
188     axes[0].legend()
189     axes[1].legend()
190     plt.tight_layout()
191     plt.savefig(os.path.join(directory_path, "bodeplot_real_imag_overview.pdf"))
192     plt.show(block=False)
193
194 #####
195 # start main

```

```
196
197
198 if __name__ == '__main__':
199     # Suche nach CSV Dateien im Ausgeführten Verzeichnis
200     csv_file_dirs, directory_path = search_files()
201
202     # Extrahiere die relevanten Daten aus den erkannten Dateien
203     data = get_file_data(csv_file_dirs)
204
205     # Erzeuge Plots
206     single_nyquistplots(data)
207     single_bodeplots_abs_phase(data)
208     single_bodeplots_real_imag(data)
209     multi_nyquistplot(data)
210     multi_bodeplot_abs_phase(data)
211     multi_bodeplot_real_imag(data)
212
213     # Stelle alle Plots dar
214     # Ggf. fuer "silent Betrieb" auskommentieren
215     plt.show()
216     #####
```

Anleitung Executable-Export

Um aus der Python-Datei eine ausführbare Datei für Windows zu erzeugen wird „pyinstaller“ verwendet. Folgender Befehl wird über das Python-Terminal im Projektverzeichnis ausgeführt.

```
1 pyinstaller --onefile --hidden-import matplotlib.backends.backend_pdf main.py
```

Zwei Besonderheiten sind hierbei zu beachten. Um eine einzige Datei ohne Abhängigkeiten zu erzeugen wird der Befehl „--onefile“ verwendet. Um PDF-Dateien generieren zu können muss zusätzlich mit dem Befehl „--hidden-import matplotlib.backend_pdf“ die Bibliothek Matplotlib hinzugefügt werden.

I. Messergebnisse

I.1. EIS-Messungen des originalen 36p-Zellmodul

EIS-Messung mit einem Ampere, Messleitungen mittig an der Endplatte des Zellmoduls platziert

CSV-Datei (Rohdaten)

```
1 1000.0000,0.371810,0.435555,0.572670,49.514341,100,1,01.01.2005
   00:09:31.410,0.00,0.3706,0.4630,0.4,40691768.1507,-131.9301,2.3,228379758.8183,-3.2518,0,2366,4294935039,0,-0.010702,0.014624,0.018121,126.196251
2 695.1928,0.343257,0.299164,0.455329,41.073588,100,1,01.01.2005
   00:09:41.465,0.00,0.3431,0.3196,0.3,32201424.6038,-139.5331,2.3,228598660.7275,-2.5034,0,2366,4294935039,0,-0.008911,0.012025,0.014967,126.538982
3 483.2930,0.331494,0.189987,0.382078,29.818044,100,1,01.01.2005
   00:09:51.520,0.00,0.3317,0.2066,0.3,26866574.8551,-149.8741,2.3,228845986.0947,-1.7932,0,2366,4294935039,0,-0.008297,0.011408,0.014106,126.030089
4 335.9818,0.334006,0.111122,0.352006,18.402055,100,1,01.01.2005
   00:10:01.575,0.00,0.3328,0.1219,0.2,24373797.2050,-161.1811,2.3,228914786.9365,-1.2967,0,2366,4294935039,0,-0.009817,0.007768,0.012518,141.646153
5 233.5721,0.340715,0.051667,0.344610,8.622845,100,1,01.01.2005
   00:10:11.630,0.00,0.3393,0.0577,0.2,23676465.2832,-171.2911,2.3,229005478.6122,-0.9422,0,2366,4294935039,0,-0.010249,0.004679,0.011267,155.459588
6 162.3777,0.357214,0.008437,0.357313,1.353069,100,1,01.01.2005
   00:10:21.685,0.00,0.3578,0.0111,0.3,24630193.1164,-178.9124,2.3,229025712.3709,-0.6886,0,2365,4294935039,0,-0.008652,0.002513,0.009009,163.800439
7 112.8838,0.375891,-0.027598,0.376903,-4.199151,100,1,01.01.2005
   00:10:31.740,0.00,0.3751,-0.0256,0.3,25905092.9087,175.5951,2.3,229309738.7903,-0.5050,0,2365,4294935039,0,-0.010446,0.002880,0.010836,164.587879
8 78.4760,0.398673,-0.049606,0.401748,-7.092710,100,1,01.01.2005
   00:10:41.795,0.00,0.4000,-0.0512,0.3,27786231.5361,172.3402,2.3,229327142.8466,-0.3712,0,2365,4294935039,0,-0.008927,-0.000074,0.008928,-179.524474
9 54.5559,0.422304,-0.064144,0.427148,-8.636690,100,1,01.01.2005
   00:10:51.750,0.00,0.4258,-0.0683,0.3,29655721.3635,170.6170,2.3,228883535.0795,-0.2684,0,2365,4294935039,0,-0.007386,-0.002260,0.007724,-162.986760
10 37.9269,0.453126,-0.071875,0.458791,-9.013214,100,1,01.01.2005
   00:11:01.705,0.00,0.4548,-0.0755,0.3,31748785.2164,170.3755,2.3,229206819.9246,-0.2027,0,2365,4294935039,0,-0.009993,-0.001440,0.010096,-171.802987
11 26.3665,0.477065,-0.075100,0.482940,-8.946086,100,1,01.01.2005
   00:11:11.560,0.00,0.4791,-0.0769,0.3,33172472.4021,170.7227,2.3,227568245.9534,-0.1595,0,2365,4294935039,0,-0.010323,0.000495,0.010335,177.252252
12 18.3298,0.503347,-0.071651,0.508421,-8.101534,100,1,01.01.2005
   00:11:21.415,0.00,0.5048,-0.0736,0.4,34810277.7381,171.5827,2.3,227148251.6179,-0.1255,0,2365,4294935039,0,-0.011598,0.000315,0.011602,178.445591
13 12.7427,0.520919,-0.061902,0.524584,-6.776823,100,1,01.01.2005
   00:11:31.170,0.00,0.5245,-0.0625,0.4,35838176.4252,173.1056,2.3,225820957.4053,-0.1008,0,2365,4294935039,0,-0.009863,0.001413,0.009964,171.847666
14 8.8587,0.534253,-0.051949,0.536773,-5.553817,100,1,01.01.2005
   00:11:40.925,0.00,0.5404,-0.0548,0.4,37220255.6412,174.1230,2.3,228079139.9272,-0.0833,0,2365,4294935039,0,-0.007679,-0.001124,0.007761,-171.669607
15 6.1585,0.547347,-0.042451,0.548991,-4.434848,100,1,01.01.2005
   00:11:50.580,0.00,0.5501,-0.0436,0.4,37908084.9307,175.3839,2.3,228649992.9556,-0.0805,0,2365,4294935055,0,-0.011419,0.000341,0.011424,178.290028
16 4.2813,0.552601,-0.034385,0.553670,-3.560548,100,1,01.01.2005
   00:12:00.335,0.00,0.5591,-0.0346,0.4,38511631.7055,176.4078,2.3,228840322.9557,-0.0476,0,2365,4294935056,0,-0.007841,0.001079,0.007915,172.167085
17 2.9764,0.559922,-0.032290,0.560852,-3.300471,100,1,01.01.2005
   00:12:09.890,0.00,0.5617,-0.0301,0.4,38239397.9727,176.8892,2.3,226290154.8879,-0.0469,0,2365,4294935056,0,-0.012779,0.003506,0.013251,164.656640
18 2.0691,0.564964,-0.028255,0.565670,-2.863062,100,1,01.01.2005
   00:12:19.045,0.00,0.5689,-0.0256,0.4,35445140.6572,177.3388,2.3,207182470.1698,-0.0835,0,2365,4294935054,0,-0.010745,0.003827,0.011406,160.396666
19 1.4384,0.565732,-0.018655,0.566039,-1.888597,100,1,01.01.2005
   00:12:28.000,0.00,0.5714,-0.0178,0.4,36553935.6752,178.1803,2.3,212837594.6754,-0.0350,0,2365,4294935055,0,-0.009032,0.001785,0.009207,168.821655
20 1.0000,0.569282,-0.021082,0.569673,-2.120792,100,1,01.01.2005
   00:12:36.855,0.00,0.5709,-0.0252,0.4,31518571.6807,177.4257,2.3,183582792.4203,-0.0453,0,2365,4294935056,0,-0.013152,-0.003133,0.013520,-166.602307
```

Grafische Darstellungen der Messwerte der CSV-Datei zuvor

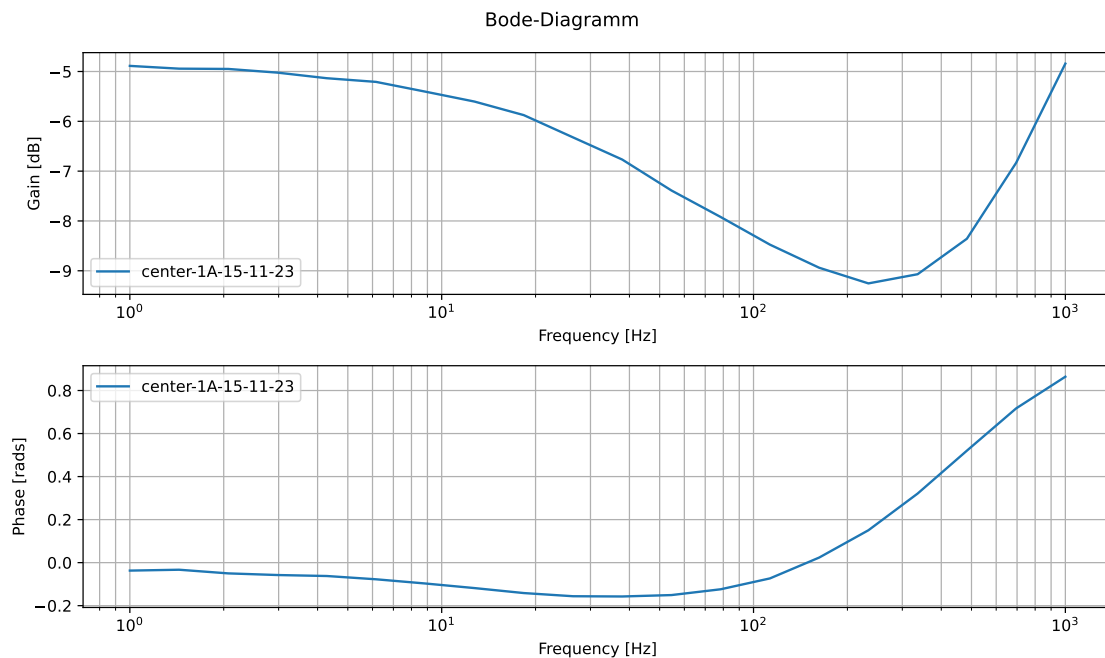


Abbildung I.1.: Bodeplot der Messung

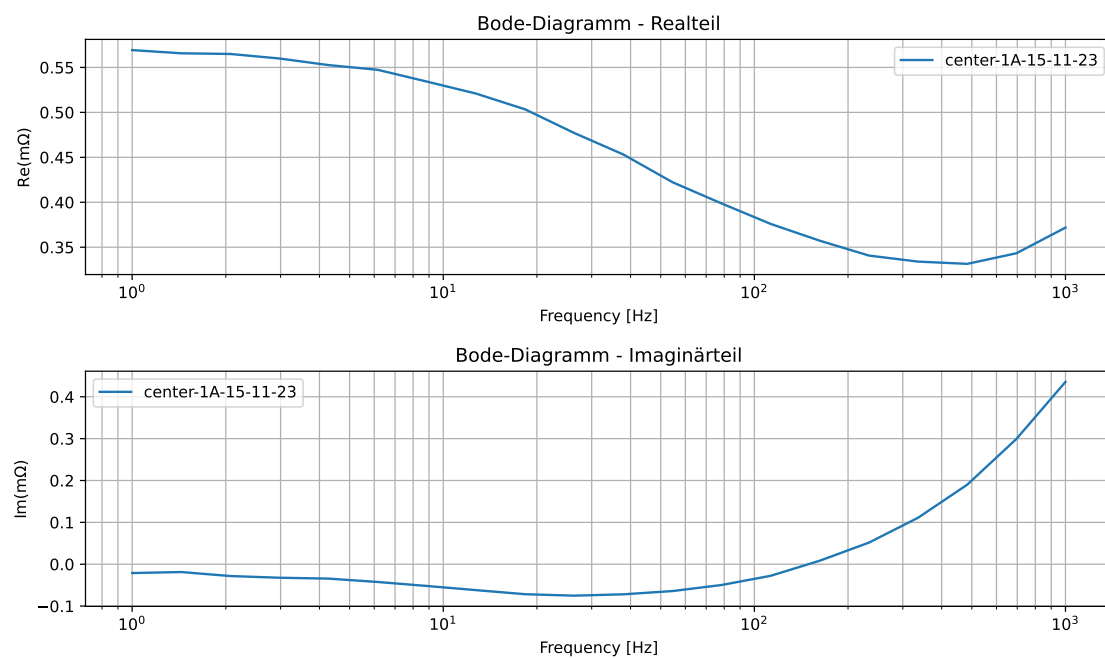


Abbildung I.2.: Real- und Imaginärteil der Messung

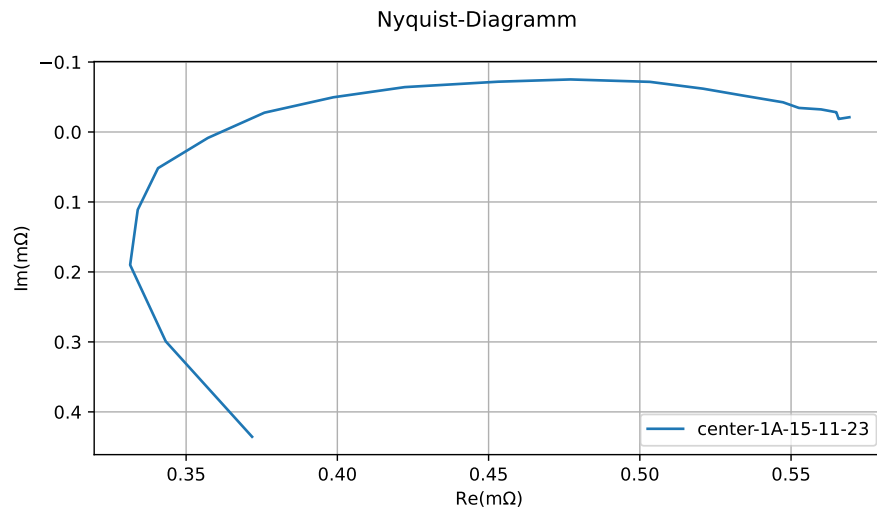


Abbildung I.3.: Nyquistplot der Messung

EIS-Messung mit zehn Ampere, Messleitungen mittig an der Endplatte des Zellmoduls platziert

CSV-Datei (Rohdaten)

```
1 1000.0000,0.374428,0.435935,0.574662,49.340476,100,1,01.01.2005
   00:02:19.565,0.00,0.3721,0.4645,1.1,111280356.7792,-131.7889,6.4,622338739.2037,-3.0923,0,2364,4294935652,0,-0.011925,0.015757,0.019761,127.117830
2 615.8482,0.338313,0.260456,0.426958,37.591515,100,1,01.01.2005
   00:02:29.620,0.00,0.3381,0.2789,0.8,82072653.5456,-142.6154,6.4,623341498.8676,-2.1376,0,2364,4294935654,0,-0.008874,0.011191,0.014282,128.413698
3 379.2690,0.332270,0.137201,0.359482,22.436740,100,1,01.01.2005
   00:02:39.675,0.00,0.3313,0.1488,0.7,68080414.4396,-157.1930,6.4,624024086.5086,-1.3781,0,2363,4294935655,0,-0.009544,0.007853,0.012360,140.553161
4 233.5721,0.341989,0.052692,0.346024,8.759013,100,1,01.01.2005
   00:02:49.730,0.00,0.3409,0.0587,0.7,64860136.6065,-171.1418,6.4,624046858.3004,-0.9047,0,2363,4294935654,0,-0.009876,0.004598,0.010894,155.036099
5 143.8450,0.363028,-0.005406,0.363069,-0.853164,100,1,01.01.2005
   00:02:59.785,0.00,0.3621,-0.0021,0.7,67955987.5401,179.0629,6.4,624658661.4881,-0.5987,0,2363,4294935654,0,-0.010304,0.003505,0.010884,161.213261
6 88.5867,0.390816,-0.043569,0.393238,-6.361170,100,1,01.01.2005
   00:03:09.840,0.00,0.3905,-0.0432,0.8,73777811.1421,173.2876,6.4,625049029.8892,-0.3979,0,2363,4294935655,0,-0.010408,0.001667,0.010540,170.898156
7 54.5559,0.424101,-0.066732,0.429319,-8.942150,100,1,01.01.2005
   00:03:19.795,0.00,0.4253,-0.0677,0.8,80699101.7991,170.6945,6.4,623786604.7743,-0.2660,0,2363,4294935655,0,-0.009786,0.001058,0.009843,173.831848
8 33.5982,0.460785,-0.074813,0.466818,-9.222071,100,1,01.01.2005
   00:03:29.750,0.00,0.4626,-0.0766,0.9,87442205.7437,170.4118,6.4,620710430.9596,-0.1833,0,2363,4294935655,0,-0.010083,0.000440,0.010093,177.502036
9 20.6914,0.494059,-0.071406,0.499192,-8.223944,100,1,01.01.2005
   00:03:39.605,0.00,0.4966,-0.0737,1.0,93650257.8595,171.4214,6.4,620889862.4613,-0.1318,0,2363,4294935656,0,-0.010225,-0.000131,0.010226,-179.263822
10 12.7427,0.519559,-0.061645,0.523203,-6.766423,100,1,01.01.2005
   00:03:49.360,0.00,0.5234,-0.0631,1.0,97480557.5273,173.0229,6.4,615405267.1592,-0.0994,0,2363,4294935655,0,-0.009556,0.000499,0.009569,177.010345
11 7.8476,0.537764,-0.049065,0.539998,-5.213216,100,1,01.01.2005
   00:03:59.015,0.00,0.5416,-0.0499,1.0,100741976.1800,174.6526,6.4,616554050.7768,-0.0814,0,2363,4294935655,0,-0.010123,0.000838,0.010157,175.264812
12 4.8329,0.550392,-0.035482,0.551535,-3.688589,100,1,01.01.2005
   00:04:08.770,0.00,0.5536,-0.0369,1.1,103602578.6544,176.1193,6.4,621513398.8737,-0.0717,0,2363,4294935656,0,-0.011041,-0.000025,0.011041,-179.871596
13 2.9764,0.556385,-0.028129,0.557096,-2.894224,100,1,01.01.2005
   00:04:18.325,0.00,0.5611,-0.0292,1.1,104098775.5769,176.9518,6.4,616696147.0919,-0.0677,0,2363,4294935656,0,-0.009719,0.000084,0.009719,179.505749
14 1.8330,0.560176,-0.022975,0.560647,-2.348610,100,1,01.01.2005
   00:04:27.480,0.00,0.5655,-0.0237,1.1,92887105.0780,177.5360,6.4,546222225.8735,-0.0660,0,2363,4294935656,0,-0.009178,0.000333,0.009184,177.924041
15 1.1288,0.563463,-0.021287,0.563865,-2.163570,100,1,01.01.2005
   00:04:36.735,0.00,0.5687,-0.0211,1.1,101113461.8639,177.8216,6.4,591354159.4789,-0.0583,0,2363,4294935657,0,-0.009343,0.001235,0.009424,172.468889
16 0.6952,0.564720,-0.022389,0.565163,-2.270414,100,1,01.01.2005
   00:04:44.390,0.00,0.5717,-0.0223,1.1,82521740.1242,177.6903,6.4,480092877.4142,-0.0722,0,2363,4294935657,0,-0.007680,0.001085,0.007756,171.956660
17 0.4281,0.573195,-0.023586,0.573681,-2.356277,100,1,01.01.2005
   00:04:53.845,0.00,0.5776,-0.0245,1.1,135480387.3891,177.5198,6.4,780032147.6042,-0.0480,0,2363,4294935657,0,-0.010473,0.000122,0.010473,179.330164
18 0.2637,0.573844,-0.031142,0.574688,-3.106364,100,1,01.01.2005
   00:05:06.300,0.00,0.5796,-0.0312,1.1,220899916.9224,176.8603,6.4,1266837738.3476,-0.0602,0,2363,4294935657,0,-0.009168,0.001231,0.009250,172.351128
19 0.1624,0.578388,-0.042187,0.579924,-4.171699,100,1,01.01.2005
   00:05:23.455,0.00,0.5837,-0.0444,1.1,361727007.6687,175.6171,6.4,2056817319.8727,-0.0376,0,2363,4294935657,0,-0.009685,-0.000607,0.009704,-176.410959
20 0.1000,0.591984,-0.057254,0.594746,-5.524246,100,1,01.01.2005
   00:05:48.310,0.00,0.5969,-0.0596,1.2,602409106.2738,174.2513,6.4,3342703039.5191,-0.0423,0,2363,4294935659,0,-0.010438,-0.000429,0.010446,-177.648860
```

Grafische Darstellungen der Messwerte der CSV-Datei zuvor

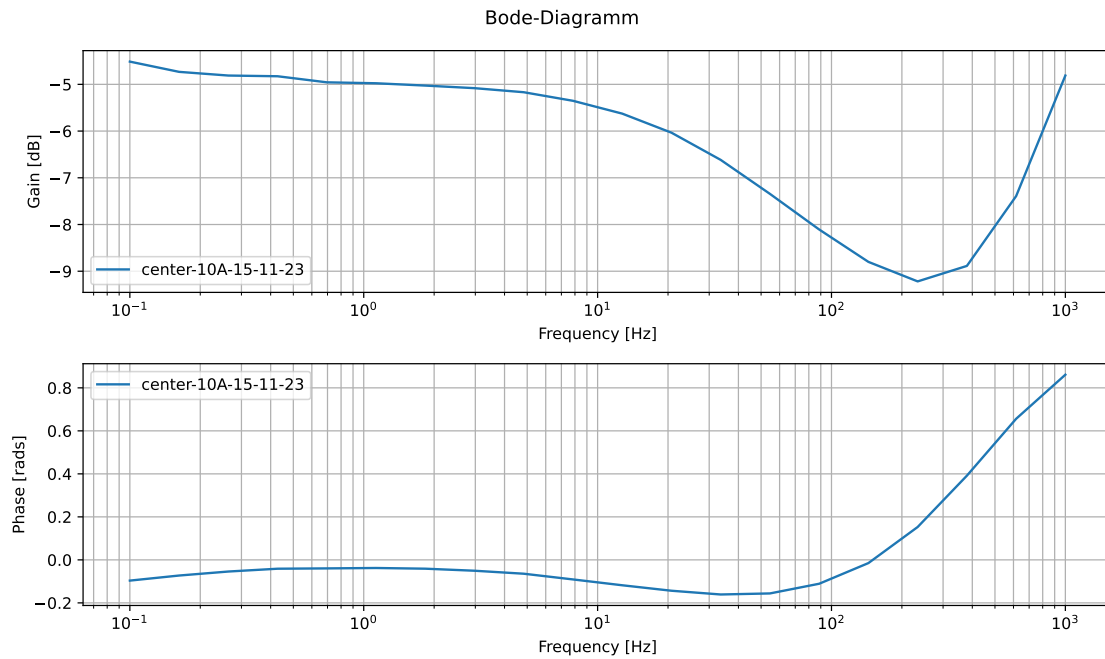


Abbildung I.4.: Bodeplot der Messung

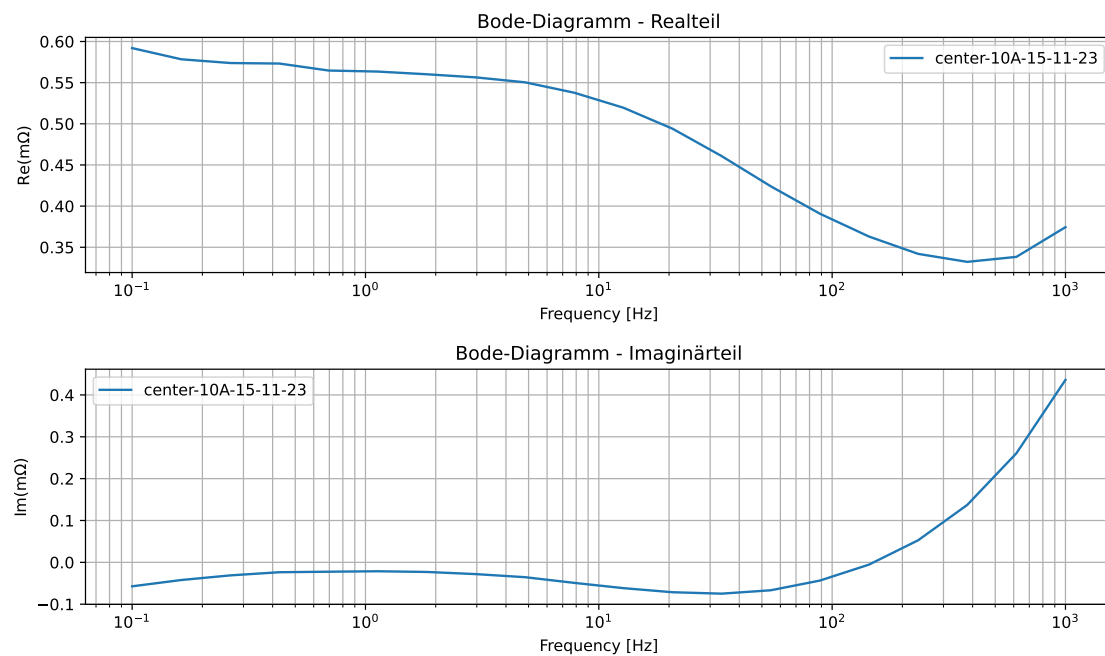


Abbildung I.5.: Real- und Imaginärteil der Messung

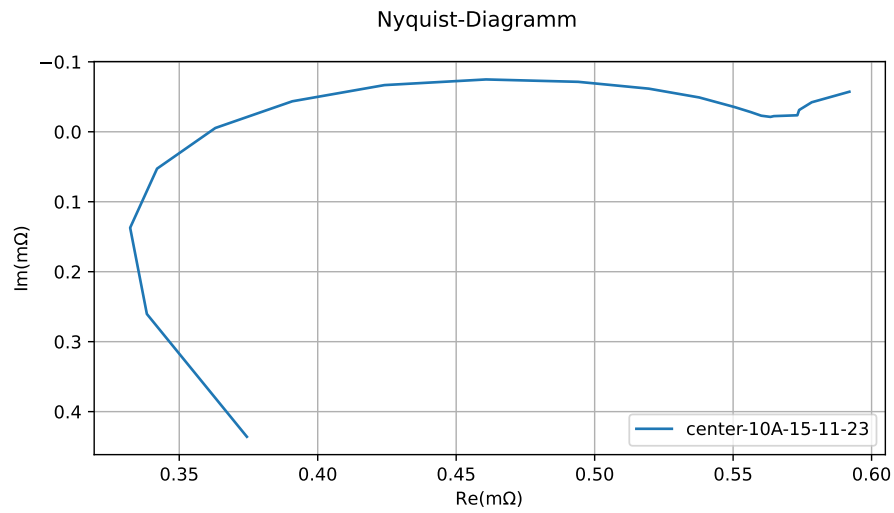


Abbildung I.6.: Nyquistplot der Messung

EIS-Messung mit zehn Ampere, Messleitungen in einer Ecke der Endplatte des Zellmoduls platziert

CSV-Datei (Rohdaten)

```
1 1000.0000,0.351857,0.355796,0.500394,45.318941,100,1,01.01.2005
   00:09:17.765,0.00,0.3498,0.3820,1.0,96829869.9254,-135.5836,6.4,622206123.9687,-3.0990,0,2363,4294935661,0,-0.011124,0.015654,0.019204,125.398799
2 615.8482,0.322487,0.208375,0.383951,32.868538,100,1,01.01.2005
   00:09:27.820,0.00,0.3218,0.2261,0.8,73640071.2246,-147.0490,6.4,623213772.6531,-2.1419,0,2363,4294935661,0,-0.008939,0.011881,0.014868,126.955200
3 379.2690,0.318332,0.103558,0.334753,18.020399,100,1,01.01.2005
   00:09:37.875,0.00,0.3168,0.1152,0.6,63183043.7204,-161.3984,6.4,623906703.7525,-1.3812,0,2363,4294935661,0,-0.009741,0.008795,0.013124,137.922824
4 233.5721,0.330284,0.032668,0.331896,5.648766,100,1,01.01.2005
   00:09:47.930,0.00,0.3285,0.0388,0.6,62011350.3866,-174.1776,6.4,623963017.6649,-0.9052,0,2362,4294935661,0,-0.010288,0.005229,0.011540,153.058569
5 143.8450,0.349468,-0.015716,0.349821,-2.574861,100,1,01.01.2005
   00:09:57.985,0.00,0.3490,-0.0137,0.7,65533011.8252,177.1516,6.4,624572538.2864,-0.6000,0,2362,4294935661,0,-0.009516,0.002514,0.009843,165.199931
6 88.5867,0.377844,-0.051177,0.381294,-7.713406,100,1,01.01.2005
   00:10:08.040,0.00,0.3775,-0.0502,0.7,71497787.2004,172.0338,6.4,624974747.2052,-0.3968,0,2362,4294935661,0,-0.010127,0.002518,0.010435,166.035122
7 54.5559,0.411956,-0.071565,0.418126,-9.855118,100,1,01.01.2005
   00:10:17.995,0.00,0.4123,-0.0721,0.8,784393336.8833,169.8116,6.4,623724870.9461,-0.2654,0,2362,4294935661,0,-0.010254,0.001530,0.010368,171.514061
8 33.5982,0.448573,-0.077801,0.455270,-9.839564,100,1,01.01.2005
   00:10:27.950,0.00,0.4497,-0.0792,0.9,85149737.7516,169.8229,6.4,620622659.2194,-0.1838,0,2362,4294935662,0,-0.010407,0.000872,0.010444,175.209468
9 20.6914,0.481502,-0.072847,0.486982,-8.603130,100,1,01.01.2005
   00:10:37.805,0.00,0.4838,-0.0749,0.9,91306070.0911,171.0703,6.4,620819306.3858,-0.1314,0,2362,4294935662,0,-0.010168,0.000207,0.010170,178.832272
10 12.7427,0.506024,-0.060436,0.509621,-6.810696,100,1,01.01.2005
   00:10:47.560,0.00,0.5096,-0.0622,1.0,94898988.2652,172.9397,6.4,615294562.5462,-0.0994,0,2362,4294935661,0,-0.009531,0.000169,0.009532,178.982432
11 7.8476,0.523659,-0.048242,0.525876,-5.263479,100,1,01.01.2005
   00:10:57.215,0.00,0.5277,-0.0501,1.0,98188021.5743,174.4941,6.4,616534724.4531,-0.0780,0,2362,4294935662,0,-0.009504,-0.000245,0.009507,-178.525708
12 4.8329,0.534458,-0.035622,0.535644,-3.813158,100,1,01.01.2005
   00:11:06.970,0.00,0.5394,-0.0373,1.0,100942346.5830,175.9770,6.4,621452125.1156,-0.0652,0,2362,4294935663,0,-0.008950,-0.000352,0.008957,-177.748139
13 2.9764,0.543552,-0.027493,0.544246,-2.895519,100,1,01.01.2005
   00:11:16.525,0.00,0.5471,-0.0277,1.1,101488046.6470,177.0453,6.4,616641371.2451,-0.0570,0,2362,4294935662,0,-0.010535,0.000942,0.010577,174.891255
14 1.8330,0.549030,-0.022000,0.549471,-2.294675,100,1,01.01.2005
   00:11:25.680,0.00,0.5525,-0.0228,1.1,90750333.1423,177.5758,6.4,546263671.1217,-0.0589,0,2362,4294935662,0,-0.010782,0.000187,0.010784,179.008762
15 1.1288,0.545951,-0.020139,0.546322,-2.112578,100,1,01.01.2005
   00:11:34.935,0.00,0.5513,-0.0218,1.1,98019920.0490,177.6809,6.4,591302419.8432,-0.0542,0,2362,4294935664,0,-0.008782,-0.000709,0.008810,-175.385909
16 0.6952,0.552145,-0.020327,0.552519,-2.108408,100,1,01.01.2005
   00:11:42.590,0.00,0.5571,-0.0218,1.1,80432842.4315,177.7064,6.4,480201535.3103,-0.0487,0,2362,4294935664,0,-0.009381,-0.000542,0.009396,-176.690461
17 0.4281,0.558858,-0.023995,0.559373,-2.458560,100,1,01.01.2005
   00:11:52.045,0.00,0.5622,-0.0258,1.1,131891568.7117,177.2970,6.4,779980973.4716,-0.0723,0,2361,4294935662,0,-0.011112,-0.000768,0.011138,-176.045930
18 0.2637,0.562215,-0.032656,0.563163,-3.324219,100,1,01.01.2005
   00:12:04.500,0.00,0.5672,-0.0341,1.1,216206634.2308,176.5203,6.4,1266392093.1422,-0.0391,0,2361,4294935662,0,-0.009553,-0.000150,0.009554,-179.097764
19 0.1624,0.558635,-0.039810,0.560051,-4.076134,100,1,01.01.2005
   00:12:21.655,0.00,0.5633,-0.0419,1.1,349128252.0024,175.6998,6.4,2057133073.4309,-0.0441,0,2361,4294935664,0,-0.009771,-0.000634,0.009792,-176.287327
20 0.1000,0.561074,-0.057908,0.564055,-5.892553,100,1,01.01.2005
   00:12:46.510,0.00,0.5666,-0.0598,1.1,572087900.5303,173.9245,6.4,3342421115.8470,-0.0515,0,2361,4294935664,0,-0.009042,0.000073,0.009043,179.536920
```

Grafische Darstellungen der Messwerte der CSV-Datei zuvor

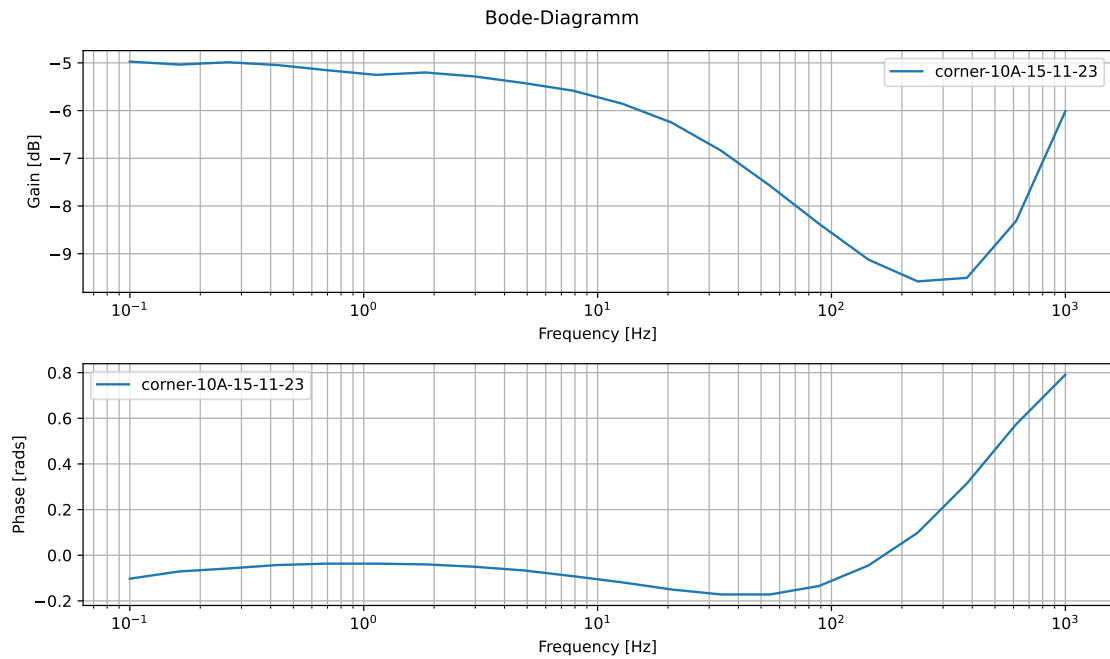


Abbildung I.7.: Bodeplot der Messung

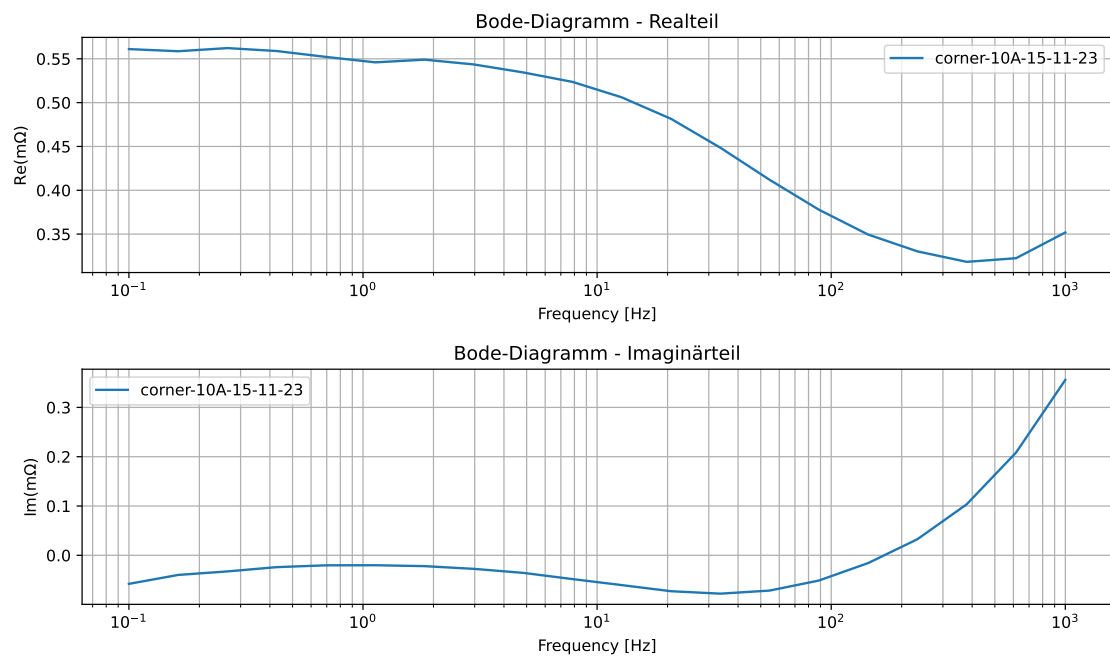


Abbildung I.8.: Real- und Imaginärteil der Messung

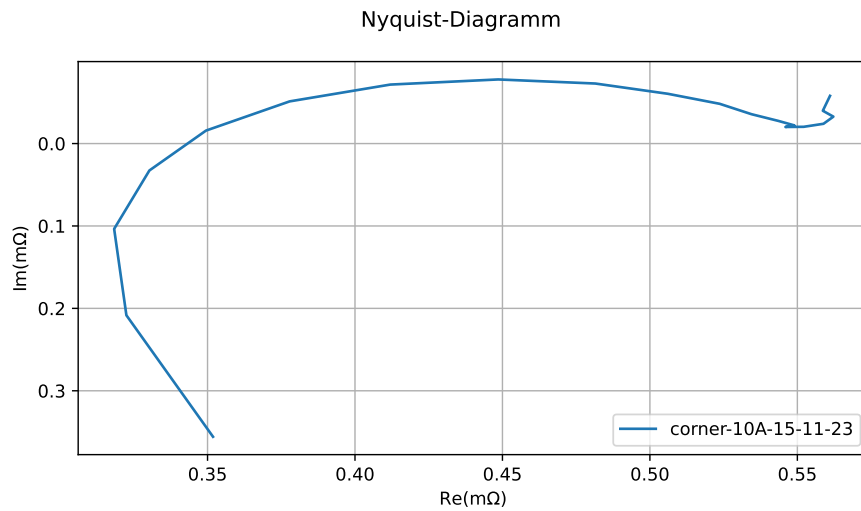


Abbildung I.9.: Nyquistplot der Messung

I.2. EIS-Messungen der Temperaturveränderung der Molicell 21700-P45B

Temperaturveränderung der Zelle 1

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 1 mit einer Temperatur von 15 °C

