



Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes

Masterarbeit



Elektromagnetische Feuchtemessung für
mineralische Schüttgüter

Monika Seidl, BSc

November 2023



MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

www.unileoben.ac.at

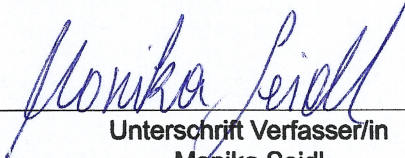
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 03.11.2023



Unterschrift Verfasser/in
Monika Seidl

Kurzfassung

Elektromagnetische Feuchtemessung für mineralische Schüttgüter

Die elektromagnetische Feuchtemessung beruht auf der Wechselwirkung von Materie mit elektromagnetischer Strahlung und dessen Abhängigkeit vom Wasseranteil des Gutes. In dieser Arbeit werden die theoretischen Hintergründe der Detektion des Dielektrikums Wassers mittels Mikrowellen über Polarisationsmechanismen erklärt. Dabei werden die unterschiedlichen Messmethoden Reflexion, Transmission und Resonanz in ihrer Ankopplung und ihrem grundlegenden Aufbau vorgestellt sowie verglichen. Die bei den jeweiligen Messverfahren erhaltenen Parameter (Amplitudendämpfung und Phasenverschiebung bzw. Resonanzfrequenz und Bandbreite der Resonanzkurve) werden beschrieben und die mathematische Verbindung zur feuchteabhängigen Dielektrizitätskonstante dargelegt. Im Fokus stehen darüber hinaus mögliche Einflussparameter auf die Feuchtemessung mineralischer Schüttgüter. Dazu zählen die Temperatur, die Schüttdichte, die Frequenz, die Bindungsstärke des Wassers, die Zusammensetzung des Materials (Eisenspezies, Additive) und die Betriebsbedingungen (Statik und Dynamik, Förderband). Der Grund für dessen Einfluss wird in den jeweiligen Unterkapiteln theoretisch beschrieben und anschließend hinsichtlich seiner Wichtigkeit beurteilt. Darüber hinaus werden Kompensationsmöglichkeiten von relevanten Einflussgrößen präsentiert. Im Hauptteil der Arbeit wird anhand von mehreren unterschiedlichen Beispielen (Beton, Bauxit, Kohle etc.) für Reflexions-/Transmissions- sowie Resonator-Messungen die Erstellung von linearen oder nicht-linearen Regressionsgeraden gezeigt. Diese werden anschließend in ihrer Ausführung analysiert und beurteilt. Es werden im Zuge dessen zwei Methoden aus Eigenentwicklung vorgestellt. Abschließend erfolgt ein Resümee der theoretischen und aus den Anwendungsbeispielen gesammelten Informationen sowie Anwendungsempfehlungen für Feuchtemessungen.

Abstract

Electromagnetic moisture measurement of mineral bulk material

The ability to measure the moisture of a material by using electromagnetic waves is caused by interaction between water particles and microwaves. In this thesis the theoretical background of the dielectric water and its detection via microwaves through polarization mechanisms is shown. Thereby, the different measuring methods reflection, transmission and resonance are compared in their coupling and basic structure. The obtained parameters (amplitude attenuation and phase shift or resonance frequency and bandwidth of the resonance curve) are described and the mathematical connection to the moisture-dependent dielectric constant is given. The focus is also placed on possible influencing parameters of the moisture measurement of mineral bulk material. These include fluctuation of the temperature, the bulk density, the frequency, the binding strength of the water, the composition of the material (iron species, additives) and the operating conditions (statics and dynamics, on a conveyor belt). The origin of the influence is described theoretically and is evaluated concerning its importance. Furthermore, compensation possibilities of relevant influencing values are discussed. As the main part of this thesis, several different examples (concrete, bauxite, coal, etc.) of reflection/transmission and resonator measurements are used to show the theoretical creation of linear and non-linear calibration functions. Further on, their accuracy is analyzed and determined. In addition, two possible methods from self-development are presented. A conclusion of all theoretically and from the application examples gathered information is merged in the last part of this thesis, and additionally recommendations for further use in moisture measurement are given.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG.....	3
2 GRUNDLAGENTEIL.....	4
2.1 Abgrenzung des Gegenstandes der Untersuchung	4
2.2 Dielektrika und Dielektrizitätskonstante	6
2.3 Messung der Feuchte	8
2.3.1 Reflexion und Transmission.....	9
2.3.2 Resonanz	15
2.4 Vektornetzwerkanalysator (VNA).....	23
3 ANALYSE DER RELEVANTEN EINFLUSSPARAMETER	24
3.1 Frequenz.....	24
3.2 Temperatur	26
3.3 Schüttdichte	28
3.4 Vorliegende Eisen-Spezies.....	28
3.5 Ionenleitfähigkeit.....	32
3.6 Bindung des Wassers	33
3.7 Statik und Dynamik.....	35
3.8 Additive und Kreislaufstoffe	36
3.9 Betriebsbedingungen am Förderband.....	37
4 AUSWERTEPRINZIPIEN.....	39
4.1 Reflexion und Transmission.....	39
4.1.1 Methodik Nr. 1 (Eigenentwicklung).....	41
4.1.2 Methodik Nr. 2	43
4.1.3 Methodik Nr. 3	51
4.2 Resonator	54
4.2.1 Methodik Nr. 4	54
4.2.2 Methodik Nr. 5	55
4.2.3 Methodik Nr. 6	56
4.2.4 Methodik Nr. 7	58
4.2.5 Methodik Nr. 8 (Eigenentwicklung).....	59
4.2.6 Methodik Nr. 9	61
5 ZUSAMMENFASSUNG UND ANWENDUNGSEMPFEHLUNGEN	64

6 VERZEICHNISSE	I
6.1 Literatur.....	I
6.2 Formelzeichen	V
ANHANG.....	VIII

1 Einleitung und Problemstellung

Diese Arbeit befasst sich mit der Feuchtemessung von mineralischen Schüttgütern unter Verwendung von elektromagnetischer Strahlung in Form von Mikrowellen. Die untersuchten Materialien bestehen aus losen anorganischen Komponenten, welche aus fein- und grobkörnigen Partikeln bestehen. Das frei fließende Gut befindet sich in Bewegung, wodurch eine berührungslose Messung vorteilhaft ist. Der Wassergehalt ist nur in einem gewissen Ausmaß vorhanden, sodass der Porenraum innerhalb der Schüttung (teilweise) gefüllt ist und das Wasser auch in gebundener Form als Kapillar- oder Adsorptionswasser vorliegen kann. Es gibt eine klare Abgrenzung zu Untersuchungen von mineralischen Böden, biologischen Substanzen (z.B. Agrarprodukten) und Fraktionen aus rein feinkörnigen Komponenten (z.B. Staub).

Im ersten Teil wird der theoretische Zusammenhang zwischen Dielektrika, Polarisations-eigenschaften von Wasser sowie des Einflusses des Wassergehaltes auf die Dielektrizität der Mischung und dessen Ausnützung bei der Bestimmung der Feuchte mittels elektromagnetischer Strahlung erläutert. Im Detail werden drei unterschiedliche Kontaktmöglichkeiten zwischen dem elektromagnetischen Feld und des Materials behandelt: Reflexion, Transmission und Resonanz. Jede Art wird hinsichtlich Aufbau und Auswertung beschrieben sowie verglichen. Folglich wird die Bestimmung der Feuchte über die Verbindung zwischen Signalerzeugung/–verarbeitung und der daraus bestimmten Dielektrizitätskonstante sowie der infolgedessen mathematischen Berechnung der Feuchte des Gutes in den Fokus gestellt. Anhand dieser Informationen soll auf Störgrößen eines möglichen Sensors geschlossen werden und Möglichkeiten zur Vermeidung von Fehlerquellen („Störeinflüssen“) gefunden werden. Dazu wird die theoretische Entstehung von mehreren Einflussparameter in deren chemischen/ physikalischen Grundlage betrachtet. Schlussendlich ist es ein Ziel der Arbeit die Einflussparameter einer bestimmten mineralischen Schüttung als Problemstellung zu konkretisieren und diese als relevant bzw. irrelevant für die Feuchtemessung klassifizieren zu können.

Nach den Analysen über mögliche Störeinflüsse sollen Auswertemethoden hinsichtlich der genannten drei Verfahren (Reflexion, Transmission und Resonanz) untersucht werden. Dazu wird der mathematische Zusammenhang zwischen den jeweiligen gemessenen Größen (Amplitudendifferenz/Phasenverschiebung bzw. Resonanzfrequenz/Güte) und der Gutfeuchte begutachtet. Bei der Untersuchung soll eine Zusammenführung des theoretischen Wissens mit realisierbaren Schaltungen aus der Literatur sowie bereits bestehenden Sensor-Systemen und experimentellen Ansätzen erfolgen. Durch Betrachtung der zuvor festgestellten Einflussfaktoren auf die Messergebnisse, sollen auch Methoden zur Kompensation dieser Parameter gefunden werden.

Erzielt wird somit, dass der Zusammenhang zwischen der feuchteabhängigen Dielektrizitätskonstante der Mischung und der Wechselwirkung mit Mikrowellen in unterschiedliche Messvarianten ausgenutzt werden kann und eine Anwendungsempfehlung gegeben wird. Das umfassende Ziel ist es, eine Verbindung zwischen theoretischem Wissen und praktischen Anwendungsmöglichkeiten samt deren Problematiken zu schaffen.

2 Grundlagenteil

In diesem Kapitel werden in mehreren Unterkapiteln das theoretische Basiswissen und die notwendigen Zusammenhänge der elektromagnetischen Feuchtemessung geschildert. Es soll dazu dienen die im nächsten Kapitel folgenden Untersuchungen zu verstehen und nachvollziehen zu können. Dazu wird zunächst das betrachtete Material nochmals genauer beschrieben. Anschließend werden Thematiken über Dielektrika und deren Einsatz bei der elektromagnetischen Feuchtemessung sowie dessen Messprinzip geschildert.

2.1 Abgrenzung des Gegenstandes der Untersuchung

Wie bereits aus dem Titel geschlossen werden kann, werden im Rahmen dieser Masterarbeit mineralische Schüttgüter betrachtet. In diesem Kapitel soll dahingehend eine detaillierte Auflistung der Stoffeigenschaften erfolgen. Dazu wurde eine Concept-Map erstellt, welche die wesentlichen Charakteristika der untersuchten Materialien und deren Wechselwirkungen grafisch beschreiben soll (siehe Abbildung 2-1 auf der nächsten Seite).

Es handelt sich demnach um eine lose Schüttung aus anorganischen Komponenten, welche frei fließend und in Bewegung (z.B. auf einem Förderband) sind. Aus diesem Grund wird eine kontaktlose Feuchteerfassung vorrangig begutachtet. Das Wasser liegt in freier und in gebundener Form als Kapillar- bzw. Porenwasser vor. Nachdem ein Wassergehalt bis maximal 8 Masse-% vorliegt, wird kein wässriger bzw. schlammartiger Feststoff untersucht. Das vorhandene Wasser sorgt für eine Agglomeration der feinen und groben Anteile im Granulierprozess. Es handelt sich bei der Betrachtung um fein- bis grobkörnige Güter (keine feinstkörnigen Materialien wie Stäube) und es werden biologische bzw. organische Bestandteile ausgeschlossen. Es soll ebenfalls eine klare Abgrenzung zu Baustoffen und Böden (Sedimenten) getroffen werden. Ein typischer Anwendungsbereich für die in dieser Arbeit betrachteten Stoffe stellt eine Grünmischbereitung für eine Sinteranlage dar.

Daraus lassen sich wesentliche Störfaktoren bestimmen, welche eine Feuchtemessung erschweren bzw. verfälschen können. Neben den Rahmenbedingungen wie Temperatur- und Frequenzbereich, spielen auch die Ionenleitfähigkeit des vorhandenen Wassers eine wesentliche Rolle. Die Korngrößenverteilung des Schüttgutes hat Einfluss auf die Schüttdichte und die spezifische Oberfläche, wobei beide die Dielektrizitätskonstante und somit die Feuchtemessung beeinflussen. Des Weiteren können unterschiedliche Zusammensetzungen (Eisen-Spezies, Additive etc.) ebenfalls eine störende Komponente darstellen. Daraus ist zu erkennen, dass es sich bei einem mineralischen Schüttgut aus einem komplexen System mit mehreren Einflussfaktoren handelt, welche alle separat im Zuge dieser Arbeit analysiert werden und einen gewissen Zusammenhang zeigen. Diese Vorgehensweise dient als Grundlage, um den geeigneten Untersuchungsrahmen zu definieren und folglich Entscheidungen über Auswerteprozessuren treffen zu können.

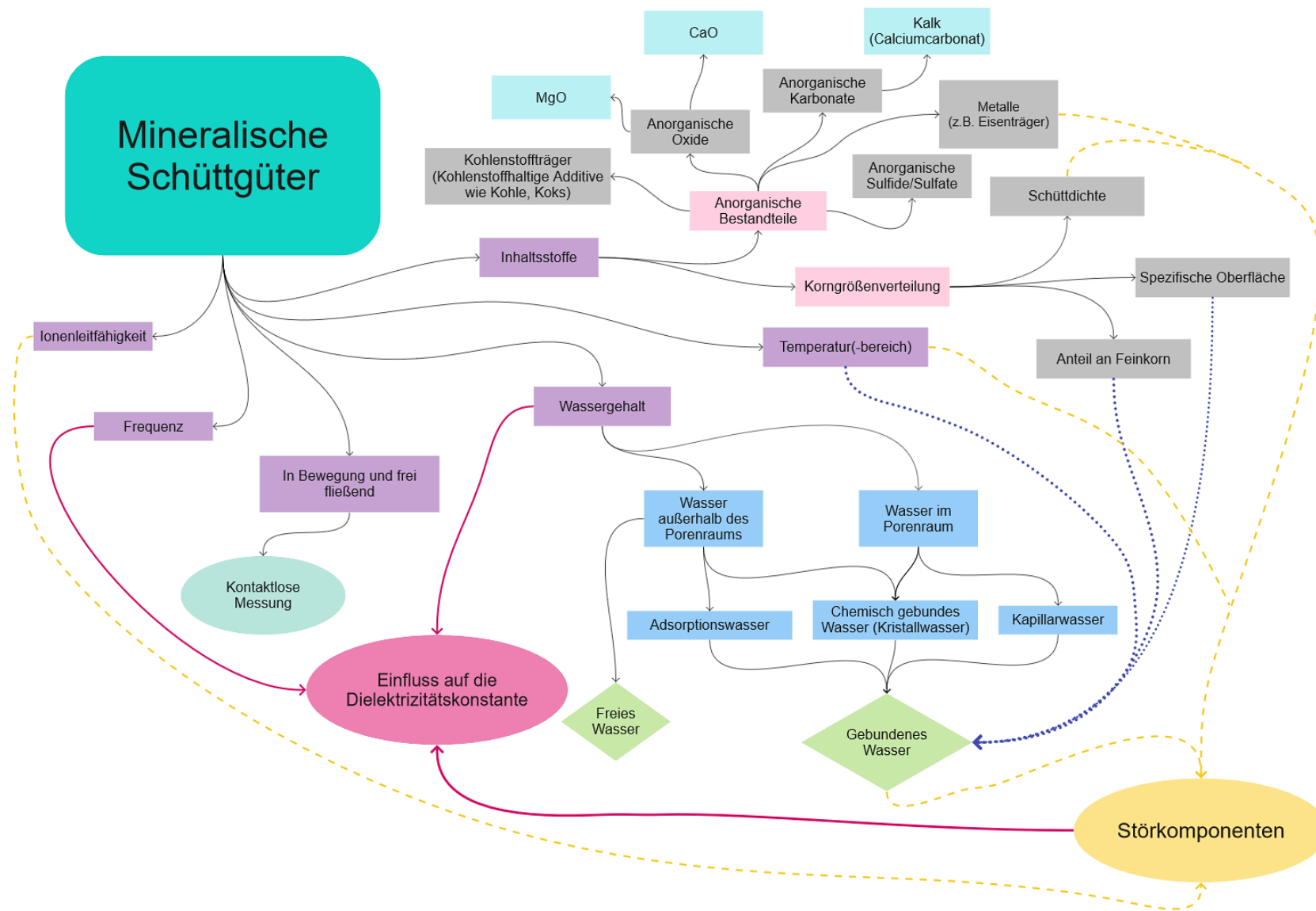


Abbildung 2-1: Concept-Map zur Visualisierung des Begriffs "mineralisches Schüttgut" und dessen Eigenschaften sowie Störparameter bei der Feuchtemessung. [Online erstellt unter <https://miro.com/de/>]

2.2 Dielektrika und Dielektrizitätskonstante

Vor der Beschreibung von Dielektrika soll zunächst der Term „elektromagnetisch“ im Titel dieser Arbeit genauer erläutert werden. Dieser bezieht sich auf den Einsatz von elektromagnetischer Strahlung in Form von Mikrowellen. Diese zählen zu den elektromagnetischen Wellen, welche laut Tipler et al. und Nyfons [1, 2] nur Energie sowie Impuls, aber keine Materie transportieren können. Sie benötigen kein Ausbreitungsmedium und breiten sich im luftleeren Raum (Vakuum) mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die Unterteilung von elektromagnetischen Wellen erfolgt nach gewissen Frequenz- bzw. Wellenlängenbereichen. Als „Mikrowellen“ werden jene bezeichnet, welche eine Frequenz von ca. 300 – 3000 MHz bzw. eine Wellenlänge von ca. 1 mm bis 1 m besitzen. Die Nutzung von Mikrowellen bietet einige Vorteile [2, 3]:

- Kein Kontakt zum Medium erforderlich und kein Einfluss auf die Substanz.
- Stabile Strahlung, welche unempfindlich gegenüber Umwelteinflüssen (z.B. hohen Temperaturen oder Ablagerungen) ist.
- Bei geringeren Frequenzen (1 – 3 GHz) unabhängig von der elektrischen Gleichstrom-Leitfähigkeit der Materialien und somit auch von der Temperatur sowie dem Ionengehalt (Salz- und Mineralienkonzentration).
- Bei einer höheren Wellenlänge (ca. 15 cm) ist die Eindringtiefe der Strahlung groß, sodass nicht nur eine Messung der Oberflächenfeuchte, sondern auch jener im Inneren des Gutes möglich ist.

Dennoch gibt es auch Nachteile [2]:

- Kalibration notwendig (vor allem bei Wechsel des zu untersuchenden Mediums).
- Durch Störkomponenten beeinflussbar.

Um die Funktionsweise von Feuchtemesssensoren mittels elektromagnetischer Strahlung zu verstehen, muss zuerst veranschaulicht werden woraus eine Wechselwirkung der Wassermoleküle und dem EM-Feld resultiert. Als „Dielektrika“ werden nach Tipler et al. sowie Gauckler und Conder [1, 4] jene Substanzen bezeichnet, welche elektrisch nicht bzw. schwach leitend sind. Unter genauerer Betrachtung besitzen diese einen hohen elektrischen Widerstand und keine frei beweglichen Ladungsträger wie Elektronen oder Ionen. Wasser zählt zwar zu den Dielektrika, kann aber aufgrund seines dissoziativen Zustandes oder durch gelöste Salze einen niedrigeren elektrischen Widerstand besitzen und dadurch kann elektrischer Strom teilweise fließen [5]. Wasser weist durch seine chemische Struktur einen permanenten elektrischen Dipol auf, welcher bei Anlegen eines elektrischen Feldes wie alle Dielektrika „polarisiert“ werden kann [1, 4]. Polarisation bedeutet nach Hippel [6], dass ortsfest gebundene positive und negative Ladungen durch Anlegen eines elektrischen Feldes verschoben werden können. Im Falle von Wasser handelt es sich dabei um Dipole, die eine Kette bilden und somit zu einer Ladungstrennung der verschiebbaren („freien“) Ladungsträger und zur Neutralisation der gebundenen Ladungsträger auf der Oberfläche von Kondensatorplatten führt. Aus diesem Grund erhöht sich die Menge an speicherbarer

Energie (= „Kapazität“). Tipler et al. sowie Gauckler und Conder [1, 4] zeigen, dass die zu Beginn ungeordneten Moleküle in die Richtung des angelegten Feldes rotieren, und dies daher „Orientierungspolarisation“ genannt wird. Dabei kommt es zu einer Abschwächung des elektrischen Feldes, weil in den Molekülen ebenfalls ein elektrisches Feld durch das elektrische Dipolmoment erzeugt wird, welches aber dem angelegten Feld entgegengerichtet ist. Als Maß für die genannte Verringerung dient die Dielektrizitätskonstante ε , welche sich aus der Multiplikation der relativen Dielektrizitätskonstante ε_r (stoffspezifisch) und der Dielektrizitätskonstante des Vakuums ε_0 (Konstante) zusammensetzt. Wenn das elektrische Feld zeitlich alterniert, sind dieses sowie die Polarisation von der Zeit abhängig und beide zueinander sind nicht mehr in Phase. Dadurch entstehen energetische Verluste als Folge eines Energieverbrauch bei der Polarisation von + nach – sowie umgekehrt (Materialerwärmung) und dielektrische Verluste durch Reibung bei der Umpolarisation. Daher wird ε_r , auch „Permittivität“ genannt, als komplexe Größe mit einem Realteil ε_r' und Imaginärteil ε_r'' wie folgt nach Formel (1) definiert.

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' + i * \varepsilon_r'' \quad (1)$$

Der Verlustfaktor d entspricht dem Tangens des Verlustwinkels δ nach Gleichung (2) und gilt als Maß für die dielektrischen Verluste.

$$d = \tan \delta = \frac{\varepsilon_r''}{\varepsilon_r'} \quad (2)$$

Hierbei soll noch erläutert werden, dass nach Nyfons [2] der Realteil ε' als Maß für die Fähigkeit elektrische Energie zu speichern gilt und der Imaginärteil ε'' als „Verlustfaktor“ die Minderung der Energie des elektrischen Feldes widerspiegelt¹. Die Permittivität ist neben weiteren Einflussfaktoren (siehe Kapitel 3) von der Frequenz abhängig. Hübner et al. [7] zeigen nach folgender Abbildung 2-2 den Verlauf der Dielektrizitätskonstante von Wasser mit der Frequenz. Der Realteil der Dielektrizitätskonstante ε' ist bis zu einer Frequenz von 3 GHz annähernd konstant. Die maximalen dielektrischen Verluste treten beim Maximalwert der Frequenzkurve des Imaginäranteils ε'' auf. Dabei besitzt die „Relaxationsfrequenz“ ν_w einen Wert von ca. 20 GHz (vgl. die blauen Pfeile in der genannten Abbildung). Der Term $(2 * \pi * \tau_w)^{-1}$ entspricht dem der Relaxationsfrequenz und enthält die Relaxationszeit τ_w des reinen Wassers.

¹ An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass folglich zur vereinfachten Schreibweise mit dem Ausdruck ε immer die stoffspezifische Dielektrizitätskonstante ε_r gemeint sein soll.

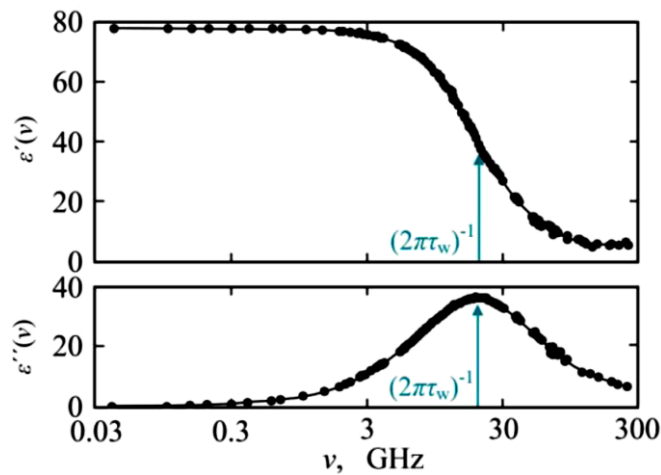


Abbildung 2-2: Abhängigkeit der realen und imaginären Dielektrizitätskonstante ϵ des Wassers bei 25°C von der Frequenz ν . [7]

2.3 Messung der Feuchte

In welcher Art und Weise der Zusammenhang zwischen der Dielektrizitätskonstante und den Wellenparameter geschaffen werden kann, wird folglich analysiert. Wenn Mikrowellen auf Materie treffen, treten unterschiedliche Arten von Wechselwirkungen auf [2]. Es kann zur Reflexion, Brechung, Streuung, Emission, Absorption oder zur Änderung der Geschwindigkeit bzw. der Phase der Welle kommen. Je nach Art der Wechselwirkung wurden unterschiedliche Sensorarten etabliert, welche in folgender Abbildung 2-3 ersichtlich sind. Jene Messprinzipien, welche im Rahmen dieser Arbeit begutachtet werden, wurden mit einem blauen Rahmen versehen. Alle drei Varianten eignen sich je nach gesuchter Eindringtiefe für die Feuchtemessung von losem Schüttgut in einer Schicht, beispielsweise auf einem Förderband.

Unknown	Circumstances	Possible choice				
		Reflection, TDR	Resonator	Transmission	Radar, interferometer	Radiometer Tomography
Temperature						x
Distance, long					x	
Distance, short		x	x			
Level		(x)	(x)		x	
Movement			(x)		x	
Speed					x	
Size			(x)		x	x
Detection of buried objects or int. structures					x	x
Material properties via (ϵ_r, μ_r)	Single object ($< \lambda$)	(x)	x	(x)		
	Single object ($> \lambda$)	(x)	(x)	x		
	Sheet-like material	(x)	x	(x)		
	Thick layer ($> \lambda$) (measurement through)			x		
	Thick layer of filled "half-space" (surface measurement)	x	x	x		
	Thread ($< \lambda$)		x			
	Liquid or granular, solid material in pipe	(x)	x	x		
	Gas		x	(x)		
	Solid particles in pneumatic transportation		x		x	
	Sensor inserted in soft material	x	x			

Abbildung 2-3: Auswahl an Mikrowellensensoren anhand der zu untersuchenden Eigenschaft. Gegenstand der Untersuchung sind die Verfahren, welche mit einem blauen Rechteck markiert wurden. [Mod. nach 2]

Je nach Art der Wechselwirkung kann die Messung der Feuchte nach Momber und Schultz [8] über unterschiedliche Anordnungsvarianten erfolgen, welche in folgender Abbildung 2-4 zusammengefasst wurden.



Abbildung 2-4: Anordnungen der Feuchtemessung bei Transmission, Reflexion und Resonanz. [8]

Dabei werden in jedem Fall die unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften der Komponenten im Material ausgenutzt. Angemerkt soll noch werden, dass sich die Amplitudendämpfung A bzw. Phasenverschiebung ϕ der elektromagnetischen Welle durch Wechselwirkung mit dem Medium bei der Reflexion- und Transmissionsmessung in der komplexen Zahlenebene darstellen lassen und die Resonanzfrequenz f_r bzw. Güte Q skalare Parameter der Resonanzmessung sind. Alle hängen aber in gewisser Weise von der Feuchte, der Dichte, der Temperatur und der Materialdicke ab.

Im Folgenden werden die drei wesentlichen Messarten Reflexion und Transmission sowie Resonanz näher beschrieben.

2.3.1 Reflexion und Transmission

Das Prinzip der Messung mittels Reflexion und Transmission ist ähnlich, wobei die Messanordnung unterschiedlich ist. Aus diesem Grund wird zunächst die allgemeine Auswertung beschrieben und darauffolgend die jeweiligen Charakteristika der Messung.

Wenn eine elektromagnetische Welle mit einem elektrischen Feld E_i auf eine Materie trifft, kann diese nach Trabelsi et al. [9] entweder reflektiert (E_r) oder transmittiert (E_t) werden. Folgende Abbildung 2-5 dient dabei als Veranschaulichung. Das Material besitzt eine gewisse Schüttdichte ρ und Feuchte M sowie Temperatur T , welche einen Einfluss auf die Wechselwirkung mit dem elektrischen Feld ausüben.

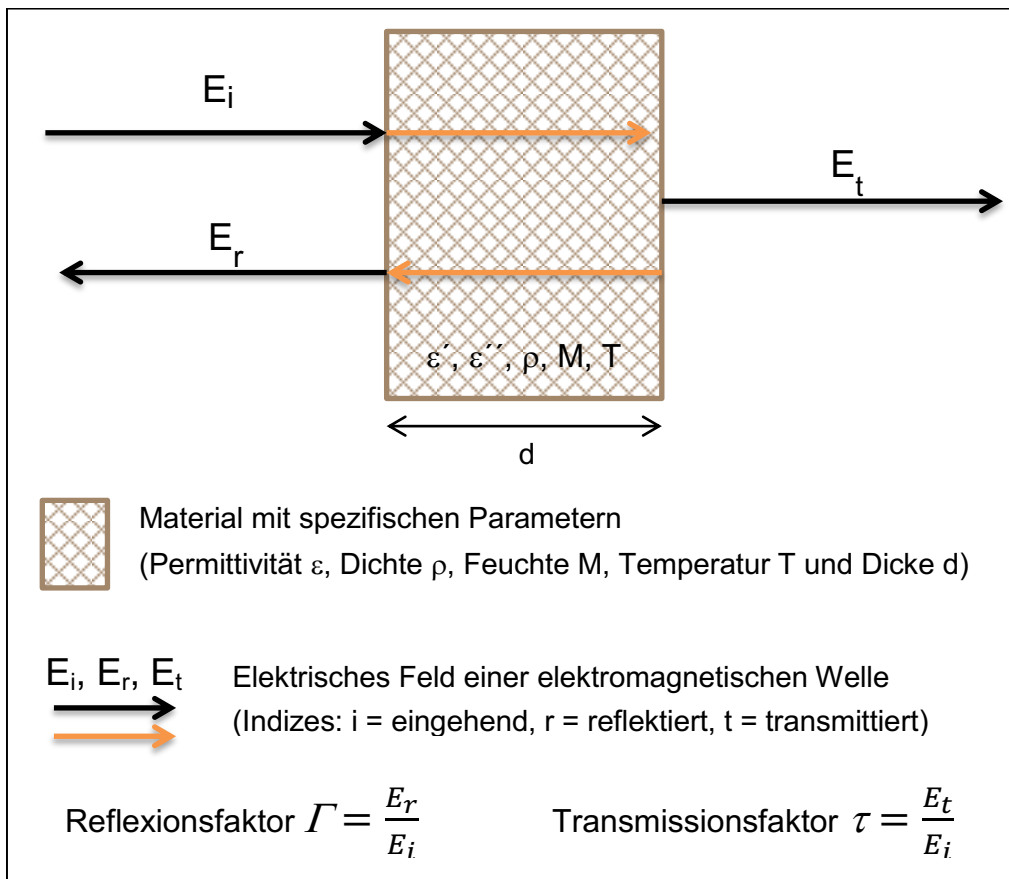


Abbildung 2-5: Reflektiertes und transmittierendes elektrisches Feld durch eine Probe. [Mod. nach 9]

Die zwei charakteristischen Größen beim Vergleich von zwei elektromagnetischen Wellen sind nach Nelson und Trabelsi [10] die **Amplitudendämpfung (Differenz der Maximalwerte)** und die **Phasenverschiebung der eingehenden im Vergleich zur reflektierten bzw. transmittierten Welle**. Anhand dieser wurden zwei Messwerte eingeführt, welche als „Amplitudenkonstante α “ und als „Phasenkonstante β “ benannt wurden. Jene werden über die Probenlänge d anhand folgender Formel (3) und (4) definiert. Bei der Phasenkonstante wird zusätzlich die Wellenlänge der einfallenden Welle λ_0 als Referenz benötigt.

$$\alpha = \frac{A}{d} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\phi}{d} + \beta_0 \text{ mit } \beta_0 = \frac{2 * \pi}{\lambda_0} \quad (4)$$

Anhand dieser beiden Parameter kann der Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante nach Gleichung (5) sowie (6) berechnet werden.

$$\epsilon' = \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^2 \quad (5)$$

$$\epsilon'' = \frac{2 * \alpha * \beta}{\beta_0} \quad (6)$$

Nach der Literatur [11] wird die Dämpfung A in dB und die Phasenverschiebung ϕ in $^\circ$ (deg) der beiden Wellen (eingehend und reflektiert bzw. transmittiert) wie folgt nach Formel (7) sowie (8) bestimmt. Die Ganzzahl n kann laut Kraszewski [12] bestimmt werden, indem die Messung mit Proben unterschiedlicher Dicke oder durch Messung mit zwei Frequenzen durchgeführt wird.

$$A = 20 * \log|S_{21}| \quad (7)$$

$$\phi = \phi_0 - 2 * \pi * n \quad (8)$$

Dabei muss noch angemerkt werden, dass für den Term S_{21} auch je nach Messaufbau andere Parameter eingesetzt werden können. Zur besseren Veranschaulichung soll dazu Abbildung 2-6 dienen. Nach mehreren Quellen [13, 14] zufolge, besitzen die Streuparameter S jeweils zwei Indizes, welche für die unterschiedlichen Ports (Ein- und Ausgänge) stehen. Somit lassen sich auf unterschiedliche Weise eine Welle in ein Medium (DUT) einleiten und die daraus gewonnen Parameter nutzen. Der Unterschied bei den Streuparametern und den Koeffizienten der Reflexion/Transmission liegt darin, dass erstere die Amplituden der ein- sowie ausgehenden Wellen (a, b) erfassen und die Koeffizienten die Spannungen bzw. die Ströme (U, I).

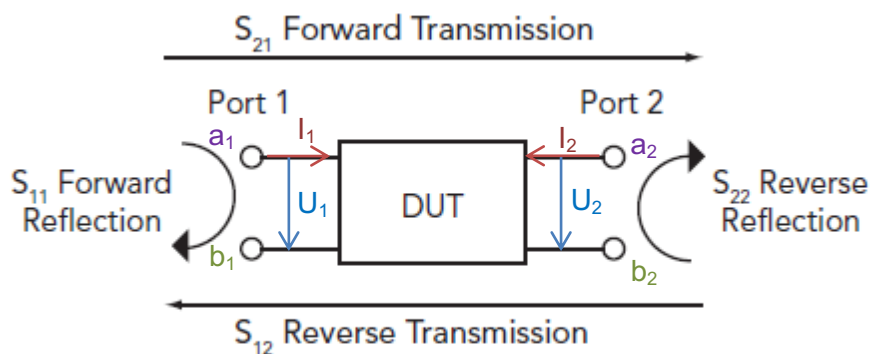


Abbildung 2-6: Bestimmung der S-Parameter anhand der Ein- und Ausgänge. [Mod. nach 13]

Die Dämpfung wird in Dezibel, abgekürzt dB, bestimmt. Nach Keller et al. [15] wird diese Einheit genutzt, um die relativen Werte zweier Parameter wie Energie oder Lärm zu messen. In diesem Fall kann er auch dazu dienen einen Vergleich der Spannungen (V_0 zu V_{ref}) aufzuzeigen. Dies soll nun anhand von folgenden Gleichungen (9) und (10) gezeigt werden. Mittels der Fourier Analyse kann über die Messung eines elektrischen Signals in der Zeit-Domäne, jenes in die Frequenz-Domäne umgewandelt werden.

$$1 B = \log \left(\frac{V_0}{V_{ref}} \right) \quad (9)$$

$$dB = \frac{1}{10} \text{ eines Bels} = 10 \log \left(\frac{V_0}{V_{ref}} \right) \quad (10)$$

Messaufbau - Reflexion

Bei der Reflexion wird eine eingehende Welle (blau) in Richtung des Materials ausgesendet und eine reflektierte Welle (rot) detektiert. Der physikalische Grund liegt dabei nach Hübner et al. [7] an der Änderung der Dielektrizitätskonstante zwischen dem freien Raum und dem Material bei $x = 0$ (Materialoberfläche). Dies führt zu einer Änderung der Impedanz vom freien Raum (Z_0) zur Materie (Z), wodurch die Welle reflektiert wird. Dies soll anhand folgender Abbildung 2-7 grafisch illustriert werden. Ebenfalls in der Grafik sind die Berechnungsformeln des Reflexionskoeffizienten r und der Impedanz der Materie Z (Wellenwiderstand) zu erkennen, wobei letztere von dessen Dielektrizitätskonstante ε abhängt. Die Reflexion der Welle kann sowohl an der Oberfläche als auch im Inneren der Probe erfolgen.

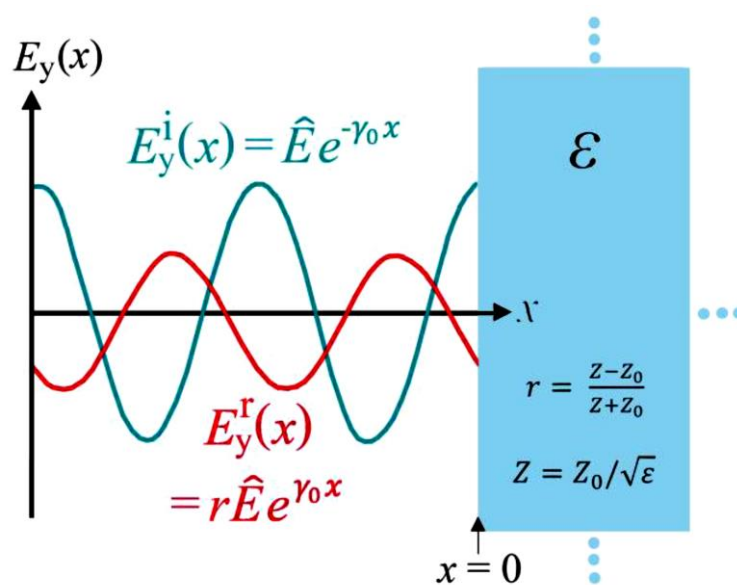


Abbildung 2-7: Reflexion einer elektrischen Welle an einem Dielektrikum bei $x = 0$. Die Ausgangswelle wird in Blau (hochgestelltes i) und die reflektierte Welle in Rot (hochgestelltes r) dargestellt. [7]

Bei der Reflexionsmessung wird laut Hübner et al. [7] zumeist eine so genannte „Cut-Off“-Variante verwendet. Bei dieser werden Koaxialkabel (1) mit einem offenen Ende mit der Probe über einen Flansch (2) leitend verbunden. Abbildung 2-8 zeigt unter a diesen so genannten „unendlichen Halbraum“, der vorherrschend ist, wenn ein großes Probenvolumen und ausreichend hohe dielektrische Verluste vorliegen, sodass Signale von anderen Grenzflächen vernachlässigt werden können. Es ist auch möglich die Probe in der Koaxialleitung direkt einzubinden, was in der selbigen Abbildung unter c gezeigt wird. Der Ersatzschaltkreis für diesen Messaufbau ist unter b zu erkennen. Es soll noch angemerkt werden, dass auf die Verwendung eines Flansches auch verzichtet werden kann, wobei das Ersatzschaltbild in diesem Fall anders dargestellt werden muss. Es ist auch möglich zur Messung der Feuchte mittels Reflexion Antennen zu benutzen, wobei dies als „Open-Space“ bezeichnet wird (d).

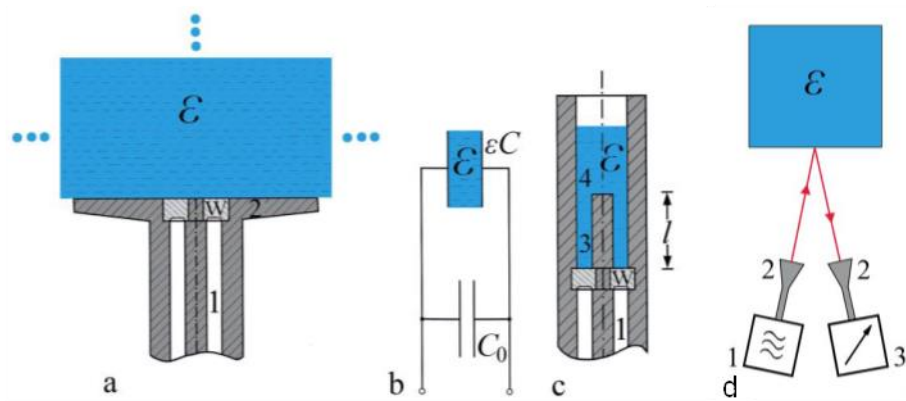


Abbildung 2-8: Reflexionsmessung mittels Koaxialkabeln (a – c als „Cut-Off“-Variante) oder Antennen (d, „Open-Space“). [Mod. nach 7]

Man unterscheidet bei der Reflexionsmessung zwischen TDR („Time domain reflectometry“) und FDR („Frequency domain reflectometry“). Bei ersterem wird nach Černý [16] die Reflexion als Funktion der Zeit gemessen. Da jede Veränderung im Kabel-Proben-System eine partielle oder totale Reflexion erzeugt, können mehrere reflektierte Wellen detektiert werden. Diese können entweder in Phase (Impedanzvergrößerung Kabel zu Probe, Anstieg der Amplitude bei der reflektierten Welle vom offenen Ende) oder wie meistens in Gegenphase (Impedanzabfall Kabel zu Probe, Verringerung der Amplitude) sein. Die Ermittlung der Dielektrizitätskonstante erfolgt über die Bestimmung der Zeiten zwischen ausgehendem Signal und den empfangenen Signalen sowie der Probendicke. Bei der FDR wird der Reflexionskoeffizient über das Verhältnis zwischen den Spannungsmaxima des reflektierten $V^-(\omega)$ und des ausgehenden Spannungs-Signales $V^+(\omega)$ in Abhängigkeit der (Kreis-)Frequenz bestimmt. Gleichung (11) zeigt zusammenfassend die Bestimmungsvarianten des Reflexionskoeffizienten über einen Spannungsvergleich bzw. den Impedanzen [7, 16]. Die Dielektrizitätskonstante kann anschließend über den Reflexionskoeffizienten berechnet werden.

$$\text{Reflexionskoeffizient } \Gamma = \frac{V^-(\omega)}{V^+(\omega)} \text{ und } r = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (11)$$

Messaufbau – Transmission

Im Falle der Transmission wird nach Hübner et al. [7] in den meisten Fällen eine „Open-Space“-Messanordnung gewählt, welche zusammen mit anderen Aufbauarten in folgender Abbildung 2-9 illustriert wird. Unter a – c werden unterschiedliche Varianten einer berührungslosen Kopplung dargestellt, wobei unter c die Probenlänge variiert werden kann (4), wodurch eine Kalibration nicht mehr nötig ist. In allen drei Fällen gibt es ein Probengefäß (1) in welches eine Welle eingeleitet wird (2) und eine transmittierte Welle (3) empfangen wird. Bei der „Open-Space“-Messung unter d stehen sich die Antennen (6) zur Aussendung über eine Aussendungseinheit (5) und dem Empfang der Wellen durch einen Detektor (7) gegenüber, wobei es in Ausnahmefällen auch zu einer Schrägstellung kommen kann [17]. Es muss dabei geachtet werden, dass es zu Fehlmessungen kommen kann, wenn

Probenbehältnisse oder durchstrahlte Elemente wie Förderbänder aus elektrisch leitendem Material bestehen (z.B. Gummi mit Graphitanteilen, Metalle) und somit Einstrahlfenster aus Kunststoff, Glas oder Keramik verwendet werden müssen [17].

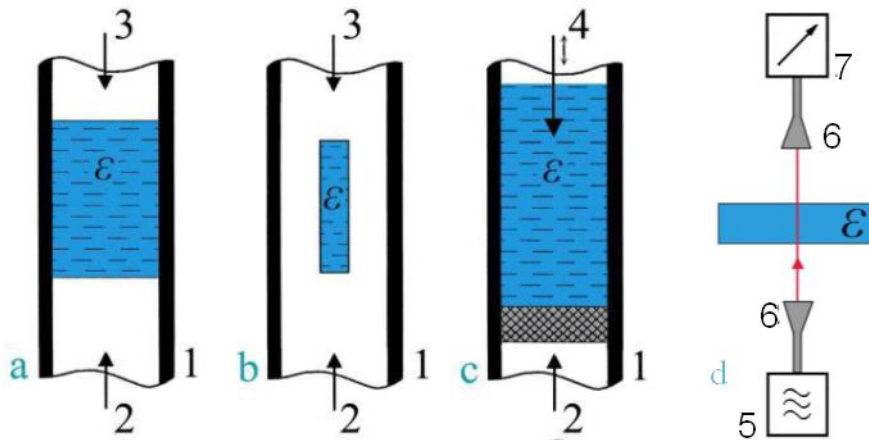


Abbildung 2-9: Messung mittels einer berührungslosen Kopplung (a – c) und der „Open-Space“-Variante (d) bei der Transmissionsmessung. [Mod. nach 7]

Bei der Transmission durchdringt nach einem Sensorhersteller [17] die elektromagnetische Welle das Medium. Durch das Medium wird die Welle in Abhängigkeit von dessen Dielektrizitätskonstante mehr oder weniger stark in ihrer Intensität verändert (Dämpfung A) und verlangsamt (Phasenverschiebung ϕ). Zur Auswertung wird anschließend die transmittierte Welle herangezogen und mit dem eingehenden Signal verglichen. Das beschriebene Auswertprinzip soll in folgender Abbildung 2-10 dargestellt werden. Durch die Abhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von der Feuchtekonzentration und dem Zusammenhang zum Maß der Dämpfung bzw. Phasenverschiebung kann schließlich die Feuchte des Materials bestimmt werden.

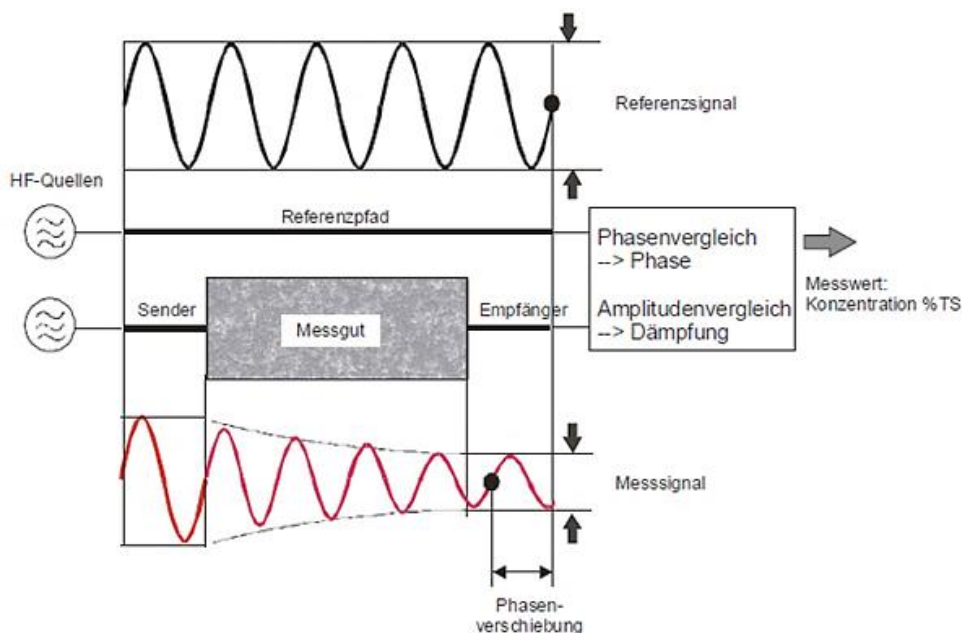


Abbildung 2-10: Messprinzip bei der Transmissionsmessung. [17]

2.3.2 Resonanz

Messaufbau

Resonatoren besitzen nach Kupfer et al. [18] im Allgemeinen einen in Abbildung 2-11 gezeigten Aufbau. Ein Mikroprozessor (CPU) kontrolliert einen Generator (GEN), welcher die elektromagnetischen Wellen durch den Resonator sendet. Ein Detektor (DET) erfasst die erhaltene Welle. Schließlich wird im Mikroprozessor die Messergebnisse analysiert und daraus die Feuchte des Gutes bestimmt.

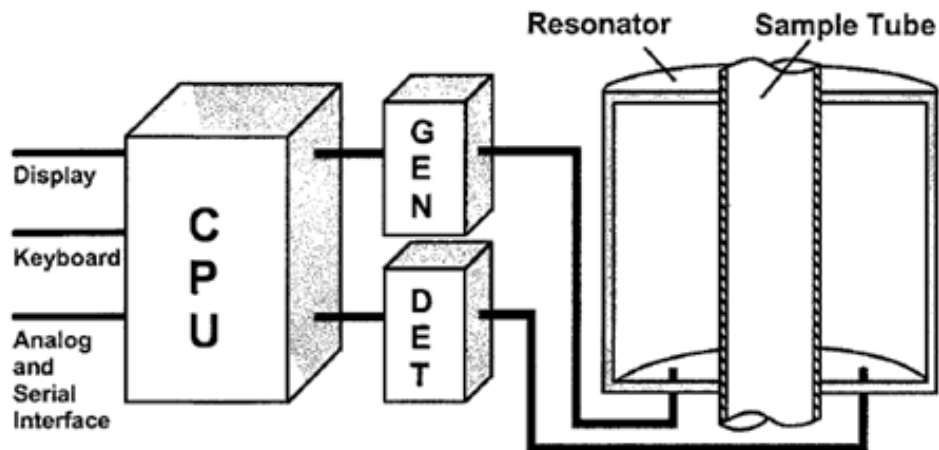


Abbildung 2-11: Allgemeiner Aufbau eines Resonators. [18]

Als Resonanzkörper, welche die elektromagnetischen Felder erzeugen, werden Materialien mit einem geringen dielektrischen Verlust wie Saphir verwendet. Die Resonanzkurve kann entweder durch ein transmittierendes oder reflektierendes Signal bestimmt werden [7]. Dabei besitzt die Kurve ein unterschiedliches Aussehen (vgl. Abbildung 2-12), wobei bei der Reflexion Kurventäler und bei Transmission Kurvenberge erhalten werden [18]. Unabhängig von der Messart werden je nach Feuchtegehalt Kurven mit unterschiedlicher Resonanzfrequenz und Bandbreite erhalten.

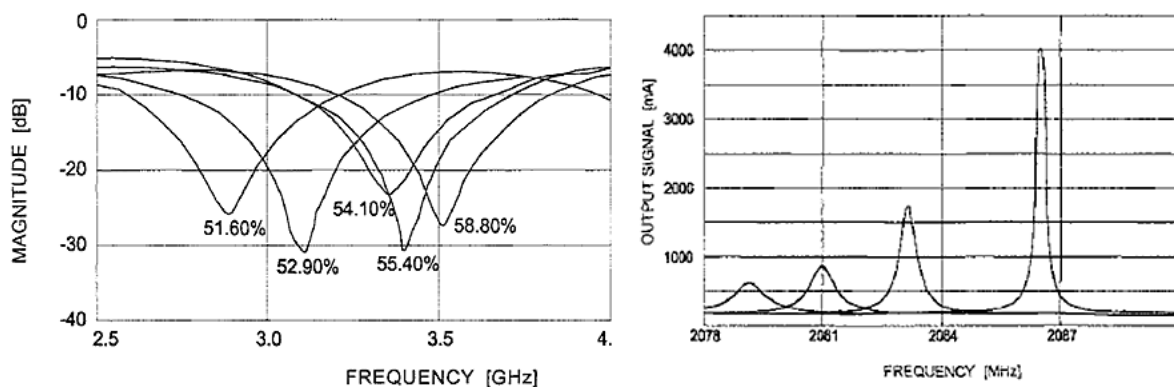


Abbildung 2-12: Aussehen der Resonanzkurve je nach Messtyp (Links: Reflexion, Rechts: Transmission). [18]

Hinsichtlich des Resonators sei noch anzumerken, dass dieser mehrere Resonanzfrequenzen nach Abbildung 2-13 (linkes Diagramm) aufweisen kann, wobei die Amplitude der Resonanzkurve unterschiedlich hoch ist [19]. Unter Abbildung 2-13 rechts ist zu erkennen, dass beispielsweise bei der Untersuchung von Weizenkörnern mit einem Hohlraumresonator die Resonanzfrequenz des leeren Resonators bei $p = 5$ mit 10,527 GHz ($\nabla 1$) herangezogen wurde und mit der Resonanzfrequenz des befüllten Resonators ($\nabla 2$) verglichen wurde.

