

Untersuchungen zur Qualitätsbeschreibung von Lebensmitteln mittels berührungsloser Leitfähigkeitsmessung

Frank Euring

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Horst-Christian Langowski

Prüfer der Dissertation:

1. Priv.-Doz. Dr.-Ing. Winfried Ruß
2. Prof. Dr.-Ing. Uwe Grupa
(Hochschule Fulda)
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietrich Knorr
(Technische Universität Berlin)
4. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heiko Briesen

Die Dissertation wurde am 16.05.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 08.01.2013 angenommen.

I. Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Lebensmittelverfahrenstechnik im Fachbereich Lebensmitteltechnologie der Hochschule Fulda. Die Finanzierung der Arbeit wurde durch das Förderprogramm des Bundesministerium für Bildung und Forschung AIF- FHprofUnd (2007) mit dem Projekttitel „Impedanzspektroskopie für die In-Line-Prozessanalytik in der Qualitätsüberwachung von Lebensmitteln“ (FK 1746A07) ermöglicht.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Uwe Grupa für die Überlassung des Themas, die sehr guten Arbeitsbedingungen und sein Vertrauen, meine Ideen während meiner Tätigkeit an der Hochschule Fulda selbstständig und eigenverantwortlich zu verfolgen.

Meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Winfried Ruß danke ich für die Möglichkeit bei ihm zu promovieren und für die Betreuung sowie die hilfreichen Diskussionen über meine Arbeit.

Auch meinen weiteren Prüfern sowie dem Prüfungsvorsitzenden danke ich für die Übernahme des jeweiligen Amtes.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Winfried Wilke und seinem Team danke ich für die vielen hilfreichen Tipps und die hervorragende Zusammenarbeit während der gesamten Projektlaufzeit.

Den Diplomanden, Bacheloranden und wissenschaftlichen Hilfskräften danke ich für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuchsreihen.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Mitstreitern Christoph Luckhardt, Jens Herrmann, Michael Wenzel und Nicole Müller, die bei allem Stress auch den Spaß nicht zu kurz kommen ließen.

Zum Schluss gilt mein Dank allen hier nicht genannten Personen, die mich während meiner Doktorarbeit, in welcher Form auch immer, unterstützt haben.

II. Inhaltsverzeichnis

I. DANKSAGUNG	I
II. INHALTSVERZEICHNIS	II
III. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IV
IV. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	V
V. TABELLENVERZEICHNIS	VIII
1 ZUSAMMENFASSUNG	1
2 SUMMARY	3
3 EINLEITUNG	5
4 AUFGABENSTELLUNG	7
5 GRUNDLAGEN	9
5.1 Grundlagen der Impedanzspektroskopie	9
5.2 Aufbau und Messprinzip der induktiven Impedanzmesstechnik	13
5.2.1 Aufbau des induktiven Impedanzmesssystems	14
5.2.2 Messprinzip des induktiven Impedanzmesssystems	16
5.2.3 Vergleich zwischen konduktiver und induktiver Messung	21
5.3 Impedanzspektroskopie von pflanzlichen Lebensmitteln	23
5.4 Äpfel als Rohmaterial für die Fruchtsaftherstellung	27
5.4.1 Der Qualitätsbegriff allgemein	27
5.4.2 Äpfel als Rohware	27
5.4.3 Anforderungen an die Qualität von Äpfeln als Rohmaterial	28
5.4.4 Die Reife von Äpfeln	28
5.4.5 Frische und Sauberkeit von Äpfeln	31
5.4.6 Parasitärer Verderb von Äpfeln	31
5.4.7 Nichtparasitärer Verderb von Äpfeln	33
6 MATERIAL UND METHODEN	34
6.1 Das induktive Impedanzmesssystem	34
6.2 Probenmaterial	35
6.3 Messungen zur Entwicklung der Messmethode	37
6.3.1 Messungen zum Einfluss der Position der Probe	37
6.3.2 Messungen zum Einfluss der Probentemperatur	38
6.3.3 Messungen zum Einfluss der geometrischen Probenform und der Probenmasse	39
6.4 Ermittlung von Apfelprofilen und Messung des Einflusses der Apfelsorte	43
6.5 Messungen zur Beschreibung der Fruchtsafttauglichkeit von Äpfeln	43
6.6 Messungen zur Ermittlung des Einflusses des Nachreifeverhaltens	45
6.7 Messungen zur Änderung des Wassergehaltes der Äpfel	45

6.8	Ermittlung des Einflusses von definierter Zellzerstörung	46
6.8.1	Einfrieren von Apfelproben	46
6.8.2	Ermittlung des Einflusses von Enzymbehandlungen von Apfelproben	46
6.9	Ermittlung des Einflusses von Fäulnisbefall	47
6.9.1	Versuche zur Ermittlung des Einflusses von definierter Oberflächenfäule und Kernfäule	47
6.9.2	Versuche zur Ermittlung des Einflusses von nicht definierter Fäulnis	49
6.10	Statistische Auswertung	50
7	ENTWICKLUNG DER MESSMETHODE	51
7.1	Einfluss der Position der Probe auf die Messergebnisse	51
7.2	Einfluss der Temperatur auf die Messergebnisse	58
7.3	Einfluss der geometrischen Probenform und der Probenmasse auf die Messung	62
7.4	Zusammenfassende Betrachtung der Methodenentwicklung	76
8	VALIDIERUNG DER ENTWICKELTEN MESSMETHODE ZUR BESCHREIBUNG DER FRUCHTSAFTTAUGLICHKEIT VON ÄPFELN	77
8.1	Einfluss der Apfelsorte auf die Messergebnisse	77
8.2	Einfluss des Nachreifeverhaltens auf die Messergebnisse	79
8.3	Einfluss der Veränderung des Wassergehaltes	80
8.4	Einfluss von definierter Zellzerstörung auf die Messergebnisse	82
8.4.1	Einfluss von Gefrier-Tau-Zyklen auf den elektrischen Qualitätskennwert	82
8.4.2	Einfluss von Enzymbehandlungen an Äpfeln auf den elektrischen Qualitätskennwert	83
8.5	Einfluss von Fäulnisbefall auf die Messergebnisse	85
8.5.1	Definierte Oberflächenfäule	85
8.5.2	Kernfäule	88
8.5.3	Nicht definierte Fäulnis	90
9	DISKUSSION	93
9.1	Methodenentwicklung	93
9.1.1	Einfluss der Probenposition auf die Messungen	93
9.1.2	Einfluss der Probentemperatur auf die Messungen	94
9.1.3	Messung des Einflusses der geometrischen Probenform und der Probenmasse	95
9.1.4	Abschließende Betrachtung der entwickelten Messmethode	96
9.2	Validierung der entwickelten Methode	98
9.2.1	Beeinflussung der Messmethode durch die Apfelsorte	98
9.2.2	Beeinflussung der Messmethode durch Nachreifung der Äpfel	102
9.2.3	Messung der Veränderung des Wassergehaltes mit der entwickelten Methode	103
9.2.4	Messung von definierten Zellzerstörungen mit der entwickelten Methode	105
9.2.5	Messung von Fäulnisbefall der Äpfel mit der Methode	109
10	FOLGERUNG	114
11	LITERATURVERZEICHNIS	116

III. Abkürzungsverzeichnis

Lateinische Symbole

\hat{I}	maximale Stromstärke	[A]
f	Frequenz	$[\frac{1}{s}]$
p	Wahrscheinlichkeit für Nullhypothese	
R ²	Bestimmtheitsmaß	
s	Standardabweichung	
Q _{el}	elektrischer Qualitätskennwert	
Y	Admittanz	[S]
Z	komplexe Impedanz	[Ω]
Z'	Realteil der Impedanz	[Ω]
Z''	Imaginärteil der Impedanz	[Ω]

Griechische Symbole

μ	arithmetischer Mittelwert	
α	Irrtumswahrscheinlichkeit	
ΔU	Veränderung der Amplitude zwischen Empfänger und Sendesignal	[V]
ε	komplexe Permittivität	$[\frac{A \cdot s}{V \cdot m}]$
σ	komplexe elektrische Leitfähigkeit	$[\frac{S}{m}]$

Indizes

0	Amplitude
A	Kanal A
B	Kanal B
B,berechnet	berechneter Messwert von Kanal B
max	Maximum
Sender	Sendespule
Empfänger	Empfängerspule
Probe	gemessene Probe

IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 5-1: Zeigerdiagramm der komplexen Impedanz. Vergleiche [19].	10
Abbildung 5-2: Schematisches Frequenzspektrum eines biologischen Gewebes mit den charakteristischen Relaxationen. Dargestellt ist der Verlauf der Permittivität über die Frequenz. Vergleiche [26].	11
Abbildung 5-3: Prinzip der konduktiven Messung mit einem Zwei-Elektroden-System und einen Apfel als Probe.	13
Abbildung 5-4: Schematische Darstellung des induktiven Impedanzmesssystems.	15
Abbildung 5-5: Exemplarischer Spannungsverlauf von Sende- und Empfängerspule.	17
Abbildung 5-6: Das Integral von 0 bis T_2 über die Empfängerspannung führt zu $U_A(t)$.	17
Abbildung 5-7: Das Integral von T_4 bis $3T_4$ über die Empfängerspannung führt zu $U_B(t)$.	18
Abbildung 5-8: Zeitlicher Verlauf von $U_A(t)$ und $U_B(t)$ bei einem Durchlauf durch das induktive Impedanzmesssystem.	21
Abbildung 5-9: Messprinzip einer konduktiven Messung.	22
Abbildung 5-10: Messprinzip einer Messung mit dem induktiven Impedanzmesssystem.	22
Abbildung 5-11: Stärkeabbau von Äpfeln sowie der dazugehörige Stärkeabbauwert [63].	30
Abbildung 6-1: Das induktive Impedanzmesssystem auf Basis des MDP-H-25x20 (Sartorius Mechatronics GmbH, Aachen).	35
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des verwendeten induktiven Impedanzmesssystems.	38
Abbildung 6-3: Messpositionen bei quadratischer Querschnittsfläche.	40
Abbildung 6-4: Messpositionen bei nichtquadratischer Querschnittsfläche.	40
Abbildung 6-5: Apfel vor blauem Hintergrund und das daraus berechnete Schwarz-Weiß-Bild.	42
Abbildung 6-6: Die unterschiedlichen Messpositionen der Äpfel.	43
Abbildung 6-7: Die unterschiedlichen Messpositionen der Äpfel für die Versuche mit nicht definierten Fäulniseregen.	49
Abbildung 7-1: Veränderung von $U_{0,max}$ in Abhängigkeit der Messposition.	52

Abbildung 7-2: Veränderung der Phasendifferenz in Abhängigkeit der Messposition.	53
Abbildung 7-3: Veränderung von U_A in Abhängigkeit der Messposition.	55
Abbildung 7-4: Veränderung von U_B in Abhängigkeit der Messposition.	56
Abbildung 7-5: Veränderung von $U_{0,max}$, φ , U_A und U_B bei unterschiedlichen Temperaturen.	59
Abbildung 7-6: Streudiagramm-Matrix der elektrischen Parameter, der Massen und der Abmessungen der Apfelquader.	62
Abbildung 7-7: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche der Apfelquader.	64
Abbildung 7-8: Streudiagramm-Matrix der elektrischen Parameter, der Massen und der Abmessungen der Apfelzylinder.	65
Abbildung 7-9: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche der Apfelzylinder.	67
Abbildung 7-10: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse der Apfelzylinder.	69
Abbildung 7-11: Streudiagramm-Matrix der elektrischen Parameter, der Massen und der Querschnittsfläche der Äpfel.	70
Abbildung 7-12: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche der Äpfel.	71
Abbildung 7-13: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse der Äpfel.	73
Abbildung 7-14: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B , berechnet aus den Durchschnittswerten aller Messpositionen, in Abhängigkeit der Masse der Äpfel.	75
Abbildung 8-1: Q_{el} bei unterschiedlichen Wasserverlusten Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.	81
Abbildung 8-2: Q_{el} in Abhängigkeit des verflüssigten Massenanteils der Äpfel.	83
Abbildung 8-3: Q_{el} bei unterschiedlichen verflüssigten Massenanteilen. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.	84
Abbildung 8-4: Mit <i>Penicillium expansum</i> befallener Apfel. Faulanteil 27,9% Massenanteil.	85
Abbildung 8-5: Q_{el} in Abhängigkeit des Faulanteils bei Oberflächenfäule.	86
Abbildung 8-6: Q_{el} bei unterschiedlichen Faulanteilen bei Oberflächenfäule. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.	88
Abbildung 8-7: Q_{el} in Abhängigkeit des Kernfäuleanteils.	89

Abbildung 8-8: Q_{el} bei unterschiedlichen Kernfäuleanteilen. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.	90
Abbildung 8-9: Q_{el} in Abhängigkeit des Faulanteils bei nicht definierter Fäule.	91
Abbildung 8-10: Q_{el} bei unterschiedlichen Faulanteilen bei nicht definierter Fäule. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.	92
Abbildung 9-1: Streudiagramm-Matrix der Qualitätsparameter und Q_{el} von Äpfeln verschiedener Sorten.	99

V. Tabellenverzeichnis

Tabelle 5-1: Stoll tabelliert wichtige Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Äpfeln unter Berücksichtigung der Sortenvariabilität sowie deren Streubreiten wie folgt [10].	28
Tabelle 6-1: verwendete Apfelsorten; 1 = Methodenentwicklung; 2 = Apfelprofilmessungen; 3 = Fäulnisversuche; 4 = Reifeversuche; 5 = Austrocknungsversuche; 6 = Enzymversuch; 7 = Kernfäule; 8 = Einfrierversuche; A = Baumschule Leinweber, Niederkalbach; B = Streuobstlehrpfad Adam Zentgraf, Hausen/Rhön; C = Einzelhandel; a = sofort nach der Ernte; b = gelagert.	36
Tabelle 6-2: Abmessungen und Massen der verwendeten Apfelquader.	40
Tabelle 6-3: Abmessungen und Massen der verwendeten Apfelzylinder.	41
Tabelle 7-1: $U_{0,max}$ in Abhängigkeit der Messposition ($n = 15$) – unterschiedliche Buchstaben hinter dem Messwert zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).	52
Tabelle 7-2: Phasendifferenz in Abhängigkeit der Messposition ($n = 15$) – unterschiedliche Buchstaben hinter dem Messwert zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).	54
Tabelle 7-3: U_A in Abhängigkeit der Messposition ($n = 15$) – unterschiedliche Buchstaben hinter dem Messwert zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).	55
Tabelle 7-4: U_B in Abhängigkeit der Messposition ($n = 15$) – unterschiedliche Buchstaben hinter dem Messwert zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).	57
Tabelle 7-5: Statistische Auswertung der linearen Regressionsmodelle der Veränderungen der elektrischen Parameter ($U_{0,max}$, φ , U_A , U_B) in Abhängigkeit der Temperatur.	59
Tabelle 7-6: Veränderungen der elektrischen Parameter bei verschiedenen Temperaturen sowie die statistische Auswertung der Versuche ($n = 15$) - unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).	61
Tabelle 7-7: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Apfelquader ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche).	64
Tabelle 7-8: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Apfelzylinder ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche).	67
Tabelle 7-9: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Apfelzylinder ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse).	68
Tabelle 7-10: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Äpfel ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche).	72
Tabelle 7-11: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Äpfel ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse).	73

Tabelle 7-12: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Äpfel berechnet aus den Durchschnittswerten aller Messpositionen ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse).	74
Tabelle 8-1: Zusammenfassung der Messwerte der verwendeten Apfelsorten.	78
Tabelle 8-2: Qualitätseigenschaften von vier verschiedenen Apfelsorten während der Nachreifung bei Raumtemperatur ($n = 4$).	79
Tabelle 8-3: Qualitätsparameter von vier Apfelsorten während der Lagerung bei 40°C .	80
Tabelle 8-4: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlich hohen Wasserverlusten.	81
Tabelle 8-5: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} vor und nach einem Gefrier-Tau-Zyklus ($n = 14$).	82
Tabelle 8-6: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Verflüssigungsgraden.	84
Tabelle 8-7: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Faulgraden bei Oberflächenfäule.	87
Tabelle 8-8: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Kernfäulegraden.	89
Tabelle 8-9: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Faulgraden bei nicht definierter Fäule.	92
Tabelle 9-1: Signifikanz der Korrelation zwischen Q_{el} und Qualitätsparameter von Äpfeln verschiedener Sorten.	99
Tabelle 9-2: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} der einzelnen Apfelsorten mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der arithmetischen Mittelwerte. Rote Markierung bedeutet signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$) zwischen den Apfelsorten.	101
Tabelle 9-3: Elektrischer Qualitätskennwert Q_{el} von vier verschiedenen Apfelsorten während der Nachreifung bei Raumtemperatur ($n = 4$). Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).	102
Tabelle 9-4: Bestimmtheitsmaß und Signifikanz der Korrelation zwischen Q_{el} und Streif-Index für die vier untersuchten Apfelsorten.	103
Tabelle 9-5: Einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte von Q_{el} und unterschiedlich hohe Wasserverluste. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).	104
Tabelle 9-6: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} vor und nach einem Gefrier-Tau-Zyklus ($n = 14$). Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).	106

Tabelle 9-7: Statistische Auswertung des Regressionsmodells Q_{el} in Abhängigkeit des verflüssigten Massenanteils.	107
Tabelle 9-8: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Verflüssigungsgraden sowie der p-Wert aus der Überprüfung der Normalverteilung. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).	108
Tabelle 9-9: Statistische Auswertung des Regressionsmodells Q_{el} in Abhängigkeit des Faulanteils bei Oberflächenfäule.	109
Tabelle 9-10: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Faulgraden bei Oberflächenfäule sowie der p-Wert aus der Überprüfung der Normalverteilung. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).	110
Tabelle 9-11: Statistische Auswertung des Regressionsmodells Q_{el} , in Abhängigkeit des Kernfäuleanteils.	111
Tabelle 9-12: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Kernfäulegraden sowie der p-Wert aus der Überprüfung der Normalverteilung. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).	112
Tabelle 9-13: Statistische Auswertung des Regressionsmodells Q_{el} in Abhängigkeit des Faulanteils bei nicht definierter Fäule.	112
Tabelle 9-14: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Faulgraden bei nicht definierter Fäule sowie der p-Wert aus der Überprüfung der Normalverteilung. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).	113

1 Zusammenfassung

Mit der Impedanzspektroskopie können Beschädigungen von biologischen Zellen gemessen werden. Derartige Messungen können zu qualitativen Aussagen über pflanzliche Gewebeproben verwendet werden. Hierbei erfolgt die Messung meist kontaktiv berührend mit Elektroden. Eine Spannung einer definierten Wechselstromfrequenz wird an die Probe angelegt, der resultierende Stromfluss durch die Probe gemessen. Häufig handelt es sich bei der kontaktiven Messmethode um ein zerstörendes Messverfahren, bei denen die Messposition der Elektroden entscheidend für das Messergebnis ist.

Mittels induktiv arbeitender Messverfahren wäre es möglich berührungslos und zerstörungsfrei zu messen. Bei der angewandten induktiven Impedanzmessung wird eine Sendespule mit dem Strom einer bestimmten Wechselstromfrequenz beaufschlagt. Durch die sich ausbildenden Magnetfelder wird ein Stromfluss in der Probe erzeugt, der über ein weiteres induziertes Magnetfeld eine Spannung in der Empfängerspule verursacht. Diese Spannung stellt das Messsignal dar.

Ziel der Arbeit war die Entwicklung einer Messmethode auf Basis von induktiver Impedanzmesstechnik zur Messung von Spannungen, mit denen pflanzliche Systeme untersucht werden können. Die Versuche wurden mit Äpfeln durchgeführt, die im Hinblick auf deren Fruchtsafttauglichkeit untersucht wurden.

Damit Äpfel für die Fruchtsaftherstellung verwendet werden können, müssen sie voll entwickelt, im passenden Reifezustand, ausreichend frisch und frei von Fäulnis, Verschmutzung sowie Fremdgeruch sein.

Vor der Durchführung von Versuchsreihen zur Bestimmung der Fruchtsafttauglichkeit von Äpfeln wurde eine Messmethode mit dem induktiven Impedanzmesssystem entwickelt. Hierfür wurden zunächst die Parameter ermittelt, welche die Messungen unabhängig von der Fruchtsafttauglichkeit beeinflussen. Die Untersuchungen zeigten, dass die Messung von der Proben temperatur, der Probenmasse, der Probenform und aufgrund der Sensibilitätsverteilung des magnetischen Feldes auch von der Position der Probe im induktiven Impedanzmesssystem beeinflusst wird. Mit diesen Erkenntnissen wurde der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} , der sich aus der Probenmasse und der gemessenen Spannung des Kanals B des verwendeten induktiven Impedanzmesssystems berechnet, eingeführt.

Anschließend wurden Qualitätsmängel an Äpfeln standardisiert erzeugt und deren Einflüsse auf die Messungen mit dem induktiven Impedanzmesssystem ermittelt. Es

wurden dazu Versuche mit unterschiedlichen Apfelsorten, zur Nachreifung, zur Austrocknung, zu Fäulnisbefall und zu definierten Zellzerstörungen mit Enzymbehandlungen und Gefrier-Tau-Zyklen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Messmethode Veränderungen in der Probenleitfähigkeit und den Anteil zerstörter Zellen, die sich durch eine Erhöhung des elektrischen Qualitätskennwertes Q_{el} äußert, detektiert.

Äpfel mit Faulstellen oder sonstigen Beschädigungen der Zellen liefern höhere Spannungssignale als Äpfel mit intakten Zellen. Signifikante Unterschiede wurden zwischen Äpfeln vor und nach einem Gefrier-Tau-Zyklus festgestellt. So erhöhte sich der elektrische Qualitätskennwert aufgrund der Zellzerstörung nach dem Gefrierprozess. Äpfel mit Faulstellen konnten je nach Art des Fäulnisbefalls von 24,1% Massenanteil bis 42,4% Massenanteil Faulanteil statistisch sicher erkannt werden. Äpfel, die mit Enzymen behandelt wurden, konnten ab 10,5% Massenanteil Verflüssigungsgrad von unbehandelten Früchten unterschieden werden. Mit der Versuchsreihe zum Einfluss des Wasserverlustes konnte gezeigt werden, dass eine Erhöhung des elektrischen Qualitätskennwertes Q_{el} mit steigendem Wasserverlust einhergeht. Ab einem Wasserverlust von 14,4% Massenanteil wurde ein Unterschied zu frischen Äpfeln festgestellt. Ein Vergleich der Q_{el} -Werte zwischen Äpfeln verschiedener Sorten zeigte kaum signifikante Unterschiede zwischen den Apfelsorten. Unterschiedliche Reifestadien, Zuckergehalte, Fruchtfleischfestigkeiten, pH-Werte, Stärketest- Messwerte und Streif-Indices beeinflussen den elektrischen Qualitätskennwert Q_{el} nicht.

Die eingesetzte Impedanzmesstechnik arbeitet induktiv, liefert aber trotzdem vergleichbare Aussagen wie konduktiv arbeitende Messverfahren. Mit der entwickelten Impedanzmessmethode kann berührungslos die Fruchtsafttauglichkeit der Äpfel bestimmt werden.

2 Summary

Impedance spectroscopy allows the measurement of biological cell damage and can thus be utilized for quality description of plant tissue. State of the art is the measurement with conductive electrodes, which requires direct contact of sample and measurement device. An AC voltage with a specified frequency is applied to the sample, whereas the resulting current flow through the sample is measured. The position of the measurement electrodes is crucial for the result and is usually attended by partial destruction of the sample.

Inductive methods in contrast facilitate non-destructive and contactless measurement of electrical properties. Within this work a particular AC frequency is applied to a transmitting coil, which allows inductive measurements by the induction of a magnetic field. This produces a current flow within the sample and in turn causes an additional magnetic field, which induces a voltage at the receiver coil. The resulting voltage represents the measurement signal.

The objective of this work was the development of a measurement method based on inductive impedance measurement technique for the evaluation of induced voltages in plant systems. The experimentation was conducted using the example of apples and their applicability for fruit juice production.

The fruit juice production demands apples, which are fully developed, in an appropriate state of maturity, sufficient fresh and free from decay, dirt and foreign odors.

Prior to the qualitative description of the apples a measurement method with an inductive impedance measurement system was developed. Therefore all potential influencing factors, which could affect the measurement results regardless to apple quality, were identified. These factors comprehend temperature, sample mass and sample shape. In addition the sample position in the inductive measuring system was identified as influencing parameter, due to inconsistencies in the sensitivity distribution of the magnetic field. The observed results were considered in an electrical quality parameter Q_{el} , which is calculated based on the sample mass and the measured voltage of channel B of the inductive impedance measurement system. Subsequently, apples with standardized defects were produced and the corresponding effects on the measurements with the inductive impedance measurement system were investigated. Therefore apple cultivars, ripening stages, dehydration, decay and defined cell damage with enzyme treatments and freeze-

thaw cycles were varied. It was shown that the developed measurement method detects changes in the sample conductivity and the proportion of damaged cells, which is indicated by an increase of the electrical quality parameter Q_{el} .

Apples with decay or other cell damages result in higher voltage signals compared to apples with intact cells. Significant differences were found between apples before and after a freeze-thaw cycle. Thus, the electrical quality parameter increased due to the cell destructions after the freezing process. Apples with decay could be significantly detected depending on the type of mold damage starting from 24,1% mass portion to 42,4% mass portion decayed part. Apples, which were treated with enzymes could be distinguished from untreated ones starting from 10,5% mass portion liquefaction.

Increasing water loss leads to an increase of the quality parameter Q_{el} . A significant difference was found between fresh apples to partly dried ones starting from a water loss of 14,4% mass portion. The comparison of Q_{el} -values between different apple varieties showed significant differences between certain apple varieties. The determination of apple quality for the fruit juice production can be measured contactless with the developed inductive impedance measuring method.

In summary the developed inductive measurement technology provides similar statements compared to conductive measurement methods and allows the contactless evaluation of the apple quality for the fruit juice production.

3 Einleitung

Viele Lebensmittel bestehen aus Zellen mit isolierenden Zellmembranen. Kenntnisse der inneren Strukturierung dieser Lebensmittel sowie deren Veränderung ermöglichen Qualitätsaussagen. Der Apfel ist ein Beispiel für solch ein strukturiertes Lebensmittel.

Äpfel nehmen weltweit den dritten Platz in der Obsterzeugung ein. Im Jahr 2008 wurden knapp 70 Millionen Tonnen Äpfel produziert. In Deutschland wurden im gleichen Zeitraum eine Million Tonnen Äpfel angebaut, rund 26% davon wurden der Verwertungsindustrie zugeführt, die daraus unter anderem Fruchtsäfte, -konserven, Tiefkühl-Obst, Trockenobst, Brotaufstriche sowie Fruchtzubereitungen herstellt. Aus dem Streuobstbereich werden sogar 40-50% der Erntemenge der Äpfel zur Saffherstellung verwendet. Der Pro-Kopf-Verbrauch von Apfelsaft lag 2008 in Deutschland bei 9,2 Liter [1].

Für die Produktion von Apfelsaft wird qualitativ geeignete Rohware benötigt. Besonders angefaulte Äpfel sind für die Produktion nicht geeignet, da sich im Faulanteil des Apfels das Mykotoxin Patulin befinden kann [2] [3]. Patulin ist in größeren Mengen gesundheitsgefährdend und ein Indiz für schlechte Rohmaterialqualität [4]. Aus diesem Grund ist der erlaubte Höchstgehalt an Patulin im Apfelsaft gesetzlich auf 50 µg/kg begrenzt [5]. Neben den möglichen gesundheitlichen Gefährdungen des Verbrauchers durch Patulin ergibt sich bei Verwendung von angefaulten Äpfeln auch eine Geschmacksbeeinträchtigung des Fruchtsaftes. Solche untauglichen Äpfel werden derzeit von Hand mit Hilfe von endlos umlaufenden Verlesebänder oder Rollenverlesebänder aus dem Produktionsprozess geschleust [6] [7] [8] oder mittels aufwendiger optischer Messsysteme detektiert und entfernt [9].

Äpfel sind aus einer Vielzahl Zellen aufgebaut. Fäulnis- und Gefrier- Vorgänge sowie sonstige mechanische Beschädigungen führen zu Beschädigungen der Zellstrukturen [10].

Mit Hilfe der Impedanzspektroskopie sind Aussagen über diese Veränderungen möglich [11] [12] [13] [14]. Bei der Impedanzspektroskopie werden elektrischen Parameter bei unterschiedlichen Wechselstromfrequenzen gemessen [15]. Werden hohe Wechselstromfrequenzen gewählt, fließt der Strom durch die Zellen hindurch. Bei niedrigeren Wechselstromfrequenzen verhalten sich die Zellmembranen wie elektrische Widerstände, der Strom fließt nur außerhalb der Zelle im extrazellulären

Raum [16]. Bei zerstörten Zellen bilden die Zellmembrane auch bei niedrigeren Frequenzen keinen elektrischen Widerstand mehr. Somit sinkt der elektrische Widerstand bei Zellzerstörungen einer Probe, wodurch auf den Zustand der Zellstrukturen geschlossen werden kann [16] [17]. Die Messung der Proben erfolgt hierbei meist mit Hilfe von berührenden Elektroden mit konduktiver Kopplung [18]. Bei der konduktiven Kopplung befindet sich die Probe zwischen zwei Elektroden. Über diese Elektroden wird bei einer definierten Wechselstromfrequenz eine Spannung auf die Probe gegeben und der resultierende Stromfluss durch die Probe gemessen. Um ein Impedanzspektrum zu erhalten werden viele verschiedene Wechselstromfrequenzen eines Frequenzbereiches während einer Messung an die Probe angelegt [19].

Als Inline-Anwendung im industriellen Produktionsprozess ist diese Art der Messung nur bedingt geeignet, da entweder nur stichprobenartig gemessen werden kann oder aber lange Stillstandzeiten in Kauf genommen werden müssen. Außerdem handelt es sich dabei häufig um zerstörende Messverfahren, bei denen die Position der Elektroden entscheidend für das Messergebnis ist.

Mittels induktiv arbeitender Messverfahren wäre es möglich, den kompletten Produktstrom berührungslos und zerstörungsfrei im laufenden Produktionsprozess zu messen. Der Aufbau einer induktiven Messapparatur kann mit drei parallel angeordneten Spulen realisiert werden. Zwei der Spulen sind Empfängerspulen, die sich jeweils im selben Abstand links und rechts von der dritten Spule, der Sendespule, entfernt befinden. Die Proben werden meist über ein Transportband durch die Spulenordnung geführt. Auf die Sendespule wird Strom einer definierten Wechselstromfrequenz angelegt. Der angelegte Wechselstrom induziert ein magnetisches Feld. Dieses magnetische Feld erzeugt einen Stromfluss in der Probe, der über ein weiteres induziertes Magnetfeld eine Spannung in der Empfängerspule erzeugt, dass als Messsignal weiterverarbeitet wird.

4 Aufgabenstellung

Aufgabe der Arbeit ist die Entwicklung und Validierung einer Messmethode auf Basis induktiver Impedanzmesstechnik zur Qualitätsbeschreibung biogener Produkte am Beispiel der Beschreibung der Fruchtsafttauglichkeit von Äpfeln. Für die Arbeit wurde die Hypothese aufgestellt, dass der Grad der Zellzerstörung von Äpfeln mit induktiven Messmethoden bestimmbar ist.

Es ist bekannt, dass mit konduktiven Messverfahren Aussagen über den Grad der Zellzerstörung bzw. Zellveränderung möglich sind. Mit berührungsloser induktiver Messtechnik sind hierfür bisher keine Messmethoden bekannt.

Induktive Messverfahren werden derzeit unter anderem in der industriellen Metalldetektion eingesetzt, um inline metallische Verunreinigungen in Produkten zu finden. Dabei werden diese Verunreinigungen über Spannungsunterschiede detektiert, wobei ab einem definierten Spannungsunterschied die Produkte als metallisch verunreinigt ausgeschleust werden [20] [21] [22] [23] [24].

Zur weiteren Qualitätsbeschreibung von Lebensmitteln wird diese Technik bisher nicht verwendet. Ob diese induktive Impedanzmesstechnik für die Beschreibung der Fruchtsafttauglichkeit von Äpfeln geeignet ist, ist bislang noch nicht untersucht worden.

Das verwendete induktive Messsystem zeichnet während einer Messung 4096 Messwerte auf zwei Spannungskanälen (U_A und U_B) auf. Wobei angenommen wird, dass, gerade im Hinblick auf die Qualitätsbeschreibung von biogenen Produkten, die erhaltenen Messsignale auswertbare Informationen enthalten, die bisher noch nicht berücksichtigt wurden. Deshalb soll das Messsignal zunächst im Hinblick auf die Methodenentwicklung aufbereitet und ausgewertet werden.

Nach der Aufbereitung und Auswertung des Messsignals, sollen zunächst die Faktoren ermittelt werden, die unabhängig von der Fruchtsafttauglichkeit der Äpfel die Messung beeinflussen. Dazu wird der Einfluss der Messposition der Probe in der Messanordnung, der Einfluss der Temperatur sowie der Probenmasse und der Probenform auf die Messung bestimmt. Sind die Einflussfaktoren bekannt, sollen diese beurteilt werden. Mit diesen Erkenntnissen soll die Messmethode für die Beschreibung der Fruchtsafttauglichkeit entwickelt werden.

Bevor die entwickelte Messmethode validiert werden kann, muss zunächst eine Methode entwickelt werden mit der Zellzerstörungen an Äpfeln reproduzierbar erzeugt und beschrieben werden können. Hierzu sollen der Einsatz von Gefrier- und

Enzymbehandlungen überprüft werden. Andererseits sollen Zellzerstörungen über mikrobiologischen Befall erzeugt werden. Der Befall soll hierbei an der Oberfläche sowie im Kern des Apfels erfolgen.

Mit Hilfe der Methoden der Zellzerstörungen (Gefrier- und Enzymbehandlungen, Fäulnis an der Oberfläche sowie im Kern) soll anschließend die im ersten Aufgabenteil entwickelte Impedanzmessmethode validiert werden.

Schließlich sollen Äpfel unbekannter Sorten und mit unbekanntem Fäulnisbefall mit der Messmethode gemessen werden, um die Ergebnisse hieraus bezüglich der Bestimmung des Faulanteils interpretieren zu können.

Zusätzlich wird überprüft, inwieweit verschiedene Apfelsorten mit unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften die Messmethode beeinflussen. Als Weiteres soll geklärt werden, ob Aussagen über Nachreifung und Wasserverluste bei Äpfeln verschiedener Sorten mit der entwickelten induktiven Impedanzmessmethode getroffen werden können. Abschließend sollen die Ergebnisse der Validierung beurteilt werden.

5 Grundlagen

5.1 Grundlagen der Impedanzspektroskopie

Die Impedanzspektroskopie ist die Messung von elektrischen Parametern bei unterschiedlichen Wechselstromfrequenzen [15]. Sie wird zur elektrischen Charakterisierung von Materialien verwendet [19], so wird beispielsweise die elektrische Beschreibung von Lebensmitteln zu deren Qualitätskontrolle erforscht [25].

Alle Materialien können entweder durch ihre aktiven elektrischen Eigenschaften oder durch ihre passiven elektrischen Eigenschaften charakterisiert werden. Die Charakterisierung mit passiven elektrischen Eigenschaften wird mit dissipativen Elementen wie ohmsche Widerstände und speichernden Elementen wie Kondensatoren und Spulen durchgeführt. Bei biologischen Materialien werden vor allem die passiven elektrischen Eigenschaften zur Charakterisierung herangezogen [18].

Während einer Messung wird an einer Probe Spannungen definierter Wechselstromfrequenzen angelegt und der resultierende Strom, der durch die Probe fließt, gemessen [19]. Speichert die Probe elektrische Energie besitzt sie kapazitives Verhalten. Ihre Impedanz, auch Wechselstromwiderstand genannt, verhält sich frequenzabhängig. Der gespeicherte kapazitive Anteil der Impedanz wird als Blindwiderstand (Z'') bezeichnet und stellt den Imaginärteil der Impedanz dar [18]. Der Realteil der Impedanz wird als Wirkwiderstand (Z') bezeichnet. Reagiert die Probe wie ein reiner Ohm'scher Widerstand, so wird bei ihr nur der Realteil der Impedanz gemessen. Die Messungen sind in diesem Fall frequenzunabhängig. Die zeitliche Verschiebung zwischen Strom und Spannung wird mit dem Phasenwinkel ρ ausgedrückt. Reagiert die Probe wie ein reiner Ohm'scher Widerstand so ist der Phasenwinkel gleich null, es erfolgt für diesen Fall keine Verschiebung. Bei negativem Phasenwinkel verhält sich die Probe wie ein Kondensator. Bei positiven Phasenwinkeln zeigt die Probe das Verhalten einer Spule. Der Zusammenhang zwischen Real und Imaginärteil kann in einem Zeigerdiagramm dargestellt werden (siehe Abbildung 5-1). Der Betrag aus dem realen und imaginären Anteil ist die komplexe Impedanz (Z) [19].

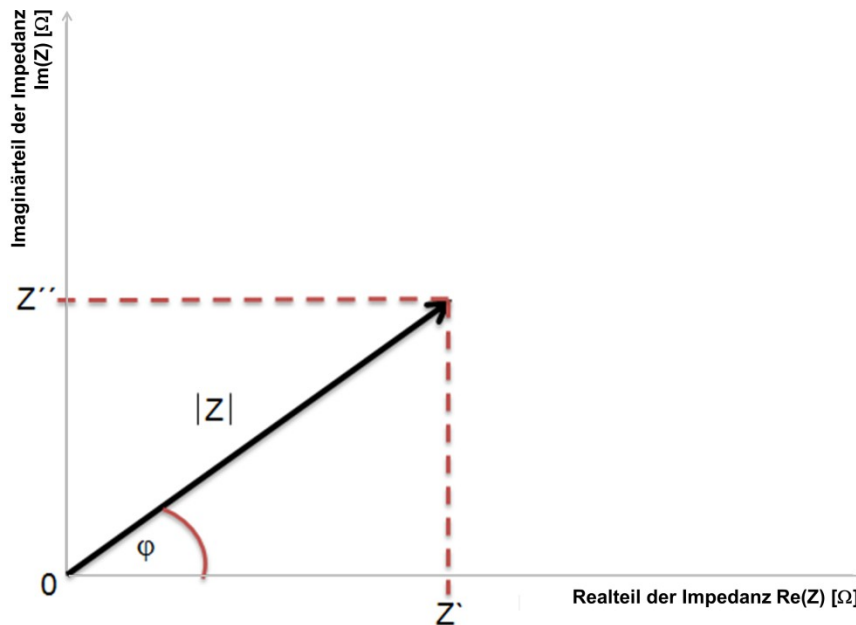


Abbildung 5-1: Zeigerdiagramm der komplexen Impedanz. Vergleiche [19].

In Formel 5.1 – Formel 5.4 werden die Zusammenhänge zwischen komplexer Impedanz und deren Real- und Imaginärteil dargestellt [19].

$$Z' = Z \cdot \cos(\rho) \quad \text{Formel 5.1}$$

$$Z'' = Z \cdot \sin(\rho) \quad \text{Formel 5.2}$$

$$\rho = \tan^{-1}\left(\frac{Z''}{Z'}\right) \quad \text{Formel 5.3}$$

$$Z = \sqrt{Z'^2 + Z''^2} \quad \text{Formel 5.4}$$

Unter linearen Bedingungen, bezogen auf eine Probenart, besitzen die elektrischen Parameter Impedanz (Z), Admittanz ($Y = \frac{1}{Z}$), komplexe Permittivität (ϵ) und komplexe Leitfähigkeit (σ) die gleichen Informationen. Die Permittivität ist ein Maß für die Durchlässigkeit einer Probe für elektrische Felder [15].

Biologisches Gewebe kann als Dielektrikum charakterisiert werden. Dielektrische Materialien können elektrische Energie kapazitiv speichern. Um die Real- und Imaginäranteile des Dielektrikums zu berücksichtigen, werden die elektrischen Parameter als komplexe Größen behandelt [15].

Die Messungen von Impedanzspektren an biologischen Proben wird Bioimpedanzspektroskopie genannt. Die Permittivität einer biologischen Probe ist frequenzabhängig. Diese Frequenzabhängigkeit wird Dispersion genannt.

Biologischen Materialien zeigen mehrere Dispersionsgebiete mit jeweils charakteristischen Relaxationsmechanismen (siehe Abbildung 5-2) [26]. Bei niedrigen Frequenzen (100 mHz – 100 Hz) wurde das α -Dispersionsgebiet, bei mittleren Frequenzen (1 kHz – 10 MHz) das β -Dispersionsgebiet und bei hohen Frequenzen (mehr als 100 MHz) das γ -Dispersionsgebiet nachgewiesen [27]. Die δ -Dispersion wurde als viertes Dispersionsgebiet etwas später im niedrigen GHz-Bereich entdeckt [15] [27].

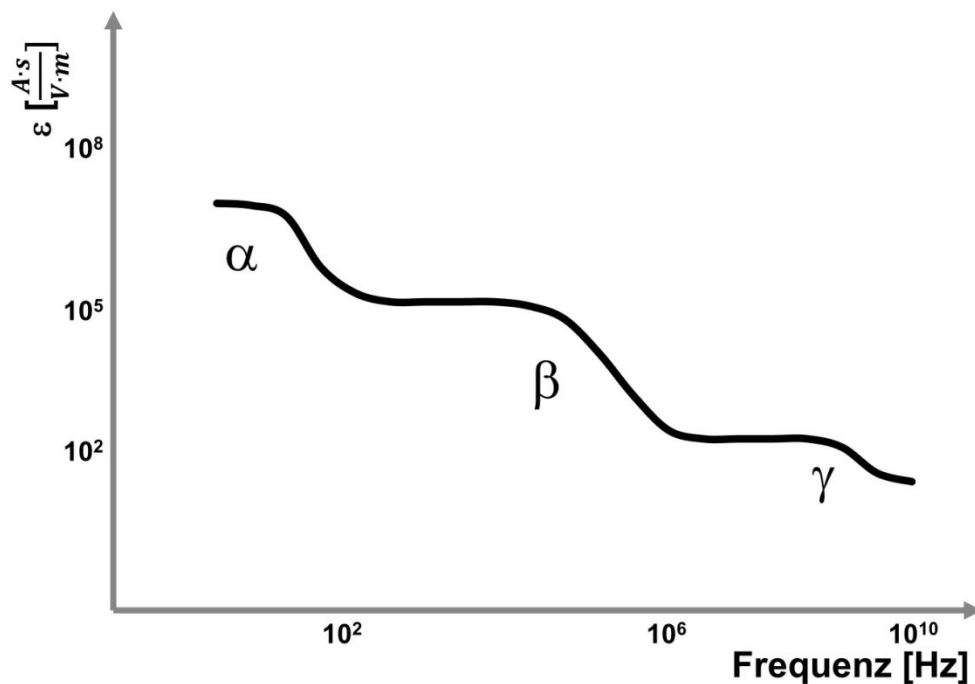


Abbildung 5-2: Schematisches Frequenzspektrum eines biologischen Gewebes mit den charakteristischen Relaxationen. Dargestellt ist der Verlauf der Permittivität über die Frequenz. Vergleiche [26].

Die genauen Mechanismen im α -Dispersionsgebiet konnten bis heute noch nicht vollständig geklärt werden [27] [28]. Es wird unter anderem vermutet, dass die Bewegung von Ladungsträgern entlang der isolierenden Zellmembranen die α -Dispersion bewirkt [18]. Die gemessene Impedanz bei diesen Frequenzen entspricht somit der Impedanz des extrazellulären Raumes.

Das γ -Dispersionsgebiet wird durch die polaren Eigenschaften von Wasser, Salzen und Proteinen hervorgerufen [15] [27].

Die δ -Dispersion (2 GHz – 25 GHz) ist häufig nicht von dem γ -Dispersionsgebiet zu unterscheiden [18] und wird durch proteingebundenes Wasser ausgelöst [27].