```
1 10000.0000,17.976979,9.008693,20.107917,26.616543,100,1,01.01.2005
   00:00:51.690,0.00,21.2983,8.6312,7.0,685259233.2873,173.6698,1.0,99251933.3636,-28.3905,0,2348,4294934896,0,-0.705992,0.629239,0.945710,138.289880
2 5455.5948,17.180433,4.805126,17.839745,15.625562,100,1,01.01.2005
   00:01:01.745,0.00,18.5426,5.0713,6.4,622449814.2218,177.2039,1.1,107774901.2127,-18.0921,0,2347,4294934896,0,-0.233221,0.270022,0.356797,130.817539
3 2976.3514,16.980576,2.262169,17.130598,7.588319,100,1,01.01.2005
   00:01:11.800,0.00,17.6963,2.4805,6.2,602334630.7157,177.3499,1.1,112196392.2722,-10.6294,0,2346,4294934897,0,-0.077498,0.130591,0.151855,120.686608
4 1623.7767,17.065100,0.671791,17.078318,2.254362,100,1,01.01.2005
   00:01:21.855,0.00,17.5764,0.8035,6.2,601953660.6265,176.6136,1.2,113874920.8257,-6.0039,0,2346,4294934897,0,-0.031277,0.072327,0.078800,113.385230
5 885.8668,17.352342,-0.339840,17.355669,-1.121976,100,1,01.01.2005
   00:01:31.910,0.00,17.8075,-0.2797,6.3,612184957.6228,175.7325,1.2,114412806.1137,-3.3678,0,2345,4294934897,0,-0.018704,0.040118,0.044264,114.995581
6 483.2930,17.771411,-1.031040,17.801295,-3.320394,100,1,01.01.2005
   00:01:41.965,0.00,18.2189,-1.0197,6.4,628369938.4016,174.8701,1.2,114620673.9433,-1.9263,0,2345,4294934899,0,-0.016264,0.024078,0.029057,124.037755
7 263.6651,18.378444,-1.540589,18.442902,-4.791667,100,1,01.01.2005
   00:01:52.020,0.00,18.8413,-1.5664,6.7,651569665.5256,174.1156,1.2,114710221.6294,-1.1321,0,2344,4294934899,0,-0.011746,0.011514,0.016448,135.569815
8 143.8450,19.140889,-1.957914,19.240766,-5.840448,100,1,01.01.2005
   00:02:02.075,0.00,19.6217,-2.0048,7.0,680461922.1366,173.4966,1.2,114831341.6299,-0.6697,0,2344,4294934899,0,-0.012969,0.008895,0.015726,145.554056
9 78.4760,20.113710,-2.195866,20.233219,-6.230454,100,1,01.01.2005
   00:02:12.130,0.00,20.6165,-2.2564,7.3,715681386.4667,173.3574,1.2,114859862.1411,-0.3967,0,2343,4294934899,0,-0.016555,0.006491,0.017783,158.589715
10 42.8133,21.144593,-2.132495,21.251855,-5.758977,100,1,01.01.2005
   00:02:22.085,0.00,21.6785,-2.2006,7.7,750401872.0455,173.9715,1.2,114627263.3300,-0.2323,0,2343,4294934899,0,-0.012715,0.000696,0.012734,176.866870
11 23.3572,21.995499,-1.776225,22.067101,-4.616847,100,1,01.01.2005
   00:02:31.940,0.00,22.5514,-1.8328,8.0,776582054.3528,175.2053,1.2,114243974.8391,-0.1483,0,2343,4294934900,0,-0.013422,0.005142,0.014373,159.037719
12 12.7427,22.531023,-1.311686,22.569172,-3.331822,100,1,01.01.2005
   00:02:41.695,0.00,23.1014,-1.3621,8.2,786341810.1093,176.5257,1.2,113101286.0382,-0.0999,0,2342,4294934898,0,-0.013406,0.000555,0.013417,177.628259
13 6.9519,22.813913,-0.912108,22.832139,-2.289486,100,1,01.01.2005
   00:02:51.450,0.00,23.3915,-0.9502,8.3,806721266.6571,177.5784,1.2,114697887.1942,-0.0955,0,2342,4294934898,0,-0.014009,0.003273,0.014387,166.848576
14 3.7927,22.971301,-0.637700,22.980151,-1.590164,100,1,01.01.2005
   00:03:01.005,0.00,23.5468,-0.6691,8.3,800998632.9432,178.2931,1.2,113181117.4581,-0.0793,0,2342,4294934899,0,-0.020572,0.003240,0.020826,171.048607
15 2.0691,23.018175,-0.508048,23.023781,-1.264404,100,1,01.01.2005
   00:03:10.160,0.00,23.6004,-0.5380,8.3,736416751.9526,178.6312,1.2,103834314.5300,-0.0629,0,2341,4294934899,0,-0.015227,0.001471,0.015298,174.480637
16 1.1288,23.041169,-0.472592,23.046015,-1.175015,100,1,01.01.2005
   00:03:19.415,0.00,23.6207,-0.4958,8.3,771444869.8182,178.7322,1.2,108684084.5684,-0.0653,0,2341,4294934899,0,-0.018582,0.007403,0.020002,158.276493
17 0.6158,23.116487,-0.541658,23.122833,-1.342290,100,1,01.01.2005
   00:03:27.470,0.00,23.6976,-0.5752,8.4,709340035.2209,178.5334,1.2,99602507.0638,-0.0762,0,2341,4294934900,0,-0.018841,-0.001011,0.018868,-176.929606
18 0.3360,23.160561,-0.741714,23.172435,-1.834263,100,1,01.01.2005
   00:03:38.225,0.00,23.7430,-0.7751,8.4,1302766480.3809,178.0852,1.2,182536134.1029,-0.0449,0,2340,4294934899,0,-0.018571,0.004357,0.019075,166.795376
19 0.1833,23.203323,-0.998847,23.224812,-2.464922,100,1,01.01.2005
   00:03:53.980,0.00,23.7927,-1.0433,8.4,2395857648.9264,177.3961,1.2,334849027.4402,-0.0930,0,2340,4294934899,0,-0.012528,0.000029,0.012528,179.866840
20 0.1000,23.401217,-1.570192,23.453837,-3.838721,100,1,01.01.2005
   00:04:18.835,0.00,23.9855,-1.6330,8.5,4429084356.4897,176.0596,1.2,613211004.9352,-0.0456,0,2339,4294934901,0,-0.022311,-0.003284,0.022551,-171.626543
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 1 mit einer Temperatur von 20 °C

```
1 10000.0000,18.047019,9.053721,20.190710,26.641731,100,1,01.01.2005
   00:01:07.150,0.00,21.3871,8.6764,7.0,688496987.3296,173.7739,1.0,99292150.7132,-28.3076,0,2340,4294934880,0,-0.704306,0.631769,0.946139,138.107589
2 5455.5948,17.183214,4.849104,17.854317,15.759069,100,1,01.01.2005
   00:01:17.205,0.00,18.5483,5.1193,6.4,623267741.5849,177.3928,1.1,107814689.8223,-18.0365,0,2339,4294934878,0,-0.231651,0.270264,0.355956,130.600765
3 2976.3514,16.936707,2.311717,17.093744,7.772358,100,1,01.01.2005
   00:01:27.260,0.00,17.6494,2.5322,6.1,601194980.2077,177.5668,1.1,112230009.0850,-10.5978,0,2338,4294934880,0,-0.078506,0.130345,0.152161,121.060372
4 1623.7767,16.991947,0.746114,17.008320,2.514233,100,1,01.01.2005
   00:01:37.315,0.00,17.4995,0.8761,6.1,599574294.7464,176.8773,1.2,113899485.3266,-5.9888,0,2337,4294934880,0,-0.032512,0.068363,0.075700,115.434921
5 885.8668,17.258498,-0.240044,17.260168,-0.796859,100,1,01.01.2005
   00:01:47.370,0.00,17.7092,-0.1759,6.2,608985260.5670,176.0715,1.2,114454806.2589,-3.3593,0,2337,4294934881,0,-0.020397,0.041477,0.046221,116.186737
6 483.2930,17.688605,-0.883228,17.710642,-2.858519,100,1,01.01.2005
   00:01:57.425,0.00,18.1342,-0.8686,6.4,625382513.6076,175.3400,1.2,114656555.6340,-1.9177,0,2335,4294934882,0,-0.015894,0.023623,0.028472,123.933774
7 263.6651,18.249881,-1.331214,18.298369,-4.171979,100,1,01.01.2005
   00:02:07.480,0.00,18.7042,-1.3478,6.6,646391163.2434,174.7559,1.2,114730656.8313,-1.1224,0,2335,4294934881,0,-0.016943,0.015260,0.022802,137.992447
8 143.8450,18.915212,-1.623520,18.984759,-4.905757,100,1,01.01.2005
   00:02:17.535,0.00,19.3879,-1.6646,6.9,671518042.4029,174.4249,1.2,114863193.5256,-0.6680,0,2335,4294934883,0,-0.015375,0.006013,0.016509,158.640283
9 78.4760,19.699302,-1.709255,19.773317,-4.958981,100,1,01.01.2005
   00:02:27.590,0.00,20.1946,-1.7620,7.2,699738133.1193,174.6189,1.2,114895390.3518,-0.3944,0,2335,4294934883,0,-0.013579,0.001392,0.013650,174.145740
10 42.8133,20.489628,-1.538697,20.547322,-4.294644,100,1,01.01.2005
   00:02:37.545,0.00,21.0021,-1.5944,7.4,725345432.1216,175.4148,1.2,114625654.0969,-0.2437,0,2335,4294934884,0,-0.017475,-0.002804,0.017698,-170.883110
11 23.3572,21.074047,-1.215881,21.109094,-3.302058,100,1,01.01.2005
   00:02:47.400,0.00,21.6062,-1.2591,7.6,742759168.8722,176.5182,1.2,114230232.3271,-0.1467,0,2335,4294934884,0,-0.013593,0.003315,0.013992,166.293143
12 12.7427,21.442984,-0.872280,21.460719,-2.329452,100,1,01.01.2005
   00:02:57.155,0.00,21.9881,-0.9082,7.8,748125270.9568,177.5265,1.2,113152608.8632,-0.1082,0,2335,4294934884,0,-0.010759,0.002833,0.011126,165.247450
13 6.9519,21.623522,-0.628528,21.632655,-1.664941,100,1,01.01.2005
   00:03:06.910,0.00,22.1690,-0.6519,7.8,764805259.7411,178.2703,1.2,114779939.9799,-0.0454,0,2335,4294934884,0,-0.015480,0.009691,0.018263,147.950953
14 3.7927,21.704989,-0.452925,21.709714,-1.195436,100,1,01.01.2005
   00:03:16.465,0.00,22.2513,-0.4775,7.9,757604256.4679,178.7016,1.2,113301718.5666,-0.0692,0,2334,4294934886,0,-0.017024,0.004276,0.017552,165.900895
15 2.0691,21.787066,-0.387861,21.790518,-1.019893,100,1,01.01.2005
   00:03:25.620,0.00,22.3346,-0.4168,7.9,696128379.5602,178.8834,1.2,103725227.6453,-0.0475,0,2334,4294934885,0,-0.018008,-0.001588,0.018078,-174.960861
16 1.1288,21.874631,-0.382588,21.877977,-1.002003,100,1,01.01.2005
   00:03:34.875,0.00,22.4240,-0.4021,7.9,730856970.4633,178.8610,1.2,108467034.8261,-0.1116,0,2334,4294934886,0,-0.018453,0.007819,0.020041,157.036296
17 0.6158,21.957789,-0.495883,21.963388,-1.293717,100,1,01.01.2005
   00:03:42.930,0.00,22.5152,-0.5205,8.0,673340835.0108,178.6360,1.2,99515855.8598,-0.0397,0,2334,4294934886,0,-0.012543,0.005774,0.013808,155.281203
18 0.3360,22.034899,-0.655608,22.044650,-1.704227,100,1,01.01.2005
   00:03:53.685,0.00,22.5915,-0.6866,8.0,1241891563.9964,178.1501,1.2,182888804.3056,-0.1092,0,2334,4294934886,0,-0.015227,0.003695,0.015668,166.359175
19 0.1833,22.195132,-0.985773,22.217012,-2.543060,100,1,01.01.2005
   00:04:09.440,0.00,22.7581,-1.0271,8.1,2293530942.3881,177.3944,1.2,335100738.6700,-0.0215,0,2334,4294934887,0,-0.012744,0.002051,0.012908,170.856445
20 0.1000,22.493968,-1.447973,22.540524,-3.683140,100,1,01.01.2005
   00:04:34.295,0.00,23.0612,-1.4988,8.2,4263268125.0733,176.2554,1.2,614036332.4497,-0.0260,0,2333,4294934888,0,-0.015875,0.004797,0.016584,163.187061
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 1 mit einer Temperatur von 25 °C

```
1 10000.0000,20.974726,9.184915,22.897637,23.648801,100,1,01.01.2005
   00:01:00.955,0.00,24.7934,8.4573,8.0,781368680.8047,170.4568,1.0,99281262.7613,-28.3782,0,2334,4294934880,0,-0.701905,0.654697,0.959843,136.993028
2 5455.5948,20.026521,4.966256,20.633111,13.927476,100,1,01.01.2005
   00:01:11.010,0.00,21.6346,5.1872,7.4,720555923.8305,175.3993,1.1,107802728.8708,-18.0836,0,2333,4294934880,0,-0.236207,0.280027,0.366345,130.148162
3 2976.3514,19.714696,2.424737,19.863247,7.011670,100,1,01.01.2005
   00:01:21.065,0.00,20.5555,2.6569,7.1,698842558.4013,176.7462,1.1,112228294.6981,-10.6188,0,2332,4294934881,0,-0.079943,0.139686,0.160944,119.782848
4 1623.7767,19.748143,0.870851,19.767335,2.524985,100,1,01.01.2005
   00:01:31.120,0.00,20.3427,1.0167,7.1,697085613.5295,176.8567,1.2,113915855.9997,-6.0044,0,2332,4294934881,0,-0.033121,0.074111,0.081175,114.080055
5 885.8668,19.998495,-0.089107,19.998694,-0.255291,100,1,01.01.2005
   00:01:41.175,0.00,20.5271,-0.0129,7.2,705877404.9522,176.5984,1.2,114459292.0958,-3.3655,0,2332,4294934881,0,-0.017053,0.044808,0.047944,110.836151
6 483.2930,20.346645,-0.676182,20.357878,-1.903414,100,1,01.01.2005
   00:01:51.230,0.00,20.8610,-0.6551,7.4,718873161.3811,176.2809,1.2,114644220.7999,-1.9206,0,2331,4294934881,0,-0.016206,0.022625,0.027830,125.612902
7 263.6651,20.797982,-1.042103,20.824073,-2.868461,100,1,01.01.2005
   00:02:01.285,0.00,21.3189,-1.0521,7.5,735733789.4080,176.0506,1.2,114729684.3507,-1.1241,0,2331,4294934882,0,-0.016088,0.014108,0.021397,138.751451
8 143.8450,21.366058,-1.209753,21.400279,-3.240645,100,1,01.01.2005
   00:02:11.340,0.00,21.9029,-1.2395,7.7,756931047.2393,176.0958,1.2,114844134.9318,-0.6654,0,2331,4294934883,0,-0.014611,0.007314,0.016340,153.408057
9 78.4760,21.959417,-1.167767,21.990445,-3.044033,100,1,01.01.2005
   00:02:21.395,0.00,22.5099,-1.2058,8.0,778135612.5575,176.5335,1.2,114897086.8081,-0.4001,0,2331,4294934883,0,-0.017165,0.003263,0.017473,169.235431
10 42.8133,22.428456,-0.979145,22.449819,-2.499739,100,1,01.01.2005
   00:02:31.350,0.00,22.9922,-1.0142,8.1,792749168.2731,177.2414,1.2,114651886.1206,-0.2329,0,2330,4294934883,0,-0.016821,0.004620,0.017444,164.643205
11 23.3572,22.743552,-0.732009,22.755329,-1.843449,100,1,01.01.2005
   00:02:41.205,0.00,23.3209,-0.7651,8.2,801020506.2817,177.9714,1.2,114265096.4102,-0.1496,0,2330,4294934884,0,-0.012112,0.002081,0.012290,170.251737
12 12.7427,22.919860,-0.519271,22.925742,-1.297867,100,1,01.01.2005
   00:02:50.960,0.00,23.4979,-0.5525,8.3,799059570.2189,178.5677,1.2,113156469.5213,-0.0853,0,2330,4294934884,0,-0.016496,-0.002532,0.016689,-171.273504
13 6.9519,23.019104,-0.379711,23.022235,-0.945036,100,1,01.01.2005
   00:03:00.715,0.00,23.5937,-0.4055,8.3,813015387.9644,178.9327,1.2,114679829.2936,-0.0826,0,2330,4294934885,0,-0.022765,0.001870,0.022842,175.304203
14 3.7927,23.030673,-0.291873,23.032522,-0.726083,100,1,01.01.2005
   00:03:10.270,0.00,23.6114,-0.3187,8.3,803669386.1908,179.1519,1.2,113283012.6521,-0.0748,0,2330,4294934885,0,-0.017120,-0.001113,0.017156,-176.280776
15 2.0691,23.071020,-0.292580,23.072875,-0.726571,100,1,01.01.2005
   00:03:19.425,0.00,23.6651,-0.3194,8.4,737821222.7093,179.1925,1.2,103765352.5166,-0.0342,0,2330,4294934886,0,-0.004899,-0.000949,0.004991,-169.039376
16 1.1288,23.152342,-0.352203,23.155020,-0.871539,100,1,01.01.2005
   00:03:28.680,0.00,23.7250,-0.3830,8.4,774591938.3148,179.0520,1.2,108657465.8550,-0.0231,0,2330,4294934887,0,-0.028434,-0.003224,0.028616,-173.531775
17 0.6158,23.249587,-0.431180,23.253585,-1.062468,100,1,01.01.2005
   00:03:36.735,0.00,23.8311,-0.4617,8.4,713143146.9650,178.8485,1.2,99586308.2944,-0.0416,0,2330,4294934886,0,-0.022010,-0.000733,0.022022,-178.092690
18 0.3360,23.390052,-0.636357,23.398707,-1.558421,100,1,01.01.2005
   00:03:47.490,0.00,23.9794,-0.6708,8.5,1315253124.6429,178.3928,1.2,182494107.6174,-0.0047,0,2329,4294934888,0,-0.017625,0.000754,0.017641,177.550406
19 0.1833,23.611962,-0.902895,23.629219,-2.189859,100,1,01.01.2005
   00:04:03.245,0.00,24.2090,-0.9431,8.5,2431541832.0987,177.7477,1.2,334059336.1950,-0.0214,0,2329,4294934887,0,-0.015508,0.002136,0.015654,172.159310
20 0.1000,23.850338,-1.294981,23.885469,-3.107888,100,1,01.01.2005
   00:04:28.100,0.00,24.4512,-1.3496,8.7,4516874618.7999,176.7800,1.2,613940094.6801,-0.0607,0,2329,4294934887,0,-0.017604,-0.001923,0.017709,-173.764295
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 1 mit einer Temperatur von 30 °C

```
1 10000.0000,11.048866,9.109408,14.319872,39.504401,100,1,01.01.2005
   00:01:24.980,0.00,13.2900,9.6247,5.0,489525059.8383,-172.4091,1.0,99297652.0185,-28.3213,0,2335,4294934876,0,-0.714596,0.574452,0.916865,141.204751
2 5455.5948,10.345129,4.907916,11.450298,25.380510,100,1,01.01.2005
   00:01:35.035,0.00,11.1237,5.3170,4.1,399346974.5614,-172.4897,1.1,107811663.1076,-18.0370,0,2334,4294934876,0,-0.231025,0.238024,0.331705,134.145195
3 2976.3514,10.232213,2.410213,10.512245,13.254492,100,1,01.01.2005
   00:01:45.090,0.00,10.6327,2.6308,3.8,369354337.6587,-176.7073,1.1,112239094.1007,-10.6044,0,2333,4294934876,0,-0.078531,0.118907,0.142499,123.442376
4 1623.7767,10.413528,0.911213,10.453318,5.000804,100,1,01.01.2005
   00:01:55.145,0.00,10.7114,1.0222,3.8,368265022.7462,179.4607,1.2,113918502.0463,-5.9905,0,2333,4294934877,0,-0.032112,0.058738,0.066942,118.665383
5 885.8668,10.753337,0.000715,10.753337,0.003809,100,1,01.01.2005
   00:02:05.200,0.00,11.0298,0.0540,3.9,379358323.4764,176.9176,1.2,114479199.2998,-3.3629,0,2332,4294934878,0,-0.016869,0.035099,0.038942,115.668939
6 483.2930,11.193479,-0.540897,11.206540,-2.766521,100,1,01.01.2005
   00:02:15.255,0.00,11.4704,-0.5233,4.0,395522210.8227,175.4724,1.2,114654514.5778,-1.9155,0,2332,4294934879,0,-0.015128,0.022838,0.027394,123.520637
7 263.6651,11.691381,-0.823862,11.720373,-4.030827,100,1,01.01.2005
   00:02:25.310,0.00,11.9789,-0.8341,4.2,413950208.2371,174.8930,1.2,114744220.0999,-1.1239,0,2332,4294934880,0,-0.014436,0.009462,0.017261,146.757761
8 143.8450,12.241328,-0.911779,12.275238,-4.259734,100,1,01.01.2005
   00:02:35.365,0.00,12.5424,-0.9309,4.4,434074035.3474,175.1021,1.2,114878167.4840,-0.6532,0,2331,4294934880,0,-0.014780,0.007759,0.016693,152.302716
9 78.4760,12.762172,-0.820084,12.788494,-3.676714,100,1,01.01.2005
   00:02:45.420,0.00,13.0751,-0.8485,4.6,452369035.0832,175.8893,1.2,114916490.8699,-0.3977,0,2331,4294934880,0,-0.016827,-0.000750,0.016844,-177.447613
10 42.8133,13.162351,-0.646005,13.178195,-2.809807,100,1,01.01.2005
   00:02:55.375,0.00,13.4861,-0.6732,4.8,465108863.6885,176.9078,1.2,114650385.0540,-0.2345,0,2331,4294934881,0,-0.016905,-0.002051,0.017029,-173.081135
11 23.3572,13.370181,-0.474774,13.378608,-2.033715,100,1,01.01.2005
   00:03:05.230,0.00,13.7016,-0.4955,4.8,470657629.2674,177.7755,1.2,114261168.4223,-0.1534,0,2331,4294934881,0,-0.015067,0.001097,0.015107,175.834522
12 12.7427,13.488853,-0.348985,13.493366,-1.482034,100,1,01.01.2005
   00:03:14.985,0.00,13.8262,-0.3649,4.9,470129063.7539,178.3877,1.2,113138502.4861,-0.1003,0,2331,4294934881,0,-0.012457,0.003241,0.012872,165.416639
13 6.9519,13.570507,-0.257647,13.572953,-1.087677,100,1,01.01.2005
   00:03:24.740,0.00,13.9083,-0.2762,4.9,479499232.9954,178.7699,1.2,114729689.1744,-0.0924,0,2330,4294934881,0,-0.014316,-0.001360,0.014380,-174.572943
14 3.7927,13.640799,-0.229331,13.642727,-0.963174,100,1,01.01.2005
   00:03:34.295,0.00,13.9793,-0.2491,4.9,475525803.0833,178.8937,1.2,113205974.1880,-0.0855,0,2330,4294934882,0,-0.015583,-0.003055,0.015880,-168.906547
15 2.0691,13.700045,-0.258528,13.702484,-1.081077,100,1,01.01.2005
   00:03:43.450,0.00,14.0358,-0.2721,5.0,438040671.0573,178.8438,1.2,103858935.7994,-0.0455,0,2330,4294934882,0,-0.019834,0.003986,0.020231,168.636228
16 1.1288,13.789081,-0.320293,13.792800,-1.330628,100,1,01.01.2005
   00:03:52.705,0.00,14.1328,-0.3367,5.0,461008121.4866,178.6097,1.2,108543754.6062,-0.0253,0,2330,4294934883,0,-0.014137,0.002844,0.014420,168.623973
17 0.6158,13.860205,-0.431005,13.866905,-1.781128,100,1,01.01.2005
   00:04:00.760,0.00,14.2103,-0.4576,5.0,425844581.3142,178.1136,1.2,99694760.5220,-0.0418,0,2330,4294934883,0,-0.009590,-0.004379,0.010543,-155.459520
18 0.3360,14.038132,-0.597046,14.050823,-2.435338,100,1,01.01.2005
   00:04:11.515,0.00,14.3763,-0.6198,5.1,789273410.4940,177.4693,1.2,182568744.8662,-0.0623,0,2330,4294934883,0,-0.026002,0.004023,0.026311,171.205320
19 0.1833,14.261768,-0.876352,14.288668,-3.516271,100,1,01.01.2005
   00:04:27.270,0.00,14.6154,-0.9143,5.2,1473817923.3135,176.4048,1.2,334992129.0686,-0.0154,0,2329,4294934885,0,-0.016141,-0.003820,0.016587,-166.686283
20 0.1000,14.597539,-1.216579,14.648147,-4.764099,100,1,01.01.2005
   00:04:52.125,0.00,14.9659,-1.2580,5.3,2765492341.0071,175.1096,1.2,612900306.4915,-0.0854,0,2329,4294934885,0,-0.009846,0.001841,0.010017,169.410247
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 1 mit einer Temperatur von 35 °C

```
1 10000.0000,11.707692,9.006466,14.771137,37.570278,100,1,01.01.2005
   00:00:46.230,0.00,14.0504,9.4261,5.2,504495009.5268,-174.5036,1.0,99247646.4262,-28.3603,0,2328,4294934896,0,-0.702328,0.583573,0.913139,140.276395
2 5455.5948,10.926511,4.888649,11.970277,24.104300,100,1,01.01.2005
   00:00:56.285,0.00,11.7537,5.2888,4.3,417258970.3538,-173.8464,1.1,107756236.7469,-18.0727,0,2328,4294934897,0,-0.232019,0.244866,0.337331,133.456874
3 2976.3514,10.743779,2.446922,11.018903,12.830400,100,1,01.01.2005
   00:01:06.340,0.00,11.1702,2.6677,4.0,387125500.0663,-177.1793,1.1,112200786.3369,-10.6113,0,2327,4294934898,0,-0.076550,0.117957,0.140620,122.982039
4 1623.7767,10.854006,0.987941,10.898874,5.200780,100,1,01.01.2005
   00:01:16.395,0.00,11.1701,1.1068,3.9,384031366.2303,179.6586,1.2,113876687.5975,-6.0000,0,2327,4294934899,0,-0.027714,0.063191,0.069001,113.681066
5 885.8668,11.106039,0.127391,11.106770,0.657177,100,1,01.01.2005
   00:01:26.450,0.00,11.3943,0.1890,4.0,391762839.4905,177.5883,1.2,114425591.2735,-3.3620,0,2326,4294934899,0,-0.014412,0.039365,0.041920,110.108363
6 483.2930,11.443542,-0.346142,11.448775,-1.732543,100,1,01.01.2005
   00:01:36.505,0.00,11.7270,-0.3251,4.1,403969698.7649,176.4977,1.2,114615996.8637,-1.9145,0,2326,4294934897,0,-0.014947,0.021034,0.025804,125.398379
7 263.6651,11.827241,-0.558150,11.840403,-2.701891,100,1,01.01.2005
   00:01:46.560,0.00,12.1237,-0.5578,4.3,418247363.2182,176.2385,1.2,114706467.9956,-1.1274,0,2326,4294934898,0,-0.008942,0.013199,0.015943,124.115586
8 143.8450,12.179435,-0.580068,12.193240,-2.726759,100,1,01.01.2005
   00:01:56.615,0.00,12.4776,-0.5932,4.4,430891134.7221,176.6068,1.2,114813971.1838,-0.6712,0,2326,4294934898,0,-0.016217,0.005116,0.017005,162.491198
9 78.4760,12.445039,-0.493969,12.454839,-2.272992,100,1,01.01.2005
   00:02:06.670,0.00,12.7543,-0.5121,4.5,440535664.5053,177.3069,1.2,114874235.1021,-0.3937,0,2326,4294934899,0,-0.012483,0.000907,0.012516,175.844353
10 42.8133,12.646814,-0.379182,12.652497,-1.717352,100,1,01.01.2005
   00:02:16.625,0.00,12.9599,-0.3960,4.6,446473762.4195,178.0108,1.2,114614370.5438,-0.2390,0,2325,4294934899,0,-0.014371,0.001084,0.014412,175.687814
11 23.3572,12.761629,-0.284618,12.764803,-1.277634,100,1,01.01.2005
   00:02:26.480,0.00,13.0803,-0.2980,4.6,449142793.3457,178.5575,1.2,114262257.9932,-0.1375,0,2325,4294934899,0,-0.012167,0.003104,0.012557,165.690033
12 12.7427,12.838692,-0.214305,12.840480,-0.956301,100,1,01.01.2005
   00:02:36.235,0.00,13.1587,-0.2233,4.6,447217418.3515,178.9321,1.2,113107167.3069,-0.0956,0,2325,4294934899,0,-0.013011,0.006194,0.014410,154.543032
13 6.9519,12.894155,-0.177809,12.895380,-0.790051,100,1,01.01.2005
   00:02:45.990,0.00,13.2017,-0.1944,4.7,455152031.0823,179.0771,1.2,114743244.5062,-0.0792,0,2325,4294934898,0,-0.027067,-0.002027,0.027143,-175.716830
14 3.7927,12.939406,-0.191222,12.940819,-0.846672,100,1,01.01.2005
   00:02:55.545,0.00,13.2549,-0.2065,4.7,450611488.2182,179.0908,1.2,113141485.6929,-0.0165,0,2325,4294934899,0,-0.020379,-0.000172,0.020380,-179.515486
15 2.0691,12.958352,-0.204498,12.959966,-0.904121,100,1,01.01.2005
   00:03:04.700,0.00,13.2929,-0.2277,4.7,414623604.8989,178.9636,1.2,103805301.1777,-0.0552,0,2324,4294934900,0,-0.001844,-0.007580,0.007801,-103.675382
16 1.1288,13.033553,-0.291465,13.036811,-1.281074,100,1,01.01.2005
   00:03:13.955,0.00,13.3533,-0.3139,4.7,436409177.6200,178.6078,1.2,108751354.0865,-0.0454,0,2324,4294934898,0,-0.018562,-0.004530,0.019107,-166.284539
17 0.6158,13.140714,-0.397838,13.146735,-1.734115,100,1,01.01.2005
   00:03:22.010,0.00,13.4716,-0.4147,4.8,403758549.3811,178.2103,1.2,99711334.6199,-0.0264,0,2324,4294934900,0,-0.010078,0.003939,0.010820,158.649776
18 0.3360,13.304167,-0.574050,13.316545,-2.470675,100,1,01.01.2005
   00:03:32.765,0.00,13.6356,-0.6002,4.8,748705699.0375,177.4640,1.2,182585642.7511,-0.0156,0,2324,4294934899,0,-0.013715,-0.000609,0.013729,-177.455895
19 0.1833,13.514010,-0.784894,13.536784,-3.324008,100,1,01.01.2005
   00:03:48.520,0.00,13.8557,-0.8178,4.9,1394042162.4855,176.5333,1.2,334302881.0896,-0.0891,0,2324,4294934899,0,-0.008671,-0.001670,0.008830,-169.100920
20 0.1000,13.700038,-1.165079,13.749489,-4.860855,100,1,01.01.2005
   00:04:13.375,0.00,14.0388,-1.2115,5.0,2597887689.1839,175.0558,1.2,613659686.7205,-0.0121,0,2323,4294934899,0,-0.016144,-0.005176,0.016954,-162.223273
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 1 mit einer Temperatur von 40 °C

```
1 10000.0000,13.825031,9.084433,16.542624,33.308929,100,1,01.01.2005
   00:02:14.830,0.00,16.5193,9.2424,5.8,564569199.1320,-179.0789,1.0,99274247.3672,-28.3054,0,2324,4294934882,0,-0.692897,0.594402,0.912918,139.375309
2 5455.5948,13.037669,4.965717,13.951314,20.850566,100,1,01.01.2005
   00:02:24.885,0.00,14.0533,5.3286,5.0,486726878.3368,-177.2690,1.1,107791800.8715,-18.0344,0,2323,4294934883,0,-0.227136,0.252278,0.339463,131.998061
3 2976.3514,12.808165,2.527796,13.055222,11.164314,100,1,01.01.2005
   00:02:34.940,0.00,13.3308,2.7559,4.7,458915239.5966,-178.9194,1.1,112211279.2872,-10.5998,0,2322,4294934884,0,-0.076510,0.123680,0.145432,121.741350
4 1623.7767,12.861103,1.074099,12.905877,4.773995,100,1,01.01.2005
   00:02:44.995,0.00,13.2375,1.2058,4.7,454862915.7908,179.2151,1.2,113901487.8724,-5.9897,0,2322,4294934884,0,-0.031281,0.068867,0.075639,114.428798
5 885.8668,13.062483,0.238765,13.064665,1.047176,100,1,01.01.2005
   00:02:55.050,0.00,13.4036,0.3070,4.7,461008777.2320,177.9537,1.2,114452167.4536,-3.3583,0,2321,4294934883,0,-0.014812,0.039609,0.042288,110.502915
6 483.2930,13.347466,-0.206808,13.349068,-0.887680,100,1,01.01.2005
   00:03:05.105,0.00,13.6855,-0.1805,4.8,471403877.9426,177.3306,1.2,114641470.3050,-1.9139,0,2321,4294934885,0,-0.009765,0.021150,0.023295,114.782584
7 263.6651,13.655178,-0.382399,13.660532,-1.604090,100,1,01.01.2005
   00:03:15.160,0.00,13.9926,-0.3793,4.9,482478153.8809,177.3221,1.2,114728007.8846,-1.1249,0,2321,4294934885,0,-0.015170,0.011074,0.018782,143.869629
8 143.8450,13.919794,-0.403865,13.925652,-1.661896,100,1,01.01.2005
   00:03:25.215,0.00,14.2669,-0.4077,5.0,492536635.1481,177.6968,1.2,114863188.9923,-0.6662,0,2321,4294934886,0,-0.012293,0.010330,0.016057,139.958490
9 78.4760,14.110860,-0.337854,14.114904,-1.371563,100,1,01.01.2005
   00:03:35.270,0.00,14.4604,-0.3497,5.1,499282024.9789,178.2208,1.2,114891250.1470,-0.3937,0,2320,4294934886,0,-0.015392,0.003989,0.015900,165.471157
10 42.8133,14.222271,-0.259747,14.224642,-1.046301,100,1,01.01.2005
   00:03:45.225,0.00,14.5793,-0.2722,5.2,502239319.8432,178.7038,1.2,114642875.3990,-0.2265,0,2320,4294934887,0,-0.011370,0.003308,0.011842,163.780310
11 23.3572,14.307937,-0.188507,14.309179,-0.754829,100,1,01.01.2005
   00:03:55.080,0.00,14.6643,-0.2065,5.2,503502695.0777,179.0432,1.2,114273770.6970,-0.1500,0,2320,4294934887,0,-0.014669,-0.002919,0.014957,-168.747443
12 12.7427,14.347906,-0.148438,14.348674,-0.592740,100,1,01.01.2005
   00:04:04.835,0.00,14.7108,-0.1601,5.2,500200779.7124,179.2362,1.2,113170280.8370,-0.1402,0,2319,4294934886,0,-0.009446,0.002972,0.009902,162.535316
13 6.9519,14.393203,-0.126877,14.393762,-0.505053,100,1,01.01.2005
   00:04:14.590,0.00,14.7543,-0.1453,5.2,508900357.2105,179.3243,1.2,114799809.5003,-0.1115,0,2319,4294934886,0,-0.012489,-0.003981,0.013108,-162.319277
14 3.7927,14.438584,-0.155948,14.439426,-0.618813,100,1,01.01.2005
   00:04:24.145,0.00,14.7982,-0.1735,5.2,503489734.4402,179.2554,1.2,113240353.3338,-0.0728,0,2319,4294934887,0,-0.015236,-0.002187,0.015392,-171.832955
15 2.0691,14.477570,-0.202261,14.478983,-0.800407,100,1,01.01.2005
   00:04:33.300,0.00,14.8445,-0.2176,5.2,463062836.0025,179.0910,1.2,103818659.9103,-0.0693,0,2319,4294934888,0,-0.008880,0.001411,0.008991,170.973804
16 1.1288,14.558401,-0.296460,14.561419,-1.166580,100,1,01.01.2005
   00:04:42.555,0.00,14.9174,-0.3140,5.3,486955104.2549,178.7864,1.2,108629792.0380,-0.0079,0,2319,4294934887,0,-0.018910,0.001786,0.018995,174.605079
17 0.6158,14.699419,-0.376986,14.704253,-1.469105,100,1,01.01.2005
   00:04:50.610,0.00,15.0557,-0.3937,5.3,450492886.4610,178.3804,1.2,99560634.4914,-0.1217,0,2319,4294934888,0,-0.025231,0.004802,0.025684,169.224942
18 0.3360,14.807996,-0.575497,14.819175,-2.225618,100,1,01.01.2005
   00:05:01.365,0.00,15.1700,-0.6065,5.4,831945510.0299,177.7961,1.2,182393783.1303,0.0855,0,2319,4294934889,0,-0.022120,-0.004200,0.022516,-169.250162
19 0.1833,14.970661,-0.784286,14.991191,-2.998882,100,1,01.01.2005
   00:05:17.120,0.00,15.3415,-0.8154,5.4,1542786646.1039,176.9212,1.2,334252388.1032,-0.0363,0,2318,4294934888,0,-0.017401,0.001200,0.017443,176.055254
20 0.1000,15.156161,-1.172925,15.201479,-4.425262,100,1,01.01.2005
   00:05:41.975,0.00,15.5286,-1.2118,5.5,2869222532.5267,175.4460,1.2,613142601.3195,-0.0918,0,2318,4294934889,0,-0.020272,0.003679,0.020603,169.713918
```

