



<https://moodle.lmu.de> → Kurse suchen: 'Rechenmethoden'

Blatt 03: Vektorprodukt, Raumkurven, Linienintegrale

Ausgabe: Mo 01.11.21 Zentralübung: Do 04.11.21 Abgabe: Do 11.11.21, 14:00

(b)[2](E/M/A) bedeutet: Aufgabe (b) zählt 2 Punkte und ist einfach/mittelschwer/anspruchsvoll
Vorschläge für Zentralübung: Beispielaufgaben 3, 6, 7, 4.
Videos existieren für Beispielaufgaben 4 (L4.3.1), 8 (V1.4.1).

Beispielaufgabe 1: $1/(1-x^2)$ -Integrale mittels hyperbolischer Substitution [3]

Punkte: (a)[1](E); (b)[2](M).

Für Integrale, die $1/(1-x^2)$ enthalten, empfiehlt sich die hyperbolische Substitution $x = \tanh y$, denn dadurch erhält man $1-x^2 = \operatorname{sech}^2 y$. Berechnen Sie mittels dieser Substitution folgende Integrale $I(z)$; überprüfen Sie Ihre Ergebnisse durch Berechnung von $\frac{dI(z)}{dz}$.
[Kontrollergebnis: (a) $I(\frac{3}{5}) = \ln 2$; (b) für $a = 3$, $I(\frac{1}{5}) = \frac{1}{6} \ln 2 + \frac{5}{32}$.]

$$(a) I(z) = \int_0^z dx \frac{1}{1-x^2} \quad (|z| < 1), \quad (b) I(z) = \int_0^z dx \frac{1}{(1-a^2x^2)^2} \quad (|az| < 1).$$

Hinweis: Das in (b) nach der Substitution auftretende $\cosh^2 y$ -Integral lässt sich partiell integrieren.

Beispielaufgabe 2: Elementare Vektorrechnung [3]

Punkte: (a)[1](E); (b)[1](E); (c)[1](E)

Gegeben sind die Vektoren $\mathbf{a} = (4, 3, 1)^T$ und $\mathbf{b} = (1, -1, 1)^T$.

(a) Berechnen Sie $\|\mathbf{b}\|$, $\mathbf{a} - \mathbf{b}$, $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ und $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$.

(b) Zerlegen Sie $\mathbf{a} \equiv \mathbf{a}_{\parallel} + \mathbf{a}_{\perp}$ in zwei Vektoren parallel und senkrecht zu \mathbf{b} .

(c) Berechnen Sie $\mathbf{a}_{\parallel} \cdot \mathbf{b}$, $\mathbf{a}_{\perp} \cdot \mathbf{b}$, $\mathbf{a}_{\parallel} \times \mathbf{b}$ und $\mathbf{a}_{\perp} \times \mathbf{b}$. Entsprechen die Ergebnisse der Erwartung?

[Ergebniskontrolle: (a) $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + \sum_i (\mathbf{a} \times \mathbf{b})^i = -4$, (b) $\sum_i (\mathbf{a}_{\parallel})^i = \frac{2}{3}$, $\sum_i (\mathbf{a}_{\perp})^i = 7\frac{1}{3}$.]

Beispielaufgabe 3: Levi-Civita-Symbol [3]

Punkte: (a)[1](E); (b)[1](E); (c)[1](E).

(a) Ist die Aussage $a^i b^j \epsilon_{ij2} \stackrel{?}{=} -a^k \epsilon_{k2l} b^l$ wahr oder falsch? Begründen Sie Ihre Antwort.

Drücken Sie die folgenden k -Summen über Produkte von zwei Levi-Civita-Symbolen durch Kronecker-delta-Symbole aus. Überprüfen Sie ihre Ergebnisse, indem Sie die k -Summen explizit ausführen und jeden Term separat auswerten.

(b) $\epsilon_{1ik} \epsilon_{kj1}$, (c) $\epsilon_{1ik} \epsilon_{kj2}$.

Beispielaufgabe 4: Grassmann-Identität (BAC-CAB) und Jacobi-Identität [5]

Punkte: (a)[2](M); (b)[1](E); (c)[2](M)

- (a) Beweisen Sie die Grassmann (oder 'BAC-CAB') Identität für beliebige Vektoren $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c} \in \mathbb{R}^3$:

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}).$$

Hinweis: Entwickeln Sie die drei Vektoren in einer Orthonormalbasis, z.B. $\mathbf{a} = e_i a^i$, und nutzen Sie die Eigenschaft $\epsilon_{ijk}\epsilon_{mnk} = \delta_{im}\delta_{jn} - \delta_{in}\delta_{jm}$ des Levi-Civita-Symbols. Sie können auch alle Indizes unten schreiben, z.B. $\mathbf{a} = e_i a_i$, da in einer Orthonormalbasis $a_i = a^i$ gilt.

