

Kapitel D

Topologische Räume

*In der Geschichte der Mathematik zeigt sich uns ein großer Reichtum in der Entstehung verschiedenartiger Strukturen, die sich entfalten, durchdringen und vereinen. Die besonders einfachen und grundlegenden Strukturen treten dabei oft erst zum Schluss hervor.*

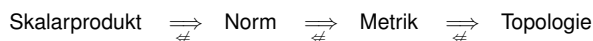
Egbert Brieskorn (1936–2013)

Inhalt dieses Kapitels D

- 1 Topologische Räume
- 2 Stetige Abbildungen
- 3 Umgebungen und Umgebungsbasen
- 4 Anwendung auf Funktionenräume
- 5 Inneres, Abschluss, Rand
- 6 Basen und Erzeugendensysteme

Rückblick und Motivation

Kapitel A: Einführung in und Ausblick auf dieses Semester  
 Kapitel B: Grundlagen und Aufbau des Zahlensystems  
 Kapitel C: von metrischen Räumen zur Topologie



Damit ist die Bühne bereitet für die Topologie:

- Ausblick und Motivation,
- Fundierung und Beispielfundus,
- analytisch-geometrische Intuition!

*Wenn du ein Schiff bauen willst,  
 lehre deine Leute nicht nur ihr Handwerk,  
 sondern erwecke ihre Sehnsucht nach dem Meer!*

Rückblick und Motivation

Topologien und topologische Räume

😊 Wir erheben die grundlegenden Eigenschaften nun zur Definition:

Definition D1A: topologischer Raum

Eine **Topologie** auf einer Menge  $X$  ist ein System  $\mathcal{T} \subset \mathfrak{P}(X)$  von Teilmengen in  $X$ , das folgende Bedingungen erfüllt:

- O1: Es gilt  $\emptyset \in \mathcal{T}$  und  $X \in \mathcal{T}$ .
- O2: Aus  $O_1, \dots, O_n \in \mathcal{T}$  folgt  $O_1 \cap \dots \cap O_n \in \mathcal{T}$ .
- O3: Aus  $O_i \in \mathcal{T}$  für alle  $i \in I$  folgt  $\bigcup_{i \in I} O_i \in \mathcal{T}$ .

Das Paar  $(X, \mathcal{T})$  heißt dann ein **topologischer Raum**. Er besteht aus der **Trägermenge**  $X$  und darauf der **Topologie**  $\mathcal{T}$ . Die Elemente  $x \in X$  nennen wir auch die **Punkte** des Raumes  $(X, \mathcal{T})$ . Im Raum  $(X, \mathcal{T})$  nennen wir eine Teilmenge  $U \subset X$  **offen**, falls  $U \in \mathcal{T}$ , und  $A \subset X$  **abgeschlossen**, falls ihr Komplement offen ist, also  $X \setminus A \in \mathcal{T}$  gilt.

⚠ Die Trägermenge  $X$  allein bestimmt noch nicht die Topologie  $\mathcal{T}$ ! Wir sagen „der Raum  $X$ “ nur wenn die Topologie  $\mathcal{T}$  im Kontext klar ist.

Diskrete und indiskrete Topologie

Beispiel D1B: diskrete Topologie

Auf jeder Menge  $X$  ist  $\mathcal{T} = \mathfrak{P}(X)$  eine Topologie, die wir die **diskrete Topologie** nennen. In dieser Topologie ist jede Teilmenge von  $X$  offen (und abgeschlossen). Dies ist die größte (= feinste) Topologie auf  $X$ .

Beispiel D1C: indiskrete Topologie

Auf jeder Menge  $X$  ist  $\mathcal{T} = \{\emptyset, X\}$  eine Topologie, die wir die **indiskrete Topologie** nennen. Hier sind nur die Teilmengen  $\emptyset$  und  $X$  offen (und abgeschlossen). Dies ist die kleinste (= gröbste) Topologie auf  $X$ .

**Kleinste Beispiele:** Auf  $X = \emptyset$  ist  $\mathcal{T} = \{\emptyset\}$  die einzige Topologie. Ebenso auf der Menge  $X = \{a\}$  ist  $\mathcal{T} = \{\emptyset, X\}$  die einzige Topologie. Auf der Menge  $X = \{a \neq b\}$  gibt es zwischen der indiskreten  $\{\emptyset, X\}$  und der diskreten  $\mathfrak{P}(X)$  genau zwei Topologien:  $\{\emptyset, \{a\}, X\}$  und  $\{\emptyset, \{b\}, X\}$ .

$n$	0	1	2	3	4	5	6	7
$t_n$	1	1	4	29	355	6942	209527	9535241

Metrische Topologie und Metrisierbarkeit

Beispiel D1D: metrische Topologie

Jede Metrik  $d : X \times X \rightarrow [0, \infty]$  auf  $X$  definiert ihre **metrische Topologie**  $\mathcal{T}_d = \mathcal{T}(X, d) := \{O \subset X \mid \forall a \in O \exists \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} \forall x \in X : d(a, x) < \varepsilon \Rightarrow x \in O\}$ . Dies ist tatsächlich eine Topologie, siehe C2M.

**Beispiel:** Die Menge  $\mathbb{R}^n$ , allgemein jede beliebige Teilmenge  $X \subset \mathbb{R}^n$ , trägt die **euklidische Topologie**  $\mathcal{T}_d$  dank der Metrik  $d(x, y) = |x - y|$ .

Definition D1E: metrisierbare Topologie

Eine Topologie  $\mathcal{T}$  auf eine Menge  $X$  heißt **metrisierbar**, falls eine Metrik  $d : X \times X \rightarrow [0, \infty]$  existiert, für die  $\mathcal{T}_d = \mathcal{T}$  gilt.

**Beispiele:** Die diskrete Topologie  $\mathcal{T} = \mathfrak{P}(X)$  auf  $X$  ist metrisierbar, etwa durch die diskrete Metrik (C2C) mit  $d(x, y) = 1$  für  $x \neq y$ . Die indiskrete Topologie  $\mathcal{T} = \{\emptyset, X\}$  auf  $X$  mit  $\#X \geq 2$  wird von keiner Metrik induziert, denn  $\mathcal{T}$  fehlt hierzu die Hausdorff-Eigenschaft C2o.

Vergleich von Topologien

Definition D1F: Vergleich von Topologien

Sind  $\mathcal{T}_1 \subset \mathcal{T}_2 \subset \mathfrak{P}(X)$  Topologien auf  $X$ , dann heißt  $\mathcal{T}_1$  **gröber** als  $\mathcal{T}_2$  und  $\mathcal{T}_2$  **feiner** als  $\mathcal{T}_1$ . Wir sagen,  $\mathcal{T}_2$  ist **echt feiner** als  $\mathcal{T}_1$ , falls  $\mathcal{T}_1 \subsetneq \mathcal{T}_2$  gilt.

Einfachste Beispiele:

- Auf jeder Menge  $X$  ist die diskrete Topologie  $\mathfrak{P}(X)$  die feinste und die indiskrete Topologie  $\{\emptyset, X\}$  die gröbste aller Topologien auf  $X$ .
- Auf  $X = \{a, b\}$  ist  $\{\emptyset, X\}$  die gröbste und  $\mathfrak{P}(X) = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, X\}$  die feinste Topologie, während die beiden Topologien  $\mathcal{T}_1 = \{\emptyset, \{a\}, X\}$  und  $\mathcal{T}_2 = \{\emptyset, \{b\}, X\}$  unvergleichbar sind.

Erste Beispiele aus der Analysis:

- Auf  $\mathcal{C}([0, 1], \mathbb{R})$  ist für  $1 \leq p < q \leq \infty$  die  $L^q$ -Topologie echt feiner als die  $L^p$ -Topologie (C3K).
- Auf  $\mathcal{C}_c(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  hingegen sind für  $1 \leq p < q \leq \infty$  die  $L^p$ -Topologie und die  $L^q$ -Topologie unvergleichbar (C3K).

**Koendliche und koabzählbare Topologie** D105

**Beispiel D1H: koendliche Topologie**  
 Sei  $X$  eine beliebige Menge. In der **koendlichen Topologie** sind die abgeschlossenen Mengen genau  $X$  und alle endlichen Teilmengen:  

$$\mathcal{T} = \{\emptyset\} \cup \{O \subset X \mid X \setminus O \text{ ist endlich}\}.$$
 Diese Topologie ist genau dann diskret, wenn  $X$  endlich ist.

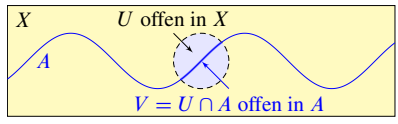
**Beispiel D1I: koabzählbare Topologie**  
 In der **koabzählbaren Topologie** auf  $X$  sind die abgeschlossenen Mengen genau  $X$  und alle abzählbaren Teilmengen:  

$$\mathcal{T} = \{\emptyset\} \cup \{O \subset X \mid X \setminus O \text{ ist abzählbar}\}.$$
 Diese Topologie ist genau dann diskret, wenn  $X$  abzählbar ist.

$\mathcal{T}_{\text{indiskret}} \subset \mathcal{T}_{\text{koendlich}} \subset \mathcal{T}_{\text{koabzählbar}} \subset \mathcal{T}_{\text{diskret}}$   
← größer: weniger offene Mengen                      feiner: mehr offene Mengen →

**Teilraumtopologie: Definition** D106

☺ Wir konstruieren neue topologische Räume aus alten.



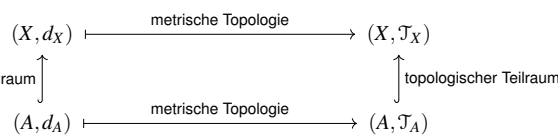
**Definition D1K: Teilraumtopologie**  
 Sei  $(X, \mathcal{T}_X)$  ein topologischer Raum und  $A \subset X$  eine Teilmenge mit der Inklusion  $\iota_A : A \hookrightarrow X : a \mapsto a$ . Die **Teilraumtopologie** von  $A$  in  $(X, \mathcal{T}_X)$  ist  

$$\mathcal{T}_A := \{V = A \cap U \mid U \in \mathcal{T}_X\} = \{\iota_A^{-1}(U) \mid U \in \mathcal{T}_X\} =: \iota_A^* \mathcal{T}_X.$$
 Wir nennen  $(A, \mathcal{T}_A)$  den **Teilraum** von  $(X, \mathcal{T}_X)$  auf der Teilmenge  $A \subset X$ .

Soweit nichts anderes vereinbart wird, statt wir jede Teilmenge  $A \subset X$  mit der Teilraumtopologie  $\mathcal{T}_A$  aus: Statt „ $V \subset A$  ist offen / abgeschlossen im Teilraum  $(A, \mathcal{T}_A)$ “ sagen wir kurz „ $V$  ist offen / abgeschlossen in  $A$ “.

**Teilraumtopologie: Eigenschaften** D107

**Beispiele:** (1) Für  $O \subset X$  offen, also  $O \in \mathcal{T}_X$ , gilt  $\mathcal{T}_O = \{U \in \mathcal{T}_X \mid U \subset O\}$ .  
 (2) Ist  $(X, \mathcal{T}_X)$  diskret/indiskret/koendlich/koabzählbar, so auch  $(A, \mathcal{T}_A)$ .  
 (3) Die Teilraumtopologie von  $\mathbb{R}$  in  $\mathbb{C}$  ist die euklidische (E2I). Allgemein:



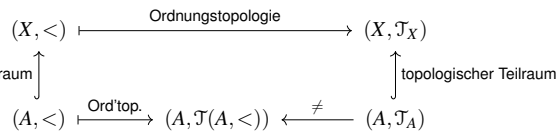
**Satz D1L: Teilräume von metrischen Räumen**  
 Sei  $(X, d_X)$  ein metrischer Raum mit der zugehörigen metrischen Topologie  $\mathcal{T}_X := \mathcal{T}(X, d_X)$  (D1D). Die Teilraummetrik  $d_A$  auf  $A$  (C2E) induziert ebenso die Topologie  $\mathcal{T}(A, d_A)$  auf  $A$ . Diese stimmt überein mit der Teilraumtopologie  $\mathcal{T}_A := \iota_A^* \mathcal{T}_X$  (D1K), das heißt  $\mathcal{T}_A = \mathcal{T}(A, d_A)$ . Ist also  $(X, \mathcal{T}_X)$  metrisierbar, dann auch jeder Teilraum  $(A, \mathcal{T}_A)$ .

**Ordnungstopologie** D108

**Definition D1M: Ordnungstopologie**  
 Jede Totalordnung  $<$  auf  $X$  definiert die zugehörige **Ordnungstopologie**  

$$\mathcal{T}_< = \mathcal{T}(X, <) := \{O \subset X \mid \forall x \in O \exists a, b \in X \sqcup \{\pm\infty\} : x \in ]a, b[ \subset O\}.$$

**Beispiele:** (1) Die Ordnungstopologie auf  $X = \mathbb{R}, \mathbb{Q}, \mathbb{Z}$  ist die euklidische.  
 (2) Die Teilmengen  $A = \{-1\} \cup \{2^{-k} \mid k \in \mathbb{N}\}$  und  $B = \{0\} \cup \{2^{-k} \mid k \in \mathbb{N}\}$  sind ordnungsisomorph und haben folglich dieselbe Ordnungstopologie. Die metrisch-euklidischen Topologien hingegen sind sehr verschieden!  
 (3) Für  $A \subset X$  gilt  $\mathcal{T}(A, <) \subset \mathcal{T}_A$ , aber nicht immer Gleichheit:



**Stetige Abbildungen: Definition** D201

**Definition D2A: stetige Abbildungen**  
 Sei  $f : (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Y, \mathcal{T}_Y)$  eine Abbildung topologischer Räume.  
 Die Abbildung  $f$  heißt **stetig**, wenn zu jeder offenen Menge  $V$  in  $(Y, \mathcal{T}_Y)$  das Urbild  $f^{-1}(V)$  in  $(X, \mathcal{T}_X)$  offen ist. In Quantorenschreibweise:  

$$f \text{ ist stetig} \iff \forall V \in \mathcal{T}_Y : f^{-1}(V) \in \mathcal{T}_X$$

$$\iff \forall Y \setminus B \in \mathcal{T}_Y : X \setminus f^{-1}(B) \in \mathcal{T}_X$$

Die Menge stetiger Abbildungen bezeichnen wir mit  $\mathcal{C}(X, \mathcal{T}_X; Y, \mathcal{T}_Y)$ , oder kurz  $\mathcal{C}(X, Y)$ , wenn die Topologien aus dem Kontext klar sind:  

$$\mathcal{C}(X, Y) = \mathcal{C}(X, \mathcal{T}_X; Y, \mathcal{T}_Y) := \{f : (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Y, \mathcal{T}_Y) \text{ stetig}\}$$

Hingegen nennen wir  $f$  **offen**, wenn zu jeder offenen Menge  $U$  in  $(X, \mathcal{T}_X)$  die Bildmenge  $f(U)$  in  $(Y, \mathcal{T}_Y)$  offen ist. Entsprechend **abgeschlossen**:  

$$f \text{ ist offen} \iff \forall U \in \mathcal{T}_X : f(U) \in \mathcal{T}_Y$$

$$f \text{ ist abgeschlossen} \iff \forall X \setminus A \in \mathcal{T}_X : Y \setminus f(A) \in \mathcal{T}_Y$$

**Stetige Abbildungen: erste Beispiele** D202

**Beispiel:** Ist  $(X, \mathcal{T}_X)$  diskret, so ist jede Abbildung  $f : X \rightarrow Y$  stetig, aber i.A. weder offen noch abgeschlossen, zum Beispiel  $f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R} : n \mapsto 2^{-n}$ .  
**Beispiel:** Ist  $(Y, \mathcal{T}_Y)$  diskret, so ist jede Abbildung  $f : X \rightarrow Y$  offen und abgeschlossen, aber i.A. nicht stetig, zum Beispiel  $\text{sign} : \mathbb{R} \rightarrow \{-1, 0, 1\}$ .  
**Beispiel:** Stetige Abbildungen  $f : \mathbb{R}^m \supset X \rightarrow Y \subset \mathbb{R}^n$ . Allgemein:  
 Seien  $(X, d_X)$  und  $(Y, d_Y)$  metrische Räume mit den induzierten Topologien  $\mathcal{T}_X$  auf  $X$  und  $\mathcal{T}_Y$  auf  $Y$ . Dank Satz C3G wissen wir:  
 Genau dann ist  $f : (X, d_X) \rightarrow (Y, d_Y)$  stetig im metrischen Sinne (C3E), wenn  $f : (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Y, \mathcal{T}_Y)$  stetig ist im topologischen Sinne (D2A).  
**Beispiel:** Die Abbildung  $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto \arctan(x)$  ist stetig und offen, aber nicht abgeschlossen, denn  $f(\mathbb{R}) = ]-\pi/2, +\pi/2[$ .  
**Beispiel:** Für  $a \in \mathbb{R}$  ist  $f_a : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto x^3 + ax$  stetig und abgeschlossen, aber offen nur für  $a \geq 0$ , dann sogar ein Homöomorphismus.