Grafische Darstellung der Temperaturveränderung von Zelle 1

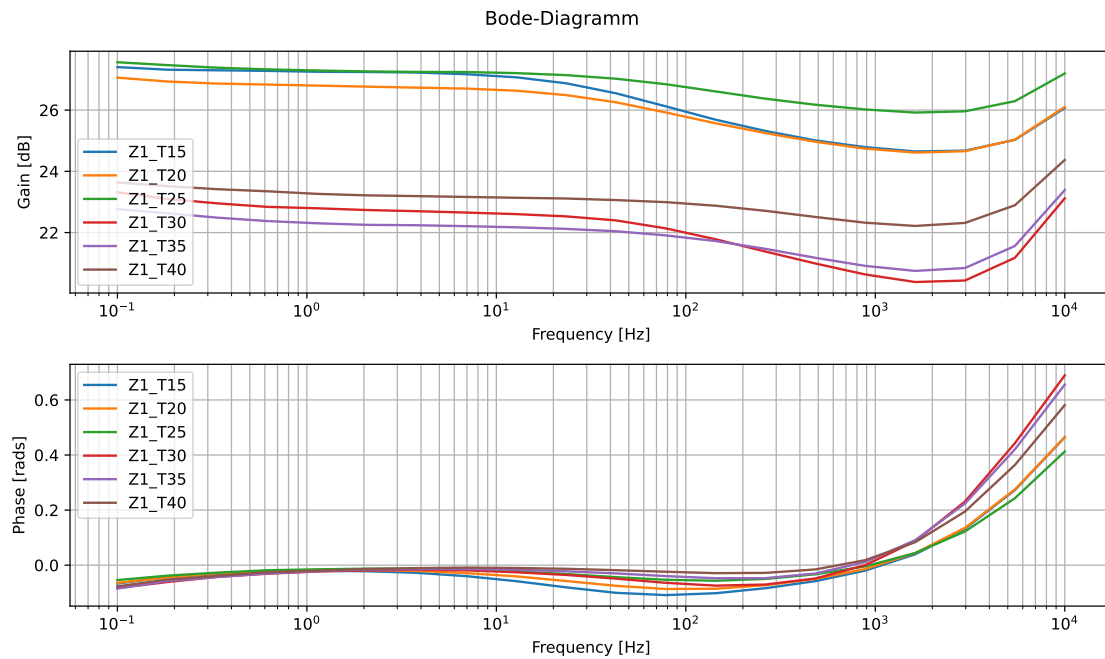


Abbildung I.10.: Bodeplot der Messung

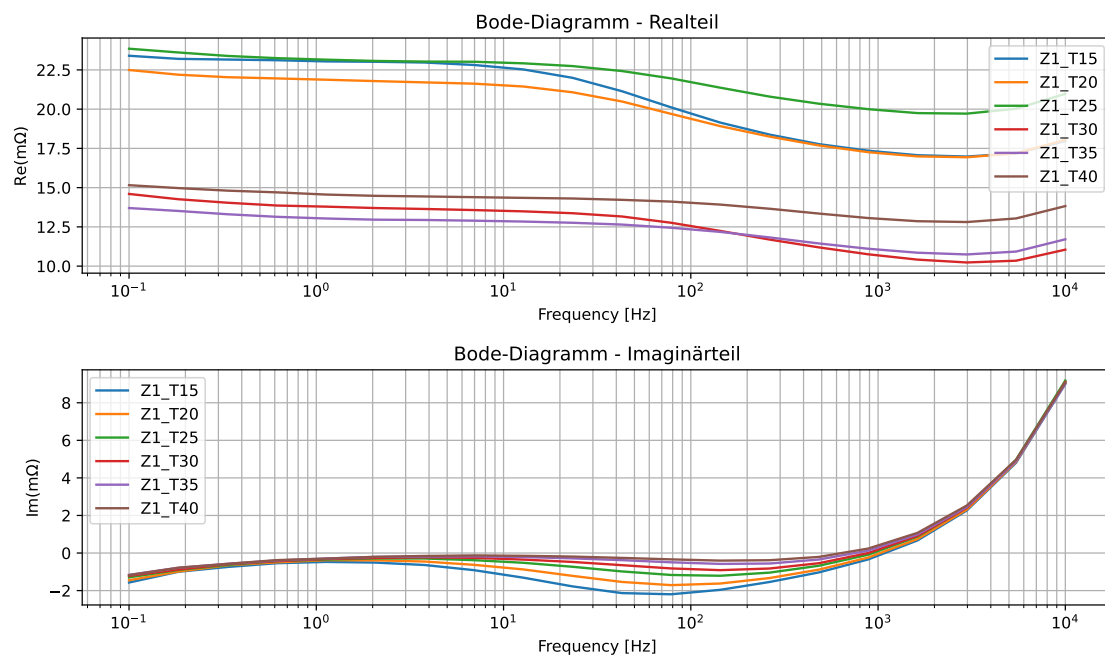


Abbildung I.11.: Real- und Imaginärteil der Messung

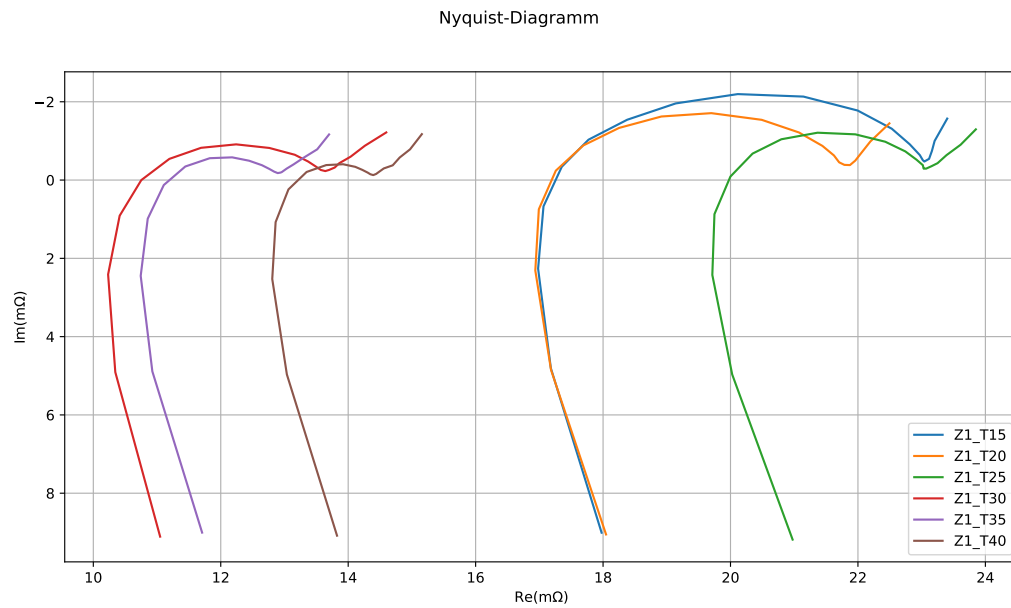


Abbildung I.12.: Nyquistplot der Messung

Temperaturveränderung der Zelle 2

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 2 mit einer Temperatur von 15 °C

```
1 10000.0000,16.172054,8.943719,18.480407,28.944150,100,1,01.01.2005
   00:13:58.900,0.00,19.2022,8.7860,6.4,629645154.9734,176.2517,1.0,99246735.3033,-28.3349,0,2359,4294934901,0,-0.705723,0.616488,0.937071,138.860978
2 5455.5948,15.326107,4.744682,16.043739,17.201566,100,1,01.01.2005
   00:14:08.955,0.00,16.5296,5.0395,5.7,559493851.6863,178.9048,1.1,107765594.8455,-18.0506,0,2358,4294934901,0,-0.230831,0.258845,0.346819,131.725699
3 2976.3514,15.177981,2.198756,15.336415,8.242803,100,1,01.01.2005
   00:14:19.010,0.00,15.8109,2.4172,5.5,539099209.6105,178.0848,1.1,112187124.9761,-10.6073,0,2357,4294934901,0,-0.076248,0.131761,0.152232,120.057424
4 1623.7767,15.357142,0.619482,15.369631,2.309964,100,1,01.01.2005
   00:14:29.065,0.00,15.8168,0.7448,5.5,541659080.9986,176.7003,1.2,113860781.7000,-5.9958,0,2356,4294934900,0,-0.028561,0.071403,0.076903,111.801251
5 885.8668,15.669541,-0.391039,15.674419,-1.429541,100,1,01.01.2005
   00:14:39.120,0.00,16.0796,-0.3362,5.7,552860883.6591,175.4325,1.2,114417860.2174,-3.3695,0,2356,4294934901,0,-0.017977,0.038982,0.042927,114.757841
6 483.2930,16.182122,-1.080415,16.218149,-3.819740,100,1,01.01.2005
   00:14:49.175,0.00,16.5854,-1.0754,5.9,572279706.1937,174.3686,1.2,114609478.3790,-1.9216,0,2355,4294934901,0,-0.019121,0.020371,0.027940,133.186935
7 263.6651,16.814069,-1.603366,16.890344,-5.447175,100,1,01.01.2005
   00:14:59.230,0.00,17.2315,-1.6310,6.1,596441345.8055,173.4684,1.2,114697863.0796,-1.1247,0,2355,4294934903,0,-0.016783,0.011528,0.020361,145.513528
8 143.8450,17.629084,-2.034964,17.746146,-6.584635,100,1,01.01.2005
   00:15:09.285,0.00,18.0684,-2.0811,6.4,627377834.7538,172.7639,1.2,114814280.7762,-0.6660,0,2354,4294934903,0,-0.015394,0.011233,0.019057,143.882115
9 78.4760,18.640692,-2.297704,18.781769,-7.026991,100,1,01.01.2005
   00:15:19.340,0.00,19.1109,-2.3629,6.8,664492708.8767,172.5621,1.2,114858383.1983,-0.3894,0,2354,4294934902,0,-0.010933,0.003637,0.011522,161.597454
10 42.8133,19.765918,-2.249332,19.893491,-6.492244,100,1,01.01.2005
   00:15:29.295,0.00,20.2551,-2.3179,7.2,702056408.0428,173.2395,1.2,114620108.5875,-0.2324,0,2353,4294934902,0,-0.021590,0.002361,0.021719,173.758022
11 23.3572,20.694298,-1.891262,20.780540,-5.221784,100,1,01.01.2005
   00:15:39.150,0.00,21.2169,-1.9515,7.5,731183286.8781,174.6112,1.2,114225729.8183,-0.1337,0,2353,4294934902,0,-0.012877,0.003577,0.013365,164.478070
12 12.7427,21.269274,-1.400320,21.315321,-3.766787,100,1,01.01.2005
   00:15:48.905,0.00,21.8075,-1.4542,7.7,743073260.1957,176.0968,1.2,113164635.9851,-0.0882,0,2352,4294934901,0,-0.012759,-0.001540,0.012851,-173.118035
13 6.9519,21.645268,-0.965278,21.666781,-2.553432,100,1,01.01.2005
   00:15:58.660,0.00,22.1878,-1.0060,7.8,765415537.4570,177.3058,1.2,114705790.4814,-0.0982,0,2352,4294934902,0,-0.018695,0.001110,0.018728,176.600942
14 3.7927,21.798508,-0.692863,21.809517,-1.820526,100,1,01.01.2005
   00:16:08.215,0.00,22.3470,-0.7269,7.9,760817188.3384,178.0802,1.2,113261095.6061,-0.0568,0,2352,4294934902,0,-0.017076,0.001086,0.017111,176.359807
15 2.0691,21.895190,-0.521068,21.901389,-1.363284,100,1,01.01.2005
   00:16:17.370,0.00,22.4524,-0.5529,7.9,700013014.0467,178.4999,1.2,103743116.2795,-0.0894,0,2351,4294934902,0,-0.010970,-0.000979,0.011014,-174.900677
16 1.1288,21.914733,-0.501805,21.920477,-1.311732,100,1,01.01.2005
   00:16:26.625,0.00,22.4713,-0.5246,7.9,733959205.1601,178.6097,1.2,108686241.4532,-0.0530,0,2351,4294934901,0,-0.012247,0.007682,0.014457,147.900655
17 0.6158,21.981091,-0.548860,21.987942,-1.430358,100,1,01.01.2005
   00:16:34.680,0.00,22.5386,-0.5782,8.0,674741090.5801,178.4896,1.2,99612794.2538,-0.0408,0,2350,4294934901,0,-0.012935,0.002426,0.013161,169.378135
18 0.3360,22.015326,-0.713012,22.026869,-1.854994,100,1,01.01.2005
   00:16:45.435,0.00,22.5692,-0.7436,8.0,1238059584.0397,177.9692,1.2,182489572.9304,-0.1438,0,2350,4294934902,0,-0.017362,0.005556,0.018230,162.253773
19 0.1833,22.051237,-1.070073,22.077185,-2.778195,100,1,01.01.2005
   00:17:01.190,0.00,22.6111,-1.1083,8.0,2278163705.3020,177.0720,1.2,334957628.7252,-0.1218,0,2349,4294934902,0,-0.011998,0.007187,0.013985,149.078701
20 0.1000,22.051474,-1.617159,22.110692,-4.194316,100,1,01.01.2005
   00:17:26.045,0.00,22.6113,-1.6713,8.0,4188776885.1134,175.7330,1.2,614931905.9302,-0.0396,0,2349,4294934902,0,-0.011646,0.005474,0.012868,154.826486
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 2 mit einer Temperatur von 20 °C

```
1 10000.0000,19.316167,9.004086,21.311684,24.992226,100,1,01.01.2005
   00:05:36.580,0.00,22.8450,8.4558,7.4,726436153.6356,171.9393,1.0,99259952.6049,-28.3721,0,2350,4294934889,0,-0.707614,0.639273,0.953618,137.904677
2 5455.5948,18.483466,4.803834,19.097522,14.568793,100,1,01.01.2005
   00:05:46.635,0.00,19.9579,5.0447,6.8,666559491.0957,176.1160,1.1,107776651.7391,-18.0694,0,2349,4294934890,0,-0.233146,0.276472,0.361654,130.140578
3 2976.3514,18.334059,2.274046,18.474550,7.070513,100,1,01.01.2005
   00:05:56.690,0.00,19.1097,2.4956,6.6,649680666.4417,176.8277,1.1,112207537.4135,-10.6128,0,2348,4294934890,0,-0.080613,0.134699,0.156978,120.899047
4 1623.7767,18.513071,0.710343,18.526694,2.197351,100,1,01.01.2005
   00:06:06.745,0.00,19.0686,0.8464,6.7,653102536.6691,176.5416,1.2,113889684.8985,-6.0000,0,2347,4294934890,0,-0.033167,0.072218,0.079471,114.667742
5 885.8668,18.933943,-0.271836,18.935894,-0.822544,100,1,01.01.2005
   00:06:16.800,0.00,19.4343,-0.2055,6.8,668272938.2695,176.0260,1.2,114448449.4607,-3.3681,0,2346,4294934890,0,-0.016561,0.041758,0.044922,111.633564
6 483.2930,19.353767,-0.918310,19.375541,-2.716571,100,1,01.01.2005
   00:06:26.855,0.00,19.8421,-0.9046,7.0,684028865.6416,175.4753,1.2,114626331.6573,-1.9144,0,2346,4294934890,0,-0.016529,0.022297,0.027756,126.549833
7 263.6651,19.945118,-1.360034,19.991434,-3.900892,100,1,01.01.2005
   00:06:36.910,0.00,20.4444,-1.3800,7.2,706181802.1955,175.0078,1.2,114710554.4113,-1.1307,0,2345,4294934891,0,-0.015762,0.012481,0.020105,141.627768
8 143.8450,20.648343,-1.660873,20.715033,-4.598750,100,1,01.01.2005
   00:06:46.965,0.00,21.1655,-1.7066,7.5,732507329.5226,174.7281,1.2,114821665.0961,-0.6620,0,2345,4294934891,0,-0.015603,0.002717,0.015838,170.123486
9 78.4760,21.449850,-1.761280,21.522039,-4.694112,100,1,01.01.2005
   00:06:57.020,0.00,21.9856,-1.8118,7.8,761314700.6009,174.8975,1.2,114869538.8921,-0.3914,0,2344,4294934892,0,-0.018369,0.005899,0.019293,162.195532
10 42.8133,22.272210,-1.589983,22.328891,-4.083340,100,1,01.01.2005
   00:07:06.975,0.00,22.8316,-1.6416,8.1,788245595.8274,175.6469,1.2,114618198.6031,-0.2407,0,2344,4294934892,0,-0.016735,0.003830,0.017167,167.107605
11 23.3572,22.811624,-1.260633,22.846431,-3.163105,100,1,01.01.2005
   00:07:16.830,0.00,23.3860,-1.3032,8.3,803750658.3567,176.6686,1.2,114219421.6850,-0.1420,0,2343,4294934892,0,-0.016417,0.006406,0.017622,158.684266
12 12.7427,23.109456,-0.903902,23.127127,-2.239923,100,1,01.01.2005
   00:07:26.585,0.00,23.6920,-0.9421,8.4,805605037.7800,177.6357,1.2,113090244.7922,-0.0871,0,2343,4294934892,0,-0.016541,0.002635,0.016750,170.948409
13 6.9519,23.256697,-0.629263,23.265209,-1.549889,100,1,01.01.2005
   00:07:36.340,0.00,23.8370,-0.6685,8.4,821856427.2659,178.3200,1.2,114715399.8490,-0.0737,0,2343,4294934892,0,-0.023012,-0.004862,0.023520,-168.070347
14 3.7927,23.327977,-0.470719,23.332726,-1.155975,100,1,01.01.2005
   00:07:45.895,0.00,23.9153,-0.5044,8.5,813763786.2541,178.7531,1.2,113233273.7268,-0.0386,0,2342,4294934893,0,-0.018075,-0.003131,0.018344,-170.171851
15 2.0691,23.333741,-0.391739,23.337029,-0.961822,100,1,01.01.2005
   00:07:55.050,0.00,23.9211,-0.4223,8.4,745436549.2385,178.9336,1.2,103707703.9698,-0.0551,0,2342,4294934893,0,-0.018366,-0.001849,0.018459,-174.250440
16 1.1288,23.352554,-0.416940,23.356275,-1.022858,100,1,01.01.2005
   00:08:04.305,0.00,23.9407,-0.4500,8.5,781130174.1157,178.8971,1.2,108582169.3395,-0.0262,0,2342,4294934893,0,-0.018052,-0.003587,0.018405,-168.762087
17 0.6158,23.400012,-0.459851,23.404530,-1.125817,100,1,01.01.2005
   00:08:12.360,0.00,23.9918,-0.4965,8.5,717607770.9226,178.7301,1.2,99535840.7396,-0.0843,0,2341,4294934892,0,-0.015602,-0.006066,0.016739,-158.754843
18 0.3360,23.442901,-0.693500,23.453156,-1.694460,100,1,01.01.2005
   00:08:23.115,0.00,24.0422,-0.7238,8.5,1318842223.2033,178.2093,1.2,182503527.0759,-0.0663,0,2341,4294934892,0,-0.009092,0.006449,0.011147,144.649349
19 0.1833,23.531853,-1.005679,23.553333,-2.447155,100,1,01.01.2005
   00:08:38.870,0.00,24.1289,-1.0536,8.5,2426726466.0207,177.4607,1.2,334440314.6968,-0.0391,0,2341,4294934894,0,-0.013387,-0.002955,0.013709,-167.551391
20 0.1000,23.692864,-1.499535,23.740270,-3.621452,100,1,01.01.2005
   00:09:03.725,0.00,24.2943,-1.5534,8.6,4496181675.4081,176.2534,1.2,614754852.5506,-0.0880,0,2340,4294934893,0,-0.012766,0.004008,0.013380,162.570271
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 2 mit einer Temperatur von 25 °C

```
1 10000.0000,10.285030,8.917677,13.612744,40.927054,100,1,01.01.2005
   00:06:12.805,0.00,12.3826,9.4988,4.8,465226007.1424,-170.9771,1.0,99223486.7594,-28.4691,0,2346,4294934892,0,-0.712758,0.567571,0.911132,141.469592
2 5455.5948,9.589460,4.760241,10.705963,26.399958,100,1,01.01.2005
   00:06:22.860,0.00,10.2984,5.1739,3.8,373179893.3807,-171.4710,1.1,107776797.8400,-18.1457,0,2344,4294934892,0,-0.232046,0.236880,0.331598,134.409433
3 2976.3514,9.454695,2.275546,9.724679,13.532510,100,1,01.01.2005
   00:06:32.915,0.00,9.8170,2.4898,3.5,341459222.9057,-176.4189,1.1,112220879.9176,-10.6504,0,2343,4294934892,0,-0.080456,0.118082,0.142887,124.268954
4 1623.7767,9.613291,0.775013,9.644481,4.609154,100,1,01.01.2005
   00:06:42.970,0.00,9.8844,0.8811,3.5,339550573.7881,179.0731,1.2,113889230.2488,-6.0209,0,2343,4294934891,0,-0.033632,0.059991,0.068775,119.275956
5 885.8668,9.940310,-0.157882,9.941564,-0.909954,100,1,01.01.2005
   00:06:53.025,0.00,10.1941,-0.1097,3.6,350530701.5658,176.0090,1.2,114446120.4986,-3.3747,0,2342,4294934891,0,-0.017613,0.035729,0.039834,116.241337
6 483.2930,10.372187,-0.738647,10.398455,-4.073397,100,1,01.01.2005
   00:07:03.080,0.00,10.6276,-0.7266,3.8,366860021.7502,174.1623,1.2,114630409.6023,-1.9268,0,2342,4294934891,0,-0.015320,0.023111,0.027728,123.539308
7 263.6651,10.918318,-1.086855,10.972279,-5.684732,100,1,01.01.2005
   00:07:13.135,0.00,11.1865,-1.1033,4.0,387475219.6565,173.2438,1.2,114735486.6764,-1.1237,0,2341,4294934894,0,-0.013852,0.010175,0.017187,143.699968
8 143.8450,11.553666,-1.250071,11.621096,-6.175203,100,1,01.01.2005
   00:07:23.190,0.00,11.8350,-1.2794,4.2,410733252.6293,173.1746,1.2,114846256.8502,-0.6555,0,2341,4294934893,0,-0.016697,0.006066,0.017765,160.032925
9 78.4760,12.181316,-1.206939,12.240962,-5.658466,100,1,01.01.2005
   00:07:33.245,0.00,12.4824,-1.2408,4.4,432873260.1966,173.9288,1.2,114861880.1033,-0.3943,0,2341,4294934892,0,-0.013488,0.003505,0.013936,165.433290
10 42.8133,12.694027,-1.003935,12.733664,-4.521951,100,1,01.01.2005
   00:07:43.200,0.00,13.0108,-1.0342,4.6,449370084.8375,175.2155,1.2,114599185.6477,-0.2397,0,2340,4294934893,0,-0.011559,0.003843,0.012181,161.606984
11 23.3572,13.039196,-0.744540,13.060436,-3.268049,100,1,01.01.2005
   00:07:53.055,0.00,13.3647,-0.7751,4.7,459494648.8917,176.5239,1.2,114245966.9451,-0.1570,0,2340,4294934894,0,-0.012207,-0.001938,0.012360,-170.978109
12 12.7427,13.244439,-0.533300,13.255172,-2.305825,100,1,01.01.2005
   00:08:02.810,0.00,13.5736,-0.5561,4.8,461786522.7724,177.5579,1.2,113143675.9530,-0.0960,0,2340,4294934893,0,-0.014189,0.000999,0.014224,175.972297
13 6.9519,13.363068,-0.379912,13.368467,-1.628481,100,1,01.01.2005
   00:08:12.565,0.00,13.6967,-0.3953,4.8,472359805.1156,178.2464,1.2,114742307.5367,-0.1005,0,2339,4294934894,0,-0.012991,0.004829,0.013859,159.606392
14 3.7927,13.451031,-0.302177,13.454425,-1.286931,100,1,01.01.2005
   00:08:22.120,0.00,13.7836,-0.3281,4.9,468957678.4477,178.5688,1.2,113213413.8017,-0.0676,0,2339,4294934893,0,-0.016539,-0.007506,0.018162,-155.588731
15 2.0691,13.504742,-0.289322,13.507840,-1.227301,100,1,01.01.2005
   00:08:31.275,0.00,13.8495,-0.3071,4.9,431812659.8217,178.6568,1.2,103753941.4227,-0.0731,0,2339,4294934893,0,-0.005793,0.000481,0.005813,175.251613
16 1.1288,13.562553,-0.344165,13.566919,-1.453633,100,1,01.01.2005
   00:08:40.530,0.00,13.9001,-0.3655,4.9,454174315.9496,178.4601,1.2,108718427.7113,-0.0336,0,2339,4294934894,0,-0.014435,-0.001598,0.014523,-173.681937
17 0.6158,13.678963,-0.460428,13.686709,-1.927822,100,1,01.01.2005
   00:08:48.585,0.00,14.0156,-0.4879,5.0,419748361.4093,177.9896,1.2,99623474.1681,-0.0166,0,2339,4294934895,0,-0.018246,-0.004623,0.018823,-165.782145
18 0.3360,13.832879,-0.643042,13.847818,-2.661565,100,1,01.01.2005
   00:08:59.340,0.00,14.1754,-0.6650,5.0,778006818.1312,177.2373,1.2,182482040.4696,-0.0767,0,2338,4294934894,0,-0.016287,0.005776,0.017281,160.472732
19 0.1833,14.043806,-0.911137,14.073332,-3.712046,100,1,01.01.2005
   00:09:15.095,0.00,14.3936,-0.9468,5.1,1449190862.1231,176.1271,1.2,334401841.9901,-0.1094,0,2338,4294934894,0,-0.014302,-0.000765,0.014322,-176.939452
20 0.1000,14.299981,-1.326318,14.361357,-5.299003,100,1,01.01.2005
   00:09:39.950,0.00,14.6532,-1.3812,5.2,2712695518.4073,174.6001,1.2,613473856.5391,-0.0152,0,2338,4294934894,0,-0.017139,-0.008976,0.019347,-152.358086
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 2 mit einer Temperatur von 30 °C

```
1 10000.0000,11.927616,9.080273,14.990643,37.281345,100,1,01.01.2005
   00:05:39.005,0.00,14.3043,9.4781,5.2,511803078.6486,-174.9654,1.0,99276541.0913,-28.4941,0,2340,4294934887,0,-0.712729,0.579787,0.918768,140.872544
2 5455.5948,11.176305,4.888348,12.198596,23.623844,100,1,01.01.2005
   00:05:49.060,0.00,12.0247,5.2825,4.4,425354303.9559,-174.3218,1.1,107796853.3413,-18.0378,0,2339,4294934887,0,-0.232259,0.244952,0.337558,133.476376
3 2976.3514,11.052749,2.405842,11.311558,12.279970,100,1,01.01.2005
   00:05:59.115,0.00,11.4891,2.6278,4.1,397335449.6037,-177.7188,1.1,112214524.9912,-10.6019,0,2338,4294934887,0,-0.080973,0.121356,0.145890,123.712663
4 1623.7767,11.163027,0.909622,11.200026,4.658469,100,1,01.01.2005
   00:06:09.170,0.00,11.4882,1.0270,4.0,394658013.3042,179.1245,1.2,113891258.7373,-5.9838,0,2338,4294934886,0,-0.028744,0.063497,0.069700,114.355088
5 885.8668,11.452692,0.011430,11.452698,0.057185,100,1,01.01.2005
   00:06:19.225,0.00,11.7487,0.0668,4.1,403985524.0882,176.9669,1.2,114450421.2305,-3.3589,0,2337,4294934888,0,-0.016345,0.035722,0.039284,114.586940
6 483.2930,11.859840,-0.514070,11.870976,-2.481955,100,1,01.01.2005
   00:06:29.280,0.00,12.1526,-0.4971,4.3,418885884.2557,175.7497,1.2,114633439.3030,-1.9078,0,2337,4294934888,0,-0.016561,0.020932,0.026691,128.351032
7 263.6651,12.324329,-0.783531,12.349211,-3.637737,100,1,01.01.2005
   00:06:39.335,0.00,12.6272,-0.7920,4.5,436076404.4536,175.2838,1.2,114723073.9014,-1.1271,0,2337,4294934888,0,-0.015362,0.010055,0.018360,146.793299
8 143.8450,12.798655,-0.848023,12.826719,-3.790806,100,1,01.01.2005
   00:06:49.390,0.00,13.1178,-0.8670,4.6,453680212.3404,175.5564,1.2,114865817.6582,-0.6622,0,2335,4294934887,0,-0.011156,0.006379,0.012851,150.238699
9 78.4760,13.225379,-0.760630,13.247234,-3.291621,100,1,01.01.2005
   00:06:59.445,0.00,13.5495,-0.7797,4.8,468532016.1812,176.3119,1.2,114907331.4553,-0.3947,0,2335,4294934888,0,-0.017726,0.007311,0.019174,157.584979
10 42.8133,13.528488,-0.592172,13.541442,-2.506366,100,1,01.01.2005
   00:07:09.400,0.00,13.8673,-0.6107,4.9,478086622.3940,177.2365,1.2,114641556.5886,-0.2420,0,2335,4294934889,0,-0.011375,0.005483,0.012628,154.263707
11 23.3572,13.717942,-0.435011,13.724837,-1.816304,100,1,01.01.2005
   00:07:19.255,0.00,14.0594,-0.4504,5.0,483006030.7142,178.0154,1.2,114291019.9942,-0.1499,0,2335,4294934888,0,-0.014090,0.005681,0.015192,158.040724
12 12.7427,13.841430,-0.310077,13.844903,-1.283330,100,1,01.01.2005
   00:07:29.010,0.00,14.1824,-0.3277,5.0,482135538.2533,178.5702,1.2,113123533.0650,-0.1061,0,2335,4294934888,0,-0.018081,0.000816,0.018099,177.416823
13 6.9519,13.901033,-0.249851,13.903278,-1.029697,100,1,01.01.2005
   00:07:38.765,0.00,14.2394,-0.2655,5.0,490989110.8257,178.8612,1.2,114750242.1922,-0.0706,0,2335,4294934890,0,-0.022373,0.001591,0.022430,175.932001
14 3.7927,13.953604,-0.220260,13.955342,-0.904348,100,1,01.01.2005
   00:07:48.320,0.00,14.2984,-0.2282,5.1,486310555.6126,179.0084,1.2,113193118.9035,-0.0773,0,2335,4294934887,0,-0.017402,0.008750,0.019478,153.304592
15 2.0691,14.000071,-0.244668,14.002209,-1.001210,100,1,01.01.2005
   00:07:57.475,0.00,14.3545,-0.2527,5.1,447734476.7106,178.9225,1.2,103803899.6262,-0.0692,0,2335,4294934889,0,-0.008972,0.009467,0.013043,133.463090
16 1.1288,14.088847,-0.306413,14.092179,-1.245906,100,1,01.01.2005
   00:08:06.730,0.00,14.4410,-0.3240,5.1,470989840.8096,178.6555,1.2,108531143.1216,-0.0593,0,2335,4294934890,0,-0.013554,0.001605,0.013649,173.247064
17 0.6158,14.176137,-0.434090,14.182781,-1.753918,100,1,01.01.2005
   00:08:14.785,0.00,14.5297,-0.4556,5.1,435245928.6675,178.1779,1.2,99658371.3717,-0.0261,0,2335,4294934889,0,-0.014311,0.001091,0.014352,175.642225
18 0.3360,14.367320,-0.595217,14.379645,-2.372325,100,1,01.01.2005
   00:08:25.540,0.00,14.7211,-0.6267,5.2,807249622.0685,177.5151,1.2,182357342.3105,-0.0474,0,2335,4294934890,0,-0.018927,-0.004501,0.019455,-166.623587
19 0.1833,14.585694,-0.871261,14.611692,-3.418439,100,1,01.01.2005
   00:08:41.295,0.00,14.9489,-0.9097,5.3,1504883703.3236,176.5074,1.2,334455371.2954,-0.0102,0,2335,4294934890,0,-0.014898,-0.004153,0.015466,-164.422803
20 0.1000,14.827603,-1.203158,14.876337,-4.638994,100,1,01.01.2005
   00:09:06.150,0.00,15.2028,-1.2513,5.4,2816765325.8332,175.2258,1.2,614624269.1392,-0.0690,0,2334,4294934891,0,-0.008978,-0.004996,0.010275,-150.904300
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 2 mit einer Temperatur von 35 °C

```
1 10000.0000,9.854745,9.027229,13.364388,42.490577,100,1,01.01.2005
   00:07:00.875,0.00,11.8992,9.6805,4.7,457462428.2491,-169.2185,1.0,99263427.1987,-28.3483,0,2338,4294934890,0,-0.713153,0.564748,0.909686,141.624177
2 5455.5948,9.112539,4.870047,10.332266,28.121547,100,1,01.01.2005
   00:07:10.930,0.00,9.7815,5.3042,3.7,360311692.5594,-169.5803,1.1,107782286.0631,-18.0498,0,2337,4294934889,0,-0.233705,0.236351,0.332385,134.677437
3 2976.3514,8.964357,2.423354,9.286137,15.127311,100,1,01.01.2005
   00:07:20.985,0.00,9.3021,2.6418,3.3,325992219.4609,-174.7512,1.1,112209443.5072,-10.6057,0,2335,4294934891,0,-0.082246,0.114869,0.141277,125.602772
4 1623.7767,9.088025,0.968653,9.139501,6.083937,100,1,01.01.2005
   00:07:31.040,0.00,9.3436,1.0810,3.3,321858986.7021,-179.3954,1.2,113897539.4026,-5.9951,0,2335,4294934890,0,-0.032060,0.061275,0.069155,117.619356
5 885.8668,9.351202,0.124573,9.352031,0.763228,100,1,01.01.2005
   00:07:41.095,0.00,9.5871,0.1788,3.4,329706666.0442,177.7025,1.2,114449955.0527,-3.3657,0,2335,4294934890,0,-0.018994,0.034998,0.039820,118.489517
6 483.2930,9.703597,-0.337659,9.709470,-1.992932,100,1,01.01.2005
   00:07:51.150,0.00,9.9392,-0.3176,3.5,342457987.2656,176.2531,1.2,114625682.5607,-1.9169,0,2335,4294934891,0,-0.017409,0.021202,0.027434,129.388722
7 263.6651,10.077181,-0.534991,10.091373,-3.038941,100,1,01.01.2005
   00:08:01.205,0.00,10.3231,-0.5363,3.6,356260293.6285,175.9053,1.2,114714684.5751,-1.1209,0,2335,4294934891,0,-0.014252,0.011161,0.018103,141.934837
8 143.8450,10.425616,-0.547122,10.439962,-3.004051,100,1,01.01.2005
   00:08:11.260,0.00,10.6800,-0.5587,3.8,368985272.9268,176.3346,1.2,114839889.5460,-0.6711,0,2334,4294934891,0,-0.014709,0.005416,0.015674,159.786330
9 78.4760,10.692299,-0.461290,10.702245,-2.470340,100,1,01.01.2005
   00:08:21.315,0.00,10.9538,-0.4765,3.9,378425205.8618,177.1128,1.2,114882630.0661,-0.3964,0,2334,4294934891,0,-0.014951,0.002143,0.015103,171.844449
10 42.8133,10.863942,-0.347858,10.869510,-1.833954,100,1,01.01.2005
   00:08:31.270,0.00,11.1343,-0.3660,3.9,383704951.0901,177.8835,1.2,114643034.1212,-0.2340,0,2334,4294934892,0,-0.010928,-0.002153,0.011138,-168.854768
11 23.3572,10.979937,-0.262960,10.983085,-1.371921,100,1,01.01.2005
   00:08:41.125,0.00,11.2509,-0.2741,4.0,386282820.8839,178.4562,1.2,114244719.4399,-0.1481,0,2334,4294934892,0,-0.013625,0.003467,0.014059,165.722938
12 12.7427,11.052079,-0.199357,11.053876,-1.033387,100,1,01.01.2005
   00:08:50.880,0.00,11.3312,-0.2109,4.0,385149928.8233,178.8424,1.2,113116539.3012,-0.0912,0,2334,4294934893,0,-0.007556,0.001916,0.007795,165.772134
13 6.9519,11.122375,-0.166987,11.123628,-0.860153,100,1,01.01.2005
   00:09:00.635,0.00,11.3967,-0.1815,4.0,392644917.0799,179.0084,1.2,114660425.9475,-0.0790,0,2333,4294934892,0,-0.014303,-0.001613,0.014394,-173.565586
14 3.7927,11.162924,-0.180364,11.164381,-0.925670,100,1,01.01.2005
   00:09:10.190,0.00,11.4435,-0.1921,4.0,389335998.2497,179.0012,1.2,113228118.8031,-0.0372,0,2333,4294934892,0,-0.009199,0.001728,0.009360,169.360766
15 2.0691,11.218868,-0.208709,11.220809,-1.065772,100,1,01.01.2005
   00:09:19.345,0.00,11.4971,-0.2206,4.1,358699816.0160,178.8330,1.2,103827160.0808,-0.0680,0,2333,4294934893,0,-0.012956,0.002458,0.013187,169.258981
16 1.1288,11.287737,-0.280024,11.291209,-1.421089,100,1,01.01.2005
   00:09:28.600,0.00,11.5678,-0.2977,4.1,377811217.5281,178.4891,1.2,108674935.3958,-0.0368,0,2333,4294934893,0,-0.012899,-0.001408,0.012976,-173.770070
17 0.6158,11.439212,-0.381156,11.445560,-1.908394,100,1,01.01.2005
   00:09:36.655,0.00,11.7205,-0.4019,4.1,350854692.6877,177.9884,1.2,99580357.5077,-0.0477,0,2333,4294934892,0,-0.015500,-0.001704,0.015593,-173.725717
18 0.3360,11.574669,-0.573196,11.588853,-2.835064,100,1,01.01.2005
   00:09:47.410,0.00,11.8607,-0.6005,4.2,651444382.2875,177.0645,1.2,182582712.4233,-0.0372,0,2333,4294934892,0,-0.014148,-0.003148,0.014494,-167.455517
19 0.1833,11.800675,-0.801321,11.827851,-3.884688,100,1,01.01.2005
   00:10:03.165,0.00,12.0953,-0.8322,4.3,1220496155.2550,175.9255,1.2,335075713.1583,-0.1386,0,2332,4294934893,0,-0.011250,-0.000623,0.011267,-176.828994
20 0.1000,12.130521,-1.127346,12.182793,-5.309513,100,1,01.01.2005
   00:10:28.020,0.00,12.4302,-1.1687,4.4,2298978477.8739,174.6187,1.2,612904279.8030,-0.0102,0,2332,4294934894,0,-0.014451,-0.002330,0.014638,-170.839271
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 2 mit einer Temperatur von 40 °C

