

Zusammenfassung: L1

Z L1

Gruppe: $G = (A, \cdot)$ Verknüpfung: $\cdot : A \times A \rightarrow A, (a, b) \mapsto a \cdot b$

(i) Abgeschlossenheit, (ii) Assoziativität, (iii) neutrales Element, (iv) inverses Element

Körper: $F = (A, +, \cdot)$ (zwei Verknüpfungsregeln: Addition & Multiplikation, beide liefern jeweils eine kommutative Gruppe)

Algebraische Struktur, die Addition, Subtraktion, Multiplikation und Division erlaubt.

Beispiele: $\mathbb{Q}, \mathbb{R}, \mathbb{C}$

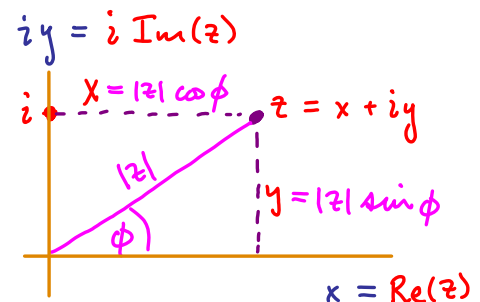
Komplexe Zahlen: $\mathbb{C} = \{z = x + iy \mid x, y \in \mathbb{R}\} \rightarrow \mathbb{R}^2 = \{(x, y) \mid x, y \in \mathbb{R}\}$

$$i = \sqrt{-1}$$

$$z + z' = (x + x') + i(y + y')$$

$$z \cdot z' = (xx' - yy') + i(xy' + x'y)$$

$$z^* = \bar{z} = x - iy, \quad z\bar{z} = x^2 + y^2 = |z|^2$$

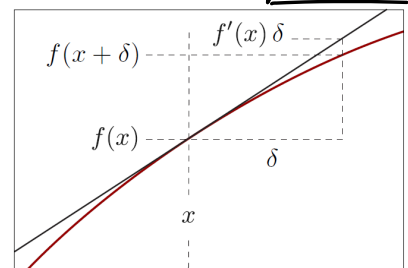


Zusammenfassung: C1-C2

Z C1

C1: Ableitung 1-dimensionaler Funktionen

Definition d. Ableitung: $\frac{df(x)}{dx} \equiv f'(x) \equiv \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{f(x+\delta) - f(x)}{\delta}$ (1)



Jede Ableitung stellt eine lokale Näherungen einer Funktion durch eine lineare Funktion dar!

$$f(x+\delta) \approx f(x) + \delta \frac{df(x)}{dx} \quad (2)$$

Produktregel: $\frac{d(fg)}{dx} = \frac{d(f(x))}{dx} g(x) + f(x) \frac{d(g(x))}{dx}$ (3)

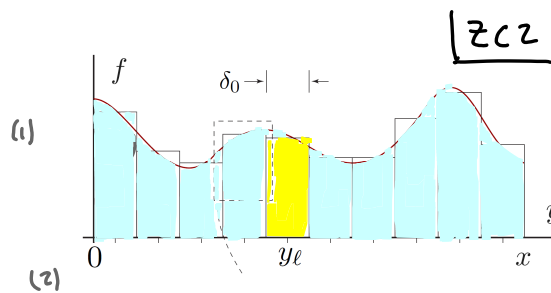
Kettenregel: $\frac{d(f(g(x)))}{dx} = \frac{df(y)}{dy} \Big|_{y=g(x)} \frac{dg(x)}{dx}$ (4)

Ableitung d. Umkehrfunktion: $\frac{df^{-1}(x)}{dx} = \frac{1}{\frac{df(y)}{dy} \Big|_{y=f^{-1}(x)}}$ (5)

C2 Integrale

'Riemann-Summe' $= \lim_{\delta \rightarrow 0} \sum_{l=1}^{N(\delta)} \chi_l$

Fläche unter Kurve: $F(x) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \sum_l f_l \equiv \int_0^x dy f(y)$



'Hauptsatz': $F(x) = \int_0^x dy f(y) \Rightarrow \frac{dF(x)}{dx} = f(x)$ (3)

Bestimmtes Integral: $\int_a^b dy f(y) = F(b) - F(a) \equiv F(y) \Big|_a^b$ (4)

'Partielle Integration' $\int_a^b dx u(x) v'(x) = u(x) v(x) \Big|_a^b - \int_a^b dx u'(x) v(x)$ (5)

'Variablen-Substitution': $\int_a^b dx \frac{dy(x)}{dx} f(y(x)) = \int_{y(a)}^{y(b)} dy f(y)$, $dy = dx y'(x)$, $\begin{matrix} x \mapsto y(x) \\ a \mapsto y(a) \\ b \mapsto y(b) \end{matrix}$ (6)

Zusammenfassung: L2 Vektorräume

Vorlesung 3 Z L2 a

F-Vektorraum: $(V, +, \cdot)$

Vektoraddition: $\begin{aligned} + : (V, V) &\rightarrow V \\ (\vec{a}, \vec{b}) &\mapsto \vec{a} + \vec{b} \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{Axiome:} \\ \text{(i)-(v): kommutative Gruppe} \end{array} \right\}$

Skalare Multiplikation: $\begin{aligned} \cdot : (F, V) &\rightarrow V \\ (\lambda, \vec{a}) &\mapsto \lambda \cdot \vec{a} \equiv (\lambda \vec{a}) \end{aligned} \quad \left. \begin{array}{l} \text{(vi, vii) distributiv} \\ \text{(viii) assoziativ} \\ \text{(ix) Identitätselement } 1 \end{array} \right\}$

Wichtigstes Beispiel: $\mathbb{R}^n$

$$\mathbb{R}^n = \{ \vec{a} = (a^1, \dots, a^n)^T \mid a^1, \dots, a^n \in \mathbb{R} \}$$

Vektoraddition: $+ : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $(\vec{a}, \vec{b}) \mapsto (\vec{a} + \vec{b}) \equiv \begin{pmatrix} a^1 + b^1 \\ \vdots \\ a^n + b^n \end{pmatrix}$

Skalare Multiplikation: $\cdot : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$, $(\lambda, \vec{b}) \mapsto (\lambda \vec{b}) \equiv \begin{pmatrix} \lambda b^1 \\ \vdots \\ \lambda b^n \end{pmatrix}$

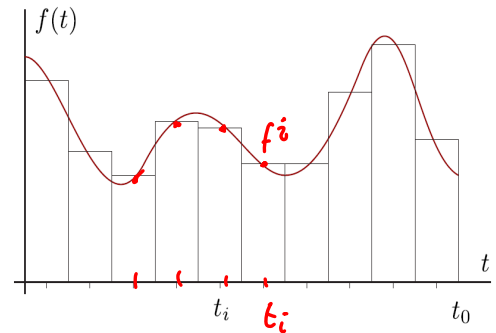
Weiteres Beispiel: Diskretisierte Funktionen:

Diskretisierte Funktion: $\vec{f} = (f^1, \dots, f^N)^T$

Vektoraddition: $(\vec{f} + \vec{g})^i = (\vec{f})^i + (\vec{g})^i$

Skalarmultiplikation: $(a \cdot \vec{f})^i = a(\vec{f})^i$

Vektorraum: $(\{ \vec{f} \mid (\vec{f})^i \in \mathbb{R}, i = 1, \dots, N \}, +, \cdot)$



Basis und Dimension

$$S \equiv \{ \vec{v}_1, \dots, \vec{v}_m \} \stackrel{?}{=} V \quad (1)$$

$\text{Span}(S) \equiv$ alle möglichen Linearkombination der Vektoren $\{ \vec{v}_j \}$ (2)

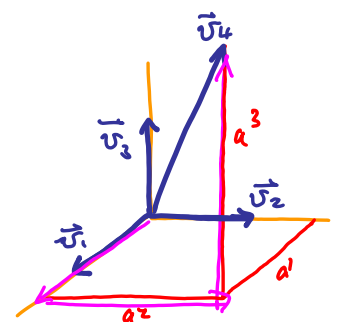
'Linear unabhängig', falls $\vec{v}_j a^j = \vec{0} \Rightarrow a^j = 0 \quad \forall j$ (3)

S ist 'vollständig', falls $\text{span}(S) = V$ (4)

S bildet 'Basis', falls S vollständig und linear unabhängig ist. (5)

Standardbasis in $\mathbb{R}^n$: $\vec{e}_j = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 1 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$ j-Position i-Komponente v. j-tem Basisvektor: $(\vec{e}_j)^i = \delta^i_j$ (6)

'Kronecker-delta' Symbol: $\delta^i_j \equiv \begin{cases} 1 & \text{falls } i=j \\ 0 & \text{falls } i \neq j \end{cases}$ $\vec{u} = \begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \\ \vdots \\ u^n \end{pmatrix}$ (7)



Euklidische Vektorräume (V: reeller Vektorraum)

Inneres Produkt: $\langle, \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{R}, (\vec{u}, \vec{v}) \mapsto \langle \vec{u}, \vec{v} \rangle$ ↗ Zahl

(i) Symmetrie, (ii-iii) Linearität bzgl. + und • (iv) Positiv definit

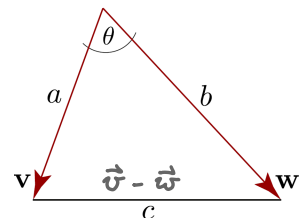
Wichtigstes Beispiel: Skalarprodukt in $\mathbb{R}^n$

$$\bullet : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, \quad \vec{u} \cdot \vec{v} \equiv u^1 v^1 + \dots + u^n v^n = u^i v^i$$

Norm: $\|\cdot\| : V \rightarrow \mathbb{R}, \vec{v} \mapsto \|\vec{v}\| \equiv \sqrt{\langle \vec{v}, \vec{v} \rangle}$

Cauchy-Schwarz Ungleichung (CSU): $|\langle \vec{v}, \vec{w} \rangle| \leq \|\vec{v}\| \|\vec{w}\|$

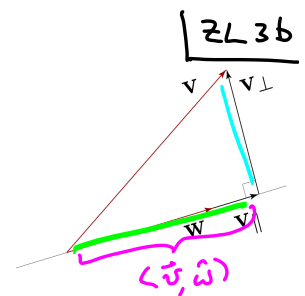
Winkel: $\langle \vec{v}, \vec{w} \rangle \equiv \cos(\angle(\vec{v}, \vec{w})) \|\vec{v}\| \|\vec{w}\|$



Einheitsvektor: $\hat{w} \equiv \frac{\vec{w}}{\|\vec{w}\|}$

'Projektion' v. $\vec{v}$ auf $\vec{w}$: $\vec{v}_{\parallel} \equiv \hat{w} \langle \hat{w}, \vec{v} \rangle$ ($\parallel \vec{w}$)

'Orthogonales Komplement' zu $\vec{w}$: $\vec{v}_{\perp} \equiv \vec{v} - \hat{w} \langle \hat{w}, \vec{v} \rangle$ ($\perp \vec{w}$)



Orthonormalbasis: vollständig, normiert, orthogonal: $\{\vec{e}'_1, \dots, \vec{e}'_n\}, \quad \langle \vec{e}'_i, \vec{e}'_j \rangle = \delta_{ij}$

Zerlegung nach Komponenten in Orthonormalbasis: $\vec{x} = \vec{e}_i x^i, \quad x^i = \langle \vec{e}_i, \vec{x} \rangle$