- (b) Beweisen Sie mittels der Grassmann-Identität die Jacobi-Identität:

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) + \mathbf{b} \times (\mathbf{c} \times \mathbf{a}) + \mathbf{c} \times (\mathbf{a} \times \mathbf{b}) = \mathbf{0}.$$

- (c) Überprüfen Sie beide Identitäten explizit für $\mathbf{a} = (1, 1, 2)^T$, $\mathbf{b} = (3, 2, 0)^T$, $\mathbf{c} = (2, 1, 1)^T$, indem Sie alle in ihnen vorkommenden Terme separat berechnen.

Beispielaufgabe 5: Spatprodukt [2]

Punkte: (a)[0.5](E); (b)[1](E); (c)[0.5](E)

Diese Aufgabe illustriert einen wichtigen Bezug zwischen dem Spatprodukt und der Frage, ob drei Vektoren in \mathbb{R}^3 linear unabhängig sind oder nicht.

- (a) Berechnen Sie das Spatprodukt, $S(y) = \mathbf{v}_1 \cdot (\mathbf{v}_2 \times \mathbf{v}_3)$, von $\mathbf{v}_1 = (1, 0, 2)^T$, $\mathbf{v}_2 = (3, 2, 1)^T$ und $\mathbf{v}_3 = (-1, -2, y)^T$ als Funktion der Variablen y . [Kontrollergebnis: $S(1) = -4$].
- (b) Finden Sie durch Lösen der Vektorgleichung $\mathbf{v}_i a^i = \mathbf{0}$ denjenigen Wert von y für den $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ und \mathbf{v}_3 *nicht* linear unabhängig sind.
- (c) Welchen Wert hat $S(y)$ für den in (b) gefundenen Wert von y ? Interpretieren Sie das Ergebnis!

Beispielaufgabe 6: Geschwindigkeit und Beschleunigung [3]

Punkte: (a)[1](E); (b)[1](M); (c)[1](E)

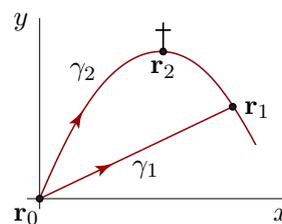
Gegeben sei die Raumkurve $\gamma = \{\mathbf{r}(t) \mid t \in (0, 2\pi/\omega)\}$, $\mathbf{r}(t) = (aC(t), S(t))^T \in \mathbb{R}^2$, mit $C(t) = \cos[\pi(1 - \cos\omega t)]$, $S(t) = \sin[\pi(1 - \cos\omega t)]$, und $0 < a, \omega \in \mathbb{R}$.

- (a) Berechnen Sie dazu den Geschwindigkeitsvektor, $\dot{\mathbf{r}}(t)$, und den Beschleunigungsvektor, $\ddot{\mathbf{r}}(t)$. Lässt sich $\mathbf{r}(t)$ durch $\dot{\mathbf{r}}(t)$ und $\ddot{\mathbf{r}}(t)$ ausdrücken?
- (b) Können Sie die Kurve ohne den Parameter t durch eine Gleichung darstellen? Um welche Kurve handelt es sich? Skizzieren Sie die Raumkurve für den Fall $a = 2$.
- (c) Berechnen Sie $\mathbf{r}(t) \cdot \dot{\mathbf{r}}(t)$. Für welchen Wert von a gilt $\mathbf{r}(t) \cdot \dot{\mathbf{r}}(t) = 0$ für alle t ?

Beispielaufgabe 7: Linienintegral: Bergwanderung [3]

Punkte: [3](M)

Zwei Wanderer wollen vom Punkt $\mathbf{r}_0 = (0, 0)^T$ im Tal zu einer Berghütte am Punkt $\mathbf{r}_1 = (3, 3a)^T$ wandern. Wanderer 1 wählt den geraden Weg zwischen Tal und Hütte, γ_1 . Wanderer 2 wählt einen parabolischen Weg, γ_2 , über den Gipfel bei $\mathbf{r}_2 = (2, 4a)^T$, dem Scheitel der Parabel (vgl. Skizze). Auf sie wirkt die Schwerkraft $\mathbf{F}_g = -10 \mathbf{e}_y$, sowie eine höhenabhängige Windkraft, $\mathbf{F}_w = -y^2 \mathbf{e}_x$.



