

Mitschrift zur Vorlesung

ANALYSIS III

Maßtheorie und Integralrechnung mehrerer Variablen*

28. November 2019

Inhaltsverzeichnis

I	Maßtheorie	3
I.1	Maßproblem und Paradoxien	3
I.2	Ringe und Algebren	5
I.2.1	Die Ringstruktur auf Potenzmengen	5
I.2.2	Ringe und Algebren	6
I.2.3	Halbringe	8
I.2.4	Produkte von Halbringen und Ringen	9
I.3	Inhalte und Prämaße	11
I.3.1	Inhalte auf Halbringen und Ringen	11
I.3.2	Fortsetzung von Inhalten von Halbringen auf Ringe	13
I.3.3	Prämaße	14
I.3.4	Produkte von Inhalten und Prämaßen	17
I.4	σ -Algebren	20
I.4.1	σ -Algebren	20
I.4.2	Dynkin-Systeme	23
I.4.3	Die messbare Kategorie	25
I.4.4	Produkte von σ -Algebren	27
I.5	Maße	27
I.5.1	Beispiele und Definitionen	27
I.5.2	Äußere Maße und Messbarkeit	28
I.5.3	Die σ -Algebra der messbaren Mengen und ihr Maß	32
I.5.4	Beziehung eines Inhalts zu seinem assoziierten äußerem Maß	34
I.5.5	Fortsetzung von Prämaßen zu Maßen	34
I.5.6	Eindeutigkeit fortgesetzter Maße	35
I.5.7	Approximation messbarer Teilmengen	37
I.5.8	Vervollständigung von Maßen	40
I.5.9	Bildmaße	42

*im Wintersemester 2019/20 gelesen von Prof. Bernhard Leeb, Ph.D.

I.5.10	Produktmaße	43
I.5.11	Charakterisierung des Lebesgue-Maßes	43
I.5.12	Existenz nicht Lebesgue-messbarer Teilmengen	49

I Maßtheorie

I.1 Maßproblem und Paradoxien

14.10.2019

Maßtheorie ist die Theorie des Volumens. Motivierende Beispiele sind:

- i) Volumina von Teilmengen des euklidischen Raums
- ii) Wahrscheinlichkeiten (= “Volumina von Ereignissen”)

Wir konzentrieren uns im Rest des Abschnitts auf \mathbb{R}^d . Wir wollen einen leistungsfähigen Volumenbegriff haben, sodass die Volumina von möglich vielen Teilmengen flexibel gemessen werden können. Unser erster “naiver” Ansatz wäre, dass wir Volumenmessung für *alle* Teilmengen verlangen, also eine Funktion

$$\text{vol} : \mathcal{P}(\mathbb{R}^d) \longrightarrow [0, \infty]$$

Unsere grundlegende Forderung ist die Additivität von Volumina bei Zerlegungen, also

- (i) **(endliche) Additivität:** Sind $M_1, \dots, M_n \subset \mathbb{R}^d$ paarweise disjunkt, so gilt

$$\text{vol}(M_1 \cup \dots \cup M_n) = \text{vol}(M_1) + \dots + \text{vol}(M_n)$$

Volumina als geometrische Größen sollten durch die metrische Struktur (Längenmessung) bestimmt sein, also invariant unter Symmetrien der metrischen Struktur:

- (ii) **Bewegungsinvarianz:** Für jede Bewegung $\varphi : \mathbb{R}^d \longrightarrow \mathbb{R}^d$ und jede Teilmenge $A \subset \mathbb{R}^d$ gilt

$$\text{vol}(\Phi(A)) = \text{vol}(A)$$

- (iii) **Normierung:** $\text{vol}([0, 1]^d) = 1$.

Verstärkte Forderung (i): (Borel, Lebesgue)

- (i') **σ -Additivität¹:** Für Folgen $(M_n)_{n \in \mathbb{N}}$ paarweise disjunkter Teilmengen $M_n \subset \mathbb{R}^d$ gilt:

$$\text{vol}\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} M_n\right) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \underbrace{\text{vol}(M_n)}_{\in [0, \infty]}$$

Bemerkung. Wegen des Umordnungssatzes spielt die Reihenfolge der Summanden keine Rolle, da sie alle positiv sind.

\rightsquigarrow flexibilisiert Volumenmessung entscheidend, wir können also komplizierte Figuren durch einfach Figuren approximieren.

Cantons Mengenlehre \rightsquigarrow Existenz von “naiver” Volumenfunktion wurde hinterfragt:

¹ σ : abzählbar, unendlich oft.

Maßproblem Existiert eine Volumenfunktion $\text{vol} : \mathcal{P}(\mathbb{R}^d) \rightarrow [0, \infty]$ mit (i') + (ii) + (iii)?

Satz (Vitali, 1905). Nein, das naive Maßproblem ist unlösbar.

Beweis. Aus dem Auswahlaxiom folgt die Existenz “verrückter” (d.h. geometrisch unvorstellbarer) Teilmengen des \mathbb{R}^d . Hier existiert $M \subset \mathbb{R}^d$, ein *Vertretersystem* für Nebenklassen von \mathbb{Q}^d (Untergruppe von \mathbb{R}^d) in \mathbb{R}^d . Der Quotient abelscher Gruppen $\mathbb{R}^d/\mathbb{Q}^d$ ist also die Menge der Nebenklassen. Die Nebenklassen $a + \mathbb{Q}^d$ für $a \in \mathbb{R}^d$ partitionieren (d.h. zerlegen disjunkt) \mathbb{R}^d (überabzählbar viele). Für alle $a, b \in \mathbb{R}^d$ besteht Dichotomie:

- i) entweder $a + \mathbb{Q}^d = b + \mathbb{Q}^d$ (nämlich wenn $a - b \in \mathbb{Q}^d$),
- ii) oder $(a + \mathbb{Q}^d) \cap (b + \mathbb{Q}^d) = \emptyset$ (nämlich wenn $a - b \notin \mathbb{Q}^d$).

D.h. für alle $a \in \mathbb{R}^d$ besteht $M \cap (a + \mathbb{Q}^d)$ aus genau einem Element. Daraus folgt, die Translate $q + M$ (abzählbar viele) für $q \in \mathbb{Q}^d$ partitionieren \mathbb{R}^d . Aus der σ -Additivität von Volumen folgt

$$\underbrace{\text{vol}(\mathbb{R}^d)}_{>0} = \sum_{q \in \mathbb{Q}^d} \underbrace{\text{vol}(q + M)}_{\substack{\text{Bew Inv} \\ = \text{vol}(M)}}$$

und somit also $\text{vol}(M) > 0$.

Jetzt wähle M spezieller, nämlich beschränkt, z.B. für $O \subset \mathbb{R}^d$ offen können wir M so wählen, dass $M \subset O$, weil $a + \mathbb{Q}^d$ dicht in \mathbb{R}^d , also $(a + \mathbb{Q}^d) \cap O \neq \emptyset$. Z.B. wähle $M \subset (0, \frac{1}{2})^d$, so enthält $[0, 1]^d$ abzählbar unendlich viele paarweise disjunkte Translate $q + M$, nämlich für alle $q \in \mathbb{Q}^d \cap (0, \frac{1}{2})^d$ gilt

$$V := \bigcup_{q \in (0, \frac{1}{2})^d \cap \mathbb{Q}^d} (q + M) \subset [0, 1]^d$$

weil $\underbrace{\text{vol}(V)}_{\geq 0} + \underbrace{\text{vol}([0, 1]^d - V)}_{=1} = \underbrace{\text{vol}([0, 1]^d)}_{=1}$. Daraus folgt $\text{vol}(V) \leq 1 < \infty$ und

$$\text{vol}(V) = \sum_{q \in (0, \frac{1}{2})^d \cap \mathbb{Q}^d} \underbrace{\text{vol}(q + M)}_{= \text{vol}(M)}$$

Somit muss gelten $\text{vol}(M) = 0$. \nexists ■

Noch dramatischer: In $\dim \geq 3$ kann man je zwei Teilmengen (unter sehr allgemeinen Annahmen) aus demselben (abzählbaren, oft sogar endlichen) “Bausatz” zusammensetzen.

Satz (Banach-Tarski, 1924). Seien $A, B \subset \mathbb{R}^d$ Teilmengen mit nichtleerem Inneren.

- (i) Sei $d \geq 3$ und seien A, B beschränkt. Dann existieren endlich viele Teilmengen $M_k \subset \mathbb{R}^d$ und Bewegungen Φ_k des \mathbb{R}^d , so dass *disjunkte Zerlegungen* $A = \bigsqcup_k M_k$ und $B = \bigsqcup_k \Phi(M_k)$ bestehen.
- (ii) Jetzt $d \geq 1$ beliebig und A, B nicht notwendig beschränkt. Dann existieren abzählbar viele Teilmengen $M_k \subset \mathbb{R}^d$ und Bewegungen Φ_k , sodass *disjunkte Zerlegungen* $A = \bigsqcup_k M_k$ und $B = \bigsqcup_k \Phi(M_k)$ bestehen.

Der Beweis verwendet Gruppentheorie, Struktur von orthogonalen Gruppen $O(d)$. (nicht mehr auflösbar für $d \geq 3$.)

Das naive *Inhaltsproblem*, also eine Volumenfunktion mit Eigenschaften (i), (ii) und (iii), ist lösbar in $d \leq 2$, aber nicht eindeutig, nicht lösbar in $d \geq 3$. (Banach 1923, Hausdorff 1914) Dies führt zu:

Maßproblem (post-paradox) : Man definiere eine Volumenfunktion $\text{vol} : \mathcal{F} \rightarrow [0, \infty]$ mit Eigenschaften (i'), (ii) und (iii) auf einer möglich großen und flexiblen Familie $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(\mathbb{R}^d)$, die die geometrisch wichtigen Teilmengen umfasst und abgeschlossen ist unter grundlegenden mengentheoretischen Operationen (Vereinigung, Schnitt, Differenz und Komplement).

I.2 Ringe und Algebren

17.10.2019

Wir untersuchen Familien von Teilmengen (einer festen Menge), die unter grundlegenden (endlichen) Mengenoperationen abgeschlossen/ stabil sind. ($\cup, \cap, \setminus, \mathbb{C}$)

Sie werden Definitionsbereiche der allgemeinsten von uns betrachteten Volumenfunktion sein. ("Inhalte")

I.2.1 Die Ringstruktur auf Potenzmengen

Sei X eine Menge. Die Potenzmenge ist definiert als die Familie aller Teilmengen $\mathcal{P}(X)$. Wir können die Potenzmenge ebenfalls auffassen als

$$\mathcal{P}(X) \xleftrightarrow[\text{bij}]{\cong} \{0, 1\}^X = \{f : X \rightarrow \{0, 1\}\}$$

da

$$A \mapsto \chi_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{falls } x \in A \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$f^{-1}(1) \longleftarrow f$$

wobei χ_A die charakteristische Funktion von A ist.

Wir fassen nun $\{0, 1\}$ auf als den Körper mit 2 Elementen (Restklassen modulo 2). So ist $\{0, 1\}^X$ ein kommutativer Ring mit Eins (multiplikatives Einselement) (im Sinne der Algebra), sogar eine \mathbb{F}_2 -Algebra.

Bemerkung. Die Addition und Multiplikation von Funktionen erfolgen punktweise:

$$- (f + g)(x) := f(x) + g(x)$$

$$- (fg)(x) = f(x) \cdot g(x)$$

und $\{0, 1\} = \mathbb{F}_2$ ist ein Körper mit zwei Elementen.

Die Nullelement ist $f \equiv 0$, also χ_\emptyset und das Einselement ist $\chi_X (\equiv 1)$. Die Addition von charakteristischen Funktionen entspricht der symmetrischen Differenz $A \Delta B$ und die Multiplikation entspricht dem Durchschnitt von Mengen. Also

$$\chi_A + \chi_B = \chi_{A \Delta B}$$

$$\chi_A \cdot \chi_B = \chi_{A \cap B}$$

Somit ist $(\mathcal{P}(X), \Delta, \cap) \cong (\mathbb{F}_2^X, +, \cdot)$ ein kommutativer Ring mit dem Nullelement \emptyset bzw. χ_\emptyset und dem Einselement X bzw. χ_X .

I.2.2 Ringe und Algebren

Definition. Eine Familie $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$ heißt

- (ρ) ein **Ring** auf X , falls sie ein Unterring von $(\mathcal{P}(X), \Delta, \cap)$ ist.
- (α) eine **Algebra** auf X , falls sie außerdem das Einselement enthält, d.h. $X \in \mathcal{R}$.

Bemerkung. “Algebra” wird in verschiedenen Bedingungen verwendet, nämlich die Algebra als ein mathematisches Gebiet, eine Algebra als algebraische Struktur im Sinne der Algebra und eine Algebra im Sinne der obigen Definition.

(ρ) bedeutet $\emptyset \in \mathcal{R}$, abgeschlossen unter Addition (Δ) (dasselbe wie Subtraktion, da mod 2) und Multiplikation (\cap), d.h.

$$A, B \in \mathcal{R} \implies A \Delta B, A \cap B \in \mathcal{R}$$

d.h. Δ - stabil und \cap - stabil. Wir können Δ, \cap ausdrücken durch \setminus und \cup :

$$\begin{aligned} A \Delta B &= (A \setminus B) \cup (B \setminus A) \\ A \cap B &= A \setminus (A \setminus B) \end{aligned}$$

und umgekehrt

$$\begin{aligned} A \setminus B &= (A \Delta B) \cap A \\ A \cup B &= (A \Delta B) \Delta (A \cap B) \end{aligned}$$

Bemerkung. Die letzte Gleichung gilt, da $(A \Delta B)$ und $(A \cap B)$ disjunkt sind.

Daraus folgt die Charakterisierung von Ringen:

Lemma. Eine Familie $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$ ist genau dann ein Ring auf X , wenn

- (i) $\emptyset \in \mathcal{R}$,
- (ii) \setminus - stabil, d.h. $A, B \in \mathcal{R} \implies A \setminus B \in \mathcal{R}$,
- (iii) \cup - stabil, d.h. $A, B \in \mathcal{R} \implies A \cup B \in \mathcal{R}$.

entspricht für Algebren:

Lemma. Eine Familie $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$ ist genau dann eine Algebra auf X , wenn

- (i) $\emptyset \in \mathcal{A}$,
- (iii) \cup - stabil,
- (iv) \complement - stabil, d.h. $A \in \mathcal{A} \implies \complement A := X \setminus A \in \mathcal{A}$.

