

Gemeinsame Aufgabenpools der Länder

## Pool für das Jahr 2025

Aufgaben für das Fach Biologie

### Kurzbeschreibung

<b>Aufgabentitel</b>	<b>Cyanobakterien als Fotosynthesespezialisten</b>
<b>Anforderungsniveau</b>	erhöht
<b>Inhaltsbereiche</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Leben und Energie</li> <li>◆ Grundlegende Zusammenhänge bei Stoffwechselwegen             <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Stofftransport zwischen Kompartimenten</li> </ul> </li> <li>◆ Aufbauender Stoffwechsel             <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Funktionelle Anpasstheit: Feinbau Chloroplast</li> <li>◆ Abhängigkeit der Fotosyntheserate von abiotischen Faktoren</li> <li>◆ Calvin-Zyklus: Fixierung, Reduktion, Regeneration</li> </ul> </li> </ul>
<b>Materialien</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ M 1 Rubisco bei Tabakpflanzen und Cyanobakterien</li> <li>◆ M 2 Besonderheiten der lichtunabhängigen Reaktion der Fotosynthese bei Cyanobakterien</li> <li>◆ M 3 Carboxylase- und Oxygenase-Aktivität der Rubisco</li> <li>◆ M 4 Wachstum genetisch veränderter Tabakpflanzen</li> </ul>
<b>Quellenangaben</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ M 1 Davidi, D. et al. (2020). Highly active rubiscos discovered by systematic interrogation of natural sequence diversity. <i>The EMBO Journal</i>, 39 (10), p. 6. doi.org/10.15252/emj.2019104081</li> <li>◆ M 2             <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Abb. 2: Espie, G. S., Kimber, M. S. (2011). Carboxysomes: cyanobacterial RubisCO comes in small packages. <i>Photosynth Res</i>, 109, p. 7–20. https://media.springernature.com/m312/springer-static/image/art%3A10.1007%2Fs11120-011-9656-y/MediaObjects/11120_2011_9656_Fig1_HTML.gif?as=webp (letzter Zugriff am 25.01.2024)</li> <li>◆ Abb. 3: Wang H. &amp; Yan X. et al. (2019). Rubisco condensate formation by CcmM in <math>\beta</math>-carboxysome biogenesis. <i>Nature</i>, 566, p. 131–135. doi.org/10.1038/s41586-019-0880-5</li> </ul> </li> <li>◆ M 3 Tab. 1: https://o.quizlet.com/kqWUrETteXGYK1TSx-OKEg.png (letzter Zugriff am 25.01.2024)</li> <li>◆ M 4</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Tab. 2: Long, B. M. et al. (2018). Carboxysome encapsulation of the CO<sub>2</sub>-fixing enzyme RuBisCO in tobacco chloroplasts. Nat Commun, 9, p. 3570. doi.org/10.1038/s41467-018-06044-0</li> <li>Tab. 2: Lin, M. T. et al. (2014). A faster Rubisco with potential to increase photosynthesis in crops. Nature, 513, p. 547–550 doi: 10.1038/nature13776</li> <li>◆ Wang H. &amp; Yan X. et al. (2019). Rubisco condensate formation by CcmM in β-carboxysome biogenesis. Nature, 566, p. 131–135. doi.org/10.1038/s41586-019-0880-5</li> <li>◆ Hayer-Hartl, M. (2019). Zusatzantrieb für die Photosynthese. MPI für Biochemie, Martinsried. <a href="https://www.biochem.mpg.de/20190123-wang-hayerhartl">https://www.biochem.mpg.de/20190123-wang-hayerhartl</a> (letzter Zugriff am 25.01.2024)</li> <li>◆ Chen, T. et al. (2023) Engineering α-carboxysomes into plant chloroplasts to support autotrophic photosynthesis. Nat Commun, 14, p. 2118. doi.org/10.1038/s41467-023-37490-0 vergleiche auch: <a href="https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/photosynthese-optimieren">https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/journal/photosynthese-optimieren</a> (letzter Zugriff am 25.01.2024)</li> </ul>
<b>Hilfsmittel</b>	◆ digitales Hilfsmittel, das mindestens die Funktionalität eines WTR hat <sup>1</sup>
<b>fachpraktischer Anteil</b>	◆ nein
<b>Hinweise:</b>	◆ keine