☺ Stetigkeit, Offenheit und Abgeschlossenheit sind unabhängig.

**Stetige Abbildungen: Komposition** D203

**Bemerkung D2B: Identität und Komposition**  
 Für jeden topologischen Raum ist die Identität  $\text{id}_X : (X, \mathcal{T}) \rightarrow (X, \mathcal{T})$  stetig.  
 Sind  $f : (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Y, \mathcal{T}_Y)$  und  $g : (Y, \mathcal{T}_Y) \rightarrow (Z, \mathcal{T}_Z)$  stetige Abbildungen, dann ist auch ihre Komposition  $g \circ f : (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Z, \mathcal{T}_Z)$  stetig.  
 Wir erhalten die Kategorie **Top**: Ihre Objekte sind topologische Räume  $X, Y, Z, \dots$ . Die Morphismenmenge  $\mathcal{C}(X, Y)$  besteht aus allen stetigen Abbildungen  $X \rightarrow Y$ . Die Komposition  $\circ : \mathcal{C}(Y, Z) \times \mathcal{C}(X, Y) \rightarrow \mathcal{C}(X, Z)$  ist die für Abbildungen übliche Hintereinanderausführung.

Ebenso bilden topologische Räume und ihre offenen Abbildungen eine Kategorie, ebenso abgeschlossene Abbildungen. Weitere Beispiele:

- Mengen (mit Struktur) und ihre (strukturertretenden) Abbildungen.
- Vektorräume über einem Körper  $K$  und ihre linearen Abbildungen.
- Offene Mengen  $U \subset \mathbb{R}^n$  und ihre differenzierbaren Abbildungen.

In Kapitel H diskutieren wir ausführlich die Sprache der Kategorien.

**Stetige Abbildungen: Komposition** D204 Erläuterung

**Definition D2A: stetige Abbildungen, fortgesetzt**

Ein **Homöomorphismus**  $(f, g) : (X, \mathcal{T}_X) \cong (Y, \mathcal{T}_Y)$  ist ein Paar stetiger Abbildungen  $f : X \rightarrow Y$  und  $g : Y \rightarrow X$  mit  $g \circ f = \text{id}_X$  und  $f \circ g = \text{id}_Y$ .

In diesem Fall nennen wir die Räume  $(X, \mathcal{T}_X)$  und  $(Y, \mathcal{T}_Y)$  **homöomorph**, geschrieben  $(X, \mathcal{T}_X) \cong (Y, \mathcal{T}_Y)$ , oder kurz  $X \cong Y$ , wenn die Topologien aus dem Kontext klar sind, etwa  $\mathbb{R} \cong ]-1, 1[$  mit euklidischen Topologien.

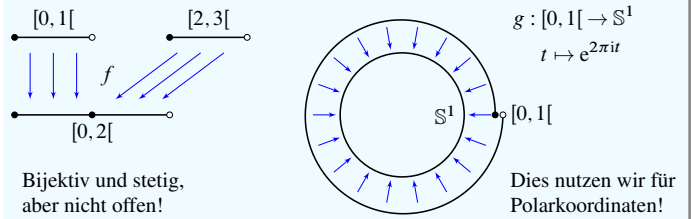
**Bemerkung:** Die Kurzschreibweise  $X \cong Y$  ist bequem und gefährlich. Die Ausführung  $(f, g) : (X, \mathcal{T}_X) \cong (Y, \mathcal{T}_Y)$  ist präzise und informativ!

**Erinnerung / Übung:** Homöomorphie ist eine Äquivalenzrelation. Das gilt allgemein für Isomorphie (strukturerehaltende Bijektion).

**Bemerkung:** Für jede Bijektion  $f : X \xrightarrow{\sim} Y$  sind äquivalent: (1)  $f^{-1}$  ist stetig, (2)  $f$  ist offen, (3)  $f$  ist abgeschlossen.

**Bemerkung D2C: bijektiv und stetig**

Ist  $f : X \rightarrow Y$  bijektiv und stetig, so kann  $f^{-1}$  dennoch unstetig sein!



**Universelles Gegenbeispiel:** Die Identität  $\text{id} : (X, \mathcal{T}_1) \rightarrow (X, \mathcal{T}_2)$  ist

- genau dann stetig, wenn  $\mathcal{T}_1 \supset \mathcal{T}_2$  gilt,
- genau dann offen, wenn  $\mathcal{T}_1 \subset \mathcal{T}_2$  gilt, und
- genau dann ein Homöomorphismus, wenn  $\mathcal{T}_1 = \mathcal{T}_2$  gilt.

**Beispiel D2E: Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung**

Sei  $\mathcal{C}^k = \mathcal{C}^k([a, b], \mathbb{R})$  der Vektorraum aller  $k$ -mal stetig differenzierbaren Funktionen  $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ . Darauf betrachten wir die linearen Abbildungen

$$D : \mathcal{C}^1 \rightarrow \mathcal{C}^0 : F \mapsto f, \quad f(x) = \lim_{t \rightarrow x} \frac{F(t) - F(x)}{t - x},$$

$$I : \mathcal{C}^0 \rightarrow \mathcal{C}^1 : f \mapsto F, \quad F(x) = \int_{t=x_0}^x f(t) dt.$$

Dank HDI gilt  $DI(f) = f$  und  $ID(F) = F - F(x_0)$ . Wir erhalten so

$$(I, D) : \mathcal{C}^0 \cong \mathcal{C}^1 := \{F \in \mathcal{C}^1 \mid F(x_0) = 0\}.$$

Bezüglich der Supremumsnormen ist  $I$  stetig, genauer gilt

$$|F(x)| = \left| \int_{x_0}^x f(t) dt \right| \leq \int_{x_0}^x |f(t)| dt \leq |a - b| \cdot |f|_{[a,b]}.$$

Hingegen ist  $D$  nicht stetig, wie die Folge  $f_n(x) = \sin(nx)/\sqrt{n}$  in  $\mathcal{C}^1$  zeigt. Erst nach Wahl der richtigen Normen wird  $(I, D)$  ein Homöomorphismus: Auf  $\mathcal{C}^1$  verfeinern wir die Supremumsnorm zu  $|F|_{\mathcal{C}^1} := |F|_{[a,b]} + |F'|_{[a,b]}$ .

Den HDI kennen Sie schon lange, sogar schon aus der Schule, richtig erklärt und bewiesen aus dem ersten Semester Analysis.

Auch Beispiele wie  $f_n(x) = \sin(nx)/\sqrt{n}$  sind Ihnen vertraut. Slogan:

*Integrieren glättet, Differenzieren raut auf!*

Dieses Beobachtung motiviert, auf den Räumen  $\mathcal{C}^k$  nicht einfach nur die Supremumsnorm zu betrachten: Diese ignoriert alle Ableitungen! Als  $\mathcal{C}^k$ -Norm nutzt man daher

$$|f|_{\mathcal{C}^k} = \sum_{i=0}^k |f^{(i)}|_{[a,b]} \quad \text{oder} \quad \left( \sum_{i=0}^k |f^{(i)}|_{[a,b]}^p \right)^{1/p} \quad \text{oder} \quad \max_{i=0}^k |f^{(i)}|_{[a,b]}.$$

Dies sind Normen auf  $\mathcal{C}^k([a, b], \mathbb{R})$  und untereinander äquivalent.

Verallgemeinert für  $\Omega \subset \mathbb{R}^n$  offen und  $1 \leq p \leq \infty$  erhalten wir so die Sobolev-Normen und durch Vervollständigung die Sobolev-Räume. Sie sind Grundlage für die Lösung partieller Differentialgleichungen, sie dienen als natürliche Definitionsbereiche der Differentialoperatoren und ebenso zur Fehlerabschätzungen numerischer Näherungsverfahren.

**Definition D3A: Umgebung eines Punktes**

Sei  $(X, \mathcal{T})$  ein topologischer Raum und  $a \in X$  ein Punkt. Eine Menge  $O \subset X$  heißt **offene Umgebung von  $a$**  in  $(X, \mathcal{T})$ , wenn  $a \in O \in \mathcal{T}$  gilt. Das System aller offenen Umgebungen bezeichnen wir mit

$$\mathcal{U}_a^\circ = \mathcal{U}_a^\circ(\mathcal{T}) = \mathcal{U}_a^\circ(X, \mathcal{T}) := \{O \in \mathcal{T} \mid a \in O\}.$$

Allgemeiner nennen wir  $U \subset X$  eine **Umgebung von  $a$**  in  $(X, \mathcal{T})$ , wenn  $U$  eine offene Umgebung umfasst, wenn also  $O \in \mathcal{T}$  existiert mit  $a \in O \subset U$ . Das System aller Umgebungen von  $a$  in  $(X, \mathcal{T})$  bezeichnen wir mit

$$\mathcal{U}_a = \mathcal{U}_a(\mathcal{T}) = \mathcal{U}_a(X, \mathcal{T}) := \{U \subset X \mid \exists O \in \mathcal{T} : a \in O \subset U\}.$$

Ebenso definieren wir (offene) Umgebungen einer Menge  $M \subset X$ .

**Beispiel:** In  $\mathbb{R}$  mit der euklidischen Topologie ist jedes offene Intervall  $]s, t[$  mit  $s < a < t$  eine offene Umgebung von  $a$ . Auch  $]s, t[$  sowie  $]s, t[$  und  $]s, t[$  sind Umgebungen von  $a$ , aber nicht offen in  $\mathbb{R}$ .

**Proposition D3C: offene Mengen und Umgebungen**

Eine Teilmenge  $U \subset X$  in einem topologischen Raum  $(X, \mathcal{T})$  ist genau dann offen, wenn sie Umgebung jedes ihrer Punkte  $x \in U$  ist.

**Beweis:** „ $\Rightarrow$ “: Ist  $U$  offen in  $(X, \mathcal{T})$ , dann ist  $U$  Umgebung jedes ihrer Punkte  $x \in U$  nach D3A. „ $\Leftarrow$ “: Ist  $U \subset X$  eine Umgebung jedes Punktes  $x \in U$ , dann existiert zu jedem  $x \in U$  eine offene Umgebung  $O_x \in \mathcal{T}$  mit  $x \in O_x \subset U$ . Somit ist  $U = \bigcup_{x \in X} O_x$  offen dank (O3) in D1A. □(ED)

**Definition D3E: Umgebungsbasis**

Eine Familie  $\mathcal{B}_a \subset \mathcal{U}_a$  heißt **Umgebungsbasis** von  $a$  im Raum  $(X, \mathcal{T})$ , wenn jede Umgebung  $U \in \mathcal{U}_a$  eine Basismenge  $V \in \mathcal{B}_a$  enthält:

$$\mathcal{U}_a = \{U \subset X \mid \exists V \in \mathcal{B}_a : V \subset U\}.$$

Somit bestimmt  $\mathcal{B}_a$  das gesamte Umgebungssystem  $\mathcal{U}_a$  von  $a$  in  $(X, \mathcal{T})$ .

**Beispiele:** Ein Punkt  $a \in X$  erlaubt i.A. verschiedene Umgebungsbasen: Das System  $\mathcal{B}_a = \mathcal{U}_a$  aller Umgebungen ist eine Umgebungsbasis von  $a$ , ebenso das System  $\mathcal{B}'_a = \mathcal{U}_a^\circ$  aller offenen Umgebungen.

Im diskreten Raum  $(X, \mathfrak{P}(X))$  ist  $\mathcal{B}_a = \{\{a\}\}$  eine UBasis von  $a \in X$ . Genau dann ist  $\mathcal{B}'_a \subset \mathcal{U}_a$  eine UBasis von  $a$ , wenn  $\mathcal{B}_a \subset \mathcal{B}'_a$  gilt.

Im indiskreten Raum  $(X, \{\emptyset, X\})$  ist  $\mathcal{B}_a = \{X\}$  die einzige UBasis von  $a$ .

Im metrischen Raum  $(X, d)$  bilden die offenen Bälle (C2L) die UBasis  $\mathcal{B}_a = \{B(a, r) \mid r \in \mathbb{R}_{>0}\}$ , ebenso  $\mathcal{B}'_a = \{B(a, r_n) \mid n \in \mathbb{N}\}$  für  $r_n \searrow 0$  in  $\mathbb{R}_{>0}$ .

Für  $a \in \mathbb{R}$  bilden die Intervalle die UBasis  $\mathcal{B}_a = \{]s, t[ \mid s < a < t \text{ in } \mathbb{R}\}$ , ebenso  $\mathcal{B}'_a = \{]s_n, t_n[ \mid n \in \mathbb{N}\}$  für streng monotone Folgen  $s_n \nearrow a \searrow t_n$ .

Ist  $(X, <)$  eine total geordnete Menge, dann bilden die Intervalle  $]s, t[$  mit  $s < a < t$  und  $s, t \in \hat{X} = X \sqcup \{\pm\infty\}$  eine UBasis von  $a$  im Raum  $(X, \mathcal{T}_{<})$ .

**Definition D3F: das erste Abzählbarkeitsaxiom (1AA)**

Ein topologischer Raum  $(X, \mathcal{T})$  heißt **erstabzählbar**, wenn jeder Punkt  $a \in X$  eine abzählbare Umgebungsbasis  $\mathcal{B}_a \subset \mathcal{U}_a(X, \mathcal{T})$  besitzt.

**Beispiel:** Jeder diskrete Raum  $(X, \mathfrak{P}(X))$  ist erstabzählbar dank  $\mathcal{B}_a = \{\{a\}\}$ , ebenso jeder indiskrete Raum  $(X, \{\emptyset, X\})$  dank  $\mathcal{B}_a = \{X\}$ .

**Beispiel:** Auf jeder überabzählbaren Menge  $X$ , etwa  $X = \mathbb{R}$ , sind weder die koendliche noch die koabzählbare Topologie erstabzählbar.

**Beispiel D3G:** Jeder metrische Raum ist erstabzählbar.

Jeder metrische Raum  $(X, d)$  erfüllt das erste Abzählbarkeitsaxiom: Zu  $a \in X$  sind die Bälle  $B(a, 1/k)$  mit  $k = 1, 2, 3, \dots$  eine Umgebungsbasis.

**Bemerkung:** Besitzt  $a$  in  $(X, \mathcal{T})$  eine abzählbare UBasis  $\{V_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ , so auch eine offene UBasis  $\{V_n^\circ \mid n \in \mathbb{N}\}$ . Für  $U_n = V_0^\circ \cap \dots \cap V_n^\circ$  ist dann die UBasis  $\{U_0 \supset U_1 \supset U_2 \supset \dots\}$  abzählbar, offen und monoton fallend.

