

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

Pool für das Jahr 2026

Aufgaben für das Fach Physik

Aufgabentitel	Elektronenstrahlen zur Härtung von Lacken
Anforderungsniveau	grundlegend
Inhaltsbereiche	♦ Inhaltsbereich: Elektrische und magnetische Felder ♦ Körper in statischen Feldern ♦ Energiebetrachtungen von Körpern in homogenen elektrischen Feldern
Materialien	♦ M 1 Erzeugung eines Elektronenstrahls ♦ M 2 Leistungsdaten des Lackierprozesses ♦ M 3 Aufweitung des Elektronenstrahls
Quellenangaben	♦ M 2, Abb. 2 in Anlehnung an: Asis (Hg.). <i>Härtung flüssiger Beschichtungen auf Formteilen</i>. https://www.asis-gmbh.de/wp-content/uploads/2021/05/ASIS_Whitepaper_Haertung-fluessiger-Beschichtungen_2103V7_de.pdf (Zugriff am: 30.10.2023)
Hilfsmittel	♦ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat ♦ mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	ja ☐ nein ☒ Zeitzuschlag: —
Hinweise	

1 Aufgabe

Elektronenstrahlen zur Härtung von Lacken

Viele Lacke trocknen durch den Eintrag von Wärme. Es gibt jedoch auch Verfahren, bei denen Lacke durch Elektronenbeschuss aushärten. Die kinetische Energie der Elektronen wird auf die Moleküle im flüssigen Lack übertragen, sodass diese sich miteinander vernetzen und einen festen Lack bilden.

	BE
1 Zunächst soll der Elektronenstrahl näher betrachtet werden.	
a Erklären Sie mithilfe von Material 1 den Beschleunigungsvorgang von Elektronen innerhalb der Elektronenkanone.	4
b Erklären Sie mithilfe von Material 1 jeweils den Einfluss der Heiz- und Beschleunigungsspannung auf die Leistung des Elektronenstrahls.	4
2 Die betriebswirtschaftliche Abteilung eines Lackierbetriebes kalkuliert die Betriebskosten der Anlage unter anderem in Abhängigkeit von der Bestrahlungszeit eines Bauteils, die sich nach der Dicke der Lackschicht und den Energiekosten richtet.	
a Begründen Sie mithilfe von Abbildung 2 die optimale Beschleunigungsspannung für den in Material 2 beschriebenen Lackierprozess unter Berücksichtigung der Konsequenzen einer zu hohen bzw. zu niedrigen Beschleunigungsspannung.	3
b Bestimmen Sie die Bestrahlungszeit pro Fläche für den in Material 2 beschriebenen Lackierprozess, um eine vollständige Aushärtung zu erzielen.	4
c Erläutern Sie den Mitarbeitenden der betriebswirtschaftlichen Abteilung die Kalkulation der Höhe der Energiekosten pro m ² am Beispiel des in Material 2 beschriebenen Lackierprozesses.	6
3 Vor Durchführung wurde das Bauteil nicht geerdet, sodass der Lackierprozess fehlerhaft ist (M 3).	
a Beschreiben Sie das sich ausbildende elektrische Feld zwischen der Lochanode und der Lackschicht und dessen Änderung bei zunehmender Aufladung der Oberfläche.	4
b Erklären Sie die mit Aufladung der Oberfläche zunehmende Aufweitung des Elektronenstrahls mithilfe einer Argumentationskette unter Berücksichtigung der Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung.	5

2 Material

Material 1: Erzeugung eines Elektronenstrahls

Zur Erzeugung eines Elektronenstrahls wird eine sogenannte Elektronenkanone verwendet. Aus einem Glühdraht können Elektronen austreten, wenn dieser beheizt ist. Diese Elektronen befinden sich zwischen dem Glühdraht und einer Lochanode in einem elektrischen Feld, welches durch eine zwischen diesen Bauteilen angelegte Spannung entsteht. Die beiden Spannungen U_H (Heizspannung) und U_B (Beschleunigungsspannung) bestimmen die Leistung des Elektronenstrahls. Diese gibt die Summe der Energiebeträge aller je Zeitspanne emittierten Elektronen dividiert durch diese Zeitspanne an. Durch den Betrag der Heizspannung kann die Anzahl der freigesetzten Elektronen pro Sekunde gesteuert werden. Vereinfachend wird angenommen, dass der gesamte Lackierprozess im Vakuum stattfindet.

