

Experimente für Schülerinnen und Schüler in Jahrgangsstufe 12 der gymnasialen Oberstufe

Was kann alphys beitragen?

Im LehrplanPLUS für die gymnasiale Oberstufe in Bayern sind Experimente vorgesehen, die von den Lernenden überwiegend selbst auszuführen sind – ein insgesamt sehr begrüßenswertes Konzept. Im Folgenden werden verschiedene Realisierungsmöglichkeiten diskutiert (ohne Anspruch auf Vollständigkeit) und es wird dargestellt, welche Materialien der Firma **alphys** dabei möglicherweise Unterstützung bieten können. Am Ende dieses Textes ist eine Tabelle mit den einzelnen Projekten und deren aktuellem Status angegeben.

Im erhöhten Anforderungsniveau (eA) sind im LehrplanPLUS zehn Experimentierthemen vorgegeben. Davon sind mindestens sieben von den Lernenden eigenständig durchzuführen. Jedes Thema umfasst jeweils mehrere konkrete Aufgaben. Vier der Themen, mit jeweils kleinerem Aufgabenumfang, sind auch im grundlegenden Anforderungsniveau (gA) gesetzt.

Für die Durchführung solcher Schülerexperimente sollten an der Schule folgende Teile/Geräte als „elektrische Grundausstattung“ in ausreichender Stückzahl vorhanden sein:

- Gleichspannungsnetzgeräte für eine regelbare, stabilisierte elektrische Spannung von 0 bis 12 oder 15 V (nicht mehr!) und eine maximale Stromstärke von 2 bis 5 A.
- Digitalmultimeter, die neben den obligatorischen Messbereichen für Spannung, Stromstärke (jeweils DC und AC) und Widerstand auch über Messbereiche für Frequenz (mindestens bis 20 kHz) und Kapazität (Auflösung möglichst 1 pF) verfügen. Die meisten modernen Geräte erfüllen diese Anforderung.

- Der zeitliche Verlauf einer elektrischen Spannung kann mit digitalen Spannungssensoren erfasst und auf einem Smartphone oder einem Tablet-PC mit zugehöriger Software dargestellt werden. Die Verbindung zu den Sensoren sollte über ein Kabel erfolgen, weil bei einem drahtlosen Datenaustausch die erzielbare Abtastrate für einige Experimente zu gering ist. Digitale Stromsensoren sind nicht notwendig, weil statt dessen die Spannung z.B. an einem 1 Ω -Shuntwiderstand gemessen werden kann.

Vor allem für das erhöhte Anforderungsniveau sind Digitaloszilloskope eine bedenkenswerte Alternative oder Ergänzung dazu. Sie werden inzwischen mit Preisen im unteren dreistelligen Eurobereich angeboten. Die Mess- und Darstellungsmöglichkeiten sind viel umfangreicher als bei den Spannungssensoren (zwei Kanäle, Trigger, hohe Abtastrate, hohe Empfindlichkeit usw.), allerdings erfordert die Bedienung eine gewisse Einarbeitung. Es ist kein Computer und keine zusätzliche Software erforderlich, trotzdem können die Geräte mit einem Rechner verbunden oder die Messwerte über USB exportiert werden. Die Möglichkeit von 2-Kanal-Messungen ist bei den Versuchsthemen 8 und 9 (siehe unten) ein entscheidender Vorteil. Zu beachten ist, dass die Eingänge von Oszilloskopen fast immer mit BNC-Buchsen versehen sind. Einen passenden Adapter mit 4 mm-Buchsen und integriertem Überspannungsschutz wird es von **alphys** geben.

- Laborleitungen mit 4mm-Steckern. Fast alle Versuche werden mit Kleinspannungen bis 15 V durchgeführt, so dass Standard-Laborleitungen ohne Isolierhülsen genügen. Für manche Experimente ist es praktisch, wenn auch Krokodilklemmen oder -kabel vorhanden sind. Nur beim Fadenstrahlrohr und bei der Elektronenablenkröhre wird je nach verwendeten Netzgeräten mit berührungsgefährlichen Spannungen umgegangen, so dass hierfür Sicherheitsleitungen (also mit Isolierhülsen) erforderlich sind.
- diverse Spulen von Experimentiertransformatoren als Induktivitäten
- diverse Widerstände und andere Kleinteile

Versuchsthema 1: Kondensator auf- und entladen (eA und gA)

Für diese Experimente werden verschiedene Widerstände und Kondensatoren mit jeweils großen Werten benötigt, damit die Zeitkonstante $\tau = R \cdot C$ lang genug ist, um mit Spannungssensor ($\tau > 1\text{ms}$), Oszilloskop ($\tau > 1\mu\text{s}$) oder auch mit Multimeter und Uhr ($\tau > 10\text{s}$) den zeitlichen Verlauf erfassen zu können.