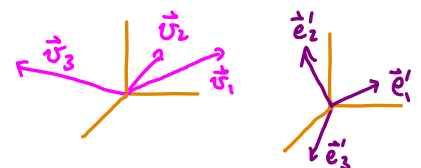
Gram-Schmidt-Verfahren:

liefert orthonormale Vektoren mit demselben Span:

$$\text{span}\{\vec{e}'_j\} \equiv \text{span}\{\vec{v}_j\}$$

$$\vec{v}_{1,\perp} \equiv \vec{v}_1, \quad \vec{e}'_1 \equiv \frac{\vec{v}_{1,\perp}}{\|\vec{v}_{1,\perp}\|}$$

$$\vec{v}_{j,\perp} \equiv \vec{v}_j - \sum_{i=1}^{j-1} \vec{e}'_i \langle \vec{e}'_i, \vec{v}_j \rangle, \quad \vec{e}'_j \equiv \frac{\vec{v}_{j,\perp}}{\|\vec{v}_{j,\perp}\|}$$



Kovariante Notation für nicht-orthogonale Basis

ZL3c

Metrik einer Basis $\{\hat{v}_j\}$ von V : $\langle \hat{v}_i, \hat{v}_j \rangle = g_{ij}$ · Skalarprodukt: $\langle \hat{x}, \hat{y} \rangle_V = x^i g_{ij} y^j$

'Inverse Metrik' g^{ij} erfüllt $g_{kj} g^{ji} = \delta_k^i$ Index oben: 'kontravariant'
Index unten: 'kovariant'

Metrik g_{ij} 'zieht Index runter': $x_j \equiv x^i g_{ij}$ (kontravariant $\xrightarrow{g_{ij}}$ kovariant) Symmetrie $g_{ji} x^i \neq x^j$

Inverse Metrik g^{ij} 'zieht Index hoch': $x^i \equiv x_j g^{ji}$ (kovariant $\xrightarrow{g^{ji}}$ kontravariant)

Duale Basisvektoren, $\hat{v}^i \equiv g^{ij} \hat{v}_j$ sind orthonormal zu Ausgangsbasisvektoren: $\langle \hat{v}^i, \hat{v}_j \rangle = \delta^i_j$

Zerlegung nach Komponenten in Orthonormalbasis: $\hat{x} = \hat{v}_i x^i$, $x^i = \langle \hat{v}^i, \hat{x} \rangle_V$

Für Orthonormalbasis, mit $g_{ij} = \delta_{ij}$, ist Unterscheidung zwischen Index oben/unten nicht nötig:

$$x_j = g_{ji} x^i = x^j, \quad g^{ij} = \delta^{ij}, \quad \hat{v}^i = g^{ij} \hat{v}_j = \hat{v}_i, \quad x^i = \langle \hat{v}^i, \hat{x} \rangle_V$$

Deswegen: wenn möglich eine Orthonormalbasis wählen!

Zusammenfassung: L4 Vektorprodukt

ZL4

$$\begin{aligned} \mathbf{x} : \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3 &\mapsto \mathbb{R}^3 \\ (\vec{v}, \vec{w}) &\mapsto \vec{u} = \vec{v} \times \vec{w} \equiv \begin{pmatrix} v^2 w^3 - v^3 w^2 \\ v^3 w^1 - v^1 w^3 \\ v^1 w^2 - v^2 w^1 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} u^1 \\ u^2 \\ u^3 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Geometrische Def:

$$\vec{v} \perp \vec{v} \times \vec{w} \perp \vec{w}$$

$$\|\vec{v} \times \vec{w}\| = \|\vec{v}\| \|\vec{w}\| \sin \theta$$

Daumen: $\vec{v} \times \vec{w}$ Mittelfinger: $\vec{w}$
Zeigefinger: $\vec{v}$

$$\vec{e}_i \times \vec{e}_j = \varepsilon_{ijk} \vec{e}_k$$

Levi-Civita: ε_{ijk} komplett antisymmetrisch

$$(\vec{v} \times \vec{w})^k = v^i w^j \varepsilon_{ijk}$$

$$\varepsilon_{ijk} \varepsilon_{muk} = \delta_{im} \delta_{jn} - \delta_{in} \delta_{jm}$$

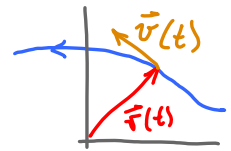
Eigenschaften: antisymmetrisch, distributiv, nicht assoziativ, Identitäten...

Spatprodukt: $|(\vec{u} \times \vec{v}) \cdot \vec{w}| = \text{Volumen v. Parallelepip}$

Zusammenfassung V1: Kurven

Σ V1

'Kurve': $\gamma = \{ \vec{r}(t) \mid t \in I \}$ wobei $\vec{r} : I = (0, \tau) \rightarrow \mathbb{R}^d$
 $t \mapsto \vec{r}(t)$



Ort entlang Kurve: $\vec{r}(t) = \vec{e}_j x^j(t)$

Kurvengeschwindigkeit: $\dot{\vec{r}}(t) = \frac{d\vec{r}(t)}{dt} = \vec{e}_j \dot{x}^j(t) = \vec{v}(t)$ liegt 'tangential' zur Kurve

Kurvenlänge: $L[\gamma] = \int_0^\tau dt \|\dot{\vec{r}}(t)\|$ unabhängig von Parametrisierung des Weges

Bogenlänge nach Zeit t: $s(t) = \int_0^t du \|\dot{\vec{r}}(u)\|$ $\gamma = \vec{r}(0, \tau)$

Natürliche Parametrisierung durch Bogenlänge: $\vec{r}_L : (0, L(\gamma)) \rightarrow \mathbb{R}^d, s \mapsto \vec{r}_L(s) \equiv \vec{r}(t(s)), \|\frac{d}{ds} \vec{r}_L(s)\| = 1$

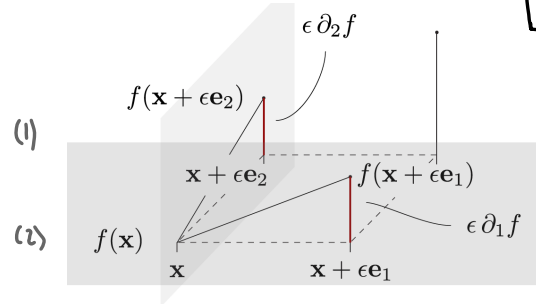
Für Vektorfeld: $\vec{f} : \gamma \rightarrow \mathbb{R}^d, \vec{r} \mapsto \vec{f}(\vec{r})$
 (vektorielle Funktion von $\vec{r}$)

Linienintegral: $\int_\gamma d\vec{r} \cdot \vec{f} \equiv \int_0^\tau dt \dot{\vec{r}} \cdot \vec{f}$ unabhängig von Parametrisierung des Weges

Zusammenfassung C3: Partielle Ableitungen

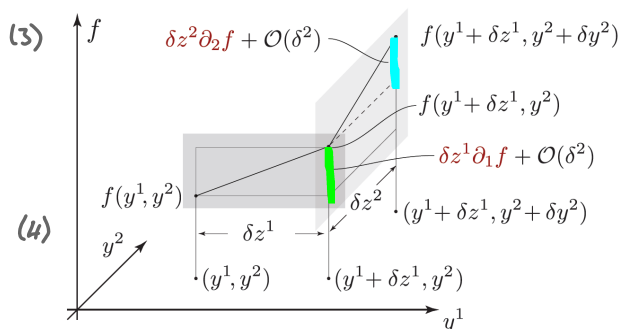
Σ C3

Partielle Ableitung: $f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}$
 $\frac{\partial f(\vec{x})}{\partial x^i} \equiv \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{\delta} [f(\vec{x} + \delta \vec{e}_i) - f(\vec{x})]$
 $\equiv \partial_{x^i} f(\vec{x}) \equiv \partial_i f(\vec{x})$



Satz v. Schwarz: $\partial_i \partial_j f = \partial_j \partial_i f$

$f : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}, \vec{y} \mapsto f(\vec{y})$
 $\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{\delta} [f(\vec{y} + \delta \vec{e}_j) - f(\vec{y})] = \partial_j f(\vec{y}) \vec{e}^j$



$\vec{g} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^d, \vec{f} : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^m, \vec{f} \circ \vec{g} : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$

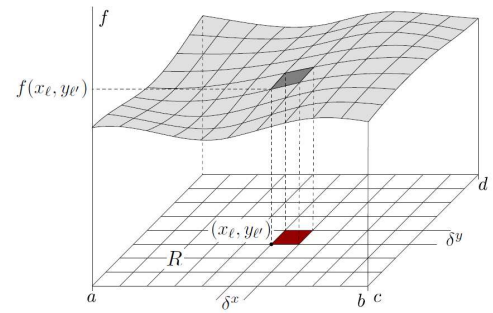
Allgemeine Kettenregel: $\frac{\partial f^i(\vec{g}(\vec{x}))}{\partial x^k} = \sum_{j=1}^d \frac{\partial f^i(\vec{g}(\vec{x}))}{\partial g^j} \frac{\partial g^j(\vec{x})}{\partial x^k}$ $i = 1, \dots, m$
 $k = 1, \dots, n$ (5)

Zusammenfassung: C4 Mehrdimensionale Integration (Kartesisch)

ZC4a

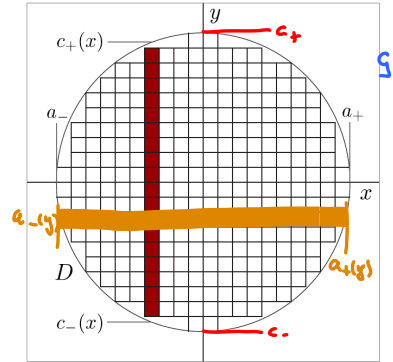
Integration in $\mathbb{R}^2$

$$\int_a^b dx \int_c^d dy f(x,y) \equiv \lim_{\delta^x, \delta^y \rightarrow 0} \delta^x \delta^y \sum_l \sum_{l'} f(x_l, y_{l'})$$



Fubini: Integrationsreihenfolge ist egal:

$$\int_a^b dx \int_{y_-(x)}^{y_+(x)} dy f(x,y) = \int_{y_a}^{y_b} dy \int_{x_-(y)}^{x_+(y)} dx f(x,y)$$



Für das "innere" (zweite) Integral sind die Grenzen abhängig von der "äußeren"

Analog in 3D: $\int_{[a,b] \times [c,d] \times [e,f]} dx dy dz f(x,y,z) = \int_a^b dx \int_c^d dy \int_e^f dz f(x,y,z)$

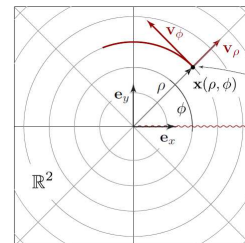
Reihenfolge dieser Integrale ist beliebig

Zusammenfassung: V5 Krummlinige Koordinaten

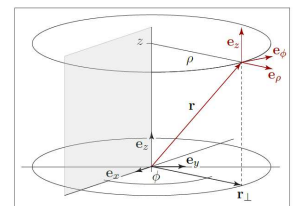
ZV2a

Kartesisch: $\vec{r} = \sum_{i=1}^d \vec{e}_i x^i$

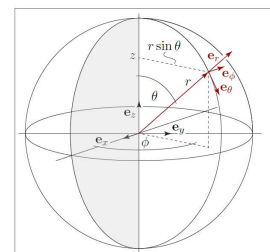
Polar (2D): $\vec{r} = \vec{e}_x \underbrace{\rho \cos \phi}_{x^1} + \vec{e}_y \underbrace{\rho \sin \phi}_{x^2}$
 $y^1 = \rho, y^2 = \phi$



Zylinder (3D): $\vec{r} = \vec{e}_x \rho \cos \phi + \vec{e}_y \rho \sin \phi + \vec{e}_z z$



Kugel (3D): $\vec{r} = \vec{e}_x r \sin \theta \cos \phi + \vec{e}_y r \sin \theta \sin \phi + \vec{e}_z r \cos \theta$