<sup>1</sup> siehe „Hinweise zur Verwendung von Hilfsmitteln“

## 1 Aufgabe

---

### Cyanobakterien als Fotosynthespezialisten

Cyanobakterien, die weltweit in verschiedenen Gewässern und im Boden vorkommen, sind Bakterien, die zur Fotosynthese fähig sind. Neben vielen Gemeinsamkeiten weist die Fotosynthese der Cyanobakterien im Vergleich zur Fotosynthese grüner Pflanzen auch einige für Forschende interessante Unterschiede auf. In verschiedenen Forschungsansätzen wird versucht, diese Besonderheiten für grüne Pflanzen nutzbar zu machen.

	<b>BE</b>
<p><b>1</b> Fertigen Sie eine beschriftete Skizze des elektronenmikroskopisch erkennbaren Aufbaus eines Chloroplasten an. Erläutern Sie am Beispiel der Thylakoide in Chloroplasten von Pflanzen den Zusammenhang zwischen Struktur und Funktion anhand von zwei Aspekten.</p>	9
<p><b>2</b> Vergleichen Sie die beiden Kurven in Abbildung 1 und leiten Sie Unterschiede hinsichtlich der Enzymaktivität der beiden Rubiscos ab (M 1).</p>	8
<p><b>3</b> Beschreiben Sie die in Material 2 dargestellten Vorgänge der Kohlenstoffdioxidfixierung bei Cyanobakterien. Erläutern Sie, wie es dadurch zu einer größeren Effizienz der Fotosynthese von Cyanobakterien bei höheren CO<sub>2</sub>-Konzentrationen kommt. (M 2, M 3).</p>	14
<p><b>4</b> Stellen Sie eine Hypothese über das relative Pflanzenwachstum in den Versuchsansätzen A, B und dem Kontrollansatz (Tabelle 2) im Vergleich zueinander auf (M 1, M 2, M 4).</p>	9

## 2 Material

### Material 1: Rubisco bei Tabakpflanzen und Cyanobakterien

Das Enzym Rubisco bindet im Calvin-Zyklus Kohlenstoffdioxid und überträgt es auf den Akzeptor Ribulose-1,5-bisphosphat. In einem Experiment wurden Cyanobakterien und Tabakpflanzen unter Sauerstoffausschluss verschiedenen  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen ausgesetzt und die Geschwindigkeit der Kohlenstoffdioxidfixierung durch die jeweilige Rubisco gemessen (Abb. 1).