β-Dispersionsgebiet

Für fast alle Lebensmittel sind Messungen im β-Dispersionsgebiet von besonderem Interesse, da hierbei die Eigenschaften der Zellstrukturen betrachtet und somit durch Interpretation der Ergebnisse Rückschlüsse auf den Zustand und die Zusammensetzung der untersuchten Lebensmittel gezogen werden können [18].

Das β-Dispersionsgebiet wird durch die zelluläre Struktur von biologischen Geweben mit ihren schlecht leitenden Membranen, die den intra- und extrazellulären Raum voneinander trennen, verursacht [27]. Werden Frequenzen am oberen Rand dieses Dispersionsgebietes gewählt, fließt der Strom durch die Zellen hindurch. Wird die Frequenz abgesenkt, d.h. eine Frequenz im unteren Bereich des β-Dispersionsgebietes gewählt, verhalten sich die Zellmembranen wie elektrische Widerstände, der Strom fließt nur außerhalb der Zelle im extrazellulären Raum [16]. Das β-Dispersionsgebiet wird sehr stark von den Membranstrukturen und dem Wassergehalt der biologischen Probe beeinflusst. Je dichter die Anordnung der Zellen, desto schwächer ist das β-Dispersionsgebiet [28].

Lebensmittel können impedanzspektroskopisch in strukturierte und unstrukturierte Produkte eingeteilt werden. Strukturierte Lebensmittel bestehen aus Zellen mit isolierenden Zellmembranen wie zum Beispiel Obst, Gemüse, Fisch und Fleisch. Unstrukturierte Lebensmittel besitzen diese isolierenden Zellmembranen nicht. Beispiele für unstrukturierte Lebensmittel sind Fruchtsäfte und Speiseöle. Bei strukturierten Lebensmitteln können α- und β- Dispersionsgebiete nachgewiesen werden, d.h. die Leitfähigkeit ist bei strukturierten Lebensmitteln bis zu Frequenzen von mehreren MHz frequenzabhängig. Unstrukturierte Lebensmittel zeigen für diese Bereiche keine Frequenzabhängigkeit [18].

5.2 Aufbau und Messprinzip der induktiven Impedanzmesstechnik

Häufig werden Impedanzspektren mittels konduktiver Kopplung aufgenommen. Bei dieser Art der Messung muss berührend mit Messsonden gearbeitet werden (siehe Abbildung 5-3). Mit Hilfe von Elektroden wird eine Wechselspannung an die Probe angelegt. Diese Wechselspannung erzeugt in der Probe einen Stromfluss über diesen man die entsprechenden elektrischen Parameter berechnen kann [19]. Bei der konduktiven Kopplung kommen Zwei-Elektroden-Systeme und Vier-Elektroden-Systeme zum Einsatz. Zwei-Elektroden-Systeme sind anfälliger für Polarisierungen als Vier-Elektroden-Systeme [29]. Für die Inline-Messung sind diese Verfahren nur bedingt geeignet.

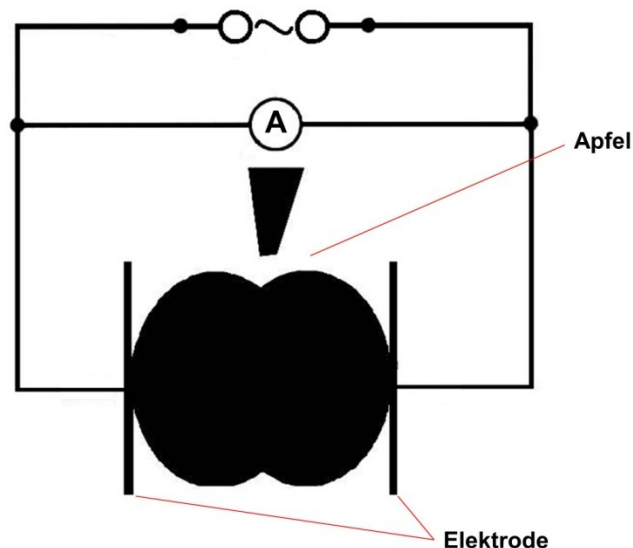


Abbildung 5-3: Prinzip der konduktiven Messung mit einem Zwei-Elektroden-System und einen Apfel als Probe.

Alternativ zur konduktiven Kopplung kann auch ohne Elektroden mit elektromagnetischer Induktion berührungslos gemessen werden. Beispielsweise gibt es Messanordnungen für elektrodenlose induktive Messungen zur Überwachung von Fermentationsprozessen. Allerdings beschränkt sich diese Anwendung auf die Messung in Flüssigkeiten [30] [31]. Vorteile der induktiven Messung sind die Vermeidung von Elektrodenpolarisation und Messfehlern durch Gasblasen an den Elektroden [32] [33]. Nachteil ist, neben dem teureren, komplexen und störungsanfälligen Aufbau, die höhere Messgenauigkeit, die durch Nichtlinearitäten der Permeabilität der Zellen hervorgerufen wird [33]. Pliquett ist der Ansicht, dass elektrodenlose Systeme nicht für den Einsatz im β -Dispersionsgebiet

geeignet sind, da die Messungen zu ungenau sind und die Messanordnungen nicht ohne weiteres miniaturisiert werden können [18].

Für die durchgeführten Untersuchungen wurde eine Drei-Spulen-Messanordnung als induktives Impedanzmesssystem verwendet. In den folgenden Abschnitten werden der Aufbau und das Messprinzip beschrieben, sowie zwischen induktiven und induktiven Messverfahren verglichen.

5.2.1 Aufbau des induktiven Impedanzmesssystems

Der Aufbau des verwendeten induktiven Impedanzmesssystems entspricht weitestgehend dem Aufbau eines Metalldetektors. Metalldetektoren werden in der Lebensmittelindustrie verwendet, um den Verbraucher vor metallischen Verunreinigungen und die Anlagen in den Produktionsbetrieben vor Beschädigungen zu schützen [20].

Das induktive Impedanzmesssystem besteht aus einem Gehäuse mit rechteckiger Durchgangsöffnung. Das Gehäuse schirmt die Spulen elektromagnetisch nach außen hin ab. Durch die Durchgangsöffnung wird ein Laufband gelegt, auf dem die jeweiligen Messobjekte durch das induktive Impedanzmesssystem geführt werden. In dem Gehäuse befinden sich drei parallel angeordneten Spulen, die senkrecht zum Transportband stehen. Die mittlere der drei Spulen ist die Sendespule. Die beiden äußeren sind die Empfängerspulen, welche jeweils im selben Abstand von der Sendespule angeordnet sind (siehe Abbildung 5-4). Die Sendespule wird über einen Oszillator angesteuert und erzeugt ein hochfrequentes Wechselfeld. Die beiden Empfängerspulen sind elektrisch miteinander verschaltet, so dass sie im Ruhezustand eine Spannung gleich null empfangen. Wird ein leitfähiges Messobjekt durch das induktive Impedanzmesssystem geführt, verzerrt sich das, durch die Sendespule induzierte, Magnetfeld und die Empfängerspulen messen eine Spannung ungleich null [20] [21] [22] [23] [24].

In der Metalldetektion spricht man von einem Produkteffekt, wenn ein Messobjekt durch Eigenleitfähigkeit eine Spannung im Magnetfeld der Spulen induziert. Schinken und Käse erzeugen beispielsweise ein solches Signal. In der Metallsuchtechnik behindern Produkteffekte das eigentliche Ziel, metallische Verunreinigungen in den Messobjekten zu erkennen und anschließend auszuschleusen [21] [22] [34]. Da die Phasendifferenz frequenzabhängig ist, können abhängig von der Probe

unterschiedliche Wechselstromfrequenzen gewählt werden, um Produkteffekte zu eliminieren [20].

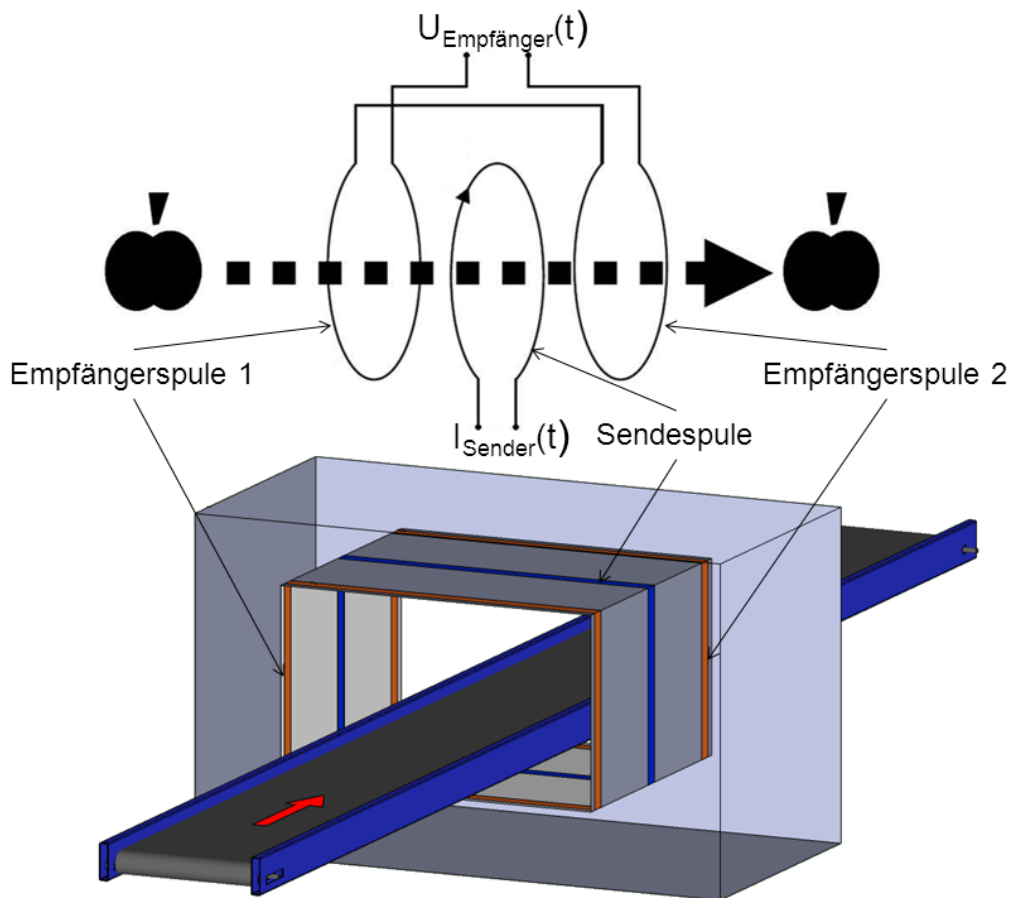


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung des induktiven Impedanzmesssystems.

Um Aussagen über die Qualität bzw. die Zellstrukturen von Lebensmitteln treffen zu können, muss der Produkteffekt interpretiert werden. Voraussetzung für die Messungen ist eine ausreichend große Eigenleitfähigkeit der Messobjekte.

Es gibt Versuche, die Spannung und die Phasendifferenz bei bekannten Proben- und Spulenparametern zu berechnen bzw. dafür Modelle aufzustellen. Diese Modelle funktionieren allerdings bisher nur bei einem, im Verhältnis zur Spule, kleinen kugelförmigen Metallteilchen (Aluminium und Edelstahl). Bei magnetischen Teilchen wie z. B. Eisen gibt es relativ große Unterschiede zwischen den mit dem aufgestellten Modell berechneten Werten und den praktisch ermittelten Messwerten [34].

Eine Berechnung der Spulenabstände für optimale Empfindlichkeit ist möglich. Als optimal wird ein Spulenabstand von 0,65-mal Radius der Spule angesehen. Bei der

Berechnung wurde allerdings davon ausgegangen, dass die Feldstärke des Magnetfeldes über die Querschnittsfläche eines, im Verhältnis zur Spule kleinen, kugeligen metallischen Körpers konstant ist [24].

5.2.2 Messprinzip des induktiven Impedanzmesssystems

Die Sendespule des induktiven Impedanzmesssystems wird mit einem Wechselstrom beaufschlagt, der sich mit Formel 5.5 berechnen lässt [35].

$$I_{\text{Sender}}(t) = \hat{I} \cdot \sin(\omega t) \quad \text{Formel 5.5}$$

Die Kreisfrequenz ω in Formel 5.5 berechnet sich mit der Periodenzeit T und der Frequenz f nach Formel 5.6. Diese wird für die folgenden Betrachtungen als konstant angenommen [35].

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad \text{Formel 5.6}$$

Der Stromfluss erzeugt ein magnetisches Feld mit dem magnetischen Fluss Φ_{Sender} . In der Empfängerspule wird daraufhin eine Spannung induziert, die sich mit der Amplitude U_0 und der Phasendifferenz φ bezüglich des Signals $I_{\text{Sender}}(t)$ nach Formel 5.7 berechnen lässt [35].

$$U_{\text{Empfänger}}(t) = U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad \text{Formel 5.7}$$

Die Spannung, die an der Empfängerspule gemessen wird, kann mit dem Ausgangssignal der Sendespule verglichen werden. Je nach Eigenschaft der gemessenen Probe ergibt sich zwischen Sende- und Empfängerspule eine unterschiedliche Phasendifferenz φ und eine unterschiedliche Veränderung der Amplitude ΔU . Die Anregungskreisfrequenz ω des Sendersignals entspricht dabei der Frequenz des Empfängersignals [35]. In Abbildung 5-5 ist exemplarisch ein Spannungsverlauf von Sende- und Empfängerspule dargestellt [20].

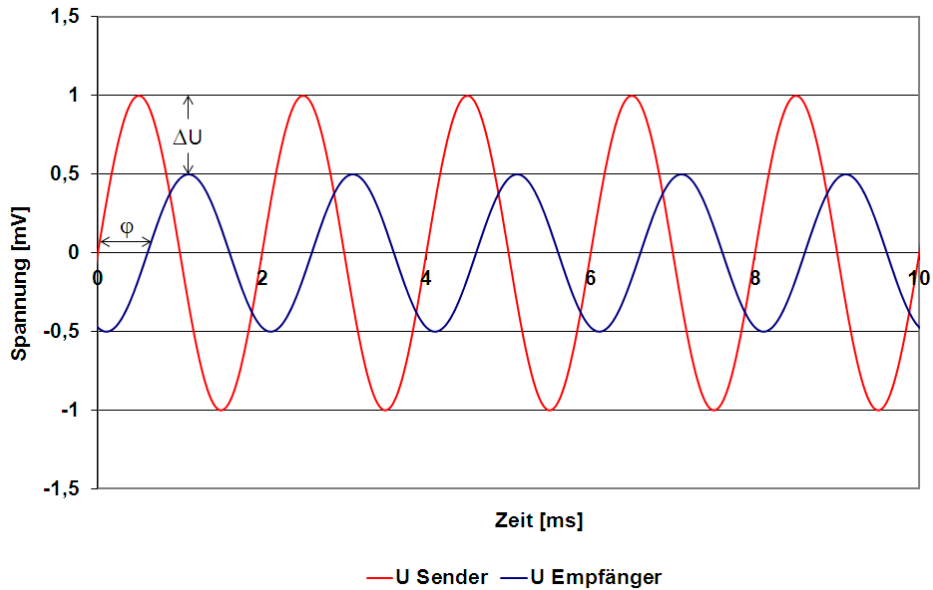


Abbildung 5-5: Exemplarischer Spannungsverlauf von Sende- und Empfängerspule.

Bekannt ist nur die Frequenz des Empfängersignals. Über die Integration der Empfängerspannung $U_{\text{Empfänger}}(t)$ im Intervall der Phasendifferenz von $0^\circ(0)$ bis $180^\circ(\frac{T}{2})$ erhält man die Spannung $U_A(t)$ (siehe Formel 5.8 und Abbildung 5-6) [35].

$$U_A(t) = \int_0^{\frac{T}{2}} U_{\text{Empfänger}}(t) dt = \int_0^{\frac{T}{2}} U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) dt \quad \text{Formel 5.8}$$

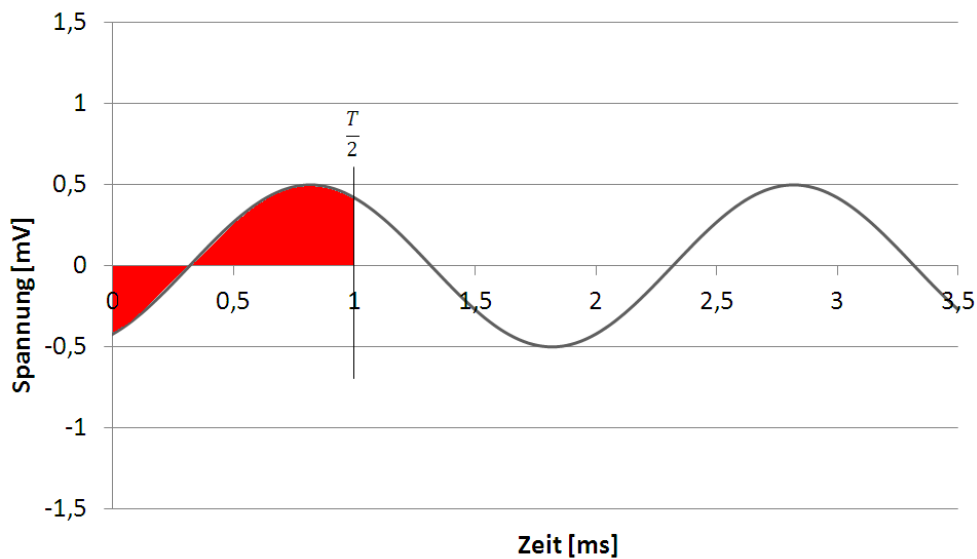


Abbildung 5-6: Das Integral von 0 bis $\frac{T}{2}$ über die Empfängerspannung führt zu $U_A(t)$.

Über die Integration der Empfängerspannung $U_{\text{Empfänger}}(t)$ im Intervall der Phasendifferenz von 90° ($\frac{T}{4}$) bis 270° ($\frac{3T}{4}$) erhält man die Spannung $U_B(t)$ (siehe Formel 5.9 und Abbildung 5-7) [35].

$$U_B(t) = \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{3T}{4}} U_{\text{Empfänger}}(t) dt = \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{3T}{4}} U_0 \cdot \sin(\omega t + \varphi) dt \quad \text{Formel 5.9}$$

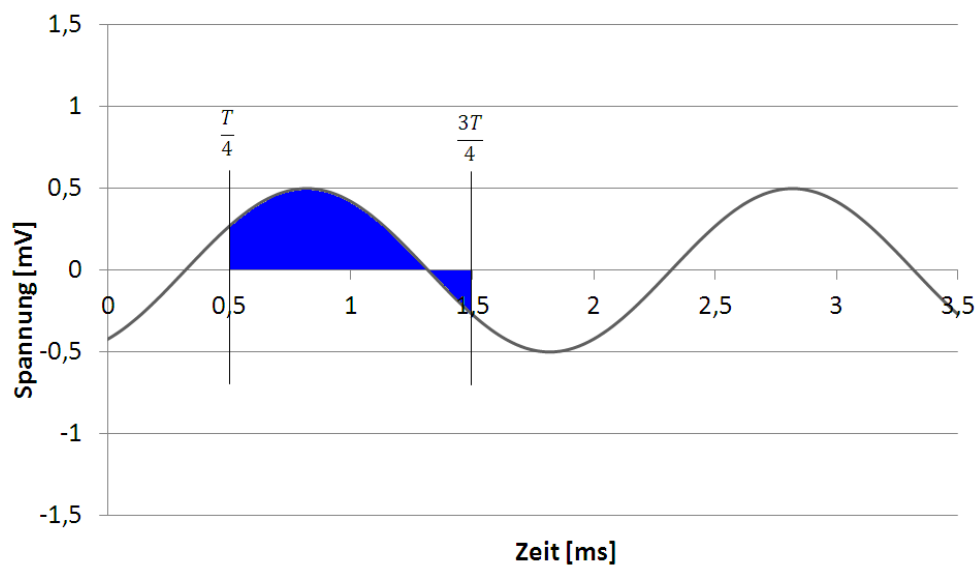


Abbildung 5-7: Das Integral von $\frac{T}{4}$ bis $\frac{3T}{4}$ über die Empfängerspannung führt zu $U_B(t)$.

Werden die Integrale $U_A(t)$ (Formel 5.8) und $U_B(t)$ (Formel 5.9) mit Hilfe der Berechnungsformel der Kreisfrequenz (Formel 5.6) aufgelöst, so erhält man zeitunabhängige Beziehungen (siehe Formel 5.10 und Formel 5.11) [35].

$$U_A(t) = U_0 \cdot 2 \cdot \cos \varphi \quad \text{Formel 5.10}$$

$$U_B(t) = -U_0 \cdot 2 \cdot \sin \varphi \quad \text{Formel 5.11}$$

Aus den zeitunabhängigen Beziehungen von $U_A(t)$ (Formel 5.10) und $U_B(t)$ (Formel 5.11) lässt sich die Amplitude U_0 berechnen (siehe Formel 5.12) [35].

$$U_o = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad \text{Formel 5.12}$$

Die Phasendifferenz zwischen Sendespannung und Empfängerspannung ergibt sich aus der arctan-Funktion und dem Verhältnis von U_B zu U_A (siehe Formel 5.13) [35].

$$\varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{U_B}{U_A} \right) \quad \text{Formel 5.13}$$

Aufgrund der Unstetigkeitsstellen der arctan- Funktion gilt die Vereinbarung nach Formel 5.14 [35].

$$\begin{aligned} U_A > 0, U_B < 0 &\rightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{U_B}{U_A} \right) \\ U_A < 0, U_B < 0 &\rightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{U_B}{U_A} \right) + 180^\circ \\ U_A < 0, U_B > 0 &\rightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{U_B}{U_A} \right) - 180^\circ \\ U_A > 0, U_B > 0 &\rightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{U_B}{U_A} \right) \end{aligned} \quad \text{Formel 5.14}$$

Die Beziehungen der Formel 5.10 bis Formel 5.14 gelten für eine Probe, die sich bewegungslos an einer Stelle im Magnetfeld befindet. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Feldstärkeverteilung des Primärfeldes sowie des Sekundärfeldes immer konstant ist. Bei dem induktiven Impedanzmesssystem wird die Probe auf dem Laufband durch die Spulen bewegt. Es verändern sich somit aufgrund der unterschiedlichen Positionen der Probe im Primärfeld mit der Zeit die Amplitude U_0 und die Phasendifferenz φ . Also gilt die Beziehung nach Formel 5.15 [35].

$$U_{Empfänger}(t) = U_0(t) \cdot \sin\{\omega t + \varphi(t)\} \quad \text{Formel 5.15}$$

Im Verhältnis zu der Durchlaufzeit einer Probe durch die Spulen (ca. 2 s) ist die Periodenzeit T ($\ll 0,001$ s) sehr gering. Deshalb kann angenommen werden, dass die Amplitude $U_0(t)$ und die Phasendifferenz $\varphi(t)$ für die Dauer der Integration

konstant bleibt. Es können aus diesem Grund analog die Beziehungen aus Formel 5.10 bis Formel 5.14 für die orts- und damit zeitabhängigen Berechnungen von $U_A(t)$ (Formel 5.16), $U_B(t)$ (Formel 5.17), $U_0(t)$ (Formel 5.18) und φ (Formel 5.19) herangezogen werden [35].

$$U_A(t) = U_0(t) \cdot 2 \cdot \cos \varphi \quad \text{Formel 5.16}$$

$$U_B(t) = -U_0(t) \cdot 2 \cdot \sin \varphi \quad \text{Formel 5.17}$$

$$U_0(t) = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{U_A^2(t) + U_B^2(t)} \quad \text{Formel 5.18}$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(-\frac{U_B(t)}{U_A(t)} \right) \quad \text{Formel 5.19}$$

Der Durchlauf einer Probe durch das induktive Impedanzmesssystem ist in Abbildung 5-8 exemplarisch mit dem Verlauf der Integralfunktionen $U_A(t)$ und $U_B(t)$ in Abhängigkeit der Probenposition und damit zeitabhängig dargestellt. Der Verlauf der Integralfunktionen zeigt den symmetrischen Aufbau der Empfängerspulen. Zunächst dringt die Probe in das Magnetfeld von Empfängerspule eins ein. Die Spannungen steigen bis zu einem maximalen Betrag an. Anschließend fallen die Spannungen bis auf den Wert 0 ab. Im Nulldurchgang gleichen sich die beiden Spannungen der Empfängerspulen aus. Nach dem Nulldurchgang dringt die Probe in das Magnetfeld von Empfängerspule zwei ein. Die Spannungen fallen, aufgrund der Gegenkopplung von Empfängerspule eins zur Empfängerspule zwei, ins Negative bis zu einem Minimum ab. Nach Erreichen des Minimums steigen die Spannungswerte wieder auf das Niveau zu Beginn des Durchlaufs an. Die Probe verlässt das Magnetfeld der Empfängerspule zwei [35].

Aus den Spannungssignalen in Abbildung 5-8 wird der Betrag der maximal auftretenden Spannung ermittelt. Zu diesem Maximalbetrag wird der Spannungswert des jeweiligen anderen Kanals (U_A oder U_B) zur Zeit des auftretenden Maximums abgelesen. Mit diesen beiden Werten wird mit Hilfe von Formel 5.18 und Formel 5.19 die maximal auftretende Amplitude $U_{0,\max}$ und die Phasendifferenz φ berechnet. Die gemessene Spannung ist direkt proportional zu der Impedanz der Probe [35].

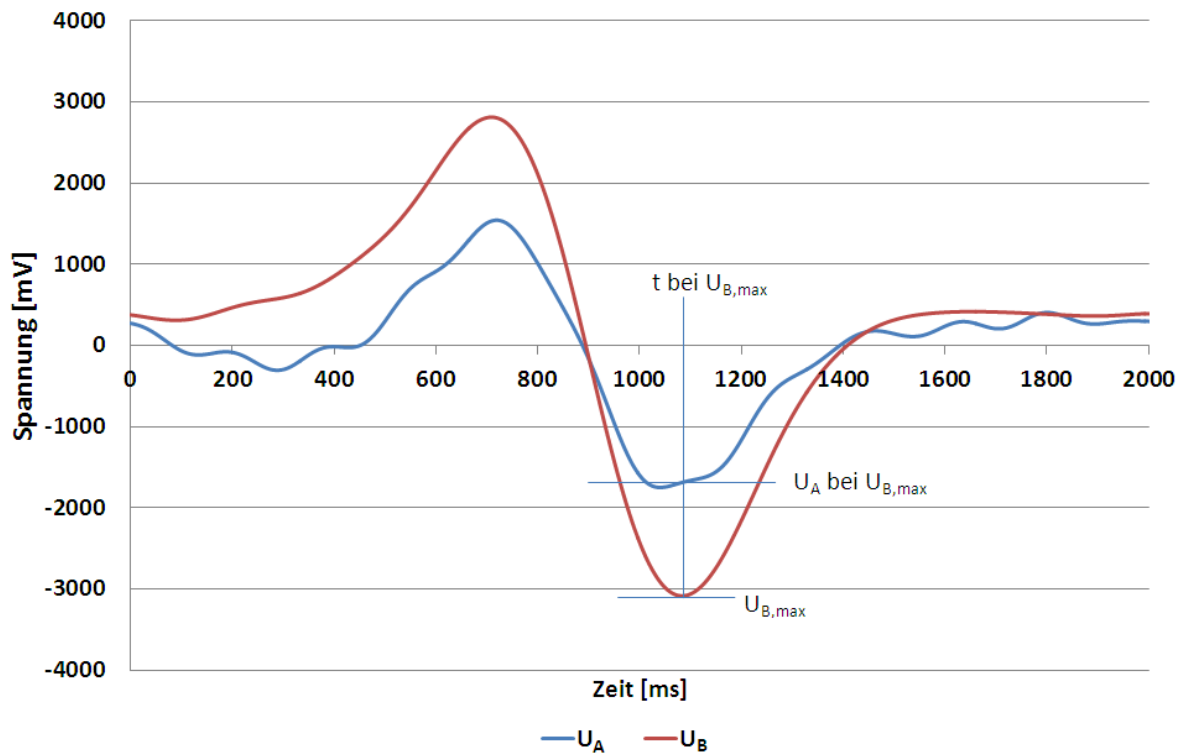


Abbildung 5-8: Zeitlicher Verlauf von $U_A(t)$ und $U_B(t)$ bei einem Durchlauf durch das induktive Impedanzmesssystem.

Die Aufnahme eines gesamten Impedanzspektrums ist mit dem hier verwendeten induktiven Impedanzmesssystem nur möglich, wenn die Frequenz nach jedem Durchlauf am Gerät umgestellt und das Messobjekt erneut durch das induktive Impedanzmesssystem geführt wird. Eine gleichzeitige Messung bei mehreren Frequenzen bei nur einem Durchlauf ist nicht möglich.

5.2.3 Vergleich zwischen konduktiver und induktiver Messung

Das Prinzip der konduktiven Messung ist in Abbildung 5-9 schematisch dargestellt. Zwischen zwei Elektroden befindet sich die Probe. Eine Spannung $U(t)$ mit einer definierten Wechselstromfrequenz wird auf die Probe geprägt und der resultierende Stromfluss $I_{\text{Probe}}(t)$ durch die Probe gemessen [19].

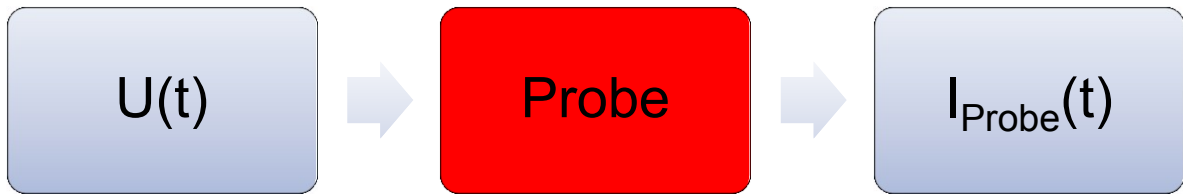


Abbildung 5-9: Messprinzip einer konduktiven Messung.

Das Prinzip der induktiven Messung ist in Abbildung 5-10 schematisch dargestellt. Die Sendespule wird mit dem Strom $I_{\text{Sender}}(t)$ einer Wechselstromfrequenz beaufschlagt. Dadurch wird ein magnetisches Feld mit dem magnetischen Fluss $\Phi_{\text{Sender}}(t)$ induziert. Das magnetische Feld der Sendespule erzeugt einen Stromfluss in der Probe $I_{\text{Probe}}(t)$, der wiederum ein Magnetfeld mit dem magnetischen Fluss $\Phi_{\text{Probe}}(t)$ induziert. Das durch die Probe induzierte Magnetfeld erzeugt eine Spannung $U_{\text{Empfänger}}(t)$ in der Empfängerspule. Das Spannungssignal des Empfängers wird, wie in Formel 5.16 bis Formel 5.19 beschrieben, zu den Parametern $U_A(t)$, $U_B(t)$, $U_{0,\text{max}}$ und φ umgerechnet.

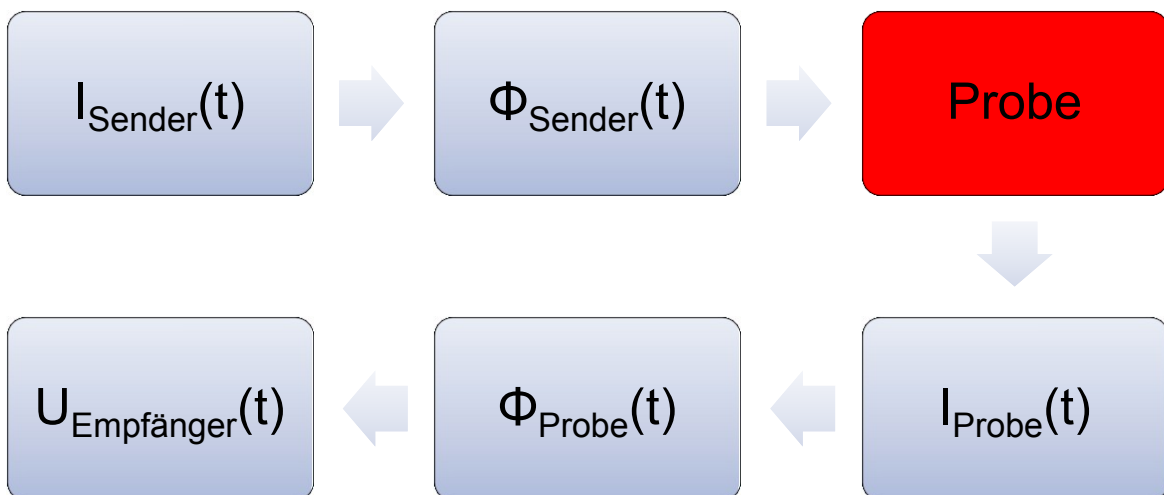


Abbildung 5-10: Messprinzip einer Messung mit dem induktiven Impedanzmesssystem.

5.3 Impedanzspektroskopie von pflanzlichen Lebensmitteln

Fäulnis-, Reife- und Gefrier- Vorgänge sowie sonstige mechanische Beschädigungen führen bei Obst und Gemüse zu Veränderungen in den Zellstrukturen. Für diese Lebensmittel sind vor allem Messungen im β -Dispersionsgebiet von Interesse, da hierbei die Eigenschaften der Zellstrukturen betrachtet werden können [18] und somit Aussagen über den Grad der Zellzerstörung bzw. Zellveränderung möglich sind. Alle in diesem Abschnitt dargestellten Untersuchungen wurden mit konduktiven Messverfahren durchgeführt.

Zellzerstörungen

Bei Stoßflecken an Äpfeln handelt es sich um eine mechanische Beschädigung des Fruchtgewebes und damit der Zellen. Diese Beschädigungen lassen sich mit der Impedanzspektroskopie messen [11]. So konnte bei drei verschiedenen Apfelsorten eine Korrelation zwischen aufgenommener Energie und elektrischen Eigenschaften nachgewiesen werden. Besonders Messungen bei niedrigen Wechselstromfrequenzen sind geeignet zur Beschreibung von Beschädigungen des Apfelgewebes [36]. Außerdem zeigten die Impedanzmessungen eine Lager- und Sortenabhängigkeit der Äpfel [37].

Mechanische Belastung ohne Beschädigung der Gewebezellen führt während der Belastung zu Veränderungen der Impedanzwerte. Der Imaginärteil der Impedanz steigt mit der Belastung an, der Realteil sinkt mit Erhöhung der Deformation ab. Nach der Belastung bzw. der Deformation werden wieder die Ausgangswerte erreicht. Hierdurch konnte gezeigt werden, dass bei konduktiven Messungen mit Elektroden die mechanische Belastung der Probe durch die Elektroden definiert sein muss, um Fehler und Messungenauigkeiten durch den Messaufbau zu verhindern [38].

Der sogenannte Desintegrations-Index ist eine Kennzahl, die in der Forschung angewendet wird, um die Zellzerstörung von pflanzlichem Gewebe zu beschreiben. Es handelt sich hierbei um das Verhältnis der Leitfähigkeit von intaktem Gewebe zu zerstörtem Gewebe, gemessen bei einer hohen (5 MHz) und einer niedrigen (5 kHz) Wechselstromfrequenz. Je höher der Desintegrations-Index ist, desto höher ist die Zellzerstörung [16] [39]. Da es keine Alternativmethode zur Bestimmung des Zerstörungsgrades gibt, ist unklar, ob der berechnete Desintegrations-Index direkt mit dem Zerstörungsgrad der Zellen korreliert. Ungenauigkeiten des Desintegrations-Index können beispielsweise durch Temperatureinflüsse hervorgerufen werden [40].

Aus diesem Grund wurde ein Korrekturfaktor eingeführt, der sich über das Verhältnis der Leitfähigkeit von intaktem zu zerstörtem Gewebe bei der hohen Frequenz berechnet [17].

Neben der mechanischen Zerstörung von Zellen führt der Einsatz von gewebezersetzen Enzymen zur Erhöhung des Desintegrations-Index und damit zur Zellzerstörung [16].

Häufig wird ein Gefrier-Tau-Zyklus als Methode verwendet, um eine totale Zellzerstörung herbeizuführen. Prinzipiell konnte anhand von Blättern nachgewiesen werden, dass Einfrieren und anschließendes Auftauen zum Absenken der elektrischen Zellwiderstände führt [12]. Bei Äpfeln wird teilweise davon ausgegangen, dass ein Gefrier-Tau-Zyklus alle Zellen komplett zerstört [41]. Somit kann bei dieser Annahme ein Gefrier-Tau-Zyklus als Standard für komplette Zellzerstörung angenommen werden [42]. Hinweise für eine komplette Zellzerstörung gibt die Frequenzunabhängigkeit und damit das Verschwinden des β -Dispersionsgebietes nach einem Gefrier-Tau-Vorgang [16] [43]. Dagegen sprechen Untersuchungen, die beim Einfrieren und anschließendem Auftauen nur von einem Großteil zerstörter Zellen sprechen und dieses mit mikroskopischen Untersuchungen beweisen [44]. Unstrittig ist, dass Gefrier-Tau-Zyklen biologische Zellen zerstören. Der Grad der Zellzerstörung ist abhängig von der Einfriereschwindigkeit und der Frucht- bzw. Gemüseart sowie deren unterschiedlicher stofflicher Zusammensetzung [17].

Reife

Während der Reifeprozesse von Obst und Gemüse verändern sich die Zellstrukturen. Ob man diese Prozesse mit impedanzspektroskopischen Methoden messen kann, wird in der Fachwelt kontrovers diskutiert.

So konnten beispielsweise unreife von überreifen Bananen mittels kapazitiver Messungen [13] sowie unreife von reifer Tomatenhaut aufgrund ihrer Impedanzwerte unterschieden werden [14]. Weitere Untersuchungen während der Reifung von Kiwis bei den Frequenzen 50 Hz und 1 MHz blieben hingegen erfolglos, während Untersuchungen an Nektarinen, Tomaten und Datteln eine Impedanzveränderung während der Reifung zeigten [45]. Bei Messungen an Erdbeeren, die unter CO₂-Atmosphäre gelagert wurden, konnte eine Erhöhung der Festigkeit nachgewiesen werden, die mit der Veränderung der Impedanz übereinstimmte [46]. Bei Versuchsreihen zur Reifung von Äpfeln wurden gute Korrelationen zwischen Reifung

und elektrischen Eigenschaften des Apfelpewebes gefunden [47]. In anderen Untersuchungen zeigte sich vor allem die Impedanz bei niedrigen Frequenzen sensibel für unterschiedliche Reifegrade. Allerdings war die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse innerhalb der Versuche nicht optimal [36]. Dagegen wurden in anderen Messungen mit Äpfeln über eine Lagerzeit von 10 Wochen kaum Veränderungen bei den Impedanzwerten festgestellt. Allerdings konnten Korrelationen zwischen Zuckergehalt und elektrischen Parametern gefunden werden [48].

Ein allgemeines Problem der Reifeuntersuchungen ist, dass es nur für wenige Produkte Messverfahren zur Reifebestimmung gibt. Meistens handelt es sich hierbei nur um Reifeindices [49] [50]. Außerdem stellt sich die Frage, wie fein die Abstufungen zwischen den untersuchten Reifegraden gewählt wurden. Eine Unterscheidung von unreif zu überreif erscheint ohne Probleme mit impedanzspektroskopischen Methoden messbar [13] [14], wohingegen detailliertere Reifegradabstufungen wesentlich schwieriger möglich sind [48]. Es bleibt anzumerken, dass die erwähnten Untersuchungen mit verschiedenen Messsonden durchgeführt wurden.

Trocknung und Qualitätsparameter

Neben der Beschreibung von Zellzerstörungen und Reifevorgängen an pflanzlichen Geweben mit Hilfe der Impedanzspektroskopie wurden auch Untersuchungen zur Trocknung und zur Korrelation mit weiteren Qualitätsparametern durchgeführt.

während der Trocknung von Apfelscheiben konnte ein Zusammenhang zwischen Wasserverlust und elektrischen Parametern gefunden werden. Der Betrag der Impedanz nahm mit sinkendem Wassergehalt zu [51]. Bei der Trocknung von Auberginen von 94% Massenanteil auf 75% Massenanteil Wassergehalt konnte eine Erhöhung der Impedanz im niederfrequenten Bereich nachgewiesen werden [43].

Bei impedanzspektroskopischen Untersuchungen von unterschiedlichen Apfelsorten wurden keinerlei Korrelationen zwischen Impedanzwerten, dem Verhältnis Brix- zu Säure-Gehalt und dem pH-Wert gefunden. Es wurden jedoch Korrelationen zwischen Brix und titrierbarer Säure nachgewiesen, allerdings nicht sortenunabhängig und auch nicht bei allen untersuchten Apfelsorten. Die Messungen über das Frequenzband von 1 Hz bis 1 MHz führten, abhängig von den Apfelsorten, bei verschiedenen Frequenzen zu unterschiedlichen Aussagen. Korrelationen zu

Qualitätsparametern wurden je nach Apfelsorte entweder bei 224 kHz, bei 1 kHz oder bei 1 MHz nachgewiesen. [52]

In allen oben genannten Untersuchungen wurden die Impedanzspektren konduktiv mit Elektroden aufgenommen. Bisher sind keine Untersuchungen an Obst und Gemüse mit induktiven Messverfahren bekannt. Konduktive Messungen weisen den Nachteil auf, dass sie berührend und meist auch zerstörend arbeiten. In der Praxis konnte das Verfahren nur zur Stichprobenmessung eingesetzt werden. Bisher findet die Impedanzspektroskopie vor allem in der Forschung zur Beschreibung des Zerstörungsgrades von pflanzlichen Geweben Anwendung [16] [40] [17] [41] [42].

Damit die Impedanzspektroskopie häufiger in der Praxis genutzt wird, muss an Messverfahren gearbeitet werden, die im Hinblick auf die jeweiligen Anwendungen selektiv und sensitiv genug sind. Häufig sind die Messverfahren sehr genau, werden aber von verschiedenen Faktoren wie z. B. Temperatur oder mechanischer Belastung sehr stark beeinflusst. Voraussetzung für eine häufigere Nutzung ist die erfolgreiche Korrelation von impedanzspektroskopischen Messungen mit Qualitätsparametern, deren Kontrolle in Gesetzen, Vorschriften oder Richtlinien vorgeschrieben sind [18].

5.4 Äpfel als Rohmaterial für die Fruchtsaftherstellung

5.4.1 Der Qualitätsbegriff allgemein

Die Qualität wird allgemein nach der DIN EN ISO 9000:2005 als „Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt“ definiert [53].

Bei Lebensmitteln beschreibt der Begriff Qualität den Grad der Exzellenz eines Produktes oder dessen Eignung für einen bestimmten Verwendungszweck. Qualitätsparameter umfassen dabei sensorische Eigenschaften, wie Aussehen, Textur, Geschmack, Aroma, Nährwerte, chemische Bestandteile, physikalische Eigenschaften, funktionale Eigenschaften sowie Mängel. Je nach Verwendungszweck wird die Qualität unterschiedlich bewertet. Qualität wird somit nicht nur auf den Endverbraucher bezogen sondern auch auf andere Teilnehmer der Produktionskette [54] [4] [55].

Da sich die Bestimmung der Qualität am Verwendungszweck des Produktes orientiert und nicht für alle verschiedenen Verwendungszwecke vereinheitlicht werden kann [42] [4], werden im Folgenden nur die Qualitätsanforderungen an Äpfeln für die Fruchtsaftherstellung berücksichtigt.

5.4.2 Äpfel als Rohware

Äpfel stellen die bedeutendste Fruchtart in Europa dar. Sie werden am häufigsten zu Fruchtsaft verarbeitet. Für die Herstellung von Fruchtsaft werden meist verschiedene Apfelsorten verwendet [4] [6]. Die geeignete Sortenauswahl ist entscheidend für die Produktion eines aromatischen Apfelsaftes [7]. Apfelsorten unterscheiden sich mitunter sehr stark in ihren typischen Merkmalen. In Tabelle 5-1 sind die Streubreiten der wichtigsten Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Äpfeln unter Berücksichtigung der Sortenvariabilität dargestellt. Die Apfelform kann ebenfalls sehr stark variieren. Grundformen des Apfels sind u.a. flachkugelig, kugelig, hochgebaut, walzenförmig, stumpfkegelförmig und glockenförmig [56].

