

Technische Universität Chemnitz  
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik  
Professur für Mess- und Sensortechnik

**Vorbereitung und Protokoll zum Praktikum Elektrische Messtechnik**

**Versuch: RLC-Messung V1.0**

Versuchstag: 22.01.2019

Laborgruppe: BREEM12

Han, Bing

Weirauch, Julius

Email: [julius.weirauch@s2013.tu-chemnitz.de](mailto:julius.weirauch@s2013.tu-chemnitz.de)

Signum / Bemerkung.....

## 2. Grundlagen / Versuchsvorbereitung

1. Mit welcher Begründung wird in der Betriebsmesstechnik vorwiegend das Ausschlagverfahren eingesetzt, während in der Labormesstechnik das Abgleichverfahren dominiert? Nennen Sie Vor- und Nachteile der beiden Verfahren! (Tabellarische Gegenüberstellung) Nennen Sie Beispiele einer Anwendung für das jeweilige Messverfahren!

Ausschlagverfahren	Abgleichverfahren
- Kurze Messdauer - Rückwirkung auf das Messergebnis => geringere Genauigkeit	- lange Messdauer, da meist manuell nachjustiert werden muss - im Idealfall keine Rückwirkung auf die Messgröße => höhere Genauigkeit, die von der Messnormalen abhängig ist

Beispiele:

Voltmeter, Ladedruckanzeige im Auto, Geigerzähler, Öldruckmesser, Drehzahlmesser, Wassertemperaturmesser, Öltemperaturmesser, Strommesser	Messbrücken, wie die Grützmaker-Brücke, Thomson-Brücke, Wheatstone-Brücke oder Wien-Brücke
---	--

2. Was ist die Strom-Spannungsmessung für ein Verfahren?

Das Ausschlagverfahren.

3. Was ist ein Ersatzschaltbild? Erklären Sie an diesem den Unterschied zwischen realem und idealem Bauteil am Ersatzschaltbild. Welche Aussage stellt ein Bauelementsymbol im Schaltplan dar? In der Literatur findet man unterschiedliche Ersatzschaltbilder für den gleichen Bauelemententyp. Geben Sie dafür eine Erklärung!

Ein Ersatzschaltbild ist die modellhafte Abbildung eines realen Bauteils durch eine Verknüpfung von idealen Bauteilen. Man kann für unterschiedliche Ersatzschaltbilder nutzen, davon abhängig welche Effekte unter den Einsatzbedingungen zum Tragen kommen und welche vernachlässigbar sind.

4. Wodurch werden bei technischen Kondensatoren die induktiven und ohmschen Komponenten verursacht?

Die ohmschen Komponenten kommen durch alle leitende Bestandteile des Kondensators, da jeder Leiter einen ohmschen Widerstand hat, sowie dem Isolationswiderstand des Dielektrikums zustande, die induktiven Komponenten kommen ebenso durch alle leitende Bestandteile des Kondensators zustande, da man jeden Leiter auch als Spule sehen kann, nur ist dieser Effekt meist vernachlässigbar.

5. Eine Messung erfolgt zum Beispiel mit einem Analog-Digital-Umsetzer (ADU). Welche Größen kann der ADU verarbeiten? Wie können indirekte Messgrößen für den ADU nutzbar gemacht werden? Begründung angeben!

Der ADU verarbeitet die Messspannung, über den Einsatz von Messwiderständen lassen sich aufgrund des Spannungsabfalls über dem Widerstand der Strom und die Leistung bestimmen.

7. Wodurch wird bei Spulen der Verlustwiderstand gebildet?

Durch den ohmschen Widerstand der Kupferwicklungen und Eisenverluste.

8. Was ist eine Hystereseurve? Erläutern Sie die einzelnen Abschnitte der Kurve! Wie erklären Sie sich die Veränderungen? Was ist der Unterschied zwischen einer laufenden und einer startenden Hystereseurve? Nennen Sie weitere Anwendungen!

Eine Hystereseurve ist eine grafische Darstellung der verzögerten Wirkungsänderung durch eine veränderte Ursache, wobei eine Pfadabhängigkeit besteht. Im folgendem werde ich die Abschnitte einer Hystereseurve an dem Verlauf des Reifenrückstellmomentes unter Lenkwinkel erläutern.

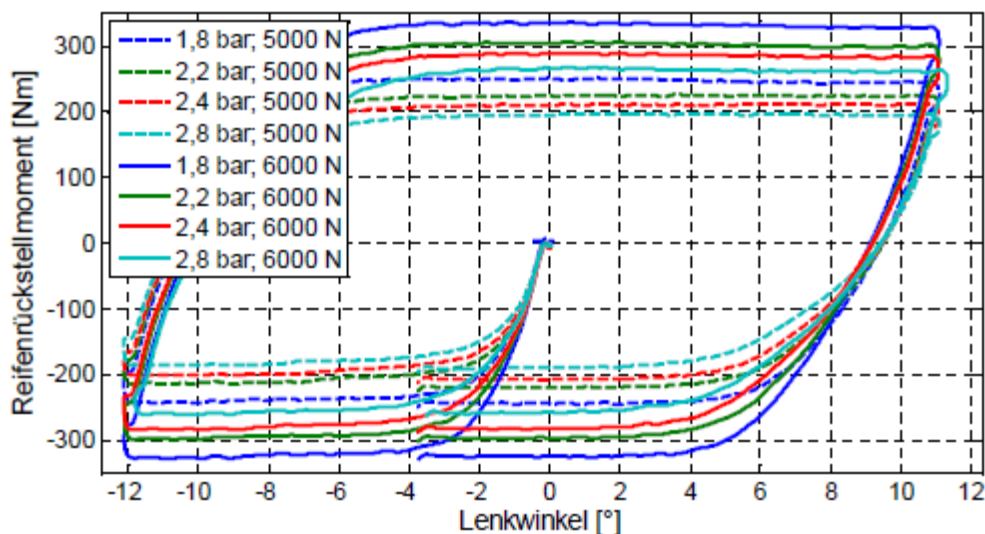


Bild 1: Hystereseurve des Reiferrückstellmomentes

Unsere jungfräuliche Kurve beginnt im Punkt 0 / 0. Durch das Lenken verformen sich das Gummi im Latsch. Durch die Haftkräfte zwischen Reifen und Fahrbahn entsteht ein Rückstellmoment, welches dem Lenken entgegenwirkt. Ab einem gewissen Lenkwinkel ( ca.  $4^\circ$  ) ist der Latsch maximal verformt, durch weiteres Auslenken wird der Latsch nicht weiter verformt, so dass das Rückstellmoment konstant bleibt. Es findet also nur noch eine Drehung des Latsches über der Fahrbahn statt. Beim Zurücklenken entspannt sich der Latsch wieder und geht in seinen Ausgangszustand zurück, das Rückstellmoment wird null, da man aber den verformten Latsch gedreht hat, hat sich der Nullpunkt des Rückstellmomentes verschoben. Wird nun noch weiter gelenkt, findet wieder eine Verformung statt etc. In der Regel durchläuft eine Hysterereurve den Anfangspunkt nicht mehr. Das ist der wesentliche Unterschied zwischen einer startenden und einer laufenden Hysterereurve. Anwendung scheint

an dieser Stelle die falsche Formulierung zu sein, aber weitere Beispiele, wo eine Hysterese auftritt, sind:

- Magnetisierung eines Magneten
- Schmitt-Trigger
- Phasenveränderung von Flüssigkristallen

9. Erstellen Sie das Schaltbild einer Vierleiterschaltung! Erklären Sie daran die Unterschiede zur herkömmlichen Messschaltung! Welche Vorteile entstehen? Wo wird die „6-Leiter-Schaltung“ angewendet?

