

Der Apfel im Wechselstromkreis

Andreas Seibt, Karsten Jessen

Ludwig-Maximilians-Universität-München, Fakultät für Physik, Praktika
Edmund-Rumpler-Straße 9, 80939 München
andreas.seibt@physik.uni-muenchen.de, karsten.jessen@physik.uni-muenchen.de

Kurzfassung

Um im Physikpraktikum für Studierende der Biologie den Bezug zu biologischen Systemen herzustellen, kann man Äpfel im Wechselstromkreis untersuchen. Die Biomasse eines Apfels besteht im wesentlichen aus Zellmembranen mit einem extra- und intrazellulären Raum, die physikalisch mit RC-Gliedern modelliert werden können [1]. Die Zellen entsprechen Kugelkondensatoren, die eine Phasenverschiebung von Strom und Spannung bewirken.

Der vorgestellte Versuchsaufbau besteht aus einem Apfel und einem Messwiderstand in Serie, wobei eine sinusförmige Wechselspannung angelegt wird. Am Apfel und am Messwiderstand wird die Spannung abgegriffen und am Oszilloskop dargestellt. Variiert man die Frequenz und bestimmt die Impedanz, so erhält man Informationen darüber, ob sich z.B. Faulstellen im Apfel befinden. Auch die Phasenverschiebung gibt Auskunft über die Integrität der Zellen innerhalb des Apfels.

Ferner wird über einen ersten Einsatz dieses Versuchsaufbaus im Physikpraktikum für Biologen berichtet.

1. Motivation

Um das Physikpraktikum für Biologen an der LMU München im Sinne einer früheren Arbeit [2] adressatenspezifischer zu gestalten, wurde ein Praktikumsversuch überarbeitet und in einen biologischen Kontext eingebettet. Das Versuchsthema „Messung von Wechselströmen mit dem Oszilloskop“ lässt sich in der Biologie anwendbar machen, wenn man als Messobjekt die Biomasse eines Apfels verwendet und dessen Zellen als RC-Glieder betrachtet.

Konkret sollen die Studierenden der Biologie des 4. Semesters im Versuch einen Apfel analysieren, dessen Frische beurteilen und dabei Einblick in die physikalischen Zusammenhänge erhalten. Dieser Versuch ist jedoch nicht nur für Biologen interessant, denn jeder, der eine Körperfettwaage benutzt, legt ein Wechselstromfeld an seinen Körper an und bestimmt auf diese Weise den Anteil der fettfreien Masse. Hier gelten die gleichen physikalischen Prinzipien wie im Versuch, sodass das Experiment auch für Schüler attraktiv sein kann. Des Weiteren kann der Versuch dazu dienen, den Studierenden einen Einblick in aktuelle Forschungsmethoden der Biologie zu geben. Die Bioimpedanzspektroskopie dient zur Qualitätsüberwachung von Lebensmitteln oder wird auch zur Analyse von elektrochemischen Systemen verwendet.

2. Grundlagen

Das Fruchtfleisch eines Apfels besteht aus runden

Zellenmembranen, die physikalisch durch ohmsche Widerstände und Kondensatoren bzw. aus vielen RC-Gliedern modelliert werden.

Legt man nun ein Wechselstromfeld an den Apfel an, tritt aufgrund der kapazitiven Eigenschaften der Doppellipidschicht eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung in Abhängigkeit der Frequenz auf. Nach der Messung von Strom und Spannung mit Hilfe eines Oszilloskops kann so auf die Impedanz Z geschlossen werden. Zerlegt man diese in ihren Real- und Imaginärteil, kann der Frequenzgang im Nyquist-Diagramm dargestellt werden. Ein Nyquist-Diagramm ergibt sich, wenn man für verschiedene Frequenzen f den Imaginärteil $\text{Im}Z$ gegen den Realteil $\text{Re}Z$ graphisch aufträgt. Mit einem einfachen RC-Glied aus einem ohmschen Widerstand R in Parallelschaltung mit einem Kondensator C als Modell [3] erhält man die Kreisgleichung

$$\left(\text{Re}Z - \frac{R}{2}\right)^2 + (\text{Im}Z)^2 = \left(\frac{R}{2}\right)^2 \quad (1)$$

Eine weitere Auswertmöglichkeit bietet das Admittanzspektrum [1]. In diesem Diagramm wird der Betrag der Admittanz $|Y|=|1/Z|$ gegen die Frequenz f doppelt logarithmisch aufgetragen. Dort lässt sich ebenfalls anhand der Lage der Messpunkte ein fauler Apfel von einem frischen unterscheiden.