Koordinatenlinie: $\vec{r}_{y^j}(y^j) \equiv \vec{r}(y^1, \dots, \underbrace{y^j}_{\text{wird variiert}}, \dots, y^d)$
 $\vec{r}_i(y^i) = \vec{r}_\rho(\rho), \vec{r}_\phi(\phi)$
 werden konstant gehalten

Koordinatenbasis: $\{\vec{v}_{j,\vec{r}}\}$
 erinnert an Ortsabhängigkeit, wird meist nicht explizit angezeigt
 $\vec{v}_{j,\vec{r}} \equiv \frac{d}{dy^j} \vec{r}_j(y^j) = \partial_j \vec{r}(\vec{y})$

Metrik: $g_{ij,\vec{r}} \equiv \langle \vec{v}_{i,\vec{r}}, \vec{v}_{j,\vec{r}} \rangle$

Lokale Basis: $\{\vec{e}_{j,\vec{r}}\}$
 $\vec{e}_{j,\vec{r}} \equiv \frac{\vec{v}_{j,\vec{r}}}{\|\vec{v}_{j,\vec{r}}\|} = \frac{\vec{v}_{j,\vec{r}}}{\sqrt{g_{jj,\vec{r}}}}$

Kartesisch:

$$\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$$

$$\vec{r} = \sum_i \vec{e}_i x^i$$

ZV2b

Polar:

$$\vec{e}_\rho = \vec{e}_x \cos \phi + \vec{e}_y \sin \phi$$

$$g_{\rho\rho} = 1$$

$$\vec{r} = \vec{e}_\rho \rho$$

$$\vec{e}_\phi = -\vec{e}_x \sin \phi + \vec{e}_y \cos \phi$$

$$g_{\phi\phi} = \rho^2$$

$$\dot{\vec{r}} = \dot{\vec{e}}_\rho \rho + \vec{e}_\phi \rho \dot{\phi}$$

Zylinder (3D):

$$\vec{e}_\rho = \vec{e}_x \cos \phi + \vec{e}_y \sin \phi$$

$$g_{\rho\rho} = 1$$

$$\vec{r} = \vec{e}_\rho \rho + \vec{e}_z z$$

$$\vec{e}_\phi = -\vec{e}_x \sin \phi + \vec{e}_y \cos \phi$$

$$g_{\phi\phi} = \rho^2$$

$$\dot{\vec{r}} = \dot{\vec{e}}_\rho \rho + \vec{e}_\phi \rho \dot{\phi} + \dot{\vec{e}}_z z$$

$$\vec{e}_z = \vec{e}_z$$

$$g_{zz} = 1$$

Kugel (3D):

$$\vec{e}_r = \vec{e}_x \sin \theta \cos \phi + \vec{e}_y \sin \theta \sin \phi + \vec{e}_z \cos \theta$$

$$g_{rr} = 1$$

$$\vec{r} = \vec{e}_r r$$

$$\vec{e}_\theta = \vec{e}_x \cos \theta \cos \phi + \vec{e}_y \cos \theta \sin \phi - \vec{e}_z \sin \theta$$

$$g_{\theta\theta} = r^2$$

$$\dot{\vec{r}} = \dot{\vec{e}}_r r + \vec{e}_\theta r \dot{\theta}$$

$$\vec{e}_\phi = -\vec{e}_x \sin \phi + \vec{e}_y \cos \phi$$

$$g_{\phi\phi} = r^2 \sin^2 \theta$$

$$+ \vec{e}_\phi r \dot{\phi} \sin \theta$$

Alle diese lokalen Basen sind orthonormal:

$$\vec{e}_i \cdot \vec{e}_j = \delta_{ij}$$

(9)

Zusammenfassung: 2D-Flächenintegrale für Fläche in $n = 2, 3$ Dimensionen

ZC4b

$$\vec{r}: U \subset \mathbb{R}^2 \rightarrow S \subset \mathbb{R}^n, \quad \vec{y} = \begin{pmatrix} y^1 \\ y^2 \end{pmatrix} \mapsto \vec{r}(\vec{y}) = \begin{pmatrix} x^1(\vec{y}) \\ \vdots \\ x^n(\vec{y}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\int_S f(\vec{r}) dS = \int_U \int_{\mathcal{U}} dy^1 dy^2 \|\partial_{y^1} \vec{r} \times \partial_{y^2} \vec{r}\| f(\vec{r}(y^1, y^2)) \quad (2)$$

für krummlinig-orthogonale Koord.: $\|\partial_{y^1} \vec{r} \times \partial_{y^2} \vec{r}\| = v_{y^1} v_{y^2} = \sqrt{g_{11} g_{22}} \quad (3)$

Integrationsmaß:

Polar: $dS = \rho d\rho d\phi \quad (4)$

Kugel:

$$dS = d\theta d\phi r^2 \sin \theta \quad (5)$$

Zusammenfassung: 3D Volumenintegrale

$$\vec{r}: U \subset \mathbb{R}^3 \rightarrow V \subset \mathbb{R}^3, \quad \vec{y} \mapsto \vec{r}(\vec{y}) = \begin{pmatrix} x^1(\vec{y}) \\ x^2(\vec{y}) \\ x^3(\vec{y}) \end{pmatrix}$$

$$\iiint_V f(\vec{r}) dV = \iiint_U dy^1 dy^2 dy^3 \|\partial_{y^1} \vec{r} \times \partial_{y^2} \vec{r} \cdot \partial_{y^3} \vec{r}\| f(\vec{r}(y^1, y^2, y^3)) \quad (7)$$

für krummlinig-orthogonale Koord.:

$$\|\partial_{y^1} \vec{r} \times \partial_{y^2} \vec{r} \cdot \partial_{y^3} \vec{r}\| = v_{y^1} v_{y^2} v_{y^3} = \sqrt{g_{11} g_{22} g_{33}} \quad (8)$$

Integrationsmaß:

Zylinder: $dV = \rho d\rho d\phi dz \quad (9)$

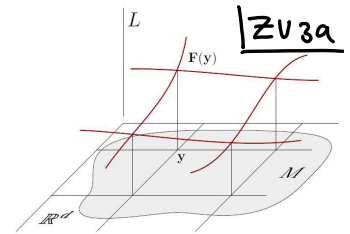
Kugel:

$$dV = r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi \quad (10)$$

Zusammenfassung V3.1 Felder

$$\vec{F}: M \subset \mathbb{R}^d \rightarrow L \subset \mathbb{R}^n$$

$$\vec{y} = (y^1, \dots, y^d)^T \mapsto \vec{F}(\vec{y}) = (F^1(\vec{y}), \dots, F^n(\vec{y}))^T$$



V3.2 Skalarfelder, Gradient

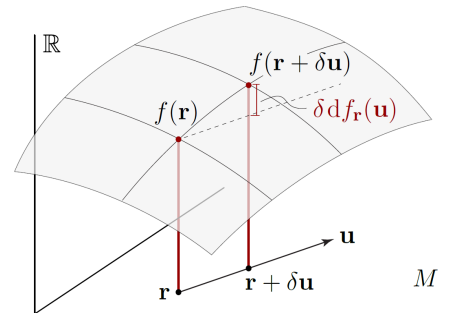
Totales Differential: differentielle Änderung von f bei $\vec{r}$ durch einen $\vec{u}$ -Schritt:

$$df_{\vec{r}}: \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}, \quad \vec{u} \mapsto df_{\vec{r}}(\vec{u}) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{\delta} [f(\vec{r} + \delta \vec{u}) - f(\vec{r})]$$

$$df_{\vec{y}}(\vec{u}) = \partial_{y^k} f(\vec{y}) u^k = \partial_{\vec{r}} f u^k \equiv \vec{\nabla} f_{\vec{y}} \cdot \vec{u}$$

Gradient in kartesischen Koordinaten: $\partial^i = \partial_i$

$$\vec{\nabla} f: M \subset \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d, \quad \vec{x} \mapsto \vec{\nabla} f_{\vec{x}} \equiv \begin{pmatrix} \partial^1 f(\vec{x}) \\ \vdots \\ \partial^d f(\vec{x}) \end{pmatrix} = \vec{e}_i (\vec{\nabla} f)^i(\vec{x})$$



$\vec{\nabla} f_{\vec{y}}$ zeigt in Richtung maximaler Steigung v. f , steht $\perp$ auf den 'Höhenflächen' v. f

In krummlinigen Koordinaten: $\vec{\nabla}_r f = \vec{e}_i (\vec{\nabla} f)^i = \vec{e}_i g^{ij} \partial_j f$ (in Koordinatenbasis)

In krummlinig-orthogonalen Koordinaten: $= \vec{e}_i \frac{1}{\sqrt{g_{ii}}} \partial_i f$ (in lokaler Basis)

$$g_{i \neq j} = 0, \quad g^{ii} = 1/g_{ii}$$

Zusammenfassung V3.3: Gradientenfeld

ZV3b

Gradientenfeld: $\vec{\nabla} \varphi: M \subset \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d, \quad \vec{x} \mapsto \vec{\nabla} \varphi_{\vec{x}}$ (1)

$$\left(\int_{\gamma: \vec{x}' \rightarrow \vec{x}} d\vec{r} \cdot \vec{u} \text{ ist wegunabhängig } \forall \vec{x}', \vec{x} \in M \right) \iff \oint d\vec{r} \cdot \vec{u} = 0 \text{ für geschlossenen Weg} \quad (1)$$

$$\iff \left(\vec{u} \text{ ist ein Gradientenfeld} \right) \iff \left(\partial_j u^i - \partial_i u^j = 0, \text{ und } M \text{ ist einfach zusammenhängend} \right)$$

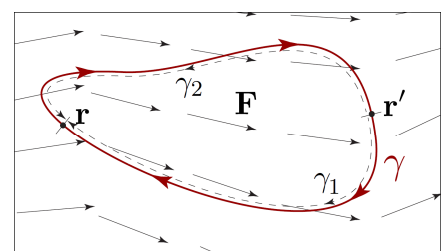
Konkret: $\int_{\gamma: \vec{x}' \rightarrow \vec{x}} d\vec{r} \cdot \vec{u} = \int_{\gamma: \vec{x}' \rightarrow \vec{x}} d\vec{r} \cdot \vec{\nabla} \varphi = \varphi(\vec{x}) - \varphi(\vec{x}')$ (2)

Konservatives Kraftfeld $\vec{F}(\vec{r}) = -\vec{\nabla} \varphi_{\vec{r}}$ (5)

ist ein Gradientenfeld:

$$W[\gamma] = \oint d\vec{r} \cdot \vec{F} = 0 \quad (6)$$

$$\iff W[\gamma_1] = W[\gamma_2] \quad (7)$$



Arbeit von $\vec{x}'$ nach $\vec{x}$ ist unabhängig vom Weg!

geschlossener Weg: $\gamma = \gamma_1 \cup (-\gamma_2)$

Zusammenfassung V3.2,4-6: Nabla, Gradient, Divergenz, Rotation, Laplace

ZV3c

Skalarfeld: $\varphi(\vec{r})$; Vektorfeld: $\vec{u}(\vec{r})$ (1)

Partielle Ableitung: $\partial_i \varphi = \frac{\partial \varphi(x^1, x^2, x^3)}{\partial x^i} \equiv \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\varphi(x^1 + \delta, x^2, x^3) - \varphi(x^1, x^2, x^3)}{\Delta x^i}$ (2)

Totales Differential: $d_{\vec{x}} f(\vec{x}) = \sum_j \partial_j f(\vec{x}) u^j = \vec{\nabla} f_{\vec{x}} \cdot \vec{u}$ (3)

Gradient: $\vec{\nabla} \varphi_{\vec{x}} = \vec{e}_i \partial^i \varphi(\vec{x}) = \begin{bmatrix} \partial^1 \varphi(\vec{x}) \\ \partial^2 \varphi(\vec{x}) \\ \partial^3 \varphi(\vec{x}) \end{bmatrix}$ (4)