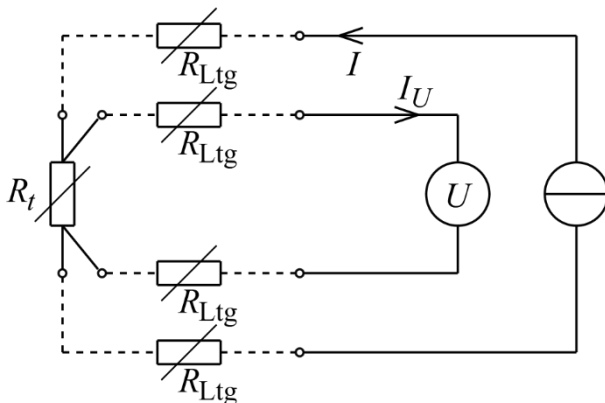


Bild 2: Schaltbild der Vierleiter-Schaltung

Der Vorteil der Vierleiterschaltung gegenüber der herkömmlichen Messschaltung liegt darin begründet, dass man auch an sehr kleinen Widerständen sehr genau gemessen kann, da der Einfluss der parasitären Widerstände der Leitungen und Kontakte auf die Messung minimiert wird und im Stromkreis des Messkreis nur ein sehr geringer Strom fließt.

Die 6-Leiterschaltung wird bei sehr langen Leitungen von der Spannungsversorgung zum Sensor verwendet, da durch den Kabelwiderstand das Ausgangssignal verfälscht wird. Über eine gesonderte Leitung wird dann die ankommende Versorgungsspannung gemessen um diese mit der Brückenspannung zu vergleichen und gegebenenfalls zu korrigieren.

10. Wie können die genannten nicht gewünschten Eigenschaften von passiven Bauelemente durch konstruktive Maßnahmen beeinflusst werden? Nennen Sie Beispiele!

Den parasitären Widerständen der Leitungen kann man durch große Leiterdurchmessern und Materialien mit einer guten Leitfähigkeit entgegenwirken, z.B. Supraleiter wie Magnesiumdiborid bei  $-234,15\text{ °C}$ . Eisenverluste an einer Spule können durch die Benutzung eines weichmagnetischen Eisenkerns reduziert werden. Der dielektrische Verlustfaktor und die dielektrische Absorption eines Kondensators kann durch die Verwendung eines Dielektrikums, mit einem hohen spezifischen Widerstand des Dielektrikums, z.B. ein Vakuumkondensator mit Teflon als Dielektrikum, reduziert werden.

### *11. Was ist eine Mikrometerschraube? Beschäftigen Sie sich mit Messunsicherheit und Genauigkeit dieses Messinstrumentes!*

Eine Mikrometerschraube ist ein Messinstrument zum Ausmessen von Dicken und Längen, im Falle des Versuches auch Abständen. Die Messung erfolgt über das Drehen an der Messschraube, bis ein Klicken zu hören ist, der Momentschlüssel in der Schraube schlägt an. Zumindest, wenn der ausgemessene Körper kein Schwamm ist. Genauigkeit des Gerätes ist von der Skaleneinteilung abhängig, in der Regel 10  $\mu\text{m}$ . Da man beim Ablesen immer von der halben Skaleneinteilung spricht, ist die Genauigkeit also 5  $\mu\text{m}$ . Problematisch ist aber das beim Messen von z.B. Bleiplatten das Werkstück von der Schraube gerne mal zerdrückt wird, dadurch steigt natürlich die Messunsicherheit. Dementsprechend würde ich für Blei diese auf 20  $\mu\text{m}$  abschätzen ansonsten 5  $\mu\text{m}$ .

## **2.2. Fragen zur Versuchsvorbereitung**

### *1. Worin unterscheiden sich zufällige und systematische Fehler bezüglich ihrer Ursachen und Beschreibung?*

Systematische Fehler sind reproduzierbar, sie lassen sich vom Messergebnis subtrahieren, falls sie bekannt sind. Ihre Ursache ist in den meisten Fällen bekannt, und unter konstanten Bedingungen tritt derselbe Fehler auf.

Zufällige Fehler sind prinzipiell systematische Fehler auf deren Ursachen wir keinen Einfluss haben, dessen Ursachen unbekannt sind und die zu nicht konstanten Bedingungen führen. Es handelt sich also um einen empirisch-pragmatischen Zufall. Die Fehler sind nicht reproduzierbar und auch nicht korrigierbar, aber im Falle eine Messung, die nicht zum gewünschten Ergebnis führt, kann man dem zufälligen Fehler die Schuld zuweisen.

### *2. Warum ist eine statistische Auswertung bei Messungen sinnvoll. Was sind die Randbedingungen hierfür? Wie kann eine Anwendung aussehen?*

Bei jeder Messung tritt eine Streuung auf, sodass sich die Messwerte unter konstanten Bedingungen (im Sinne von den kontrollierbaren Bedingungen (siehe 1.)) voneinander unterscheiden, um den Einfluss der Streuung auf die Messergebnisse zu reduzieren, ist eine statistische Anwendung sinnvoll. Randbedingungen sind zumindest eine große Anzahl an Messwerten. Anwendung könnte zum Beispiel die Echtzeit-Analyse der Messdaten eines G-Force-Sensors sein, da die Reifenhaftung abhängig von der Materialpaarung starken Schwankungen unterliegt und durch eine statische Auswertung ist es möglich, die dynamische Drehmomentverteilung bestmöglich zu nutzen.

### *3. Was ist eine Normierung und wann ist diese in der Praxis sinnvoll?*

Bei der Normierung wird eine Messgröße ins Verhältnis zu einer konstanten Bezugsgröße gesetzt. Diese Darstellung ist einheitenlos. Sie ist sinnvoll um verschiedene Messdaten vergleichen zu können.

4. Was bedeuten Mittelwert und Standardabweichung und wie werden sie berechnet? Wann und warum ist die Anwendung in der Praxis sinnvoll?

Der Mittelwert ist der Durchschnitt aller Messwerte.

$$\text{Mittelwert: } \bar{x} = \sum_{i=0}^N \frac{x_i}{N}$$

Die Anwendung des Mittelwertes ist sinnvoll um bei der Auswertung die Streuung der Messwerte zu reduzieren.

Die Standardabweichung ist das Maß für die Streuung der Messwerte um den Erwartungswert.

$$\text{Standardabweichung } \sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^N \frac{(x_i - \mu)^2}{N}}$$

Die Anwendung der Standardabweichung ist sinnvoll um bei der Auswertung Aussagen über die Streuung der Messwerte zu treffen.

5. Nennen Sie Beispiele (Messprobleme oder Aufgaben), bei denen eine Gaußverteilung für die gemessenen Werte angewendet werden kann. Begründen Sie dies! Nennen Sie Beispiele für eine Gleichverteilung!

Die Gaußverteilung kann zum Beispiel bei der Auswertung von Gutteilen bei der maschinellen Fertigung angewendet werden oder auf die Leistungsfähigkeit eines Motors der in Serie produziert wird, das ist dem Umstand geschuldet, dass bei der Produktion sämtliche Fertigungsroboter, Werkstücke und auch elektrische Steuersignale aller einer gewissen Streuung unterliegen, die zwar durch unsere moderne Fertigungstechnologie extrem gering geworden ist, dazu kommt noch, dass man um die Präzision zu erhöhen einen großen finanziellen Mehraufwand betreiben muss. Deshalb sind die produzierten Waren nie identisch und bestimmte Eigenschaften wie Länge, Materialbeschaffenheit, etc. treten jeweils mit einer bestimmten Häufigkeit auf. Diese lässt sich in einer Gaußverteilung abbilden.

Eine Gleichverteilung tritt z.B. bei Pseudozufallsgeneratoren auf. Z.B. der Blum-Blum-Shub-Generator oder klassisch der Münzwurf.

6. Wie stellt sich im Wahrscheinlichkeitsnetz eine exakt normalverteilte Messreihe dar? Warum wird hier die Summenhäufigkeit  $P(x)$  genutzt?

Mit einem Wahrscheinlichkeitspapier kann man anhand von Messdaten ermitteln, ob ihnen eine bestimmte Wahrscheinlichkeitsverteilung zu Grunde liegt. Aufgrund der Skalierung von X- und Y-Achse erhält man näherungsweise eine Gerade, wenn eine Normalverteilung der Messdaten vorliegt. Diese Gerade kommt nur dadurch zustande, dass man die Summenhäufigkeit nutzt.