3. Experiment

Das Experiment besteht aus zwei Versuchen. Im ersten Versuch wird ein Apfel im Wechselstromkreis untersucht. Der zweite Versuchsaufbau ist ein experimentelles Modell und dient zum Vergleich mit dem Apfel. Die Schaltung besteht nur aus physikalischen Bauteilen.

Im jeweiligen Versuchsaufbau (s. Abb. 1 u. 2) wird bei Variation der Wechselstromfrequenz f die Spannung U am Apfel bzw. am RC-Glied und U_M am Messwiderstand R_M gemessen. Für die Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ misst man die Zeitdifferenz Δt zwischen den beiden Signalen. Um den Betrag der Impedanz zu berechnen nutzt man die Formel

$$|Z| = (U / U_M) \cdot R_M \quad (2)$$

Hat man die Phasenverschiebung

$$\Delta\varphi = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t \quad (3)$$

bestimmt, kann man mit den Formeln

$$\text{Im} Z = |Z| \sin(\Delta\varphi) \quad \text{und} \quad \text{Re} Z = |Z| \cos(\Delta\varphi) \quad (4)$$

den Imaginär- und Realteil berechnen, um das Nyquist-Diagramm anzufertigen.

Im ersten Versuchsaufbau wird einmal ein frischer Apfel und einmal ein fauler im Wechselstromkreis untersucht (Abb. 1). Um das am jeweiligen Apfel anliegende Stromsignal am Oszilloskop darzustellen, wird der Apfel mit einem Messwiderstand in Serie geschaltet. Für die Messreihe werden die Spannungen U und U_M in Abhängigkeit der Frequenz f aufgenommen.

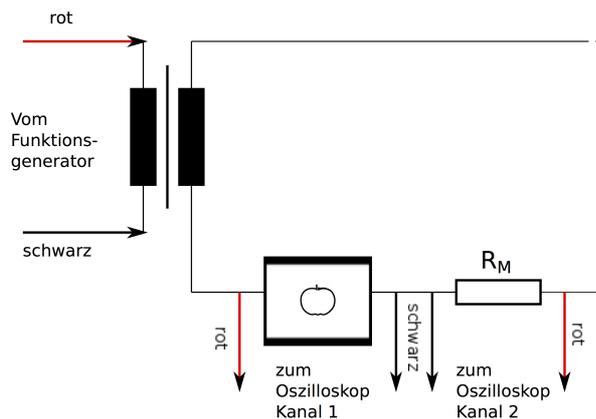


Abb. 1: Schaltskizze des Versuchs

Abb. 2 zeigt eine Schaltskizze des zweiten Versuchsaufbaus. Auch hier befindet sich der Messwiderstand in Reihe zu dem RC-Glied. Die Messreihe wird analog zum vorherigen Teilversuch aufgenommen.

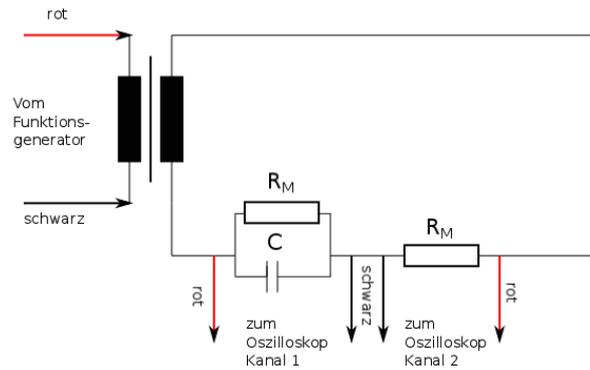


Abb. 2: Schaltskizze des experimentellen Modells

4. Ergebnisse

Das Nyquist-Diagramm des experimentellen Modells ist in Abb. 3 dargestellt. Die Messwerte liegen gemäß Gl. (1) auf einem Halbkreis. Laut Gl. (1) entspricht der Durchmesser des Kreises dem Widerstand des RC-Gliedes, was mit einer direkten Multimetermessung überprüft werden kann.