Nabla-Operator: $\vec{\nabla} = e_i \partial^i = \vec{e}_1 \partial^1 + \vec{e}_2 \partial^2 + \vec{e}_3 \partial^3$ (5)
(Vektor-Diff.-Operator)

Laplace-Operator: $\vec{\nabla}^2 = \Delta = \partial_i \partial^i$ (6)

Divergenz: $\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \partial_i u^i = \partial_1 u^1 + \partial_2 u^2 + \partial_3 u^3$ (7)

Rotation: $\vec{\nabla} \times \vec{u} = \vec{e}_i \varepsilon_{ijk} \partial_j u^k = \begin{bmatrix} \partial_2 u^3 - \partial_3 u^2 \\ \partial_3 u^1 - \partial_1 u^3 \\ \partial_1 u^2 - \partial_2 u^1 \end{bmatrix}$ (8)
(alle Indizes unten)

Gradiententelder sind 'wirbelfrei': $\vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \varphi) = 0$ (9)

Wirbelfelder sind 'quelfrei': $\vec{\nabla} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{u}) = 0$ (10)

Zusammenfassung: L5.1-5.3 Lineare Abbildungen und Matrizen

ZL5a

Die Abbildung $F: V \rightarrow W$ ist 'linear', falls $F(a\vec{v} + b\vec{w}) = aF(\vec{v}) + bF(\vec{w})$ (1)

Für $V = \mathbb{C}^n$, $W = \mathbb{C}^m$ hat eine lineare Abbildung die Form:

$A: \mathbb{C}^n \rightarrow \mathbb{C}^m$, $\vec{x} \mapsto \vec{y} = A\vec{x}$, mit $y^i = a_j^i x^j = \vec{A}^i \cdot \vec{x}$ (2)
 $= A \cdot \vec{x}$

m x n Matrix:

$A = \begin{bmatrix} A^1_1 & \dots & A^1_j & \dots & A^1_n \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A^i_1 & \dots & A^i_j & \dots & A^i_n \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A^m_1 & \dots & A^m_j & \dots & A^m_n \end{bmatrix} = \{A^i_j\}$ (3)
 $i = 1, \dots, m$
 $j = 1, \dots, n$

Spalte j: $\vec{A}_j = \begin{bmatrix} A^1_j \\ \vdots \\ A^i_j \\ \vdots \\ A^m_j \end{bmatrix}$ (4)

Reihe i: $\vec{A}^i = (A^i_1, \dots, A^i_j, \dots, A^i_n)$ (5)

Abbildung der Standardbasis: $\vec{e}_j \xrightarrow{A} A\vec{e}_j = \vec{A}_j = \text{Spalte } j$ (6)

Komplexe (mxn)-Matrizen bilden $m \cdot n$ dim. Vektorraum, $\simeq \mathbb{C}^{m \cdot n}$ |ZL5b

$$\text{Mat}(\mathbb{C}, m, n) \equiv \{A = \{A^i_j\} : i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n, A^i_j \in \mathbb{C}\} \quad (1)$$

mit Matrixaddition, (elementenweise) $(A, B) \mapsto A + B, \quad (A+B)^i_j \equiv A^i_j + B^i_j \quad (2)$

und Skalarmultiplikation, (elementenweise) $(\lambda, A) \mapsto \lambda A, \quad (\lambda A)^i_j \equiv \lambda A^i_j \quad (3)$

Verknüpfung von zwei linearen Abbildungen $\Rightarrow$ Matrixmultiplikation

$$\mathbb{C}^n \xrightarrow{A} \mathbb{C}^m \xrightarrow{B} \mathbb{C}^l \quad (4)$$

$$\vec{x} \xrightarrow{A} \vec{y} = A \cdot \vec{x} \xrightarrow{B} \vec{z} = B \cdot \vec{y} = B \cdot (A \cdot \vec{x}) \equiv C \cdot \vec{x} \quad (5)$$

(5e.3,4)

$$C^k_j = B^k_i A^i_j = (\vec{B}^k)_i (\vec{A}_j)^i = \vec{B}^k \cdot \vec{A}_j \quad \begin{cases} k = 1, \dots, l \\ i = 1, \dots, m \\ j = 1, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

(Zeile k von B) (Spalte j von A)

Matrixmultiplikation ist assoziativ & distributiv, aber nicht kommutativ !

Zusammenfassung: L5.5-6 Basistransformationen

|ZL5c

Zwei Vektorräume: $V = \text{span}\{\hat{v}_j\}, \quad W = \text{span}\{\hat{w}_i\} \quad (1)$

Allgemeine lineare Abbildung: $\hat{A} : V \rightarrow W \quad \hat{x} = \hat{v}_j x^j \mapsto \hat{y} = \hat{w}_i y^i \quad (2)$

Matrixdarstellung v. A: $\hat{A}(\hat{v}_j) = \hat{w}_i A^i_j \quad \vec{y} = A \cdot \vec{x}, \quad A = \{A^i_j\} \quad (3)$

In Standardbasis: A bildet Basisvektor $\vec{e}_j$ ab auf: $\vec{A}_j = \text{Spalte } j \text{ von } A \quad (4)$

Zwei Basen für denselben Raum: $V = \text{span}\{\hat{v}_j\} = \text{span}\{\hat{v}'_i\} \quad (5)$

Basistransformation: $T : V \rightarrow V \quad \hat{v}_j = \hat{v}'_i T^i_j \quad (6)$

Matrixdarstellung v. T: $T = \{T^i_j\} \quad x'^i = T^i_j x^j, \quad \vec{x}' = T \cdot \vec{x} \quad (7)$

Darstellung v. altem Basisvektor $\hat{v}_j$ in neuer Basis: $\vec{T}_j = \text{Spalte } j \text{ von } T \quad (8)$

Inverse Transformation: $T^{-1} = \{(T^{-1})^j_i\} \quad \hat{v}'_i = \hat{v}_j (T^{-1})^j_i, \quad x^j = (T^{-1})^j_i x'^i \quad (9)$

Darstellung v. neuem Basisvektor $\hat{v}'_i$ in alter Basis: $(\vec{T}^{-1})_i = \text{Spalte } i \text{ von } T^{-1} \quad (10)$

Bezug zwischen $\vec{y} = A \cdot \vec{x} \quad (11)$ und $\vec{y}' = A' \cdot \vec{x}' \quad (12)$: $A' = T \cdot A \cdot T^{-1} \quad (13)$

Zusammenfassung: L6 Determinanten

ZL6a

Determinante: diagnostiziert lin. Unabhängigkeit d. Spaltenvektoren einer nxn-Matrix

Leibniz-Regel: $\det A \equiv \sum_P \operatorname{sgn}(P) A^{p_1}_1 \dots A^{p_n}_n = \varepsilon_{i_1 \dots i_n} A^{i_1}_1 \dots A^{i_n}_n$ (1)

2x2: $\begin{vmatrix} a^1 & b^1 \\ a^2 & b^2 \end{vmatrix} = a^1 b^2 - a^2 b^1$ 3x3: $\begin{vmatrix} a^1 & b^1 & c^1 \\ a^2 & b^2 & c^2 \\ a^3 & b^3 & c^3 \end{vmatrix} = \varepsilon_{ijk} a^i b^j c^k$ (2)

Laplace-Entwicklung: $\det A = \sum_{k=1}^n \tilde{A}^k_j A^k_j = \sum_{k=1}^n \tilde{A}^i_k A^i_k$ (hier keine) (3)
(j fest) (i fest)

Kofaktor: $\tilde{A}^i_j \equiv (-1)^{i+j} M^i_j$ (4)
Unterdeterminante:
(streiche Zeile i, Spalte j aus A, bilde dann die Determinante)

Diagonalmatrix: $\det(\lambda_i \delta^i_j) = \prod_{i=1}^n \lambda_i$, $\det \mathbb{1} = 1$ (5)

Transponierte: $\det A = \det A^T$ (6)

ZL6b

Multilinearität: $\det(\vec{A}_1, \dots, \underbrace{\lambda \vec{B} + \mu \vec{C}}_{j\text{-Spalte}}, \dots, \vec{A}_n) = \lambda \det(\vec{A}_1, \dots, \vec{B}, \dots, \vec{A}_n) + \mu \det(\vec{A}_1, \dots, \vec{C}, \dots, \vec{A}_n)$ (1)
j-Spalte

Antisymmetrie: Vorzeichenwechsel beim Vertauschen v. zwei Zeilen oder zwei Spalten.

$$\det(\dots, \vec{B}, \dots, \vec{C}, \dots) = -\det(\dots, \vec{C}, \dots, \vec{B}, \dots) \quad (2)$$

Zwei gleiche Spalten oder Zeilen: $\det(\dots, \vec{B}, \dots, \vec{B}, \dots) = 0$ (3)

Konstruktion des Inversen: $\underline{A} = \{A^i_j\} \Rightarrow \underline{A}^{-1} \equiv \underline{C} = \{C^i_k\}$, $C^i_k = \frac{\tilde{A}^k_i}{\det \underline{A}}$ (4)

$\det \underline{A} \neq 0 \Leftrightarrow$ A invertierbar $\Leftrightarrow$ Spaltenvektoren v. A sind lin. unabhängig

Multiplikationstheorem: $\det(\underline{A} \cdot \underline{B}) = (\det \underline{A})(\det \underline{B})$ (5)

Det. der Inversen: $\det(\underline{A}^{-1}) = (\det \underline{A})^{-1}$ (6)

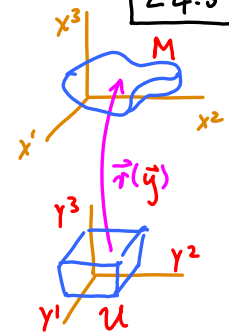
Krummlinige Integration in n Dimensionen

Z4.5

$$\vec{r}: U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow M \subset \mathbb{R}^n$$

$$\vec{y} \mapsto \vec{r}(\vec{y}) \equiv \vec{x}(\vec{y}) = \begin{pmatrix} x^1(y^1, \dots, y^n) \\ \vdots \\ x^n(y^1, \dots, y^n) \end{pmatrix}$$

krummlinig $\vec{y}$ $\vec{r}(\vec{y})$ $\vec{x}(\vec{y})$ kartesisch



n-dimensionales
'Volumenelement':

$$dV^n = dy^1 \dots dy^n \cdot \left| \frac{\partial(x^1, \dots, x^n)}{\partial(y^1, \dots, y^n)} \right|$$

'Jacobi-Determinante', 'Funktionaldeterminante': = Volumenelement, welches von Koordinatenbasisvektoren $\vec{v}_j = \frac{\partial \vec{x}}{\partial y^j}$ aufgespannt wird:

$$\left| \frac{\partial \vec{x}}{\partial \vec{y}} \right| \equiv \left| \frac{\partial(x^1, \dots, x^n)}{\partial(y^1, \dots, y^n)} \right| = \det \left[\frac{\partial \vec{x}}{\partial y^1}, \frac{\partial \vec{x}}{\partial y^2}, \dots, \frac{\partial \vec{x}}{\partial y^n} \right] \equiv \det \begin{pmatrix} \frac{\partial x^1}{\partial y^1} & \frac{\partial x^1}{\partial y^2} & \dots & \frac{\partial x^1}{\partial y^n} \\ \frac{\partial x^2}{\partial y^1} & \frac{\partial x^2}{\partial y^2} & \dots & \frac{\partial x^2}{\partial y^n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial x^n}{\partial y^1} & \frac{\partial x^n}{\partial y^2} & \dots & \frac{\partial x^n}{\partial y^n} \end{pmatrix}$$

n-dimensionales Integral:

$$\int_M dx^1 \dots dx^n f(x^1, \dots, x^n) = \int_U dy^1 \dots dy^n \left| \frac{\partial(x^1, \dots, x^n)}{\partial(y^1, \dots, y^n)} \right| f(x^1(\vec{y}), \dots, x^n(\vec{y}))$$