Tabelle 5-1: Stoll tabelliert wichtige Inhaltsstoffe und Eigenschaften von Äpfeln unter Berücksichtigung der Sortenvariabilität sowie deren Streubreiten wie folgt [10].

Hauptbestandteile [%]		
Inhaltsstoff	Mittelwert	Streubreiten
Wasser	84	77 - 90
Eiweiß	0,34	0,02 - 0,45
Fett	0,3	0,2 - 0,64
Kohlenhydrate	12	9 - 15
Faserstoffe	1	0,9 - 1,6
Titrierbare Säuren	0,7	0,08 - 2,75
Mineralstoffe	0,32	0,2 - 0,4
Physikalische und chemische Eigenschaften		
pH-Wert pflückreif	3,0 - 3,4	2,1 - 4,0
pH-Wert essreif	3,5 - 3,8	3,3 - 4,2
pH-Wert überreif	>4,2	
Stärke unreif	3	0 - 6
Stärke pflückreif	0,1	0 - 3
Stärke essreif	0	0 - Spuren
Fruchtdurchmesser	70 mm	2 - 140 mm
Fruchtgewicht	140 g	1 - 1400 g
Dichte	0,81 $\frac{g}{cm^3}$	0,69 - 0,94 $\frac{g}{cm^3}$
Penetrometerwert zum Pflückzeitpunkt in kg bei 11 mm-Zylinder	6,82	6,36 - 11,36

5.4.3 Anforderungen an die Qualität von Äpfeln als Rohmaterial

Damit Äpfel für die Fruchtsaftherstellung geeignet sind, müssen sie voll entwickelt, im passenden Reifezustand, ausreichend frisch und frei von Fäulnis, Verschmutzung sowie Fremdgeruch sein [4] [6] [7] [10]. Offene Verletzungsstellen sind akzeptabel, sofern die Früchte schnell weiterverarbeitet werden [10]. Die Aussortierung von für Fruchtsaft ungeeigneten Äpfeln erfolgt überwiegend manuell [6] [7]. Als Hilfe werden endlos umlaufende Verlesebänder oder Rollenverlesebänder verwendet [8].

5.4.4 Die Reife von Äpfeln

Während der Reifung von Obst und Gemüse verändern sich deren Zellstrukturen [45]. Auch bei der Reifung von Äpfeln laufen eine Vielzahl an abbauenden und aufbauenden Prozessen ab. Bekannte Reifevorgänge sind die Ethylenbildung, der Stärkeabbau, das Weichwerden des Fruchtfleisches und der Chlorophyllabbau [10] [57].

Die Reife kann in Unreife, Pflückreife, Essreife und Überreife unterschieden werden. Bei Unreife überwiegen die Unreifemerkmale (siehe Tabelle 5-1), wie zu grünes und zu hartes Fruchtfleisch, zu grüne Apfelhaut, grasiger und zu saurer Geruch und Geschmack sowie eine fehlende Aromaentwicklung. Die Pflückreife wird erreicht wenn ein Mindestmaß an qualitätsgebenden Inhaltsstoffen vorhanden ist. Die Unreifemerkmale sind zum größten Teil nicht mehr vorhanden, so dass mit einer langen Lagerfähigkeit gerechnet werden kann [10]. Die Pflückreife kann auch als Anzahl der Tage vor dem optimalen Reifezeitpunkt angegeben werden [58]. Die Essreife ist definiert als der Zeitpunkt, an dem die Unreifemerkmale soweit zurückgebildet sind, dass die Äpfel im Hinblick auf die sensorischen Eigenschaften als optimal für den Konsumenten angesehen werden. Bei der Überreife haben die Äpfel das Optimum der sensorischen Eigenschaften überschritten [10].

Die Reife kann nur für wenige Produkte mit Messverfahren bestimmt werden. In den meisten Fällen handelt es sich nur um Reifeindices

[49] [10]. Bisher ist kein Messverfahren bekannt, das den Reifegrad von Äpfeln unabhängig von der Apfelsorte sicher beschreibt. Reifemerkmale können unter anderem der pH-Wert, die Fruchtfleischfestigkeit, der Zuckergehalt, der Säuregehalt, der Stärkeabbauwert (Jod-Stärketest) oder das optische Erscheinungsbild des Apfels sein. Allerdings sind diese Merkmale unter anderem von der Apfelsorte, dem Anbauort und den Klimabedingungen während des Wachstums abhängig [50].

Die Fruchtfleischfestigkeit wird häufig als wichtigstes Qualitätsmerkmal beschrieben [59] [60] [61]. Man kann sie mit einem Penetrometer bestimmen. Dazu wird die Fruchthaut an der Messstelle entfernt und ein runder Stempel mit elf mm Durchmesser acht mm in das Fruchtfleisch gedrückt. Hierbei wird die maximal aufzubringende Kraft ermittelt [57].

Der Stärketest zeigt den Grad des Stärkeabbaus zu Zucker im Apfel an. Stärke kann mit Lugol'scher Lösung (Jod-Lösung) blau gefärbt werden, Zucker hingegen lässt sich nicht mit Lugol'scher Lösung blau anfärben. Die Frucht wird quer zur Mitte halbiert und an den Schnittflächen mit der Jod-Lösung bestrichen. Der Anteil der blaugefärbten Schnittflächen gibt den Wert des Stärketestes an. Er reicht von dem Wert eins, der aussagt, dass die komplette Schnittfläche blau ist und damit noch keine Stärke abgebaut wurde, bis zu dem Wert zehn, was sich durch einen kompletten Stärkeabbau mit keinerlei Blaufärbung der Schnittfläche zeigt. Je nach

Grad der Blaufärbung werden Werte zwischen eins und zehn vergeben (siehe Abbildung 5-11) [10] [57] [62]. Der Stärketest ist allerdings eine subjektive Messmethode, mit der man den Stärkegehalt nicht quantitativ bestimmen kann [62].



Abbildung 5-11: Stärkeabbau von Äpfeln sowie der dazugehörige Stärkeabbauwert [63].

Der Zuckergehalt wird häufig mit einem Refraktometer gemessen. Der Refraktometerwert wird in °Brix angegeben und ist ein Maß für die lösliche Trockensubstanz im Saft. Mehr als 90% der löslichen Trockensubstanz des Saftes besteht aus Zucker. Somit wird der Refraktometerwert als Zuckergehalt angegeben [57].

Ein häufig benutzter Reifeparameter ist der Streif-Index [58]. Der Streif-Index wird aus einer Kombination von drei verschiedenen Parametern gebildet. Dieser Reifeindex beruht auf der Messung der Fruchtfleischfestigkeit, des Zuckergehalts und des Stärkegehalts (Jod-Stärketest). Der Reifeindex wird nach Formel 5.20 berechnet.

$$\text{Streif} - \text{Index} = \frac{\text{Fruchtfleischfestigkeit} \left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right]}{\text{Zuckergehalt}[\text{°Brix}] \cdot \text{Stärketest}} \quad \text{Formel 5.20}$$

Der Streif-Index liefert Richtwerte für die Reifebeschreibung [57]. Je nach Apfelsorte und Anbauort variiert der Streifindex [57] [64] [65]. Zu Beginn der Fruchtentwicklung liegt er zwischen fünf und sechs. Zum optimalen Erntezeitpunkt werden Werte

zwischen 0,3 und 0,08 erreicht [64]. Für optimal essreife Äpfel wird ein Streif-Index von 0,07 genannt [66].

In neueren Forschungen wurde der Einsatz der elektronischen Nase zur Reifebeschreibung erprobt. Es wurden gute Ansätze zur Reifebeschreibung und Korrelationen mit anderen Reifeparametern gefunden [61] [64] [67]. Allerdings werden noch mehr Untersuchungen auf diesem Gebiet bis zu einer praktischen Umsetzbarkeit nötig sein [67]. Eine Kombination von verschiedenen zerstörungsfreien Sensoren (Nahinfrarotspektroskopie, elektronische Nase und optisches Messsystem) mit einem künstlichen neuronalen Netz führte zur Verbesserung der Qualitätsbeschreibung von Äpfeln [68]. So konnte mit der Kombination von Sensoren (Nahinfrarotspektroskopie und akustischer Resonanzanalyse) eine Verbesserung der Reifebeschreibung von Äpfeln erreicht werden [69].

5.4.5 Frische und Sauberkeit von Äpfeln

Je nach Apfelsorte ist man auf frische Ware für die Fruchtsaftproduktion angewiesen. Zwar kann mit sachgerechter Lagerung die Qualität von pflückreif geernteten Äpfeln sogar noch verbessert werden, allerdings setzen sofort nach der Ernte chemische, biologische und mikrobiologische Prozesse ein, welche die Wertbestandteile je nach Apfelsorte unterschiedlich schnell abbauen [6]. Deshalb sollte mit der Verarbeitung von Obst zu Fruchtsaft möglichst bald nach der Anlieferung begonnen werden [8].

Mit Schmutz behaftete Äpfel faulen, aufgrund der erhöhten Anzahl von Mikroorganismen, schneller als trockenes und sauberes Obst. Der Keimgehalt und damit die Sauberkeit der Rohware ist mitentscheidend für die Lagerfähigkeit und die Qualität der Rohware [6]. Bei der Verarbeitung von Laub, Gras usw. würden Geruchs- und Geschmacksfehler im Saft auftreten. Durch Waschen von Früchten vor der Verarbeitung zu Fruchtsaft können unerwünschte Stoffe wie z. B. Pflanzenschutzmittelrückstände oder Erde entfernt und der Keimgehalt reduziert werden [8].

5.4.6 Parasitärer Verderb von Äpfeln

Faule und angefaulte Früchte sind für die Herstellung von Fruchtsaft nicht geeignet. Bei Äpfeln wurden bisher über 150 verschiedene Schimmelpilze entdeckt. Allerdings

verursachen nur die wenigsten einen bedeutenden wirtschaftlichen Schaden [10]. Die wichtigsten Fäulniserreger sind Monilia-Arten, Penicillium expansum, Penicillium glaucum, Mucor-Arten, Botrytis cinerea, Gloesporium-Arten, Fusicladium-Arten und Fusarium-Arten [6].

Der Befall von Schimmelpilzen erfolgt bei Äpfeln meist über eine Verletzung der Cutikula. Die Pilze sondern in diese Wundstellen gewebeauflösende Enzyme, wie beispielsweise Pektinasen und Cellulasen, ab und können so leichter in das Innere des Apfels wachsen. Werden Äpfel von Schimmelpilzen befallen, werden somit die Zellstrukturen zerstört [10].

Patulin

Patulin ist das am häufigsten vorkommende Mykotoxin bei Äpfeln. Es wird meistens von Penicillium expansum produziert. Infektionen werden durch Beschädigungen der Oberflächen ermöglicht [70] [71] [72]. Patulin ist in größeren Mengen gesundheitsgefährdend und ein Indiz für schlechte Rohmaterialqualität [4]. Die Bildung von Patulin ist abhängig von den Umgebungsbedingungen wie z. B. der Temperatur oder dem Sauerstoffgehalt [72]. Der Patulingehalt steigt mit zunehmender Fäulnis der Äpfel an. Der pH-Wert und der Brix-Gehalt des Saftes verändern sich ebenfalls mit dem Faulanteil [73]. Äpfel mit mehr als 30% Massenanteil Faulanteil sollten schon aufgrund ihres Patulingehaltes nicht zur Fruchtsaftherstellung verwendet werden [74]. Das Patulin befindet sich vor allem im Faulanteil des Apfels. Im gesunden Anteil wurde kaum Patulin nachgewiesen. Durch das Entfernen des faulen Fruchtgewebes kann bei Äpfeln der Patulingehalt reduziert werden [2] [3].

Kernhausfäule

Mit Kernhausfäule infizierte Früchte sind äußerlich in den frühen Stadien der Fäulnis nicht zu erkennen. Die Fäulnis beschränkt sich zunächst nur auf das Kernhaus. In späteren Stadien wird auch, je nach Schimmelpilz, das Fruchtgewebe befallen. Kernhausfäule kann von vielen verschiedenen Pilzen verursacht werden. Schimmelpilze, die auch auf das Fruchtgewebe übergreifen, sind Pilze der Familien Fusarium, Botrytis, Penicillium, Trichothecium und Nectria. Kernhausfäule tritt bevorzugt bei Apfelsorten auf, die einen offenen Blütenkelch besitzen [10].

5.4.7 Nichtparasitärer Verderb von Äpfeln

Nichtparasitärer Verderb sind Fruchtschäden, die nicht von Pilzen oder Tieren verursacht werden. Zu den nichtparasitären Schäden gehören Stippigkeit, Bormangelschäden, Berostung der Fruchthaut, Glasigkeit, Hautrisse, Schäden an Lentizellen, Wasserverluste, Schrumpfungen, mangelhafte Aromaausbildung, Fremdgeruch, Hautverbräunungen, Stoßflecken und diverse Gewebezusammenbrüche, wie z. B. O₂-Mangelschäden, Kälte-, Gefrier- und Hitzeschäden sowie Schäden verursacht durch CO₂-Überschuss [10].

Stoßflecken sind mechanische Beschädigungen des Fruchtgewebes und damit der Zellen. Die mechanischen Beschädigungen erleichtern Mikroorganismen den Befall des Gewebes. Das Vorhandensein von Stoßflecken führt bei Tafeläpfeln zur Abwertung der Qualität. Für Tafeläpfel sind Stoßflecken eines der größten Qualitätsprobleme [75]. Äpfel mit Stoßflecken sind für die Fruchtsaftherstellung nicht ungeeignet, müssen aber aufgrund der Gefahr des Mikroorganismenbefalls möglichst schnell weiterverarbeitet werden [10].

Wasserverluste treten bei Äpfeln unter anderem während der Lagerung auf und führen bei der Fruchtsaftherstellung zu wirtschaftlichen Verlusten. Wasserverluste im Bereich von 5 - 7% Massenanteil sind äußerlich am Apfel noch nicht zu erkennen. Mit passenden Lagerkonditionen kann der Wasserverlust minimiert werden [10].

6 Material und Methoden

6.1 Das induktive Impedanzmesssystem

Die Messungen wurden mit einem induktiven Impedanzmesssystem basierend auf dem MDP-H-25x20 mit Förderband der Firma Sartorius Mechatronics GmbH (Aachen) durchgeführt (siehe Abbildung 6-1). Die Spulenöffnung ist 20,2 cm hoch, 25,3 cm breit und 37 cm tief. Das Förderband ist 150 cm lang und 20 cm breit.

Am induktiven Impedanzmesssystem können Frequenzen im Bereich von 197 - 638 kHz eingestellt werden. Für die Versuche wurde 197 kHz als Arbeitsfrequenz gewählt, da Messungen im niedrigeren Frequenzbereich des β - Dispersionsgebietes besonders zur Beschreibung von Beschädigungen des Apfelgewebes geeignet sind [36]. Das verwendete induktive Messsystem zeichnet zeitabhängig während einer Messung 4096 Messwerte auf zwei Spannungskanälen (U_A und U_B) auf. Über eine CAN- Bus- Schnittstelle wurden die Rohdaten in einen Computer eingelesen und dort mit einer für diesen Zweck mit Labview 8.2 (National Instruments, Austin, USA) programmierten Messsoftware aufgezeichnet und weiterverarbeitet. Die Software wurde nach Vorgaben vom Labor für verfahrenstechnisches Messen der Hochschule für angewandte Wissenschaften Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt programmiert. Die aufgezeichneten Parameter waren die Zeit und die Messwerte der beiden Spannungskanäle (U_A und U_B). Die Rohdaten der beiden Spannungskanäle werden mittels Tiefpassfilterung mit Hilfe einer schnellen Fourier- Transformation gefiltert. Aus den Spektren wurden alle Gleichanteile sowie Frequenzen größer als 11 Hz entfernt. Aus den gefilterten Signalen wurden $U_{0,max}$ (Formel 5.18) und φ (Formel 5.19) berechnet (siehe 5.2.1).



Abbildung 6-1: Das induktives Impedanzmesssystem auf Basis des MDP-H-25x20 (Sartorius Mechatronics GmbH, Aachen).

6.2 Probenmaterial

Für die Untersuchungen wurden verschiedene Apfelsorten unterschiedlicher Reifegrade verwendet. In Tabelle 6-1 sind die verwendeten Apfelsorten aufgelistet. Es wurden einerseits Äpfel aus dem örtlichen Einzelhandel verwendet. Zum anderen wurden Äpfel von der Baumschule Leinweber (Niederkalbach) und dem Streuobstlehrpfad Adam Zentgraf (Hausen/Rhön) bezogen. Die Äpfel aus dem Einzelhandel waren gelagerte Äpfel. Die Äpfel von der Baumschule und dem Streuobstlehrpfad wurden einen Tag nach der Ernte bezogen und je nach Versuch noch eingelagert. Die Pflückreife der Äpfel wurde durch einen Gärtnermeister mit langjähriger Erfahrung im Apfelanbau sensorisch ermittelt. Die Methode wird bei Brezmes [50] beschrieben.

Die Äpfel für die nicht definierten Fäulnisversuche wurden von der Kelterei Elm (Flieden) bezogen. Bei diesen Äpfeln handelt es sich um Streuobstäpfel deren Sorte, Lagerzeit und Reifezustand unbekannt ist. Als maximale Lagerzeit wurden vier Wochen angenommen.

Tabelle 6-1: verwendete Apfelsorten; 1 = Methodenentwicklung; 2 = Apfelprofilmessungen; 3 = Fäulnisversuche; 4 = Reifeversuche; 5 = Austrocknungsversuche; 6 = Enzymversuch; 7 = Kernfäule; 8 = Einfrierversuche; A = Baumschule Leinweber, Niederkalbach; B = Streuobstlehrpfad Adam Zentgraf, Hausen/Rhön; C = Einzelhandel; a = sofort nach der Ernte; b = gelagert.

Sorte	Verwendung	Herkunft	Zeitpunkt der Messung
Antonowka	1, 2	A	a
Ariwa	1, 2	B	a
Berliner Schafsnase	1, 2	B	a
Bohnapfel	1, 2	B	a
Boskoop	1, 2	A	a
Braeburn	1, 2, 6, 7, 8	A	b
Coulons Renette	1, 2	A	a
Discovery	1, 2	A	a
Dülmener Herbstrosenapfel	1, 2	A	a
Effeltricher Findling	1, 2	A	a
Elstar	3	C	b
Gala Tenroy	1, 2	C	b
Gescher Klosterapfel	2, 3	A	b
Golden Delicious	1, 2	C	a
Goldparmäne	2, 3, 4, 5	A	a, b
Granny Smith	1, 2	C	b
Idared	8	C	b
Jonagold	7, 8	C	b
Kaiser Wilhelm	1, 2	A	a
Käsaapfel Rothenkirchen	1, 2	A	a
Linsenhöfer Sämling	2, 3, 4, 5	A	a, b
Lohrer Rambour	1, 2	B	a
Lombarts Kavill	2, 3	A	b
Nela	1, 2	A	a
Ontario	1, 2	A	a
Otava	1, 2	B	a
Prima	1, 2	A	a
purpurroter Cousinot	1, 2	A	a
Remo	1, 2	B	a
Rheinischer Winterapfel	1, 2	A	a
Roter Gravensteiner	1, 2	B	a
Schneiderapfel	1, 2	A	a
Schöner von Herrnhut	2, 3, 4, 5	A	a, b
Schöner von Nordhausen	1, 2	A	a
Schöner von Wiltshire	2, 3	A	a, b
Selena	1, 2	A	a
Teser ITSR 30	1, 2	A	a

6.3 Messungen zur Entwicklung der Messmethode

6.3.1 Messungen zum Einfluss der Position der Probe

Um den Einfluss der Probenposition auf dem Förderband zu ermitteln, wurde aus Äpfeln ein Würfel geschnitten und an unterschiedlichen Positionen durch das induktive Impedanzmesssystem geführt.

Für diesen Würfel wurden Äpfel der Sorte Braeburn aus dem örtlichen Einzelhandel bezogen. Die Sorte Braeburn wurde für die Versuche gewählt, da sie ganzjährig zur Verfügung steht. Nach dem Schälen wurden aus den Äpfeln mit einem Pommes Frites- und Stifteschneider der Firma GEFU Küchenboss GmbH & Co. KG (Eslohe) Stifte mit der Kantenlänge von einem cm geschnitten. Die Apfelstifte wurden auf sechs cm Länge geschnitten. 36 Apfelstifte wurden zu einem Würfel zusammengefügt. Apfelstifte, die Teile des Kernhauses beinhalteten, wurde nicht für den Apfelwürfel verwendet. Die Größe des Apfelwürfels sollte mit dem Gewicht eines durchschnittlichen Apfels vergleichbar sein. Aus diesem Grund wurde ein Würfel mit Kantenlänge sechs cm gewählt.

Der Apfelwürfel wurde bei fünf verschiedenen Höhen (7,2 cm; 8,6 cm; 10,0 cm; 10,8 cm; 12,2 cm; jeweils vom Mittelpunkt des Würfels gemessen) an je acht verschiedenen Breiten (8 cm; 9,6 cm; 11,2 cm; 12,8 cm; 14,2 cm; 15,8 cm; 17,4 cm; 19 cm; jeweils vom Mittelpunkt des Würfels gemessen) auf dem Förderband platziert und je Messposition 15-mal gemessen und anschließend daraus der arithmetische Mittelwert berechnet. Als Nullpunkt für die verschiedenen Messpositionen wurde die untere linke Ecke des induktiven Impedanzmesssystems gewählt (siehe Abbildung 6-2). Um die unterschiedlichen Höhen zu erreichen, wurden die Apfelwürfel auf Styropor-Platten durch das induktive Impedanzmesssystem geführt. Die verwendeten Styropor-Platten hatten keinen nachweisbaren Einfluss auf die Messungen, was in Vorversuchen überprüft wurde.

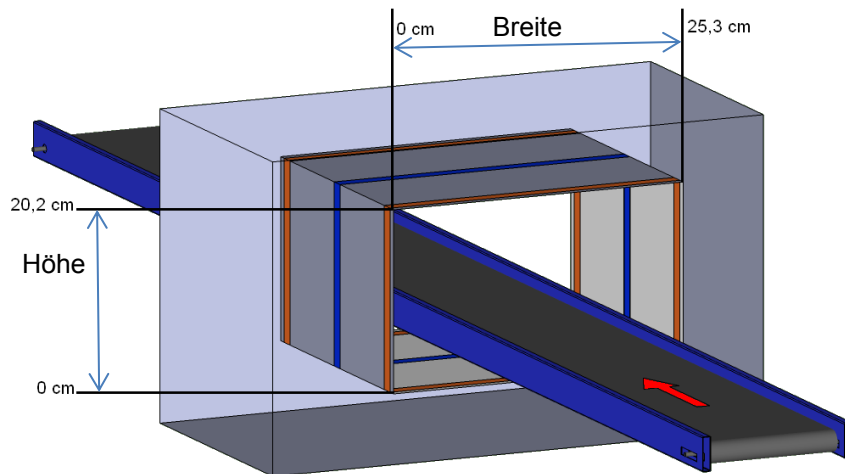


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des verwendeten induktiven Impedanzmesssystems.

6.3.2 Messungen zum Einfluss der Probentemperatur

Zur Ermittlung des Einflusses der Probentemperatur auf die Messungen mit dem induktiven Impedanzmesssystem wurden 15 Äpfel der Sorte Braeburn aus dem örtlichen Einzelhandel bezogen. Äpfel der Sorte Braeburn bieten sich für diese Messungen an, da sie ganzjährig bezogen werden können. Die Äpfel wurden in Wasserbädern auf 15°C, 20°C, 25°C, 30°C und 35°C temperiert. Temperaturen über 35°C führen bei Äpfeln zu einer Veränderung der Zellstrukturen [76]. Da ausschließlich der Temperatureinfluss ermittelt und eventuelle Denaturierungseffekte verhindert werden sollten, wurde 35°C als höchste Temperatur gewählt. Jedes Wasserbad wurde mit einem zusätzlichen Apfel, der in seiner Größe und Form mit den anderen Äpfeln vergleichbar war, mit Temperaturfühler im Kern versehen. Die Temperatur wurde mit dem Digitalthermometer GTH 175/MO der Firma Greisinger electronic GmbH (Regenstauf) gemessen. Nachdem der Apfel mit dem Temperaturfühler die vorgegebene Kerntemperatur erreicht hatte, wurden die jeweiligen Äpfel mittig mit dem Blütenkelch nach unten in der Unterhälfte einer Petrischale auf dem Förderband platziert und je neunmal gemessen. Aus den neun Messungen wurde anschließend der arithmetische Mittelwert berechnet.

6.3.3 Messungen zum Einfluss der geometrischen Probenform und der Probenmasse

Um den Einfluss der Probengeometrie und der Masse auf die Messwerte zu ermitteln, wurden aus gesunden Äpfeln unterschiedliche Formen mit verschiedenen Massen geschnitten. Dazu wurden verschiedenförmige Quader und Zylinder aus Äpfeln hergestellt und gemessen. Außerdem wurden gesunde Äpfel verschiedener Sorten durch das induktive Impedanzmesssystem geführt, um den Einfluss kugelförmiger Objekte zu bestimmen. Vor der Messung mit dem induktiven Impedanzmesssystem wurden die Proben mit der Waage Typ 1493 der Firma Sartorius AG (Göttingen) gewogen.

Quader

Für die Quadermessungen wurden Äpfel der Sorte Gala verwendet. Die Sorte Gala wurde wegen ihrer ganzjährigen Verfügbarkeit gewählt. Die Äpfel wurden geschält und mit einem Pommes Frites- und Stifteschneider der Firma GEFU Küchenboss GmbH & Co. KG (Eslohe) in Stifte mit der Kantenlänge einen cm geschnitten. Die Länge der einzelnen Stifte betrug 3,8 cm. Die Apfelstifte wurden zu einem Quader zusammengesetzt und zur Stabilisierung mit einer Klarsichtfolie umwickelt. Die verwendete Klarsichtfolie besaß keinen nachweisbaren Einfluss auf die Messungen, was in Vorversuchen überprüft wurde.

Die Massen und Abmessungen der verwendeten Quader sind in Tabelle 6-2 aufgeführt. Für die Messung wurden die Apfelquader mittig auf dem Förderband positioniert und durch das induktive Impedanzmesssystem geführt. Bei quadratischer Querschnittsfläche wurden die Quader bei drei verschiedenen Ausrichtungen auf dem Förderband gemessen (siehe Abbildung 6-3). Bei nichtquadratischer Querschnittsfläche wurden sechs verschiedene Positionen gewählt (siehe Abbildung 6-4). Jeder Apfelquader wurde pro Position dreimal gemessen. Aus den drei ermittelten Messwerten wurde der arithmetische Mittelwert berechnet.

Tabelle 6-2: Abmessungen und Massen der verwendeten Apfelquader.

Masse (g)	Querschnitt (cm ²)	Seitenfläche (cm ²)	Höhe (cm)	Breite (cm)	Länge (cm)	Messpositionen
55,6	16	15,2	4	4	3,8	3
68,9	20	19	5	4	3,8	6
85,0	25	19	5	5	3,8	3
100,9	30	22,8	6	5	3,8	6
121,2	36	22,8	6	6	3,8	3
140,8	42	26,6	7	6	3,8	6
164,2	49	26,6	7	7	3,8	3
186,3	56	30,4	8	7	3,8	6
213,5	64	30,4	8	8	3,8	3
239,2	34,2	72	9	3,8	8	2
269,6	34,2	81	9	3,8	9	2

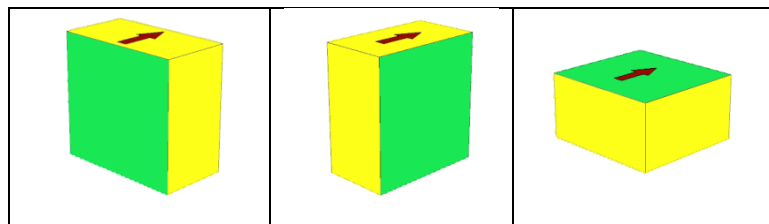


Abbildung 6-3: Messpositionen bei quadratischer Querschnittsfläche.

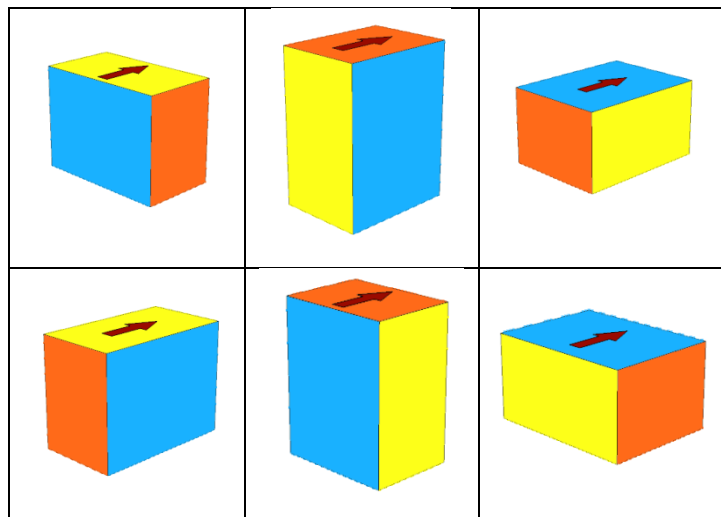


Abbildung 6-4: Messpositionen bei nichtquadratischer Querschnittsfläche.

Zylinder

Für die Zylindermessungen wurden Äpfel der Sorten Gala, Elstar; Jonagold und Braeburn unterschiedlicher Größen verwendet. Die Sorten wurden wegen ihrer ganzjährigen Verfügbarkeit und ihrer unterschiedlichen Durchmesser gewählt. Die Äpfel wurden parallel zum Blütenkelch mit einem Alleschneider Technostar MS100R der Firma Venalasia Import GmbH (Kösching) in etwa einen cm dicke Apfelscheiben geschnitten. Die Apfelscheiben wurden nach Durchmessern sortiert. Apfelscheiben mit gleichen Durchmessern wurden zu einem Zylinder aufeinander gestapelt. Apfelscheiben mit Kernhausanteilen wurden für die Zusammensetzung der Zylinder nicht aussortiert, da deren Kernhausanteil an den Apfelscheiben verhältnismäßig gering war. Die Massen und Abmessungen der Zylinder sind in Tabelle 6-3 aufgeführt. Für die Messung wurden die Apfelzylinder mittig in der Unterhälfte einer Petrischale auf das Förderband positioniert und durch das induktive Impedanzmesssystem geführt. Jeder Apfelzylinder wurde dreimal gemessen. Aus den drei ermittelten Messwerten wurde der arithmetische Mittelwert berechnet.

Tabelle 6-3: Abmessungen und Massen der verwendeten Apfelzylinder.

Durchmesser (cm) ->	5,9		6,3		6,9		7,5		7,7		8,9	
	Höhe (cm)	Masse (g)	Höhe (cm)	Masse (g)	Höhe (cm)	Masse (g)	Höhe (cm)	Masse (g)	Höhe (cm)	Masse (g)	Höhe (cm)	Masse (g)
	15,4	313	14,2	336	13,3	399	14,7	499	14,3	511	13,8	632
	13,5	297	13,5	317	12,5	374	14,0	473	13,3	479	13,2	596
	12,7	282	12,8	300	11,8	357	13,1	446	12,5	449	12,4	564
	11,2	249	11,9	282	11,1	336	12,3	419	11,6	416	11,8	533
	10,4	232	11,1	266	10,3	312	11,4	393	11,0	380	10,8	495
	9,7	216	10,4	248	9,6	289	10,6	366	9,7	345	10,0	459
	8,9	200	9,6	228	8,7	268	9,9	339	8,8	317	9,1	424
	8,1	182	8,8	209	8,1	247	9,0	312	8,0	283	8,3	389
	7,4	165	8,0	191	7,4	233	8,3	285	7,0	252	7,6	351
	6,6	146	7,2	175	6,5	199	7,4	257	6,2	220	6,8	317
	5,6	127	6,4	156	5,9	176	6,5	229	5,4	196	6,1	282
	4,9	108	4,9	117	5,0	153	5,7	199	4,5	163	5,3	249
	4,1	88	4,0	96	4,3	129	4,9	171	3,6	132	4,6	214
	3,2	69	3,3	78	3,6	108	4,1	143	2,8	100	3,8	179
			2,4	58	2,9	86	3,3	115			3,1	143
			1,5	40	2,1	64	2,5	86			2,2	104
					1,4	43					1,5	69

Äpfel in ihrer natürlichen Form

Für die Messungen wurden alle in Tabelle 6-1 mit der Ziffer eins aufgeführten Apfelsorten verwendet. Die Apfelsorten wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen kugeligen Formen und als typische Vertreter für Streuobstsorten gewählt. Pro Sorte wurden für die Messungen fünf Äpfel herangezogen. Da die Querschnittsfläche der Äpfel nicht ohne weiteres ermittelt werden konnte, wurden die Äpfel mit einer Canon EOS 400 der Firma Canon Deutschland GmbH (Krefeld) vor einem blauen Hintergrund fotografiert. Aus den Fotos wurde anschließend die Querschnittsfläche mit einer vom Fachgebiet Lebensmittelverfahrenstechnik der Hochschule Fulda mit Labview 8.2 von National Instruments (Austin, USA) programmierten Messsoftware berechnet. Das Programm wandelte den blauen Hintergrund in Schwarz um und alle anderen Farben in Weiß (siehe Abbildung 6-5). Über die Anzahl der weißen Pixel konnte die Querschnittsfläche berechnet werden. Die Äpfel wurden nacheinander in den sechs Hauptrotationsrichtungen (Blütenkelch nach unten, jeweils um 90° gedreht, sowie Draufsicht von oben und unten) in der Unterhälfte einer Petrischale mittig auf dem Förderband positioniert und mit dem induktiven Impedanzmesssystem dreimal je Messposition gemessen (siehe Abbildung 6-6). Aus den drei ermittelten Messwerten wurde der arithmetische Mittelwert berechnet.

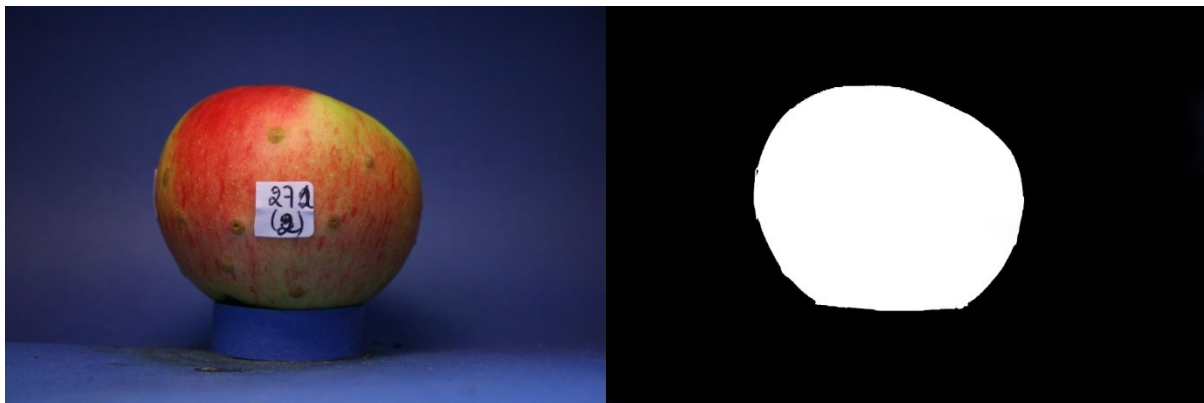


Abbildung 6-5: Apfel vor blauem Hintergrund und das daraus berechnete Schwarz-Weiß-Bild.

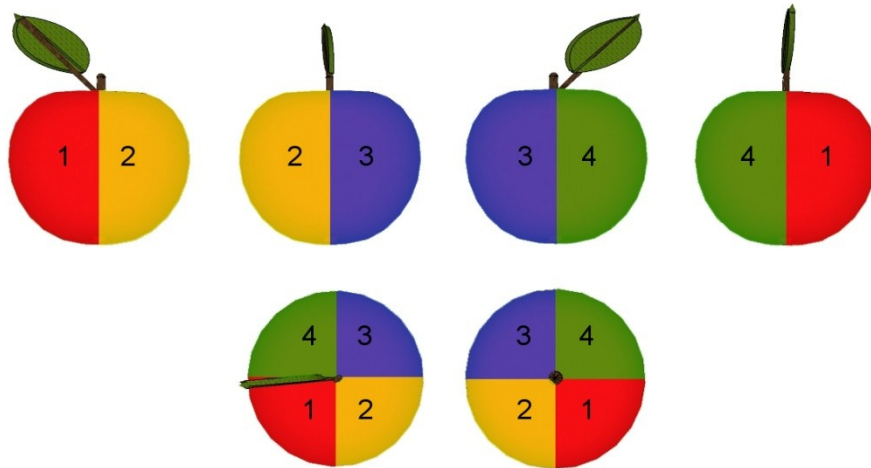


Abbildung 6-6: Die unterschiedlichen Messpositionen der Äpfel.

6.4 Ermittlung von Apfelprofilen und Messung des Einflusses der Apfelsorte

Um den Einfluss von unterschiedlichen Apfelsorten auf die Ergebnisse der induktiven Impedanzmessmethode zu ermitteln, wurden die Apfelsorten verwendet, die in Tabelle 6-1 mit der Ziffer zwei versehen sind. Diese Apfelsorten besitzen unterschiedliche physikalische und chemische Eigenschaften und sind typische Vertreter für Streuobstsorten, weshalb sie für die Versuche gewählt wurden. Pro Apfelsorte wurden mindestens fünf Äpfel für die Profilmessungen verwendet.

Zur Messung mit dem induktiven Impedanzmesssystem wurden die Äpfel bei sechs verschiedenen Positionen (siehe Abbildung 6-6) mittig in der Unterhälfte einer Petrischale auf dem Förderband platziert und je dreimal gemessen. Aus den ermittelten Messwerten wurde der arithmetische Mittelwert berechnet.

6.5 Messungen zur Beschreibung der Fruchtsafttauglichkeit von Äpfeln

Die Beschreibung der Fruchtsafttauglichkeit beinhaltet die Messungen des Stärkewertes, der Fruchtfleischfestigkeit, des Zuckergehaltes, des pH-Wertes und die Berechnung des Streif-Index.

Um den pH-Wert und den Zuckergehalt messen zu können, wurde aus dem jeweiligen Apfel Saft gepresst. Mit einer Reibe wurden die Äpfel einzeln zerkleinert.

Die so gewonnene Maische wurde in einen Filter überführt und über einem Becherglas ausgepresst.

Stärketest

Für die Durchführung des Stärketests wurden die Äpfel mittig, parallel zum Blütenkelch und Stiel, durch das Kerngehäuse halbiert und die Schnittfläche mit Lugol'scher Lösung der Firma Carl Roth GmbH+Co. KG (Karlsruhe) besprüht. Nach zwei Minuten Einwirkzeit wurde der Stärkeabbauwert optisch ermittelt. Für den Stärkeabbau wurden die Noten eins bis zehn vergeben. Note eins bedeutete kein Stärkeabbau, das heißt die Schnittfläche färbte sich aufgrund der vorhandenen Stärke komplett blau. Note zehn bedeutete kompletter Stärkeabbau, das heißt, es war keine Blaufärbung zu erkennen (siehe Abbildung 5-11). Die Methode ist bei Höhn beschrieben [57].

Fruchtfleischfestigkeit

Die Fruchtfleischfestigkeit wurde mit dem Penetrometer PCE-PTR der PCE Group HG (Meschede) (Zylinder: Durchmesser 11 mm, Penetration: 8 mm) in kg/cm^2 bestimmt. Auf zwei gegenüberliegenden Seiten wurde jeweils mittig horizontal zum Blütenkelch ein Stück Fruchthaut entfernt. Der Zylinder wurde mittig mit konstanter Kraftaufwendung in das Fruchtfleisch gedrückt und die gemessene Kraft am Display abgelesen. Aus den beiden Messwerten wurde der Mittelwert gebildet. Die Methode ist bei Höhn, Bobelyn und Brezmes beschrieben [57] [60] [61].

Zuckergehalt

Die Messung des Zuckergehalts der Äpfel erfolgte mit einem Abbe-Refraktometer der Firma Krüss Optronic (Hamburg). Hierzu wurden einige Tropfen des, aus dem jeweiligen Apfel gewonnenen, Apfelsaftes auf die Glasplatte des Refraktometers pipettiert. Anschließend wurde der Zuckergehalt von der Skala abgelesen. Die Methode ist bei Höhn und Roth beschrieben [57] [66].

pH-Wert

Der pH-Wert wurde mit dem Sartorius Professional Meter PP-50 der Firma Sartorius AG (Göttingen) gemessen. Zur Messung wurde der gewonnene Apfelsaft in ein Becherglas überführt und der pH-Wert am Gerät abgelesen.

Streif-Index

Aus den Messwerten des pH-Wertes, der Fruchtfleischfestigkeit und des Stärkeabbauwertes wurde nach Formel 5.20 der Streifindex berechnet.

6.6 Messungen zur Ermittlung des Einflusses des Nachreifeverhaltens

Der Einfluss der Nachreife auf die elektrischen Parameter wurde über sechs Messtage ermittelt. Für die Untersuchungen wurden Apfelsorten, die mit der Ziffer vier in Tabelle 6-1 markiert sind, verwendet. Die Apfelsorten wurden aufgrund ihrer ausreichenden Verfügbarkeit zum Messzeitraum gewählt. Die Messungen mit den Apfelsorten Linsenhöfer Sämling und Schöner von Herrnhut wurden 1, 18, 25, 28, 33 und 36 Tage nach der Ernte durchgeführt. Die Apfelsorten Schöner von Wiltshire und Goldparmäne wurden 1, 4, 7, 11, 14 und 18 Tage nach der Ernte gemessen. Diese Messzeitpunkte wurden gewählt, da Veränderungen der Eigenschaften innerhalb dieser Zeiträume erwartet wurden. Alle verwendeten Apfelsorten wuchsen auf derselben Obstwiese heran. Pro Messtag wurden vier Äpfel je Sorte, wie in Abschnitt 6.5 beschrieben, zerstörend gemessen. Zwischen den Messungen wurden die Äpfel bei Raumtemperatur gelagert. Für die Messung mit dem induktiven Impedanzmesssystem wurden die Äpfel mit dem Blütenkelch nach unten mittig auf dem Förderband platziert und dreimal gemessen. Aus den drei Messwerten wurde anschließend der arithmetische Mittelwert bestimmt.

6.7 Messungen zur Änderung des Wassergehaltes der Äpfel

Mit längerer Lagerzeit verlieren Äpfel Wasser. Wasserverluste führen zu Veränderungen der Leitfähigkeit. Ob sich diese Veränderungen auf die gemessenen elektrischen Parameter auswirken, wurde mit einer Versuchsreihe überprüft. Die Austrocknungsversuche wurden an sechs Messtagen durchgeführt. Die Äpfel wurden zwischen den Messtagen im Trockenschrank bei 40°C gelagert. Für die Untersuchungen wurden je nach Apfelsorte die Messungen entweder nach 0, 3, 5, 10, 15 und 19 Tagen Lagerzeit im Trockenschrank (Linsenhöfer Sämling und Schöner von Herrnhut) oder nach 0, 3, 7, 11, 14 und 16 Tagen (Schöner von Wiltshire und Goldparmäne) Lagerzeit im Trockenschrank durchgeführt. Die

Messpunkte wurden so gewählt, dass unterschiedlich starke Wasserverluste auftraten. Die Auswahl der Apfelsorten erfolgte aufgrund ihrer Verfügbarkeit bei dem Erzeugerbetrieb. Pro Messtag wurden vier Äpfel je Sorte, wie in Abschnitt 6.5 beschrieben, zerstörend gemessen. Einen Tag vor den Messungen wurden die Äpfel dem Trockenschrank entnommen, um sie für die Messungen auf Raumtemperatur abkühlen zu lassen. Für die Messung mit dem induktiven Impedanzmesssystem wurden die Äpfel mit dem Blütenkelch nach unten mittig auf dem Förderband platziert und dreimal gemessen. Aus den drei Messwerten wurde anschließend der arithmetische Mittelwert bestimmt.