Das Nyquist-Diagramm des frischen und faulen Apfels ist in Abb. 4 dargestellt. Die Messwerte des frischen Apfels liegen wie bei dem experimentellen Modell auf einem Halbkreis, wobei $\text{Im} Z$ beim faulen Apfel nahezu konstant bei Null liegt. Die negativen Werte des Imaginärteils bei der frischen Probe zeigen, dass der Apfel kapazitive Eigenschaften besitzt. Auch der Durchmesser des Halbkreises lässt sich wieder mit einer Multimetermessung des Apfelwiderstandes überprüfen. Da die Verteilungen der Messwerte des experimentellen Modells und des frischen Apfels vergleichbar sind, kann der Apfel also mit Hilfe von RC-Gliedern modelliert werden. Dem faulen Apfel hingegen fehlen die kapazitiven Eigenschaften intakter Zellen völlig. Das bedeutet, dass ein Großteil der Zellen schon zerstört ist, und der Wechselstrom ausschließlich durch den Elektrolyten des extrazellulären Raums fließt.

Auch im Admittanzspektrum kann man anhand der Lage und Form der Messwerte den frischen von dem faulen Apfel gut unterscheiden. Abb. 5 zeigt das Admittanzspektrum eines frischen und faulen Apfels. Man kann hier direkt anhand der Lage der Messwerte den frischen von dem faulen Apfel unterscheiden.

5. Diskussion

Um das Physikpraktikum für Biologen interessanter zu gestalten, lassen sich Äpfel im Wechselstromkreis untersuchen. Damit wird eine interdisziplinäre

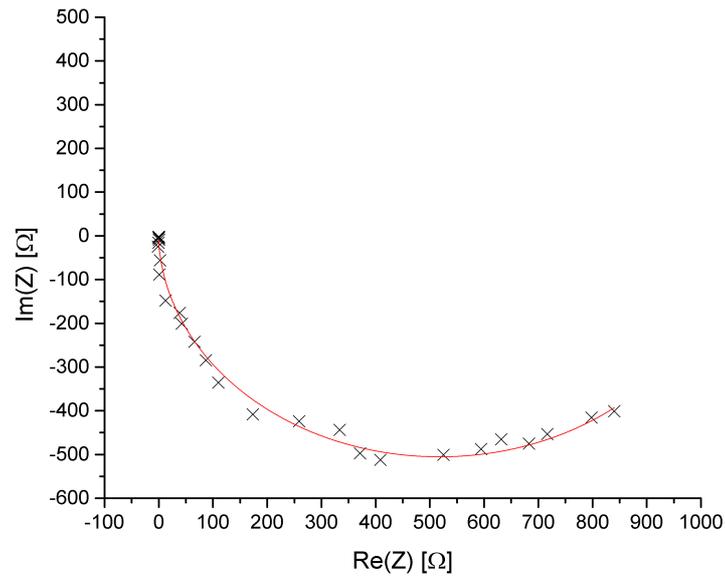


Abb. 3: Nyquist-Diagramm des experimentellen Modells

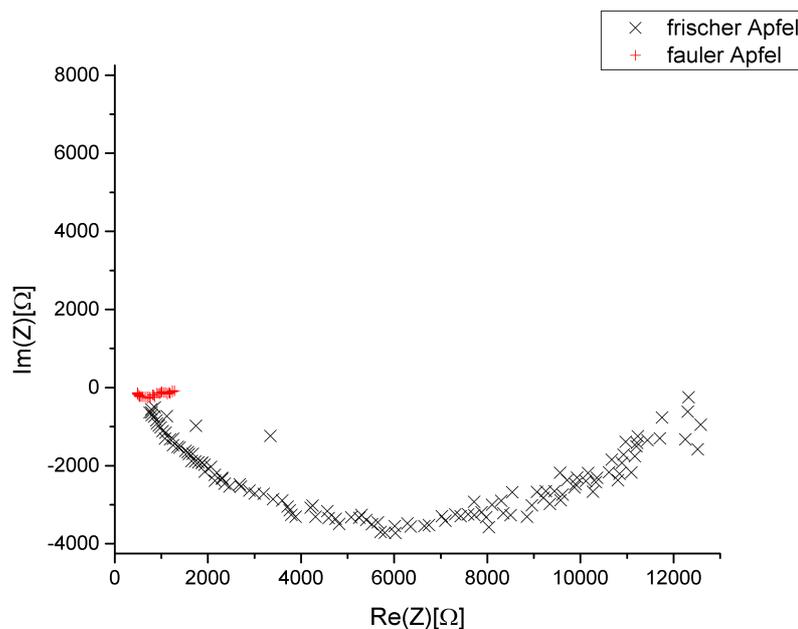


Abb. 4: Nyquist-Diagramm des frischen und faulen Apfels

und anwendungsnahe Vermittlung von physikalischen Inhalten zum Thema Elektrizität angestrebt. Nach Messung der Spannungen U , U_M und der Zeitdifferenz Δt in Abhängigkeit der Frequenz f lassen sich im Nyquist-Diagramm frische Äpfel von faulen sehr gut unterscheiden.