Das ist Verallgemeinerung der Substitutionsregel in 1D:

$$\int dx f(x) = \int dy \left| \frac{dx}{dy} \right| f(x(y))$$

Zusammenfassung: L7 Diagonalisieren, Eigenwerte, Eigenvektoren

ZL7

Eigenwertgleichung:

$$A \cdot \vec{v} = \lambda \vec{v}$$

Eigenwert
Eigenvektor

(1)

Bedingung an EW:

$$0 = \det(A - \lambda \mathbb{1}) := P_A(\lambda)$$

charakteristisches
Polynom

(2)

Für $A \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n)$ ist $P_A(\lambda)$ ein Polynom v. Grad n , mit n Nullstellen. diese entsprechen den n Eigenwerten v. A

(3)

Wenn EW λ_j bekannt ist, finde dazugehörigen EV $\vec{v}_j$ durch Lösen des linearen Gleichungssystems:

$$(A - \lambda_j \mathbb{1}) \vec{v}_j = \vec{0}$$

(4)

Falls n linear unabhängige EV existieren, wird A diagonalisiert durch,

$$T^{-1} \cdot A \cdot T = D = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$$

(5)

wobei T die EV als Spaltenvektoren hat:

$$T = (\vec{v}_1, \vec{v}_2, \dots, \vec{v}_n)$$

(6)

Determinante = Produkt der Eigenwerte:

$$\det(A) = \prod_j \lambda_j$$

(7)

Spur = Summe der Eigenwerte:

$$\text{Sp}(A) = \sum_j \lambda_j$$

Zusammenfassung: L8.1 Unitäre/orthogonale Matrizen

zL 8a

Reelles Skalarprodukt (L3.1): $\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{R}, \langle \vec{u}, \vec{v} \rangle = u^i \delta_{ij} v^j \quad u^i, v^j \in \mathbb{R}$

Komplexes Skalarprodukt (L3.4): $\langle \cdot, \cdot \rangle : V \times V \rightarrow \mathbb{C}, \langle \vec{u}, \vec{v} \rangle = \overline{u^i} \delta_{ij} v^j \quad u^i, v^j \in \mathbb{C}$

Komplexe Matrix:

$$A \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n)$$

$$(A^\dagger)^i_j = \overline{A^j_i}$$

Adjungierte Matrix:

$$A^\dagger \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n),$$

$$(A^\dagger)^i_j = (A^j_i)^\dagger \equiv \overline{(A^j_i)} \quad \text{in Ortnormalbasis}$$

Transponierte Matrix:

$$A^T \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n)$$

$$(A^T)^i_j = (A^j_i)^T \equiv (A^j_i)^T \quad \text{in Ortnormalbasis}$$

$\text{mat}(\mathbb{C}, n, n) \ni U$ ist 'unitär' falls $U^\dagger \cdot U = \mathbb{1} \quad (\text{äquivalent}) \quad U^{-1} = U^\dagger$

Komplexes Skalarprodukt invariant: $\langle U \cdot \vec{v}, U \cdot \vec{w} \rangle = \langle \vec{v}, \vec{w} \rangle$

$\text{mat}(\mathbb{R}, n, n) \ni O$ ist 'orthogonal' falls $O^T \cdot O = \mathbb{1} \quad (\text{äquivalent}) \quad O^{-1} = O^T$

Reelles Skalarprodukt invariant: $\langle O \cdot \vec{v}, O \cdot \vec{w} \rangle = \langle \vec{v}, \vec{w} \rangle$

Spalten (oder Zeilen-)vektoren einer unitären oder orthogonalen Matrix bilden eine orthonormierte Basis.

$$U = (\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_n) \quad \langle \vec{v}_i, \vec{v}_j \rangle = \delta_{ij}$$

Zusammenfassung: L8.1 Unitäre/orthogonale Gruppen

zL 8b

'Unitäre Gruppe':

$$U(n) = \{ U \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n); U U^\dagger = \mathbb{1} \}$$

'Orthogonale Gruppe':

$$O(n) = \{ O \in \text{mat}(\mathbb{R}, n, n); O^T O = \mathbb{1} \}$$

'spezielle unitäre Gruppe':

$$SU(n) = \{ U \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n); U^\dagger U = \mathbb{1}, \det U = 1 \}$$

'spezielle orthogonale Gruppe':

$$SO(n) = \{ O \in \text{mat}(\mathbb{R}, n, n); O^T O = \mathbb{1}, \det O = 1 \}$$

Zusammenfassung: L8.2 Hermitesche/symmetrische Matrizen

$A \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n)$ ist 'hermitesch', falls $A \stackrel{!}{=} A^\dagger \Rightarrow A^i_j \stackrel{!}{=} (A^\dagger)^i_j = \overline{A^j_i}$

Für hermitesche Matrizen gilt: $\langle \vec{x}, A \vec{x} \rangle = \langle A \vec{x}, \vec{x} \rangle$ und $\langle \vec{x}, A \vec{x} \rangle \in \mathbb{R}$

$A \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n)$ ist 'symmetrisch', falls $A \stackrel{!}{=} A^T \Rightarrow A^i_j \stackrel{!}{=} (A^T)^i_j = A^j_i$

Für symmetrische Matrizen gilt:

$$\langle \vec{x}, A \vec{x} \rangle = \langle A \vec{x}, \vec{x} \rangle$$

(8)

Zusammenfassung: L8.2 Diagonalisierung v. hermiteschen und symm. Matrizen

ZL 8c

$A \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n)$ ist 'hermitesch', falls

$$A = A^\dagger \Rightarrow A_{ij} = (A^\dagger)_{ji} = \overline{A_{ji}}$$

in Orthonormalbasis

$A \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n)$ ist 'symmetrisch', falls
(oder $\mathbb{R}$)

$$A = A^T \Rightarrow A_{ij} = (A^T)_{ji} = A_{ji}$$

Für alle hermiteschen (insb. auch für alle reelle symmetrischen) Matrizen gilt:

- sie sind immer diagonalisierbar

- alle Eigenwerte sind reell:

$$\lambda = \bar{\lambda}$$

- es lässt sich immer eine Orthonormalbasis aus Eigenvektoren finden

- Eigenvektoren zu verschiedenen Eigenwerten sind orthogonal:

$$(\lambda_2 - \lambda_1) \langle \vec{v}_2, \vec{v}_1 \rangle = 0$$

Für $\left\{ \begin{array}{l} \text{hermitesche} \\ \text{reell symmetrische} \end{array} \right\}$ Matrizen ist T $\left\{ \begin{array}{l} \text{unitär: } T^{-1} = T^\dagger \\ \text{orthogonal: } T^{-1} = T^T \end{array} \right.$

Zusammenfassung: C5.1-3,5 Taylor-Reihen

ZC 5.1-3

'Taylor-Reihe' v. $f(x)$ um $x=y$:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (x-y)^n f^{(n)}(y)$$

Wichtige Beispiele:

$$\frac{1}{1-z} = \sum_{n=0}^{\infty} z^n \quad (2) \quad \ln(1+z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n+1} z^{n+1}, \quad \text{für } |z| < 1$$

$$e^z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} z^n, \quad \sin z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)!} z^{2n+1} = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i} \quad \text{für } z \in \mathbb{C}$$

(4)

$$\cos z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n)!} z^{2n} = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}$$

Euler-de Moivre:

$$e^{iz} = \cos z + i \sin z \quad (7) \quad \text{Euler: } e^{i\pi} + 1 = 0 \quad (8)$$

Polardarstellung einer komplexen Zahl:

$$z = x + iy = |z| e^{i\phi} \quad (9)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} |z|^2 = x^2 + y^2, \quad (10) \\ \tan \phi = y/x \quad (11) \end{array} \right.$$



Zusammenfassung: L7.4 Funktionen von Matrizen

Z L7.4 a

Sei $f(z)$ eine beliebige komplexe Funktion mit wohldefinierter Taylor-Reihe,

$$f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, \quad z \mapsto f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!} z^n$$

Erweiterung als Matrix-Funktion:

$$f: \text{mat}(\mathbb{C}, n, n) \rightarrow \text{mat}(\mathbb{C}, n, n), \quad A \mapsto f(A) \equiv \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(0)}{n!} A^n$$

Falls die Matrix diagonalisierbar ist, $A = T D T^{-1}$ mit $D = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \lambda_2 & \\ & & \ddots \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix}$

gilt:

$$f(A) = T f(D) T^{-1} = T \begin{pmatrix} f(\lambda_1) & & \\ & f(\lambda_2) & \\ & & \ddots \\ & & & f(\lambda_n) \end{pmatrix} T^{-1}$$

Zusammenfassung: C7.2 Separable Differentialgleichungen

Z C7.2

Separable DG:

(f- und t-Abhängigkeit faktorisiert)

$$d_t f(t) = g(t) h(f(t)) \quad (1)$$

$$\text{mit } f(t_0) = f_0 \quad (1')$$

Lösungsweg: Trennung der Variablen

Trennen:

$$\frac{df}{h(f)} = g(t) dt \quad (2)$$

Integrieren:

$$\int_{f_0 = f(t_0)}^{f = f(t)} \frac{d\tilde{f}}{h(\tilde{f})} = \int_{t_0}^t g(\tilde{t}) d\tilde{t} \quad (3)$$

Stammfunktionen:

$$H(f) - H(f_0) = G(t) - G(t_0) \quad (4)$$

Nach f auflösen:

$$f(t) = H^{-1}(G(t) - G(t_0) + H(f_0)) \quad (5)$$

Zusammenfassung: C7.3 Lineare DG 1. Ordnung

| z C7.3

Lineare DG: $\dot{f}(t) = g(t) f(t) + h(t)$, mit $f(0) = f_0$

falls $h(t) = 0$: homogen

falls $h(t) \neq 0$: inhomogen

Allgemeine Lösung einer inhomogenen linearen DG:

$$f(t) = f_h(t) + f_p(t)$$

Allgemeine homogene Lösung erfüllt homogene DG:

$$\dot{f}_h(t) = g(t) f_h(t)$$

partikuläre Lösung erfüllt inhomogene DG:

$$\dot{f}_p(t) = g(t) \cdot f_p(t) + h(t)$$

homogene Lösung (Trennung d. Variablen):

$$f_h(t) = f_0 e^{\Phi(t)}$$

mit

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^t g(\tilde{t}) d\tilde{t}$$

partikuläre Lösung (Variation d. Konstanten):

$$f_p(t) = c(t) e^{\Phi(t)}$$

mit

$$c(t) = \int_{t_0}^t h(\tilde{t}) e^{-\Phi(\tilde{t})} d\tilde{t}$$

Zusammenfassung: C7.4 Homogenes System von linearen DG 1. Ordnung

| z C7.4a

$$\begin{array}{ccc} d_t \vec{f}(t) & = & A(t) \cdot \vec{f}(t) \\ \in \mathbb{C}^n \rightsquigarrow & & \rightsquigarrow \text{mat}(\mathbb{C}, n, n) \end{array}$$

Superpositionsprinzip (SP) für lineare, homogene DG:

$$\text{falls } d_t \vec{f}_j(t) = A(t) \cdot \vec{f}_j(t) \quad (j=1,2) \quad \text{dann} \quad d_t \vec{f}(t) = \lambda_1 \vec{f}_1(t) + \lambda_2 \vec{f}_2(t)$$