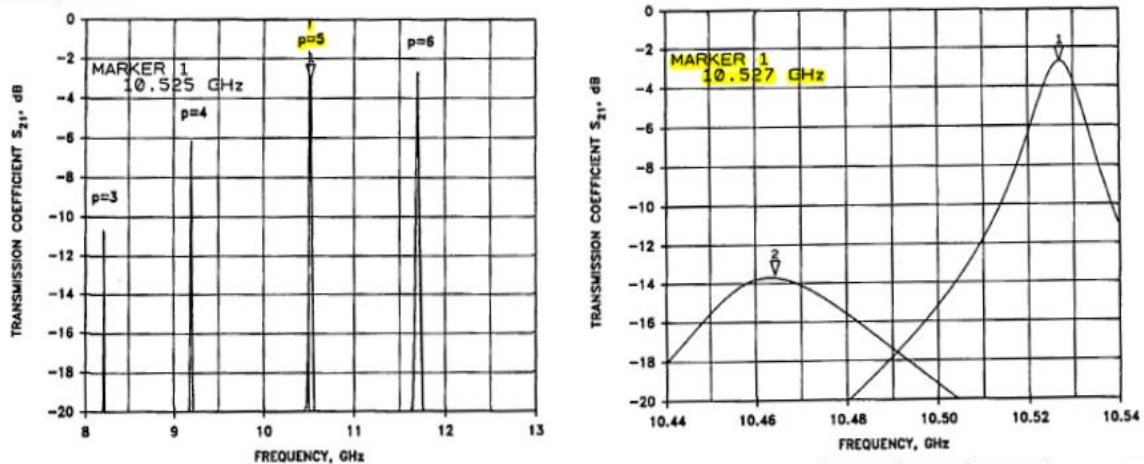


Abbildung 2-13: Auswahl der geeigneten Resonanzfrequenz anhand der Amplitudengröße (links) und Vergleich mit dem mit Probe befüllten Resonator (rechts). [19]

Okamura et al. [20] zeigen nach Abbildung 2-14, dass es drei unterschiedliche Herangehensweisen an die Bestimmung der Resonanzfrequenz gibt. Nach der ersten Methode wird der höchste Punkt der Kurve verwendet („Peak Point“). Bei der zweiten Methode wird die Steigung und der Achsenabschnitt einer Gerade über gewisse Kurvenparameter berechnet und anschließend über den Schnittpunkt der Gerade mit der Resonanzkurve der „straight line fitting midpoint“ bestimmt. Die dritte Methode umfasst die Bestimmung einer quadratischen Kurve, wessen Koeffizienten ebenfalls über Kurvenparameter ermittelt werden. Der Schnittpunkt der Resonanzkurve und der Funktion ergibt den gesuchten „curve fitting midpoint“. Bei dieser Untersuchung von Cardboards mit einem Feuchtebereich von 5 – 115 % konnte festgestellt werden, dass letztere Methode das präziseste Messergebnis lieferte. Anzumerken ist, dass die „curve fitting midpoint methode“ bei realen Messungen (mehr „Rauschen“) und bei niedrigen Q-Faktoren vorteilhafter ist.

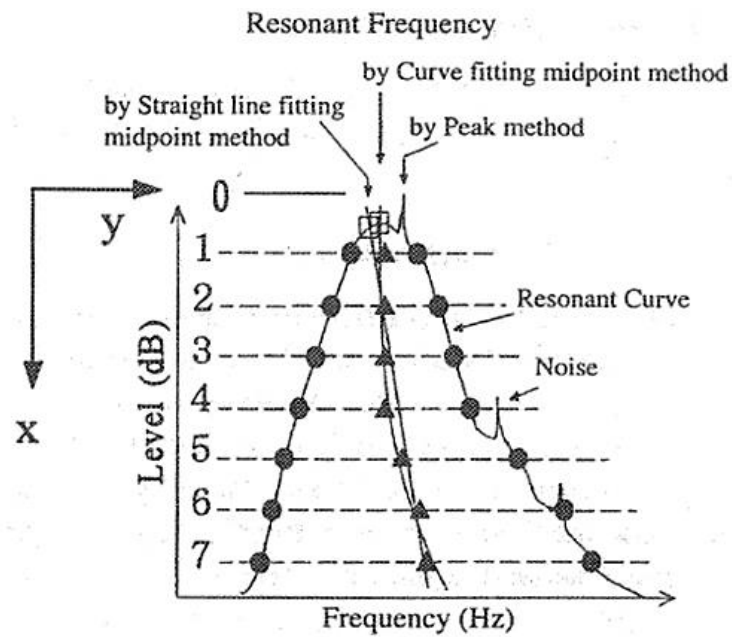


Abbildung 2-14: Bestimmung der Resonanzfrequenz über drei unterschiedliche Methoden. [20]

Das Ersatzschaltbild eines Resonators ist nach Kupfer et al. [18] eine Parallelschaltung aus einem ohmschen Widerstand R , einer Induktivität L und einer Kapazität C . Die Resonanzfrequenz des leeren Resonators lässt sich demnach nach folgender Formel (12) berechnen.

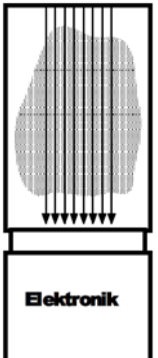
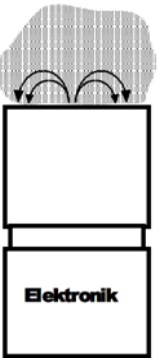
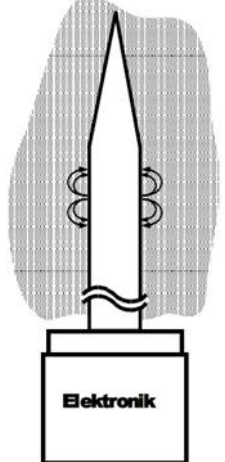
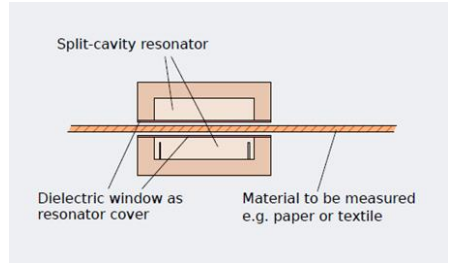
$$f_{r0} = \sqrt{\frac{1}{L * C}} \quad (12)$$

Dessen Güte lässt sich nach selbigem Ersatzschaltbild nach Gleichung (13) bestimmen.

$$Q_{r0} = \frac{R}{\omega * L} \quad (13)$$

Der Resonator selbst kann in unterschiedlichen Ausführungen vorliegen, welche von der Art des Materials abhängig ist (Granulat, Puder, Flüssigkeit etc.). Man unterscheidet drei wesentliche Resonator-Arten [2, 18, 21–23].

Tabelle 2-1: Zusammenfassung über die wichtigsten Resonator-Bauarten. [2, 18, 21–23]

	Hohlraumresonator (Geschlossene Resonatoren)	Streifeldresonator (Offene Resonatoren)	Einstechresonator (Unterart Streifeldr.)	Geteilter Resonator
Abbildung				
Aufbau	<ul style="list-style-type: none"> - Nach allen Seiten geschlossen - Mit dem zu untersuchenden Material gefüllt 	<ul style="list-style-type: none"> - Einseitig offener Mikrowellensensor - Feld besitzt eine gewisse Reichweite - Frequenzabhängiger Messbereich (hohe f für kleine Bereiche und niedrige f für größere Bereiche) <ul style="list-style-type: none"> - Messbereich liegt zwischen 0,5 und 5 GHz - Häufig mit kreisförmigem Sensor (Durchmesser 20 mm) und eine universelle Frequenz von 2,4 GHz - Das erzeugte Feld kann dabei das gesamte Material oder nur einen Teil davon durchdringen 	<ul style="list-style-type: none"> - Können direkt in das Material eingetaucht werden 	<ul style="list-style-type: none"> - Besteht aus zwei Hälften mit zu messendem Material dazwischen - Realisierbarer Abstand wären 2 cm - Dielektrische Fenster als Abdeckung des Resonators nötig

	Hohlraumresonator (Geschlossene Resonatoren)	Streifeldresonator (Offene Resonatoren)	Einstechresonator (Unterart Streufeldr.)	Geteilter Resonator
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> - Höchste Genauigkeit, weil das gesamte Material mit dem Messfeld in Kontakt steht - Nicht nur Oberflächenfeuchte gemessen - Wenig Strahlungsverluste 	<ul style="list-style-type: none"> - Besserer Kontakt zwischen Material und Resonator - Bedienung im Prozess möglich - Einsetzbar, wenn nur einseitiger Zugang - Für sehr verlustreiche Materialien (wasserbeinhaltende Mixturen) - Auch für körniges (granuliertes) Material geeignet 	<ul style="list-style-type: none"> - Als Handgerät verfügbar 	<ul style="list-style-type: none"> - Hohe Messempfindlichkeit - Messung während Prozess möglich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - Probenahme erforderlich - Nur für sehr verlustarme Materialien (Resonanz verringert sich ansonsten zu stark) 	<ul style="list-style-type: none"> - Plane Oberfläche sollte gegeben sein - Design schwierig - Strahlungsverluste hoch - Schwieriger Kalibrationsprozess 	<ul style="list-style-type: none"> - Inhomogener Feldverlauf - Geringe Eindringtiefe (Abnahme mit ca. $1/r^3$) - Ungenaue Messung 	<ul style="list-style-type: none"> - Nur für dünne Materialien

Messprinzip und Auswertung

Die Messung mittels eines Resonators beruht nach Kupfer et al. [18] auf der Wechselwirkung des elektromagnetischen Streufeldes mit den Wassermolekülen. Dies soll nun anhand von Abbildung 2-15 genauer beschrieben werden. Der Realteil der Dielektrizitätskonstante ϵ' reflektiert die Polarisierbarkeit und beschreibt die Fähigkeit, mit welcher das Material elektrische Energie speichern kann. Mit dem Laden des Resonators durch ein Dielektrikum wird mehr elektrische Energie gespeichert, wodurch es zu einer Minimierung der Resonanzfrequenz (vom leeren Resonator f_{r0} zum mit Probe befüllten Resonator f_r) kommt. Der Imaginärteil ϵ'' wird der Verlustfaktor genannt und beschreibt den Verlust von elektrischer Energie in Form von Wärme, was zu einer Verringerung der Amplitude und zu einer Vergrößerung der Bandbreite der Resonanzkurve (vom leeren Resonator B_{r0} zum befüllten Resonator B_r) führt. Die Bandbreite wird ab der Hälfte des maximalen Wertes der Amplitude gemessen.

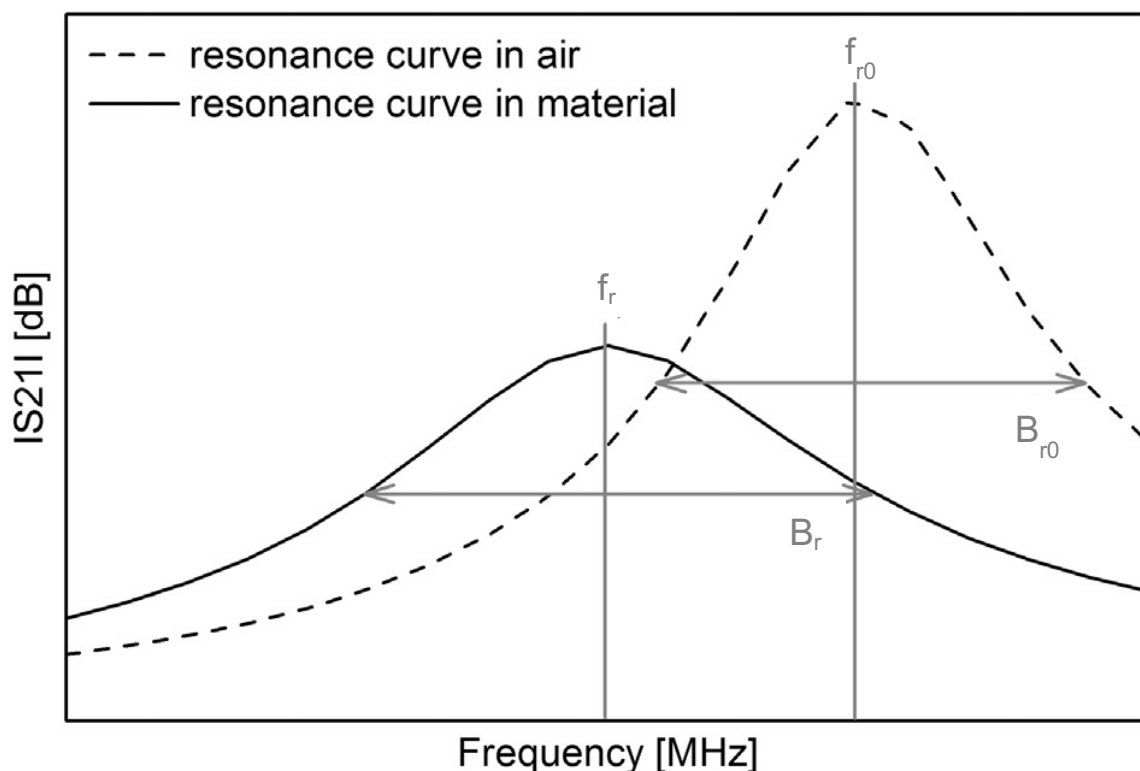


Abbildung 2-15: Resonanzkurve eines Resonators im leeren Zustand (Index r_0) und unter Wechselwirkung mit einem Material (Index r). Die frequenzabhängige skalare Spannungsverstärkung einer elektromagnetischen Welle ist proportional zum Logarithmus des Streuparameters $|S_{21}|$, wobei der Index 21 eine Transmissionsmessung repräsentiert. Die Resonanzfrequenz wird mit f und die Bandbreite der Resonanzkurve mit B gekennzeichnet. [Mod. nach 24]

Bei Resonatoren wird nach Nyfons [2] eine elektromagnetische Welle entlang einer Transmissionslinie ausgesendet und durch Impedanz-Diskontinuitäten wird die Welle reflektiert. Bei einer bestimmten Frequenz befinden sich die Reflexionen in einer konstruktiven Interferenz, was zu einer Resonanz führt. Der Resonator ist mit der zu untersuchenden Probe gefüllt oder auf einen bestimmten Teil des Mediums gerichtet. Bei unterschiedlichem Feuchtegehalt ändert sich die Dielektrizitätskonstante, was zu einer

Änderung der Resonanzfrequenz führt, wobei diese nach Formel (14) indirekt proportional zur Wurzel des Realteils der Dielektrizitätskonstante ε' ist.

$$f_r = \frac{f_{r0}}{\sqrt{\varepsilon'}} \quad (14)$$

Nach gleicher Quelle wird zur Bestimmung des imaginären Anteils über den Q-Faktor des Resonators Gleichung (15) definiert.

$$Q_r = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon''} \quad (15)$$

Somit kann anhand der Resonanzfrequenz und der Güte die komplexe Dielektrizitätskonstante für ein Gut mit einer gewissen Feuchte bestimmt werden.

Laut Peters et al. [24] gibt es einen außerdem signifikanten Zusammenhang zwischen dem Ausmaß an Wechselwirkung und der Feuchte des Materials. Besonders bei granulierten Materialien hängt die Resonanzfrequenz- und Bandbreiten-Änderung mit der Schüttdichte zusammen, da mit höherer Dichte auch mehr Masse an der Wechselwirkung mit dem elektromagnetischen Feld beteiligt ist. Da die Änderung der Frequenzen als auch jene der Bandbreiten gleichermaßen von der Dichte abhängen, kann eine dichteunabhängige Messung durchgeführt werden. Dazu kann ein Parameter M, welcher nur von der Feuchte abhängig ist, nach Gleichung (16) wie folgt berechnet werden. Über die Erstellung einer Kalibrationsgeraden über die Bestimmung des Parameters M für Proben mit bekannter Feuchte, kann eine Feuchtemessung durchgeführt werden.

$$M = \frac{(B_r - B_{r0})}{(f_{r0} - f_r)} = \frac{\Delta B}{\Delta f} \quad (16)$$

Abschließend wird ein Vergleich der drei beschriebenen Messarten in folgender Tabelle 2-2 präsentiert, für welche mehrere Literaturquellen [2, 4, 7, 8, 25] herangezogen wurden.

Tabelle 2-2: Vergleich der unterschiedlichen Messarten Reflexion, Transmission und Resonanz. [2, 4, 7, 8, 25]

	Reflexion	Transmission	Resonanz
Theoretischer Hintergrund	Jede Veränderung im Kabel-Proben-System (Impedanz) verursacht eine partielle oder totale Reflexion	Die Wellenparameter werden beim Durchdringen der Probe unterschiedlich beeinflusst	Konstruktive Interferenz zwischen ausgesendeter und reflektierter/ transmittierter Welle bei bestimmter Frequenz, durch Änderung von ε auch Beeinflussung der Resonanzfrequenz
Anordnung	Reflexion an der Oberfläche, Material in Leitung einbezogen oder als Leitungsabschluss („cut-off“)	Durchstrahlung des Materials („open-space“), Material in Leitung einbezogen	Material in Resonator einbezogen
Proben-ankopplung	Antennen („open-space“), berührungslose Kopplung („cut-off“), Applikator	Berührungslose Kopplung, Antennen („open-space“)	Applikator mit mittlerem oder ohne Koppelspalt
Unterarten	TDR (time domain reflectometry) und FDR (frequency domain reflectometry)	-	Hohlraum- (für verlustarme Materialien), Streufeld- (für Güter mit hohen dielektrischen Verlusten), Einstichresonator
Auswertegrößen	Dämpfung A und Phasenverschiebung ϕ , Reflexionskoeffizient	Dämpfung A und Phasenverschiebung ϕ , Transmissionskoeffizient	Resonanzfrequenz f_r und Güte Q bzw. Bandbreite B
Eindringtiefe	20 – 30 cm	5 – 30 cm, abhängig von der Dichte	2 – 3 cm
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • Häufig bei porösen Materialien • Bei offenem Ende breites Frequenzspektrum möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Messung von dicken Schichten 	<ul style="list-style-type: none"> • Für körniges (granuliertes) Material geeignet • Hohe Sensibilität bei offenem Ende
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Für homogene Materialien (empfindlich gegenüber Störeffekten, Rauheit) 	<ul style="list-style-type: none"> • Empfindlich gegenüber Reflexionen • Einfluss von Bau-Materialien bei Messung Gut mit geringen dielektrischen Verlusten • Externe Referenz nötig 	<ul style="list-style-type: none"> • Störeffekte durch Unebenheiten zwischen Sensorkopf und Oberfläche • Messfehler bei hohen Frequenzen durch Streuung/Reflexion • Bei niedrigen Frequenzen geringe Trennschärfe • Starker Einfluss von Materialinhomogenitäten • Meist nur eine Frequenz/ kleines Frequenzband

Daraus lässt sich auf das Prinzip der Feuchtemessung folgendermaßen zusammenfassen. Die relative Dielektrizitätskonstante einer Mischung ist nach Trabelsi et al. [9] vorrangig von der Temperatur, der Schüttdichte und von der Feuchte abhängig. Letzteres kann dadurch erklärt werden, dass Wasser laut Nyfons [2] im Vergleich zu den meisten anderen trockenen Stoffen eine höhere Dielektrizitätskonstante aufweist und somit erhöht sich die Permittivität der gesamten Schüttung am wesentlichsten durch die Erhöhung des Wasseranteils. Zuvor wurde gezeigt, dass die Wellenparameter aller drei Messvarianten (bei Reflexion/Transmission A und ϕ , beim Resonator f_r und B bzw. Q) in gewisser Weise einen Zusammenhang zur Dielektrizitätskonstante besitzen. Aus diesem Grund sind die Eigenschaften der Wellen indirekt durch die genannten Einflusskomponenten (Temperatur, Schüttdichte und Feuchte) beeinflussbar. Daher ist es möglich über die Erfassung dieser Größen auf den Feuchtegehalt der Mischung zu schließen. Dazu müssen zuvor Kalibrationsmessungen mit Proben bekannter Feuchte durchgeführt werden. Bei einer präzisen Feuchtemessung ist es weiters aus genanntem Grund ebenfalls notwendig die beiden anderen Größen, Temperatur und Schüttdichte, entweder konstant zu halten oder zu kompensieren. An dieser Stelle wird zur genauen Darstellung und Analyse der Auswertemöglichkeiten auf Kapitel 4 verwiesen.

2.4 Vektornetzwerkanalysator (VNA)

Vektornetzwerkanalysatoren unterscheiden sich von skalaren Netzwerkanalysatoren laut Qin [26] darin, dass anhand dieser neben der Amplitude und der Frequenz auch die Phase einer elektromagnetischen Welle untersucht werden kann. Im Bereich der Netzwerkanalyse (Satelliten, Radare, Navigationssystemen etc.) wird ein VNA auf Grund seiner hohen Präzision und Effizienz verwendet. Im Zuge von Messungen mit Mikrowellen werden diese oft eingesetzt, um die bereits auf Seite 11 (Abbildung 2-6) genannten S-Parameter zu messen. Bei den ersten Studien wurden nur diese herangezogen und daraus andere physikalische Größen berechnet. Dadurch konnte ein Verlust von Informationen und eine Unsicherheitsfortpflanzung beobachtet werden. Aus diesem Grund wurden nicht-lineare Messungen und Modellierungen des Begleitverhaltens untersucht. Bei Mehrfrequenzmessungen kommt es aber im nicht-linearen Bereich zu Oberschwingungen und Intermodulationsverzerrungen, welche somit bei der Analyse der Messunsicherheit berücksichtigt werden müssen. Im Allgemeinen muss ein VNA kalibriert werden und während der Messung müssen Anpassungen vorgenommen werden, um die Messgenauigkeit zu erhöhen und die Interferenzfehler zu verringern. Dies kann nur erreicht werden, wenn das gesamte Messsystem (VNA mit Verstärker, Kabel, Antennen, Mixer etc.) aufeinander abgestimmt ist. Ein weiterer Nachteil ist, dass die wenigen Produzenten von VNAs nicht dieselben Standards verwenden. Der Vorteil eines VNA ist nach dem Hersteller Tektronix [27], dass es die Quelle als auch Empfangsgerät von elektromagnetischen Wellen in einem Apparat vereint. Dadurch kann ein Vergleich der Signale stattfinden. Anhand dieses Vergleichs können über einen weiten Frequenzbereich neben den S-Parametern auch die Verstärkung, Dämpfung (A), Phasenverschiebung (ϕ), die elektrische Länge und Verzögerung, die Transmissions- und Reflexionskoeffizienten, der Reflexionsverlust und der Wellenwiderstand (Impedanz Z) einer elektromagnetischen Welle ermittelt werden.

3 Analyse der relevanten Einflussparameter

In diesem Kapitel erfolgt die theoretische Ausarbeitung der wichtigsten Einflussfaktoren auf die elektromagnetische Feuchtemessung. Jede einzelne Größe wird separat untersucht und hinsichtlich ihrer Relevanz diskutiert. Bei den mit * gekennzeichneten Größen wurden Versuche bzw. Berechnungen zur Abschätzung des Einflusses durchgeführt.

Wesentlichen Hauptparameter, welche die absorptive Wechselwirkung mit dem elektromagnetischen Feld beeinflussen, sind nach mehreren Quellen [4, 7, 18] zufolge:

- Feuchte (wird bei der Messung ausgenützt)
- Frequenz
- Temperatur
- Schüttdichte
- Vorliegende Eisen-Spezies
- Bindung des Wassers (Rotationsfreiheit)*
- Ionenleitfähigkeit*
- Korngrößenverteilung
- Feldstärke

Zur Korngrößenverteilung sei an dieser Stelle hinzugefügt, dass Hübner et al. [7] anmerken, dass die Form und Geometrie der Teilchen ebenfalls in Zusammenhang zur Feldrichtung (senkrecht, parallel) einen Einfluss auf die Messung ausübt. Nachdem dieser Aspekt nicht detaillierter begutachtet werden konnte, wird dieser in weiterer Folge außen vor gelassen.

3.1 Frequenz

Laut Gauckler und Conder [4] benötigen die Umlagerungen auf atomarer Ebene Zeit. Aus diesem Grund besitzt die Dielektrizitätskonstante jedes Materials einen frequenzspezifischen Wert bzw. kann in einem frequenzabhängigen Verlauf dargestellt werden. Besonders hohe dielektrische Verluste sind bei Frequenzbereichen zu erwarten, bei welchen die Polarisation dem elektrischen Feld nicht mehr folgen kann. An dieser Stelle sind Maxima im Verlauf der Imaginäranteils der Dielektrizitätskonstante ϵ'' zu verzeichnen. Als Beispiel sei hier nochmals auf den in Abbildung 2-2 gezeigten Verlauf der komplexen Dielektrizitätskonstante für Wasser verwiesen. Weiters wird nach Hübner et al. [7] dieses Phänomen über eine zu überwindende Energiebarriere ΔH^\ddagger erklärt (vgl. Abbildung 3-1 a). Durch diese erfolgt die Polarisation zeitlich verzögert, was zu einer Phasenverschiebung zwischen dem angelegten elektrischen Feld $E(t)$ und der Polarisation $P(t)$ nach folgender Abbildung 3-1 unter b führt. Die Phasenverschiebung ist von der Frequenz des elektrischen Feldes abhängig, wodurch eine Frequenzabhängigkeit der Messung entsteht. Dabei wird ein Teil der Energie dem elektrischen Feld entnommen und in Wärme umgewandelt. Bei zu hohen Frequenzen kann die Polarisation dem wechselnden Feld nicht mehr folgen und es entsteht Dispersion. Die Dielektrizitätskonstante gilt als Maß für die Polarisationsfähigkeit im elektrischen Feld.

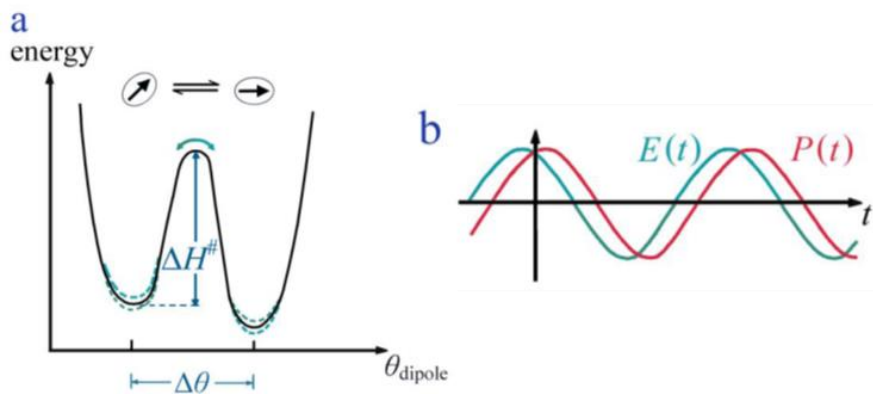


Abbildung 3-1: Unter a wird die zu überwindende Energiebarriere $\Delta H^\#$ für eine Umorientierung der Moleküle zwischen zwei unterschiedlichen Dipolwinkeln θ_{dipole} dargestellt. Die gestrichelten blauen Linien visualisieren eine periodische Änderung der Energieminima mit dem sinusförmig angelegten elektrischen Feld. Durch diese Energiebarriere kann die Polarisation P nicht sofort dem angelegten elektrischen Feld E folgen, was zu einer Phasenverschiebung nach b führt. [Mod. nach 7]

Bei der Feuchtebestimmung muss somit auf die Frequenz geachtet werden und (außer in speziellen Auswertemethoden) die Frequenz bei der Kalibration bzw. Messung konstant gehalten werden.

Des Weiteren beeinflusst die Frequenz f die Eindringtiefe d_p , was anhand von Gleichung (17) aus dem Werk von Oke et al. [28] zu erkennen ist. Daraus lässt sich allgemein schließen, dass bei einem Material unter gleichen Bedingungen (= kein Einfluss der Permittivität ϵ' bzw. ϵ'' durch Materialschwankungen oder Feuchteänderung) die Eindringtiefe mit steigender Frequenz abnimmt. Die Konstante c soll die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum darstellen.

$$d_p = \frac{c}{2 * \pi * f * \sqrt{2 * \epsilon' * \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\epsilon''}{\epsilon'} \right)^2} - 1 \right)}} \quad (17)$$

Daraus lässt sich der Nachteil von Messverfahren mittels Reflexion erkennen. Wenn nur dünne Schichten erfasst werden, wie es bei der Herstellung von Papier der Fall ist, ist eine geringe Eindringtiefe erwünscht. Bei einem Förderband mit einer dicken Materialschicht aus beispielsweise Grünmix, könnte dies nachteilig sein. Wie bereits geschildert umfassen Mikrowellen einen Frequenzbereich von 300 – 3000 MHz, sodass über die gezielte Verwendung eines bestimmten Messbereiches die Eindringtiefe gesteuert werden kann. Unter Betrachtung von Tabelle 2-2 ist draus zu schließen, dass eine Reflexionsmessung nur dann eine Eindringtiefe von 20 – 30 cm erreicht, wenn entweder die Frequenz oder die Permittivität des zu untersuchten Materials gering ist. Da Resonatoren meist im niedrigen GHz-Bereich verwendet werden, lässt sich die Angabe in den Literaturwerken von 2 – 3 cm erklären. Als Beispiel wird im Unterkapitel 3.4 auf Seite 31 unter Formel (18) die Berechnung von d_p für reines Wasser bei 25 °C und 2 GHz gezeigt sowie mit der Eindringtiefe anderer Eisen-Spezies (Wüstit, Hämatit, Magnetit) anhand von Tabelle 3-2 verglichen. An dieser Stelle erfolgt auch die Beurteilung von d_p bei einem dicken Materialschicht (Förderband).

3.2 Temperatur

Die Dielektrizitätskonstante von Wasser weist nach Hübner et al. [7] einen temperaturabhängigen Verlauf auf (vgl. Abbildung 3-2). Nach mehreren Quellen [23, 24] werden in der Praxis unterschiedliche Frequenzen bei der Feuchtemessung verwendet. Allgemein gilt, dass je kleiner der Messbereich ist, desto größer wird die Frequenz gewählt. Bei den meisten Anwendungen wird mit 2,4 GHz gemessen, wobei ein praktischer Messbereich von 1 bis 8 GHz angesehen werden kann. Dieser wurde in der genannten Abbildung als blauer Bereich markiert.

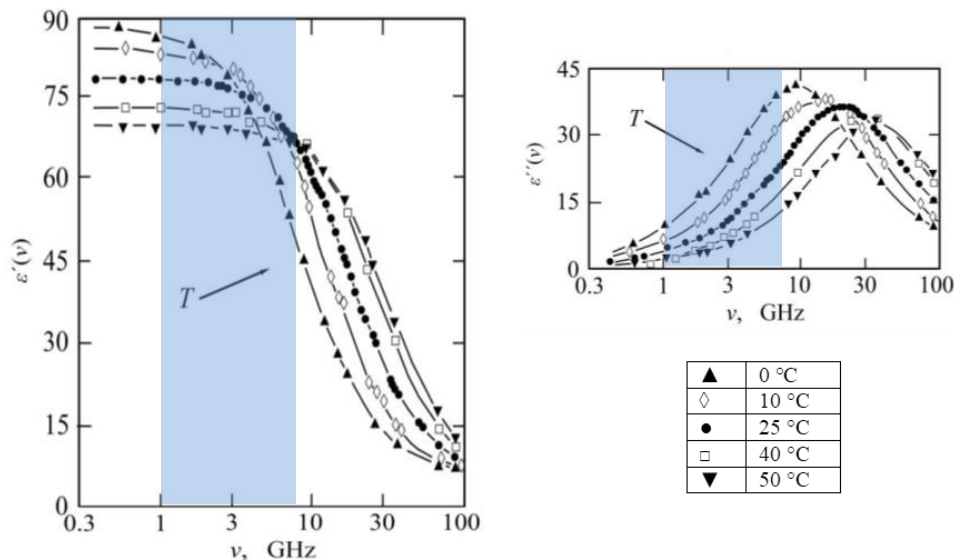


Abbildung 3-2: Temperaturabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante von reinem Wasser. Der blaue Bereich zeigt den praktischen Messbereich von Feuchtemesssensoren. [Mod. nach 7]

Kupfer et al. [18] bestätigten diese Tatsache mit der Temperaturabhängigkeit der einzelnen Parameter der Dielektrizitätskonstante (statische Permittivität $\epsilon(0)$, die Permittivität bei hohen Frequenzen $\epsilon(\infty)$ sowie der Relaxationszeit τ_w , wobei alle mit der Temperatur sinken. Die theoretische Begründung für diesen Effekt wird von mehreren Seiten begutachtet, wobei sich diese teilweise überschneiden:

1. Begründung:

Die Relaxationszeit (Zeit bis zur vollständigen Umlagerung der Wassermoleküle) sinkt nach Brodie et al. [29] mit der Temperatur, weil Kollisionen und interne Reibung eine sofortige Ausrichtung beim Anlegen eines externen elektrischen Feldes verzögern.

2. Begründung:

Diese Begründung erfolgt über eine Internetquelle [30]. Durch Anlegen eines externen elektromagnetischen Feldes werden Dipole ausgerichtet, besitzen aber dennoch eine gewisse thermische Bewegung. Nun wird diese Rotation der Moleküle durch die Temperatur beeinflusst. Bei niedrigen Temperaturen kommt es nahezu zum Stillstand und bei hohen Temperaturen zu unkontrollierten Bewegungen der Moleküle. Somit steigt mit der

Temperatur die thermische Energie der Teilchen, was dazu führt, dass das Maß der Orientierungspolarisation (Ausrichtung zum Feld) und somit auch die Dielektrizitätskonstante verringert werden. Die Permittivität ändert sich bei Phasenumwandlungen durch die Strukturänderungen des Gutes und sinkt daher nicht kontinuierlich mit der Temperatur. Bei geringen Temperaturen kann die Orientierung der Moleküle der Polarisation nicht folgen, was dazu führt, dass das Material schwerer polarisierbar ist und daher ε geringer sowie weniger temperaturabhängig ist.

3. Begründung:

Des Weiteren wird dies durch Gauckler und Conder [4] bestätigt, denn durch die Temperaturerhöhung erfolgt eine thermische Bewegung, welche der Orientierung bzw. Ausrichtung der Dipole entgegenwirkt. Eine maximale Polarisation ist bei niedrigen Temperaturen und hohen elektrischen Feldern erreichbar. Der Einfluss der Temperatur kann ebenfalls über die Temperaturabhängigkeit der Relaxationszeit erklärt werden. Demnach wird die Lage der Relaxationsfrequenz, welche der Kehrwert der Relaxationszeit ist, beeinflusst. Die Relaxationszeit beschreibt die Verzögerung des Dipolmomentes mit der Zeit. Wenn die Relaxationsfrequenz überschritten wird, kann der Dipol dem elektrischen Feld nicht mehr folgen und es kommt zu keiner Wechselwirkung.

4. Begründung:

Durch Hübner et al. [7] erfolgt eine alternative in Abbildung 3-3 anschauliche Erklärung.

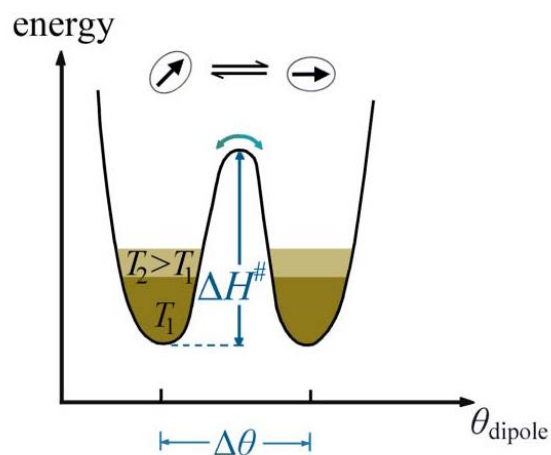


Abbildung 3-3: Effekt einer Temperaturerhöhung auf die erforderliche Energieüberwindung $\Delta H^\#$, damit sich der Dipolwinkel θ_{dipole} ändert. [7]

Für die Umorientierung der Dipole, man beachte die Pfeilrichtungen, wird eine gewisse Energiemenge $\Delta H^\#$ benötigt. Dies wird hierbei durch einen Hügel und die blauen Pfeile dargestellt. Bei einer hohen Temperatur T_1 wird das Start-Niveau angehoben. Dadurch ist zum Erreichen der erforderlichen Energie ein geringeres $\Delta H^\#$ erforderlich. Bei einer noch höheren Temperatur T_2 ist eine noch geringere Energiebarriere zu überwinden, damit sich der Winkel des Dipols θ_{dipole} ändert. Die Stärke der Wasserstoffbrückenbindung hängt nicht von der Orientierung der Dipole ab. Je mehr Vibrationen es gibt, desto mehr Versuche gibt

es die Energiebarriere zu überwinden und somit verkürzt sich auch die Zeit bis sich eine Re-Orientierung einstellt. Die Dielektrizitätskonstante ist proportional zum Maß der Polarisierung eines Mediums [4]. Somit bedeutet dies, dass durch eine Temperaturerhöhung eine Umorientierung (= Polarisierung) erleichtert wird, da die dazu notwendige Energiebarriere ΔH^\ddagger nach unten gesenkt wird. Dies würde erklären aus welchem Grund ein Abfall der Dielektrizitätskonstante mit der Temperatur beobachtet werden kann.

Daher scheint es bedeutsam zu sein entweder eine Temperaturkompensation durchzuführen oder die Temperatur weitestgehend konstant zu halten. Eine Untersuchung über den Temperatureffekt bei der Messung wäre von Vorteil.

3.3 Schüttdichte

Laut mehreren Quellen [9, 31] gibt es erhebliche Fehler bei der Messung der Feuchte von partikelförmigen Medien durch Schüttdichteschwankungen, welche besonders bei einem Transport auf Förderbändern mechanisch nicht ausgeglichen werden können. Daher ist der Einfluss durch die Schüttdichte ρ sehr groß und es gibt 3 Kompensationsmöglichkeiten bei der Messung der Feuchte:

1. Die Dichte des Gutes muss über die Kalibration und der Messung konstant bleiben.
2. Die Dichte muss immer zusätzlich gemessen werden (z.B. Gamma-Strahlung).
3. Dichteunabhängige Messung.

Anhand dieser drei Varianten kann nun die Feuchtebestimmung auf unterschiedliche Arten durchgeführt werden. An dieser Stelle wird auf Kapitel 4 verwiesen, in welchem die für diese Arbeit relevanten Bestimmungsarten vorgestellt werden. Im Allgemeinen werden dazu die Dämpfung (bestimmt über die Streuparameter oder die Koeffizienten) und die Phasenverschiebung oder ein direkt gemessener Wert der Dielektrizitätskonstante benötigt. Anhand der Erstellung einer Kalibrationsgeraden durch Messung von Proben mit bekannter Feuchte kann schließlich über eine erneute Messung der selbigen Parameter und Verwendung der Kalibrationsgeraden die unbekannte Feuchte bestimmt werden.

3.4 Vorliegende Eisen-Spezies

Da mineralische Schüttungen auch aus metallischen bzw. elektrisch leitenden Materialien bestehen können, wird an dieser Stelle der Einfluss von vorliegenden Eisen-Spezies genauer untersucht. Anhand von mehreren Literaturquellen [32–34] wurde folgende Abbildung 3-4 erstellt, welche auf der nächsten Seite zu finden ist und die Frequenzabhängigkeit sowie Größe der komplexen Dielektrizitätskonstanten von drei wesentlichen Eisenarten einer Grünmischung zeigt. Es wurde zusätzlich der messtechnisch relevante Frequenzbereich von 1 – 8 GHz in Farbe hinterlegt.

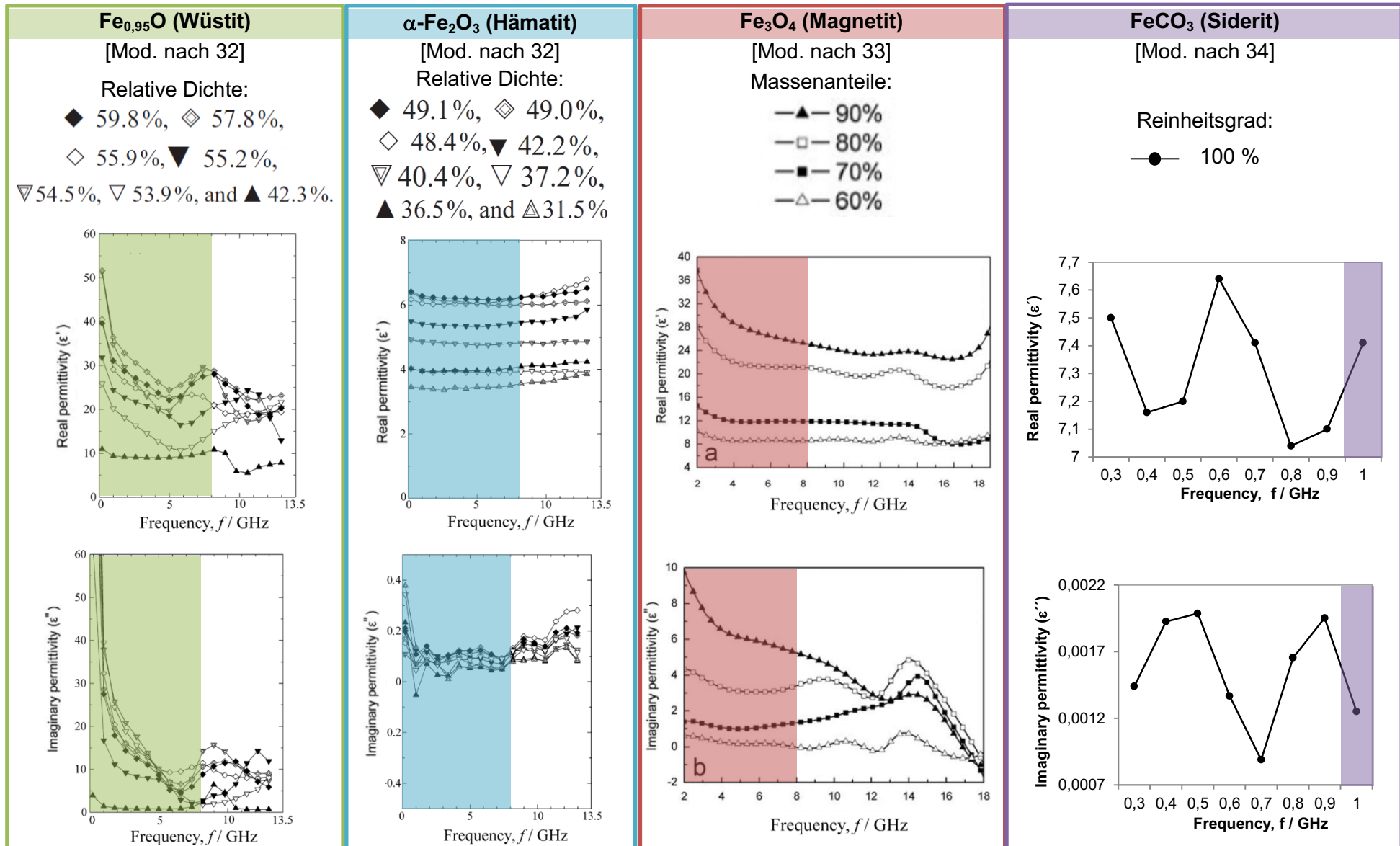


Abbildung 3-4: Abhängigkeit der realen und imaginären Permittivität von Fe_{0,95}O (grün), α-Fe₂O₃ (blau), Fe₃O₄ (rot) und FeCO₃ (violett) von der Frequenz. Die farblich hinterlegten Bereiche charakterisieren den messtechnisch relevanten Frequenzbereich von 1 – 8 GHz (bei Siderit nur bei 1 GHz).

Anhand dieser Grafik wurden für alle drei Spezies die Werte des Real- und Imaginäranteils der Dielektrizitätskonstante für einen Frequenzbereich von 1 – 8 GHz in Tabelle 3-1 zusammengefasst. Für die drei Eisen-Varianten wurden jeweils die Datensätze für den höchsten Anteil herangezogen. Für Siderit wurde jeweils der Wert bei 1 GHz herangezogen, da keine weiteren Daten gegeben waren. Als Vergleich wurden dieselben Parameter für Wasser bei 25 °C aus Abbildung 3-2 ebenfalls in den tabellarischen Vergleich integriert.

Tabelle 3-1: Vergleich der Real- und Imaginäranteile der Eisenspezies Wüstit, Hämatit, Magnetit und Siderit mit Wasser in einem Frequenzbereich von 1 – 8 GHz. [7, 32–34]

	Wüstit	Hämatit	Magnetit	Siderit	Wasser
	f = 1 – 8 GHz			f = 1 GHz	f = 1 – 8 GHz
ϵ'	40 - 30	6,3	38 - 26	7,5	80 - 70
ϵ''	>60 - 10	0,2 – 0,1	10 - 6	0,00125	5 - 20

Aus Abbildung 3-4 lässt sich erkennen, dass Hämatit am wenigsten Schwankungen über den relevanten Frequenzbereich zeigt. Bei Siderit kann die gezeigte Schwankung vernachlässigt werden, da es einerseits ein irrelevanter Messbereich ist und es eine scheinbare Schwankung aufgrund der breiten Skalierung gibt. Bei Wüstit und Magnetit kann ein steiler Abfall im Bereich zwischen 1 – 4 GHz wahrgenommen werden. Dies ist auch in einem geringeren Frequenzbereich bei ϵ'' von Hämatit zu sehen. Unter Tabelle 3-1 kann weiters festgestellt werden, dass die Werte der Dielektrizitätskonstanten in diesem Bereich hoch sind und besonders bei Wüstit sowie Magnetit ungefähr halb so groß sind wie jene des Wassers. Daraus lässt sich schließen, dass der Einfluss der Eisenspezies Wüstit und Hämatit nicht vernachlässigbar gering ist. Dies bedeutet, dass sich eine Variation der Zusammensetzung hinsichtlich der Eisen-Spezies ebenfalls auf die Dielektrizitätskonstante der gesamten Mischung auswirken würde. Dieser Einfluss könnte je nach vorrangig vorliegender Eisenspezies verringert werden, indem eine passende Frequenz gewählt wird. Beispielsweise kann bei der Messung von Schüttgütern mit einem höheren Magnetit-Anteil die Messung bei 5 GHz durchgeführt werden, da mit steigender Frequenz die Dielektrizitätskonstante sinkt. Eine zweite Möglichkeit bietet sich, indem bei der Auswertung lediglich der Realteil der Dielektrizitätskonstante herangezogen werden würde. Hinsichtlich Siderit und Hämatit können diese durch deren in Vergleich zu Wasser geringen und konstanten Werte für die Dielektrizitätskonstante (vgl. Tabelle 3-1) als irrelevante Einflussfaktoren betrachtet werden. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Messung bei einer höheren Frequenz und unter Einbezug beider Teile der komplexen Dielektrizitätskonstante das präziseste Ergebnis erzielt werden könnte. Das genaue Ausmaß des Einflusses der vorliegenden Eisen-Spezies müsste separat untersucht werden, indem beispielsweise Proben mit bekannter, aber unterschiedlicher Eisen-Zusammensetzung sowie identer Feuchte auf gleiche Art und Weise elektromagnetischer Strahlung ausgesetzt werden würden. Die mögliche Variation der Wellenparameter würde schließlich Informationen über die Größe des Einflusses liefern.

An dieser Stelle soll nochmals auf die Thematik der Eindringtiefe aus Kapitel 3.1 eingegangen werden. Für die betrachteten Spezies Magnetit, Wüstit und Hämatit wurde anhand von Formel (17) die theoretische Eindringtiefe d_p berechnet. Als Vergleich wurde dies analog für Wasser bei 25 °C durchgeführt. Dazu wurde aus Abbildung 3-2 und Abbildung 3-4 die Permittivitäten ε' und ε'' für eine Frequenz von 2 GHz herausgelesen. Gleichung (18) soll beispielsweise die Berechnung der Eindringtiefe für Wasser zeigen.

$$d_p(\text{Wasser}, 25^\circ\text{C}, 2 \text{ GHz}) = \frac{299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2 * \pi * \left(2 * 10^9 \frac{1}{\text{s}}\right) * \sqrt{2 * 76 * \left(\sqrt{1 + \left(\frac{5}{76}\right)^2} - 1\right)}} \quad (18)$$

$$= 4,16 * 10^{-2} \text{ m} = 4,16 \text{ cm}$$

In folgender Tabelle 3-2 wurden alle Messergebnisse zusammengefasst. Daraus lässt sich schließen, dass Hämatit durch seine geringe Permittivität eine hohe Eindringtiefe bei einer Frequenz von 2 GHz aufweist. Wasser besitzt eine geringere Eindringtiefe von ca. 4 cm, da dessen Realteil der Permittivität ε' höher liegt als bei Hämatit. Die Eisenspezies Magnetit und Wüstit weisen im Real- als auch im Imaginärteil hohe Werte auf und besitzen dementsprechend eine geringe Eindringtiefe von ca. 0,7 bzw. 1,5 cm.

