

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

Pool für das Jahr 2025

Aufgaben für das Fach Physik

Kurzbeschreibung

Aufgabentitel	3D-Metalldruck mit Elektronenstrahlen
Anforderungsniveau	erhöht
Inhaltsbereiche	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Elektrische und magnetische Felder <ul style="list-style-type: none"> ◆ Das Feldkonzept zur Beschreibung von Wechselwirkungen <ul style="list-style-type: none"> ◆ Begriff des Feldes am Beispiel von elektrischen und magnetischen Feldern ◆ Elektrische Feldstärke ◆ Körper in statischen Feldern <ul style="list-style-type: none"> ◆ Kräfte auf Körper in homogenen elektrischen und magnetischen Feldern, Bahnformen (qualitativ) ◆ Energiebetrachtungen von Körpern in homogenen elektrischen Feldern ◆ Quantitative Betrachtung von Bahnformen in homogenen Feldern
Materialien	<ul style="list-style-type: none"> ◆ M 1 Aufbau des Geräts zum Elektronenstrahlschmelzen ◆ M 2 Elektrostatische Linse mit Detailvergrößerung ◆ M 3 Ablenkung des Elektronenstrahls ◆ M 4 Technische Daten der Elektronenschmelzanlage ARCAM Q20plus
Quellenangaben	<ul style="list-style-type: none"> ◆ M 2 in Anlehnung an: <ul style="list-style-type: none"> ◆ Spektrumredaktion (2022). <i>Elektronenlinsen</i>. Verfügbar unter: https://www.spektrum.de/lexikon/physik/elektronenlinsen/4102 (Zugriff am: 06.08.2023). ◆ Braun, T. (2009). <i>Entwicklung und Charakterisierung einer Elektronenlinse für abbildende Photoelektronenspektroskopie</i>. Verfügbar unter: https://pure.mpg.de/rest/items/item_736370_3/component/file_736369/content (Zugriff am 06.08.2023) ◆ Hinterberger, F. (2008). <i>Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik</i>. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. ◆ Girwidz, R. (Hg.). <i>E-Feld</i>. Verfügbar unter: https://www.didaktikononline.physik.uni-muenchen.de/programme/e_feld/E_Feld.html (Zugriff am 06.08.2023)

	<ul style="list-style-type: none"> ◆ M 4 in Anlehnung an: <ul style="list-style-type: none"> ◆ GE Additive, <i>Arcam EBM Q20plus</i>. Verfügbar unter: https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-07/EBM_QPlus20_Bro_A4_EN_v1.pdf (Zugriff am: 21.11.2023) ◆ Fraunhofer IFAM. <i>Elektronenstrahlschmelzanlage ARCAM Q20plus</i>. Verfügbar unter: https://www.ifam.fraunhofer.de/content/dam/ifam/de/documents/dd/Datenblaetter_Technologien_Neu/ICAM_Elektronenstrahlschmelzanlage%20Arcam%20Q20plus.pdf (Zugriff am 21.11.2023) ◆ Kahnert, M. (2015). <i>Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)</i>. Verfügbar unter: https://www.mec.ed.tum.de/fileadmin/w00cbp/iwb/Institut/Dissertationen/293_Kahnert_M.pdf (Zugriff am 21.11.2023)
Hilfsmittel	<ul style="list-style-type: none"> ◆ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat¹ ◆ mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung
fachpraktischer Anteil	nein
Hinweise:	

¹ siehe „Hinweise zur Verwendung von Hilfsmitteln“

1 Aufgabe

3D-Metalldruck mit Elektronenstrahlen

Das Elektronenstrahlschmelzen (electron beam melting, EBM) ist ein Verfahren, welches u. a. zur Herstellung von metallischen Bauteilen für die Luft- und Raumfahrt oder von orthopädischen Metallprothesen für die Medizin verwendet wird.