7. Wieviel Prozent der Messwerte liegen bei Normalverteilung innerhalb der Grenzen  $\pm 1\sigma$ ,  $\pm 2\sigma$  bzw.  $\pm 3\sigma$ ? Welche dieser Werte ist sinnvollerweise im Praktikum auszugehen?

In den Grenzen  $\pm 1\sigma$  liegen 68,27% aller Messwerte.  
In den Grenzen  $\pm 2\sigma$  liegen 95,45% aller Messwerte.  
In den Grenzen  $\pm 3\sigma$  liegen 99,73% aller Messwerte.

Welche dieser Werte ist sinnvollerweise im Praktikum auszugehen?  
???

Die Standardabweichung liegt in den Grenzen  $\pm 1\sigma$ . Aber wenn ich von  $\pm 3\sigma$  habe ich mit ziemlicher Sicherheit alle Messwerte abgedeckt. Trotzdem verstehe ich die Frage nicht.

8. Bei welchen Geräten in der elektrischen Messtechnik wird die Mittelwertbildung angewendet und warum ist dies sinnvoll? Wie ist das Messprinzip eines Drehspulmessinstruments und eines Dreheisenmessinstruments?

Jedes Gerät mit einer Rauschunterdrückungsfunktion nutzt eine Mittelwertbildung, dazu gehören auch Digital-Oszi und Multimeter. Das ist sinnvoll um die zufälligen Fehler in dem Messergebnis zu minimieren.

Drehspulmessinstrument:

Das Messprinzip beruht darauf, dass ein Magnetfeld Kraft auf eine stromdurchflossene Spule ausübt. Es handelt sich um einen feststehenden Magneten und eine freibeweglich gelagerte Spule. Die Spule ist an einer Feder befestigt. Bei Stromfluss durch die Spule tritt ein Drehmoment proportional zum fließenden Strom auf, welches von der Feder unter Dehnung aufgenommen wird, der an der Spule befestigte Zeiger dreht sich solange, bis ein Gleichgewicht eintritt. Die Drehung des Zeigers ist durch die Feder außerdem gedämpft sodass eine Mittelwertbildung über ein bestimmtes Intervall eintritt, wenn der Strom nicht konstant ist.

Dreheisenmessinstrument:

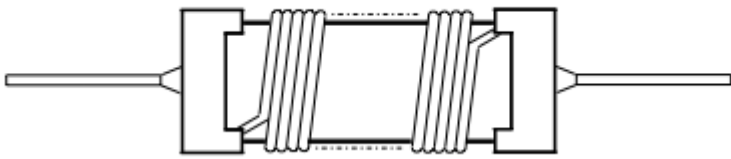
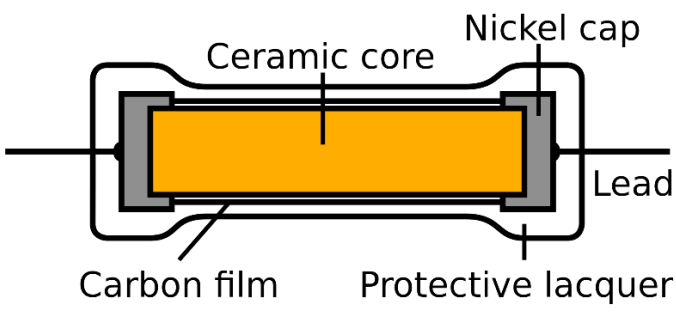
Innerhalb einer Spule befinden sich zwei Eisenkerne, das bewegliche Dreheisen mit dem Zeiger und der feststehende Eisenkern. Durch einen Stromfluss findet eine Magnetisierung beider statt, sodass sie sich abstoßen. Am Dreheisen befinden sich eine Feder und ein Zeiger, sodass die magnetischen Reluktanzkraft durch die Federkraft ausgeglichen wird und der Ausschlag zu sehen ist. Dieser ist nicht linear zur Stromstärke. Eine Dämpfung erfolgt meist über die Luft.

#### **4. Auswertung**

1.4.1 Diskutieren Sie die Ergebnisse! Vergleichen Sie die verschiedenen Bauarten! Was können Sie aus den verschiedenen Frequenzen deuten? Berechnen Sie für einen Wert exemplarisch Phasenlage, Güte und Verlustfaktor, vergleichen Sie diese Berechnungen mit den Messwerten! Erstellen Sie eine tabellarische Übersicht für die Vorteile des jeweiligen Bauteiltyps in der Anwendung.

## Vergleich der Widerstände:

Der gewedelte Drahtwiderstand R1 entwickelt bei hohen Frequenzen eine gewisse Induktivität, woraus ein zusätzlicher Blindwiderstand resultiert. Die Drahtwicklungen im Widerstand wirken dann wie eine in Reihe geschaltete Spule. Der Kohleschichtwiderstand R2 entwickelt bei hohen Frequenzen eine gewisse Kapazität, woraus ein zusätzlicher Blindwiderstand resultiert. Der Widerstand wirkt dann zusätzlich noch wie ein in Reihe geschalteter Kondensator, bei dem die Anschlussklemmen die Elektroden und die Kohleschichten und der Isolator kern als Dielektrikum erscheinen.

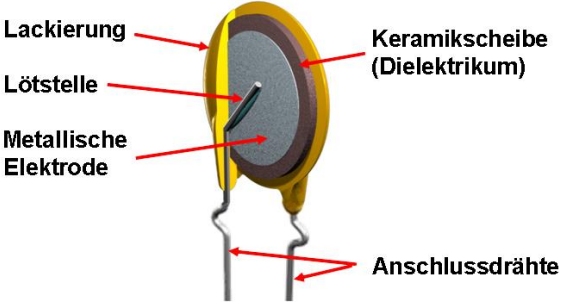
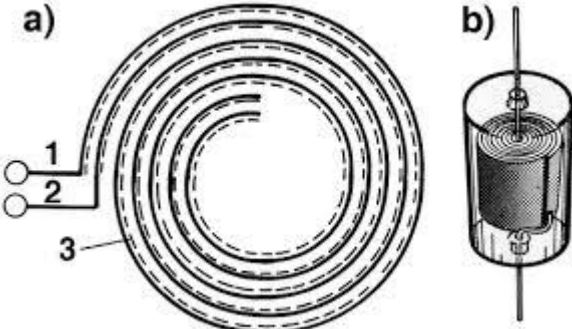
Bauteiltyp	Vorteil
<p>gewedelter Drahtwiderstand</p>  <p>Bild 3: Schema gewedelter Drahtwiderstand</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringer kapazitiver Blindwiderstandanteil<sup>1</sup></li> <li>- Hohe Leistungsaufnahme ohne Versagen</li> <li>- Thermisch dauerbelastbar</li> </ul>
<p>Kohleschichtwiderstand</p>  <p>Bild 4: Schema Kohleschichtwiderstand</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Geringer induktiver Blindwiderstandanteil<sup>2</sup></li> <li>- Kostengünstiger</li> </ul>

## Vergleich der Kondensatoren:

Der Keramikscheibenkondensator C1 verhält sich im gesamten gemessenen Frequenzbereich wie ein fast idealer Kondensator, der Phasenwinkel beträgt fast konstant  $\sim -90^\circ$ . Der Polyester-Wickel-Kondensator C2 entwickelt bei hohen Frequenzen eine gewisse Induktivität, woraus ein deutlich geringerer Blindwiderstand resultiert, da sich Induktivität und Kapazität überlagern. Die gewickelten Platten im Kondensator wirken dann zusätzlich wie eine in Reihe geschaltete Spule.

<sup>1</sup> Jedes elektronische Bauteil hat in der Realität einen induktiven und einen kapazitiver Blindwiderstandanteil. Je nachdem welcher Anteil dominanter ist, wird der jeweils andere überlagert. Deshalb bezeichne ich den überlagerten Anteil als geringer.