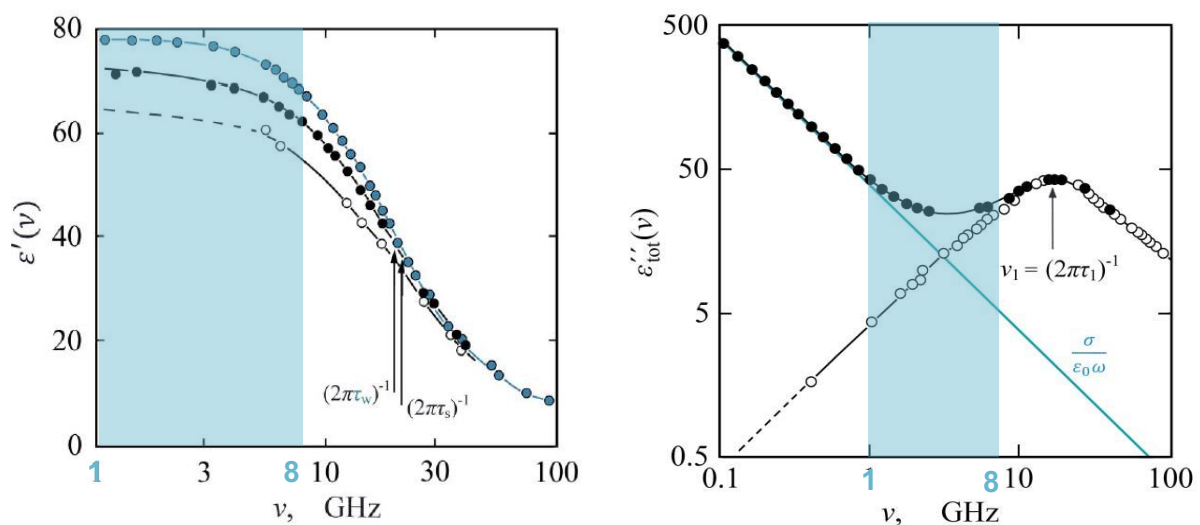
Tabelle 3-2: Messergebnisse der Bestimmung der Eindringtiefe bei unterschiedlichen Materialien bei 2 GHz. [7, 32–34]

Material	ε'	ε''	Eindringtiefe d_p
Wasser (25°C)	76	5	4,16 cm
Magnetit	38	10	1,48 cm
Wüstit	30	20	0,69 cm
Hämatit	6	0,4	14,63 cm

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass von den untersuchten Eisen-Spezies Wüstit und Magnetit theoretisch Messfehler verursachen könnten. Da aber beispielsweise ein Grünmix im Vergleich zur Gesamtmasse einen geringen Anteil an Magnetit aufweist, ist dessen Einfluss nur bedingt gegeben und es kann dennoch ein präzises Messergebnis sowie eine hohe Eindringtiefe erzielt werden. Wüstit stellt ein Zwischenprodukt bei der Reaktion von Eisenerzen mit Luft dar und wurde im Rahmen der Analyse im wissenschaftlichen Artikel synthetisch hergestellt. Da es sofort weiterreagieren würde und chemisch nicht stabil ist, kann dessen Einfluss ebenfalls vernachlässigt werden. Aus diesem Grund kann behauptet werden, dass der Einfluss der vorliegenden Eisenspezies nur dann von Bedeutung ist, wenn sich die Komponenten einer Mischung grundlegend ändern. Wenn beispielsweise neue Rezepturen verwendet werden würden, müsste auch die Kalibration der Messwerte erneuert werden. Schwankungen der gleichbleibenden Zusammensetzung sollten demnach zu keinen wesentlichen Messfehlern bei der Feuchtmessung führen. Davon ausgenommen wären lokale Anhäufungen von Materialtypen, welche aber in der Regel durch vorgeschaltete Mischprozesse vermieden werden.

3.5 Ionenleitfähigkeit

Der Salzgehalt hat nach Hübner et al. [7] einen wesentlichen Einfluss auf das dielektrische Verhalten von reinem Wasser. Durch die Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit wird der Verlauf der frequenzabhängigen Dielektrizitätskonstante verändert, was anhand von Abbildung 3-5 mit einem praktischen Messbereich in blauer Farbe gezeigt wird. Der Imaginärteil ε'' von Wasser besitzt in reiner Form (weiße Kugeln) einen anderen Verlauf als mit einer Salzkonzentration von $0,224 \text{ mol L}^{-1}$ (schwarze Kugeln). Dieser Effekt lässt sich bis zu einer Frequenz von 10 GHz beobachten, ab diesem Wert überschneiden sich die beiden Verläufe.



Praktischer
Messbereich




	Reines Wasser
	NaCl-Lösung Links: mit einer Konzentration von 1,3 Masse-% bzw. $0,224 \text{ mol L}^{-1}$ sowie einer Leitfähigkeit von $2,04 \text{ S m}^{-1}$ Rechts: mit einer Konzentration von $0,5 \text{ mol L}^{-1}$
	HCl-Lösung mit einer Konzentration von $0,5 \text{ mol L}^{-1}$

Abbildung 3-5: Einfluss des Salzgehaltes (NaCl und HCl in unterschiedlichen Konzentrationen) auf den frequenzabhängigen Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante von Wasser bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

[Mod. nach 7]

An dieser Stelle wird weiterführend eine genaue Untersuchung zum Einfluss der Ionenleitfähigkeit und dessen Resultat beschrieben. Bei dieser wurden jeweils 6 Bechergläser mit der gleichen Substanz (reines Wasser, Salzlösung mit einer Konzentration von $0,2236$ und $1,090 \text{ mol L}^{-1}$) gefüllt und in einem Mikrowellenherd mit $2,45 \text{ GHz}$ erwärmt. Bei einem geringen Salzgehalt von $0,2236 \text{ mol L}^{-1}$ konnte kein Unterschied im Erwärmungsverhalten im Vergleich zu reinem Wasser festgestellt werden. Beide zeigten nur geringe Messwertschwankungen und keinen Trend auf. Bei einer bereits starken Konzentration von $1,090 \text{ mol L}^{-1}$ ist der Unterschied zwischen den Mittelwerten der Temperaturdifferenz mit $1 \text{ }^\circ\text{C}$ sehr gering. Zudem schwankten die Messergebnisse auch im

Verhältnis zu den beiden zuerst durchgeführten Versuchen stärker, was durch eine Erhöhung der Standardabweichung festgestellt werden konnte. Es wurde auch ein positiver Trend wahrgenommen, welcher aber nach Vernachlässigung des ersten Messergebnisses weniger stark ausgeprägt war. Das Resultat der Untersuchung war somit, dass der Einfluss der Ionenleitfähigkeit auf die Messung der Feuchte vernachlässigbar gering ist. Dadurch kann die Feuchtebestimmung mittels elektromagnetischer Strahlung ohne Rücksicht auf eventuelle Leitfähigkeitsänderungen durch Schwankungen des Salzgehaltes durchgeführt werden. Nach Momber et al. [8] ist der Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit bei Frequenzen ab 2 – 3 GHz vernachlässigbar gering, was diesen Sachverhalt zusätzlich bestätigt. Hinsichtlich der elektrischen Leitfähigkeit konnte keine ausreichende Übereinstimmung zwischen dem Vergrößerungsfaktor von $\sigma \cdot \epsilon(0)^{-1} \cdot \omega^{-1}$ bei einer Frequenz von 2,45 GHz bei der Bestimmung des Imaginäranteils der Dielektrizitätskonstante ϵ'' gefunden werden. Die berechnete Abweichung ist zu gering, sodass eine Berechnung über diese Art nicht möglich ist. Für detailliertere Informationen wird an dieser Stelle an den Anhang verwiesen.

3.6 Bindung des Wassers

Wasser kann „gebunden“ in einem Gut vorliegen. Wenn es in dieser Form vorliegt, ist es laut Hübner et al. [7] derzeit schwierig dessen Gehalt zu bestimmen. Weiters ist solches Wasser stärker an (nicht-wässrigen) Oberflächen gebunden und die bereits diskutierte zu überwindende Energiebarriere ΔH^\ddagger ist höher als bei nicht-gebundenem Wasser. Meist wird bei elektromagnetischen Untersuchungen das nicht identifizierte Wasser als „gebundenes“ Wasser betrachtet. Das dielektrische Verhalten von Eis kann dabei als Näherung für gebundenes Wasser herangezogen werden. Das Mixtur-Problem zeigt, dass es Schwierigkeiten gibt, komplexe Systeme aus mehreren Komponenten beschreiben zu können. Wie sich elektrische Felder im Inneren einer Mixtur ausbreiten ist meist unklar und daher können dielektrischen Eigenschaften kaum durch analytische Modelle bestimmt werden. Es konnte gezeigt werden, dass gebundenes Wasser als Hydrationswasser eine charakteristische Verschiebung der Relaxationsfrequenz bewirkt (vgl. Abbildung 3-6). Aus diesem Grund kann behauptet werden, dass gebunden vorliegendes Wasser mittels Feuchtemesssensoren, welche in dem genannten Messbereich arbeiten, nicht erfasst werden können. Dabei wird darauf hingewiesen, dass bei der Reduktion der Permittivität bei „unsichtbaren“ Wasser in einem geringen Messbereich besonders Vorsicht geboten ist. Nur, wenn eine Verschiebung der Relaxationsfrequenz ($\delta\nu_r$) beobachtet werden kann, ist davon auszugehen, dass Wasser in einer gebundenen Form vorliegt.

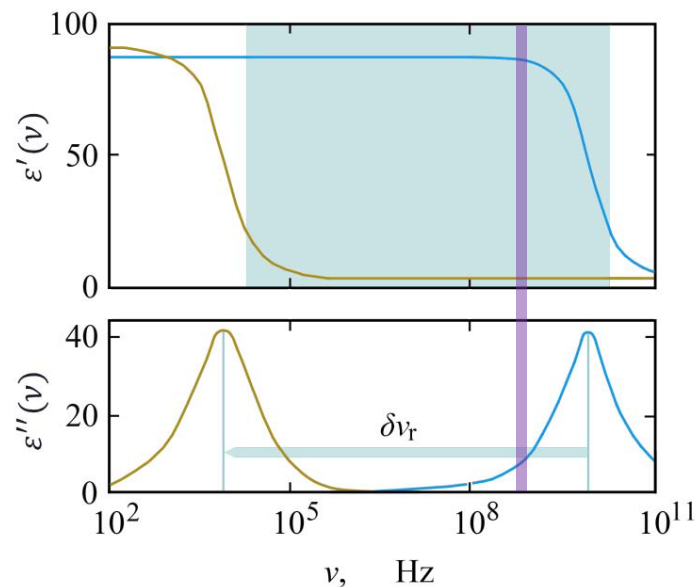


Abbildung 3-6: Verlauf des Real-/Imaginäranteils von ε über die Frequenz für flüssiges Wasser (blaue Linien) und Eis (braune Linien) bei 0 °C. Der violette Bereich spiegelt den typischen Messbereich von dielektrischen Feuchtesensoren wieder. Die für gebundenes Wasser typische Relaxationsfrequenzverschiebung ist ebenfalls mit $\delta\nu_r$ gekennzeichnet. [Mod. nach 7]

Um diesen Einflussparameter genauer zu begutachten, wurde eine Untersuchung durchgeführt, bei welcher nach Kupfer et al. [18] bzw. nach dem Originalwerk von Or et al. [35] die Schichtdicke sowie die daraus berechnete Menge an gebundenem Wasser bestimmt wurde. Die Abhängigkeit des gebundenen Wassers von der Temperatur durch seine Komplexität ist schwer festzustellen, insbesondere weil die Abgrenzung zwischen freiem und gebundenem Wasser undeutlich ist. Es konnte eine Bestimmungsformel für die Menge an gebundenem Wasser M_{bw} in Abhängigkeit von der Schichtdicke $x(T)$, der masse-spezifischen Materialoberfläche A_S und der Schüttdichte ρ_b nach Formel (19) gefunden werden.

$$M_{bw} = x(T) * A_S * \rho_b \quad (19)$$

Dabei konnte festgestellt werden, dass unter einer bestimmten „cut-off“ Frequenz f^* bei der TDR (time-domain-reflectometry)-Messung der Einfluss des gebundenen Wassers vernachlässigt werden kann. Diese liegen im Bereich zwischen 0,8 – 1 GHz. Die Schichtdicke des gebundenen Wassers kann demnach nach folgender Formel (20) berechnet werden.

$$x(T) = \frac{a}{-d + T * \ln\left(\frac{k * T}{8 * \pi^2 * r^3 * c * f^*}\right)} \quad (20)$$

$$\text{Konstanten } a = 1621 \text{ \AA K}, \quad d = 2,047 * 10^3 \text{ K}, \quad c = 9,5 * 10^3 \text{ Pa s}$$

$$\text{Boltzmannkonstante } k = 1,38062 * 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$$

$$\text{Radius des gebundenen Wassermoleküls } r = \sim 1,8 - 2,5 \text{ \AA}$$

$$\text{Typische "cut-off" Frequenzen } f^* = 0,8 - 1 \text{ GHz}$$

Zuerst wurde die Schichtdicke für einen Frequenzbereich von 0,8 - 1 GHz mit den angegebenen Konstanten berechnet. Für den Radius des gebundenen Wassermoleküls wurde ein Wert von 2,5 Å herangezogen (nach Or et al. [35] führt die Annahme eines größeren Radius zu präziseren Ergebnissen) und für die Temperatur 25 °C eingesetzt. Darauf folgend wurde die volumenspezifische Oberfläche über eine Korngrößenverteilung einer Grünmischung unter Hinzuziehung eines RRSB-Netzes berechnet [36]. Da in Formel (19) die massespezifische Oberfläche gefragt ist, wurde die volumenspezifische Oberfläche durch die Partikeldichte, welche aus der chemischen Zusammensetzung der Probe berechnet wurde, dividiert [36]. Dabei belief sich der Wassergehalt auf ca. 4 Masse-%. Schließlich konnte über die Schüttdichte (angenommen wurden ca. 1800 kg m⁻³) eine Menge an gebundenem Wasser zwischen 1,06 – 1,24 ppm_v bestimmt werden. Zur genaueren Betrachtung der Messergebnisse sei erneut an den Anhang verwiesen. Abschließend kann gesagt werden, dass die Menge an gebundenem Wasser sehr gering ist. Im Durchschnitt liegt die Menge an Wasser in der Schüttung bei 4 Masse-%, was bei einer Umrechnung unter Hinzuziehung der berechneten Stoffdichte der Trockensubstanz ungefähr 3 Vol-% entspricht. Dadurch kann zusammenfassend gesagt werden, dass der Anteil an gebundenem Wasser für die weitere Untersuchung vernachlässigt werden kann.

3.7 Statik und Dynamik

Versuche zur Feuchtemessung mittels elektromagnetischen Wellen finden in der Regel in einem Labor und dadurch meist unter ruhenden Bedingungen statt. Einige Werke haben sich mit dem dynamischen Verhalten der Messgrößen beschäftigt und untersucht, ob signifikante Unterschiede in den Auswertungen zu verzeichnen sind. Beispielsweise haben sich Kon et al. [37] mit dem dynamischen Verhalten von Reis- und Weizenkörnern beschäftigt. Ergebnis der Untersuchung war es, dass die Messergebnisse für die Dämpfung A und Phasenverschiebung ϕ unter statischen sowie dynamischen Bedingungen ähnliche Werte zeigten. Dieser Sachverhalt soll anhand von Abbildung 3-7 dargelegt werden. Zu sehen ist, dass die Messpunkte der Versuche unter bewegten Körnern auf einer Linie mit den statischen Werten für A und ϕ liegen.

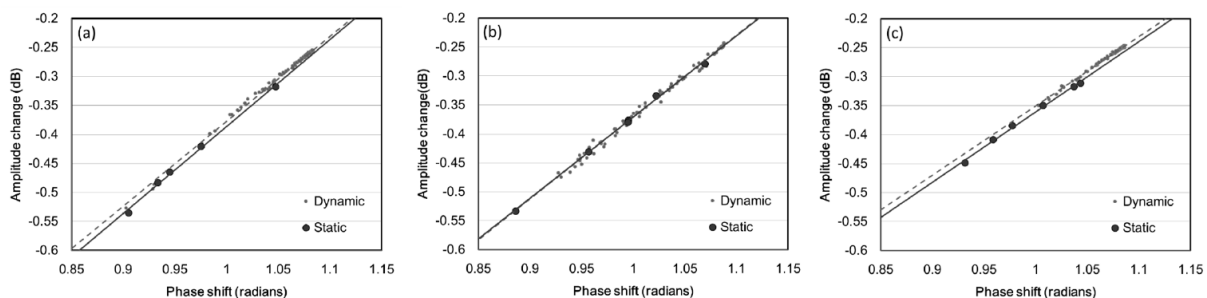


Abbildung 3-7: Vergleich der Auftragungen der Dämpfung A und Phasenverschiebung ϕ unter statischen sowie dynamischen Bedingungen bei einer Untersuchung von Reis- und Weizenkörnern bei 3 GHz. Es wurden unterschiedliche Feuchtegehalte (a = 18 % und b = 15,1 % sowie c = 12,2 %) verwendet. [37]

Unter Auftragung der Verhältnisses A/ϕ gegen die Feuchte der Proben, ist nach folgender Abbildung 3-8 zu sehen, dass die Regressionsgeraden für den statischen und dynamischen Fall parallel zu einander liegen. Dies bedeutet, dass die Messwerte zwar gering abweichen, aber dennoch denselben Verlauf zeigen. Somit kann daraus geschlossen werden, dass eine Analyse des dielektrischen Verhaltens im Labor unter statischen Bedingungen Rückschlüsse auf eine dynamische Wechselwirkung mit elektromagnetischer Strahlung zulässt.

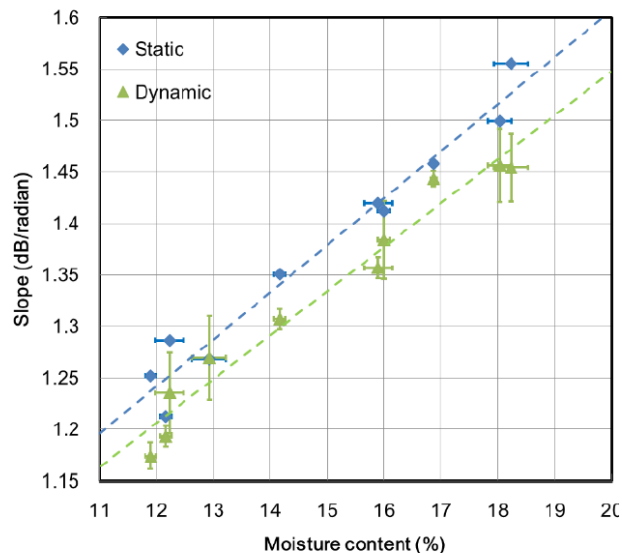


Abbildung 3-8: Vergleich zwischen statischem und dynamischen Verhalten von Weizen- und Reiskörnern unter Auftragung des A/ϕ -Verhältnisses gegen die Feuchte. [37]

Im wissenschaftlichen Artikel von McKeown et al. [38] ist zu lesen, dass die gleiche Schlussfolgerung auch bei der dynamischen Untersuchung von Kiefer- und Erdnusshüllen-Pellets getroffen werden konnte. Die Abweichungen in den Messergebnissen liegen in der Größenordnung der möglichen Fehlerquote der Kalibration (Bestimmtheitsmaß R^2).

3.8 Additive und Kreislaufstoffe

Als Beispiel für den Einfluss von Additiven und Kreislaufstoffen bei der elektromagnetischen Feuchtemessung werden die Zuschlagstoffe eines Grünmix begutachtet. Dazu wird eine Studie von O’Dea et al. [39] herangezogen, bei welcher eine Transmissionsmessung mit Mikrowellenstrahlung im niedrigen Frequenzbereich für Grünmix mit einer Feuchte zwischen 5 und 8 Masse-% angewendet wurde. Ergebnis der Untersuchung war es, dass eine Messung von Sinter auf einem Förderband erfolgreich durchgeführt werden konnte. Jedoch beeinflusst die Masse an rückgeführtem Gut die Feuchtemessung und müsste kalibriert werden. Kohle besitzt eine starke Wechselwirkung mit Mikrowellenstrahlung, dennoch konnte trotz einer breiten Variation (3 – 5 Masse-%) nur ein geringer Einfluss festgestellt werden, besonders im Vergleich zu dem rückgeführtem Feinanteil. Dies war darauf zurückzuführen, dass Kohle – analog zum Recyclat – homogen in der gesamten Schüttung verteilt war. Darüber hinaus untersucht O’Dea et al. [39] auch den Einfluss von Branntkalk und Kalkhydrat, da diese für die industrielle Grünmixbereitung nicht relevant sind, wird hier nicht näher darauf eingegangen.

Hinsichtlich der Partikelgröße zeigt die Studie an Kohle von Liu et al. [40], dass diese einen wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Mikrowellendämpfung besitzt. Mit steigendem Partikeldurchmesser wird das Ausmaß der Dämpfung höher. Dieser Effekt ist darüber hinaus auch von der Frequenz abhängig. Ab einem Durchmesser von 13 mm steigt die Dämpfung im Vergleich zu niedrigeren Partikeldurchmessern mit einem Faktor 2 sehr stark an. Die Abhängigkeit von der Frequenz sei vom Verhältnis des Partikeldurchmessers und der Wellenlänge bei der Berechnung des Reflexionsfaktors erklärbar. Dabei wurde festgestellt, dass **die höchste Messgenauigkeit** erreicht werden konnte, wenn **das Verhältnis Wellenlänge zu Partikeldurchmesser größer oder gleich 5 ist**.

Eine Rezeptur kann auch Kalkstein als Bindemittel enthalten. Dem wissenschaftlichen Artikel von Kamijo et al. [41] ist zu entnehmen, dass Kalkstein eine reale Permittivität ϵ' von ca. 9 und eine imaginäre Permittivität ϵ'' zwischen $20 - 60 \cdot 10^{-3}$ bei einer Frequenz von 9,4 GHz besitzt. Folgende Abbildung 3-9 zeigt, dass die Werte der Permittivität auch für niedrigere Frequenzen in der gleichen Größenordnung liegt. Aus diesem Grund kann behauptet werden, dass sich Kalkstein ähnlich wie Siderit verhält und somit nicht als Einflussfaktor angesehen werden kann. Des Weiteren ist der Anteil an Kalkstein im Vergleich zur Gesamtmasse bei einem Grünmix gering.

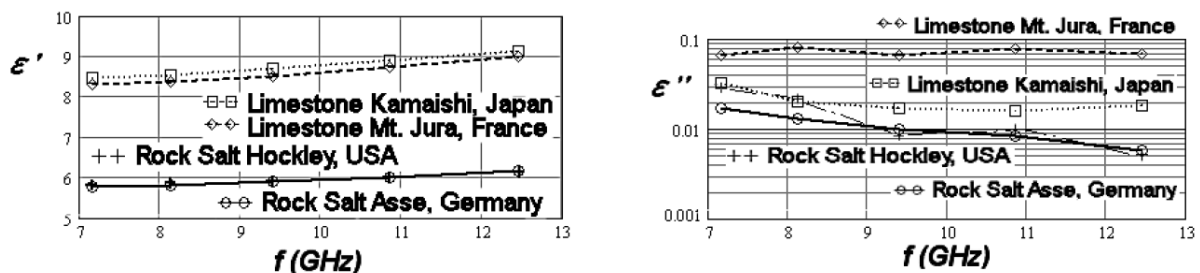


Abbildung 3-9: Frequenzabhängigkeit und Größe der Dielektrizitätskonstante von Kalkstein. [41]

3.9 Betriebsbedingungen am Förderband

Im Werk von O'Dea et al. [39] werden die Vorteile und Problematiken bei der Feuchtemessung von Eisenerz bzw. Sinter auf einem Transportband dargelegt. Durch die Transmissionsmessung ergibt sich anhand der Messung durch das gesamte Material der Vorteil, dass vertikale Segregation vernachlässigbar ist. Des Weiteren kann über eine hohe Phasen-Auflösung eine geringe Korngrößenabhängigkeit erzielt werden. Ohne aufwändigen Umbau der Anlage kann das Gerät montiert werden und die Feuchte kontinuierlich berührungslos gemessen werden.

Aus dem wissenschaftlichen Artikel von Zhul et al. [42] ist zu entnehmen, dass bei einer Feuchtemessung am Förderband zwei Einflussfaktoren zu verzeichnen sind. Durch die Verwendung eines Bandes wird die Amplitude der transmittierten Welle nochmals verringert. Aus diesem Grund ist das Material des Bandes ein wesentlicher Einflussparameter. Darüber hinaus wird mit höherer Schichtdicke die elektromagnetische Welle mehr abgeschwächt bzw. verlangsamt (stärker werdende Verringerung von A und ϕ).

Eine weitere Problematik bei der Feuchtemessung von mineralischen Schüttgütern wird von Miljak et al. [43] präsentiert. Die Transmissionsmessung von Eisenerz weist die Schwierigkeit auf einen weiten Messbereich abdecken zu müssen. Da Eisenerz stark mit den Mikrowellen in Wechselwirkung tritt, ist die Dämpfung der Strahlung entsprechend hoch. Dies wird durch die große Schichtdicke nochmals verstärkt. Weiters wird durch das Gewicht der Schüttung oft Stahl als Konstruktionsmittel und dicke Förderbänder verwendet, welche ebenfalls eine Abschwächung zur Folge haben. Darüber hinaus ergibt sich auch durch den meist langen Transmissionsweg zwischen den Antennen (rund 8 m) die Anforderung an eine präzise gerichtete Mikrowelle, welche nur wenig Strahlung in die unmittelbare Umgebung emittiert. Diese sollte entsprechend stark sein, sodass die gesamte Abschwächung samt Toleranz durch die Feuchteschwankung abgedeckt werden kann.

Im Werk von Indra et al. [44] ist zu entnehmen, dass eine Kalibration bei einer Online-Messung essentiell ist. Da ein Förderband einen wesentlichen Einfluss auf die Messung ausübt, würde eine Technik namens "Stop Belt Sampling" bei der Kalibration angewendet. Bei dieser wurde das Messsignal aufgezeichnet, während sich 15 m des leeren Bandes an den Antennen vorbeibewegten. Darauf folgend wurde anhand von Vergleichs-Messungen für unterschiedliche Bettiefen die Amplitudendämpfung und die Phasenverschiebung für das leere Band ermittelt. Anhand der Auftragung der Amplitudendämpfung/Tiefe gegen die Tiefe konnte auch geschlussfolgert werden, wie hoch die Materialschicht auf dem Förderband mindestens sein muss, um eine ausreichend genaue Messung zu gewährleisten. Weiters ist im wissenschaftlichen Artikel geschildert, dass für die Auswertung von Nickelerz bzw. Ferronickel die alleinige Heranziehung der Amplitudendämpfung den Vorteil bietet eine größere Bettiefe erfassen zu können. Bei anderen Versuchen wurde der Parameter Phasenverschiebung als vorteilhafter erkannt, was aber auf unterschiedliche Bettiefen und Produktvariationen (Partikelgrößen) sowie Art des Trockners oder Bettgeschwindigkeiten zurückzuführen war. Es konnte in der Arbeit gezeigt werden, dass der maximale Fehler bei der Feuchtemessung bei 1 % lag. Weiters wird auf den Vorteil von Mikrowellen- im Vergleich zu NIR-Strahlung eingegangen. Erstere erlauben eine Messung in Sekundenabständen, was bei einem Förderband zu einer präzisen Feuchteerfassung führt, da sich in dieser kurzen Zeit das Gut nur gering weiterbewegt.

Cutmore et al. [45] beschreiben, dass die Messung von Eisenerz problematisch ist, da die Betthöhen am Förderband groß sind (> 30 cm) und das Gut bei einer Frequenz zwischen 2 bis 4 GHz eine starke Amplitudendämpfung aufweist (> 60 dB). Zur Zeit der Veröffentlichung des Beitrages konnte somit Eisenerzmischungen mit 10 Masse-% an Feuchte aufgrund der dynamischen Bedingungen und der fehlenden Mikrowellenleistung nur bis zu einer Betthöhe von 150 mm gemessen werden. Um dies kompensieren zu können, wurden kompakte Antennen für den geringen Frequenzbereich von 1,2 – 1,9 GHz entworfen (je niedriger die Frequenz, desto größer müssten die Antennen sein) und erfolgreich Messungen bei Eisenerzmischungen mit unter 8 Masse-% sowie einer Betthöhe von 300 mm durchgeführt werden. Um einen größeren Feuchtebereich (bis 10 Masse-%) abdecken zu können, müsste die Frequenz noch niedriger sein (0,8 – 1 GHz).

4 Auswerteprinzipien

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Möglichkeiten zur Bestimmung der Feuchte über die bereits beschriebenen Messgrößen vorgestellt. Weiters soll jeweils anhand eines Beispiels das Auswerteprinzip dargelegt und analysiert werden. Da im Zuge der Verfassung der Masterarbeit aus Zeitgründen keine praktischen Versuche durchgeführt werden konnten, wurden Datensätze aus der Literatur herangezogen. Es konnte nicht für alle Anwendungsmöglichkeiten ein Beispiel eines mineralischen Schüttgutes gefunden werden. Aus diesem Grund werden manche Anwendungsprinzipien über Ersatzmaterialien aus biologischen Komponenten beschrieben. Diese wurden zur besseren Übersicht markiert.

Da bei den beiden Messarten Reflexion/Transmission und Resonanz unterschiedliche Parameter gemessen werden, müssen die Möglichkeiten zur Auswertung dieser ebenfalls separiert werden. In allen Fällen wird aber das gleiche Schema verwendet:

- I. Einstellung der Feuchte bei mehreren Proben des gleichen Materials.
- II. Bestimmung der Messgrößen (Dämpfung A und Phasenverschiebung ϕ bei Reflexion/ Transmission bzw. Resonanzfrequenz f_r und Bandbreite B bei Resonanz). Vorzugsweise sollten die Proben die gleiche Schüttdichte und Temperatur während des gesamten Messvorganges besitzen. Diese Problematik wird im weiteren Verlauf des Kapitels beschrieben.
- III. Aus den gemessenen Größen können anschließend weitere Parameter berechnet werden. Dazu zählen die Permittivität als ϵ' bzw. ϵ'' bei allen Messarten sowie in Falle der Resonanz zusätzlich die Güte Q . Des Weiteren wurden vielfach Funktionsvariablen (X , M , R , F , etc.) etabliert, welche unter Einbezug der gemessenen Größen eine feuchteabhängige Funktion ergeben.
- IV. Jeder einzelne Parameter, ob gemessen oder berechnet, kann anschließend in einem Diagramm gegen die bekannte Feuchte aufgetragen werden.
- V. Ziel ist es eine Funktion in Form einer Regressionsgeraden zu finden, anhand welcher die unbekannte Feuchte einer Probe bestimmt werden kann. Dazu sollte diese ein hohes Bestimmtheitsmaß R^2 (Übereinstimmung mit den Datenpunkten) und eine hohe Abhängigkeit von der Feuchte (um genaue Messergebnisse erzielen zu können) besitzen. Die Kalibrierungsfunktion kann linear, polynomisch oder exponentiell sein.

4.1 Reflexion und Transmission

Wie bereits erwähnt kann die Dielektrizitätskonstante eines Materials aus der Dämpfung A und der Phasenverschiebung ϕ berechnet werden. Dazu werden in der Literatur mehrere Möglichkeiten dargeboten. Im Zuge der Auswertung konnte jedoch festgestellt werden, dass nicht jede Formel zum selbigen Ergebnis führt, was durch die unterschiedlichen Materialien angenommen wurde. Der Nachteil liegt dabei darin, dass zur Bestimmung der Permittivität die Probendicke d bekannt sein muss. Bei Laborbedingungen ist dies einfacher zu realisieren, als beispielsweise auf einem Förderband. Laut Kupfer et al. [18] gibt es mehrere

Herangehensweisen an diese Problematik: Entweder die Schichthöhe wird über eine Abstreifplatte konstant gehalten oder es erfolgt eine kontinuierliche Messung.

Nach Mohan et al. [11] erfolgt die Bestimmung des Realteils der Dielektrizitätskonstante ϵ_r' für Böden nach folgender Formel (21), wobei d für die Dicke der Probe steht.

$$\epsilon_r' = \left(\frac{\phi * c}{2 * \pi * d * f} + 1 \right)^2 \quad (21)$$

Nach Kraszewski [12] kann über folgende Gleichung (22) sowie (23) aus der Dämpfung A über den Transmissionskoeffizienten τ die Dämpfungskonstante α und anhand der Phasenverschiebung ϕ die Phasenkonstante β für Agrarprodukte bestimmt werden.

$$A = 20 * \log|\tau| = 8,686 * \alpha * d \quad (22)$$

$$\phi = (\beta - \beta_0) * d \text{ mit } \beta_0 = \frac{2 * \pi}{\lambda_0} \quad (23)$$

Über die Kenntnis der Konstante α und β kann nach folgenden Formeln (24) sowie (25) der Real- und Imaginärteil der Dielektrizitätskonstante ϵ bestimmt werden. Dabei wurde angemerkt, dass $(\epsilon')^2 > (\epsilon'')^2$ gelten muss, um diese anwenden zu können.

$$\alpha \cong \frac{\pi}{\lambda} * \frac{\epsilon''}{\sqrt{\epsilon'}} \rightarrow \epsilon'' = \frac{\alpha * \lambda * \sqrt{\epsilon'}}{\pi} \quad (24)$$

$$\beta \cong \frac{2 * \pi}{\lambda} * \sqrt{\epsilon'} \rightarrow \epsilon' = \left(\frac{\beta * \lambda}{2 * \pi} \right)^2 \quad (25)$$

Bei gleichen Voraussetzungen könnte der Realteil der Dielektrizitätskonstante auch über den Betrag des Reflexionskoeffizienten Γ bestimmt werden (vgl. Formel (26)).

$$|\Gamma| \cong \frac{\sqrt{\epsilon'} - 1}{\sqrt{\epsilon'} + 1} \quad (26)$$

Eine analoge Möglichkeit der Bestimmung der Dielektrizitätskonstante besteht nach Nelson und Trabelsi [10] anhand von Formel (27) bis (30).

$$\alpha = \frac{A}{d} \quad (27)$$

$$\beta = \frac{\phi}{d} + \beta_0 \text{ mit } \beta_0 = \frac{2 * \pi}{\lambda_0} \quad (28)$$

$$\epsilon' = \left(\frac{\beta}{\beta_0} \right)^2 \quad (29)$$

$$\epsilon'' = \frac{2 * \alpha * \beta}{\beta_0} \quad (30)$$

Dabei konnte im Zuge der Auswertung festgestellt werden, dass der Ausdruck 2π in Zusammenhang mit der Einheit der Phasenverschiebung steht. Wenn diese in ° (deg) gemessen wurde, muss anstatt dieses Terms die Zahl 360 wie bei der Umrechnung zwischen den Einheiten deg und rad verwendet werden.

Nach mehreren Quellen [9, 31] gibt es erhebliche Fehler bei der Messung der Feuchte von partikelförmigen Medien durch Schüttdichteschwankungen, welche besonders bei einem Transport auf Förderbändern mechanisch nicht ausgeglichen werden können. Daher ist der Einfluss durch Schüttdichte ρ sehr groß und es gibt 3 Möglichkeiten zur Bestimmung der Feuchte:

- I. Die Dichte des Gutes muss während Kalibration und Messung konstant bleiben.
- II. Die Dichte muss immer zusätzlich gemessen werden (z.B. Gamma-Strahlung).
- III. Dichteunabhängiges Mess- und Auswerteprozedere.

Falls Fall I nicht zutreffend ist, muss Fall II (Methodik Nr. 1) oder Fall III (Methodik Nr. 2) angewendet werden.

Folglich werden nun die Auswerteprozess anhand von Beispielen dargelegt.

4.1.1 Methodik Nr. 1 (Eigenentwicklung)

Wenn die Dichte über Gamma-Strahlungs-Messung bestimmt wurde, kann diese bei der Kalibration laut Kupfer et al. [18] wie folgt nach Gleichung (31) eingesetzt werden. Der Term m_A soll dabei das Flächengewicht repräsentieren. Es ist auch möglich zur Auswertung nur ϕ heranzuziehen. Dabei gilt es zu beachten, dass die Dichtemessung vor der Bestimmung von A bzw. ϕ installiert sein muss.

$$MC_{A\phi} = a * \frac{\phi}{m_A} + b * \frac{A}{m_A} + c \quad (31)$$

Zur Illustration wurde eine Internetquelle [46] herangezogen, bei welcher die Dämpfung und die Phasenverschiebung dividiert durch die Masse der Probe in Abhängigkeit von der Feuchte für die Messung an einem Förderband zum Transport von *Bauxit* gegeben wurde. Dabei zeigt sich eine lineare Abhängigkeit von ϕ/m von der Feuchte (siehe Abbildung 4-1). Die Regressionsgerade hat ein hohes Bestimmtheitsmaß von 0,9688. Eine exakte Auswertung nach Formel (31) war aus Komplexität durch drei Variablen nicht möglich, daher wurde lediglich der Term ϕ/m verwendet.

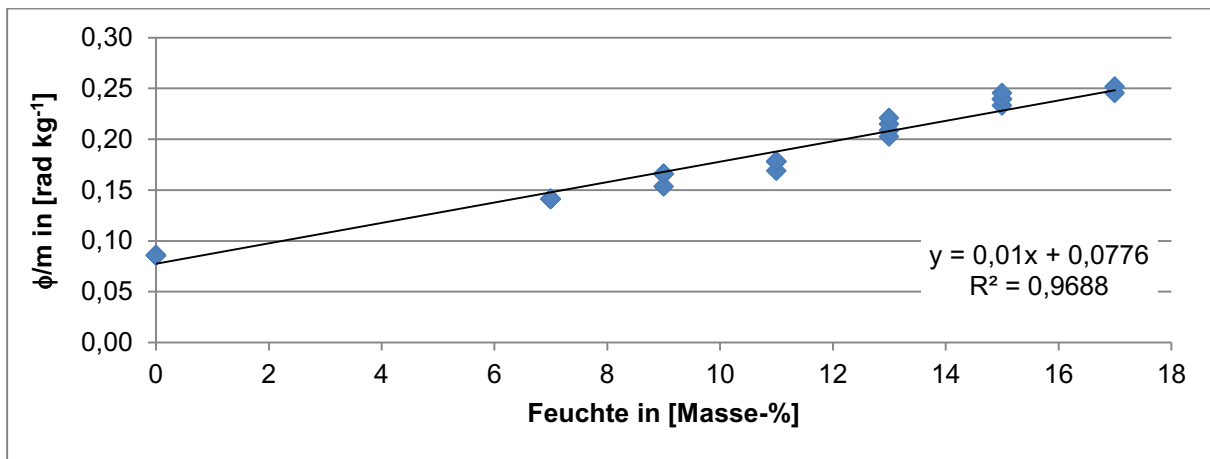


Abbildung 4-1: Methodik Nr.1 an Bauxit. [Mod. nach 46]

Bei selbstständigem Suchen nach einer passenden Auswertemethodik konnte bei diesem Beispiel eine Möglichkeit gefunden werden. Wenn die beiden gemessenen Parameter in einem Diagramm wie nach Abbildung 4-2 gegeneinander aufgetragen werden, kann beobachtet werden, dass sich für die Datenpunkte gleicher Feuchte eine Gerade ergibt. Somit besitzt jede Feuchte einen eigenen Schnittpunkt mit der y-Achse, auf welcher ϕ/m aufgetragen wurde.

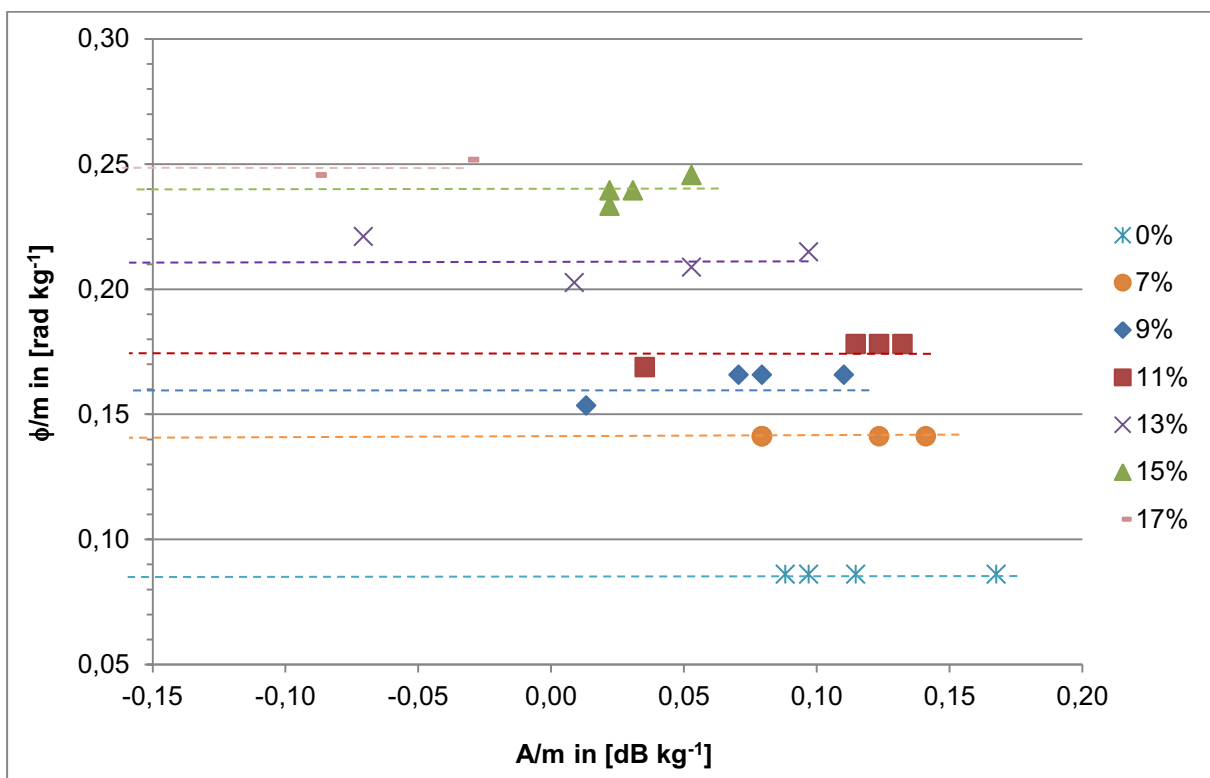


Abbildung 4-2: Auftragung von A/m gegen ϕ/m bei der Messung von Bauxit auf einem Förderband.

Wenn nun diese Schnittpunkte mit der y-Achse herausgelesen werden und gegen die Feuchte aufgetragen werden (siehe Abbildung 4-3), kann eine Regressionsgerade mit einem höheren Bestimmtheitsgrad von 0,976 erhalten werden. Des Weiteren werden beide gemessenen Parameter in die Auswertung miteinbezogen.

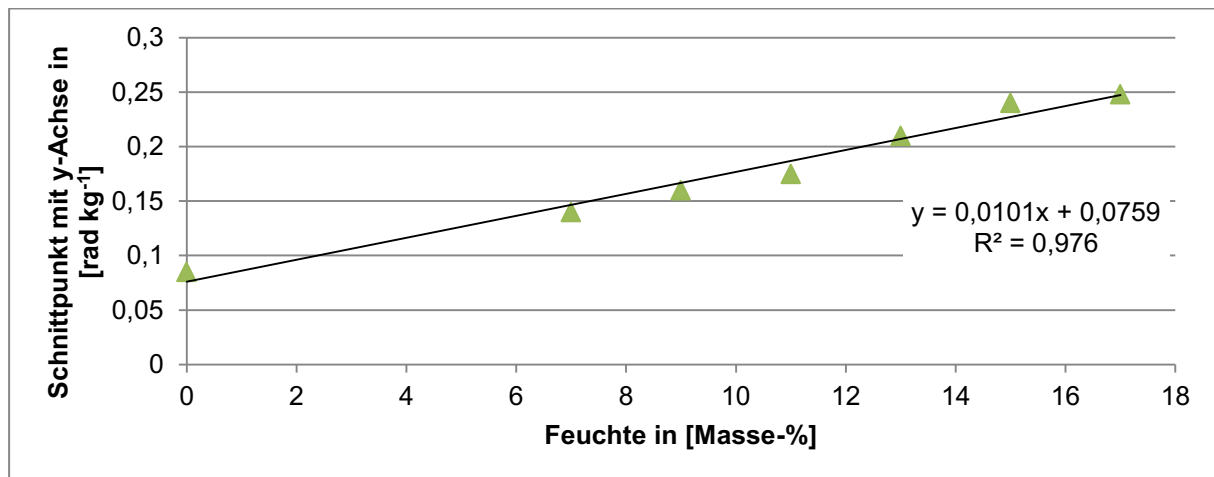


Abbildung 4-3: Auftragung des Schnittpunktes mit der y-Achse gegen die Feuchte bei der Auftragung von A/m gegen ϕ/m bei der Messung von Bauxit auf einem Förderband.

4.1.2 Methodik Nr. 2

An dieser Stelle wird die dichteunabhängige Messung genauer betrachtet. Dazu wurden mehrere Literaturquellen herangezogen [10, 31]. Bei einer Studie an Weizen wurden mehrere dichteunabhängige Ausdrücke verglichen. Dazu gab es 180 Messungen bei Frequenzen zwischen 11,3 und 16,8 GHz im freien Raum (Transmission) bei Feuchten zwischen 10,6 – 18,2 % w.b. (wet basis). Es konnten mehrere Funktionen X gefunden werden, welche eine dichteunabhängige Regressionsgerade ermöglichen, und in folgender Tabelle 4-1 auf der nächsten Seite zusammengefasst wurden. Es können generell lineare und nicht-lineare Geraden gefunden werden, wobei eine quadratische Abhängigkeit der Feuchte zu einer besseren Kompensation der Dichte führte. Lediglich zur Bestimmung der Funktion X_3 und X_4 ist die Kenntnis über die Dichte für die Erstellung der Kalibration notwendig. Dazu muss für beide Funktionen zunächst das s.g. „Argand-Diagramm“ erstellt werden. Dabei werden auf der x-Achse ε'/ρ und auf der y-Achse ε''/ρ bei bekannter Feuchte aufgetragen. Die daraus erhaltene Regressionsgerade hat die Form nach Gleichung (32).

$$\frac{\varepsilon''}{\rho} = a_f * \left(\frac{\varepsilon'}{\rho} - b_0 \right) \quad (32)$$

Die Konstante a_f hängt nur von der Frequenz ab und b_0 ist der Schnittpunkt mit der x-Achse, wobei diese nur vom Material abhängig ist. Der zuletzt genannte Parameter entspricht dem Wert bei 0 % Feuchte und sehr niedriger Temperatur. Beide Größen werden anschließend zur Bestimmung der Werte X_3 bzw. anschließend für X_4 herangezogen. Der Vorteil liegt bei dieser Methode daran, dass die Parameter a_f und b_0 bei gleicher Frequenz für ähnliche Produkte (Weizen, Soja, Mais, etc.) annähernd gleich groß sind. Dies konnte auch bei unterschiedlichen Korndimensionen/ -formen sowie Schüttdichten und Zusammensetzungen beobachtet werden. Daher wird sie als „universal Funktion“ bezeichnet. Der Nachteil liegt dabei, dass die Dichte bekannt sein muss. Die Koeffizienten können aber im Labormaßstab bestimmt und anschließend für die online Messung verwendet werden, ohne weitere Kenntnis über die Dichte während des Betriebes.

Tabelle 4-1: Zusammenfassung über alle möglichen Werte X, anhand welcher eine Regressionsgerade zur Bestimmung der Feuchte erstellt werden kann. Ein prinzipieller Verlauf für Weizenkörner in Abhängigkeit der Feuchte ist ebenfalls ersichtlich. [Mod. nach 10, 31]

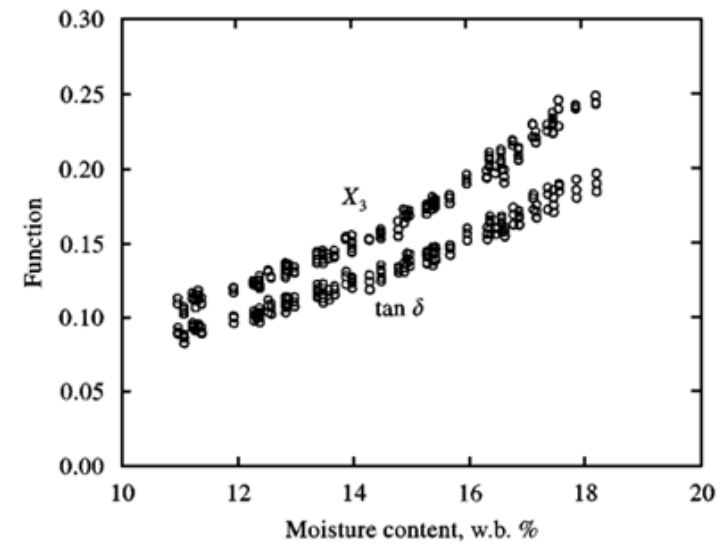
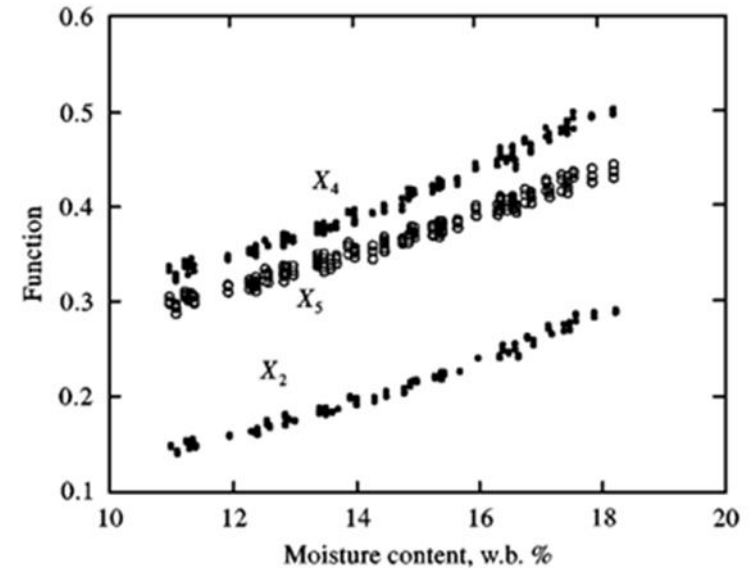
Symbol	Funktion	Prinzipieller Verlauf
X_1	$X_1 = \frac{A}{\phi} = \frac{8,686 * \pi}{360} * \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon'} * (\sqrt{\varepsilon'} - 1)} = c * \zeta * X_2$ $= c * \eta * \tan(\delta)$ <p style="text-align: center;">mit</p> $A \cong d * \frac{8,686 * \pi}{\lambda_0 * \sqrt{\varepsilon'}} * \varepsilon''$ $\phi \cong d * \frac{360}{\lambda_0} * (\sqrt{\varepsilon'} - 1)$ <p style="text-align: center;">Konstante $c = 0,0758$</p> $\eta = \frac{\sqrt{\varepsilon'}}{(\sqrt{\varepsilon'} - 1)}$ $\zeta = \frac{(\sqrt{\varepsilon'} + 1)}{\sqrt{\varepsilon'}}$ $\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}$	

$$X_2 = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon' - 1}$$

$$X_4 = \sqrt{X_3}$$

$$X_5 = \sqrt{\tan \delta}$$

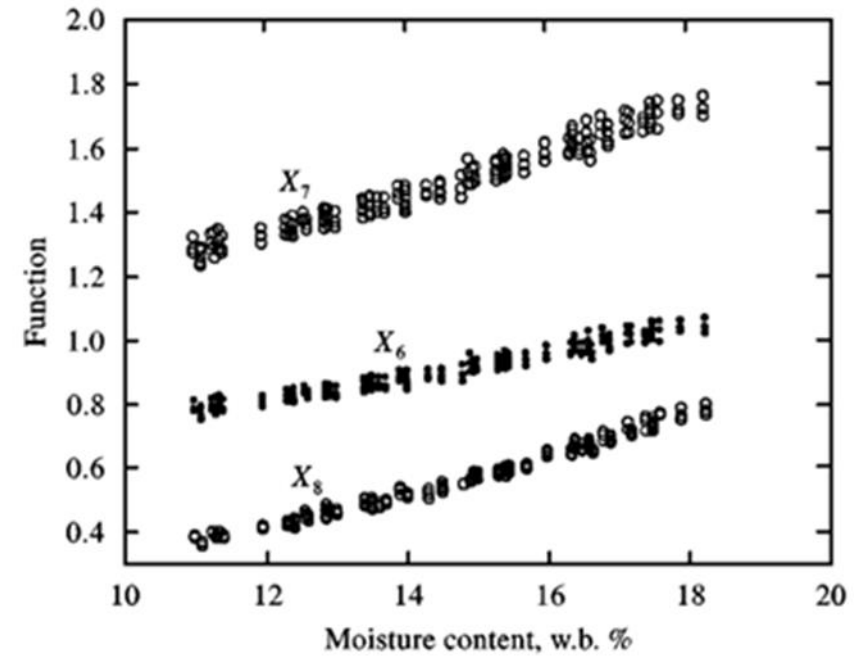
$$X_3 = \frac{\tan \delta}{\rho} = \frac{a_f * b_0 * \tan \delta}{a_f * \varepsilon' - \varepsilon''}$$



$$X_6 = \frac{\sqrt{\varepsilon''}}{\sqrt{\varepsilon' - 1}}$$

$$X_7 = \frac{\sqrt{\varepsilon''}}{\sqrt[3]{\varepsilon' - 1}}$$

$$X_8 = \frac{\varepsilon''}{\sqrt{\varepsilon' - 1}}$$



Vorteile dieser Methode sind:

- Obwohl manche Funktionen nur eine geringe Steigung besitzen, ist die Sensitivität für einen gewissen Feuchtegehalt adäquat.
- Die Funktion X_1 beinhaltet die Relation von zwei tatsächlich gemessenen Größen, daher müssen ε' und ε'' nicht bestimmt werden. Somit kann dies auch genützt werden, wenn die Materialdicke schwankt, da beide Größen (Dämpfung und Phasenverschiebung) gleichermaßen von der Schichtdicke abhängen.
- Diese Methode ist auch anwendbar, wenn anderweitig ε bestimmt wurde.