Elektrolytkondensatoren haben große, aber recht ungenaue Kapazitätswerte und verhalten sich wegen der dielektrischen Absorption (lange verbleibende Restladung) deutlich nicht-ideal. Viel besser geeignet sind Polypropylen-Folienkondensatoren (PP).

Von **alphys** wird es eine Anordnung („Panel“) mit 10 verschiedenen PP-Kondensatoren (1nF bis 33 μF) geben. Zusammen mit Widerständen im k Ω bis M Ω -Bereich sind lange Zeitkonstanten möglich. Der Innenwiderstand des Spannungsmessgerätes (je nach Gerät 1 10 M Ω) hat in der Regel einen Einfluss auf den Umladevorgang und muss berücksichtigt werden.

Versuchsthema 2: elektrische Potentialverläufe (eA und gA)

Mit Hilfe einer schwach leitfähigen Oberfläche lassen sich elektrische Potentiale in zwei Dimensionen experimentell darstellen. Häufig wird dafür ein wässrig getränkter Karton zusammen mit rechteckigen, kreis- und ringförmigen Elektroden verwendet. Die Elektroden müssen an ihrem Rand jeweils einen zuverlässigen elektrischen Kontakt zum Karton aufweisen.

Von **alphys** wird es eine Platte mit einer leitfähigen, schwarzen Kunststoffolie geben, die sich isoliert über einer Stahlblechplatte befindet. Dadurch können die Elektroden magnetisch fixiert werden, die Magnetkraft sorgt für einen sicheren Kontakt und die Potentialpunkte lassen sich durch kleine Permanentmagnete markieren. Zentimeterskalen an den Rändern der Platte ermöglichen die Bestimmung der Positionen der Elektroden und der markierten Punkte (z.B. mithilfe eines senkrecht von oben angefertigten Fotos).

Versuchsthema 3: Elektronenablenkröhre und Fadenstrahlrohr (eA)

Die Röhren, die erforderlichen Netzgeräte und Spulen sind recht kostspielig im mittleren vierstelligen Eurobereich für einen Experimentiersatz. Außerdem muss je nach verwendeten Netzgeräten mit berührungsfährlichen Spannungen umgegangen werden. Vermutlich werden diese Experimente daher in der Regel von der Lehrkraft gemeinsam mit der ganzen Gruppe der Lernenden durchgeführt.

Versuchsthema 4: Permittivität und Kondensator anderer Geometrie (eA)

Hierfür ist es erforderlich, Kapazitäten im Bereich von 100 pF zu messen. Die Kapazitätsbestimmung durch Ladungs- und Spannungsmessung ist als Schülerexperiment recht umständlich, aufwändig und ungenau. Statt dessen bietet sich die Verwendung eines Digitalmultimeters an, sofern es über einen entsprechenden Messbereich verfügt. Viele Geräte können Kapazitäten mit 1 pF auflösen, zeigen den Wert aber erst z.B. ab 1000 pF an. Durch einen parallel zum Messobjekt geschalteten Kondensator von etwa 1 nF und Differenzbildung (mit und ohne Messobjekt) lässt sich die gesuchte Kapazität dann recht einfach und genau ermitteln. Die Bestimmung der Permittivität kann mit einem üblichen Plattenkondensator oder zwei flach auf dem Tisch liegenden Alublechen und einer zwischenliegenden Kunststoffplatte (z.B. 2 mm Polyethylen, PE) erfolgen.

Als Kondensator anderer Geometrie bietet sich die Verwendung eines handelsüblichen koaxialen Antennenkabels („75 Ohm-Kabel“) an. Ein z.B. 3 m langes Stück dieses Kabels mit PE-Isolierung ($\epsilon_r \approx 2,3$) stellt in guter Näherung einen Zylinderkondensator dar. Der Innen- und Außendurchmesser können mit einer Schieblehre an einem abisolierten Ende gemessen werden. Die Kapazität des Kabels lässt sich dann mit dem aus $C = 2\pi\epsilon_0\epsilon_r l / \ln(r_a/r_i)$ berechneten Wert ($l = \text{Länge}$) vergleichen. Er beträgt rund 70 pF pro Meter Kabellänge.