```
1 10000.0000,8.679673,8.938393,12.459198,45.841323,100,1,01.01.2005
   00:06:23.085,0.00,10.5406,9.7280,4.4,427718431.8049,-165.6219,1.0,99254127.5040,-28.3259,0,2335,4294934890,0,-0.700669,0.556917,0.895038,141.521036
2 5455.5948,7.941696,4.847997,9.304494,31.401915,100,1,01.01.2005
   00:06:33.140,0.00,8.5125,5.3036,3.3,324757008.9306,-166.1171,1.1,107777471.0584,-18.0415,0,2334,4294934889,0,-0.230503,0.231283,0.326532,134.903305
3 2976.3514,7.777988,2.450563,8.154897,17.487756,100,1,01.01.2005
   00:06:43.195,0.00,8.0642,2.6690,2.9,286355981.8228,-172.2884,1.1,112208292.1121,-10.6011,0,2334,4294934891,0,-0.078635,0.112321,0.137111,124.995728
4 1623.7767,7.882043,1.049255,7.951575,7.582612,100,1,01.01.2005
   00:06:53.250,0.00,8.1015,1.1593,2.9,280005739.9911,-177.8482,1.2,113880126.3921,-5.9916,0,2333,4294934890,0,-0.029494,0.059018,0.065977,116.553291
5 885.8668,8.115346,0.255329,8.119362,1.802073,100,1,01.01.2005
   00:07:03.305,0.00,8.3218,0.3109,2.9,286328607.6211,178.7736,1.2,114444350.1494,-3.3659,0,2333,4294934892,0,-0.014486,0.034892,0.037779,112.547080
6 483.2930,8.405051,-0.150303,8.406395,-1.024480,100,1,01.01.2005
   00:07:13.360,0.00,8.6104,-0.1274,3.0,296582774.1114,177.2343,1.2,114636282.6752,-1.9177,0,2332,4294934891,0,-0.013681,0.020116,0.024327,124.219181
7 263.6651,8.682561,-0.303755,8.687873,-2.003648,100,1,01.01.2005
   00:07:23.415,0.00,8.8949,-0.2976,3.1,306732858.7841,176.9635,1.2,114716016.8656,-1.1205,0,2332,4294934892,0,-0.011820,0.012862,0.017468,132.583535
8 143.8450,8.908316,-0.310233,8.913717,-1.994524,100,1,01.01.2005
   00:07:33.470,0.00,9.1256,-0.3137,3.2,315052764.2224,177.3587,1.2,114845722.7630,-0.6723,0,2332,4294934893,0,-0.012713,0.006916,0.014473,151.455400
9 78.4760,9.071780,-0.256192,9.075397,-1.617632,100,1,01.01.2005
   00:07:43.525,0.00,9.2864,-0.2657,3.3,320652230.2185,177.9760,1.2,114883918.7546,-0.3850,0,2332,4294934893,0,-0.020011,0.001685,0.020082,175.185964
10 42.8133,9.171471,-0.199947,9.173651,-1.248904,100,1,01.01.2005
   00:07:53.480,0.00,9.3956,-0.2074,3.3,323673893.4964,178.4973,1.2,114637330.4570,-0.2384,0,2332,4294934892,0,-0.013418,0.003620,0.013898,164.899948
11 23.3572,9.246230,-0.158370,9.247587,-0.981272,100,1,01.01.2005
   00:08:03.335,0.00,9.4715,-0.1629,3.3,325004088.2070,178.8652,1.2,114197121.5767,-0.1497,0,2332,4294934892,0,-0.014480,0.006190,0.015748,156.852881
12 12.7427,9.297947,-0.123614,9.298769,-0.761689,100,1,01.01.2005
   00:08:13.090,0.00,9.5216,-0.1371,3.4,323737386.3435,179.0662,1.2,113157812.3981,-0.1086,0,2331,4294934893,0,-0.017541,-0.003335,0.017856,-169.236870
13 6.9519,9.343374,-0.139227,9.344411,-0.853708,100,1,01.01.2005
   00:08:22.845,0.00,9.5737,-0.1396,3.4,329938315.4620,179.0962,1.2,114698106.3361,-0.0682,0,2331,4294934891,0,-0.012175,0.010449,0.016044,139.361481
14 3.7927,9.388244,-0.143950,9.389347,-0.878447,100,1,01.01.2005
   00:08:32.400,0.00,9.6240,-0.1654,3.4,327319984.5681,178.9979,1.2,113187804.4271,-0.0177,0,2331,4294934893,0,-0.007891,-0.010292,0.012968,-127.478152
15 2.0691,9.444539,-0.207676,9.446822,-1.259675,100,1,01.01.2005
   00:08:41.555,0.00,9.6743,-0.2184,3.4,301954552.8337,178.6715,1.2,103863147.4248,-0.0350,0,2331,4294934893,0,-0.015395,0.002114,0.015539,172.182251
16 1.1288,9.522163,-0.288646,9.526537,-1.736277,100,1,01.01.2005
   00:08:50.810,0.00,9.7623,-0.2986,3.4,318793028.0333,178.1836,1.2,108643113.3794,-0.0643,0,2331,4294934892,0,-0.006950,0.005099,0.008620,143.735720
17 0.6158,9.610725,-0.392691,9.618745,-2.339788,100,1,01.01.2005
   00:08:58.865,0.00,9.8368,-0.4110,3.5,295477000.6484,177.6012,1.2,99894347.5760,-0.0062,0,2331,4294934895,0,-0.023264,-0.000457,0.023269,-178.873860
18 0.3360,9.819417,-0.559558,9.835347,-3.261462,100,1,01.01.2005
   00:09:09.620,0.00,10.0582,-0.5705,3.6,552532872.5619,176.6962,1.2,182553726.0783,-0.0572,0,2330,4294934894,0,-0.015860,0.011407,0.019536,144.274819
19 0.1833,10.018193,-0.716544,10.043786,-4.091072,100,1,01.01.2005
   00:09:25.375,0.00,10.2616,-0.7481,3.6,1033733802.0393,175.6912,1.2,334419294.9465,-0.1391,0,2330,4294934893,0,-0.016239,-0.004947,0.016975,-163.056875
20 0.1000,10.287928,-1.051532,10.341527,-5.835950,100,1,01.01.2005
   00:09:50.230,0.00,10.5379,-1.0806,3.7,1950942887.8881,174.0331,1.2,613010962.9972,-0.1121,0,2330,4294934894,0,-0.016420,0.006508,0.017662,158.377832
```

Grafische Darstellung der Temperaturveränderung von Zelle 2

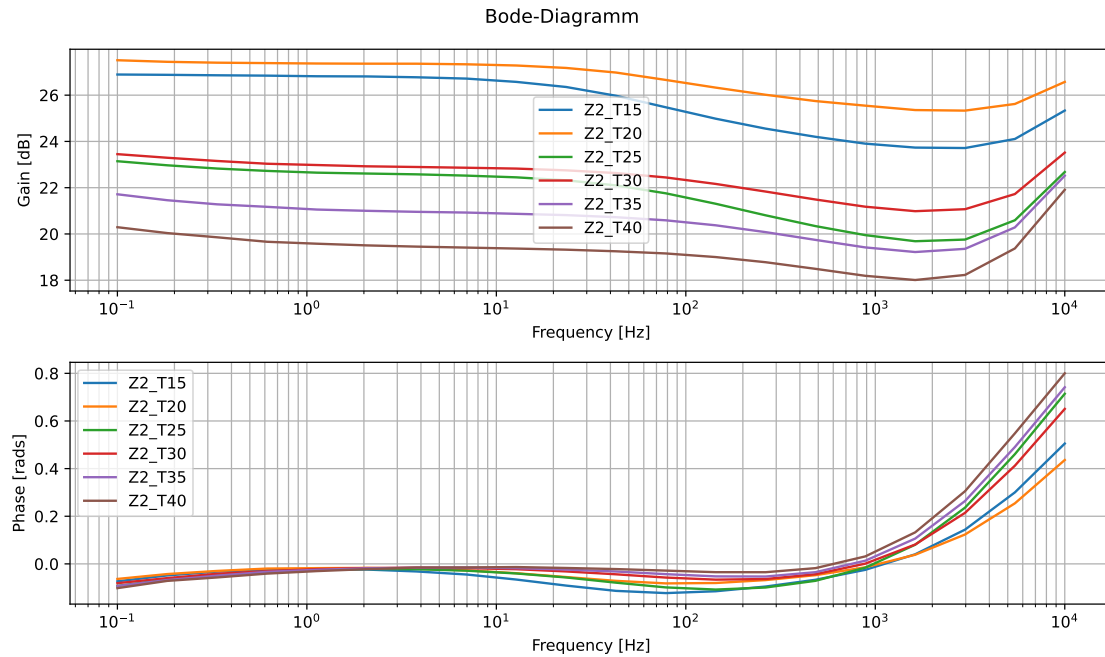


Abbildung I.13.: Bodeplot der Messung

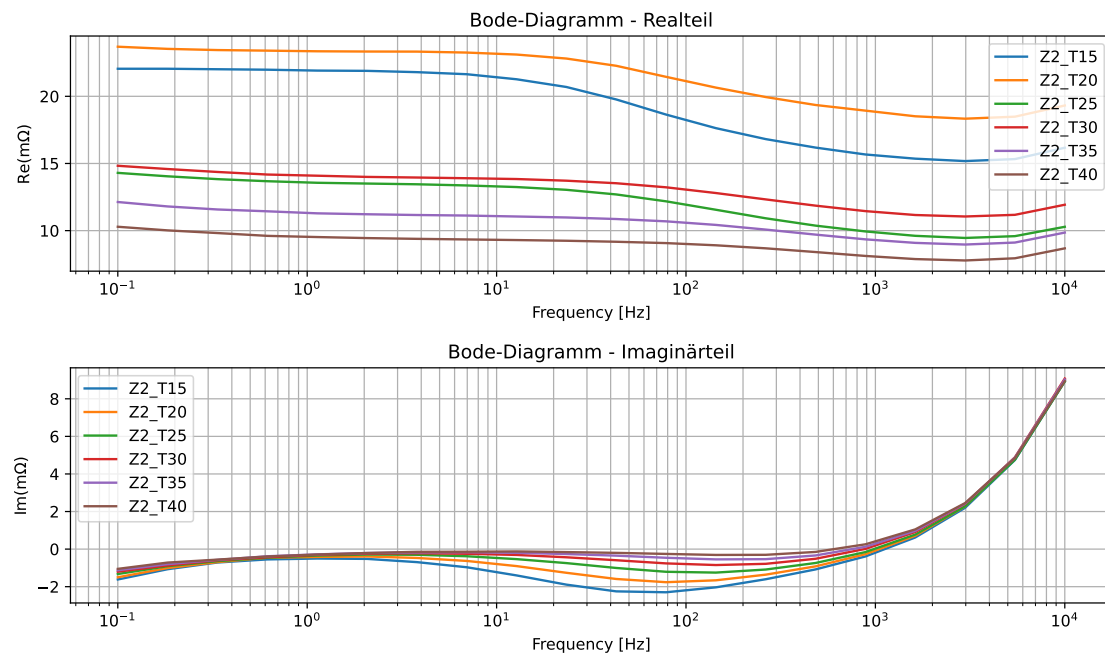


Abbildung I.14.: Real- und Imaginärteil der Messung

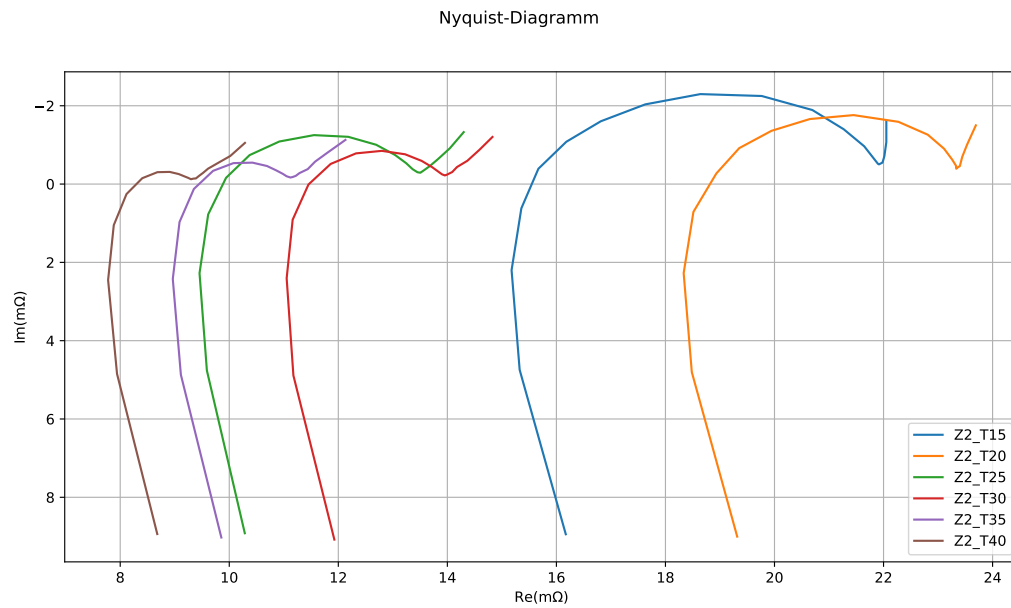


Abbildung I.15.: Nyquistplot der Messung

Temperaturveränderung der Zelle 3

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 3 mit einer Temperatur von 15 °C

```
1 10000.0000,14.376454,8.965991,16.943182,31.950060,100,1,01.01.2005
   00:19:08.080,0.00,17.1226,9.0384,5.9,577152912.5057,179.4139,1.0,99219140.9303,-28.4141,0,2361,4294934903,0,-0.711493,0.601616,0.931753,139.783207
2 5455.5948,13.592162,4.769764,14.404774,19.337000,100,1,01.01.2005
   00:19:18.135,0.00,14.6435,5.1035,5.1,501950106.3767,-178.8835,1.1,107738780.7299,-18.0978,0,2360,4294934902,0,-0.234415,0.253442,0.345229,132.766447
3 2976.3514,13.437397,2.228818,13.620986,9.417727,100,1,01.01.2005
   00:19:28.190,0.00,13.9870,2.4427,4.9,478624075.7446,179.2730,1.1,112200787.1189,-10.6334,0,2358,4294934902,0,-0.078598,0.124015,0.146824,122.365579
4 1623.7767,13.595816,0.656690,13.611666,2.765290,100,1,01.01.2005
   00:19:38.245,0.00,13.9975,0.7748,4.9,479563922.0647,177.1462,1.2,113862508.3831,-6.0220,0,2358,4294934903,0,-0.030342,0.066921,0.073478,114.389668
5 885.8668,13.912188,-0.357763,13.916787,-1.473082,100,1,01.01.2005
   00:19:48.300,0.00,14.2774,-0.3066,5.0,490878505.4573,175.3961,1.2,114412455.7532,-3.3738,0,2357,4294934903,0,-0.014850,0.037437,0.040275,111.636912
6 483.2930,14.378067,-1.053873,14.416639,-4.192128,100,1,01.01.2005
   00:19:58.355,0.00,14.7396,-1.0485,5.2,508762015.3848,174.0074,1.2,114599062.3849,-1.9239,0,2357,4294934901,0,-0.013814,0.021469,0.025529,122.757771
7 263.6651,14.999756,-1.578466,15.082581,-6.007284,100,1,01.01.2005
   00:20:08.410,0.00,15.3707,-1.6012,5.5,532567858.2443,172.9300,1.2,114706154.3590,-1.1226,0,2356,4294934901,0,-0.016507,0.015939,0.022946,136.003152
8 143.8450,15.770291,-1.987591,15.895050,-7.183333,100,1,01.01.2005
   00:20:18.465,0.00,16.1610,-2.0337,5.8,561913997.6026,172.1524,1.2,114825857.8993,-0.6753,0,2356,4294934902,0,-0.016075,0.009501,0.018673,149.413884
9 78.4760,16.761629,-2.235619,16.910062,-7.597114,100,1,01.01.2005
   00:20:28.520,0.00,17.1806,-2.2961,6.1,598219556.6182,171.9889,1.2,114875384.7376,-0.3990,0,2355,4294934902,0,-0.013606,0.005883,0.014824,156.618090
10 42.8133,17.835602,-2.173310,17.967526,-6.947377,100,1,01.01.2005
   00:20:38.475,0.00,18.2809,-2.2421,6.5,634162111.6440,172.7749,1.2,114606229.1484,-0.2328,0,2355,4294934902,0,-0.015472,-0.001106,0.015511,-175.912895
11 23.3572,18.745053,-1.821171,18.833313,-5.549141,100,1,01.01.2005
   00:20:48.330,0.00,19.2156,-1.8720,6.8,662630185.6901,174.2805,1.2,114238796.3121,-0.1552,0,2354,4294934901,0,-0.014357,0.009745,0.017352,145.831082
12 12.7427,19.330521,-1.342512,19.377084,-3.972835,100,1,01.01.2005
   00:20:58.085,0.00,19.8174,-1.3894,7.0,674990787.4660,175.8812,1.2,113092978.4632,-0.1084,0,2354,4294934904,0,-0.013866,0.002503,0.014090,169.766476
13 6.9519,19.657036,-0.942773,19.679631,-2.745865,100,1,01.01.2005
   00:21:07.840,0.00,20.1469,-0.9807,7.1,695026230.8341,177.1251,1.2,114690332.9196,-0.0882,0,2353,4294934902,0,-0.019737,0.001804,0.019819,174.778201
14 3.7927,19.803547,-0.667404,19.814790,-1.930208,100,1,01.01.2005
   00:21:17.395,0.00,20.3022,-0.6984,7.2,690751397.8874,177.9712,1.2,113180427.1174,-0.0586,0,2353,4294934902,0,-0.015133,0.001898,0.015252,172.851510
15 2.0691,19.886713,-0.511503,19.893290,-1.473370,100,1,01.01.2005
   00:21:26.550,0.00,20.3864,-0.5409,7.2,635865890.2851,178.3987,1.2,103781548.0238,-0.0815,0,2352,4294934904,0,-0.016360,-0.000343,0.016364,-178.800020
16 1.1288,19.906004,-0.487919,19.911983,-1.404105,100,1,01.01.2005
   00:21:35.805,0.00,20.4007,-0.5125,7.2,667027874.3030,178.5061,1.2,108795179.7330,-0.0548,0,2352,4294934904,0,-0.021888,0.003932,0.022238,169.816676
17 0.6158,20.032368,-0.563330,20.040288,-1.610789,100,1,01.01.2005
   00:21:43.860,0.00,20.5399,-0.5987,7.2,613805691.1736,178.3274,1.2,99425485.1473,-0.0031,0,2352,4294934904,0,-0.012373,-0.004699,0.013235,-159.203881
18 0.3360,20.059507,-0.708926,20.072031,-2.024055,100,1,01.01.2005
   00:21:54.615,0.00,20.5549,-0.7399,7.3,1126086413.7922,177.8394,1.2,182231825.0474,-0.0990,0,2352,4294934902,0,-0.025087,0.003449,0.025323,172.171704
19 0.1833,20.079057,-1.049604,20.106472,-2.992331,100,1,01.01.2005
   00:22:10.370,0.00,20.5842,-1.0996,7.3,2074398680.5735,176.8740,1.2,334955912.1031,-0.0682,0,2351,4294934903,0,-0.015536,-0.006695,0.016917,-156.688316
20 0.1000,20.104922,-1.608558,20.169169,-4.574385,100,1,01.01.2005
   00:22:35.225,0.00,20.6128,-1.6605,7.3,3816683035.4751,175.3939,1.2,614318244.0126,-0.0004,0,2350,4294934903,0,-0.013063,0.005903,0.014335,155.681216
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 3 mit einer Temperatur von 20 °C

```
1 10000.0000,16.444423,8.923761,18.709692,28.486993,100,1,01.01.2005
   00:09:55.155,0.00,19.5161,8.7268,6.5,637549309.2302,175.7230,1.0,99262868.7552,-28.3692,0,2352,4294934894,0,-0.704155,0.616990,0.936222,138.774716
2 5455.5948,15.593010,4.760475,16.303499,16.977191,100,1,01.01.2005
   00:10:05.210,0.00,16.8170,5.0486,5.8,568575354.6168,178.6571,1.1,107783109.7690,-18.0530,0,2351,4294934894,0,-0.233750,0.257201,0.347551,132.265226
3 2976.3514,15.286843,2.242687,15.450476,8.346156,100,1,01.01.2005
   00:10:15.265,0.00,15.9209,2.4634,5.6,543004880.8586,178.1878,1.1,112188183.7628,-10.6076,0,2350,4294934895,0,-0.080243,0.132087,0.154551,121.278777
4 1623.7767,15.387133,0.702172,15.403146,2.612807,100,1,01.01.2005
   00:10:25.320,0.00,15.8439,0.8263,5.6,542806052.5507,176.9908,1.2,113878422.2277,-5.9948,0,2349,4294934895,0,-0.032260,0.067533,0.074842,115.533668
5 885.8668,15.633282,-0.275342,15.635707,-1.009020,100,1,01.01.2005
   00:10:35.375,0.00,16.0413,-0.2168,5.6,551493765.3437,175.8645,1.2,114421774.7357,-3.3611,0,2349,4294934893,0,-0.018804,0.039604,0.043842,115.397865
6 483.2930,16.050870,-0.920610,16.077250,-3.282648,100,1,01.01.2005
   00:10:45.430,0.00,16.4532,-0.9047,5.8,567476952.9861,174.9358,1.2,114628125.6882,-1.9167,0,2348,4294934896,0,-0.016517,0.027139,0.031770,121.325694
7 263.6651,16.587457,-1.359545,16.643079,-4.685615,100,1,01.01.2005
   00:10:55.485,0.00,17.0055,-1.3793,6.0,587995928.0907,174.2423,1.2,114712464.0395,-1.1207,0,2348,4294934896,0,-0.010375,0.013111,0.016719,128.355633
8 143.8450,17.279935,-1.655948,17.359099,-5.473978,100,1,01.01.2005
   00:11:05.540,0.00,17.7072,-1.6984,6.3,613760696.1061,173.8592,1.2,114844034.2710,-0.6621,0,2347,4294934895,0,-0.018518,0.005019,0.019186,164.834841
9 78.4760,18.105609,-1.745157,18.189520,-5.505598,100,1,01.01.2005
   00:11:15.595,0.00,18.5597,-1.7965,6.6,643544418.0919,174.0782,1.2,114876673.5949,-0.3929,0,2347,4294934896,0,-0.013538,0.002925,0.013850,167.809392
10 42.8133,18.904134,-1.574981,18.969630,-4.762549,100,1,01.01.2005
   00:11:25.550,0.00,19.3831,-1.6225,6.9,669856543.1125,174.9734,1.2,114628245.9551,-0.2418,0,2346,4294934896,0,-0.009945,0.005403,0.011318,151.486608
11 23.3572,19.501975,-1.242074,19.541489,-3.644226,100,1,01.01.2005
   00:11:35.405,0.00,19.9961,-1.2832,7.1,687708854.2919,176.1741,1.2,114239086.7536,-0.1542,0,2346,4294934897,0,-0.010833,0.005009,0.011935,155.186384
12 12.7427,19.887676,-0.899727,19.908018,-2.590320,100,1,01.01.2005
   00:11:45.160,0.00,20.3857,-0.9349,7.2,693544683.7845,177.2805,1.2,113120410.4815,-0.0938,0,2345,4294934897,0,-0.017477,0.003130,0.017755,169.847100
13 6.9519,20.064541,-0.617419,20.074038,-1.762530,100,1,01.01.2005
   00:11:54.915,0.00,20.5746,-0.6495,7.3,709321265.5257,178.0874,1.2,114694582.4852,-0.1044,0,2345,4294934896,0,-0.010367,-0.000533,0.010381,-177.055390
14 3.7927,20.178903,-0.468869,20.184350,-1.331062,100,1,01.01.2005
   00:12:04.470,0.00,20.6754,-0.4905,7.3,703579583.9182,178.5683,1.2,113236176.1633,-0.0727,0,2344,4294934898,0,-0.027126,0.006425,0.027877,166.674398
15 2.0691,20.240007,-0.380785,20.243589,-1.077806,100,1,01.01.2005
   00:12:13.625,0.00,20.7395,-0.4107,7.3,646692276.4078,178.7952,1.2,103767799.2599,-0.0704,0,2344,4294934896,0,-0.025851,-0.003951,0.026151,-171.309554
16 1.1288,20.246545,-0.400791,20.250512,-1.134052,100,1,01.01.2005
   00:12:22.880,0.00,20.7589,-0.4267,7.3,678155018.0042,178.7593,1.2,108712932.9197,-0.0631,0,2343,4294934896,0,-0.013170,0.000589,0.013183,177.438282
17 0.6158,20.339261,-0.448566,20.344207,-1.263407,100,1,01.01.2005
   00:12:30.935,0.00,20.8571,-0.4721,7.4,623891021.2247,178.5382,1.2,99538638.8211,-0.1652,0,2343,4294934896,0,-0.010061,0.004372,0.010970,156.510580
18 0.3360,20.375140,-0.645525,20.385363,-1.814637,100,1,01.01.2005
   00:12:41.690,0.00,20.8924,-0.6825,7.4,1147758327.3842,177.9957,1.2,182759572.7703,-0.1333,0,2343,4294934897,0,-0.011494,-0.003888,0.012134,-161.310620
19 0.1833,20.485391,-0.959114,20.507831,-2.680598,100,1,01.01.2005
   00:12:57.445,0.00,20.9968,-1.0018,7.4,2113800898.9603,177.1270,1.2,334707349.8687,-0.1412,0,2343,4294934896,0,-0.019890,-0.001432,0.019941,-175.882123
20 0.1000,20.621890,-1.492702,20.675844,-4.140096,100,1,01.01.2005
   00:13:22.300,0.00,21.1496,-1.5432,7.5,3913524568.4232,175.8046,1.2,614272207.9959,-0.0222,0,2342,4294934896,0,-0.006705,0.004776,0.008232,144.535259
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 3 mit einer Temperatur von 25 °C

```
1 10000.0000,12.916662,8.935031,15.705889,34.673336,100,1,01.01.2005
   00:11:51.850,0.00,15.4291,9.1875,5.5,535339924.1058,-177.6972,1.0,99228188.7905,-28.4694,0,2345,4294934896,0,-0.712354,0.590145,0.925050,140.360179
2 5455.5948,12.047635,4.790340,12.965064,21.683593,100,1,01.01.2005
   00:12:01.905,0.00,12.9701,5.1568,4.6,451911831.9968,-176.4546,1.1,107767868.0531,-18.1371,0,2343,4294934896,0,-0.230833,0.246910,0.338006,133.072558
3 2976.3514,11.848191,2.307131,12.070729,11.018992,100,1,01.01.2005
   00:12:11.960,0.00,12.3242,2.5244,4.3,424019929.6940,-179.0642,1.1,112189086.4665,-10.6399,0,2343,4294934896,0,-0.078186,0.122064,0.144958,122.640908
4 1623.7767,11.958532,0.804014,11.985530,3.846406,100,1,01.01.2005
   00:12:22.015,0.00,12.3108,0.9193,4.3,422351004.4529,178.2569,1.2,113875322.9852,-6.0139,0,2342,4294934896,0,-0.027254,0.063073,0.068709,113.368975
5 885.8668,12.230694,-0.131711,12.231404,-0.616990,100,1,01.01.2005
   00:12:32.070,0.00,12.5463,-0.0766,4.4,431327326.1075,176.2798,1.2,114428209.1621,-3.3706,0,2342,4294934898,0,-0.018251,0.038075,0.042223,115.610812
6 483.2930,12.622255,-0.711102,12.642269,-3.224472,100,1,01.01.2005
   00:12:42.125,0.00,12.9348,-0.6993,4.6,446080004.4073,174.9835,1.2,114621510.1687,-1.9218,0,2341,4294934897,0,-0.016761,0.020295,0.026321,129.553001
7 263.6651,13.133503,-1.066023,13.176695,-4.640425,100,1,01.01.2005
   00:12:52.180,0.00,13.4610,-1.0776,4.8,465305676.1350,174.2995,1.2,114689048.5829,-1.1237,0,2341,4294934897,0,-0.011663,0.014198,0.018374,129.403288
8 143.8450,13.723430,-1.213197,13.776951,-5.052004,100,1,01.01.2005
   00:13:02.235,0.00,14.0661,-1.2498,5.0,487211423.6672,174.2543,1.2,114837610.7896,-0.6682,0,2340,4294934898,0,-0.011397,-0.001567,0.011505,-172.171171
9 78.4760,14.325131,-1.177658,14.373457,-4.699675,100,1,01.01.2005
   00:13:12.290,0.00,14.6824,-1.2102,5.2,508370242.5055,174.8960,1.2,114857993.9111,-0.3919,0,2340,4294934896,0,-0.012789,0.005152,0.013788,158.059205
10 42.8133,14.802371,-0.969965,14.834116,-3.749101,100,1,01.01.2005
   00:13:22.245,0.00,15.1720,-1.0071,5.4,523669295.0233,175.9615,1.2,114632354.2807,-0.2408,0,2340,4294934897,0,-0.013313,-0.002581,0.013561,-169.027437
11 23.3572,15.128534,-0.723520,15.145825,-2.738076,100,1,01.01.2005
   00:13:32.100,0.00,15.5081,-0.7514,5.5,532840709.0173,177.0582,1.2,114229570.9050,-0.1678,0,2339,4294934898,0,-0.012366,0.001622,0.012472,172.526737
12 12.7427,15.312994,-0.516819,15.321713,-1.933021,100,1,01.01.2005
   00:13:41.855,0.00,15.6988,-0.5375,5.5,533765978.7781,177.9302,1.2,113104112.6249,-0.1090,0,2339,4294934898,0,-0.011247,0.004280,0.012034,159.166273
13 6.9519,15.419894,-0.366923,15.424259,-1.363122,100,1,01.01.2005
   00:13:51.610,0.00,15.8040,-0.3899,5.6,544710960.6845,178.4914,1.2,114687114.1113,-0.0951,0,2339,4294934898,0,-0.015935,-0.001565,0.016012,-174.390729
14 3.7927,15.466382,-0.302475,15.469340,-1.120387,100,1,01.01.2005
   00:14:01.165,0.00,15.8589,-0.3269,5.6,539632453.4481,178.7700,1.2,113235279.3102,-0.0489,0,2339,4294934897,0,-0.008900,-0.004461,0.009956,-153.377323
15 2.0691,15.524000,-0.284614,15.526609,-1.050333,100,1,01.01.2005
   00:14:10.320,0.00,15.9124,-0.3104,5.6,495936164.2010,178.8398,1.2,103718178.9442,-0.0428,0,2339,4294934898,0,-0.014507,-0.006055,0.015720,-157.345256
16 1.1288,15.569788,-0.332909,15.573347,-1.224895,100,1,01.01.2005
   00:14:19.575,0.00,15.9557,-0.3454,5.6,521031380.2776,178.6600,1.2,108666525.0781,-0.0999,0,2338,4294934898,0,-0.018246,0.008555,0.020152,154.878458
17 0.6158,15.691032,-0.416515,15.696559,-1.520546,100,1,01.01.2005
   00:14:27.630,0.00,16.0882,-0.4440,5.7,481280690.9532,178.3490,1.2,99534863.7274,-0.0702,0,2338,4294934897,0,-0.010086,-0.004124,0.010897,-157.759897
18 0.3360,15.773152,-0.625019,15.785531,-2.269188,100,1,01.01.2005
   00:14:38.385,0.00,16.1727,-0.6619,5.7,888918433.3366,177.5967,1.2,182795263.6685,-0.0595,0,2338,4294934899,0,-0.009658,-0.008067,0.012584,-140.130441
19 0.1833,15.978787,-0.935228,16.006133,-3.349663,100,1,01.01.2005
   00:14:54.140,0.00,16.3801,-0.9700,5.8,1650129221.7131,176.6323,1.2,334726574.9487,0.0212,0,2338,4294934898,0,-0.012986,0.002333,0.013193,169.814215
20 0.1000,16.250029,-1.349791,16.305992,-4.748310,100,1,01.01.2005
   00:15:18.995,0.00,16.6603,-1.4039,5.9,3084969205.6636,175.1852,1.2,614157813.3417,0.0019,0,2337,4294934898,0,-0.010726,-0.006045,0.012312,-150.593419
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 3 mit einer Temperatur von 30 °C

```
1 10000.0000,9.567853,9.018231,13.148091,43.306159,100,1,01.01.2005
   00:09:52.855,0.00,11.5625,9.7081,4.6,450244149.2202,-168.3294,1.0,99262884.0817,-28.3468,0,2341,4294934893,0,-0.716816,0.564163,0.912198,141.795840
2 5455.5948,8.800074,4.850946,10.048531,28.865277,100,1,01.01.2005
   00:10:02.910,0.00,9.4429,5.2875,3.6,350472473.3910,-168.8043,1.1,107789299.7872,-18.0508,0,2340,4294934892,0,-0.232442,0.232861,0.329019,134.948303
3 2976.3514,8.637758,2.380326,8.959733,15.406725,100,1,01.01.2005
   00:10:12.965,0.00,8.9640,2.5979,3.2,314621034.4567,-174.4417,1.1,112207812.0203,-10.6039,0,2340,4294934892,0,-0.078558,0.115623,0.139786,124.193258
4 1623.7767,8.764235,0.898083,8.810129,5.850757,100,1,01.01.2005
   00:10:23.020,0.00,9.0125,1.0052,3.2,310270882.4785,-179.6332,1.2,113882899.0132,-5.9974,0,2339,4294934892,0,-0.029142,0.058997,0.065802,116.287037
5 885.8668,9.045191,0.008005,9.045195,0.050709,100,1,01.01.2005
   00:10:33.075,0.00,9.2750,0.0599,3.3,318880623.5713,177.0069,1.2,114433468.1131,-3.3629,0,2339,4294934892,0,-0.016874,0.036368,0.040092,114.890337
6 483.2930,9.426861,-0.507543,9.440514,-3.081837,100,1,01.01.2005
   00:10:43.130,0.00,9.6614,-0.4909,3.4,333154294.1764,175.1723,1.2,114628680.7926,-1.9192,0,2338,4294934892,0,-0.011401,0.022430,0.025161,116.945352
7 263.6651,9.887260,-0.768819,9.917106,-4.446287,100,1,01.01.2005
   00:10:53.185,0.00,10.1243,-0.7718,3.6,349981445.0324,174.5207,1.2,114728029.0227,-1.1202,0,2338,4294934893,0,-0.018277,0.015570,0.024010,139.571708
8 143.8450,10.343895,-0.823002,10.376584,-4.549099,100,1,01.01.2005
   00:11:03.240,0.00,10.6006,-0.8406,3.8,366850425.1098,174.8010,1.2,114827836.4937,-0.6649,0,2338,4294934893,0,-0.010240,0.006428,0.012090,147.882783
9 78.4760,10.739813,-0.724464,10.764220,-3.859093,100,1,01.01.2005
   00:11:13.295,0.00,11.0045,-0.7447,3.9,380720076.3718,175.7321,1.2,114892852.3829,-0.3962,0,2337,4294934892,0,-0.012866,0.003901,0.013444,163.130232
10 42.8133,11.024685,-0.564863,11.039146,-2.933055,100,1,01.01.2005
   00:11:23.250,0.00,11.2934,-0.5855,4.0,389440341.8339,176.7814,1.2,114626009.1556,-0.2506,0,2337,4294934894,0,-0.016656,0.000987,0.016686,176.609255
11 23.3572,11.201183,-0.415210,11.208876,-2.122891,100,1,01.01.2005
   00:11:33.105,0.00,11.4764,-0.4333,4.1,394246509.0530,177.6882,1.2,114261730.2912,-0.1496,0,2337,4294934894,0,-0.015029,0.000649,0.015043,177.527221
12 12.7427,11.302264,-0.300710,11.306264,-1.524061,100,1,01.01.2005
   00:11:42.860,0.00,11.5844,-0.3182,4.1,393749861.5163,178.3424,1.2,113092116.3089,-0.0843,0,2337,4294934893,0,-0.011007,-0.001173,0.011069,-173.916802
13 6.9519,11.368090,-0.235831,11.370536,-1.188431,100,1,01.01.2005
   00:11:52.615,0.00,11.6538,-0.2488,4.1,401682269.3548,178.7097,1.2,114700484.8798,-0.0672,0,2337,4294934894,0,-0.009280,0.001932,0.009479,168.239223
14 3.7927,11.420875,-0.221605,11.423025,-1.111598,100,1,01.01.2005
   00:12:02.170,0.00,11.7048,-0.2303,4.1,398352234.6900,178.8291,1.2,113257481.9809,-0.0437,0,2337,4294934894,0,-0.012460,0.006036,0.013845,154.153513
15 2.0691,11.496593,-0.244470,11.499192,-1.218188,100,1,01.01.2005
   00:12:11.325,0.00,11.7757,-0.2547,4.2,367089732.1922,178.7228,1.2,103736581.2184,-0.0383,0,2335,4294934895,0,-0.019262,0.005272,0.019971,164.692557
16 1.1288,11.536254,-0.319236,11.540670,-1.585107,100,1,01.01.2005
   00:12:20.580,0.00,11.8276,-0.3375,4.2,386484440.5989,178.4061,1.2,108719676.4241,0.0407,0,2335,4294934894,0,-0.008052,-0.000805,0.008092,-174.293462
17 0.6158,11.666268,-0.412758,11.673567,-2.026306,100,1,01.01.2005
   00:12:28.635,0.00,11.9523,-0.4324,4.2,358205146.7555,177.8117,1.2,99688212.4535,-0.1166,0,2335,4294934894,0,-0.016620,0.000423,0.016625,178.541007
18 0.3360,11.802182,-0.609701,11.817920,-2.957271,100,1,01.01.2005
   00:12:39.390,0.00,12.0937,-0.6301,4.3,665179491.2298,176.9776,1.2,182826389.9311,-0.0397,0,2335,4294934895,0,-0.014526,0.004825,0.015307,161.624237
19 0.1833,12.007421,-0.850461,12.037502,-4.051378,100,1,01.01.2005
   00:12:55.145,0.00,12.3122,-0.8824,4.4,1243396839.0832,175.8377,1.2,335282118.5180,-0.0631,0,2335,4294934893,0,-0.006428,-0.000220,0.006431,-178.042081
20 0.1000,12.340920,-1.188818,12.398048,-5.502405,100,1,01.01.2005
   00:13:20.000,0.00,12.6482,-1.2296,4.5,2344982660.4589,174.3478,1.2,614209012.5148,-0.0997,0,2335,4294934893,0,-0.012292,-0.000011,0.012292,-179.948008
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 3 mit einer Temperatur von 35 °C