Dabei wird wiederholt eine dünne Schicht Metallpulver mittels Elektronenstrahlen punktuell geschmolzen. Beim Abkühlen bilden sich daraus feste Metallstrukturen. Es handelt sich also um eine Form des 3D-Metalldrucks.

	BE
<p>1 Der Aufbau eines Gerätes zum Elektronenstrahlschmelzen ist in Material 1 dargestellt.</p>	
<p>a Geben Sie die Polung der Spannungsquelle an den Stellen A und B an, siehe Abbildung 2 in Material 1. Begründen Sie, dass der Wehneltzylinder zur Bündelung der Elektronenstrahlen negativ geladen sein muss.</p>	3
<p>b Berechnen Sie die Spannung für den Beschleunigungsabschnitt, welche für die Beschleunigung der Elektronen aus der Ruhe auf die Geschwindigkeit $v_1 = 1,25 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ erforderlich ist.</p>	2
<p>c Erklären Sie, dass das Verfahren nicht funktioniert, wenn in das evakuierte Gerät Luft eindringt.</p>	2
<p>2 Zur Bündelung der Elektronenstrahlen wird eine elektrostatische Linse verwendet, siehe Material 2.</p>	
<p>a Erklären Sie anhand der Abbildung 3 in Material 2, dass die Wirkung der elektrischen Kraft in P_1 den Elektronenstrahl zur Symmetrieachse S hin und in P_2 weg von ihr lenkt.</p>	4
<p>b Bei der elektrostatischen Linse überwiegt die Ablenkung der Elektronenstrahlen zur Symmetrieachse S hin. Stellen Sie die wirkenden elektrischen Kräfte F_1 und F_2, welche auf Elektronen in P_1 und in P_2 wirken, in Abbildung 3 als Kraftpfeile dar. Begründen Sie die Ablenkung des Elektronenstrahls qualitativ anhand der elektrischen Kräfte F_1 und F_2 und der Aufenthaltszeit der Elektronen in den Bereichen um P_1 und um P_2.</p>	6
<p>3 Die Ablenkung des Elektronenstrahls wird mithilfe eines homogenen magnetischen Feldes gesteuert.</p>	
<p>a Ermitteln Sie die erforderliche magnetische Flussdichte für die im Material 3 beschriebene Ablenkung. [Kontrollwert: $r = 0,47 \text{ m}$]</p>	6
<p>b Erklären Sie, dass statische magnetische Felder den Elektronen keine Energie zuführen können.</p>	3

- 4** Für den Schmelzvorgang werden Elektronen mit Geschwindigkeiten benötigt, die größer als die bisher betrachteten Geschwindigkeiten sind. Um den Schmelzvorgang mit einem fokussierten Strahl aus so energiereichen Elektronen durchführen zu können, sind in den drei Abschnitten
- I) Elektronenstrahlsystem,
 - II) elektrostatische Linse,
 - III) Ablenkmagnet,
- Änderungen notwendig.
Stellen Sie für jeden der drei Abschnitte eine Hypothese darüber auf, welche Änderung dort erforderlich ist. Effekte der speziellen Relativitätstheorie sind nicht zu berücksichtigen.
- 5** In Material 4 sind Gerätedaten einer Elektronenstrahlschmelzanlage dargestellt. Beim Betrieb des Gerätes müssen Gefahren für die Gesundheit von Menschen, die sich in unmittelbarer Nähe der Anlage aufhalten, ausgeschlossen werden.
- Analysieren Sie zwei Angaben aus den technischen Gerätedaten der Tabelle in Material 4 unter physikalischen Gesichtspunkten hinsichtlich möglicher Risiken für die Gesundheit von Menschen und nennen Sie Sicherheitsmaßnahmen zur Verringerung dieser Risiken.

2 Material

Material 1: Aufbau des Geräts zum Elektronenstrahlschmelzen

Beim Herstellungsprozess eines Bauteils wird das Metallpulver in der Arbeitsebene dadurch geschmolzen, dass durch einen Elektronenstrahl Energie übertragen wird. Nach dem Schmelzvorgang kühlt das Pulver ab und bildet feste Metallstrukturen.