Nachteile dieser Methode sind:

- Sehr aufwendiges Vergleichsverfahren.
- Zur Bestimmung von ε muss die Probendicke d bekannt sein.
- Bei X_3 und X_4 muss die Dichte bekannt sein sowie ein Argand-Diagramm erstellt werden.
- Es handelt sich um eine statische Problemlösung, somit könnte eine dynamische Beanspruchung (Förderband) ein anderes Ergebnis liefern.
- Es wurde ein homogenes Material (nur Weizen) verwendet, aber Grünmix besteht aus mehreren Komponenten. Bei einer stark variierenden Zusammensetzung müsste die Kalibration mehrmals für unterschiedliche Rezepturen durchgeführt werden.
- Die Temperatur war konstant, sodass ein möglicher Temperatureinfluss nicht berücksichtigt wurde.

Nach gleichem Schema wurden zwei weitere dichteunabhängige Funktionen gefunden, anhand welcher die Feuchte bestimmt werden kann. Bei der ersten Funktion unter Formel (33) wurden mehrere Materialien über einen Heterodyne Network Analyser getestet.

$$X_9 = \frac{\phi}{A} = \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} * \frac{2 * \sqrt{\varepsilon'}}{1 + \sqrt{\varepsilon'}} \quad (33)$$

Bei der zweiten Funktion nach Gleichung (34) konnte bei 5 – 25 % Feuchte und einem weiten Dichtebereich ein dichteunabhängiges, aber sehr präzises Messergebnis erzielt werden. Dabei gilt die Voraussetzung, dass die Dichte nicht zu sehr schwankt.

$$X_{10} = \frac{\sqrt[3]{\varepsilon'} - 1}{\sqrt[2]{\varepsilon''}} \quad (34)$$

An dieser Stelle sein noch angemerkt, dass im Zuge der Ausarbeitung X_1 als A/ϕ berechnet wurde. Des Weiteren wurde für X_3 und X_4 jeweils beide Berechnungsmethoden (mit ε und den Konstanten aus dem Argand-Diagramm) gewählt. Zu unterscheiden sind diese durch den Ausdruck „ X_3 über Argand“ bzw. „ X_4 über Argand“. Bei X_9 wurden ebenfalls beide Arten verwendet und die erstere zur Unterscheidung als „ X_9 als ϕ/A “ benannt.

Diese Auswertemethodik wurde anhand von Rohdaten bei einer Messung von Kohle [47] erprobt. Es sind jeweils die Dämpfung A und die Phasenverschiebung ϕ gegen die Feuchte

für eine Reflexions- und eine Transmissionsmessung gegeben. Die Messfrequenz ist 2,45 GHz und die Probendicke 7,5 cm. Die Feuchte variiert zwischen 1 – 11 Masse-%. Anhand der herausgelesenen Daten konnte nur für die Transmissionsmessung ein plausibles Ergebnis erzielt werden. Überprüft werden konnte das anhand einer anderen Quelle [48], in welcher unterschiedliche Permittivitäten für Materialien zu finden sind. Angegeben wurde, dass Fettkohle eine Dielektrizitätskonstante von 3,4 und Holzkohle eine von 1,3 sowie Kohle mit einer Feuchtigkeit von 15 % einen Wert von 4 besitzen soll. Für die Transmissionsmessung konnte nach den gegebenen Formeln in der ersten Spalte von Tabelle 4-1 ein mit der Quelle übereinstimmender Werte berechnet werden. Nachdem die Dichte nicht bekannt war, wurden nur jene Funktionen herangezogen, welche von A , ϕ oder ε abhängen. Im Anhang auf Seite XV ff. lassen sich die Kalibrationsgeraden finden. Ergebnis der Untersuchung war es, dass folgende Funktionen die höchsten Bestimmtheitsgrade aufgewiesen haben: $\xi (0,9174) < \varepsilon' (0,9055) < \eta (0,8391) < \varepsilon'' (0,8058) < X_{10} (0,7950)$. Somit kann eine Feuchtebestimmung über Berechnung der Variabel ξ zum präzisesten Messergebnis führen.

Auf analoger Weise konnte dies auch für eine Messung der realen und imaginären Dielektrizitätskonstante von Natriumchlorid angewendet werden [49]. Dabei wurden die Parameter des Gutes mit einem Open-End-Sensor und über die Bestimmung des Reflexionskoeffizienten gemessen. Es wurde eine Frequenz von 2,45 GHz verwendet. Für diesen Anwendungsfall konnte festgestellt werden, dass zur Bestimmung der Feuchte andere Funktionen als beim Beispiel Kohle gebräuchlicher wären. Alle Diagramme lassen sich erneut im Anhang (Seite XIX ff.) finden. Die Reihenfolge nach Bestimmtheitsmaß lautet: $X_8 (0,99) < X_2 (0,9895) < X_5 (0,9876) < X_6 (0,9853) < \varepsilon'' (0,9844)$. Im Vergleich zu Kohle lässt sich weiters sagen, dass die linearen Regressionsgeraden bei NaCl ebenfalls einen besseren Bestimmtheitsgrad aufweisen. Es sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass in diesem Werk zusätzlich auf die Eindringtiefe eingegangen wurde. Dabei kann nach folgender Abbildung 4-4 auf der nächsten Seite gezeigt werden, dass diese mit dem Wassergehalt annähernd exponentiell sinkt. Somit können Güter, welche eine höhere Feuchtigkeit und dicke Probenschicht besitzen, nur ungenau mit einer Reflexionsmethode gemessen werden, da lediglich die Feuchte in den obersten Schichten in Wechselwirkung mit der elektromagnetischen Strahlung tritt. Außerdem wurde gezeigt, dass die Eindringtiefe mit steigender Temperatur abnimmt, während ε' sowie $\tan \delta$ abnimmt.

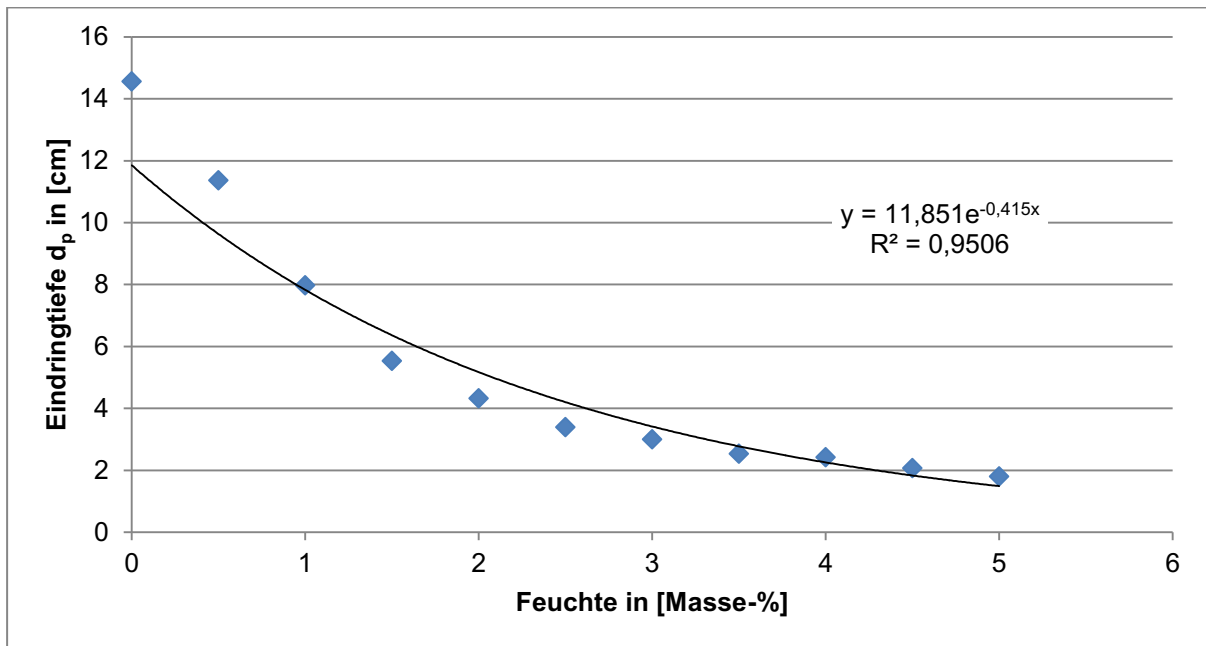


Abbildung 4-4: Verlauf der Eindringtiefe d_p mit der Feuchte bei der Reflexionsmessung von Natriumchlorid bei 2,45 GHz. [Mod. nach 49]

Um eine Auswertung mittels eines Argand-Diagramm zu zeigen, werden Daten einer Messung von Sojabohnen bei 2,45 GHz und 24 °C herangezogen [50]. Das erstellte Diagramm lässt sich in folgender Abbildung 4-5 finden. Aus der Regressionsgeraden lässt sich eine Steigung k (entspricht Konstante a_f) von 0,3453 und ein Achsenabschnitt d von 0,7948 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$ herauslesen. Die Konstante b_0 wird berechnet, indem d durch a_f dividiert wird, und diese entspricht einem Wert von 2,302 $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$.

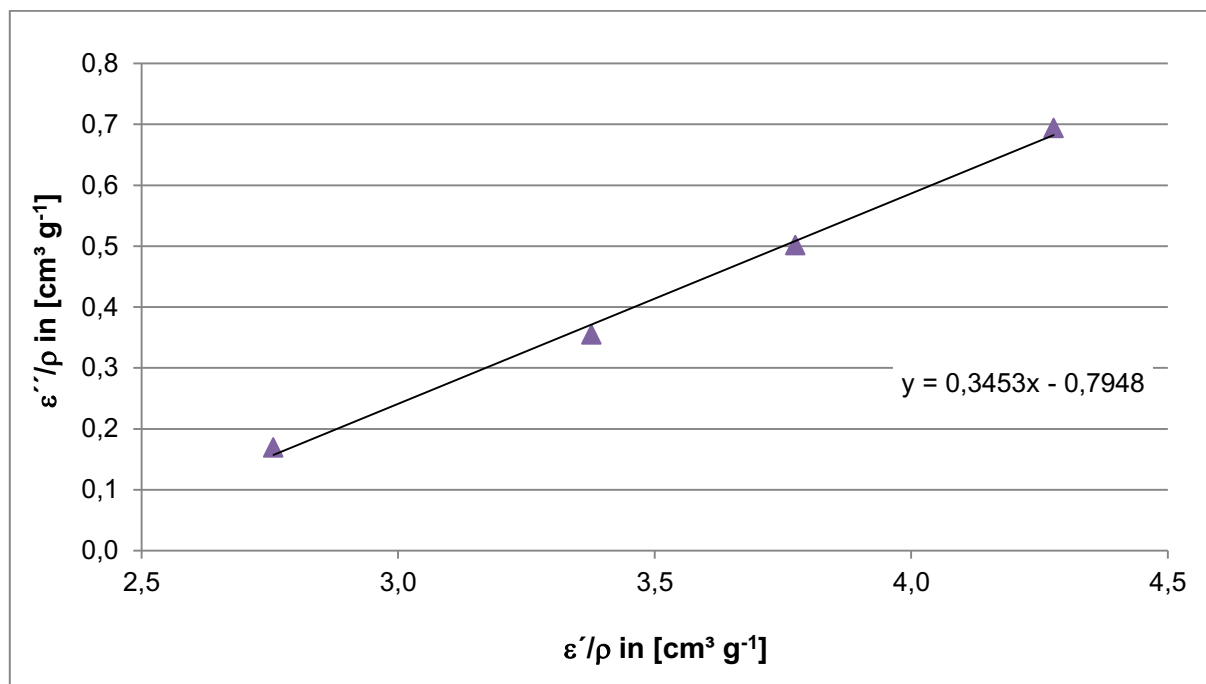


Abbildung 4-5: Erstelltes Argand-Diagramm bei der Auswertung von Sojabohnen.

In diesem Beispiel konnte festgestellt werden, dass die Funktionen in der Reihenfolge $\varepsilon'' (0,9999) < X_3 (0,9985) < X_3 \text{ über Argand} (0,9984) < \varepsilon' (0,9975) < X_4 (0,9953)$ am besten zur Auswertung geeignet sind. Die dazugehörigen Diagramme sind im Anhang auf S. XXII ff. zu finden. Analog zum Natriumchlorid weisen alle Regressionsgeraden einen linearen Verlauf mit einem hohen Bestimmtheitsmaß auf.

Im Zuge der Ausarbeitung konnte festgestellt werden, dass diese Auswertemethodik ebenfalls verwendet werden kann, wenn die Dielektrizitätskonstanten des Materials anderweitig bestimmt wurden. Als Beispiel seien hier die Artikel von Pinto et al. [51] und Lage et al. [52] angeführt. In beiden wurden Messdaten bei der Bestimmung der Dielektrizitätskonstante von Eisenerz präsentiert, welche anhand einer Kapazitätsmessung erfolgten. Diese Werte wurden herangezogen und in veränderter Weise ausgewertet. Da nur die Permittivität gegeben war und nicht der Real- bzw. Imaginärteil, wurde bei den Funktionen statt ε' bzw. ε'' die Gesamtpermittivität ε eingesetzt. Im Vergleich zu den zuvor gezeigten Beispielen, konnten im Falle des Eisenerzes nicht-lineare Regressionsgeraden gefunden werden. Anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 können die Funktionen wie folgt gereiht werden: $X_{10} (0,9998; \text{Polynomisch 4. Grad}) < X_7 (0,9997; \text{Polynomisch 4. Grad}) < X_8 (0,9956; \text{Linear}) < \xi (0,9937; \text{Polynom 2. Grades}) < \varepsilon (0,9756; \text{Linear})$. Da die Diagramme zur Auswertemethodik bei beiden Datensätzen ähnlich sind sowie das gleiche Ergebnis bezüglich des Bestimmtheitsmaßes liefert, wird nur jene aus der zweiten Literaturquelle [52] herangezogen und im Anhang ab Seite XXVI präsentiert.

Angemerkt sei noch, dass Kupfer et al. [18] die unter X_1 vorgestellte Funktion anderweitig präsentierten. Hierbei wird ein Amplitude zu Phasen-Diagramm erstellt, bei welchem der Steigungswinkel unabhängig von der Dichte (uc = nicht komprimiert, c = komprimiert) sein soll. Demnach gibt es unter Formel (35) eine dazugehörige Funktion F , welche von der Feuchte abhängig ist.

$$\tan \psi = \frac{A(uc)}{\phi(uc)} = \frac{A(c)}{\phi(c)} = F \quad (35)$$

Unter Abbildung 4-6 wird ein Beispiel für solch ein Diagramm bei der Untersuchung von Sand gezeigt. Die Nachteile dieses Bestimmungsverfahrens liegen darin, dass einseitige Temperaturänderungen, Inhomogenitäten und der Salzgehalt wesentliche Einflussfaktoren sind. Weiters ist es nur bis zu einem bestimmten Feuchtegehalt möglich (bei Sand: 12,64 Masse-% an Feuchte).

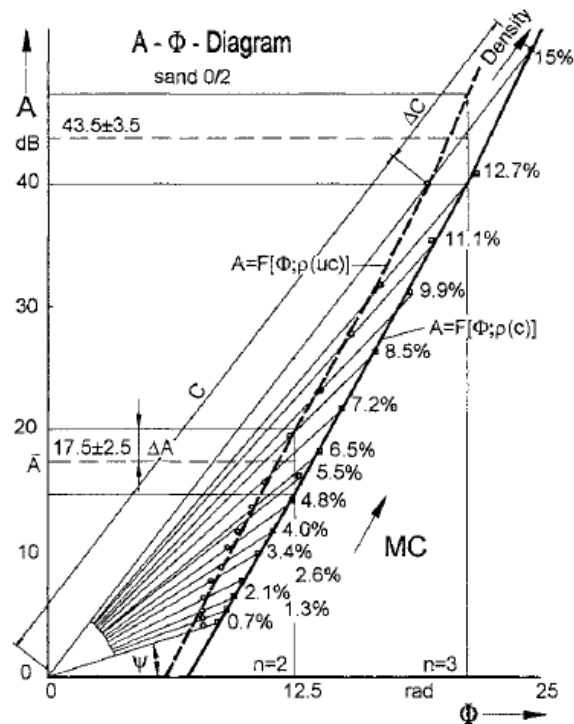


Abbildung 4-6: Das A- zu ϕ - Diagramm liefert Geraden mit derselben Steigung ψ , welche unabhängig von der Dichte (uc = nicht komprimiert, c = komprimiert) und nur mit der Feuchte MC schwankt. Anhand dieser kann eine dichteunabhängige Kalibrationsgerade erstellt werden. [18]

4.1.3 Methodik Nr. 3

Nach der selbigen Literaturquelle [18] wird eine Auswertemethode dargelegt, welche sich von den übrigen unterscheidet. Bei allen bisher genannten Möglichkeiten wurde bei der Kalibration bzw. Messung immer nur eine feststehende Frequenz verwendet. Es ist aber auch möglich die Dämpfung A und die Phasenverschiebung ϕ beim gleichen Material mit zwei unterschiedlichen Frequenzen f (bzw. Kreisfrequenzen ω) zu messen sowie diese anschließend zu vergleichen. Bei einer Transmissionsmessung wurde dieser so genannte „Frequenz-Sweep“ erprobt und aus dem Vergleich der Parameter bei den beiden unterschiedlichen Frequenzen eine nach Formel (36) dichteunabhängige Funktion X_{11} , welche ebenfalls nur von der Feuchte abhängt, bestimmt.

$$X_{11} = \frac{\frac{\Delta A(\omega)}{\Delta \omega}}{\frac{\Delta \phi(\omega)}{\Delta \omega}} \quad (36)$$

Diese Methodik soll wesentliche Vorteile aufweisen. Es kommt zu einer Erhöhung der Sensitivität und eine höhere Präzision, besonders bei hohen Feuchtegehalten. Des Weiteren wird ein Frequenz-Sweep eingesetzt, wenn die Feuchte des Gutes über die Messperiode stärker schwankt. Außerdem ist die Kenntnis über die Probendicke nicht erforderlich.

Des Weiteren wird eine zweite Methode vorgestellt, welche ebenfalls auf dem Prinzip beruht, zwei unterschiedliche Frequenzen zu verwenden. Es handelt sich um eine Transmissionsmessung im freien Raum mit zwei unterschiedlichen Frequenzen. Dazu sollen

Formel (37) und (38) herangezogen werden. Das Verhältnis zwischen den beiden Phasenverschiebungen ϕ ist ident mit einem Verhältnis aus den Dielektrizitätskonstanten ε' und den Wellenlängen λ (bei Umrechnung den Frequenzen). Aus diesem Verhältnis lässt sich erneut eine dichteunabhängige Funktion χ erstellen, welche als Kalibrationsgerade dienen kann.

$$X_{12} = \frac{\Delta\phi_2}{\Delta\phi_1} = \frac{\sqrt{\varepsilon_2'} - 1}{\sqrt{\varepsilon_1'} - 1} * \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (37)$$

$$\chi = \frac{\sqrt{\varepsilon_2'} - 1}{\sqrt{\varepsilon_1'} - 1} \quad (38)$$

Diese Art der Auswertung soll nun anhand eines Beispiels veranschaulicht werden. Es wurden die Dielektrizitätskonstanten für Beton aus dem Artikel von Xiaohua und Mohammad [53] herangezogen. Dabei muss erwähnt werden, dass die genaue Bestimmungsform der Permittivität nicht beschrieben wurde. Zuerst wurde dazu die Methode aus Methodik Nr. 2 angewendet. Dabei war zu erkennen, dass diese zwar für eine feststehende Frequenz verwendet werden kann, aber für unterschiedliche Frequenzen besitzen die einzelnen Parameter (ε , X , ξ , η) auch unterschiedliche Werte. Dies soll anhand folgender Abbildung 4-7 für die Permittivität gezeigt werden. Zwar scheint es, dass die Permittivität für die Frequenzen zwischen 0,4 – 2 GHz eine frequenzunabhängige Regressionsgerade bilden könnten, dennoch wird dies durch den weiten Abstand zu den Regressionsgeraden der Frequenzen 0 – 0,2 GHz und der geringen Größe des Diagramms verzerrt.

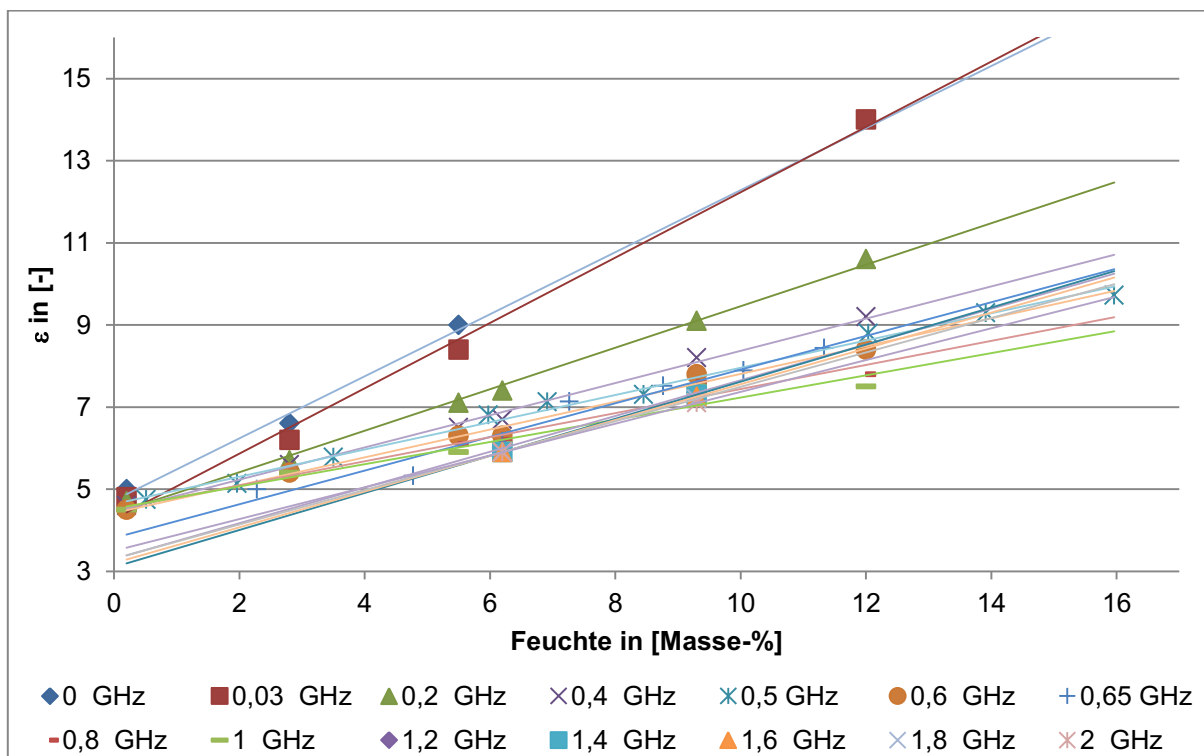


Abbildung 4-7: Permittivität ε von Beton in Abhängigkeit zur Feuchte bei mehreren Mess-Frequenzen.

In Abbildung 4-8 wird für X_2 dieser Sachverhalt dargelegt. Daraus ist zu erkennen, dass eine geringe Änderung der Frequenz bereits zu Messfehlern führen kann. Anzumerken ist, dass dieser Effekt mit zunehmender Frequenz verkleinert wird, da die Geraden geringere Abstände zueinander aufweisen.

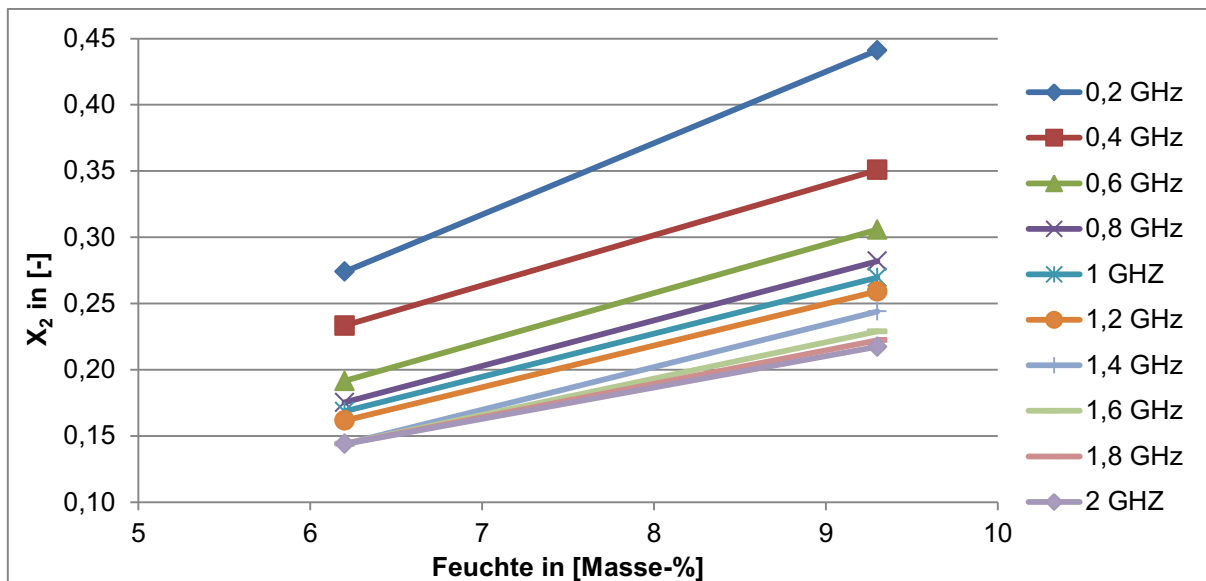


Abbildung 4-8: Auswertung anhand der Permittivität ϵ für Beton bei mehreren Frequenzen unter Anwendung der Berechnung von X_2 .

Anhand des selbigen wissenschaftlichen Artikels wurden zwei Verläufe der Permittivität über die Feuchte für 0,5 und 1,5 GHz herangezogen. Für diese wurden nach dem genannten Schema Werte für X_{12} und χ berechnet, welche anschließend gegen die Feuchte aufgetragen wurden. In beiden Fällen konnte kein ausreichendes Ergebnis erzielt werden. Abbildung 4-9 zeigt die beiden Verläufe. Zwar weisen diese einen annähernd linearen Verlauf auf, aber das Bestimmtheitsmaß ist mit 0,6061 zu gering, um genaue Auswertungen treffen zu können.

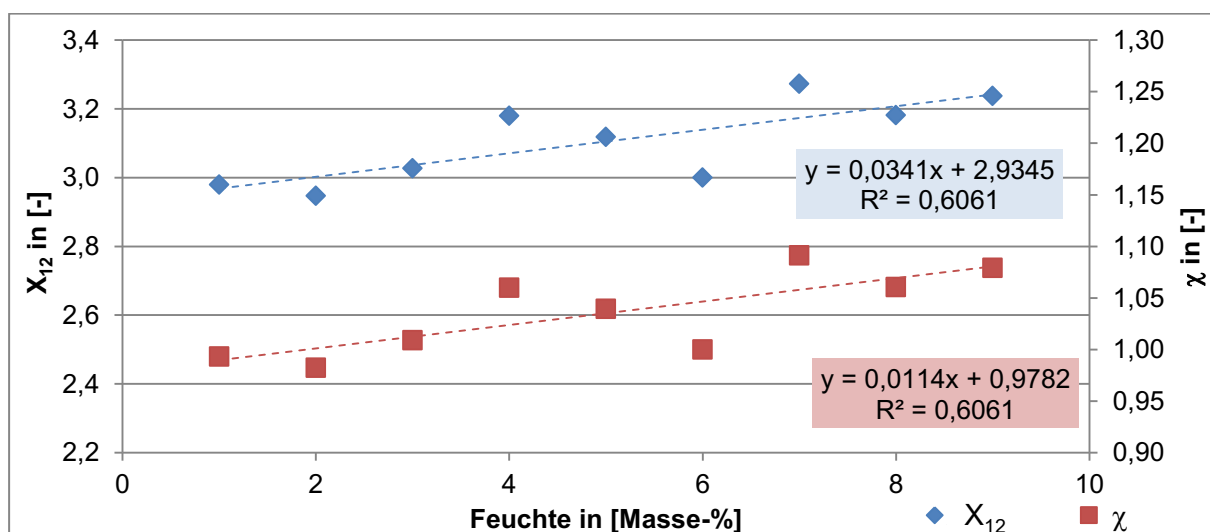


Abbildung 4-9: Auswertung von X_{12} und χ , berechnet aus den Permittivitäten von Beton bei zwei unterschiedlichen Frequenzen (0,5 und 1,5 GHz).

Da für den Anwendungsfall Beton die Permittivität bei einer feststehenden Frequenz linear und mit einem hohen R^2 von der Feuchte abhängig ist (vgl. Abbildung 4-10), ist eine einfache Auswertung über eine Frequenz zielführender.

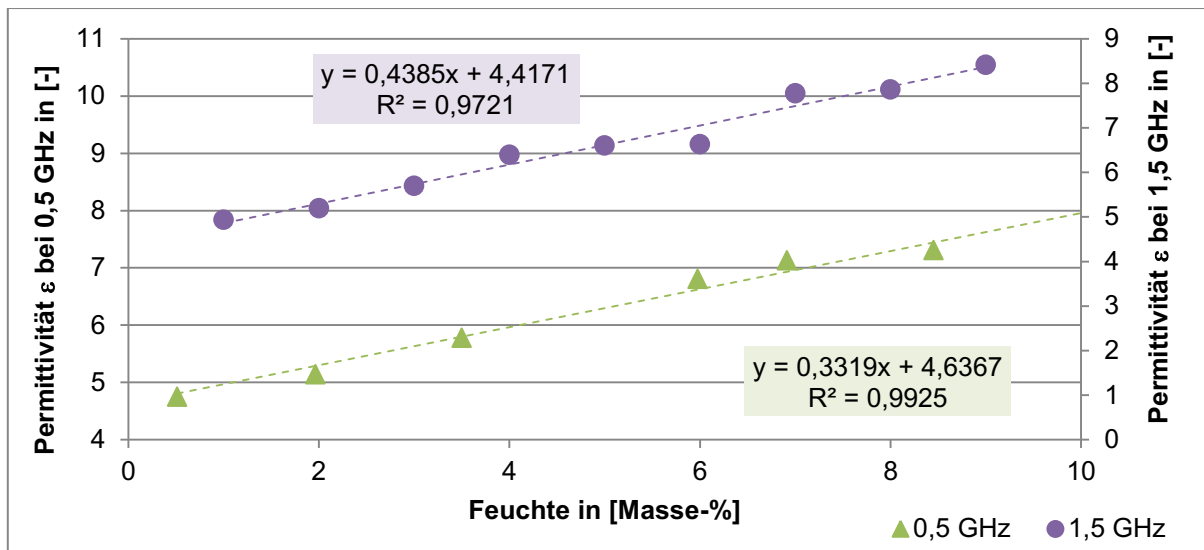


Abbildung 4-10: Verlauf der Permittivitäten von Beton über die Feuchte für zwei unterschiedliche Frequenzen (0,5 und 1,5 GHz).

4.2 Resonator

An dieser Stelle erfolgt eine Wiederholung der zu messenden Parameter. Diese werden bei einem Resonator aus der Resonanzkurve entnommen. Dazu zählt die Resonanzfrequenz f_r (= Frequenz bei Maximalwert) und die Bandbreite B (= Breite Resonanzkurve beim um den Faktor $\sqrt{2}$ verringerten Maximalwert). Dies erfolgt für den leeren Resonator und den mit Probe gefüllten Resonator bei unterschiedlichen Feuchtegehalten. Aus diesen Größen lässt sich nach Formel (39) die Güte Q , auch Q -Faktor genannt, erneut für Resonator im leeren (Q_{r0}) sowie befüllten Zustand (Q_r) bestimmen.

$$Q_{r0} = \frac{f_{r0}}{B_{r0}} \text{ bzw. } Q_r = \frac{f_r}{B_r} \quad (39)$$

4.2.1 Methodik Nr. 4

Nach Peters et al. [24] gibt es einen Zusammenhang zwischen der Resonanzfrequenzen f_r sowie f_{r0} und dem Realteil der Permittivität ϵ' , welche nach Formel (40) folgendermaßen gegeben ist.

$$f_r = \frac{f_{r0}}{\sqrt{\epsilon'}} \rightarrow \epsilon' = \left(\frac{f_{r0}}{f_r} \right)^2 \quad (40)$$

Der Q -Faktor wird durch Verluste und daher durch den Imaginäranteil der Permittivität ϵ'' nach Formel (41) beeinflusst.

$$Q_r = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} \quad (41)$$

Somit kann mittels Messung der Resonanzfrequenz und des Q-Faktors die komplexe Permittivität des Materials bestimmt werden. Nun kann analog zur Reflexion/Transmissions-Messung die gemessenen und/oder berechneten Größen gegen die Feuchte in einem Diagramm aufgetragen werden sowie eine Regressionsgerade anhand der Datenpunkten erstellt werden. Dies soll folglich beispielhaft gezeigt werden. Aus dem wissenschaftlichen Artikel von Olkkonen et al. [54] wurden Daten bei einer Resonator-Messung von Beton herangezogen. Gegeben war das Verhältnis der jeweiligen Resonanzfrequenzen zur Resonanzfrequenz des leeren Resonators ($\Delta f_r = f_{r0} - f_r$) in Abhängigkeit der Feuchte und die Resonanzfrequenz des leeren Resonators ($f_{r0} = 1,715$ GHz). Daraus konnten die Resonanzfrequenzen des befüllten Resonators bei unterschiedlichen Feuchtegehalten und der Realteil der Permittivität ϵ' berechnet werden. Die Ermittlung des Imaginärteils war aufgrund der fehlenden Information über die Güte nicht möglich. Alle Größen wurden in Diagrammen gegen die Feuchte aufgetragen und befinden sich im Anhang auf Seite XXIX ff. Zwar weisen die Regressionsgeraden niedrige Bestimmtheitsmaße R^2 auf, aber dies ist auf zwei außerordentliche Messdaten zurückzuführen. Wenn diese als Messfehler angenommen und dadurch vernachlässigt werden, ergeben sich höhere Bestimmtheitsmaße: ϵ' als Polynomfunktion (0,9798) < Δf_r (0,9477) < $\Delta f_r/f_{r0}$ (0,9477) < f_r (0,9477) < ϵ' als lineare Funktion (0,9436). Es wurde erprobt, ob die Auswertemethode nach Methodik Nr. 3 für die Reflexions-/Transmissionsmessung ebenfalls angewendet werden kann. Da nur ϵ' berechnet werden konnte, wurde anstatt ϵ'' erneut ϵ' eingesetzt. Das Ergebnis der gesamten Untersuchung in diesem Fallbeispiel war es, dass eine polynomische Regressionsgerade bei Auftragung von ϵ' gegen die Feuchte das höchste Bestimmtheitsmaß aufgewiesen hat. Unter den Funktionen X , η und ξ besaß Funktion X_8 den höchsten Wert mit 0,9628.

4.2.2 Methodik Nr. 5

Peters et al. [24] geben in ihrem Werk noch eine weitere Auswertemethodik bekannt. Besonders bei granulierten Materialien hängt die Resonanzfrequenz- und Bandbreiten-Änderung mit der Schüttdichte zusammen, da mit höherer Dichte auch mehr Masse eine Wechselwirkung mit dem elektromagnetischen Feld eingeht. Da die Änderung der Frequenzen als auch jene der Bandbreiten gleichermaßen von der Dichte abhängen, kann eine dichteunabhängige Messung durchgeführt werden. Somit gibt es von der Feuchte abhängige Größe M (vgl. Gleichung (42)).

$$M = \frac{B_r - B_{r0}}{f_{r0} - f_r} = \frac{\Delta B}{\Delta f} \quad (42)$$

Als Grundlage für das Fallbeispiel wurden Daten aus der Messung von Weizen mit einem 2,81 GHz Resonator nach Kocsis et al. [55] herangezogen. Aus den Diagrammen wurden die Größen für die Differenz der Resonanzfrequenzen Δf und Winkel Φ entnommen. Im Werk wurde beschrieben, dass bei einer Auftragung der Differenz der Bandbreite ΔB gegen die Differenz der Resonanzfrequenzen Δf alle Datenmesspunkte von Proben gleicher Feuchte auf einer Geraden liegen. Diese Geraden haben somit feuchteabhängige Steigungswinkel Φ . Daher konnte aus den angegebenen Daten die Bandbreite ermittelt werden. Aus den beiden

Differenzen Δf und ΔB kann schließlich die Größen M in Abhängigkeit von der Feuchte berechnet und gegen diese aufgetragen werden. In folgender Abbildung 4-11 wird das dazugehörige Diagramm gezeigt. Zu erkennen ist, dass eine polynomische Regressionsgerade zu einem hohen Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9867 führt und daher als Auswertemöglichkeit zutreffende Ergebnisse liefert.

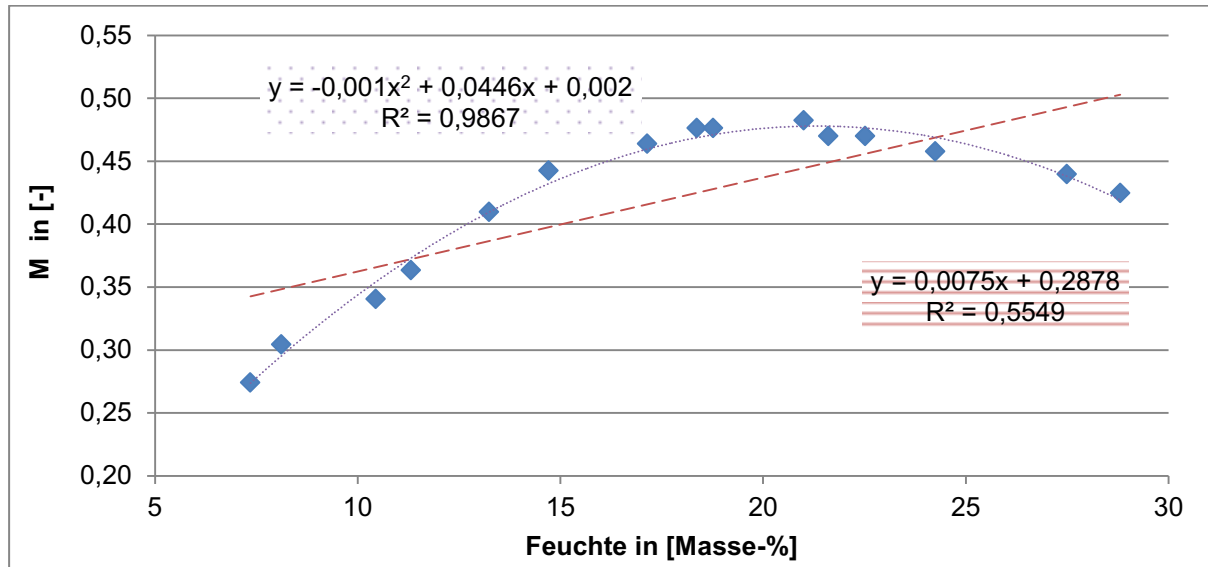


Abbildung 4-11: Parameter M in Abhängigkeit von der Feuchte für eine Resonator-Messung von Weizen.

An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass für die gleichen Datensatz das gleiche Auswertungsschema wie für Methodik Nr. 4 angewendet wurde. Zusätzlich wurde die Regressionsgerade bei der Auftragung des Winkel Φ gegen die Feuchte ebenfalls in die Analyse miteinbezogen. Alle Diagramme sind dem Anhang auf Seite XXXIII ff. hinzugefügt worden.

4.2.3 Methodik Nr. 6

Im Werk von Kupfer et al. [18] wird ein weiterer Parameter R vorgestellt, welcher im Vergleich zur Größe M über die Güte Q anstatt der Bandbreite B berechnet wird. Folgende Gleichung (43) zeigt die Berechnungsform. In selbiger Formel findet sich auch die daraus bestimmbare Dielektrizitätskonstante ε . Anhand dieser kann unter Bestimmung von R für Proben mit bekannter Feuchte die Regressionsgerade zur Messung der unbekannt Feuchte erstellt werden.

$$R = 2 * \frac{\frac{f_{r0} - f_r}{f_r}}{\frac{1}{Q_r} - \frac{1}{Q_{r0}}} = \frac{\varepsilon' - 1}{\varepsilon''} \quad (43)$$

Diese Methode wurde für eine Bodenprobe, welche von Cheng et al. [56] über einen Resonator gemessen wurde, analysiert. Aus der Literatur wurde das Diagramm der Resonanzkurven entnommen und die Resonanzfrequenzen (f_{r0} , f_r) und die Bandbreiten

(B_{r0} , B_r) herausgelesen. Daraus wurden nach Formel (39) die Güte Q_{r0} sowie Q_r berechnet. Das Ergebnis der Untersuchung ist, dass eine Auswertung auf diesem Weg für eine Bodenprobe nicht geeignet ist, da eine lineare Regressionsgerade ein geringes Bestimmtheitsmaß von 0,7978 aufweist.

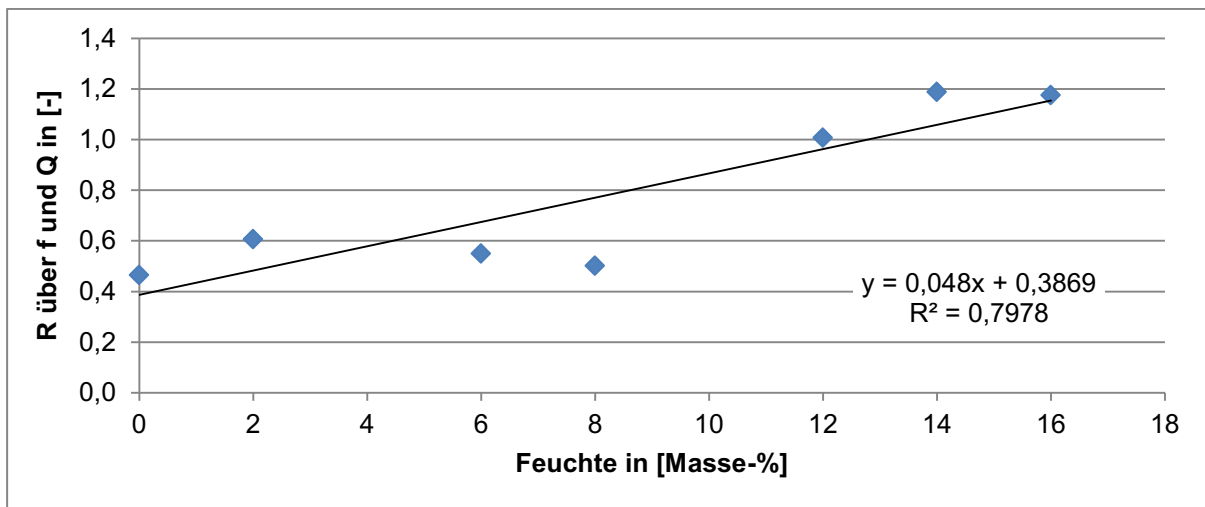


Abbildung 4-12: Parameter M in Abhängigkeit von der Feuchte für eine Resonator-Messung für eine Bodenprobe.

Des Weiteren wurde die Permittivität analog zu Methodik Nr. 1 berechnet. Die Berechnung von R nach Formel (43) wurde daraufhin durchgeführt. Es konnte festgestellt werden, dass die beiden Funktionen nicht übereinstimmen, aber einen ähnlichen Verlauf aufweisen (vgl. Abbildung 4-13). Außerdem kann beobachtet werden, dass eine Berechnung von R über ϵ' und ϵ'' zu einem höheren Bestimmtheitsmaß von 0,8663 führt. Im Gegensatz dazu wird die Fehlerwahrscheinlichkeit größer, da bereits ϵ berechnet wurde und R somit aus einer nicht gemessenen Größe bestimmt wird.

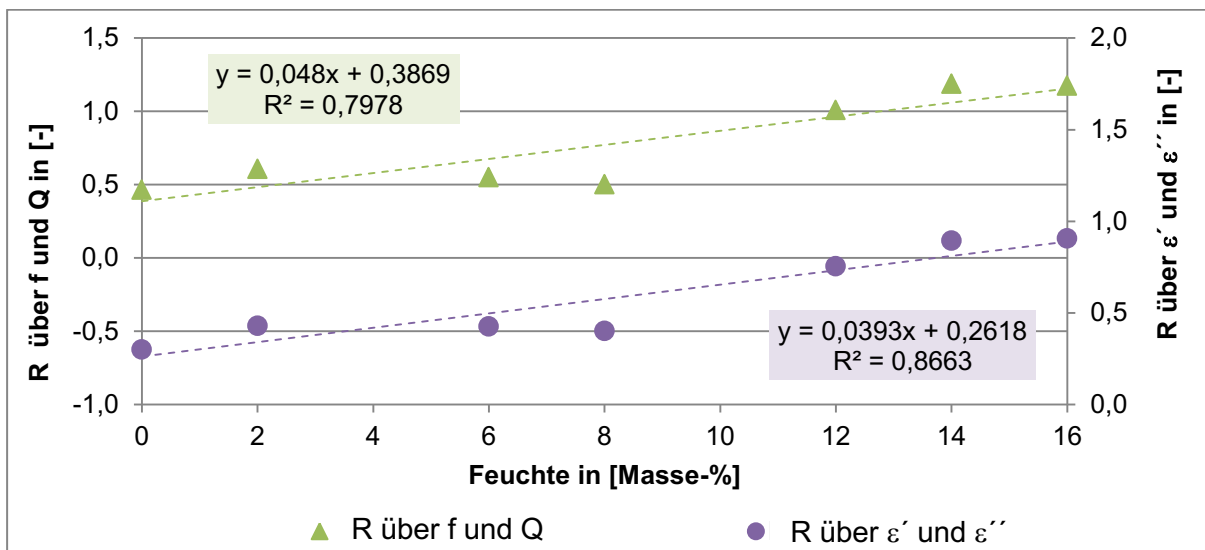


Abbildung 4-13: Vergleich der Bestimmung der Größe R aus f und Q sowie ϵ' und ϵ'' für eine Resonator-Messung von Bodenproben.

4.2.4 Methodik Nr. 7

Wie bereits bei Methodik Nr. 5 dargelegt, beschrieben Kupfer et al. [18], dass es einen dichteunabhängigen Verlauf für eine bestimmte Feuchte in einem Diagramm gibt, bei welchem die Differenz der Bandbreiten ΔB (in der Grafik ΔBW genannt) gegen die Differenz der Resonanzfrequenzen Δf (in der Grafik Δf_r genannt) aufgetragen wurde (siehe folgende Abbildung 4-14).

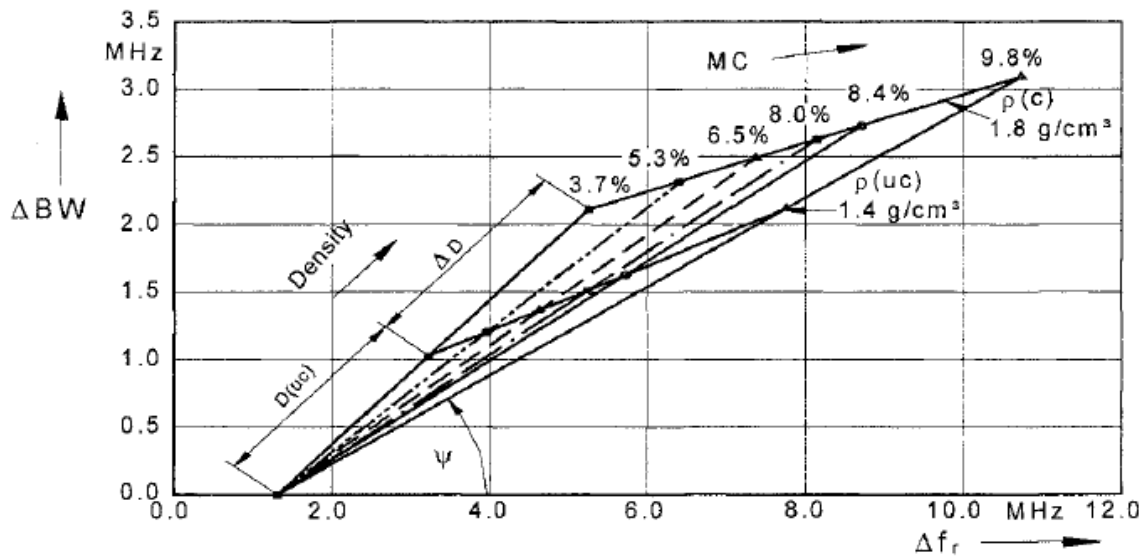


Abbildung 4-14: Das Auftragen der Differenz der Bandbreiten ΔB (ΔBW) gegen die Differenz der Resonanzfrequenzen Δf (Δf_r) bei gefülltem sowie leeren Resonator liefern Geraden, deren Steigungswinkel ψ von der Feuchte abhängen. [18]

Damit kann eine dichteunabhängige Funktion F nach Gleichung (44) gefunden werden, welche nur vom Steigungswinkel ψ der Gerade und damit von der Feuchte abhängt. Die Abkürzungen uc und c stehen jeweils für nicht komprimierte bzw. komprimierte Proben.

$$\cot \psi = \frac{\Delta f(uc)}{\Delta B(uc)} = \frac{\Delta f(c)}{\Delta B(c)} = F \quad (44)$$

Im Folgenden soll ein Beispiel präsentiert werden, bei welchem der Winkel bestimmt wird. Dazu wurde erneut die Daten für Weizen (Kocsis et al. [55]) und Böden (Cheng et al. [56]) herangezogen. Für Weizen ist die Funktion F in Abhängigkeit von der Feuchte in folgender Abbildung 4-15 gegeben. Daraus ist zu erkennen, dass eine Bestimmung auf diesem Weg möglich ist, wenn eine polynomische Funktion gewählt wird, weil diese ein höheres Bestimmtheitsmaß von 0,9911 besitzt als jene lineare Regressionsgerade mit 0,776. Zusammenfassend kann nun für die Weizenproben ein Gesamtresumé erfolgen. Unter Betrachtung aller Auswertemethoden kann gesagt werden, dass folgende Funktionen am besten zur Auswertung geeignet sind: ε'' (0,9914) < F (0,9910) < M (0,9893) < Winkel ψ (0,9883) < X_{10} (0,9862). Wenn nur lineare Funktionen gewertet werden, dann erfolgt die Reihung nach: X_{10} (0,9862) < X_9 (0,9835) < ζ (0,9825) < Δf (0,9825) < η (0,9614). Eine

analoge Reihung für alle polynomsichen Funktionen, ergibt: ε'' (0,9914) < F (0,9910) < M (0,9893) < Winkel ψ (0,9883) < X_5 (0,9848).