<sup>2</sup> „“

Bauteiltyp	Vorteil
<p data-bbox="204 271 587 300">Keramikscheibenkondensator</p>  <p data-bbox="204 663 647 689">Bild 5: Schema Keramikscheibenkondensator</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konstante Kapazität über den gesamten Frequenzbereich</li> <li>- Geringer induktiver Blindwiderstandanteil<sup>3</sup></li> </ul>
<p data-bbox="204 696 608 725">Polyester-Wickel-Kondensator</p>  <p data-bbox="204 1070 660 1097">Bild 6: Schema Polyester-Wickel-Kondensator</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kostengünstiger</li> <li>- Gute Widerstandsfähigkeit gegen hohe Strom/ Spannungsimpulse</li> </ul>

### Vergleich der Spulen:

Die Luftspule L1 und die Blechkernspule L3 verlieren bei 100 bzw. 10 kHz ihren induktiven Charakter durch parasitäre Kapazitäten, die sich zwischen den einzelnen Windungen ausprägen. Die Ferritkernspule L2 kann auch als Hochfrequenzspule genutzt werden aufgrund ihres ferromagnetischen, elektrisch nichtleitenden Kerns.

<sup>3</sup> Jedes elektronische Bauteil hat in der Realität einen induktiven und einen kapazitiver Blindwiderstandanteil. Je nachdem welcher Anteil dominanter ist, wird der jeweils andere überlagert. Deshalb bezeichne ich den überlagerten Anteil als geringer.

Bauteiltyp	Vorteil
Luftspule	- Keine Magnetische Sättigung
Ferritkernspule	- Einsatz als Hochfrequenzspule wegen der gleichbleibender Induktivität
Blechkernspule	- Große Induktivität - Typisch für den Einsatz in Transformatoren

### Berechnung der Phasenlage, Güte und Verlustfaktor für den gewedelten Drahtwiderstand R1 bei 50 Hz:

$$R_x = 654,9 \Omega$$

$$|Z|_x = 655 \Omega$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{R_x}{|Z|_x}\right) = \arccos\left(\frac{654,9 \Omega}{655 \Omega}\right) = 1^\circ$$

$$Q = \frac{|Z|_x \cdot \sin(\varphi)}{R_x} = \frac{11,43 \Omega}{654,9 \Omega} = 0,017$$

$$D = \frac{R_x}{|Z|_x \cdot \sin(\varphi)} = \frac{654,9 \Omega}{11,43 \Omega} = 57,29$$

Aufgrund von zeitlichen Schwankungen des Widerstandswertes und einer vom Messgerät vorgenommen Rundung beträgt der berechnete Wert für die Phasenlage das Zehnfache des gemessenen Wertes.

Deshalb sind auch Güte und Dämpfung jeweils um eine Zehnerpotenz größer. Würde ich mit einer Phasenlage von  $0,1^\circ$  rechnen, entsprächen Güte und Dämpfung ziemlich genau den Messwerten.

*1.4.2 Vergleichen und Diskutieren Sie die Eigenschaften der beiden Kondensatortypen! In welchem Zusammenhang stehen der Phasenwinkel, die Güte Q und der Verlustfaktor D? Kontrollieren Sie diesen Zusammenhang anhand Ihrer Messergebnisse. Vergleichen Sie Ihre Messergebnisse mit berechneten Werten! Begründen Sie die Abweichungen, finden Sie Ursachen!*

Der Keramikscheibenkondensator C1 verhält sich im gesamten gemessenen Frequenzbereich wie ein fast idealer Kondensator, der Phasenwinkel beträgt fast konstant  $\sim -90^\circ$ . Der Polyester-Wickel-Kondensator C2 entwickelt bei hohen Frequenzen eine gewisse Induktivität, woraus ein deutlich geringerer Blindwiderstand resultiert, da sich Induktivität und Kapazität

überlagern. Die gewickelten Platten im Kondensator wirken dann zusätzlich wie eine in Reihe geschaltete Spule. Der Phasenwinkel geht mit steigender Frequenz gegen null.

$$Q = \tan(\varphi) \Leftrightarrow \varphi = \arctan(Q)$$

$$D = \cot(\varphi) \Leftrightarrow \varphi = \operatorname{arccot}(D)$$

$$Q = \frac{1}{D}$$

Kapazität C1	$\varphi$ in Grad(gemessen)	Q (berechnet)	Q (gemessen)
50 Hz	-90	-9,6701E+12	50
100 Hz	-89,3	81,8470411	82
1 kHz	-90	114,58865	106,2
10 kHz	-89,6	143,237122	139,5
100 kHz	-89,6	143,237122	161,2

Da D nur das Reziprok von Q ist und sich die Berechnung in meinem Excelprogramm mittels Kotangens als schwierig erweist, lass ich es an dieser Stelle weg. Die Übereinstimmung zwischen Gemessen und Berechnet ist dieselbe.

Kapazität C2	$\varphi$ in Grad(gemessen)	Q (berechnet)	Q (gemessen)
50 Hz	-89,9	572,9572134	500
100 Hz	-89,9	572,9572134	435
1 kHz	-89,6	143,2371217	160,8
10 kHz	-88	28,63625328	28,5
100 kHz	-12,9	0,229030574	0,229

Es ist eine Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Werten feststellbar. Die Abweichungen kommen durch Rundungen bei der Ausgabe des Messgerätes und zeitliche Veränderungen der Messwerte während des Ablesevorgangs zustande.

*1.4.3 Erklären Sie das frequenzabhängige Verhalten unter Berücksichtigung der Spulenart (Luftspule, Spule mit Ferritkern und Spule mit Eisenkern).*

*Führen Sie für eine Frequenz an jeder Spule eine Berechnung der Messgrößen durch, wie sie auch in der Recheneinheit des RCL-Meters vorgenommen wird!*

*Zeichnen Sie das Ersatzschaltbild einer realen technischen Spule und einer theoretischen idealen Spule. Begründen Sie die Unterschiede!*

Die Luftspule L1 und die Blechkernspule L3 verlieren schleichend durch eine Frequenzerhöhung ihren induktiven Charakter durch parasitäre Kapazitäten, die sich zwischen den einzelnen Windungen ausprägen. Die Ferritkernspule L2 kann auch als

Hochfrequenzspule genutzt werden aufgrund ihres ferromagnetischen, elektrisch nichtleitenden Kerns. Das Verhalten einer Spule ändert sich mit dem verwendeten Kernmaterial, Leitermaterial, ihrem Aufbau, dem Leiterdurchmesser, der Windungszahl und ihrer Länge, ihrem Durchmesser. Dadurch verschiebt sich der Frequenzbereich in dem ein Übergang vom induktiven Charakter zum kapazitiven Charakter stattfindet. Der Übergang an sich findet dadurch statt, dass sich zwischen den benachbarten Wicklungen in der Spule frequenzabhängig elektrische Felder aufbauen wie bei einem Kondensator.

$$Q = \tan(\varphi)$$

Für jeweils 1kHz

Spule	$\varphi$ in Grad(gemessen)	Q (berechnet)	Q (gemessen)
<b>Luftspule (Reed-Relais)</b>	70,1	2,762469503	2,76
<b>Spule mit Ferritkern</b>	75,7	3,923156294	3,93
<b>Spule mit Blechkern K40</b>	71,9	3,059503847	3,06

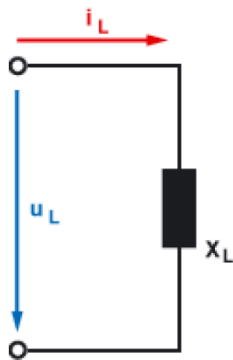


Bild 7: Ersatzschaltbild ideale Spule

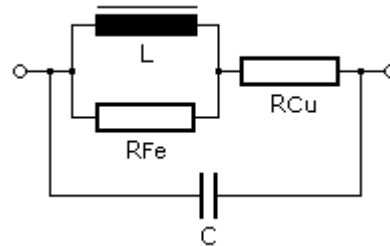


Bild 8: Ersatzschaltbild reale Spule

Die ideale Spule hat eine Phasenlage von  $90^\circ$ , ihre Impedanz ist frequenzabhängig:

$$X_L = \omega \cdot L$$

Die reale Spule hat stets eine Phasenlage von  $\leq 90^\circ$ , abhängig vom Wirkwiderstand. An der realen Spule treten unterschiedliche zusätzliche Verlustwiderstände auf, der Kupferwiderstand der Wicklungen, die Eisenverluste und parasitäre Kapazitäten. Dadurch entstehen unterschiedliche Ersatzschaltbilder.