```
1 10000.0000,9.907356,9.101576,13.453415,42.572711,100,1,01.01.2005
   00:11:18.750,0.00,11.9678,9.7633,4.7,460658274.6584,-169.1356,1.0,99274731.8349,-28.3430,0,2338,4294934894,0,-0.715455,0.568574,0.913867,141.525769
2 5455.5948,9.130628,4.935578,10.379224,28.393523,100,1,01.01.2005
   00:11:28.805,0.00,9.8041,5.3748,3.7,362042376.4194,-169.3214,1.1,107780226.3483,-18.0539,0,2337,4294934896,0,-0.232338,0.236256,0.331358,134.521003
3 2976.3514,8.952195,2.472941,9.287477,15.442205,100,1,01.01.2005
   00:11:38.860,0.00,9.2919,2.6926,3.3,326127189.0444,-174.4456,1.1,112207171.0682,-10.6062,0,2335,4294934894,0,-0.079785,0.113796,0.138979,125.035096
4 1623.7767,9.064071,1.009528,9.120117,6.355236,100,1,01.01.2005
   00:11:48.915,0.00,9.3195,1.1244,3.3,321217667.9255,-179.1138,1.2,113898544.6370,-5.9934,0,2335,4294934895,0,-0.031332,0.062517,0.069929,116.618969
5 885.8668,9.315940,0.156976,9.317263,0.965360,100,1,01.01.2005
   00:11:58.970,0.00,9.5544,0.2127,3.4,328572394.6719,177.9147,1.2,114437098.1741,-3.3608,0,2335,4294934894,0,-0.015332,0.035735,0.038885,113.221581
6 483.2930,9.657109,-0.313290,9.662190,-1.858101,100,1,01.01.2005
   00:12:09.025,0.00,9.8952,-0.2895,3.5,340913946.3518,176.4030,1.2,114625884.2373,-1.9213,0,2335,4294934896,0,-0.013706,0.024314,0.027911,119.409108
7 263.6651,10.028355,-0.507517,10.041190,-2.897166,100,1,01.01.2005
   00:12:19.080,0.00,10.2730,-0.5105,3.6,354482633.6309,176.0321,1.2,114712678.0806,-1.1229,0,2335,4294934893,0,-0.014319,0.008744,0.016778,148.590590
8 143.8450,10.364562,-0.526370,10.377919,-2.907300,100,1,01.01.2005
   00:12:29.135,0.00,10.6147,-0.5363,3.8,366658572.1483,176.4455,1.2,114828796.2770,-0.6622,0,2335,4294934894,0,-0.017431,0.006479,0.018597,159.609252
9 78.4760,10.616299,-0.442077,10.625499,-2.384498,100,1,01.01.2005
   00:12:39.190,0.00,10.8754,-0.4561,3.8,375656943.8263,177.2100,1.2,114871606.6423,-0.3886,0,2335,4294934896,0,-0.015354,0.002805,0.015609,169.647918
10 42.8133,10.782954,-0.339689,10.788304,-1.804359,100,1,01.01.2005
   00:12:49.145,0.00,11.0490,-0.3509,3.9,380628797.5366,177.9393,1.2,114606511.2458,-0.2419,0,2334,4294934893,0,-0.013193,0.004514,0.013944,161.113572
11 23.3572,10.895482,-0.242911,10.898189,-1.277179,100,1,01.01.2005
   00:12:59.000,0.00,11.1619,-0.2557,3.9,383154391.8457,178.5271,1.2,114227268.6403,-0.1608,0,2334,4294934897,0,-0.016022,0.001294,0.016075,175.382648
12 12.7427,10.965764,-0.192640,10.967456,-1.006433,100,1,01.01.2005
   00:13:08.755,0.00,11.2327,-0.2024,4.0,381713303.3218,178.8679,1.2,113092150.1742,-0.1000,0,2334,4294934895,0,-0.017568,0.003526,0.017918,168.649575
13 6.9519,11.013111,-0.164077,11.014333,-0.853547,100,1,01.01.2005
   00:13:18.510,0.00,11.2813,-0.1713,4.0,388845680.9569,179.0427,1.2,114713688.8494,-0.0875,0,2334,4294934895,0,-0.017588,0.005596,0.018457,162.350289
14 3.7927,11.071510,-0.172019,11.072846,-0.890137,100,1,01.01.2005
   00:13:28.065,0.00,11.3339,-0.1910,4.0,385471386.9424,179.0092,1.2,113187808.2500,-0.0255,0,2334,4294934896,0,-0.024984,-0.005765,0.025640,-167.005869
15 2.0691,11.105227,-0.216449,11.107337,-1.116597,100,1,01.01.2005
   00:13:37.220,0.00,11.3798,-0.2330,4.0,355073073.0190,178.8152,1.2,103834406.1896,-0.0118,0,2334,4294934896,0,-0.013688,-0.002134,0.013853,-171.137482
16 1.1288,11.181640,-0.281301,11.185178,-1.441108,100,1,01.01.2005
   00:13:46.475,0.00,11.4540,-0.2965,4.0,374218891.1241,178.4225,1.2,108710805.0853,-0.0946,0,2333,4294934897,0,-0.017861,0.000993,0.017889,176.819451
17 0.6158,11.312091,-0.388434,11.318758,-1.966648,100,1,01.01.2005
   00:13:54.530,0.00,11.5876,-0.4054,4.1,347370015.0912,177.9306,1.2,99719799.4762,-0.0657,0,2333,4294934896,0,-0.017985,0.002140,0.018112,173.214728
18 0.3360,11.487400,-0.546262,11.500381,-2.722544,100,1,01.01.2005
   00:14:05.285,0.00,11.7697,-0.5716,4.2,645961621.2083,177.1067,1.2,182464705.0610,-0.1127,0,2333,4294934896,0,-0.015652,-0.002003,0.015779,-172.707373
19 0.1833,11.668370,-0.774519,11.694047,-3.797587,100,1,01.01.2005
   00:14:21.040,0.00,11.9561,-0.8101,4.2,1205735804.6690,176.0433,1.2,334902241.2738,-0.0805,0,2333,4294934897,0,-0.014767,-0.006134,0.015991,-157.443967
20 0.1000,11.974046,-1.112794,12.025643,-5.309465,100,1,01.01.2005
   00:14:45.895,0.00,12.2716,-1.1506,4.4,2272558797.7020,174.5432,1.2,613706696.4628,-0.1004,0,2333,4294934896,0,-0.012542,0.000688,0.012561,176.860689
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 3 mit einer Temperatur von 40 °C

```
1 10000.0000,9.083618,8.990504,12.780504,44.704828,100,1,01.01.2005
   00:10:28.010,0.00,11.0155,9.7367,4.5,438396462.7972,-166.8655,1.0,99253179.0105,-28.3393,0,2335,4294934894,0,-0.700069,0.559685,0.896294,141.358671
2 5455.5948,8.319206,4.887351,9.648595,30.433301,100,1,01.01.2005
   00:10:38.065,0.00,8.9242,5.3419,3.4,336750458.7016,-167.1497,1.1,107768203.7945,-18.0537,0,2335,4294934894,0,-0.229785,0.235971,0.329368,134.239005
3 2976.3514,8.151442,2.484024,8.521524,16.947779,100,1,01.01.2005
   00:10:48.120,0.00,8.4555,2.7062,3.1,299253796.2188,-172.8604,1.1,112195321.7573,-10.6077,0,2334,4294934894,0,-0.078208,0.114916,0.139004,124.237788
4 1623.7767,8.245896,1.076453,8.315862,7.437563,100,1,01.01.2005
   00:10:58.175,0.00,8.4767,1.1882,3.0,292864359.6364,-178.0172,1.2,113884322.2356,-5.9966,0,2334,4294934896,0,-0.029721,0.059086,0.066140,116.703225
5 885.8668,8.466149,0.285094,8.470948,1.928680,100,1,01.01.2005
   00:11:08.230,0.00,8.6817,0.3407,3.1,298709562.1844,178.8802,1.2,114434409.5646,-3.3668,0,2333,4294934896,0,-0.014840,0.033479,0.036621,113.905948
6 483.2930,8.743011,-0.128122,8.743950,-0.839564,100,1,01.01.2005
   00:11:18.285,0.00,8.9605,-0.1036,3.2,308580767.2448,177.4172,1.2,114618719.9475,-1.9206,0,2333,4294934895,0,-0.010344,0.020955,0.023369,116.272025
7 263.6651,9.021056,-0.284380,9.025537,-1.805595,100,1,01.01.2005
   00:11:28.340,0.00,9.2379,-0.2773,3.3,318483040.1743,177.1602,1.2,114700364.7214,-1.1203,0,2333,4294934896,0,-0.016042,0.013168,0.020754,140.619264
8 143.8450,9.235798,-0.297101,9.240575,-1.842478,100,1,01.01.2005
   00:11:38.395,0.00,9.4569,-0.2971,3.3,326441607.7367,177.5343,1.2,114839692.6970,-0.6663,0,2332,4294934896,0,-0.017357,0.010175,0.020120,149.622011
9 78.4760,9.384842,-0.239122,9.387888,-1.459557,100,1,01.01.2005
   00:11:48.450,0.00,9.6137,-0.2488,3.4,331944626.0886,178.1098,1.2,114888414.8908,-0.4079,0,2332,4294934896,0,-0.013804,0.001287,0.013863,174.674869
10 42.8133,9.486510,-0.190297,9.488419,-1.149182,100,1,01.01.2005
   00:11:58.405,0.00,9.7177,-0.1968,3.4,334719208.1729,178.5888,1.2,114624546.4677,-0.2512,0,2332,4294934897,0,-0.014546,0.004505,0.015228,162.792495
11 23.3572,9.552305,-0.149540,9.553475,-0.896882,100,1,01.01.2005
   00:12:08.260,0.00,9.7876,-0.1569,3.5,336008461.4392,178.9454,1.2,114253310.8587,-0.1362,0,2332,4294934896,0,-0.012430,0.003313,0.012864,165.073574
12 12.7427,9.609514,-0.118248,9.610241,-0.705005,100,1,01.01.2005
   00:12:18.015,0.00,9.8372,-0.1323,3.5,334418391.0470,179.1112,1.2,113143217.2410,-0.1183,0,2332,4294934897,0,-0.021653,-0.003745,0.021975,-170.188498
13 6.9519,9.648847,-0.122721,9.649627,-0.728690,100,1,01.01.2005
   00:12:27.770,0.00,9.8821,-0.1335,3.5,340556138.0791,179.1339,1.2,114695482.4778,-0.0922,0,2332,4294934897,0,-0.017123,-0.000115,0.017124,-179.613825
14 3.7927,9.685774,-0.146206,9.686877,-0.864811,100,1,01.01.2005
   00:12:37.325,0.00,9.9274,-0.1594,3.5,337897825.2111,179.0154,1.2,113277116.6677,-0.0645,0,2331,4294934898,0,-0.009778,-0.001825,0.009947,-169.425691
15 2.0691,9.751606,-0.208706,9.753839,-1.226068,100,1,01.01.2005
   00:12:46.480,0.00,9.9950,-0.2139,3.5,311531670.3285,178.7240,1.2,103721203.8055,-0.0502,0,2331,4294934897,0,-0.009678,0.007991,0.012550,140.454640
16 1.1288,9.827146,-0.266277,9.830753,-1.552108,100,1,01.01.2005
   00:12:55.735,0.00,10.0648,-0.2788,3.6,328686465.4195,178.3083,1.2,108656825.9870,-0.1052,0,2331,4294934896,0,-0.017332,0.002238,0.017476,172.641137
17 0.6158,9.917565,-0.381837,9.924913,-2.204863,100,1,01.01.2005
   00:13:03.790,0.00,10.1644,-0.3939,3.6,305293038.8960,177.7351,1.2,99898388.4943,-0.0455,0,2331,4294934898,0,-0.010468,0.005753,0.011945,151.207372
18 0.3360,10.118313,-0.545684,10.133017,-3.086990,100,1,01.01.2005
   00:13:14.545,0.00,10.3677,-0.5671,3.7,569039378.5901,176.8372,1.2,182413851.8130,-0.0322,0,2331,4294934897,0,-0.012940,0.000889,0.012970,176.069624
19 0.1833,10.331986,-0.758843,10.359815,-4.200605,100,1,01.01.2005
   00:13:30.300,0.00,10.5886,-0.7803,3.7,1065848847.9545,175.7448,1.2,334139976.0430,-0.0406,0,2331,4294934898,0,-0.011113,0.006533,0.012891,149.548185
20 0.1000,10.583532,-1.019655,10.632537,-5.503091,100,1,01.01.2005
   00:13:55.155,0.00,10.8391,-1.0583,3.8,2009657245.2047,174.3455,1.2,614207224.3935,-0.0777,0,2330,4294934898,0,-0.018465,-0.003739,0.018840,-168.552724
```

Grafische Darstellung der Temperaturveränderung von Zelle 3

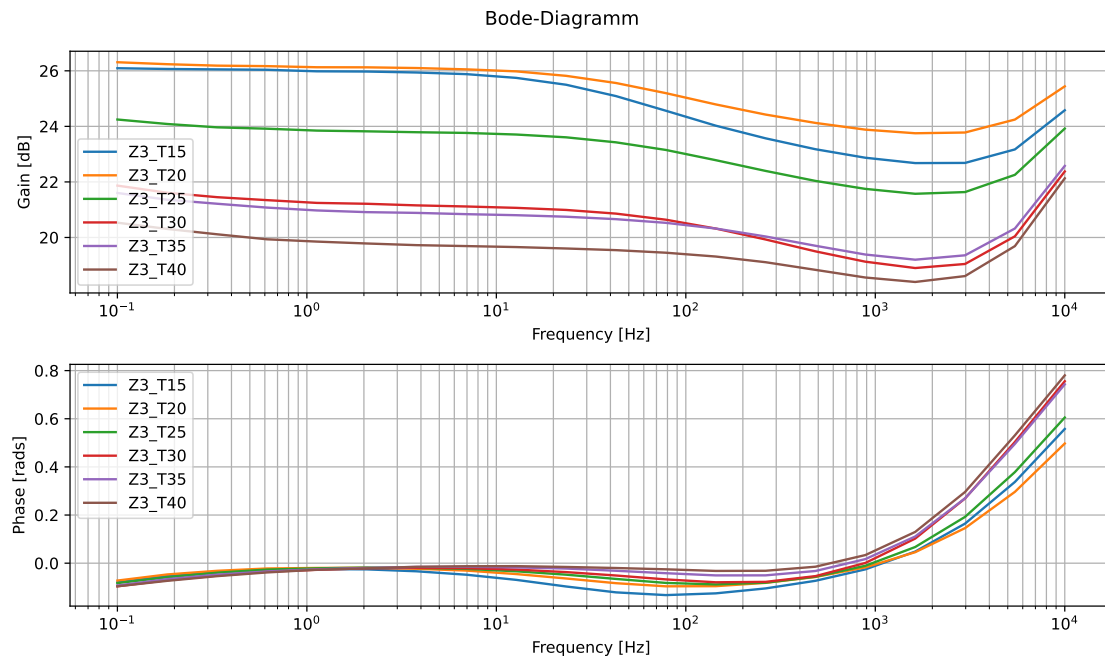


Abbildung I.16.: Bodeplot der Messung

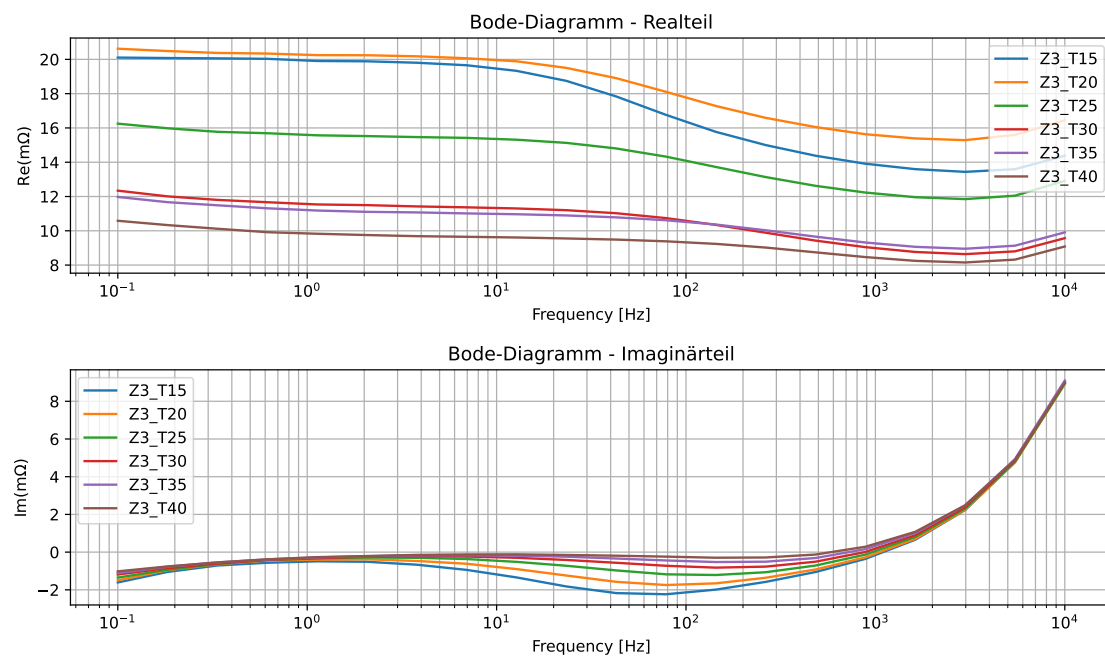


Abbildung I.17.: Real- und Imaginärteil der Messung

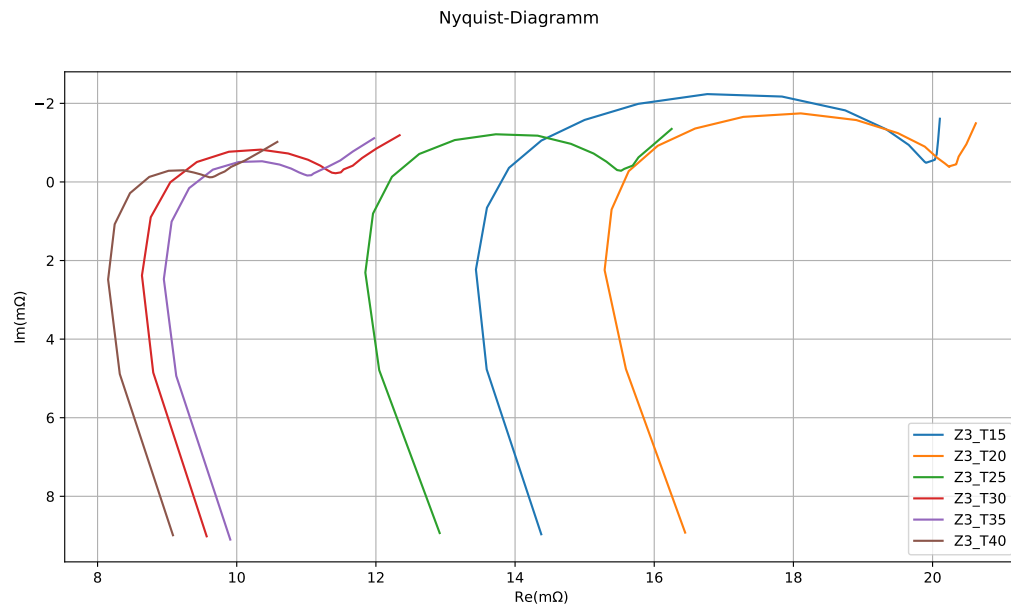


Abbildung I.18.: Nyquistplot der Messung

Temperaturveränderung der Zelle 4

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 4 mit einer Temperatur von 15 °C

```
1 10000.0000,18.348364,8.821132,20.358655,25.676317,100,1,01.01.2005
   00:23:23.325,0.00,21.6956,8.3742,7.1,693247978.7715,172.7385,1.0,99222243.9875,-28.3674,0,2358,4294934903,0,-0.713064,0.639102,0.957555,138.130902
2 5455.5948,17.172823,4.674374,17.797629,15.226785,100,1,01.01.2005
   00:23:33.380,0.00,18.5315,4.9311,6.3,620783739.5587,176.8273,1.1,107751603.1375,-18.0734,0,2356,4294934903,0,-0.232943,0.271598,0.357810,130.618946
3 2976.3514,16.922565,2.162978,17.060237,7.283836,100,1,01.01.2005
   00:23:43.435,0.00,17.6317,2.3783,6.1,599610950.1533,177.0633,1.1,112178480.0365,-10.6187,0,2356,4294934902,0,-0.081315,0.132090,0.155113,121.616580
4 1623.7767,16.912494,0.591132,16.922822,2.001808,100,1,01.01.2005
   00:23:53.490,0.00,17.4194,0.7184,6.1,596359793.0661,176.3584,1.2,113855913.7199,-6.0034,0,2355,4294934903,0,-0.031033,0.070827,0.077328,113.660423
5 885.8668,17.076317,-0.423844,17.081576,-1.421822,100,1,01.01.2005
   00:24:03.545,0.00,17.5251,-0.3647,6.2,602548940.3673,175.4451,1.2,114415634.8588,-3.3626,0,2355,4294934903,0,-0.017656,0.041810,0.045385,112.893884
6 483.2930,17.400486,-1.114660,17.436152,-3.665310,100,1,01.01.2005
   00:24:13.600,0.00,17.8360,-1.1088,6.3,615294471.2456,174.5233,1.2,114602903.1875,-1.9194,0,2354,4294934904,0,-0.018592,0.021089,0.028114,131.399854
7 263.6651,17.858230,-1.645612,17.933890,-5.264862,100,1,01.01.2005
   00:24:23.655,0.00,18.3044,-1.6717,6.5,633359602.1082,173.6600,1.2,114693716.6669,-1.1217,0,2354,4294934904,0,-0.015048,0.013959,0.020525,137.151287
8 143.8450,18.596270,-2.069174,18.711032,-6.349085,100,1,01.01.2005
   00:24:33.710,0.00,19.0616,-2.1242,6.8,661593081.8287,172.9777,1.2,114815576.6628,-0.6636,0,2353,4294934901,0,-0.014397,0.003459,0.014807,166.492503
9 78.4760,19.533946,-2.354860,19.675375,-6.873959,100,1,01.01.2005
   00:24:43.765,0.00,20.0201,-2.4191,7.1,695851947.5219,172.7075,1.2,114855366.4576,-0.4025,0,2353,4294934902,0,-0.018078,0.006521,0.019218,160.166372
10 42.8133,20.574214,-2.320007,20.704606,-6.433658,100,1,01.01.2005
   00:24:53.720,0.00,21.0878,-2.3897,7.5,730579955.6615,173.2878,1.2,114581515.6518,-0.2470,0,2352,4294934902,0,-0.018114,0.003562,0.018461,168.875469
11 23.3572,21.503980,-1.955105,21.592675,-5.194952,100,1,01.01.2005
   00:25:03.575,0.00,22.0468,-2.0200,7.8,760016796.0097,174.6112,1.2,114264575.8569,-0.1536,0,2352,4294934904,0,-0.013641,0.001080,0.013684,175.471403
12 12.7427,22.157552,-1.458791,22.205522,-3.766756,100,1,01.01.2005
   00:25:13.330,0.00,22.7167,-1.5130,8.0,773483984.7700,176.0937,1.2,113082223.7443,-0.0960,0,2352,4294934903,0,-0.014897,0.000353,0.014901,178.641532
13 6.9519,22.516427,-1.019106,22.539478,-2.591470,100,1,01.01.2005
   00:25:23.085,0.00,23.0812,-1.0628,8.2,796168711.7337,177.2829,1.2,114692384.4534,-0.0806,0,2351,4294934904,0,-0.019007,0.000156,0.019008,179.528840
14 3.7927,22.696528,-0.729817,22.708259,-1.841736,100,1,01.01.2005
   00:25:32.640,0.00,23.2736,-0.7689,8.2,791527168.9092,178.0787,1.2,113139325.6007,-0.0291,0,2350,4294934904,0,-0.011729,-0.002273,0.011948,-169.032302
15 2.0691,22.732039,-0.545510,22.738583,-1.374688,100,1,01.01.2005
   00:25:41.795,0.00,23.3097,-0.5781,8.2,727470737.1653,178.5130,1.2,103846889.4832,-0.0663,0,2350,4294934904,0,-0.012262,-0.000408,0.012269,-178.094513
16 1.1288,22.798852,-0.459399,22.803480,-1.154358,100,1,01.01.2005
   00:25:51.050,0.00,23.3723,-0.4912,8.2,762155910.4248,178.6354,1.2,108516312.5233,-0.1606,0,2350,4294934903,0,-0.018331,-0.001694,0.018409,-174.718750
17 0.6158,22.766811,-0.546334,22.773365,-1.374660,100,1,01.01.2005
   00:25:59.105,0.00,23.3341,-0.5825,8.3,699571649.2596,178.4995,1.2,99759335.7462,-0.0706,0,2349,4294934903,0,-0.023558,-0.003758,0.023856,-170.935922
18 0.3360,22.841321,-0.713521,22.852463,-1.789233,100,1,01.01.2005
   00:26:09.860,0.00,23.4190,-0.7472,8.3,1285628187.7132,178.0477,1.2,182631137.9209,-0.1248,0,2349,4294934902,0,-0.015037,0.003087,0.015350,168.399758
19 0.1833,22.856006,-1.057790,22.880471,-2.649792,100,1,01.01.2005
   00:26:25.615,0.00,23.4322,-1.1019,8.3,2361138567.5819,177.2165,1.2,335025336.9482,-0.0910,0,2348,4294934903,0,-0.016644,0.001611,0.016721,174.469950
20 0.1000,22.938094,-1.614523,22.994844,-4.026187,100,1,01.01.2005
   00:26:50.470,0.00,23.5188,-1.6795,8.3,4342553013.8080,175.8588,1.2,613019716.6374,-0.0566,0,2348,4294934903,0,-0.013825,-0.004687,0.014598,-161.270901
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 4 mit einer Temperatur von 20 °C

```
1 10000.0000,15.470649,8.876023,17.836053,29.844319,100,1,01.01.2005
   00:14:31.660,0.00,18.3781,8.8029,6.2,607680692.8620,177.2423,1.0,99259228.7512,-28.3515,0,2352,4294934897,0,-0.709437,0.617317,0.940415,138.971797
2 5455.5948,14.632325,4.737260,15.380071,17.939520,100,1,01.01.2005
   00:14:41.715,0.00,15.7736,5.0469,5.5,536211643.3583,179.6831,1.1,107767752.2946,-18.0595,0,2350,4294934896,0,-0.233167,0.257419,0.347320,132.169917
3 2976.3514,14.428106,2.241044,14.601114,8.828910,100,1,01.01.2005
   00:14:51.770,0.00,15.0220,2.4569,5.2,513064186.6275,178.6755,1.1,112191190.1847,-10.6132,0,2349,4294934897,0,-0.080372,0.126465,0.149844,122.437120
4 1623.7767,14.546547,0.701039,14.563430,2.759109,100,1,01.01.2005
   00:15:01.825,0.00,14.9773,0.8191,5.2,513171643.4045,177.1287,1.2,113875277.2136,-6.0016,0,2349,4294934897,0,-0.031479,0.063315,0.070709,116.435270
5 885.8668,14.844099,-0.277949,14.846701,-1.072711,100,1,01.01.2005
   00:15:11.880,0.00,15.2341,-0.2208,5.4,523760613.0081,175.8055,1.2,114424358.7973,-3.3641,0,2348,4294934898,0,-0.015329,0.039642,0.042503,111.140887
6 483.2930,15.294624,-0.918545,15.322181,-3.436870,100,1,01.01.2005
   00:15:21.935,0.00,15.6802,-0.9067,5.5,540850720.8889,174.7706,1.2,114616850.9658,-1.9200,0,2347,4294934897,0,-0.013518,0.023656,0.027246,119.744908
7 263.6651,15.856743,-1.360577,15.915008,-4.904212,100,1,01.01.2005
   00:15:31.990,0.00,16.2502,-1.3780,5.8,561992396.6191,174.0334,1.2,114700563.3316,-1.1195,0,2347,4294934899,0,-0.016106,0.015525,0.022370,136.051983
8 143.8450,16.548036,-1.639782,16.629082,-5.659092,100,1,01.01.2005
   00:15:42.045,0.00,16.9656,-1.6819,6.0,588202762.3681,173.6693,1.2,114837127.9472,-0.6692,0,2346,4294934898,0,-0.009337,0.004716,0.010461,153.203316
9 78.4760,17.377419,-1.723085,17.462638,-5.662741,100,1,01.01.2005
   00:15:52.100,0.00,17.8111,-1.7715,6.3,617716960.3740,173.9367,1.2,114871004.8786,-0.3833,0,2346,4294934899,0,-0.015105,0.004965,0.015900,161.803025
10 42.8133,18.128086,-1.539245,18.193316,-4.853308,100,1,01.01.2005
   00:16:02.055,0.00,18.5780,-1.5928,6.6,642072411.9463,174.8649,1.2,114615368.5922,-0.2347,0,2345,4294934898,0,-0.018863,-0.002118,0.018981,-173.593389
11 23.3572,18.684365,-1.206105,18.723252,-3.693407,100,1,01.01.2005
   00:16:11.910,0.00,19.1477,-1.2475,6.8,658520419.8303,176.1160,1.2,114230520.1066,-0.1563,0,2345,4294934898,0,-0.020510,0.003183,0.020755,171.179251
12 12.7427,18.994493,-0.868134,19.014321,-2.616853,100,1,01.01.2005
   00:16:21.665,0.00,19.4730,-0.9007,6.9,662534489.8284,177.2460,1.2,113125653.1545,-0.1056,0,2344,4294934898,0,-0.013889,0.004207,0.014512,163.149710
13 6.9519,19.177290,-0.604924,19.186828,-1.806726,100,1,01.01.2005
   00:16:31.420,0.00,19.6505,-0.6414,6.9,677632386.1149,178.0570,1.2,114719699.2343,-0.0734,0,2344,4294934898,0,-0.024240,-0.005935,0.024956,-166.242345
14 3.7927,19.285178,-0.438550,19.290163,-1.302695,100,1,01.01.2005
   00:16:40.975,0.00,19.7649,-0.4652,7.0,672273807.7811,178.5519,1.2,113182401.2950,-0.0997,0,2343,4294934898,0,-0.020696,-0.000130,0.020697,-179.640363
15 2.0691,19.310135,-0.377582,19.313826,-1.120194,100,1,01.01.2005
   00:16:50.130,0.00,19.8022,-0.4000,7.0,617397388.0097,178.7446,1.2,103755434.2232,-0.0981,0,2343,4294934899,0,-0.009121,0.002684,0.009508,163.600637
16 1.1288,19.335252,-0.408928,19.339576,-1.211587,100,1,01.01.2005
   00:16:59.385,0.00,19.8205,-0.4403,7.0,647462297.8226,178.7086,1.2,108703091.8177,-0.0187,0,2343,4294934898,0,-0.016640,-0.005380,0.017488,-162.083849
17 0.6158,19.415516,-0.485704,19.421591,-1.433027,100,1,01.01.2005
   00:17:07.440,0.00,19.9110,-0.5182,7.0,595795460.8037,178.4655,1.2,99564722.1140,-0.0438,0,2343,4294934897,0,-0.008407,-0.004333,0.009458,-152.732302
18 0.3360,19.509362,-0.701821,19.521981,-2.060245,100,1,01.01.2005
   00:17:18.195,0.00,19.9992,-0.7313,7.1,1095206132.4587,177.8954,1.2,182154856.9776,-0.0104,0,2342,4294934898,0,-0.016293,0.004334,0.016859,165.104048
19 0.1833,19.621586,-0.993421,19.646717,-2.898353,100,1,01.01.2005
   00:17:33.950,0.00,20.1073,-1.0398,7.1,2024625255.4582,176.9883,1.2,334703144.0427,-0.0513,0,2342,4294934899,0,-0.023157,-0.004917,0.023673,-168.012785
20 0.1000,19.770226,-1.467813,19.824639,-4.246054,100,1,01.01.2005
   00:17:58.805,0.00,20.2650,-1.5180,7.2,3747608925.1751,175.6572,1.2,613820874.9007,-0.0588,0,2341,4294934899,0,-0.017593,0.003710,0.017980,168.092629
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 4 mit einer Temperatur von 25 °C

```
1 10000.0000,10.794619,8.948339,14.021290,39.657474,100,1,01.01.2005
   00:17:43.620,0.00,12.9763,9.4732,4.9,479162401.5851,-172.2812,1.0,99269802.6357,-28.4121,0,2346,4294934899,0,-0.712606,0.575046,0.915689,141.097792
2 5455.5948,10.037087,4.783062,11.118489,25.479615,100,1,01.01.2005
   00:17:53.675,0.00,10.7881,5.1936,4.0,387654762.8609,-172.3612,1.1,107767103.0155,-18.0682,0,2344,4294934899,0,-0.229089,0.242686,0.333734,133.349189
3 2976.3514,9.868823,2.299025,10.133074,13.113648,100,1,01.01.2005
   00:18:03.730,0.00,10.2506,2.5151,3.6,355768366.7638,-176.8351,1.1,112194311.7153,-10.6207,0,2343,4294934899,0,-0.080207,0.119208,0.143679,123.933802
4 1623.7767,10.011358,0.793692,10.042771,4.532881,100,1,01.01.2005
   00:18:13.785,0.00,10.2988,0.9033,3.6,353699796.4233,179.0075,1.2,113875988.5367,-6.0050,0,2343,4294934899,0,-0.029970,0.062027,0.068888,115.788966
5 885.8668,10.322851,-0.144182,10.323858,-0.800213,100,1,01.01.2005
   00:18:23.840,0.00,10.5918,-0.0927,3.7,364142898.4746,176.1302,1.2,114428079.4043,-3.3685,0,2342,4294934898,0,-0.012820,0.037997,0.040101,108.643732
6 483.2930,10.768798,-0.719271,10.792792,-3.821230,100,1,01.01.2005
   00:18:33.895,0.00,11.0320,-0.7095,3.9,380664571.4403,174.3984,1.2,114614340.7545,-1.9218,0,2342,4294934899,0,-0.017842,0.019960,0.026772,131.794000
7 263.6651,11.297963,-1.071167,11.348628,-5.416058,100,1,01.01.2005
   00:18:43.950,0.00,11.5768,-1.0838,4.1,400637985.1620,173.5289,1.2,114687839.0136,-1.1228,0,2342,4294934900,0,-0.012960,0.013494,0.018710,133.844715
8 143.8450,11.916429,-1.215085,11.978218,-5.822169,100,1,01.01.2005
   00:18:54.005,0.00,12.2064,-1.2449,4.3,423238728.4884,173.5102,1.2,114814915.7557,-0.6663,0,2341,4294934900,0,-0.017422,0.004746,0.018056,164.762347
9 78.4760,12.528230,-1.166709,12.582439,-5.320403,100,1,01.01.2005
   00:19:04.060,0.00,12.8339,-1.1980,4.6,444773148.4056,174.2782,1.2,114853367.2398,-0.3890,0,2341,4294934899,0,-0.017875,0.005262,0.018633,163.598098
10 42.8133,13.011971,-0.960241,13.047355,-4.220590,100,1,01.01.2005
   00:19:14.015,0.00,13.3348,-0.9933,4.7,460418380.5613,175.5047,1.2,114607308.6008,-0.2354,0,2340,4294934899,0,-0.013726,0.000160,0.013727,179.331071
11 23.3572,13.345017,-0.711339,13.363962,-3.051192,100,1,01.01.2005
   00:19:23.870,0.00,13.6760,-0.7387,4.8,469962198.7575,176.7440,1.2,114214491.6429,-0.1643,0,2340,4294934901,0,-0.014723,0.000617,0.014736,177.601584
12 12.7427,13.526242,-0.511883,13.535924,-2.167251,100,1,01.01.2005
   00:19:33.625,0.00,13.8620,-0.5318,4.9,471601669.5384,177.7194,1.2,113156089.5830,-0.0836,0,2340,4294934899,0,-0.014908,0.003550,0.015325,166.604727
13 6.9519,13.644062,-0.374180,13.649192,-1.570908,100,1,01.01.2005
   00:19:43.380,0.00,13.9857,-0.3940,4.9,482031240.9074,178.3075,1.2,114674308.7813,-0.0789,0,2339,4294934899,0,-0.012285,0.000488,0.012294,177.723127
14 3.7927,13.695153,-0.298654,13.698409,-1.249266,100,1,01.01.2005
   00:19:52.935,0.00,14.0350,-0.3191,5.0,477682549.1041,178.6558,1.2,113256277.9330,-0.0417,0,2339,4294934899,0,-0.015529,-0.001954,0.015651,-172.827124
15 2.0691,13.771521,-0.287240,13.774516,-1.194876,100,1,01.01.2005
   00:20:02.090,0.00,14.1089,-0.3033,5.0,439757183.4186,178.6980,1.2,103721494.2347,-0.0704,0,2339,4294934899,0,-0.020080,0.002295,0.020211,173.479926
16 1.1288,13.830573,-0.332844,13.834578,-1.378603,100,1,01.01.2005
   00:20:11.345,0.00,14.1733,-0.3496,5.0,462519237.9144,178.5314,1.2,108586588.0070,-0.0555,0,2339,4294934900,0,-0.016253,0.002890,0.016508,169.916760
17 0.6158,13.940562,-0.477953,13.948753,-1.963622,100,1,01.01.2005
   00:20:19.400,0.00,14.2898,-0.4960,5.0,427087996.9674,177.9771,1.2,99421395.5315,-0.0350,0,2339,4294934899,0,-0.012515,0.005515,0.013676,156.218455
18 0.3360,14.068705,-0.630823,14.082841,-2.567352,100,1,01.01.2005
   00:20:30.155,0.00,14.4268,-0.6555,5.1,790354212.8908,177.3099,1.2,182159199.9262,-0.0884,0,2338,4294934899,0,-0.006775,0.002909,0.007373,156.765077
19 0.1833,14.248472,-0.912742,14.277677,-3.665300,100,1,01.01.2005
   00:20:45.910,0.00,14.6046,-0.9451,5.2,1473246019.0095,176.1922,1.2,335063476.8011,-0.1051,0,2338,4294934900,0,-0.013246,0.002730,0.013525,168.356192
20 0.1000,14.593642,-1.310164,14.652335,-5.130054,100,1,01.01.2005
   00:21:10.765,0.00,14.9561,-1.3579,5.3,2770022117.5840,174.7270,1.2,613947948.3848,-0.0850,0,2338,4294934900,0,-0.015582,-0.002063,0.015718,-172.458957
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 4 mit einer Temperatur von 30 °C