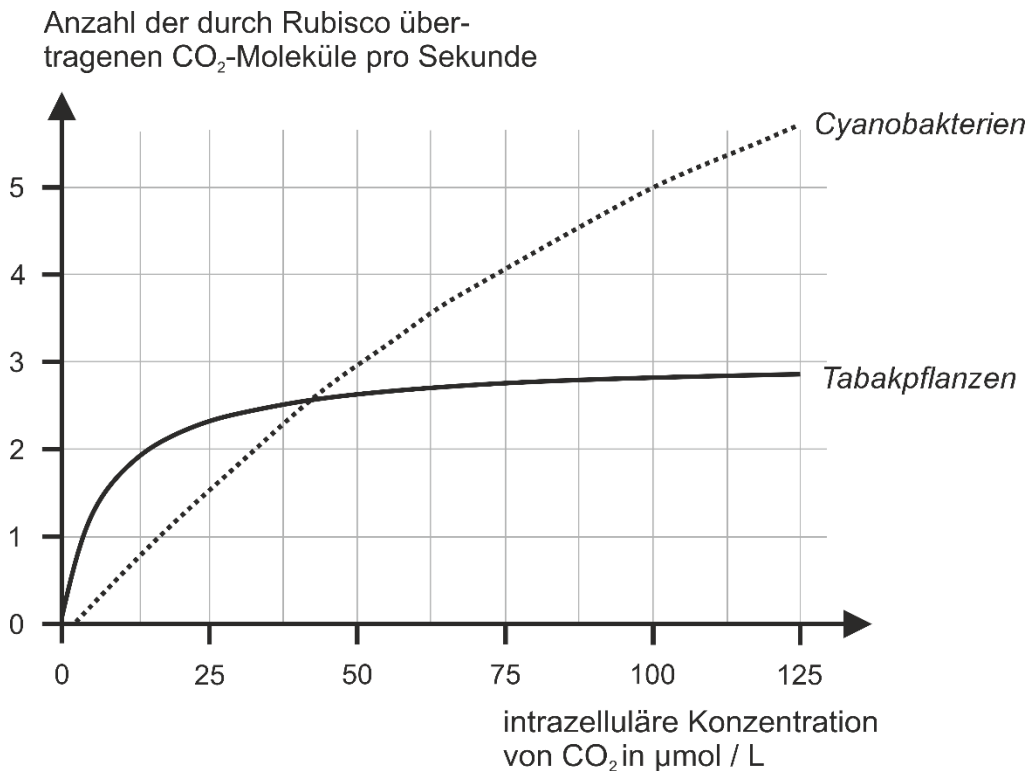


Abb. 1:  $\text{CO}_2$ -Fixierungsrate der Rubisco von Tabakpflanzen und der Rubisco von Cyanobakterien (in Anlehnung an: Davidi et al., 2020, p. 6)

## Material 2: Besonderheiten der lichtunabhängigen Reaktion der Fotosynthese bei Cyanobakterien

Cyanobakterien besitzen keine Chloroplasten, dennoch betreiben sie wie grüne Pflanzen Fotosynthese. Im Zellinneren der Cyanobakterien befinden sich dafür u. a. spezielle Kompartimente, die sogenannten Carboxysomen. Diese sind durch eine Proteinhülle, die nicht für alle Stoffe permeabel ist, vom Cytoplasma abgegrenzt. Carboxysomen enthalten die Enzyme Rubisco und Carboanhydrase (Abb. 2).

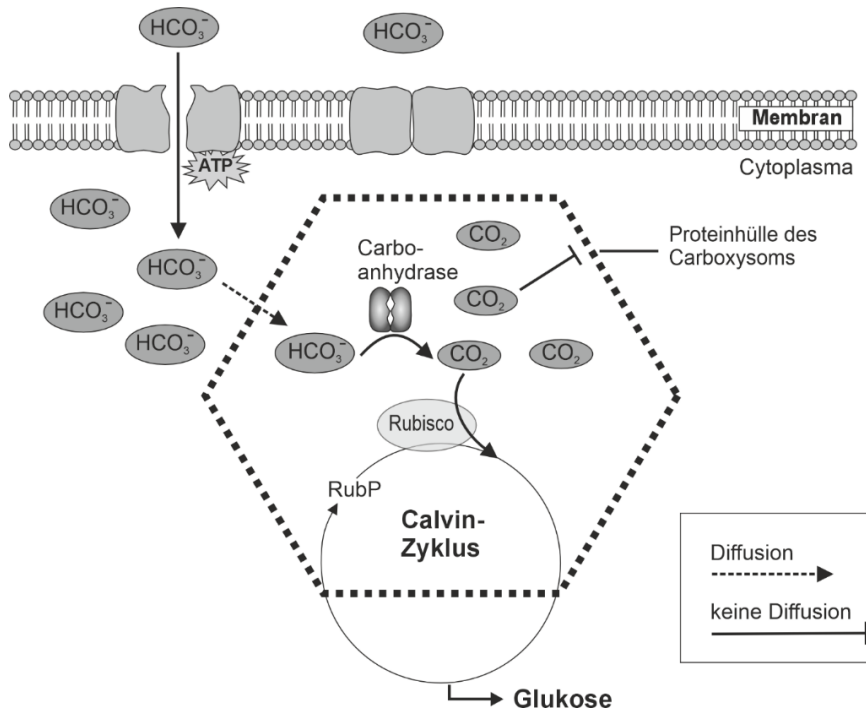


Abb. 2: Stoffwechselweg der Kohlenstoffdioxidfixierung in Cyanobakterien (Hinweis: Hydrogencarbonat-Ionen =  $\text{HCO}_3^-$  werden aus der Umgebung aufgenommen, RubP = Ribulose-1,5-bisphosphat) (in Anlehnung an: Espie & Kimber, 2011)

