

### Didaktische Begründung des allgemeinen Induktionsgesetzes

Wie bereits erwähnt, liegen die didaktischen Herausforderungen in der BPE Induktion in der Sachkompetenz und der Erkenntnisgewinnung. Die sprachliche Bewältigung der Thematik fällt den Lernenden schwer, was die Lehrkräfte nicht verwundern sollte. Eine phänomenologische Vorgehensweise ist hier insofern leicht zu begründen. Allerdings darf in der Sek II die Sachkompetenz nicht auf der phänomenologischen Ebene stehen bleiben. Das im Bildungsplan vorgesehene allgemeine Induktionsgesetz fordert die mathematische Darlegung und Begründung des Gesetzes. Das heißt, in diesem Fall ganz konkret, dass das anschauliche Bild vom magnetischen Fluss mit der Zahl der Feldlinien innerhalb einer Fläche physikalisch und mathematisch erweitert werden muss.

Wie kann dies bei einem knappen Budget an Lernzeit erreicht werden? Der didaktisch nahe liegende Ansatz besteht in einer möglichst unmittelbaren Messung der Induktionsspannung. Einen möglichen Versuchsaufbau zeigt die Abb. 1. Der Exzenterantrieb mit Schnur bewegt den Stabmagneten vor einer Spule hin und her. Die Rückholung erfolgt über ein kleines Gummi auf der rechten Seite des Wagens. Der prinzipielle Aufbau ist sehr eng an die Vorgehensweisen im Arbeitsblatt 1 angelegt, er hat so für die Schülerinnen und Schüler einen hohen Wiedererkennungswert und bietet die didaktische Brücke zur mathematischen Begründung der Induktion. Die Spule hat 500 Windungen und eine Querschnittsfläche von  $A = 2,5 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm} = 0,000625 \text{ m}^2$ . Mit dem axialen B-Feldsensor, dem Mikrovoltadapter und dem Mobile-Cassy kann die Induktionsspannung direkt gemessen und in einem Diagramm dargestellt werden, siehe Abb. 2. Bei den Einstellungen, siehe Abb. 3, wird mit  $df_1/dt$  die Änderungsrate der magnetischen Flussdichte B ermittelt. Die Mittelwertbildung des Systems bei der numerischen Berechnung der zeitlichen Ableitung ist nicht besonders überzeugend, aber die Übereinstimmung der insgesamt ermittelten Werte sehr wohl, siehe Abb. 4. Mit  $f_3$  wird die Induktionsspannung berechnet. Mit einer schmaleren Spule kann die Messposition für die magnetische Flussdichte leichter eingestellt werden.

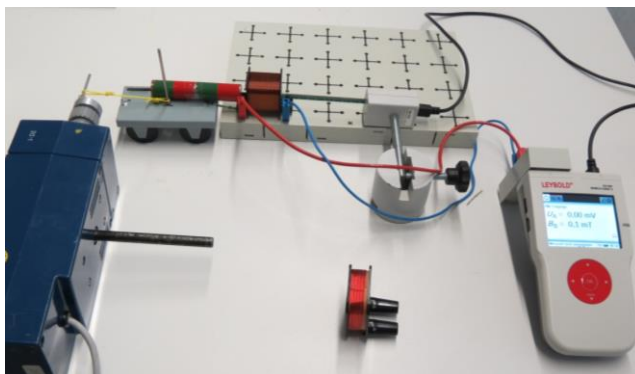


Abb. 1: Versuchsaufbau zur Messung von  $U_{\text{ind}}$

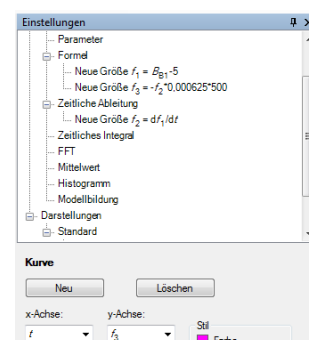


Abb. 3: Einstellungen bei CASSY

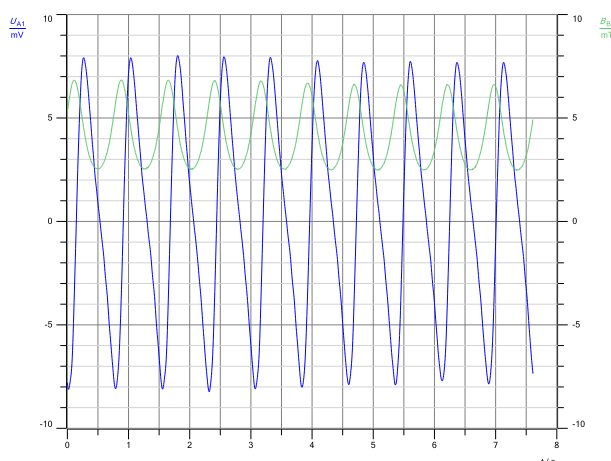


Abb. 2: Messung der magnetischen Flussdichte B (grün) und der Induktionsspannung  $U_{\text{ind}}$  (blau)