Für konstanten Koeffizienten:

exp-Ansatz:

$$\vec{f}(t) = \underbrace{\vec{v}}_{\text{zeitunabhängiger Vektor, } \in \mathbb{C}^n} e^{\lambda t} \quad \leftarrow \text{Zeitabhängigkeit nur im Exponenten!}$$

führt auf Eigenwertgleichung:

$$A \vec{v} = \lambda \vec{v}$$

Falls A diagonalisierbar ist, ist die allgemeine Lösung die Summe über alle Eigenlösungen:

$$\vec{f}(t) = \sum_j \vec{v}_j e^{\lambda_j t} \quad c_j \quad \text{mit} \quad A \cdot \vec{v}_j = \lambda_j \vec{v}_j, \quad j=1, \dots, n$$

$$\vec{c} = T^{-1} \cdot \vec{f}(0), \quad T = (\vec{v}_1, \dots, \vec{v}_n)$$

Allgemeinerer Exponentialansatz:
(funktioniert auch dann, wenn
A nicht diagonalisierbar ist):

$$\vec{f}(t) = e^{A t} \vec{f}_0$$

Zusammenfassung: Inhomogene lineare DG 1. Ordnung

| ZC7.4b

Lineare DG: $\dot{\vec{x}}(t) = A(t) \cdot \vec{x}(t) + \vec{b}(t)$
 $\in \mathbb{C}^n \rightsquigarrow \vec{x}(t)$ falls $= 0$: homogen
 $\leftarrow \text{mat}(\mathbb{C}, n, n)$ falls $\neq 0$: inhomogen

Allgemeine Lösung einer inhomogenen linearen DG: $\vec{x}(t) = \vec{x}_h(t) + \vec{x}_p(t)$

Allgemeine homogene Lösung: $\dot{\vec{x}}_h(t) = A(t) \cdot \vec{x}_h(t)$

(irgendeine) Partikuläre Lösung: $\dot{\vec{x}}_p(t) = A(t) \cdot \vec{x}_p(t) + \vec{b}(t)$

1D (n=1):

$$\dot{x}(t) = a(t)x(t) + b(t)$$

homogene Lösung (Trennung d. Variablen):

$$x_h(t) = x_0 e^{\Phi(t)}$$

$$\Phi(t) = \int_{t_0}^t a(\tilde{t}) d\tilde{t}$$

partikuläre Lösung (Variation d. Konstanten):

$$x_p(t) = c(t) e^{\Phi(t)}$$

mit:

$$c(t) = \int_{t_0}^t a(\tilde{t}) e^{-\Phi(\tilde{t})} d\tilde{t}$$

Zusammenfassung: Inhomogene lineare DG mit konstanten Koeffizienten

| ZC7.4c

$$\dot{\vec{x}}(t) = A \cdot \vec{x}(t) + \vec{b}(t), \quad A = A(\vec{x}) \in \text{mat}(\mathbb{C}, n, n), \quad \vec{b}(t) \in \mathbb{C}$$

(i) Suche Lösung für homogene DGL per Exponential-Ansatz:

e-Ansatz: $\vec{x}_h(t) = \vec{v} e^{\lambda t}$
Zeitabhängigkeit nur im Exponenten!
zeitunabhängiger Vektor, $\in \mathbb{R}^n$

Ergebnis: Allg. Lösung der homogenen DGL ist Summe über alle Eigenlösungen:

$$\vec{x}_h(t) = \sum_j c_j^i \vec{v}_j e^{\lambda_j t} \quad \text{mit} \quad A \cdot \vec{v}_j = \lambda_j \vec{v}_j, \quad j=1, \dots, n$$

durch Anfangsbedingungen bestimmt Eigenwertproblem!

(ii) Partikuläre Lösung für inhomogene DGL: per Variation der Konstanten

$$\vec{x}_p(t) = \sum_j c_p^j(t) \vec{v}_j e^{\lambda_j t}, \quad (\text{zerlegt in Eigenbasis von } A)$$

mit $c_p^j(t) = \int_{t_0}^t b^j(\tilde{t}) e^{-\lambda_j \tilde{t}} d\tilde{t}$ und $\vec{b}(t) = \sum_j b^j(t) \vec{v}_j$

(iii) Allgemeine Lösung: $\vec{x}(t) = \vec{x}_h(t) + \vec{x}_p(t)$

(6)

Zusammenfassung: C5.4 Taylor-Entwicklung zur Lösung v. Gleichungen

ZC 5.4,5

Löse die Gl. $0 = F(y(x), x)$ mittels einer Reihenentwicklung

für die gesuchte Funktion $y(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} y_n x^n$, mit $y_n \equiv y^{(n)}(x)|_{x=0}$

$$0 = F\left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} y_n x^n, x\right) \equiv \sum_{n=0}^{\infty} F_n(y_0, \dots, y_n) x^n \quad \text{mit} \quad \frac{1}{n!} F_n(y_0, \dots, y_n) = \left. \frac{d^n}{dx^n} F(y(x), x) \right|_{x=0}$$

löse die Gleichungen $F_n = 0$ iterativ nach $y_0, y_1, y_2, \dots$

Zusammenfassung: C5.5 Höherdimensionale Taylor-Reihen

$$f(\vec{y} + \vec{a}) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} (\vec{a} \cdot \vec{\nabla})^n f(\vec{y})$$

$$(\vec{a} \cdot \vec{\nabla})^n = \sum_{i_1=1}^m \dots \sum_{i_n=1}^m \overbrace{a_{i_1} \dots a_{i_n}}^{\text{orange}} \partial_{y^{i_1}} \dots \partial_{y^{i_n}}$$

$$n=2: \quad f(y^1 + a^1, y^2 + a^2) = f(\vec{y}) + (a^1 \partial_1 + a^2 \partial_2) f(\vec{y})$$

$$\left[\frac{1}{2} (a^1)^2 \partial_1^2 + a^1 a^2 \partial_1 \partial_2 + \frac{1}{2} (a^2)^2 \partial_2^2 \right] f(\vec{y}) + \mathcal{O}((a^i)^3)$$

Zusammenfassung: V3.3 Extrema mit Nebenbedingungen: Lagrange-Multiplikatoren

ZV3.3

Finde Extrema von $f: U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$

mit k Nebenbedingungen $g_i(\vec{x}) = 0$, wobei $g_i: U \subset \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, k$

Lösungsstrategie: Führe Lagrange-Multiplikatoren ein, λ_i , $i = 1, \dots, k$

und bilde Hilfsfunktion: $F(\vec{x}, \lambda_1, \dots, \lambda_k) = f(\vec{x}) - \sum_{i=1}^k \lambda_i g_i(\vec{x})$

Extremalbedingungen:

$$\vec{\nabla} F(\vec{x}, \lambda_1, \dots, \lambda_k) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda_i} F(\vec{x}, \lambda_1, \dots, \lambda_k) = 0 \quad \forall i = 1, \dots, k$$

Zusammenfassung C6.1 delta-Funktion

7 C 6.1

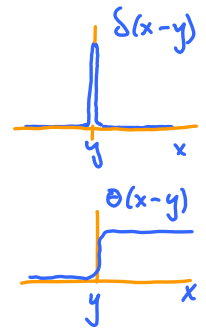
Definierende Eigenschaft:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-y) f(x) dx = f(y) \quad (1)$$

$\delta_y(x) = \delta(x-y)$ ist ein unendlich hoher, unendlich scharfer Peak bei $x = y$:

Werte: $\delta(x-y) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \neq y \\ \infty & \text{für } x = y \end{cases}$

Normierung: $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(x-y) dx = 1$



Beliebte Darstellungen:

Gauß-Peak:

$$\delta(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{\varepsilon \sqrt{\pi}} e^{-x^2/\varepsilon^2}$$

Lorentz-Peak:

$$\delta(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\varepsilon/\pi}{x^2 + \varepsilon^2}$$

Exp.-Peak:

$$\delta(x) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{1}{2\varepsilon} e^{-|x|/\varepsilon}$$

Wichtige Eigenschaften:

$$\delta(ax) = \frac{1}{|a|} \delta(x), \quad (7) \quad \delta(g(x)) = \sum_i \frac{\delta(x-y_i)}{|g'(y_i)|} \quad \text{wobei } y_i \text{ die einfachen Nullstellen von } g(x) \text{ sind.}$$

$$\frac{d}{dx} \theta(x) = \delta(x), \quad (9) \quad \int_{-\infty}^{\infty} \delta'(x-y) f(x) dx = -f'(y)$$

Zusammenfassung C6.2 Fourier-Reihen

7 C 6.2a

$$f: I \subset \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}, \quad x \mapsto f(x), \quad I = (x_0, x_0+L) \quad (1)$$

Fourier-Reihen-Ansatz für $f(x)$:

$$f(x) = \frac{1}{L} \sum_{k \in \frac{2\pi}{L} \mathbb{Z}} \underbrace{e^{ikx}}_{\text{'Fourier-Moden'}} \underbrace{\tilde{f}_k}_{\text{'Fourier-Komponenten'}} \quad (2)$$

Rücktransformation:

$$\tilde{f}_k = \int_I dx e^{-ik \cdot x} f(x) \quad (3)$$

Eigenschaften der 'Fourier-Moden':

Periodizität: Wellenlänge: $\lambda_k = \frac{2\pi}{k} = \frac{L}{n} \quad e^{ik \cdot (x+L)} = e^{ik \cdot x} \quad (4)$

Orthonormalität:

$$\int_I dx e^{i(k'-k)x} = L \delta_{kk'} \quad (5)$$

Vollständigkeit:

$$\frac{1}{L} \sum_{k \in \frac{2\pi}{L} \mathbb{Z}} e^{ikx} = \sum_{m \in \mathbb{Z}} \delta(x+mL) \quad \text{periodische delta-Funktion} \quad (6)$$

Parseval-Identität:

$$\int_I dx |f(x)|^2 = \frac{1}{L} \sum_k |\tilde{f}_k|^2 \quad (7)$$

L9.1 Konzeptionelle Grundlage der Fourier-Entwicklung

L 9.1 a
Z 9.1 a

Kernaussage: Fourier-Entwicklung ist Basiswechsel im Funktionenraum

Zur Erinnerung: Eigenschaften einer Basis in $\mathbb{C}^n$:

	Invariante Größe	In Komponenten ausgedrückt
Element:	(1) $\vec{v} = \sum_j \vec{e}_j v^j$ (1)	(1') $v^i = (\vec{v})^i = \langle \vec{e}_i, \vec{v} \rangle \stackrel{(3', 2')}{=} \delta_{ij} v^j$ (1')
Standardbasis: $j=1, \dots, n$	(2) $\vec{e}_j \stackrel{(6, 7)}{=} \sum_\alpha \vec{w}_\alpha \langle \vec{w}_\alpha, \vec{e}_j \rangle$ (17) (2)	(2') $(\vec{e}_j)^i = \delta^i_j$ (2')
Skalarprodukt:	(3) $\langle \vec{e}_j, \vec{e}_j \rangle = \delta_{jj}$ (5) $\langle \vec{u}, \vec{v} \rangle$	(3) Metrik ist trivial, also: Index oben = Index unten (3') $\sum_i \bar{u}^i v^i$ (3')
Allgemeine Basis: $\alpha=1, \dots, n$	(8) $\vec{w}_\alpha$ (4)	(4') $w^i_\alpha = (\vec{w}_\alpha)^i \stackrel{(1')}{=} \langle \vec{e}_i, \vec{w}_\alpha \rangle$ (4')
Orthonormalität:	(10) $\langle \vec{w}_\alpha, \vec{w}_\beta \rangle = \delta_{\alpha\beta}$ (5)	(5') $\sum_i \bar{w}^i_\alpha w^i_\beta \stackrel{(3')}{=} \delta_{\alpha\beta}$ (5')
Entwicklung:	(12) $\vec{v} = \sum_\alpha \vec{w}_\alpha v^\alpha$ (7) $= \sum_\alpha \vec{w}_\alpha \langle \vec{w}_\alpha, \vec{v} \rangle$ (16)	(13) $v^i = \sum_\alpha \underbrace{w^i_\alpha}_{T^i_\alpha} v^\alpha$ Basis-Wechsel (6)
Koeffizienten:	(14) $v^\alpha \stackrel{(6, 5)}{=} \langle \vec{w}_\alpha, \vec{v} \rangle$ (7)	(15) $v^\alpha \stackrel{(7, 2')}{=} \sum_i \bar{w}^i_\alpha v^i$ Basis-Wechsel (7')
Vollständigkeit:	(18) $\delta_{jj} \stackrel{(3)}{=} \langle \vec{e}_j, \vec{e}_j \rangle$ (2) $= \sum_\alpha \langle \vec{e}_j, \vec{w}_\alpha \rangle \langle \vec{w}_\alpha, \vec{e}_j \rangle$ (9)	(19) $\delta_{jj} \stackrel{(9)(4)}{=} w^j_\alpha \bar{w}^j_\alpha$ (6') $= T^j_\alpha \bar{T}^j_\alpha = (T T^\dagger)^j_j$ (8')