Versuchsthema 5: Magnetfelduntersuchungen an Spulen und am geraden Draht (eA)

Mit einer stromdurchflossenen langen Spule oder einem Helmholtz-Spulenpaar lässt sich eine magnetische Flussdichte im mT-Bereich erzeugen, so dass eine Hall-Sonde (analog oder als digitaler Sensor) gut geeignet ist, um das Magnetfeld und seine räumlichen Eigenschaften zu untersuchen. Schwieriger ist es bei einem geraden Draht: Bei einer Stromstärke von 3 A ist die Flussdichte in 10 cm Abstand nur etwa ein Zehntel der Flussdichte des Erdmagnetfeldes (ca. $60 \mu\text{T}$), so dass die Untersuchung der radialen Abhängigkeit sowohl in Bezug auf die Auflösung der Hall-Sonde als auch auf die Kompensation des Erdmagnetfeldes schwierig ist.

Als möglicher Ausweg bietet sich die Verwendung von 50 Hz-Wechselstrom im geraden Draht und die Messung der Induktionswechselspannung in einer kleinen Induktionsspule mit hoher Windungszahl an. Dabei spielt das statische Erdmagnetfeld keine Rolle und man kann eine Flussdichte von deutlich weniger als einem μT mit dem Wechselspannungsmessbereich eines Digitalmultimeters gut nachweisen. Nachteilig ist, dass die Flussdichte nicht lokal, sondern als Mittelwert über der Spulenfläche bestimmt wird und dass das Thema Induktion im Unterricht normalerweise erst später behandelt wird.

Siehe auch https://www.alphys.de/images/pdfs/Versuche_Induktionsspule.pdf

Versuchsthema 6: Ein- und Ausschaltvorgang bei Spulen (eA)

Für diese Experimente werden verschiedene Induktivitäten und Widerstände benötigt. Die jeweils größtmögliche Zeitkonstante $\tau = L/R$ ist hier durch das Verhältnis aus Induktivität L und Drahtwiderstand R einer Spule bestimmt. Ein zusätzlicher Widerstand in Serie mit der Spule verkürzt die Zeitkonstante. Als Induktivitäten bieten sich die Spulen von Experimentiertrafos an. Ohne Eisenkern erreicht man damit Zeitkonstanten im Millisekunden-Bereich, übrigens weitgehend unabhängig von der Windungszahl, weil eine größere Induktivität durch den dann ebenfalls größeren Drahtwiderstand ausgeglichen wird. Mit einem geschlossenen Eisenkern ergibt sich eine wesentlich größere Induktivität und Zeitkonstante, aber wegen der Hysterese des Eisens und der schnell erreichten magnetischen Sättigung verhält sich die Spule dann deutlich nicht-ideal. Einen guten Kompromiss stellt die Verwendung eines Eisenkerns mit Luftspalt dar (z.B. als dünner Karton zwischen den Jochteilen). Damit lassen sich Zeitkonstanten von z.B. 50 ms erzielen. Zur Beobachtung des zeitlichen Verlaufs ist ein digitaler Spannungssensor oder ein Digitaloszilloskop erforderlich. Nur mit sehr großen und teuren Spulen (z.B. 500 H / 300 Ω) erreicht man Zeitkonstanten im Sekundenbereich.

Bei der Spannungsmessung an einer Spule ist zu beachten, dass bei absichtlichen oder auch versehentlichen Ausschaltvorgängen sehr hohe Spannungsspitzen im kV-Bereich auftreten können. Damit nach RiSU keine Berührungsfahr besteht, darf die gespeicherte Energie in der Spule höchstens 350 mJ betragen. Auch bei kleineren Werten der gespeicherten Energie besteht aber für die empfindliche Eingangsstufe eines angeschlossenen Spannungssensors oder eines Oszilloskops eine Gefahr. Der BNC-Adapter von **alphys** besitzt einen integrierten Überspannungsschutz.

Versuchsthema 7: mechanischen Schwingungen und Resonanz (eA)

Als schwingungsfähiges mechanisches System bietet sich die Verwendung eines Federpendels an. Zunächst sollen die Lernenden die Eigenfrequenz beobachten und mit dem hergeleiteten Zusammenhang mit Masse und Federkonstante vergleichen. Wenn man berücksichtigt, dass etwa die halbe Federmasse ebenfalls mitbewegt wird und sie deshalb zur Masse addiert, erhält man eine recht genaue Übereinstimmung.