**Konvergenz von Folgen: Definition** D305

**Definition D3I: Konvergenz und Häufungspunkte**  
 Sei  $(X, \mathcal{T})$  ein topologischer Raum,  $a \in X$  ein Punkt und  $\mathcal{B}_a \subset \mathcal{U}_a(X, \mathcal{T})$  eine Umgebungsbasis, etwa die triviale Wahl  $\mathcal{B}_a = \mathcal{U}_a$ .  
 Eine Folge  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$  in  $X$  **konvergiert** gegen  $a \in X$ , wenn jede Umgebung  $U$  von  $a$  in  $(X, \mathcal{T})$  schließlich alle Folgenglieder enthält:

$$(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \rightarrow a \text{ in } (X, \mathcal{T}) \iff \forall U \in \mathcal{U}_a(X, \mathcal{T}) \exists m \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq m} : x_n \in U$$

$$\iff \forall U \in \mathcal{B}_a \exists m \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq m} : x_n \in U$$

Schwächer heißt  $a \in X$  **Häufungspunkt** der Folge  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ , wenn jede Umgebung  $U$  von  $a$  in  $(X, \mathcal{T})$  unendlich viele Folgenglieder enthält:

$$(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \rightsquigarrow a \text{ in } (X, \mathcal{T}) \iff \forall U \in \mathcal{U}_a(X, \mathcal{T}) \forall m \in \mathbb{N} \exists n \in \mathbb{N}_{\geq m} : x_n \in U$$

$$\iff \forall U \in \mathcal{B}_a \forall m \in \mathbb{N} \exists n \in \mathbb{N}_{\geq m} : x_n \in U$$

Statt „ $x_n \rightarrow a$ “ schreibt man auch „ $\lim x_n = a$ “; das kann gefährlich sein. Ehrlicher wäre die Schreibweise als Menge  $\text{Lim } x_n := \{a \in X \mid x_n \rightarrow a\}$ .

**Konvergenz von Folgen: Beispiele** D306

**Beispiele:** In jedem metrischen Raum  $(X, d)$  ist die Konvergenz  $x_n \rightarrow a$  bezüglich der Metrik  $d$  (C3A) und der metrischen Topologie  $\mathcal{T}_d$  (D3I) gleichbedeutend dank der Umgebungsbasis  $\mathcal{B}_a = \{B(a, \varepsilon) \mid \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}\}$ .  
 In  $\mathbb{R} = \mathbb{R} \cup \{\pm\infty\}$  mit der Ordnungstopologie gilt  $x_n \rightarrow +\infty$  genau dann, wenn zu jeder Schranke  $s \in \mathbb{R}$  ein Index  $m \in \mathbb{N}$  existiert, sodass  $x_n > s$  für alle  $n \geq m$  gilt. Entsprechendes gilt für  $x_n \rightarrow -\infty$ .  
 Im diskreten Raum  $(X, \mathfrak{P}(X))$  ist  $\{a\}$  offen und somit eine Umgebung. Hier konvergieren daher nur die schließlich konstanten Folgen.  
 Im indiskreten Raum  $(X, \{\emptyset, X\})$  ist die Menge  $X$  die einzige Umgebung. Hier konvergiert daher jede Folge gegen jeden Punkt („chaotisch“).  
 In der koendlichen Topologie gilt  $x_n \rightarrow a$  genau dann, wenn die Folge  $(x_n)$  jeden Wert  $x \neq a$  nur endlich oft annimmt. Ist die Menge  $X$  unendlich und  $n \mapsto x_n$  injektiv, dann konvergiert die Folge  $(x_n)$  gegen jeden Punkt aus  $X$ .

**Hausdorff-Eigenschaft und eindeutige Grenzwerte** D307

**Definition D3J: Hausdorff-Eigenschaft**  
 Ein topologischer Raum  $(X, \mathcal{T})$  heißt **hausdorffsch** ( $T_2$ ) oder **separiert**, wenn zu je zwei Punkten  $a \neq b$  in  $X$  disjunkte Umgebungen existieren: Es gibt  $U, V$  mit  $a \in U \in \mathcal{T}$  und  $b \in V \in \mathcal{T}$  sowie  $U \cap V = \emptyset$ .

**Satz D3K: Eindeutigkeit des Grenzwertes**  
 Ist  $(X, \mathcal{T})$  hausdorffsch, dann hat jede Folge in  $(X, \mathcal{T})$  höchstens einen Grenzwert. Die Umkehrung gilt, wenn  $(X, \mathcal{T})$  erstabzählbar ist.

**Beweis:** „ $\Rightarrow$ “: Sei  $x_n \rightarrow a$  und  $a \neq b$ . Dank Hausdorff-Eigenschaft existieren  $U \in \mathcal{U}_a$  und  $V \in \mathcal{U}_b$  mit  $U \cap V = \emptyset$ . Wegen  $x_n \rightarrow a$  existiert ein Index  $m \in \mathbb{N}$  mit  $x_n \in U$  für alle  $n \geq m$ , folglich gilt  $x_n \notin V$ , somit  $x_n \not\rightarrow b$ .  
 „ $\Leftarrow$ “: Seien  $a, b$  in  $(X, \mathcal{T})$  nicht separiert, das heißt, je zwei Umgebungen von  $a$  und  $b$  schneiden sich. Ist  $(X, \mathcal{T})$  erstabzählbar, so existiert eine Umgebungsbasis  $U_0 \supset U_1 \supset U_2 \supset \dots$  von  $a$  und eine Umgebungsbasis  $V_0 \supset V_1 \supset V_2 \supset \dots$  von  $b$ . Für jeden Index  $n \in \mathbb{N}$  können wir einen Punkt  $x_n \in U_n \cap V_n$  wählen. Gemäß D3I folgt  $x_n \rightarrow a$  und  $x_n \rightarrow b$ , also  $a = b$ . QED

**Hausdorff-Eigenschaft und eindeutige Grenzwerte** D308

**⚠** Auf Erstabzählbarkeit können wir in Satz D3K nicht verzichten!  
**Beispiel:** Sei  $X$  eine Menge und  $\mathcal{T}$  die koabzählbare Topologie (D1I). Hierin gilt  $x_n \rightarrow a$  genau dann, wenn die Folge  $(x_n)$  schließlich konstant ist, also ein Index  $m \in \mathbb{N}$  existiert, sodass  $x_n = a$  für alle  $n \geq m$  gilt.  
 Ist  $X$  überabzählbar, dann ist der Raum  $(X, \mathcal{T})$  nicht hausdorffsch. Der Folgenbegriff ist aber zu schwach, um dies zu erkennen.  
 Das liegt an der restriktiven Indexmenge  $\mathbb{N}$ . Solche Probleme lösen wir, indem wir Folgen verallgemeinern zu **Netzen** (D8D) oder **Filtern** (D8L).  
**Übung:** Ist die Ordnungstopologie  $\mathcal{T}$  auf  $(X, <)$  hausdorffsch?  
**Lösung:** Ja. Beweis: Seien  $a < b$  in  $(X, <)$ . Wenn es ein  $z \in X$  mit  $a < z < b$  gibt, so sind  $a \in X_{<z} \in \mathcal{T}$  und  $b \in X_{>z} \in \mathcal{T}$  disjunkte offene Umgebungen; andernfalls genügen  $a \in X_{<b} \in \mathcal{T}$  und  $b \in X_{>a} \in \mathcal{T}$ .

**Stetigkeit und Offenheit von Abbildungen** D309

**Definition D3N: Stetigkeit und Offenheit in einem Punkt**  
 Sei  $f: (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Y, \mathcal{T}_Y)$  eine Abbildung topologischer Räume,  $x \mapsto y$ , sowie  $\mathcal{B}_x \subset \mathcal{U}_x = \mathcal{U}_x(X, \mathcal{T}_X)$  und  $\mathcal{B}_y \subset \mathcal{U}_y = \mathcal{U}_y(Y, \mathcal{T}_Y)$  Umgebungsbasen.

$f$  ist **stetig in  $x$**   $\iff \forall V \in \mathcal{U}_y : f^{-1}(V) \in \mathcal{U}_x$   
 $\iff \forall V \in \mathcal{B}_y : f^{-1}(V) \in \mathcal{U}_x$

$f$  ist **offen in  $x$**   $\iff \forall U \in \mathcal{U}_x : f(U) \in \mathcal{U}_y$   
 $\iff \forall U \in \mathcal{B}_x : f(U) \in \mathcal{U}_y$

Für metrische Räume  $(X, d_X)$  und  $(Y, d_Y)$  nutzen wir die UBasen der offenen Bälle. Wir erhalten damit sofort die übliche  $\varepsilon$ - $\delta$ -Definition:

- Genau dann ist  $f: X \rightarrow Y$  stetig in  $x \mapsto y$ , wenn zu jedem  $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$  ein  $\delta \in \mathbb{R}_{>0}$  existiert, sodass  $f(B(x, \delta)) \subset B(y, \varepsilon)$  gilt.
- Genau dann ist  $f: X \rightarrow Y$  offen in  $x \mapsto y$ , wenn zu jedem  $\delta \in \mathbb{R}_{>0}$  ein  $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$  existiert, sodass  $B(y, \varepsilon) \subset f(B(x, \delta))$  gilt.

Beide Eigenschaften bleiben unter Komposition erhalten.

**Lokale Homöomorphismen** D310

**Definition D3O: lokaler Homöomorphismus**  
 Wir nennen  $f: (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Y, \mathcal{T}_Y)$  einen **lokalen Homöomorphismus um  $x \in X$  und  $y = f(x)$** , wenn offene Umgebungen  $U \in \mathcal{U}_x^o(X, \mathcal{T}_X)$  und  $V \in \mathcal{U}_y^o(Y, \mathcal{T}_Y)$  existieren, sodass  $f(U) = V$  gilt und  $f|_U^V: U \rightarrow V$  ein Homöomorphismus ist. Wir nennen  $f: (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Y, \mathcal{T}_Y)$  einen **lokalen Homöomorphismus**, wenn dies in jedem Punkt  $x \in X$  gilt.

**Beispiele:** Jeder lokale Homöomorphismus ist stetig und offen.  
 Die Funktion  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} : x \mapsto x^2$  ist stetig. Sie ist offen in  $x \neq 0$ , aber nicht in  $x = 0$ . Um jedem Punkt  $x \neq 0$  ist sie ein lokaler Homöomorphismus; die lokale Umkehrfunktion  $\pm\sqrt{x}$  ist ein Zweig der reellen Wurzelfunktion.  
 Die Funktion  $f: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C} : z \mapsto z^2$  ist stetig und offen, auch in  $z = 0$ . Um jeden Punkt  $z \neq 0$  ist sie ein lokaler Homöomorphismus; die lokale Umkehrfunktion ist jeweils ein Zweig der komplexen Wurzelfunktion.  
 Auch  $\exp: \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C} \setminus \{0\}$  ist ein lokaler Homöomorphismus; die lokale Umkehrfunktion ist jeweils ein Zweig des komplexen Logarithmus.  
 😊 Sie kennen den lokalen Umkehrsatz aus der Differentialrechnung.

**Stetigkeit und Folgenkonvergenz** D311

**Satz D3P: Stetigkeit und Folgenstetigkeit**  
 Ist  $f: (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Y, \mathcal{T}_Y)$  stetig in  $a$ , dann sendet  $f$  jede konvergente Folge  $(x_n) \rightarrow a$  in  $(X, \mathcal{T}_X)$  auf eine konvergente Folge  $(f(x_n)) \rightarrow f(a)$  in  $(Y, \mathcal{T}_Y)$ . Die Umkehrung gilt, wenn  $a$  in  $(X, \mathcal{T})$  eine abzählbare UBasis besitzt. Ist der Startraum  $(X, \mathcal{T})$  erstabzählbar, zum Beispiel metrisierbar, dann ist die Stetigkeit von  $f$  äquivalent zur Folgenstetigkeit.

**Beweis:** „ $\Rightarrow$ “: Sei  $V$  eine Umgebung von  $f(a)$  in  $(Y, \mathcal{T}_Y)$ . Dank der Stetigkeit von  $f$  ist dann  $U = f^{-1}(V)$  eine Umgebung von  $a$  in  $(X, \mathcal{T}_X)$ . Wegen  $x_n \rightarrow a$  existiert ein Index  $m \in \mathbb{N}$  sodass  $x_n \in U$  für alle  $n \geq m$ . Daher gilt  $f(x_n) \in V$  für alle  $n \geq m$ . Das bedeutet  $f(x_n) \rightarrow f(a)$ .  
 „ $\Leftarrow$ “: Ist  $f$  in  $a$  nicht stetig, so existiert eine Umgebung  $V$  von  $f(a)$  in  $(Y, \mathcal{T}_Y)$ , deren Urbild  $U = f^{-1}(V)$  in  $(X, \mathcal{T}_X)$  keine Umgebung von  $a$  ist. Sei  $U_0 \supset U_1 \supset U_2 \supset \dots$  eine Umgebungsbasis von  $a$ . Für jeden Index  $n \in \mathbb{N}$  gilt  $U_n \not\subset U$ , denn andernfalls wäre  $U$  eine Umgebung von  $a$ . Wir wählen  $x_n \in U_n \setminus U$  und erhalten  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \rightarrow a$  gemäß D3I. Wegen  $x_n \notin U$  gilt  $f(x_n) \notin V$  für alle  $n \in \mathbb{N}$ , also  $f(x_n) \not\rightarrow f(a)$ . QED

**Stetigkeit und Folgenkonvergenz** D312

**⚠** Auf Erstabzählbarkeit können wir in Satz D3P nicht verzichten!  
**Beispiel:** Sei  $X$  überabzählbar, etwa  $X = \mathbb{R}$ . Hierauf sei  $\mathcal{T} = \mathfrak{P}(X)$  die diskrete Topologie (D1B) und  $\mathcal{T}' \subsetneq \mathcal{T}$  die koabzählbare Topologie (D1I). Die identische Abbildung  $f: (X, \mathcal{T}) \rightarrow (X, \mathcal{T}) : x \mapsto x$  ist nicht stetig, aber dennoch folgenstetig: Konvergiert  $x_n \rightarrow a$  in  $(X, \mathcal{T}')$ , so ist  $(x_n)$  schließlich konstant gleich  $a$ . Daher konvergiert  $(f(x_n))$  in  $(X, \mathcal{T})$  gegen  $f(a)$ .  
 Hier sind Folgen also zu schwach, um die Unstetigkeit zu erkennen. Das liegt an der restriktiven Indexmenge  $\mathbb{N}$ . Solche Probleme lösen wir, indem wir Folgen verallgemeinern zu **Netzen** (D8D) oder **Filtern** (D8L).  
**Satz D3S: Konvergenz von Teilfolgen**  
 Wenn eine Teilfolge  $(x_{n_k})_{k \in \mathbb{N}}$  mit Indizes  $n_0 < n_1 < n_2 < \dots$  gegen  $a$  in  $(X, \mathcal{T})$  konvergiert, dann ist  $a$  ein Häufungspunkt der Folge  $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ . Die Umkehrung gilt, wenn  $a$  in  $(X, \mathcal{T})$  eine abzählbare UBasis besitzt.  
**Übung:** Führen Sie dies nach obigem Vorbild aus!

**Satz D3V: Topologie aus Umgebungsbasen**

Sei  $(X, \mathcal{T})$  ein topologischer Raum. Zu jedem Punkt  $x \in X$  sei  $\mathcal{B}_x \subset \mathcal{U}_x(\mathcal{T})$  eine Umgebungsbasis. Diese erfreuen sich folgender Eigenschaften:

- UB1: Es gilt  $\mathcal{B}_x \neq \emptyset$ , und für alle  $U \in \mathcal{B}_x$  gilt  $x \in U \subset X$ .
- UB2: Zu  $U, V \in \mathcal{B}_x$  existiert  $W \in \mathcal{B}_x$ , sodass  $W \subset U \cap V$ .
- UB3: Jede Umgebung enthält eine offene Umgebung, das heißt: In jedem  $U \in \mathcal{B}_x$  liegt eine Teilmenge  $V \subset U$  mit  $x \in V$ , sodass gilt: Zu jedem Punkt  $y \in V$  existiert  $W \in \mathcal{B}_y$  mit  $W \subset V$ .

