

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

Pool für das Jahr 2026

Aufgaben für das Fach Physik

Aufgabentitel	Der Elektrobus – Induktives Laden in der E-Mobilität
Anforderungsniveau	grundlegend
Inhaltsbereiche	♦ Elektrische und magnetische Felder ♦ Das Feldkonzept zur Beschreibung von Wechselwirkungen ♦ Begriff des Feldes am Beispiel von elektrischen und magnetischen Feldern ♦ Magnetische Flussdichte ♦ Veränderliche elektromagnetische Felder ♦ Induktion durch Änderung des magnetischen Flusses
Materialien	♦ M 1 Induktives Laden eines Elektrobusses ♦ M 2 Verbesserungsvorschläge der Ingenieure zum Elektrobus 2.0 ♦ M 3 Idealisierte Annahmen zum Laden von Elektrobussen ♦ M 4 Daten zur Planung der Ladestellen eines Elektrobusses
Quellenangaben	♦ M 3 in Anlehnung an: Wikipedia. <i>Biot-Savart-Gesetz</i>. https://de.wikipedia.org/wiki/Biot-Savart-Gesetz (Zugriff am: 03.12.24) ♦ M 4 in Anlehnung an: ♦ BSVG, <i>emil - Elektromobilität mittels induktiver Ladung</i>. https://www.bsvg.net/unternehmen/elektrobusse-emil.html (Zugriff am: 09.09.24) ♦ BSVG, <i>Elektrobusse</i>. https://www.bsvg.net/unternehmen/elektrobusse-emil/elektrobus.html (Zugriff am: 09.09.24) ♦ Abb. 4: Argue, C. / Geotab (2023). <i>Wie wirkt sich die Temperatur auf die Reichweite des Elektrofahrzeugs aus?</i> https://www.geotab.com/de/blog/elektrofahrzeuge-batterie-temperatur/ (Zugriff am: 01.12.24)
Hilfsmittel	♦ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat ♦ mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	ja ☐ nein ☒ Zeitzuschlag: —
Hinweise	

1 Aufgabe

Der Elektrobus – Induktives Laden in der E-Mobilität

Die Elektromobilität schreitet voran. Im Jahre 2024 fuhren bereits über 2000 Elektrobusse auf deutschen Straßen. In einigen Städten werden die an Haltestellen stehenden Elektrobusse induktiv geladen.

	BE
1 Die Technik des induktiven Ladens von stehenden Elektrobussen an Ladestationen ist in Material 1 beschrieben. a Erklären Sie das Zustandekommen der Induktionsspannung in der Sekundärspule. b Der Bereich innerhalb der Primärspule soll mit Eisenplatten ausgefüllt werden. Erklären Sie, dass damit eine höhere Induktionsspannung in der Sekundärspule am Bus erreicht werden kann. c Begründen Sie anhand physikalischer Zusammenhänge mit Material 2, dass der dort geschilderte Verbesserungsvorschlag korrekt ist.	4 3 4
2 a Berechnen Sie mit den Daten aus Material 3 den maximalen Wert der magnetischen Flussdichte B_{Mitte} der Primärspule mittig im Abstand von 14 cm über der Primärspule. [Kontrollwert: $B_{\text{Mitte}} = 0,57 \text{ mT}$] b Ermitteln Sie unter Berücksichtigung von Abbildung 3 (M 3) den maximalen Wert der induzierten Spannung an der Sekundärspule. Nehmen Sie an, dass die maximale magnetische Flussdichte in der Sekundärspule B_{max} der magnetischen Flussdichte B_{Mitte} aus Teilaufgabe 2a entspricht. c Stellen Sie passend zu Abbildung 3 den zeitlichen Verlauf der induzierten Spannung, welche an der Sekundärspule gemessen werden würde, im Zeitintervall $0 \leq t \leq T$ quantitativ in einem Diagramm dar. Hinweis: Wenn Sie kein Ergebnis bei Teilaufgabe 2b erhalten haben, nutzen Sie ersatzweise $U_{\text{ind}} = 500 \text{ V}$ als maximalen Wert der induzierten Spannung.	3 5 3
3 a Begründen Sie mithilfe einer Rechnung anhand der Daten aus Tabelle 2, dass der Ladepunkt an der Endhaltestelle ausreicht, um den Bus den gesamten Tag fahren zu lassen. b Diskutieren Sie unter Berücksichtigung von Material 4, ob die Maßnahme, eine weitere Ladestelle an einer Zwischenhaltestelle zu bauen, sinnvoll ist. Berücksichtigen Sie dabei zwei Argumente für und zwei Argumente gegen dieses Vorhaben.	3 5