*1.4.4 Stellen Sie die Abhängigkeit des Scheinwiderstandes ( $Z$  und  $\varphi$ ) von der Frequenz grafisch dar. Was sind die Ursachen für diesen Verlauf? Diskutieren Sie warum genau dieses Verhalten von Spulen wichtig für die Verwendung ist.*

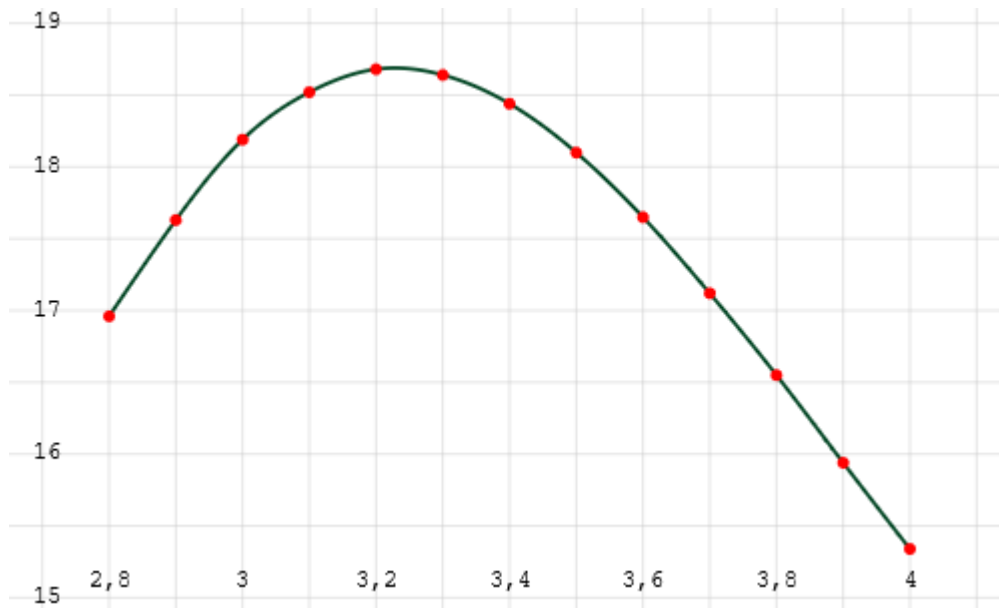


Bild 9: Abhängigkeit  $Z$  von  $f$  bei Blechkernspule L3,  $Z$  in  $k\Omega$ ,  $f$  in kHz

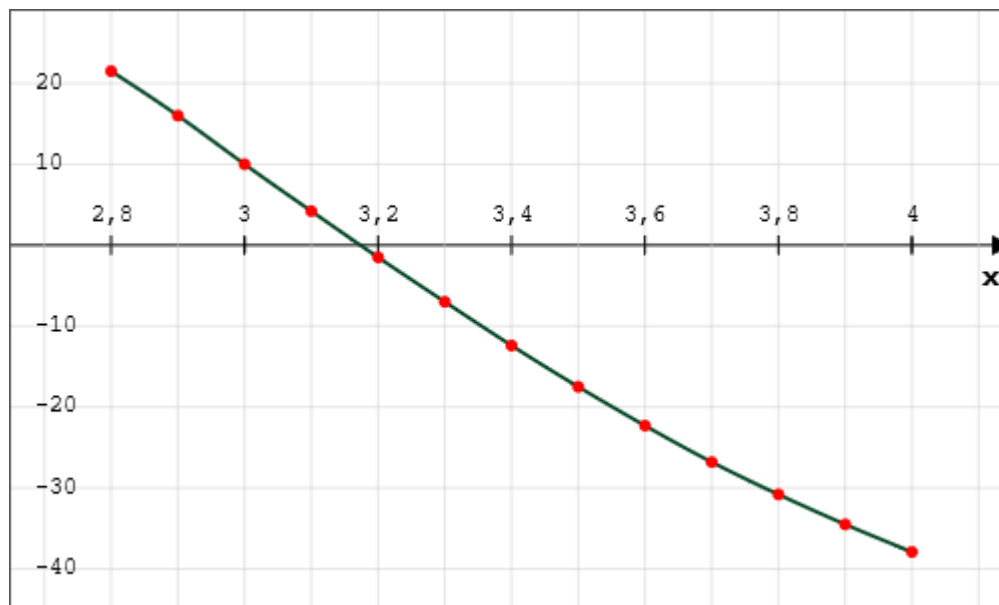


Bild 10: Abhängigkeit  $\varphi$  von  $f$  bei Blechkernspule L3,  $\varphi$  in  $^\circ$ ,  $f$  in kHz

Die reale Spule bildet durch die auftretende Kapazität (siehe Bild 8) einen Parallelschwingkreis. Es ergibt sich dadurch eine Resonanzfrequenz, bei der die Spule zu einem reinen Widerstand wird, da sich Induktivität und Kapazität bei dieser Frequenz aufheben. Der Verlauf macht außerdem deutlich, dass die Induktivität bei Frequenzen unterhalb der Resonanzfrequenz überwiegt und die Kapazität oberhalb.

Dies ist bei der Technischen Anwendung der Spule als Filter zu beachten, da sich ein RL-Tiefpass bei dieser Frequenz in einen RC-Hochpass verwandeln würde und ein RL-Hochpass einen RC-Tiefpass. Generell ist es bei jeder technischen Anwendung einer Spule ungünstig, wenn sich ungewollt die Spule in ein Kondensator verwandelt, weil man die parasitären

Kapazitäten einer realen Spule in der Planung vernachlässigt hat. Demensprechend sollte man immer Hochfrequenzspulen nutzen, deren Resonanzfrequenz weit über dem genutzten Frequenzbereich liegt.

*1.4.5 Was bewirkt die Trimmfunktion und warum benötigen wir diese? Stellen Sie den Kapazitätsverlauf über dem Plattenabstand grafisch dar (Millimeterpapier). Diskutieren sie den Kurvenverlauf!*

*Finden Sie Anwendungen für kapazitive Sensoren! Schätzen Sie das Verhältnis zwischen Sensorkapazität und parasitärer Kapazität bei dem gemessenen Sensor ein! Welche Teilkapazitäten sind daran beteiligt?*

*Wie würde sich die vorhandene parasitäre Kapazität auswirken, wenn der Plattenkondensator als Wegsensor angewendet werden soll?*

Die Trimmfunktion kalibriert das Messgerät, der komplexe Eigenwiderstand des Messgeräts und dessen Verkabelung wird vom Messergebnis intern abgezogen. Ähnlich wie bei der Tare-Funktion der Küchenwaage. Dadurch wird das vom Messgerät verfälschte Messergebnis korrigiert.