Beweis. Sind diese Eigenschaften erfüllt, so implizieren (i + iv), dass

$$X = \complement \emptyset \in \mathcal{A}$$

“ \setminus ” kann ausgedrückt werden durch “ \cup ” und “ \complement ”: Aus

$$\complement(A \setminus B) = (\complement A) \cup B$$

folgt

$$A \setminus B = \mathbb{C}((\mathbb{C}A) \cup B)$$

Also ist \mathcal{A} ein Ring, und damit \mathcal{A} eine Algebra.

Ist umgekehrt \mathcal{A} eine Algebra, so gelten (i + iii). Da auch $X \in \mathcal{A}$, können wir " \mathbb{C} " durch " \setminus " ausdrücken

$$\mathbb{C}A = X \setminus A$$

Also gilt auch (iv). ■

Folgerung. Ist \mathcal{R} ein Ring auf X und $A, B \in \mathcal{R}$, so auch $A \setminus B, A \cap B, B \setminus A$ und $A \cup B \in \mathcal{R}$. (Bem. Alle in $A \cup B$ enthalten.) Ist \mathcal{A} eine Algebra auf X und $A, B \in \mathcal{A}$, so ist außerdem auch $\mathbb{C}(A \cup B) \in \mathcal{A}$.

Beispiel.

- (o) $\{\emptyset\} \subset \mathcal{P}(X)$ ist ein Ring auf X ,
 $\{\emptyset, X\} \subset \mathcal{P}(X)$ ist die kleinste Algebra auf X , $\mathcal{P}(X) \subset \mathcal{P}(X)$ die größte.
- (i) $\{\emptyset, A\} \subset \mathcal{P}(X)$ ist ein Ring auf X für ein $A \in \mathcal{P}(X)$,
 $\{\emptyset, A, \mathbb{C}A, X\} \subset \mathcal{P}(X)$ ist eine Algebra auf X .
- (ii) Die Familie der endlichen (bzw. abzählbaren) Teilmengen von X ist ein Ring.
 (eine Algebra, nur falls X selbst endlich bzw. abzählbar)
 Die Familie der Teilmengen, die endlich (bzw. abzählbar) sind oder endliches (bzw. abzählbares) Komplement haben, ist eine Algebra.

Weitere Beispiele folgen nach der Diskussion vom Erzeugendensystem.

Beobachtung. Der Durchschnitt beliebig vieler Ringe (bzw. Algebren) auf einer festen Menge ist wieder ein Ring (bzw. eine Algebra). Zu jeder Menge $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$ gibt es eine(n) bezüglich mengentheoretischer Inklusion kleinste(n) Ring (bzw. Algebra), der (die) \mathcal{E} umfasst, nämlich den Durchschnitt aller Ringe (bzw. Algebren), die \mathcal{E} umfassen.

Definition (Erzeugendensystem). Der von einer Familie $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$ erzeugte Ring auf X ist der kleinste Ring, der sie enthält. Man nennt \mathcal{E} ein *Erzeugendensystem* dieses Rings, oder *Erzeuger*. (Analog für Algebren)

Die Algebra eines Erzeugendensystems ist oft die einfachste Art, eine(n) Ring bzw. Algebra zu beschreiben.

Ein Ring geht aus einem Erzeugendensystem $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$ *konstruktiv* durch einen *abzählbaren* (induktiv!) Prozess hervor, ebenso eine Algebra.

Ring. Definiere induktiv eine Folge von Familien $\mathcal{F}_0 \subset \mathcal{F}_1 \subset \dots \subset \mathcal{F}_n \subset \dots \subset \mathcal{P}(X)$ mit

$$\begin{aligned}\mathcal{F}_0 &:= \mathcal{E} \cup \{\emptyset\} \\ \mathcal{F}_n &:= \{A \setminus B, A \cup B \mid A, B \in \mathcal{F}_{n-1}\}, \quad n \geq 1\end{aligned}$$

So ist $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} \mathcal{F}_n \subset \mathcal{P}(X)$ \setminus - und \cup -stabil, also ein Ring.

Algebra. analog.

I.2.3 Halbringe

Hat ein Erzeugendensystem strukturelle Eigenschaft, so ist die Beschreibung des erzeugenden Rings einfach. Eine natürliche auftretende Bedingung ist:

Definition (Halbringe). Eine Familie $\mathcal{H} \subset \mathcal{P}(X)$ heißt ein *Halbring* auf X , falls

- (i) $\emptyset \in \mathcal{H}$,
- (ii) \mathcal{H} ist \cap -stabil,
- (iii) Für $A, B \in \mathcal{H}$ existieren *disjunkte* Teilmengen $C_1, \dots, C_n \in \mathcal{H}$ mit $A \setminus B = C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n$.

Bemerkung. Halbring ist eine Verallgemeinerung des Begriffs Ring, Ringe sind also Halbringe.

Beispiel.

- (o) $\{\emptyset\} \subset \mathcal{P}(X)$ ist ein Halbring auf X .
- (i) Die Familie bestehend aus \emptyset und allen (eielementigen) Teilmengen $\{\emptyset\} \cup \{\{a\} \mid a \in X\}$ ist ein Halbring auf X , sie erzeugt den Ring der endlichen Teilmengen von X .

Der Grundbaustein für später:

- (ii) Die Familie der *halboffenen* Intervalle $[a, b) \subset \mathbb{R}$, falls $a < b$, also ist

$$\mathcal{I} := \{[a, b) \mid a, b \in \mathbb{R}, a < b\}$$

ein Halbring auf \mathbb{R} .

Beschreibe den von einem Halbring erzeugenden Ring, die folgende Beobachtung wird darüber hinaus nützlich sein:

Lemma (Simultane Zerlegung). Zu beliebigen Teilmengen $H_1, \dots, H_m \in \mathcal{H}$ existieren paarweise disjunkte Teilmengen $H'_1, \dots, H'_n \in \mathcal{H}$, sodass jedes H_i sich als die Vereinigung einiger H'_j 's darstellen lässt.

Beweis. Betrachte die $2^m - 1$ Durchschnitte der Form $G_1 \cap \dots \cap G_m$, wobei $G_i = H_i$ oder $\mathbb{C}H_i$ und nicht alle gleich $\mathbb{C}H_i$. Sie sind paarweise disjunkt und zerlegen $H_1 \cup \dots \cup H_m$. Jedes H_i ist die Vereinigung von 2^{m-1} von ihnen. Es genügt zu zeigen, dass diese Durchschnitte disjunkte Vereinigungen von Teilmengen aus \mathcal{H} sind. Da Halbringe \cap -stabil sind, reicht es zu zeigen, dass die Teilmengen der Form

$$H \cap \mathbb{C}\widetilde{H}_1 \cap \dots \cap \mathbb{C}\widetilde{H}_l \quad \text{mit } H, \widetilde{H}_1, \dots, \widetilde{H}_l \in \mathcal{H}$$

disjunkte Vereinigungen von Teilmengen in \mathcal{H} sind.

Da für $H \cap \mathbb{C}\widetilde{H}_l = H \setminus \widetilde{H}_l$ (Axiom (iii)) gilt, reduziert die Behauptung für l auf Behauptung für $l - 1$, mit Induktion liefert dann die Behauptung. ■

Proposition. Jede Teilmenge im von einem Halbring \mathcal{H} erzeugten Ring \mathcal{R} ist eine endliche disjunkte Vereinigung von Teilmengen in \mathcal{H} , d.h. (ein einfacher Erzeugungsprozess!)

$$\mathcal{R} = \left\{ \bigsqcup_{k=1}^n H_k \mid n \in \mathbb{N}, H_1, \dots, H_n \in \mathcal{H} \right\} \quad (\text{I.1})$$

Beweis. Sei \mathcal{R} die Familie der endlichen *disjunkten* Vereinigungen von Teilmengen in \mathcal{H} . Mit dem letzten Lemma “Simultane Zerlegung” ist \mathcal{R} gleich der Familie aller endlichen Vereinigungen von Teilmengen in \mathcal{H} . Sie ist offensichtlich \cup -stabil. Zu verifizieren bleibt die \setminus -Stabilität. Seien hierzu $A = A_1 \cup \dots \cup A_m$ und $B = B_1 \cup \dots \cup B_n$, $A_i, B_j \in \mathcal{H}$. Aus dem Lemma “Simultane Zerlegung” folgt, dass es endlich viele nicht-leere, *paarweise disjunkte* $H'_k \in \mathcal{H}$ existieren, sodass jedes A_i und B_j eine Vereinigung einiger H'_k ’s ist. Daraus folgt, dass auch A und B Vereinigungen einiger H'_k ’s sind. So ist auch $A \setminus B$ die Vereinigung einiger H'_k ’s, nämlich derer, die in A , aber nicht in B enthalten sind. Also ist \mathcal{R} ein Ring, enthalten in von \mathcal{H} erzeugendem Ring (denn Ringe sind \cup -stabil), also gleich. ■

Bemerkung. Man kann den von einer Familie \mathcal{E} erzeugten Halbring nicht (analog zu Ringen und Algebren) definieren, denn das Halbring-Axiom (iii) vererbt nicht auf Durchschnitte von Familien. Es gibt Durchschnitte von Halbringen, die keine Halbringe sind. M.a.W. existieren Familien, die nicht in einem eindeutigen kleinsten Halbring enthalten sind.

I.2.4 Produkte von Halbringen und Ringen

Sind $\mathcal{F}_i \subset \mathcal{P}(X_i), i = 1, \dots, n$ Familien von Teilmengen, so entsteht das Produkt von “Quadern”

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_1 * \dots * \mathcal{F}_n &:= \left\{ \underbrace{M_1 \times \dots \times M_n}_{\subset X_1 \times \dots \times X_n} \mid M_i \in \mathcal{F}_i \text{ für } i = 1, \dots, n \right\} \\ &\subset \mathcal{P}(X_1 \times \dots \times X_n) \end{aligned}$$

und die \cup -stabile Hülle, die Familie $\mathcal{F}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{F}_n$ der endlichen Vereinigungen von “Quadern” in $\mathcal{F}_1 * \dots * \mathcal{F}_n$, die Figuren,

$$\mathcal{F}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{F}_n = \{\text{endliche Vereinigungen von Teilmengen in } \mathcal{F}_1 * \dots * \mathcal{F}_n\}$$

Beide Produkte $*$ und \boxtimes sind *assoziativ*, d.h.

$$(\mathcal{F}_1 * \mathcal{F}_2) * \mathcal{F}_3 = \mathcal{F}_1 * \mathcal{F}_2 * \mathcal{F}_3 = \mathcal{F}_1 * (\mathcal{F}_2 * \mathcal{F}_3) \text{ und } (\mathcal{F}_1 \boxtimes \mathcal{F}_2) \boxtimes \mathcal{F}_3 = \mathcal{F}_1 \boxtimes \mathcal{F}_2 \boxtimes \mathcal{F}_3 = \mathcal{F}_1 \boxtimes (\mathcal{F}_2 \boxtimes \mathcal{F}_3).$$

Wir definieren weiter

$$\mathcal{Z} = \mathcal{Z}(\mathcal{F}_1, \dots, \mathcal{F}_n) \subset \mathcal{P}(X_1 \times \dots \times X_n)$$

die Familie der **Zylindermengen**

$$\begin{aligned} \pi_k^{-1}(M_k) &= X_1 \times \dots \times X_{k-1} \times M_k \times X_{k+1} \times \dots \times X_n \\ &\text{mit } 1 \leq k \leq n, M_k \in \mathcal{F}_k \end{aligned}$$

wobei $\pi_k : X_1 \times \dots \times X_n \rightarrow X_k, (x_1, \dots, x_n) \mapsto x_k$ die natürliche Projektion ist.

Falls $X_i \in \mathcal{F}_i \forall i$, so ist $\mathcal{Z}(\mathcal{F}_1, \dots, \mathcal{F}_n) \subset \mathcal{F}_1 * \dots * \mathcal{F}_n$.

Proposition.

- (i) Seien $\mathcal{H}_i \subset \mathcal{P}(X_i)$ Halbringe ($i = 1, \dots, n$) und $\mathcal{R}_i \subset \mathcal{P}(X_i)$ die von ihnen erzeugten Ringe. Dann ist $\mathcal{H}_1 * \dots * \mathcal{H}_n$ ein Halbring auf $X_1 \times \dots \times X_n$ und $\mathcal{H}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{H}_n = \mathcal{R}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{R}_n$ der von ihm erzeugte Ring.
- (ii) Sind $\mathcal{R}_i \subset \mathcal{P}(X_i)$ Ringe und $\mathcal{E}_i \subset \mathcal{R}_i$ Erzeugendensysteme für $i = 1, \dots, n$, so wird der Produktring $\mathcal{R}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{R}_n$ von der Familie von Quändern $\mathcal{E}_1 * \dots * \mathcal{E}_n$ erzeugt.
- (iii) Sind die \mathcal{R}_i Algebren, so wird der Produktring $\mathcal{R}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{R}_n$ von den Zylindermengen $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}(\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_n)$ erzeugt.
- (iv) Sind $\mathcal{A}_i \subset \mathcal{P}(X_i)$ σ -Algebren und $\mathcal{E}_i \subset \mathcal{A}_i$ Erzeugendensysteme für $i = 1, \dots, n$, so wird die Produkt- σ -Algebra von $\mathcal{Z}(\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_n)$ sowie von $\mathcal{E}_1 * \dots * \mathcal{E}_n$ erzeugt.

Beweis.

- (i) Zunächst im Fall $n = 2$. Klar enthält $\mathcal{H}_1 * \mathcal{H}_2$ auch \emptyset und ist \cap -stabil. Wir betrachten die disjunkte Zerlegung

$$(A_1 \times A_2) \setminus (B_1 \times B_2) = \underbrace{\left(\underbrace{(A_1 \cap B_1)}_{\in \mathcal{H}_1} \times \underbrace{(A_2 \setminus B_2)}_{\substack{\text{zerlegbar in} \\ \text{Teilmengen} \\ \text{aus } \mathcal{H}_2}} \right)}_{\substack{\text{zerlegbar in} \\ \text{Teilmengen} \\ \text{aus } \mathcal{H}_1}} \sqcup \underbrace{\left(\underbrace{(A_1 \setminus B_1)}_{\substack{\text{zerlegbar in} \\ \text{Teilmengen} \\ \text{aus } \mathcal{H}_1}} \times \underbrace{(A_2 \setminus B_2)}_{\substack{\text{zerlegbar in} \\ \text{Teilmengen} \\ \text{aus } \mathcal{H}_2}} \right)}_{\text{zerlegbar in Teilmengen aus } \mathcal{H}_1 \times \mathcal{H}_2} \sqcup \underbrace{\left((A_1 \setminus B_1) \times (A_2 \cap B_2) \right)}_{\text{analog zerlegbar}}$$

Also ist $(A_1 \times A_2) \setminus (B_1 \times B_2)$ disjunkt zerlegbar in Teilmengen aus $\mathcal{H}_1 * \mathcal{H}_2$, also erfüllt Axiom (iii) für Halbringe, d.h. $\mathcal{H}_1 * \mathcal{H}_2$ ist ein Halbring.