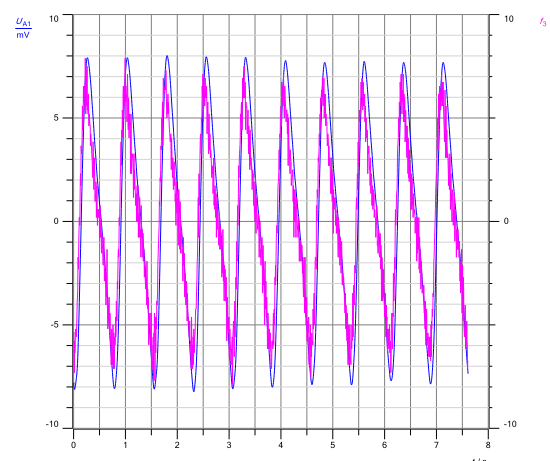


Abb. 4: Gemessener Induktionsspannung (blau) und berechnete Induktionsspannung (magenta) im Vergleich

Vermöge dieser unmittelbaren und sehr überzeugenden Messung der Induktionsspannung können die Erkenntnisse der Lernenden mit weniger Problemen erweitert werden als in den üblichen Vorgehensweisen im Unterricht.

Die Auswertung der Messung kann folgendermaßen begründet und aufgezeigt werden. Ein **Kurzvortrag** mit etwa folgenden Inhalten ist denkbar.

„Bislang haben wir Entstehung einer Spannung mit der Änderung des magnetischen Flusses begründet und Feldlinien in einer Fläche A gezählt. Beim magnetischen Fluss hatten wir die Vorstellung, dass es eine bestimmte Zahl an Feldlinien innerhalb einer Leiterschleife mit der Fläche A gibt, und diese Zahl sich ändern kann. Dieses anschauliche Bild, verknüpft mit einer Regelung zur Richtung, in welcher die Magnetfeldlinien die linke oder rechte Seite einer Spule durchsetzen, reichte aus, um die Wechselspannung mit einem Vorzeichenwechsel zu erklären. Wir haben dies mit AB2 am Wechselspannungsgenerator erarbeitet.

Dieses Bild müssen wir nun erweitern, wenn wir die **Spannung in Volt messen** wollen. Wir müssen ein Gesetz – eine Formel – finden, mit dem die Spannung berechnet werden kann. Die Größen Spannung U in Volt, Fläche A in m<sup>2</sup> sind gesetzt. **Wie aber muss der mathematische Ausdruck für den magnetischen Fluss aussehen?** Hinter der Zahl der Feldlinien steht die magnetische Flussdichte B, die wir in Tesla oder Millitesla messen. Wir haben bislang den Begriff magnetische Flussdichte B verwendet, ohne groß darüber nachzudenken, weshalb in diesem Begriff das Wort Dichte enthalten ist. Bei einem starken Magnetfeld haben wir eine hohe Zahl an Feldlinien innerhalb einer bestimmten Fläche gezeichnet, egal ob diese Fläche von einer Leiterschleife umgeben ist oder nicht. Also kommt es bei der Stärke der magnetischen Flussdichte B auf die Zahl der Feldlinien pro Fläche A an. ‚Pro Fläche‘ heißt, wir brauchen einen Bruch. Es gilt also Folgendes:

$$\text{magnetische Flussdichte } B = \frac{\text{Zahl der Feldlinien}}{\text{Fläche } A} = \frac{\text{magnetischer Fluss}}{\text{Fläche } A} = \frac{\theta}{A}$$

Daraus folgt für den magnetischen Fluss:  $\theta = B \cdot A$

Ein Tesla ist ja bereits definiert. Der magnetische Fluss hat damit die Einheit ‚Tesla mal Quadratmeter‘, also gilt für die ‚Einheit des magnetischen Flusses‘:

$$[\theta] = T \cdot m^2 = \frac{N}{A \cdot m} \cdot m^2 = \frac{N \cdot m}{A} = \frac{J}{\frac{C}{s}} = V \cdot s$$

A bedeutet hier Ampere. Wenn sich nun die magnetische Flussdichte B zeitlich ändert, dann ändert sich selbstverständlich auch die Einheit. Es ergibt sich dann Folgendes:  $\frac{T \cdot m^2}{s} = \frac{T}{s} \cdot m^2 = \frac{V \cdot s}{s} = V$ .

Es müsste sich also lohnen, wenn wir folgenden Messversuch durchführen.“

Anschließend kommt im Unterrichtsgang dann der oben erläuterte Versuch und dessen Interpretation.

Die hier aufgeführten Notizen entsprechen dann dem in etwa dem Heftaufschrieb zur mathematischen Definition des magnetischen Flusses  $\Phi$  in der Einheit Weber.

Je nach Schulart und angestrebtem Niveau ist bei der mathematischen Vertiefung mit der Ableitung des Produktes  $B \cdot A$  unter Verwendung der Produktregel differenziert vorzugehen. Die im Kurs bislang geforderten und unterstützten Kompetenzen bieten aber in jedem Fall die Möglichkeit den Kurs zum Thema Induktion didaktisch solide und kompetenzorientiert zu bewältigen.

Der Einfluss des inhomogenen Magnetfeldes sollte im grundlegendem möglichst unberücksichtigt bleiben. Die Berücksichtigung des Skalarproduktes könnte allerdings im Rahmen von VIP aufgegriffen werden.