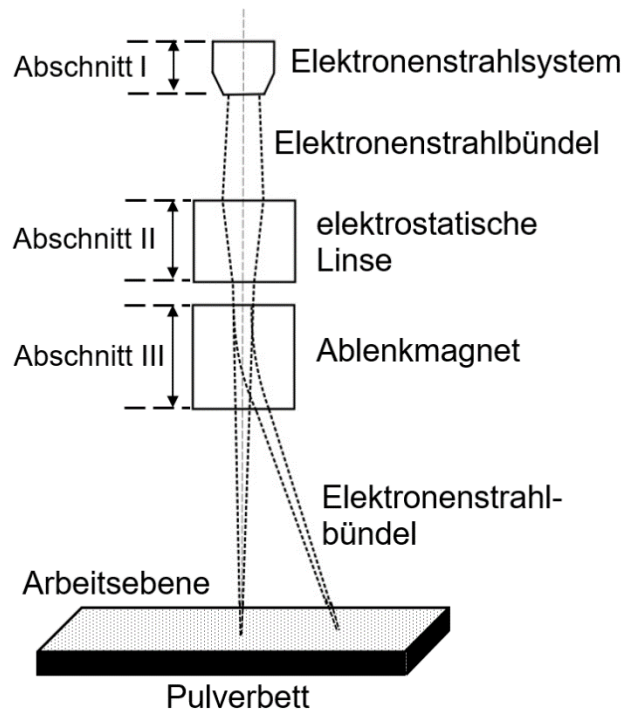
Der Weg des Elektronenstrahlbündels ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

Im Abschnitt I des Elektronenstrahlsystems wird die Geschwindigkeit der Elektronen erhöht.

Die elektrostatische Linse im Abschnitt II dient dazu, den Elektronenstrahl in einem Punkt der Arbeitsebene zu konzentrieren.

Durch den Ablenkmagneten im Abschnitt III kann der Auftreffort der Elektronenstrahlen in der Arbeitsebene verschoben werden.

Abb. 1: Weg des Elektronenstrahls



Im Elektronenstrahlsystem treten Elektronen am Ende des Beschleunigungsabschnittes als Elektronenstrahlbündel aus der kreisförmigen Öffnung aus, siehe Abbildung 2. Der sogenannte Wehneltzylinder ist eine zylinderförmige Röhre, welche die Elektronenquelle umschließt. In Abbildung 2 ist der Wehneltzylinder räumlich dargestellt.

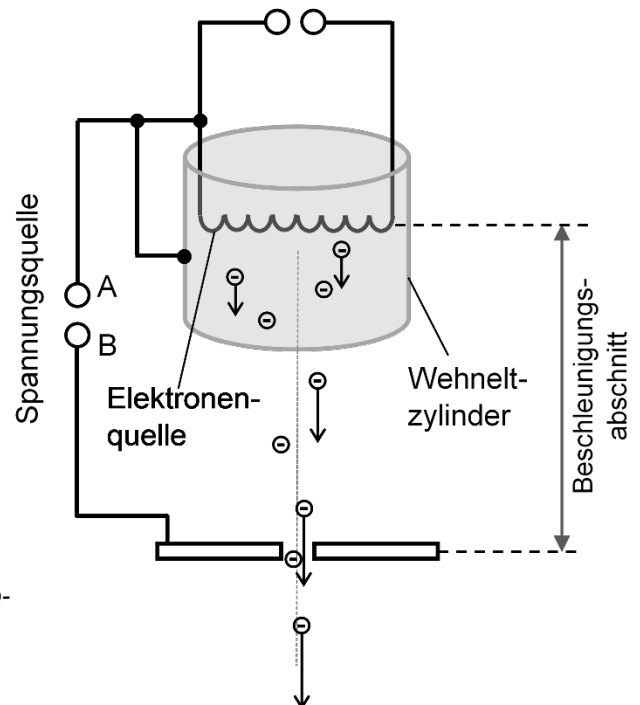


Abb. 2: Schematische Darstellung des Beschleunigungsabschnitts des Elektronenstrahlsystems