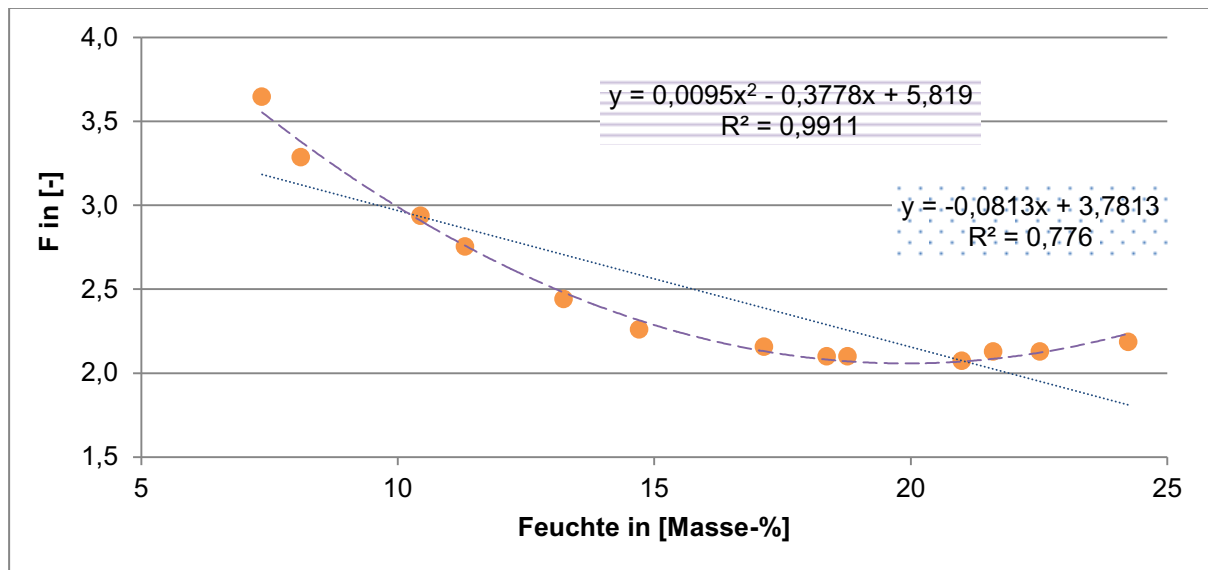


Abbildung 4-15: Bestimmung der Größe F über die Feuchte für Weizenproben bei der Resonator-Messung.

In Abbildung 4-15 ist die Auswertung für Boden-Proben ersichtlich. Die Regressionsgerade der Datenpunkte hat ein geringes Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,7034. Daraus lässt sich schließen, dass diese Auswertemethodik nicht geeignet ist.

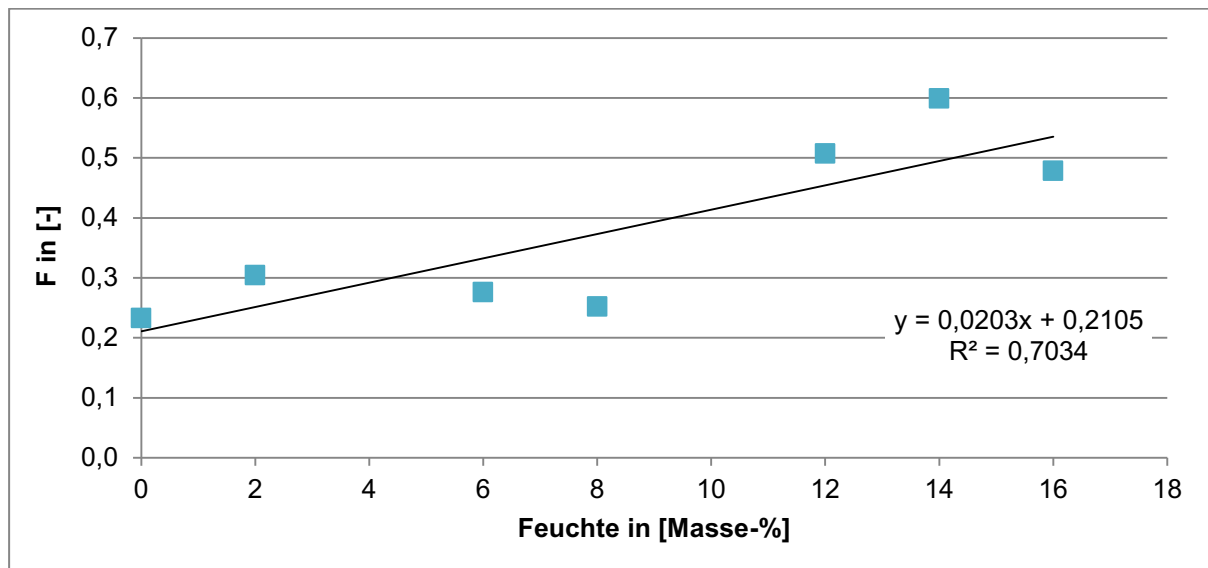


Abbildung 4-16: Auftragung von F gegen die Feuchte für Bodenproben bei der Resonator-Messung.

4.2.5 Methodik Nr. 8 (Eigenentwicklung)

Im Zuge der Ausarbeitungen konnte eine Methodik geschaffen werden, welche im Folgenden beschrieben wird. Es wurden erneut die Werte aus dem Werk von Cheng et al. [56] herangezogen. Da die Resonanzfrequenz f_r und der Wert des Parameters S_{11} (= Amplitudenwert der Resonanzkurve) für den leeren sowie befüllten Resonator gegeben

waren, wurden diese zur Auswertung herangezogen. Es konnte festgestellt werden, dass bei einer Auftragung der Differenz der Amplitudenwerte ΔS_{11} gegen die Differenz der Resonanzfrequenzen Δf (in beiden Fällen bezüglich des leeren Resonators) Geraden mit unterschiedlicher Steigung erhalten werden (vgl. Abbildung 4-17).

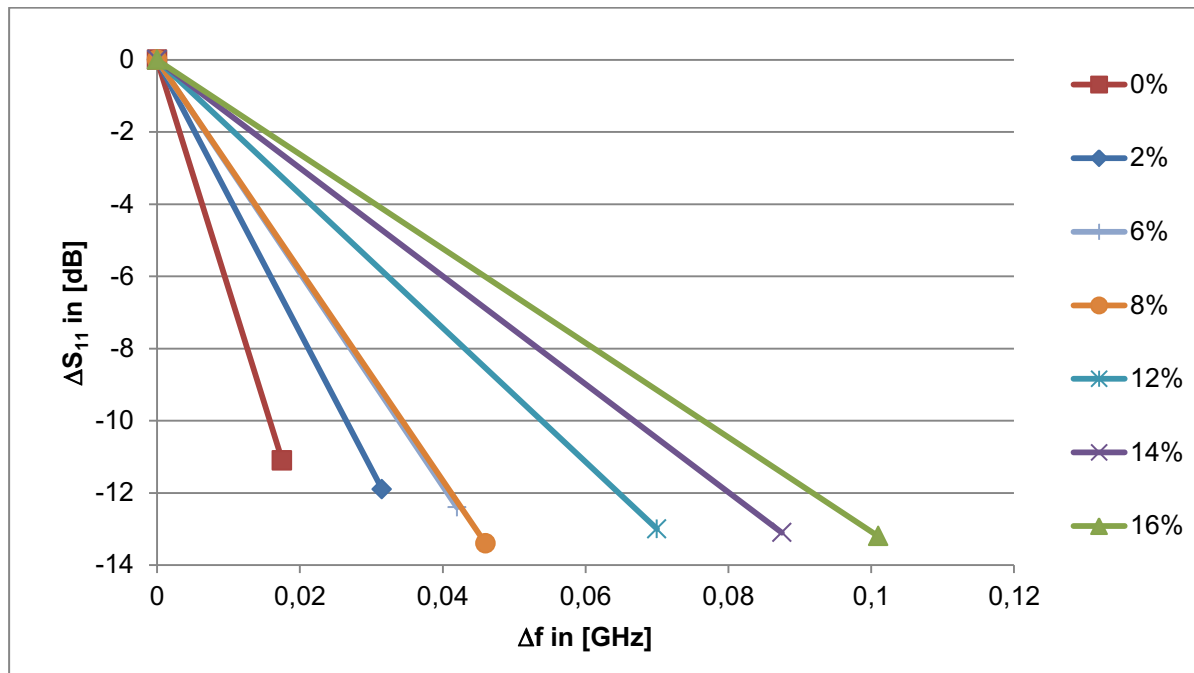


Abbildung 4-17: Auftragung der Differenz der Amplitudenwerte ΔS_{11} gegen die Differenz der Resonanzfrequenzen Δf für unterschiedliche Feuchte bei einer Resonator-Messung von Böden.

Anhand der Steigungen k konnte schließlich über den Arkustangens der Steigungswinkel γ berechnet und anschließend in einem Diagramm gegen die bekannte Feuchte aufgetragen werden. Dies ist in folgender Abbildung 4-18 ersichtlich. Mit einem hohen Bestimmtheitsmaß von 0,9507 ist diese Methode somit geeignet, um aus Messdaten mit bekannter Feuchte eine Kalibrationsgerade zu erstellen.

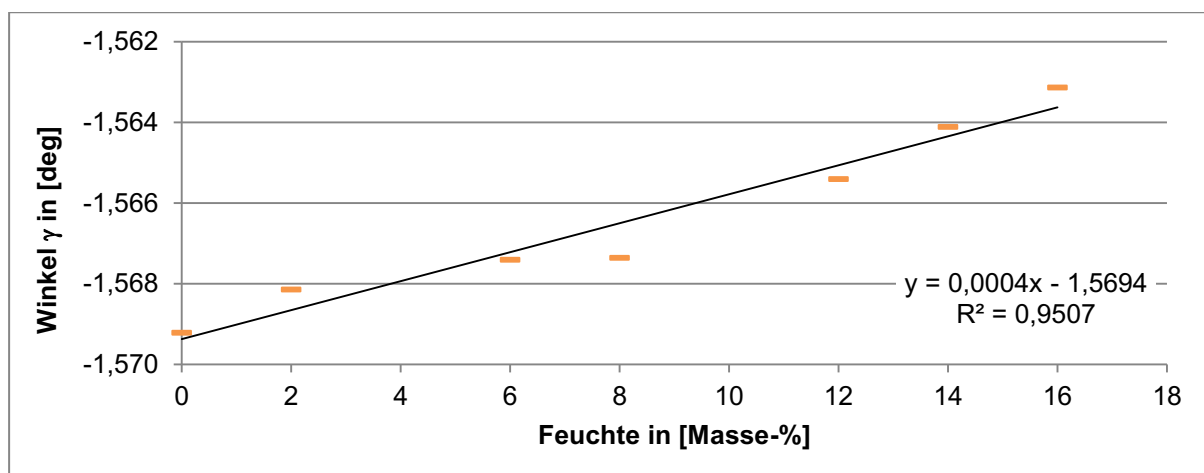


Abbildung 4-18: Auftragung des berechneten Steigungswinkels aus der Auftragung der Differenz der Amplitudenwerte ΔS_{11} gegen die Differenz der Resonanzfrequenzen Δf bei einer Resonator-Messung von Böden.

4.2.6 Methodik Nr. 9

Abschließend wird noch eine Resonator-Messung im Multifrequenzbereich vorgestellt und analysiert. Dazu wurde das Werk von Peters et al. [24] herangezogen, in welchem eine Multifrequenzmessung von Maisstärke präsentiert wurde. Anhand der Resonanzkurven für unterschiedliche Feuchte und Messfrequenzen, wurden die Resonanzfrequenzen und Bandbreiten sowie Q-Faktoren herausgelesen bzw. berechnet. Das Analyseergebnis ähnelt jenem von Methodik Nr. 4 aus der Reflexions-/Transmissionsmessung. Bei der Auftragung der berechneten Permittivitäten ϵ' und ϵ'' nach Methodik Nr. 4 kann wie in Abbildung 4-19 ersichtlich unterschiedliche Kalibrationsgeraden für die einzelnen Frequenzen beobachtet werden.

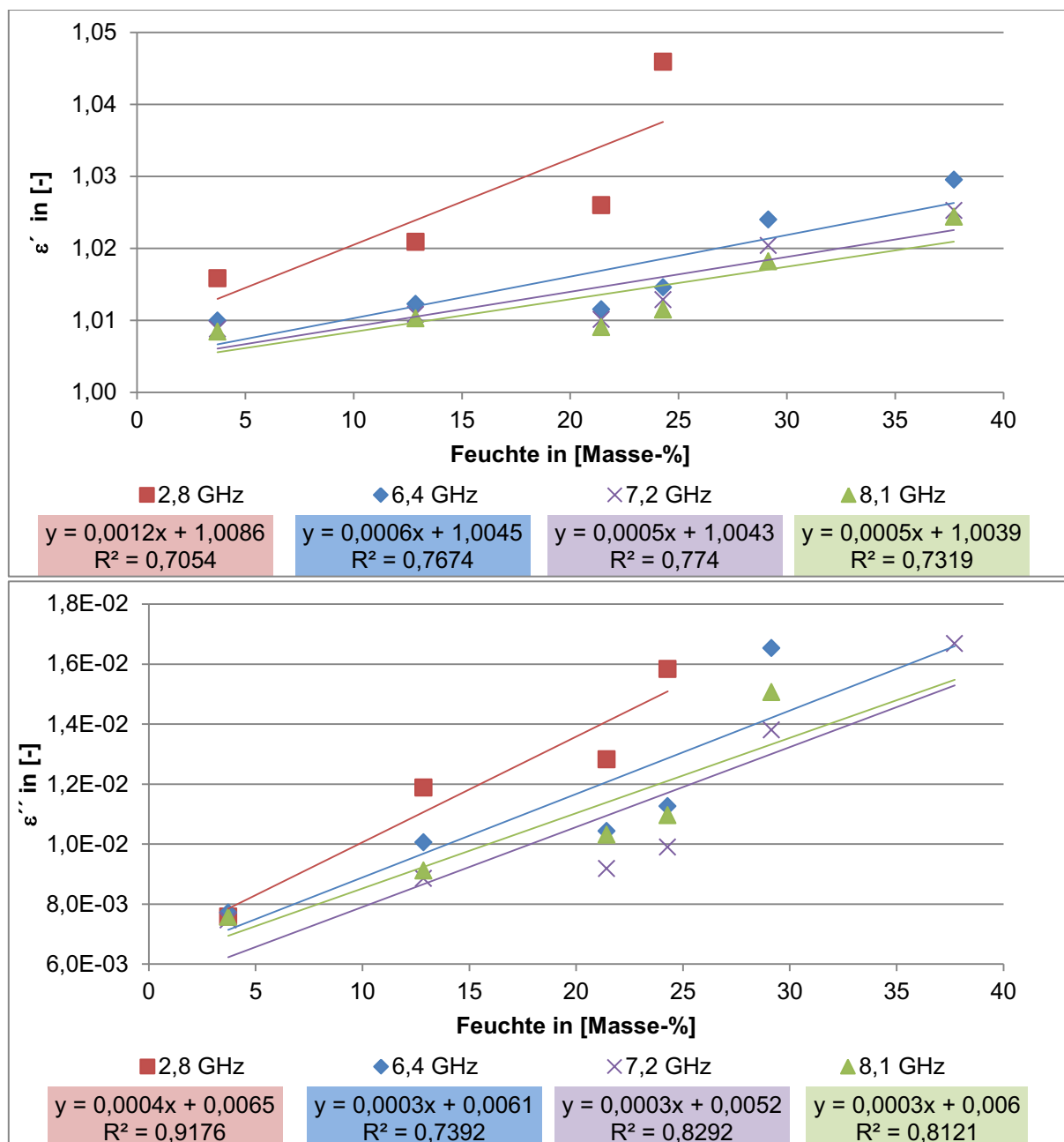


Abbildung 4-19: Auftragung des Real- und Imaginärteils der Permittivität gegen die Feuchte bei einer Resonator-Messung von Maisstärke.

Auch die Auftragungen der Größen M, F und R gegen die Feuchte sind frequenzabhängig, wie es in folgender Abbildung 4-20 zu sehen ist.

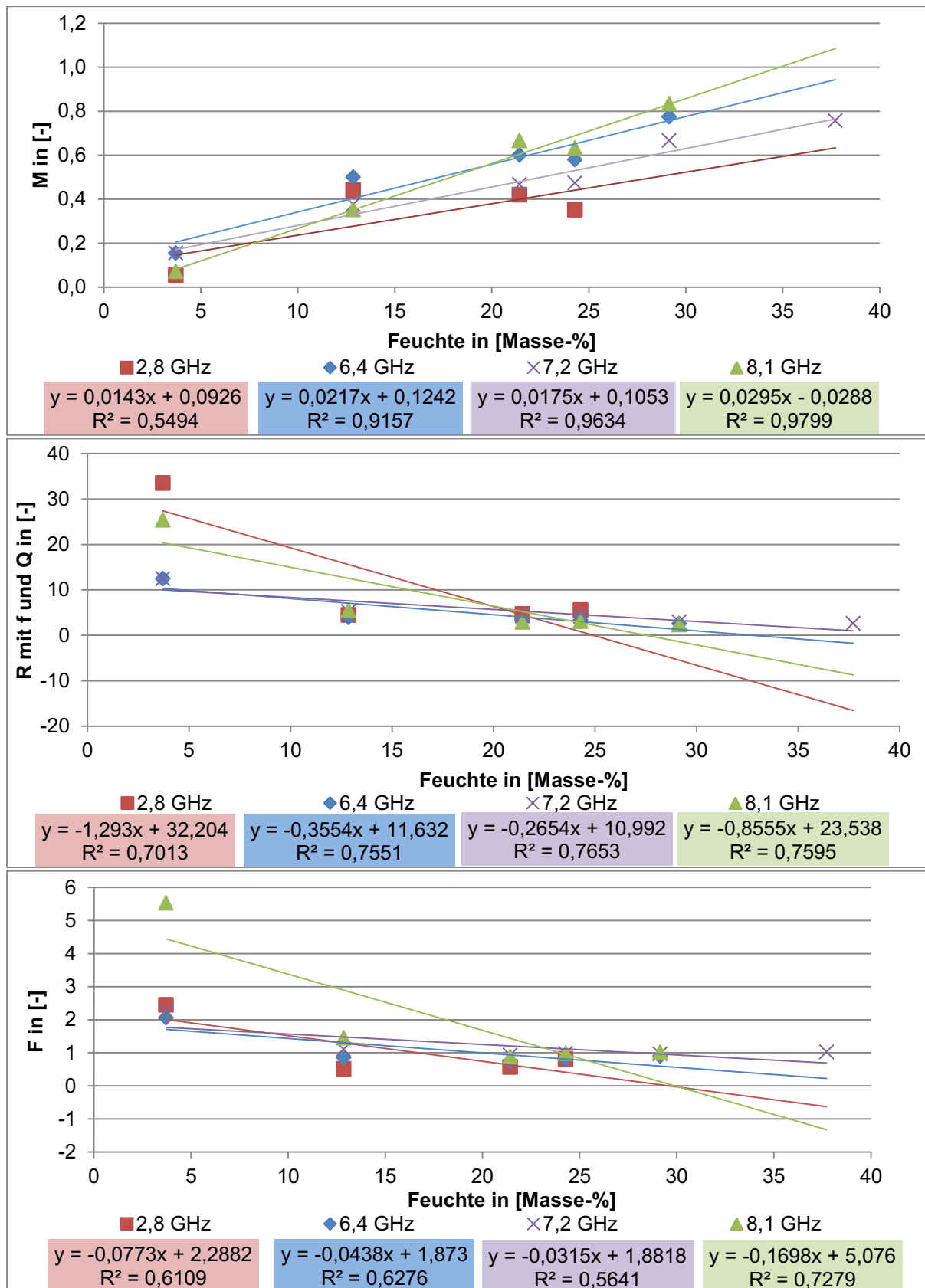


Abbildung 4-20: Auftragung der Größen M, R und F gegen die Feuchte bei einer Resonator-Messung von Maisstärke.

Wenn die Differenz der Bandbreiten ΔB durch die Differenz der Resonanzfrequenzen Δf (jeweils bezogen auf den leeren Resonator) dividiert und in einem Diagramm aufgetragen werden, kann ebenfalls keine frequenzunabhängige Regressionsgerade beobachtet werden (vgl. Abbildung 4-21).

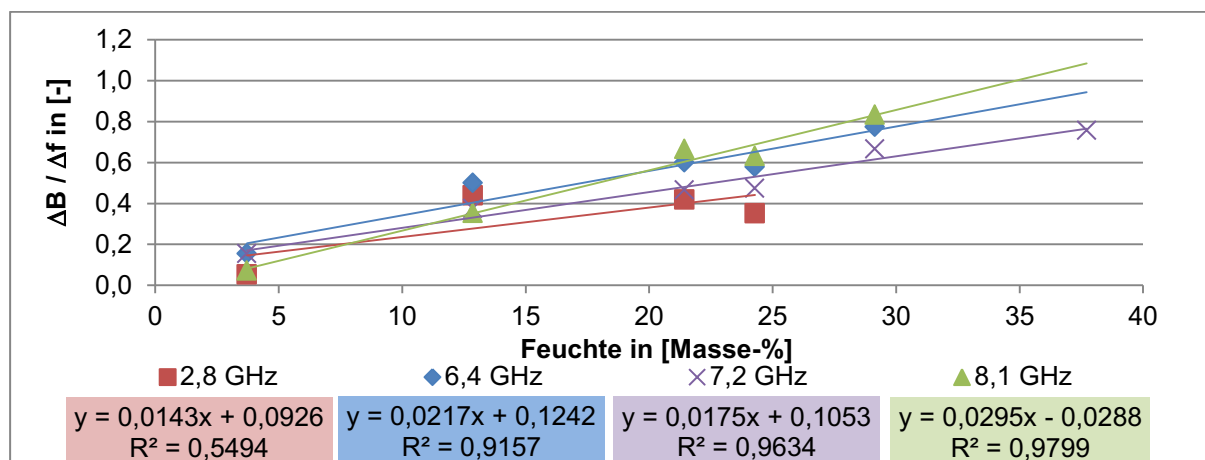


Abbildung 4-21: Auftragung des Verhältnisses aus der Differenz der Bandbreiten ΔB und der Differenz der Resonanzfrequenzen Δf gegen die Feuchte bei der Resonator-Messung von Maisstärke.

Dennoch können folgende Schlussfolgerungen anhand von Tabelle 4-2 gezogen werden:

- Die Messwerte bei 2,8 GHz besitzen bei den meisten Auswertemöglichkeiten die schlechtesten Bestimmtheitsgrade R^2 .
- Beim Vergleich zwischen den Auftragungen von ϵ' und ϵ'' , weist letztere höhere Bestimmtheitsgrade auf.
- Hinsichtlich der Funktionen M, R sowie F kann mittels M der höchste Bestimmtheitsgrad bei einer Messung mit 8,1 GHz festgestellt werden (0,9799).
- Die Verwendung der Größen F liefert die schlechteste Abhängigkeit von der Feuchte, da das Bestimmtheitsmaß am niedrigsten ist. Wobei eine Messung bei 8,1 GHz im Bereich von ϵ' (0,7 – 0,73) mit einem R^2 von 0,7279 liegt.
- Den höchsten Bestimmtheitsgrad weist eine Auftragung von $\Delta B / \Delta f$ oder M bei einer Frequenz von 8,1 GHz auf (0,9799).

Tabelle 4-2: Bestimmtheitsmaß für unterschiedliche Auswertemethoden bei der Multifrequenz-Resonator-Messung von Maisstärke.

f	Bestimmtheitsmaß R^2 bei der Auftragung von					
	$\Delta B / \Delta f$	ϵ'	ϵ''	M	R	F
2,8 GHz	0,5494	0,7054	0,9176	0,5494	0,7013	0,6109
6,4 GHz	0,9157	0,7674	0,7392	0,9157	0,7551	0,6276
7,2 GHz	0,9634	0,7740	0,8292	0,9634	0,7653	0,5641
8,1 GHz	0,9799	0,7319	0,8121	0,9799	0,7595	0,7279

Abschließend zeigt diese Analyse, dass durch das Verwenden von mehreren Frequenzen jene gefunden werden kann, welche die am meisten übereinstimmende Regressionsgerade liefern kann. Dennoch sollten alle Möglichkeiten untersucht werden, da die Qualität der Ergebnisse neben der Frequenz auch von der gewählten Methode abhängt.

5 Zusammenfassung und Anwendungsempfehlungen

Im Zuge der Arbeit wurde die Feuchtemessung unter Verwendung von elektromagnetischer Strahlung in Form von Mikrowellen untersucht. Dabei stehen mineralische Schüttgüter im Fokus, welche als fein- und grobkörnigen anorganischen Mineralien bestehen. Durch den möglichen Transport solcher Güter auf Förderbändern wird eine dynamische Betrachtung ebenfalls begutachtet. Der Einsatz von Mikrowellen als elektromagnetische Strahlung wird dabei untersucht, da deren Nutzung Vorteile bietet. Neben einer kontaktlosen Messung, wie sie bei transportierten Materialien von Bedeutung ist, und einer Unabhängigkeit bezüglich Salzgehalten im Wasser, üben diese darüber hinaus keinen Einfluss auf das zu untersuchende Gut aus.

Grundlage der elektromagnetischen Feuchtemessung sind die materialspezifischen Dielektrizitätskonstanten. „Dielektrika“ sind Stoffe, welche den elektrischen Strom aufgrund von fehlenden frei beweglichen elektrischen Ladungsträgern schlechter weiterleiten. Wasser wird zu diesen gezählt, auch wenn es durch gelöste Salze und Dissoziation Strom leitet. Dessen Molekül weist durch seine chemische Struktur einen permanenten elektrischen Dipol auf, wodurch dieser über das Feld der elektromagnetischen Welle beeinflussbar ist. Alle Dielektrika werden beim Anlegen eines externen elektrischen Feldes „polarisiert“. Wasser bildet durch seinen permanenten Dipol Ketten aus und verursacht dadurch eine Ladungstrennung der frei beweglichen Ladungsträger. Dadurch wird das elektrische Feld abgeschwächt. Als Maß der Verringerung dient die Dielektrizitätskonstante, welche sich aus der konstanten Dielektrizitätskonstante des Vakuums ϵ_0 und der stoffspezifischen Dielektrizitätskonstante ϵ zusammensetzt. Letztere besteht aus einem Real- und Imaginärteil, wobei der Realteil ϵ' das Maß für die Speicher-Fähigkeit elektrischer Energie und der Imaginärteil ϵ'' die Minderung der Energie des elektrischen Feldes widerspiegelt.

Im Vergleich zu den meisten anderen Dielektrika besitzt Wasser eine hohe Dielektrizitätskonstante, wobei ϵ' ab ca. 3 GHz abfällt und ϵ'' bei ungefähr 20 GHz seinen Höhepunkt erreicht. Dieser Unterschied in den Dielektrizitätskonstanten wird bei der elektromagnetischen Feuchtemessung ausgenutzt. Wenn die Feuchte in einem Material steigt, vergrößert sich auch dessen gesamte Dielektrizitätskonstante. Diese Änderung hängt in einem gewissen Ausmaß von der Feuchte ab und lässt somit Rückschlüsse auf die unbekannt Feuchte einer Probe zu.

Dazu werden drei unterschiedliche Herangehensweisen unterschieden: Reflexion, Transmission und Resonanz. In allen Fällen tritt die Materie mit elektromagnetischer Strahlung in Wechselwirkung. Bei Reflexion wird das Gut einseitig bestrahlt und anschließend die ausgehende mit der eingehenden Welle verglichen. Analog gilt dies für Transmissions-Messungen, hierbei wird aber das Material durchstrahlt. Bei beiden Arten wird die Welle durch die Substanz in ihrer Amplitude verkleinert und in ihrer Geschwindigkeit verringert. Als Maß gelten dabei die Amplitudendämpfung A und die Phasenverschiebung ϕ . Die Amplitudendämpfung lässt sich anhand der Verringerung der Spannung entweder als S-Parameter oder als Reflexions- bzw. Transmissionskoeffizienten feststellen. Über die

Messung beider Größen kann schließlich ε' sowie ε'' berechnet werden. Dabei gilt es unterschiedliche Messaufbauarten zu unterscheiden. Bei der Reflexion kann eine Messung als „Cut-Off“-Variante (Anlegen des Wellenleiters an die Probe) oder als „Free-Space“ (Wellen werden über den freien Raum zwischen Antenne und Material ausgesendet) unterschieden. Letztere Möglichkeit wird ebenfalls in den meisten Fällen bei der Transmissionsmessung angewendet. Es ist aber auch möglich eine berührungslose Kopplung über Einbringen einer Probe in einen Hohlleiter möglich. Bei Resonatoren wird die konstruktive Interferenz zwischen der emittierten und der reflektierten oder transmittierten Wellen begutachtet. Dabei werden Resonanzkurven erstellt, anhand welcher die Resonanzfrequenz f_r und die Bandbreite der Kurve B bestimmt werden. Bei der stärksten konstruktiven Interferenz besitzt die Resonanzkurve ihr Amplitudenmaximum, anhand dessen die Resonanzfrequenz f_r bestimmbar ist. Indem der Wert des Maximums um den Faktor $\sqrt{2}$ verringert wird, kann an dieser Stelle die Breite der Kurve als Bandbreite B ermittelt werden. Über diese beiden Parameter lässt sich nun analog zur Reflexion und Transmission die Dielektrizitätskonstante ε berechnen. Alle drei Verfahren besitzen unterschiedliche Vor- und Nachteile, beispielsweise die Eindringtiefe. Aus diesem Grund ist eine genaue Überlegung des zu wählenden Messprinzips essentiell.

Einflussfaktoren dielektrischer Materialien bei der Wechselwirkung mit Mikrowellenstrahlung

Da die Bestimmung der Feuchte über die dielektrischen Eigenschaften eines Materials erfolgt, weist diese wesentliche Einflussfaktoren auf. Der Einfluss der Feuchte auf die Dielektrizitätskonstante wird bei der Messung ausgenutzt und daher ist eine starke Abhängigkeit erwünscht. Als störende Größen gelten die Frequenz, die Schüttdichte, die Temperatur, Inhomogenitäten in der Materialzusammensetzung, die Ionenleitfähigkeit und die Bindungsart des Wassers. Im Zuge der Ausarbeitung konnte gezeigt werden, dass Schwankungen in der Frequenz das Messergebnis verfälschen. Des Weiteren sinkt die Eindringtiefe mit der Frequenz, was dazu führt, dass in einem höheren Frequenzbereich je nach Permittivität des zu untersuchten Materials nur Oberflächenfeuchtemessungen möglich sind. Die Dielektrizitätskonstante ist stark von der Temperatur abhängig. Infolgedessen muss entweder diese bei der Messung mitbestimmt und Kalibrationen mit unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt werden oder es muss eine spezifische Auswertemethodik angewendet werden. Die Schüttdichte übt ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse aus und verfälscht diese. Aus diesem Grund muss entweder die Dichte konstant gehalten werden, diese zusätzlich gemessen und bei der Kalibration berücksichtigt werden oder eine dichteunabhängige Auswertemethode gewählt werden. Als Beispiel für den Einfluss von Inhomogenitäten seien die unterschiedlich vorkommenden Eisenspezies in einem Grünmix zu nennen. Wüstit, Hämatit, Magnetit und Siderit weisen unterschiedliche Abhängigkeiten von der Frequenz und verschiedenen hohe Permittivitäten auf. Im Fall von Wüstit und Magnetit konnte gezeigt werden, dass in einem ungünstig gewählten Frequenzbereich die Permittivitäten jenen von Wasser sehr ähneln und daher zu Fehlmessungen führen könnten. Des Weiteren wird die Eindringtiefe von der Permittivität beeinflusst, wodurch diese bei einem steigenden Gehalt an Wüstit oder Magnetit verringert wird. Wüstit ist ein Zwischenprodukt bei der Reaktion von Eisenerzen und ist chemisch nicht

stabil, wodurch sein negativer Einfluss nur theoretisch begründet werden kann. Der Einfluss des Magnetits ist durch seine im Vergleich zur Gesamtmasse geringen Anteil in der Rezeptur ebenfalls vernachlässigbar. Somit könnten dennoch genaue Feuchtebestimmungen und Reflexionsmessungen mit höheren Eindringtiefen realisiert werden. Dies gilt, wenn sich die Zusammensetzung gering ändert. Es konnte bei Studien gezeigt werden, dass es zu Messabweichungen gekommen ist, wenn Erze unterschiedlicher Herkunft herangezogen wurden, da dessen Magnetitanteil unterschiedlich hoch war. Es wurde aber beschrieben, dass diese Abweichungen minimalisiert werden könnten, wenn zuvor neue Kalibrationsgeraden für die jeweiligen Erze ermittelt werden und automatische Anpassungen der Messung (Auswahl der geeigneten Kalibrationsgerade) angewendet werden würden. Im Zuge der Arbeit konnte weiters beobachtet werden, dass die Additive Kohle/Koks und Kalkstein keinen Einfluss auf die Messung ausüben. Im Zuge der Arbeit konnte festgestellt werden, dass im Frequenzbereich der Mikrowellenstrahlung ein Einfluss der Ionenleitfähigkeit nicht gegeben ist. Dies wurde in mehreren Literaturquellen bestätigt. Hinsichtlich der Bindung des Wassers gibt es ebenfalls Grenzen bezüglich der Feuchtemessung. Sobald Wasser gebunden im Gut vorliegt, ist dieses im Frequenzbereich von Mikrowellen nicht mehr „sichtbar“. Dies bedeutet, dass jener Anteil an Kapillar-, Hydrations-, Kristall oder Adsorptionswasser nicht als Feuchte detektiert werden kann. Bei Gütern, bei welchen die Körner eine große Oberfläche oder viele Poren aufweisen, könnte dies somit zu Fehlmessungen führen. In der Arbeit wurde eine Berechnung des Anteils an gebundenem Wasser für einen Grünmix bei 0,8 – 1 GHz durchgeführt. Das Ergebnis der Untersuchung war, dass der Anteil an gebundenem Wasser mit 1,06 – 1,24 ppm_v vernachlässigbar gering ist, da der Grünmix im Durchschnitt 4 Masse-% bzw. 3 Vol-% an Feuchte besitzt. Wasser kann sich auch an Additiven wie Kalk, Branntkalk und Kohle binden, wobei angenommen wird, dass die Menge an gebundenem Wasser ebenfalls vernachlässigbar gering ist. Darüber hinaus sind für die Messung die Einflüsse von Behältnissen, Transortbändern, Rohren und ähnlichem relevant. Bezug nehmend auf einen möglichen Unterschied bei Messungen im statischen und bewegten Zustand, konnte keine signifikante Abweichung festgestellt werden.

Auswertemethodik und Beispielmateriale

Die Auswertung der Feuchtemessung erfolgt bei Reflexion, Transmission und **Resonanz** ähnlich. Es müssen Kalibrationen mit Proben bekannter Feuchte durchgeführt werden. Dazu sind die jeweiligen gemessenen Parameter (\underline{A} , $\underline{\phi}$, \underline{f}_r , \underline{B}_r) oder berechneten Größen ($\underline{\epsilon}'$, $\underline{\epsilon}''$, \underline{Q} , $\underline{\Delta B}_r$ und $\underline{\Delta f}_r$ bezüglich des leeren Resonators) nötig. Die Schüttdichte und Temperatur sollte dabei vorzugsweise konstant gehalten werden. Nun können die genannten Größen gegen die Feuchte in einem Diagramm aufgetragen werden. Über Erstellung einer Regressionsgeraden sollte schließlich ein linearer oder auch nicht-linearer Zusammenhang festgestellt werden. Anhand diesem kann schließlich die unbekannte Feuchte desselben Gutes über Messung bzw. Berechnung der gleichen verwendeten Größe und Eintragung im Kalibrationsdiagramm bestimmt werden. Falls sich keine entsprechend gut übereinstimmende Regressionsgerade finden lässt, gibt es weitere Möglichkeiten. Bei zu stark schwankenden Schüttdichten oder Temperaturen kann beispielsweise das

„Argand-Diagramm“ erstellt werden. Bei diesem werden Proben vorbereitet, bei welchen die Feuchte und die Schüttdichte bzw. Temperatur bekannt sind. Über Auftragung von ε''/ρ gegen ε'/ρ in einem Diagramm sollte sich eine gerade Regressionsgerade finden lassen. Über deren Eigenschaften (Steigung, Schnittpunkt mit der x-Achse) lassen sich die stoffspezifischen Parameter a_f und b_0 finden, welche in einem weiteren Schritt in unterschiedlichen Formeln zu Größen „X“ berechnet werden. Diese können erneut in einem Kalibrationsdiagramm gegen die Feuchte aufgetragen werden und als Bestimmungsmöglichkeit für Proben unbekannter Feuchte dienen. Es wurden auch andere Größen (**X (Index 1 – 11), R, M, F**) berechnet, welche sich aus speziellen Verhältnissen von ε' und ε'' bzw. A und ϕ zusammensetzen, und für verschiedene Materialien in Diagrammen gegen die Feuchte aufgetragen werden.

Für jedes Material konnte anhand des Bestimmungsmaßes R^2 (Übereinstimmung der Datenpunkte mit der Regressionsgeraden) qualitative Aussagen getroffen werden, ob und welche Funktion am besten für das zu untersuchte Gut geeignet ist. Es konnte bei der Verwendung von zwei Frequenzen für die gleiche Probe (Beton) festgestellt werden, dass eine Auswertung über Verwendung der Messgrößen A und ϕ bei beiden Frequenzen in definierten Formeln nicht zielführend ist. Im Zuge der Ausarbeitung konnten selbstständig eine Auswertemethodik gefunden werden. Bei einer Auftragung von ϕ/m gegen A/m konnten horizontale Regressionslinien gefunden werden, welche feuchteabhängige Schnittpunkte mit der y-Achse besaßen. Diese Schnittpunkte wurden in einem separaten Diagramm gegen die Feuchte aufgetragen und es konnte auf diesem Weg eine Kalibrationsgerade mit einem hohen Bestimmtheitsmaß gefunden werden. Durch Vergleich der einzelnen Auswertemethoden konnte gesagt werden für welches Material welche Methodik am besten geeignet ist. Es wurden ebenfalls übergreifende Methoden untersucht. Beispielsweise konnte für Weizenproben bestimmt werden, dass eine Auftragung der Differenz der Bandbreiten oder des berechneten Wertes ε'' zu besseren Übereinstimmungsgraden R^2 führten als die Berechnung der Größen F oder M . Des Weiteren wurde auch im Falle des Resonators eine Multifrequenzmessung untersucht. Dessen Ergebnis war analog zu jenem der Reflexions-/ Transmissionsmessung. Jedoch konnte dabei beobachtet werden, dass durch diese Analyseart festgestellt werden konnte, welche Auswertemethode ($\Delta B/\Delta f$, ε' , ε'' , **M, R, F**) am besten bei welcher Frequenz durchgeführt werden kann. Schließlich konnte erneut im Zuge der Ausarbeitungen selbstständig eine Auswertemethodik für Resonator-Messungen gefunden werden. Bei dieser wurde die Differenz der Resonanzmaxima ΔS_{11} gegen die Differenz der Resonanzfrequenzen Δf_r in einem Diagramm aufgetragen. Dabei konnte beobachtet werden, dass die Regressionsgeraden für jede Feuchte einen unterschiedlichen Winkel aufweisen. Dieser wurde berechnet und in einem neuen Diagramm gegen die Feuchte aufgetragen. Es ließ sich eine Kalibrationsgerade mit einem hohen Bestimmtheitsmaß für dieses Beispiel (Bodenproben) finden. In Tabelle 5-1 auf Seite 69 wurden alle verwendeten Auswertungen samt deren Erfolgsquote (beurteilt nach den ersten 5 Größen in der R^2 -Reihung) zusammengefasst.

Anwendungsempfehlungen

Abschließend sollen anhand der Ergebnisse der Arbeit Anwendungsempfehlungen genannt werden. Die Dielektrizitätskonstante ist eine komplexe stoffspezifische Größe, welche viele Einflussfaktoren aufweist, welche sich auch gegenseitig beeinflussen können. Daher ist besonders im Vorhinein zu analysieren, ob das gegebene Material „geeignet“ ist. Dabei ist gemeint, dass die Zusammensetzung sowie der typische Wassergehalt bekannt sein sollten und inwieweit diese schwanken. Wie beschrieben, weisen manche Materialien eine hohe Schwankungsbreite bezüglich ε gegen die Frequenz auf. Daher ist auch zu prüfen, welcher Frequenzbereich am besten geeignet ist. Dies kann entweder über bereits veröffentlichte Verläufe der Dielektrizitätskonstanten über die Frequenz erfolgen, oder über Messungen mit mehreren Frequenzen und Vergleich der Bestimmtheitsmaße der einzelnen Regressionsgeraden. Der Messaufbau sollte dabei weitestgehend den realen Bedingungen entsprechen, da alle Materialien Einflüsse ausüben (vgl. Beförderungsband). Die einzelnen Auswertemethoden können sehr umfangreich und zeitintensiv sein. Aus diesem Grund sollten diese nur dann durchgeführt werden, wenn keine zufriedenstellenden Kalibrationsgeraden über Messgrößen möglich sind. Im Falle von der Kalibration abweichenden Referenzergebnissen, ist es allerdings empfehlenswert mehrere Größen miteinzubeziehen bzw. Analysen bezüglich unterschiedlicher Funktionen (X, F, etc.) wie in dieser Arbeit durchzuführen. Ansonsten kann bei unzureichenden Messergebnissen auch ein Vergleich zwischen den Auswertungen bei den unterschiedlichen Messarten Reflexion/Transmission und Resonanz stattfinden.

Tabelle 5-1: Vergleich der Auswertemethoden und deren Erfolg (Reflexion und Transmission = RT, Resonator = R).

Messart	Formel	Erfolgreich?	Messart	Formel	Erfolgreich?
RT	$MC_{A\phi} = a * \frac{\phi}{m_A} + b * \frac{A}{m_A} + c$	Ja (Bauxit mit ϕ/m)	RT, R	$X_{10} = \frac{\sqrt[3]{\epsilon' - 1}}{\sqrt{\epsilon''}}$	Ja (Kohle, Eisenerz)
RT	$X_1 = \frac{A}{\phi}$	Ja (Kohle)	RT, R	$X_{12} = \frac{\Delta\phi_2}{\Delta\phi_1} = \frac{\sqrt{\epsilon_2'} - 1}{\sqrt{\epsilon_1'} - 1} * \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$	Nein (Beton)
RT, R	$X_2 = \frac{\epsilon''}{\epsilon' - 1}$	Ja (NaCl)	RT, R	$\chi = \frac{\sqrt{\epsilon_2'} - 1}{\sqrt{\epsilon_1'} - 1}$	Nein (Beton)
RT, R	$X_3 = \frac{\tan \delta}{\rho} = \frac{a_f * b_0 * \tan \delta}{a_f * \epsilon' - \epsilon''}$	Ja (Soja)	RT, R	$\eta = \frac{\sqrt{\epsilon'}}{(\sqrt{\epsilon'} - 1)}$	Ja (Kohle)
RT, R	$X_4 = \sqrt{X_3}$	Ja (Soja)	RT, R	$\zeta = \frac{(\sqrt{\epsilon'} + 1)}{\sqrt{\epsilon'}}$	Ja (Kohle, Eisenerz)
RT, R	$X_5 = \sqrt{\tan \delta}$	Ja (NaCl)	R	$M = \frac{B_r - B_{r0}}{f_{r0} - f_r} = \frac{\Delta B}{\Delta f}$	Ja (Weizen)
RT, R	$X_6 = \frac{\sqrt{\epsilon''}}{\sqrt{\epsilon' - 1}}$	Ja (NaCl)	R	$R = 2 * \frac{f_{r0} - f_r}{f_r} = \frac{\epsilon_r' - 1}{\epsilon_r''}$	Ja (Boden)
RT, R	$X_7 = \frac{\sqrt{\epsilon''}}{\sqrt[3]{\epsilon' - 1}}$	Ja (Eisenerz)	R	$\cot \psi = \frac{\Delta f(uc)}{\Delta B(uc)} = \frac{\Delta f(c)}{\Delta B(c)} = F(MC)$	Ja (Weizen) Nein (Boden)
RT, R	$X_8 = \frac{\epsilon''}{\sqrt{\epsilon' - 1}}$	Ja (NaCl, Eisenerz)	RT	$\tan \psi = \frac{A(uc)}{\phi(uc)} = \frac{A(c)}{\phi(c)} = F(MC)$	Nicht analysiert
RT, R	$X_9 = \frac{\phi}{A} = \frac{\epsilon' - 1}{\epsilon''} * \frac{2 * \sqrt{\epsilon'}}{1 + \sqrt{\epsilon'}}$	Ja (Weizen)	RT	$X_{11} = \frac{\Delta A(\omega)}{\Delta \phi(\omega)}$	Nicht analysiert

6 Verzeichnisse

6.1 Literatur

- [1] Wagner, J. (Hrsg.): Physik: Für Wissenschaftler und Ingenieure, 7. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2014.
- [2] Nyfors, E.: Industrial Microwave Sensors - A Review, Subsurface Sensing Technologies and Applications 1 (2000), Nr. 1, 23–43.
- [3] Rezaei, M.; Ebrahimi, E.; Naseh, S.; Mohajerpour, M.: A new 1.4-GHz soil moisture sensor, Measurement 45 (2012), Nr. 7, S. 1723 - 1728.
- [4] Gauckler, J.; Conder, K.: Ceramics II: Skript zur Vorlesung, Skriptum, Zürich, ETH
- [5] Nichtleiter, <https://www.chemie.de/lexikon/Nichtleiter.html> (01.04.2023).
- [6] Hippel, A. von: Dielectrics and Waves, 2. Aufl., Boston, London: Artech House 1994.
- [7] Hübner, C.; Kaatze, U.: Electromagnetic Moisture Measurement: Principles and Applications, Mannheim, Göttingen: Universitätsverlag Göttingen 2016.
- [8] Momber, A.; Schulz, R. R.: Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton: Bearbeitung - Eigenschaften - Prüfung, Bauhandbuch, Basel: Birkhäuser Verlag 2006.
- [9] Trabelsi, S.; Kraszewski, A. W.; Nelson, S. O.: A microwave method for on-line determination of bulk density and moisture content of particulate materials, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement 47 (1998), Nr. 1, S. 127 - 132.
- [10] Nelson, S. O.; Trabelsi, S.: Principles for microwave moisture and density measurement in grain and seed, The journal of microwave power and electromagnetic energy 39 (2004), no. 2, 107–117.
- [11] Mohan, R. R.; Paul, B.; Mridula, S.; Mohanan, P.: Measurement of Soil Moisture Content at Microwave Frequencies, Procedia Computer Science 46 (2015), S. 1238 - 1245.
- [12] Kraszewski, A.: Microwave Aquametry: An Effective Tool for Nondestructive Moisture Sensing, Subsurface Sensing Technologies and Applications 2 (2001), Nr. 4.
- [13] Anritsu Company: Understanding Vector Network Analysis: Product Guide 2017.
- [14] Magdowski, M.: Reflexionsfaktor, Transmissionsfaktor und Streuparameter an einem Impedanzsprung 2014.
- [15] Keller, R. B.: Design for Electromagnetic Compatibility - In a Nutshell: Theory and Practice, Cham: Springer International Publishing 2023.
- [16] Černý, R.: Time-domain reflectometry method and its application for measuring moisture content in porous materials: A review, Measurement 42 (2009), S. 329 - 336.
- [17] Berthold Technologies GmbH & Co KG: Betriebsanleitung Konzentrations- / Feuchte-Messsysteme MicroPolar 2 (++) LB 567, Bad Wildbad 2018.
- [18] Kupfer, K. (Hrsg.): Electromagnetic aquametry: Electromagnetic wave interaction with water and moist substances, Berlin: Springer 2005.
- [19] Kraszewski, A. W.; Nelson, S. O.: Microwave resonator for sensing moisture content and mass of single wheat kernels, Canadian Agricultural Engineering 36 (1994), Nr. 4, S. 231 - 238.
- [20] Okamura, S.; Miyagaid, S.; Ma, Z.: Accurate Resonance Frequency Detection in a Microwave Moisture Measurement, Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy 33 (1998), Nr. 3, S. 143 - 150.