Finden Sie die von den Wanderern entlang γ_1 und γ_2 verrichtete Arbeit, $W[\gamma_i] = -\int_{\gamma_i} \mathbf{dr} \cdot \mathbf{F}$, als Funktion des Parameters a . [Kontrollergebnisse: für $a = 1$ gilt $W[\gamma_1] = 39$, $W[\gamma_2] = 303/5$.]

[Gesamtpunktzahl Beispielaufgaben: 22]

Hausaufgabe 1: $1/(1+x^2)$ -Integrale mittels trigonometrischer Substitution [3]

Punkte: (a)[1](E); (b)[2](M).

Für Integrale, die $1/(1+x^2)$ enthalten, empfiehlt sich die trigonometrische Substitution $x = \tan y$, denn dadurch erhält man $1+x^2 = \sec^2 y$. Berechnen Sie mittels dieser Substitution folgende Integrale $I(z)$; überprüfen Sie Ihre Ergebnisse durch Berechnung von $\frac{dI(z)}{dz}$.

[Kontrollergebnis: (a) $I(1) = \frac{\pi}{4}$; (b) für $a = \frac{1}{2}$, $I(2) = \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}$.]

$$(a) I(z) = \int_0^z dx \frac{1}{1+x^2} \qquad (b) I(z) = \int_0^z dx \frac{1}{(1+a^2x^2)^2}$$

Hausaufgabe 2: Elementare Vektorrechnung [3]

Punkte: (a)[1](E); (b)[1](E); (c)[1](E)

Seien die Vektoren $\mathbf{a} = (2, 1, 5)^T$ und $\mathbf{b} = (-4, 3, 0)^T$ gegeben.

- (a) Berechnen Sie $\|\mathbf{b}\|$, $\mathbf{a} - \mathbf{b}$, $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}$ und $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$.
- (b) Zerlegen Sie \mathbf{a} in einen Vektor \mathbf{a}_{\parallel} parallel zu \mathbf{b} and einen Vektor \mathbf{a}_{\perp} senkrecht zu \mathbf{b} .
- (c) Berechnen Sie $\mathbf{a}_{\parallel} \cdot \mathbf{b}$, $\mathbf{a}_{\perp} \cdot \mathbf{b}$, $\mathbf{a}_{\parallel} \times \mathbf{b}$ und $\mathbf{a}_{\perp} \times \mathbf{b}$. Entsprechen die Ergebnisse ihren Erwartungen?

[Ergebniskontrolle: (a) $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} + \sum_i (\mathbf{a} \times \mathbf{b})^i = -30$, (b) $\sum_i (\mathbf{a}_{\parallel})^i = \frac{1}{5}$, $\sum_i (\mathbf{a}_{\perp})^i = 7\frac{4}{5}$.]

Hausaufgabe 3: Levi-Civita-Symbol [2]

Punkte: (a)[0,5](E); (b)[0,5](E); (c)[0,5](E); (d)[0,5](E).

(a) Ist die Aussage $a^i a^j \epsilon_{ij3} \stackrel{?}{=} b^m b^n \epsilon_{mn2}$ wahr oder falsch? Begründen Sie Ihre Antwort.

Drücken Sie die folgenden k -Summen über Produkte von zwei Levi-Civita-Symbole durch Kronecker-delta-Funktionen aus:

$$(b) \epsilon_{1ik} \epsilon_{23k}, \quad (c) \epsilon_{2jk} \epsilon_{ki2}, \quad (d) \epsilon_{1ik} \epsilon_{k3j}$$

Hausaufgabe 4: Lagrange-Identität [3]

Punkte: (a)[1](E); (b)[1](E); (c)[1](E)

- (a) Beweisen Sie die Lagrange-Identität für beliebige Vektoren $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d} \in \mathbb{R}^3$:

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot (\mathbf{c} \times \mathbf{d}) = (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{d}) - (\mathbf{a} \cdot \mathbf{d})(\mathbf{b} \cdot \mathbf{c}).$$

Hinweis: Nutzen Sie das Levi-Civita-Symbol!

- (b) Berechnen Sie [mittels (a)] den Betrag $\|\mathbf{a} \times \mathbf{b}\|$ und drücken Sie das Ergebnis aus durch $\|\mathbf{a}\|$, $\|\mathbf{b}\|$ und den Winkel ϕ , den die Vektoren \mathbf{a} und \mathbf{b} einschließen.
- (c) Überprüfen Sie die Lagrange-Identität explizit für $\mathbf{a} = (2, 1, 0)^T$, $\mathbf{b} = (3, -1, 2)^T$, $\mathbf{c} = (3, 0, 2)^T$, $\mathbf{d} = (1, 3, -2)^T$, indem Sie alle Terme darin separat berechnen.