6.8 Ermittlung des Einflusses von definierter Zellzerstörung

6.8.1 Einfrieren von Apfelproben

Um Zellen in Äpfeln zu zerstören und die Auswirkungen dieser Zellzerstörung auf die elektrischen Eigenschaften zu untersuchen, wurden Äpfel einem Gefrier-Tau-Zyklus ausgesetzt. Für die Versuche wurden Äpfel der Sorte Braeburn, Jonagold und Idared gewählt (siehe Tabelle 6-1 Ziffer acht). Die Sorten wurden wegen ihrer ganzjährigen Verfügbarkeit und ihrer unterschiedlichen Durchmesser gewählt. Die Äpfel wurden mit dem induktiven Impedanzmesssystem vor dem Einfrierprozess gemessen. Für die Messungen wurden die Äpfel mit dem Blütenkelch nach unten mittig auf dem Förderband platziert und dreimal gemessen. Aus den drei Messwerten wurde der arithmetische Mittelwert berechnet. Anschließend wurden die Äpfel für 24 h bei -20 °C eingefroren. Die Methode ist bei Chalermchat [41] beschrieben. Vor den weiteren Messungen mit dem induktiven Impedanzmesssystem wurden sie zum Auftauen für 24 h bei Raumtemperatur gelagert. Nach dem Auftauen wurden die Äpfel wie vor dem Gefrierprozess mit dem induktiven Impedanzmesssystem gemessen.

6.8.2 Ermittlung des Einflusses von Enzymbehandlungen von Apfelproben

Um Äpfel mit unterschiedlichen Anteilen an zerstörten Zellen zu erhalten und die Auswirkungen auf die induktive Impedanzmessmethode zu ermitteln, wurden

insgesamt 110 Äpfel der Sorte Braeburn mit zellabbauenden Enzymen behandelt. Die Sorte Braeburn wurde für die Versuche gewählt, da sie ganzjährig zur Verfügung steht. Bis zur Messung erfolgte die Lagerung der Äpfel bei Raumtemperatur. 22 Äpfel wurden nach zwei Tagen Lagerung gemessen, 34 Äpfel nach vier Tagen Lagerung, 28 Äpfel nach neun Tagen Lagerung und 26 Äpfel nach 23 Tagen Lagerung. Die Messtage wurden so gewählt, um einen möglichst gleichmäßigen Anstieg der Verflüssigungsgrade zu erreichen. Zur Zellzerstörung wurde eine Enzymmischung zur Totalverflüssigung verwendet. Dazu wurde entionisiertes Wasser mit Rohapect DA 6 L (Firma AB Enzymes GmbH, Darmstadt) und Rohament CL (Firma AB Enzymes GmbH, Darmstadt) im Verhältnis 2:1:1 gemischt. Zwei ml der hergestellten Enzymmischung wurden mit einer Einzelspritze (Sollvolumen 2 ml) mit Einmal-Injektionskanüle (Länge 1,2 cm, Firma B. Braun, Melsungen) durch den Blütenkelch in das Kernhaus injiziert. Für die Messung mit dem induktiven Impedanzmesssystem wurden die Äpfel mit dem Blütenkelch nach unten mittig auf dem Förderband platziert und dreimal gemessen. Aus den drei Messwerten wurde anschließend der arithmetische Mittelwert bestimmt. Nach der induktiven Messung wurde der verflüssigte Anteil des Apfels mit der Waage Typ 1493 der Firma Sartorius AG (Göttingen) gravimetrisch ermittelt.

6.9 Ermittlung des Einflusses von Fäulnisbefall

6.9.1 Versuche zur Ermittlung des Einflusses von definierter Oberflächenfäule und Kernfäule

In Vorversuchen wurden verschiedene Schimmelpilze im Hinblick auf reproduzierbare Ergebnisse getestet. Für die Vorversuche wurden *Aspergillus niger* Stamm 12634, *Fusarium solani* Stamm 15964 sowie *Penicillium expansum* Stamm 62841 (jeweils bezogen von DSMZ - Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH, Braunschweig) ausgewählt. Die Schimmelpilzsporen wurden auf Schrägagar (Kartoffel-Glucose-Agar, Firma Merck KGaA, Darmstadt) in Reagenzgläser übertragen. Nach einer Wachstumsphase von vier Tagen bei Raumtemperatur (ca. 22 °C) wurden die Schimmelpilze mit einer Impföse in eine wässrige EumulginL- NaCl- Lösung mit 0,02% Massenanteil EumulginL und 0,85%

Massenanteil NaCl suspendiert. Das EumulginL wurde von der Firma Cognis GmbH, Düsseldorf bezogen. 0,5 ml Suspension wurde an unterschiedlichen Stellen (Kernhaus und Apfeloberfläche) mit einer Einmalspritze (Sollvolumen 2 ml) mit Einmal-Injektionskanüle (Länge 1,2 cm, Firma B. Braun, Melsungen) in Äpfel der Sorte Braeburn injiziert. Die infizierten Äpfel wurden anschließend bei Raumtemperatur gelagert und beobachtet. Die Vorversuche zeigten, dass mit *Penicillium expansum* der Fäulnisverlauf sowohl bei Infizierung an der Oberfläche als auch im Kernhaus am gleichmäßigsten verlief. Aus diesem Grund wurden die Versuche mit dem definierten Fäulnisbefall mit *Penicillium expansum* durchgeführt.

Für die definierte Oberflächenfäulnis wurden Äpfel der sieben Apfelsorten (insgesamt 930 Äpfel) verwendet, die in Tabelle 6-1 mit der Ziffer drei markiert sind. Die Äpfel wurden aufgrund Ihrer Verfügbarkeit und als Vertreter von Streuobstäpfeln gewählt. Die Äpfel wurden mit *Penicillium expansum* Stamm 62841 (DSMZ - Deutsche Sammlung von Mikroorganismen und Zellkulturen GmbH, Braunschweig) infiziert. Die *Penicillium expansum*- Suspension wurde wie oben beschrieben hergestellt. Für die Fäulnisversuche an der Oberfläche wurde die *Penicillium expansum*- Suspension mit einer Einmalspritze (Sollvolumen 2 ml) mit Einmal-Injektionskanüle (Länge 1,2 cm, Firma B. Braun, Melsungen) einen cm unter die Schale in der Mitte des Apfels injiziert. Die Infektionsmethode ist bei Baert beschrieben [77]. Der Einstichkanal wurde mit ca. 0,5 ml Suspension durchspült. Über den Zeitraum von ca. drei Wochen wurden pro Messtag zwischen fünf und zehn Äpfel pro Sorte an sechs Messtagen untersucht, um einen möglichst linear ansteigenden Faulanteil über den Messzeitraum zu erhalten.

Für die Kernfäuleversuche wurde 60 Äpfel der Sorte Braeburn verwendet. Die Infektion erfolgte mit 0,5 ml der *Penicillium expansum*- Suspension mit einer Einmalspritze mit Einmal-Injektionskanüle durch den Blütenkelch in das Kernhaus. Die Äpfel wurden nach 8 bzw. 18 Tagen Infektionszeit zerstörend untersucht, um unterschiedliche Faulanteile zu erhalten.

Für die Messung mit dem induktiven Impedanzmesssystem wurden die Äpfel mit dem Blütenkelch nach unten mittig auf dem Förderband platziert und dreimal gemessen. Aus den drei Messwerten wurde der arithmetische Mittelwert bestimmt. Der Faulanteil wurde nach der Messung gravimetrisch ermittelt. Dazu wurde mit einem Löffel das faule Gewebe entfernt und mit der Waage Typ 1493 der Firma Sartorius AG (Göttingen) gewogen. Die Methode ist bei Bandoh [2] beschrieben. Bis

zur Infizierung erfolgte die Aufbewahrung der Äpfel bei 8 °C im Kühlhaus. Nach der Infektion wurden die Äpfel bei Raumtemperatur gelagert.

6.9.2 Versuche zur Ermittlung des Einflusses von nicht definierter Fäulnis

Für die nicht definierten Fäulnisversuche wurden 350 Streuobstäpfel von der Kelterei Elm (Flieden) bezogen. Bei diesen Äpfeln waren die Sorte, die Lagerzeit und der Reifezustand unbekannt. Als maximale Lagerzeit wurden vier Wochen angenommen. Die Äpfel wurden nach ihrem optischen Zustand ausgewählt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Versuchscharge aus Äpfeln unterschiedlicher Sorten, Größen, Formen und unterschiedlich starkem Fäulnisbefall bestand. Nach der Auswahl der Äpfel wurden diese mindestens 24 h bei Raumtemperatur temperiert.

Für die Messung mit dem induktiven Impedanzmesssystem wurden die Äpfel bei vier unterschiedlichen Positionen (Blütenkelch unten, um 90° gedreht, Blütenkelch nach hinten und Blütenkelch nach vorne) je dreimal gemessen. Die vier Messpositionen sind in Abbildung 6-7 dargestellt. Aus den insgesamt zwölf Einzelmesswerten wurde der arithmetische Mittelwert bestimmt. Der Faulanteil wurde nach der Messung gravimetrisch ermittelt. Das faule Gewebe wurde dazu mit einem Messer entfernt und mit der Waage Typ 1493 der Firma Sartorius AG (Göttingen) gewogen, um den prozentualen Anteil des faulen Gewebes berechnen zu können. Aufgrund der festeren Textur der Faulstellen bei der nicht definierten Fäulnis konnte kein Löffel zum Entfernen verwendet werden, sondern es musste mit einem Messer gearbeitet werden.

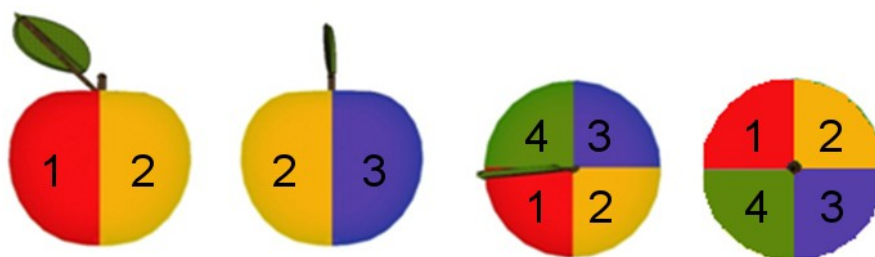


Abbildung 6-7: Die unterschiedlichen Messpositionen der Äpfel für die Versuche mit nicht definierten Fäulnisserregern.

6.10 Statistische Auswertung

Die Daten wurden mit dem Programm R 2.10.1 (The R Foundation for Statistical Computing) und dem Addon R Commander 1.5-4 [78] statistisch ausgewertet. Die Normalverteilung der Daten wurden auf einen Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Die Nullhypothese des Tests besagt, dass die Beobachtungen einer Zufallsstichprobe normalverteilt sind [79].

Um Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussfaktoren und Parametern zu finden, wurden die Daten auf lineare und multiple lineare Regression überprüft. Im ersten Schritt wurde eine Streudiagramm-Matrix aus den Daten erstellt, um erste Hinweise auf Zusammenhänge zu erhalten. Im nächsten Schritt wurde das Modell aufgestellt und die Koeffizienten des ermittelten Regressionsmodells mit dem t-Test auf Signifikanz überprüft. Bei nicht vorliegender Signifikanz der Koeffizienten wurde das Modell verändert und erneut statistisch getestet. Als Maß für die Güte der ermittelten Regression wurde das Bestimmtheitsmaß berechnet. Das Bestimmtheitsmaß wurde mit dem Omnibus F-Test auf Signifikanz überprüft. Die Nullhypothese bei dem Test lautet: das Bestimmtheitsmaß ist gleich null [80]. Um das Modell validieren zu können, müssen die Residuen normalverteilt sein. Die Normalverteilung der Residuen wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft [79].

Wurde kein statistisch validierbares Modell gefunden oder war aufgrund des Versuchsdesigns eine Modellbildung nicht durchführbar, wurde nach Möglichkeit aus den Messwerten, die sich in bestimmten Streubreiten befanden, Gruppen gebildet. Diese Gruppen wurden mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. Um die gebildeten Gruppen auf signifikante Unterschiede zu untersuchen, wurden diese anschließend untereinander mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der arithmetischen Mittelwerte verglichen. Die Ergebnisse des paarweisen Vergleichs wurden mit der Buchstabenanzeige dargestellt. Unterschiedliche Buchstaben hinter den Messreihen zeigen signifikante Unterschiede an. Bei gleichen Buchstaben unterscheiden sich die Messreihen nicht signifikant [81]. Die Signifikanz der Normalverteilung und der Korrelationskoeffizienten wurden mit dem p-Wert ausgedrückt. Der p-Wert gibt die Wahrscheinlichkeit für eine experimentelle Situation unter der Annahme der Nullhypothese an. War der p-Wert kleiner als 0,05, wurde die Nullhypothese abgelehnt [79].

7 Entwicklung der Messmethode

Ziel der Methodenentwicklung war es, die Fruchtsafttauglichkeit von Äpfeln mit dem induktiven Impedanzmesssystem beschreiben zu können. Dazu darf die Messung nicht von der Messposition, der Temperatur, der Apfelmasse oder der Apfelform beeinflusst werden bzw. diese Einflussfaktoren müssen berechenbar sein.

7.1 Einfluss der Position der Probe auf die Messergebnisse

Die Messungen zur Ermittlung des Einflusses der Messposition auf dem Förderband wurden mit einem aus Apfelstiften hergestellten Würfel durchgeführt. Aus allen aufgenommen Messwerten eines elektrischen Parameters ($U_{0,max}$, φ , U_A , U_B ,) wurde der arithmetische Mittelwert berechnet. Die Messwerte für jede Messposition wurden in Beziehung zu diesem Mittelwert gesetzt und die prozentuale Abweichung berechnet. In Abbildung 7-1 - Abbildung 7-4 sind die Ergebnisse der Messungen in Diagrammen dargestellt. Die Mittelwerte sowie die prozentualen Standardabweichungen sind für die elektrischen Parameter $U_{0,max}$, U_A , U_B und φ für zwölf Positionen in Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-4 angegeben.

Der Einfluss der Messposition auf die Amplitude $U_{0,max}$ ist in Abbildung 7-1 dargestellt. Je nach Position des Apfelwürfels ergaben sich unterschiedliche hohe Messwerte für $U_{0,max}$. Die einzelnen Messpositionen wurden auf den Mittelwert aller Positionsmessungen bezogen. Je weiter der Apfelwürfel von dem Spulenöffnungsrand entfernt durch das induktive Impedanzmesssystem geführt wurde, desto geringer war die Sensitivität. Im mittleren Bereich des induktiven Impedanzmesssystems wurden die niedrigsten Werte für $U_{0,max}$ gemessen. Dabei schwankte die Sensitivität um maximal 52% von der Messposition „14,2 cm Breite – 10 cm Höhe“ (81% des Mittelwerts) zur Messposition „19 cm Breite – 12,2 cm Höhe“ (133% des Mittelwerts). Die höchsten Messwerte wurden auf der rechten Seite der Spulenöffnung festgestellt.

In Tabelle 7-1 sind die Messwerte von $U_{0,max}$ an den vier Seiten sowie in der Mitte der Spulenöffnung dargestellt. Die Werte wurden auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Die Messwerte der Position „19 cm Breite – 12,2 cm Höhe“ erwiesen sich dabei als nicht normalverteilt. Alle anderen Messreihen waren normalverteilt. Mit den normalverteilten Messwerten wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Die $U_{0,max}$ -

Werte in der Spulenmitte unterschieden sich von allen anderen Messwerten signifikant ($\alpha = 0,05$). Die drei Messpositionen auf Höhe des Förderbandes bei 7,2 cm zeigten ebenfalls signifikante Unterschiede ($\alpha = 0,05$) untereinander.

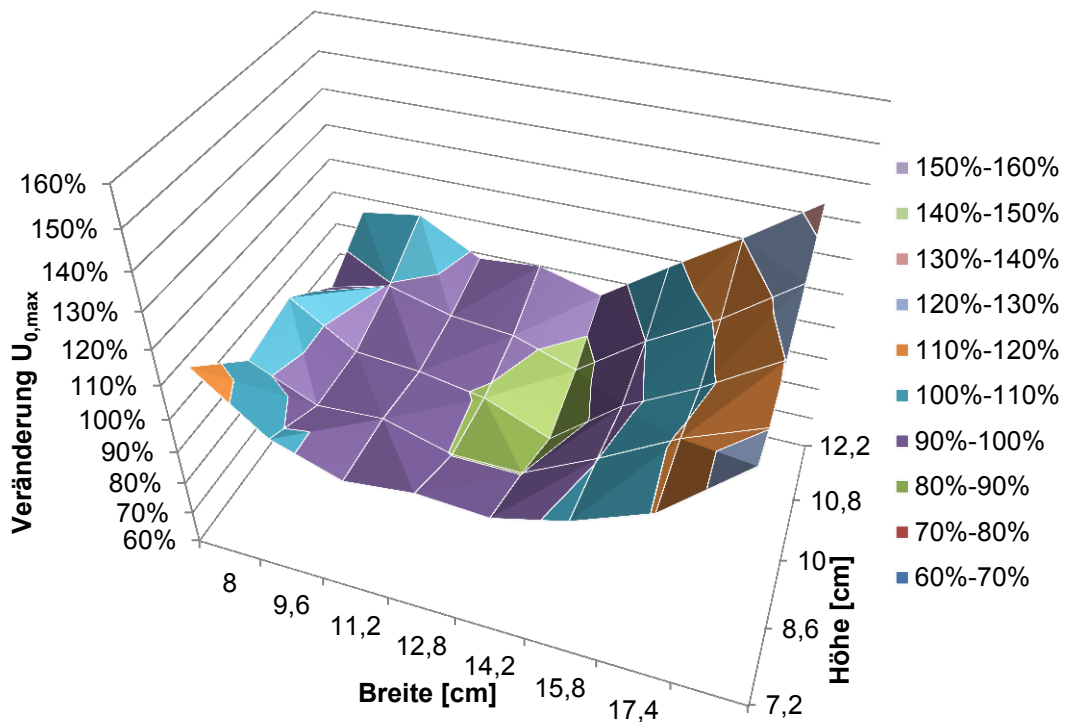


Abbildung 7-1: Veränderung von $U_{0,max}$ in Abhängigkeit der Messposition.

Tabelle 7-1: $U_{0,max}$ in Abhängigkeit der Messposition ($n = 15$) – unterschiedliche Buchstaben hinter dem Messwert zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).

$U_{0,max}$	Breite (cm)	8	12,8	19
Höhe (cm)				
7,2	μ (mV)	1553	1291	1702
	s (%)	0,8%	2,2%	0,8%
10	μ (mV)	1403	1177	1587
	s (%)	2,5%	1,7%	0,7%
12,2	μ (mV)	1392	1319	1762
	s (%)	9,8%	1,4%	1,7%

Abbildung 7-2 zeigt die prozentuale Veränderung der Phasendifferenz bezogen auf den arithmetischen Mittelwert aller Positionsmessungen mit Veränderung der Messposition auf dem Förderband. Anders als bei der Sensitivitätsverteilung der Amplitude $U_{0,max}$ im Feld (siehe Abbildung 7-1) fiel die Phasendifferenz nicht zur

Spulenmitte hin ab. Der größte Unterschied in den Phasendifferenzen wurde mit 25% zwischen den Messposition „17,4 cm Breite – 10,8 cm Höhe“ (89% des Mittelwerts) und „11,2 cm Breite – 7,2 cm Höhe“ (115% des Mittelwerts) gefunden.

In Tabelle 7-2 sind die Messwerte von der Phasendifferenz an den vier Seiten sowie in der Mitte der Spulenöffnung dargestellt. Alle zwölf Messpositionen erwiesen sich als normalverteilt. Die einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte ergab, dass sich die Spulenmitte von den meisten anderen Messpositionen nicht signifikant ($\alpha = 0,05$) unterschied. Es konnte auch kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$) zwischen den drei Messpositionen auf Höhe des Förderbandes (Höhe = 7,2 cm) ermittelt werden. Die prozentuale Standardabweichung der einzelnen Messpositionen erreichte im Vergleich zu den Messpositionen der Amplitude höhere Werte (vgl. Tabelle 7-1)

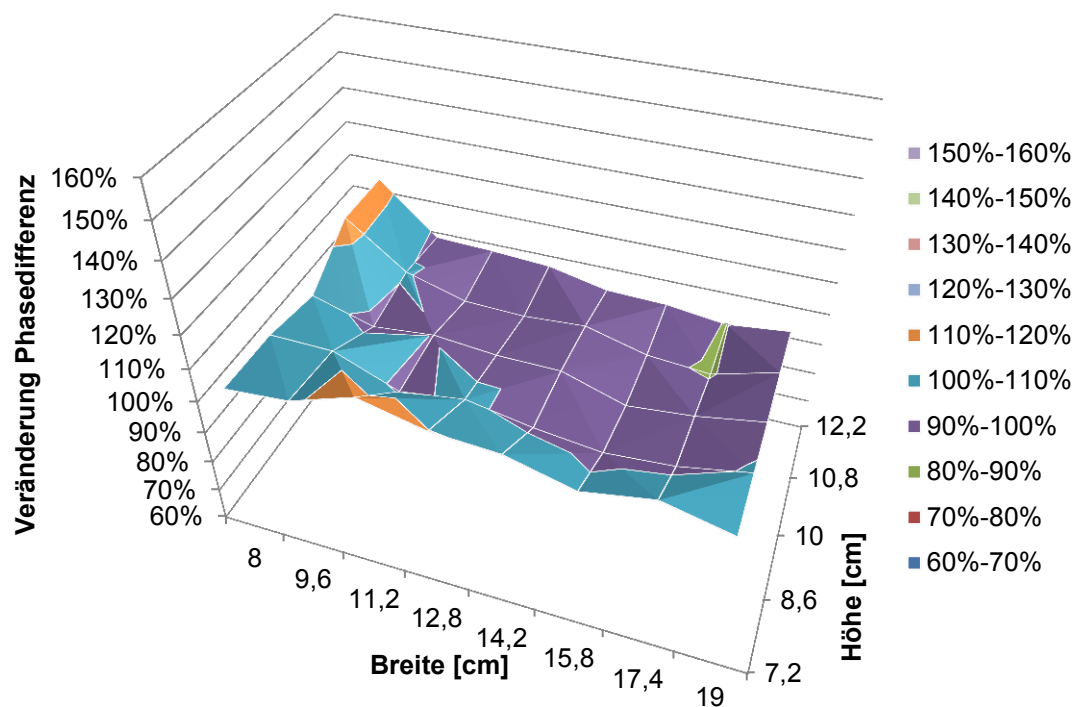


Abbildung 7-2: Veränderung der Phasendifferenz in Abhängigkeit der Messposition.

Tabelle 7-2: Phasendifferenz in Abhängigkeit der Messposition (n = 15) – unterschiedliche Buchstaben hinter dem Messwert zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).

Phase	Breite (cm)	8	12,8	19
Höhe (cm)				
7,2	μ (°)	-66	-68	-64
	s (%)	-5,0%	-6,8%	-4,6%
10	μ (°)	-64	-60	-60
	s (%)	-6,2%	-8,6%	-5,1%
12,2	μ (°)	-70	-59	-57
	s (%)	-9,9%	-5,8%	-4,5%

Die prozentuale Veränderung des Kanals A bezogen auf den Mittelwert bei unterschiedlicher Messposition zeigt Abbildung 7-3. Die Sensitivität des Feldes stieg von links nach rechts an. Der höchste Messwert wurde an der rechten oberen Ecke ermittelt. Der größte Unterschied der Messwerte des Kanals A wurde zwischen den Messposition „11,2 cm Breite – 7,2 cm Höhe“ (65% des Mittelwerts) und „19 cm Breite – 12,2 cm Höhe“ (150% des Mittelwerts) mit 85% Differenz gefunden.

In Tabelle 7-3 werden die Messwerte von U_A an den vier Seiten sowie in der Mitte der Spulenöffnung wiedergegeben. Alle zwölf Messpositionen erwiesen sich als normalverteilt. Die einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte ergab, dass sich die Spulenmitte lediglich von den drei Messpositionen der rechten Spulenseiten signifikant ($\alpha = 0,05$) unterschied. Auf Höhe des Förderbandes (Höhe = 7,2 cm) wurden signifikante Unterschiede ($\alpha = 0,05$) zwischen allen drei Messpositionen ermittelt. Die Messwerte von U_A zeigten innerhalb der einzelnen Messpositionen die höchsten prozentualen Standardabweichungen im Vergleich zu den anderen drei elektrischen Parametern.

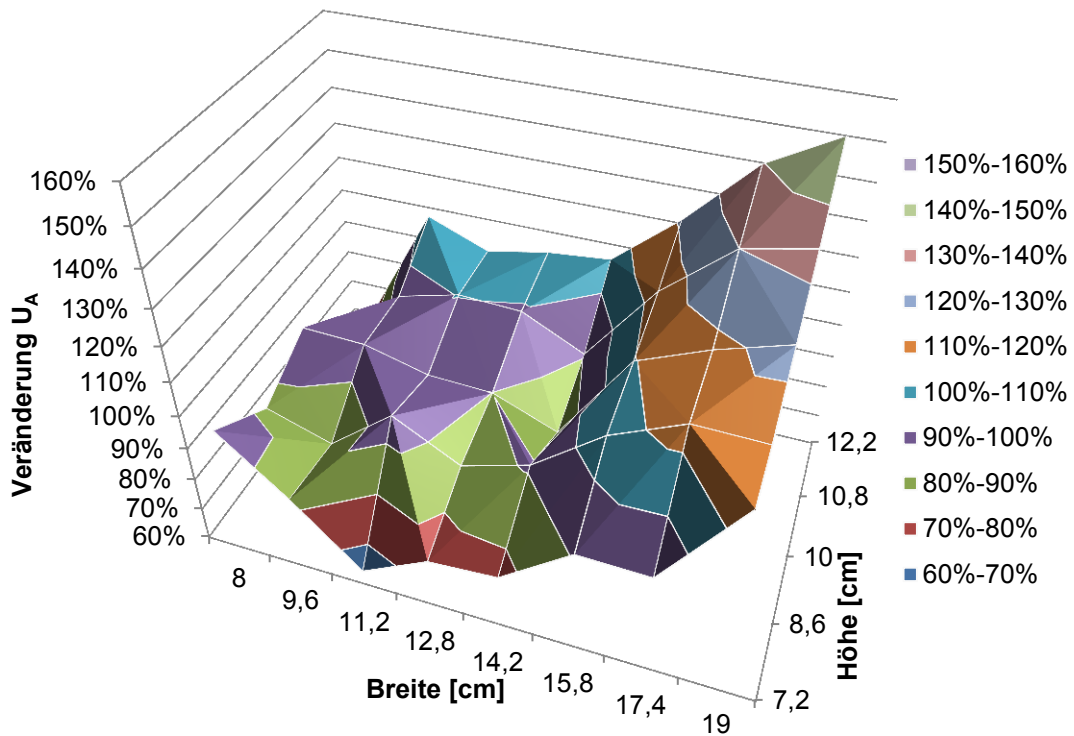


Abbildung 7-3: Veränderung von U_A in Abhängigkeit der Messposition.

Tabelle 7-3: U_A in Abhängigkeit der Messposition (n = 15) – unterschiedliche Buchstaben hinter dem Messwert zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).

U_A	Breite (cm)	8	12,8	19
7,2	μ (mV)	1251	974	1505
	s (%)	10,2%	18,4%	9,8%
10	μ (mV)	1238	1152	1604
	s (%)	13,2%	15,1%	9,0%
12,2	μ (mV)	957	1354	1920
	s (%)	40,1%	8,6%	6,6%

Der Einfluss der Messposition auf den Kanal B U_B ist in Abbildung 7-4 dargestellt. Die unterschiedliche Sensitivität des Feldes ähnelt dabei im Aussehen der Sensitivitätsverteilung der Amplitude $U_{0,max}$ in Abbildung 7-1. Zur Spulenmitte ergaben sich niedrigere Messwerte. Die höchsten Werte für U_B wurden auf der rechten Seite der Spule gemessen. Die Sensitivität schwankte um maximal 50% von der Messposition „14,2 cm Breite – 10 cm Höhe“ (78% des Mittelwerts) zur Messposition „19 cm Breite – 7,2 cm Höhe“ (128% des Mittelwerts).

In Tabelle 7-4 sind die Messwerte von U_B an den vier Seiten sowie in der Mitte der Spulenöffnung dargestellt. Die Werte wurden auf Normalverteilung mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft. Alle Messpositionen erwiesen sich als normalverteilt. Die einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte ergab signifikante Unterschiede ($\alpha = 0,05$) der Messposition in der Spulenmitte zu allen anderen Messpositionen. Die drei Messpositionen auf Höhe des Förderbandes bei 7,2 cm zeigten ebenfalls signifikante Unterschiede ($\alpha = 0,05$) untereinander. Die prozentuale Standardabweichung für die jeweiligen Messpositionen lagen im Vergleich zu den Messungen von $U_{o,max}$ höher, allerdings niedriger als bei den Messungen der Phasendifferenz.

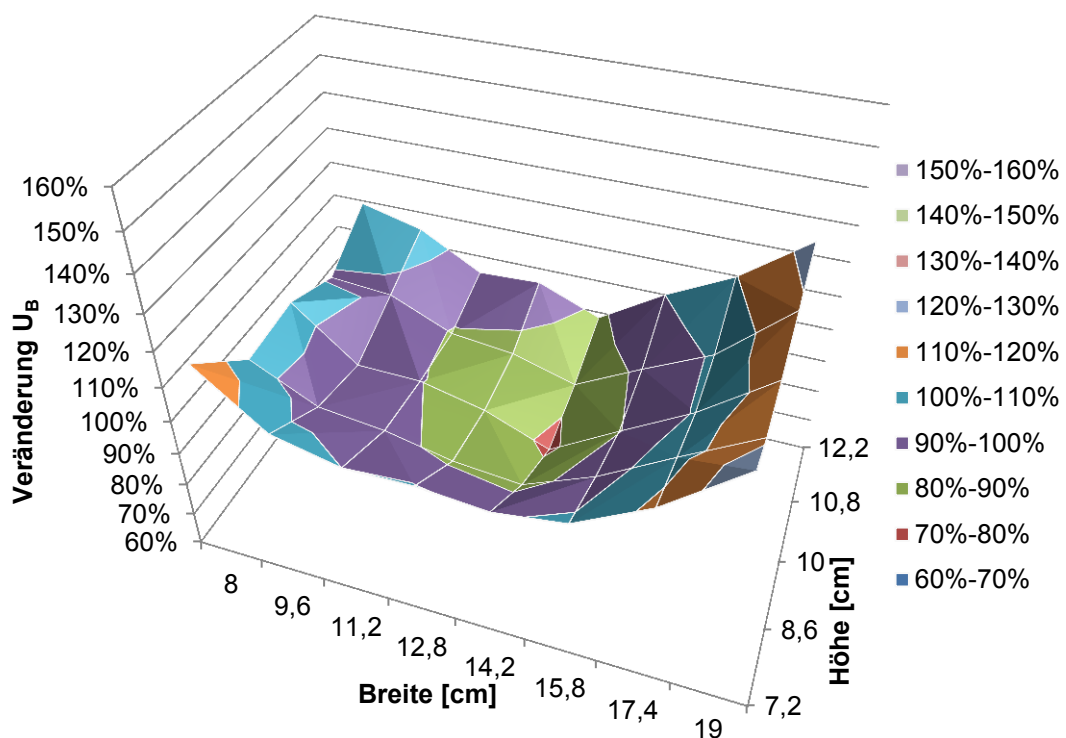


Abbildung 7-4: Veränderung von U_B in Abhängigkeit der Messposition.

Tabelle 7-4: U_B in Abhängigkeit der Messposition (n = 15) – unterschiedliche Buchstaben hinter dem Messwert zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).

U_B	Breite (cm)	8	12,8	19
Höhe (cm)				
7,2	μ (mV)	2829	2386	3046
	s (%)	3,1%	4,8%	3,0%
10	μ (mV)	2509	2038	2738
	s (%)	5,0%	6,1%	3,0%
12,2	μ (mV)	2593	2269	2941
	s (%)	7,6%	4,1%	3,0%

Folgerungen

Für die weiteren Messungen bedeuten diese Ergebnisse, dass sich die unterschiedlichen Sensitivitäten des Feldes abhängig von den Abmessungen der Äpfel auf die Messungen auswirken. Aus diesem Grund müssen die Proben immer auf derselben Position des Förderbands durch das induktive Impedanzmesssystem geführt werden um den Einfluss der unterschiedlichen Sensitivität möglichst konstant zu halten. Als Messposition für alle folgenden Messungen wurde die Mitte des Förderbandes festgelegt. Damit konnte gewährleistet werden, dass alle größeren Proben gemessen werden konnten und die Messwerte sich, aufgrund der „wannenförmigen“ Verteilung der Sensitivität von $U_{0,max}$ und U_B , bei unterschiedlicher Probengröße relativ gleichmäßig verändern.

7.2 Einfluss der Temperatur auf die Messergebnisse

Die Messungen des Temperatureinflusses wurden mit 15 verschiedenen Äpfeln durchgeführt. Aufgrund der Ergebnisse von 7.1 wurden die Äpfel mittig auf dem Förderband durch das induktive Impedanzmesssystem geführt. Aus allen fünf Temperaturstufen wurden für jeden Apfel und jeden elektrischen Parameter ($U_{0,max}$, φ , U_A , U_B) der arithmetische Mittelwert berechnet. Anschließend wurden die prozentualen Veränderungen, bezogen auf den jeweiligen Mittelwert, für jeden Apfel bei jeder Temperaturstufe ermittelt.

In Abbildung 7-5 sind die Veränderungen der elektrischen Parameter über die Temperatur aufgetragen. Mit steigender Temperatur ist ein Anstieg von $U_{0,max}$ und U_B zu erkennen. Die Phasendifferenz sank mit steigender Temperatur. Die Daten wurden auf lineare Regression überprüft. Tabelle 7-5 zeigt die Ergebnisse der statistischen Auswertung. Zwischen der Temperatur und dem Kanal A U_A wurde keine Signifikanz des Korrelationskoeffizienten gefunden. Die anderen Korrelationskoeffizienten zwischen den elektrischen Parametern und der Temperatur waren ebenso signifikant wie die Koeffizienten der Regressionsmodelle. Die Phasendifferenz korrelierte negativ mit der Temperatur. $U_{0,max}$ und U_B zeigten eine positive Korrelation zu der Temperatur. Um die ermittelten Regressionsgeraden zu überprüfen, wurden die Residuen für jedes Regressionsmodell berechnet und auf Normalverteilung überprüft. Bei keinem der Regressionsmodelle zeigten sich die Residuen für $\alpha = 0,05$ normalverteilt. Somit können diese Regressionsmodelle für eine Berechnung des Temperatureinflusses nicht herangezogen werden.

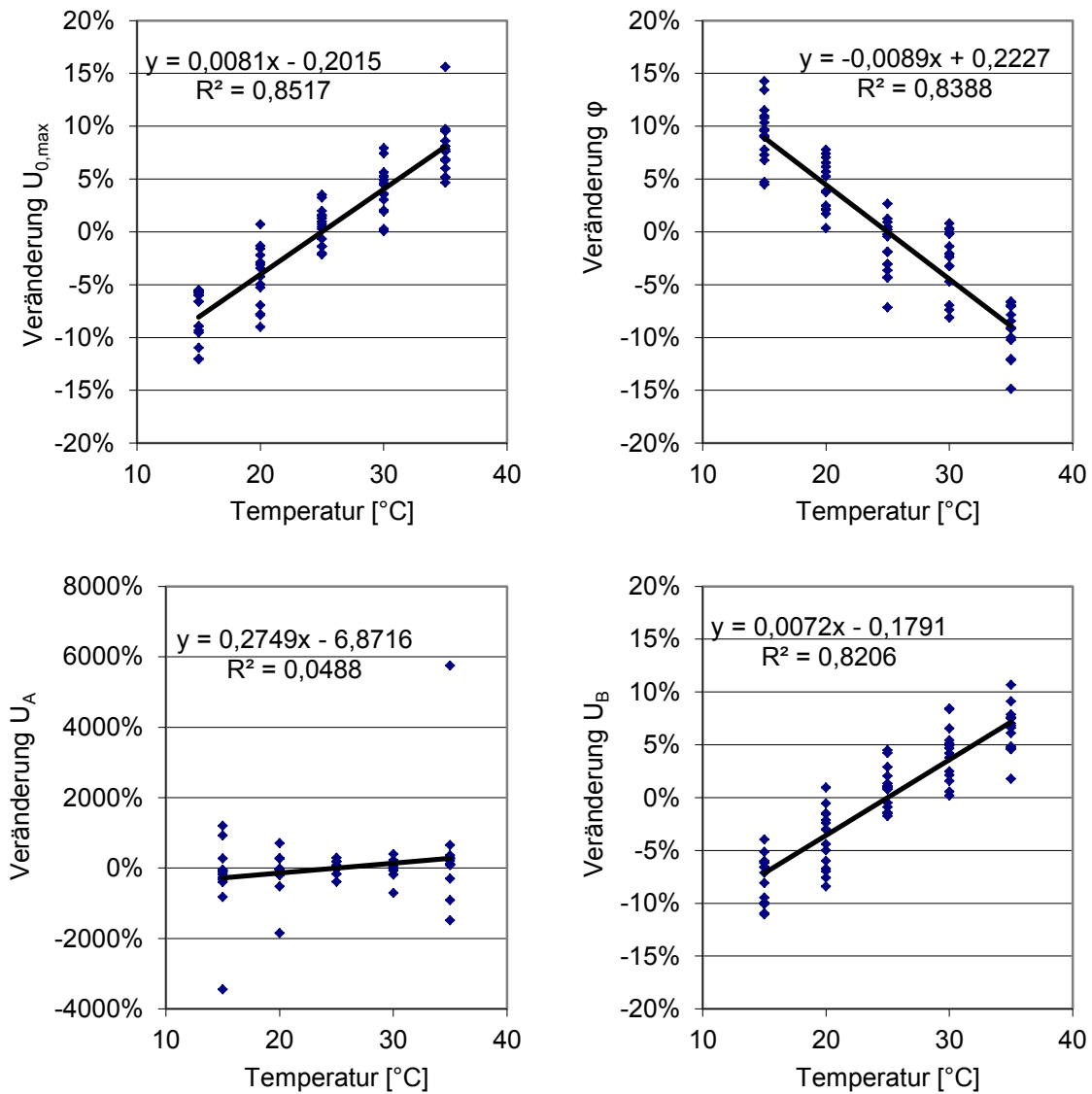


Abbildung 7-5: Veränderung von $U_{0,max}$, φ , U_A und U_B bei unterschiedlichen Temperaturen.

Tabelle 7-5: Statistische Auswertung der linearen Regressionsmodelle der Veränderungen der elektrischen Parameter ($U_{0,max}$, φ , U_A , U_B) in Abhängigkeit der Temperatur.

Beziehung	Regressionsmodell			Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten		Normalverteilung der Residuen
	x	Achsenabschnitt	R ²		x	Achsenabschnitt	
Temperatur – $\Delta U_{0,max}$	0,0081	-0,2015	0,8517	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 0,0363$
Temperatur – $\Delta \varphi$	-0,0089	0,2227	0,8388	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 0,0117$
Temperatur – ΔU_A	0,2749	-6,8716	0,0488	$p = 0,0568$			
Temperatur – ΔU_B	0,0072	-0,1791	0,8206	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 0,0211$

Da keines der Regressionsmodelle validiert werden konnte, wurden von jeder Temperaturstufe für jeden elektrischen Parameter die prozentualen Abweichungen zu einer Gruppe zusammengefasst. Jede Gruppe wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test auf Normalverteilung überprüft. Für jeden elektrischen Parameter wurde für die verschiedenen Temperaturstufen eine einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte durchgeführt, sofern die Messwerte innerhalb der Gruppen normalverteilt waren.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-6 wiedergegeben. Mit steigender Temperatur stiegen die Messwerte von $U_{0,max}$ und U_B . Die Phasendifferenz sank mit steigender Temperatur. Die Messwerte von U_A streuten so stark, so dass bei keiner der Temperaturstufen eine Normalverteilung der Messwerte von U_A nachgewiesen werden konnte. Bei der 35°C-Temperaturstufe der Amplitude $U_{0,max}$ wurde ebenfalls keine Normalverteilung der Messergebnisse festgestellt. Der paarweise Mittelwertvergleich der Amplitude $U_{0,max}$ zeigte, dass sich alle normalverteilten Temperaturstufen signifikant unterscheiden. Bei der Phasendifferenz konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen 25°C und 30°C festgestellt werden. Bei U_B konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen der Messreihe bei 30°C und 35°C festgestellt werden. Da bei dem Kanal A keine der Messreihen innerhalb einer Temperaturstufe normalverteilt waren, konnte keine Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte durchgeführt werden.

Tabelle 7-6: Veränderungen der elektrischen Parameter bei verschiedenen Temperaturen sowie die statistische Auswertung der Versuche (n = 15) - unterschiedliche Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede an ($\alpha = 0,05$).

	Veränderung $U_{0,max}$				Veränderung φ			
Temperatur	μ	s	Shapiro-Wilk – p-Wert		μ	s	Shapiro-Wilk – p-Wert	
15°C	-8,1%	±2,4%	0,051	a	9,3%	±2,8%	0,938	e
20°C	-4,5%	±3,0%	0,430	b	4,4%	±2,3%	0,291	f
25°C	0,5%	±1,8%	0,581	c	-1,6%	±2,6%	0,618	g
30°C	4,0%	±2,3%	0,575	d	-2,7%	±2,9%	0,061	g
35°C	8,1%	±2,8%	0,019		-9,4%	±2,3%	0,058	h
	Veränderung U_A				Veränderung U_B			
Temperatur	μ	s	Shapiro-Wilk – p-Wert		μ	s	Shapiro-Wilk – p-Wert	
15°C	-251,3%	±16,7%	0,000		-7,6%	±2,2%	0,239	i
20°C	-132,1%	±547,9%	0,001		-3,9%	±2,8%	0,351	j
25°C	16,9%	±156,0%	0,080		0,9%	±1,9%	0,204	k
30°C	-6,5%	±235,7%	0,005		4,2%	±2,5%	0,483	l
35°C	373,1%	±579,9%	0,000		6,3%	±2,2%	0,446	l

Folgerungen

Es liegt ein schwacher Temperatureinfluss vor. Allerdings konnte kein mathematisches Modell gefunden werden, mit dem der Temperatureinfluss beschrieben werden konnte. Aus diesem Grund wurden die nachfolgenden Messungen alle bei Raumtemperatur durchgeführt.

7.3 Einfluss der geometrischen Probenform und der Probenmasse auf die Messung

Der Einfluss der Probenform auf die Messung der elektrischen Parameter wurde mit Quadern, Zylindern und Äpfeln unterschiedlicher Abmessungen und Massen ermittelt.

Quader

Für die Messungen wurden Quader aus Apfelstiften hergestellt. Die Quader waren zwischen 55,6 g und 269,6 g schwer. Die Kantenlängen variierten zwischen 3,8 cm und 9 cm (siehe Tabelle 6-2).

Abbildung 7-6 zeigt eine Streudiagramm-Matrix, die aus den elektrischen Parametern, den Massen und den Abmessungen (Querschnittsfläche, Seitenfläche, Länge, Breite und Höhe) der Quader erstellt wurde.