Material 2: Elektrostatische Linse

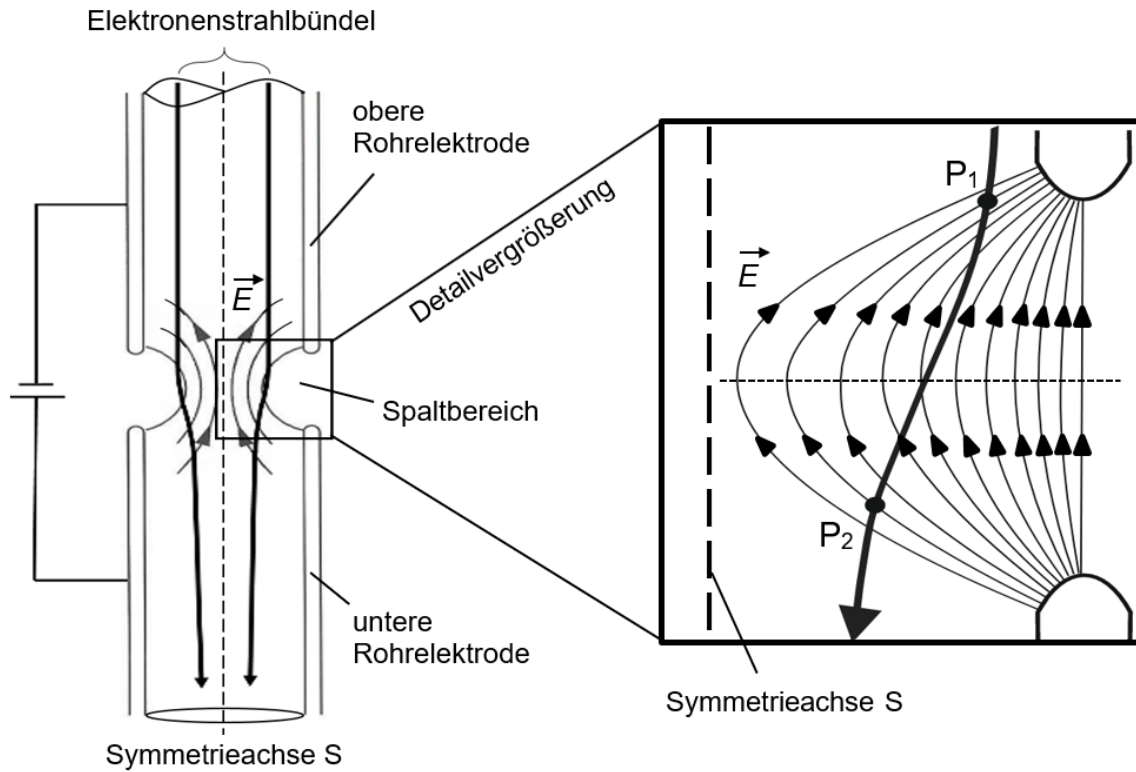


Abb. 3: Schematischer Längsschnitt einer elektrostativen Linse

Im linken Teil der Abbildung 3 ist der Aufbau und die Funktion der elektrostativen Linse dargestellt. Sie besteht aus zwei Metallröhren als Elektroden mit gemeinsamer Symmetrieachse S , die durch einen Spalt getrennt sind und sich auf unterschiedlichem elektrischem Potenzial befinden. Die elektrostativen Linse dient zur Bündelung der Elektronenstrahlen. Der rechte Teil der Abbildung 3 zeigt eine Detailvergrößerung des Spaltbereichs. Die elektrischen Feldlinien sind im Inneren des Zylinders schematisch dargestellt. Der Spaltbereich wird durch eine gestrichelte Linie in eine obere und untere Hälfte unterteilt. Der Verlauf des Elektronenstrahls vom Bereich P_1 zum Bereich P_2 ist idealisiert abgebildet.