Analoge Strukturen existieren im Funktionenraum:

$$L^2(I) = \left\{ f: I \rightarrow \mathbb{C} \mid \int_I dx |f(x)|^2 < \infty \right\}$$

$x \mapsto f(x)$

$$\begin{aligned} \vec{v} &\leftrightarrow f & v^i &\leftrightarrow f(x) \\ \vec{e}_j &\leftrightarrow \delta_y & e^i_j &\leftrightarrow \delta_y(x) \\ \vec{w}_\alpha &\leftrightarrow \psi_k & w^i_\alpha &\leftrightarrow \psi_k(x) \equiv \frac{e^{ikx}}{\sqrt{L}} \end{aligned}$$

L 9.1 b
Z 9.1 b

	Invariante Größe	In Komponenten ausgedrückt
Element:	(1) f (1)	(1') $f(x) = \langle \delta_x, f \rangle \stackrel{(6)}{=} \int dx' \delta(x-x') f(x')$ (1')
Standardbasis:	(4) $\delta_y \stackrel{(6, 7)}{=} \sum_k \psi_k \langle \psi_k, \delta_y \rangle$ (9) (2)	(2') $\delta_y(x) = \delta(y-x)$ (2')
Skalarprodukt:	(3) $\langle f, g \rangle$ (9) $\langle \delta_{y'}, \delta_y \rangle = \delta(y'-y)$	(3) $\int dx \bar{f}(x) g(x)$ (3') (8) $\int dx \delta(y'-x) \delta(y-x) \stackrel{(1')}{=} \delta(y'-y)$
Allgemeine Basis: $k = \frac{2\pi}{L} \mathbb{Z}$	(10) ψ_k (4)	(11) $\psi_k(x) = \langle \delta_x, \psi_k \rangle \stackrel{(1')}{=} \frac{1}{\sqrt{L}} e^{ikx}$ (4')
Orthonormalität:	(13) $\langle \psi_k, \psi_{k'} \rangle = \delta_{kk'}$ (5)	(12) $\int dx \bar{\psi}_k(x) \psi_{k'}(x) \stackrel{(4')}{=} \int dx \frac{e^{i(k'-k)x}}{L} = \delta_{kk'}$ (5')
Entwicklung:	(15) $f = \sum_k \psi_k \tilde{f}_k$ (7) $= \sum_k \psi_k \langle \psi_k, f \rangle$ (18)	(14) $f(x) = \sum_k \frac{e^{ikx}}{\sqrt{L}} \tilde{f}_k$, $L = \frac{1}{\sqrt{L}} \tilde{f}_k$ Basis-Wechsel (6)
Koeffizienten:	(17) $\tilde{f}_k \stackrel{(6, 5)}{=} \langle \psi_k, f \rangle$ (7)	(16) $\tilde{f}_k = \int dx \frac{e^{-ikx}}{\sqrt{L}} f(x)$ Basis-Wechsel (7')
Vollständigkeit:	(20) $\delta(y'-y) \stackrel{(3)}{=} \langle \delta_{y'}, \delta_y \rangle$ (2) $= \sum_k \langle \delta_{y'}, \psi_k \rangle \langle \psi_k, \delta_y \rangle$ (9)	(19) $\delta(y'-y) \stackrel{(9)(4')}{=} \sum_k \underbrace{\psi_k(y') \bar{\psi}_k(y)}_{\frac{1}{L} e^{ik(y'-y)}}$ (8')

Zusammenfassung C6.2 Fourier-Reihen für periodische Funktionen

ZC6.2b

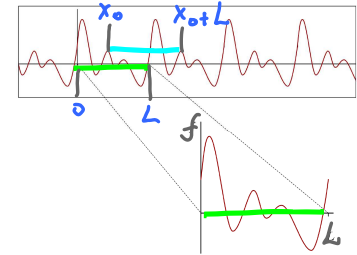
Sei $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$, $x \mapsto f(x)$ periodisch, mit Periode L :

$$f(x+L) = f(x)$$

$$f(x) \stackrel{(b.3)}{=} \frac{1}{L} \sum_k e^{ikx} \tilde{f}_k, \quad k \in \frac{2\pi n}{L}, \quad n \in \mathbb{Z}$$

$$\tilde{f}_k \stackrel{(c.5)}{=} \int_0^L dx e^{-ikx} f(x) = \int_{x_0}^{x_0+L} dx e^{-ikx} f(x)$$

beliebige Periode



Faltung: $(f * g)(x) \equiv \int_{x_0}^{x_0+L} dx' f(x-x') g(x'), \quad (\widetilde{f * g})_k = \tilde{f}_k \tilde{g}_k$

Ableitung in Fourier-Darstellung: $\tilde{f}'_k \stackrel{(2)}{=} \int_0^L dx e^{-ikx} f'(x) = ik \tilde{f}_k$

Zeit-Darstellung:

Für $f: (t_0, t_0+T) \rightarrow \mathbb{C}$, $t \mapsto f(t)$: $\omega_n = \frac{2\pi}{T} n, \quad n \in \mathbb{Z}$

Fourier-Reihen-Ansatz: $f(t) = \frac{1}{T} \sum_n e^{-i\omega_n t} \tilde{f}_n, \quad \tilde{f}_n = \int_{t_0}^{t_0+T} dt e^{+i\omega_n t} f(t)$

Ableitung: $\tilde{f}'_n = \int_{t_0}^{t_0+T} dt e^{+i\omega_n t} f'(t) = -i\omega_n \tilde{f}_n$

Zusammenfassung: C6.3 Fourier-Transformation

ZC6.3a

$$f: (-\infty, \infty) \rightarrow \mathbb{C}$$

Vorzeichen ist Konvention: in Physik +, Mathe: -

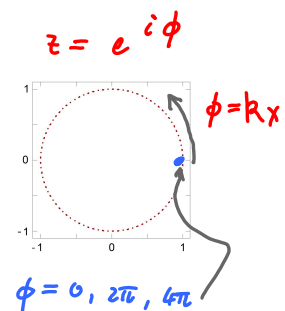
Fourier-Rück-Transformation: $f(x) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} e^{ikx} \tilde{f}(k)$

Fourier-Transformation: $\tilde{f}(k) = \int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-ikx} f(x)$

Wichtige Eigenschaften der Fourier-Exponenten:

'Vollständigkeit': $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} e^{ikx} = \delta(x)$

'Orthonormalität': $\int_{-\infty}^{\infty} dx e^{-ikx} = 2\pi \delta(k)$



Wichtige Beispiele:

Exponentialfunktion $\longleftrightarrow$ Lorentzfunktion

Gauß-Funktion $\longleftrightarrow$ Gauß-Funktion

Physikerkonvention:

$$f(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\omega}{2\pi} e^{i(kx - \omega t)} \tilde{f}(k, \omega) \quad (1)$$

Merkregel:

$$\frac{\partial}{\partial x} \xrightarrow{FT} ik \quad \frac{\partial}{\partial t} \xrightarrow{FT} -i\omega \quad (2)$$

Parseval:

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx \overline{f(t)} g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} \overline{\tilde{f}(k)} \tilde{g}(k) \quad (3)$$

Plancherel:

$$\int_{-\infty}^{\infty} dx |f(x)|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dk}{2\pi} |\tilde{f}(k)|^2 \quad (4)$$

Faltung:

$$(f * g)(x) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} dx' f(x-x') g(x') = (g * f)(x) \quad (5)$$

Faltungstheorem:

$$(\widetilde{f * g})(k) = \tilde{f}(k) \tilde{g}(k) \quad (6)$$

Zusammenfassung: C7.5 DGL mit konstanten Koeffizienten - Fourier, Green

$$\left[c_n \frac{d^n}{dt^n} + c_{n-1} \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + c_1 \frac{d}{dt} + c_0 \right] x(t) = f(t) \quad (1)$$

Kurznotation:

$$\hat{L}(t) x(t) = f(t) \quad (2)$$

Fourier-transformiert:

$$f(t) = \int \frac{d\omega}{2\pi} e^{-i\omega t} \tilde{f}(\omega) \quad (3)$$

$$\tilde{L}(-i\omega) \tilde{x}(\omega) = \tilde{f}(\omega) \quad (4) \quad \text{mit} \quad \tilde{L}(-i\omega) \equiv \sum_{\ell=0}^n c_{\ell} (-i\omega)^{\ell} \quad (5)$$

Aufgelöst:

$$\tilde{x}(\omega) \stackrel{(4)}{=} \tilde{g}(\omega) \tilde{f}(\omega) \quad (6) \quad \text{mit} \quad \tilde{g}(\omega) \stackrel{(4)}{=} \frac{1}{\tilde{L}(-i\omega)} \quad (7)$$

Green'sche

Funktion erfüllt:

$$\tilde{L}(-i\omega) \cdot \tilde{g}(\omega) \stackrel{(7)}{=} \underset{= \tilde{\xi}(\omega)}{1} \quad (8) \quad \xrightarrow{\text{Fourier-Tr.}} \quad \hat{L}(t) g(t) \stackrel{(1)}{=} \delta(t) \quad (9)$$

[(1) mit $f(t) = \delta(t)$]

Faltungstheorem,
angewandt auf (6):

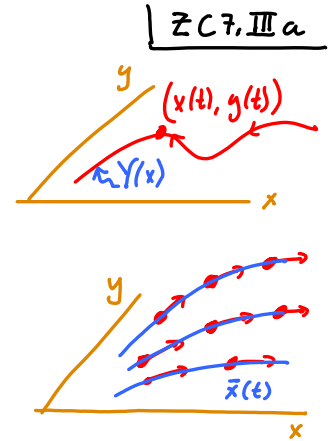
$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} du g(t-u) f(u) \quad (10)$$

= allgemeine Lösung
für beliebigen Antrieb!