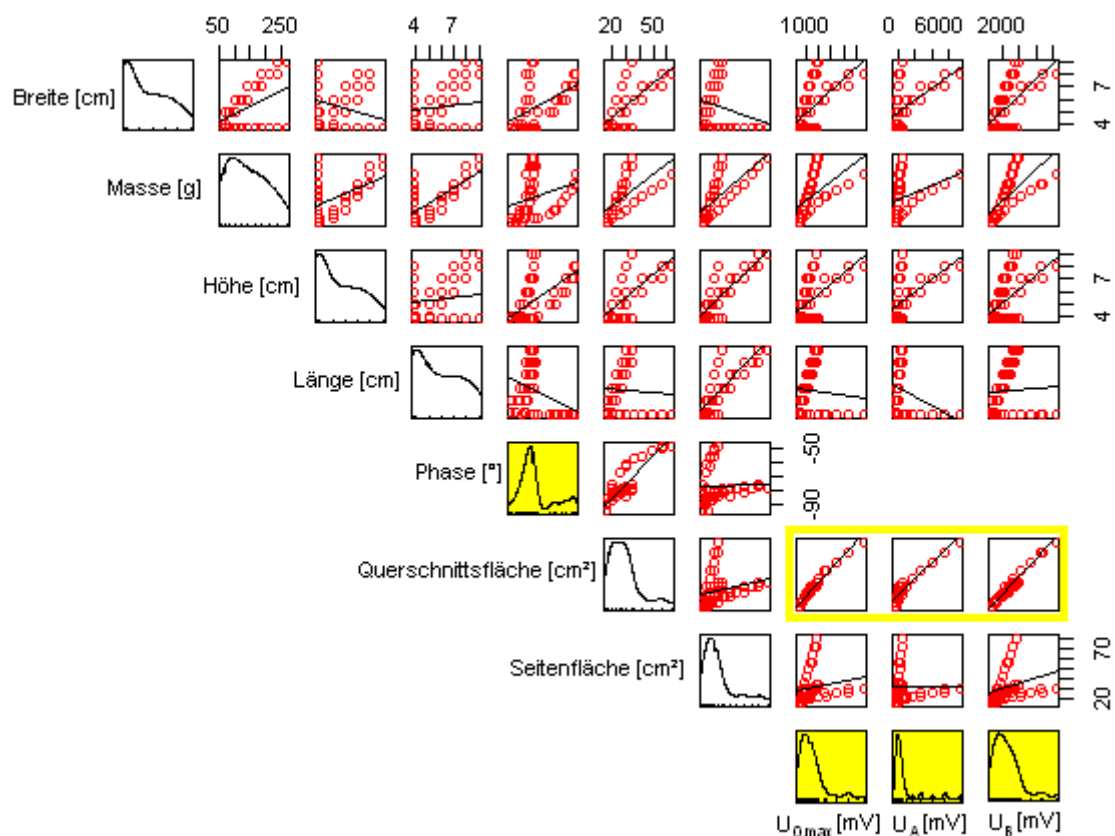


Abbildung 7-6: Streudiagramm-Matrix der elektrischen Parameter, der Massen und der Abmessungen der Apfelquader.

Es können Korrelationen zwischen $U_{0,max}$, U_B , U_A und der Querschnittsfläche erkannt werden. Diese wurden einer weitergehenden statistischen Analyse unterzogen. Dazu wurden die Beziehungen zwischen $U_{0,max}$, U_A , U_B , und der Querschnittsfläche mit Regressionsmodellen beschrieben. In Abbildung 7-6 sind diese jeweils mit einer gelben Umrandung markiert. Zwischen der Phasendifferenz und den Abmessungen bzw. der Massen sind ebenso keine Korrelationen zu erkennen, so wie zwischen $U_{0,max}$, U_B , U_A und der Masse.

In Abbildung 7-7 sind $U_{0,max}$, U_A , und U_B über die Querschnittsfläche des Quaders aufgetragen. Mit steigendem Querschnitt erhöhten sich die Werte von $U_{0,max}$, U_A , und U_B . Eine Regressionsanalyse wurde für die elektrischen Parameter und die Querschnittsfläche durchgeführt.

Die Ergebnisse der statistischen Analyse sind in Tabelle 7-7 dargestellt. Es erfolgte für $U_{0,max}$, U_A und U_B eine Auswertung mit multipler linearer Regression über ein Polynom zweiten Grades. Die Korrelationskoeffizienten aller drei berechneter Regressionskurven waren signifikant.

Das höchste Bestimmtheitsmaß wurde zwischen $U_{0,max}$ und der Querschnittsfläche gefunden. Die Koeffizienten des Regressionsmodells waren signifikant. Allerdings konnte für die Residuen keine Normalverteilung nachgewiesen werden, so dass dieses Modell nicht validiert werden konnte.

Die Bestimmtheitsmaße von Kanal A zur Querschnittsfläche ($R^2 = 0,9752$) und Kanal B zur Querschnittsfläche ($R^2 = 0,9735$) nahmen fast identische Werte an. Allerdings konnte der Zusammenhang zwischen U_A und Querschnittsfläche nicht statistisch abgesichert mit einem Modell beschrieben werden. Die Koeffizienten waren signifikant. Die Residuen zeigten keine Normalverteilung. Somit konnte auch der Zusammenhang zwischen Querschnittsfläche und U_A nicht mit dem Regressionsmodell statistisch abgesichert beschrieben werden.

Die Regression zwischen U_B und Querschnittsfläche konnte als einzige der hier untersuchten möglichen Korrelationen zwischen den elektrischen Parametern und der Querschnittsfläche der Apfelquader mit einem Modell statistisch abgesichert beschrieben werden. Die Koeffizienten des Modells waren signifikant. Die Residuen erwiesen sich als normalverteilt.

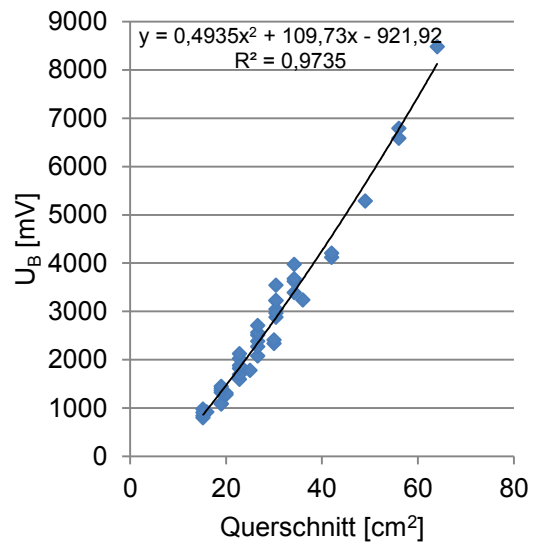
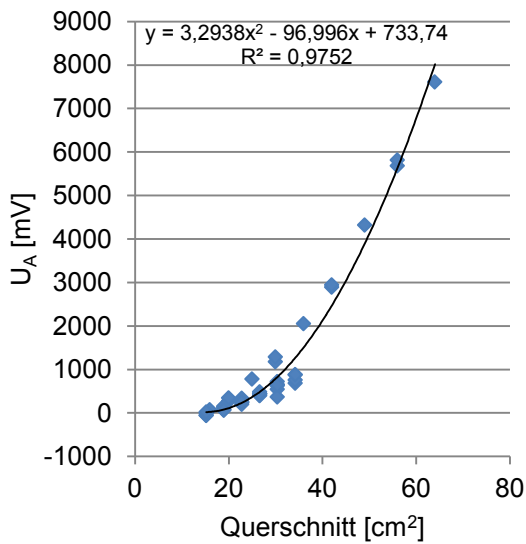
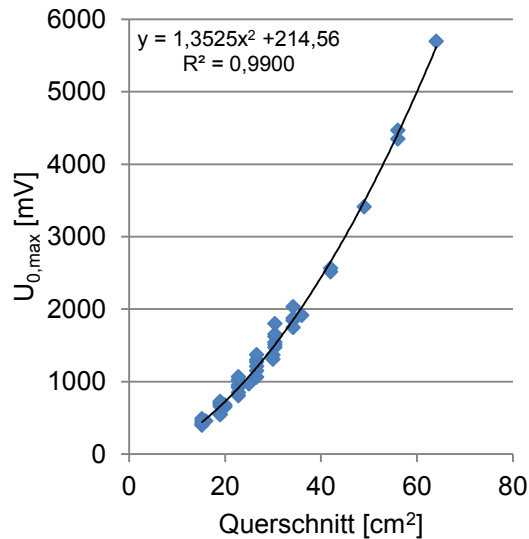


Abbildung 7-7: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche der Apfelquader.

Tabelle 7-7: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Apfelquader ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche).

Beziehung	Regressionsmodell			R ²	Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten			Normalverteilung der Residuen
	x ²	x	Achsenabschnitt t			x ²	x	Achsenabschnitt	
Querschnittsfläche - $U_{0,max}$	1,3525		214,56	0,9900	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p = 8,2 \cdot 10^{-3}$
Querschnittsfläche - U_A	3,2938	-96,996	733,74	0,9752	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,05$	$p = 0,04632$
Querschnittsfläche - U_B	0,4935	109,73	-921,92	0,9735	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,01$	$p = 0,5704$

Zylinder

Für die Messungen von zylinderförmigen Proben wurden Apfelscheiben zu Zylindern aufeinander gesetzt. Die Masse der Zylinder betrug zwischen 40 g und 632 g. Die Durchmesser der Grundfläche variierten zwischen 5,9 cm und 8,9 cm, die Höhe zwischen 1,4 cm und 15,4 cm (siehe Tabelle 6-3).

Abbildung 7-8 zeigt eine Streudiagramm-Matrix, die aus den elektrischen Parametern, den Massen und den Abmessungen (Querschnittsfläche, Durchmesser und Höhe) der Zylinder erstellt wurde. Es können stärkere Korrelationen zwischen $U_{0,max}$, U_B , U_A , der Phasendifferenz und der Masse der Apfelzylinder und etwas schwächere Korrelationen zwischen $U_{0,max}$, φ , U_A , U_B und der Querschnittsfläche der Apfelzylinder erkannt werden.

Zwischen $U_{0,max}$, φ , U_A , U_B und dem Durchmesser sowie der Höhe sind keine Korrelationen zu erkennen.

Die gelb umrandeten Matrix-Bereiche in Abbildung 7-8 wurden im Folgenden einer weitergehenden statistischen Analyse unterzogen. Dazu wurden Regressionsmodelle aufgestellt und statistisch ausgewertet.

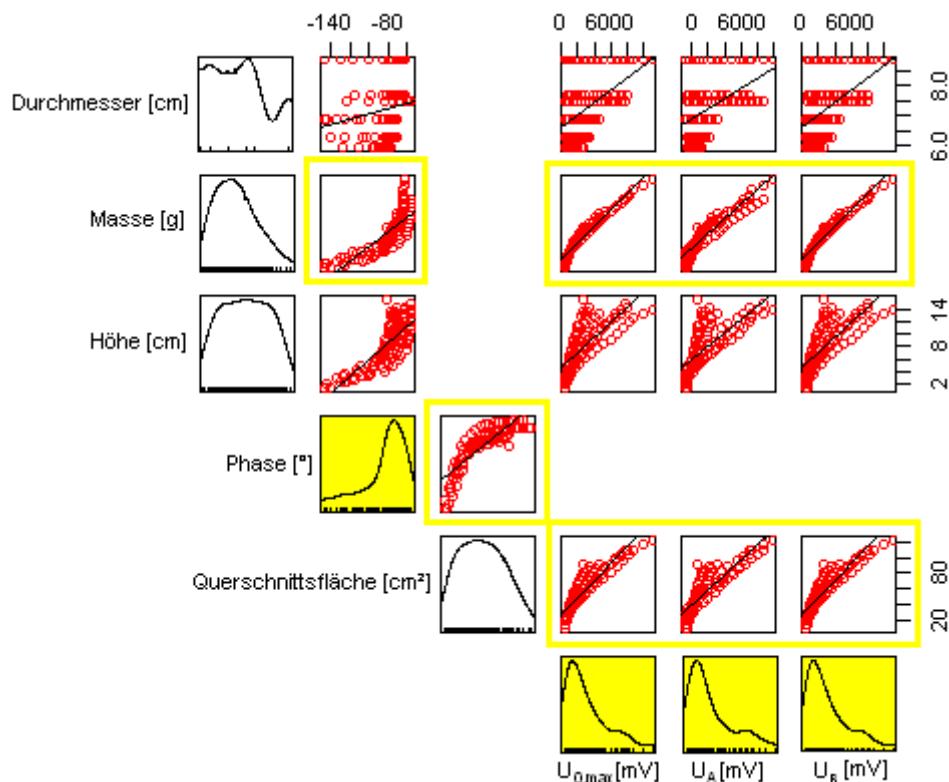


Abbildung 7-8: Streudiagramm-Matrix der elektrischen Parameter, der Massen und der Abmessungen der Apfelzylinder.

In Abbildung 7-9 sind $U_{0,max}$, φ , U_A und U_B über die Querschnittsfläche der verschiedenen Zylinder aufgetragen. Aus steigenden Querschnittsflächen resultierten erhöhte Werte von $U_{0,max}$, φ , U_A und U_B . Eine Regressionsanalyse wurde für die elektrischen Parameter und die Querschnittsfläche durchgeführt. Hierfür wurde jeweils eine Auswertung mit multipler linearer Regression über ein Polynom zweiten Grades durchgeführt. Die Ergebnisse der statistischen Analyse sind in Tabelle 7-8 dargestellt. Die Korrelationskoeffizienten der vier berechneten Regressionskurven waren signifikant.

Der Zusammenhang zwischen $U_{0,max}$ und der Querschnittsfläche konnte mit einem Polynom zweiten Grades beschrieben werden. Die Koeffizienten des Polynoms waren signifikant. Allerdings konnte für die Residuen keine Normalverteilung nachgewiesen werden. Somit konnte das Modell nicht validiert werden.

Die Beziehung zwischen Phasendifferenz und Querschnittsfläche wurde mit multipler linearer Regression überprüft. Die Koeffizienten des Regressionsmodells waren signifikant. Die Residuen des Modells erwiesen sich nicht als normalverteilt, somit konnte das Regressionsmodell nicht für Berechnungen herangezogen werden.

Das gefundene Regressionsmodell für den Zusammenhang zwischen U_A und Querschnittsfläche konnte ebenfalls nicht statistisch abgesichert werden. Die Koeffizienten waren signifikant. Die Residuen zeigten keine Normalverteilung.

Anders als bei den Quadermessungen ließ sich die Regression zwischen U_B und Querschnittsfläche nicht mit einem Modell statistisch validieren. Es wurde das höchste Bestimmtheitsmaß im Vergleich zu den vier hier beschriebenen elektrischen Parameter gefunden. Die Koeffizienten des Modells waren signifikant. Die Residuen zeigten aber keine Normalverteilung.

Für den Zusammenhang zwischen $U_{0,max}$, φ , U_A , U_B und der Querschnittsfläche konnten keine statistisch abgesicherten Modelle gefunden werden.

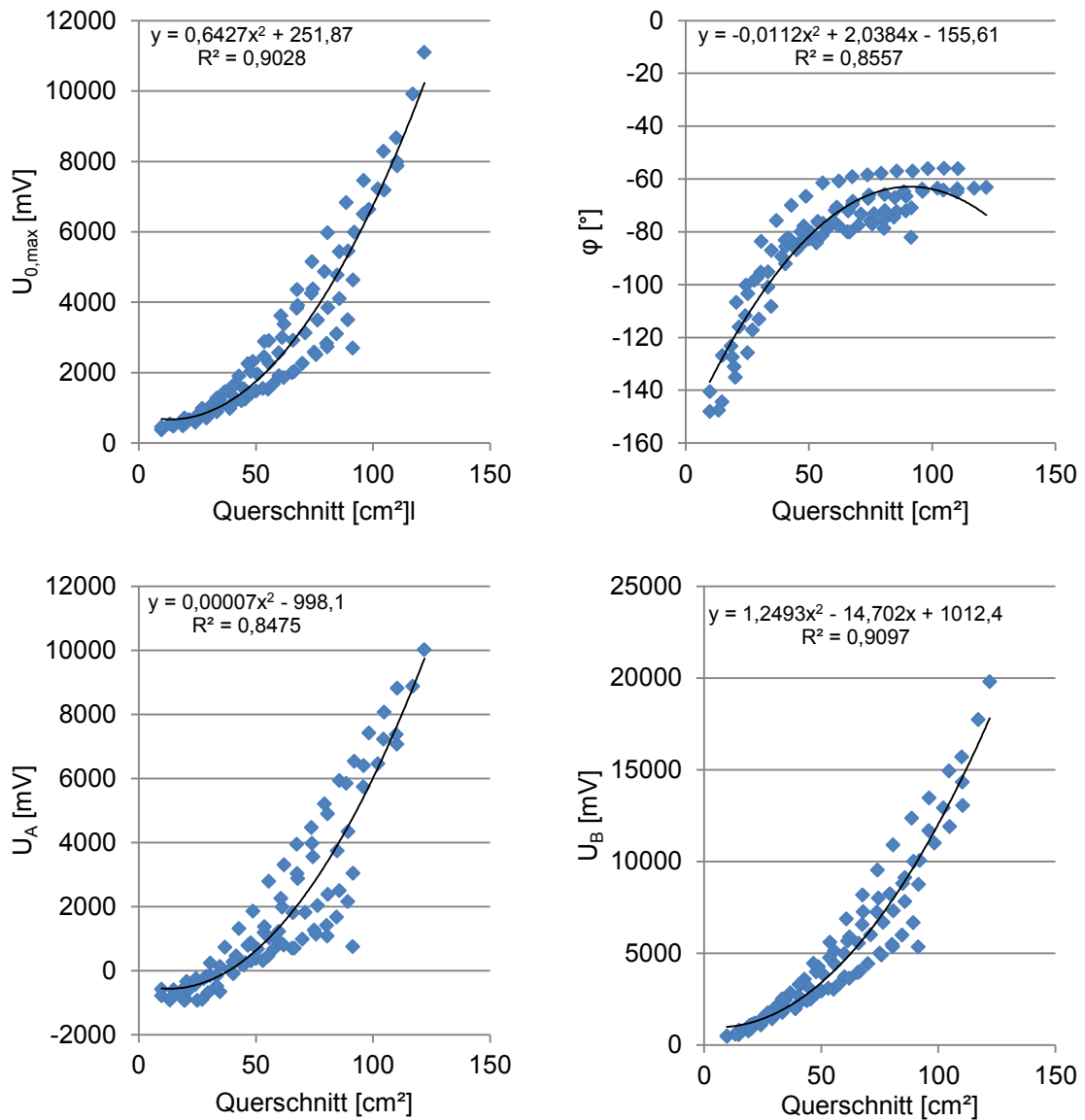


Abbildung 7-9: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche der Apfelzylinder.

Tabelle 7-8: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Apfelzylinder ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche).

Beziehung	Regressionsmodell			R^2	Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten			Normalverteilung der Residuen
	x^2	x	Achsenabschnitt			x^2	x	Achsenabschnitt	
Querschnittsfläche - $U_{0,max}$	0,6427		251,87	0,9028	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,05$	$p = 2,3 \cdot 10^{-4}$
Querschnittsfläche - φ	-0,0112	2,0384	-155,61	0,8557	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 9,7 \cdot 10^{-8}$
Querschnittsfläche - U_A	0,00007		-998,1	0,8475	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p = 4,8 \cdot 10^{-4}$
Querschnittsfläche - U_B	1,2493	-14,702	1012,4	0,9097	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,01$	$p = 5,6 \cdot 10^{-3}$

Abbildung 7-10 zeigt den Zusammenhang zwischen $U_{0,max}$, φ , U_A , U_B , und der Masse der Apfelzylinder. Eine Zusammenfassung der statistischen Auswertung befindet sich in Tabelle 7-9. Alle Korrelationskoeffizienten waren signifikant von null verschieden.

Die Regression zwischen $U_{0,max}$ und der Masse wurde mit einem Polynom zweiten Grades beschrieben. Die Koeffizienten des Polynoms waren signifikant. Da die Residuen nicht normalverteilt waren, konnte das Regressionsmodell nicht validiert werden.

Das Bestimmtheitsmaß der Beziehung zwischen Phasendifferenz und Masse lag im Vergleich zu den anderen Korrelationen der elektrischen Parameter mit der Masse auf einem niedrigeren Niveau. Die Koeffizienten des Regressionsmodells waren signifikant. Die Residuen des Modells erwiesen sich als normalverteilt. Somit konnte das ermittelte Modell validiert werden.

Das Regressionsmodell zwischen Kanal A und Masse konnte ebenfalls nicht statistisch abgesichert werden. Während die Koeffizienten noch signifikant waren, wiesen die Residuen keine Normalverteilung auf.

Die Regression zwischen U_B und Masse konnte mit einem Modell statistisch sicher beschrieben werden. Die Koeffizienten des Modells waren signifikant. Die Residuen waren normalverteilt.

Tabelle 7-9: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Apfelzylinder ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse).

Beziehung	Regressionsmodell				Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten			Normalverteilung der Residuen
	x^2	x	Achsenabschnitt	R^2		x^2	x	Achsenabschnitt	
Masse - $U_{0,max}$	0,0284		500,9	0,9858	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p = 1,3 \cdot 10^{-4}$
Masse - φ	-0,0005	0,4032	-149,45	0,8472	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 0,2723$
Masse - U_A	0,0305		-717,7	0,9175	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p = 8,1 \cdot 10^{-7}$
Masse - U_B	0,05		1083	0,9875	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p = 0,2259$

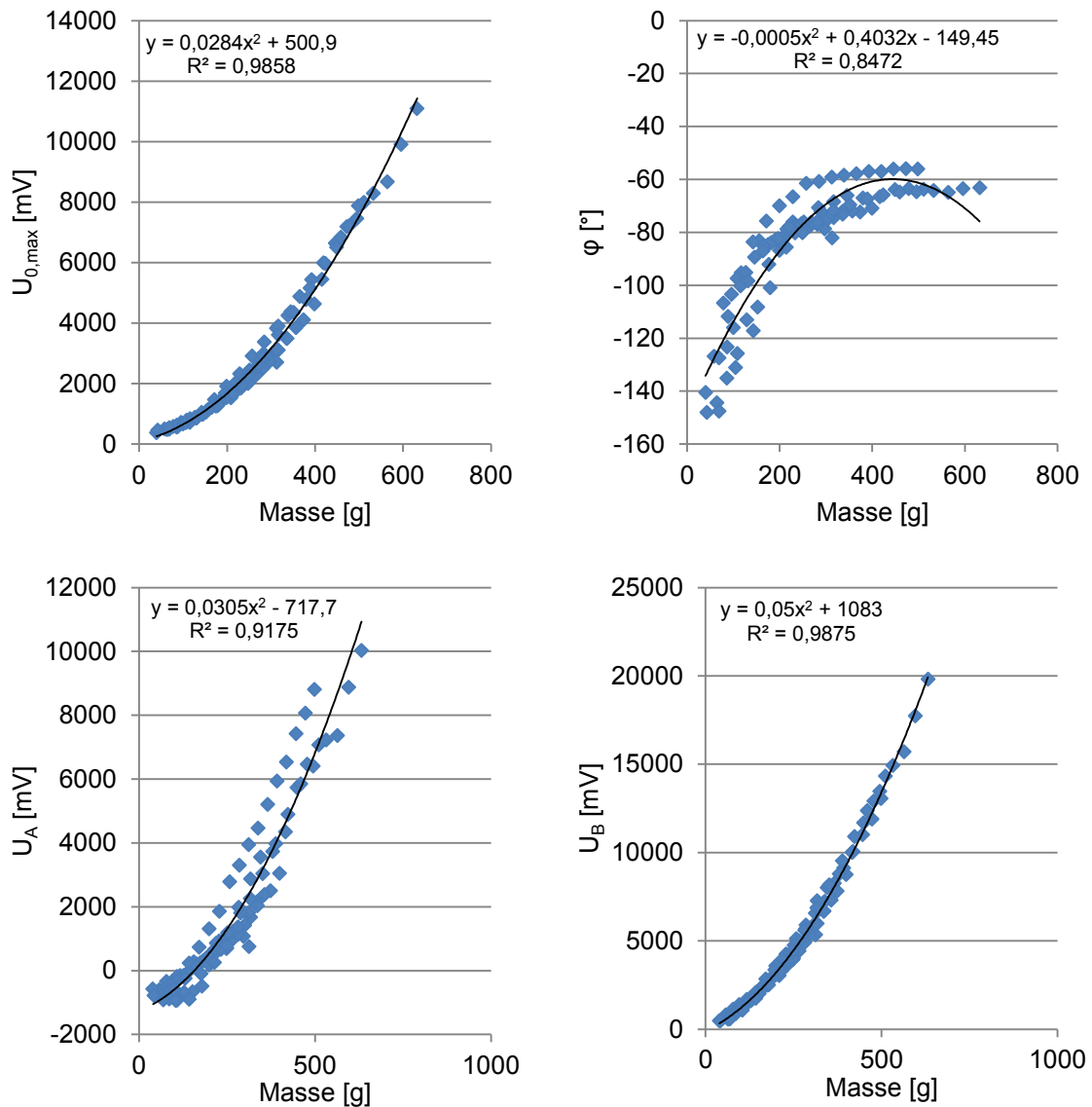


Abbildung 7-10: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse der Apfelzylinder.

Äpfel in ihrer natürlichen Form

Nach der Ermittlung des Einflusses der geometrischen Form auf die elektrischen Parameter mit gleichmäßigen geometrischen Formen wurde der Einfluss von natürlich gewachsenen Äpfeln unterschiedlicher Formen bestimmt. Die Äpfel wiesen Massen zwischen 65,8 g und 324 g auf. Die Querschnittsfläche der Äpfel variierte zwischen 13,2 cm² und 50,6 cm². Die Äpfel wurden jeweils in verschiedenen Positionen durch das induktive Impedanzmesssystem geführt.

Bei der Auswertung und der Darstellung der Messergebnisse wurde wie bei den Quader- und Zylindermessungen vorgegangen. Abbildung 7-11 zeigt eine Streudiagramm-Matrix zwischen den elektrischen Parametern und der Masse sowie der Querschnittsfläche. Ähnlich wie bei den anderen geometrischen Formen können

größere Korrelationen zwischen $U_{0,max}$, U_B , U_A und der Masse der Äpfel bzw. der Querschnittsfläche der Äpfel erkannt werden.

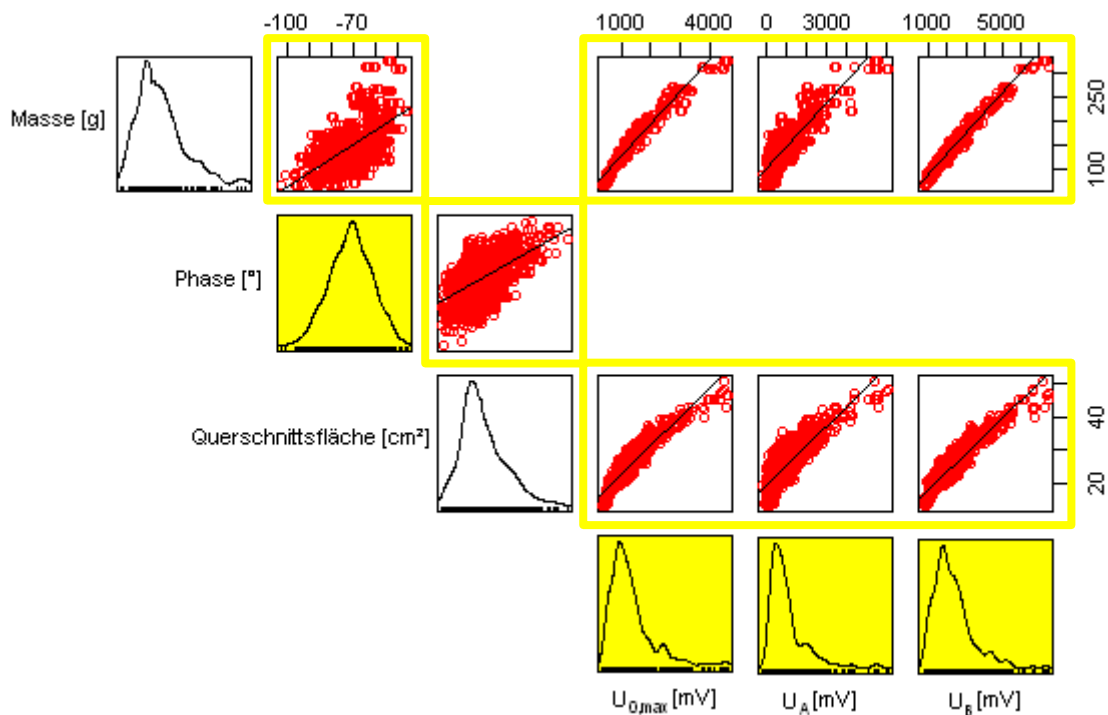


Abbildung 7-11: Streudiagramm-Matrix der elektrischen Parameter, der Massen und der Querschnittsfläche der Äpfel.

In Abbildung 7-12 sind $U_{0,max}$, φ , U_A und U_B über die Querschnittsfläche der Äpfel aufgetragen. Mit steigender Querschnittsfläche erhöhten sich diese elektrischen Parameter. Eine Regressionsanalyse wurde für die elektrischen Parameter und die Querschnittsfläche durchgeführt. Hierfür wurde für die Phasendifferenz eine Auswertung mit einfacher linearer Regression und für $U_{0,max}$, U_A und U_B jeweils eine Auswertung mit multipler linearer Regression über ein Polynom zweiten Grades durchgeführt.

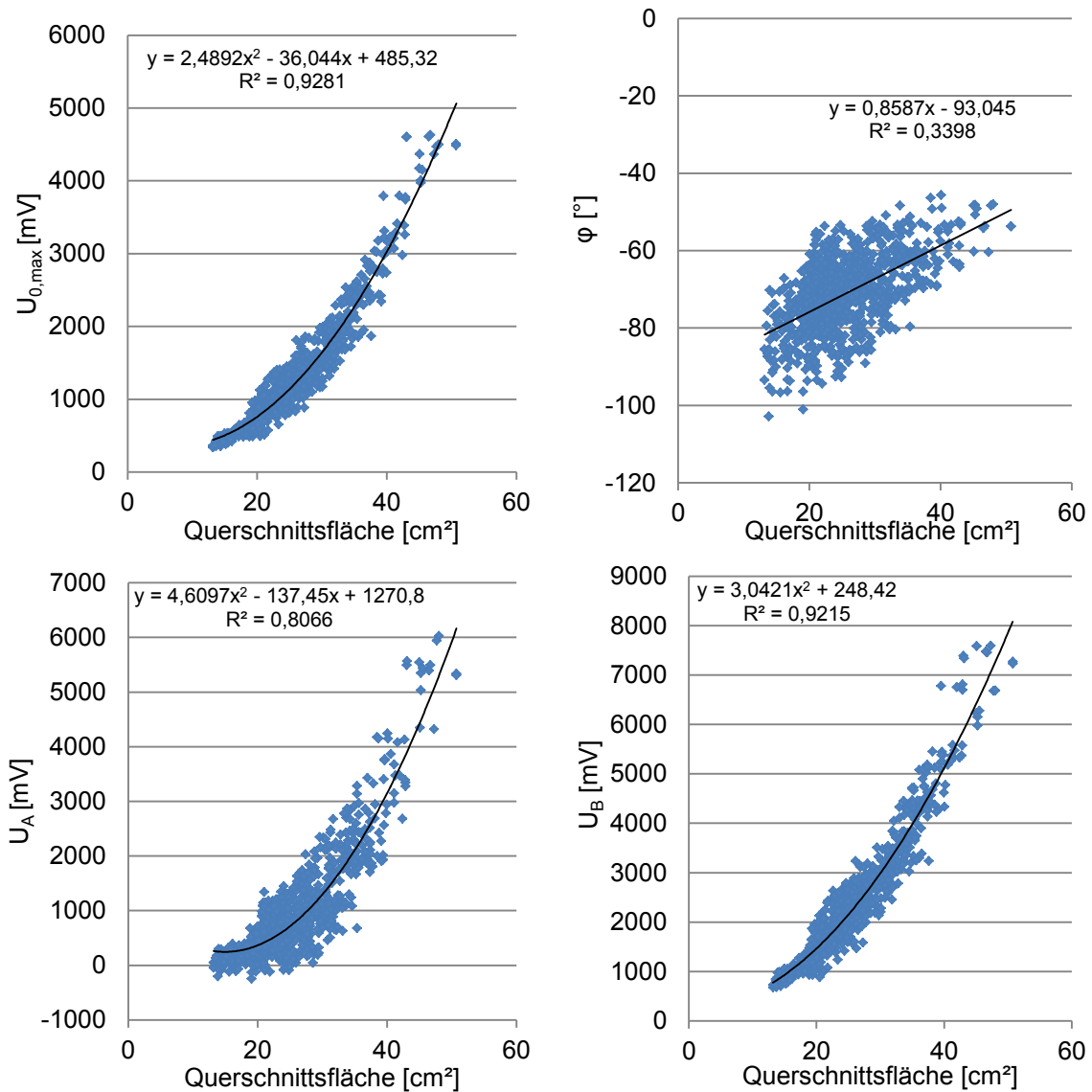


Abbildung 7-12: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche der Äpfel.

In Tabelle 7-10 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung zusammengefasst. Die Korrelationskoeffizienten aller vier berechneter Regressionskurven waren signifikant. Das Bestimmtheitsmaß der Beziehung Phasendifferenz zur Querschnittsfläche lag im Vergleich zu den anderen Korrelationen der elektrischen Parameter mit der Querschnittsfläche deutlich niedriger.

Die Zusammenhänge zwischen $U_{0,max}$, U_A , U_B und der Querschnittsfläche konnten jeweils mit einem Polynom zweiten Grades beschrieben werden. Die Koeffizienten der Polynome waren alle signifikant. Allerdings waren die Residuen der Regressionsmodelle nicht normalverteilt.

Die Beziehung zwischen der Phasendifferenz und der Querschnittsfläche wurde mit einer einfachen linearen Regression beschrieben. Die Koeffizienten erwiesen sich als signifikant. Die Residuen waren nicht normalverteilt.

Somit konnte keines der vier berechneten Regressionsmodelle validiert werden.

Tabelle 7-10: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Äpfel ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Querschnittsfläche).

Beziehung	Regressionsmodell			R^2	Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten			Normalverteilung der Residuen
	x^2	x	Achsenabschnitt			x^2	x	Achsenabschnitt	
Querschnittsfläche - $U_{0,max}$	2,4892	-36,044	485,32	0,9281	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 3,7 \cdot 10^{-10}$
Querschnittsfläche - φ		0,8587	- 93,045	0,3398	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$		$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 3,9 \cdot 10^{-4}$
Querschnittsfläche - U_A	4,6097	-137,45	1270,8	0,8066	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 3,0 \cdot 10^{-6}$
Querschnittsfläche - U_B	3,0421		248,42	0,9215	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p = 9,0 \cdot 10^{-11}$

Abbildung 7-13 zeigt den Zusammenhang zwischen $U_{0,max}$, φ , U_A , U_B und der Masse der Äpfel. Mit steigender Masse erhöhten sich die Messwerte von $U_{0,max}$, φ , U_A und U_B . Eine Regressionsanalyse wurde für die Korrelationen der elektrischen Parameter und der Masse durchgeführt. Hierfür wurden für $U_{0,max}$, φ , U_A und U_B jeweils eine Auswertung mit multipler linearer Regression über ein Polynom zweiten Grades durchgeführt.

Eine Zusammenfassung der statistischen Auswertung befindet sich in Tabelle 7-11. Alle Korrelationskoeffizienten waren signifikant von null verschieden. Das Bestimmtheitsmaß der Beziehung Phasendifferenz zur Masse lag im Vergleich zu den anderen Korrelationen der elektrischen Parameter mit der Masse deutlich niedriger.

Alle Koeffizienten der ermittelten Regressionsmodelle waren signifikant. Die Residuen der jeweiligen Regressionsmodelle erwiesen sich als nicht normalverteilt. Somit konnte auch der Zusammenhang der elektrischen Parameter zu der Apfelmasse für keines der ermittelten Regressionsmodelle validiert werden.

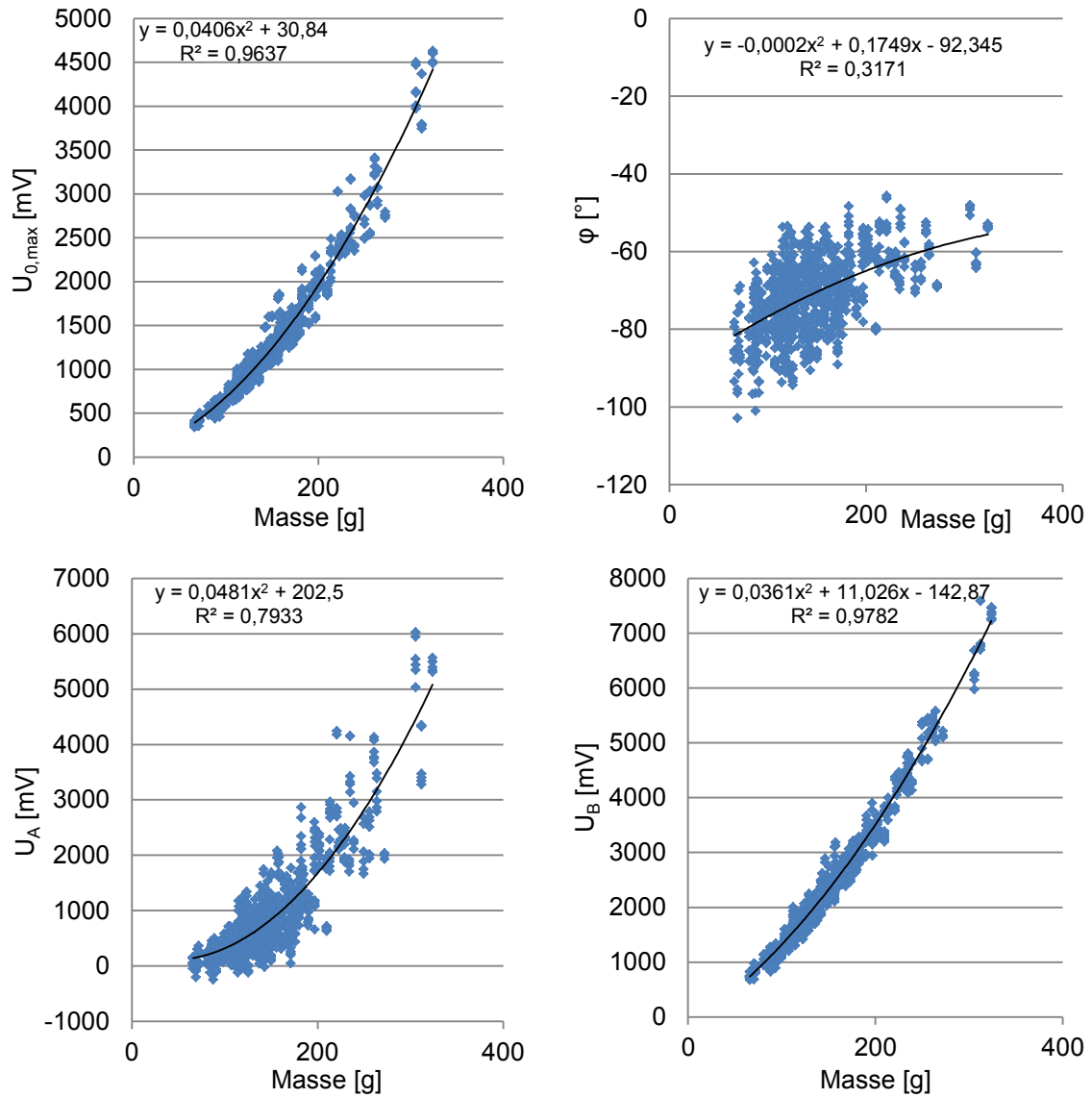


Abbildung 7-13: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse der Äpfel.

Tabelle 7-11: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Äpfel ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse).

Beziehung	Regressionsmodell			R ²	Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten			Normalverteilung der Residuen
	x ²	x	Achsenabschnitt			x ²	x	Achsenabschnitt	
Masse - $U_{0,max}$	0,0406		30,84	0,9637	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$
Masse - φ	-0,0002	0,1749	-92,345	0,3171	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,01$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 7,5 \cdot 10^{-9}$
Masse - U_A	0,0481		202,5	0,7933	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p = 8,1 \cdot 10^{-14}$
Masse - U_B	0,0361	11,026	-142,87	0,9782	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,01$	$p = 3,5 \cdot 10^{-8}$

In Abbildung 7-14 sind die arithmetischen Mittelwerte aus den verschiedenen Positionsmessungen der elektrischen Parameter über die Masse der Äpfel aufgetragen. Ziel war es, über die Berechnung der Mittelwerte die unterschiedlichen Formausprägungen der Äpfel auszugleichen und somit Messwerte für einen relativ gleichmäßigen kugeligen Körper zu erhalten.

Eine Zusammenfassung der statistischen Auswertung befindet sich in Tabelle 7-12. Alle Korrelationskoeffizienten waren signifikant von null verschieden.

Die Regression zwischen $U_{0,max}$ und der Masse wurde mit einem Polynom zweiten Grades beschrieben. Die Koeffizienten des Polynoms waren signifikant. Da die Residuen nicht normalverteilt waren, konnte das Regressionsmodell nicht validiert werden.

Das Regressionsmodell zwischen der Phasendifferenz und der Apfelmasse konnte statistisch abgesichert werden. Die Koeffizienten des Regressionsmodells waren signifikant. Die Residuen des Modells erwiesen sich als normalverteilt.

Der Zusammenhang zwischen Kanal A und Masse konnte nicht statistisch abgesichert werden. Während die Koeffizienten noch signifikant waren, wiesen die Residuen keine Normalverteilung auf.

Die Regression zwischen U_B und der Masse konnte mit einem Modell statistisch sicher beschrieben werden. Die Koeffizienten des Modells waren signifikant. Die Residuen waren normalverteilt.

Tabelle 7-12: Statistische Auswertung der Regressionsmodelle der Äpfel berechnet aus den Durchschnittswerten aller Messpositionen ($U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B in Abhängigkeit der Masse).

Beziehung	Regressionsmodell				Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten			Normalverteilung der Residuen
	x^2	x	Achsenabschnitt	R^2		x^2	x	Achsenabschnitt	
Masse - $U_{0,max}$	0,0396		328,4	0,9808	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p = 1,5 \cdot 10^{-3}$
Masse - φ		0,1063	-86,768	0,3964	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$		$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 0,3003$
Masse - U_A	0,0495		-231,6	0,8736	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$		$\alpha = 0,001$	$p = 6,1 \cdot 10^{-3}$
Masse - U_B	0,0297	13,133	-298,9	0,9897	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 0,2233$

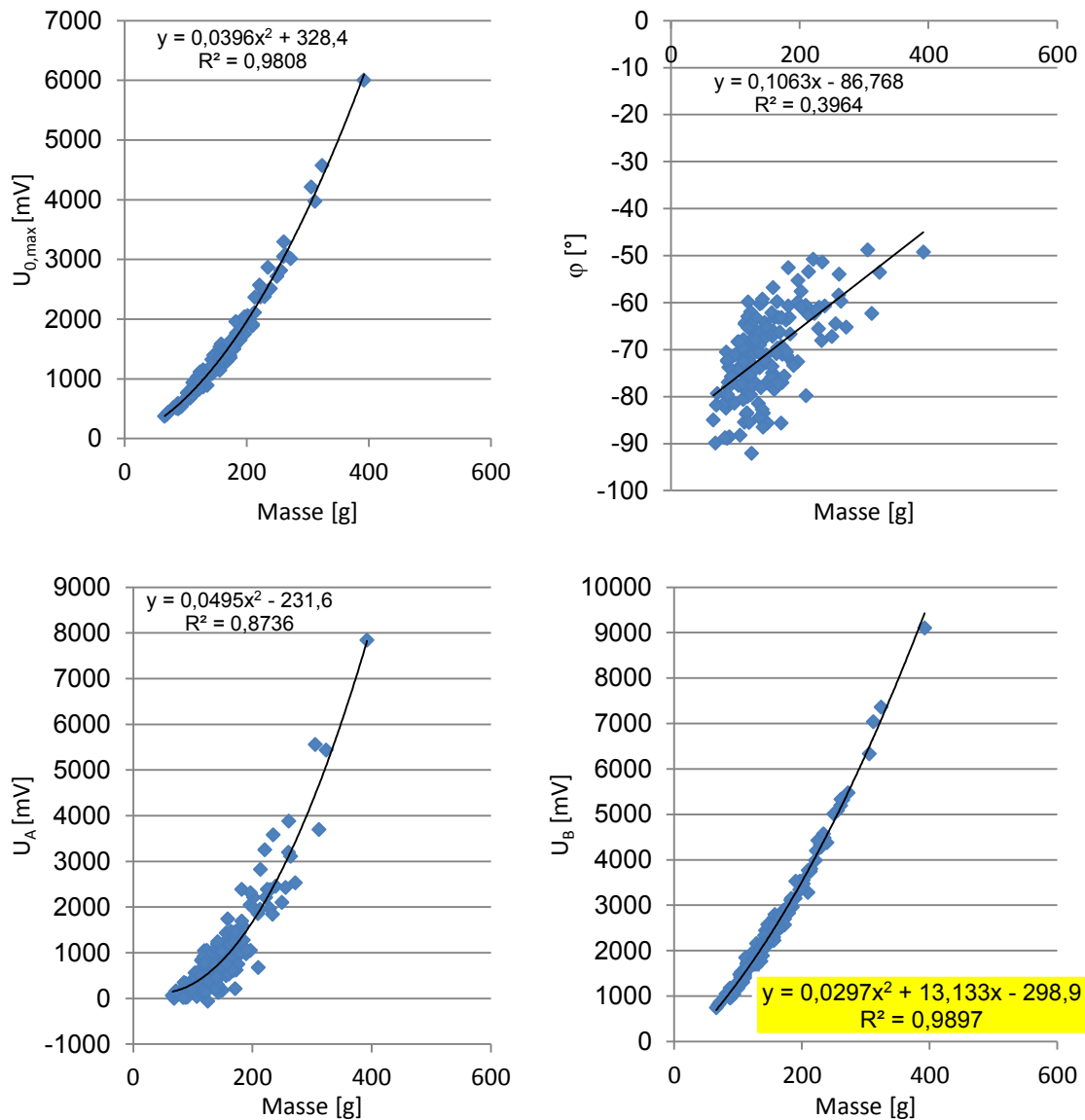


Abbildung 7-14: $U_{0,max}$, φ , U_A , und U_B , berechnet aus den Durchschnittswerten aller Messpositionen, in Abhängigkeit der Masse der Äpfel.

Folgerungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde der Einfluss der geometrischen Probenform auf die Messung der elektrischen Parameter untersucht.

Um massen- bzw. formkorrigierte Messwerte bei den Apfelmessungen zu erhalten, wurde das ermittelte Regressionsmodell von U_B berechnet aus den Durchschnittswerten aller Messpositionen und der Apfelmasse verwendet (siehe Tabelle 7-12).

$$U_{B,berechnet} = 0,0297 \frac{1}{g^2} \cdot (\text{Apfelmasse}[g])^2 + 13,133 \frac{1}{g} \cdot \text{Apfelmasse}[g] - 298,9$$

Formel 7.1

7.4 Zusammenfassende Betrachtung der Methodenentwicklung

Aufgrund der vorangegangenen Untersuchungen wurde für die weiteren Messungen folgende Messmethode definiert:

Die Äpfel müssen zur Messung bei Raumtemperatur mittig auf dem Laufband platziert werden. Der aussagekräftigste elektrische Parameter ist U_B . Um die Messwerte auf die Apfelmasse zu kalibrieren, wird das Regressionsmodell von U_B zur Masse verwendet (siehe Tabelle 7-12).

Als elektrischer Qualitätskennwert wurde Q_{el} eingeführt. Q_{el} berechnet sich aus der prozentualen Abweichung zur Regressionskurve (siehe Formel 7.2). In den folgenden Untersuchungen wurde nach Korrelationen zwischen der Qualitätsbeschreibung von Äpfeln und dem neudefinierten Qualitätskennwert Q_{el} gesucht.

$$Q_{el} =$$

$$\frac{\text{Messwert von Kanal B } U_B [\text{mV}] \cdot 1 \frac{1}{\text{mV}}}{U_{B,\text{berechnet}}} =$$

Formel 7.2

$$\left(\frac{\text{Messwert von Kanal B } U_B [\text{mV}] \cdot 1 \frac{1}{\text{mV}}}{0,0297 \frac{1}{\text{g}^2} \cdot (\text{Apfelmasse}[\text{g}])^2 + 13,133 \frac{1}{\text{g}} \cdot \text{Apfelmasse}[\text{g}] - 298,9} \right) - 1$$

8 Validierung der entwickelten Messmethode zur Beschreibung der Fruchtsafttauglichkeit von Äpfeln

8.1 Einfluss der Apfelsorte auf die Messergebnisse

Zur Bestimmung des Einflusses der Apfelsorte auf den elektrischen Qualitätskennwert Q_{el} wurden 38 verschiedene Apfelsorten mit dem induktiven Impedanzmesssystem gemessen. Von 34 Apfelsorten wurden jeweils der Zuckergehalt in °Brix und der pH-Wert ermittelt. Von 32 Apfelsorten wurde zusätzlich die Fruchtfleischfestigkeit gemessen, der Stärketest durchgeführt und nach Formel 5.20 der Streif-Index berechnet.

In Tabelle 8-1 sind die Ergebnisse der Apfelprofilmessung dargestellt. Die Massen der Äpfel schwankten zwischen 80,3 g (Discovery) und 240,4 g (Remo). Der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} streute zwischen 0,17 (Granny Smith) und -0,11 (Schöner von Nordhausen). Die Apfelsorten Remo und Schneiderapfel erreichten mit $9,9 \frac{kg}{cm^2}$ die höchsten Fruchtfleischfestigkeiten, Golden Delicious mit $4,0 \frac{kg}{cm^2}$ die niedrigsten. Der höchste Zuckergehalt wurde mit 16,2 °Brix bei der Sorte Boskoop gemessen. Der geringste Zuckergehalt wurde mit 9,5 °Brix bei der Sorte Ontario festgestellt. Diese beiden Apfelsorten besaßen bei den Messungen mit 2,95 auch den niedrigsten pH-Wert. Der höchste pH-Wert wurde mit 3,98 bei der Sorte Gala Tenroy gemessen. Der Stärketest ergab bei den meisten Apfelsorten Werte im oberen Messbereich von 10, die niedrigsten Wert wurden mit 3,2 bei den Sorten Teser ITSR 30 und purpurroter Cousinot gemessen. Der Streif-Index streute zwischen 0,033 (Braeburn) und 0,267 (Prima).

Tabelle 8-1: Zusammenfassung der Messwerte der verwendeten Apfelsorten.

Sorte	n	Masse (g)		Q _{el}		Festigkeit ($\frac{kg}{cm^2}$)		Zucker- gehalt (°Brix)		pH- Wert		Stärketest		Streif-Index	
		μ	s	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Antonowka	5	227,4	106,5	-0,07	0,04	7,4	0,7	11,3	0,7	3,14	0,03	10,0	0,0	0,066	0,007
Ariwa	5	122,4	8,9	0,00	0,04	9,5	0,8	11,2	0,8	3,45	0,09	10,0	0,0	0,086	0,001
Berliner Schafsnase	5	159,9	32,4	0,01	0,01	6,4	0,4	11,9	0,2	3,12	0,02	6,0	1,2	0,093	0,022
Bohnapfel	5	131,1	16,7	0,10	0,03	8,4	0,8	12,0	0,6	3,12	0,06	5,4	0,5	0,131	0,011
Boskoop	5	164,6	37,7	-0,03	0,04	6,1	1,1	16,2	0,7	2,95	0,08	9,2	1,1	0,042	0,011
Braeburn	5	151,9	5,8	-0,05	0,04	4,7	0,7	14,1	1,0	3,91	0,12	10,0	0,0	0,033	0,005
Coulons Renette	5	152,8	22,0	-0,02	0,07	5,5	0,4	15,0	0,5	3,07	0,10	10,0	0,0	0,037	0,002
Discovery	5	80,3	11,9	-0,04	0,05	7,7	1,7	11,1	1,9	3,40	0,08	9,8	0,4	0,072	0,017
Dülmener Herbstrosenapfel	5	228,2	48,0	-0,05	0,02	7,9	2,2	13,3	0,6	3,19	0,07	6,2	2,6	0,151	0,170
Effeltricher Findling	5	137,7	37,7	0,00	0,11	6,1	1,2	10,6	0,5	3,20	0,04	5,0	0,0	0,115	0,018
Elstar	148	150,8	11,6	-0,05	0,05										
Gala Tenroy	5	171,0	4,3	-0,01	0,07	5,3	0,8	11,0	1,5	3,98	0,10	9,6	0,5	0,051	0,009
Gescher Klosterapfel	45	179,9	26,4	-0,06	0,03			13,5	0,7	3,42	0,06				
Golden Delicious	5	188,3	12,0	0,00	0,03	4,0	0,6	11,0	0,8	3,10	0,05	10,0	0,0	0,037	0,008
Goldparmäne	8	108,0	23,3	0,00	0,12	6,4	1,3	14,2	0,4	3,34	0,08	7,4	1,1	0,063	0,019
Granny Smith	5	123,0	15,6	0,17	0,08	4,8	0,3	10,6	0,5	3,60	0,05	10,0	0,0	0,045	0,004
Idared	16	153,8	15,3	-0,09	0,05										
Jonagold	60	145,2	29,9	-0,08	0,07										
Kaiser Wilhelm	5	240,3	60,4	0,04	0,05	6,5	0,6	14,0	0,7	3,10	0,05	8,0	1,2	0,059	0,008
Käsaapfel Rothenkirchen	5	150,8	6,2	0,06	0,03	7,2	0,5	10,5	0,6	3,29	0,09	6,8	2,5	0,111	0,036
Linsenhöfer Sämling	8	151,1	22,4	-0,05	0,15	8,4	0,4	10,2	0,6	3,08	0,13	8,4	0,2	0,097	0,004
Lohrer Rambour	5	130,3	27,4	0,06	0,04	8,6	1,5	13,4	0,4	3,22	0,06	8,0	1,6	0,085	0,032
Lombarts Kavill	59	158,0	26,6	-0,06	0,03			13,5	0,8	3,56	0,13				
Nela	5	124,7	14,2	-0,02	0,05	5,8	0,7	12,0	0,6	3,24	0,05	8,4	2,1	0,061	0,016
Ontario	5	129,3	15,0	-0,05	0,03	6,8	1,3	9,5	0,7	2,95	0,05	9,6	0,9	0,076	0,017
Otava	5	173,6	43,4	-0,08	0,04	6,3	0,5	12,0	1,3	3,05	0,05	7,6	2,4	0,078	0,033
Prima	5	174,2	19,7	-0,02	0,02	8,8	0,8	10,4	0,4	3,22	0,05	3,8	1,6	0,267	0,130
purpurroter Cousinot	5	113,1	11,4	0,02	0,05	7,4	0,9	9,8	1,5	3,24	0,03	3,2	1,1	0,258	0,073
Remo	5	240,4	18,3	0,01	0,01	9,9	1,2	13,4	0,7	3,14	0,02	3,6	1,9	0,245	0,107
Rheinischer Winterapfel	5	233,3	67,5	0,00	0,04	9,1	0,4	11,2	0,7	3,24	0,03	5,8	0,4	0,143	0,022
Roter Gravensteiner	5	89,8	28,0	-0,02	0,09	7,1	1,2	12,6	0,9	3,29	0,05	6,8	1,6	0,087	0,028
Schneiderapfel	5	117,6	20,2	-0,08	0,06	9,9	0,7	14,9	0,3	3,07	0,06	5,7	0,6	0,120	0,006
Schöner von Herrnhut	8	139,1	21,6	0,00	0,11	6,6	0,3	11,2	0,5	3,19	0,04	8,4	0,5	0,070	0,004
Schöner von Nordhausen	5	104,6	16,3	-0,11	0,08	6,7	1,4	12,7	0,5	3,06	0,04	10,0	0,0	0,053	0,012
Schöner von Wiltshire	7	127,0	21,3	-0,08	0,04	7,0	0,8	12,9	0,5	3,22	0,05	7,4	1,1	0,075	0,022
Selena	5	143,8	45,6	-0,03	0,02	7,6	0,7	11,4	0,2	3,29	0,05	4,0	0,0	0,167	0,016
Teser ITSR 30	5	153,2	28,3	-0,04	0,06	8,7	0,6	12,0	0,4	3,91	0,12	3,2	0,8	0,246	0,093
Alle Sorten		153,6	35,7	-0,04	0,07	7,2	1,7	12,6	1,6	3,35	0,24	7,5	2,4	0,101	0,077

8.2 Einfluss des Nachreifeverhaltens auf die Messergebnisse

Das Nachreifeverhalten wurde anhand von vier verschiedenen Apfelsorten untersucht. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 8-2 dargestellt. Die Fruchtfleischfestigkeit und der Streif-Index nahmen für jede Apfelsorte tendenziell im Verlauf der Lagerung ab, während für pH-Wert, Zuckergehalt und Stärketest bei allen Apfelsorten tendenziell höhere Werte erreicht wurden. Für die elektrischen Qualitätskennwerte der Äpfel ist keine Tendenz zu erkennen. Wird die Standardabweichung von Q_{el} berücksichtigt, sind keine Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Lagerzeiten zu erkennen.

Tabelle 8-2: Qualitätseigenschaften von vier verschiedenen Apfelsorten während der Nachreife bei Raumtemperatur (n = 4).

Apfelsorte	Tage nach der Ernte	Fruchtfleischfestigkeit [$\frac{kg}{cm^2}$]		Zuckergehalt [°Brix]		pH-Wert		Stärketest		Streif-Index		Q_{el}	
		μ	s	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Goldparmäne	1	6,88	0,64	14,19	0,13	3,33	0,06	6,8	0,5	0,072	0,012	-0,06	0,08
	4	7,01	0,48	14,69	1,31	3,33	0,01	7,0	0,0	0,069	0,010	0,00	0,07
	7	5,92	0,53	14,63	1,45	3,48	0,07	9,5	0,6	0,043	0,006	-0,04	0,05
	11	5,55	0,58	14,42	0,52	3,59	0,03	10,0	0,0	0,038	0,003	-0,11	0,04
	14	6,21	0,58	15,38	1,30	3,52	0,07	9,3	0,5	0,044	0,005	-0,08	0,07
	18	5,23	0,64	15,81	1,18	3,57	0,08	9,8	0,5	0,034	0,007	-0,10	0,07
Schöner von Wiltshire	1	7,42	0,41	13,25	0,29	3,19	0,04	7,0	1,4	0,084	0,026	-0,09	0,03
	4	6,10	0,45	12,94	0,47	3,30	0,07	8,5	1,0	0,056	0,008	-0,04	0,04
	7	6,53	1,06	13,25	0,00	3,30	0,04	9,8	0,5	0,051	0,011	-0,11	0,04
	11	5,01	0,24	13,19	0,52	3,38	0,04	10,0	0,0	0,038	0,001	-0,05	0,05
	14	4,93	0,83	13,19	0,47	3,31	0,04	10,0	0,0	0,037	0,006	-0,11	0,03
	18	4,96	0,73	13,25	0,61	3,42	0,05	10,0	0,0	0,037	0,004	-0,12	0,02
Linsenhöfer Sämling	1	8,26	0,15	9,94	0,47	3,04	0,03	1,5	0,0	0,555	0,028	-0,17	0,01
	18	6,50	0,21	12,50	0,79	3,12	0,01	6,8	0,5	0,078	0,007	-0,17	0,03
	25	5,49	1,23	12,50	0,35	3,20	0,08	9,8	0,5	0,045	0,010	-0,13	0,03
	28	5,77	1,08	13,06	0,55	3,19	0,07	10,0	0,0	0,044	0,007	-0,16	0,07
	33	5,23	0,52	12,81	1,33	3,25	0,07	10,0	0,0	0,041	0,005	-0,16	0,05
	36	5,02	0,47	13,69	0,55	3,28	0,03	10,0	0,0	0,037	0,003	-0,18	0,03
Schöner von Hermhut	1	6,73	0,28	11,00	0,00	3,19	0,05	1,5	0,6	0,463	0,193	-0,08	0,09
	18	3,32	0,26	13,13	0,85	3,34	0,04	8,0	0,0	0,032	0,003	-0,19	0,03
	25	3,85	0,41	12,56	0,31	3,34	0,07	9,8	0,5	0,031	0,003	-0,12	0,03
	28	3,12	0,39	12,38	0,25	3,41	0,08	10,0	0,0	0,025	0,003	-0,15	0,02
	33	3,20	0,21	12,44	0,63	3,50	0,05	10,0	0,0	0,026	0,003	-0,13	0,03
	36	3,34	0,28	12,67	0,29	3,49	0,07	10,0	0,0	0,026	0,002	-0,11	0,04

8.3 Einfluss der Veränderung des Wassergehaltes

Die Untersuchungen zur Ermittlung des Einflusses der Veränderung des Wassergehaltes auf den elektrischen Qualitätskennwert wurden mit vier verschiedenen Apfelsorten durchgeführt. Äpfel, die erkennbar von Schimmelpilzen befallen waren oder sonstige auffällige Verfärbungen an der Oberfläche hatten, wurden für die Auswertung der Daten nicht verwendet. Die Äpfel wurden zur Beschleunigung des Wasserverlusts bei 40°C im Trockenschrank gelagert. Während der Lagerung nahmen für jede Apfelsorte die Fruchtfleischfestigkeit und der Streif-Index tendenziell ab, während der pH-Wert, der Zuckergehalt und der Stärkewert des Stärketests tendenziell anstiegen. Tabelle 8-3 zeigt die Ergebnisse zu verschiedenen Lagerzeiten.

Tabelle 8-3: Qualitätsparameter von vier Apfelsorten während der Lagerung bei 40°C.

Apfelsorte	Lagerzeit [d]	n	Wasser- verlust [Massen- anteil]		Frucht- fleisch- festigkeit [$\frac{kg}{cm^2}$]		Zucker- gehalt [°Brix]		pH-Wert		Stärketest		Streif-Index		Q _{el}	
			μ	s	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s	μ	s
Goldparmäne	0	4	0,0%	0,0%	5,9	1,7	14,3	0,6	3,4	0,1	8,0	1,2	0,053	0,021	0,06	0,13
	3	4	8,9%	1,8%	4,9	0,4	14,6	0,9	3,8	0,1	8,5	0,6	0,039	0,004	0,06	0,08
	7	4	11,8%	1,6%	5,6	0,3	15,5	0,8	4,1	0,0	9,5	0,6	0,038	0,002	0,09	0,02
	10	4	17,5%	2,8%	4,6	0,7	15,8	0,8	4,2	0,0	10,0	0,0	0,029	0,005	0,13	0,05
	14	4	25,8%	1,9%	3,5	0,9	19,3	0,5	4,3	0,1	10,0	0,0	0,018	0,005	0,33	0,09
	16	4	34,1%	8,9%	3,2	1,4	17,9	1,2	4,4	0,0	10,0	0,0	0,023	0,011	0,21	0,10
Schöner von Wiltshire	0	4	0,0%	0,0%	6,3	0,6	12,4	0,4	3,2	0,0	8,0	0,0	0,063	0,006	0,09	0,08
	3	4	5,1%	0,7%	4,7	0,4	13,8	0,4	3,6	0,0	10,0	0,0	0,034	0,003	0,02	0,03
	7	4	9,6%	1,4%	4,8	0,2	14,1	0,1	4,0	0,1	10,0	0,0	0,034	0,001	0,09	0,07
	10	4	10,5%	0,6%	5,1	0,2	14,4	1,1	4,1	0,0	10,0	0,0	0,036	0,001	0,10	0,05
	14	4	12,8%	1,1%	4,8	0,4	14,1	0,7	4,4	0,1	10,0	0,0	0,034	0,002	0,12	0,09
	16	4	13,5%	1,0%	3,9	0,7	13,7	0,5	4,5	0,1	10,0	0,0	0,028	0,004	0,09	0,03
Linsenhöfer Sämling	0	4	0,0%	0,0%	8,5	0,5	10,5	0,6	3,1	0,2	1,6	0,3	0,505	0,082	0,07	0,11
	3	4	4,5%	0,9%	7,8	0,4	11,8	0,4	3,2	0,0	1,8	0,5	0,422	0,187	0,05	0,08
	5	4	5,9%	0,6%	6,9	0,4	12,3	0,5	3,3	0,0	4,0	0,0	0,140	0,005	0,07	0,08
	11	3	13,8%	1,2%	6,1	0,8	13,9	0,9	4,2	0,2	3,7	1,5	0,141	0,078	0,22	0,03
	15	1	20,4%		5,6		14,0		4,9		10,0		0,040		0,46	
	19	3	21,4%	1,2%	4,3	0,8	13,8	0,4	5,2	0,2	10,0	0,0	0,031	0,007	0,66	0,04
Schöner von Herrnhut	0	4	0,0%	0,0%	6,4	0,3	11,4	0,6	3,2	0,0	1,8	0,5	0,350	0,142	0,08	0,02
	3	4	4,6%	0,4%	5,3	2,0	12,1	0,8	3,4	0,1	3,8	2,2	0,164	0,110	0,10	0,09
	5	1	6,5%		5,8		13,0		3,4		2,0		0,223		0,07	
	11	4	14,6%	1,0%	4,6	0,7	13,5	0,6	3,9	0,1	6,8	1,0	0,051	0,009	0,14	0,02
	15	3	19,1%	2,0%	3,7	1,6	14,0	0,0	4,0	0,0	9,0	0,0	0,037	0,003	0,33	0,18
	19	4	22,7%	4,6%	4,5	0,9	15,6	1,3	4,3	0,2	10,0	0,0	0,029	0,005	0,32	0,10

Um den Einfluss des Wasserverlusts auf Q_{el} zu veranschaulichen, wurden aus allen Messwerten ohne Berücksichtigung der Apfelsorte in Abhängigkeit der Wasserverluste Gruppen gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-4 dargestellt. Mit steigendem Wasserverlust erhöhen sich auch die elektrischen Qualitätskennwerte.

Tabelle 8-4: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlich hohen Wasserverlusten.

Wasserverlust		n	Q_{el}	
μ [Massenanteil]	s [Massenanteil]		μ	s
0,0%	0,0%	87	0,045	0,069
3,7%	0,2%	11	0,093	0,057
4,5%	0,3%	30	0,064	0,066
5,5%	0,4%	14	0,071	0,048
6,4%	0,2%	18	0,054	0,076
7,8%	0,4%	20	0,082	0,053
9,0%	0,3%	9	0,083	0,041
11,5%	0,3%	12	0,106	0,063
13,5%	0,3%	10	0,118	0,047
14,4%	0,3%	10	0,145	0,046
15,7%	0,5%	9	0,169	0,043
17,6%	0,8%	14	0,230	0,119
20,2%	0,5%	8	0,330	0,180
21,7%	0,3%	7	0,389	0,214
24,2%	0,6%	5	0,297	0,066
28,0%	1,4%	7	0,321	0,143
39,2%	3,0%	4	0,496	0,254

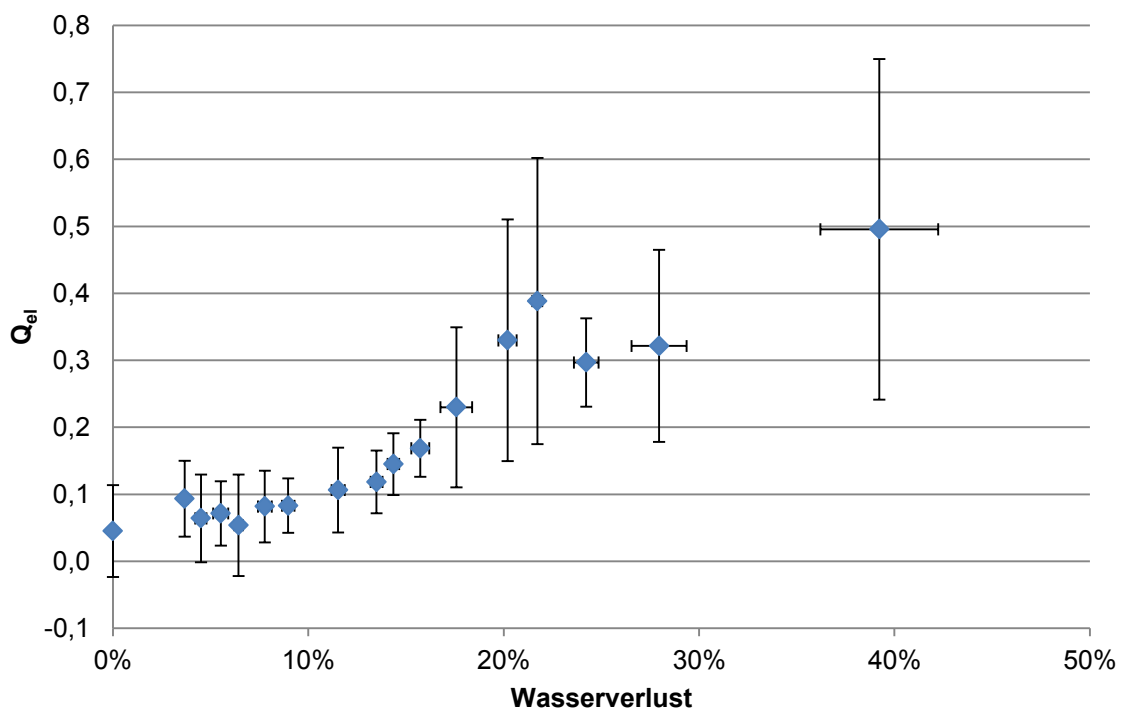


Abbildung 8-1: Q_{el} bei unterschiedlichen Wasserverlusten Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.

In Abbildung 8-1 sind die Mittelwerte von Q_{el} über die Mittelwerte der Wasserverluste aufgetragen. Hier ist deutlich zu erkennen, dass sich mit steigendem Wasserverlust, neben den Messwerten für Q_{el} , auch deren Standardabweichung erhöhte.

8.4 Einfluss von definierter Zellerstörung auf die Messergebnisse

Mit der entwickelten Messmethode soll, ähnlich wie bei konduktiver Kopplung, der Anteil zerstörter Zellen ermittelt werden können. Um Zellen definiert zu zerstören, wurden in der ersten Versuchsreihe Äpfel einem Gefrier-Tau-Zyklus unterzogen und die Veränderungen des elektrischen Qualitätskennwert Q_{el} vor und nach der Behandlung beobachtet. Die thermische Belastung sollte möglichst alle Zellen zerstören und somit Extremwerte für Q_{el} liefern. In der zweiten Versuchsreihe wurden Äpfel mit Enzymen behandelt und zu unterschiedlichen Einwirkzeiten gemessen, um unterschiedliche Zellerstörungsgrade zu erhalten.

8.4.1 Einfluss von Gefrier-Tau-Zyklen auf den elektrischen Qualitätskennwert

Die Versuche wurden mit den Apfelsorten Braeburn, Jonagold und Idared durchgeführt. Vor und nach dem Einfrieren wurde jeweils der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} der Äpfel ermittelt. Tabelle 8-5 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Die elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} der jeweiligen Apfelsorten waren nach dem Gefrier-Tau-Zyklus höher als vor dem Einfrieren. Zwischen den Apfelsorten ist vor dem Einfrieren kein Unterschied zu erkennen, wenn man die verhältnismäßig hohen Standardabweichungen mit einbezieht. Nach dem Einfrieren erreicht die im Mittel größte Apfelsorte Braeburn die höchsten Q_{el} -Werte. Zwischen den beiden anderen Apfelsorten sind kaum Unterschiede zu erkennen.

Tabelle 8-5: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} vor und nach einem Gefrier-Tau-Zyklus (n = 14).

Sorte		Masse [g]		Q_{el}	
		μ	s	μ	s
Jonagold	vorher	189,3	19,1	-0,042	0,054
Idared	vorher	150,4	13,0	-0,070	0,027
Braeburn	vorher	253,0	12,7	-0,035	0,052
Jonagold	nachher	188,3	19,0	1,035	0,273
Idared	nachher	149,1	12,7	0,903	0,288
Braeburn	nachher	250,9	14,0	1,597	0,127

8.4.2 Einfluss von Enzymbehandlungen an Äpfeln auf den elektrischen Qualitätskennwert

Für die Verflüssigungsversuche mit dem Enzymgemisch wurden Äpfel der Sorte Braeburn ausgewählt. Abbildung 8-2 zeigt den Verlauf Q_{el} über den Anteil verflüssigter Apfelmasse. Mit steigendem Verflüssigungsgrad stieg auch der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} an.

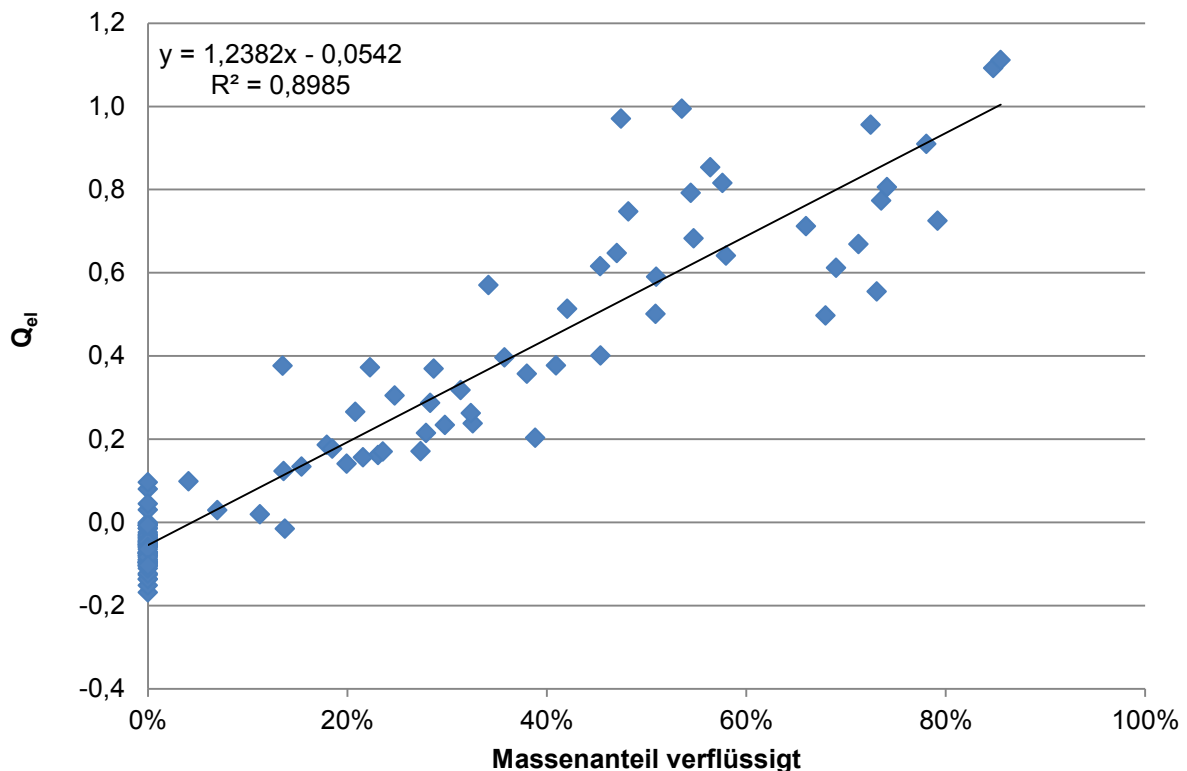


Abbildung 8-2: Q_{el} in Abhängigkeit des verflüssigten Massenanteils der Äpfel.

Aus allen aufgenommenen Messwerten wurden in Abhängigkeit der Anteile verflüssigter Apfelmasse Gruppen gebildet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-6 dargestellt. Mit steigendem Verflüssigungsgrad erkennt man auch hier das Ansteigen der Q_{el} -Werte.

Tabelle 8-6: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Verflüssigungsgraden.

Verflüssigung		n	Q_{el}	
μ [Massenanteil]	s [Massenanteil]		μ	s
0,0%		55	-0,06	0,05
10,5%	4,1%	6	0,10	0,14
17,9%	1,9%	4	0,16	0,03
22,7%	1,4%	6	0,24	0,09
30,3%	2,4%	9	0,30	0,12
39,1%	2,5%	5	0,37	0,11
49,8%	3,6%	10	0,69	0,19
59,5%	4,4%	4	0,76	0,10
71,6%	2,4%	7	0,70	0,16
81,9%	3,8%	4	0,96	0,18

In Abbildung 8-3 sind die Gruppenmittelwerte von Q_{el} über die Gruppenmittelwerte der verflüssigten Massenanteile in einem Diagramm aufgetragen. Zwischen den Gruppen von 49,8% Massenanteil und 71,6% Massenanteil sind keine Unterschiede der Q_{el} -Werte zu erkennen, wenn die Standardabweichung berücksichtigt wird.

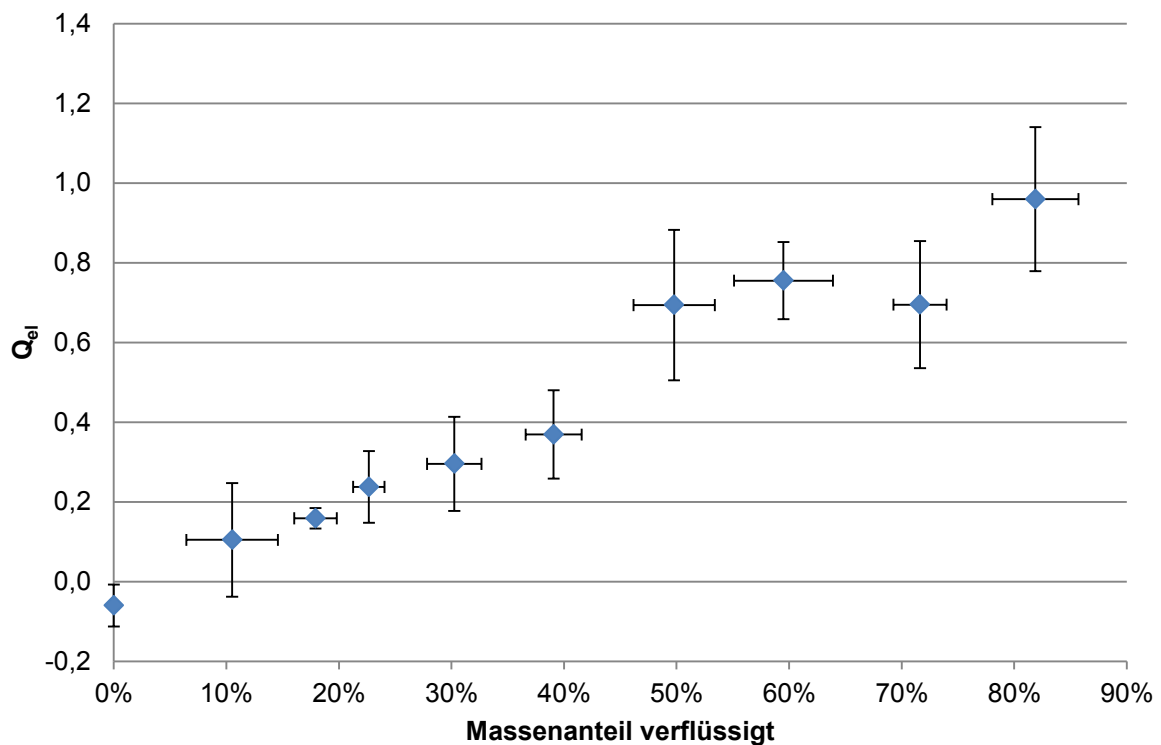


Abbildung 8-3: Q_{el} bei unterschiedlichen verflüssigten Massenanteilen. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.

8.5 Einfluss von Fäulnisbefall auf die Messergebnisse

Die Fäulnisversuche unterteilten sich in zwei Versuchsreihen. Zunächst wurden Äpfel verschiedener Sorten mit *Penicillium expansum* an einer definierten Stelle der Apfeloberfläche bzw. im Kernhaus beimpft.

Im zweiten Versuchsabschnitt wurden Äpfel verwendet, die nicht im Labor beimpft wurden, sondern bereits bei Anlieferung mit verschiedenen nicht identifizierten Schimmelpilzen unterschiedlich stark befallen waren.

8.5.1 Definierte Oberflächenfäule

Die Beimpfung mit *Penicillium expansum* führte zu scharf abgegrenzten wässrigen Faulstellen, die mit einem Löffel entfernt werden konnten. Die Faulstelle breitete sich von der Beimpfungsstelle gleichmäßig in alle Richtungen aus, so dass die Form des befallenen Fruchtfleisches als kugeliges Körper beschrieben werden konnte (siehe Abbildung 8-4).



Abbildung 8-4: Mit *Penicillium expansum* befallener Apfel. Faulanteil 27,9% Massenanteil.

Abbildung 8-5 zeigt den Verlauf Q_{el} über den Massenanteil faulem Gewebes. Mit steigendem Anteil faulem Apfelgewebe stieg auch der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} an.

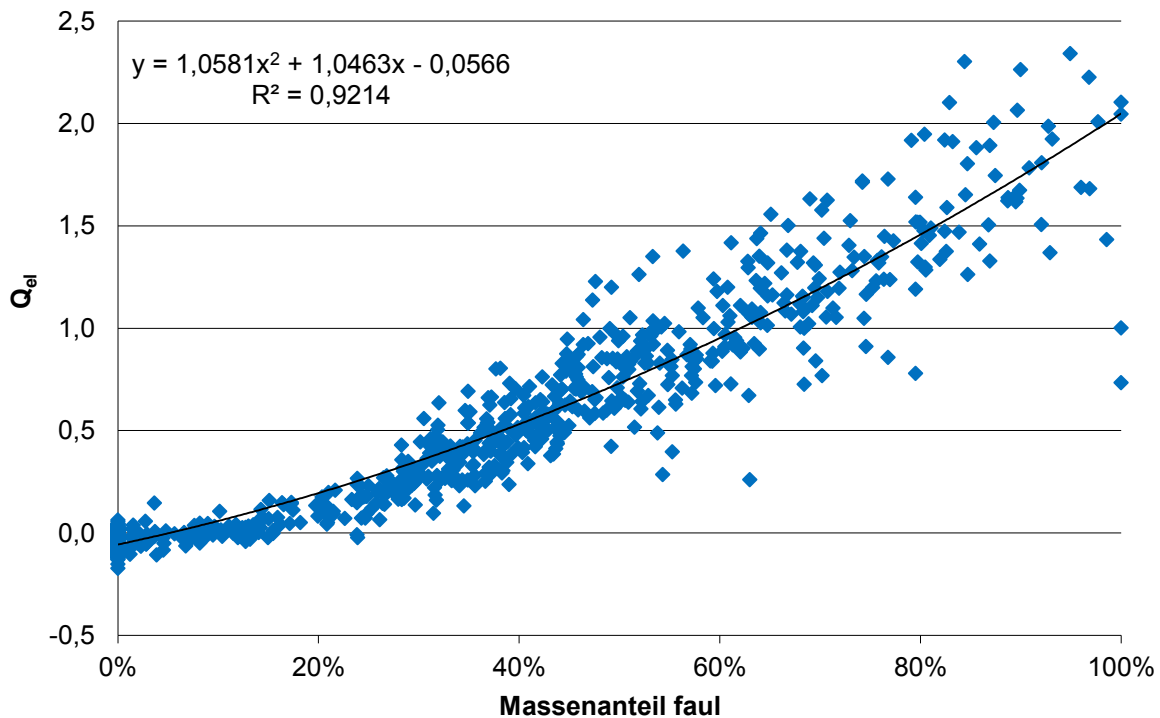


Abbildung 8-5: Q_{el} in Abhängigkeit des Faulanteils bei Oberflächenfäule.

Die Messwerte der Äpfel wurden in Abhängigkeit der Faulanteile in Gruppen aufgeteilt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-7 dargestellt.

In Abbildung 8-6 sind die Gruppenmittelwerte von Q_{el} über die Gruppenmittelwerte der Faulanteile inklusive der Standardabweichungen aufgetragen. Mit steigendem Faulanteil stiegen auch die Messwerte für Q_{el} bis zur Gruppe von 100% Massenanteil Faulanteil an. Der Gruppenmittelwert von 100% Massenanteil Faulanteil befand sich auf einem niedrigeren Niveau als der Gruppenmittelwert von 94,9% Massenanteil Faulanteil. Je größer der Faulanteil im Apfel war, desto größer war auch die Standardabweichung für Q_{el} .

Tabelle 8-7: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Faulgraden bei Oberflächenfäule.

Faulanteil		n	Q_{el}	
μ [Massenanteil]	s [Massenanteil]		μ	s
0,0%	0,0%	337	-0,04	0,04
1,5%	0,3%	11	-0,03	0,04
3,1%	0,6%	12	-0,01	0,07
5,1%	0,8%	6	-0,03	0,03
7,1%	0,5%	8	-0,01	0,03
8,8%	0,6%	11	0,01	0,03
11,0%	0,7%	8	0,02	0,04
12,8%	0,5%	12	0,01	0,03
14,8%	0,6%	11	0,05	0,06
17,6%	1,3%	10	0,10	0,04
20,9%	0,5%	10	0,12	0,06
24,1%	0,6%	17	0,14	0,08
26,2%	0,4%	13	0,18	0,06
27,5%	0,3%	5	0,21	0,03
28,5%	0,2%	15	0,27	0,08
29,6%	0,2%	7	0,26	0,06
31,3%	0,5%	21	0,37	0,14
33,0%	0,6%	22	0,35	0,06
34,7%	0,5%	23	0,41	0,13
36,9%	0,6%	28	0,44	0,14
38,9%	0,6%	21	0,50	0,15
41,0%	0,5%	18	0,53	0,10
42,7%	0,5%	15	0,57	0,11
44,2%	0,4%	20	0,63	0,16
45,8%	0,5%	21	0,76	0,12
47,9%	0,6%	14	0,78	0,21
50,0%	0,6%	21	0,79	0,17
52,1%	0,6%	17	0,83	0,18
53,8%	0,6%	15	0,87	0,26
55,7%	0,5%	10	0,81	0,26
57,5%	0,4%	12	0,86	0,12
59,9%	0,6%	13	0,99	0,16
62,0%	0,7%	15	0,96	0,29
64,0%	0,5%	15	1,16	0,17
66,6%	0,9%	11	1,25	0,17
68,9%	0,6%	17	1,13	0,22
71,0%	0,7%	10	1,23	0,26
74,0%	0,8%	11	1,33	0,25
76,3%	0,5%	9	1,31	0,23
80,0%	1,0%	17	1,44	0,26
83,8%	1,2%	13	1,70	0,31
88,7%	1,4%	14	1,74	0,24
94,9%	2,4%	11	1,82	0,32
100,0%	0,0%	4	1,47	0,71

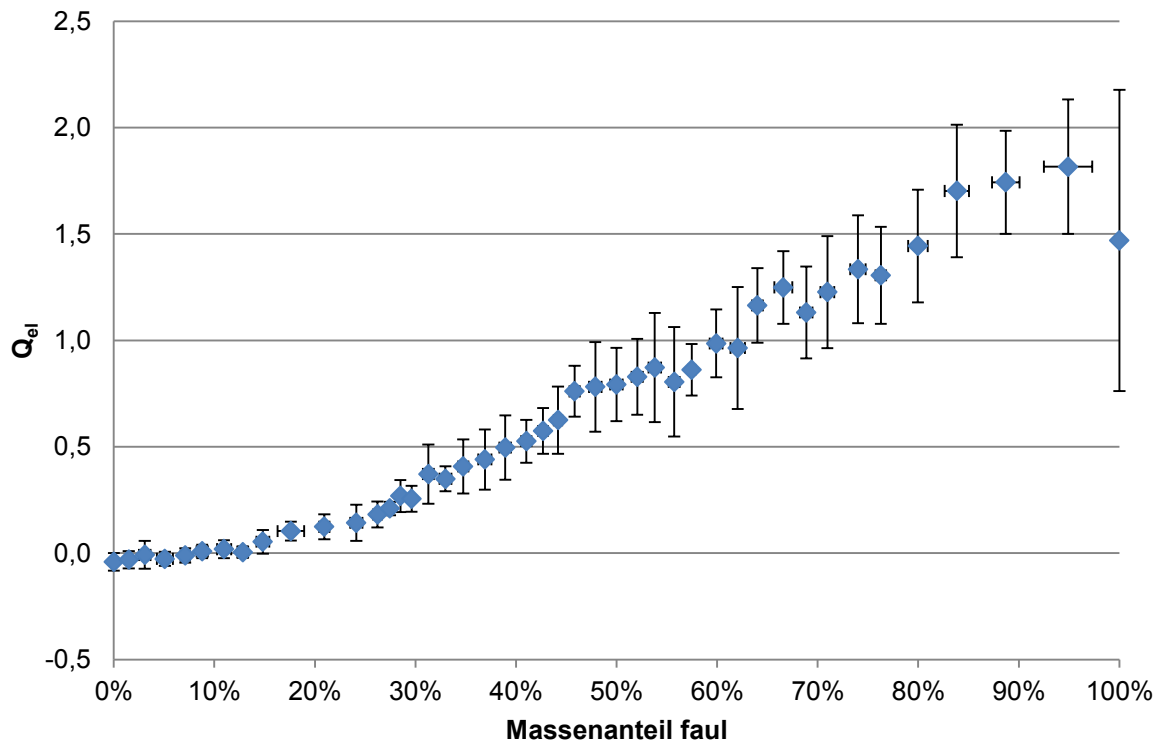


Abbildung 8-6: Q_{el} bei unterschiedlichen Faulanteilen bei Oberflächenfäule. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.