```
1 10000.0000,10.138795,8.897972,13.489591,41.270718,100,1,01.01.2005
   00:14:04.075,0.00,12.2089,9.4967,4.7,461288240.8834,-170.4835,1.0,99266036.7711,-28.3612,0,2341,4294934894,0,-0.714690,0.568657,0.913319,141.491815
2 5455.5948,9.397857,4.778433,10.542919,26.951510,100,1,01.01.2005
   00:14:14.130,0.00,10.0925,5.1980,3.8,367581160.8905,-170.8080,1.1,107773466.1433,-18.0582,0,2340,4294934895,0,-0.230298,0.236660,0.330220,134.219516
3 2976.3514,9.248158,2.336248,9.538683,14.177315,100,1,01.01.2005
   00:14:24.185,0.00,9.6031,2.5528,3.4,334975548.7605,-175.7233,1.1,112207754.1529,-10.6101,0,2339,4294934896,0,-0.078214,0.117359,0.141034,123.681280
4 1623.7767,9.379401,0.868336,9.419510,5.289314,100,1,01.01.2005
   00:14:34.240,0.00,9.6438,0.9803,3.4,331654258.2846,179.8059,1.2,113881070.1138,-5.9984,0,2339,4294934896,0,-0.032662,0.063411,0.071328,117.252156
5 885.8668,9.667769,-0.006112,9.667771,-0.036221,100,1,01.01.2005
   00:14:44.295,0.00,9.9159,0.0445,3.5,340918233.4781,176.8941,1.2,114436405.7091,-3.3632,0,2338,4294934896,0,-0.015615,0.034471,0.037843,114.370070
6 483.2930,10.054725,-0.517875,10.068053,-2.948450,100,1,01.01.2005
   00:14:54.350,0.00,10.3018,-0.4999,3.6,355168906.5309,175.2971,1.2,114619837.2128,-1.9248,0,2338,4294934896,0,-0.015250,0.023510,0.028023,122.969615
7 263.6651,10.508276,-0.767422,10.536261,-4.176912,100,1,01.01.2005
   00:15:04.405,0.00,10.7669,-0.7732,3.8,372056170.1771,174.7666,1.2,114723074.5727,-1.1261,0,2337,4294934896,0,-0.012775,0.012652,0.017980,135.276700
8 143.8450,10.967019,-0.811014,10.996966,-4.229342,100,1,01.01.2005
   00:15:14.460,0.00,11.2381,-0.8290,4.0,388798556.5419,175.1106,1.2,114842069.4769,-0.6706,0,2337,4294934896,0,-0.011904,0.005946,0.013306,153.459293
9 78.4760,11.354470,-0.715772,11.377009,-3.607083,100,1,01.01.2005
   00:15:24.515,0.00,11.6340,-0.7358,4.1,402300688.0222,175.9876,1.2,114868678.2053,-0.3934,0,2337,4294934896,0,-0.013854,0.004196,0.014475,163.150785
10 42.8133,11.632185,-0.553571,11.645350,-2.724626,100,1,01.01.2005
   00:15:34.470,0.00,11.9159,-0.5744,4.2,410769112.6425,177.0051,1.2,114607762.9211,-0.2352,0,2337,4294934896,0,-0.017331,0.000955,0.017357,176.846665
11 23.3572,11.798990,-0.408838,11.806071,-1.984519,100,1,01.01.2005
   00:15:44.325,0.00,12.0882,-0.4233,4.3,415324757.6201,177.8556,1.2,114289825.2611,-0.1388,0,2336,4294934896,0,-0.016535,0.004522,0.017142,164.705452
12 12.7427,11.894918,-0.294744,11.898569,-1.419440,100,1,01.01.2005
   00:15:54.080,0.00,12.1977,-0.3096,4.3,414727313.5787,178.4523,1.2,113134133.3338,-0.0937,0,2335,4294934897,0,-0.005737,0.001731,0.005992,163.209379
13 6.9519,11.964880,-0.231959,11.967129,-1.110634,100,1,01.01.2005
   00:16:03.835,0.00,12.2679,-0.2444,4.3,422765894.5805,178.7967,1.2,114681181.2783,-0.0621,0,2335,4294934896,0,-0.007454,0.002856,0.007983,159.034136
14 3.7927,12.028968,-0.215604,12.030900,-1.026845,100,1,01.01.2005
   00:16:13.390,0.00,12.3187,-0.2321,4.4,419275747.4182,178.8501,1.2,113267588.6688,-0.0705,0,2335,4294934896,0,-0.022453,-0.001454,0.022500,-176.295938
15 2.0691,12.060906,-0.239543,12.063285,-1.137808,100,1,01.01.2005
   00:16:22.545,0.00,12.3582,-0.2544,4.4,385687062.4634,178.7797,1.2,103857550.6703,-0.0411,0,2335,4294934897,0,-0.015799,0.000944,0.015827,176.580879
16 1.1288,12.150270,-0.296166,12.153879,-1.396323,100,1,01.01.2005
   00:16:31.800,0.00,12.4552,-0.3174,4.4,406812141.6529,178.4768,1.2,108680446.2647,-0.0633,0,2335,4294934897,0,-0.010426,-0.003896,0.011131,-159.510855
17 0.6158,12.240429,-0.407808,12.247220,-1.908187,100,1,01.01.2005
   00:16:39.855,0.00,12.5506,-0.4327,4.4,375987785.1142,177.9764,1.2,99654819.3124,-0.0489,0,2335,4294934897,0,-0.007384,-0.004546,0.008672,-148.380944
18 0.3360,12.397232,-0.601835,12.411831,-2.779294,100,1,01.01.2005
   00:16:50.610,0.00,12.7098,-0.6236,4.5,698500158.7393,177.1632,1.2,182706797.5814,-0.0278,0,2335,4294934897,0,-0.008968,0.003775,0.009730,157.172602
19 0.1833,12.599174,-0.837997,12.627012,-3.805254,100,1,01.01.2005
   00:17:06.365,0.00,12.9134,-0.8661,4.6,1303499890.5346,176.0654,1.2,335229823.5357,-0.0975,0,2335,4294934896,0,-0.012307,0.003726,0.012858,163.155723
20 0.1000,12.915219,-1.211068,12.971876,-5.356996,100,1,01.01.2005
   00:17:31.220,0.00,13.2286,-1.2476,4.7,2449997195.8676,174.5898,1.2,613727794.5026,-0.0225,0,2335,4294934897,0,-0.021063,0.005263,0.021711,165.970846
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 4 mit einer Temperatur von 35 °C

```
1 10000.0000,9.444949,8.846511,12.940935,43.126134,100,1,01.01.2005
   00:01:03.970,0.00,11.4050,9.5260,4.5,443075027.9001,-168.4834,1.0,99245017.5936,-28.3537,0,2333,4294934897,0,-0.709129,0.564139,0.906155,141.496447
2 5455.5948,8.707463,4.774969,9.930772,28.739336,100,1,01.01.2005
   00:01:14.025,0.00,9.3469,5.2127,3.5,346483996.2655,-168.9208,1.1,107760915.0808,-18.0690,0,2332,4294934896,0,-0.226055,0.238293,0.328457,133.490293
3 2976.3514,8.560524,2.361026,8.880147,15.419064,100,1,01.01.2005
   00:01:24.080,0.00,8.8821,2.5777,3.2,311741401.5943,-174.4335,1.1,112194033.4025,-10.6172,0,2331,4294934897,0,-0.079628,0.115618,0.140385,124.555770
4 1623.7767,8.682454,0.908718,8.729879,5.974905,100,1,01.01.2005
   00:01:34.135,0.00,8.9295,1.0201,3.1,307493507.1896,-179.4890,1.2,113878811.2860,-6.0061,0,2331,4294934898,0,-0.027774,0.063069,0.068914,113.767293
5 885.8668,8.959260,0.050795,8.959404,0.324839,100,1,01.01.2005
   00:01:44.190,0.00,9.1907,0.1046,3.2,315995583.4698,177.2864,1.2,114433373.1298,-3.3657,0,2331,4294934897,0,-0.012838,0.037278,0.039427,109.002135
6 483.2930,9.328350,-0.430549,9.338281,-2.642603,100,1,01.01.2005
   00:01:54.245,0.00,9.5616,-0.4190,3.4,329576797.8299,175.5734,1.2,114619447.6165,-1.9171,0,2331,4294934898,0,-0.010090,0.015327,0.018350,123.358129
7 263.6651,9.760354,-0.663468,9.782877,-3.888746,100,1,01.01.2005
   00:02:04.300,0.00,9.9942,-0.6659,3.5,345223906.8037,175.0621,1.2,114720496.0549,-1.1258,0,2330,4294934897,0,-0.018238,0.013338,0.022595,143.821615
8 143.8450,10.174348,-0.690073,10.197723,-3.880129,100,1,01.01.2005
   00:02:14.355,0.00,10.4235,-0.7060,3.7,360470015.0858,175.4571,1.2,114844423.1954,-0.6683,0,2330,4294934898,0,-0.013410,0.004670,0.014199,160.799199
9 78.4760,10.509134,-0.596564,10.526053,-3.248977,100,1,01.01.2005
   00:02:24.410,0.00,10.7665,-0.6149,3.8,372146237.5612,176.3461,1.2,114862968.6815,-0.3853,0,2330,4294934898,0,-0.014238,0.002432,0.014444,170.306148
10 42.8133,10.734309,-0.449180,10.743703,-2.396158,100,1,01.01.2005
   00:02:34.365,0.00,10.9973,-0.4707,3.9,378991228.4283,177.3101,1.2,114602733.2654,-0.2390,0,2330,4294934899,0,-0.014914,-0.003030,0.015219,-168.516096
11 23.3572,10.873642,-0.336182,10.878838,-1.770856,100,1,01.01.2005
   00:02:44.220,0.00,11.1456,-0.3486,3.9,382768200.9207,178.0683,1.2,114253189.0623,-0.1402,0,2330,4294934899,0,-0.009856,0.004036,0.010651,157.733182
12 12.7427,10.972011,-0.242068,10.974681,-1.263871,100,1,01.01.2005
   00:02:53.975,0.00,11.2412,-0.2558,4.0,382067753.9645,178.5977,1.2,113100791.8301,-0.0987,0,2330,4294934899,0,-0.015455,0.000795,0.015475,177.055077
13 6.9519,11.028523,-0.203025,11.030392,-1.054642,100,1,01.01.2005
   00:03:03.730,0.00,11.3039,-0.2120,4.0,389604135.0454,178.8357,1.2,114701023.5446,-0.0900,0,2329,4294934898,0,-0.010803,0.004857,0.011844,155.789398
14 3.7927,11.083606,-0.185381,11.085156,-0.958222,100,1,01.01.2005
   00:03:13.285,0.00,11.3588,-0.2043,4.0,386481062.2294,178.9128,1.2,113233231.3901,-0.0567,0,2329,4294934899,0,-0.012480,-0.005408,0.013602,-156.569701
15 2.0691,11.130349,-0.218520,11.132494,-1.124730,100,1,01.01.2005
   00:03:22.440,0.00,11.4127,-0.2347,4.0,355908076.0974,178.7191,1.2,103778661.5288,-0.1030,0,2329,4294934899,0,-0.006592,-0.001646,0.006795,-165.979742
16 1.1288,11.233902,-0.293408,11.237733,-1.496114,100,1,01.01.2005
   00:03:31.695,0.00,11.5095,-0.3104,4.1,375451505.3073,178.4060,1.2,108539631.3127,-0.0494,0,2329,4294934898,0,-0.015948,-0.000381,0.015952,-178.629690
17 0.6158,11.325325,-0.406554,11.332620,-2.055910,100,1,01.01.2005
   00:03:39.750,0.00,11.6069,-0.4276,4.1,347702215.8491,177.8384,1.2,99642349.6409,-0.0517,0,2329,4294934899,0,-0.012223,-0.001444,0.012308,-173.262993
18 0.3360,11.524547,-0.556240,11.537963,-2.763273,100,1,01.01.2005
   00:03:50.505,0.00,11.8119,-0.5817,4.2,647431900.1552,177.0993,1.2,182219895.4243,-0.0813,0,2329,4294934898,0,-0.011510,-0.001812,0.011651,-171.051331
19 0.1833,11.673792,-0.797547,11.701004,-3.908345,100,1,01.01.2005
   00:04:06.260,0.00,11.9565,-0.8276,4.2,1207050721.6074,176.0070,1.2,335221669.5180,-0.0333,0,2329,4294934899,0,-0.019871,-0.000038,0.019871,-179.891637
20 0.1000,12.011158,-1.133737,12.064547,-5.392191,100,1,01.01.2005
   00:04:31.115,0.00,12.3065,-1.1794,4.4,2277741187.5085,174.5181,1.2,613244696.4552,-0.0076,0,2328,4294934898,0,-0.015751,-0.006604,0.017080,-157.253618
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 4 mit einer Temperatur von 40 °C

```
1 10000.0000,9.423293,8.857166,12.932434,43.226177,100,1,01.01.2005
   00:00:31.715,0.00,11.3997,9.5567,4.5,443494540.9220,-168.4445,1.0,99234352.1773,-28.4188,0,2326,4294934895,0,-0.690807,0.579642,0.901776,140.000677
2 5455.5948,8.671985,4.792086,9.907947,28.924770,100,1,01.01.2005
   00:00:41.770,0.00,9.3071,5.2391,3.5,345758858.5327,-168.7207,1.1,107754615.0338,-18.0965,0,2325,4294934896,0,-0.227691,0.245242,0.334644,132.874624
3 2976.3514,8.490704,2.393193,8.821533,15.741041,100,1,01.01.2005
   00:00:51.825,0.00,8.8119,2.6181,3.2,309984439.2273,-174.0909,1.1,112240737.6114,-10.6382,0,2324,4294934898,0,-0.076766,0.122274,0.144374,122.121389
4 1623.7767,8.592638,0.972434,8.647488,6.456723,100,1,01.01.2005
   00:01:01.880,0.00,8.8350,1.0896,3.1,304586811.1058,-178.9913,1.2,113887901.6983,-6.0220,0,2324,4294934897,0,-0.029478,0.067030,0.073225,113.738950
5 885.8668,8.834464,0.151274,8.835759,0.980991,100,1,01.01.2005
   00:01:11.935,0.00,9.0604,0.2074,3.2,311563110.2070,177.9195,1.2,114428828.2430,-3.3921,0,2324,4294934897,0,-0.014814,0.037120,0.039966,111.756420
6 483.2930,9.153162,-0.293032,9.157852,-1.833658,100,1,01.01.2005
   00:01:21.990,0.00,9.3778,-0.2727,3.3,323094714.4649,176.4030,1.2,114628579.8527,-1.9312,0,2323,4294934898,0,-0.014001,0.020696,0.024987,124.077814
7 263.6651,9.498857,-0.480654,9.511011,-2.896766,100,1,01.01.2005
   00:01:32.045,0.00,9.7275,-0.4768,3.4,335667134.9673,176.0613,1.2,114718891.1376,-1.1328,0,2323,4294934897,0,-0.016625,0.015025,0.022408,137.894275
8 143.8450,9.804534,-0.488461,9.816694,-2.852112,100,1,01.01.2005
   00:01:42.100,0.00,10.0401,-0.4947,3.5,346841695.2254,176.5101,1.2,114845708.7371,-0.6688,0,2323,4294934898,0,-0.017499,0.008991,0.019674,152.807581
9 78.4760,10.025947,-0.407335,10.034218,-2.326540,100,1,01.01.2005
   00:01:52.155,0.00,10.2684,-0.4187,3.6,354712040.3734,177.2651,1.2,114884890.6393,-0.3998,0,2323,4294934898,0,-0.016804,0.004216,0.017325,165.917160
10 42.8133,10.175375,-0.310236,10.180103,-1.746345,100,1,01.01.2005
   00:02:02.110,0.00,10.4224,-0.3214,3.7,359021738.7418,177.9877,1.2,114603140.2561,-0.2460,0,2323,4294934897,0,-0.016497,0.003367,0.016837,168.463132
11 23.3572,10.263540,-0.234216,10.266213,-1.307275,100,1,01.01.2005
   00:02:11.965,0.00,10.5183,-0.2420,3.7,361082256.4683,178.5403,1.2,114233631.6237,-0.1418,0,2323,4294934898,0,-0.011303,0.005601,0.012614,153.637641
12 12.7427,10.338139,-0.169043,10.339521,-0.936783,100,1,01.01.2005
   00:02:21.720,0.00,10.5840,-0.1885,3.7,359817569.4018,178.8808,1.2,113138458.5831,-0.0986,0,2322,4294934898,0,-0.022292,-0.007341,0.023470,-161.773132
13 6.9519,10.379766,-0.159904,10.380998,-0.882594,100,1,01.01.2005
   00:02:31.475,0.00,10.6346,-0.1742,3.8,366587970.4685,178.9794,1.2,114721791.9731,-0.0822,0,2322,4294934899,0,-0.014504,-0.002099,0.014655,-171.765670
14 3.7927,10.421348,-0.172510,10.422775,-0.948361,100,1,01.01.2005
   00:02:41.030,0.00,10.6814,-0.1835,3.8,363259066.2052,178.9661,1.2,113180493.7584,-0.0498,0,2322,4294934899,0,-0.010409,0.001710,0.010549,170.672725
15 2.0691,10.461296,-0.211417,10.463432,-1.157757,100,1,01.01.2005
   00:02:50.185,0.00,10.7205,-0.2199,3.8,334285137.4394,178.7472,1.2,103766611.8729,-0.0779,0,2322,4294934898,0,-0.012279,0.005340,0.013390,156.497889
16 1.1288,10.530524,-0.296238,10.534690,-1.611382,100,1,01.01.2005
   00:02:59.440,0.00,10.7891,-0.3121,3.8,352648533.9441,178.3324,1.2,108748685.8705,-0.0106,0,2321,4294934900,0,-0.014699,0.000209,0.014700,179.184792
17 0.6158,10.662083,-0.402648,10.669683,-2.162718,100,1,01.01.2005
   00:03:07.495,0.00,10.9196,-0.4252,3.9,326818735.3562,177.7626,1.2,99545267.8766,-0.0076,0,2321,4294934899,0,-0.019112,-0.003555,0.019440,-169.462942
18 0.3360,10.794005,-0.561818,10.808616,-2.979506,100,1,01.01.2005
   00:03:18.250,0.00,11.0620,-0.5846,3.9,608538436.4799,176.8976,1.2,182850259.2219,-0.0773,0,2321,4294934898,0,-0.011874,0.000425,0.011882,177.949864
19 0.1833,10.949358,-0.791162,10.977904,-4.132807,100,1,01.01.2005
   00:03:34.005,0.00,11.2189,-0.8219,4.0,1131646527.8642,175.7870,1.2,334847935.4902,-0.0228,0,2321,4294934900,0,-0.014250,-0.001468,0.014326,-174.118919
20 0.1000,11.181813,-1.159876,11.241808,-5.922042,100,1,01.01.2005
   00:03:58.860,0.00,11.4544,-1.1993,4.1,2128899949.6629,173.9833,1.2,615265099.3132,-0.0396,0,2320,4294934901,0,-0.016875,-0.000315,0.016878,-178.929589
21 0603,169.713918
```

Grafische Darstellung der Temperaturveränderung von Zelle 4

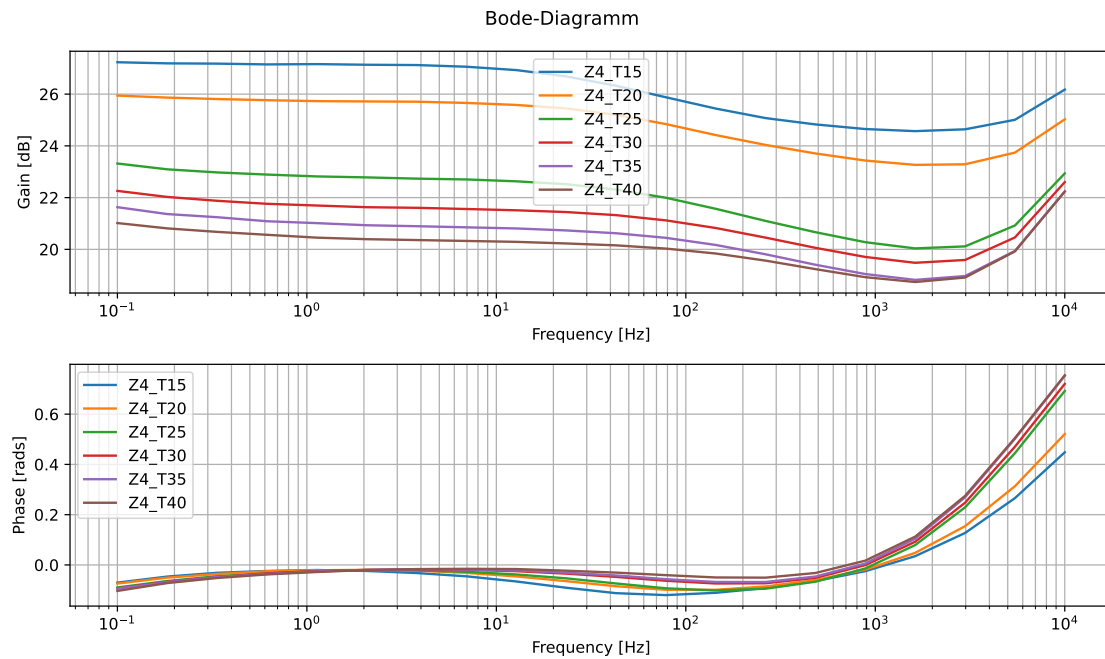


Abbildung I.19.: Bodeplot der Messung

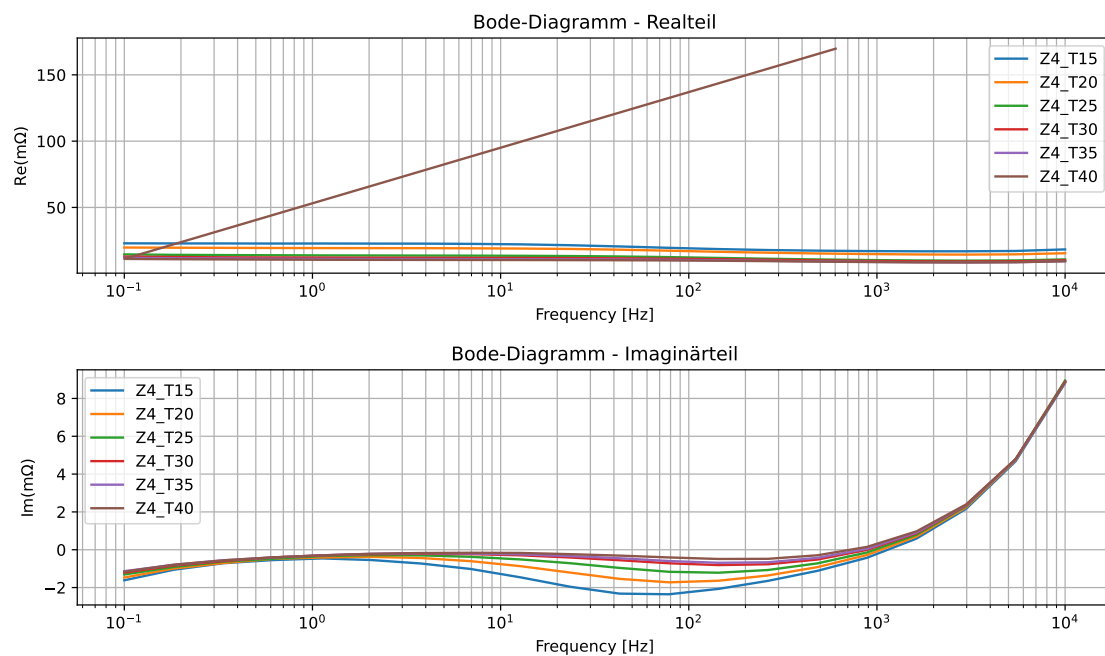


Abbildung I.20.: Real- und Imaginärteil der Messung

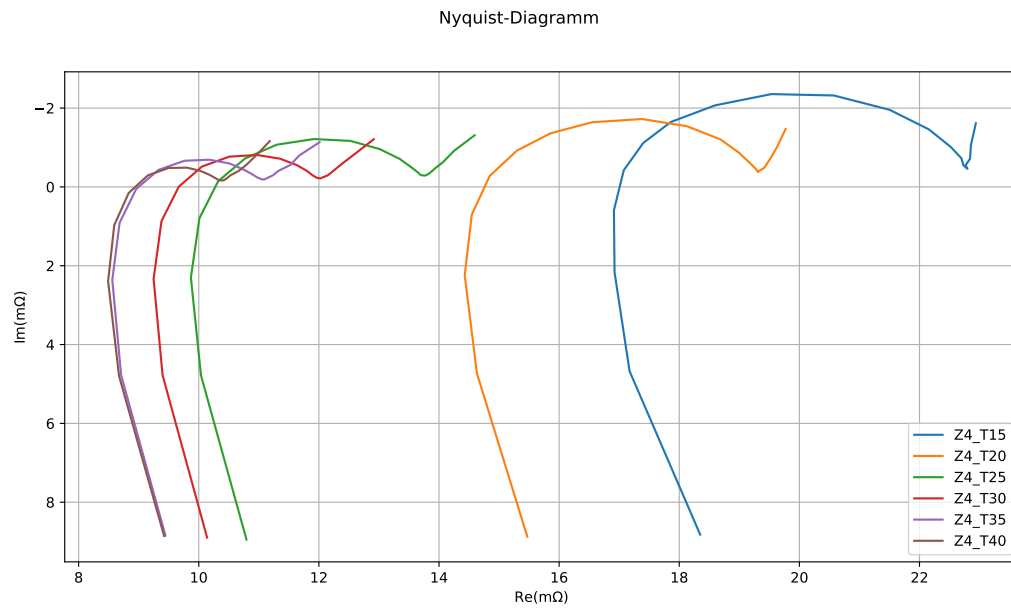


Abbildung I.21.: Nyquistplot der Messung

Temperaturveränderung der Zelle 5

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 5 mit einer Temperatur von 15 °C

```
1 10000.0000,7.683431,6.297940,9.934745,39.340724,100,1,01.01.2005
   00:00:52.705,0.00,8.5834,7.1181,3.4.332715514.7281,-168.6895,1.0,99314634.5335,-28.3580,0,2330,4294934880,0,-1.150525,0.867073,1.440668,142.997139
2 5455.5948,7.017956,3.300764,7.755434,25.189068,100,1,01.01.2005
   00:01:02.760,0.00,7.3352,3.7799,2.7,267291893.5325,-170.7902,1.1,107816188.1296,-18.0527,0,2329,4294934880,0,-0.366974,0.365544,0.517970,135.111822
3 2976.3514,6.914164,1.411744,7.056818,11.540112,100,1,01.01.2005
   00:01:12.815,0.00,7.1167,1.6471,2.5,246328533.6975,-177.5780,1.1,112242051.4617,-10.6089,0,2328,4294934881,0,-0.120974,0.176730,0.214169,124.392245
4 1623.7767,7.118659,0.179688,7.120926,1.445946,100,1,01.01.2005
   00:01:22.870,0.00,7.2985,0.2946,2.6,250004243.4937,176.3142,1.2,113921805.6792,-5.9970,0,2328,4294934882,0,-0.046687,0.093306,0.104334,116.581678
5 885.8668,7.501882,-0.659966,7.530856,-5.027560,100,1,01.01.2005
   00:01:32.925,0.00,7.6849,-0.6116,2.7,265131890.0868,172.0822,1.2,114472382.8716,-3.3672,0,2328,4294934881,0,-0.022707,0.053643,0.058251,112.943180
6 483.2930,8.035739,-1.289605,8.138561,-9.117295,100,1,01.01.2005
   00:01:42.980,0.00,8.2252,-1.2819,2.9,286737301.6084,169.2196,1.2,114650229.6943,-1.9221,0,2327,4294934881,0,-0.020877,0.034945,0.040707,120.855206
7 263.6651,8.704951,-1.808692,8.890869,-11.737755,100,1,01.01.2005
   00:01:53.035,0.00,8.9102,-1.8409,3.2,313695424.9433,167.2039,1.2,114760187.1090,-1.1227,0,2327,4294934883,0,-0.019683,0.013300,0.023755,145.953148
8 143.8450,9.572790,-2.306160,9.846658,-13.544904,100,1,01.01.2005
   00:02:03.090,0.00,9.8009,-2.3580,3.6,347883162.8724,165.8070,1.2,114867823.7062,-0.6653,0,2327,4294934883,0,-0.018520,0.010306,0.021195,150.904752
9 78.4760,10.710133,-2.713908,11.048631,-14.219241,100,1,01.01.2005
   00:02:13.145,0.00,10.9680,-2.7857,4.0,390714909.3373,165.3539,1.2,114922977.7019,-0.3954,0,2327,4294934883,0,-0.017875,0.003889,0.018293,167.726436
10 42.8133,12.082306,-2.826403,12.408492,-13.166392,100,1,01.01.2005
   00:02:23.100,0.00,12.3747,-2.9054,4.5,437771939.4690,166.5539,1.2,114633361.7657,-0.2330,0,2326,4294934883,0,-0.018945,0.001923,0.019043,174.203747
11 23.3572,13.389141,-2.517892,13.623834,-10.650358,100,1,01.01.2005
   00:02:32.955,0.00,13.7130,-2.5943,4.9,479261352.1863,169.1301,1.2,114301416.5070,-0.1569,0,2326,4294934884,0,-0.021641,-0.001591,0.021699,-175.796045
12 12.7427,14.360035,-1.965969,14.493986,-7.795649,100,1,01.01.2005
   00:02:42.710,0.00,14.7102,-2.0282,5.3,504991299.2065,172.0448,1.2,113194521.1327,-0.1047,0,2326,4294934885,0,-0.021104,-0.000446,0.021109,-178.789639
13 6.9519,14.971918,-1.415413,15.038674,-5.400570,100,1,01.01.2005
   00:02:52.465,0.00,15.3370,-1.4596,5.4,531294919.5121,174.4813,1.2,114785064.0657,-0.0822,0,2326,4294934885,0,-0.022532,0.004114,0.022904,169.651724
14 3.7927,15.312848,-1.007454,15.345953,-3.764148,100,1,01.01.2005
   00:03:02.020,0.00,15.6935,-1.0444,5.6,535264401.2230,176.1614,1.2,113275732.9992,-0.0314,0,2326,4294934885,0,-0.016181,0.001301,0.016233,175.403314
15 2.0691,15.516921,-0.728065,15.533992,-2.686389,100,1,01.01.2005
   00:03:11.175,0.00,15.9053,-0.7620,5.6,496618373.1515,177.1871,1.2,103808161.9217,-0.0702,0,2326,4294934886,0,-0.014029,-0.002690,0.014284,-169.144271
16 1.1288,15.663390,-0.632172,15.676142,-2.311195,100,1,01.01.2005
   00:03:20.430,0.00,16.0517,-0.6602,5.7,524859008.6003,177.6278,1.2,108743156.7072,-0.0169,0,2325,4294934887,0,-0.017962,0.000816,0.017981,177.397798
17 0.6158,15.787994,-0.650027,15.801370,-2.357663,100,1,01.01.2005
   00:03:28.485,0.00,16.1788,-0.6766,5.7,485359574.5108,177.5883,1.2,99767093.3582,-0.0169,0,2325,4294934886,0,-0.018778,0.002890,0.018999,171.250594
18 0.3360,15.945996,-0.803159,15.966210,-2.883407,100,1,01.01.2005
   00:03:39.240,0.00,16.3331,-0.8326,5.8,898885323.7046,177.0450,1.2,182945288.9848,-0.0369,0,2325,4294934887,0,-0.026451,0.004203,0.026783,170.970599
19 0.1833,16.161770,-1.075833,16.197538,-3.808364,100,1,01.01.2005
   00:03:54.995,0.00,16.5682,-1.1221,5.9,1673516026.3464,176.0401,1.2,335434929.4532,-0.0853,0,2325,4294934888,0,-0.012458,-0.005433,0.013591,-156.438940
20 0.1000,16.490972,-1.621529,16.570502,-5.615744,100,1,01.01.2005
   00:04:19.850,0.00,16.9042,-1.6671,6.0,3132095668.1289,174.3519,1.2,613745360.7552,-0.0159,0,2325,4294934887,0,-0.013851,0.009783,0.016958,144.765930
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 5 mit einer Temperatur von 20 °C

```
1 10000.0000,7.711085,6.374052,10.004468,39.577441,100,1,01.01.2005
   00:00:32.405,0.00,8.6230,7.2075,3.4,335379212.0840,-168.4611,1.0,99328550.1830,-28.3516,0,2328,4294934873,0,-1.153106,0.872209,1.445823,142.896149
2 5455.5948,7.037021,3.373352,7.803792,25.611764,100,1,01.01.2005
   00:00:42.460,0.00,7.3518,3.8592,2.8,268993017.0548,-170.3537,1.1,107831866.1865,-18.0503,0,2327,4294934875,0,-0.372857,0.366478,0.522808,135.494299
3 2976.3514,6.920833,1.494043,7.080261,12.181853,100,1,01.01.2005
   00:00:52.515,0.00,7.1163,1.7373,2.5,247042671.8549,-176.8890,1.1,112253010.5063,-10.6084,0,2326,4294934878,0,-0.128465,0.180850,0.221833,125.387699
4 1623.7767,7.096569,0.286886,7.102365,2.314979,100,1,01.01.2005
   00:01:02.570,0.00,7.2749,0.4099,2.6,249385465.5632,177.2236,1.2,113921451.9820,-6.0014,0,2326,4294934879,0,-0.047308,0.098090,0.108902,115.747793
5 885.8668,7.446237,-0.501524,7.463107,-3.853201,100,1,01.01.2005
   00:01:12.625,0.00,7.6246,-0.4469,2.7,262717000.9597,173.2801,1.2,114491941.6735,-3.3651,0,2325,4294934880,0,-0.025585,0.055677,0.061274,114.680106
6 483.2930,7.937393,-1.054201,8.007094,-7.565431,100,1,01.01.2005
   00:01:22.680,0.00,8.1243,-1.0446,2.9,282207860.5451,170.7509,1.2,114676052.7449,-1.9223,0,2325,4294934880,0,-0.020717,0.030773,0.037096,123.948796
7 263.6651,8.545854,-1.473748,8.671998,-9.784520,100,1,01.01.2005
   00:01:32.735,0.00,8.7464,-1.4920,3.1,305934849.3471,169.1913,1.2,114767138.4037,-1.1283,0,2324,4294934880,0,-0.020213,0.018661,0.027510,137.287652
8 143.8450,9.313803,-1.777510,9.481902,-10.804791,100,1,01.01.2005
   00:01:42.790,0.00,9.5348,-1.8183,3.4,335029769.1103,168.5386,1.2,114885473.4965,-0.6648,0,2324,4294934880,0,-0.019085,0.007664,0.020567,158.120576
9 78.4760,10.218486,-1.891978,10.392162,-10.489664,100,1,01.01.2005
   00:01:52.845,0.00,10.4643,-1.9398,3.8,367459597.3373,169.1058,1.2,114923930.1479,-0.3926,0,2324,4294934881,0,-0.017595,0.006342,0.018703,160.179960
10 42.8133,11.113390,-1.732586,11.247635,-8.861127,100,1,01.01.2005
   00:02:02.800,0.00,11.3822,-1.7819,4.1,396845082.2359,170.8602,1.2,114653537.7898,-0.2425,0,2324,4294934880,0,-0.018123,0.002719,0.018326,171.466613
11 23.3572,11.814244,-1.381150,11.894702,-6.667925,100,1,01.01.2005
   00:02:12.655,0.00,12.1035,-1.4270,4.3,418451421.5438,173.1097,1.2,114283748.8978,-0.1660,0,2323,4294934882,0,-0.016210,-0.001641,0.016293,-174.218017
12 12.7427,12.271490,-1.003953,12.312490,-4.677056,100,1,01.01.2005
   00:02:22.410,0.00,12.5614,-1.0412,4.5,428467563.6954,175.1355,1.2,113146955.3420,-0.1264,0,2323,4294934881,0,-0.027875,-0.001915,0.027940,-176.070189
13 6.9519,12.529871,-0.713827,12.550188,-3.260616,100,1,01.01.2005
   00:02:32.165,0.00,12.8365,-0.7481,4.5,443283976.5125,176.6195,1.2,114748644.7991,-0.0453,0,2323,4294934882,0,-0.018134,-0.006007,0.019103,-161.671194
14 3.7927,12.680130,-0.526443,12.691054,-2.377392,100,1,01.01.2005
   00:02:41.720,0.00,12.9877,-0.5483,4.6,442142261.7540,177.5287,1.2,113212227.1315,-0.0539,0,2323,4294934883,0,-0.021349,0.001798,0.021425,175.185549
15 2.0691,12.786887,-0.439035,12.794421,-1.966468,100,1,01.01.2005
   00:02:50.875,0.00,13.0957,-0.4587,4.6,408413549.4216,177.9459,1.2,103741893.2781,-0.0479,0,2323,4294934883,0,-0.022942,0.001853,0.023017,175.381165
16 1.1288,12.867701,-0.448173,12.875503,-1.994765,100,1,01.01.2005
   00:03:00.130,0.00,13.1851,-0.4702,4.7,430848601.7265,177.9350,1.2,108696266.5719,-0.0228,0,2323,4294934885,0,-0.016475,-0.000113,0.016475,-179.605596
17 0.6158,12.981839,-0.521335,12.992302,-2.299695,100,1,01.01.2005
   00:03:08.185,0.00,13.3010,-0.5393,4.7,398679178.2521,177.6004,1.2,99685466.2269,-0.0779,0,2323,4294934885,0,-0.017625,0.005971,0.018609,161.284894
18 0.3360,13.120021,-0.697217,13.138534,-3.041921,100,1,01.01.2005
   00:03:18.940,0.00,13.4414,-0.7312,4.8,738945496.1427,176.8963,1.2,182714876.7857,0.0100,0,2322,4294934886,0,-0.018812,-0.005364,0.019562,-164.084615
19 0.1833,13.333176,-0.992496,13.370064,-4.257137,100,1,01.01.2005
   00:03:34.695,0.00,13.6591,-1.0266,4.8,1378824308.5632,175.5743,1.2,335051893.2691,-0.1275,0,2322,4294934886,0,-0.019594,0.002333,0.019733,173.209740
20 0.1000,13.614967,-1.465248,13.693585,-6.142553,100,1,01.01.2005
   00:03:59.550,0.00,13.9474,-1.5178,5.0,2588282380.8880,173.7047,1.2,614060295.6616,-0.0846,0,2322,4294934884,0,-0.020051,-0.003611,0.020373,-169.789825
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 5 mit einer Temperatur von 25 °C