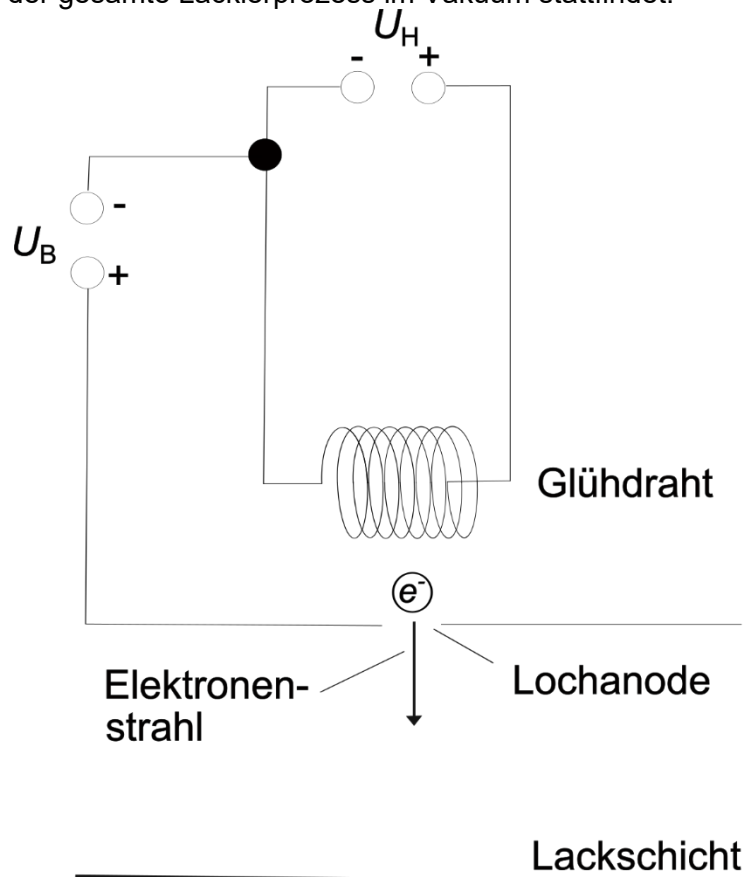


Abb. 1: Bestrahlung der Lackschicht mit Elektronen aus einer Elektronenkanone

Material 2: Leistungsdaten des Lackierprozesses

Die Beschleunigungsspannung des Elektronenstrahls muss an die Dicke der Lackschicht angepasst werden. So wird sichergestellt, dass eine Aushärtung in der gesamten Schicht erfolgt, jedoch keine weitere unnötige Energieaufnahme des darunter liegenden Bauteils erfolgt.

Die Leistung des Elektronenstrahls beträgt 1,0 kW. Pro Gramm des aufgetragenen Lacks muss insgesamt eine Energie von 5,0 kJ zugeführt werden. Pro 1 kWh zugeführte Energie ist mit Energiekosten von 20 Cent zu rechnen.

Bei dem hier betrachteten Lackierprozess wird eine Schicht mit $80 \frac{\text{g}}{\text{m}^2}$ Lack aufgetragen. Abbildung 2 zeigt den Zusammenhang zwischen der kinetischen Energie der einzelnen Elektronen im Strahl und der damit erreichten prozentualen Aushärtung dieser Lackschicht bei ausreichender Bestrahlungszeit.