8.5.2 Kernfäule

Für die Kernfäuleuntersuchungen wurden Äpfel der Sorte Braeburn verwendet. Zur Infektion wurde eine *Penicillium expansum*- Suspension benutzt, die ins Kerngehäuse der Äpfel gespritzt wurde. Nach entsprechender Infektionszeit wurde der Faulanteil der Äpfel nach dem Messen mit dem induktiven Impedanzmesssystem gravimetrisch bestimmt. Ähnlich wie bei der Oberflächenfäule bildeten sich scharf abgegrenzte wässrige Faulstellen, die sich einfach mit einem Löffel entfernen ließen. Abbildung 8-7 zeigt den Verlauf Q_{el} über den Kernfäuleanteil. Mit steigendem Kernfäulegrad stieg auch der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} an.

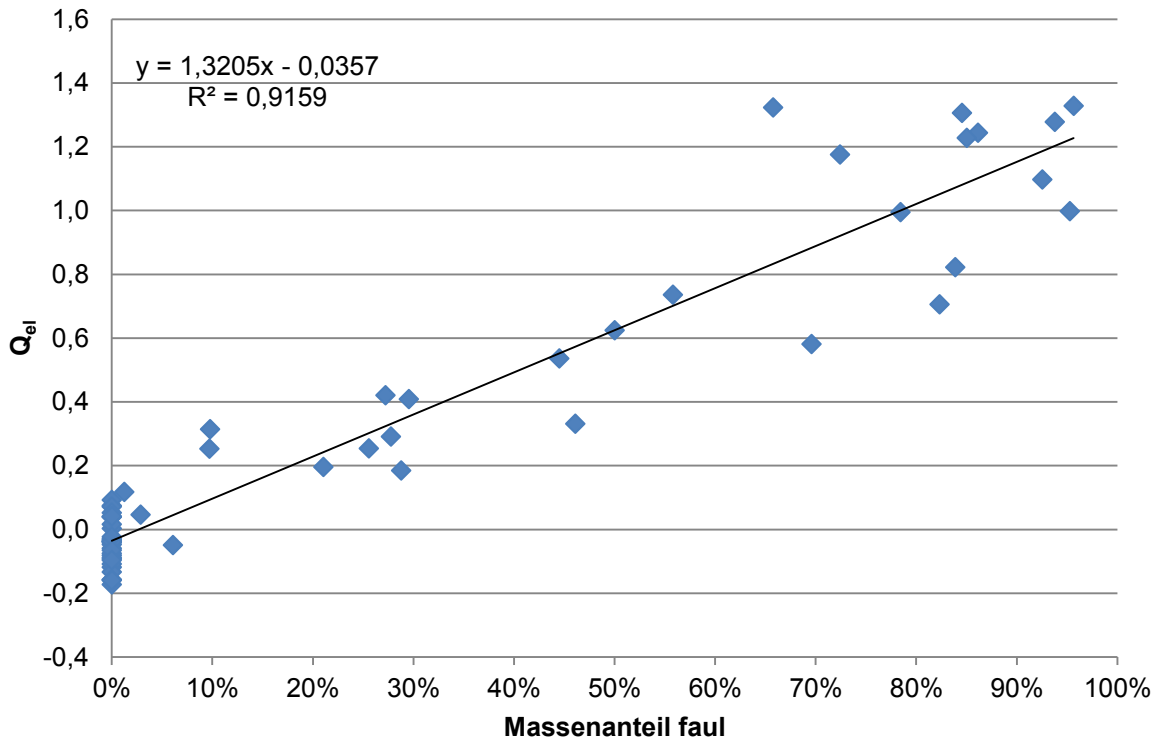


Abbildung 8-7: Q_{el} in Abhängigkeit des Kernfäuleanteils.

Die Messwerte dieser Versuchsreihe wurden in Abhängigkeit der Kernfäuleanteile in Gruppen aufgeteilt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8-8 dargestellt. Ab der Gruppe mit 71,6% Massenanteil Kernfäuleanteil sind bei Berücksichtigung der Standardabweichung keine Unterschiede zwischen den Q_{el} - Mittelwerten mehr festzustellen.

Abbildung 8-8 zeigt die Gruppenmittelwerte von Q_{el} , die über die Gruppenmittelwerte der Kernfäuleanteile aufgetragen sind. In der Abbildung sind auch die Standardabweichungen berücksichtigt. Mit steigendem Faulanteil stiegen die Messwerte für Q_{el} bis zur Gruppe 71,6% Massenanteil Kernfäuleanteil an.

Tabelle 8-8: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Kernfäulegraden.

Fäule		n	Q_{el}	
μ [Massenanteil]	s [Massenanteil]		μ	s
0,0%	0,0%	32	-0,05	0,07
6,0%	3,9%	5	0,14	0,15
26,7%	3,1%	6	0,29	0,10
49,1%	5,0%	4	0,56	0,17
71,6%	5,3%	4	1,02	0,32
84,4%	1,4%	5	1,06	0,28
94,3%	1,5%	4	1,18	0,15

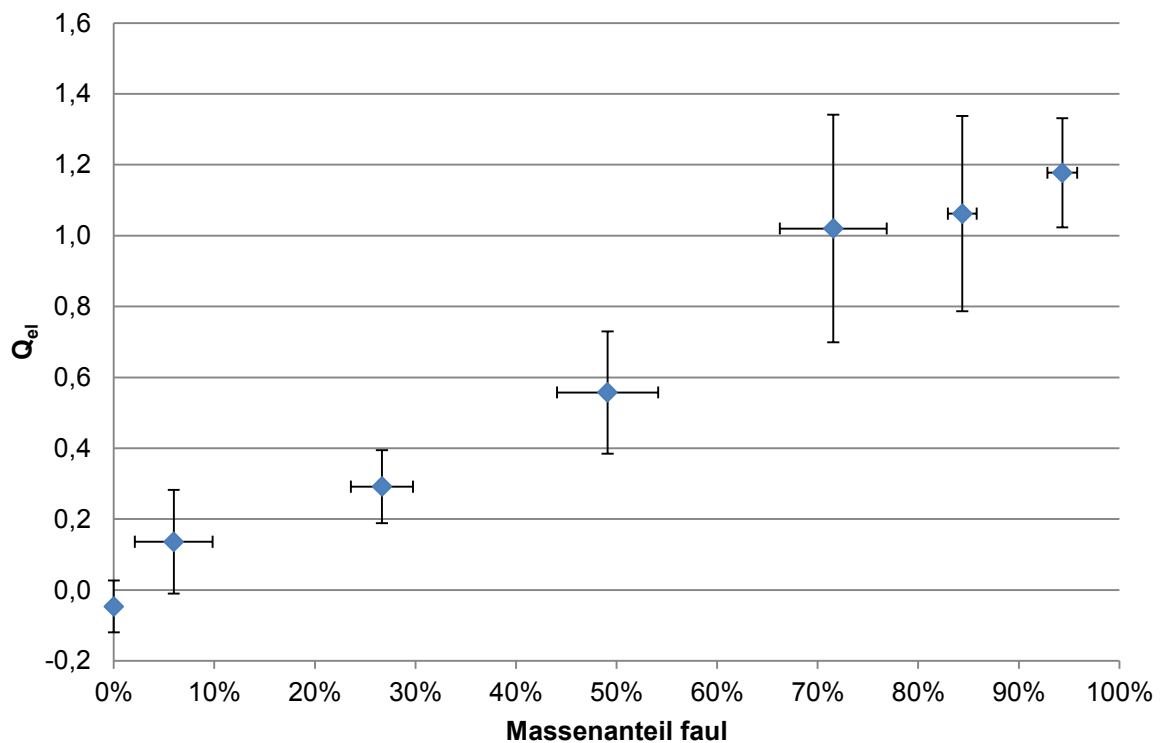


Abbildung 8-8: Q_{ei} bei unterschiedlichen Kernfäuleanteilen. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.

8.5.3 Nicht definierte Fäulnis

Die Versuchsreihe mit den nicht identifizierten Fäulniserregern wurde mit Streuobstäpfel unterschiedlicher Sorte, Größe, Form, unterschiedlichen Fäulniserregern und unterschiedlich starkem Fäulnisbefall durchgeführt. Anders als bei den Kernfäule- und den Oberflächenfäuleversuchen befanden sich die Faulstellen nicht an einer definierten Stelle. In vielen Fällen faulten die Äpfel an mehr als einer Position. Für die Messung bedeutete dies, dass die Äpfel, aufgrund der unterschiedlichen Sensitivitätsverteilung des magnetischen Feldes (siehe Abschnitt 7.1), in vier verschiedenen Positionierungen durch das induktive Impedanzmesssystem geführt werden mussten, um aussagefähige Messwerte zu erhalten. Aus den vier Messpositionen wurde der arithmetische Mittelwert berechnet, um die unterschiedlichen Feldsensitivitäten auszugleichen. Die Faulstellen dieser Versuchsreihe waren in der Regel keine scharf abgegrenzten wässrigen Stellen, die mit einem Löffel entfernt werden konnten. Deshalb wurden die Faulstellen mit einem Messer von dem gesunden Gewebe getrennt. Auffällig verfärbtes Fruchtfleisch wurde mit dem Messer als faules Fruchtwewebe entfernt.

Abbildung 8-9 zeigt Q_{el} aufgetragen über den Faulanteil. Mit steigendem Anteil faulen Apfelgewebes stieg auch der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} an. Allerdings streuen die Messwerte wesentlich stärker als bei den Versuchen mit dem definierten Fäulniserreger.

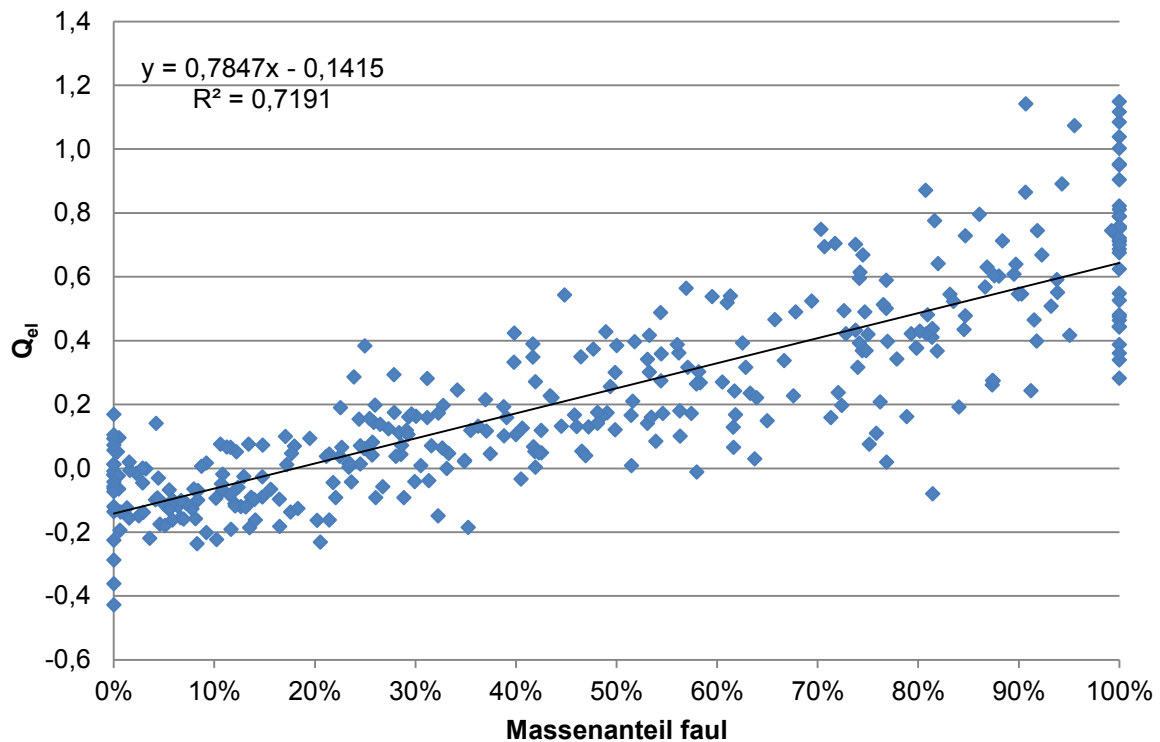


Abbildung 8-9: Q_{el} in Abhängigkeit des Faulanteils bei nicht definierter Fäule.

Die Messwerte der Äpfel wurden in Abhängigkeit der Faulanteile in Gruppen aufgeteilt. Die Ergebnisse der Gruppierungen sind in Tabelle 8-9 dargestellt.

In Abbildung 8-10 sind die Gruppenmittelwerte von Q_{el} über die Gruppenmittelwerte der Faulanteile inklusive der Standardabweichungen aufgetragen. Mit steigendem Faulanteil stiegen auch die Messwerte für Q_{el} an.

Tabelle 8-9: Elektrische Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Faulgraden bei nicht definierter Fäule.

Faulanteil			Q_{el}		Faulanteil			Q_{el}	
μ [Massenanteil]	s [Massenanteil]	n	μ	s	μ [Massenanteil]	s [Massenanteil]	n	μ	s
0,0%	0,0%	20	-0,07	0,16	47,9%	1,4%	15	0,20	0,12
1,0%	0,6%	11	-0,05	0,09	53,0%	1,4%	15	0,26	0,14
3,6%	0,7%	11	-0,07	0,10	57,3%	1,1%	12	0,29	0,17
6,0%	0,7%	12	-0,13	0,03	62,4%	1,3%	13	0,25	0,16
8,4%	0,5%	9	-0,10	0,09	67,4%	1,4%	5	0,41	0,12
11,3%	0,7%	14	-0,05	0,09	73,1%	1,4%	18	0,48	0,19
13,8%	0,8%	11	-0,07	0,09	77,3%	1,6%	14	0,32	0,18
16,6%	0,6%	5	-0,05	0,11	81,2%	0,5%	11	0,47	0,25
18,2%	0,8%	5	-0,01	0,11	84,1%	0,7%	6	0,48	0,18
22,9%	1,5%	20	0,03	0,15	87,0%	0,5%	6	0,47	0,23
27,7%	1,5%	21	0,09	0,10	88,9%	1,0%	6	0,62	0,05
32,4%	1,5%	15	0,08	0,12	92,6%	1,7%	14	0,65	0,26
37,9%	1,7%	12	0,15	0,15	100,0%	0,1%	34	0,71	0,23
42,4%	1,2%	15	0,17	0,16					

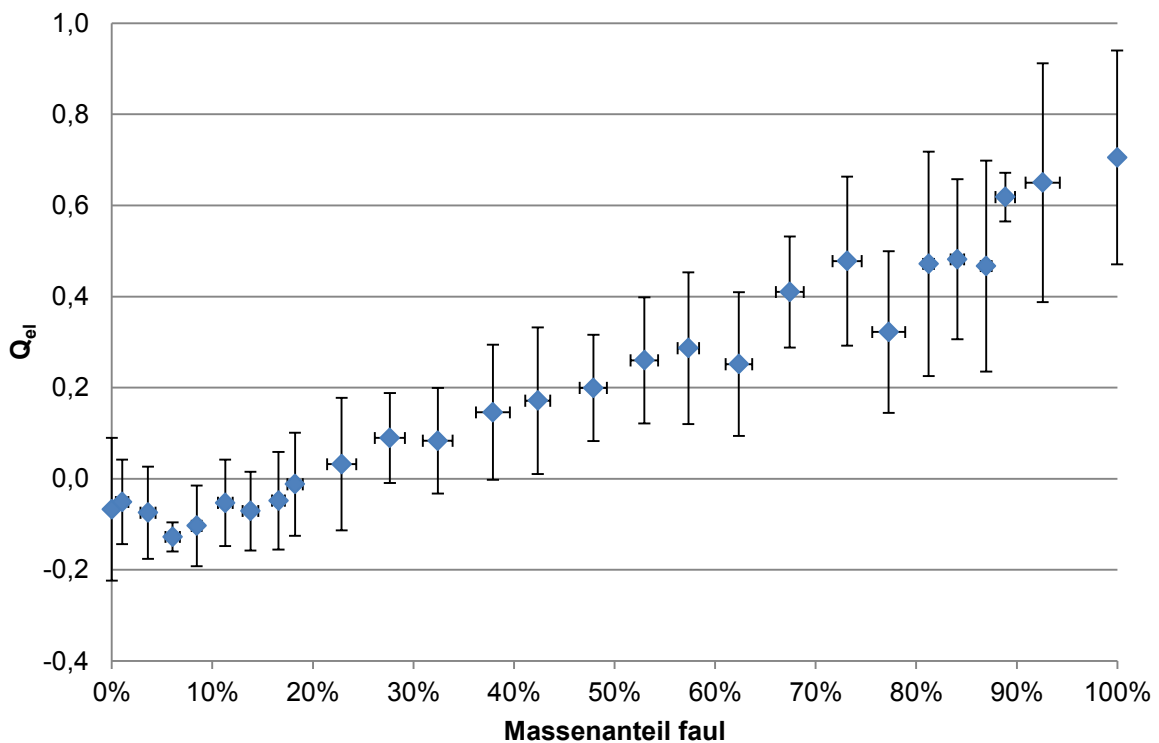


Abbildung 8-10: Q_{el} bei unterschiedlichen Faulanteilen bei nicht definierter Fäule. Darstellung von Mittelwert und Standardabweichung der Gruppen.

9 Diskussion

Wird die angewandte induktive Impedanzmesstechnik mit der konduktiven Messtechnik verglichen, fällt auf, dass die Bezeichnungen der elektrischen Parameter sich sehr stark ähneln. Bei der konduktiven Messtechnik spricht man beispielsweise bei der Impedanz von einer komplexen Größe, die sich in Realteil und Imaginärteil aufteilt. Bei der hier eingesetzten induktiven Impedanzmesstechnik wurde U_A als Realteil und U_B als Imaginärteil bezeichnet. Im Gegensatz zur konduktiven Messung handelt es sich hierbei aber nur um eine Definition. Mit der Lösung des Integrals aus Formel 5.18 und Formel 5.19 berechnet sich die Spannung U_A über eine Cosinus-Funktion (siehe Formel 5.16) und die Spannung U_B über eine Sinus-Funktion (siehe Formel 5.17). Bei der konduktiven Messung wird der Realteil ebenfalls über eine Cosinus-Funktion (siehe Formel 5.1) und der Imaginärteil über eine Sinus-Funktion (siehe Formel 5.2) berechnet. Außerdem besitzen die Berechnungen der Spannung U_A und U_B den Faktor zwei in ihren Formeln (siehe Formel 5.16 und Formel 5.17), so dass diese, anders als der Real- und der Imaginärteil der konduktiven Messungen (siehe Abbildung 5-1), nicht ohne weiteres in ein Zeigerdiagramm übertragen werden können. Die gemessenen Parameter der konduktiven und der hier angewandten induktiven Messtechnik können also nicht direkt aufeinander übertragen werden. Trotzdem wurde in dieser Arbeit überprüft, ob gleiche Aussagen mit induktiver und konduktiver Messtechnik getroffen werden können.

9.1 Methodenentwicklung

9.1.1 Einfluss der Probenposition auf die Messungen

Die Messungen zum Einfluss der Position auf dem Förderband zeigten, dass das magnetische Feld nicht homogen verteilt ist. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Position auf dem Förderband einen Einfluss auf die Messergebnisse besitzt. Je näher die Proben an den Rand des induktiven Impedanzmesssystems geführt wurden, desto höher waren die Messwerte von $U_{0,max}$ und U_B . Die Messwerte von Kanal A zeigten die höchsten Streuungen. Anders als bei der Amplitude $U_{0,max}$ und dem Kanal B konnte bei der Phasendifferenz kein Muster der Sensitivitätsverteilung

erkannt werden. Ein homogenes Feld müsste an jeder Stelle, nach der hier angewandten Auswertung, für jeden elektrischen Parameter den gleichen Wert ergeben.

In der Literatur wurden Untersuchungen dargestellt, die Spannung und die Phasendifferenz bei bekannten Produkteigenschaften zu berechnen. Dies gelang bei kugelförmigen Metallteilchen (Aluminium und Edelstahl), bei denen die Querschnittsfläche im Vergleich zur Spule verhältnismäßig klein war [34]. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten induktiven Impedanzmesssystem waren die Messproben (Äpfel) im Verhältnis zur Spule nicht so klein, so dass sie nicht durch einen homogenen Teil des Feldes geführt werden konnten. Außerdem sind Äpfel von der Zusammensetzung her nicht homogen und auch nicht ideal kugelförmig. Eine Berechnung der Spannungen und der Phasendifferenz erscheint für Äpfel aufgrund der vielen Einflussfaktoren mit dem verwendeten induktiven Impedanzmesssystem deshalb als nicht möglich.

9.1.2 Einfluss der Probentemperatur auf die Messungen

Die Versuche mit den unterschiedlich temperierten Äpfeln haben gezeigt, dass die Temperatur die Messungen beeinflusst. Es konnten signifikante Unterschiede zwischen den meisten Temperaturstufen für die elektrischen Parameter $U_{0,max}$, φ und U_B nachgewiesen werden. Allerdings kann dieser Einfluss als gering eingestuft werden. Es konnte kein mathematisches Modell gefunden werden, mit dem der Temperatureinfluss beschrieben werden konnte. Die Temperaturschwankungen waren relativ gering im Vergleich zu den Schwankungen innerhalb einer Messung (vgl. Tabelle 7-1 und Tabelle 7-4 mit Tabelle 7-6). Es muss beachtet werden, dass eine Abhängigkeit der Messergebnisse von der Temperatur vorliegt, allerdings kommt diese Abhängigkeit nur bei größeren Temperaturunterschieden deutlicher zum Tragen. Bei niedrigeren Temperaturunterschieden ist die Streuung innerhalb einer Messung größer als der Einfluss der Temperatur. Trotzdem muss bei zu großen Temperaturdifferenzen bei der Berechnung von Q_{el} die Probentemperatur beachtet werden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten.

9.1.3 Messung des Einflusses der geometrischen Probenform und der Probenmasse

Es konnte gezeigt werden, dass zum einen die Masse der Probe einen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Zum anderen besitzt, aufgrund der Sensibilitätsverteilung des magnetischen Feldes, auch die Probenform einen Einfluss auf die Messungen. Allgemein lässt sich sagen, je höher die Massen der Proben sind, desto größer sind auch die elektrischen Parameter. Allerdings muss dabei die Probenform beachtet werden. Bei stark unterschiedlich geformten Proben tritt der Einfluss der Masse im Vergleich zum Einfluss der Probenform in den Hintergrund. Die Probenform kann, wie im Beispiel der Quadermessungen zu sehen, mit der Querschnittsfläche herausgerechnet werden. Je größer die Querschnittsfläche ist, desto größer sind die elektrischen Parameter. Je nachdem wie unterschiedlich die Probenformen sind, müssen die Einflüsse der Masse und der Form unterschiedlich gewichtet werden.

Der Effekt der steigenden elektrischen Parameter mit steigender Masse bzw. steigender Querschnittsfläche lässt sich mit der höheren Anzahl an leitenden Ionen im magnetischen Feld erklären. Aufgrund der Sensitivitätsverteilung im Magnetfeld (siehe 7.1) ergibt sich keine lineare Veränderung der elektrischen Parameter zu der Erhöhung der Masse bzw. der Querschnittsfläche sondern die Beschreibung der Zusammenhänge mit einem Polynom zweiten Grades.

Die Versuche mit den Apfelquadern repräsentieren die Messung von stark unterschiedlichen Formen. Die statistische Auswertung hat gezeigt, dass ein gültiges Regressionsmodell für den Zusammenhang Querschnittsfläche zu U_B gefunden werden konnte. Die Regressionsmodelle mit den anderen elektrischen Parametern konnten nicht validiert werden.

Die Versuche mit den Apfelzylindern repräsentieren die Messung von gleichmäßigen Formen bei stark unterschiedlichen Massen. Hier konnte das Regressionsmodell zwischen Masse und U_B statistisch sicher beschrieben werden. Der Zusammenhang zwischen der Masse und der Phasendifferenz konnte ebenso statistisch abgesichert werden. Allerdings lag das Bestimmtheitsmaß auf einem niedrigeren Niveau, so dass mit großen Abweichungen bei Verwendung dieses Modells gerechnet werden muss. Die anderen Regressionsmodelle zwischen den elektrischen Parametern und der Masse bzw. Probenform konnten nicht statistisch validiert werden.

Die Form von natürlich gewachsenen Äpfeln bewegt sich zwischen flachkugelig und walzenförmig [56]. Allgemein können alle Äpfel als kugelig geformt bezeichnet

werden. Es ergeben sich somit bei den Äpfeln nicht so große Formunterschiede wie bei den Messungen mit den Apfelquadern, allerdings größere wie bei den Apfelzylindern, so dass der Formeinfluss hinter dem Masseneinfluss bei Äpfeln zurücksteht. Aus diesem Grund sollte bei der Messung von Äpfeln keine Kalibrierung auf die Querschnittsfläche sondern auf die Apfelmasse erfolgen. Zunächst konnte kein Regressionsmodell gefunden werden, dass die Zusammenhänge zwischen Masse bzw. Querschnittsfläche und elektrischen Parametern statistisch sicher beschreibt. Da die Äpfel mit verschiedenen Positionen durch das induktive Impedanzmesssystem geführt wurden, konnte für jeden Apfel ein Mittelwert aus allen Positionen berechnet werden. Die statistische Auswertung hat gezeigt, dass dieses Regressionsmodell für Kanal U_B zur Masse Gültigkeit besitzt. Es konnte ein statistisch validiertes Regressionsmodell für den Zusammenhang zwischen Phasendifferenz und Masse gefunden werden. Allerdings lag das Bestimmtheitsmaß in diesem Fall zu niedrig, so dass dieses Modell als nicht geeignet erscheint. Für die anderen elektrischen Parameter konnten keine gültigen Regressionsmodelle gefunden werden.

Um massen- bzw. formkorrigierte Messwerte bei den Apfelmessungen zu erhalten, wurde U_B nach dem ermittelten Regressionsmodell (siehe Formel 7.2) zur Berechnung vom elektrischen Qualitätskennwert Q_{el} verwendet. Die Kalibrierung erfolgt hierbei auf nahezu kugelige Äpfel, die über die Mittelwertbildung angenähert erhalten wurden. Trotzdem kann bei stark ungleichmäßig geformten Äpfeln der Einfluss der Form die Messung stärker beeinflussen als die Apfelmasse. Somit kann eine größere Abweichung von dem Regressionsmodell durch nicht kugelige Apfelformen verursacht werden. Dieser Einfluss führt zu einem Herabsetzen der Trennschärfe der entwickelten Methode.

9.1.4 Abschließende Betrachtung der entwickelten Messmethode

Wie in der Formel 7.2 zu erkennen, ist der Qualitätskennwert Q_{el} ausschließlich von dem elektrischen Parameter U_B und der Apfelmasse abhängig. Aufgrund der kugelähnlichen geometrischen Form von Äpfeln und der Berechnung des U_B - Wertes aus den Durchschnittswerten aller Messpositionen, kann der Einfluss der Apfelform vernachlässigt werden. Je weniger die Proben einer Kugel ähneln, desto größer tritt der Formeinfluss gegenüber dem Einfluss der Masse hervor. Somit kann für stark unterschiedlich geformte Proben der Einfluss der geometrischen Form nicht mehr

vernachlässigt werden (z.B. für Kartoffeln). In diesen Fällen muss eine Messmethode entwickelt werden, die die geometrische Form der Probe berücksichtigt.

Die unter 7 dargestellten Ergebnisse sind sehr stark an das verwendete induktive Impedanzmesssystem gekoppelt. Eine Übertragung der Ergebnisse auf andere induktive Impedanzmesssysteme ist nur möglich wenn die Abmessungen der Spule und die Spulenparameter sich sehr stark ähneln. Veränderungen in der Spulengeometrie, wie z. B. der Abstand der drei Spulen zueinander oder der Durchmesser der Spulenöffnung, würden zu unterschiedlichen Sensitivitätsverteilungen führen. Dies kann dazu führen, dass, nicht wie in diesem Fall, auf die Masse kalibriert werden muss, sondern auf die Querschnittsfläche.

Eine vorherige Berechnung der Spulenabstände für optimale Empfindlichkeit ist prinzipiell möglich. Als optimal wird ein Spulenabstand von 0,65-mal Radius der Spule angesehen. Bei dieser Berechnung wurde allerdings davon ausgegangen, dass die Feldstärke des Magnetfeldes über die Querschnittsfläche eines, im Verhältnis zur Spule, kleinen kugeligen metallischen Körpers konstant ist [24]. Diese Bedingungen liegen bei den Messungen der Äpfel in diesem Anwendungsfall nicht vor. Somit ist eine auf die Praxis übertragbare Berechnung der Spulenempfindlichkeit nicht möglich.

9.2 Validierung der entwickelten Methode

9.2.1 Beeinflussung der Messmethode durch die Apfelsorte

Die Messungen der verschiedenen Apfelsorten dienten der Überprüfung, ob sich unterschiedliche Qualitätseigenschaften wie Zuckergehalt, Fruchtfleischfestigkeit, pH-Wert, Stärketest oder Streif-Index auf den elektrischen Qualitätskennwert Q_{el} auswirken und ob das Messverfahren abhängig von der Apfelsorte ist.

Bei konduktiven Impedanzmessungen konnten Einflüsse der Apfelsorte auf die Messergebnisse nachgewiesen werden [37] [52].

Die einzelnen Apfelsorten unterschieden sich sehr stark in den jeweiligen Qualitätseigenschaften. Die ermittelten Streubreiten entsprachen weitestgehend den Literaturwerten [10], die in Tabelle 5-1 dargestellt sind. Bei der Fruchtfleischfestigkeit wurden niedrigere Werte, als in Tabelle 5-1 angegeben, gefunden.

Korrelationen mit Qualitätsparametern

Um Korrelationen zwischen den Zuckergehalten, den Fruchtfleischfestigkeiten, des pH-Wertes, des Stärketests, des Streif-Index und Q_{el} zu finden, wurden die Messergebnisse in einer Streudiagramm-Matrix dargestellt.

Abbildung 9-1 zeigt diese Matrix. Die gelben Umrandungen markieren die Zusammenhänge zwischen den Qualitätsparametern und dem elektrischen Qualitätskennwert Q_{el} . Graphisch sind keinerlei Korrelationen zwischen Qualitätsparametern und Q_{el} zu erkennen. Auch die statistische Auswertung mit linearer und multipler linearer Regression führte zu dem gleichen Ergebnis. Keine der Korrelationskoeffizienten waren von null signifikant verschieden (siehe Tabelle 9-1). Somit konnte mit der statistischen Untersuchung auf linearer und multipler linearer Regression keine signifikanten Korrelationen zwischen Qualitätseigenschaften und Q_{el} nachgewiesen werden. Die entwickelte Messmethode wird nicht durch unterschiedliche Qualitätseigenschaften wie Zuckergehalt, Fruchtfleischfestigkeit, pH-Wert, Stärketest oder Streif-Index beeinflusst.

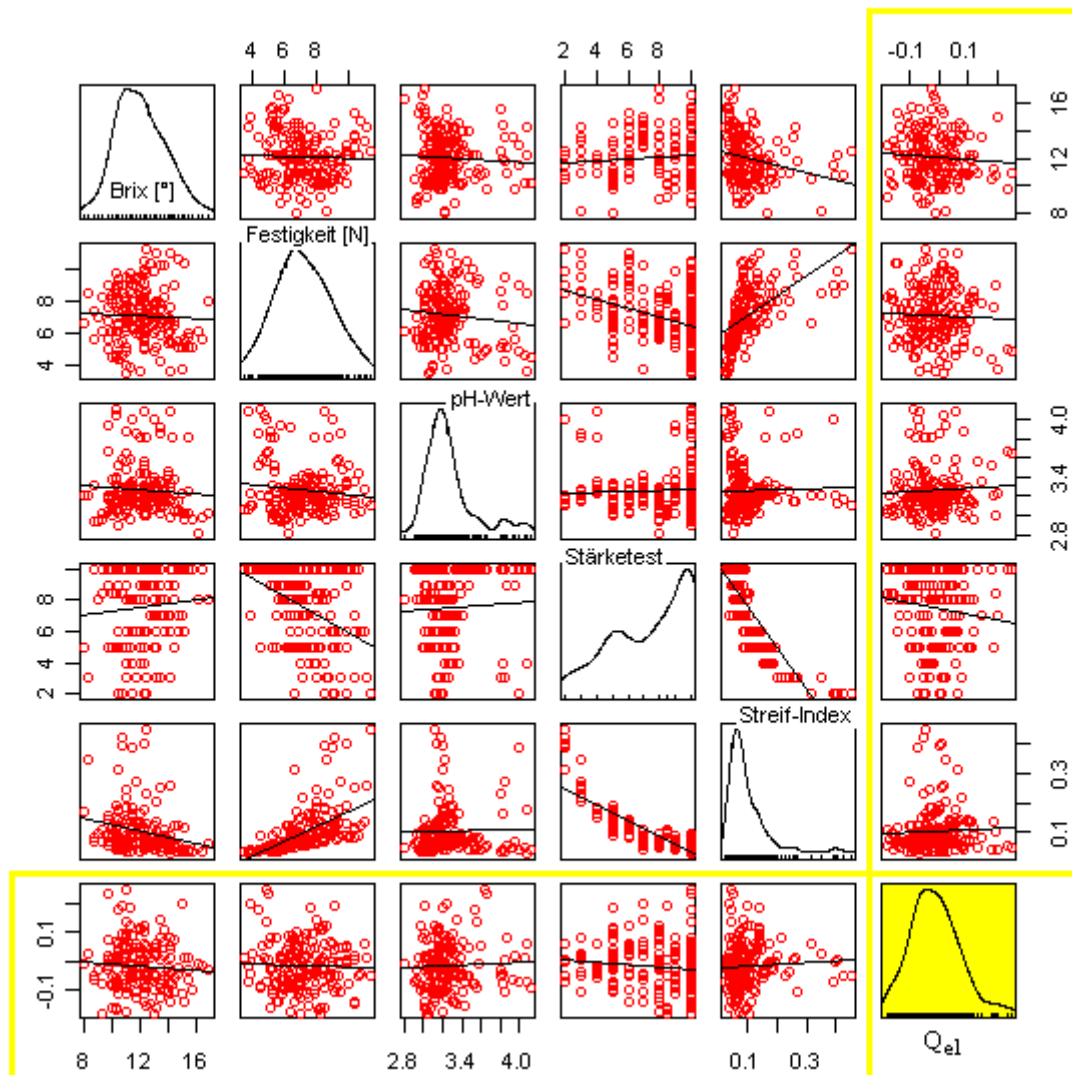


Abbildung 9-1: Streudiagramm-Matrix der Qualitätsparameter und Q_{el} von Äpfeln verschiedener Sorten.

Tabelle 9-1: Signifikanz der Korrelation zwischen Q_{el} und Qualitätsparameter von Äpfeln verschiedener Sorten.

Beziehung	p-Wert
Q_{el} – Streif-Index	0,5344
Q_{el} - Stärketest	0,1272
Q_{el} – pH-Wert	0,4844
Q_{el} - Fruchtfleischfestigkeit	0,4761
Q_{el} - Zuckergehalt	0,3095

Vergleich von Q_{el} der unterschiedlichen Apfelsorten

Die elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} der einzelnen Apfelsorten wurden mit einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der arithmetischen Mittelwerte auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ untereinander verglichen (siehe Tabelle 9-2). Vor der Varianzanalyse wurden die Q_{el} -Werte innerhalb der jeweiligen Sorten auf Normalverteilung überprüft. Alle Apfelsorten zeigten normalverteilte Q_{el} -Werte.

Zwischen den meisten Apfelsorten wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Besonders auffällig ist die Apfelsorte Granny Smith, die sich von 35 der 38 gemessenen Apfelsorten signifikant unterschied. Die Sorte Bohnapfel wies mit 18 Unterschieden zu anderen Apfelsorten die zweitmeisten Abweichungen auf.

Der Vergleich der Q_{el} -Werte zwischen den Apfelsorten zeigte nur bei wenigen Apfelsorten signifikante Unterschiede. Der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} berechnet sich über die Apfelmasse (siehe Formel 7.2). Bei stark unterschiedlichen geometrischen Formen reicht die alleinige Berücksichtigung der Masse nicht mehr aus. Die Messung wird in diesen Fällen auch von der geometrischen Form beeinflusst, was bei der Berechnung von Q_{el} nicht berücksichtigt wird. Die ermittelten Sortenunterschiede könnten somit durch unterschiedliche Apfelformen hervorgerufen werden. Das Messverfahren reagiert empfindlich auf Veränderung der Zellstrukturen bzw. auf unterschiedliche Zellstrukturen, deshalb können die signifikanten Sortenunterschiede auch durch derartige Unterschiede verursacht werden.

9.2.2 Beeinflussung der Messmethode durch Nachreifung der Äpfel

Die in der Literatur [10] [57] beschriebenen Vorgänge bei der Reifung von Äpfeln wie der Stärkeabbau und das Weichwerden des Fruchtfleisches konnten auch bei den Nachreifeuntersuchungen festgestellt werden.

Mit impedanzspektroskopischen Methoden konnten Unterschiede zwischen absolut unreifen und überreifen Früchten gemessen werden [13] [14], wohingegen sehr viel detailliertere Reifegradabstufungen nicht mehr messbar waren [48]. Eine Unterscheidung von unterschiedlichen Reifegraden war auch mit der entwickelten induktiven Impedanzmessmethode nicht möglich. Allerdings wurde bei den Untersuchungen kein Vergleich von absolut unreifen zu überreifen Äpfeln durchgeführt. Die elektrischen Qualitätskennwerte der unterschiedlichen Apfelsorten zu unterschiedlichen Lagerzeiten wurden mit einem paarweisen Vergleich der Mittelwerte miteinander verglichen. Innerhalb einer Apfelsorte wurde zwischen unterschiedlich lange gelagerten Äpfeln für den elektrischen Qualitätskennwert Q_{el} kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$) gefunden (siehe Tabelle 9-3).

Tabelle 9-3: Elektrischer Qualitätskennwert Q_{el} von vier verschiedenen Apfelsorten während der Nachreifung bei Raumtemperatur (n = 4). Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).

Apfelsorte	Tage nach der Ernte	Q_{el}			Apfelsorte	Tage nach der Ernte	Q_{el}		
		μ	s				μ	s	
Goldparmäne	1	-0,06	0,08	a	Linsenhöfer Sämpling	1	-0,17	0,01	c
	4	0,00	0,07	a		18	-0,17	0,03	c
	7	-0,04	0,05	a		25	-0,13	0,03	c
	11	-0,11	0,04	a		28	-0,16	0,07	c
	14	-0,08	0,07	a		33	-0,16	0,05	c
	18	-0,10	0,07	a		36	-0,18	0,03	c
Schöner von Wiltshire	1	-0,09	0,03	b	Schöner von Herrnhut	1	-0,08	0,09	d
	4	-0,04	0,04	b		18	-0,19	0,03	d
	7	-0,11	0,04	b		25	-0,12	0,03	d
	11	-0,05	0,05	b		28	-0,15	0,02	d
	14	-0,11	0,03	b		33	-0,13	0,03	d
	18	-0,12	0,02	b		36	-0,11	0,04	d

Der Zusammenhang zwischen Streif-Index und Q_{el} innerhalb einer Apfelsorte wurde mit linearer Regression überprüft. Es wurde bei keiner der untersuchten Apfelsorten eine signifikante Korrelation gefunden (siehe Tabelle 9-4). Die Bestimmtheitsmaße

lagen jeweils auf einem sehr niedrigen Niveau. Es konnte somit kein Zusammenhang zwischen Streif-Index und elektrischer Qualitätskennwert Q_{el} nachgewiesen werden. Die entwickelte Messmethode eignet sich somit nicht zur Beschreibung des Streif-Index.

Tabelle 9-4: Bestimmtheitsmaß und Signifikanz der Korrelation zwischen Q_{el} und Streif-Index für die vier untersuchten Apfelsorten.

Apfelsorte	R^2	p-Wert
Goldparmäne	0,166	0,054
Schöner von Wiltshire	0,003	0,798
Linsenhöfer Sämling	0,009	0,652
Schöner von Herrnhut	0,149	0,069

Während der Reifung von Obst und Gemüse verändern sich die Zellstrukturen [45]. Diese Veränderungen der Zellstrukturen sollten auch mit der hier angewandten Messmethode nachweisbar sein. Allerdings konnten keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den elektrischen Qualitätskennwerten Q_{el} der vier untersuchten Apfelsorten zu je zwei unterschiedlichen Lagerzeiten gefunden werden ($\alpha = 0,05$). Somit kann auch eine signifikante Veränderung der Q_{el} -Werte der untersuchten Äpfel im Verlauf der Lagerung für den beobachteten Zeitraum ausgeschlossen werden. Dies bedeutet, dass die Zellstrukturen ihr passives elektrisches Verhalten während der Nachreifung nicht so stark verändern, so dass mit dem induktiven Impedanzmesssystem diese Veränderungen wahrgenommen werden können. Eine Beschreibung des Nachreifeverhaltens in Abhängigkeit der Lagerzeit der Äpfel ist weder sortenunabhängig noch innerhalb einer Apfelsorte mit dem hier verwendeten induktiven Impedanzmesssystem möglich.

9.2.3 Messung der Veränderung des Wassergehaltes mit der entwickelten Methode

Um die Erhöhung von Q_{el} bei steigendem Wasserverlust zu beweisen, wurden die gebildeten Gruppen statistisch analysiert (siehe Tabelle 9-5). Die Verteilung der Messwerte für den Wasserverlust und Q_{el} innerhalb der einzelnen Gruppen wurde auf Normalverteilung überprüft. Die Werte für Wasserverlust und Q_{el} erwiesen sich innerhalb jeder gebildeten Gruppe als normalverteilt. Mit diesen Gruppen wurde für

den Wasserverlust und Q_{el} eine einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Die Gruppen unterschieden sich in den Wasserverlusten signifikant ($\alpha = 0,05$) voneinander. Die Mittelwerte von Q_{el} bis zur Gruppe mit einem Wasserverlust von 13,5% Massenanteil unterschieden sich nicht signifikant ($\alpha = 0,05$). Ab einem Wasserverlust von 14,4% Massenanteil konnte ein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$) zu dem Startwert bei 0% Massenanteil Wasserverlust nachgewiesen werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9-5 dargestellt.

Tabelle 9-5: Einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte von Q_{el} und unterschiedlich hohe Wasserverluste. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).