```
1 10000.0000,7.764596,6.446903,10.092151,39.702667,100,1,01.01.2005
   00:00:58.560,0.00,8.6938,7.2918,3.5,338596455.0504,-168.3904,1.0,99323484.8196,-28.3781,0,2316,4294934877,0,-1.153999,0.879425,1.450897,142.690139
2 5455.5948,7.076486,3.438164,7.867504,25.913149,100,1,01.01.2005
   00:01:08.615,0.00,7.4005,3.9327,2.8,271480875.9934,-170.0768,1.1,107824208.1023,-18.0636,0,2315,4294934880,0,-0.368603,0.370564,0.522671,134.847994
3 2976.3514,6.949229,1.573240,7.125088,12.756199,100,1,01.01.2005
   00:01:18.670,0.00,7.1499,1.8242,2.5,248830970.7110,-176.3071,1.1,112243538.8517,-10.6200,0,2314,4294934880,0,-0.124661,0.184882,0.222984,123.990769
4 1623.7767,7.109793,0.400270,7.121052,3.222260,100,1,01.01.2005
   00:01:28.725,0.00,7.2885,0.5285,2.6,250119468.0453,178.1468,1.2,113925695.4454,-6.0006,0,2313,4294934880,0,-0.047125,0.099644,0.110226,115.311029
5 885.8668,7.427238,-0.341532,7.435086,-2.632815,100,1,01.01.2005
   00:01:38.780,0.00,7.6062,-0.2840,2.7,261782082.8288,174.4958,1.2,114476959.6582,-3.3662,0,2313,4294934880,0,-0.024191,0.054343,0.059484,113.996540
6 483.2930,7.862449,-0.826565,7.905777,-6.001357,100,1,01.01.2005
   00:01:48.835,0.00,8.0456,-0.8088,2.8,278564041.1413,172.3383,1.2,114664723.6753,-1.9209,0,2312,4294934882,0,-0.022278,0.033024,0.039836,124.003439
7 263.6651,8.404635,-1.133161,8.480680,-7.678643,100,1,01.01.2005
   00:01:58.890,0.00,8.6015,-1.1466,3.1,299159928.5813,171.2851,1.2,114749984.3822,-1.1221,0,2312,4294934880,0,-0.020238,0.014694,0.025010,144.017242
8 143.8450,9.032834,-1.268204,9.121427,-7.992052,100,1,01.01.2005
   00:02:08.945,0.00,9.2488,-1.2962,3.3,322302817.7969,171.3527,1.2,114869599.7921,-0.6694,0,2311,4294934881,0,-0.017003,0.007202,0.018465,157.043781
9 78.4760,9.665029,-1.207531,9.740170,-7.121527,100,1,01.01.2005
   00:02:19.000,0.00,9.8961,-1.2393,3.5,344299939.8481,172.4664,1.2,114905828.6203,-0.3954,0,2311,4294934883,0,-0.018393,0.004334,0.018896,166.741840
10 42.8133,10.167228,-0.993889,10.215691,-5.583164,100,1,01.01.2005
   00:02:28.955,0.00,10.4130,-1.0245,3.7,360414077.6171,174.1450,1.2,114651824.1656,-0.2361,0,2311,4294934882,0,-0.017029,0.001653,0.017109,174.456673
11 23.3572,10.515836,-0.748809,10.542463,-4.073029,100,1,01.01.2005
   00:02:38.810,0.00,10.7712,-0.7748,3.8,370653796.7315,175.7541,1.2,114243636.9746,-0.1315,0,2310,4294934883,0,-0.016879,0.000900,0.016903,176.949476
12 12.7427,10.723510,-0.533905,10.736793,-2.850305,100,1,01.01.2005
   00:02:48.565,0.00,10.9850,-0.5557,3.9,373847380.0228,177.0210,1.2,113133015.4880,-0.0829,0,2310,4294934883,0,-0.016477,0.000112,0.016477,179.609429
13 6.9519,10.838096,-0.386527,10.844987,-2.042514,100,1,01.01.2005
   00:02:58.320,0.00,11.0989,-0.4063,3.9,382939452.9306,177.8137,1.2,114764827.3674,-0.0896,0,2309,4294934883,0,-0.020318,-0.001385,0.020365,-176.100158
14 3.7927,10.903253,-0.329114,10.908219,-1.728946,100,1,01.01.2005
   00:03:07.875,0.00,11.1660,-0.3408,4.0,380347573.3288,178.2098,1.2,113325992.4239,-0.0420,0,2303,4294934883,0,-0.020139,0.005428,0.020857,164.916635
15 2.0691,10.946072,-0.305855,10.950345,-1.600539,100,1,01.01.2005
   00:03:17.030,0.00,11.2220,-0.3245,4.0,350227183.2600,178.2891,1.2,103835260.7821,-0.0544,0,2303,4294934884,0,-0.008067,-0.002066,0.008327,-165.636841
16 1.1288,11.015766,-0.371631,11.022033,-1.932214,100,1,01.01.2005
   00:03:26.285,0.00,11.2828,-0.3927,4.0,368410605.7233,177.9644,1.2,108617297.3156,-0.0421,0,2303,4294934884,0,-0.018729,-0.002662,0.018917,-171.911517
17 0.6158,11.074817,-0.487232,11.085530,-2.519082,100,1,01.01.2005
   00:03:34.340,0.00,11.3371,-0.5097,4.0,339422053.2400,177.3708,1.2,99551293.7167,-0.0549,0,2303,4294934885,0,-0.024947,-0.000989,0.024966,-177.729476
18 0.3360,11.107439,-0.713027,11.130301,-3.672983,100,1,01.01.2005
   00:03:45.095,0.00,11.3682,-0.7402,4.0,625370217.4998,176.2448,1.2,182714973.4775,-0.0297,0,2303,4294934886,0,-0.027141,0.000179,0.027142,179.622606
19 0.1833,11.087551,-1.045692,11.136752,-5.387757,100,1,01.01.2005
   00:04:00.850,0.00,11.3517,-1.0810,4.0,1146818704.2659,174.4740,1.2,334752047.5267,-0.0860,0,2303,4294934885,0,-0.023036,0.000687,0.023046,178.290577
20 0.1000,10.938772,-1.670638,11.065612,-8.683471,100,1,01.01.2005
   00:04:25.705,0.00,11.2126,-1.7216,4.0,2087924292.3174,171.1668,1.2,612626625.7259,-0.1041,0,2303,4294934885,0,-0.008926,0.001196,0.009006,172.368909
21 483
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 5 mit einer Temperatur von 30 °C

```
1 10000.0000,7.990350,6.526577,10.317069,39.242203,100,1,01.01.2005
   00:00:50.285,0.00,8.9637,7.3577,3.5,346067268.8409,-168.9906,1.0,99328061.0891,-28.3710,0,2283,4294934878,0,-1.155911,0.883563,1.454927,142.606167
2 5455.5948,7.288027,3.510570,8.089464,25.719652,100,1,01.01.2005
   00:01:00.340,0.00,7.6295,4.0087,2.9,279189285.3392,-170.3418,1.1,107823789.9073,-18.0605,0,2281,4294934880,0,-0.371107,0.373085,0.526225,134.847714
3 2976.3514,7.142532,1.655644,7.331911,13.050713,100,1,01.01.2005
   00:01:10.395,0.00,7.3532,1.9096,2.6,256205242.4281,-176.0542,1.1,112250263.1581,-10.6119,0,2280,4294934878,0,-0.123693,0.184219,0.221893,123.879078
4 1623.7767,7.277996,0.512675,7.296031,4.029358,100,1,01.01.2005
   00:01:20.450,0.00,7.4643,0.6429,2.6,256432461.9077,178.9191,1.2,113927558.3822,-6.0039,0,2279,4294934880,0,-0.044622,0.097716,0.107422,114.543817
5 885.8668,7.566512,-0.187156,7.568826,-1.416912,100,1,01.01.2005
   00:01:30.505,0.00,7.7466,-0.1276,2.7,266450772.9181,175.6883,1.2,114471688.9465,-3.3683,0,2278,4294934880,0,-0.026652,0.051921,0.058363,117.172489
6 483.2930,7.947638,-0.611582,7.971134,-4.400320,100,1,01.01.2005
   00:01:40.560,0.00,8.1358,-0.5922,2.9,281002191.1002,173.9169,1.2,114659971.3305,-1.9201,0,2276,4294934880,0,-0.019370,0.029044,0.034911,123.699554
7 263.6651,8.405898,-0.827940,8.446573,-5.625214,100,1,01.01.2005
   00:01:50.615,0.00,8.6013,-0.8336,3.0,297936947.1949,173.3384,1.2,114757116.3454,-1.1257,0,2275,4294934881,0,-0.021724,0.014534,0.026138,146.216192
8 143.8450,8.870864,-0.866144,8.913049,-5.576636,100,1,01.01.2005
   00:02:00.670,0.00,9.0839,-0.8790,3.2,314907199.3256,173.8102,1.2,114850452.1423,-0.6626,0,2274,4294934882,0,-0.015780,0.011868,0.019744,143.053066
9 78.4760,9.272458,-0.762987,9.303796,-4.704001,100,1,01.01.2005
   00:02:10.725,0.00,9.4949,-0.7807,3.4,328858062.8070,174.9091,1.2,114896233.9064,-0.3905,0,2273,4294934882,0,-0.017141,0.006731,0.018415,158.559640
10 42.8133,9.561595,-0.592737,9.579950,-3.547309,100,1,01.01.2005
   00:02:20.680,0.00,9.7930,-0.6132,3.5,338003910.8658,176.1727,1.2,114658486.7750,-0.2444,0,2272,4294934881,0,-0.016030,0.001006,0.016061,176.410522
11 23.3572,9.752575,-0.444818,9.762713,-2.611467,100,1,01.01.2005
   00:02:30.535,0.00,9.9819,-0.4573,3.5,343079511.6479,177.2265,1.2,114280934.6759,-0.1502,0,2270,4294934883,0,-0.023316,0.005955,0.024064,165.671960
12 12.7427,9.852377,-0.323048,9.857672,-1.877986,100,1,01.01.2005
   00:02:40.290,0.00,10.0934,-0.3413,3.6,343242535.6554,177.9772,1.2,113126047.2587,-0.0863,0,2269,4294934883,0,-0.014420,-0.002432,0.014623,-170.426426
13 6.9519,9.922018,-0.266806,9.925605,-1.540331,100,1,01.01.2005
   00:02:50.045,0.00,10.1515,-0.2805,3.6,350129883.3317,178.3581,1.2,114757584.3838,-0.0593,0,2268,4294934883,0,-0.027914,0.000926,0.027930,178.099032
14 3.7927,9.960232,-0.237569,9.963065,-1.366347,100,1,01.01.2005
   00:02:59.600,0.00,10.2000,-0.2540,3.6,346947027.9269,178.4807,1.2,113182362.1887,-0.0930,0,2267,4294934883,0,-0.018739,-0.002397,0.018892,-172.711012
15 2.0691,9.960804,-0.284995,9.964880,-1.638880,100,1,01.01.2005
   00:03:08.755,0.00,10.2118,-0.3001,3.6,318923190.5893,178.2452,1.2,103907014.0240,-0.0716,0,2265,4294934884,0,-0.007470,0.000209,0.007473,178.398053
16 1.1288,9.982849,-0.377683,9.989991,-2.166651,100,1,01.01.2005
   00:03:18.010,0.00,10.2160,-0.3904,3.6,334124342.6126,177.7601,1.2,108782592.1143,-0.0516,0,2264,4294934884,0,-0.025839,0.005079,0.026333,168.878455
17 0.6158,10.002169,-0.532331,10.016324,-3.046497,100,1,01.01.2005
   00:03:26.065,0.00,10.2463,-0.5540,3.6,307216138.6467,176.8216,1.2,99652804.2804,-0.0833,0,2264,4294934885,0,-0.015186,0.000094,0.015187,179.645187
18 0.3360,9.963806,-0.787848,9.994905,-4.521025,100,1,01.01.2005
   00:03:36.820,0.00,10.2100,-0.8175,3.6,561949729.1538,175.3596,1.2,182613208.8825,-0.0626,0,2262,4294934886,0,-0.011964,-0.001218,0.012026,-174.185899
19 0.1833,9.830760,-1.242720,9.908996,-7.204624,100,1,01.01.2005
   00:03:52.575,0.00,10.0679,-1.2834,3.6,1021320975.0114,172.7523,1.2,334943027.3148,0.0168,0,2261,4294934887,0,-0.017192,-0.000526,0.017200,-178.245992
20 0.1000,9.644785,-1.964515,9.842825,-11.512898,100,1,01.01.2005
   00:04:17.430,0.00,9.8809,-2.0239,3.6,1860100132.3568,168.4433,1.2,613854480.0471,0.0194,0,2259,4294934887,0,-0.012875,-0.000688,0.012894,-176.939183
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 5 mit einer Temperatur von 35 °C

```
1 10000.0000,8.310871,6.634818,10.634443,38.601416,100,1,01.01.2005
   00:00:52.005,0.00,9.3497,7.4445,3.6,356641374.5160,-169.8333,1.0,99324955.4999,-28.3613,0,2272,4294934878,0,-1.155239,0.888271,1.457259,142.443054
2 5455.5948,7.597491,3.600604,8.407510,25.357211,100,1,01.01.2005
   00:01:02.060,0.00,7.9650,4.1023,3.0,290213988.6450,-170.8078,1.1,107817581.7246,-18.0582,0,2270,4294934877,0,-0.373869,0.376399,0.530523,134.806788
3 2976.3514,7.434824,1.747348,7.637397,13.225748,100,1,01.01.2005
   00:01:12.115,0.00,7.6574,2.0091,2.7,266938326.2460,-175.9131,1.1,112232848.0867,-10.6146,0,2268,4294934878,0,-0.125481,0.188088,0.226103,123.708879
4 1623.7767,7.544864,0.629069,7.571043,4.766133,100,1,01.01.2005
   00:01:22.170,0.00,7.7373,0.7626,2.7,266109809.2051,179.6300,1.2,113924823.4842,-5.9991,0,2267,4294934878,0,-0.046674,0.096708,0.107382,115.763486
5 885.8668,7.791104,-0.032923,7.791173,-0.242111,100,1,01.01.2005
   00:01:32.225,0.00,7.9775,0.0293,2.8,274372035.8896,176.8472,1.2,114477377.1369,-3.3631,0,2265,4294934880,0,-0.026182,0.049935,0.056383,117.669269
6 483.2930,8.112876,-0.398615,8.122662,-2.812885,100,1,01.01.2005
   00:01:42.280,0.00,8.3064,-0.3717,2.9,286439982.3634,175.5196,1.2,114665798.1582,-1.9182,0,2264,4294934881,0,-0.018100,0.030873,0.035788,120.382080
7 263.6651,8.466556,-0.542673,8.483930,-3.667420,100,1,01.01.2005
   00:01:52.335,0.00,8.6663,-0.5357,3.1,299332299.6665,175.3393,1.2,114746527.2972,-1.1234,0,2263,4294934881,0,-0.018875,0.019820,0.027370,133.600816
8 143.8450,8.777002,-0.531375,8.793072,-3.464556,100,1,01.01.2005
   00:02:02.390,0.00,8.9848,-0.5375,3.2,310607664.3115,175.9110,1.2,114861950.1041,-0.6657,0,2262,4294934881,0,-0.018719,0.009997,0.021221,151.895689
9 78.4760,9.013536,-0.442951,9.024413,-2.813415,100,1,01.01.2005
   00:02:12.445,0.00,9.2275,-0.4533,3.3,318945309.7322,176.7994,1.2,114910260.8748,-0.3879,0,2260,4294934883,0,-0.019066,0.005619,0.019877,163.578144
10 42.8133,9.166866,-0.335355,9.172998,-2.095139,100,1,01.01.2005
   00:02:22.400,0.00,9.3879,-0.3460,3.3,323601745.8282,177.6544,1.2,114655440.5919,-0.2347,0,2259,4294934882,0,-0.016273,0.003857,0.016724,166.664751
11 23.3572,9.265853,-0.250678,9.269243,-1.549702,100,1,01.01.2005
   00:02:32.255,0.00,9.4849,-0.2620,3.4,325771767.4212,178.2654,1.2,114278370.8470,-0.1525,0,2257,4294934883,0,-0.021138,0.001810,0.021215,175.106721
12 12.7427,9.313979,-0.201418,9.316157,-1.238848,100,1,01.01.2005
   00:02:42.010,0.00,9.5397,-0.2096,3.4,324358647.1303,178.6374,1.2,113144439.0045,-0.1036,0,2256,4294934881,0,-0.015845,0.003999,0.016342,165.836332
13 6.9519,9.350388,-0.191376,9.352346,-1.172518,100,1,01.01.2005
   00:02:51.765,0.00,9.5714,-0.1961,3.4,330130144.8653,178.7561,1.2,114780016.8070,-0.0701,0,2255,4294934884,0,-0.021591,0.007464,0.022845,160.931005
14 3.7927,9.378982,-0.200460,9.381124,-1.224415,100,1,01.01.2005
   00:03:01.320,0.00,9.6000,-0.2147,3.4,326653331.1939,178.6604,1.2,113228991.4634,-0.0582,0,2254,4294934883,0,-0.022423,-0.001693,0.022487,-175.682069
15 2.0691,9.384435,-0.265306,9.388184,-1.619369,100,1,01.01.2005
   00:03:10.475,0.00,9.6070,-0.2733,3.4,299924223.8625,178.3079,1.2,103871138.4618,-0.0628,0,2252,4294934884,0,-0.020909,0.006369,0.021858,163.058057
16 1.1288,9.406470,-0.361228,9.413403,-2.199194,100,1,01.01.2005
   00:03:19.730,0.00,9.6314,-0.3799,3.4,314634011.6596,177.6749,1.2,108649626.8265,-0.0663,0,2251,4294934885,0,-0.019114,-0.001786,0.019198,-174.662650
17 0.6158,9.421598,-0.534986,9.436775,-3.249930,100,1,01.01.2005
   00:03:27.785,0.00,9.6495,-0.5548,3.4,289174061.9691,176.6473,1.2,99583471.0651,-0.0619,0,2250,4294934885,0,-0.016402,0.001568,0.016477,174.538176
18 0.3360,9.364784,-0.821557,9.400752,-5.013625,100,1,01.01.2005
   00:03:38.540,0.00,9.5902,-0.8492,3.4,528111798.2790,174.9415,1.2,182578109.0774,0.0017,0,2249,4294934885,0,-0.017119,0.001202,0.017161,175.982411
19 0.1833,9.232048,-1.253241,9.316723,-7.730589,100,1,01.01.2005
   00:03:54.295,0.00,9.4539,-1.2859,3.4,960596203.4425,172.2117,1.2,335118316.5919,-0.0428,0,2248,4294934886,0,-0.016945,0.007314,0.018456,156.651627
20 0.1000,9.061330,-1.953347,9.269481,-12.165070,100,1,01.01.2005
   00:04:19.150,0.00,9.2748,-2.0096,3.4,1751420018.0961,167.7358,1.2,614291027.2786,-0.0387,0,2246,4294934885,0,-0.020375,0.001749,0.020450,175.094020
```

CSV-Datei (Rohdaten) der Zelle 5 mit einer Temperatur von 40 °C

```
1 10000.0000,8.441718,6.733676,10.798379,38.578194,100,1,01.01.2005
   00:01:19.130,0.00,9.5172,7.5443,3.7,362397632.1689,-169.9575,1.0,99322944.2302,-28.3613,0,2247,4294934880,0,-1.152408,0.891233,1.456826,142.282870
2 5455.5948,7.714514,3.683408,8.548755,25.522827,100,1,01.01.2005
   00:01:29.185,0.00,8.0928,4.1921,3.0,295199069.8000,-170.6783,1.1,107807582.0850,-18.0626,0,2246,4294934880,0,-0.375183,0.379092,0.533360,134.703037
3 2976.3514,7.533418,1.838023,7.754399,13.711298,100,1,01.01.2005
   00:01:39.240,0.00,7.7607,2.1052,2.8,271115893.4404,-175.4427,1.1,112223725.0676,-10.6196,0,2244,4294934881,0,-0.125487,0.189355,0.227161,123.532869
4 1623.7767,7.616131,0.733931,7.651412,5.504332,100,1,01.01.2005
   00:01:49.295,0.00,7.8118,0.8759,2.8,269019676.1804,-179.6061,1.2,113912437.6562,-6.0036,0,2243,4294934882,0,-0.045566,0.101601,0.111351,114.155379
5 885.8668,7.824723,0.107637,7.825463,0.788111,100,1,01.01.2005
   00:01:59.350,0.00,8.0125,0.1807,2.8,275644858.7000,177.9259,1.2,114478008.4345,-3.3661,0,2241,4294934883,0,-0.025501,0.056921,0.062372,114.132859
6 483.2930,8.081510,-0.208544,8.084200,-1.478192,100,1,01.01.2005
   00:02:09.405,0.00,8.2717,-0.1760,2.9,284991186.4278,176.8639,1.2,114653722.2892,-1.9175,0,2240,4294934882,0,-0.020510,0.031622,0.037691,122.967153
7 263.6651,8.331472,-0.325066,8.337811,-2.234358,100,1,01.01.2005
   00:02:19.460,0.00,8.5258,-0.3147,3.0,294084239.3335,176.7643,1.2,114733782.7563,-1.1220,0,2240,4294934882,0,-0.020822,0.017670,0.027309,139.681186
8 143.8450,8.547064,-0.320795,8.553082,-2.149458,100,1,01.01.2005
   00:02:29.515,0.00,8.7466,-0.3239,3.1,302042133.0022,177.2155,1.2,114863145.7906,-0.6640,0,2236,4294934883,0,-0.021137,0.007532,0.022439,160.386222
9 78.4760,8.683095,-0.269067,8.687263,-1.774884,100,1,01.01.2005
   00:02:39.570,0.00,8.8915,-0.2760,3.1,307175011.5335,177.8217,1.2,114934928.0341,-0.4003,0,2235,4294934883,0,-0.016166,0.004413,0.016757,164.731056
10 42.8133,8.779645,-0.207999,8.782109,-1.357143,100,1,01.01.2005
   00:02:49.525,0.00,8.9852,-0.2179,3.2,309621359.4277,178.3653,1.2,114662627.7090,-0.2452,0,2233,4294934884,0,-0.021787,0.001041,0.021812,177.265087
11 23.3572,8.833082,-0.170865,8.834734,-1.108175,100,1,01.01.2005
   00:02:59.380,0.00,9.0442,-0.1799,3.2,310528016.6648,178.7093,1.2,114259676.0911,-0.1509,0,2232,4294934884,0,-0.017884,0.001631,0.017958,174.789037
12 12.7427,8.874105,-0.149953,8.875372,-0.968084,100,1,01.01.2005
   00:03:09.135,0.00,9.0842,-0.1598,3.2,308941435.0618,178.8826,1.2,113180301.7737,-0.1098,0,2230,4294934885,0,-0.020120,0.000739,0.020133,177.897719
13 6.9519,8.887978,-0.155930,8.889345,-1.005089,100,1,01.01.2005
   00:03:18.890,0.00,9.1046,-0.1674,3.2,314119464.3795,178.8522,1.2,114817300.9727,-0.0944,0,2229,4294934884,0,-0.013984,-0.000541,0.013994,-177.785599
14 3.7927,8.914156,-0.202018,8.916445,-1.298250,100,1,01.01.2005
   00:03:28.445,0.00,9.1275,-0.2150,3.2,310584568.6101,178.6158,1.2,113228740.0244,-0.0349,0,2227,4294934885,0,-0.017995,-0.000711,0.018009,-177.738310
15 2.0691,8.927141,-0.271977,8.931283,-1.745054,100,1,01.01.2005
   00:03:37.600,0.00,9.1456,-0.2859,3.2,285380442.0784,178.1448,1.2,103812519.8120,-0.0645,0,2226,4294934885,0,-0.013201,0.000192,0.013202,179.167287
16 1.1288,8.941671,-0.397832,8.950517,-2.547517,100,1,01.01.2005
   00:03:46.855,0.00,9.1513,-0.4178,3.2,299208244.6465,177.3396,1.2,108714303.6892,-0.0464,0,2225,4294934885,0,-0.022282,-0.002517,0.022424,-173.556158
17 0.6158,8.955628,-0.569146,8.973695,-3.636360,100,1,01.01.2005
   00:03:54.910,0.00,9.1684,-0.5897,3.2,274583293.2770,176.2800,1.2,99479621.6598,-0.0395,0,2224,4294934886,0,-0.019416,0.001328,0.019461,176.087711
18 0.3360,8.897396,-0.861426,8.938999,-5.530012,100,1,01.01.2005
   00:04:05.665,0.00,9.1065,-0.8852,3.2,502323222.5447,174.4396,1.2,182741886.8858,-0.0082,0,2222,4294934887,0,-0.021308,0.005684,0.022053,165.063048
19 0.1833,8.713899,-1.314922,8.812551,-8.581157,100,1,01.01.2005
   00:04:21.420,0.00,8.9210,-1.3485,3.2,907306705.5635,171.3038,1.2,334720537.9517,-0.1002,0,2220,4294934888,0,-0.018167,0.007514,0.019660,157.529092
20 0.1000,8.486745,-2.046857,8.730089,-13.559797,100,1,01.01.2005
   00:04:46.275,0.00,8.6861,-2.1060,3.2,1646513937.6813,166.3398,1.2,613178276.9688,-0.0314,0,2218,4294934888,0,-0.019478,0.000802,0.019495,177.642933
```

Grafische Darstellung der Temperaturveränderung von Zelle 5

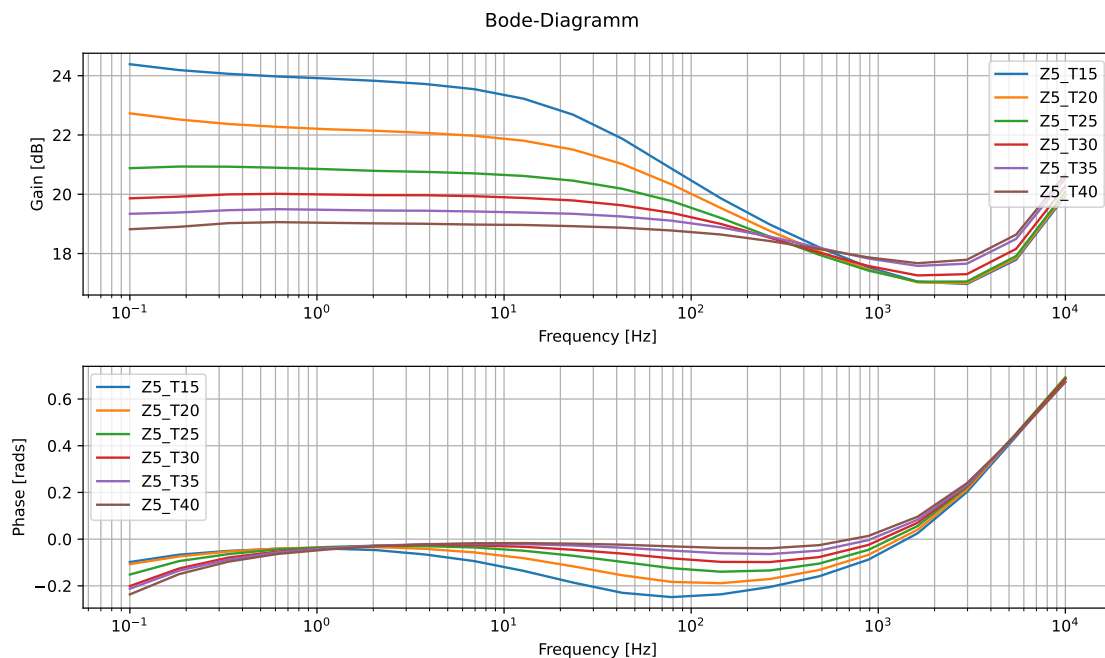


Abbildung I.22.: Bodeplot der Messung

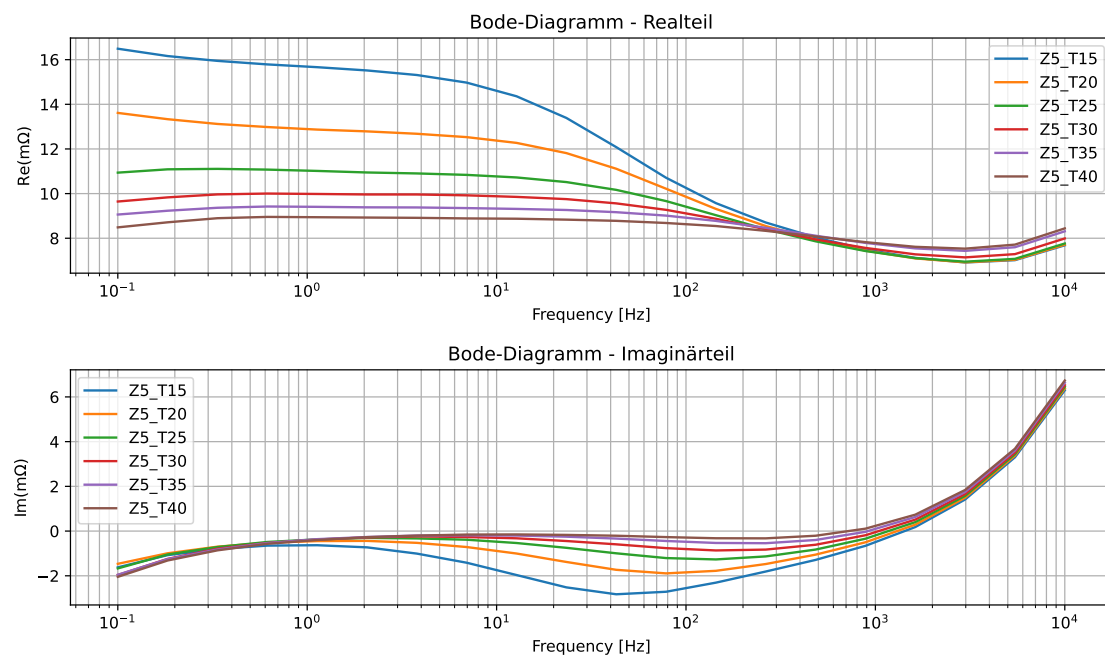


Abbildung I.23.: Real- und Imaginärteil der Messung

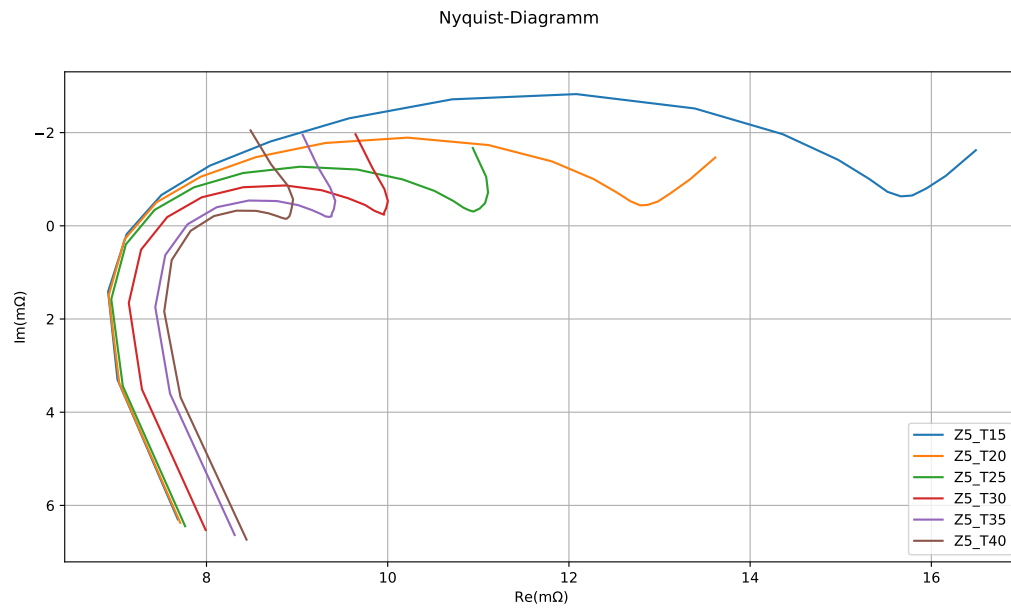


Abbildung I.24.: Nyquistplot der Messung

J. Auswertung Zellalterung

Python-Script der Auswertung