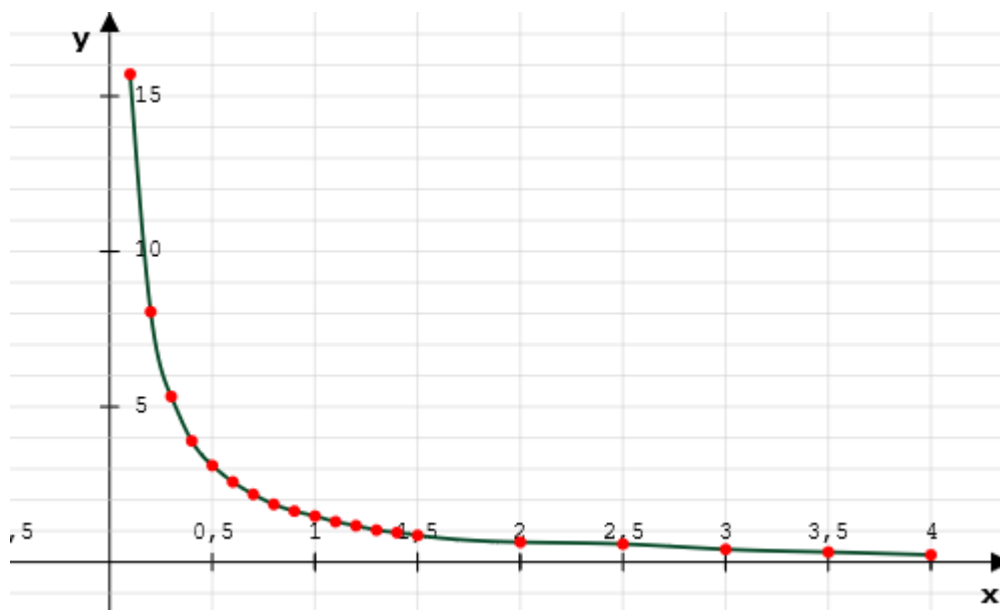


Bild 11: Abhängigkeit der Kapazität  $C_x$  vom Plattenabstand  $d$ ,  $d$  (X-Achse) in mm,  $C_x$  (Y-Achse) in pF

Der Kurvenverlauf stimmt mit dem Verhältnis  $C_x \sim \frac{\text{konst.}}{d}$  überein, welches sich aus

$C_x = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$  ergibt, wenn man alle anderen Variablen konstant und unabhängig von  $d$  setzt.

Kapazitive Sensoren lassen sich als Öl-, Lade- oder Kraftstoffeinspritzdrucksensor nutzen, wenn man eine Platte als Membran auslegt, die sich unter Druck durchbiegt und so den Plattenabstand verändert. Kapazitive Sensoren lassen sich außerdem als Öltemperatur-, Abgastemperatur- oder Wassertempersensoren nutzen, wenn man eine Platte an einem

Thermobimetall anbringt, das seine Form bei Temperaturänderung verändert und so den Plattenabstand verändert. Kapazitive Sensoren lassen sich außerdem als G-Kraft-Sensor nutzen, indem man zwei parallele Plattensensoren eine gemeinsame Platte nutzen lässt, welche als federndes Pendel ausgelegt ist, die sich durch die auftretenden Beschleunigungskräfte verschiebende gemeinsame Platte verändert die Kapazität in beiden Kondensatoren, sodass sich daraus die angreifenden G-Kräfte berechnen lassen. Dadurch lassen sich effizientere Bremsanlagen und Antriebsmomentenverteilungsregelungen (z.B. ATTESA) realisieren.

Das Verhältnis zwischen Sensorkapazität und parasitärer Kapazität ist alles andere als ideal, bezogen auf unsere Messung, da die parasitäre Kapazität selbst bei der größten gemessenen Sensorkapazität noch 4-mal größer war als die Sensorkapazität. Bei der kleinsten gemessenen Sensorkapazität sogar ganze 260-mal.

Die parasitäre Kapazität setzt sich aus der parasitäre Kapazität des Sensors, der Anschlusskabel und des Messgerätes, das Messgerät kompensiert aber die Eigenkapazität bei der Anzeige durch die Trimmfunktion.

Die parasitäre Kapazität würde sich als Offset des Messwertes bei Nutzung als Wegsensor auswirken, welches bei der Anwendung zu einer schlechteren Messgenauigkeit führen würde, da bei der Messung des Offsets durch einen ADU bereits eine Messgenauigkeit auftritt, beim Abziehen des Offsets vom Messergebnis halbiert sich also die Messgenauigkeit. Die Bitauflösung wird also eins gesenkt.

#### **4. Teil 2: Auswertung von Messreihen (Statistik)**

Vorwort:

Dieser Teil entfiel während des Praktikums ohne die Angabe von Gründen seitens des Betreuers. Damit meine ich, wir haben das 2. Kolloquium zu den Vorbereitungsaufgaben der Statistik gemacht, wir haben uns eine Seite mit Excel-Befehlen von ihm fotografiert und uns sein Nutzerkürzel notiert und danach meinte er, ok gut dann sind wir fertig und ihr könnt nach Hause gehen. Da ich trotzdem das Praktikum bestehen möchte, habe ich ein GlovePIE-Programm geschrieben, welches mir normalverteilte Zufallszahlen liefert und mir von Kommilitonen das ungefähre Intervall der Messwerte dieser Aufgabe geben lassen.

Das GlovePIE-Programm:

## 2.4.2

Mittelwert: 19564,8509

Minimalwert: 18175,98

Maximalwert: 20499,03

Varianz: 278357,0463

Standardabweichung: 527,5955328

## 2.4.3

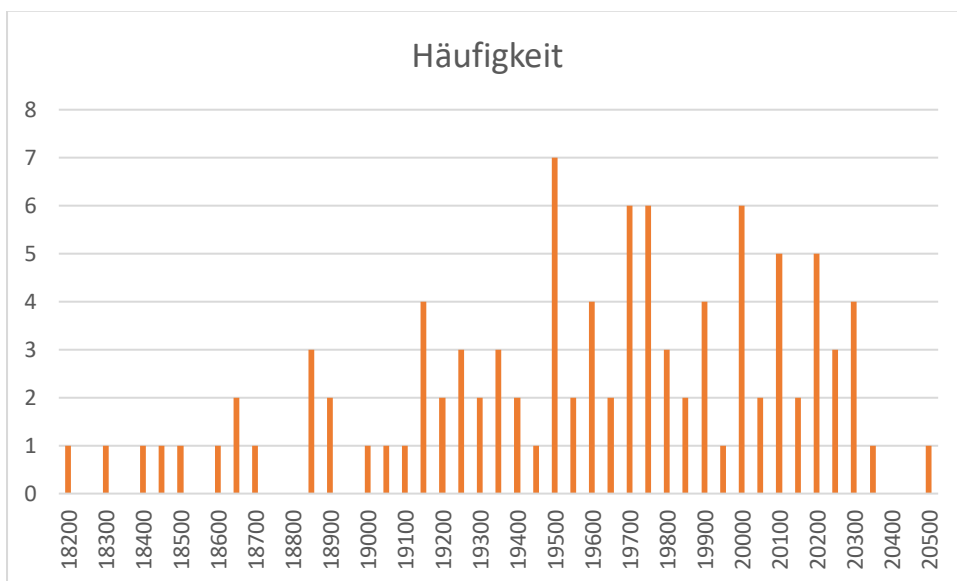


Diagramm 1: Verteilungsdichte mit Klassenbreite von 50 Ohm

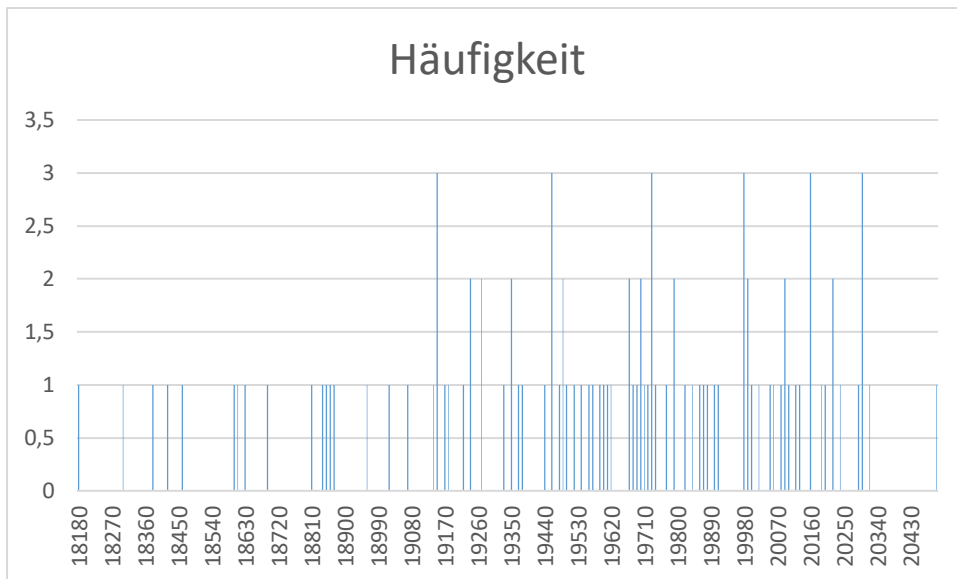


Diagramm 2: Verteilungsdichte mit Klassenbreite von 10 Ohm

**Zusätzlich:**

Da in meinem Fall die Klassen wohl ein wenig zu klein gewählt wurden, mache ich dasselbe nochmal für 200 Ohm