Material 3: Ablenkung des Elektronenstrahls

Zur Ablenkung des Elektronenstrahls wird ein homogenes magnetisches Feld mit der Breite $b = 9,0 \text{ cm}$ verwendet, dessen Feldlinien senkrecht aus der Zeichenebene heraus gerichtet sind, siehe Abbildung 4.

Die Elektronen treten mit einer Geschwindigkeit von $2,4 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in das Magnetfeld ein und werden um einen Winkel von $\alpha = 11^\circ$ aus ihrer ursprünglichen Bewegungsrichtung abgelenkt.

Die Abbildung ist nicht maßstäblich.

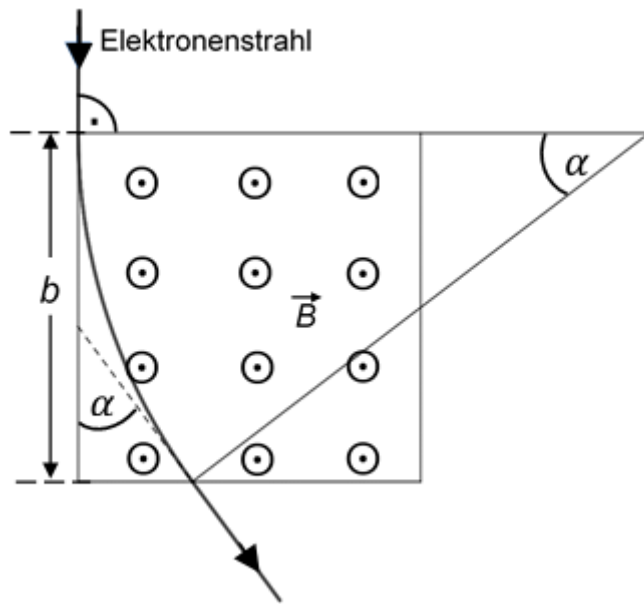


Abb. 4: Ablenkung des Elektronenstrahls

Material 4: Technische Daten einer Elektronenschmelzanlage

Tab. 1: Technische Daten der Elektronenschmelzanlage ARCAM Q20plus

Prinzip Pulverbettverfahren: Aufbringen dünner Schichten eines fließfähigen Pulvers mit der Korngröße $15 - 50 \mu\text{m}$.	
Werkstoffe	u.a. Titan, Kupfer, Stahl
max. Größe des gefertigten Teils	$\varnothing 350 \text{ mm}$, h 380 mm
Beschleunigungsspannung	60 kV
Stromstärke und Leistung des Elektronenstrahls	50 mA, 3 kW
Pulverbetttemperatur	bis 800°C
Masse	2900 kg