2 Material

Material 1: Induktives Laden eines Elektrobusses

Fährt ein Bus an eine Ladestelle, dann positioniert er sich über der im Asphalt eingelassenen flachen, runden Primärspule, die mit einer Wechselspannung betrieben wird (Abb. 1). Zum Laden senkt sich die runde Sekundärspule bis auf eine Distanz von 14 cm zur Mitte der Primärspule in der Straßenoberfläche herab. Der Vorgang ist hier vereinfacht dargestellt, da üblicherweise mehrere Primär- und Sekundärspulen genutzt werden.

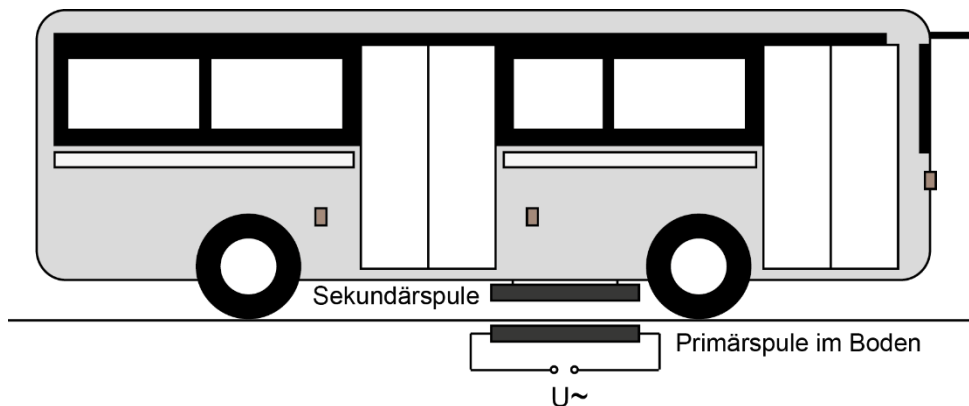


Abb. 1: Positionierung eines Elektrobusses zum Laden

Material 2: Verbesserungsvorschlag der Ingenieure zum Elektrobus 2.0

Beim Bau der nächsten Generation der Elektrobusse könnten deutliche Verbesserungen vorgenommen werden. Wenn die Sekundärspule auch nur 1 oder 2 Zentimeter mehr abgesenkt wird, dann erhöht sich die Energieübertragung pro Zeit, das heißt, die elektrische Leistung. Die auf die Sekundärspule übertragene elektrische Leistung P kann mit $P = U_{\text{ind}} \cdot I$ berechnet werden. Noch effektiver wäre eine direkte Absenkung der Sekundärspule auf den Erdboden. Diese zweite Möglichkeit würde aber zu einer Abnutzung der Sekundärspule führen und Unebenheiten, wie z. B. Steine, könnten zu Problemen, wie dem Kippen der Sekundärspule, führen.

Hinweis: Vereinfachend soll davon ausgegangen werden, dass der Widerstand im Stromkreis der Sekundärspule konstant ist.

Material 3: Idealisierte Annahmen zum Laden von Elektrobussen

Die magnetische Flussdichte B mittig über einer flachen Kreisspule mit dem Radius R sowie der Windungszahl N kann mithilfe der folgenden Formel berechnet werden:

$$B = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot (R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Die Größe I beschreibt dabei die elektrische Stromstärke des durch die Spule fließenden Stroms und x ist der Abstand von der Spulenebene mittig über der Spule (siehe Abb. 2).