Erfüllt umgekehrt eine Familie  $(\mathcal{B}_x)_{x \in X}$  von Mengensystemen  $\mathcal{B}_x \subset \mathcal{P}(X)$  die Bedingungen (UB1–2), dann definiert dies auf  $X$  eine Topologie

$$\mathcal{T} := \{O \subset X \mid \forall x \in O \exists U \in \mathcal{B}_x : U \subset O\}.$$

Die letzte Bedingung (UB3) garantiert  $\mathcal{B}_x \subset \mathcal{U}_x(\mathcal{T})$ , somit ist  $\mathcal{B}_x$  tatsächlich eine Umgebungsbasis des Punktes  $x$  im Raum  $(X, \mathcal{T})$ .

**Übung:** Rechnen Sie dies sorgfältig nach!

**Beweis:** Ist  $\mathcal{B}_x$  eine Umgebungsbasis des Punktes  $x$  in  $(X, \mathcal{T})$ , dann folgen die Eigenschaften (UB1–3) unmittelbar aus der Definition.

Nehmen wir umgekehrt an, die Familie  $(\mathcal{B}_x)_{x \in X}$  erfüllt (UB1–2). Das so definierte Mengensystem  $\mathcal{T}$  erfüllt dann (O1) dank (UB1). Für (O2) ist nachzuweisen, dass für alle  $U, V \in \mathcal{T}$  auch der Durchschnitt  $W = U \cap V$  in  $\mathcal{T}$  liegt. Zu jedem  $x \in W$  existieren  $U_x, V_x \in \mathcal{B}_x$  mit  $U_x \subset U$  und  $V_x \subset V$ . Dank (UB2) existiert  $W_x \in \mathcal{B}_x$  mit  $W_x \subset U_x \cap V_x \subset U \cap V = W$ . Also gilt  $W \in \mathcal{T}$ . Axiom (O3) ist trivialerweise erfüllt.

Somit ist  $\mathcal{T}$  eine Topologie auf  $X$ . Bedingung (UB3) garantiert  $\mathcal{B}_x \subset \mathcal{U}_x(X, \mathcal{T})$ . Nach Konstruktion von  $\mathcal{T}$  ist demnach  $\mathcal{B}_x$  eine Umgebungsbasis von  $x$  in  $(X, \mathcal{T})$ . QED

**Beispiel D3W: metrische Topologie aus Umgebungsbasen**

Jede Metrik  $d : X \times X \rightarrow [0, \infty]$  definiert eine Topologie  $\mathcal{T}_d$  wie folgt (D1D): Als Umgebungsbasis jedes Punktes  $x \in X$  wählen wir die offenen Bälle,

$$\mathcal{B}_x = \{B(x, \varepsilon) \mid \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}\}.$$

Die Bedingung (UB1) ist trivialerweise erfüllt, und (UB2) gilt dank

$$B(x, \varepsilon) \cap B(x, \varepsilon') = B(x, \min\{\varepsilon, \varepsilon'\}).$$

Dank Satz D3V erhalten wir daraus die Topologie

$$\mathcal{T}_d = \{O \subset X \mid \forall x \in O \exists B(x, \varepsilon) \in \mathcal{B}_x : B(x, \varepsilon) \subset O\}.$$

Dank Dreiecksungleichung ist jeder offene Ball offen (C2M), somit gilt auch die letzte Bedingung (UB3), und daher ist  $\mathcal{B}_x$  eine Umgebungsbasis des Punktes  $x$  im Raum  $(X, \mathcal{T}_d)$ .

**Beispiel D3X: Ordnungstopologie aus Umgebungsbasen**

Jede Totalordnung  $<$  auf  $X$  definiert eine Topologie  $\mathcal{T}_<$  wie folgt (D1M): Als Umgebungsbasis jedes Punktes  $x \in X$  wählen wir offene Intervalle,

$$\mathcal{B}_x = \{]a, b[ \mid a, b \in X \cup \{\pm\infty\}, a < x < b\}.$$

Trivialerweise gelten (UB1) und (UB3), und (UB2) gilt dank

$$]a, b[ \cap ]a', b'[ = ]\max\{a, a'\}, \min\{b, b'\}[.$$

Dank Satz D3V erhalten wir daraus die Topologie

$$\mathcal{T}_< = \{O \subset X \mid \forall x \in O \exists ]a, b[ \in \mathcal{B}_x : ]a, b[ \subset O\}.$$

😊 Die Konstruktion einer Topologie aus vorgegebenen UBasen ist oft sehr natürlich und bequem, so wie hier in diesen Beispielen. Wir wollen dies nun auf erste wichtige Funktionenräume anwenden.

Gegeben sei eine Folge reeller Funktionen  $f_0, f_1, f_2, \dots, f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ .

$$\begin{aligned} f_n \rightarrow f \text{ punktweise} & \quad \Leftrightarrow \quad \forall x \in \mathbb{R} : f_n(x) \rightarrow f(x) \\ \Leftrightarrow & \quad \forall x \in \mathbb{R} \quad \forall \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} \quad \exists m \in \mathbb{N} \quad \forall n \in \mathbb{N}_{\geq m} : |f(x) - f_n(x)| < \varepsilon \end{aligned}$$

Wir suchen hierzu die **Topologie der punktweisen Konvergenz**. Zu  $x \in \mathbb{R}$  und  $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$  definieren wir die  $(x, \varepsilon)$ -Umgebung von  $f$  in  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ :

$$U(f; x, \varepsilon) := \{g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \mid |f(x) - g(x)| < \varepsilon\}.$$

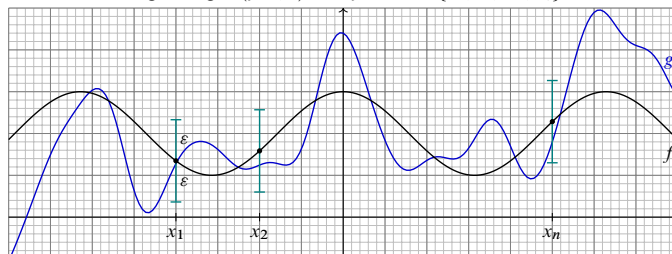
Hier gilt zwar (UB1,3), aber noch nicht (UB2). Zu  $J = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset \mathbb{R}$  und  $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$  definieren wir daher die  $(J, \varepsilon)$ -Umgebung

$$U(f; J, \varepsilon) := \{g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \mid |f(x) - g(x)| < \varepsilon \text{ für alle } x \in J\} = \bigcap_{x \in J} U(f; x, \varepsilon).$$

Diese Umgebungen erfüllen nun sowohl (UB1,3) als auch (UB2), denn

$$U(f; J, \varepsilon) \cap U(f; J', \varepsilon') \supset U(f; J \cup J', \min\{\varepsilon, \varepsilon'\}).$$

Skizze der Umgebung  $U(f; J, \varepsilon)$  von  $f$  für  $J = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ :



**Definition D4A: Topologie der punktweisen Konvergenz auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$**

Die Umgebungen  $U(f; J, \varepsilon)$  definieren gemäß D3V auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  die Topologie  $\mathcal{T}_{pw}$  der **punktweisen Konvergenz**: Genau dann ist eine Menge  $O \subset \mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  offen in  $\mathcal{T}_{pw}$ , wenn sie mit jedem  $f \in O$  eine Umgebung  $U(f; J, \varepsilon)$  enthält.

$$\mathcal{T}_{pw} = \{O \subset \mathbb{R}^{\mathbb{R}} \mid \forall f \in O \exists J = \{x_1, \dots, x_n\} \subset \mathbb{R} \exists \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} : U(f; J, \varepsilon) \subset O\}$$

**Satz D4B: Punktweise Konvergenz auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  ist nicht metrisierbar.**

Die Topologie  $\mathcal{T}_{pw}$  der punktweisen Konvergenz auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  ist zwar hausdorffsch, aber nicht erstabzählbar, also nicht metrisierbar.

Dasselbe gilt für die Teilräume  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}} \supset \mathcal{C}(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \supset \mathbb{R}[x]$ .

**Beweis:** ( $T_2$ ) Seien  $f \neq g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ . Also existiert  $x_0 \in \mathbb{R}$  mit  $f(x_0) \neq g(x_0)$ . Für  $\varepsilon = \frac{1}{2}|f(x_0) - g(x_0)| > 0$  gilt dann  $U(f; x_0, \varepsilon) \cap U(g; x_0, \varepsilon) = \emptyset$ .

(1AA) Seien  $(U_n)_{n \in \mathbb{N}}$  Umgebungen von  $f$ . Zu  $n$  existiert  $U(f; J_n, \varepsilon_n) \subset U_n$  mit  $J_n \subset \mathbb{R}$  endlich und  $\varepsilon_n \in \mathbb{R}_{>0}$ . Somit ist  $J = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} J_n \subset \mathbb{R}$  abzählbar, aber  $\mathbb{R}$  überabzählbar ( $B2N$ ), also  $J \neq \mathbb{R}$ . Wir wählen ein  $x_0 \in \mathbb{R} \setminus J$ .

Zu jedem  $n \in \mathbb{N}$  sei  $g_n = f + h_n : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  mit  $|h_n(x_0)| \geq 1$  und  $h_n|_{J_n} = 0$ . Dann gilt  $g_n \in U(f; J_n, \varepsilon_n) \subset U_n$ , aber  $g_n \notin U(f; x_0, 1)$ , also  $U_n \not\subset U(f; x_0, 1)$ . Demnach ist  $(U_n)_{n \in \mathbb{N}}$  keine Umgebungsbasis von  $f$ . QED

Ist  $X$  überabzählbar, so ist  $\mathbb{R}^X$  nicht erstabzählbar, also nicht metrisierbar. Hingegen sind die Räume  $\mathbb{R}^n$  und  $\mathbb{R}^{\mathbb{N}}$  erstabzählbar, sogar metrisierbar.

Unsere Konstruktion der Topologie  $\mathcal{T}_{pw}$  der punktweisen Konvergenz auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  scheint mühsam. Wir fragen uns daher: Geht es auch einfacher, etwa durch eine geeignete Metrik? Die erstaunliche Antwort ist: Nein!

Wie beweisen wir, dass ein Raum  $(X, \mathcal{T})$  nicht metrisierbar ist? Aufgeben genügt nicht, wir müssen ein Hindernis benennen!

Jede metrische Topologie hat zwei wichtige Eigenschaften: Sie ist hausdorffsch (D3J) und erstabzählbar (D3F).

Diese Kriterien sind also notwendig zur Metrisierbarkeit (D1E): Ist  $\mathcal{T}$  nicht hausdorffsch oder nicht erstabzählbar, so ist  $\mathcal{T}$  sicher nicht metrisierbar!

Das erste Kriterium, die Hausdorff-Eigenschaft, ist hier erfüllt, das zweite Kriterium, die Erstabzählbarkeit, jedoch nicht!

Die Topologie der punktweisen Konvergenz auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  wird daher von keiner Metrik induziert.

Gegeben sei eine Folge reeller Funktionen  $f_0, f_1, f_2, \dots, f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ .

$$f_n \rightarrow f \text{ punktweise} \iff \forall x \in \mathbb{R} : f_n(x) \rightarrow f(x)$$

$$\iff \forall x \in \mathbb{R} \forall \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} \exists m \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq m} : |f(x) - f_n(x)| \leq \varepsilon$$

Gleichmäßige Konvergenz ist Konvergenz in der Supremumsmetrik:

$$f_n \rightarrow f \text{ gleichmäßig} \iff \|f - f_n\|_{\mathbb{R}} \rightarrow 0$$

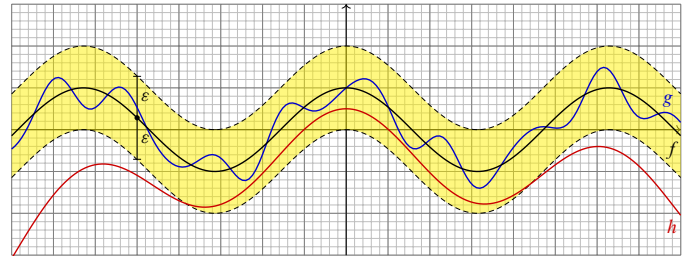
$$\iff \forall \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} \exists m \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq m} \forall x \in \mathbb{R} : |f(x) - f_n(x)| \leq \varepsilon$$

Für  $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$  definieren wir daher die  $\varepsilon$ -Umgebung von  $f \in \mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  durch

$$U(f, \varepsilon) := \{g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \mid |f - g|_{\mathbb{R}} < \varepsilon\}.$$

Diese Umgebungen erfüllen die erforderlichen Bedingungen (UB1–3), insbesondere gilt (UB2) dank  $U(f, \varepsilon) \cap U(f, \varepsilon') = U(f, \min\{\varepsilon, \varepsilon'\})$ .

Skizze der Umgebung  $U(f, \varepsilon)$  einer Funktion  $f$ :



Definition D4C: Topologie der gleichmäßigen Konvergenz auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$

Die Umgebungen  $U(f, \varepsilon)$  definieren gemäß D3v auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  die Topologie  $\mathcal{T}_{\text{uni}}$  der **gleichmäßigen Konvergenz**: Genau dann ist  $O \subset \mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  offen, wenn sie mit jedem  $f \in O$  auch eine Umgebung  $U(f, \varepsilon)$  enthält.

$$\mathcal{T}_{\text{uni}} = \{O \subset \mathbb{R}^{\mathbb{R}} \mid \forall f \in O \exists \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} : U(f, \varepsilon) \subset O\}$$

Definition C3P: punktweise und gleichmäßige Konvergenz

Gegeben sei eine Menge  $X$  und ein metrischer Raum  $(Y, d_Y)$  sowie eine Folge von Funktionen  $f_n: X \rightarrow Y$ . Wir definieren:

$$f_n \rightarrow f \text{ punktweise} \iff \forall x \in X : d_Y(f_n(x), f(x)) \rightarrow 0$$

$$\iff \forall x \in X \forall \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} \exists m \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq m} : d_Y(f_n(x), f(x)) \leq \varepsilon$$

$$f_n \rightarrow f \text{ gleichmäßig} \iff d(f_n, f) = |d_Y(f_n, f)|_X \rightarrow 0$$

$$\iff \forall \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} \exists m \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq m} \forall x \in X : d_Y(f_n(x), f(x)) \leq \varepsilon$$

⚠ Bei punktweiser Konvergenz kann die Stetigkeit zerbrechen!

**Beispiel:** Die Funktionen  $f_n: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$  mit  $f_n(x) = x^n$  konvergieren punktweise gegen  $f: [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}$  mit  $f(x) = 0$  für  $0 \leq x < 1$  und  $f(1) = 1$ .

Die Konvergenz  $f_n \rightarrow f$  gilt punktweise, aber nicht gleichmäßig: Das Supremum des Abstandes ist  $|f_n - f|_{[0,1]} = 1$  für jedes  $n \in \mathbb{N}$ .

Satz C3Q: Die gleichmäßige Konvergenz erhält Stetigkeit.

Seien  $(X, d_X)$  und  $(Y, d_Y)$  metrische Räume und  $f_n: X \rightarrow Y$  eine Funktionenfolge, die gleichmäßig gegen  $f: X \rightarrow Y$  konvergiert.

- 1 Sind alle  $f_n$  stetig in  $a \in X$ , dann auch  $f$ .
- 2 Sind alle  $f_n$  stetig auf ganz  $X$ , dann auch  $f$ .
- 3 Sind alle  $f_n$  gleichmäßig stetig auf  $X$ , dann auch  $f$ .
- 4 Sind alle  $f_n$  sogar  $L$ -lipschitz-stetig, dann auch  $f$ .

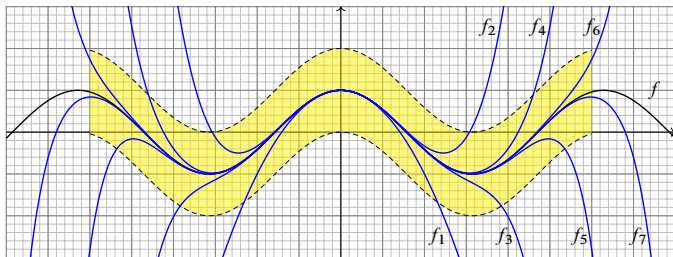
**Übung:** Wiederholen Sie hierzu den  $\varepsilon/3$ -Beweis aus der Analysis!