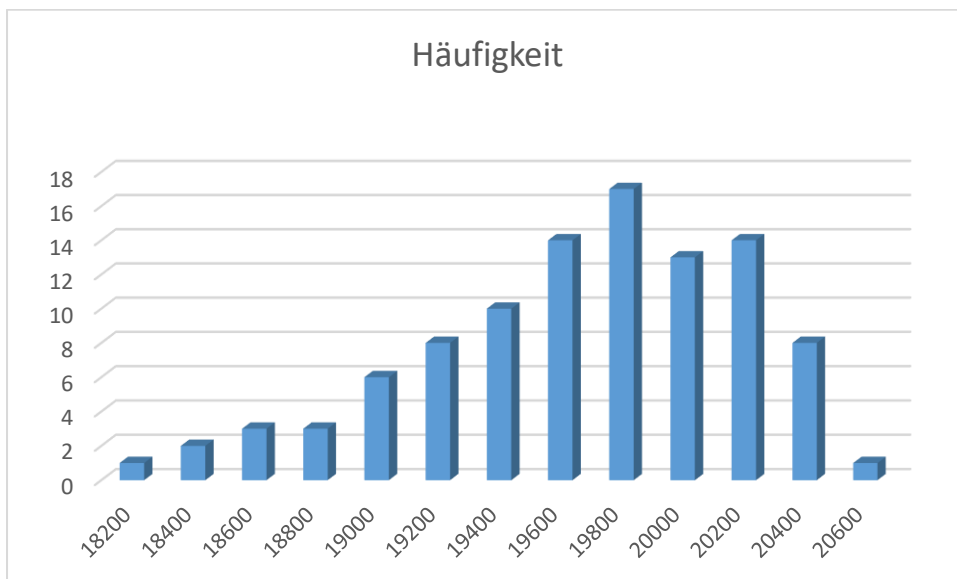


Diagramm 3: Verteilungsdichte mit Klassenbreite von 200 Ohm

In allen 3 Diagrammen lässt sich eine Normalverteilung erahnen. Allerdings treten bei 10 und 50 Ohm starke Unregelmäßigkeiten auf, die sich durch die große Standardabweichung und die wenigen Messwerte erklären lassen.

Deswegen erstelle ich jetzt nochmal ein Diagramm mit 20.000 Messwerten für 10 Ohm-Klassen.

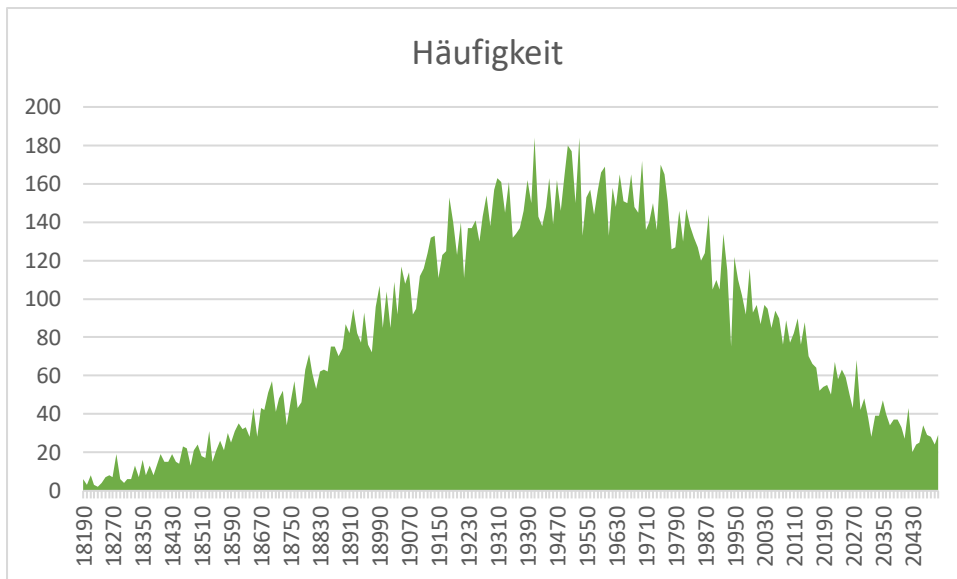


Diagramm 4: Verteilungsdichte mit Klassenbreite von 10 Ohm

Es lässt sich deutlich eine Normalverteilung erkennen.

### 2.4.3

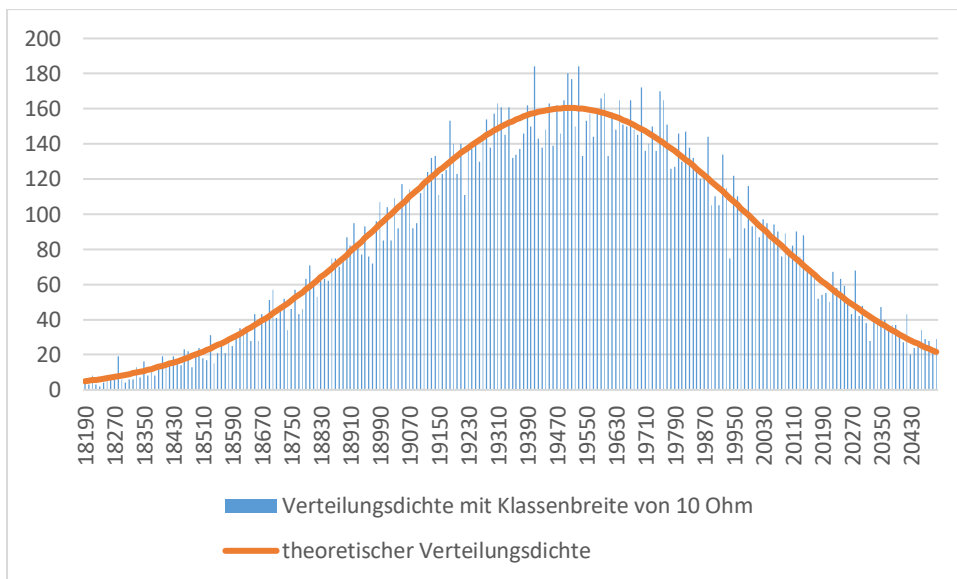
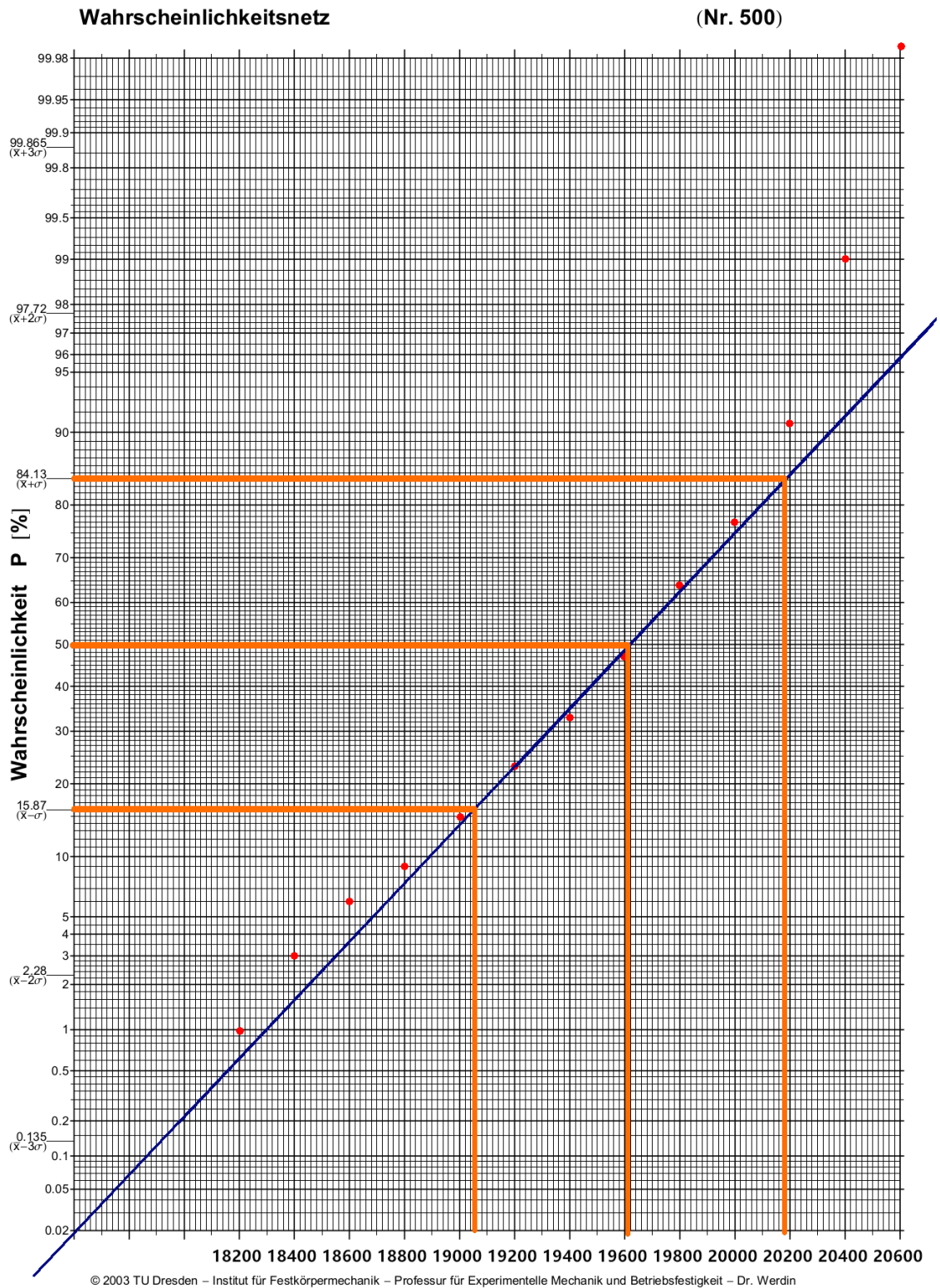