3 Erwartungshorizont

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

		BE/AFB		
		I	II	III
1	<p>a A: negative Polung B: positive Polung Gleichnamige Ladungen üben wechselseitig Kräfte aufeinander aus und stoßen sich ab. Elektronen werden durch den negativ geladenen Zylinder von diesem abgestoßen und somit zur Zylindermitte hingelenkt.</p>	1	2	
	<p>b</p> $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = e \cdot U_1$ $U_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m \cdot v^2}{e} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_e \cdot \left(1,25 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{e} = 444 \text{ V}$	2		
	<p>c Ohne Vakuum findet eine Wechselwirkung der Elektronen mit den Gasmolekülen der Atmosphäre statt. Dabei können die Elektronen abgelenkt werden und geben Energie an die Gasmoleküle ab.</p>	2		
2	<p>a Die elektrische Kraft im elektrischen Feld ist tangential zu den Feldlinien gerichtet. Die Kraft, die auf die Elektronen wirkt, weist in die entgegengesetzte Richtung wie die Feldlinien, bei P_1 also nach links unten und damit zur Elektronenstrahlmitte hin, bei P_2 nach rechts unten und damit von der Elektronenstrahlmitte weg.</p>		4	
	<p>b Gründe, weshalb die ablenkende Wirkung zur Symmetrieachse hin überwiegt:</p> <p>Um P_1 ist die Feldliniendichte größer als um P_2, weshalb auch die Feldstärke und damit die Kraft F_1 größer ist als die Kraft F_2. In der elektrostatischen Linse werden die Elektronen zur positiv geladenen Röhre hin beschleunigt. Deshalb sind sie im Bereich um P_2 schneller als im Bereich um P_1, weshalb die elektrische Kraft in P_2 eine geringere Zeit wirkt als die elektrische Kraft in P_1.</p> <p style="text-align: center;">Symmetrieachse S</p>		4	2
3	<p>a</p> $b = 0,090 \text{ m}; v = 2,4 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}; \alpha = 11^\circ$ $\sin \alpha = \frac{b}{r} \rightarrow r = \frac{b}{\sin \alpha}$ <p>Alternativ: Bestimmung von $r = 0,47 \text{ m}$ mithilfe einer Konstruktion</p>		6	

	$F_L = F_Z \rightarrow e \cdot v \cdot B = m_e \cdot \frac{v^2}{r} \rightarrow e \cdot v \cdot B = m_e \cdot \frac{v^2 \cdot \sin \alpha}{b}$ $B = \frac{m_e \cdot v \cdot \sin \alpha}{b \cdot e} = \frac{m_e \cdot 2,4 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sin 11^\circ}{0,09 \text{ m} \cdot e} = 0,29 \text{ mT}$ <p>b Auf bewegte elektrische Ladungen im Magnetfeld wirkt die Lorentzkraft. Da diese stets senkrecht zur Bewegungsrichtung wirkt, kann sie nur die Richtung, nicht aber den Betrag der Geschwindigkeit verändern. Die kinetische Energie der Elektronen bleibt somit konstant.</p>			
4	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Beschleunigungsabschnitt: Größere Beschleunigungsspannung, um schnellere Elektronen zu erhalten. ◆ Elektrostatische Linse: Größere Spannung, um dieselbe Fokussierung zu erreichen, da sich die Elektronen kürzere Zeit in der elektrostatischen Linse aufhalten. ◆ Ablenkmagnet: Größere magnetische Flussdichte B, um dieselbe Ablenkung zu erreichen, da B proportional zur Geschwindigkeit der Elektronen ist. 	2		3
5	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Aufgrund der hohen Beschleunigungsspannungen entsteht Röntgenstrahlung durch das Abbremsen der energiereichen Elektronen an der Bearbeitungsoberfläche. Als Schutzmaßnahmen werden ein Strahlenmessgerät und eine Bleiabschirmung gegen ionisierende Strahlen empfohlen, um die Strahlenbelastung zu minimieren. ◆ Beim Schmelzvorgang entstehen Temperaturen am Bauteil von über 800 °C. Schutzkleidung und hitzebeständige Handschuhe verringern die Verbrennungsgefahr beim Umgang mit den noch nicht abgekühlten Bauteilen. <p>Weitere mögliche Lösungen: Die Pulvergröße beträgt 15 µm. Feinstäube sind für die Atemwege gefährlich. Lüftungsanlagen und Atemmasken verringern die Risiken einer Atemwegserkrankung. Beim Schmelzvorgang treten hohe Temperaturen auf, deshalb ist der Schmelzpunkt sehr hell und intensiv. Getönte Sichtfenster und Schutzbrillen verringern das Risiko, die Augen zu schädigen.</p>	3		3
	Summe²	13	19	8

² 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			
b	3			
c	1			
2 a			3	
b	1		6	
3 a	7			
b	3			
4		2		
5			3	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.

Für die Bewertung der Gesamtleistung eines Prüflings ist ein Bewertungsraster³ vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

³ Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.