**Beweis:** (1) Sei  $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$ . Wegen  $d(f_n, f) \rightarrow 0$  existiert ein Index  $n \in \mathbb{N}$  mit  $d(f_n, f) \leq \varepsilon/3$ . Da  $f_n$  stetig ist, existiert  $\delta \in \mathbb{R}_{>0}$  sodass für alle  $x \in X$  mit  $d_X(x, a) < \delta$  die Ungleichung  $d_Y(f_n(x), f_n(a)) < \varepsilon/3$  gilt. Daraus folgt:

$$d_Y(f(x), f(a)) \leq d_Y(f(x), f_n(x)) + d_Y(f_n(x), f_n(a)) + d_Y(f_n(a), f(a)) < \varepsilon$$

Die Aussagen (2,3,4) beweist man genauso. QED

$$\exp(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}, \quad \sin(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{x^{2k+1}}{(2k+1)!}, \quad \cos(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{x^{2k}}{(2k)!}.$$



Eine Folge  $f_n: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  **konvergiert kompakt** gegen  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ , wenn auf jedem kompakten Intervall  $K = [-r, r]$  gleichmäßige Konvergenz vorliegt:

$$f_n \rightarrow f \text{ kompakt} \iff \forall r \in \mathbb{R}_{\geq 0} : |f - f_n|_{[-r,r]} \rightarrow 0$$

$$\iff \forall r \in \mathbb{R}_{>0} \forall \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} \exists m \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq m} \forall x \in [-r, r] : |f(x) - f_n(x)| \leq \varepsilon$$

Für  $r \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  und  $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$  betrachten wir das kompakte Intervall  $K = [-r, r]$  und definieren die  $(K, \varepsilon)$ -Umgebung von  $f$  in  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  durch

$$U(f; K, \varepsilon) := \{g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \mid |f - g|_K < \varepsilon\}.$$

Diese Umgebungen erfüllen (UB1–3), insbesondere gilt (UB2) dank

$$U(f; K, \varepsilon) \cap U(f; K', \varepsilon') \supset U(f; K \cup K', \min\{\varepsilon, \varepsilon'\}).$$

Definition D4D: Topologie der kompakten Konvergenz auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$

Die Umgebungen  $U(f; K, \varepsilon)$  definieren gemäß D3v auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  die Topologie  $\mathcal{T}_{\text{kpkt}}$  der **kompakten Konvergenz**: Genau dann ist eine Menge  $O \subset \mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  offen, wenn sie mit jedem  $f \in O$  auch eine Umgebung  $U(f; K, \varepsilon)$  enthält:

$$\mathcal{T}_{\text{kpkt}} = \{O \subset \mathbb{R}^{\mathbb{R}} \mid \forall f \in O \exists r \in \mathbb{R}_{\geq 0} \exists \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} : U(f; [-r, r], \varepsilon) \subset O\}$$

😊 Ebenso für Funktionen  $f: X \rightarrow \mathbb{R}$ . Ist  $X$  lokal-kompakt, so heißt dies auch **lokal gleichmäßige Konvergenz**. Sie erhält Stetigkeit! (Satz C3Q)

**Übung D4F:** Die kompakte Konvergenz ist nicht normierbar.

(1) Es gelten strikte Inklusionen  $\mathcal{T}_{\text{pw}} \subsetneq \mathcal{T}_{\text{kpkt}} \subsetneq \mathcal{T}_{\text{uni}}$  (von gröber zu feiner). Hierbei ist  $\mathcal{T}_{\text{uni}}$  normierbar, aber  $\mathcal{T}_{\text{pw}}$  nicht metrisierbar. Was gilt für  $\mathcal{T}_{\text{kpkt}}$ ?

(2) Wir haben  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}} \supset \ell^{\infty}(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \supset \mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \supset \mathcal{C}_c(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  sowie  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}} \supset \mathbb{R}[x]$ . Auf welchen dieser Räume ist die kompakte Konvergenz normierbar?

**Lösung:** (2) Auf keinem! (2a) Sei  $\|\cdot\|: \mathcal{C}_c(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$  eine Norm.

Zu  $n \in \mathbb{N}$  sei  $f_n: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  stetig mit  $f_n \neq 0$  und Träger in  $[n-1, n+1]$ .

Dann gilt  $\|f_n\| \neq 0$ , nach geeigneter Skalierung  $\|f_n\| = 1$ .

Es folgt  $f_n \rightarrow 0$  kompakt, aber  $\|f_n\| \not\rightarrow 0$ .

(2b) Angenommen,  $\|\cdot\|: \mathbb{R}[x] \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}$  wäre eine Norm für die kompakte Konvergenz. Sei  $f_n(x) = a_n x^n \in \mathbb{R}[x]$  mit  $\|f_n\| = 1$ . Wegen  $\|f_n\| \not\rightarrow 0$  gilt  $f_n \not\rightarrow 0$  kompakt: Es gibt ein Intervall  $[-r, r] \subset \mathbb{R}$  mit  $|f_n|_{[-r,r]} = a_n r^n \not\rightarrow 0$ .

Für  $g_n = f_n/n$  gilt demnach  $\|g_n\| = 1/n \rightarrow 0$ , also  $g_n \rightarrow 0$  kompakt. Auf  $[-2r, 2r] \subset \mathbb{R}$  jedoch gilt  $|g_n|_{[-2r,2r]} = a_n r^n \cdot 2^n/n \not\rightarrow 0$ . QED

Für jeden Radius  $r \in \mathbb{N}$  ist die gleichmäßige Konvergenz auf  $[-r, r]$  metrisierbar, sogar normierbar durch die Supremumsnorm  $|\cdot|_{[-r,r]}$ .

Wir stützen dies zur einer äquivalenten, aber endlichen Metrik:

$$d_r(f, g) = |f - g|_{[-r,r]}^* = \sup\{|f(x) - g(x)|^* \mid x \in [-r, r]\} \in [0, 1]$$

Für Funktionen  $f, g: [-r, r] \rightarrow \mathbb{R}$  ist dies eine Metrik, für  $f, g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  jedoch nur eine Halbmetrik (C2B).

**Satz D4E:** Metrisierung der kompakten Konvergenz

Die Halbmetriken  $(d_k)_{k \in \mathbb{N}}$  fassen wir zusammen zu

$$d: \mathbb{R}^{\mathbb{R}} \times \mathbb{R}^{\mathbb{R}} \rightarrow [0, 1] : d(f, g) = \sum_{k=1}^{\infty} 2^{-k} d_k(f, g).$$

Dies ist eine Metrik auf  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ , und es gilt  $\mathcal{J}_d = \mathcal{T}_{\text{kpkt}}$ .

**Übung:** Zeigen Sie (M0–3) sowie  $\mathcal{J}_d \subset \mathcal{T}_{\text{kpkt}}$  und  $\mathcal{J}_d \supset \mathcal{T}_{\text{kpkt}}$ .

😊 Ein solcherart metrisierbarer Vektorraum heißt **Fréchet-Raum**.

**Topologische Grundbegriffe** D501

äußere Punkte  
innerere Punkte  
Randpunkte  
Häufungspunkt

isolierte Punkte

$X = \mathbb{C}$  mit eukl. Topologie  
 $M = (B(0,3) \setminus B(0,2)) \cup \{0, \pm 1\} \cup [3,4[$

**Topologische Grundbegriffe** D502

**Definition D5A: topologische Grundbegriffe**

Sei  $(X, \mathcal{T})$  ein topologischer Raum und  $M \subset X$ . Ein Punkt  $x \in X$  heißt...

**innerer Punkt** von  $M$  in  $(X, \mathcal{T})$   $\iff M \in \mathcal{U}_x(X, \mathcal{T})$   
(Die Menge  $M$  ist eine Umgebung von  $x$ .)

**äußerer Punkt** von  $M$  in  $(X, \mathcal{T})$   $\iff (X \setminus M) \in \mathcal{U}_x(X, \mathcal{T})$   
(Das Komplement  $X \setminus M$  ist eine Umgebung von  $x$ .)

**Berührungspunkt** von  $M$  in  $(X, \mathcal{T})$   $\iff \forall U \in \mathcal{U}_x: U \cap M \neq \emptyset$   
(Jede Umgebung von  $x$  trifft die Menge  $M$ .)

**Randpunkt** von  $M$  in  $(X, \mathcal{T})$   $\iff \forall U \in \mathcal{U}_x: U \cap M \neq \emptyset \neq U \cap (X \setminus M)$   
(Jede Umgebung von  $x$  trifft sowohl  $M$  als auch  $X \setminus M$ .)

**Häufungspunkt** von  $M$  in  $(X, \mathcal{T})$   $\iff \forall U \in \mathcal{U}_x: (U \setminus \{x\}) \cap M \neq \emptyset$   
(Jede Umgebung von  $x$  trifft außer  $x$  mindestens einen Punkt von  $M$ .)

**isolierter Punkt** von  $M$  in  $(X, \mathcal{T})$   $\iff \exists U \in \mathcal{U}_x: U \cap M = \{x\}$   
(Eine genügend kleine Umgebung von  $x$  hat mit  $M$  nur  $x$  gemeinsam.)

**Inneres, Abschluss, Rand** D503

Die Menge aller inneren Punkte von  $M$  heißt das **Innere** oder auch der **offene Kern** von  $M$  in  $(X, \mathcal{T})$ , geschrieben

$$\overset{\circ}{M} = K_{\mathcal{T}}(M) = K_{(X, \mathcal{T})}(M) := \{x \in X \mid M \in \mathcal{U}_x(X, \mathcal{T})\} = \bigcup \{U \subset M \mid U \in \mathcal{T}\}$$

Es gilt  $M \supset M^\circ = (M^\circ)^\circ$ . Genau dann ist  $M$  offen, wenn  $M = M^\circ$  gilt.

Die Menge aller Berührungspunkte von  $M$  heißt der **Abschluss** oder auch die **abgeschlossene Hülle** von  $M$  in  $(X, \mathcal{T})$ , geschrieben

$$\bar{M} = H_{\mathcal{T}}(M) = H_{(X, \mathcal{T})}(M) := \{x \in X \mid \forall U \in \mathcal{U}_x(X, \mathcal{T}): U \cap M \neq \emptyset\} = \bigcap \{A \supset M \mid X \setminus A \in \mathcal{T}\}.$$

Es gilt  $M \subset \bar{M} = \bar{\bar{M}}$ . Genau dann ist  $M$  abgeschlossen, wenn  $M = \bar{M}$  gilt.

Die Menge aller Randpunkte von  $M$  heißt der **Rand** von  $M$ , geschrieben

$$\delta M := \bar{M} \setminus M^\circ \quad \text{bzw. ausführlich} \quad \delta_{(X, \mathcal{T})}(M) = H_{(X, \mathcal{T})}(M) \setminus K_{(X, \mathcal{T})}(M).$$

**Inneres, Abschluss, Rand** D504

⚠ Diese topologischen Begriffe sind **relativ**: Sie hängen nicht nur von der Menge  $M$  ab, sondern auch vom umgebenden Raum  $(X, \mathcal{T})$ .

**Beispiel:** Wir betrachten die Teilmenge  $M = ]0, 1[ \cup ]1, 2[ \cup \{3\}$  in jedem der drei Räume  $\mathbb{R}_{>0} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$  jeweils mit der euklidischen Topologie:

In  $\mathbb{R}_{>0}$  gilt:  $\overset{\circ}{M} = ]0, 1[ \cup ]1, 2[, \bar{M} = ]0, 2[ \cup \{3\}, \delta M = \{1, 2, 3\}$ .  
In  $\mathbb{R}$  gilt:  $\overset{\circ}{M} = ]0, 1[ \cup ]1, 2[, \bar{M} = [0, 2] \cup \{3\}, \delta M = \{0, 1, 2, 3\}$ .  
In  $\mathbb{C}$  gilt:  $\overset{\circ}{M} = \emptyset, \bar{M} = [0, 2] \cup \{3\}, \delta M = [0, 2] \cup \{3\}$ .

Sind Umgebungsbasen  $(\mathcal{B}_x)_{x \in X}$  für  $(X, \mathcal{T})$  gegeben, oder sogar eine Metrik  $d: X \times X \rightarrow [0, \infty]$ , die die Topologie  $\mathcal{T}$  induziert, so können wir Abschluss und Inneres der Menge  $M \subset X$  wie folgt charakterisieren:

$$\bar{M} = \{x \in X \mid \forall U \in \mathcal{B}_x: U \cap M \neq \emptyset\} = \{x \in X \mid d(x, M) = 0\}$$

$$\overset{\circ}{M} = \{x \in X \mid \exists U \in \mathcal{B}_x: U \subset M\} = \{x \in X \mid d(x, X \setminus M) > 0\}$$

**Abschluss und Folggrenzwerte** D505

**Satz D5C: Abschluss und Folggrenzwerte**

Im Raum  $(X, \mathcal{T})$  sei  $A \subset X$  eine Teilmenge und  $x \in X$  ein Punkt. Wenn es eine Folge  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  in  $A$  gibt, die gegen  $x$  in  $X$  konvergiert, dann gilt  $x \in \bar{A}$ . Die Umkehrung gilt, wenn  $x$  eine abzählbare Umgebungsbasis erlaubt.

**Beweis:** „ $\Rightarrow$ “: Sei  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  eine Folge in  $A$ , die gegen  $x$  konvergiert: Jede Umgebung  $U$  von  $x$  enthält schließlich alle Folgenglieder  $a_n$ , also mindestens einen Punkt von  $A$ . Somit gilt  $x \in \bar{A}$ .

„ $\Leftarrow$ “: Sei  $U_0 \supset U_1 \supset U_2 \supset \dots$  eine abzählbare Umgebungsbasis von  $x$ . Aus  $x \in \bar{A}$  folgt  $A \cap U_n \neq \emptyset$  für jedes  $n \in \mathbb{N}$ . Also existiert eine Folge  $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$  mit  $a_n \in A \cap U_n$  für alle  $n \in \mathbb{N}$ . Gemäß D3i gilt  $a_n \rightarrow x$ . □

**Korollar D5D: abgeschlossen und folgenabgeschlossen**

Jede abgeschlossene Menge  $A \subset X$  ist folgenabgeschlossen. Die Umkehrung gilt, wenn  $(X, \mathcal{T})$  erstabzählbar ist.

**Lokal-endliche Familien** D506

**Definition D5F: lokal-endliche Familien**

Eine Familie  $(A_i)_{i \in I}$  von Teilmengen  $A_i \subset X$  nennen wir...

**endlich**, wenn die Indexmenge  $I$  endlich ist,

**endlich** im Punkt  $x \in X$ , wenn  $I_x = \{i \in I \mid x \in A_i\}$  endlich ist,

**punktwise endlich**, wenn dies in jedem Punkt  $x \in X$  gilt,

**lokal-endlich** um  $x$  im Raum  $(X, \mathcal{T})$ , wenn eine offene Umgebung  $U$  existiert, also  $x \in U \in \mathcal{T}$ , sodass  $I_U = \{i \in I \mid A_i \cap U \neq \emptyset\}$  endlich ist,

**lokal-endlich** im Raum  $(X, \mathcal{T})$ , falls dies um jedem Punkt  $x \in X$  gilt.

Trivialerweise gilt  $I \supset I_U \supset I_x$ , somit gelten die Implikationen

$$\text{endlich} \implies \text{lokal-endlich} \implies \text{punktwise endlich}.$$

Die Umkehrungen gelten nicht, siehe  $([n, n+1])_{n \in \mathbb{Z}}$  und  $(\{x\})_{x \in \mathbb{Q}}$  in  $\mathbb{R}$ .