```
1 # Tobias Schwinghammer
2 # Masterarbeit 2023
3 # alterung_Auswertung
4 # 14.11.2023
5 import numpy as np
6 import matplotlib.pyplot as plt
7
8 import pandas as pd
9
10
11 def plot():
12     # simulativ
13     sim_data = pd.read_csv("Alterung_Sim_Ergebnisse.csv", header=None)
14
15     # mathematisch
16     current = 10 / 4
17     singleRes = 0.010
18     sweepRes = np.linspace(0.01, 1, 5000)
19     resistance = 1 / (((1 / singleRes) * 8) + 1 / sweepRes)
20
21     voltage = resistance * current
22     m_sweepRes = sweepRes * 1000
23     m_voltage = voltage * 1000
24
25     # messtechnisch
26     res = [11, 21, 31, 41, 51, 501, 3001]
27     voltage = [3.182, 3.214, 3.248, 3.252, 3.267, 3.282, 3.284]
28
29     fig, ax = plt.subplots()
30     fig.suptitle("Spannung bei gealterter Zelle")
31     fig.subplots_adjust(left=0.15,
32                        bottom=0.12,
33                        right=0.95,
34                        top=0.9,
35                        wspace=0.4,
36                        hspace=0.5)
37
38     ax.plot(sim_data[0], sim_data[1], label="simulativ") # simulativ
39     ax.plot(res, voltage, '-o', label="messtechnisch") # messtechnisch
40     # ax.plot(m_sweepRes, m_voltage, label="mathematisch") # mathematisch
41
42     plt.legend(loc='lower right')
43     ax.grid(True)
44     ax.grid(True, which='minor')
45     ax.set_xlabel("Widerstand in Milliohm [mOhm]")
46     ax.set_xlim(5, 100)
47     # ax.set_xlim(5, 600)
48     ax.set_ylim(3.15, 3.3)
49     # ax.set_ylim(2.75, 3.35)
50     ax.set_ylabel("Spannung(mV)")
51     plt.xticks([10, 50, 100, 150, 200, 250, 300])
52     plt.yticks([3.15, 3.175, 3.20, 3.225, 3.25, 3.275, 3.30])
53     # plt.yticks(list(plt.yticks()[0]))
54
```

```
55
56 if __name__ == '__main__':
57     plot()
58     plt.savefig("alterung_Auswertung_zoom.pdf")
59     # plt.savefig("alterung_Auswertung_ges.pdf")
60     plt.show()
```

Verwendete Simulationsdaten als CSV-Datei

```
1 11.0,3.083333332485873
2 18.49122807017544,3.1637628309746297
3 25.982456140350877,3.2005796895772485
4 33.473684210526315,3.2216908931391672
5 40.96491228070175,3.235379495169293
6 48.45614035087719,3.2449748342049825
7 55.94736842105263,3.2520741031234905
8 63.43859649122807,3.2575391691777162
9 70.9298245614035,3.261876063329741
10 78.42105263157895,3.265401440020952
11 85.91228070175438,3.2683235879261945
12 93.40350877192982,3.2707851327898823
13 100.89473684210526,3.2728870223830784
14 108.3859649122807,3.2747027139218305
15 115.87719298245614,3.2762869355184665
16 123.36842105263158,3.2776812976101004
17 130.859649122807,3.2789180009554784
18 138.35087719298247,3.2800223541592834
19 145.8421052631579,3.281014523984265
20 153.33333333333331,3.281910778040952
21 160.82456140350877,3.282724383692585
22 168.31578947368422,3.2834662692410035
23 175.80701754385964,3.284145517642544
24 183.29824561403507,3.284769740235482
25 190.78947368421052,3.285345363177353
26 198.28070175438597,3.285877849485262
27 205.7719298245614,3.286371872961463
28 213.26315789473682,3.2868314557426626
29 220.75438596491227,3.2872600780512373
30 228.24561403508773,3.2876607664883517
31 235.73684210526315,3.2880361656095483
32 243.22807017543857,3.2883885963616484
33 250.71929824561403,3.288720104113512
34 258.2105263157895,3.289032498377024
35 265.70175438596493,3.2893273858519843
36 273.1929824561403,3.289606198064841
37 280.6842105263158,3.289870214609331
38 288.17543859649123,3.2901205827820617
39 295.66666666666663,3.290358334248255
40 303.1578947368421,3.2905843992525834
41 310.64912280701753,3.290799618782495
42 318.140350877193,3.2910047550230637
43 325.63157894736844,3.291200500375164
44 333.12280701754383,3.291387485264217
45 340.6140350877193,3.2915662849216654
46 348.10526315789474,3.2917374252967777
47 355.59649122807014,3.291901388222801
48 363.0877192982456,3.2920586159483474
49 370.57894736842104,3.2922095151196658
50 378.0701754385965,3.2923544602936063
51 385.56140350877195,3.292493797041262
52 393.05263157894734,3.292627844698199
53 400.5438596491228,3.292756898808647
54 408.03508771929825,3.292881233299741
55 415.52631578947364,3.293001102423456
56 423.0175438596491,3.2931167424907155
57 430.50877192982455,3.293228373427964
58 438.0,3.293336200171409
59 445.49122807017545,3.293440413924271
60 452.98245614035085,3.293541193286508
```

J Auswertung Zellalterung

61 460.4736842105263,3.293638705278337
62 467.96491228070175,3.2937331062619455
63 475.45614035087715,3.2938245427797312
64 482.9473684210526,3.2939131523121867
65 490.43859649122805,3.293999063968241
66 497.9298245614035,3.294082399112775
67 505.42105263157896,3.2941632719390697
68 512.9122807017543,3.2942417899899326
69 520.4035087719299,3.2943180546356357
70 527.8947368421052,3.2943921615102316
71 535.3859649122807,3.294464200911659
72 542.8771929824561,3.2945342581691333
73 550.3684210526316,3.2946024139792978
74 557.859649122807,3.2946687447177725
75 565.3508771929825,3.2947333227231317
76 572.8421052631579,3.2947962165614237
77 580.3333333333333,3.294857491267992
78 587.8245614035087,3.2949172085726124
79 595.3157894736842,3.294975427106043
80 602.8070175438596,3.2950322025925303
81 610.2982456140351,3.295087588028517
82 617.7894736842105,3.295141633845409
83 625.280701754386,3.295194388065484
84 632.7719298245614,3.295245896441992
85 640.2631578947369,3.295296202592701
86 647.7543859649122,3.2953453481228108
87 655.2456140350877,3.295393372739377
88 662.7368421052631,3.2954403143588644
89 670.2280701754386,3.295486209206472
90 677.719298245614,3.295531091910061
91 685.2105263157895,3.295574995586298
92 692.7017543859649,3.2956179519228126
93 700.1929824561403,3.2956599912544746
94 707.6842105263157,3.2957011426348957
95 715.1754385964912,3.295741433902578
96 722.6666666666666,3.2957808917447946
97 730.1578947368421,3.2958195417560825
98 737.6491228070175,3.295857408493399
99 745.140350877193,3.2958945155283517
100 752.6315789473684,3.2959308854963107
101 760.1228070175439,3.2959665401419302
102 767.6140350877192,3.296001500363605
103 775.1052631578947,3.2960357862523084
104 782.5964912280701,3.296069417132557
105 790.0877192982456,3.296102411596718
106 797.578947368421,3.296134787540433
107 805.0701754385965,3.2961665621948013
108 812.561403508772,3.2961977521560186
109 820.0526315789473,3.2962283734160445
110 827.5438596491227,3.2962584413880354
111 835.0350877192982,3.296287970933732
112 842.5263157894736,3.29631697638739
113 850.0175438596491,3.2963454715786367
114 857.5087719298245,3.2963734698544123
115 865.0,3.2964009841011856
116 872.4912280701755,3.2964280267626602
117 879.9824561403509,3.2964546098602296
118 887.4736842105262,3.29648074500987
119 894.9649122807017,3.2965064434396787
120 902.4561403508771,3.2965317160052185
121 909.9473684210526,3.2965565732052458
122 917.438596491228,3.2965810251966934
123 924.9298245614035,3.2966050818072388
124 932.421052631579,3.2966287525501494
125 939.9122807017543,3.2966520466353755
126 947.4035087719298,3.2966749729820966
127 954.8947368421052,3.296697540230438
128 962.3859649122807,3.296719756751652
129 969.8771929824561,3.2967416306588277
130 977.3684210526316,3.2967631698170927
131 984.859649122807,3.2967843818519307

J Auswertung Zellalterung

132 992.3508771929825,3.2968052741597176
133 999.8421052631579,3.2968258539150606
134 1007.333333333333,3.2968461280797454
135 1014.8245614035087,3.2968661034101507
136 1022.3157894736842,3.2968857864649763
137 1029.8070175438597,3.2969051836125174
138 1037.298245614035,3.296924301037241
139 1044.7894736842104,3.29694314474667
140 1052.280701754386,3.296961720577441
141 1059.7719298245613,3.2969800342012525
142 1067.2631578947369,3.296998091131059
143 1074.7543859649122,3.2970158967260224
144 1082.2456140350878,3.2970334561978185
145 1089.7368421052631,3.2970507746143776
146 1097.2280701754385,3.2970678569055663
147 1104.719298245614,3.2970847078679086
148 1112.2105263157894,3.2971013321687037
149 1119.701754385965,3.29711773435068
150 1127.1929824561403,3.29713391883599
151 1134.6842105263158,3.29714988992992
152 1142.1754385964912,3.297165651825492
153 1149.6666666666665,3.297181208605676
154 1157.157894736842,3.297196564249194
155 1164.6491228070174,3.2972117226311974
156 1172.140350877193,3.2972266875287684
157 1179.6315789473683,3.297241462622757
158 1187.122807017544,3.297256051501657
159 1194.6140350877192,3.297270457663732
160 1202.1052631578948,3.297284684520153
161 1209.5964912280701,3.2972987353977965
162 1217.0877192982455,3.2973126135418327
163 1224.578947368421,3.2973263221177804
164 1232.0701754385964,3.297339864214926
165 1239.561403508772,3.297353242847543
166 1247.0526315789473,3.2973664609571083
167 1254.5438596491229,3.297379521416016
168 1262.0350877192982,3.2973924270277433
169 1269.5263157894738,3.297405180529838
170 1277.017543859649,3.2974177845958246
171 1284.5087719298244,3.2974302418369716
172 1292.0,3.2974425548034976
173 1299.4912280701753,3.297454725988185
174 1306.982456140351,3.297466757825322
175 1314.4736842105262,3.2974786526943283
176 1321.9649122807018,3.297490412921239
177 1329.4561403508771,3.2975020407787845
178 1336.9473684210525,3.297513538489755
179 1344.438596491228,3.2975249082266753
180 1351.9298245614034,3.297536152114459
181 1359.421052631579,3.2975472722310895
182 1366.9122807017543,3.297558270609235
183 1374.4035087719299,3.297569149236774
184 1381.8947368421052,3.29757991005919
185 1389.3859649122805,3.2975905549795934
186 1396.877192982456,3.2976010858605234
187 1404.3684210526314,3.2976115045248373
188 1411.859649122807,3.297621812756689
189 1419.3508771929824,3.2976320123024934
190 1426.842105263158,3.2976421048721902
191 1434.333333333333,3.2976520921401065
192 1441.8245614035088,3.2976619757454704
193 1449.3157894736842,3.297671757294251
194 1456.8070175438595,3.2976814383588815
195 1464.298245614035,3.2976910204796797
196 1471.7894736842104,3.2977005051659365
197 1479.280701754386,3.297709893896295
198 1486.7719298245613,3.2977191881194896
199 1494.2631578947369,3.2977283892555533
200 1501.7543859649122,3.297737498695711
201 1509.2456140350878,3.2977465178040672
202 1516.7368421052631,3.2977554479176345

J Auswertung Zellalterung

203 1524.2280701754385,3.297764290346993
204 1531.719298245614,3.29777304637753
205 1539.2105263157894,3.2977817172692663
206 1546.701754385965,3.2977903042578567
207 1554.1929824561403,3.297798808555352
208 1561.6842105263158,3.297807231350523
209 1569.1754385964912,3.297815573809528
210 1576.666666666665,3.297823837075872
211 1584.157894736842,3.2978320222722495
212 1591.6491228070174,3.2978401304996883
213 1599.140350877193,3.2978481628387257
214 1606.6315789473683,3.2978561203499175
215 1614.122807017544,3.297864004074016
216 1621.6140350877192,3.2978718150326265
217 1629.1052631578946,3.297879554228402
218 1636.5964912280701,3.2978872226457883
219 1644.0877192982455,3.297894821251501
220 1651.578947368421,3.2979023509944616
221 1659.0701754385964,3.2979098128063313
222 1666.561403508772,3.297917207602667
223 1674.0526315789473,3.297924536282005
224 1681.5438596491229,3.297931799727233
225 1689.0350877192982,3.2979389988054812
226 1696.5263157894735,3.2979461343682552
227 1704.017543859649,3.2979532072528075
228 1711.5087719298244,3.297960218281522
229 1719.0,3.2979671682617155
230 1726.4912280701753,3.297974057987755
231 1733.982456140351,3.2979808882397217
232 1741.4736842105262,3.297987659784451
233 1748.9649122807018,3.2979943733754973
234 1756.4561403508771,3.2980010297536393
235 1763.9473684210525,3.2980076296473477
236 1771.438596491228,3.298014173772264
237 1778.9298245614034,3.2980206628326214
238 1786.421052631579,3.2980270975201424
239 1793.9122807017543,3.298033478515627
240 1801.4035087719299,3.2980398064883514
241 1808.8947368421052,3.2980460820960458
242 1816.3859649122805,3.298052305986579
243 1823.877192982456,3.298058478796275
244 1831.3684210526314,3.2980646011515953
245 1838.859649122807,3.298070673668385
246 1846.3508771929824,3.2980766969530806
247 1853.842105263158,3.298082671601527
248 1861.3333333333333,3.29808859820093
249 1868.8245614035086,3.2980944773281813
250 1876.3157894736842,3.2981003095517103
251 1883.8070175438595,3.2981060954303505
252 1891.298245614035,3.2981118355143777
253 1898.7894736842104,3.2981175303453463
254 1906.280701754386,3.2981231804565025
255 1913.7719298245613,3.298128786372173
256 1921.2631578947369,3.2981343486091133
257 1928.7543859649122,3.298139867675865
258 1936.2456140350876,3.298145344072928
259 1943.7368421052631,3.2981507782934316
260 1951.2280701754385,3.29815617082258
261 1958.719298245614,3.298161522138276
262 1966.2105263157894,3.2981668327111713
263 1973.701754385965,3.298172103005058
264 1981.1929824561403,3.2981773334763522
265 1988.6842105263158,3.29818252457463
266 1996.1754385964912,3.2981876767427276
267 2003.6666666666665,3.298192790417079
268 2011.157894736842,3.2981978660275417
269 2018.6491228070174,3.298202903997529
270 2026.140350877193,3.298207904743827
271 2033.6315789473683,3.298212868678096
272 2041.122807017544,3.2982177962046686
273 2048.6140350877195,3.2982226877231944

J Auswertung Zellalterung

274 2056.1052631578946,3.2982275436264845
275 2063.59649122807,3.2982323643023728
276 2071.0877192982457,3.298237150132839
277 2078.578947368421,3.2982419014940954
278 2086.0701754385964,3.2982466187572936
279 2093.561403508772,3.2982513022883335
280 2101.0526315789475,3.298255952447609
281 2108.5438596491226,3.2982605695904392
282 2116.035087719298,3.2982651540674532
283 2123.5263157894738,3.298269706223927
284 2131.017543859649,3.2982742264003138
285 2138.5087719298244,3.2982787149328026
286 2146.0,3.2982831721521246
287 2153.4912280701756,3.2982875983850195
288 2160.9824561403507,3.298291993953598
289 2168.4736842105262,3.2982963591753225
290 2175.964912280702,3.2983006943632174
291 2183.456140350877,3.2983049998263896
292 2190.9473684210525,3.298309275869438
293 2198.438596491228,3.2983135227929865
294 2205.9298245614036,3.298317740893314
295 2213.4210526315787,3.2983219304629987
296 2220.9122807017543,3.2983260917901562
297 2228.40350877193,3.29833022515996
298 2235.894736842105,3.298334330852937
299 2243.3859649122805,3.298338409146258
300 2250.877192982456,3.2983424603129796
301 2258.3684210526317,3.298346484623244
302 2265.859649122807,3.2983504823428156
303 2273.3508771929824,3.298354453734944
304 2280.842105263158,3.2983583990582908
305 2288.333333333333,3.298362318569037
306 2295.8245614035086,3.298366212519532
307 2303.315789473684,3.2983700811589016
308 2310.8070175438597,3.2983739247334642
309 2318.298245614035,3.2983774348562
310 2325.7894736842104,3.2983815376552563
311 2333.280701754386,3.29838530747927
312 2340.7719298245615,3.298389053190633
313 2348.2631578947367,3.2983927750203015
314 2355.754385964912,3.2983964731960613
315 2363.245614035088,3.298400147942373
316 2370.736842105263,3.298403799481459
317 2378.2280701754385,3.298407428032196
318 2385.719298245614,3.298411033811269
319 2393.2105263157896,3.2984146170324333
320 2400.7017543859647,3.2984181779063313
321 2408.1929824561403,3.2984217166415135
322 2415.684210526316,3.298425233443917
323 2423.175438596491,3.2984287285168574
324 2430.6666666666665,3.298432202060957
325 2438.157894736842,3.2984356542746998
326 2445.6491228070176,3.298439085353667
327 2453.1403508771928,3.2984424954915834
328 2460.6315789473683,3.2984458848795852
329 2468.122807017544,3.298449253706218
330 2475.614035087719,3.298452602158373
331 2483.1052631578946,3.2984559304201766
332 2490.59649122807,3.298459238673659
333 2498.0877192982457,3.2984625270988324
334 2505.578947368421,3.2984657958732013
335 2513.0701754385964,3.2984690451725234
336 2520.561403508772,3.2984722751705444
337 2528.0526315789475,3.298475486038275
338 2535.5438596491226,3.2984786779454622
339 2543.035087719298,3.298481851059491
340 2550.5263157894738,3.2984850055459285
341 2558.017543859649,3.2984881415680842
342 2565.5087719298244,3.2984912592880082
343 2573.0,3.2984943588650957
344 2580.4912280701756,3.298497440457252

J Auswertung Zellalterung

345 2587.9824561403507,3.298500504220816
346 2595.4736842105262,3.2985035503098423
347 2602.964912280702,3.2985065788769603
348 2610.456140350877,3.298509590073106
349 2617.9473684210525,3.2985125840467835
350 2625.438596491228,3.2985155609457424
351 2632.9298245614036,3.2985185209155636
352 2640.4210526315787,3.2985214640999745
353 2647.9122807017543,3.2985243906418553
354 2655.40350877193,3.298527300681476
355 2662.894736842105,3.2985301943583867
356 2670.3859649122805,3.2985330718099597
357 2677.877192982456,3.298535933172505
358 2685.3684210526317,3.2985387785802667
359 2692.859649122807,3.2985416081665244
360 2700.3508771929824,3.298544422063088
361 2707.842105263158,3.2985472203996204
362 2715.333333333333,3.2985500033051727
363 2722.8245614035086,3.298552770906981
364 2730.315789473684,3.298555523330882
365 2737.8070175438597,3.2985582607013777
366 2745.298245614035,3.2985609831415523
367 2752.7894736842104,3.298563690773399
368 2760.280701754386,3.2985663837174433
369 2767.771929824561,3.2985690620924992
370 2775.2631578947367,3.2985717260169407
371 2782.754385964912,3.2985743756070574
372 2790.245614035088,3.2985770109785824
373 2797.736842105263,3.2985796322451892
374 2805.2280701754385,3.2985822395202815
375 2812.719298245614,3.2985848329153207
376 2820.2105263157896,3.2985874125408885
377 2827.7017543859647,3.2985899785063912
378 2835.1929824561403,3.298592530920069
379 2842.684210526316,3.29859506988888
380 2850.175438596491,3.298597595518956
381 2857.666666666665,3.2986001079150764
382 2865.157894736842,3.2986026071809635
383 2872.6491228070176,3.2986050934191025
384 2880.1403508771928,3.2986075667314827
385 2887.6315789473683,3.29861002721822
386 2895.122807017544,3.2986124749790293
387 2902.614035087719,3.298614910112553
388 2910.1052631578946,3.2986173327157062
389 2917.59649122807,3.2986197428857076
390 2925.0877192982457,3.2986221407175584
391 2932.578947368421,3.2986245263056375
392 2940.0701754385964,3.298626899743967
393 2947.561403508772,3.2986292611244963
394 2955.052631578947,3.2986316105395135
395 2962.5438596491226,3.2986339480793263
396 2970.035087719298,3.2986362738339974
397 2977.5263157894738,3.298638587892096
398 2985.017543859649,3.2986408903419306
399 2992.5087719298244,3.2986431812707266
400 3000.0,3.2986454607643547

K. Datenblätter

K.1. Wieland-W55

Wieland-K55®
CuNi3Si1Mg
C70250

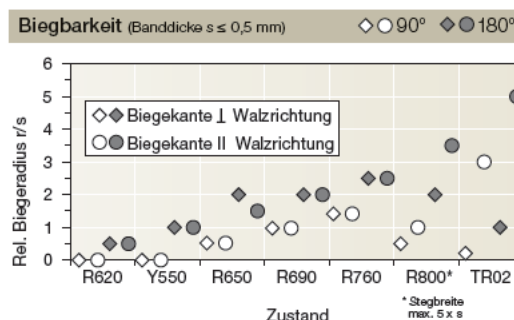
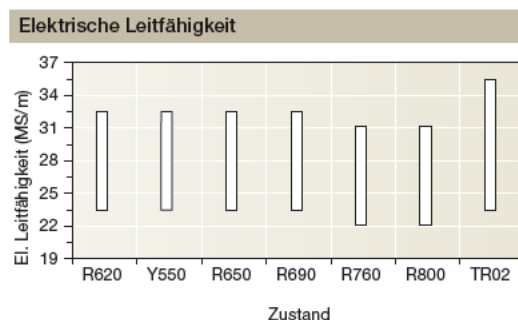
Walzprodukte

Wieland

Werkstoffbezeichnung		Zusammensetzung (Richtwerte)		Typische Anwendungen
EN	nicht genormt	Ni	3 %	- Bauteile der Elektrotechnik - Stanzbiegeteile - Relaisfedern - Halbleiterbauelemente - Steckverbinder geeignet für Anwendungen bei erhöhten Temperaturen
UNS*	C70250	Si	0,65 %	
* Unified Numbering System (USA)		Mg	0,15 %	
		Cu	Rest	

Physikalische Eigenschaften*			Bearbeitungshinweise		Korrosionsbeständigkeit
Elektrische Leitfähigkeit	MS/m	25	Kaltumformen	gut	Wieland-K55 besitzt eine gute Korrosionsbeständigkeit in natürlicher Atmosphäre. Es ist unempfindlich gegen Spannungsrisskorrosion.
Leitfähigkeit	%IACS	43	Spanen	weniger geeignet	
Wärmeleitfähigkeit	W/(m·K)	190	Galvanisieren	gut	
Temperaturkoeff. des elektrischen Widerstandes**	10 ⁻³ /K	1,8	Tauchverzinnen	gut	
Wärmeausdehnungskoeffizient**	10 ⁻⁶ /K	17,6	Weichlöten	gut	
Dichte	g/cm³	8,82	Widerstandsschweißen	mittel	
Elastizitätsmodul	GPa	130	Schutzgas-schweißen	gut	
Spezifische Wärme	J/(g·K)	0,399	Laserschweißen	weniger geeignet	
Querkontraktionszahl		0,34			
* Richtwerte bei Raumtemperatur					
** Zwischen 0 und 300 °C					

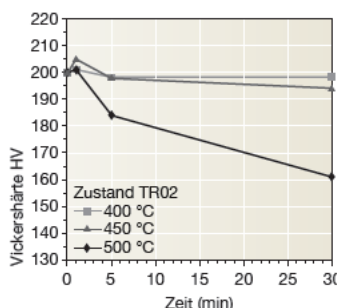
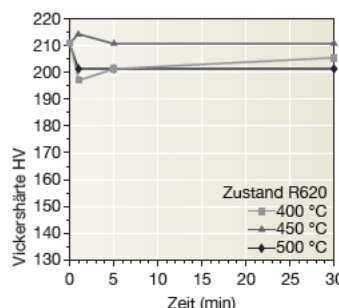
Mechanische Eigenschaften								
Zustand		R620	Y550	R650	R690	R760	R800	TR02
Zugfestigkeit R _m	MPa	620–700	620–740	650–780	690–800	760–840	800–900	608–725
0,2 %-Dehngrenze R _{p0,2}	MPa	≥ 500	≥ 550	≥ 585	≥ 655	≥ 720	≥ 750	550–650
Bruchdehnung A _{50mm}	%	≥ 14	≥ 14	≥ 7	≥ 5	≥ 5	≥ 1	≥ 6
Härte HV (nur zur Information)		(180–220)	(180–220)	(200–240)	(200–240)	(210–250)	(230–270)	(180–220)



Wieland-K55®

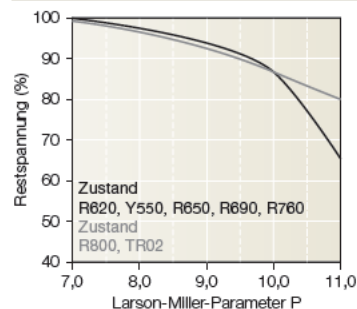
CuNi3Si1Mg
C70250

Erweichungsbeständigkeit



Vickershärte
nach Wärmebehandlung
(typische Werte)

Thermische Spannungsrelaxation



Restspannung nach thermischer Relaxation in Abhängigkeit vom Larson-Miller-Parameter P (F. R. Larson, J. Miller, Trans ASME74 (1952) 765-775), berechnet durch:

$$P = (20 + \log(t)) \cdot (T + 273) \cdot 0,001$$

Zeit t in Stunden, Temperatur T in °C.

Beispiel: P = 9 ist äquivalent zu 1000 h/118 °C.

Gemessen an thermisch entspannten Bandproben nach der Ringmethode. Die Gesamtrelaxation ist abhängig von der aufgetragenen Spannung. Zusätzlich wird sie durch Kaltverformung z. T. deutlich erhöht.

Biegewechselfestigkeit

Die Biegewechselfestigkeit ist definiert als die maximale Biegespannungsschwingweite, bei der ein Werkstoff unter symmetrischer Wechselbelastung 10⁷ Lastspiele erträgt, ohne zu brechen. Sie ist abhängig vom geprüften Festigkeitszustand und beträgt etwa 1/3 der Zugfestigkeit R_m.

Lieferbare Ausführungen

- Bänder in Ringen mit Außendurchmesser bis 1.400 mm
- Gespulte Bänder mit Spulengewichten bis 1,5 t
- Multicoll bis 5 t
- Feuerverzinnete Bänder
- Profilgefräste Bänder
- Bleche
- Schutzbeschichtete Bänder und Bleche

Lieferbare Abmessungen

- Banddicken ab 0,10 mm, dünnere Abmessungen auf Anfrage
- Bandbreiten ab 3 mm, jedoch mindestens 10 x Banddicke

Wieland-Werke AG www.wieland.de

Graf-Arco-Str. 36, 89079 Ulm, Deutschland, Telefon +49 731 944 2030, Fax +49 731 944 4257, info@wieland.de

Diese Drucksache unterliegt keinem Änderungsdienst. Abgesehen von Vorsatz oder grober Fahrlässigkeit übernehmen wir für ihre inhaltliche Richtigkeit keine Haftung. Die Produkteigenschaften gelten als nicht zugesichert und ersetzen keine Beratung durch unsere Experten.

K.2. Messingblech CW508L (CuZn37)



Werkstoffdatenblatt

Messing

Materials Services
Materials Germany
Technischer Verkauf

Seite 1/4

Werkstoffbezeichnung:	EN-Werkstoff-Nr.	DIN-Werkstoff-Nr.
	CW508L [CuZn37]	2.0321

Geltungsbereich

Dieses Datenblatt gilt für gezogene und gepresste Langprodukte aus der Kupfer-Zink-Legierung CW508L.

Anwendung

Der Werkstoff CW508L weist mittlere Festigkeitswerte auf und besitzt eine gute Korrosionsbeständigkeit gegenüber Wasser, Wasserdampf. CW508L ist gut schweißbar und sehr gut kaltumformbar. Der Werkstoff findet zum Beispiel Anwendung für Sanitärarmaturen, Wasserkästen für Kfz-Kühler, Kontakteile in Schalter und Blechblasinstrumente.

Chemische Zusammensetzung in %

Cu	Al	Fe	Ni	Pb	Sn	Zn
62,0-64,0	≤ 0,05	≤ 0,10	≤ 0,3	≤ 0,1	≤ 0,1	Rest

Andere Beimengungen: Insgesamt: max. 0,1 %

Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur (Stangen) gem. EN 12163

Lieferzustand	Maße		Dehngrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung			Härte
	D ^{a)} [mm]	S ^{b)} [mm]	R _{p0,2} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A _{100 mm} [%]	A _{11,3} [%]	A [%]	HBW
M	Alle	Alle	Wie gefertigt					
R290	4-80	4-80	≤ 230	≥ 290	-	≥ 40	≥ 45	-
H070	4-80	4-80	-	-	-	-	-	70-110
R370	4-40	4-35	≥ 240	≥ 370	-	≥ 12	≥ 14	-
H105	4-40	4-35	-	-	-	-	-	105-145
R460	4-10	4-6	≥ 330	≥ 460	-	≥ 6	≥ 8	-
H140	4-10	4-6	-	-	-	-	-	≥ 140

^{a)} D = Durchmesser von Rundstangen

^{b)} S = Schlüsselweite von Quadrat-, Sechskant-, und Achteckstangen

thyssenkrupp Schulte GmbH, thyssenkrupp Allee 1, 45143 Essen, Deutschland
T: 0201 844-0, F: 0201 844-536000, www.thyssenkrupp-schulte.de
Geschäftsführung: Detlef Schotten (Vorsitzender), Dr. Tobias Hegmanns, Michael Labodt, Peter Zarth
Sitz der Gesellschaft: Essen, Registergericht: Essen HRB 26718, USt-ID: DE811154786, Steuer-Nr.: 112/5795/0833
Bankverbindung: Commerzbank AG, IBAN: DE38 3004 0000 0204 0533 00, BIC: COBADEFFXXX



Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur (Bleche und Bänder) gem. EN 1652

Lieferzustand	Dicke [mm]	Dehngrenze $R_{p0,2}$	Zugfestigkeit R_m	Bruchdehnung		Härte HV	Korngröße [mm]
		[N/mm ²]	[N/mm ²]	A_{50mm} für Dicken ≤ 2,5 mm [%]	A für Dicken > 2,5 mm [%]		
R300	0,2-5,0	(≤ 180)	300-370	≥ 38	≥ 48	-	-
H065		-	-	-	-	55-90	-
G010	0,2-1,0	(210)	(410)	(30)	-	≤ 120	≤ 0,015
G020	0,2-2,0	(150)	(360)	(40)	-	≤ 95	0,015-0,030
G030		(130)	(340)	(40)	-	≤ 90	0,020-0,040
G050		(110)	(330)	(40)	-	≤ 80	0,035-0,070
R350	0,2-5,0	(≥ 170)	350-430	≥ 19	≥ 28	-	-
H095		-	-	-	-	95-125	-
R410	0,2-5,0	(≥ 300)	410-490	≥ 8	≥ 12	-	-
H120		-	-	-	-	120-155	-
R480	0,2-2,0	(≥ 430)	480-560	≥ 3	-	-	-
H150		-	-	-	-	150-180	-
R550	0,2-2,0	(≥ 500)	550	-	-	-	-
H170		-	-	-	-	≥ 170	-

Die Zahlen in Klammern sind keine Anforderung der Norm, sondern sind nur zur Information angeben

Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur (Rohre) gem. EN 12449

Lieferzustand	Wanddicke	Dehngrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Härte	
	t [mm]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	R_m [N/mm ²]	A [%]	HV	HBW
M	≤ 20	wie gefertigt				
R300 ^{a)}	≤ 20	≤ 220	≥ 300	≥ 45	-	-
H060 ^{a)}	≤ 20	-	-	-	60-90	55-85
R370	≤ 10	≥ 200	≥ 370	≥ 25	-	-
H085	≤ 10	-	-	-	85-120	80-115
R440	≤ 5	≥ 320	≥ 440	≥ 10	-	-
H115	≤ 5	-	-	-	≥ 115	≥ 110

Mechanische Eigenschaften bei Raumtemperatur (Drähte) gem. EN 12166

Lieferzustand	Maße	Dehngrenze	Zugfestigkeit	Bruchdehnung			Härte
	Ø [mm]	R _{p0,2} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A _{100 mm} [%]	A _{11,3} [%]	A [%]	
M	Alle	Wie gefertigt					
R290	0,5-20,0	≤ 230	≥ 290	≥ 30	≥ 40	≥ 45	-
H055	1,5-20,0	-	-	-	-	-	55-110
R370	0,5-20,0	≥ 240	≥ 370	≥ 10	≥ 12	≥ 14	-
H095	1,5-20,0	-	-	-	-	-	95-140
R460	0,5-5,0	≥ 330	≥ 460	≥ 4	≥ 6	-	-
H115	1,5-5,0	-	-	-	-	-	115-155
R550	0,5-4,0	≥ 450	≥ 550	≥ 2	≥ 5	-	-
H130	1,5-4,0	-	-	-	-	-	130-170
R700	0,5-4,0	≥ 550	≥ 700	-	-	-	-
H160	1,5-4,0	-	-	-	-	-	≥ 160

Anhaltsangaben für einige physikalische Eigenschaften

Dichte bei 20 °C [kg/dm ³]	Elektrische Leitfähigkeit bei 20 °C [MS/m]	Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C [W/m•K]	Spezifische Wärmekapazität bei 20 °C [J/kg•K]	Elastizitätsmodul bei 20 °C [MPa]	Schubmodul [MPa]
8,44	15	120	377	106000	-

Hinweise auf Temperaturen für die Wärmebehandlung

Weichglühen Temperatur	Entspannungsglühen Temperatur	Warmumformen Temperatur
450-650 °C	200-300 °C	750-850 °C

Verarbeitung/Schweißen

Der Werkstoff ist sehr gut kaltumformbar (Kaltumformgrad zwischen den Glühungen max. 65 %) und warmumformbar. Des Weiteren ist der Werkstoff schweißbar, aber, wenn das Schweißen nicht fachmännisch durchgeführt wird, kann eine hohe Zinkausdampfung auftreten, welche die Güte der Schweißnaht beeinträchtigt. Ein bevorzugtes Fügeverfahren für diesen Werkstoff ist Löten. CW505L ist nur mäßig bis schwer spanend zu bearbeiten.

Bemerkungen

Der Werkstoff ist RoHS-konform.



Herausgeber

thyssenkrupp Schulte GmbH
Technischer Verkauf
thyssenkrupp Allee 1
45143 Essen

Literaturhinweis

DIN EN 1652 : 1998-03	Beuth Verlag GmbH, Postfach, D-10772 Berlin
DIN EN 12163 : 2016-11	
DIN EN 12166 : 2016-11	
DIN EN 12449 : 2019-12	
Kupfer-Datenblätter	Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V. D-40239 Düsseldorf

Wichtiger Hinweis

Die in diesem Datenblatt enthaltenen Angaben über die Beschaffenheit oder Verwendbarkeit von Materialien bzw. Erzeugnissen sind keine Eigenschaftszusicherungen, sondern dienen der Beschreibung.

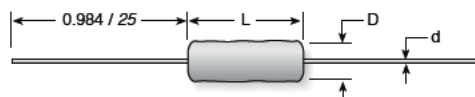
Die Angaben, mit denen wir Sie beraten wollen, entsprechen den Erfahrungen des Herstellers und unseren eigenen. Eine Gewähr für die Ergebnisse bei der Verarbeitung und Anwendung der Produkte können wir nicht übernehmen.

WL Series

Miniature Wirewound
Current Sense

DIMENSIONS

(in./mm)



Type	Power Rating (watts)	L	D	d
WLA	0.5	5.08 / 0.200	2.54 / 0.100	0.60 / 0.024
WLB	1	7.00 / 0.276	3.30 / 0.130	0.60 / 0.024
WLC	2	11.4 / 0.450	4.57 / 0.180	0.80 / 0.031

ORDERING INFORMATION

RoHS compliant
WLA R010 FET
Series Power Ohms Tolerance Package
A = 0.5 B = 1 C = 2 F = 1% J = 5% T = Tape

Standard Part Numbers for WL Series

Wattage:	0.5	1.0	2.0
Series:	WLA	WLB	WLC
Ohms			
0.005	WLA R005FET	WLB R005FET	
0.01	WLA R010FET	WLB R010FET	WLC R010FET
0.015	WLA R015FET	WLB R015FET	WLC R015FET
0.02	WLA R020FET	WLB R020FET	WLC R020FET
0.025	WLA R025FET	WLB R025FET	WLC R025FET
0.03	WLA R030FET	WLB R030FET	WLC R030FET
0.05	WLA R050FET	WLB R050FET	WLC R050FET
0.10	WLA R100FET	WLB R100FET	WLC R100FET

rev 9/20-1

1-866-9-OHMITE • Int'l 1-847-258-0300 • Fax 1-847-574-7522 • www.ohmite.com • info@ohmite.com

51



L. CD-Struktur

- Masterarbeit
- Messungen
 - Messergebnisse Original-Modul
 - Bilder Messaufbau Molicell P45B
 - Messergebnisse Molicell P45B
- Python-Skripte
 - Simulation eines R-RC-Modells
 - Simulation einer idealen 3s36p-Verschaltung
 - Simulation einer idealen ohmschen 3s36p-Verschaltung
 - Simulation der Zellalterung
 - Simulation der Zelltemperatur
 - Auswertung der Zellalterung
 - Auswertung Fuelcon Eismeter-Skript und Executable
- CAD-Konstruktion
 - Modulnachbildung
 - Zellschraubstock
- Dokumente

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

_____	_____	_____ 
Ort	Datum	Unterschrift im Original