Wasserverlust		n	Q_{el}	
μ [Massenanteil]			μ	
0,0%	a	87	0,045	a
3,7%	b	11	0,093	ab
4,5%	c	30	0,064	ab
5,5%	d	14	0,071	ab
6,4%	e	18	0,054	ab
7,8%	f	20	0,082	ab
9,0%	g	9	0,083	ab
11,5%	h	12	0,106	ab
13,5%	i	10	0,118	abc
14,4%	j	10	0,145	bd
15,7%	k	9	0,169	bd
17,6%	l	14	0,230	cde
20,2%	m	8	0,330	efg
21,7%	n	7	0,389	fg
24,2%	o	5	0,297	df
28,0%	p	7	0,321	efg
39,2%	q	4	0,496	g

Mit der Versuchsreihe zum Einfluss des Wasserverlusts konnte gezeigt werden, dass mit steigendem Wasserverlust eine Erhöhung des elektrischen Qualitätskennwertes Q_{el} einhergeht. Überträgt man dieses Ergebnis auf die Impedanzmessungen, bedeutet dies, dass im untersuchten Bereich ein Abfallen der Impedanz bei Absinken des Wassergehaltes folgt. Anders als in der Literatur beschrieben also kein Anstieg des Betrages der Impedanz [51]. In den durchgeführten Versuchsreihen wurden die Äpfel allerdings nicht so stark getrocknet wie in der Literatur beschrieben [51]. Bei niedrigen Wasserverlusten erfolgt eine Aufkonzentrierung der Ionen, was zu einer Absenkung der Impedanz führt. Bei sehr hohen Wasserverlusten ist die Aufkonzentrierung so stark, dass die Impedanz wieder zunimmt.

Zu Zellzerstörungen kam es in der durchgeführten Versuchsreihe während der Trocknungsvorgänge nicht, da Zerstörungen der Zellen aufgrund der dann auftretenden Enzymaktivität zu Verfärbungen des Fruchtfleisches geführt hätten und somit optisch sichtbar gewesen wären. Dies kann für die Äpfel dieser Messreihe ausgeschlossen werden. Die ermittelte Erhöhung von Q_{el} kann somit mit der Aufkonzentrierung der leitenden Ionen erklärt werden.

Mit der entwickelten induktiven Impedanzmessmethode lassen sich Wasserverluste ab ca. 14,4% Massenanteil vom Ausgangswert unterscheiden. Eine höhere Trennschärfe ist aufgrund der unter Abschnitt 7 beschriebenen Einflussfaktoren mit dem verwendeten induktiven Impedanzmesssystem nicht möglich.

9.2.4 Messung von definierten Zellzerstörungen mit der entwickelten Methode

Es ist bekannt, dass mit konduktiven Messverfahren Beschädigungen von pflanzlichen Geweben, und damit der Zellen, messbar sind [16] [11] [37] [12] [43]. Anhand der vorliegenden Versuchsreihen konnte gezeigt werden, dass auch mit dem entwickelten induktiven Messverfahren der Anteil zerstörter Zellen detektiert werden kann, was sich in einer Erhöhung des elektrischen Qualitätskennwertes Q_{el} äußert.

Einfluss von Gefrier-Tau-Zyklen auf den elektrischen Qualitätskennwert

Tabelle 9-6 zeigt die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte. Die elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} der jeweiligen Apfelsorten waren nach dem Gefrier-Tau-Zyklus signifikant höher als vor dem Einfrieren. Zwischen den Apfelsorten wurde vor dem Einfrieren kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$) festgestellt. Nach dem Gefrier-Tau-Zyklus unterschied sich die Apfelsorte Braeburn von den anderen beiden Apfelsorten.

Prinzipiell konnte mit diesen Messungen gezeigt werden, dass ein Gefrier-Tau-Zyklus zu einer Veränderung der elektrischen Parameter führt, wie dies auch in der Literatur [12] beschrieben ist.

Tabelle 9-6: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} vor und nach einem Gefrier-Tau-Zyklus (n = 14). Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).

Sorte		
Jonagold	vorher	a
Idared	vorher	a
Braeburn	vorher	a
Jonagold	nachher	b
Idared	nachher	b
Braeburn	nachher	c

Gefrier-Tauzyklen zerstören biologische Zellen. Somit ist die Annahme bestätigt, dass bei Äpfeln mit weitestgehend intakten Gewebezellen signifikant niedrigere elektrische Qualitätskennwerte im Vergleich zu Äpfeln mit zerstörten Gewebezellen gemessen werden können. Der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} nimmt bei Proben mit zerstörten Zellen höhere Werte an.

Der Grad der Zellzerstörung der durch Gefrier-Tauzyklen verursacht wird, ist unter anderem abhängig von der Einfriergeschwindigkeit [17]. Ist die Einfriergeschwindigkeit hoch, werden prozentual weniger Zellen zerstört als bei niedrigeren Einfriergeschwindigkeiten. Bei dieser Versuchsreihe wurde zwischen den Apfelsorten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Q_{el} - Werten vor dem Einfriervorgang festgestellt. Nach dem Einfrieren unterschieden sich, die im Durchschnitt größeren, Äpfel der Sorte Braeburn von den Äpfeln der anderen beiden Sorten signifikant. Dieser Effekt ist nicht auf die unterschiedliche Größe der Äpfel zurückzuführen, sondern auf die unterschiedlichen Einfriergeschwindigkeiten und dem damit einhergehenden unterschiedlichen Anteil an zerstörten Zellen. Die Äpfel wurden alle bei gleichen Bedingungen eingefroren. Da die Einfrierzeit bei größeren Äpfeln unter gleichen Bedingungen länger wie bei kleineren Äpfeln ist, führt dies zu höheren Einfriergeschwindigkeiten bei den kleineren Äpfeln und damit zu einem geringeren Zellzerstörungsanteil und niedrigeren Q_{el} - Werten. Bei größeren Äpfeln ist die Einfriergeschwindigkeit bei gleichen Bedingungen niedriger und damit auch der Anteil an zerstörten Zellen höher.

Eine Erhöhung von Q_{el} aufgrund der Zellzerstörung nach einem Gefrierprozess muss bei Anwendung der Messtechnik bei der Fruchtsaftherstellung beachtet werden. Die Äpfel in Keltereien werden häufig bis in den Spätherbst in nicht isolierten Silos gelagert und so erleiden je nach Temperatur ein Teil der Äpfel Frostschäden. Dies

führt dazu, dass mit der Messmethode nicht mehr zwischen angefaulten und angefrorenen Äpfeln unterschieden werden kann.

Einfluss von Enzymbehandlungen an Äpfeln auf den elektrischen Qualitätskennwert

Mit steigendem Verflüssigungsgrad stieg auch der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} an. Die Beziehung zwischen verflüssigten Massenanteil und Q_{el} wurde auf einfache lineare Regression überprüft. Der Korrelationskoeffizient der berechneten Regressionsgeraden war ebenso wie die Koeffizienten des Regressionsmodells signifikant. Die Residuen des Modells erwiesen sich auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ als nicht normalverteilt. Somit konnte das ermittelte Modell nicht validiert werden (siehe Tabelle 9-7).

Tabelle 9-7: Statistische Auswertung des Regressionsmodells Q_{el} in Abhängigkeit des verflüssigten Massenanteils.

Beziehung	Regressionsmodell			Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten		Normalverteilung der Residuen
	x	Achsenabschnitt	R^2		x	Achsenabschnitt	
Massenanteil verflüssigt – Q_{el}	1,2382	-0,0542	0,8985	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p = 2,6 \cdot 10^{-11}$

Aus allen aufgenommenen Messwerten wurden in Abhängigkeit der Anteile verflüssigter Apfelmasse Gruppen gebildet, da zuvor kein validierbares Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen verflüssigten Massenanteil und Q_{el} gefunden wurde. Ziel war die Ermittlung des Verflüssigungsgrades, ab welchem ein Unterschied zu „intakten“ Äpfeln erkannt werden kann.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 9-8 dargestellt. Die Verteilung der Messwerte für den Verflüssigungsgrad und Q_{el} innerhalb der einzelnen Gruppen wurde auf Normalverteilung überprüft. Die Werte für Verflüssigungsgrad und Q_{el} erweisen sich innerhalb jeder gebildeten Gruppe als normalverteilt. Mit diesen Gruppen wurde für den verflüssigten Massenanteil und Q_{el} eine einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Alle Gruppen unterschieden sich in den Mittelwerten des verflüssigten Massenanteils signifikant ($\alpha = 0,05$) voneinander. Der Mittelwert der Gruppe mit einem Verflüssigungsgrad von

0% Massenanteil unterschied sich bei den Q_{el} - Werten signifikant ($\alpha = 0,05$) von allen anderen Gruppen.

Tabelle 9-8: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Verflüssigungsgraden sowie der p-Wert aus der Überprüfung der Normalverteilung. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).

Verflüssigung				n	Q_{el}			
μ [Massenanteil]	s [Massenanteil]	Shapiro- Wilk p-Wert			μ	s	Shapiro-Wilk p-Wert	
0,0%			a	55	-0,06	0,05	0,137	a
10,5%	4,1%	0,089	b	6	0,10	0,14	0,076	b
17,9%	1,9%	0,784	c	4	0,16	0,03	0,293	bc
22,7%	1,4%	0,991	d	6	0,24	0,09	0,232	bc
30,3%	2,4%	0,438	e	9	0,30	0,12	0,060	c
39,1%	2,5%	0,904	f	5	0,37	0,11	0,687	c
49,8%	3,6%	0,243	g	10	0,69	0,19	0,795	d
59,5%	4,4%	0,058	h	4	0,76	0,10	0,687	de
71,6%	2,4%	0,319	i	7	0,70	0,16	0,884	d
81,9%	3,8%	0,208	j	4	0,96	0,18	0,392	e

Somit ist bewiesen, dass sich mit steigendem Verflüssigungsgrad auch der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} erhöht. Die Versuche zeigten, dass prinzipiell eine Abschätzung für den Anteil zerstörter Zellen bzw. für den Anteil von verflüssigter Apfelmasse mit dem entwickelten Messverfahren möglich ist. Im Vergleich zu dem Ausgangswert von Q_{el} unterschieden sich bereits die Gruppenmittelwerte von 0% Massenanteil zu 10,5% Massenanteil Verflüssigungsgrad. Bei den Versuchen zu dem Einfluss des Wasserverlusts auf Q_{el} konnte ein Unterschied erst ab 14,4% Massenanteil Wasserverlust statistisch nachgewiesen werden. Allerdings ist die Trennschärfe zwischen den unterschiedlichen Verflüssigungsgraden nicht sehr hoch, da zwischen den Bereichen von 10,5% Massenanteil bis 22,7% Massenanteil, 17,9% Massenanteil bis 39,1% Massenanteil und 49,1% Massenanteil bis 71,6% Massenanteil verflüssigter Apfelmasse keine statistisch signifikanten Unterschiede nachgewiesen wurden.

9.2.5 Messung von Fäulnisbefall der Äpfel mit der Methode

Definierte Oberflächenfäule

Mit steigendem Faulanteil stieg der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} an. Die Beziehung zwischen Faulanteil und Q_{el} wurde mittels multipler linearer Regression überprüft. Die Ergebnisse aus der Regressionsanalyse sind in Tabelle 9-9 dargestellt. Der Korrelationskoeffizient der berechneten Regressionskurve erwies sich wie die Koeffizienten des Regressionsmodells als signifikant. Die Residuen des Modells waren auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ nicht normalverteilt. Das ermittelte Modell konnte nicht validiert werden.

Tabelle 9-9: Statistische Auswertung des Regressionsmodells Q_{el} in Abhängigkeit des Faulanteils bei Oberflächenfäule.

Beziehung	Regressionsmodell				Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten			Normalverteilung der Residuen
	x^2	x	Achsenabschnitt	R^2		x^2	x	Achsenabschnitt	
Massenanteil faul – Q_{el}	1,0581	1,0463	-0,0566	0,9214	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$

Da kein validierbares Modell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Faulanteil und Q_{el} gefunden werden konnte, wurden die Messwerte der Äpfel in Abhängigkeit der Faulanteile in Gruppen aufgeteilt. Die Gruppenbildung hatte zum Ziel, den Faulgrad zu ermitteln, ab dem ein statistisch abgesicherter Unterschied zu gesunden Äpfeln vorliegt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 9-10 dargestellt. Die Verteilung der Messwerte für den Faulanteil und Q_{el} innerhalb der einzelnen Gruppen wurde auf Normalverteilung überprüft. Alle Messwerte erwiesen sich innerhalb der Gruppen als normalverteilt. Zum Vergleich der gebildeten Gruppen untereinander wurde jeweils für den Faulanteil und Q_{el} eine einfaktorische Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Alle Gruppenmittelwerte unterschieden sich im Faulanteil signifikant ($\alpha = 0,05$) voneinander. Die Äpfel ohne Fäulnisbefall unterschieden sich im elektrischen Qualitätskennwert Q_{el} ab der Gruppe 24,1% Massenanteil Faulanteil signifikant von den restlichen Gruppen.

Untereinander ließen sich nicht alle Gruppenmittelwerte von Q_{el} statistisch sicher unterscheiden.

Tabelle 9-10: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{ei} bei unterschiedlichen Faulgraden bei Oberflächenfäule sowie der p-Wert aus der Überprüfung der Normalverteilung. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).

Faulanteil			n	Q_{ei}		
μ [Massenanteil]	Shapiro- Wilk p-Wert			μ	Shapiro- Wilk p-Wert	
0,0%		a	337	-0,04	0,1054	a
1,5%	0,1513	b	11	-0,03	0,9861	af
3,1%	0,1796	c	12	-0,01	0,1960	af
5,1%	0,0535	d	6	-0,03	0,6140	ab
7,1%	0,8361	e	8	-0,01	0,8792	ab
8,8%	0,1927	f	11	0,01	0,7501	ab
11,0%	0,1504	g	8	0,02	0,0819	ab
12,8%	0,3617	h	12	0,01	0,3756	ab
14,8%	0,3338	i	11	0,05	0,4886	ab
17,6%	0,0794	j	10	0,10	0,0507	abg
20,9%	0,5494	k	10	0,12	0,6020	abg
24,1%	0,1984	l	17	0,14	0,2222	bfgh
26,2%	0,4432	m	13	0,18	0,7201	bfgh
27,5%	0,6006	n	5	0,21	0,4822	bfi
28,5%	0,1292	n	15	0,27	0,8650	gi
29,6%	0,9480	o	7	0,26	0,1743	bi
31,3%	0,1863	p	21	0,37	0,9912	ij
33,0%	0,6158	q	22	0,35	0,0506	hik
34,7%	0,0550	r	23	0,41	0,4185	ijl
36,9%	0,2346	s	28	0,44	0,3191	ijl
38,9%	0,2106	t	21	0,50	0,9359	jkm
41,0%	0,0676	u	18	0,53	0,9952	jm
42,7%	0,0708	v	15	0,57	0,5871	lm
44,2%	0,3747	w	20	0,63	0,2692	mn
45,8%	0,3601	x	21	0,76	0,5743	no
47,9%	0,1948	y	14	0,78	0,0716	npq
50,0%	0,1823	z	21	0,79	0,7038	op
52,1%	0,5455	A	17	0,83	0,7142	oq
53,8%	0,2284	B	15	0,87	0,1311	oq
55,7%	0,2815	C	10	0,81	0,4133	npq
57,5%	0,0529	D	12	0,86	0,6058	oq
59,9%	0,1341	E	13	0,99	0,6678	gr
62,0%	0,0969	F	15	0,96	0,3643	pqs
64,0%	0,3507	G	15	1,16	0,6994	rt
66,6%	0,5456	H	11	1,25	0,1242	et
68,9%	0,0912	I	17	1,13	0,9762	rst
71,0%	0,1549	J	10	1,23	0,7204	ct
74,0%	0,2485	K	11	1,33	0,8561	et
76,3%	0,4598	L	9	1,31	0,2787	et
80,0%	0,1560	M	17	1,44	0,1222	et
83,8%	0,1782	N	13	1,70	0,7108	du
88,7%	0,1303	O	14	1,74	0,4205	du
94,9%	0,1598	P	11	1,82	0,8143	u
100,0%		Q	4	1,47	0,1668	cde

Kernfäule

Auch bei den Kernfäulenversuchen stieg der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} mit steigendem Faulanteil an. Die Beziehung zwischen Kernfäulegrad und Q_{el} wurde auf einfache lineare Regression überprüft. Einen Überblick über die Ergebnisse der Regressionsanalyse bietet Tabelle 9-11. Der Korrelationskoeffizient der berechneten Regressionsgeraden war signifikant. Der Achsenabschnitt des Modells erwies sich als nicht signifikant. Damit konnte kein Regressionsmodell gefunden werden, das den Zusammenhang zwischen Kernfäulegrad und Q_{el} statistisch sicher beschreibt.

Tabelle 9-11: Statistische Auswertung des Regressionsmodells Q_{el} , in Abhängigkeit des Kernfäuleanteils.

Beziehung	Regressionsmodell			Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten		Normalverteilung der Residuen
	x	Achsenabschnitt	R ²		x	Achsenabschnitt	
Massenanteil faul – Q_{el}	1,3205	-0,0357	0,9159	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 1$	

Da, wie bei den Versuchen zur Oberflächenfäule, kein statistisch abgesichertes Regressionsmodell zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Kernfäulegrad und Q_{el} gefunden werden konnte, wurden die Messwerte dieser Versuchsreihe in Abhängigkeit der Kernfäuleanteile in Gruppen aufgeteilt. Mit der Gruppenbildung sollte ermittelt werden, ab welchem Kernfäulegrad ein statistisch abgesicherter Unterschied zu gesunden Äpfeln vorliegt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 9-12 dargestellt. Alle Messwerte einer Gruppe wurden für die Kernfäule- Werte und Q_{el} - Werte auf Normalverteilung überprüft. Alle Messwerte waren innerhalb der jeweiligen Gruppen normalverteilt. Zum Vergleich der gebildeten Gruppen untereinander wurde jeweils für den Kernfäuleanteil und Q_{el} eine einfaktorische Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Alle Gruppenmittelwerte unterschieden sich im Faulanteil signifikant ($\alpha = 0,05$) voneinander. Die Äpfel mit 0% Massenanteil Kernfäuleanteil unterschieden sich im Q_{el} - Mittelwert ab der Gruppe von 26,7% Massenanteil Kernfäulegrad signifikant von den restlichen Gruppen.

Untereinander ließen sich nicht alle Gruppenmittelwerte von Q_{el} statistisch sicher unterscheiden. So konnte ab der Gruppe von 71,6% Massenanteil Kernfäulegrad

kein Unterschied mehr zu den Gruppen mit höheren Kernfäuleanteilen nachgewiesen werden.

Tabelle 9-12: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Kernfäulegraden sowie der p-Wert aus der Überprüfung der Normalverteilung. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).

Fäule			n	Q_{el}		
μ [Massenanteil]	Shapiro- Wilk p-Wert			μ	Shapiro- Wilk p-Wert	
0,0%		a	32	-0,05	0,324	a
6,0%	0,349	b	5	0,14	0,854	ab
26,7%	0,249	c	6	0,29	0,295	bc
49,1%	0,615	d	4	0,56	0,874	c
71,6%	0,933	e	4	1,02	0,634	d
84,4%	0,971	f	5	1,06	0,124	d
94,3%	0,595	g	4	1,18	0,564	d

Nicht definierte Fäulnis

Um die Erhöhung der Q_{el} - Werte mit steigendem Faulanteil zu beweisen wurde eine Regressionsanalyse durchgeführt (siehe Tabelle 9-13). Die Beziehung zwischen Faulanteil und Q_{el} wurde auf lineare Regression überprüft. Der Korrelationskoeffizient der berechneten Regressionskurve erwies sich wie die Koeffizienten des Regressionsmodells als signifikant. Die Residuen des Modells waren auf einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ nicht normalverteilt. Das ermittelte Modell konnte somit nicht validiert werden.

Tabelle 9-13: Statistische Auswertung des Regressionsmodells Q_{el} in Abhängigkeit des Faulanteils bei nicht definierter Fäule.

Beziehung	Regressionsmodell			Signifikanz der Korrelation	Signifikanz der Koeffizienten		Normalverteilung der Residuen
	x	Achsenabschnitt	R^2		x	Achsenabschnitt	
Massenanteil faul – Q_{el}	0,7847	-0,1415	0,7191	$p < 2,2 \cdot 10^{-16}$	$\alpha = 0,001$	$\alpha = 0,001$	0,0007982

Für die weitere statistische Auswertung wurden die Messwerte der Äpfel in Abhängigkeit der Faulanteile in Gruppen aufgeteilt. Die Gruppenbildung sollte es ermöglichen, den Faulgrad zu ermitteln, ab dem ein statistisch abgesicherter Unterschied zu Äpfeln ohne erkennbaren Fäulnisbefall vorlag.

Die Ergebnisse der Gruppierungen sind in Tabelle 9-14 dargestellt. Innerhalb aller Gruppen erwiesen sich die Messwerte für den Faulanteil und Q_{el} als normalverteilt. Zum Vergleich der gebildeten Gruppen untereinander wurde jeweils für den Faulanteil und Q_{el} eine einfaktorielle Varianzanalyse mit paarweisem Vergleich der Mittelwerte durchgeführt. Die meisten Gruppenmittelwerte unterschieden sich im Faulanteil signifikant ($\alpha = 0,05$) voneinander. Lediglich zwischen den Gruppen mit 0% Massenanteil und 1% Massenanteil Faulanteil, zwischen den Gruppen von 16,6% Massenanteil und 18,2% Massenanteil Faulanteil, sowie zwischen den Gruppen von 87,0% Massenanteil und 88,9% Massenanteil Faulanteil konnte kein statistisch signifikanter Unterschied gefunden werden. Die Äpfel ohne erkennbaren Fäulnisbefall unterschieden sich ab der Gruppe von 42,2% Massenanteil Faulanteil signifikant von den restlichen Gruppen.

Tabelle 9-14: Vergleich der elektrischen Qualitätskennwerte Q_{el} bei unterschiedlichen Faulgraden bei nicht definierter Fäule sowie der p-Wert aus der Überprüfung der Normalverteilung. Gleicher Buchstabe bedeutet kein signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,05$).

Faulanteil			n	Q_{el}		
μ [Massenanteil]	Shapiro-Wilk p-Wert			μ	Shapiro-Wilk p-Wert	
0,0%		a	20	-0,07	0,1215	ab
1,0%	0,0528	a	11	-0,05	0,7951	abc
3,6%	0,1759	b	11	-0,07	0,7848	ab
6,0%	0,3803	c	12	-0,13	0,5962	ab
8,4%	0,3030	d	9	-0,10	0,8571	ab
11,3%	0,2299	e	14	-0,05	0,3868	ab
13,8%	0,3643	f	11	-0,07	0,2960	ab
16,6%	0,3920	g	5	-0,05	0,9620	abd
18,2%	0,1759	g	5	-0,01	0,0657	be
22,9%	0,3610	h	20	0,03	0,3650	abf
27,7%	0,0769	i	21	0,09	0,2944	ae
32,4%	0,6234	j	15	0,08	0,7987	be
37,9%	0,2159	k	12	0,15	0,2135	aeg
42,4%	0,2182	l	15	0,17	0,1906	cdefg
47,9%	0,4406	m	15	0,20	0,1512	defh
53,0%	0,1148	n	15	0,26	0,8565	ei
57,3%	0,4411	o	12	0,29	0,9456	eij
62,4%	0,4697	p	13	0,25	0,5922	dei
67,4%	0,9221	q	5	0,41	0,3206	ghik
73,1%	0,0507	r	18	0,48	0,3179	jk
77,3%	0,1612	s	14	0,32	0,3435	ghij
81,2%	0,7012	t	11	0,47	0,0897	ik
84,1%	0,2876	u	6	0,48	0,6908	hikl
87,0%	0,4623	v	6	0,47	0,1286	hikl
88,9%	0,3195	v	6	0,62	0,5472	kl
92,6%	0,3300	w	14	0,65	0,5967	kl
100,0%		x	34	0,71	0,4170	l

10 Folgerung

Bei keiner der Versuchsreihen mit Fäulniserregern konnte ein statistisch abgesichertes Regressionsmodell gefunden werden. Dennoch zeigen die Versuche, dass sich mit steigendem Faulanteil, unabhängig von der Versuchsreihe, der elektrische Qualitätskennwert Q_{el} erhöht. Der Effekt der Steigerung der Q_{el} -Werte bei erhöhtem Faulanteil ist auf die erhöhte Anzahl zerstörter Zellen zurückzuführen.

Im Vergleich der drei durchgeführten Fäuleversuchsreihen wurden Äpfel mit Oberflächenfäule ab 24,1% Massenanteil, mit Kernfäule ab einem Faulgrad von 26,7% Massenanteil und mit nichtidentifizierter Fäule ab 42,4% Massenanteil Faulanteil statistisch sicher erkannt.

Die Messergebnisse für Q_{el} erreichten bei der Oberflächenfäule bei vergleichbarem Faulgrad die höchsten Messwerte, bei den Kernfäulemessungen wurden ähnlich hohe Werte aufgenommen. Deutlich niedrigere Q_{el} -Werte wurden für die Versuche mit der nicht identifizierten Fäule gemessen. Die Ursache hierfür liegt in der Bestimmung des Faulanteils. Die Höhe von Q_{el} wird unter anderem durch den Anteil zerstörter Zellen beeinflusst. Im Optimalfall sollten alle angefaulten Zellen zerstört sein und mit dem Löffel bzw. dem Messer zur Ermittlung des Faulanteils entfernt werden können. Allerdings konnten die Faulstellen nur optisch über die Verfärbung des Fruchtfleisches erkannt werden. Bei den Versuchen zur Oberflächenfäule und zur Kernfäule waren die Faulstellen scharf von dem restlichen gesunden Gewebe abgegrenzt. Bei den Versuchen mit der nicht identifizierten Fäule war der Faulanteil nicht so einfach zu erkennen. Bei diesen Versuchen hatte in den meisten Fällen das braun verfärbte Gewebe, das als faul definiert wurde, eine festere Textur und es waren keine scharfen Abgrenzungen zu gesundem Fruchtfleisch erkennbar. Teilweise war das Fruchtfleisch braun marmoriert, so dass davon ausgegangen werden muss, dass bei der Bestimmung des Faulgrades bei der Versuchsreihe mit nicht identifizierter Fäule auch intakte Zellen mitentfernt wurden. Waren bei diesem braunen Gewebe eine gewisse Anzahl der Zellwände nicht zerstört, so nahm Q_{el} nicht so hohe Werte wie bei vergleichbaren Faulgraden bei den definierten Fäulnisversuchen an.

Es muss davon ausgegangen werden, dass bei den Versuchen mit der nichtidentifizierten Fäule der bestimmte Faulgrad dem Zellzerstörungsgrad nicht so gut entsprach wie in den Versuchsreihen mit dem definierten Fäulniserreger. Die Vielzahl an verschiedenen Fäulniserregern bei dieser Versuchsreihe und deren

erzeugter Faulstellen mit stark unterschiedlicher Textur führte daher zu höheren Streuungen bei der Faulgradbestimmung der Äpfel. Allerdings ist kein genaueres Alternativverfahren zur gravimetrischen Bestimmung des Faulanteils bei Äpfeln bekannt. Eine andere Methode zur Ermittlung des Faulanteils ist die optische Bestimmung des faulen Oberflächenanteils eines Apfels [73] [74] oder die Berechnung des Volumenanteils faulen Gewebes über den faulen Oberflächenanteil und einer Berechnungsformel für Kegelformen [72]. Aufgrund der sehr unterschiedlich gefaulten Äpfel bei den Versuchen mit der nicht identifizierten Fäulnis sind diese beiden Verfahren als ungenauer als das hier angewandte gravimetrische Verfahren zu betrachten.

Die Streuung der Messwerte für Q_{el} nahm mit dem Faulanteil zu. Erklären lässt sich dieser Effekt zum einen mit dem Fäulnisverlauf. Nachdem die Schimmelpilze die Zellwände zerstört haben, finden viele verschiedene weitere Abbauprozesse statt, welche die Beweglichkeit der Ladungsträger auf unterschiedliche Weise beeinträchtigen können. Zum anderen zeigen die Messungen zum Wasserverlust in Abschnitt 8.3, dass sich Austrocknen von Äpfeln auf Q_{el} auswirkt. Da mit fortschreitender Fäule, je nach Fäulniserreger, häufig auch eine Austrocknung der Faulstellen einhergeht, können die Ladungsträger bei gleichen Faulheitsgraden unterschiedlich beweglich sein, was die größere Streuung der Q_{el} -Werte verursacht. Äpfel mit mehr als 30% Massenanteil Faulanteil sollten aufgrund ihres Patulingehaltes nicht mehr zur Fruchtsaftherstellung verwendet werden [74]. Mit dem induktiven Impedanzmesssystem und den entwickelten Auswerteverfahren konnten Äpfel mit Oberflächenfäule ab 24,1% Massenanteil, mit Kernfäule ab einen Faulgrad von 26,7% Massenanteil und mit nichtdefinierter Fäule ab 42,4% Massenanteil Faulanteil statistisch sicher erkannt werden. Da sich das Patulin vor allem im Faulanteil des Apfels befindet [2] [3], und der Paulingehalt mit zunehmender Fäulnis der Äpfel ansteigt [73], kann bei Anwendung der entwickelten Messmethode bei der Apfelsaftherstellung der Patulingehalt des Saftes gesenkt werden.

11 Literaturverzeichnis

1. LANDESANSTALT FÜR ENTWICKLUNG DER LANDWIRTSCHAFT UND DER LÄNDLICHEN RÄUME, B. L. F. L. **Agrarmärkte 2009**. Stuttgart: Copy Shop West, 2010.
2. BANDO, S. et al. Patulin distribution in decayed apple and its reduction. **International Biodeterioration and Biodegradation**, 2009. 379-382.
3. RYCHLIK, M.; SCHIEBERLE, P. Model studies on the diffusion behavior of the mycotoxin patulin in apples, tomatoes, and wheat bread. **European Food Research and Technology**, 2001. 274–278.
4. DAEPP, H. U. Anforderungen an das Rohmaterial. In: SCHOBINGER, U. **Frucht- und Gemüsesäfte**. Stuttgart: Ulmer, 2001. p. 91-103.
5. VERORDNUNG (EG) Nr. 1425/2003 der Kommission vom 11. August 2003 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 466/2001 in Bezug auf Patulin, ABl. EG Nr. L 203. [S.I.]: [s.n.], 2003.
6. BIRUS, T. **Moderne Apfelsafttechnologie - Das Fruchtsaft-Fachbuch für den Praktiker**. Schönborn: Fachverlag FLÜSSIGES OBST, 2001.
7. BUMP, V. L. Apple Pressing and Juice Extraction. In: DOWNING, D. L. **Processed Apple Products**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989. p. 53-82.
8. WEISS, J. Vorbereiten der Früchte. In: SCHOBINGER, U. **Frucht- und Gemüsesäfte**. Stuttgart: Ulmer, 2001. p. 104-122.
9. GEYER, M.; HEROLD, B. Moderne Apfelsaft-Aufbereitungsanlage am Bodensee. **Obst-, Gemüse- und Kartoffelverarbeitung**, 2001. 50-51.
10. STOLL, K. **Der Apfel**. Zürich: Enrico Negri, 1997. 303 p.
11. VOZÁRY, E.; LÁSZLÓ, P.; ZSIVANOVITS, G. Impedance Parameter Characterizing Apple Bruise. **Annals of the New York Academy of Sciences**, 1999. 421-429.
12. ZHANG, M. I. N.; WILSON, J. H. M. Electrical Impedance Analysis in Plant Tissues. **Journal of Experimental Botany**, 1993. 1369-1375.
13. ZULHUSIN et al. **Feasibility study of a non-destructive fruit maturity testing system on banana utilising capacitive properties**. International Conference on Electronic Design 2008. Penang: IEEE. 2008. p. 1-4.
14. BENAVENTE, J.; RAMOS-BARRADO, J. R.; HEREDIA, A. A study of the electrical behaviour of isolated tomato cuticular membranes and cutin by impedance spectroscopy measurements. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 1998. 333–338.
15. GRIMNES, S.; MARTINSEN, O. G. **Bioimpedance and Bioelectricity Basics**. San Diego Calif. ;London: Academic Press, 2000.
16. ANGERSBACH, A.; HEINZ, V.; KNORR, D. Electrophysiological Model of Intact and Processed Plant Tissues: Cell Disintegration Criteria. **Biotechnology Progress**, 1999. 753-762.
17. ANGERSBACH, A.; HEINZ, V.; KNORR, D. Evaluation of process-induced dimensional changes in the membrane structure of biological cells using impedance measurement. **Biotechnology Progress**, 2002. 597-603.
18. PLIQUETT, U. Bioimpedance: A Review for Food Processing. **Food Engineering Reviews**, 2010. 74-94.
19. MACDONALD, R. J.; JOHNSON, W. B. Fundamentals of Impedance

- Spectroscopy. In: BARSOUKOV, E.; MACDONALD, R. J. **Impedance spectroscopy: theory, experiment, and applications**. 2. ed. Hoboken N.J.: Wiley-Interscience, 2005. p. 1-27.
20. BUTLER, T. Metal detection testing provides protection. **Sensor Review**, 1991. 10–14.
 21. SCHAEDEL, H. M.; JANTZEN, U.; OBERDÖRFFER, E. Steigerung der Empfindlichkeit in der Metallfeinsuchtechnik durch Fuzzy-Signalauswertung. In: FORTSCHRITTSBERICHTE VDI **Neuronale Fuzzy-Logik, Reihe 10, Nr. 648**. Düsseldorf: VDI Verlag, 1999. p. 87-97.
 22. GRAY, J. Development of an advanced industrial metal detector instrumentation. **Computing and Control Engineering Journal**, 1994. 117-120.
 23. GRAVES, M. Approaches to foreign body detection in foods. **Trends in Food Science and Technology**, 1998. 21-27.
 24. BRIGHTON, M.; ENGLISH, M. J. Calculation of optimum spacing for a three coil axially symmetric metal detector. **Electronics Letters**, 1993. 838.
 25. NELSON, S. O. Electrical properties of agricultural products — A critical review. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, 1973. 384-400.
 26. SCHWAN, H. P. Electrical Properties of tissues and cell suspensions. **Advances in Biological and Medical Physics**, 1957. 147-209.
 27. SCHWAN, H. P. **Electrical properties of tissues and cell suspensions: mechanisms and models**. Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE. Baltimore, MD, USA: IEEE. 1994. p. A70 - A71 vol.1.
 28. KUANG, W.; NELSON, S. O. Low-frequency dielectric properties of biological tissues: a review with some new insights. **Transactions of the ASAE**, 1998. 173-184.
 29. DAMEZ, J. et al. Electrical impedance probing of the muscle food anisotropy for meat ageing control. **Food Control**, 2008. 931-939.
 30. SIANO, S. A. Biomass measurement by inductive permittivity. **Biotechnology and Bioengineering**, 1997. 289–304.
 31. ASAMI, K. Characterization of biological cells by dielectric spectroscopy. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 2002. 268-277.
 32. ASAMI, K.; GHEORGHIU, E.; YONEZAWA, T. Real-Time Monitoring of Yeast Cell Division by Dielectric Spectroscopy. **Biophysical Journal**, 1999. 3345–3348.
 33. HOFMANN, M. **Integrierte Impedanzspektroskopie aerober Zellkulturen in biotechnologischen Hochdurchsatzscreenings**. Aachen: Dissertation RWTH Aachen, 2009.
 34. YAMAZAKI, S.; NAKANE, H.; TANAKA, A. Basic analysis of a metal detector. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, 2002. 810-814.
 35. WILKE, W.; GRUPA, M. A.; GAZIL, K. **Impedanzspektroskopie für die In-Line-Prozessanalytik in der Qualitätsüberwachung von Lebensmitteln**. HAW FH Würzburg Schweinfurt, Fak. Maschinenbau, Labor für verfahrenstechnisches Messen. Schweinfurt, p. 61. 2010.

36. VARLAN, A. R.; SANSEN, W. Nondestructive Electrical Impedance Analysis in Fruit: Normal Ripening and Injuries Characterization. **Electromagnetic Biology and Medicine**, 1996. 213-227.
37. PUCHALSKI, C.; BRUSEWITZ, G. H. Apple bruise resistance determination using an electrical universal bridge. **International Agrophysics**, 2000. 411–416.
38. VOZÁRY, E.; MÉSZÁROS, P. **Effect of Mechanical Stress on Apple Impedance Parameter**. ICEBI 2007, IFMBE Proceedings 17. Berlin, Heidelberg: Springer. 2007. p. 118-121.
39. KNORR, D.; ANGERSBACH, A. Impact of high-intensity electric field pulses on plant membrane permeabilization. **Trends in Food Science & Technology**, 1998. 185-191.
40. LBOVKA, N. I.; BAZHAL, M. I.; VOROBIEV, E. Estimation of characteristic damage time of food materials in pulsed-electric fields. **Journal of Food Engineering**, 2002. 337–346.
41. CHALERMCHAT, Y.; MALANGONE, L.; DEJMEK, P. Electropermeabilization of apple tissue: Effect of cell size, cell size distribution and cell orientation. **Biosystems Engineering**, 2010. 357–366.
42. GRIMI, N. et al. Acoustic impulse response in apple tissues treated by pulsed electric field. **Biosystems Engineering**, 2010. 266-272.
43. WU, L.; OGAWA, Y.; TAGAWA, A. Electrical impedance spectroscopy analysis of eggplant pulp and effects of drying and freezing–thawing treatments on its impedance characteristics. **Journal of Food Engineering**, 2008. 274-280.
44. CHASSAGNE-BERGES, S. et al. Changes in texture, cellular structure and cell wall composition in apple tissue as a result of freezing. **Food Research International**, 2009. 788–797.
45. BAUCHOT, A. D.; HARKER, F. R.; ARNOLD, W. M. The use of electrical impedance spectroscopy to assess the physiological condition of kiwifruit. **Postharvest Biology and Technology**, 2000. 9–18.
46. HARKER, F. Physical and mechanical changes in strawberry fruit after high carbon dioxide treatments. **Postharvest Biology and Technology**, 2000. 139-146.
47. VOZÁRY, E. et al. Electrical impedance of apple tissues during ripening. **Progress in Biophysics and Molecular Biology**, 1996. 213.
48. NELSON, S. O.; GUO, W.; TRABELSI, S. **Study of Fruit Permittivity Measurements for Quality Detection**. International Instrumentation and Measurement Technology Conference 2008. Victoria, Kanada: . 2008. p. 1009-1011.
49. SHEWFELT, R. L. Chapter 17 - Measuring Quality and Maturity. In: FLORKOWSKI, W., et al. **Postharvest Handling A Systems Approach**. 2. ed. Amsterdam; Boston; London: Elsevier/Academic Press, 2009. p. 461-481.
50. BREZMES, J. et al. Evaluation of an electronic nose to assess fruit ripeness. **IEEE Sensors Journal**, 2005. 97-108.
51. MÉSZÁROS, P.; VOZÁRY, E.; FUNK, D. B. Connection between Moisture Content and Electrical Parameters of Apple Slices during Drying. **Progress in Agricultural Engineering Sciences**, 2005. 95-121.
52. FANG, Q.; LUI, X.; COSIC, I. **Bioimpedance study on four apple varieties**. ICEBI 2007, IFMBE Proceedings 17. Berlin, Heidelberg: Springer. 2007. p. 114-117.

53. DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 900: 2005)**. Berlin: Beuth-Verlag, 2005. 18 p.
54. ABBOTT, J. A. Quality measurement of fruits and vegetables. **Postharvest Biology and Technology**, 1999. 207–225.
55. SHEWFELT, R. L. What is quality? **Postharvest Biology and Technology**, 1999. 197–200.
56. GÖTZ, G.; SILBEREISEN, R. **Obstsorten-Atlas: Kernobst, Steinobst, Beerenobst, Schalenobst**. Stuttgart: Ulmer, 1989.
57. HÖHN, E. et al. Streifindex und optimaler Pflückzeitpunkt von Tafelkernobst. **SCHWEIZ. Z. OBST-WEINBAU**, 1999. 443-446.
58. PEIRS, A.; SCHENK, A.; NICOLAI, B. M. Effect of natural variability among apples on the accuracy of VIS-NIR calibration models for optimal harvest date predictions. **Postharvest Biology and Technology**, 2005. 1–13.
59. AABY, K.; HAFFNER, K.; SKREDE, G. Aroma Quality of Gravenstein Apples Influenced By Regular and Controlled Atmosphere Storage. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, 2002. 254-259.
60. BOBELYN, E. et al. Postharvest quality of apple predicted by NIR-spectroscopy: Study of the effect of biological variability on spectra and model performance. **Postharvest Biology and Technology**, 2010. 133-143.
61. BREZMES, J. et al. Correlation between electronic nose signals and fruit quality indicators on shelf-life measurements with pinklady apples. **Sensors and Actuators B: Chemical**, 2001. 41–50.
62. PEIRS, A. et al. Uncertainty analysis and modelling of the starch index during apple fruit maturation. **Postharvest Biology and Technology**, 2002. 199–207.
63. KÖHLER, H. Durchführung Reifetest Kernobst, Material, Reifewerte, Farbschablone Stärkeabbau. www.obstbau.rlp.de, abgerufen am 11 Juni 2011.
64. SAEVELS, S. et al. Electronic nose as a non-destructive tool to evaluate the optimal harvest date of apples. **Postharvest Biology and Technology**, 2003. 3–14.
65. PEIRS, A.; SCHENK, A.; NICOLAI, B. M. Prediction of the optimal picking date of different apple cultivars by means of VIS/NIR-spectroscopy. **Postharvest Biology and Technology**, 2001. 189–199.
66. ROTH, E. et al. Postharvest quality of integrated and organically produced apple fruit. **Postharvest Biology and Technology**, 2007. 11-19.
67. PATHANGE, L. P. et al. Non-destructive evaluation of apple maturity using an electronic nose system. **Journal of Food Engineering**, 2006. 1018–1023.
68. ZOU, X.; ZHAO, J. **Apple Quality Assessment by Fusion Three Sensors**. IEEE Sensors, 2005. Irvine, CA, USA: IEEE. 2005. p. 389-392.
69. ZUDE, M. et al. Non-destructive tests on the prediction of apple fruit flesh firmness and soluble solids content on tree and in shelf life. **Journal of Food Engineering**, 2006. 254–260.
70. WEIDENBÖRNER, M. **Encyclopedia of Food Mycotoxins**. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2001.
71. WELKE, J. E. et al. Fungi and Patulin in Apples and the Role of processing on Patulin Levels in Juices: An Study on naturally contaminated Apples. **Journal of Food Safety**, 2010. 276-287.

72. BAERT, K. et al. Influence of storage conditions of apples on growth and patulin production by *Penicillium expansum*. **International Journal of Food Microbiology**, 2007. 170–181.
73. KADAKAL, C.; NAS, S.; EKNC, R. Ergosterol as a new quality parameter together with patulin in raw apple juice produced from decayed apples. **Food Chemistry**, 2005. 95–100.
74. KADAKAL, Ç.; NAS, S. Effect of apple decay proportion on the patulin, fumaric acid, HMF and other apple juice properties. **Journal of Food Safety**, 2002. 17–25.
75. VAN ZEEBROECK, M. et al. Impact damage of apples during transport and handling. **Postharvest Biology and Technology**, 2007. 157-167.
76. HART, F. X. et al. Measurement of the activation enthalpies of ionic conduction in apples. **Journal of Materials Science**, 1998. 3919–3925.
77. BAERT, K. et al. Modeling the effect of temperature on the growth rate and lag phase of *Penicillium expansum* in apples. **International Journal of Food Microbiology**, 2007. 139-150.
78. FOX, J. Getting Started With the R Commander: A Basic-Statistics Graphical User Interface to R. **Journal of Statistical Software**, 2005. 1-42.
79. SACHS, L. **Angewandte Statistik: Methodensammlung mit R**. Berlin; Heidelberg; New York: Springer, 2006.
80. GROß, J. **Grundlegende Statistik mit R**. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2010.
81. PIEPHO, H.-P. An Algorithm for a Letter-Based Representation of All-Pairwise Comparisons. **Journal of Computational and Graphical Statistics**, 2004. 456-466.