**Lokal-endliche Vereinigung** D507

**Satz D5G: lokal-endliche Vereinigung**

(1) In jedem topologischen Raum  $(X, \mathcal{T})$  gilt die Inklusion

$$\bigcup_{i \in I} \bar{A}_i \supset \overline{\bigcup_{i \in I} A_i}.$$

(2) Genau dann gilt Gleichheit, wenn  $A := \bigcup_{i \in I} A_i$  abgeschlossen ist, insb.

$$\overline{A_1 \cup \dots \cup A_n} = \bar{A}_1 \cup \dots \cup \bar{A}_n.$$

(3) Ist die Familie  $(A_i)_{i \in I}$  lokal-endlich, so auch  $(\bar{A}_i)_{i \in I}$ . (4) Dann gilt

$$\bigcup_{i \in I} \bar{A}_i = \overline{\bigcup_{i \in I} A_i}.$$

Ist eine Familie  $(A_i)_{i \in I}$  abgeschlossener Teilmengen  $A_i \subset X$  lokal-endlich in  $(X, \mathcal{T})$ , dann ist ihre Vereinigung  $A = \bigcup_{i \in I} A_i$  abgeschlossen in  $(X, \mathcal{T})$ .

Gleichheit gilt nicht für beliebige Vereinigungen: In  $\mathbb{R}$  gilt  $\bigcup_{x \in \mathbb{Q}} \overline{\{x\}} = \mathbb{Q}$  aber  $\overline{\bigcup_{x \in \mathbb{Q}} \{x\}} = \mathbb{R}$ . Ein weiteres Gegenbeispiel ist  $]0, 1[ = \bigcup_{n=1}^{\infty} ]1/n, 1[$ .

**Lokal-endliche Vereinigung** D508

**Beweis:** Wir vergleichen  $A := \bigcup_{i \in I} \bar{A}_i$  mit  $B := \overline{\bigcup_{i \in I} A_i}$ .

(1) Aus  $A_i \subset B \subset \bar{B}$  folgt  $\bar{A}_i \subset \bar{B}$ , also  $A \subset \bar{B}$ .

(2) Es gilt  $B \subset A$ . Ist  $A$  abgeschlossen, so folgt  $\bar{B} \subset A$ , also  $\bar{B} = A$ . Dies gilt insbesondere für  $I$  endlich dank (A2).

(3) Sei  $x \in U \in \mathcal{T}$  mit  $I_U := \{i \in I \mid A_i \cap U \neq \emptyset\}$  endlich. Das Komplement  $X \setminus U$  ist abgeschlossen: Aus  $A_i \subset X \setminus U$  folgt demnach  $\bar{A}_i \subset X \setminus U$ . Also gilt  $I_U = \{i \in I \mid \bar{A}_i \cap U \neq \emptyset\}$ .

(4) Zu zeigen ist:  $A$  ist abgeschlossen, also  $X \setminus A$  offen. Zu jedem  $x \in X \setminus A$  existiert eine offene Umgebung  $x \in U \in \mathcal{T}$  mit  $I_U$  endlich. Daher gilt:

$$U' := U \setminus A = U \setminus \bigcup_{i \in I_U} \bar{A}_i \stackrel{(3)}{=} U \setminus \bigcup_{i \in I_U} \bar{A}_i \stackrel{(2)}{=} U \setminus \overline{\bigcup_{i \in I_U} A_i}$$

Demnach ist  $U'$  eine offene Umgebung des Punktes  $x$  in  $X \setminus A$ . Das Komplement  $X \setminus A$  ist Umgebung jedes seiner Punkte, also offen (D3C), und  $A = \bigcup_{i \in I} \bar{A}_i$  ist abgeschlossen. □

**Definition D5J:** dichte und diskrete Teilmengen

Eine Teilmenge  $M \subset X$  heißt **diskret** in  $(X, \mathcal{T})$ , falls jeder Punkt  $x \in M$  isoliert ist, also eine offene Umgebung  $U \in \mathcal{T}$  existiert mit  $M \cap U = \{x\}$ . Das heißt, der Teilraum  $(M, \mathcal{T}_M)$  ist diskret (D1K, D1B).

Eine Teilmenge  $M \subset X$  heißt **dicht** in  $(X, \mathcal{T})$ , falls  $\overline{M} = X$  gilt. Das heißt  $M \cap U \neq \emptyset$  für jede nicht-leere offene Menge  $U \in \mathcal{T} \setminus \{\emptyset\}$ .

Hingegen heißt  $M$  **nirgends dicht** in  $(X, \mathcal{T})$ , wenn  $\overline{M}^\circ = \emptyset$  gilt. Äquivalent: In keiner offenen Menge  $O \subset X$  ist  $O \cap M$  dicht.

**Beispiele:** In  $\mathbb{R}$  ist  $\mathbb{Q}$  dicht, aber nicht diskret, ebenso  $\mathbb{Q}^n$  in  $\mathbb{R}^n$ . In  $\mathbb{R}$  ist  $\mathbb{Z}$  diskret und abgeschlossen, nirgends dicht, ebenso  $\mathbb{Z}^n$  in  $\mathbb{R}^n$ . In  $(\mathbb{R}, +)$  ist jede diskrete Untergruppe von der Form  $\mathbb{Z}a$  für ein  $a \in \mathbb{R}_{>0}$ . Für  $\xi \in \mathbb{Q}$  ist  $X = \{e^{2\pi i k \xi} \mid k \in \mathbb{Z}\}$  diskret in  $\mathbb{S}^1$ , für  $\xi \in \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$  jedoch dicht. In  $\ell^p(\mathbb{N}, \mathbb{R})$  mit  $1 \leq p < \infty$  sind  $\mathbb{R}^{(\mathbb{N})}$  und  $\mathbb{Q}^{(\mathbb{N})}$  dicht, in  $\ell^\infty(\mathbb{N}, \mathbb{R})$  nicht. Im Banach-Raum  $\ell^p(\Omega, \mathbb{K})$  ist  $\{\mathbf{1}_A \mid A \subset \Omega \text{ endlich}\}$  diskret. Im Banach-Raum  $\ell^\infty(\Omega, \mathbb{K})$  ist  $\{\mathbf{1}_A \mid A \subset \Omega\}$  diskret.

**Satz D5L:** Vergleich stetiger Funktionen auf dichten Teilmengen

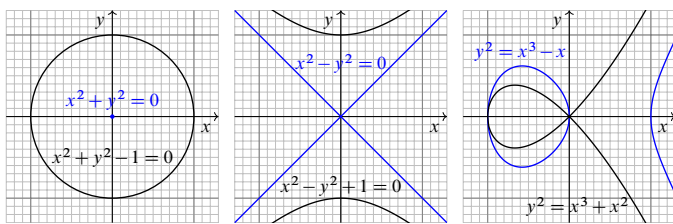
Seien  $f, g: (X, \mathcal{T}_X) \rightarrow (Y, \mathcal{T}_Y)$  stetig und  $(Y, \mathcal{T}_Y)$  hausdorffsch. Dann ist  $O = \{x \in X \mid f(x) \neq g(x)\}$  offen und  $\{x \in X \mid f(x) = g(x)\}$  abgeschlossen. Aus  $A \subset X$  und  $f|_A = g|_A$  folgt  $f|_{\overline{A}} = g|_{\overline{A}}$ ; ist  $A$  dicht in  $(X, \mathcal{T})$ , so folgt  $f = g$ .

**Beweis:** Sei  $x \in O$ . Zu  $f(x) \neq g(x)$  in  $Y$  existieren Umgebungen  $U, V$  mit  $f(x) \in U \in \mathcal{T}_Y$  und  $g(x) \in V \in \mathcal{T}_Y$  mit  $U \cap V = \emptyset$ . Für  $W = f^{-1}(U) \cap g^{-1}(V)$  gilt  $x \in W \in \mathcal{T}_X$ . Für  $x' \in W$  gilt  $f(x') \in U$  und  $g(x') \in V$ , also  $f(x') \neq g(x')$ . Somit gilt  $W \subset O$ . Also ist  $O$  offen (D3c). QED

**Beispiel / Übung D5M:** stetige Funktionen auf  $\mathbb{R}$  und  $\mathbb{Q}$

Ist die Einschränkung  $\mathcal{C}(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{C}(\mathbb{Q}, \mathbb{R}) : f \mapsto f|_{\mathbb{Q}}$  injektiv? surjektiv?

Die Einschränkung  $\mathcal{C}(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \rightarrow \mathcal{C}(\mathbb{Q}, \mathbb{R}) : f \mapsto f|_{\mathbb{Q}}$  ist injektiv dank D5L, aber nicht surjektiv: Funktionen wie  $x \mapsto \text{sign}(x^2 - 2)$  sind stetig auf  $\mathbb{Q}$ . Wir haben  $\mathbb{R} \cong \{0, 1\}^{\mathbb{N}}$ , also  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}} \cong \{0, 1\}^{\mathbb{N} \times \mathbb{R}} \cong \{0, 1\}^{\mathbb{R}} \cong \mathfrak{P}(\mathbb{R})$ , jedoch  $\mathcal{C}(\mathbb{R}, \mathbb{R}) \hookrightarrow \mathcal{C}(\mathbb{Q}, \mathbb{R}) \hookrightarrow \mathbb{R}^{\mathbb{Q}} \cong \{0, 1\}^{\mathbb{N} \times \mathbb{Q}} \cong \{0, 1\}^{\mathbb{N}} \cong \mathbb{R}$ .



Erinnerung: Jedes **Polynom**  $P = \sum_v p_v X^v$  in  $\mathbb{K}[X_1, \dots, X_n]$  definiert die zugehörige **Polynomfunktion**  $f_P: \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K} : x \mapsto P(x) = \sum_v p_v x^v$ .

Dürfen wir beide identifizieren? Wie? Wann? Warum? Ist  $P \mapsto f_P$  injektiv?

⚠ Für jeden endlichen Körper  $\mathbb{F}_q$  mit  $q$  Elementen schlägt das fehl! Die Polynomalgebra  $\mathbb{F}_q[X]$  ist unendlich, doch  $\text{Abb}(\mathbb{F}_q, \mathbb{F}_q)$  ist endlich. Konkret: Für  $P = X^q - X \in \mathbb{F}_q[X]$  gilt  $P \neq 0$ , aber  $f_P = 0$  dank Lagrange. Speziell für  $P = X^2 + X \in \mathbb{F}_2[X]$  gilt  $P(0) = 0$  und  $P(1) = 0$ , also  $f_P = 0$ .

**Lemma D5N:** Polynome und Polynomfunktionen

Sei  $\mathbb{K} = \mathbb{R}, \mathbb{C}$  sowie  $U \subset \mathbb{K}^n$  offen und  $a \in U$ . Dann ist die Zuordnung

$$\Phi_U : \mathbb{K}[X_1, \dots, X_n] \rightarrow \mathcal{C}^\infty(U, \mathbb{K}) : P = \sum_v p_v X^v \mapsto f_P|_U$$

injektiv: Verschieben nach  $a = 0$  gilt  $p_v = \frac{1}{v!} f_P^{(v)}(a)$ .

Für  $\mathbb{K} = \mathbb{R}, \mathbb{C}$  ist es somit möglich, und auch üblich, die Polynomalgebra  $\mathbb{K}[X_1, \dots, X_n]$  als Unteralgebra von  $\mathcal{C}^\infty(\mathbb{K}^n, \mathbb{K}) \subset \mathcal{C}(\mathbb{K}^n, \mathbb{K})$  aufzufassen.

**Satz D5O:** Nullstellenmengen sind nirgends dicht.

Für jedes Polynom  $P \in \mathbb{K}[X_1, \dots, X_n]^*$  ist die Nullstellenmenge  $N = f_P^{-1}(0)$  in  $\mathbb{K}^n$  abgeschlossen, nirgends dicht und hat Lebesgue-Maß  $\text{vol}_n(N) = 0$  (dank Fubini und Induktion). Ihr Komplement  $f_P^{-1}(\mathbb{K} \setminus \{0\}) \subset \mathbb{K}^n$  ist offen und dicht (dank Lemma D5N) und hat volles Lebesgue-Maß.

😊 Dies ist eine Besonderheit von Polynomen! Jede abgeschlossene Menge  $A \subset \mathbb{K}^n$  ist Nullstellenmenge einer stetigen Funktion  $f: \mathbb{K}^n \rightarrow \mathbb{K}$ .

**Beispiel D5P:** Determinante

Die **Determinante** ist eine Polynomfunktion in den Matrixeinträgen:

$$\det_n : \mathbb{K}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{K} : A = (a_{ij}) \mapsto \sum_{\sigma \in S_n} \text{sign}(\sigma) a_{\sigma(1),1} \cdot a_{\sigma(2),2} \cdots a_{\sigma(n),n}$$

Speziell für  $n = 2$  gilt  $\det_2 \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = ad - bc$  und für  $n = 3$  entsprechend

$$\det_3 \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{cases} +a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32} \\ -a_{11}a_{23}a_{32} - a_{12}a_{21}a_{33} - a_{13}a_{22}a_{31} \end{cases}$$

Im Raum  $\mathbb{K}^{n \times n}$  der  $n \times n$ -Matrizen ist die **allgemeine lineare Gruppe**

$$\text{GL}_n \mathbb{K} := \{A \in \mathbb{K}^{n \times n} \mid A \text{ ist invertierbar}\} \stackrel{!}{=} \det_n^{-1}(\mathbb{K} \setminus \{0\})$$

offen und dicht und hat volles Lebesgue-Maß.

😊 Anschaulich: Fast alle Matrizen sind invertierbar, invertierbare Matrizen bleiben invertierbar bei kleiner Störung, nicht-invertierbare Matrizen werden invertierbar nach kleiner Störung.

Paul Halmos, *Finite dimensional vector spaces* (1958), §53, exercise 13.

**Satz D5Q:** charakteristische Polynome

Für jedes Paar quadratischer Matrizen  $A, B \in \mathbb{K}^{n \times n}$  über  $\mathbb{K} = \mathbb{R}, \mathbb{C}$  stimmen die charakteristischen Polynome  $P_{AB}$  und  $P_{BA}$  überein.

**Beweis:** Für  $M \in \mathbb{K}^{n \times n}$  ist das charakteristische Polynom

$$P_M(X) := \det(XI_{n \times n} - M) \in \mathbb{K}[X]$$

invariant unter Konjugation durch jede invertierbare Matrix  $B \in \text{GL}_n \mathbb{K}$ :

$$P_{B^{-1}MB} = \det(XI_{n \times n} - B^{-1}MB) = \det(B^{-1}(XI_{n \times n} - M)B) = \det B^{-1} \cdot \det(XI_{n \times n} - M) \cdot \det B = P_M$$

Speziell für  $M = BA$  erhalten wir die ersehnte Gleichung  $P_{AB} = P_{BA}$ .

Wir statten die Vektorräume  $\mathbb{K}^{n \times n}$  und  $\mathbb{K}[X]$  mit ihrer  $\ell^2$ -Norm aus.

Die Abbildungen  $f, g: \mathbb{K}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{K}[X]$  mit  $f: B \mapsto P_{AB}$  und  $g: B \mapsto P_{BA}$  sind stetig und stimmen auf der dichten Menge  $\text{GL}_n \mathbb{K}$  überein. QED

😊 Der Satz gilt sogar ganz allgemein über jedem kommutativen Ring.

Im Raum  $\mathbb{K}[X] \cong \mathbb{K}^{(\mathbb{N})}$  aller Polynome betrachten wir die Teilmenge  $\mathbb{K}[X]_n^1 := \{P(X) = a_0 + \dots + a_{n-1}X^{n-1} + X^n \mid a_0, \dots, a_{n-1} \in \mathbb{K}\} \cong \mathbb{K}^n$ .

Fundamentalsatz der Algebra: Zu jedem Polynom  $P \in \mathbb{C}[X]_n^1$  existieren Nullstellen  $z_1, z_2, \dots, z_n \in \mathbb{C}$ , sodass  $P(X) = (X - z_1)(X - z_2) \cdots (X - z_n)$  gilt. Wir nennen  $P$  **separabel**, wenn alle  $n$  Nullstellen verschieden sind.