- [21] Knöchel, R.; Daschner, F.; Taute, W.: Mikrowellen-Sensor zur präzisen Feuchtemessung an Bauteilen und Baustoffen, DGZfP-Berichtsband, Berlin 1999.
- [22] WORK Microwave GmbH: Broschüre Resonator WORK Microwave 2019.
- [23] WORK Microwave GmbH: Sensoren mit Mikrowellenresonatoren zur Feuchte- oder Massebestimmung 2019.
- [24] Peters, J.; Taute, W.; Bartscher, K.; Döscher, C.; Höft, M.; Knöchel, R.; Breitzkreutz, J.: Design, development and method validation of a novel multi-resonance microwave sensor for moisture measurement, *Analytica chimica acta* 961 (2017), S. 119 - 127.
- [25] Scantech International Pty Ltd: TBM210/TBM230 TBM210/TBM230 MK2 Through Belt Moisture Monitor: Operation & Maintenance Manual, 11. Aufl., Camden Park, Australia 2020.
- [26] Qin, T.: Measurement and Application of VNA, *Highlights in Science, Engineering and Technology* (2022), Nr. 27, S. 651 - 661.
- [27] Tektronix: Introduction to VNA Basics: PRIMER 2017.
- [28] Oke, A. B.; Baik, O.-D.: Role of moisture content, temperature, and frequency on dielectric behaviour of red lentil and Kabuli chickpea in relation to radio frequency heating, *Applied Food Research* 2 (2022), Nr. 1.
- [29] Brodie, G.; Jacob, M. V.; Farrel, P.: Microwave and radio-frequency technologies in agriculture: An introduction for agriculturalists and engineers, Berlin: De Gruyter Open Ltd 2015.
- [30] University of Cambridge: Effect of temperature on the dielectric constant, <https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/dielectrics/temperature.php> (04.06.2023).
- [31] Kraszewski, A. W.; Trabelsi, S.; Nelson, S. O.: Comparison of Density-independent Expressions for Moisture Content Determination in Wheat at Microwave Frequencies, *Journal of Agricultural Engineering Research* (1998), Nr. 71, S. 227 - 237.
- [32] Hotta, M.; Hayashi, M.; Nagata, K.: Complex Permittivity and Permeability of α -Fe₂O₃ and Fe_{1-x}O Powders in the Microwave Frequency Range between 0.2 and 13.5 GHz, *ISIJ International* 50 (2010), Nr. 10, S. 1514 - 1516.
- [33] Zou, Z.; Xuan, A. G.; Yan, Z. G.; Wu, Y. X.; Li, N.: Preparation of Fe₃O₄ particles from copper/iron ore cinder and their microwave absorption properties, *Chemical Engineering Science* 65 (2010), Nr. 1, S. 160 - 164.
- [34] Church, R. H.; Webb, W. E.; Salsman, J. B.: Dielectric Properties of Low-Loss Minerals, REPORT OF INVESTIGATIONS 1988.
- [35] Or, D.; Wraith, J. M.: Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: A physical model, *WATER RESOURCES RESEARCH* 35 (1999), Nr. 2, S. 371 - 383.
- [36] Weiß, C.: Stoffbilanzen und Stoffeigenschaften, Vorlesungsskriptum, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Verfahrenstechnik des industriellen Umweltschutzes 2016.
- [37] Kon, S.; Horibe, M.; Kato, Y.: Dynamic measurements of moisture content using microwave signal and its verification, in: 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016), Ottawa, ON, Canada, 10. - 15.07.2016, IEEE, S. 1 - 2.
- [38] McKeown, M. S.; Trabelsi, S.; Nelson, S. O.; Tollner, E. W.: Microwave sensing of moisture in flowing biomass pellets, *Biosystems Engineering* 155 (2017), S. 152 - 160.
- [39] O'Dea, D.; McGown, G.; Gu, N. (Hrsg.): Evaluation of the low frequency microwave (LFM) moisture analyser for sinter plants: China National Ironmaking Conference, Ningbo 2008.

- [40] Liu, H.; Tan, H.; Hu, H.; Xiong, X.; Luo, Z.; Niu, Y.: An Experimental Study on the Measurement of Moisture Content in Coal with Microwaves: Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, *Energy Sources* (2014), Nr. 36, S. 2707 - 2714.
- [41] Kamijo, T.; Chiba, M.: Microwave properties of rock salt and limestone for detection of ultra-high energy neutrinos, in: Gorham, P. W. (Hrsg.): *Particle Astrophysics Instrumentation, Astronomical Telescopes and Instrumentation*, Waikoloa, Hawaii, United States, 22.08.2002, SPIE, S. 151.
- [42] Zhul, J. D.; Chenl, Z. P.; He, C. J.; 2, Xul, E. D. (Hrsg.): A moisture detection system of iron ore concrete: Fifth Asia International Symposium on Mechatronics, Guilin, China, 07. - 10.10. 2015.
- [43] Miljak, D. G.; Bennett, D.; Kazzaz, T.; Cutmore, N. G. (Hrsg.): *On-Line Microwave Moisture Measurement of Iron Ore and Mineral Concentrates in Conveyor Applications: Technology Conference*, Sorrento, Italy, 24. - 27.04. 2006.
- [44] Indra, W. A.; Azahar, A. H.; Manap, M.; Alsayaydeh, J. A. J.; Irianto, I.: On-Line Microwave Moisture Technique Performance of Ferronickel, *INTERNATIONAL JOURNAL OF INTEGRATED ENGINEERING* 1 (2019), Nr. 3, S. 216 - 222.
- [45] Cutmore, N. G.; Eberhardt, J. E.; Sowerby, B. D.; Watt, J. S. (Hrsg.): *On-line measurement of composition for the Australian mineral and energy industries: Technology Conference*, Brussels, Belgium, 04. - 06.06. 1996.
- [46] Viana, S. A. A.: Microwave-based Moisture Measurement of Bauxite Ore on Conveyor Belts, <https://www.e-mj.com/features/microwave-based-moisture-measurement-of-bauxite-ore-on-conveyor-belts/> (11.10.2023).
- [47] Ponte, D. G.; Prieto, I. F.; Viar, P. F.; Luengo, J. C. G.: Determination of moisture content in power station coal using microwaves, *Fuel* 75 (1996), Nr. 2, S. 133 - 138.
- [48] VEGA Grieshaber KG: Dielektrizitätszahl-Liste, https://www.vega.com/-/media/pdf-files/dielektrizitaetszahl-liste_de.pdf
- [49] Liu, C.; Zhang, L.; Peng, J.; Qu, W.; Liu, B.; Xia, H.; Zhou, J.: Dielectric Properties and Microwave Heating Characteristics of Sodium Chloride at 2.45 GHz, *High Temperature Materials and Processes* 32 (2013), Nr. 6, S. 587 - 596.
- [50] Das, P.; Ahmad, Z.; Singh, H. N.; Prasad, A.: Microwave density-independent permittivity functions as soybean seeds' moisture calibrators: A new approach, *Agric Eng Int: CIGR Journal* 12 (2010), Nr. 3, 107 - 114.
- [51] Pinto, E. S.; Santos, G. A.; Magalhaes, P. H. V.; Segundo, A. K. R.: A Novel Two Degrees of Freedom System for Measuring Iron Ore Water Content on a Conveyor Belt, *IEEE Sensors Journal* 21 (2021), Nr. 14, S. 16291 - 16300.
- [52] Lage, V. N.; Segundo, A. K. R.; Barsante e Pinto, T. V.; Da Silva, C. C. A. F.; Pinto, E. S.; Silva, M. E. H.; Da Silva, S. A. L.; De Barros Monteiro, P. M.: Bench System for Iron Ore Moisture Measurement, in: 2018 12th International Conference on Sensing Technology (ICST), Limerick, 04. - 06. 12.2018, IEEE, S. 139 - 142.
- [53] Xiaohua, J.; Mohammad, A.: Simple empirical formulas to estimate the dielectric constant and conductivity of concrete, *Microwave and Optical Technology Letters* 61 (2019), Nr. 2, S. 386 - 390.
- [54] Olkkonen, M.-K.; Mikhnev, V.; Huuskonen, E. (Hrsg.): RF moisture measurement of concrete with a resonator sensor: 22nd Int. Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", Sevastopol, Crimea, Ukraine, 10. - 14.09. 2012.

- [55] Kocsis, L.; Schlemm, U.; Richter, H.; Mellmann, J.; Farkas, I. (Hrsg.): On-line microwave measurement of the moisture content of wheat: Proceedings of the 17th World Congress, Seoul, Korea, 6. - 11.07. 2008.
- [56] Cheng, W.-C.; Sun, J.-S.; Chen, G.-Y.; Liao, C.-F.; Cheng, K.; Cheng, C.-H. (Hrsg.): A New Type 3D Printing Microwave Resonant Cavity for Materials Moisture Sensing: 2020 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C), Taichung, Taiwan., 13. - 16.11. 2020, IEEE
- [57] Griesser, A.: Einfluss der Mischgutfeuchte, der Korngrößenverteilung und weiteren agglomerationsrelevanten Korneigenschaften von Sintereinsatzmischungen auf den Einfluss der Mischgutfeuchte, der Korngrößenverteilung und weiteren agglomerationsrelevanten Korneigenschaften von Sintereinsatzmischungen auf den Druckverlust über die Schüttungen und die Sinterleistung, Masterarbeit, Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Eisen- und Stahlmetallurgie
- [58] Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung: GESTIS-Stoffdatenbank, <https://gestis.dguv.de/> (22.07.2023).

6.2 Formelzeichen

Tabelle 6-1: Formelzeichen und deren Bedeutung samt Einheit.

Symbol	Bezeichnung	Einheit
f oder ν	Frequenz	Hz
λ	Wellenlänge (Index 0 ... der eingesetzten Frequenz)	m
d	Verlustfaktor	-
δ	Verlustwinkel	-
ν_w	Relaxationsfrequenz (Index w = Wasser)	Hz
τ_w	Relaxationszeit (Index w = Wasser)	s
A	Amplitudendämpfung	dB
ϕ	Phasenverschiebung	deg
ϵ_r	Relative Dielektrizitätskonstante ¹	-
ϵ_r'	Realanteil Relative Dielektrizitätskonstante	-
ϵ_r''	Imaginäranteil Relative Dielektrizitätskonstante	-
$\epsilon(0)$	Statische Dielektrizitätskonstante	-
$\epsilon(\infty)$	Dielektrizitätskonstante bei hohen Frequenzen	-
ω	Kreisfrequenz	Hz
f_r	Resonanzfrequenz gefüllter Resonator	Hz
f_{r0}	Resonanzfrequenz leerer Resonator	Hz
Δf	Differenz der Resonanzfrequenz des leeren und des befüllten Resonators	Hz
f_1 bzw. f_2	Frequenzen bei den beiden Halbwertswerten (Maximalwert Resonanzkurve dividiert durch den Faktor $\sqrt{2}$)	Hz
B_r	Bandbreite der Resonanzkurve (beim Halbwertswert) des leeren Resonators	Hz
B_{r0}	Bandbreite der Resonanzkurve (beim Halbwertswert) des mit Probe befüllten Resonators	Hz
ΔB	Differenz der Bandbreite des befüllten und des leeren Resonators	Hz
Q_{r0}	Güte des leeren Resonators	-
Q_r	Güte des mit Probe befüllten Resonators	-
E_i^j	Elektrisches Feld (Index i oder hochgestelltes j ... eingehend, r ... reflektiert, t ... transmittiert)	V m ⁻¹
T	Temperatur	°C
d	Probendicke	m
ρ	Schüttdichte	kg m ⁻³
Γ , r, R	Reflexionskoeffizient oder -faktor	-
τ , D	Transmissionskoeffizient oder -faktor	-
α	Dämpfungskonstante	dB m ⁻¹
β	Phasenkonstante (Index 0 ... der eingesetzten Frequenz)	deg m ⁻¹
n	Ganzzahliges Vielfachen	-
S_{XY}	S-Parameter (Index XY: 11 ... Vorwärts-Reflexion, 22 ... Rückwärts-Reflexion, 21 ... Vorwärts-Transmission, 12 ... Rückwärts-Transmission)	-
V_g^k (oder U)	Spannung (Index g: 0 ... verwendetes Signal, ref ... Referenz-Signal, hochgestellter Index k: - ... reflektiertes Signal, + ... ausgehendes Signal)	V

¹ ϵ_r bzw. ϵ_r' und ϵ_r'' wird in der vereinfachten Schreibweise nur mit ϵ bzw. ϵ' und ϵ'' bezeichnet.

I	Strom	A
a_A, b_B	Amplituden der Wellen (a .. einende Welle, b ausgehende Welle, Index A bzw. B: 1 ... am Port 1, 2 ... am Port 2)	V oder A
C	Kapazität	F
L	Induktivität	H
R	Ohm'scher Widerstand	Ω
Z_z	Impedanz oder Wellenwiderstand eines Materials (Index z: 0 ... im freien Raum)	Ω
c	Lichtgeschwindigkeit	$m s^{-1}$
P	Polarisation	$C m^{-2}$
$\Delta H^\#$	eine zu überwindende Energiebarriere	J
θ_{dipole}	Rotationswinkel des Dipols	deg
$\Delta\theta$	Unterschied des Rotationswinkel des Dipols	deg
d_p	Eindringtiefe der elektromagnetischen Strahlung	m
σ	Elektrische Leitfähigkeit	$S m^{-1}$
$\delta\nu_r$	Relaxationsfrequenzverschiebung	Hz
M_{bw}	Menge an gebundenem Wasser	ppmv
$x(T)$	Temperaturabhängige Schichtdicke des gebundenen Wassers	Å
A_S	Massespezifischen Materialoberfläche	$m^2 kg^{-1}$
ρ_b	Schüttdichte	$kg m^{-3}$
k	Boltzmannkonstante	$J K^{-1}$
r	Radius eines gebundene Wassermoleküls	Å
f^*	„cut-off“ Frequenz	Hz
$MC_{A\phi}$	Feuchteabhängiger Parameter	$deg m^2 kg^{-1}$
m_A	Flächengewicht	$kg m^{-2}$
m	Masse	kg
R^2	Bestimmtheitsmaß einer Regressionsgeraden	-
a_f	Steigung der Gerade beim Argand-Diagramm	-
b_0	Schnittpunkt mit der x-Achse beim Argand-Diagramm	$m kg^{-3}$
X_1 als A/ϕ	Feuchteabhängiger Parameter	$dB deg^{-1}$
X_1	Feuchteabhängiger Parameter	-
X_2	Feuchteabhängiger Parameter	-
X_3 über Argand	Feuchteabhängiger Parameter	$m kg^{-3}$
X_3	Feuchteabhängiger Parameter	-
X_4 über Argand	Feuchteabhängiger Parameter	$m^{0,5} kg^{-3,5}$
X_4	Feuchteabhängiger Parameter	-
X_5	Feuchteabhängiger Parameter	-
X_6	Feuchteabhängiger Parameter	-
X_7	Feuchteabhängiger Parameter	-
X_8	Feuchteabhängiger Parameter	-
X_9 als ϕ/A	Feuchteabhängiger Parameter	$deg dB^{-1}$
X_9	Feuchteabhängiger Parameter	-
X_{10}	Feuchteabhängiger Parameter	-
F bzw. $\tan \psi$	Feuchteabhängiger Parameter anhand der Steigung ψ der Geraden in einem A zu ϕ -Diagramm	-
X_{11}	Feuchteabhängiger Parameter	$dB deg^{-1}$

X_{12}	Feuchteabhängiger Parameter	-
χ	Feuchteabhängiger Parameter	-
η	Feuchteabhängiger Parameter	-
ζ	Feuchteabhängiger Parameter	-
M	Feuchteabhängiger Parameter	-
R über f und Q	Feuchteabhängiger Parameter	-
R über ε' und ε''	Feuchteabhängiger Parameter	-
F bzw. cot ψ	Feuchteabhängiger Parameter in Zusammenhang mit der Steigung ψ der Geraden in einem ΔB zu Δf Diagramm	-
ΔS_{11}	Differenz der S_{11} -Parameter eines befüllten und leeren Resonators	dB
γ	Winkel der Geraden in einem ΔS_{11} zu Δf Diagramm bei einer Resonatormessung	deg
ΔT	Temperaturdifferenz	°C
c	Konzentration	mol L ⁻¹
K	Korngrößenabhängiger Parameter des RRSB-Netzes	-
S_V	Volumenspezifische Oberfläche	m ² m ⁻³
d'	Schnittpunkt der Geraden mit der 63,2 % - Linie im RRSB-Netz	m
f	Formfaktor	-
ρ_{mix}	Rohdichte einer Mischung	kg m ⁻³
w_i	Massenanteil der Komponente i	Masse-%
ρ_i	Dichte der Komponente i	kg m ⁻³
S_M	Massespezifische Oberfläche	m ² kg ⁻¹

Anhang

I. Weiterführende Informationen zur experimentelle Untersuchung über die Ionenleitfähigkeit

Der Imaginärteil ε'' gilt nach Kupfer et al. [18] als Maß für den dielektrischen Verlust und somit der Wärmeentwicklung des Mediums durch Wechselwirkung mit einem elektromagnetischen Feld. Durch die elektromagnetische Strahlung innerhalb der Mikrowelle sollte die Änderung von ε'' näherungsweise als Temperaturerhöhung nachgebildet werden. Es wurde angenommen, dass sich reines Wasser nach der gleichen Zeit in der Mikrowelle weniger stark erwärmen lässt als die Salzlösungen. Laut der Theorie nimmt ε'' mit dem Salzgehalt zu und dadurch müssten auch die dielektrischen Verluste höher sein, was in einer stärkeren Temperaturerhöhung resultiert. Unter Betrachtung der orangefarbenen gestrichelten Linien in Abbildung 0-1 ist zu erkennen, dass sich bei der eingesetzten Frequenz von 2,45 GHz die Imaginäranteile der Dielektrizitätskonstante für reines Wasser (A) und einer Salzlösung mit einer Konzentration von $0,224 \text{ mol L}^{-1}$ (B) um einen Faktor von ca. 8 unterschieden. Dies lässt vermuten, dass sich dieser Sachverhalt auch in der unterschiedlichen Temperaturerhöhung zeigt und ein deutlicher Unterschied wahrgenommen werden kann. Wenn nun eine starke Zunahme der Temperaturdifferenzen mit der eingesetzten Salzkonzentration beobachtet werden kann, würde dies darauf hindeuten, dass der Einfluss der Ionenleitfähigkeit auf das dielektrische Verhalten nicht vernachlässigt werden kann und somit bei der Feuchtemessung mittels elektromagnetischer Strahlung miteinbezogen werden müsste.

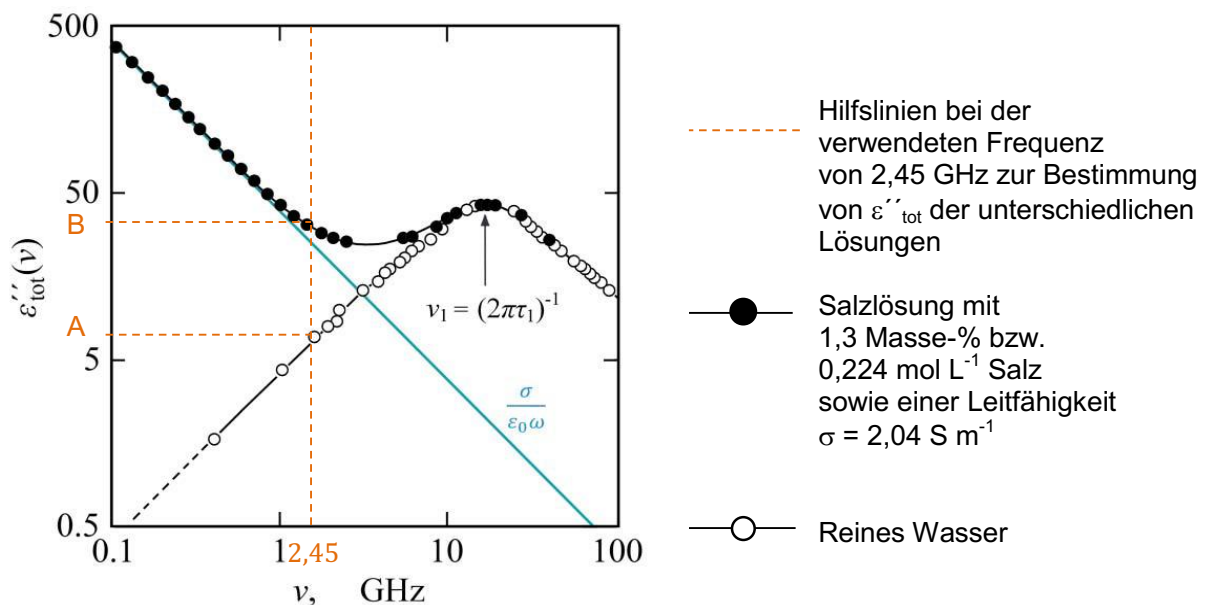


Abbildung 0-1: Einfluss des Salzgehaltes auf den frequenzabhängigen Imaginäranteil der Dielektrizitätskonstante von Wasser $\varepsilon''_{\text{tot}}$ bei der verwendeten Frequenz von 2,45 GHz. [Mod. nach 7]

Es konnte bei der Untersuchung beobachtet werden, dass sich ein negativer Trend in den Temperaturdifferenzverläufen entwickelte, sodass die Rahmenbedingungen angepasst werden mussten. Bei einer hohen Leistung und langen Kontaktzeit heizte sich das Wasser

zu stark auf, sodass es zur teilweisen Verdampfung des Wassers kam. Dadurch änderte sich die Atmosphäre innerhalb des Herdes (höhere Luftfeuchtigkeit). Angenommen wurde, dass die gasförmigen Wasserdampfteilchen somit ebenfalls in Wechselwirkung mit dem elektromagnetischen Feld standen und dies zu einer Verringerung der Absorptionsstärke der Flüssigkeit geführt hatte. Daher wurden nach Testungen die niedrigste Leistung des Herdes sowie eine Erwärmungsdauer von einer Minute gewählt.

Als Vergleich der Messergebnisse soll folgende Abbildung 0-2 dienen. Hierbei ist zu sehen, dass die Mittelwerte bei reinem Wasser und einer niedrigen Salzkonzentration von $c = 0,2236 \text{ mol L}^{-1}$ annähernd gleich sind. Unter Betrachtung der Messwerte ergibt sich eine Differenz von $1,67 \cdot 10^{-2} \text{ °C}$. Hinsichtlich der Standardabweichung ergibt sich eine wenig höhere Abweichung von $6,82 \cdot 10^{-2} \text{ °C}$. Dies bedeutet, dass die Messergebnisse der 2. Versuchsreihe schwächere Schwankungen aufweisen als jene der Ersten. Umgekehrt gilt dies bei der dritten Versuchsreihe, welche im Vergleich zur ersten eine Differenz von $1,12 \text{ °C}$ bei den Mittelwerten und $1,36 \cdot 10^{-1} \text{ °C}$ bei den Standardabweichungen aufweist. Daraus lässt sich schließen, dass der Mittelwert zwar höher liegt als bei den ersten beiden Versuchsreihen, aber die Schwankungen der Messwerte deutlich größer sind.

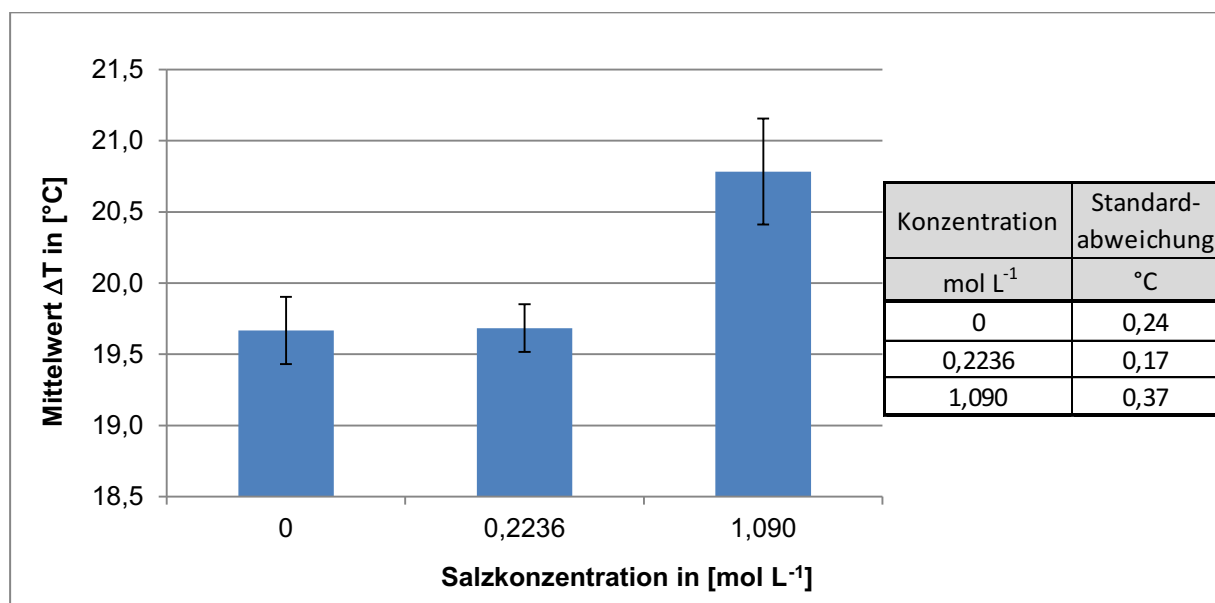


Abbildung 0-2: Vergleich aller drei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Salzkonzentration hinsichtlich des Mittelwertes und der Standardabweichung der Temperaturdifferenzen bei der elektromagnetischen Erwärmung von jeweils 6 Bechergläsern mit gleichem Inhalt.

Als Vergleich des Verlaufs der Temperaturdifferenzen mit der Zeit anhand der Becherglasnummer für alle drei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Salzkonzentration dient folgende Abbildung 0-3. Hierbei kann erkannt werden, dass die Verläufe für die erste und zweite Versuchsreihe annähernd gleich sind und auch keine Trendlinie aufweisen. Dies bedeutet, dass für beide ein ausreichend konstanter Versuchsrahmen geherrscht haben muss, da ansonsten die Messwerte stark schwanken würden und/oder ein Trend zu sehen wäre. Die Erwärmung von reinem Wasser zeigt dabei den besten Verlauf, da die Schwankungen gering und ein Trend nicht beobachtet werden kann.

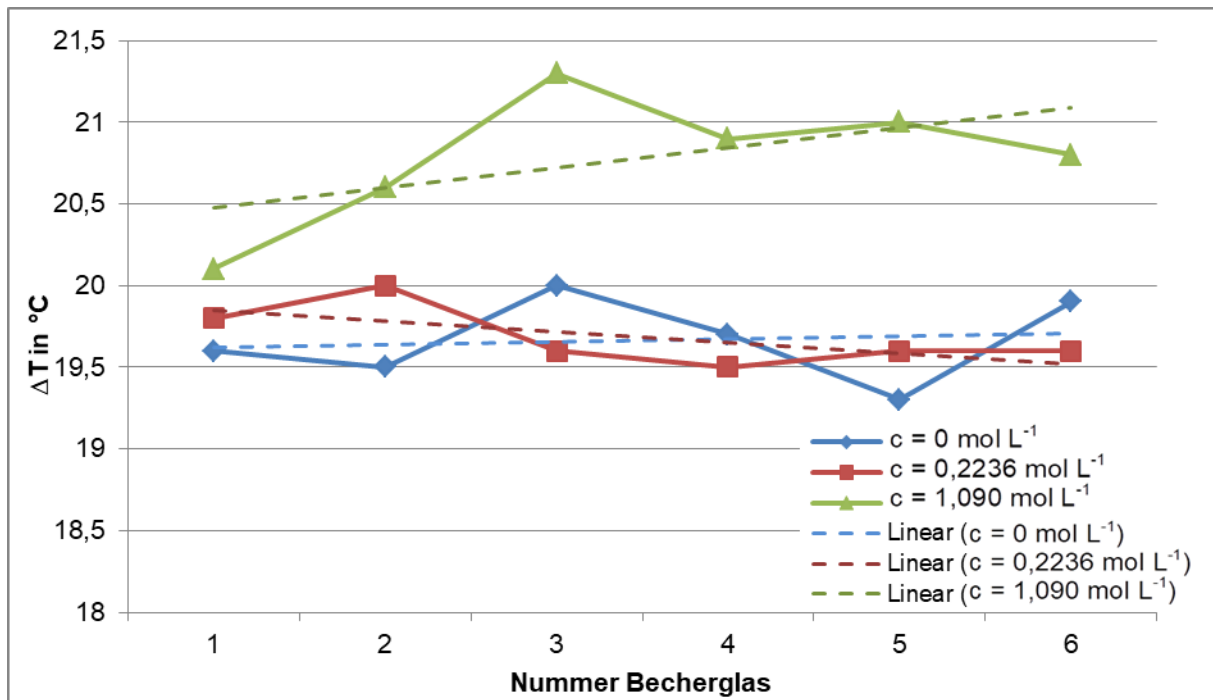


Abbildung 0-3: Liniendiagramm-Vergleich der Temperaturdifferenzen bei der Erwärmung im Mikrowellenherd für alle drei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Salzkonzentration c über die Becherglasnummer.

Nachdem die Proben unterschiedliche Volumina aufgewiesen haben, wurden die Temperaturerhöhungen durch das jeweils verwendete Volumen dividiert und gegen die Becherglasnummer (gleichzeitig der Versuchszeit) aufgetragen. Unter Vergleich mit Abbildung 0-3 zuvor konnte kein wesentlicher Unterschied zum Verlauf festgestellt werden. An dieser Stelle muss dabei angemerkt werden, dass die Messungen jeweils bei gleicher Frequenz von 2,45 GHz durchgeführt wurden und bei einer anderen bzw. einem Frequenzsweep die Schlussfolgerungen durchaus anders lauten könnten. Weiters wurde der Temperatureinfluss der Dielektrizitätskonstante im Rahmen dieser Untersuchung vernachlässigt. Somit ist die Wechselwirkung der Effekte (Salz und Temperatur) nicht bekannt.

II. Weiterführende Informationen zur experimentelle Untersuchung über die Menge an gebundenem Wasser

Wie bereits in Kapitel 3.6 auf Seite 33 unter Formel (19) geschildert, kann die Menge an gebundenem Wasser über die Schichtdicke berechnet werden. Dazu wird anhand von Formel (20) die Schichtdicke von Wasser in einem Grünmix bei einer Temperatur von 25°C und in einem Frequenzbereich von 0,8 - 1 GHz berechnet. Dies wird beispielsweise für 1 GHz in Formel (45) gezeigt. Für den Radius wurde der angegeben Wert von 2,5 Å herangezogen.

$$x(T) = \frac{(1621 \cdot 10^{-10}) m K}{-(2,047 \cdot 10^3) K + 298,15 K \cdot \ln \left(\frac{(1,38062 \cdot 10^{-23}) J K^{-1} \cdot 298,15 K}{8 \cdot \pi^2 \cdot (2,5 \cdot 10^{-10})^3 m^3 \cdot (9,5 \cdot 10^3) Pa s \cdot 10^9 \frac{1}{s}} \right)} \quad (45)$$

$$= 4,19 \text{ \AA} = 4,19 \cdot 10^{-10} m$$

Zur Bestimmung der volumenspezifischen Oberfläche wurde eine Korngrößenanalyse eines Grünmixes hinzugezogen und in einem RRSB-Netz eingetragen [36], welches in folgender Abbildung 0-4 zu sehen ist.

- Regressionsgerade anhand der KG-Verteilung
- Parallel durch den Pol verschobene Gerade

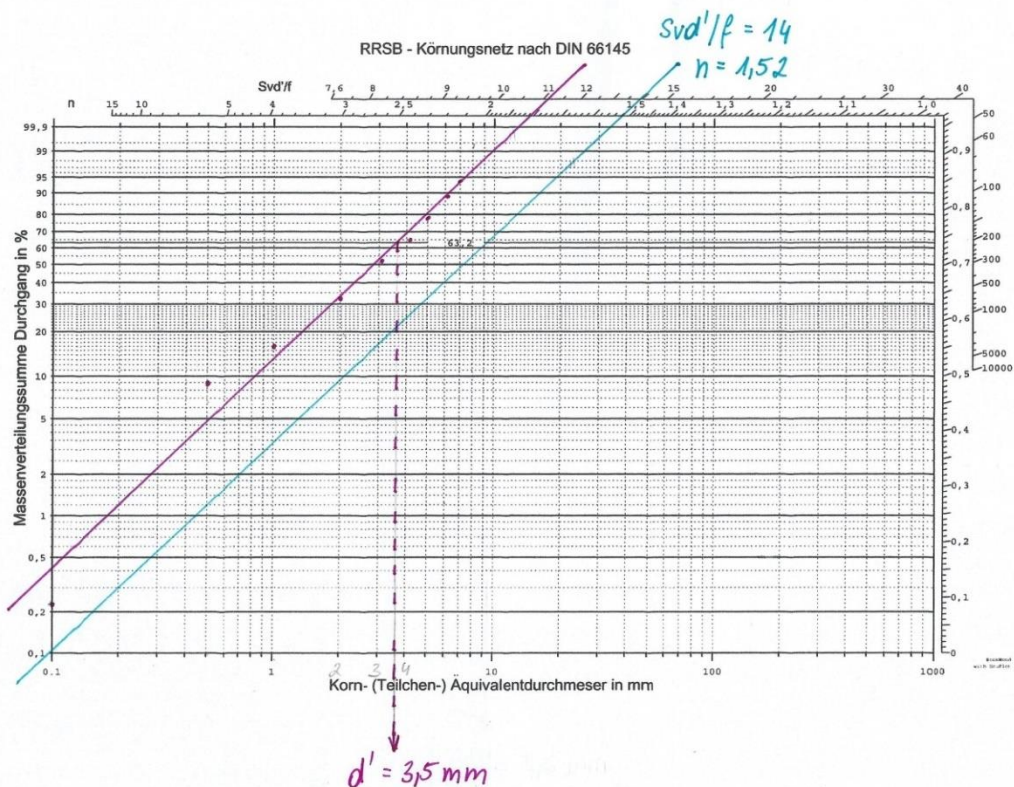


Abbildung 0-4: Bestimmung der volumenspezifischen Oberfläche über das RRSB-Körnungsnetz.

Mit diesem konnte über die Kenntnis des Formfaktors f und dem ebenfalls abgelesenen Wert d' (Schnittpunkt der Geraden mit der 63,2 % - Linie) die volumenspezifische Oberfläche nach Formel (46) bestimmt werden.

$$K = \frac{S_V * d'}{f} = 14 \rightarrow S_V = \frac{K * f}{d'} = \frac{14 * 1,4}{3,5} = 5,6 \frac{mm^2}{mm^3} \quad (46)$$

Für die Berechnung der massespezifischen Oberfläche muss die volumenspezifische Oberfläche durch die Partikeldichte dividiert werden. Dazu wurde eine typische Zusammensetzung eines Grünmixes und der Dichten der jeweiligen Komponenten herangezogen [57]. Da sich die gegebenen Massenanteile auf das trockene Gut beziehen, mussten diese zunächst ungerechnet werden. Es wurde eine durchschnittliche Wassermenge von 4 Masse-% angenommen. Der angepasste Anteil wurde berechnet, indem der Anteil ohne Wasser durch 104 (Summe gesamt + Anteil Wasser) dividiert wurde. Die Dichte von Wasser wurde aus einer anderen Literaturquelle [58] bezogen.

Tabelle 0-1: Durchschnittliche Zusammensetzung eines Grünmixes und die Rohdichte der jeweiligen Komponenten. [57]

Stoffbezeichnung	Anteil ohne Wasser Masse-%	Anteil Masse-%	Dichte g cm ⁻³
Eisenerzer Erz	46,1	44,33	3,55
Kumba Erz	14,5	13,94	4,89
Rückgut intern	24,1	23,17	4,31
Rückgut extern	7,9	7,60	4,31
Koksgrus	3,7	3,56	1,95
Kalksplitt	2,8	2,69	2,76
Walzzunder	0,9	0,87	5,2
Wasser	4,0	3,85	0,997
	104	100	
	Summe	Summe	

Um die Rohdichte der Mischung zu bestimmen muss Formel (47) hinzugezogen werden. Dazu werden die bekannten Massenanteile w_i jeder einzelnen Komponente der Mischung durch die jeweiligen Dichten der gleichen Komponente ρ_i dividiert. Für die Dichte des Walzzunders wurde die Dichte von Hämatit nach gleicher Literaturquelle herangezogen.

$$\frac{1}{\rho_{mix}} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \rightarrow \rho_{mix} = 3412,90 \frac{kg}{m^3} \quad (47)$$

Nach der Ermittlung der Mischungs-Rohdichte, kann nun die massespezifische Oberfläche über Gleichung (48) laut der Literatur [36] wie folgt berechnet werden.

$$S_M = \frac{S_V}{\rho_{mix}} = \frac{5600 \frac{m^2}{m^3}}{3412,90 \frac{kg}{m^3}} = 1,64 \frac{m^2}{kg} \equiv A_S \quad (48)$$

Nachdem nun die spezifischen Oberflächen und die Schichtdicken berechnet wurden, kann unter Einbezug der Schüttdichte ρ_b , welche bei einem Wert von ca. 1800 kg m^{-3} liegt, nach gezeigter Formel (20) die Menge an gebundenem Wasser berechnet werden. Dies soll exemplarisch für eine Frequenz von 1 GHz und einer massespezifischen Oberfläche anhand der dritten Methode in folgender Gleichung (49) präsentiert werden.

$$M_{bw} = x(T) * A_S * \rho_b = (4,19 * 10^{-10}) \text{ m} * 1,64 \frac{\text{m}^2}{\text{kg}} * 1800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,24 \text{ ppm}_v \quad (49)$$

Wenn nun diese Berechnungsschritte nach der dritten Methode für das gesamte Frequenzband durchgeführt werden, kann ein Anstieg der Schichtdicke sowie der Menge an gebundenem Wasser mit der Frequenz beobachtet werden (vgl. Abbildung 0-5).

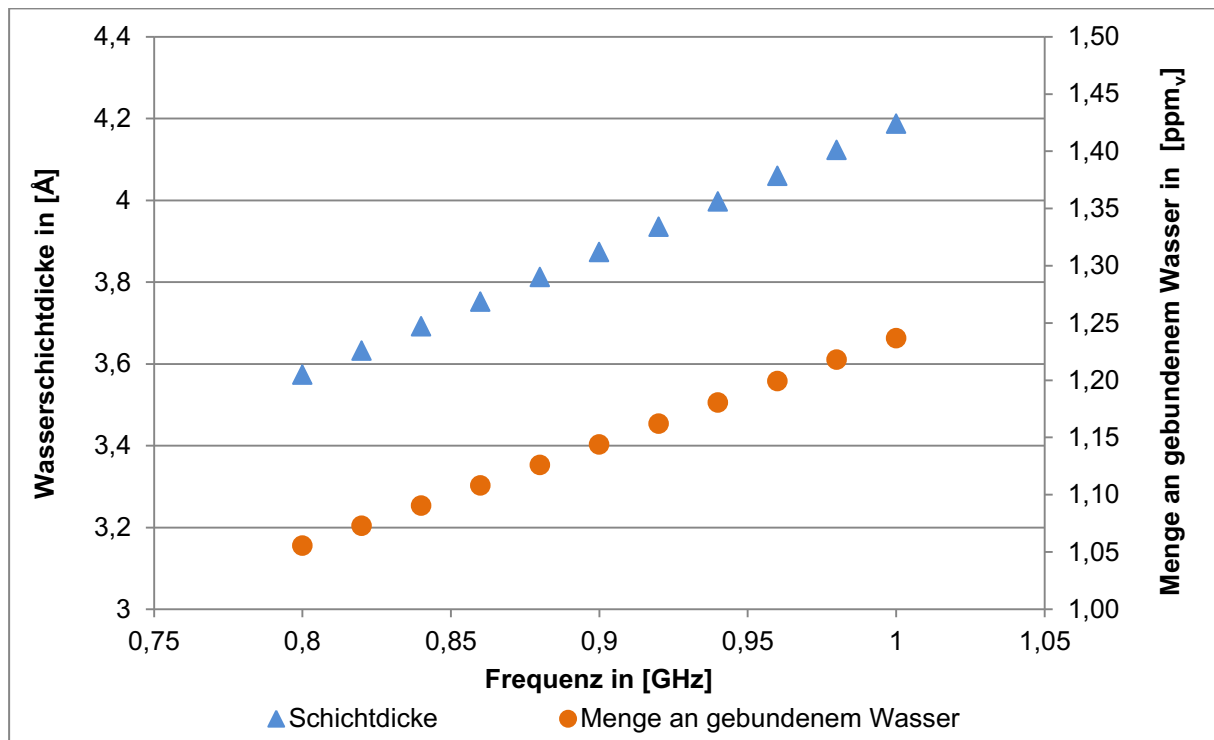


Abbildung 0-5: Anstieg der Wasserschichtdicke und der Menge an gebundenem Wasser mit der Frequenz im praktischen Messbereich der elektromagnetischen Feuchtemessung.

Alle berechneten Werte für die jeweiligen Methoden wurden in folgender Tabelle 0-2 zusammengefasst.

Tabelle 0-2: Auflistung der Schichtdicke und der Menge an gebundenem Wasser für jede der drei Berechnungsvarianten.

f	x(25 °C)	M _{bw}
GHz	Å	ppm _v
0,80	3,57	1,06
0,82	3,63	1,07
0,84	3,69	1,09
0,86	3,75	1,11
0,88	3,81	1,13
0,90	3,87	1,14
0,92	3,93	1,16
0,94	4,00	1,18
0,96	4,06	1,20
0,98	4,12	1,22
1,00	4,19	1,24

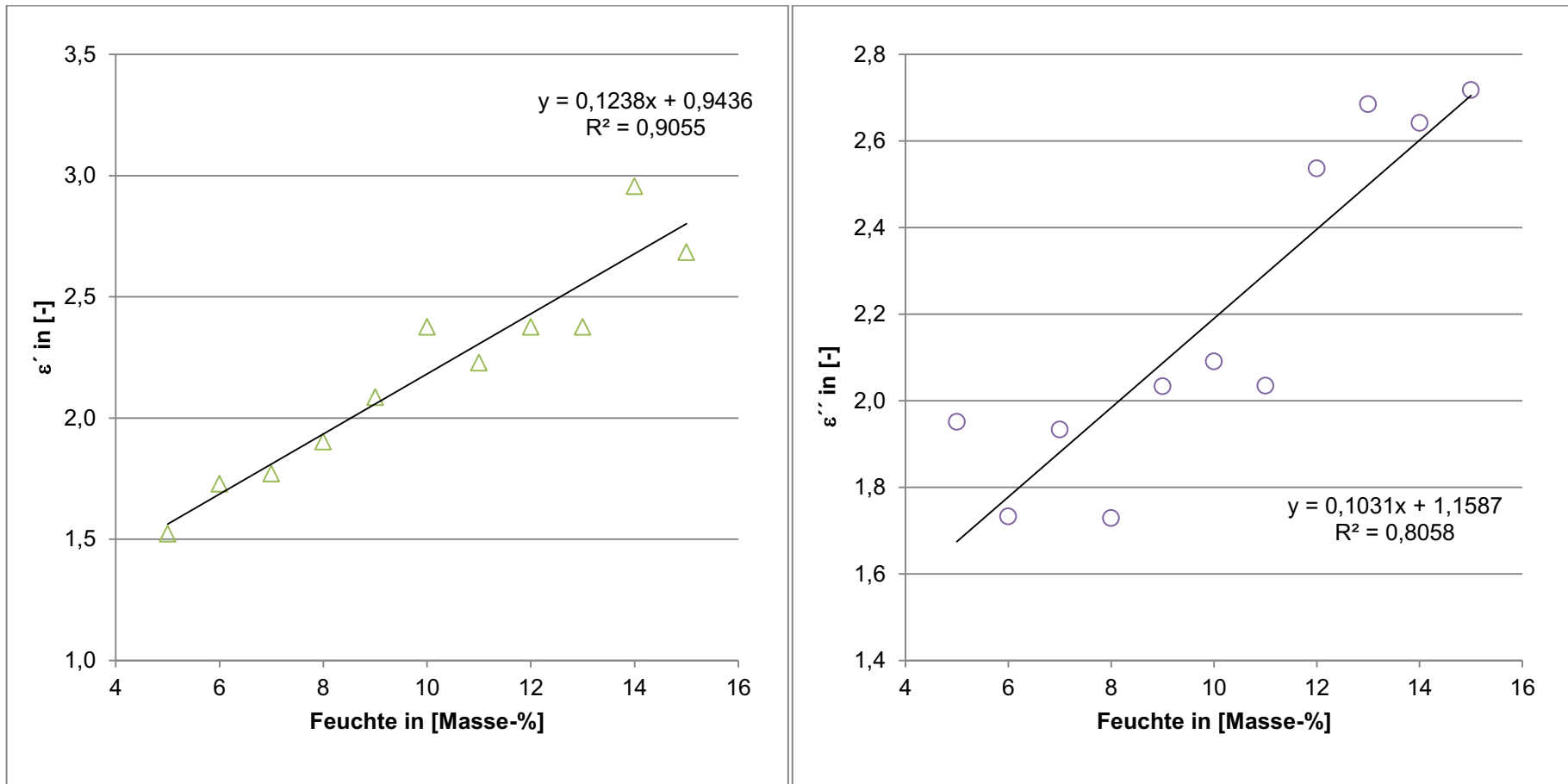
Die Umrechnung zwischen Massen- und Vol.-% bei der Wasserangabe wurde folgende Gleichung (50) verwendet, wobei die Partikeldichte der Trockensubstanz TS analog mit Formel (47) unter Hinzuziehung der Masseanteile ohne Wasseranteil berechnet wurde.