Zusammenfassung: C7.6 Fluss einer DG

Autonome DGL in zwei Dimensionen:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y) \\ \dot{y} &= g(x, y) \end{aligned} \quad , \quad y(t) = Y(x(t)) \quad \Longrightarrow \quad \frac{dY}{dx} = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \frac{g(x, Y)}{f(x, Y)}$$



DGL für Feldlinie eines

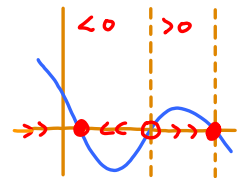
Vektorfelds $\vec{E}(\vec{x}): \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$, $\frac{dY}{dx} = \frac{\dot{y}}{\dot{x}} = \frac{E_y(x, Y)}{E_x(x, Y)}$

Zusammenfassung: C7.7 Fixpunkte, Linearisierung von Differentialgleichungen

$$\dot{\vec{x}} = \vec{f}(\vec{x}) \quad \text{hat Fixpunkt bei } \vec{x}^* \quad \text{falls} \quad \vec{f}(\vec{x}^*) = 0$$

Für n=1: $\dot{x} = f(x)$:
 ○ instabile Fixpunkte:
 ● stabile Fixpunkte:

$$\begin{aligned} f'(x^*) &> 0 \\ f'(x^*) &< 0 \end{aligned}$$



Lineare Stabilitätsanalyse (n=1):

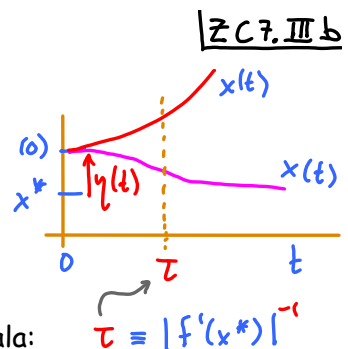
$$\dot{x} = f(x) \quad , \quad f(x^*) = 0$$

$$\eta(t) \equiv x(t) - x^* \quad \Rightarrow \quad \dot{\eta}(t) = f'(x^*) \eta(t)$$

Lösung für kleine Auslenkungen:

$$\eta(t) = \eta(0) \exp[f'(x^*) t]$$

mit charakteristischen Zeitskala:



Stabilität von Fixpunkten in höheren Dimensionen:

$$\dot{\vec{x}}(t) = \vec{f}(\vec{x}(t)) \quad , \quad \vec{f}(\vec{x}^*) = 0$$

$$\vec{\eta}(t) \equiv \vec{x}(t) - \vec{x}^* \quad \Rightarrow \quad \dot{\vec{\eta}}(t) = A \cdot \vec{\eta}(t) \quad , \quad A = (A_{ij}^i) = \frac{\partial f^i(\vec{x}^*)}{\partial x_j}$$

Lösung für kleine Auslenkungen ist
Summe über Eigenmoden von A:

$$\vec{\eta}(t) = \sum_j \vec{v}_j e^{\lambda_j t}$$

$$\vec{\eta}(t) \rightarrow \vec{0} \quad \text{nur falls 'A negativ definit' ist:} \quad \operatorname{Re}(\lambda_j) < 0 \quad \forall j$$

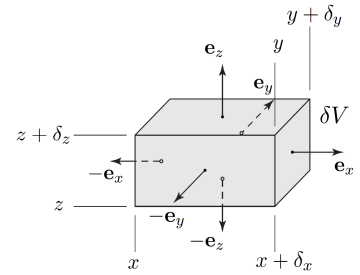
Zusammenfassung: V3.5 Divergenz, Satz v. Gauß

ZV 3.5

Divergenz (kartesisch): $\operatorname{div} \vec{u} = \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \sum_{i=1}^d \partial_i u^i$

Geometrische Definition der Divergenz:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \lim_{\delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\delta V} \int_{\delta S} d\vec{S} \cdot \vec{u} = \text{'Ausfluss pro Volumenelement'}$$



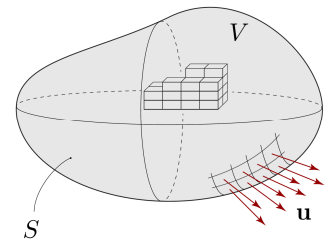
Satz v. Gauß: Volumenintegral der Divergenz = Flussintegral über Fläche

$$\int_V dV \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \int_S d\vec{S} \cdot \vec{u}$$

$\int_V$ ← Volumen $\int_S$ ← Aussenfläche von V

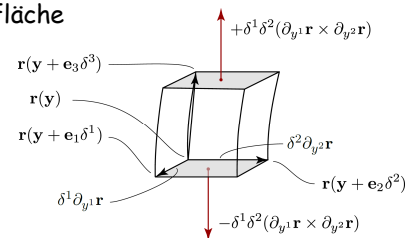
Symbolisch: $\int_V dV \partial_i u^i = \int_{\partial V} dS_i u^i$

suggestive Notation Rand des Volumens = Oberfläche



Divergenz in krummlinigen Koordinaten (d=3): $\vec{v}_j = \partial_{y_j} \vec{r}(y) = \vec{e}_j n_j$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \frac{1}{n_1 n_2 n_3} [\partial_{y_1} (n_2 n_3 u^1) + \partial_{y_2} (n_3 n_1 u^2) + \partial_{y_3} (n_1 n_2 u^3)]$$



Zusammenfassung: V3.6 Satz von Stokes

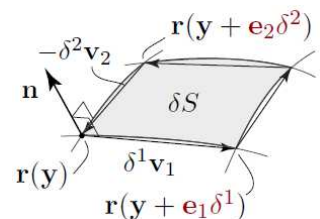
ZV 3.6

Rotation kartesisch: $\operatorname{rot} \vec{u} = \vec{\nabla} \times \vec{u} = \vec{e}_i \epsilon_{ijk} \partial_j u^k$

Geometrische Definition der Rotation:

'Zirkulation pro gerichteter Fläche' $\delta \vec{S} = \hat{n} \delta S$

$$\hat{n} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{u}) = \lim_{\delta S \rightarrow 0} \frac{1}{\delta S} \oint_{\gamma} d\vec{r} \cdot \vec{u} \quad (1)$$



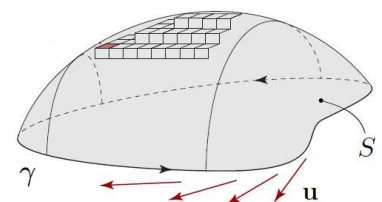
Satz v. Stokes: Flussintegral der Rotation = Linienintegral

$$\int_{S_\gamma} d\vec{S} \cdot (\vec{\nabla} \times \vec{u}(\vec{r})) = \oint_{\gamma} d\vec{r} \cdot \vec{u}(\vec{r}) \quad (2)$$

S_γ ← Fläche γ ← Rand der Fläche = Linie

Symbolisch: $\int_S dS_i (\partial_x u^i) = \int_{\partial S} d\vec{r}_i u^i \quad (3)$

suggestive Notation



Rotation in krummlinigen Koordinaten: $\vec{v}_j = \partial_{y_j} \vec{r}(y) = \vec{e}_j n_j$

$$(\vec{\nabla} \times \vec{u})^k = \frac{1}{n_i n_j} [\partial_{y_i} (n_j u^i) - \partial_{y_j} (n_i u^i)] \quad (4) \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{analog für zyklisch} \\ \text{vertauschte Komponenten} \end{array} \right. \quad (5)$$

Zusammenfassung: C9.1-2 Analytische Funktionen I

ZC 9.1-2

Def: Komplexe Funktion

$$f(z) = \begin{cases} U \subset \mathbb{C} & \longrightarrow \mathbb{C} \\ z = x + iy & \longmapsto f(z) = u(x, y) + i v(x, y) \end{cases}$$

ist analytisch in U , falls $f'(z)$ überall in U existiert.

Cauchy-Riemann-

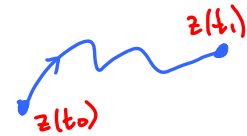
Differentialgleichungen (CRG):

$$\partial_x u = \partial_y v \quad (2) \quad \partial_x v = -\partial_y u$$

Def: Komplexes
Wegintegral:

$$\int_{\gamma} dz f(z) \equiv \int_{t_0}^{t_1} dt \frac{dz(t)}{dt} f(\gamma(t))$$

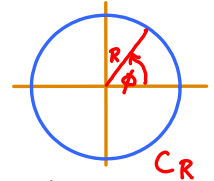
Substitution: $z = \gamma(t)$



Wichtiges

Beispiel:

$$I_n \equiv \oint_{C_R} dz z^n = \begin{cases} 2\pi i & \text{falls } n = -1 \\ 0 & \text{falls } n \neq -1 \end{cases} = 2\pi i \delta_{n, -1}$$



Satz v. Cauchy: falls $f(z)$ analytisch ist auf einfach zusammenhängendem Gebiet, gilt:

Geschlossener Weg liefert 0:

Wegunabhängigkeit:

$$\oint_{\gamma} f(z) = 0$$

$\gamma = (\gamma_1, -\gamma_2)$

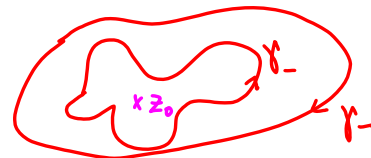
$$\iff \int_{\gamma_1} dz f(z) = \int_{\gamma_2} dz f(z) = F(z_1) - F(z_0), \text{ mit } F'(z) = f(z)$$



Zusammenfassung: C9.3-4 Analytische Funktionen II

ZC 9.3-4a

$$I_n^{(z)} \equiv \oint_{\gamma_z} dz (z - z_0)^n = \pm 2\pi i \delta_{n, -1}$$



Reihenentwicklungen:

- wenn f analytisch ist:

$$f(z) \stackrel{\text{Taylor}}{=} \sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_0)^n, \quad a_n = \frac{1}{n!} f^{(n)}(z_0)$$

- wenn f einen Pol der Ordnung p bei $z = z_0$ hat:

$$f(z) \stackrel{\text{Laurent}}{=} \sum_{n=-p}^{\infty} a_n (z - z_0)^n = \frac{a_{-p}}{(z - z_0)^p} + \dots + \frac{a_{-1}}{(z - z_0)^1} + \sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_0)^n$$

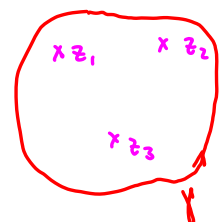
$\frac{a_{-1}}{(z - z_0)^1} \equiv \text{Res}(f, z_0)$

$f(z)$ habe mehrere isolierte Pole,

und der Weg γ umschlieÙe N Pole, bei $z_1, z_2, \dots, z_N$

Residuensatz:

$$\oint_{\gamma} dz f(z) \stackrel{(2), (3)}{=} \sum_{j=1}^N 2\pi i \text{Res}(f, z_j)$$



Residuenformel:

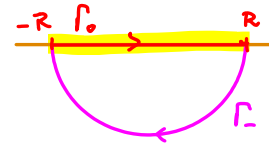
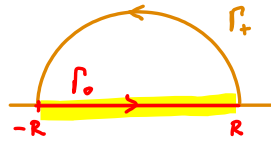
$$\text{Res}(f, z_0) = a_{-1} = \lim_{z \rightarrow z_0} \left[\frac{1}{(p-1)!} \partial_z^{p-1} \left[(z - z_0)^p f(z) \right] \right]$$

Kontur schließen:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{\Gamma_0} dz f(z) \quad (1)$$

$$= \lim_{R \rightarrow \infty} \int_{(\Gamma_0, \Gamma_+)} dz f(z) \quad (2)$$

$$= \pm 2\pi i \sum_j \text{Res}(f, z_j^{\pm}), \quad (3)$$



ZC 9.3-46

falls

$$\lim_{|z| \rightarrow \infty} [z f(z)] = 0$$

$$\left. \begin{matrix} z_j^+ \\ z_j^- \end{matrix} \right\}$$

Pole innerhalb



Diese Strategie funktioniert insbesondere für Integrale folgender Form:

$$I = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{P(x)}{Q(x)} dx \quad \text{mit} \quad P(x) = \sum_{j=0}^n p_j x^j, \quad Q(x) = \sum_{j=0}^m q_j x^j \quad \text{falls: } m \geq n+2 \quad (4)$$

$$I(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-i\omega t}}{Q(\omega)} d\omega = \begin{cases} \oint_{\Gamma_+} dz \frac{e^{+iz|t|}}{Q(z)} & \text{falls } t < 0 \quad (5) \\ \oint_{\Gamma_-} dz \frac{e^{-iz|t|}}{Q(z)} & \text{falls } t > 0 \quad (6) \end{cases}$$

$$Q(\omega) = \sum_{j=2}^m q_j \omega^j$$