Die **Diskriminante**  $\Delta_n(P) := \prod_{i < j} (z_i - z_j)^2$  ist symmetrisch in  $z_1, \dots, z_n$ , also ein Polynom in den Koeffizienten  $a_0, \dots, a_{n-1}$  des Polynoms  $P$ .

Beispiel: Aus der Schule kennen Sie  $\Delta_2(X^2 + pX + q) = p^2 - 4q$ .

**Satz D5R:** Fast alle Matrizen sind diagonalisierbar.

Wir nutzen die Diskriminante  $\Delta_n: \mathbb{K}[X]_n^1 \rightarrow \mathbb{K}$  und das char. Polynom

$$\chi_n: \mathbb{K}^{n \times n} \rightarrow \mathbb{K}[X]_n^1 : M \mapsto P_M(X) = \det(XI_{n \times n} - M).$$

(1) In  $\mathbb{K}[X]_n^1$  ist die Menge  $\Sigma = \Delta_n^{-1}(\mathbb{K} \setminus \{0\})$  aller separablen Polynome offen und dicht, und ihr Komplement hat Lebesgue-Maß Null.

(2) In  $\mathbb{K}^{n \times n}$  ist die Menge  $S = (\Delta_n^{-1} \circ \chi_n)(\mathbb{K} \setminus \{0\})$  aller separablen Matrizen offen und dicht, und ihr Komplement hat Lebesgue-Maß Null.

😊 Bitte bewundern Sie, wie herrlich einfach alle Argumente werden durch die geschickte Verwendung von stetigen Funktionen, hier speziell Polynomfunktionen! Polynome kommen natürlich mit ihrer Diskriminante, quadratische Matrizen kommensensibel natürlich mit ihrer Determinante. Diese Abbildungen werden uns geschenkt, wir müssen sie nur nutzen!

😊 Anschaulich: Fast alle Matrizen in  $\mathbb{K}^{n \times n}$  sind separabel, somit über  $\mathbb{C}$  diagonalisierbar, separable Matrizen bleiben's bei kleiner Störung, nicht-separable werden's nach kleiner Störung.

Wenn Sie zufällig (stetig verteilt) eine Matrix in  $\mathbb{K}^{n \times n}$  wählen, so ist diese mit Wahrscheinlichkeit 1 separabel und somit über  $\mathbb{C}$  diagonalisierbar, ebenso alle Matrizen in einer Umgebung. Die verbleibenden Fälle sind so gesehen vernachlässigbar. Die Jordan-Form ist trotzdem wichtig, um alle Fälle behandeln zu können. Nicht alle Matrizen sind zufällig!

😊 Der Satz von Cayley-Hamilton folgt ebenso topologisch. Die behauptung gilt offensichtlich für jede diagonale Matrix, damit auch für jede diagonalisierbare, und diese sind dicht!



**Basis einer Topologie** D601

**Definition D6A: Basis einer Topologie**  
 Sei  $(X, \mathcal{T})$  ein topologischer Raum. Ein System  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$  offener Mengen ist eine **Basis** der Topologie  $\mathcal{T}$ , wenn  $\mathcal{T} = \{ \cup S \mid S \subset \mathcal{B} \}$  gilt. Das heißt: Jede offene Menge in  $(X, \mathcal{T})$  ist Vereinigung von Mengen der Basis  $\mathcal{B}$ .

**Beispiele:** Jede Topologie  $\mathcal{T}$  erlaubt (viele) Basen  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$ :  
 Jeder Raum  $(X, \mathcal{T})$  hat als Basen trivialerweise  $\mathcal{B} = \mathcal{T}$  und  $\mathcal{B}' = \mathcal{T} \setminus \{\emptyset\}$ . Für jede indiscrete Topologie  $\mathcal{T} = \{\emptyset, X\}$  sind dies die beiden einzigen.  
 Für jeden diskreten Raum  $(X, \mathcal{P}(X))$  ist  $\mathcal{B} = \{ \{x\} \mid x \in X \}$  eine Basis der Topologie. Hier ist  $\mathcal{B}$  die kleinste Basis, also in jeder Basis enthalten.  
 Die euklidische Topologie auf  $\mathbb{R}$  ist zugleich die Ordnungstopologie. Hier ist  $\mathcal{B} = \{ ]a, b[ \mid a, b \in \mathbb{R} \}$  eine Basis, ebenso  $\mathcal{B}' = \{ ]a, b[ \mid a, b \in \mathbb{Q} \}$ .  
 Für jeden metrischen Raum  $(X, d)$  ist  $\mathcal{B} = \{ B(x, \varepsilon) \mid x \in X, \varepsilon \in \mathbb{R}_{>0} \}$  eine Basis der Topologie  $\mathcal{T}_d$ , ebenso  $\mathcal{B}' = \{ B(x, 2^{-n}) \mid x \in X, n \in \mathbb{N} \}$ .

**Basis einer Topologie** D602

**Proposition D6B: äquivalente Umformulierungen**  
 Sei  $(X, \mathcal{T})$  ein topologischer Raum. Für  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$  sind äquivalent:  
 (1) Jede offene Menge  $U \in \mathcal{T}$  ist die Vereinigung gewisser offener Mengen  $B \in \mathcal{B}$ :  

$$\mathcal{T} = \{ \cup S \mid S \subset \mathcal{B} \} \quad \text{das heißt} \quad \forall U \in \mathcal{T} \exists S \subset \mathcal{B} : U = \cup S.$$
  
 (2) Jede offene Menge  $U \in \mathcal{T}$  ist die Vereinigung aller offenen Mengen  $B \in \mathcal{B}$  mit  $B \subset U$ :  

$$\forall U \in \mathcal{T} : U = \cup S \quad \text{mit} \quad S = \{ B \in \mathcal{B} \mid B \subset U \}.$$
  
 (3) Jede offene Menge  $U \in \mathcal{T}$  enthält zu jedem  $x \in U$  auch eine offene Umgebung  $B \in \mathcal{B}$ :  

$$\forall U \in \mathcal{T} \forall x \in U \exists B \in \mathcal{B} : x \in B \subset U.$$
  
 (4) Jeder Punkt  $x$  in  $(X, \mathcal{T})$  hat als eine Umgebungsbasis das System  

$$\mathcal{B}_x = \{ B \in \mathcal{B} \mid x \in B \}.$$

**Re/Konstruktion einer Topologie aus einer Basis** D603

**Satz D6C: Re/Konstruktion einer Topologie aus einer Basis**  
 Jede Basis  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$  einer Topologie  $\mathcal{T}$  auf  $X$  hat folgende Eigenschaften:  
 B1: Es gilt  $X = \cup \mathcal{B}$ .  
 B2: Für alle  $B_1, B_2 \in \mathcal{B}$  existiert  $S \subset \mathcal{B}$  sodass  $B_1 \cap B_2 = \cup S$ .  
 Äquivalent hierzu sind die folgenden lokalen Umformulierungen:  
 B1': Für jeden Punkt  $x \in X$  existiert ein  $B \in \mathcal{B}$  mit  $x \in B$ .  
 B2': Zu  $B_1, B_2 \in \mathcal{B}$  und  $x \in B_1 \cap B_2$  existiert  $B \in \mathcal{B}$  mit  $x \in B \subset B_1 \cap B_2$ .  
 Erfüllt umgekehrt ein beliebiges Mengensystem  $\mathcal{B} \subset \mathcal{P}(X)$  diese Bedingungen, dann erhalten wir mit  

$$\mathcal{T} := \{ \cup S \mid S \subset \mathcal{B} \} = \{ U \subset X \mid \forall x \in U \exists B \in \mathcal{B} : x \in B \subset U \}$$
  
 eine Topologie auf  $X$ , und  $\mathcal{B}$  ist eine Basis der Topologie  $\mathcal{T}$ .

**Nachrechnen:** Ist  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$  eine Basis der Topologie  $\mathcal{T}$ , so gilt  $(O1) \Rightarrow (B1)$  und  $(O2) \Rightarrow (B2)$ . Die Äquivalenz  $(B1) \Leftrightarrow (B1')$  und  $(B2) \Leftrightarrow (B2')$  ist klar. Umgekehrt für  $\mathcal{B} \mapsto \mathcal{T}$  gilt:  $(B1) \Rightarrow (O1)$ ,  $(B2) \Rightarrow (O2)$ ,  $(O3)$  ist klar. **[QED]**

**Re/Konstruktion einer Topologie aus einer Basis** D604 Erläuterung

Bitte schreiben Sie zur Übung alle genannten Implikationen selbst aus. Prüfen Sie sorgsam, dass Sie Definitionen und Argumente verstehen, angefangen bei den Äquivalenzen  $(B1) \Leftrightarrow (B1')$  und  $(B2) \Leftrightarrow (B2')$ .  
 Bei der Konstruktion  $\mathcal{B} \mapsto \mathcal{T}$  ist die Implikation  $(B1) \Rightarrow (O1)$  klar, lediglich die Implikation  $(B2) \Rightarrow (O2)$  ist nicht ganz offensichtlich.  
 Wir zeigen stattdessen  $(B2') \Rightarrow (O2)$ : Seien  $U_1, U_2 \in \mathcal{T}$  und  $U := U_1 \cap U_2$ . Zu jedem Punkt  $x \in U$  existieren Mengen  $B_1, B_2 \in \mathcal{B}$  mit  $x \in B_1 \subset U_1$  und  $x \in B_2 \subset U_2$ . Dank  $(B2')$  existiert  $B \in \mathcal{B}$  mit  $x \in B \subset B_1 \cap B_2 \subset U_1 \cap U_2 = U$ . Das bedeutet  $U \in \mathcal{T}$ .  
 Das Axiom  $(O3)$  schließlich ist klar nach Konstruktion. Ausführlich: Sei  $U_i \in \mathcal{T}$  und  $U := \cup_{i \in I} U_i$ . Zu jedem Punkt  $x \in U$  existiert  $i \in I$  mit  $x \in U_i$ , und somit ein  $B \in \mathcal{B}$  mit  $x \in B \subset U_i \subset U$ . Das bedeutet  $U \in \mathcal{T}$ .  
 Nach Konstruktion gilt  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$ , somit ist  $\mathcal{B}$  eine Basis der Topologie  $\mathcal{T}$ .

**Die Fürstenberg–Topologie** D605

Zur Erheiterung und Allgemeinbildung diskutieren wir als Anwendung Fürstenbergs topologischen Beweis der Unendlichkeit der Primzahlen: *On the infinitude of primes*, American Mathematical Monthly 62 (1955).

**ON THE INFINITUDE OF PRIMES**  
 HARRY FURSTENBERG, Yeshiva University

In this note we would like to offer an elementary "topological" proof of the infinitude of the prime numbers. We introduce a topology into the space of integers  $\mathbb{Z}$ , by using the arithmetic progressions (from  $-\infty$  to  $+\infty$ ) as a basis. It is not difficult to verify that this actually yields a topological space. In fact, under this topology,  $\mathbb{Z}$  may be shown to be normal and hence metrizable. Each arithmetic progression is closed as well as open, since its complement is the union of other arithmetic progressions (having the same difference). As a result, the union of any finite number of arithmetic progressions is closed. Consider now the set  $A = \cup A_p$ , where  $A_p$  consists of all multiples of  $p$ , and  $p$  runs through the set of primes  $\geq 2$ . The only numbers not belonging to  $A$  are  $-1$  and  $1$ , and since the set  $\{-1, 1\}$  is clearly not an open set,  $A$  cannot be closed. Hence  $A$  is not a finite union of closed sets which proves that there are an infinity of primes.

**Die Fürstenberg–Topologie** D606

**Behauptung:** Die Menge  $\mathbb{P} \subset \mathbb{N}$  der Primzahlen ist unendlich. **Beweis:**  
 (0) Eine **arithmetische Progression** in  $\mathbb{Z}$  ist eine Menge der Form  

$$P(a, b) = a + b\mathbb{Z} = \{ a + nb \mid n \in \mathbb{Z} \} \quad \text{mit } a, b \in \mathbb{Z} \text{ und } b \geq 1.$$
  
 (1) Die Familie  $\mathcal{B} = \{ P(a, b) \mid a, b \in \mathbb{Z}, b \geq 1 \}$  ist Basis einer Topologie  $\mathcal{T}$ . Wir prüfen für  $\mathcal{B}$  die Basisaxiome direkt nach:  $(B1')$  Es gilt  $\mathbb{Z} = P(0, 1)$ .  $(B2')$  Für  $x \in P(a, b) \cap P(c, d)$  gilt  $x \in P(x, bd) \subset P(a, b) \cap P(c, d)$ .  
 (2) In der so erzeugten **Fürstenberg–Topologie**  $\mathcal{T}$  ist  $P(a, b)$  offen und zudem abgeschlossen, denn  $\mathbb{Z} \setminus P(a, b) = \cup_{0 < k < b} P(a + k, b)$ .  
 (3) Jede Zahl  $v \in \mathbb{Z} \setminus \{\pm 1\}$  wird von einer Primzahl  $p \in \mathbb{P}$  geteilt. Die Vereinigung  $V = \cup_{p \in \mathbb{P}} (p\mathbb{Z})$  hat als Komplement  $\mathbb{Z} \setminus V = \{\pm 1\}$ .  
 (4) Wäre die Menge  $\mathbb{P}$  endlich, so wäre  $V$  zudem abgeschlossen, also  $\{-1, +1\}$  offen, was offensichtlich falsch ist. **[QED]**

☺ Euklids Beweis ist ebenso instruktiv und zudem konstruktiv!

**Erzeugung von Topologien** D607

**Satz D6F: Erzeugung einer Topologie**  
 Sei  $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$  ein beliebiges System von Teilmengen in  $X$ . Wir setzen  

$$\mathcal{B} := \{ E_1 \cap \dots \cap E_n \mid n \in \mathbb{N}, E_1, \dots, E_n \in \mathcal{E} \} \quad \text{und} \quad \mathcal{T} := \{ \cup S \mid S \subset \mathcal{B} \}.$$
  
 Dann ist  $\mathcal{T} := \tau(\mathcal{E})$  die größte Topologie auf  $X$ , die  $\mathcal{E}$  enthält. Daher heißt  $\mathcal{T}$  die **von  $\mathcal{E}$  erzeugte Topologie**,  $\mathcal{B}$  die **von  $\mathcal{E}$  erzeugte Basis**, und  $\mathcal{E}$  ein **Erzeugendensystem** oder eine **Subbasis** der Topologie  $\mathcal{T}$ .

**Beweis:** Das System  $\mathcal{B} \supset \mathcal{E}$  ist stabil unter endlichen Durchschnitten. Für  $n = 0$  interpretieren wir den leeren Durchschnitt als  $X \in \mathcal{B}$ . Das System  $\mathcal{T} \supset \mathcal{B}$  ist zudem stabil unter beliebigen Vereinigungen. Für  $S = \emptyset$  erhalten wir die leere Vereinigung  $\cup S = \emptyset \in \mathcal{T}$ . Das System  $\mathcal{B}$  erfüllt  $(B1-2)$ , somit ist  $\mathcal{T}$  eine Topologie auf  $X$ . **[QED]**

**Satz D6G: Stetigkeitskriterium auf einem Erzeugendensystem**  
 Eine Abbildung  $f : (Y, \mathcal{T}_Y) \rightarrow (X, \mathcal{T}_X)$  topologischer Räume mit  $\mathcal{T}_X = \tau(\mathcal{E})$  ist genau dann stetig, für alle  $U \in \mathcal{E}$  stets  $f^{-1}(U) \in \mathcal{T}_Y$  gilt.