## Material 3: Carboxylase- und Oxygenase-Aktivität der Rubisco

Das Enzym Rubisco kann in allen fotosynthesebetreibenden Organismen sowohl als Carboxylase als auch als Oxygenase arbeiten. Die Aktivität als Carboxylase oder Oxygenase ist abhängig von der intrazellulären  $\text{CO}_2$ - und  $\text{O}_2$ -Konzentration. Ist Rubisco als Carboxylase aktiv, überträgt sie im Calvin-Zyklus Kohlenstoffdioxid auf den Akzeptor Ribulose-1,5-bisphosphat. Als Oxygenase überträgt sie alternativ Sauerstoff auf Ribulose-1,5-bisphosphat. Bei diesem als Fotorespiration bezeichneten Vorgang wird im Gegensatz zum Calvin-Zyklus keine Glukose gebildet. Die Fotorespiration vermindert die Effizienz der Fotosynthese.

In einem Experiment wurden Tabakpflanzen unterschiedlichen Konzentrationen an Kohlenstoffdioxid ausgesetzt und dabei die Carboxylase-Aktivität und Oxygenase-Aktivität der Rubisco gemessen. Eine intrazelluläre  $\text{CO}_2$ -Konzentration von  $6 \mu\text{mol/L}$  entspricht dem Anteil an Kohlenstoffdioxid in der Luft von ca. 0,039 %.

Tabelle 1: Einfluss unterschiedlicher  $\text{CO}_2$ -Konzentrationen auf die Rubisco-Aktivität

Intrazelluläre $\text{CO}_2$ -Konzentration in $\mu\text{mol/L}$	Verhältnis der Carboxylase- zur Oxygenase-Aktivität
6	68 : 32
18	89 : 11
60	98 : 2

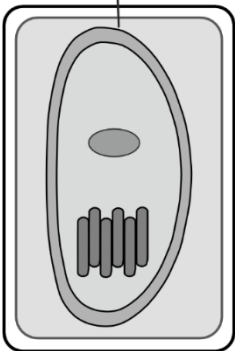
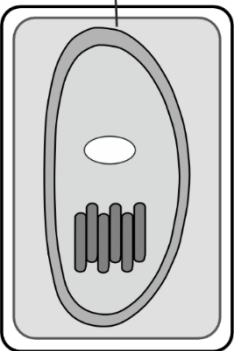
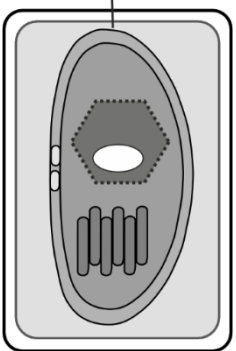
(<https://o.quizlet.com/kqWUrETteXGYK1TSx-OKEg.png>)

### Material 4: Wachstum genetisch veränderter Tabakpflanzen

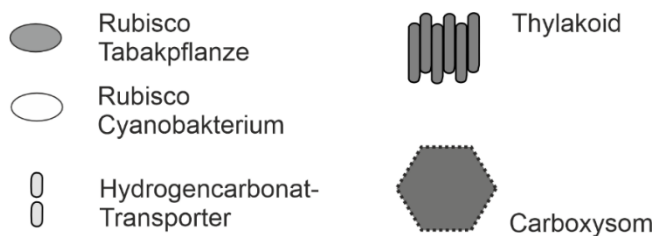
In einem Experiment wurde versucht, bestimmte Eigenschaften von Cyanobakterien auf Tabakpflanzen zu übertragen. Hierzu schaltete man in Ansatz A die spezifische Rubisco der Tabakpflanze genetisch aus. Danach wurden Gene der Cyanobakterien in die Chloroplasten der Tabakpflanzen übertragen, die die Information zur Ausbildung der spezifischen Rubisco der Cyanobakterien codieren. Im Ansatz B wurden weitere Gene der Cyanobakterien auf die Tabakpflanze übertragen, die für die CO<sub>2</sub>-Fixierung notwendige Genprodukte exprimieren. Die Konzentration an Kohlenstoffdioxid (0,039 %) und Sauerstoff (21 %) außerhalb der Pflanze wurde bei allen Ansätzen konstant gehalten. Tabelle 2 zeigt die Versuchsansätze, mit denen das Wachstum der genetisch veränderten Tabakpflanzen experimentell untersucht wurde.