Mit Induktion liefert dann die Behauptung auch für $\mathcal{H}_1 * \dots * \mathcal{H}_n, n \geq 1$.

Aus (I.1) folgt, dass $\mathcal{H}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{H}_n$ der von $\mathcal{H}_1 * \dots * \mathcal{H}_n$ erzeugte Ring ist.

- (ii) Für jedes i wird der Ring auf $X_1 \times \dots \times X_n$ bestehend aus den Zylindermengen $\pi_i^{-1}(M_i)$ für $M_i \in \mathcal{R}_i$ von der Familie der Zylindermengen $\pi_i^{-1}(E_i)$ für $E_i \in \mathcal{E}_i$ erzeugt, denn jede Teilmenge $M_i \in \mathcal{R}_i$ kann durch endlich viele Mengenoperationen aus Teilmengen $E_{ij} \in \mathcal{E}_i$ hergestellt werden und $\pi_i^{-1}(M_i)$ entsprechend aus den $\pi_i^{-1}(E_{ij})$.

Daraus folgt, dass $\mathcal{Z}(\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_n)$ erzeugt denselben Ring wie $\mathcal{Z}(\mathcal{R}_1, \dots, \mathcal{R}_n)$ und denselben wie $\mathcal{R}_1 * \dots * \mathcal{R}_n$, also den Produktring $\mathcal{R}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{R}_n$.

- (iii) Übung. ■

Definition. Wir nennen den Halbring $\mathcal{H}_1 * \dots * \mathcal{H}_n$ das Produkt der Halbringe \mathcal{H}_i , den Ring $\mathcal{R}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{R}_n$ das Produkt der Ringe \mathcal{R}_i .

Hauptbeispiel (Quader und Figuren in \mathbb{R}^d). Ist $a, b \in \mathbb{R}^d$ mit $a_i < b_i \forall i$, so entsteht ein achsenparalleler halboffener Quader

$$[a, b) := [a_1, b_1) \times \dots \times [a_d, b_d)$$

Wir bezeichnen

$$\mathcal{Q}^d := \text{Familie dieser Quader}$$

und

$$\mathcal{I} := \mathcal{Q}^1, \text{ Familie der halboffenen Intervalle}$$

Also gilt

$$\mathcal{Q}^d = \underbrace{\mathcal{I} * \dots * \mathcal{I}}_{d\text{-Mal}}$$

Aus der letzten Proposition folgt, dass \mathcal{Q}^d ein Halbring auf \mathbb{R}^d ist. Es folgt ebenfalls, dass

$$\mathcal{F}^d := \underbrace{\mathcal{I} \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{I}}_{d\text{-Mal}}$$

der Ring erzeugt von \mathcal{Q}^d ist, also der Ring der d -dimensionale “Figuren”. Wir haben gesehen: Figuren sind disjunkte Vereinigungen von Quadern.

Wir arbeiten aus technischen Gründen mit halboffenen Intervallen und Quadern. Besonders übersichtliche sind Halbringe, die abgeschlossen unter Produktbildung sind, jedoch nicht die Teilmengen enthalten, die uns geometrisch primär interessieren: die offenen und abgeschlossenen Quader, die nicht achsenparallele sind, Polygone und Polytope, gekrümmte “elementare Geometrie” sowie Gebilde: Scheiben, Bälle, Zylinder und Kegel. Deshalb müssen wir unsere Ringe weiter anreichern und flexibilisieren, damit sie stabil unter abzählbaren Vereinigungen sind. \rightsquigarrow σ -Algebra.

I.3 Inhalte und Prämaße

Wir beginnen mit der Untersuchung von Volumenfunktionen. Die grundlegende Forderung ist die *Additivität*. Volumina dürfen nicht negativ sein, d.h. $\in [0, \infty] := [0, \infty) \cup \{\infty\}$, also die erweiterte positive Halbgerade.

Bemerkung. Die erweiterten reellen Zahlen ist definiert als $\overline{\mathbb{R}} := \{-\infty\} \cup \mathbb{R} \cup \{\infty\}$ mit natürlichen Konventionen

$$\begin{aligned} x + \infty &= \infty \text{ für } x > -\infty \\ x \cdot \infty &= \infty \text{ für } x > 0 \end{aligned}$$

Später werden wir außerdem sehen $0 \cdot \infty = 0$ (da $0 \cdot n \rightarrow 0$ für $n \rightarrow \infty$).

I.3.1 Inhalte auf Halbringen und Ringen

Die allgemeinste Sorte von uns betrachteter Volumenfunktion ist endlich additiv und definiert auf Halbringen.

Definition (Inhalt). Ein Inhalt auf einer Halbring \mathcal{H} ist eine Funktion $\mu : \mathcal{H} \rightarrow [0, \infty]$ mit den Eigenschaften:

- (i) $\mu(\emptyset) = 0$,
- (ii) *Additivität:* Sind $A_1, \dots, A_n \in \mathcal{H}$ paarweise disjunkt mit $A_1 \sqcup \dots \sqcup A_n \in \mathcal{H}$ ², so gilt $\mu(A_1 \sqcup \dots \sqcup A_n) = \mu(A_1) + \dots + \mu(A_n)$.

Beispiel.

- (o) $\mu \equiv 0$ “der Nullinhalt” und

$$\nu(A) = \begin{cases} 0, & A = \emptyset \\ \infty, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{sind stets Inhalte auf beliebigen Halbringen.}$$

- (i) Sei X nichtleer. Betrachte die Algebra $\{\emptyset, X\} \subset \mathcal{P}(X)$. So wird ein Inhalt $\begin{cases} \emptyset \mapsto 0 \\ x \mapsto v \in [0, \infty] \text{ beliebig} \end{cases}$ definiert.

Beispiel (Halboffene Intervalle in \mathbb{R} , der Grundbaustein für Lebesgue-Maß). Auf dem Halbring $\mathcal{I} = \mathcal{Q}^1 \subset \mathcal{P}(\mathbb{R})$ wird ein Inhalt gegeben durch die euklidische Länge

$$\lambda_{\mathcal{I}}^1 : \mathcal{I} \rightarrow [0, \infty), \quad \lambda_{\mathcal{I}}^1([a, b)) := b - a \quad (a < b)$$

Wir überprüfen die Additivität: Sei $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ eine Unterteilung von $[a, b)$. So entsteht die disjunkte Zerlegung $[a, b) = [a, x_1) \sqcup \dots \sqcup [x_{n-1}, b)$. Es folgt

$$\underbrace{\lambda_{\mathcal{I}}^1([a, b))}_{b-a} = \underbrace{\lambda_{\mathcal{I}}^1([a, x_1))}_{x_1-a} + \underbrace{\lambda_{\mathcal{I}}^1([x_1, x_2))}_{x_2-x_1} + \dots + \underbrace{\lambda_{\mathcal{I}}^1([x_{n-1}, b))}_{b-x_{n-1}}$$

24.10.2019

Lemma (Einfache Eigenschaften von Inhalten). Seien \mathcal{H} ein Halbring und $\mu : \mathcal{H} \rightarrow [0, \infty]$ ein Inhalt. Dann gilt:

- (i) *Monotonie:* Ist $A, B \in \mathcal{H}$ mit $A \subset B$, so ist $\mu(A) \leq \mu(B)$,
- (ii) *Subadditivität:* Seien $A_1, \dots, A_n \in \mathcal{H}$ (nicht notwendigerweise disjunkt!) mit $A_1 \cup \dots \cup A_n \in \mathcal{H}$, dann gilt

$$\mu(A_1 \cup \dots \cup A_n) \leq \mu(A_1) + \dots + \mu(A_n).$$

Beweis.

- (i) Setze $B \setminus A = C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n$ mit $C_i \in \mathcal{H}$ paarweise disjunkt, bzw. $B = A \sqcup C_1 \sqcup \dots \sqcup C_n$. Aus der Additivität folgt dann $\mu(B) = \mu(A) + \underbrace{\mu(C_1) + \dots + \mu(C_n)}_{\geq 0} \geq \mu(A)$.
- (ii) Aus dem Lemma “simultane Zerlegung” folgt, dass es paarweise disjunkte $H_i \in \mathcal{H}$ existieren, sodass jedes A_j die Vereinigung einiger von H_i ist. Entsprechend summieren sich die Volumina auf. Die Ungleichung folgt, denn jedes $\mu(H_j)$ *genau einmal* auf der linken Seite und je *mindestens einmal* auf der rechten Seite.

■

²Die Voraussetzung ist redundant, falls \mathcal{H} ein Ring ist.

I.3.2 Fortsetzung von Inhalten von Halbringen auf Ringe

Satz. Jeder Inhalt μ auf einem Halbring \mathcal{H} besitzt eine eindeutige Fortsetzung zu einem Inhalt $\bar{\mu}$ auf dem von \mathcal{H} erzeugten Ring \mathcal{R} .

Beweis.

- *Eindeutigkeit* folgt aus der Additivität von Inhalten und Beschreibung des erzeugten Rings \mathcal{R} . Jede Teilmenge in \mathcal{R} ist eine disjunkte Vereinigung (wegen (I.1)) $A_1 \sqcup \dots \sqcup A_n$ mit $A_i \in \mathcal{H}$. Daher notwendig

$$\bar{\mu}(A_1 \sqcup \dots \sqcup A_n) = \underbrace{\mu(A_1) + \dots + \mu(A_n)}_{=\bar{\mu}(A_1)} \quad (\text{I.2})$$

- *Existenz bzw. Wohldefiniertheit* von $\bar{\mu}$ durch (I.2): Wir betrachten eine weitere disjunkte Zerlegung derselben Teilmengen

$$A_1 \sqcup \dots \sqcup A_n = B_1 \sqcup \dots \sqcup B_m \in \mathcal{R}, A_i, B_j \in \mathcal{H}$$

so entstehen Zerlegungen

$$A_i = \bigsqcup_{j=1}^m (A_i \cap B_j)$$

$$B_j = \bigsqcup_{i=1}^n (A_i \cap B_j)$$

Daraus folgt (Wir bemerken, dass $A_i \cap B_j \in \mathcal{H}$, denn \mathcal{H} \cap -stabil ist.)

$$\sum_i \mu(A_i) = \sum_i \underbrace{\sum_j \mu(A_i \cap B_j)}_{\mu(A_i)} = \sum_j \underbrace{\sum_i \mu(A_i \cap B_j)}_{\mu(B_j)} = \sum_j \mu(B_j)$$

Also ist $\bar{\mu}$ wohldefiniert.

- Es bleibt zu zeigen, dass $\bar{\mu}$ tatsächlich ein Inhalt ist. $\bar{\mu}$ ist laut der Definition (I.2) offensichtlich additiv und somit ein Inhalt.

■

Bemerkung. Hat μ endliche Werte, so hat $\bar{\mu}$ auch endliche Werte.

Beispiel. Wir setzen den auf dem Halbring \mathcal{I} definierten Inhalt $\lambda_{\mathcal{Q}^1}^1 : \mathcal{I} = \mathcal{Q}^1 \rightarrow [0, \infty)$ fort zu

$$\lambda_{\mathcal{F}^1}^1 : \mathcal{F}^1 \longrightarrow [0, \infty)$$

wobei \mathcal{F}^1 den von \mathcal{Q}^1 erzeugten Ring der 1-dimensionalen Figuren bezeichnen, also ist $\lambda_{\mathcal{F}^1}^1$ definiert als die Summe der Längen der Teilintervalle.

Bemerkung. Die Fortsetzung von Inhalten von Ringen auf Algebren ist nicht eindeutig. Z.B. betrachten wir die vom Ring $\mathcal{R} = \{\emptyset\}$ erzeugte Algebra $\mathcal{A} = \{\emptyset, X\}$, so können wir den Inhalt von X beliebig $\in [0, \infty)$ wählen.

I.3.3 Prämaße

Wir betrachten Verhalten von Volumina bei gewissen Grenzprozessen. (Approximation von innen und außen) Wir arbeiten mit Teilmengen einer festen Menge X .

Falls $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine aufsteigende Folge von Teilmengen von X mit

$$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n = A, \quad A_1 \subset A_2 \subset \dots \subset A_n \subset \dots \subset X$$

so schreiben wir $A_n \nearrow A$.

Falls $(A'_n)_{n \in \mathbb{N}}$ absteigend mit

$$\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A'_n = A, \quad X \supset A'_1 \supset A'_2 \supset \dots \supset A'_n \supset \dots$$

so schreiben wir $A'_n \searrow A$.

Beobachtung. Es gelten

$$\begin{aligned} A_n \nearrow A &\iff A \setminus A_n \searrow \emptyset \\ A'_n \searrow A &\iff A'_n \setminus A \searrow \emptyset \end{aligned}$$

Sei $\mu : \mathcal{R} \rightarrow [0, \infty]$ ein Inhalt. Dann gilt

$$A_n \nearrow A \swarrow A'_n \xrightarrow[\text{wächst}]{\text{Monotonie}} \mu(A_n) \leq \mu(A) \leq \mu(A'_n) \xrightarrow[\text{fällt}]{} \mu(A'_n)$$

Da $\mu(A_n)$ und $\mu(A'_n)$ nur *schwach* monoton sind, folgt nur die Ungleichung

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A_n) \leq \mu(A) \leq \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(A'_n) \quad (\text{I.3})$$

Wir formulieren nun eine disjunkte Zerlegung für A_n durch einen induktiven Prozess: (Man beachte, dass $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine aufsteigende Folge ist.)

$$\begin{aligned} A_0 &:= \emptyset \\ \tilde{A}_n &:= A_n \setminus A_{n-1} \end{aligned}$$

so entsteht die disjunkte Zerlegung

$$A = \bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} \tilde{A}_n$$

Dann ist (I.3) äquivalent zu: Für Folgen $(\tilde{A}_n)_{n \in \mathbb{N}}$ paarweise disjunkter Teilmengen mit $A := \bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} \tilde{A}_n \in \mathcal{R}$ gilt

$$\mu\left(\underbrace{\bigsqcup_{n \in \mathbb{N}} \tilde{A}_n}_{=A}\right) \geq \sum_{n=1}^{\infty} \mu(\tilde{A}_n) \quad (\sigma\text{-Supadditivität})$$

Gilt in einer der Gleichung (I.3) die Gleichheit, so fassen wir das als **Stetigkeitseigenschaften** auf. Wir vergleichen nun die Stetigkeitseigenschaften:

Proposition. Für einen Inhalt $\mu : \mathcal{R} \rightarrow [0, \infty]$ auf einem Ring \mathcal{R} sind die beiden folgenden Eigenschaften äquivalent:

- (i) *σ -Additivität:* Ist $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge paarweise disjunkter Teilmengen in \mathcal{R} mit $\bigsqcup_n A_n \in \mathcal{R}$, so gilt

$$\mu\left(\bigsqcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n).$$

- (ii) *Stetigkeit von unten:* Ist $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine aufsteigende Folge in \mathcal{R} , so gilt

$$B_n \nearrow B \in \mathcal{R} \implies \mu(B_n) \nearrow \mu(B).$$

Sie implizieren die beiden folgenden, ebenfalls zueinander äquivalenten, Eigenschaften:

- (iii) *Stetigkeit von oben:* Ist $(C_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine absteigende Folge in \mathcal{R} mit $\mu(C_n) < \infty$, so gilt

$$C_n \searrow C \in \mathcal{R} \implies \mu(C_n) \searrow \mu(C).$$

- (iv) *Stetigkeit von \emptyset :* Ist $(D_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine absteigende Folge in \mathcal{R} mit $\mu(D_n) < \infty$, so gilt

$$D_n \searrow \emptyset \implies \mu(D_n) \searrow 0.$$

Falls μ endliche Werte hat, gilt umgekehrt (iii), (iv) \implies (i), (ii).