**Erzeugung von Topologien** D608

**Beispiele:** (0) Für  $\mathcal{E} = \emptyset$  erhalten wir  $\mathcal{B} = \{X\}$  und  $\mathcal{T} = \{\emptyset, X\}$ .  
 (1) Ist  $\mathcal{E}$  selbst schon eine Topologie auf  $X$ , so gilt  $\mathcal{E} = \mathcal{B} = \mathcal{T}$ .  
 (2) Sei  $(X, <)$  total geordnet und  $\mathcal{E} = \{ ]a, +\infty[ , ]-\infty, b[ \mid a, b \in X \}$ . Wir erhalten daraus die Basis  $\mathcal{B} = \{X\} \cup \mathcal{E} \cup \{ ]a, b[ \mid a, b \in X \}$  und die Ordnungstopologie  $\mathcal{T} = \mathcal{T}_<$  auf der Menge  $X$  (D1M).  
 (3) Zum Vektor  $a \in \mathbb{S}^n$  betrachten wir den offenen Halbraum  

$$H_a = \{ x \in \mathbb{R}^n \mid a_1 x_1 + \dots + a_n x_n > a_0 \}.$$
  
 Das System  $\mathcal{H} = \{ H_a \mid a \in \mathbb{S}^n \}$  erzeugt die euklidische Topologie auf  $\mathbb{R}^n$ . Hierzu genügen bereits für  $i = 1, \dots, n$  und  $a_0 \in \mathbb{R}$  die offenen Halbräume  

$$H_i^{<a_0} = \{ x \in \mathbb{R}^n \mid x_i < a_0 \} \quad \text{und} \quad H_i^{>a_0} = \{ x \in \mathbb{R}^n \mid x_i > a_0 \}.$$
  
**Beweis:** Es gilt  $\mathcal{H} \subset \mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ . Umgekehrt: Die von  $\mathcal{H}$  erzeugte Basis enthält alle offenen Quader, insbesondere also alle offenen Würfel ( $\ell^\infty$ -Bälle). Auf  $\mathbb{R}^n$  sind alle  $\ell^p$ -Normen äquivalent dank  $|x|_\infty \leq |x|_p \leq |x|_1 \leq n \cdot |x|_\infty$ . Die von  $\mathcal{H}$  erzeugte Topologie enthält demnach die euklidische  $\mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}$ .

**Das zweite Abzählbarkeitsaxiom** D609

**Definition D6H:** das zweite Abzählbarkeitsaxiom (2AA)  
 Ein topologischer Raum  $(X, \mathcal{T})$  heißt **zweitabzählbar**, wenn die Topologie eine abzählbare Basis  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$  erlaubt.

**Beispiel:** Für die euklidische Topologie  $\mathcal{T}$  auf  $\mathbb{R}$  bilden die offenen Intervalle die Basis  $\mathcal{B} = \{]a, b[ \mid a, b \in \mathbb{R}\}$ . Mit rationalen Endpunkten erhalten wir hierin die abzählbare Basis  $\mathcal{B}' = \{]a, b[ \mid a, b \in \mathbb{Q}\}$ .

Für die euklidische Topologie auf  $\mathbb{R}^n$  bilden die offenen Quader die Basis

$$\mathcal{B} = \{]a_1, b_1[ \times \dots \times ]a_n, b_n[ \mid a_1 < b_1, \dots, a_n < b_n \text{ in } \mathbb{R}\}.$$

Mit rationalen Eckpunkten erhalten wir hierin die abzählbare Basis

$$\mathcal{B}' = \{]a_1, b_1[ \times \dots \times ]a_n, b_n[ \mid a_1 < b_1, \dots, a_n < b_n \text{ in } \mathbb{Q}\}.$$

**Bemerkung:** Es gilt  $2AA \Rightarrow 1AA$  dank  $\mathcal{B}_x = \{B \in \mathcal{B} \mid x \in B\}$  in D6B. Die Umkehrung gilt nicht, wie wir gleich an Gegenbeispielen sehen.

**Kardinalität einer zweitabzählbaren Topologie** D610

**Satz D6I:** Kardinalität einer zweitabzählbaren Topologie  
 Ist  $\mathcal{B}$  eine Basis der Topologie  $\mathcal{T}$ , so erhalten wir die Injektion

$$\Phi : \mathcal{T} \hookrightarrow \mathfrak{P}(\mathcal{B}) : U \mapsto \{B \in \mathcal{B} \mid B \subset U\} \text{ mit } U = \bigcup \Phi(U).$$

Ist  $\mathcal{B}$  abzählbar, also  $\text{card}(\mathcal{B}) \leq \text{card}(\mathbb{N})$ , so folgt

$$\text{card}(\mathcal{T}) \leq \text{card}(\mathfrak{P}(\mathcal{B})) \leq \text{card}(\mathfrak{P}(\mathbb{N})) = \text{card}(\mathbb{R}).$$

Für die euklidische Topologie  $\mathcal{T}$  auf  $\mathbb{R}^n$ ,  $n \geq 1$ , gilt  $\text{card}(\mathcal{T}) = \text{card}(\mathbb{R})$ .

**Beweis:** Wir haben  $\Psi : \mathfrak{P}(\mathcal{B}) \rightarrow \mathcal{T} : S \mapsto \bigcup S$  und  $\Psi \circ \Phi = \text{id}_{\mathcal{T}}$  dank D6B. Jede Injektion  $\mathcal{B} \hookrightarrow \mathbb{N}$  impliziert  $\mathcal{T} \hookrightarrow \mathfrak{P}(\mathcal{B}) \hookrightarrow \mathfrak{P}(\mathbb{N}) \cong \{0, 1\}^{\mathbb{N}} \cong \mathbb{R}$  (B2N). Die euklidische Topologie  $\mathcal{T}$  auf  $\mathbb{R}^n$  erlaubt eine abzählbare Basis  $\mathcal{B}$ , also gilt  $\mathcal{T} \hookrightarrow \mathbb{R}$ . In Dimension  $n \geq 1$  haben wir umgekehrt eine Injektion  $\mathbb{R}_{>0} \hookrightarrow \mathcal{T} : r \mapsto B(0, r)$  mit  $r = \text{diam} B(0, r)/2$ . Dank Cantor–Bernstein B2O erhalten wir eine Bijektion  $\mathcal{T} \cong \mathbb{R}$ , also  $\text{card}(\mathcal{T}) = \text{card}(\mathbb{R})$ . QED

**Diskrete Teilmengen und Basen** D611

**Übung:** Die Menge  $\mathbb{Z}^2$  ist abzählbar unendlich und diskret in  $\mathbb{R}^2$ . Können Sie eine überabzählbare diskrete Menge  $A \subset \mathbb{R}^2$  finden?

**Lemma D6J:** diskrete Teilmengen und Basen  
 Sei  $(X, \mathcal{T})$  ein topologischer Raum,  $A \subset X$  diskret und  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$  eine Basis. Zu jedem  $a \in A$  existiert  $U_a \in \mathcal{T}$  mit  $U_a \cap A = \{a\}$ . Hierzu existiert  $B_a \in \mathcal{B}$  mit  $a \in B_a \subset U_a$ , also  $B_a \cap A = \{a\}$ . Somit ist  $A \hookrightarrow \mathcal{B} : a \mapsto B_a$  injektiv.

Ist  $(X, \mathcal{T})$  zweitabzählbar, so ist jede diskrete Teilmenge  $A \subset X$  abzählbar. Ist  $A \subset X$  diskret und überabzählbar, so ist  $(X, \mathcal{T})$  nicht zweitabzählbar.

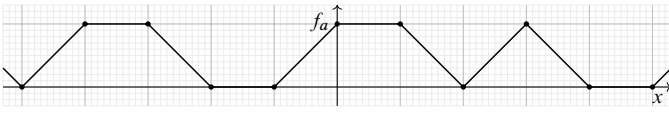
**Beispiel:** Der euklidische Raum  $\mathbb{R}^n$  ist zweitabzählbar. Also ist jede diskrete Teilmenge  $A \subset \mathbb{R}^n$  abzählbar.

**Beispiel:** Wir betrachten den Raum  $\mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  mit Supremumsnorm.

**Satz D6K:**  $\mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  ist erstabzählbar, aber nicht zweitabzählbar. Der Raum  $\mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  enthält eine überabzählbare diskrete Teilmenge. Er ist erstabzählbar wie jeder metrische Raum, aber nicht zweitabzählbar.

**$\mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  ist erstabzählbar, aber nicht zweitabzählbar.** D612

**Beweis:** Die Menge  $A = \{0, 1\}^{\mathbb{Z}}$  ist überabzählbar, genauer  $A \cong \mathbb{R}$  (B2N).



Zu jeder Folge  $a : \mathbb{Z} \rightarrow \{0, 1\}$  sei  $f_a : \mathbb{R} \rightarrow [0, 1]$  die affine Interpolation mit  $f_a(x) = (1-t)a_k + ta_{k+1}$  für  $x = k+t$  mit  $k \in \mathbb{Z}$  und  $t \in [0, 1]$ . Die Zuordnung  $A \rightarrow \mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R}) : a \mapsto f_a$  ist injektiv, denn es gilt  $a = f_a|_{\mathbb{Z}}$ . Mit  $A$  ist auch die Menge  $F = \{f_a \mid a \in A\} \subset \mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  überabzählbar.

Die Menge  $F$  ist diskret in  $\mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  bezüglich der Supremumsnorm, denn für  $a \neq b$  in  $A$  gilt  $\|f_a - f_b\|_{\infty} = 1$ , also  $B(f_a, 1) \cap F = \{f_a\}$ .

Demnach ist  $\mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  nicht zweitabzählbar. Gemäß D6J gilt genauer: Jede Basis dieser Topologie ist mindestens so mächtig wie  $\mathbb{R}$ . QED

**Dichte Teilmengen und Separabilität** D613

**Definition D6L:** separabler topologischer Raum  
 Ein topologischer Raum  $(X, \mathcal{T})$  ist **separabel**, wenn er eine abzählbare dichte Teilmenge enthält, d.h. es existiert  $A \subset X$  abzählbar mit  $\bar{A} = X$ .

**⚠ Unterscheide separabel und separiert (= hausdorffsch, siehe D3J).** Leider klingt beides sehr ähnlich, bedeutet aber völlig verschiedenes.

**Satz D6M:** Zweitabzählbar impliziert separabel.  
 Ist  $(X, \mathcal{T})$  zweitabzählbar, d.h. es existiert eine abzählbare Basis  $\mathcal{B} \subset \mathcal{T}$ , so ist  $(X, \mathcal{T})$  separabel, d.h. es existiert  $A$  abzählbar und dicht in  $(X, \mathcal{T})$ .

**Beweis:** Zu jeder Menge  $B \in \mathcal{B} \setminus \{\emptyset\}$  wählen wir einen Punkt  $a_B \in B$ . Mit  $\mathcal{B}$  ist auch  $A = \{a_B \mid B \in \mathcal{B} \setminus \{\emptyset\}\}$  abzählbar. Zudem ist  $A$  dicht: Jede offene Menge  $U \in \mathcal{T} \setminus \{\emptyset\}$ , enthält eine Menge  $B \in \mathcal{B} \setminus \{\emptyset\}$ , somit gilt  $a_B \in B \subset U$ , also  $A \cap U \neq \emptyset$ . QED

**⚠ Die Umkehrung gilt nicht:**  $\mathbb{R}^{\mathbb{R}}$  mit der Topologie der punktweisen Konvergenz ist separabel dank  $\mathbb{Q}[x] \hookrightarrow \mathbb{R}^{\mathbb{R}}$ , erfüllt aber nicht 1AA / 2AA.

**Metrisch & separabel impliziert zweitabzählbar.** D614

Die erhsehnte Umkehrung gilt immerhin für alle metrischen Räume:

**Satz D6N:** Metrisch & separabel impliziert zweitabzählbar.  
 Sei  $(X, d)$  ein metrischer Raum und darin  $A \subset X$  abzählbar und dicht. Dann erlaubt die metrische Topologie  $\mathcal{T}_d$  die abzählbare Basis  $\mathcal{B} = \{B(a, r_k) \mid a \in A, k \in \mathbb{N}\}$  mit Radien  $r_k \searrow 0$ , etwa  $r_k = 2^{-k}$ .

**Beispiel:** Die euklidische Topologie auf  $\mathbb{R}^n$  erlaubt die abzählbare Basis

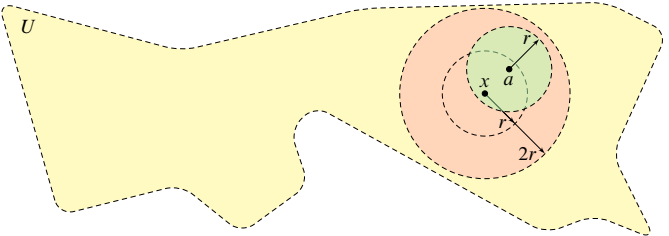
$$\mathcal{B} = \{B(a, 2^{-k}) \mid a \in \mathbb{Q}^n, k \in \mathbb{N}\}.$$

Für ihre Mächtigkeit gilt  $\text{card}(\mathcal{T}_{\mathbb{R}^n}) = \text{card}(\mathbb{R}^n) = \text{card}(\mathbb{R})$  dank D6I.

**Korollar D6O:** separabel und zweitabzählbar  
 Ein metrisierbarer topologischer Raum  $(X, \mathcal{T})$  ist genau dann separabel, wenn er zweitabzählbar ist (dank D6M und D6N). QED

**Metrisch & separabel impliziert zweitabzählbar.** D615

**Beweis von D6N:** Gegeben ist  $\mathcal{B} = \{B(a, r_k) \mid a \in A, k \in \mathbb{N}\} \subset \mathcal{T}_d$ .



Für  $U \in \mathcal{T}_d$  behaupten wir  $U = \bigcup \{B \in \mathcal{B} \mid B \subset U\}$ . Die Inklusion „ $\supset$ “ ist klar, wir zeigen „ $\subset$ “: Hierzu sei  $x \in U$ . Da  $U$  offen ist in  $(X, d)$ , existiert ein  $\varepsilon \in \mathbb{R}_{>0}$  mit  $B(x, \varepsilon) \subset U$ . Dank  $r_k \searrow 0$  existiert  $k \in \mathbb{N}$  mit  $r_k < \varepsilon/2$ , also  $B(x, 2r_k) \subset U$ . Da  $A$  dicht ist in  $(X, d)$ , existiert  $a \in A \cap B(x, r_k)$ . Somit gilt  $x \in B(a, r_k) \subset B(x, 2r_k) \subset U$ . QED

**Erste Anwendungen zur Separabilität** D616

**Satz D6P:** separable Räume stetiger Funktionen  
 Der Banach–Raum  $\mathcal{C}_b(\mathbb{R}, \mathbb{R})$  mit Supremumsnorm ist nicht zweitabzählbar (D6K) und somit auch nicht separabel (D6N). Hingegen ist  $\mathcal{C}([a, b], \mathbb{R})$  separabel und somit zweitabzählbar (D6N): Hier ist  $\mathbb{Q}[x] \hookrightarrow \mathbb{R}[x] \hookrightarrow \mathcal{C}([a, b], \mathbb{R})$  dicht dank Weierstraß–Approximation.

**Satz D6Q:** separable  $\ell^p$ –Räume  
 Sei  $1 \leq p < \infty$ . Im Banach–Raum  $\ell^p(\Omega, \mathbb{K})$  ist  $\mathbb{Q}^{(\Omega)}$  bzw.  $(\mathbb{Q} + i\mathbb{Q})^{(\Omega)}$  dicht und  $\{\mathbf{1}_A \mid A \subset \Omega \text{ endlich}\}$  diskret. Genau dann ist  $\ell^p(\Omega, \mathbb{K})$  separabel und zweitabzählbar, wenn die Grundmenge  $\Omega$  abzählbar ist. Hingegen ist  $\ell^\infty(\mathbb{N}, \mathbb{K})$  weder separabel noch zweitabzählbar, denn hierin ist  $\{\mathbf{1}_A \mid A \subset \mathbb{N}\}$  überabzählbar und diskret.

**Satz D6R:** separable Hilbert–Räume  
 Jeder separable Hilbert–Raum  $(V, \langle - | - \rangle)$  über  $\mathbb{K} = \mathbb{R}, \mathbb{C}$  ist isometrisch entweder zu einem euklidischen Raum  $\mathbb{K}^n = \ell^2(\{1, \dots, n\})$  oder  $\ell^2(\mathbb{N}, \mathbb{K})$ .