Erzwungene Schwingungen kann man gut untersuchen, wenn man das Federpendel an eine Schnur hängt, die über eine Umlenkrolle mit einem kleinen Getriebemotor samt Exzenter verbunden ist. Die (notwendige!) Dämpfung des Federpendels kann durch eine Kartonscheibe erreicht werden, die man einfach zwischen die Massstücke eines Schlitzgewichtes legt. Die Größe der Scheibe bestimmt die Luftreibung und damit die Stärke der Dämpfung. Um die relative Phase zwischen Erreger und Resonator gut beobachten zu können, darf die Frequenz bei Resonanz nicht zu groß sein. Eine weiche Feder ($D \approx 3 \text{ N/m}$),

ein 100 g-Schlitzgewicht und eine leichte Kartonscheibe mit z.B. 25 cm Durchmesser sind gut geeignet. Die Belastung des Motors durch das Pendel bei Resonanz darf seine Drehzahl nur geringfügig beeinflussen.

Ein passender Getriebemotor mit Exzenter für den Frequenzbereich von 0 bis 2,5 Hz zum Betrieb an einem regelbaren Gleichspannungs-Netzgerät (maximal 15 V) wird von **alphys** angeboten. Die Erregerfrequenz lässt sich dann über den Spannungswert des Netzgerätes einstellen.

Versuchsthema 8: elektromagnetische Schwingungen und Resonanz (eA und gA)

Hier soll zunächst die Eigenfrequenz eines Schwingkreises gemessen und damit die Thomson-Gleichung bestätigt werden. Mit den Spulen von Experimentiertrafos (ohne Eisenkern) und Kondensatoren (z.B. PP-Kondensatoren mit 1 nF bis 33 μ F) ergeben sich Eigenfrequenzen in einem großen Bereich von 10^2 bis 10^5 Hz. Dabei ist eine Schwierigkeit, dass bei realen Schwingkreisen – anders als beim Federpendel – die Amplitude nach der Anregung innerhalb von nur wenigen Schwingungen abklingt, wodurch eine genaue Bestimmung von Periodendauer bzw. Frequenz erschwert wird.

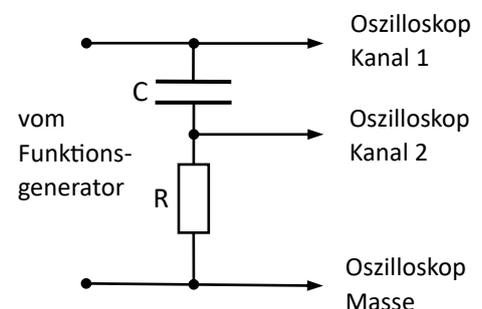
Deshalb ist es sinnvoll, den Schwingkreis zu ungedämpften Schwingungen anzuregen. Zu diesem Zweck bietet **alphys** eine elektronische Schaltung an, die als „Schwingkreibreiter“ bezeichnet wird. Sie hat die Eigenschaft, dass sie praktisch jeden angeschlossenen Schwingkreis zu ungedämpften Schwingungen (Frequenzbereich 0 bis 10^6 Hz, Amplitude bis etwa 10 V) anregt. Es ist keine Rückkopplungsspule o.Ä. wie bei der Meißnerschaltung erforderlich. Die Eigenfrequenz kann dann recht einfach und genau mit einem Multimeter, das über einen entsprechenden Messbereich verfügt, bestimmt werden. Die Schwingung lässt sich mit einem Spannungssensor oder Oszilloskop beobachten, die Sinusform und verschiedene Einflüsse auf die Frequenz können untersucht werden.

Ein Schwingkreis lässt sich zu erzwungenen Schwingungen anregen, indem man z.B. eine an den Funktionsgenerator angeschlossene Erregerspule in die Nähe der Schwingkreisspule stellt. Der Funktionsgenerator muss über eine kleinschrittig einstellbare Frequenz (1 Hz bis 10^5 Hz) und eine Leistungsstufe am Ausgang verfügen. Auf dem Markt sind solche Geräte verfügbar, haben aber Nachteile in Bezug auf die komplizierte Bedienung oder den Preis. Derzeit versuchen wir bei **alphys**, ein preisgünstiges Gerät mit einfacher Bedienung zu entwickeln. Um die relative Phasenlage von Erreger und Resonator zu beobachten, bietet sich die Verwendung der beiden Kanäle eines Digitaloszilloskops an. Mit zwei einzelnen digitalen Spannungssensoren ist es viel schwieriger, diese Messung durchzuführen, weil die beiden Sensoren genau synchronisiert werden müssen.