Beweis.

- (i) \iff (ii). Übergang durch $B_n = A_1 \sqcup \dots \sqcup A_n$, bzw. $A_n = B_n \setminus B_{n-1}$, $B = \bigsqcup_n A_n$. Aus der endlichen Additivität folgt $\mu(B_n) = \sum_{i=1}^n \mu(A_i)$. Daraus folgt $\lim_{n \rightarrow \infty} \mu(B_n) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n)$. Außerdem gilt $\mu(B) = \mu(\bigsqcup_n A_n)$. \checkmark
- (ii) \implies (iii). Sei $C_n \searrow C$ mit endlichen Inhalten. Setze $B_n := C_1 \setminus C_n \in \mathcal{R}$ und $B := C_1 \setminus C$, d.h. $C_1 = B_n \sqcup C_n$ und $C_1 = B \sqcup C$. Daraus folgt wegen der Additivität des Inhalts $\mu(C_1) = \mu(B_n) + \mu(C_n) = \mu(B) + \mu(C)$. Es gilt n.V. $\mu(B_n) \nearrow \mu(B)$, da $B_n \nearrow B$. Da alle Inhalte endlich sind, gilt $\mu(B_n) = \mu(C_1) - \mu(C_n)$ und $\mu(B) = \mu(C_1) - \mu(C)$. Also gilt $\mu(C_1) - \mu(C_n) \nearrow \mu(C_1) - \mu(C)$. Daraus folgt, dass $\mu(C_n) \searrow \mu(C)$, also (iii).
- (iii) \iff (iv). (Die andere Richtung ist klar, da (iv) ist Spezialfall von (iii)!)
Sei $C_n \searrow C$ mit endlichen Inhalten. Setze $D_n := \underbrace{C_n \setminus C}_{\in \mathcal{R}} \searrow \emptyset$. Dann ist $C_n = D_n \sqcup C$ und somit $\mu(C_n) = \mu(D_n) + \mu(C)$. Da alle Inhalte endlich sind, gilt $\underbrace{\mu(D_n)}_{\searrow 0 \text{ wegen (iv)}} = \mu(C_n) - \mu(C)$. Daraus folgt $\mu(C_n) \searrow \mu(C)$, also (iii).
- μ habe endliche Werte, es gelte (iv). Zeige (ii). Sei $B_n \nearrow B$. Setze $D_n := B \setminus B_n$. Da $\underbrace{\mu(D_n)}_{\searrow 0 \text{ wg (iv)}} = \mu(B) - \mu(B_n)$ und alle Inhalte endlich sind, gilt $\mu(B_n) \nearrow \mu(B)$, d.h. (ii).

■

Es ist natürlich und geboten, von Inhalten σ -Additivität zu verlangen. \rightsquigarrow leistungsfähige Volumentheorie. (E. Borel, Lebesgue ~ 1900)

Definition. Ein **Prämaß** auf einem *Ring* ist ein σ -additiver Inhalt.

Beispiel. Sei X unendlich. Betrachte $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$ die Algebra erzeugt von endlichen Teilmengen, besteht aus endlichen Teilmengen und deren Komplementen. Definieren Inhalt μ auf \mathcal{A} durch

$$\mu(A) := \begin{cases} 0, & \text{falls } A \text{ endlich} \\ 1, & \text{falls } \mathbb{C}A \text{ endlich} \end{cases}$$

Sind A_1, \dots, A_n paarweise disjunkt und nicht alle A_i endlich, so gibt es genau ein A_i unendlich. Daraus folgt

$$\mu(A_1) + \dots + \mu(A_n) = 1 = \mu(A_1 \sqcup \dots \sqcup A_n).$$

genau ein Beitrag 1

Also war die endliche Additivität. Die σ -Additivität wird genau dann verletzt, falls X abzählbare Zerlegung in endlichen Teilmengen ($\iff X$ abzählbar) zulässt.³ Daraus folgt: μ Prämaß $\iff X$ überabzählbar (z.B. $X = \mathbb{R}$).

Satz. Der Inhalt $\lambda_{\mathcal{F}^1}^1$ ist ein Prämaß.

(Später, nach Produkten, Beweis in beliebiger Dimension.)

Beweis. Zu zeigen ist die σ -Additivität. Dies ist wegen endlicher Werte von $\lambda_{\mathcal{F}^1}^1$ äquivalent zu Stetigkeit in \emptyset . Diese weisen wir jetzt nach. Das Argument beruht auf *topologischen* Eigenschaften von \mathbb{R} , nämlich Lokalkompaktheit. Wir betrachten eine Folge absteigender Figuren (d.h. *endliche* Vereinigung halboffener Intervalle $[a, b)$), nämlich

$$F_1 \supset F_2 \supset \dots \supset F_n \supset \dots \quad \text{mit } F_n \in \mathcal{F}^1.$$

Stetigkeit in \emptyset bedeutet: $\underbrace{F_n \searrow \emptyset}_{\iff \bigcap_n F_n = \emptyset} \implies \lambda_{\mathcal{F}^1}^1(F_n) \searrow 0$. Wir notieren $\lambda = \lambda_{\mathcal{F}^1}^1$.

Annahme: $\lim_{n \rightarrow \infty} \lambda(F_n) \geq v_0 > 0$. Zu zeigen: $\bigcap_n F_n \neq \emptyset$.

Dazu approximieren wir von innen durch eine geschachtelte Folge von Kompakta K_n . Sei $\varepsilon_n \searrow 0$. Dann existieren $F'_n \in \mathcal{F}^1$ und Kompakta $K_n \subset \mathbb{R}$ sodass $F'_n \subset K_n \subset F_n$ (*Bem.* K_n sind nicht notwendigerweise geschachtelt. Wir brauchen F'_n , denn μ ist nicht auf Kompakta definiert.) und $\lambda(F'_n) > \lambda(F_n) - \varepsilon_n$. Wir vergleichen absteigende Folgen

$$\bigcap_{i \leq n} F'_i \subset \bigcap_{i \leq n} K_i \subset \underbrace{\bigcap_{i \leq n} F_i}_{=F_n}.$$

Es genügt zu zeigen, dass

$$\bigcap_{i \leq n} K_i \neq \emptyset \quad \forall n, \tag{I.4}$$

³Zum Beispiel betrachten wir die natürlichen Zahlen \mathbb{N} . Es gilt $\sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(\{n\}) = 0 \neq 1 = \mu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} \{n\}\right)$.

denn (I.4) $\xrightarrow{\text{Topologie}} \bigcap_{i=1}^{\infty} K_i \neq \emptyset \implies \bigcap_{i=1}^n F_i \neq \emptyset$.

Es gilt

$$\underbrace{\left(\bigcap_{i \leq n} F_i \right)}_{F_n} \setminus \left(\bigcap_{i \leq n} F'_i \right) = \bigcup_{i \leq n} \underbrace{(F_n \setminus F'_i)}_{\subset F_i} \subset \bigcup_{i \leq n} (F_i \setminus F'_i),$$

also

$$F_n = \bigcap_{i \leq n} F_i \subset \left(\bigcap_{i \leq n} F'_i \right) \cup \bigcup_{i \leq n} (F_i \setminus F'_i),$$

d.h. Überdeckung von F_n durch $n+1$ Teilmengen aus \mathcal{F}^1 . Aus der σ -Subadditivität folgt dann

$$\lambda(F_n) \leq \lambda \left(\bigcap_{i \leq n} F'_i \right) + \sum_{i \leq n} \underbrace{\lambda(F_i \setminus F'_i)}_{< \varepsilon_i}$$

Da λ endlich-wertig ist, können wir die Gleichung umstellen zu

$$\lambda \left(\bigcap_{i \leq n} F'_i \right) \geq \underbrace{\lambda(F_n)}_{\geq v_0} - \sum_{i \leq n} \varepsilon_i > v_0 - \sum_{n \in \mathbb{N}} \varepsilon_n$$

Wähle (ε_n) so, dass $\sum_{n \in \mathbb{N}} \varepsilon_n < v_0$. Dann folgt

$$\lambda \left(\bigcap_{i \leq n} F'_i \right) > 0 \implies \bigcap_{i \leq n} F'_i \neq \emptyset \implies \bigcap_{i \leq n} K_i \neq \emptyset$$

Also haben wir (I.4) gezeigt und somit war die Behauptung. ■

Definition. $\lambda_{\mathcal{F}^1}^1$ heißt das **eindimensionale Lebesgue-Prämaß**.

I.3.4 Produkte von Inhalten und Prämaßen

Man kann in natürlicher Weise Produkte von Inhalten auf Halbringen und Ringen bilden. Zunächst Halbringe:

Satz. Seien μ_i Inhalte auf Halbringen $\mathcal{H}_i \subset \mathcal{P}(X_i), i = 1, \dots, n$. Dann wird durch

$$(\mu_1 \times \dots \times \mu_n)(H_1 \times \dots \times H_n) := \mu(H_1) \cdot \dots \cdot \mu(H_n), H_i \in \mathcal{H}_i$$

ein Inhalt $\mu_1 \times \dots \times \mu_n$ auf dem Produkthalbring $\mathcal{H}_1 * \dots * \mathcal{H}_n \subset \mathcal{P}(X_1 \times \dots \times X_n)$ definiert.

Zusätzliche *Konvention* für Multiplikation auf \mathbb{R} : $0 \cdot \infty = 0$, weil $0 \cdot n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} 0$.

Beweis. (Für $n = 2$, der allgemeiner Fall folgt mit Induktion.)

Wir müssen die *Additivität* nachweisen. Betrachte die endliche Zerlegung eines “Rechtecks” $H_1 \times H_2 \in \mathcal{H}_1 * \mathcal{H}_2$ in endlich viele paarweise disjunkte “Rechtecken” $H_1^{(j)} \times H_2^{(j)} \in \mathcal{H}_1 * \mathcal{H}_2$:

$$H_1 \cdot H_2 = \bigsqcup_j (H_1^{(j)} \times H_2^{(j)}).$$

Aus dem Lemma “simultane Zerlegung” folgt, dass wir H_i in $H_i'^{(k)} \in \mathcal{H}_i, k \in K_i$ endlich! zerlegen können, sodass jedes $H_i^{(j)}$ die disjunkte Vereinigung einiger $H_i'^{(k)}$ ist, also

$$H_i^{(j)} = \bigsqcup_{k \in K_i^{(j)}} H_i'^{(k)}, K_i^{(j)} \subset K_i.$$

So entsteht die “karierte” Zerlegung

$$H_1 \times H_2 = \bigsqcup_{(k_1, k_2) \in K_1 \times K_2} \left(H_1'^{(k_1)} \times H_2'^{(k_2)} \right)$$

bzw.

$$H_1^{(j)} \times H_2^{(j)} = \bigsqcup_{(k_1, k_2) \in K_1^{(j)} \times K_2^{(j)}} \left(H_1'^{(k_1)} \times H_2'^{(k_2)} \right).$$

Es gilt die Zerlegung der Indexmenge

$$K_1 \times K_2 = \bigsqcup_j \left(K_1^{(j)} \times K_2^{(j)} \right).$$

Da μ_i additiv ist, folgt

$$\mu_i(H_i) = \sum_{k \in K_i} \mu_i(H_i'^{(k)})$$

bzw.

$$\mu_i(H_i^{(j)}) = \sum_{k \in K_i^{(j)}} \mu_i(H_i'^{(k)}).$$

Es folgt (Die Additivität von $\mu_1 \times \mu_2$ ist klar für “karierte” Zerlegung)

$$\begin{aligned} (\mu_1 \times \mu_2)(H_1 \times H_2) &= \sum_{(k_1, k_2) \in K_1 \times K_2} (\mu_1 \times \mu_2)(H_1'^{(k_1)} \times H_2'^{(k_2)}) \\ &= \sum_j \underbrace{\sum_{(k_1, k_2) \in K_1^{(j)} \times K_2^{(j)}} (\mu_1 \times \mu_2)(H_1'^{(k_1)} \times H_2'^{(k_2)})}_{= \mu_1 \times \mu_2(H_1^{(j)} \times H_2^{(j)})}. \end{aligned}$$

Also war die Additivität von $\mu_1 \times \mu_2$. ■

Definition. Wir nennen den Inhalt $\mu_1 \times \dots \times \mu_n$ auf dem Halbring $\mathcal{H}_1 * \dots * \mathcal{H}_n$ das Produkt der Inhalte μ_i .

Hauptbeispiel (Elementarinhalt). Der Elementarinhalt achsenparalleler Quader $[a, b] \subset \mathbb{R}^d$ für $a, b \in \mathbb{R}^d$ mit $a_i < b_i$ ist definiert als ihr d -dimensionales euklidisches Volumen

$$\lambda_{\mathcal{Q}^d}^d([a, b]) := (b_1 - a_1) \cdot \dots \cdot (b_d - a_d)$$

Der Elementarinhalt $\lambda_{\mathcal{Q}^d}^d$ ist ein Inhalt, denn

$$\lambda_{\mathcal{Q}^d}^d = \underbrace{\lambda_{\mathcal{I}}^1 \times \dots \times \lambda_{\mathcal{I}}^1}_{d\text{-mal}}$$

bezüglich der Zerlegung $\mathcal{Q}^d = \mathcal{I} \times \dots \times \mathcal{I}$.