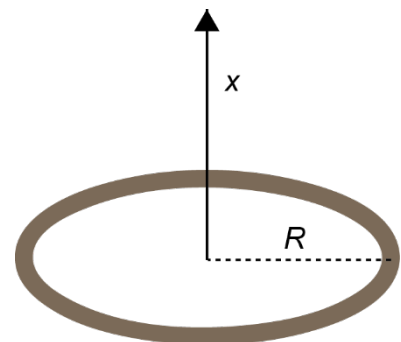


Abb. 2: flache Kreisspule mit einer Windung

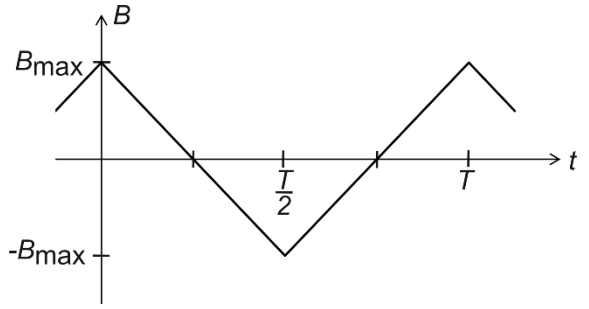
Tab. 1: technische Daten zum Laden		
Maximale Stromstärke in der Primärspule	$I_{\max} = 170 \text{ A}$	
Maximale Spannung an der Primärspule	$U_{\max} = 400 \text{ V}$	
Frequenz der Wechselspannung	$f = 85 \text{ kHz}$	
Windungsanzahl der Primär-/ Sekundärspule	$N = 3$	
Radius der Primär-/ Sekundärspule	$R = 0,50 \text{ m}$	
Abstand der Spulenmittelpunkte (beim Laden)	14 cm	

Abb. 3: vereinfachter zeitlicher Verlauf der magnetischen Flussdichte im Inneren der Sekundärspule innerhalb einer Periodendauer

Material 4: Daten zur Planung der Ladestellen eines Elektrobusses

Der Elektrobuss soll nachts einmal maximal geladen werden und dann tagsüber im Dauerbetrieb fahren, wobei der Bus nach jeder Runde kurz zum Zwischenladen an der Endhaltestelle hält.

Tab. 2: Daten eines konkreten Elektrobusses, der bisher nur an der Endhaltestelle induktiv geladen werden soll

Fahrtstrecke einer Runde	13 km
Fahrdauer einer Runde	39 Minuten
Ladezeit am Ende einer Runde an der Endhaltestelle	ca. 11 Minuten
Ladeleistung an der Endhaltestelle	180 kW
Maximale Energie in der Lithium-Ionen-Batterie	90 kWh
Benötigte Energie pro Kilometer (Jahresmittelwert)	1,6 kWh

1 kWh entspricht 3,6 MJ.

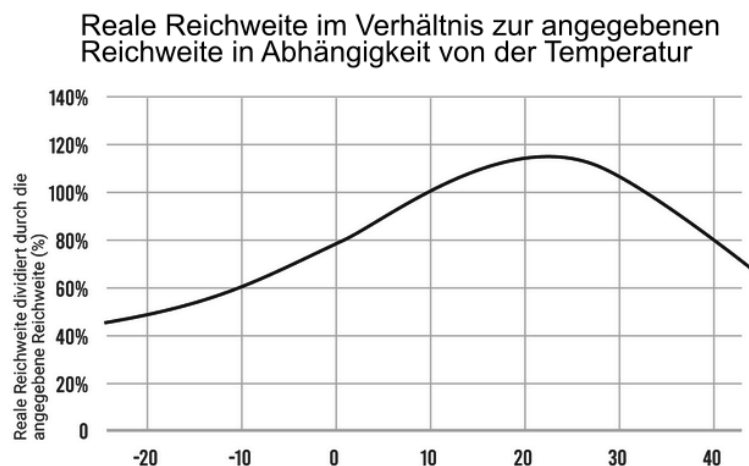


Abb. 4: Temperatur-Verhältnis-Diagramm, in dem die durchschnittlichen Werte aus Fahrten von 4200 Elektroautos verschiedener Marken, Modelle und Baujahre berücksichtigt sind. Die angegebene Reichweite wurde vom Hersteller beziffert, die reale Reichweite von Nutzenden.

Die Reichweite eines Elektrofahrzeugs wird unter anderem durch das Heizen bzw. Kühlen des Fahrzeuginnenraums und der Batterie beeinflusst.

Lithium-Ionen-Batterien werden bei niedrigen Temperaturen beheizt, um sie im optimalen Temperaturbereich zu halten.

Es kann angenommen werden, dass sich die Reichweite von Elektrobussen wie in Abb. 4 verhält.

3 Erwartungshorizont

Der Erwartungshorizont stellt für jede Teilaufgabe eine mögliche Lösung dar. Nicht dargestellte korrekte Lösungen sind als gleichwertig zu akzeptieren.

Werden im Erwartungshorizont in Rechnungen Werte verwendet, die Resultat einer vorangegangenen Berechnung sind, so gehen sie in Taschenrechner-Genauigkeit in die jeweilige Berechnung ein, sind aber mit einer sinnvollen Genauigkeit angegeben.