(in Anlehnung an: Wang & Yan et al., 2019, Chen et al., 2023)

Tabelle 2: Experiment zum Wachstum genetisch veränderter Tabakpflanzen

	Kontrollansatz	Ansatz A	Ansatz B
<b>Veränderungen auf zellulärer Ebene</b>	keine genetischen Veränderungen  Chloroplast 	Gen für Rubisco der Cyanobakterien  Chloroplast 	Ansatz A + Gene für Hydrogencarbonat-Transporter und Carboxysomen  Chloroplast 
<b>intrazelluläre Konzentration von CO<sub>2</sub></b>	6 µmol/L im Stroma	6 µmol/L im Stroma	60 µmol/L im Carboxysom

Legende:



(in Anlehnung an: Long et al., 2018, Lin et al., 2014)

### 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	Skizzieren und beschriften: <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Doppelmembran, Stroma- und Granathylakoide, Stroma, DNA, Ribosomen, Stärkekorn</li> </ul>	5		
	Erläutern: <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Oberfläche der inneren Membran um ein Vielfaches vergrößert → große Anzahl eingelagerter Pigmente → Absorptionsfläche für Licht erhöht → optimierte Lichtausbeute für die Fotosynthese</li> <li>◆ Kompartimentierung ermöglicht Abgrenzung des Thylakoidinnenraums vom Stroma → Ablauf der Primär- und Sekundärreaktion der Fotosynthese in den Chloroplasten parallel zueinander möglich.</li> </ul>	4		
2	Vergleichen: <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Die Anzahl der durch Rubisco übertragenen CO<sub>2</sub>-Moleküle pro Sekunde steigt bei beiden Rubisco-Varianten mit zunehmender intrazellulärer Konzentration an CO<sub>2</sub>.</li> <li>◆ Bis zu einer intrazellulären CO<sub>2</sub>-Konzentration von ca. 40 µmol/L ist die Anzahl der durch Rubisco pro Sekunde übertragenen CO<sub>2</sub>-Moleküle bei Tabakpflanzen höher als bei Cyanobakterien. Bei CO<sub>2</sub>-Konzentrationen höher als 40 µmol/L ist die Anzahl der durch Rubisco übertragenen CO<sub>2</sub>-Moleküle bei Tabakpflanzen geringer als bei Cyanobakterien.</li> <li>◆ Bei CO<sub>2</sub>-Konzentrationen unter 40 µmol/L ist die Geschwindigkeit der Kohlenstoffdioxidfixierung durch die Rubisco der Tabakpflanzen höher als die der Cyanobakterien. Die CO<sub>2</sub>-Fixierung der Tabakpflanzen erreicht ab ca. 75 µmol/L eine Sättigung, so dass die Geschwindigkeit nicht weiter als ca. 3 Moleküle CO<sub>2</sub> pro Sekunde gesteigert werden kann.</li> <li>◆ Bei CO<sub>2</sub>-Konzentrationen über 40 µmol/L ist die Geschwindigkeit der Kohlenstoffdioxidfixierung durch die Rubisco der Cyanobakterien höher als die der Tabakpflanzen. Die Geschwindigkeit der Kohlenstoffdioxidfixierung durch die Rubisco der Cyanobakterien steigt weiter an, da die maximale Geschwindigkeit noch nicht erreicht ist.</li> </ul>	3	2	
	Ableiten: <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Enzymaktivität der Rubisco der Tabakpflanze ist bei geringer intrazellulärer CO<sub>2</sub>-Konzentration deutlich höher als die der Rubisco der Cyanobakterien</li> <li>◆ Enzymaktivität der Rubisco der Tabakpflanze erreicht bei geringerer intrazellulärer CO<sub>2</sub>-Konzentration ihr Maximum</li> <li>◆ Rubisco der Cyanobakterien ist bei hoher intrazellulärer CO<sub>2</sub>-Konzentration aktiver als die der Tabakpflanzen</li> </ul>		3	