Für Ringe folgt mit dem Fortsetzungsresultat für Inhalte von Halbringen auf (die von den erzeugte) Ringe:

Korollar. Seien μ_i Inhalte auf Ringen $\mathcal{R}_i \subset \mathcal{P}(X_i)$, $(i = 1, \dots, n)$. Dann existiert einen eindeutigen Inhalt $\mu_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mu_n$ auf dem Produktring $\mathcal{R}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{R}_n \subset \mathcal{P}(X_1 \times \dots \times X_n)$ mit

$$(\mu_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mu_n)(R_1 \times \dots \times R_n) = \mu_1(R_1) \cdot \dots \mu_n(R_n), R_i \in \mathcal{R}_i$$

Hauptbeispiel. Der Elementarinhalt $\lambda_{\mathcal{Q}^d}^d : \mathcal{Q}^d \rightarrow [0, \infty)$ setzt sich eindeutig fort zu einem Inhalt

$$\lambda_{\mathcal{F}^d}^d : \mathcal{F}^d \rightarrow [0, \infty)$$

auf d -dimensionalen Figuren, den wir als *d-dimensionales euklidisches Volumen* auffassen.

Auch Prämaße verhalten sich gut unter Produkten:

Satz. Endliche Produkte von Prämaßen sind wieder Prämaße.

Beweis. ($n = 2$, der allgemeiner Fall folgt mit Induktion.)

Seien μ_i Prämaße auf Ringen $\mathcal{R}_i \subset \mathcal{P}(X_i)$, $i = 1, 2$. und der Produktinhalt $\mu_1 \boxtimes \mu_2$ auf $\mathcal{R}_1 \boxtimes \mathcal{R}_2$ gegeben durch

$$(\mu_1 \boxtimes \mu_2)(R_1 \times R_2) = \mu_1(R_1) \cdot \mu_2(R_2), R_i \in \mathcal{R}_i.$$

Jetzt müssen wir die Additivität des Volumens nachweisen bei *abzählbaren* Zerlegungen von Figuren (d.h. Teilmengen aus $\mathcal{R}_1 \boxtimes \mathcal{R}_2$) in Figuren. Weil Figuren endliche disjunkte Vereinigungen von Quadern sind und der Inhalt $\mu_1 \boxtimes \mu_2$ (endlich) additiv ist, genügt es, abzählbare disjunkte Zerlegungen

$$A_1 \times A_2 = \bigsqcup_{\substack{m \in \mathbb{N} \\ \text{abzählbar!}}} (A_{1,m} \times A_{2,m})$$

mit $A_i, A_{i,m} \in \mathcal{R}_i$ zu betrachten. Zu zeigen ist also

$$\sum_{m \in \mathbb{N}} \underbrace{\mu_1(A_{1,m}) \cdot \mu_2(A_{2,m})}_{(\mu_1 \boxtimes \mu_2)(A_{1,m} \times A_{2,m})} = \mu_1(A_1) \cdot \mu_2(A_2)$$

Wegen der Monotonie von Inhalten gilt die Richtung “ \leq ”, zu zeigen ist “ \geq ”. Hierbei wird verwendet, dass μ_i Prämaße sind. Wir brauchen eine *untere* Abschätzung von der Summe der Teilvolumina. Betrachte eine Folge approximierender Figuren

31.10.2019

$$F_m := \bigsqcup_{i \leq m} (A_{1,i} \times A_{2,i}).$$

Wir schätzen $(\mu_1 \boxtimes \mu_2)(F_m)$ nach unten ab. Die X_2 -Querschnitte für $x_1 \in A_1$

$$S_{2,m}(x_1) \subset A_2$$

sind definiert durch

$$\{x_1\} \times S_{2,m}(x_1) = F_m \cap (\{x_1\} \times A_2).$$

Dann folgt

$$S_{2,m}(x_1) \in \mathcal{R}_2$$

da $S_{2,m}(x_1)$ die Vereinigung einiger $A_{2,i}$ ist. $S_{2,m}(x_1)$ wachsen mit m und $S_{2,m}(x_1) \nearrow A_2$ für $m \rightarrow \infty$ und festes x_1 .

Für festes m treten endlich viele Querschnitte auf. Die Punkte $x_1 \in A_1$, für die $S_{2,m}(x_1)$ ein bestimmter Querschnitt ist, bilden eine Figur $\in \mathcal{R}_1$. (Liegt im Unterring erzeugt von $A_{1,i}$.)

Für $0 < v_2 < \mu_2(A_2)$ setze

$$B_{1,m}(v_2) := \{x_1 \in A_1 \mid \mu_2(S_{2,m}(x_1)) \geq v_2\} \in \mathcal{R}_1.$$

Dann erhalten wir die Volumenabschätzung:

$$(\mu_1 \boxtimes \mu_2)(F_m) \geq \mu_1(B_{1,m}(v_2)) \cdot v_2.$$

Somit:

$$\begin{aligned} & S_{2,m}(x_1) \nearrow A_2 \\ \xRightarrow{\mu_2 \text{ Prämaß}} & \mu(S_{2,m}(x_1)) \nearrow \mu_2(A_2) \\ \implies & B_{1,m}(v_2) \nearrow A_1 \\ \xRightarrow{\mu_1 \text{ Prämaß}} & \mu_1(B_{1,m}(v_2)) \nearrow \mu_1(A_1) \\ \implies & \lim_{m \rightarrow \infty} (\mu_1 \boxtimes \mu_2)(F_m) \geq \mu_1(A_1) \cdot v_2 \quad \forall v_2 \in (0, \mu_2(A_2)) \\ \implies & \lim_{m \rightarrow \infty} (\mu_1 \boxtimes \mu_2)(F_m) \geq \mu_1(A_1) \cdot \mu_2(A_2) \end{aligned}$$

Also die Gleichheit, d.h. $\mu_1 \boxtimes \mu_2$ ist ein Prämaß. ■

Bemerkung. Der letzte Satz wird häufig erst im Rahmen der Integrationstheorie bewiesen (mit Satz von der monotonen Konvergenz).

Zurück zum unsren Hauptbeispiel: Weil der Inhalt $\lambda_{\mathcal{F}^d}^d$ die d -te Potenz des Prämaßes $\lambda_{\mathcal{F}^1}^1$ ist, folgt

Korollar. Der Inhalt $\lambda_{\mathcal{F}^d}^d$ ist ein Prämaß.

Definition. Das Prämaß $\lambda_{\mathcal{F}^d}^d$ heißt **das d -dimensionale Lebesgue-Prämaß**.

I.4 σ -Algebren

I.4.1 σ -Algebren

Wir fordern von Teilmengenfamilien jetzt, dass sie *reichhaltiger* und *flexibel* sind, d.h. dass man innerhalb von ihnen zusätzlich zu den genannten endlichen Mengenoperationen auch gewisse *abzählbar unendliche* Operationen (nämlich Vereinigungen) durchführen kann. D.h. Sie sollen abgeschlossen sein unter gewissen *Grenzprozessen*.

Definition (σ -Algebra). Eine Familie $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$ heißt σ -Algebra auf X , falls:

- (i) $\emptyset \in \mathcal{A}$,
- (ii) σ - \cup -stabil, d.h. Für jede Folge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von Teilmengen mit $A_n \in \mathcal{A}$ gilt $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}$,
- (iii) \mathbb{C} -stabil, d.h. $A \in \mathcal{A} \implies \mathbb{C}A \in \mathcal{A}$.

Man kann (i) bzw. (iii) ersetzen durch die bezüglich Komplementbildung duale Forderung:

- (i*) $X \in \mathcal{A}$,
- (ii*) δ - \cap -stabil, d.h. Für jede Folge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von Teilmengen mit $A_n \in \mathcal{A}$ gilt $\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{A}$.

Leicht können wir einsehen, dass σ -Algebren Algebren sind.

Bemerkung. (i) Beachte formale Ähnlichkeit von (iii) bzw. (iii*) mit Definition einer Topologie: Die Topologie ist die Familie aller offenen Teilmengen, sie ist stabil unter beliebigen Vereinigungen und endlichen Durchschnitten.

- (ii) In σ -Algebren gilt: Alle von innen bzw. außen durch Teilmengen in der σ -Algebra approximierbaren Teilmengen gehören wieder zur σ -Algebra.

Wie im Fall von Ringen und Algebren: Beliebige Durchschnitte von σ -Algebren sind wieder σ -Algebren, deswegen ist die folgende Definition sinnvoll:

Definition (Erzeugendensystem von σ -Algebren). Die von einer Familie $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$ erzeugte σ -Algebra $\sigma(\mathcal{E})$ ist die eindeutige kleinste sie enthaltende σ -Algebra. Man nennt \mathcal{E} ein(en) *Erzeugendensystem* oder *Erzeuger* von $\sigma(\mathcal{E})$.

Die Definition einer σ -Algebra durch ein Erzeugendensystem ist nicht *konstruktiv*! Im Fall von Ringen und Algebren kann man die enthaltenen Teilmengen ausgehend von einem Erzeugendensystem noch explizit angeben, nämlich *induktiv* in *abzählbaren vielen* Schritten konstruieren. Diese ist bei σ -Algebren abgesehen von Ausnahmefällen nicht mehr möglich, sondern man benötigt zur Konstruktion aus einem Erzeugendensystem einen Prozess mit *überabzählbaren vielen* Schritten. (siehe transfinite Induktion) Dieser Umstand reflektiert, dass die in σ -Algebren enthaltenen Teilmengen i.A. so kompliziert sind, dass man sie nicht mehr explizit beschreiben kann.

Ergänzend: Ist $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$, so kann man durch Anwenden abzählbarer Mengenoperationen immer größere Teilmengenfamilien angeben, die zu $\sigma(\mathcal{E})$ gehören müssen und deren “Verwandtschaftsgrad” zu \mathcal{E} gleichzeitig sukzessive abnimmt.

Zu $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(X)$ definiere

$$\begin{aligned} \mathcal{F} \subset \mathcal{F}^\nu &:= \left\{ \begin{array}{l} \text{abzählbare Vereinigungen von Teilmengen in } \mathcal{F} \\ \text{sowie deren Komplementen} \end{array} \right\} \subset \mathcal{P}(X) \\ \mathcal{E}_0 &:= \mathcal{E} \cup \{\emptyset\} \\ \mathcal{E}_n &:= \mathcal{E}_{n-1}^\nu \text{ für } n \in \mathbb{N} \end{aligned}$$

Anfang der “Borel-Hierarchie”, fortsetzen mit transfiniter Induktion.

Einfachste Beispiele.

- (o) $\{\emptyset, X\} \subset \mathcal{P}(X)$ ist eine σ -Algebra auf X , erzeugt von \emptyset .
 $\mathcal{P}(X) \subset \mathcal{P}(X)$ ist ebenfalls eine σ -Algebra.
- (i) Ist $A \subset X$, so ist $\{\emptyset, A, \complement A, X\}$ eine σ -Algebra auf X , erzeugt von $\mathcal{E} = \{A\}$.
- (ii) Die Teilmengen von X , die abzählbar sind oder abzählbares Komplement haben, bilden eine σ -Algebra \mathcal{A} auf X , erzeugt von den *einelementigen* Teilmengen. Es gilt: $\mathcal{A} \neq \mathcal{P}(X) \iff X$ überabzählbar.

Von zentraler Wichtigkeit sind Beispiele *topologischen* Ursprungs:

Beispiel.

- (i) (**Borelsche σ -Algebra, Borel-Mengen**) Jeder topologische Raum (X, \mathcal{T}) trägt eine natürliche σ -Algebra, nämlich die von seiner Topologie erzeugte σ -Algebra

$$\mathcal{B}(X) := \sigma(\mathcal{T}).$$

Wir nennen $\mathcal{B}(X)$ die *Borelsche σ -Algebra* von X . In ihnen enthaltenen Teilmengen heißen *Borel-Mengen*.

Notation:

$$\mathcal{B}(\mathbb{R}^d) =: \mathcal{B}^d$$

$$\mathcal{B}(\mathbb{R}) =: \mathcal{B}$$

- (ii) Jeder *metrische* Raum (X, d) trägt eine natürliche Topologie, die von den offenen metrischen Bällen erzeugte Topologie \mathcal{T}_d und damit eine natürliche σ -Algebra

$$\mathcal{B}(X) := \sigma(\mathcal{T}_d).$$

Bemerkung.

- (i) Die Borelsche σ -Algebra eines topologischen Raumes wird ebenfalls von den abgeschlossenen Teilmengen erzeugt. (vgl. die Stabilität unter Komplementbildung)
- (ii) Ist die Topologie *Hausdorffsch*, so sind kompakte Teilmengen abgeschlossen⁴, und daher die von den Kompakta erzeugte σ -Algebra in der Borelschen enthalten. Besitzt der Raum eine abzählbare Überdeckung durch Kompakta, so sind beide σ -Algebren gleich.

Wir haben also gesehen:

4.11.2019

$$\begin{array}{c} (X, \mathcal{T}) \\ \text{topologischer Raum} \end{array} \rightsquigarrow \text{Borelsche } \sigma\text{-Algebra } \mathcal{B}(X) := \sigma(\mathcal{T}).$$

$\mathcal{B}^d = \mathcal{B}(\mathbb{R}^d)$ hat verschiedene natürliche Erzeuger, z.B.

- die Familie der offenen Teilmengen,
- die Familie der abgeschlossenen Teilmengen,

⁴In metrischen Räumen sind Kompakta abgeschlossen und beschränkt. Allgemeiner: In topologischen Räumen mit Hausdorff-Eigenschaft sind Kompakta abgeschlossen. (Ana II, S.30)

- die Familie der Kompakta,
- die Familie der offenen Bälle, bzw. offenen Bälle mit Radien $\in \mathbb{Q}^+$ und Zentren $\in \mathbb{Q}^d$, denn jede offene Teilmenge ist eine abzählbare Vereinigung von offenen Bällen,
- die Familie der abgeschlossenen Bälle,
- die Familie der offenen (achsenparallelen) Quader,
- die Familie der abgeschlossenen (achsenparallelen) Quader.

Lemma. \mathcal{B}^d wird auch von \mathcal{Q}^d (halboffenen, achsenparallelen Quadern) erzeugt.

Beweis. Einerseits: Jede offene Teilmenge von \mathbb{R}^d ist (notwendigerweise) wegen der Dichtheit von \mathbb{Q} in \mathbb{R} eine abzählbare Vereinigung von Quadern $[a, b)$ aus \mathcal{Q}^d mit rationalen Ecken, d.h. $a_i < b_i \forall i, a, b \in \mathbb{Q}^d$. Also $\mathcal{B}^d \subset \sigma(\mathcal{Q}^d)$.