		BE/AFB		
		I	II	III
1	a Die Primärspule wird mit einer Wechselspannung betrieben. Die Stromstärke in der Primärspule verändert sich somit auch periodisch. Damit ändert sich die magnetische Flussdichte B der Primärspule periodisch. Also ändert sich in der Sekundärspule auch der magnetische Fluss periodisch, da das Magnetfeld der Primärspule die Sekundärspule durchsetzt und der magnetische Fluss proportional zur Flussdichte ist. Damit wird in der Sekundärspule laut dem Induktionsgesetz eine Spannung induziert. b Wenn der Bereich innerhalb der Primärspule mit Eisenplatten ausgelegt wird, dann wird bei gleicher Wechselspannung das Magnetfeld stärker, so dass der magnetische Fluss und somit auch die Magnetfeldänderung in der Sekundärspule größer ist. Damit ist auch die Induktionsspannung in der Sekundärspule am Bus größer. c Ein tieferes Absenken der Sekundärspule trägt dazu bei, dass die magnetische Flussdichte, die die Sekundärspule durchsetzt, ansteigt, da die magnetische Flussdichte der Primärspule tendenziell mit dem Abstand abnimmt. Damit wird eine größere Induktionsspannung in der Sekundärspule erreicht, da so eine stärkere Änderung der magnetischen Flussdichte vorliegt. Wenn die induzierte Spannung in der Sekundärspule ansteigt, steigt auch die daraus resultierende Stromstärke. Mit $P = U_{\text{ind}} \cdot I$ ergibt sich entsprechend, dass die Energieübertragung pro Zeit (Leistung) zunimmt.	4		
		3		
			4	
2	a $B_{\text{Mitte}} = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot I_{\text{max}} \cdot R^2}{2 \cdot (R^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}}$ $B_{\text{Mitte}} = \frac{\mu_0 \cdot 3 \cdot 170 \text{ A} \cdot (0,50 \text{ m})^2}{2 \cdot ((0,50 \text{ m})^2 + (0,14 \text{ m})^2)^{\frac{3}{2}}}$ $B_{\text{Mitte}} = 0,57 \text{ mT}$ b $U_{\text{ind}} = -N \cdot A_{\perp} \cdot \frac{\Delta B_{\text{max}}}{\Delta t}$ In der Abbildung 3 ist erkennbar, dass der Unterschied der magnetischen Flussdichte $-2B_{\text{max}}$ während der Zeitspanne $\frac{1}{2}T$ ist.	3		
			5	

	Wenn die Batterie vollgeladen ist, kann der Bus ca. $\frac{90 \text{ kWh}}{1,6 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}} = 56 \text{ km}$ weit fahren. ♦ Das Zwischenladen verlängert ggf. die Haltezeit. Eine mögliche Abwägung der Argumente: In weiten Teilen von Deutschland sinken die Temperaturen im Winter eher selten unter -10°C, so dass für diese wenigen Tage statt einer Zwischenhaltestelle auch eine weitere längere Ladung an der Endhaltestelle im Tagesverlauf eingeplant werden könnte. Bei den restlichen unvorhergesehenen Ereignissen scheint eine Zwischenladestation kaum notwendig, da zusätzlich zur Ladung an der Endhaltestelle noch die nächtliche Vollladung einen gewissen „Puffer“ bietet. Die Zusatzkosten können somit eingespart werden.			
Summe¹		10	15	5

4 Standardbezug

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
1 a	1			
b	1			
c		8		
2 a	3			
b	3		3	
c	7			
3 a	3			
b				6

5 Bewertungshinweise

Die Bewertung der erbrachten Prüfungsleistungen hat sich für jede Teilaufgabe nach der am rechten Rand der Aufgabenstellung angegebenen Anzahl maximal erreichbarer Bewertungseinheiten (BE) zu richten.

¹ Bei jeder Aufgabe liegen die Anzahlen der Bewertungseinheiten – abhängig vom Anforderungsniveau – in den Bereichen, die der folgenden Tabelle zu entnehmen sind:

Anforderungsniveau	erhöht			grundlegend		
Anforderungsbereich	I	II	III	I	II	III
Anzahl der BE	11 - 13	17 - 21	8 - 10	10 - 12	13 - 16	4 - 6

Für die Bewertung der Gesamtleistung eines Prüflings ist ein Bewertungsraster² vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

² Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.