Versuchsthema 9: induktiver und kapazitiver Widerstand in einfachen Schaltungen (eA)

Bei einer Hintereinanderschaltung einer Kapazität bzw. einer Induktivität und eines ohmschen Widerstandes kann man mit einem Funktionsgenerator und einem 2-Kanal-Oszilloskop leicht die Spannungen an der Schaltung darstellen und daraus die Spannungen an den Bauteilen und die gemeinsame Stromstärke bestimmen (siehe Beispiel rechts).

Mit Hilfe der „Math-Funktion“ am Oszilloskop lässt sich die Spannung U_C als Differenz von U_1 und U_2 am Bildschirm anzeigen, so dass man die Amplituden und die Phasenlagen an den beiden Bauteilen unmittelbar erkennen kann. Durch Variation der Frequenz ergibt sich beim dargestellten Beispiel die Wirkungsweise als Hochpassfilter, wenn man U_1 als Eingang und U_2 als Ausgang der Schaltung betrachtet. Viele weitere Kombinationen von R, C und L lassen sich entsprechend untersuchen.



$$\text{Es gilt: } U_C = U_1 - U_2 ; \quad U_R = U_2 ; \\ I_R = I_C = U_2/R$$

Versuchsthema 10: Wellenlängenbestimmung von LED-Licht, Ermittlung von Strukturgrößen (eA und gA)

Moderne LEDs sind recht helle Lichtquellen mit einer kleinen Leuchtfläche. Mit ihnen ist es möglich, bei lediglich gedämpftem Raumlicht die von einem Beugungsgitter hervorgerufenen Maxima auf einem Schirm zu beobachten und zu vermessen. Derzeit entwickeln wir bei **alphys** ein einfaches, preiswertes und modular aufgebautes Gitterspektrometer, mit dem sich die LED-Lichtwellenlängen mit einer Genauigkeit von rund 5 nm bestimmen lassen. Farbige LEDs emittieren einen Wellenlängenbereich von mindestens etwa 20 nm. Durch den modularen Aufbau ist es möglich, das Spektrometer auch für Laserlicht zu verwenden. Es kann auch ein Halbleiterbaustein oder eine CD als Reflexionsgitter eingesetzt werden, um die betreffenden Strukturgrößen zu ermitteln.

Zusammenfassung der **alphys**-Projekte

In der folgenden Tabelle sind unsere aktuellen Projekte, die ungefähren Preisspannen und der Projektstatus zusammengefasst. Genaue Preise für die einzelnen Artikel können erst angegeben werden, wenn Einkauf, Produktion, Qualitätskontrolle, Verpackung usw. genau feststehen. Wir hoffen, dass sich alles so wie geplant realisieren lässt und dass bis Herbst 2024 bzw. Anfang 2025 ausreichende Stückzahlen hergestellt sind.

Projekt	zu Versuchsthema	für Anford.-niveau	Preisspanne €	Status Mitte April 2024
Kondensator-Panel mit 10 PP-Kondensatoren 1 nF ... 33 μ F	1, 6, 8, 9	eA, gA	30 50	Testmodul fertig, Produktion wird vorbereitet
Potentialplatte mit Leitfolie, zwei rechteckigen, zwei kreisförmigen und einer ringförmigen Elektrode	2	eA, gA	100 150	Testmodul wird hergestellt, Produktion wird vorbereitet
BNC-Adapter mit Überspannungsschutz	6, 8, 9	eA, gA (für Oszilloskop)	30 40	Testmodul fertig, Produktion wird vorbereitet
Getriebemotor mit Exzenter	7	eA	50 70	Testmodul fertig, Produktion ist angelaufen
Schwingkreistreiber	8	eA, gA	80 100	Testmodul fertig, Produktion ist angelaufen
Frequenzgenerator	8, 9	eA	??	in Entwicklung
Spektrometer mit LED-Panel	10	eA, gA	80 150	Entwicklung fast abgeschlossen

16.04.2024

Andreas Urban