Andererseits ist jeder Quader $[a, b)$ mit $a_i < b_i \forall i$ ein abzählbarer Durchschnitt offener Quader, gehört also zu \mathcal{B}^d , denn

$$[a, b) = \underbrace{\bigcap_{n \in \mathbb{N}} \left(a_1 - \frac{1}{n}, b_1 \right) \times \dots \times \left(a_d - \frac{1}{n}, b_d \right)}_{\substack{\in \mathcal{T} \\ \in \sigma(\mathcal{T}) = \mathcal{B}^d}}$$

Also die Gleichheit. ■

\mathcal{B}^d ist so reichhaltig, dass sie alle “denkbaren” geometrischen Gebilde in \mathbb{R}^d enthält. Genauerer Vergleich von \mathcal{B}^d mit $\mathcal{T}_{\mathbb{R}^d}$ folgt später.

I.4.2 Dynkin-Systeme

Wir betrachten jetzt eine Abschwächung von σ -Algebren, die natürlich auftritt.

Definition. Eine Familie $\mathcal{D} \subset \mathcal{P}(X)$ heißt ein Dynkin-System auf X , falls

- (i) $\emptyset \in \mathcal{D}$,
- (ii) \mathcal{D} -stabil,
- (iii) Für jede Folge $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ paarweise disjunkter Teilmengen $A_n \in \mathcal{D}$ gilt $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{D}$.

Im Vergleich zu σ -Algebren fordern wir zusätzlich die (paarweise) Disjunktheit der Folgenglieder. σ -Algebren sind Dynkin-Systeme.

Proposition. \cap -stabile Dynkin-Systeme sind σ -Algebren.

Beweis. Sei \mathcal{D} ein \cap -stabiles Dynkin-System. Aus der \complement -Stabilität und \cap -Stabilität folgt die \cup -Stabilität wegen $A \cup B = \complement(\complement A \cap \complement B)$. \mathcal{D} ist also eine Algebra. In Algebren lassen sich abzählbare Vereinigungen als abzählbare *disjunkte* Vereinigungen ausdrücken:

$$A_1 \cup A_2 \cup \dots \cup A_n \cup \dots = A_1 \sqcup \underbrace{(A_2 \setminus A_1)}_{\in \mathcal{D}} \sqcup \underbrace{(A_3 \setminus (A_1 \sqcup A_2))}_{\in \mathcal{D}} \sqcup \dots \in \mathcal{D}$$

D.h. \mathcal{D} enthält beliebige abzählbare Vereinigungen von Teilmengen aus \mathcal{D} , ist also eine σ -Algebra. ■

Lemma. Ist $\mathcal{D} \subset \mathcal{P}(X)$ ein Dynkin-System und $D_1, D_2 \in \mathcal{D}$ mit $D_1 \subset D_2$, so ist $D_2 \setminus D_1 \in \mathcal{D}$.

Beweis. Wegen $\complement(D_2 \setminus D_1) = D_1 \sqcup \complement D_2 \in \mathcal{D}$ gilt $D_2 \setminus D_1 \in \mathcal{D}$. ■

\rightsquigarrow Die Dynkin-Eigenschaft vererbt sich bei gewissen Konstruktionen:

Folgerung. Für $D \in \mathcal{D}$ ist die Spur

$$\mathcal{D}|_D := \{M \subset D \mid M \in \mathcal{D}\} \subset \mathcal{P}(D)$$

von \mathcal{D} auf D ein Dynkin-System auf D . Ebenso ist

$$\mathcal{D}_D := \{M \subset X \mid M \cap D \in \mathcal{D}\} \subset \mathcal{P}(X)$$

ein Dynkin-System auf X .

Beweis. Ist $M \in \mathcal{D}|_D$, so ist $M \in \mathcal{D}$ und wegen des Lemmas $\complement M = D \setminus M \in \mathcal{D}$, also $\complement M \in \mathcal{D}|_D$. Ist $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge paarweise disjunkter Teilmengen in $\mathcal{D}|_D$, so ist $A_n \in \mathcal{D} \forall n$, folglich $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{D}$, also $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{D}|_D$.

Ist $M \in \mathcal{D}_D$, so ist $M \cap D \in \mathcal{D}$ und wegen des Lemmas $\underbrace{D \setminus (M \cap D)}_{\complement M \cap D} \in \mathcal{D}$, also

$\complement M \in \mathcal{D}_D$. Ist $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge paarweise disjunkter Teilmengen in \mathcal{D}_D , so ist $\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) \cap D \in \mathcal{D}$, also $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} (A_n \cap D) \in \mathcal{D}$, d.h. $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \in \mathcal{D}_D$. ■

Da beliebige Durchschnitte von Dynkin-Systemen wieder solche sind, gibt es für jede Familie $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$ ein eindeutiges kleinstes sie enthaltendes Dynkin-System $\mathcal{D}(\mathcal{E}) \subset \mathcal{P}(X)$, genannt **das von \mathcal{E} erzeugte Dynkin-System**. Klar gilt $\mathcal{D}(\mathcal{E}) \subset \sigma(\mathcal{E})$.

Satz. Von \cap -stabilen Familien erzeugte Dynkin-Systeme sind \cap -stabil, also σ -Algebren.

Beweis. Sei $\mathcal{E} \subset \mathcal{P}(X)$ \cap -stabil. Zu zeigen: $\mathcal{D}(\mathcal{E})$ ist \cap -stabil. Sei $E \in \mathcal{E}$. Fixiere noch ein $E' \in \mathcal{E}$. Dann gilt nach Voraussetzung $E' \cap E \in \mathcal{E} \subset \mathcal{D}(\mathcal{E})$, d.h. $E' \in \mathcal{D}(\mathcal{E})_E$ (vgl. oben). Daraus folgt $\mathcal{E} \subset \mathcal{D}(\mathcal{E})_E$ und somit $\mathcal{D}(\mathcal{E}) \subset \mathcal{D}(\mathcal{E})_E$, da $\mathcal{D}(E)$ das kleinste Dynkin-System ist, das \mathcal{E} enthält. Wir haben also gezeigt: $\mathcal{D}(\mathcal{E}) \subset \mathcal{D}(\mathcal{E})_E \forall E \in \mathcal{E}$. Es folgt

$$\left. \begin{array}{l} E \in \mathcal{E} \\ D \in \mathcal{D}(\mathcal{E}) \end{array} \right\} \implies D \in \mathcal{D}(\mathcal{E})_E \implies D \cap E \in \mathcal{D}(\mathcal{E}) \implies E \in \mathcal{D}(\mathcal{E})_D$$

Wir haben also gezeigt: $\mathcal{E} \subset \mathcal{D}(\mathcal{E})_D \forall D \in \mathcal{D}(\mathcal{E})$, weiter gilt $\mathcal{D}(\mathcal{E}) \subset \mathcal{D}(\mathcal{E})_D \forall D \in \mathcal{D}(\mathcal{E})$. Dies wiederum bedeutet:

$$D, D' \in \mathcal{D}(\mathcal{E}) \implies D \cap D' \in \mathcal{D}(\mathcal{E})$$

Also ist $\mathcal{D}(\mathcal{E})$ \cap -stabil, wird aufgrund der letzten Proposition eine σ -Algebra. ■

Bemerkung. Ist \mathcal{E} \cap -stabil, so gilt $\mathcal{D}(\mathcal{E}) = \sigma(\mathcal{E})$.

I.4.3 Die messbare Kategorie

“Messbare Objekte” sind Mengen versehen mit σ -Algebren als “messbaren Zusatzstrukturen”.

Definition (Messraum, Messbarkeit von Teilmengen). Ein **Messraum** ist ein Paar (X, \mathcal{A}) bestehend aus einer Menge X und einer σ -Algebra $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$. Die Teilmengen in \mathcal{A} heißen **messbar**.

\rightsquigarrow werden Definitionsbereiche unserer Volumenfunktionen (Maße) sein.

Definition (Messbarkeit von Abbildungen). Eine Abbildung $f : (X, \mathcal{A}) \rightarrow (Y, \mathcal{B})$ von Messräumen heißt **messbar**, falls $f^{-1}(B) \in \mathcal{A} \forall B \in \mathcal{B}$, d.h. Urbilder messbarer Teilmengen sollen messbar sein. Man sagt auch $f : X \rightarrow Y$ ist **\mathcal{A} - \mathcal{B} -messbar**.

Beobachtung. Kompositionen messbarer Abbildungen sind messbar, denn: ist

$$(X, \mathcal{A}) \xrightarrow[\text{messbar}]{f} (Y, \mathcal{B}) \xrightarrow[\text{messbar}]{g} (Z, \mathcal{C}),$$

so gilt

$$C \in \mathcal{C} \implies g^{-1}(C) \in \mathcal{B} \implies \underbrace{f^{-1}(g^{-1}(C))}_{(g \circ f)^{-1}(C)} \in \mathcal{A}.$$

Also $g \circ f$ ist \mathcal{A} - \mathcal{C} -messbar.

Zurückziehen von σ -Algebren: Eine Abbildung von Mengen $f : X \rightarrow Y$ induziert kontravariant eine Abbildung $f^* : \mathcal{P}(Y) \rightarrow \mathcal{P}(X), M \mapsto f^{-1}(M)$.

Für $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(Y)$ nennt man

$$f^*\mathcal{F} := \{f^{-1}(M) \mid M \in \mathcal{F}\} \subset \mathcal{P}(X)$$

die mit f zurückgezogene Familie.

Ist $\mathcal{B} \subset \mathcal{P}(Y)$ eine σ -Algebra, so ist $f^*\mathcal{B} \subset \mathcal{P}(X)$ auch eine σ -Algebra, denn

$$\begin{aligned} f^{-1}\left(\bigcup M_k\right) &= \bigcup f^{-1}(M_k) \\ f^{-1}(\mathbb{C}M) &= \mathbb{C}f^{-1}(M). \end{aligned}$$

Beobachtung. Gegeben eine σ -Algebra \mathcal{B} auf Y , ist $f^*\mathcal{B}$ die kleinste σ -Algebra auf X , bezüglich derer f messbar ist. Deswegen ist die Reformulierung von der Definition der Messbarkeit der Abbildungen sinnvoll:

Definition. Eine Abbildung $f : (X, \mathcal{A}) \rightarrow (Y, \mathcal{B})$ ist genau dann messbar, wenn $f^*\mathcal{B} \subset \mathcal{A}$. Ist speziell $X \subset Y$ eine Teilmenge und $\iota : X \rightarrow Y$ die Inklusion, so ist $\iota^{-1}(M) = X \cap M$ für $M \subset Y$. Für eine σ -Algebra \mathcal{B} auf Y nennt man

$$\mathcal{B}|_X := \iota^*\mathcal{B} = \{M \cap X \mid M \in \mathcal{B}\} \subset \mathcal{P}(X)$$

die **Spur- σ -Algebra** von \mathcal{B} auf X . Die Inklusion ist dann $\mathcal{B}|_X$ - \mathcal{B} -messbar.

Man kann Erzeugendensysteme von σ -Algebren zurückziehen:

Lemma. Ist $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung und $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(Y)$, so gilt $\sigma(f^*\mathcal{F}) = f^*(\sigma(\mathcal{F}))$.

Beweis. Einerseits: $f^*(\sigma(\mathcal{F}))$ ist σ -Algebra, enthält $f^*\mathcal{F} \implies \sigma(f^*\mathcal{F}) \subset f^*(\sigma(\mathcal{F}))$. Andererseits ist $\{A \in \sigma(\mathcal{F}) \mid f^{-1}(A) \in \sigma(f^*\mathcal{F})\}$ eine Algebra, die \mathcal{F} enthält und in $\sigma(\mathcal{F})$ enthalten ist, somit Gleichheit. D.h. $A \in \sigma(\mathcal{F}) \implies f^{-1}(A) \in \sigma(f^*\mathcal{F})$, somit $f^*(\sigma(\mathcal{F})) \subset \sigma(f^*\mathcal{F})$. ■

Das Lemma lässt sich reformulieren: Ist $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung, $\mathcal{B} \subset \mathcal{P}(Y)$ eine σ -Algebra und $\mathcal{E} \subset \mathcal{B}$ Erzeugendensystem, so wird $f^*\mathcal{B}$ von $f^*\mathcal{E}$ erzeugt. Wir können also Erzeuger zurückziehen.

7.11.2019

$$\begin{array}{ccc} \text{topologische Kategorie} & \rightsquigarrow & \text{Klasse der Borelschen Messräume} \\ (X, \mathcal{T}) & \rightsquigarrow & (X, \mathcal{B}(X)) \end{array}$$

Definition. Sind (X, \mathcal{T}_X) und (Y, \mathcal{T}_Y) topologische Räume, so heißt eine Abbildung $f : X \rightarrow Y$ **Borel-messbar**, falls sie $\mathcal{B}(X)$ - $\mathcal{B}(Y)$ -messbar ist.

Lemma. Stetige Abbildungen sind Borel-messbar.

Beweis. Mit Notation der Definition: Die Stetigkeit von $f : X \rightarrow Y$ bedeutet, dass $f^*\mathcal{T}_Y \subset \mathcal{T}_X$. Es folgt

$$f^*\underbrace{(\mathcal{B}(Y))}_{\sigma(\mathcal{T}_Y)} \stackrel{\text{Lemma}}{=} \sigma\left(\underbrace{f^*\mathcal{T}_Y}_{\subset \mathcal{T}_X}\right) \subset \sigma(\mathcal{T}_X) = \mathcal{B}(X).$$

■

I.4.4 Produkte von σ -Algebren

Wir konstruieren endliche Produkte von σ -Algebren bzw. Messräumen.

Definition. Seien (X_i, \mathcal{A}_i) Messräume ($i = 1, \dots, n$).

Die **Produkt- σ -Algebra** $\mathcal{A} = \mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n$ ist definiert als die σ -Algebra auf $X = X_1 \times \dots \times X_n$ erzeugt von $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}(\mathcal{A}_1, \dots, \mathcal{A}_n)$, d.h. von $\pi_i^{-1}(A_i) \forall A_i \in \mathcal{A}_i^5$, $i = 1, \dots, n$ und ebenfalls erzeugt vom Halbring $\mathcal{Q} = \mathcal{A}_1 * \dots * \mathcal{A}_n \supset \mathcal{Z}$ der Quader $A_1 \times \dots \times A_n$ mit $A_i \in \mathcal{A}_i$.

Die σ -Algebra $\mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n$ auf $X_1 \times \dots \times X_n$ heißt das Produkt der σ -Algebren \mathcal{A}_i , und der Messraum $(X_1 \times \dots \times X_n, \mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n)$ das Produkt der Messräume (X_i, \mathcal{A}_i) .