<p><b>3</b></p>	<p><b>Beschreiben:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Vorhandensein von Carboxysomen zur Anreicherung von CO<sub>2</sub> für Calvinzyklus</li> <li>◆ Anreicherung von Hydrogencarbonat-Ionen im Cytoplasma durch aktiven Transport von Hydrogencarbonat-Ionen aus der Umgebung in das Cytoplasma → Aufbau eines Konzentrationsgefälles zwischen Cytoplasma und Carboxysomen → Diffusion von Hydrogencarbonat-Ionen durch die selektiv permeable Proteinhülle der Carboxysomen → Umwandlung von Hydrogencarbonat-Ionen in CO<sub>2</sub> durch Carboanhydrase → Anreicherung von CO<sub>2</sub>, da CO<sub>2</sub> die Carboxysomen nicht verlassen kann.</li> </ul> <p><b>Erläutern:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Rubisco als Carboxylase → Glukosebildung möglich</li> <li>Rubisco als Oxygenase → keine Glukosebildung möglich</li> <li>→ Effizienz der Fotosynthese wird erhöht, wenn die Aktivität der Rubisco als Carboxylase gesteigert werden kann</li> <li>→ Förderung der Rubisco als Carboxylase durch Erhöhung der intrazellulären CO<sub>2</sub>-Konzentration</li> <li>→ Erhöhung der intrazellulären CO<sub>2</sub>-Konzentration durch beschriebenen Fixierungsmechanismus in den Carboxysomen</li> </ul> <p><b>Fazit:</b> Angepasstheit führt zur Effizienzsteigerung der Fotosynthese durch Erhöhung der intrazellulären CO<sub>2</sub>-Konzentration</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>→ schnellere Übertragung von CO<sub>2</sub> auf Ribulose-1,5-bisphosphat</li> <li>→ gesteigerter Ablauf des Calvin-Zyklus</li> <li>→ mehr Glukosebildung</li> </ul>	<p>6</p>	<p>4</p>	<p>4</p>
<p><b>4</b></p>	<p><b>Aufstellen einer Hypothese:</b></p> <p><b>Ansatz A:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Hypothese: In Ansatz A ist theoretisch ein geringeres Pflanzenwachstum als beim Kontrollansatz und Ansatz B zu erwarten.</li> <li>◆ Begründung: Rubisco der Cyanobakterien weist bei geringer intrazellulärer CO<sub>2</sub>-Konzentration geringere Aktivität auf → ineffizienter Calvin-Zyklus → geringere Glukosebildung → geringeres Wachstum im Vergleich zum Ansatz B fehlt der restliche CO<sub>2</sub>-Fixierungsmechanismus → kein Vorteil</li> </ul> <p><b>Ansatz B:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>◆ Hypothese: Bei diesem Ansatz ist theoretisch ein stärkeres Wachstum der Tabakpflanze im Vergleich zu den anderen Ansätzen im Experiment zu erwarten.</li> <li>◆ Begründung:                     <ul style="list-style-type: none"> <li>Exprimieren der Proteine zum Aufbau der Carboxysomen und der Hydrogencarbonat-Ionen-Transporter → vollständiger CO<sub>2</sub>-Fixierungsmechanismus im Vergleich zu Ansatz A → Erhöhung der intrazellulären CO<sub>2</sub>-Konzentration</li> <li>CO<sub>2</sub>-Konzentration im Carboxysom liegt bei 60 µmol/L → hohe Carboxylase-Aktivität der Rubisco gegenüber dem Kontrollexperiment und Ansatz A → Aufbau von Glucose wird gesteigert → mehr Wachstum möglich</li> </ul> </li> </ul>	<p>4</p>	<p>5</p>	<p>5</p>

<b>Summe<sup>2</sup></b>	<b>12</b>	<b>19</b>	<b>9</b>
--------------------------	-----------	-----------	----------

<sup>2</sup> 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<sup>3</sup>

---

Teilaufgabe	Kompetenzbereich			
	S	E	K	B
1	1, 3		9	
2	6	9	5	
3	1, 3	9	2	
4	4, 6	3, 9	2, 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 Bewertungsraster<sup>4</sup> vorgesehen, das angibt, wie die in den drei Prüfungsteilen insgesamt erreichten Bewertungseinheiten in Notenpunkte umgesetzt werden.

<sup>3</sup> Zu jeder Teilaufgabe sind zu jedem Kompetenzbereich die Nummern der Standards gemäß den Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife genannt, die zur Bearbeitung der Teilaufgabe erforderlich sind.

<sup>4</sup> Das Bewertungsraster ist Teil des Dokuments „Beschreibung der Struktur“, das auf den Internetseiten des IQB zum Download bereitsteht.