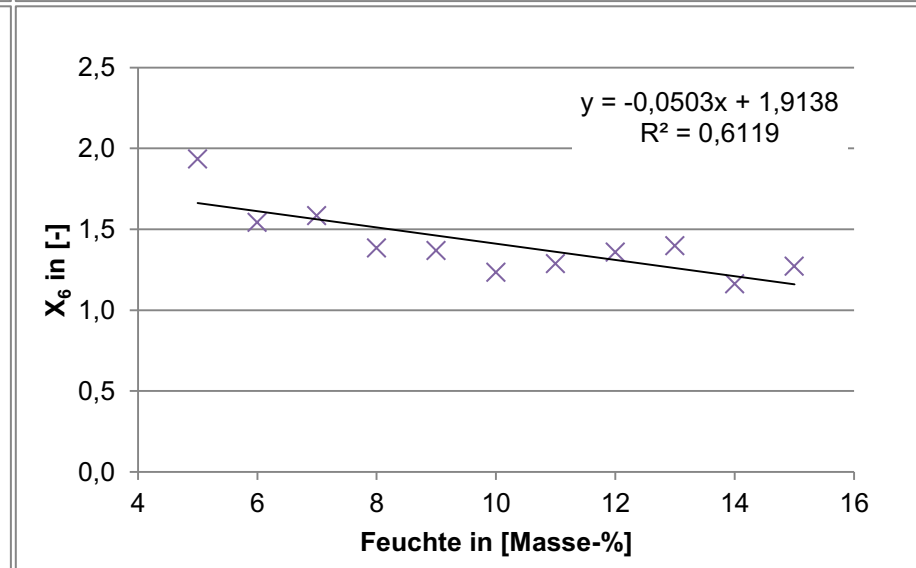
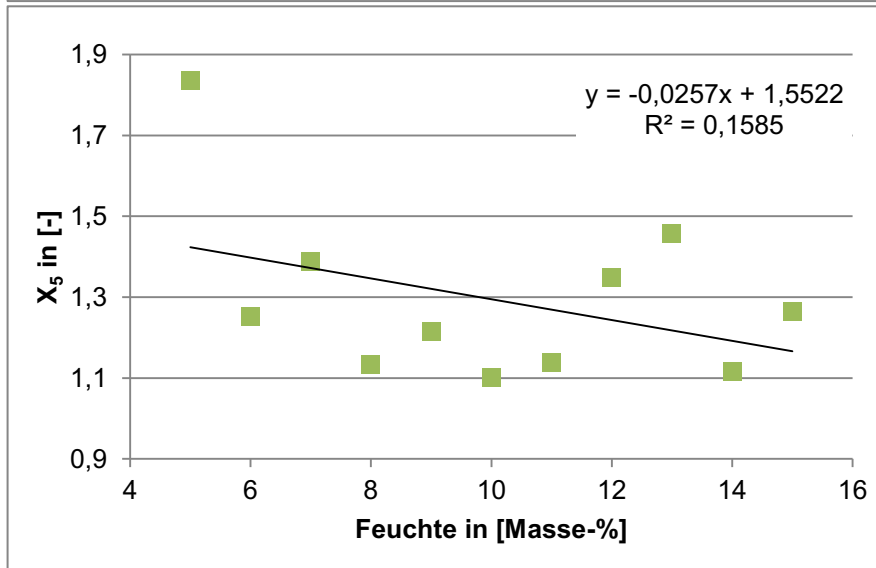
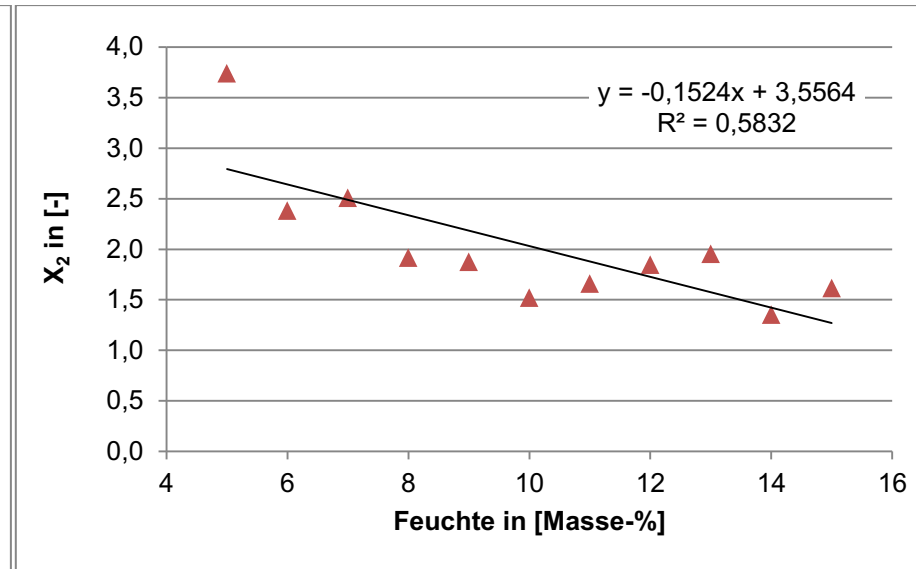
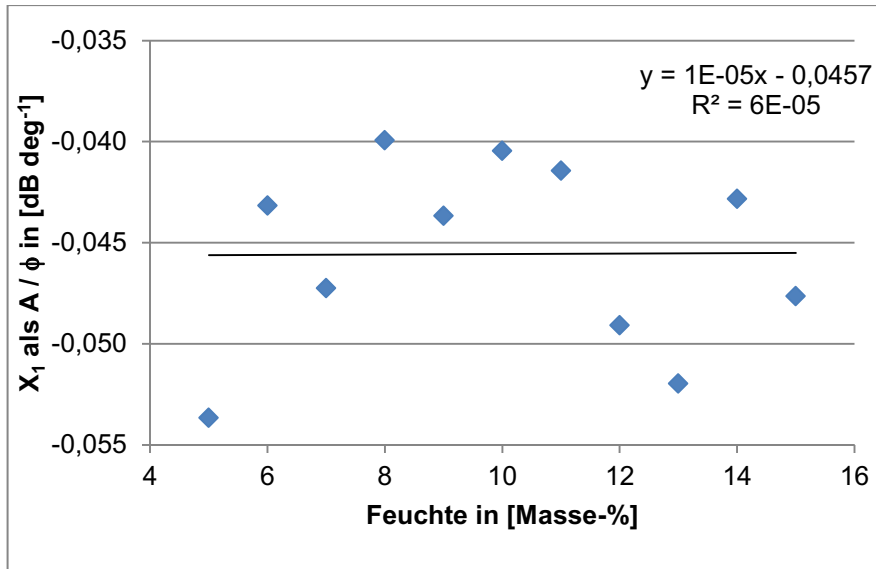
$$\begin{aligned}
 4 \text{ Masse} - \% H_2O &= \\
 &= 4 \frac{kg H_2O}{kg TS + kg H_2O} \hat{=} \frac{4 kg H_2O * \frac{1 m^3}{997 kg H_2O}}{1 kg TS * \frac{1 m^3 TS}{3779,18 kg H_2O} + 4 kg H_2O * \frac{1 m^3}{997 kg H_2O}} \quad (50) \\
 &= 3 \text{ Vol.} - \% H_2O
 \end{aligned}$$

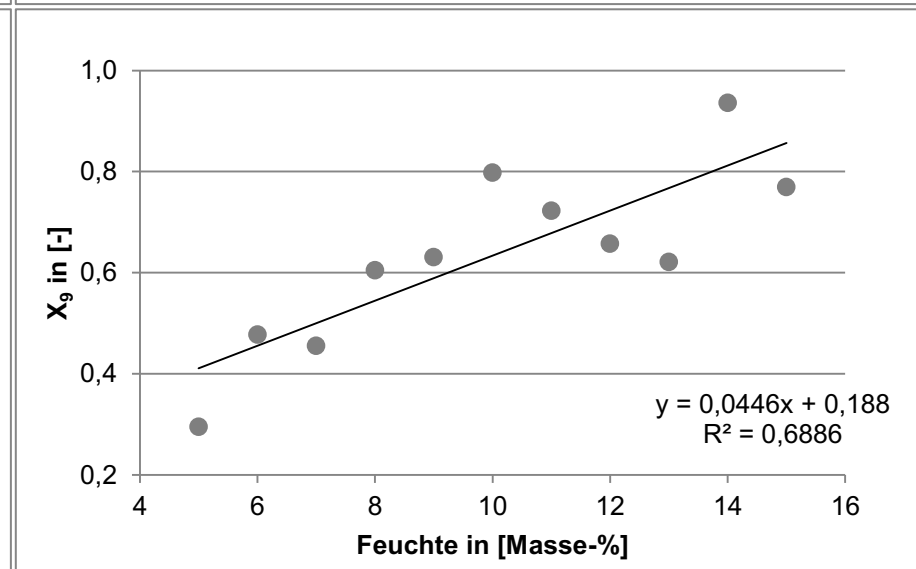
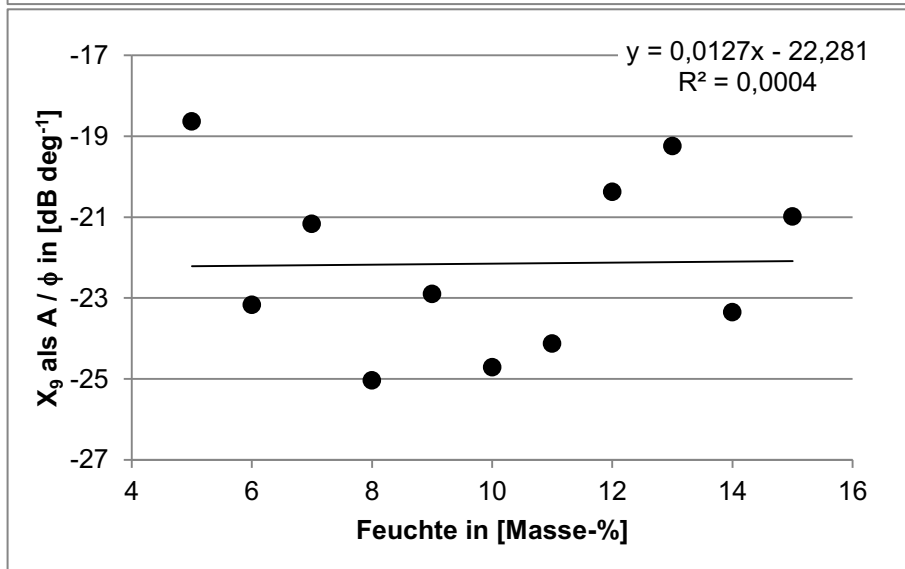
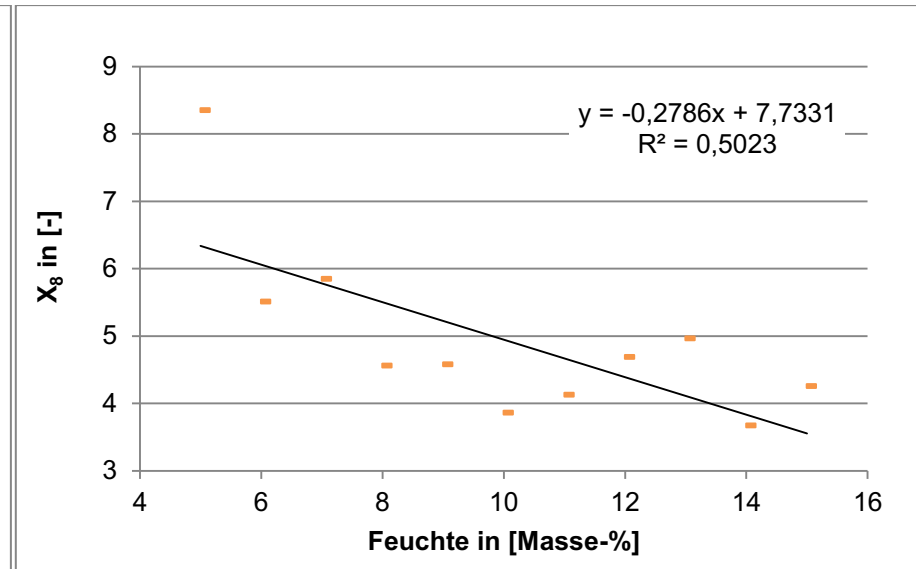
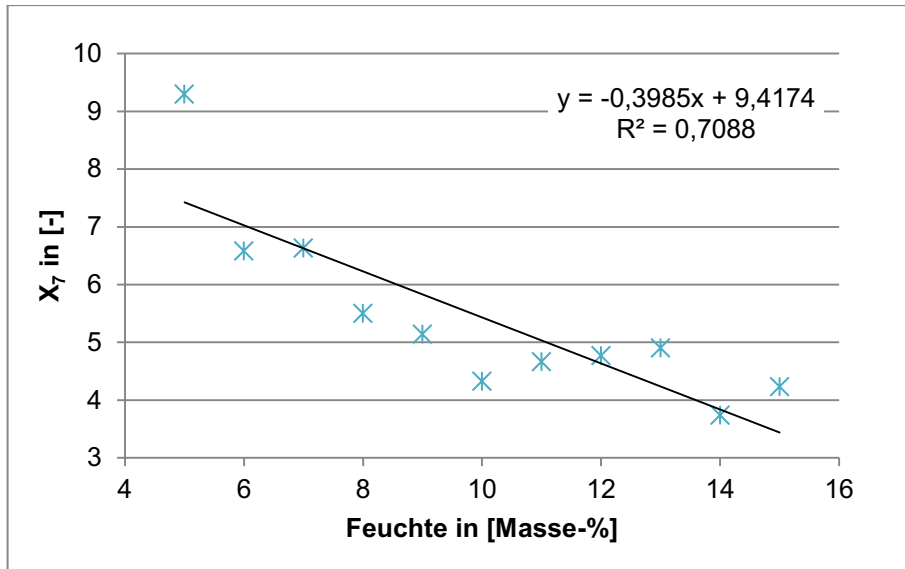
III. Weiterführende Informationen zur Auswertemethodik

i. Ad Methodik Nr. 2 (Kohle)

In folgender Abbildung 0-6 wurden alle Diagramme, welche bei der Auswertung der Transmissionsmessung von Kohle erstellt wurden, zusammengefasst.







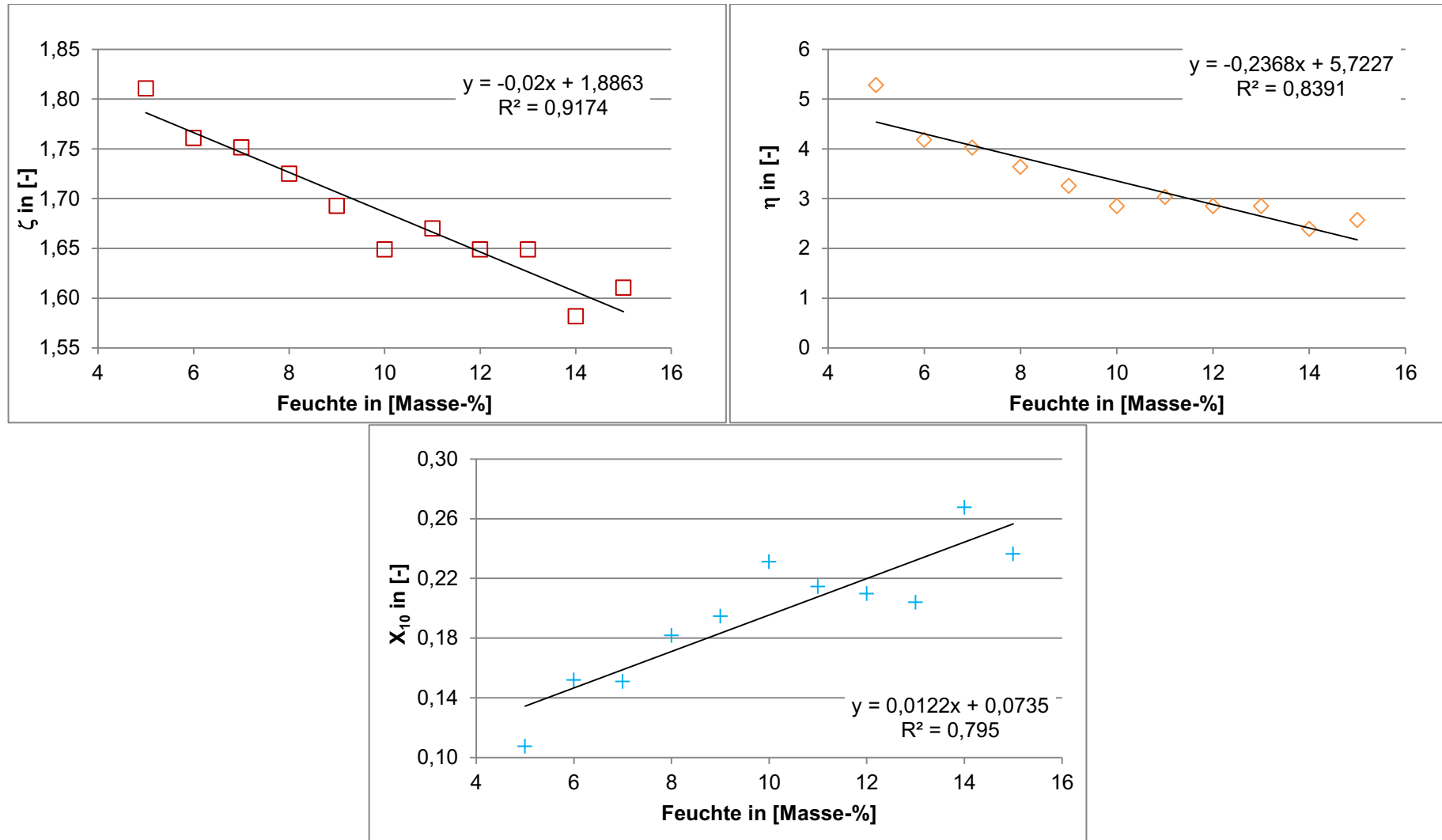
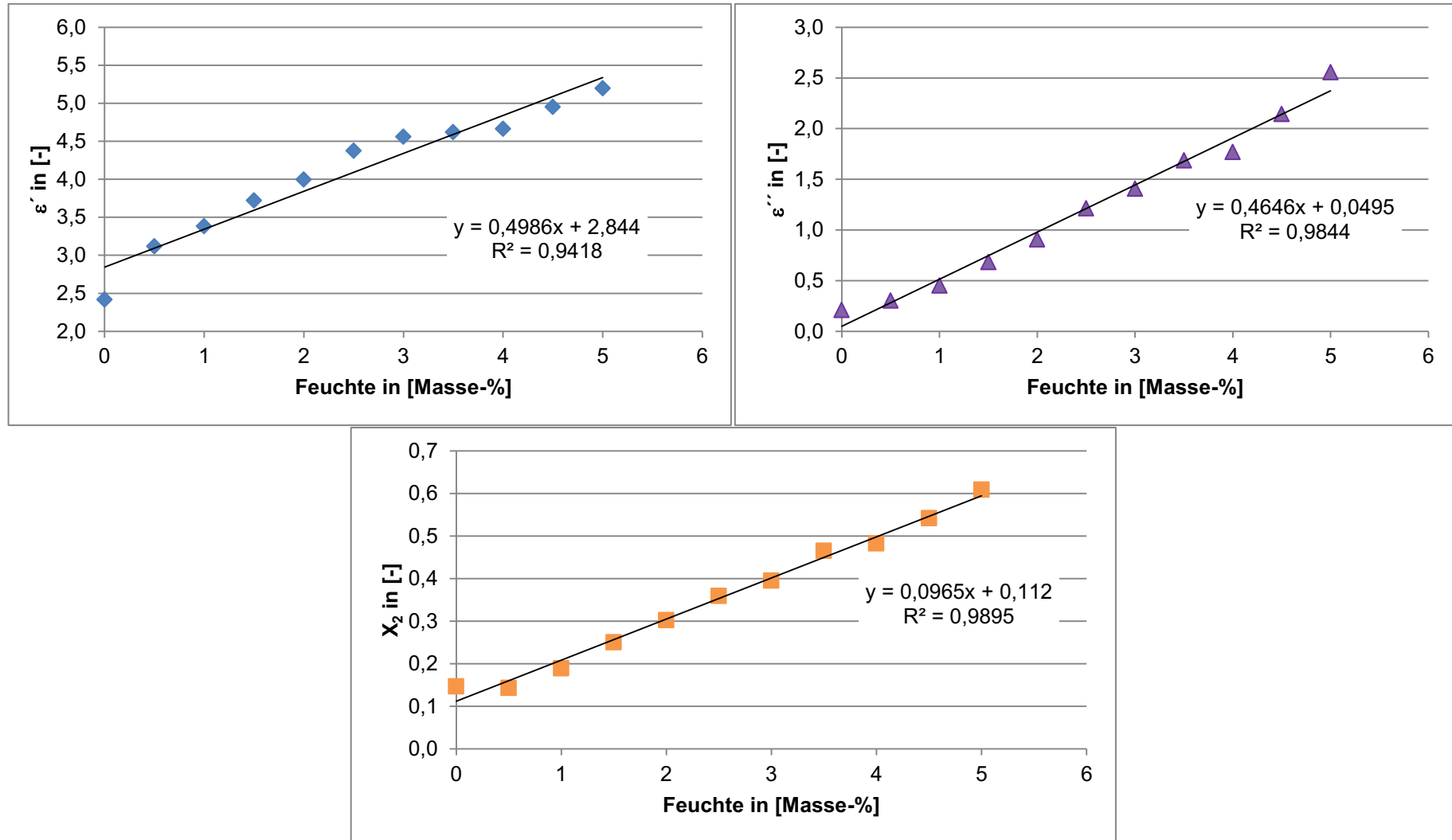
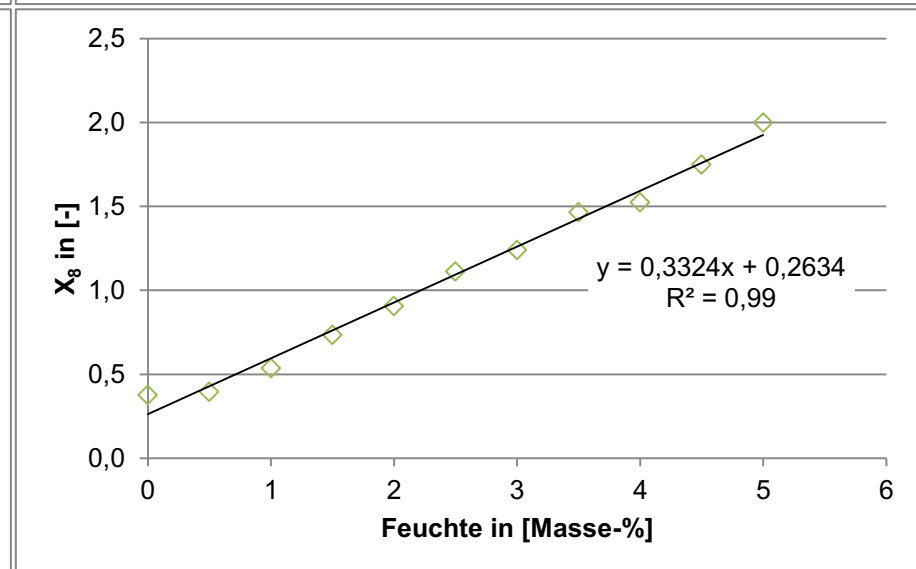
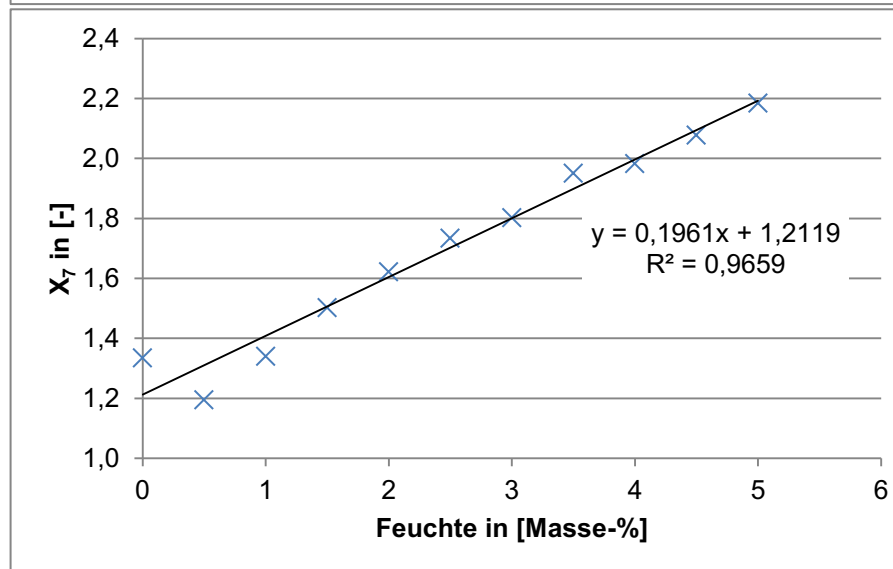
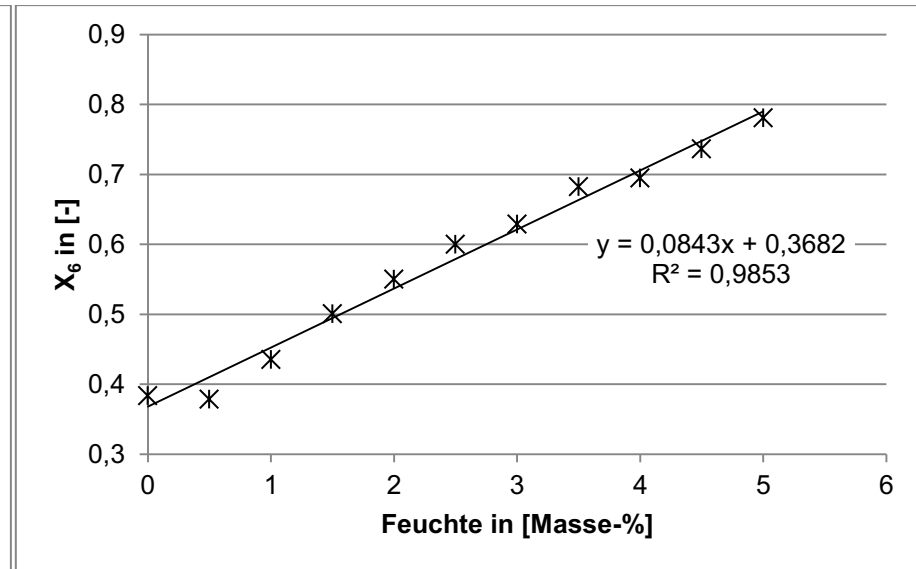
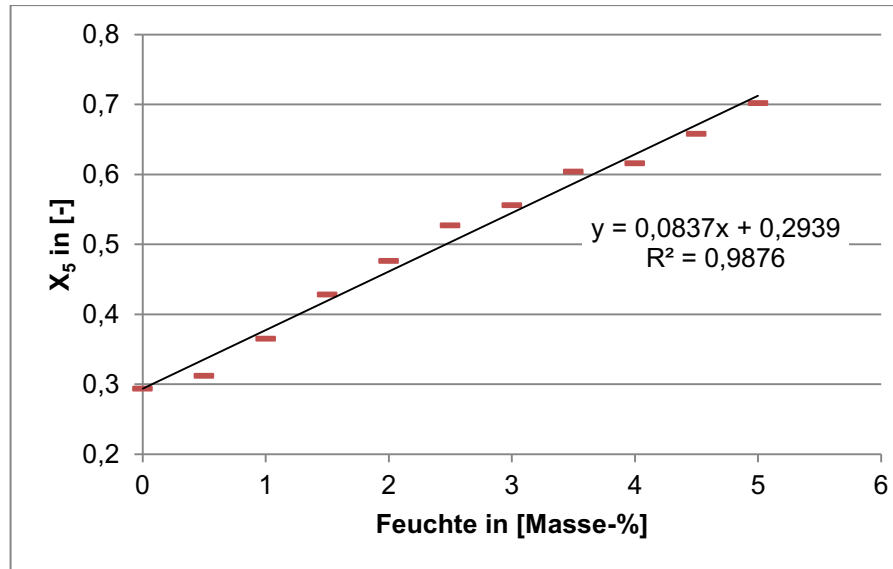


Abbildung 0-6: Diagramme der Funktionen für die Auswertung von Kohle bei einer Transmissionsmessung.

ii. Ad Methodik Nr. 2 (Natriumchlorid)

In folgender Abbildung 0-7 wurden alle Diagramme, welche bei der Auswertung von Natriumchlorid erstellt wurden, zusammengefasst.





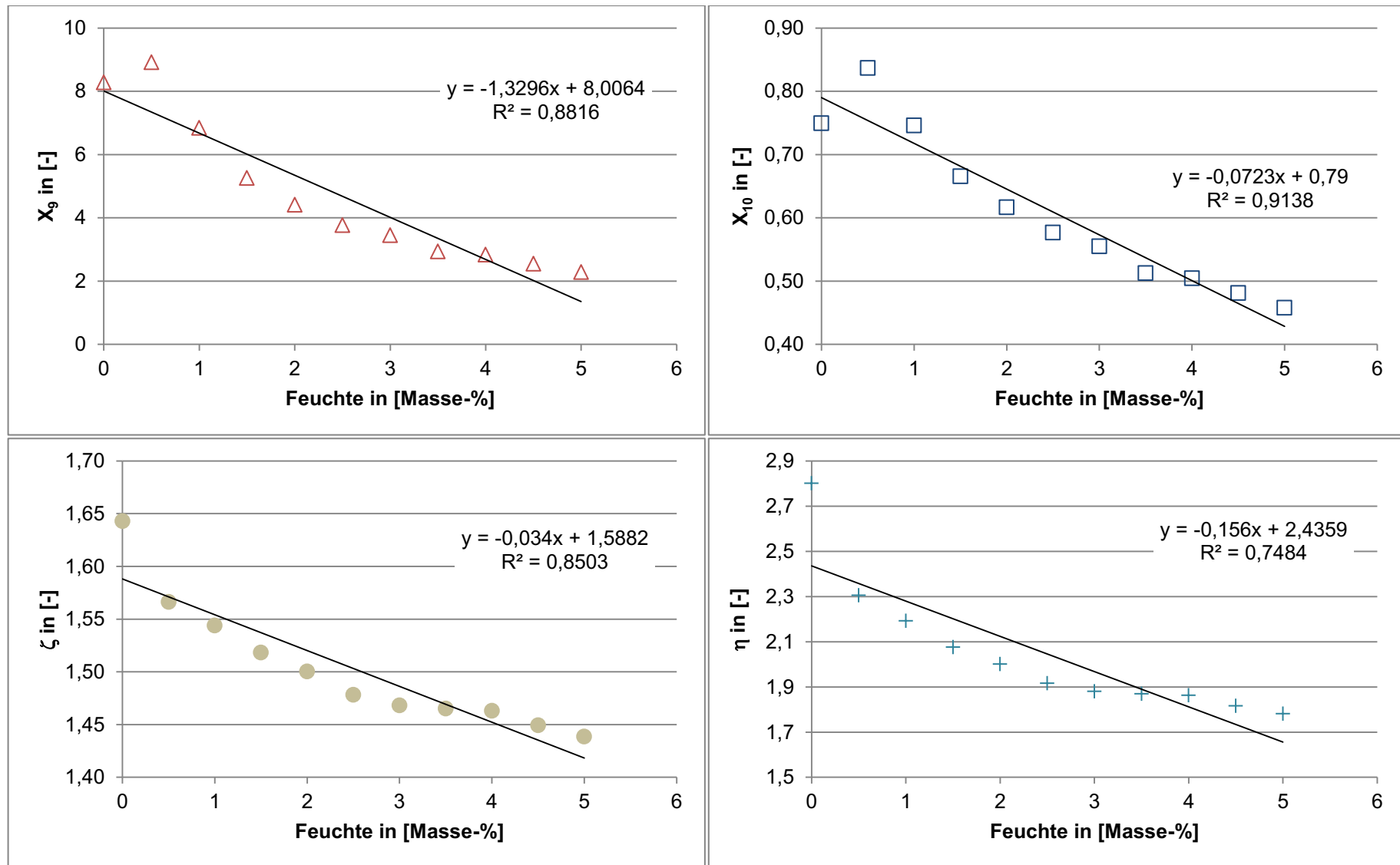
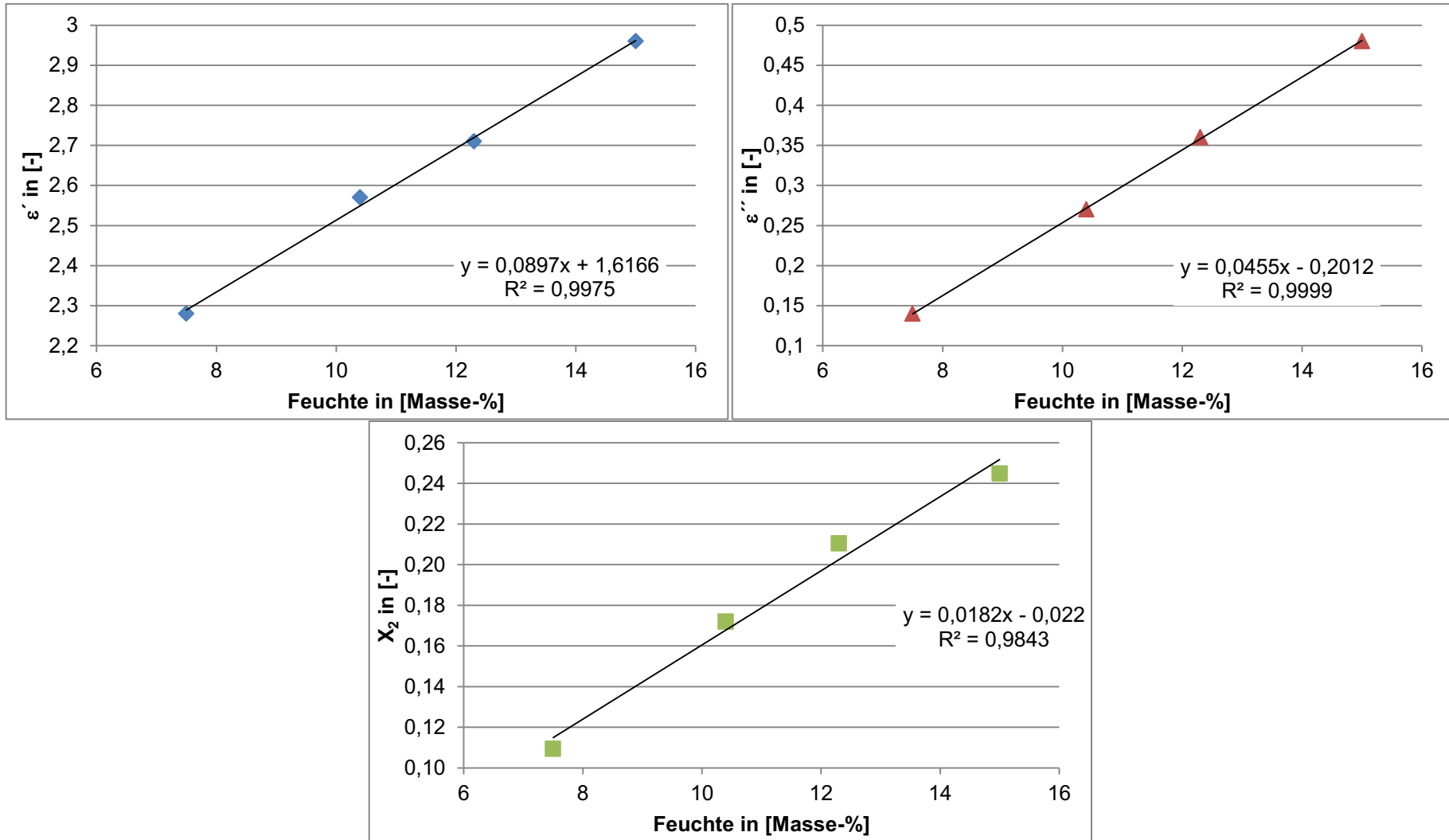
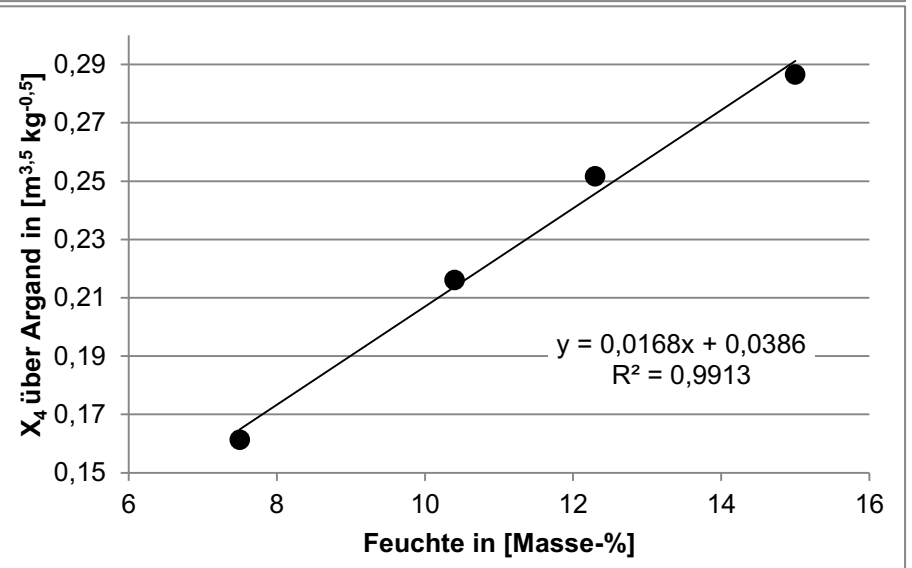
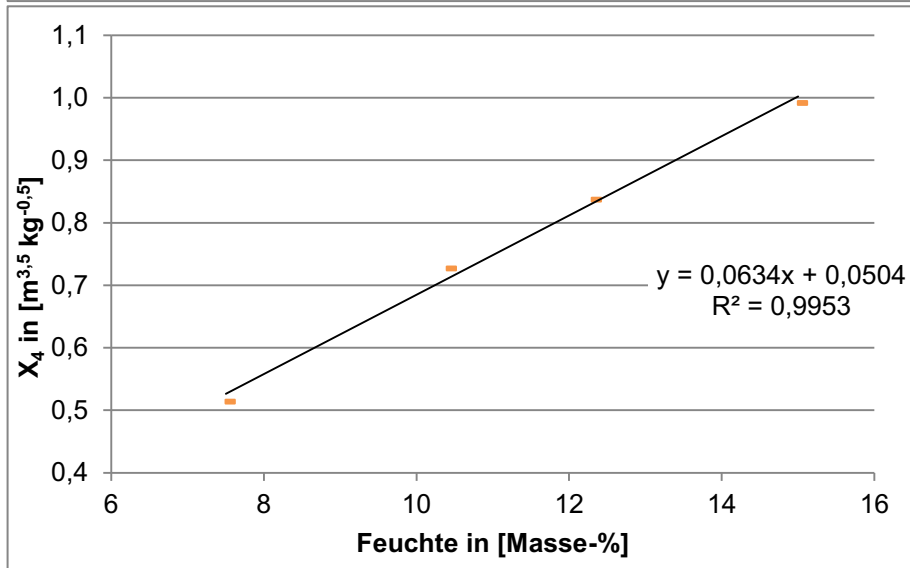
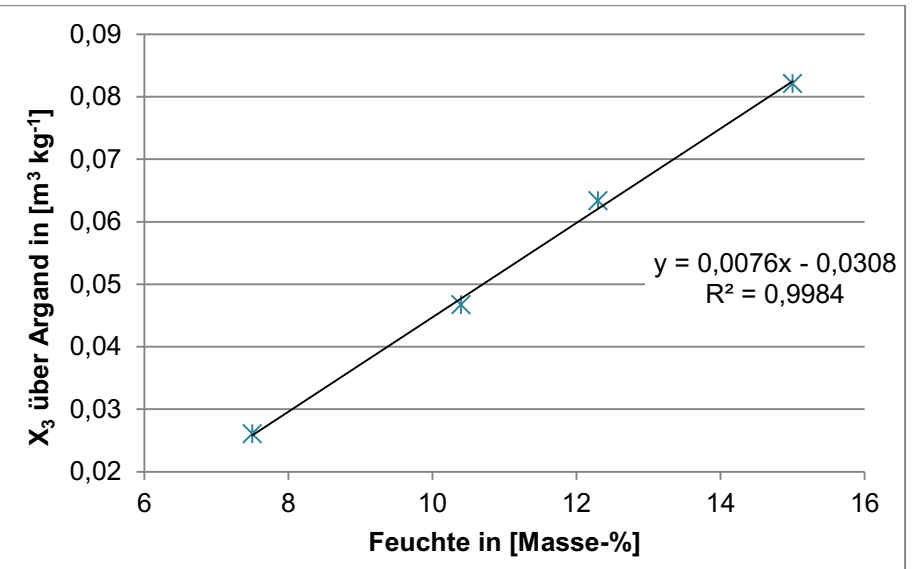
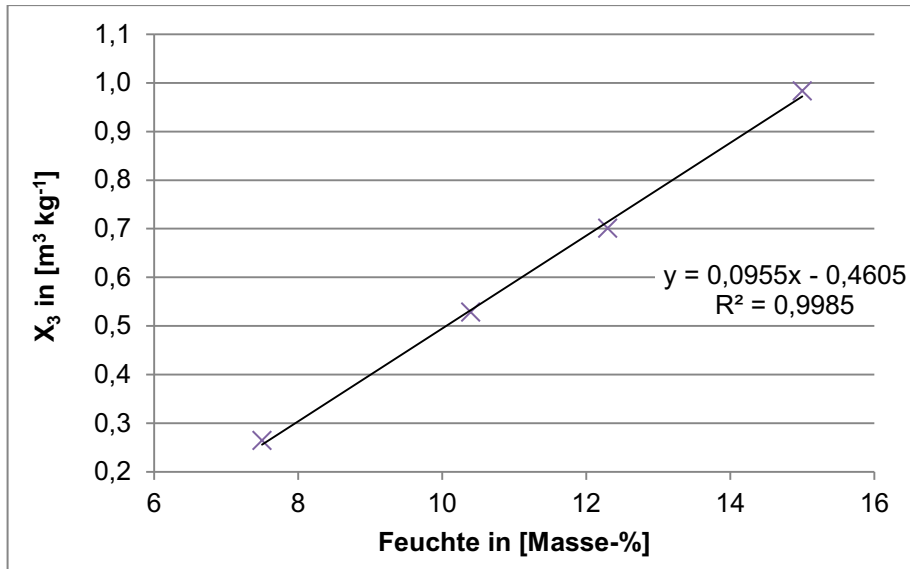


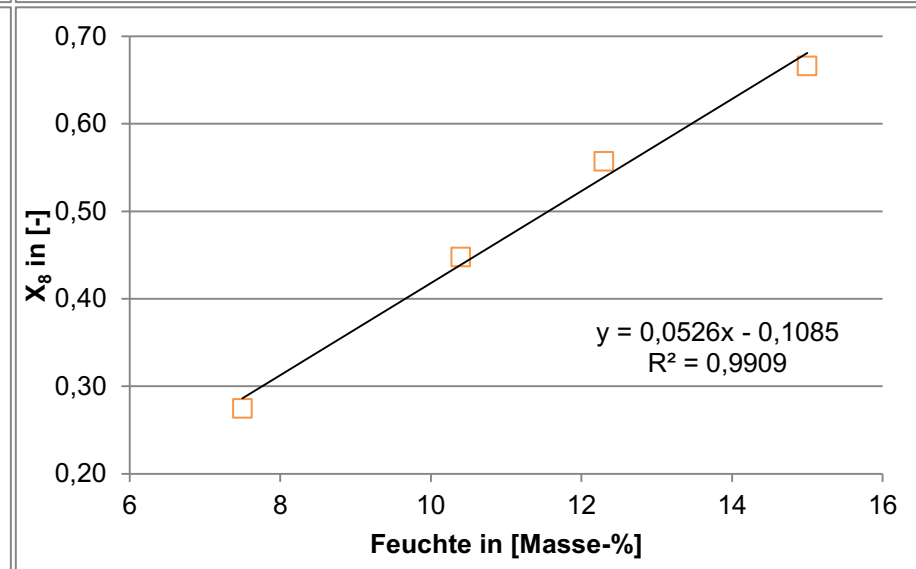
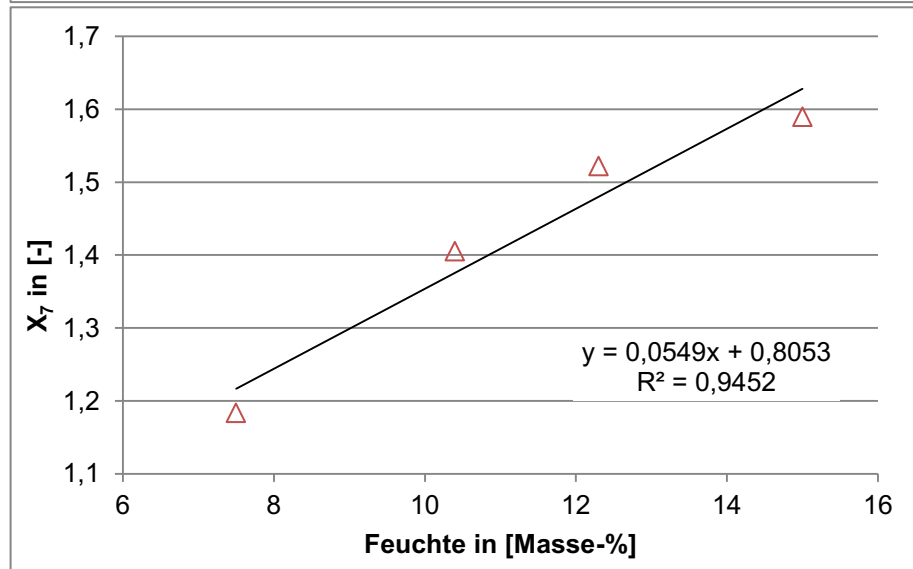
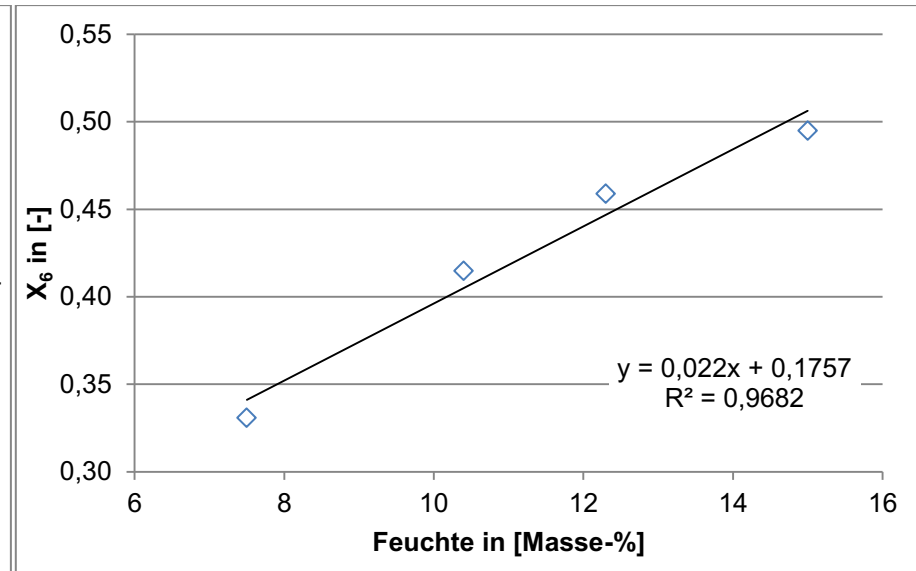
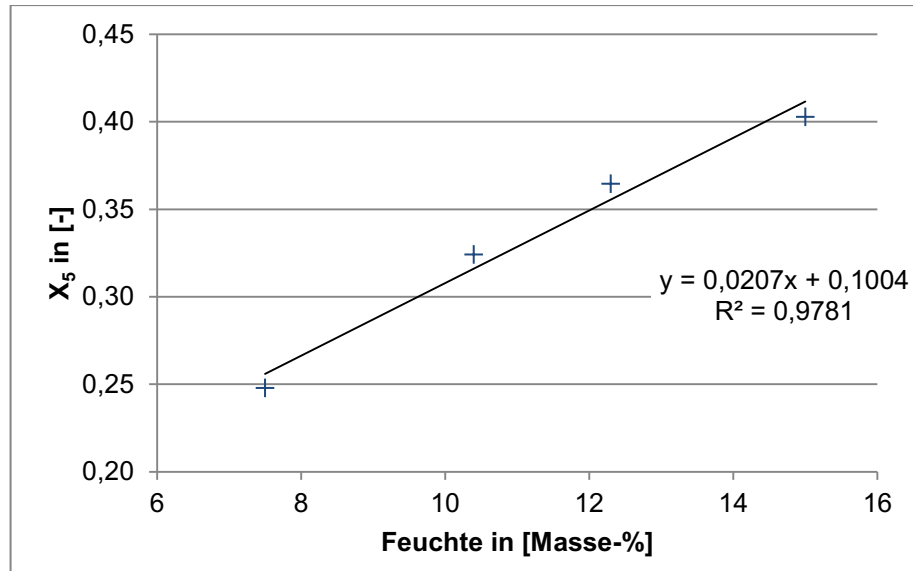
Abbildung 0-7: Diagramme der Funktionen für die Auswertung von Natriumchlorid bei 2,45 GHz.

iii. Ad Methodik Nr. 2 (Sojabohnen)

In folgender Abbildung 0-8 wurden alle Diagramme, welche bei der Auswertung von Sojabohnen erstellt wurden, zusammengefasst.







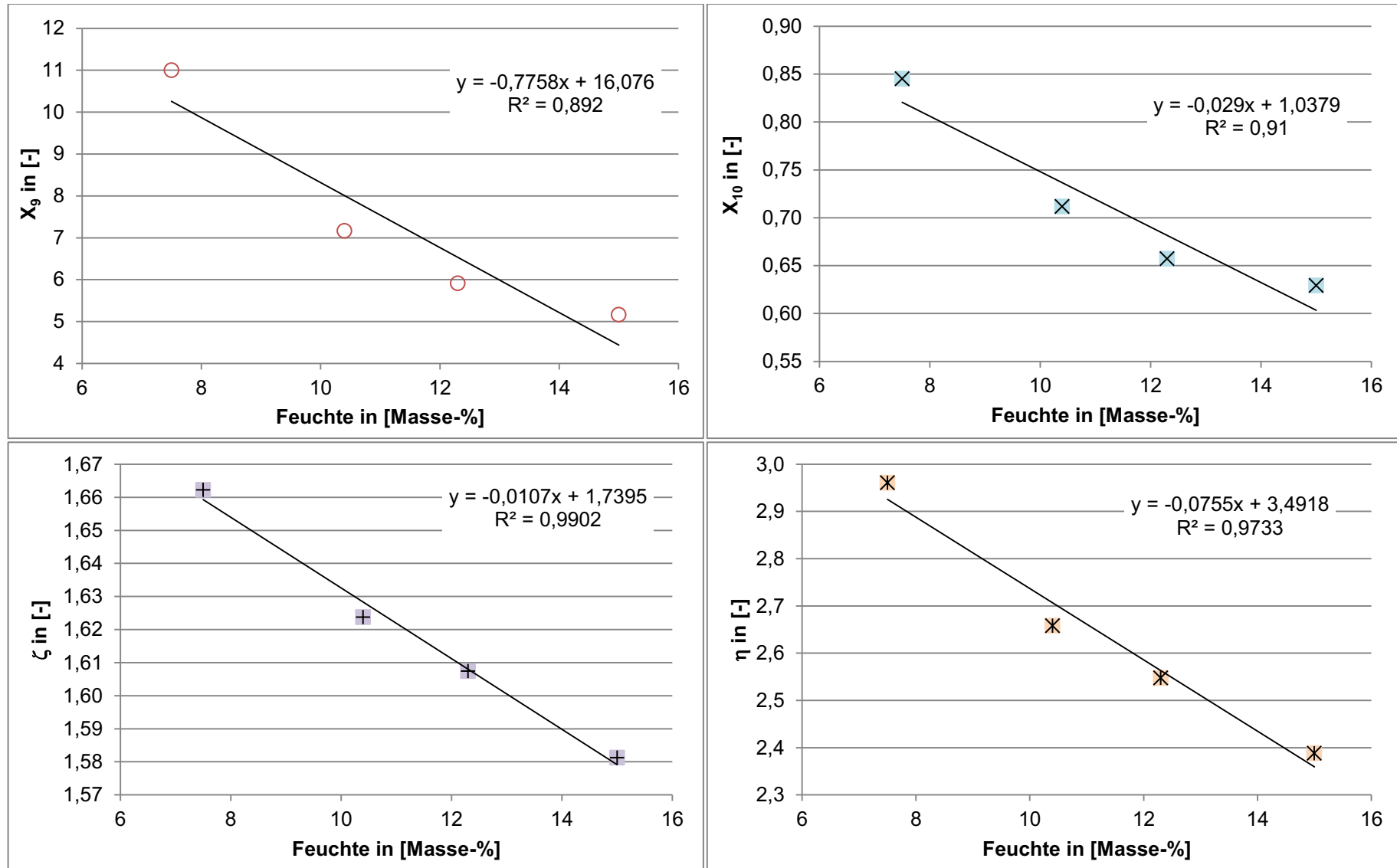
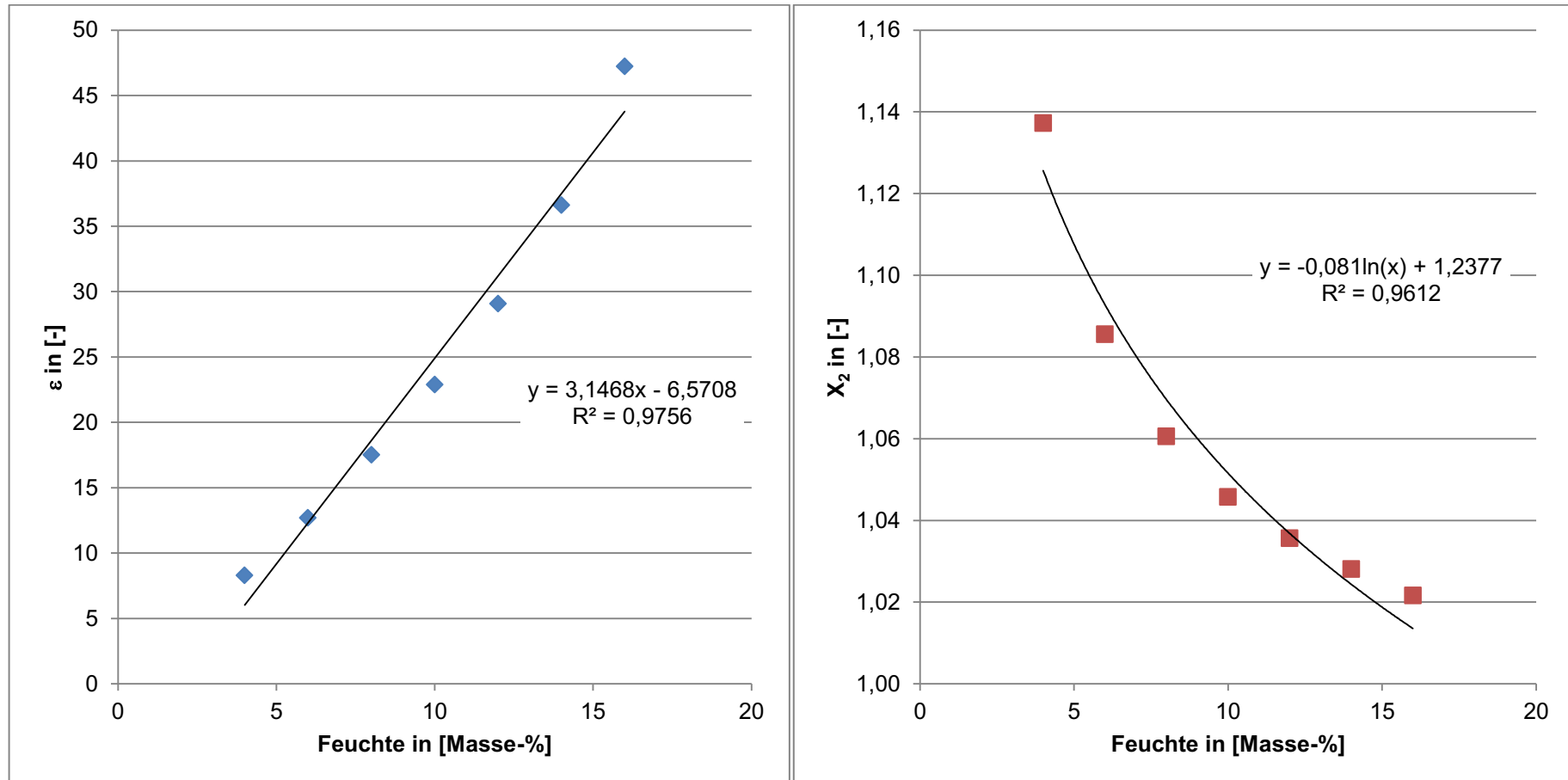
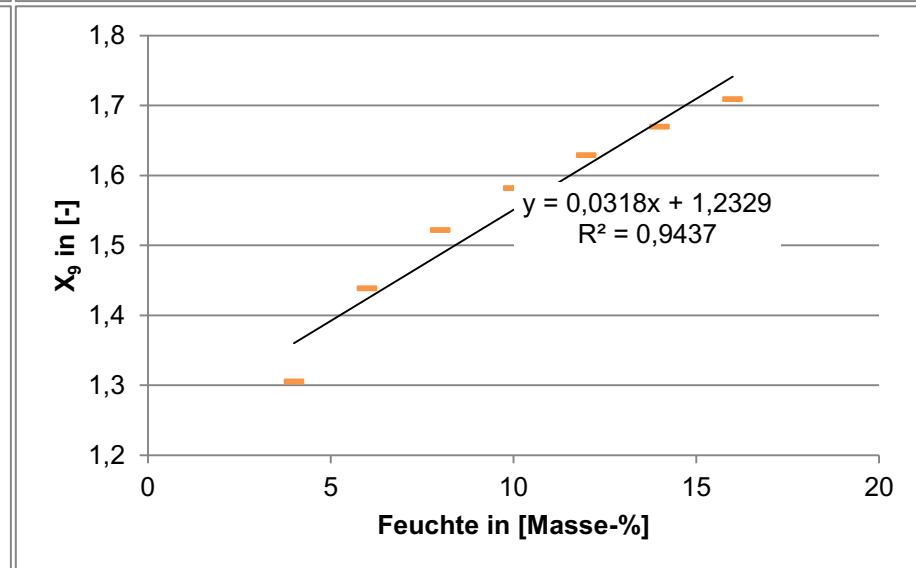
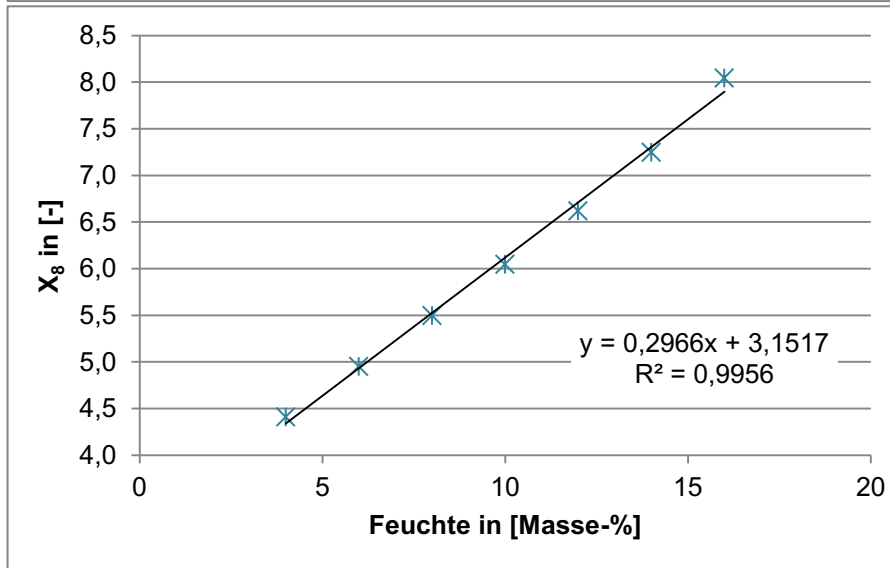
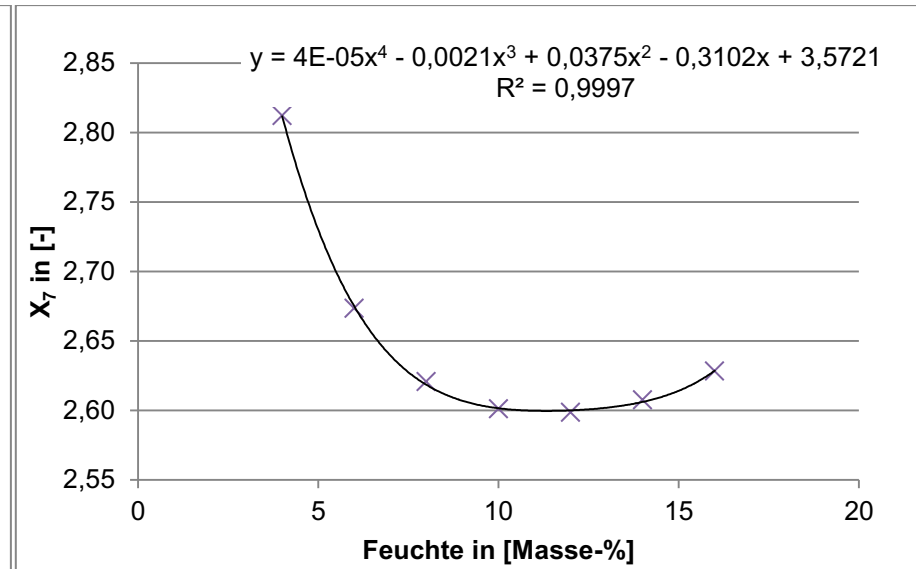
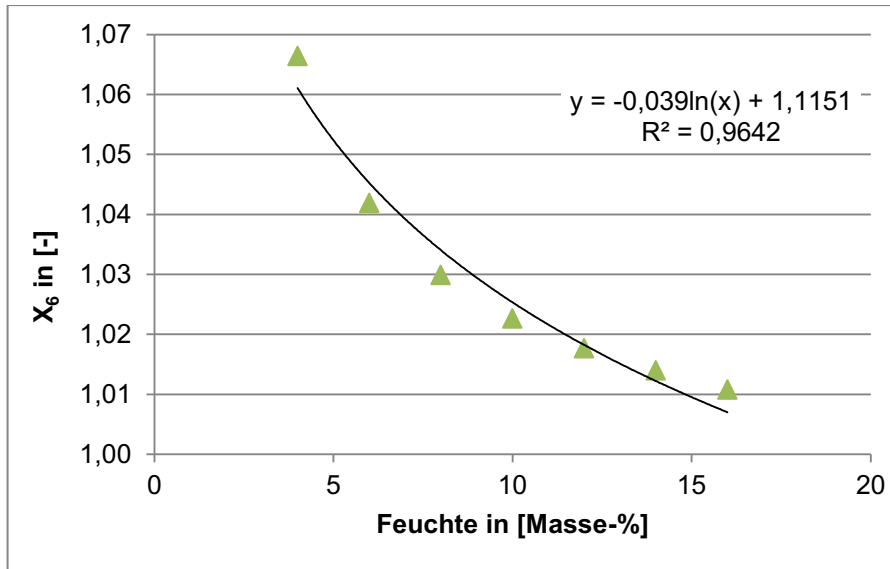


Abbildung 0-8: Diagramme der Funktionen für die Auswertung von Sojabohnen bei 2,45 GHz.

iv. Ad Methodik Nr. 3 (Eisenerz)

In folgender Abbildung 0-9 wurden alle Diagramme, welche bei der Auswertung von Eisenerz über die Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten über Kapazitätsmessung erstellt wurden, zusammengefasst.