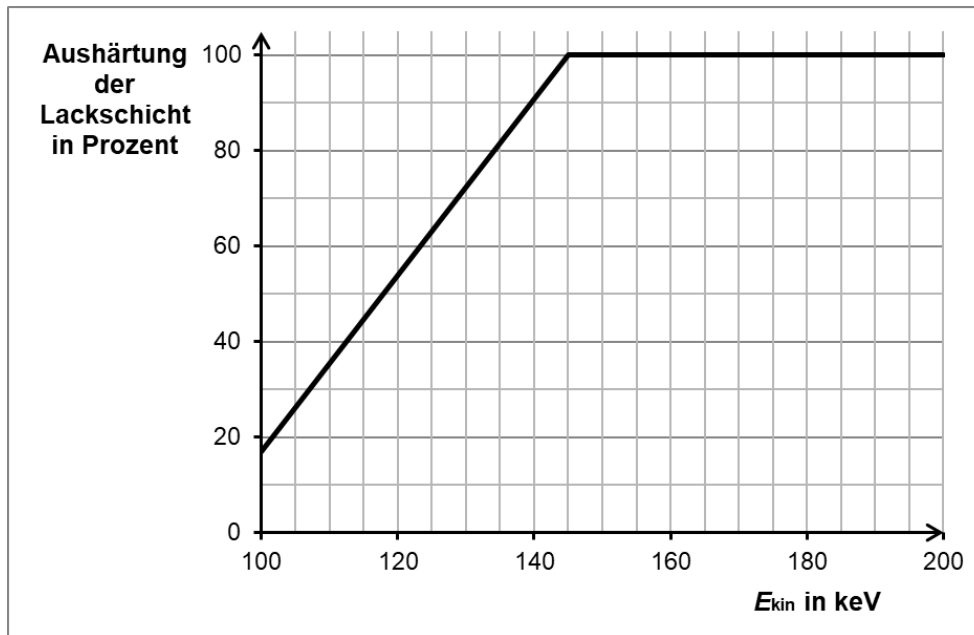


Abb. 2: Aushärtung einer Schicht mit 80 g/m^2 Lack in Abhängigkeit von der Energie der Elektronen bei ausreichender Bestrahlungszeit

Material 3: Aufweitung des Elektronenstrahls

Damit der Elektronenstrahl nicht nur punktuell die Lackschicht bestrahlt, wird dieser aufgeweitet. Dabei erhalten die Elektronen jeweils eine konstante Geschwindigkeit in x-Richtung. Wechselwirkungen der Elektronen im Elektronenstrahl untereinander werden vernachlässigt. Die Elektronen müssen durch eine Erdung des Bauteils nach Auftreffen abgeführt werden.

Die Erdung des Bauteils wurde in der Vorbereitung des Lackierprozesses vergessen. Dadurch werden die Elektronen beim Lackierprozess nicht abgeführt und es bildet sich ein homogenes elektrisches Feld im Bereich zwischen der Lochanode und der Lackschicht aus. Dadurch wird der Elektronenstrahl noch weiter aufgeweitet.