Das Produkt ist *assoziativ*, z.B. gilt $(\mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2) \otimes \mathcal{A}_3 = \mathcal{A}_1 \otimes \mathcal{A}_2 \otimes \mathcal{A}_3 = \mathcal{A}_1 \otimes (\mathcal{A}_2 \otimes \mathcal{A}_3)$. (Ü)

Die natürlichen Projektionen $\pi_k : X_1 \times \dots \times X_n \rightarrow X_k$ sind messbar. Die Produkt- σ -Algebra ist charakterisiert als *die kleinste σ -Algebra* auf $X_1 \times \dots \times X_n$, so dass die π_k bezüglich der \mathcal{A}_k messbar sind.

Sind $\mathcal{E}_i \subset \mathcal{A}_i$ Erzeugendensysteme, so ist $\mathcal{Z}(\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_n)$ ein Erzeugendensystem von $\mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n$, ebenso wie $\mathcal{E}_1 * \dots * \mathcal{E}_n$, denn

$$\begin{array}{ccc} \pi_k^{-1}(M_k) & \xleftarrow{\text{bij.}} & M_k \subset X_k \\ \{\pi_k^{-1}(E_k)\} & \xleftarrow{\text{bij.}} & \{E_k\} \\ \text{erzeugt} & & \text{erzeugt} \\ \{\pi_k^{-1}(A_k)\} & \xleftarrow{\text{bij.}} & \mathcal{A}_k \\ \sigma\text{-Algebra} & & \end{array}$$

I.5 Maße

I.5.1 Beispiele und Definitionen

Definition. Ein Maß ist ein auf einer σ -Algebra definiertes Prämaß.

Beispiel.

- (i) (Punkteinheitsmaße, Diracmaße) Sei $x \in X$. Die *Dirac-Maße* δ_x auf $\mathcal{P}(X)$ sind definiert als

$$\delta_x(A) := \begin{cases} 1, & \text{falls } x \in A, \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Durch Linearkombinationen $\sum_{i=1}^k m_i \delta_{x_i}$, $m_i \in \mathbb{R}_0^+$, $x_i \in X$ erhält man weitere Maße, die “endlichen Maßverteilungen”. Man kann ebenfalls allgemeinere Maßverteilungen (\longleftrightarrow Fkt $X \rightarrow \mathbb{R}_0^+$) mit beliebigem Träger $\subset X$ bilden.

- (ii) (Zählmaß) Das Zählmaß $\zeta : \mathcal{P}(X) \rightarrow \mathbb{N}_0 \cup \{\infty\} \subset [0, \infty]$ ist definiert durch

$$\zeta(A) = \begin{cases} |A|, & \text{falls } A \text{ endlich,} \\ \infty, & \text{sonst} \end{cases}$$

⁵Die $\pi_i^{-1}(A_i)$ sind spezielle Quader, da $X_i \in \mathcal{A}_i$.

(iii) Auf $\mathcal{P}(X)$ wird ein Maß μ definiert durch

$$\mu(A) = \begin{cases} 0, & \text{falls } A = \emptyset, \\ \infty, & \text{sonst} \end{cases}$$

(iv) Sei X überabzählbar und \mathcal{A} die von den endlichen Teilmengen erzeugte σ -Algebra, d.h. abzählbare Teilmengen und deren Komplemente. Dann ist

$$\nu(A) = \begin{cases} 0, & \text{falls } A \text{ abzählbar,} \\ 1, & \text{falls } \mathbb{C}A \text{ abzählbar} \end{cases}$$

ein Maß auf \mathcal{A} .

Teilmengen von σ -Algebren sind i.A. kompliziert und nicht explizit beschreibbar. Entsprechend sind Maße i.A. nicht beschreibbar durch explizite Angabe ihrer Werte. \rightsquigarrow Konstruktion durch *Fortsetzung*.

Ansatz/ Methode:

$$\begin{array}{ccc} \text{Inhalt auf Halbring} & \xrightarrow[\text{Fortsetzung}]{\text{eindeutige}} & \text{Maße auf } \sigma\text{-Algebren} \\ (\text{Prämaß auf Ring}) & & \end{array}$$

Daher brauchen wir Fortsetzungsergebnisse.

I.5.2 Äußere Maße und Messbarkeit

Sei $\mathcal{H} \subset \mathcal{P}(X)$ ein Halbring und $\mu : \mathcal{H} \rightarrow [0, \infty]$ ein Inhalt. Unser Ziel ist, μ auf $\sigma(\mathcal{H})$ fortzusetzen.

Wir geben für *beliebige* Teilmengen von X ein **äußeres μ -Volumen** (bzw. eine **obere μ -Volumenschranke**), indem wir *abzählbare* Überdeckungen durch Teilmengen aus \mathcal{H} verwenden. Wir definieren für $M \subset X$

$$\mu^*(M) := \inf \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) \mid (A_n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ Folge in } \mathcal{H} \text{ mit } M \subset \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right\}.$$

$\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$ ist also eine abzählbare Überdeckung von M , beinhaltet alle endlichen. Falls keine Überdeckung existiert, so $\mu^*(M) = \inf \emptyset = \infty$.

Wir können immer zu disjunkter Überdeckung übergehen:

$$\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n = A_1 \cup (A_2 \setminus A_1) \cup \dots \cup \underbrace{(A_n \setminus (A_1 \cup \dots \cup A_{n-1}))}_{\text{disjunkt zerlegbar in Teilmengen aus } \mathcal{H}} \cup \dots$$

Daher genügt es, Infimum über disjunkte Überdeckung zu bilden.

Wir erinnern uns an unser erstes Fortsetzungsergebnis: Ist μ ein Inhalt auf \mathcal{H} , so

existiert eine eindeutige $\bar{\mu}$ auf dem von \mathcal{H} erzeugten Ring \mathcal{R} , der aus endlichen disjunkten Vereinigungen von Teilmengen aus \mathcal{H} besteht. D.h. Überdeckungen durch Teilmengen aus \mathcal{R} sind nicht effektiver als Überdeckungen durch Teilmengen aus \mathcal{H} . Anders gesagt,

$$\boxed{\bar{\mu}^* = \mu^*}.$$

Ist $M \subset B \in \mathcal{R}$, so genügt es, Infimum über Überdeckungen durch in B enthaltene Teilmengen zu bilden. (Bild hier) Analog: Ist $M \cap B = \emptyset$, so genügt es, Infimum über Überdeckungen durch zu B disjunkte Teilmengen zu bilden.

Lemma. Die obere μ -Volumenschranke $\mu^* : \mathcal{P}(X) \rightarrow [0, \infty]$ hat folgende Eigenschaften:

- (i) $\mu^*(\emptyset) = 0$,
- (ii) *Monotonie:* $M \subset M' \implies \mu^*(M) \leq \mu^*(M')$,
- (iii) *σ -Subadditivität:* Für Folgen $(M_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von (nicht notwendigerweise disjunkten) Teilmengen $M_n \subset X$ gilt: $\mu^*\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} M_n\right) \leq \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu^*(M_n)$.

Beweis. Zu (iii): Sei $(\underbrace{A_{n,m}}_{\in \mathcal{H}})_m$ eine Überdeckung von M_n . Dann ist $(A_{n,m})_{(n,m)}$ eine Überdeckung von $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} M_n$. Es folgt

$$\mu^*\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} M_n\right) \leq \sum_{\substack{m \in \mathbb{N} \\ n \in \mathbb{N}}} \mu^*(A_{n,m}) \stackrel{\substack{\text{großer Umordnungssatz} \\ \text{für Doppelreihen}}}{=} \sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{m \in \mathbb{N}} \mu^*(A_{n,m})$$

Die Summe $\sum_{\substack{m \in \mathbb{N} \\ n \in \mathbb{N}}} \mu^*(A_{n,m})$ ist wohldefiniert, da unabhängig von Summationsreihenfolge⁶. Zu $\varepsilon_n > 0$ können wir die Überdeckung $(A_{n,m})_m$ so wählen, dass $\sum_{m \in \mathbb{N}} \mu^*(A_{n,m}) \leq \mu^*(M_n) + \varepsilon_n$. Dann folgt

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} \sum_{m \in \mathbb{N}} \mu^*(A_{n,m}) \leq \sum_{n \in \mathbb{N}} \mu^*(M_n) + \underbrace{\sum_{n \in \mathbb{N}} \varepsilon_n}_{\substack{>0, \\ \text{wird bel. klein}}}$$

Also war die σ -Subadditivität. ■

Definition. Eine Funktion $\mu^* : \mathcal{P}(X) \rightarrow [0, \infty]$ mit den oben genannten Eigenschaften (i)-(iii) heißt ein **äußeres Maß** auf X .

μ^* muss nicht von (zu) einem Inhalt μ induziert (assoziiert) sein. Falls μ^* zu Inhalt $\mu : \mathcal{H} \rightarrow [0, \infty]$ assoziiert, so gilt

$$\boxed{\mu^*|_{\mathcal{R}} \leq \bar{\mu}}.$$

⁶siehe Umordnungssatz für Reihen mit nichtnegativen Summanden.

Partielle Additivität äußerer Maße: Seien $M_1, M_2 \subset X$ disjunkt und durch \mathcal{R} trennbar, d.h. es existiert ein $B \in \mathcal{R}$ mit $M_1 \subset B$ und $M_2 \cap B = \emptyset$. Dann gilt (v)

$$\mu^*(M_1 \sqcup M_2) = \mu^*(M_1) + \mu^*(M_2).$$

Man kann auch ein **inneres μ -Volumen** (bzw. **untere μ -Volumenschranke** definieren⁷. Die Approximation geschieht durch äußere Approximation des Komplements. Sei $M \subset X$ so, dass $M \subset R \in \mathcal{R}$ mit $\bar{\mu}(R) < \infty$. Das innere μ -Volumen ist definiert als

$$\mu_*(M) := \underbrace{\mu^*(R)}_{\substack{\text{i.A. nur} \\ \leq \bar{\mu}(R)}} - \mu^*(R \setminus M).$$

Die Approximation von innen gelingt nicht: Ist z.B. $O \subset X$ offen und $A \subset O$ eine abzählbare dichte Teilmenge, so enthält $O \setminus A$ keine Quader, d.h. inneres Volumen = 0.

Ist $R \subset R'$ mit $\bar{\mu}(R') < \infty$, so gilt wegen der partiellen Additivität

$$\underbrace{\mu^*(R' \setminus M)}_{\mu^*(R \setminus M) + \mu^*(R' \setminus R)} - \mu^*(R \setminus M) = \mu^*(R' \setminus R) = \mu^*(R') - \mu^*(R),$$

also ist μ_* wohldefiniert.

Diskrepanz zwischen äußerem und innerem Volumen:

$$\mu^*(M) - \mu_*(M) = \underbrace{\mu^*(M) + \mu^*(R \setminus M)}_{\geq \mu^*(R)} - \mu^*(R) \geq 0$$

Der “Volumen-Exzess” wird also erzeugt durch “erzwungene Überlappung”. Intuition: der Exzess ist positiv, wenn der “Rand” von M bzw. Übergangsbereich (Interface) von M in $\mathbb{C}M$ “dick” bzw. “diffus” ist.

Unser Ziel ist nun, die μ^* -messbare Teilmengen zu definieren und danach zeigen, dass diese eine σ -Algebra $\mathcal{A}^* \supset \mathcal{R}$ bilden und dass $\mu^*|_{\mathcal{A}^*}$ ein Maß ist. (Es setzt $\bar{\mu}$ fort, falls $\bar{\mu}$ ein Prämaß ist.)

11.11.2019

Wir betrachten M als “messbar”, falls es keinen “Volumen-Exzess” gibt, d.h. wir verlangen

$$\mu^*(M) = \mu_*(M),$$

also

$$\mu^*(R) = \mu^*(M) + \mu^*(R \setminus M) \quad \forall R \in \mathcal{R} \text{ mit } R \supset M, \bar{\mu}(R) < \infty.$$

Um auf beliebige Teilmengen $M \subset X$ auszudehnen, *lokalisiere* und *verlange*:

$$\mu^*(R) = \mu^*(R \cap M) + \underbrace{\mu^*(R \setminus M)}_{R \cap \mathbb{C}M} \quad \forall R \in \mathcal{R} \quad (I.5)$$

⁷Dies ist nicht logisch notwendig für unsere Diskussion, motiviert aber die Diskussion von Messbarkeit, siehe unten.

(*Bemerkung:* Dies gilt wegen der Subadditivität von μ^* sowieso, falls $\mu^*(R) = \infty$.)
Es folgt, dass diese Gleichheit auch für Schnitte von M mit *beliebigen* Teilmengen $S \subset X$, d.h.

$$\boxed{\mu^*(S) = \mu^*(S \cap M) + \mu^*(S \setminus M)} \quad (\text{I.6})$$

Begründung: Ist $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Überdeckung von S durch Teilmengen $A_n \in \mathcal{R}$, so gilt

$$\begin{aligned} \sum_{n \in \mathbb{N}} \bar{\mu}(A_n) &\geq \sum_{n \in \mathbb{N}} \underbrace{\mu^*(A_n)}_{\stackrel{(\text{I.5})}{=} \mu^*(A_n \cap M) + \mu^*(A_n \setminus M)} = \sum_{n \in \mathbb{N}} \underbrace{\mu^*(A_n \cap M)}_{\geq \mu^*(S \cap M)} + \sum_{n \in \mathbb{N}} \underbrace{\mu^*(A_n \setminus M)}_{\geq \mu^*(S \setminus M)} \\ &\geq \mu^*(S \cap M) + \mu^*(S \setminus M) \stackrel{\text{Subadd.}}{\geq} \mu^*(S) \end{aligned}$$

Nehmen wir nun Infimum über (A_n) , so ist die linke Seite der Ungleichung gleich $\mu^*(S)$ und es folgt

$$\mu^*(S) \geq \mu^*(S \cap M) + \mu^*(S \setminus M) \geq \mu^*(S),$$

also Gleichheit überall, d.h. (I.6) gilt. ■

Man gelangt so auf natürlicher Weise zur Schlüssel-Definition: (Carathéodory, 1914)

Definition. $M \subset X$ heißt **μ^* -messbar**, falls

$$\mu^*(S) = \mu^*(S \cap M) + \mu^*(S \setminus M)$$

für alle $S \subset X$ gilt. S ist also eine “Testmenge”.

Vorstellungen: M und $\mathbb{C}M$ “durchdringen sich nicht”. M hat “dünnen Rand”. Jede Teilmenge S wird durch “sauberen Schnitt” durch M geteilt.