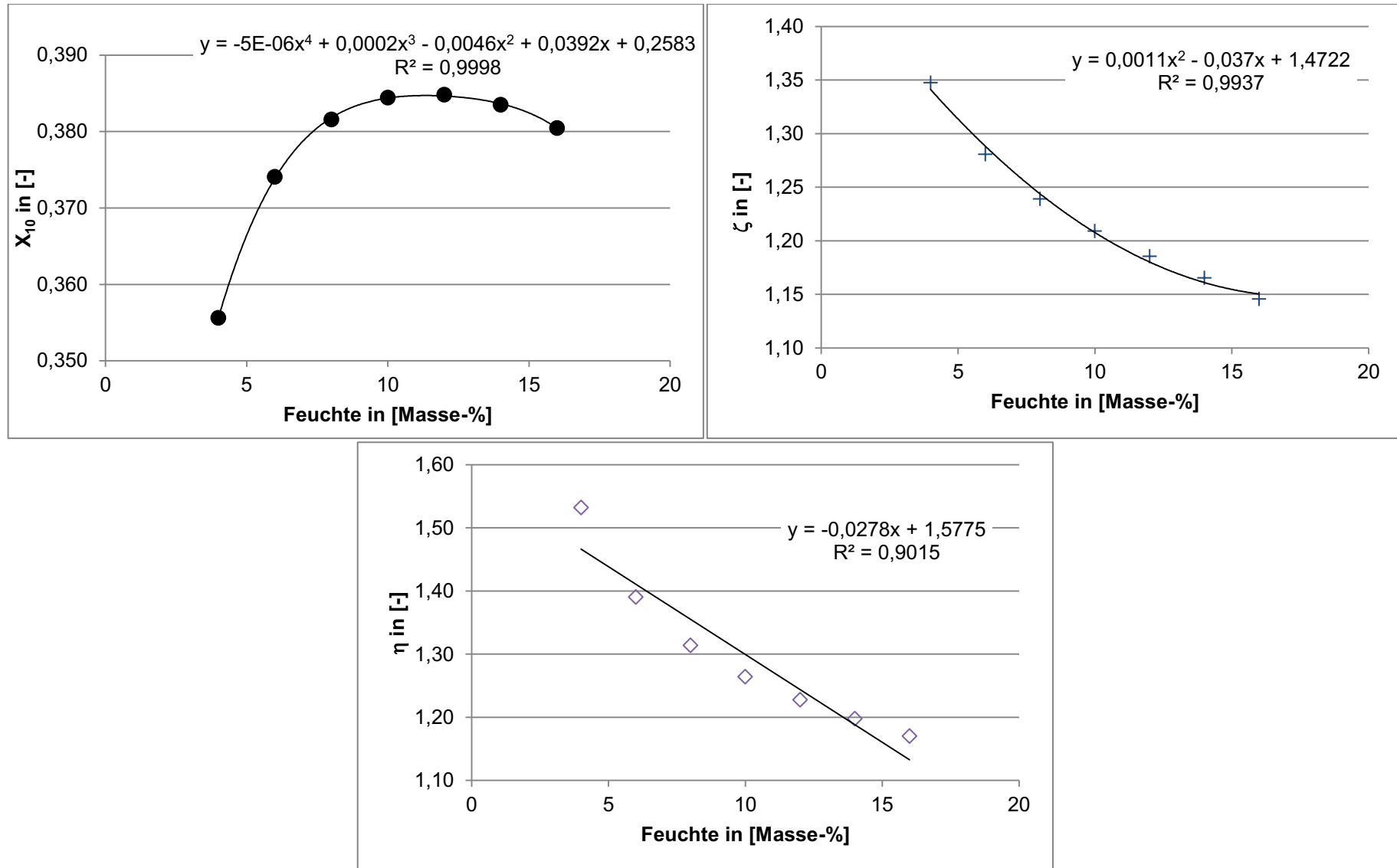
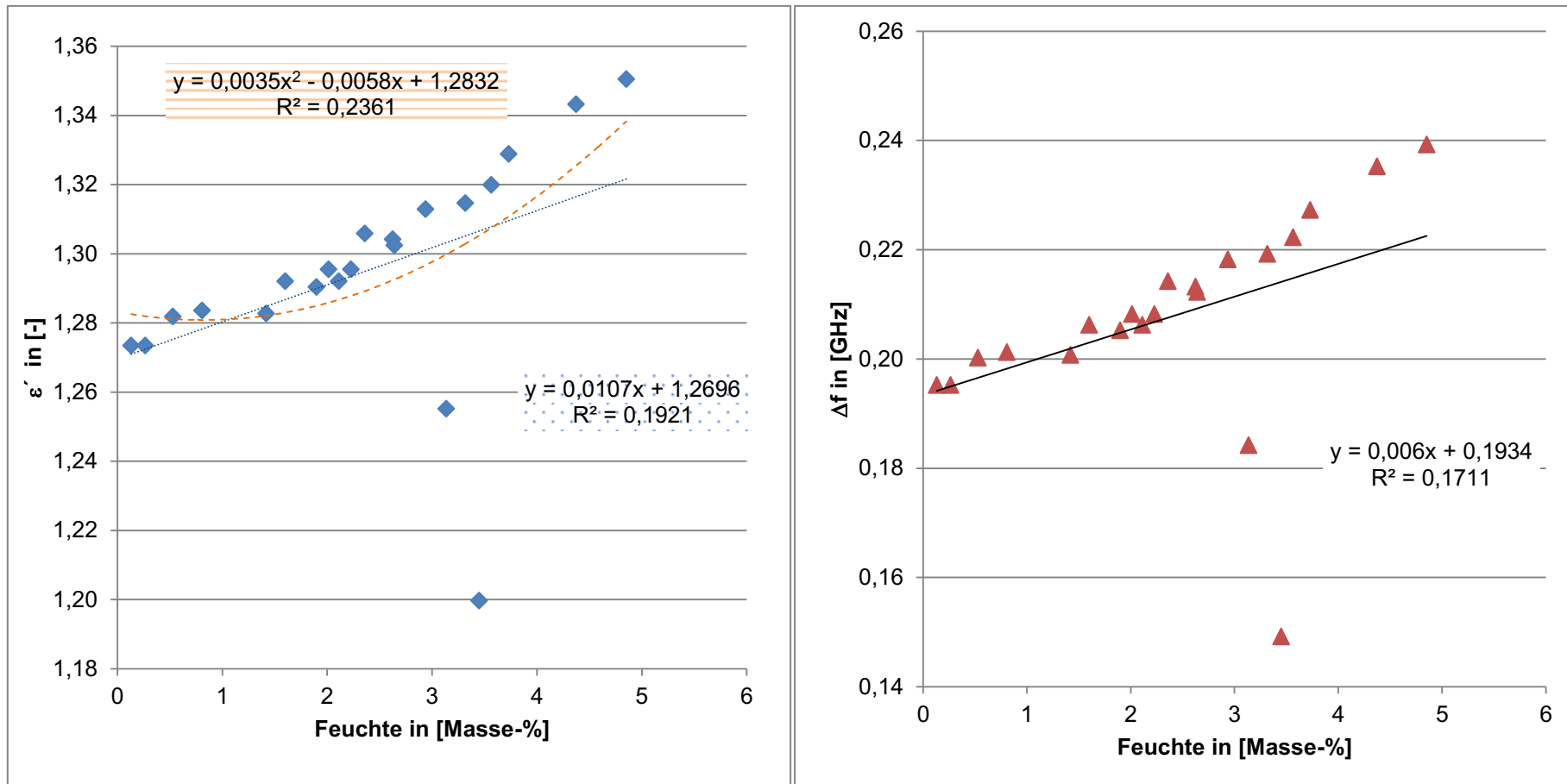
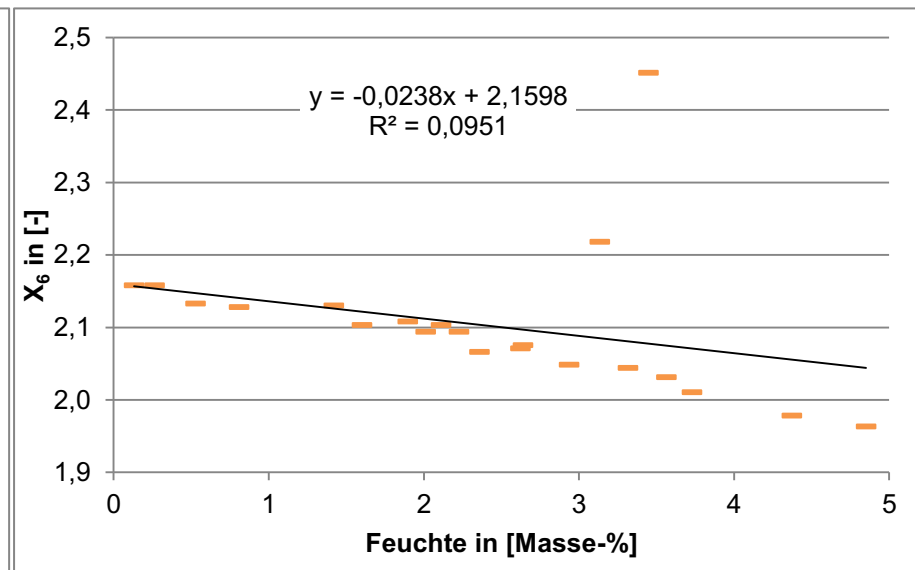
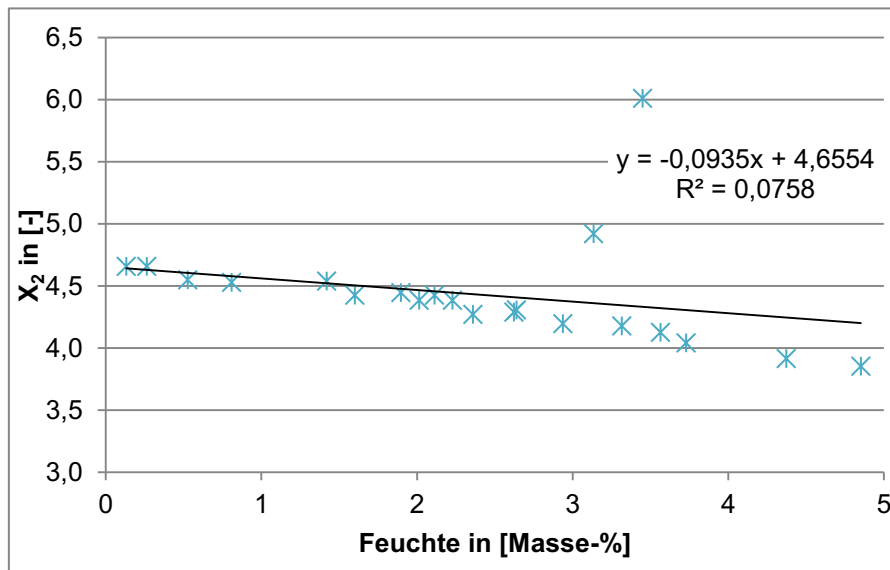
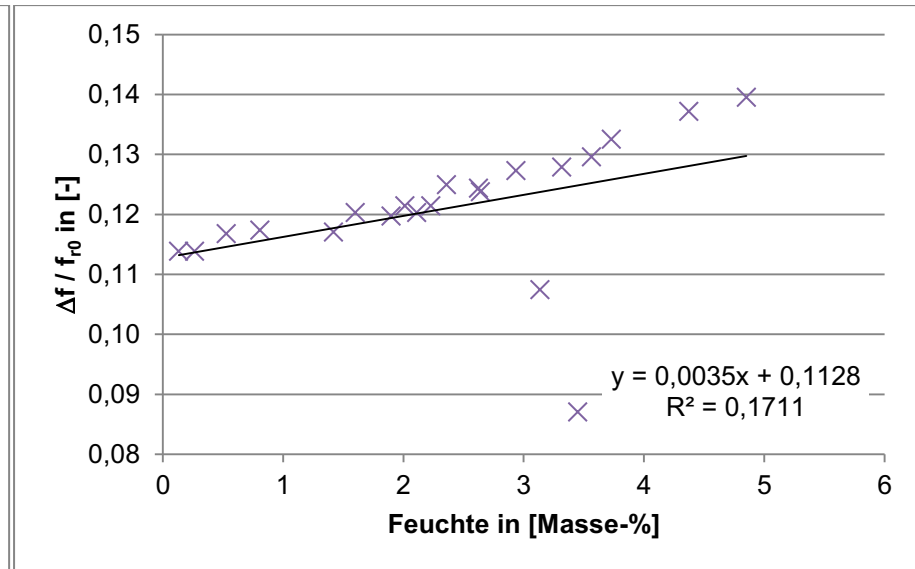
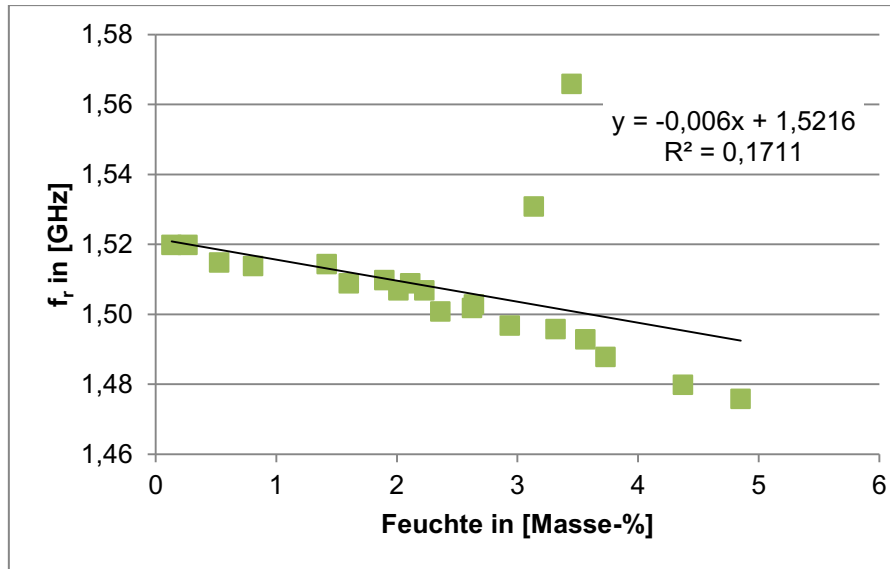


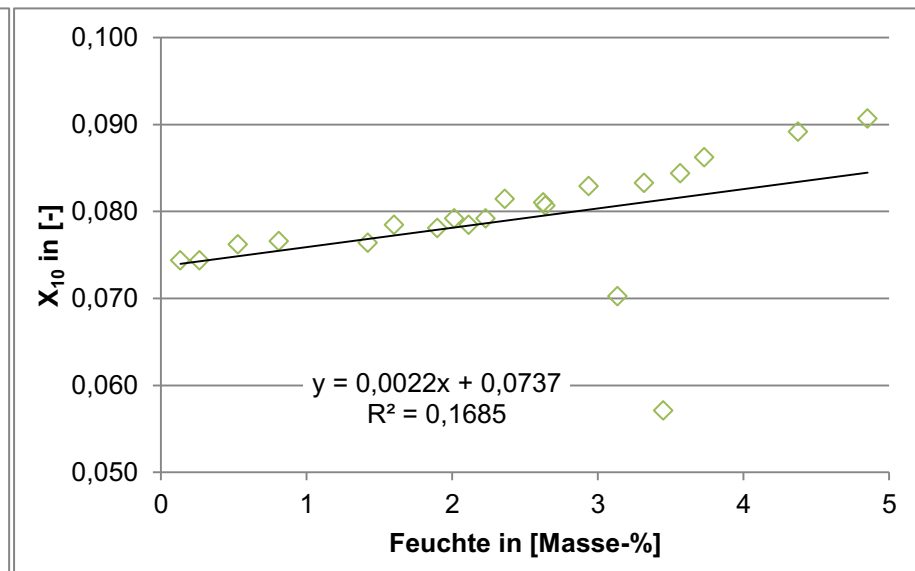
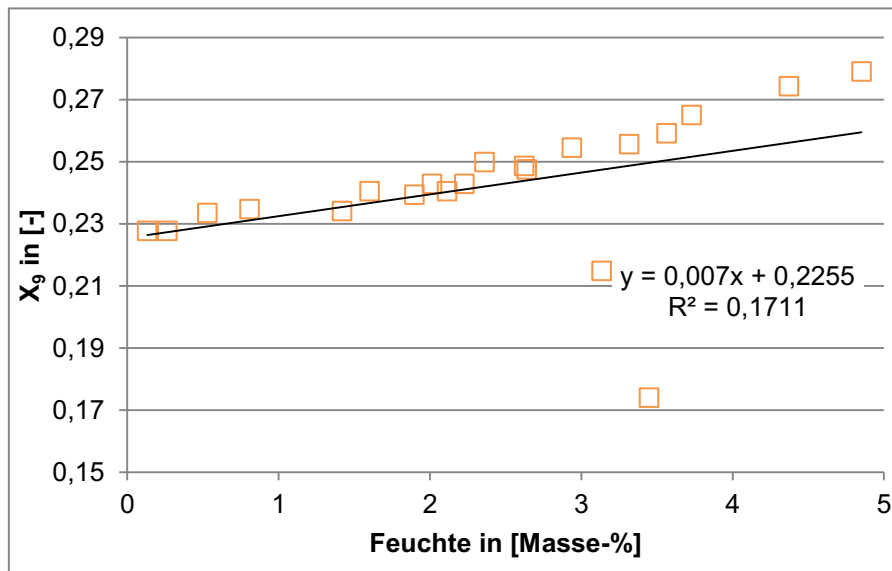
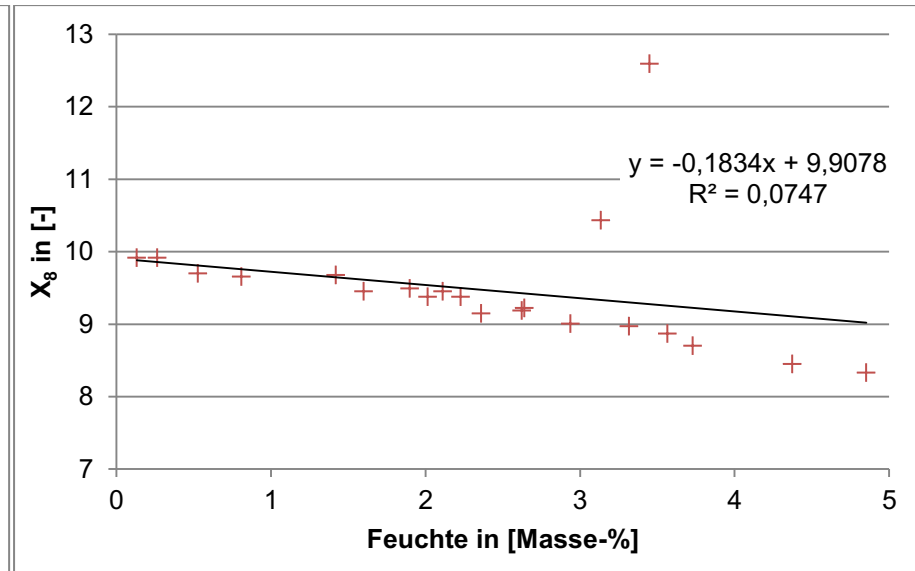
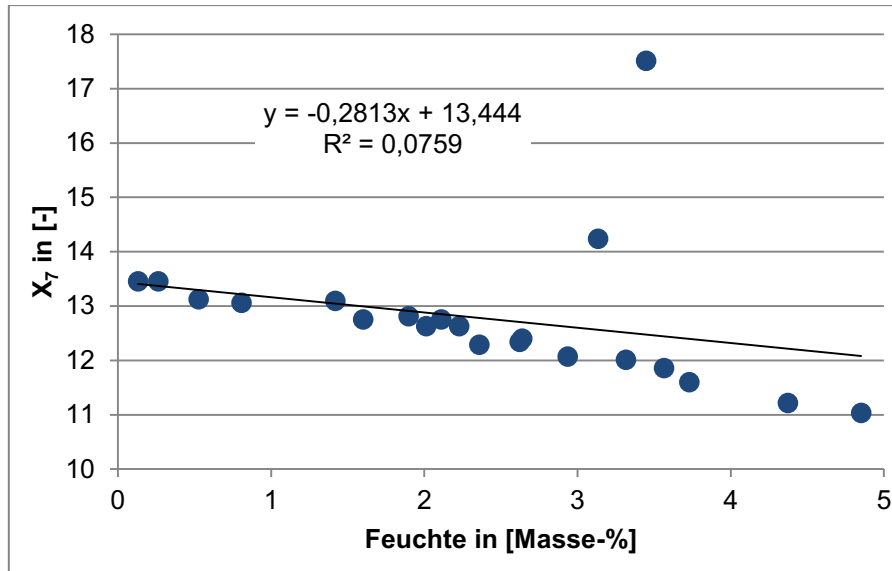
Abbildung 0-9: Diagramme der Funktionen für die Auswertung von Eisenerz über die bei einer Kapazitätsmessung bestimmten Dielektrizitätskonstanten.

v. Ad Methodik Nr. 4 (Beton)

In folgender Abbildung 0-10 wurden alle Diagramme, welche bei der Auswertung von Beton über die Resonator-Messung zusammengefasst.







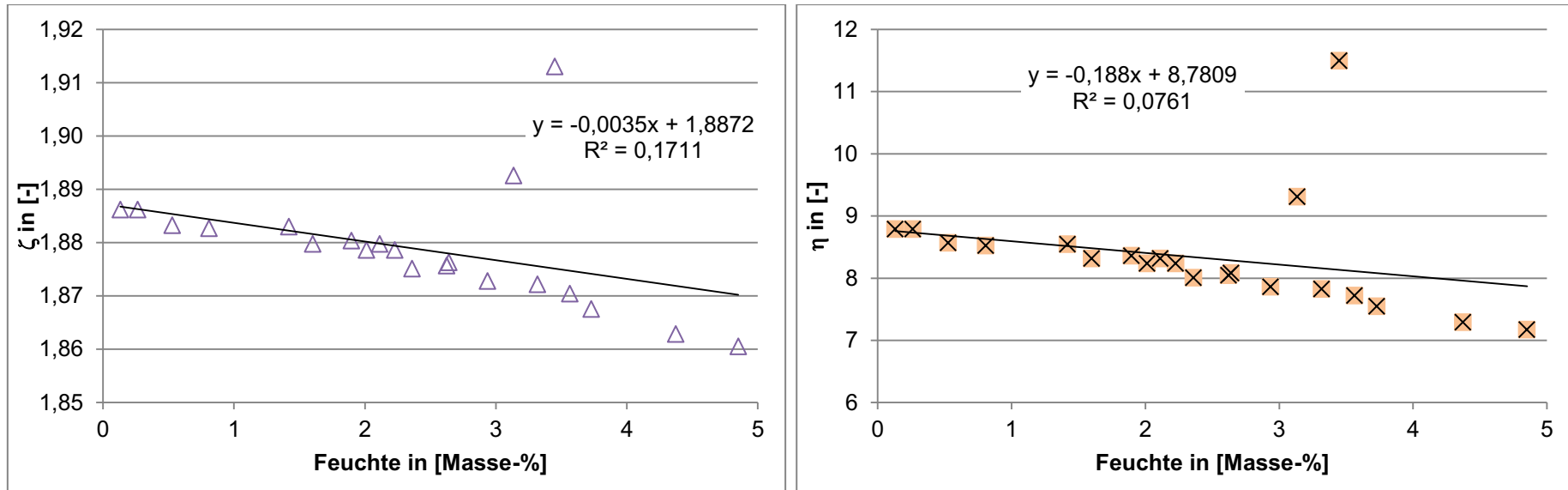
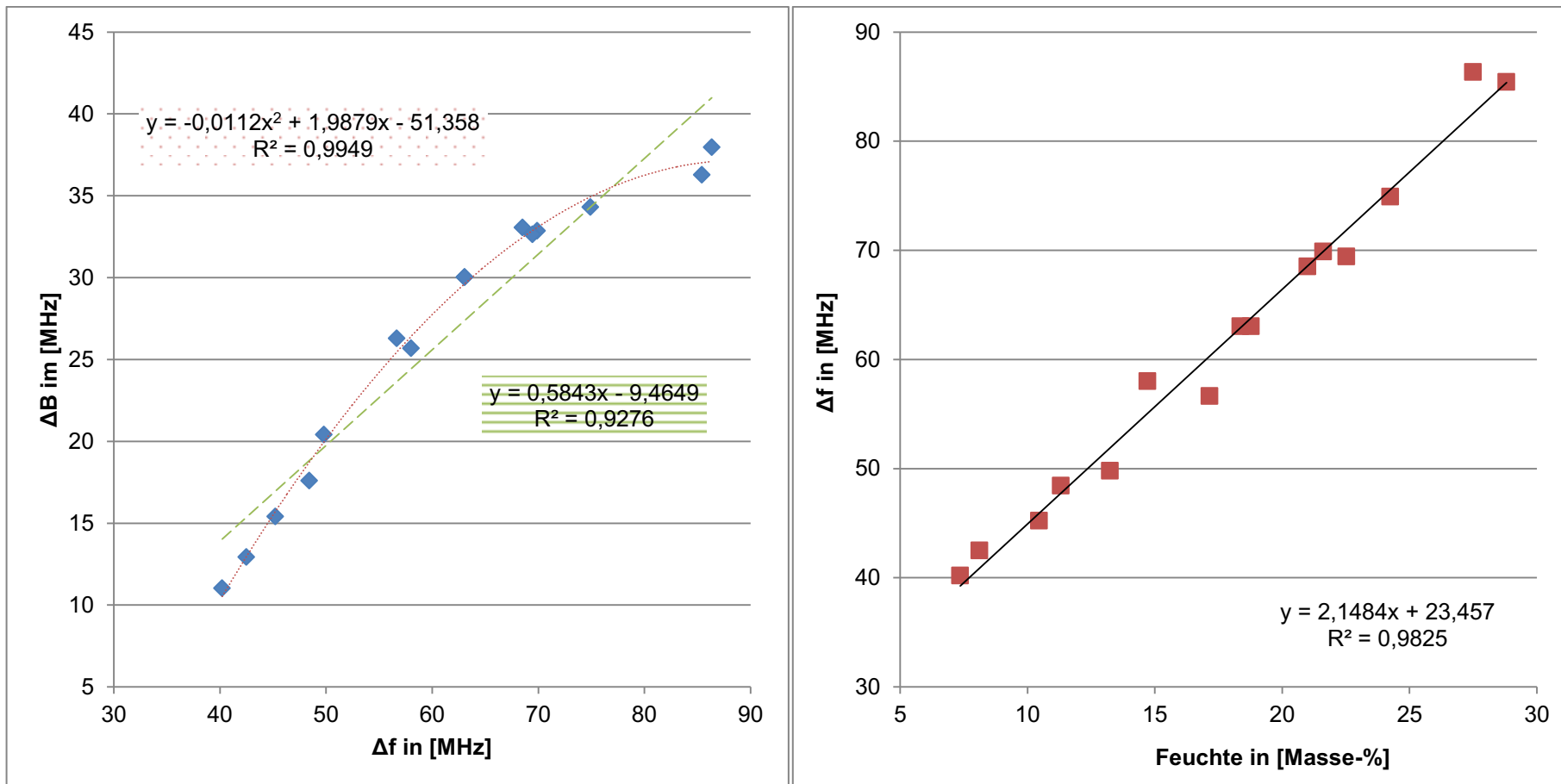
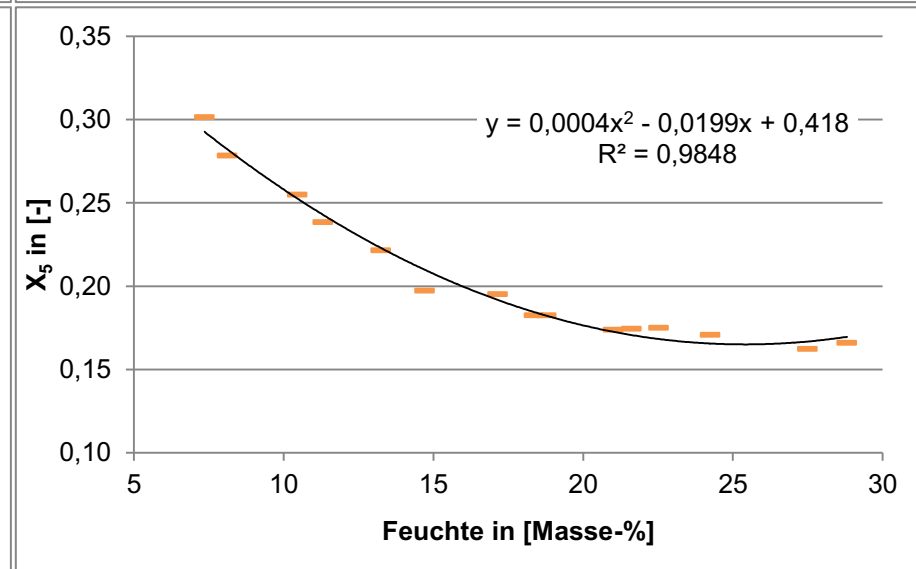
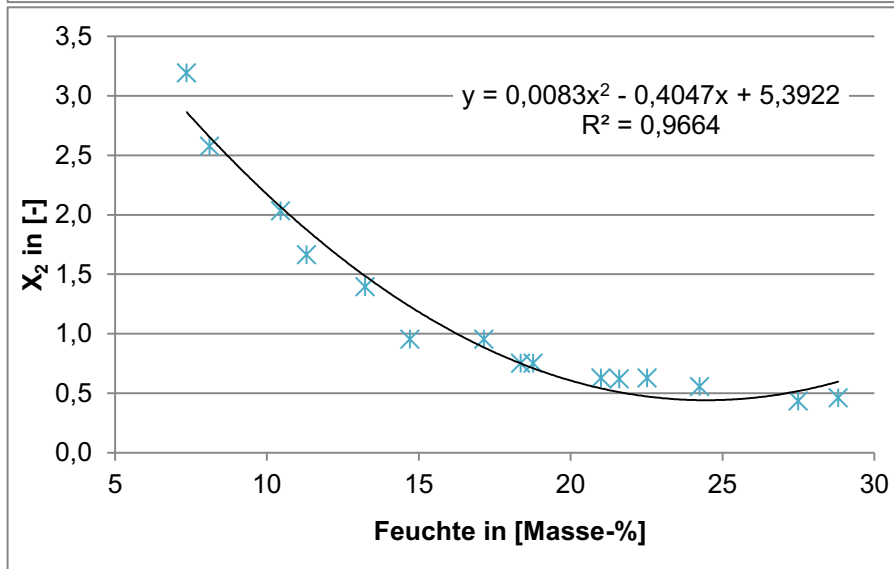
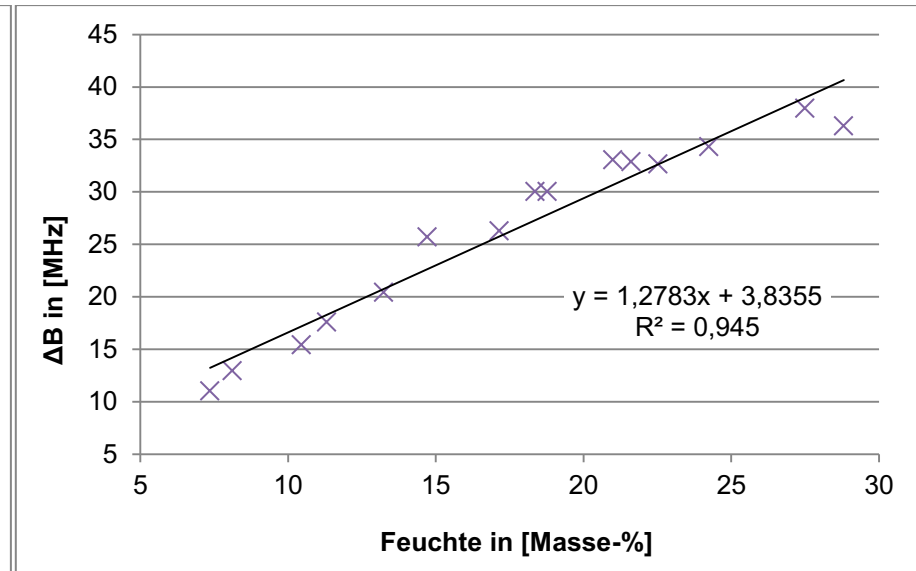
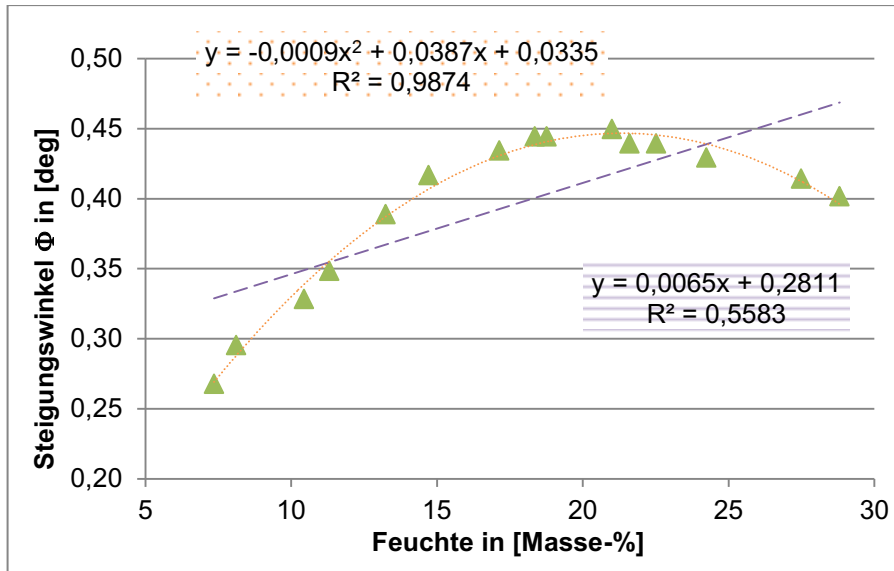


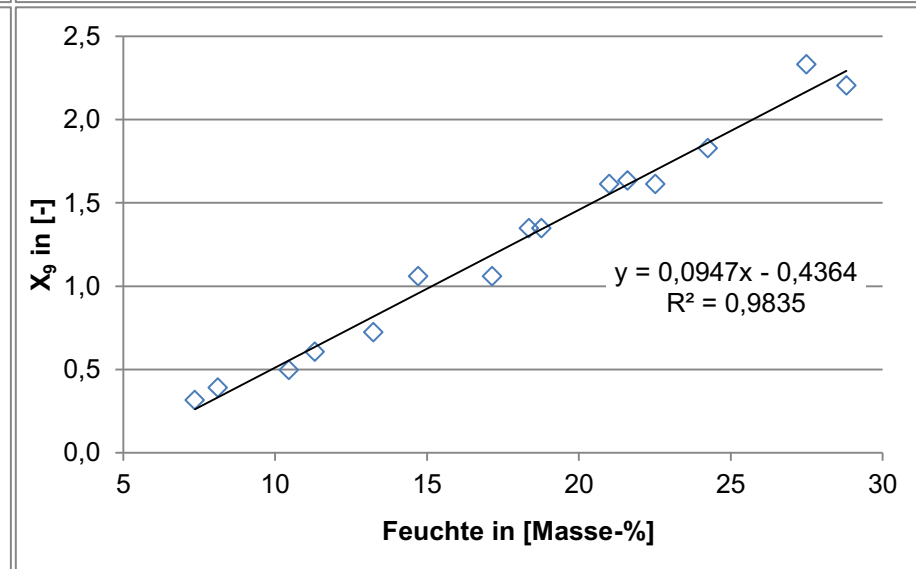
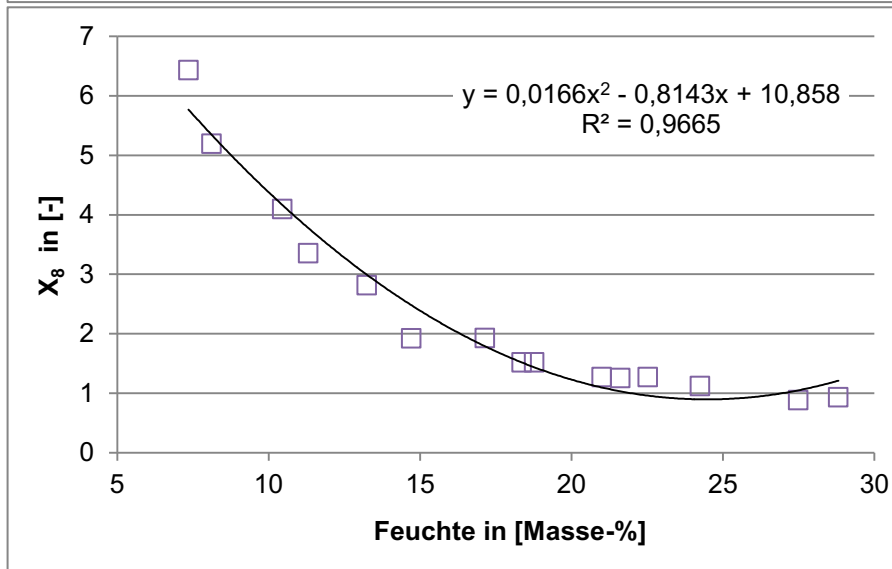
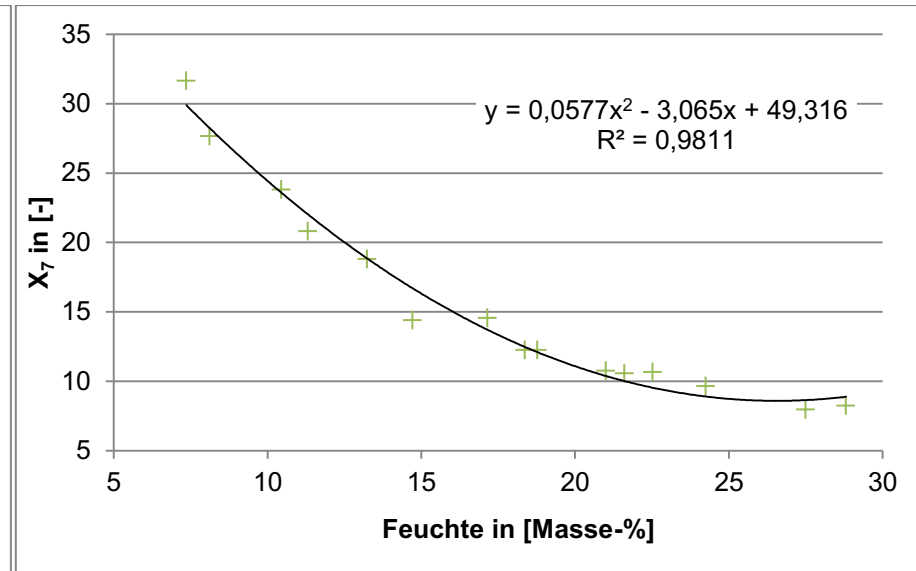
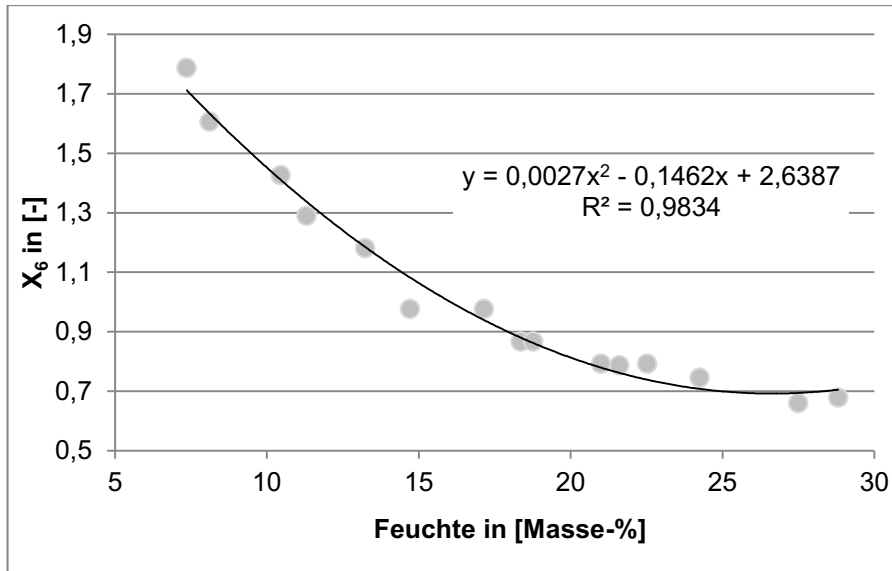
Abbildung 0-10: Diagramme der Funktionen für die Auswertung von Beton über die Resonator-Messung.

vi. Ad Methodik Nr. 5 (Weizen)

In folgender Abbildung 0-11 wurden alle Diagramme, welche bei der Auswertung von Weizen über die Resonator-Messung zusammengefasst.







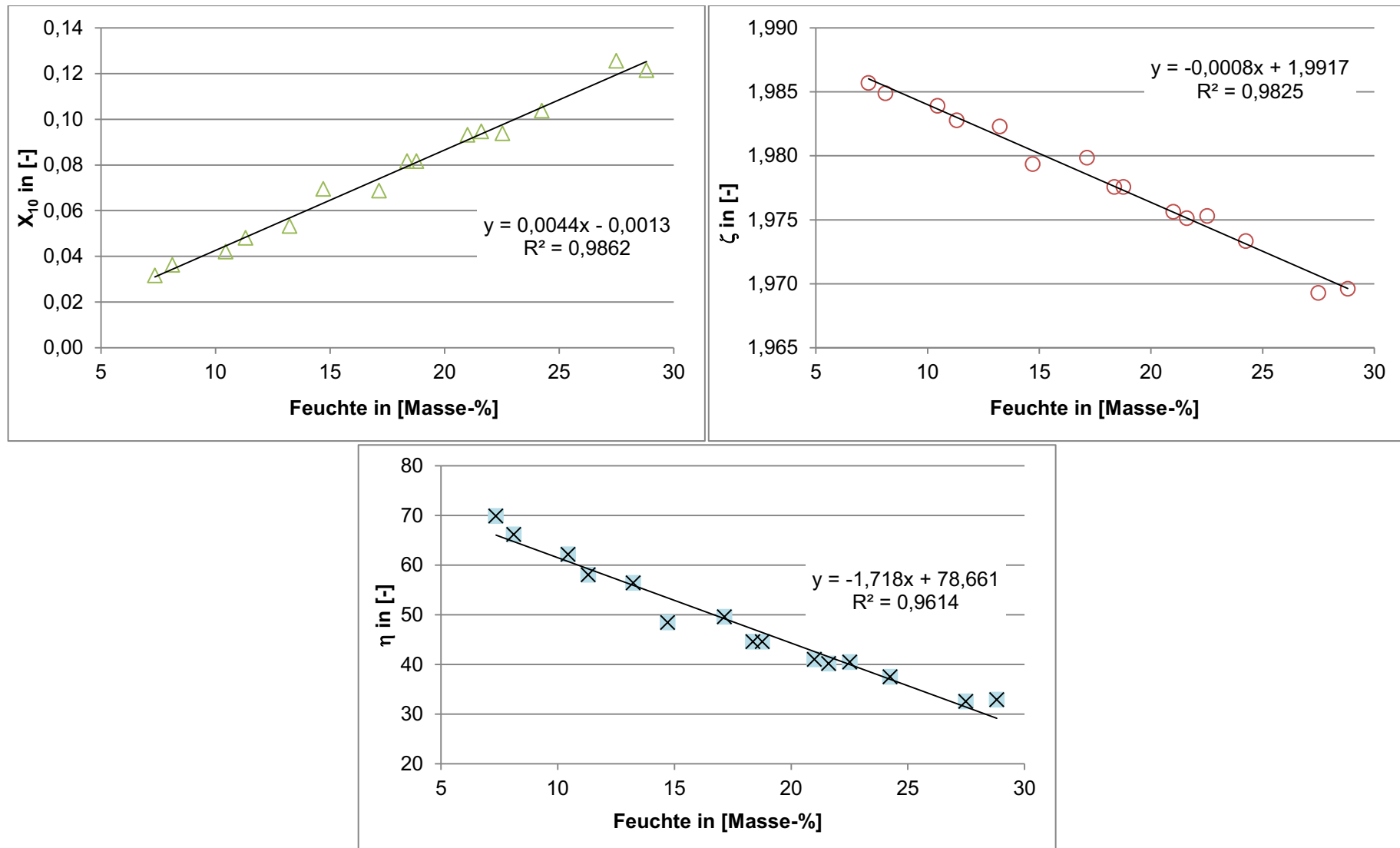


Abbildung 0-11: Diagramme der Funktionen für die Auswertung von Weizen über die Resonator-Messung.