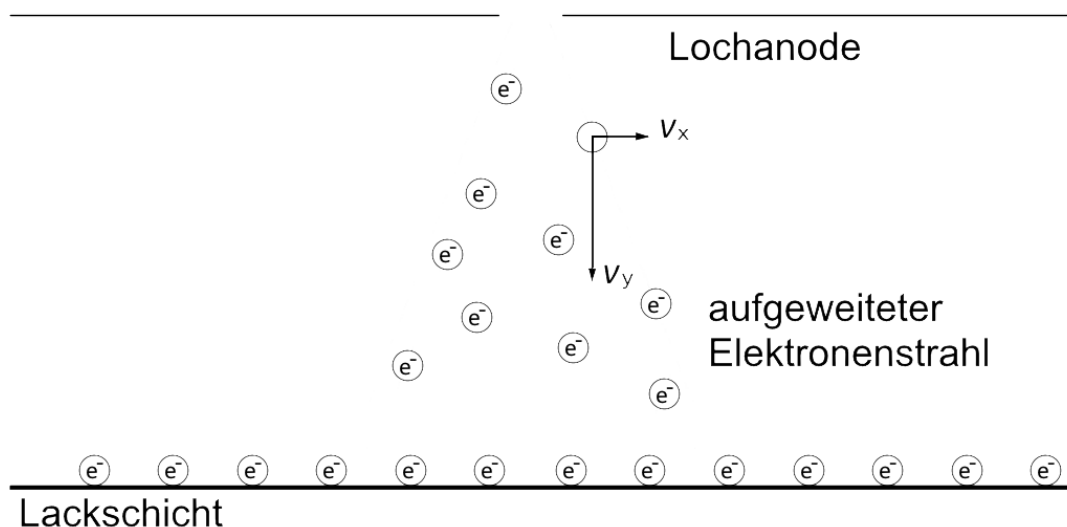


Abb. 3: Ansammlung von Elektronen auf der Oberfläche der Lackschicht

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 Zwischen dem Glühdraht und der Lochanode ist eine Beschleunigungsspannung angelegt. Daraus resultiert ein elektrisches Feld zwischen Glühdraht und Lochanode. Die elektrische Kraft auf die ausgetretenen Elektronen zeigt in Richtung der Lochanode, sodass diese in diese Richtung beschleunigt werden. b Die Höhe der Heizspannung bestimmt die Anzahl der freigesetzten Elektronen pro Sekunde. Mit Hilfe der Beschleunigungsspannung wird auf diese eine Energie übertragen. Durch mehr freigesetzte Elektronen wird die übertragene Energie und somit auch die Leistung des Elektronenstrahls erhöht. Eine erhöhte Heizspannung erhöht somit die Leistung des Elektronenstrahls. Die freigesetzten Elektronen durchlaufen das elektrische Feld zwischen dem Glühdraht und der Lochanode, sodass diese beschleunigt werden. Je höher die Beschleunigungsspannung, desto höher ist auch die Energie der einzelnen Elektronen. Somit wird durch eine höhere Beschleunigungsspannung die Leistung des Elektronenstrahls erhöht.	4	4	
2	a Die Darstellung in Material 3 zeigt, dass die Elektronen eine Energie von etwa 145 keV benötigen, um eine vollständige Aushärtung der Lackschicht zu erreichen. Eine Energie von mindestens 145 keV besitzen die Elektronen, wenn eine Beschleunigungsspannung von 145 kV angelegt wird, da $E_{\text{kin}} = U_B \cdot e$ gilt. Haben die Elektronen eine geringere Energie, dann wird keine vollständige Aushärtung erzielt. Wenn sie eine größere Energie besitzen gibt es einen unnötig hohen Energieeintrag in das Bauteil. Die Beschleunigungsspannung sollte daher 145 kV betragen. b Pro Gramm aufgetragenen Lacks muss eine Energie von 5,0 kJ zugeführt werden. Die Leistung des Elektronenstrahls beträgt $1 \text{ kW} = 1 \text{ kJ/s}$. Daraus ergibt sich eine Bestrahlungszeit von $\frac{5,0 \text{ kJ}}{1 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}} = 5 \text{ s}$. Bei einer Lackschicht mit 80 g/m^2 beträgt die Bestrahlungszeit $5 \frac{\text{s}}{\text{g}} \cdot 80 \frac{\text{g}}{\text{m}^2} = 400 \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$. c Die Energiekosten richten sich nach der Menge des aufgetragenen Lackes. Pro Gramm Lack müssen 5,0 kJ durch den Elektronenstrahl der Lackschicht zugeführt werden. Dieser Wert ist immer gleich und wird mit der vorgegebenen Menge an Lack multipliziert. In diesem	3	4	6

	Beispiel sind dies 80 g pro m². Es ergeben sich somit 80 · 5 kJ pro m² = 400 kJ pro m². Dieser errechnete Wert muss in kWh pro m² angegeben werden, indem durch 3600 geteilt wird, also 400 : 3600 kWh pro m² = 0,111 kWh pro m². Um die Energiekosten pro m² zu erhalten, muss dieser Wert mit dem Strompreis multipliziert werden, also 0,111 · 20 Cent pro m² = 2,22 Cent pro m².			
3	a Die Feldlinien des elektrischen Feldes verlaufen senkrecht zu der Oberfläche. Die Feldlinienrichtung zeigt zu der Oberfläche. Bei zunehmender Aufladung der Oberfläche wird die Feldliniendichte erhöht. b ♦ Auf die Elektronen des Elektronenstrahls wirkt eine Kraft in dem entstehenden elektrischen Feld zwischen Lochanode und Lack-schicht. Diese wirkt in y-Richtung mit Orientierung zur Lochanode. ♦ Durch die wirkende Kraft werden die Elektronen in y-Richtung gebremst. ♦ Die Geschwindigkeit der Elektronen in y-Richtung wird reduziert. ♦ In dem sich ausbildenden elektrischen Feld wirken in x-Richtung keine Kräfte auf die Elektronen. Die Geschwindigkeit der Elektronen in x-Richtung bleibt konstant. ♦ Der Geschwindigkeitsanteil in y-Richtung hat sich gegenüber dem Geschwindigkeitsanteil in x-Richtung verkleinert. ♦ Die resultierende Bewegungsrichtung zeigt weiter nach außen. Der Elektronenstrahl weitet sich auf.	4		5
	Summe¹	11	14	5

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

4 Standardbezug

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

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.

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.