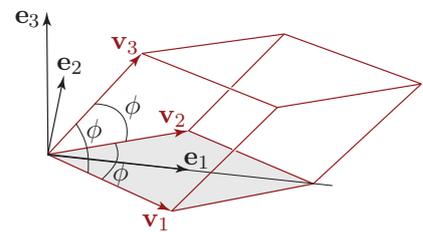
Hausaufgabe 5: Spatprodukt [3]

Punkte: [3](M)

Berechnen Sie das Volumen $V(\phi)$ eines Parallelepipeds, das durch drei Einheitsvektoren $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ und \mathbf{v}_3 aufgespannt wird, die paarweise jeweils den Winkel ϕ einschließen (mit $0 \leq \phi \leq \frac{2}{3}\pi$; warum ist diese Einschränkung nötig?).

Kontrollergebnisse: (i) Was erwarten Sie für $V(\frac{\pi}{2})$ bzw. $V(\frac{2}{3}\pi)$?

(ii): $V(\frac{\pi}{3}) = \frac{1}{\sqrt{2}}$.



Hinweis: Wählen Sie die Orientierung des Parallelepipeds so, dass \mathbf{v}_1 und \mathbf{v}_2 beide in der durch \mathbf{e}_1 und \mathbf{e}_2 aufgespannten Ebene liegen und \mathbf{e}_1 den Winkel zwischen \mathbf{v}_1 und \mathbf{v}_2 halbiert (siehe Skizze).

Hausaufgabe 6: Kurvengeschwindigkeit und Beschleunigung [2]

Punkte: (a)[1](E); (b)[0.5](E); (c)[0.5](E)

Gegeben sei die Raumkurve $\gamma = \{\mathbf{r}(t) \mid t \in (0, \infty)\}$, $\mathbf{r}(t) = (e^{-t^2}, ae^{t^2})^T \in \mathbb{R}^2$, mit $0 < a \in \mathbb{R}$ ($0 < a < 1$ für (c)).

- (a) Berechnen Sie dazu den Geschwindigkeitsvektor, $\dot{\mathbf{r}}(t)$, und den Beschleunigungsvektor, $\ddot{\mathbf{r}}(t)$. Lässt sich $\mathbf{r}(t)$ als Linearkombination von $\dot{\mathbf{r}}(t)$ und $\ddot{\mathbf{r}}(t)$ ausdrücken?
- (b) Können Sie die Kurve ohne den Parameter t durch eine Gleichung darstellen? Um welche Kurve handelt es sich? Skizzieren Sie die Raumkurve für den Fall $a = 2$.
- (c) Berechnen Sie $\mathbf{r}(t) \cdot \dot{\mathbf{r}}(t)$. Finden Sie die Zeit, $t(a)$, bei der $\mathbf{r}(t) \cdot \dot{\mathbf{r}}(t) = 0$ gilt? [Kontrollergebnis: $t(e^{-2}) = \pm 1$].

Hausaufgabe 7: Linienintegrale in kartesischen Koordinaten [4]

Punkte: (a)[2](M); (b)[1](E); (c)[1](M)

Sei $\mathbf{F}(\mathbf{r}) = (x^2, z, y)^T$ ein dreidimensionales Vektorfeld in kartesischen Koordinaten, mit $\mathbf{r} = (x, y, z)^T$. Berechnen Sie das Linienintegral $\int_{\gamma} d\mathbf{r} \cdot \mathbf{F}$ entlang folgender Wege von $\mathbf{r}_0 \equiv (0, 0, 0)^T$ nach $\mathbf{r}_1 \equiv (0, -2, 1)^T$:

- (a) $\gamma_a = \gamma_1 \cup \gamma_2$ ist der zusammengesetzte Weg aus γ_1 , der geraden Linie von \mathbf{r}_0 nach $\mathbf{r}_2 \equiv (1, 1, 1)^T$, und γ_2 , der geraden Linie von \mathbf{r}_2 nach \mathbf{r}_1 .
- (b) γ_b ist parametrisiert durch $\mathbf{r}(t) = (\sin(\pi t), -2t^{1/2}, t^2)^T$, mit $0 < t < 1$.

(c) γ_c ist eine in der yz -Ebene liegende Parabel der Form $z(y) = y^2 + \frac{3}{2}y$.

[Ergebniskontrolle: die Summe der Antworten aus (a), (b) und (c) ist -6 .]

[Gesamtpunktzahl Hausaufgaben: 20]