Diagramm 5: Verteilungsdichte mit Klassenbreite von 10 Ohm und theoretischer Verteilungsdichte

## 2.4.4 Anwendung des Wahrscheinlichkeitsnetzes:



	berechnet	Aus Wahrscheinlichkeitsnetz ermittelt
Mittelwert $\mu$	19564,8509	19600
Streuung $\sigma$	527,595533	540

Die berechneten und ermittelten Werte stimmen annähernd überein. Eine starke Abweichung von der Ausgleichsgerade ist bei Werten  $> 20200 \Omega$  registrierbar. Dies ist auf die geringe Anzahl an Messwerten zurückzuführen. Die restlichen Werte liegen nahe an der Ausgleichsgerade. Deswegen weicht die Stichprobenverteilung durchschnittlich zu 39,07730169% von der Normalverteilung ab.

#### 2.4.5 Berechnung mit Teilmittelwerten

Mittelwerte $\bar{x}$
19727,367
19587,831
19597,449
19717,699
19529,449
19525,515
19842,137
18975,19
19417,586

$$\bar{\bar{x}} = 19564,8509$$

$\bar{\bar{x}}$  ist identisch mit Mittelwert aller Messwerte, was auch zu erwarten war.

$$\bar{\sigma} = 242,017193$$

Die Standardabweichung der Teilmittelwerte beträgt weniger als 50% der normalen Standardabweichung aller Messwerte, da das Mitteln zu einer Reduzierung der Streuung geführt hat.

#### Nachwort/Kritik zu diesem Versuch:

So ziemlich alle Excel-Befehle aus der Vorlage sind inzwischen veraltet in meiner Office 2013 Version, und ich vermute mal, dass es inzwischen sogar schon wieder ein aktuelleres Office gibt. Es gibt auch keine Symbolleiste mit einem Diagrammassistenten. Vielleicht könnte man diese Versuchsanleitung ja mal aktualisieren. Beim Messen ist aufgefallen, dass die meisten zu messenden Bauteile viel zu kurze und kleine Anschlussbeinchen haben, vielleicht könnte man dort ja mal ordentlich Anschlussklemmen oder Stecker anlöten. Außerdem stimmt die in der Versuchsanleitung angegebene Seriennummer nicht mit der des Messgerätes überein. Außerdem ist ein zweiteiliges Kolloquium, dessen 2. Teil man, nachdem man stundenlang Messwerte aufnehmen muss, absolviert, sehr ermüdend und hier könnte man ein paar Aufgaben einsparen und daraus eines machen, wie bei allen anderen Versuchen. In meinem Fall kommt außerdem noch dazu, dass mir jetzt, da ich noch aufgrund des hohen Gesamtumfangs des Versuchs und dessen Auswertung 2 Wochen daran gearbeitet habe, erheblich Zeit zum Lernen für die erste Prüfung in 2 Tagen fehlt, vielleicht könnte man hier auch für die Zukunft den Umfang verringern oder den Zeitplan für die Gruppen so legen, dass dieser Versuch in jedem Fall bei keiner Gruppe zwei Wochen vor den Prüfungen eingeplant wird.

Anhang: Die Excel-Dateien zum Versuch kann man hier herunterladen:

[https://cdn.discordapp.com/attachments/451374373295620101/541169649048616960/Breem\\_12\\_rlc\\_excel\\_dateien.rar](https://cdn.discordapp.com/attachments/451374373295620101/541169649048616960/Breem_12_rlc_excel_dateien.rar)

### **Quellen:**

[https://www.tu-chemnitz.de/mb/sgt/Download/wiss\\_Arbeit/Richtlinien\\_wiss\\_Arbeiten.pdf](https://www.tu-chemnitz.de/mb/sgt/Download/wiss_Arbeit/Richtlinien_wiss_Arbeiten.pdf)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Bitwertigkeit>

<https://en.wikipedia.org/wiki/ATTESA>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Bimetallthermometer>

[https://de.wikipedia.org/wiki/Kapazitiver\\_Sensor#Drucksensor](https://de.wikipedia.org/wiki/Kapazitiver_Sensor#Drucksensor)

[https://de.wikipedia.org/wiki/Spule\\_\(Elektrotechnik\)#Hochfrequenzspulen](https://de.wikipedia.org/wiki/Spule_(Elektrotechnik)#Hochfrequenzspulen)

<https://www.elektrotechnik-fachwissen.de/wechselstrom/rc-hochpass.php>

<https://elektroniktutor.de/bauteilkunde/spule.html>

<https://de.wikipedia.org/wiki/G%C3%BCtefaktor>

<http://www.arndt-bruenner.de/mathe/scripts/kubspline.htm#rechner>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Luftspule>

<http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/drehspulinstrument.glos.html>

[https://de.wikipedia.org/wiki/Pseudozufall#Nicht-periodischer/unendlicher\\_Generator](https://de.wikipedia.org/wiki/Pseudozufall#Nicht-periodischer/unendlicher_Generator)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Standardabweichung>

<https://www.industr.com/de/parasit%C3%A4re-induktivit%C3%A4ten-kondensatoren-1708034>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Resonanzwiderstand>

[https://de.wikipedia.org/wiki/Supraleiter#Metallische\\_Supraleiter](https://de.wikipedia.org/wiki/Supraleiter#Metallische_Supraleiter)

<https://de.wikipedia.org/wiki/Thomson-Br%C3%BCcke>

Dissertation „Analyse und Modellierung des Reifenübertragungsverhaltens bei transienten und extremen Fahrmanövern“, Dipl. -Ing. Stefan Einsle