Vergleicht man das Modell des frischen Apfels mit dem des experimentellen Modells, zeigen sich die

physikalischen Eigenschaften der Zellen, da sie sich gut mit Hilfe von RC-Gliedern modellieren lassen.

Auch weitere Auswertemethoden können für die Analyse der Zellintegrität und somit zur Unterscheidung von frischen und faulen Äpfeln nützlich sein. So zeigt der Vergleich der Phasenverschiebung ebenso den Frischegrad eines Apfels an [4].

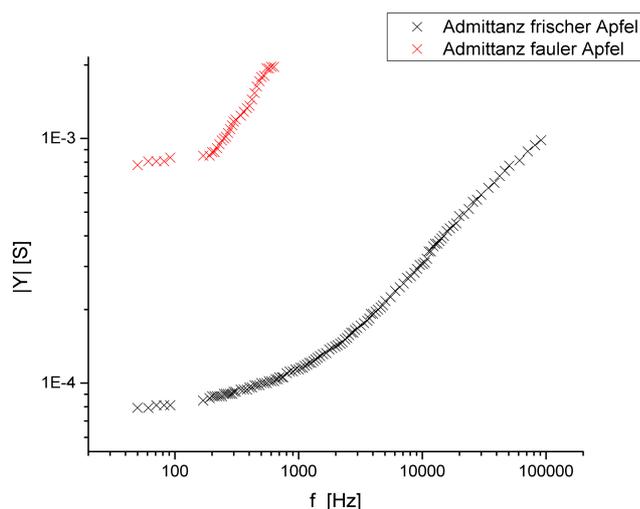


Abb. 5: Admittanzspektrum des frischen und des faulen Apfels

Im Wintersemester 2013/2014 wurde der hier geschilderte Versuch mit dem physikalischen Modell und dem frischen Apfel erstmals mit ca. 40 Studierenden der Biologie des 4. Semesters durchgeführt. Die Messreihen wurden von den Studierenden in ca. 60 min relativ zügig aufgenommen. Dabei waren die Studierenden während der Durchführung sehr interessiert, da sie entweder den biologischen Kontext schätzten oder sich durch die Neuerungen motiviert fühlten. Bei der Korrektur der Auswertungen viel auf, dass bei einigen Studierenden die Spannungswerte U zu ungenau gemessen wurden, um einen Halbkreis erkennen zu lassen. Im Rückblick sollte bei der Durchführung deshalb von Beginn an auf exaktes Messen hingewiesen werden z.B. auf die

Verwendung der Measure-Funktion des Oszilloskops, die den Wert der Amplitude automatisch bestimmt.

Prinzipiell hat sich der Einsatz dieses Versuchs als interessant und durchführbar für die Studierenden erwiesen. Die konkrete Festlegung des Arbeitsumfangs und die Erstellung der Versuchsanleitung sind z.Zt. in Arbeit [4].

6. Literatur

- [1] U. Grupa, W. Wilke: *Impedanzspektroskopie für die In-Line-Prozessanalytik in der Qualitätsüberwachung von Lebensmitteln*. In: Technologie Transfer Netzwerk Hessen, AICHEM 2012, Frankfurt (2012), S. 27f
- [2] S. Huber, K. Jessen: *Inhalte für das Physikpraktikum der Biologen*. In: H. Groetzbauch, V. Nordmeier (Redaktion). PhyDid B – Didaktik der Physik, Beiträge zur DPG-Frühjahrestagung, Jena (2013)
- [3] A.H. Gitter: *Die Barrierefunktion des Kolonepithels unter physiologischen und pathophysiologischen Bedingungen*. Habilitationsschrift, Freie Universität Berlin, 2000
- [4] A. Seibt. *Schriftliche Hausarbeit zur Ersten Staatsprüfung (Lehramt Gymnasium)*. LMU München (in Arbeit)