Wir setzen

$$\mathcal{A}^* := \{\mu^*\text{-messbare Teilmengen}\} \subset \mathcal{P}(X).$$

Bemerkung. Ältere Ansätze (Jordan, Peano) arbeiten noch mit *endlichen* Überdeckungen durch Teilmengen aus \mathcal{H} , bzw. äquivalent, *Einschließungen* durch Teilmengen in \mathcal{R} . Das äußere Maß wird also so definiert:

$$\begin{aligned} \mu^{*,\text{fin}} &:= \inf \left\{ \sum_{i=1}^n \mu(A_i) \mid A_1, \dots, A_n \in \mathcal{H}, \text{ mit } A_1 \cup \dots \cup A_n \supset M \right\} \\ &= \inf \left\{ \bar{\mu}(\bar{A}) \mid \bar{A} \in \mathcal{R} \text{ mit } \bar{A} \supset M \right\} \end{aligned}$$

$\mu^{*,\text{fin}} : \mathcal{P}(X) \rightarrow [0, \infty]$ ist wieder monoton, aber nur *endlich* additiv. Es ist $\mu^{*,\text{fin}}|_{\mathcal{R}} = \bar{\mu}$ und somit $\mu^{*,\text{fin}} \geq \mu^*$. Deswegen ist $\mu^{*,\text{fin}}$ nur nützlich auf kleineren Klassen von Teilmengen. Das innere Maß wird definiert durch

$$\mu_{*,\text{fin}} := \sup \{ \bar{\mu}(I) \mid I \in \mathcal{R} \text{ mit } I \subset M \}$$

Also schöpft man M durch Teilmenge $I \in \mathcal{R}$ aus. Dies ist wiederum unflexibler, denn:

$$\mu_{*,\text{fin}} \leq \mu_* (\leq \mu^* \leq \mu^{*,\text{fin}}).$$

Dies führt zur einer größeren Diskrepanz $\mu^{*,\text{fin}} - \mu_{*,\text{fin}} \geq \mu^* - \mu_*$ und deswegen sind weniger Teilmengen $\mu^{*,\text{fin}}$ -messbar (bzw. Jordan-messbar, Jordan-quadrierbar).

Die ältere Version der Theorie bleibt unbefriedigend, denn z.B. betrachten wir $\mathbb{Q} \cap [0,1]$ dicht in $[0,1]$ und $\lambda_{\mathcal{I}}^1$ (euklidische Länge $b-a$) auf \mathcal{I} (Halbring halboffener Intervalle $[a,b)$). Es gilt $(\lambda_{\mathcal{I}}^1)^{*,\text{fin}}(\mathbb{Q} \cap [0,1]) = 1$, weil jede Teilmenge aus \mathcal{F}^1 , die $\mathbb{Q} \cap [0,1]$ enthält, auch $[0,1]$ enthält. Andererseits gilt $(\lambda_{\mathcal{I}}^1)^*(\mathbb{Q} \cap [0,1]) = 0$, da es abzählbare Überdeckung durch abzählbare viele Teilintervalle beliebig kleiner Gesamtlänge gibt. Es folgt $\lambda_{*,\text{fin}}(\mathbb{Q} \cap [0,1]) \leq \lambda_*(\mathbb{Q} \cap [0,1]) \leq \underbrace{\lambda^*(\mathbb{Q} \cap [0,1])}_{=0} \leq \underbrace{\lambda^{*,\text{fin}}(\mathbb{Q} \cap [0,1])}_{=1}$. Also ist $\mathbb{Q} \cap [0,1]$ nicht $(\lambda_{\mathcal{I}}^1)^{*,\text{fin}}$ -messbar, aber $(\lambda_{\mathcal{I}}^1)^*$ -messbar.

I.5.3 Die σ -Algebra der messbaren Mengen und ihr Maß

Sei $\mathcal{A}^* \subset \mathcal{P}(X)$ die Familie der μ^* -messbaren Teilmengen. (μ^* nicht notwendigerweise induziert von einem Inhalt, fordere nur Axiome eines äußeren Maßes)

Definition. $N \subset X$ heißt μ^* -Nullmenge, falls $\mu^*(N) = 0$.

Lemma. Alle μ^* -Nullmengen gehören zu \mathcal{A}^* .

Beweis. Für $S \subset X$ gilt:

$$\mu^*(S) \stackrel{\text{Subadd.}}{\leq} \underbrace{\mu^*(S \cap N)}_{\substack{\subset N \\ \text{Monot.} \\ \leq \mu^*(N)=0}} + \underbrace{\mu^*(S \setminus N)}_{\substack{\subset S \\ \leq \mu^*(S)}} \leq \mu^*(S)$$

Also Gleichheit in allen Ungleichungen. Also N μ^* -messbar. ■

Beobachtung. \mathcal{A}^* ist \mathbb{C} -stabil, d.h. $M \in \mathcal{A}^* \implies \mathbb{C}M \in \mathcal{A}^*$, denn “Rand von $M =$ Rand von $\mathbb{C}M$ ”.

Äußere Maße sind i.A. nicht additiv, d.h. sie sind keine Inhalte auf $\mathcal{P}(X)$, sondern nur partiell additiv (vgl. oben). Es ist aber plausibel zu erwarten, dass sie σ -additiv auf Teilmengen mit “dünnem Rand” sind, da keine “Volumendurchdringung”.

Satz (Carathéodory). \mathcal{A}^* ist eine σ -Algebra und $\mu^*|_{\mathcal{A}^*}$ ist ein Maß.

Lemma.

- (i) Sind $M_1, \dots, M_n \subset X$ Teilmengen (nicht notwendigerweise disjunkt) mit $\mu^*(M_1 \cup \dots \cup M_n) = \mu^*(M_1) + \dots + \mu^*(M_n)$, so auch $\mu^*(M_1 \cup \dots \cup M_k) = \mu^*(M_1) + \dots + \mu^*(M_k)$ für $1 \leq k < n$.
- (ii) Sind $M_1, \dots, M_n \in \mathcal{A}^*$ paarweise disjunkt und $S \subset X$, so gilt $\mu^*(S \cap (M_1 \cup \dots \cup M_n)) = \mu^*(S \cap M_1) + \dots + \mu^*(S \cap M_n)$.

Beweis. (i) Subadditivität von μ^* liefert

$$\mu^* \left(\bigcup_{i=1}^n M_i \right) \stackrel{\text{nV}}{=} \sum_{i=1}^n \mu^*(M_i) = \underbrace{\sum_{i \leq k} \mu^*(M_i)}_{\geq \mu^* \left(\bigcup_{i \leq k} M_i \right)} + \underbrace{\sum_{i > k} \mu^*(M_i)}_{\geq \mu^* \left(\bigcup_{i > k} M_i \right)} \geq \mu^* \left(\bigcup_{i=1}^n M_i \right)$$

Also Gleichheit überall und insbesondere gilt $\sum_{i \leq k} \mu^*(M_i) = \mu^* \left(\bigcup_{i \leq k} M_i \right)$

(ii) Für $1 \leq k \leq n$ gilt, da M_i disjunkt:

$$\begin{aligned} (S \cap (M_k \cup \dots \cup M_n)) \cap M_k &= S \cap M_k \\ (S \cap (M_k \cup \dots \cup M_n)) \cap \mathbb{C}M_k &= S \cap (M_{k+1} \cup \dots \cup M_n) \end{aligned}$$

Setze nun die Testmenge $S \cup (M_k \cup \dots \cup M_n)$, und weil $M_k \in \mathcal{A}^*$ ist, folgt nach der Definition der μ^* -Messbarkeit:

$$\mu^*(S \cup (M_k \cup \dots \cup M_n)) = \mu^*(S \cap M_k) + \mu^*(S \cap (M_{k+1} \cup \dots \cup M_n))$$

Induktion liefert die Behauptung. ■

Beweis des Satzes von Carathéodory. Zuerst zeigen wir, dass \mathcal{A}^* \cup -stabil ist: Hierzu seien $M_1, M_2 \in \mathcal{A}^*$. Sei $S \subset X$ beliebig. Dann folgt

$$\begin{aligned} \mu^*(S) &\stackrel{M_1}{\underset{\text{messbar}}{=}} \underbrace{\mu^*(S \cap M_1)}_{= \mu^*(S \cap M_1 \cap M_2) + \mu^*(S \cap M_1 \cap \mathbb{C}M_2)} + \underbrace{\mu^*(S \cap \mathbb{C}M_1)}_{= \mu^*(S \cap \mathbb{C}M_1 \cap M_2) + \mu^*(S \cap \mathbb{C}M_1 \cap \mathbb{C}M_2)} \\ &\stackrel{\text{da } M_2 \text{ messbar}}{=} \mu^*(S \cap M_1 \cap M_2) + \mu^*(S \cap M_1 \cap \mathbb{C}M_2) + \mu^*(S \cap \mathbb{C}M_1 \cap M_2) + \mu^*(S \cap \mathbb{C}M_1 \cap \mathbb{C}M_2) \end{aligned}$$

Das Lemma (i) liefert, dass (Bild hier)

$$\mu^*(S \cap (M_1 \cup M_2)) = \mu^*(S \cap M_1 \cap M_2) + \mu^*(S \cap \mathbb{C}M_1 \cap M_2) + \mu^*(S \cap M_1 \cap \mathbb{C}M_2).$$

Daraus folgt

$$\mu^*(S) = \mu^*(S \cap (M_1 \cup M_2)) + \mu^*(S \cap \mathbb{C}(M_1 \cup M_2))$$

Also $M_1 \cup M_2 \in \mathcal{A}^*$, also ist \mathcal{A}^* eine Algebra. Zu zeigen bleibt: \mathcal{A}^* ist σ - \cup -stabil. Es genügt, für abzählbare disjunkte Vereinigungen zu zeigen (da \mathcal{A}^* eine Algebra). Sei $(M_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in \mathcal{A}^* mit paarweise disjunkten Folgengliedern. Sei $S \subset X$. Setze $\overline{M}_n = M_1 \cup \dots \cup M_n$ und $\overline{M}_\infty = \bigcup_{i \in \mathbb{N}} M_i$. Für alle $n \in \mathbb{N}$ gilt:

$$\begin{aligned} \mu^*(S) &\stackrel{\text{Lemma (ii)}}{=} \sum_{i=1}^n \mu^*(S \cap M_i) \\ &= \underbrace{\mu^*(S \cap \overline{M}_n)}_{\nearrow S \cap \overline{M}_\infty} + \underbrace{\mu^*(S \cap \mathbb{C}\overline{M}_n)}_{\searrow S \cap \mathbb{C}\overline{M}_\infty} \\ &\geq \mu^*(S \cap \overline{M}_\infty) \end{aligned}$$

Es folgt für $n \rightarrow \infty$:

$$\mu^*(S) \geq \underbrace{\sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(S \cap M_i)}_{\geq \mu^*(S \cap \overline{M}_{\infty})} + \mu^*(S \cap \mathbb{C}\overline{M}_{\infty}) \geq \mu^*(S)$$

Also überall Gleichheit, d.h.

14.11.2019

$$\mu^*(S) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu^*(S \cap M_n) + \mu^*(S \cap \mathbb{C}\overline{M}_{\infty}) = \mu^*(S \cap \overline{M}_{\infty}) + \mu^*(S \cap \mathbb{C}\overline{M}_{\infty}) \quad (\text{I.7})$$

dies zeigt, dass $\overline{M}_{\infty} \in \mathcal{A}^*$, d.h. \mathcal{A}^* eine σ -Algebra. Setze nun $S = \overline{M}_{\infty}$ in (I.7), dann folgt

$$\mu^*(M_{\infty}) = \sum_{i=1}^{\infty} \mu^*(\underbrace{\overline{M}_{\infty} \cap M_i}_{M_i}),$$

also μ^* σ -additiv, also $\mu^*|_{\mathcal{A}^*}$ Maß. ■

I.5.4 Beziehung eines Inhalts zu seinem assoziierten äußerem Maß

Wir betrachten folgende Situation:

$$\begin{array}{ccccccc} \mathcal{H} & \subset & \text{von } \mathcal{H} \text{ erz. Ring} & \subset & \sigma(\mathcal{R}) & \subset & \mathcal{A}^* \subset \mathcal{P}(X) \\ \text{Halbring} & & & & & & \sigma \text{ Algebra der} \\ & & & & & & \mu^* \text{-messb. Mengen} \\ \mu \text{ Inhalt} & & \bar{\mu} \text{ Inhalt} & & & & \mu^*|_{\mathcal{A}^*} \text{ Maß} \\ & & \text{eind. Forts. von } \mu & & & & \mu^* \text{ induziert von } \mu \\ & & \mu^*|_{\mathcal{R}} \leq \bar{\mu} & & & & \end{array}$$

Beobachtung. Es gilt $\mathcal{R} \subset \mathcal{A}^*$, d.h. für $R \in \mathcal{R}$ und $S \subset X$ gilt

$$\mu^*(S) = \mu^*(\underbrace{R \cap S}_{\subset R \in \mathcal{R}}) + \mu^*(\underbrace{R \cap \mathbb{C}S}_{\text{disjunkt zu } R})$$

Dies folgt unmittelbar aus partieller Additivität von μ^* .

Aus dem Satz von Carathéodory folgt unmittelbar folgendes Korollar:

Korollar. $\sigma(\mathcal{R}) \subset \mathcal{A}^*$ und $\mu^*|_{\sigma(\mathcal{R})}$ ist Maß (Insbesondere ist $\mu^*|_{\mathcal{R}}$ ein Prämaß). Dies ist notwendig dafür, dass μ^* eine Fortsetzung von $\bar{\mu}$ ist, dass $\bar{\mu}$ Prämaß.

I.5.5 Fortsetzung von Prämaßen zu Maßen

Lemma. Sei μ ein Inhalt auf einem Ring \mathcal{R} . Ist μ ein Prämaß, so gilt $\mu^*|_{\mathcal{R}} = \mu$.

Beweis. Sei $A \in \mathcal{R}$ und $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine abzählbare Überdeckung von A durch Teilmengen in \mathcal{R} . Setze $\overline{A}_n := A_1 \cup \dots \cup A_n \in \mathcal{R}$. Da μ Inhalt ist, folgt

$$\sum_{i=1}^n \mu(A_i) \geq \mu(\overline{A}_n) \xrightarrow{\text{Monot.}} \underbrace{\mu(\overline{A}_n \cap A)}_{\nearrow A} \leq \mu(A)$$

Für $n \rightarrow \infty$ gilt

$$\sum_{i=1}^{\infty} \mu(A_i) \geq \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(\overline{A}_n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \mu(\overline{A}_n \cap A) \stackrel{\mu \text{ Prämaß}}{=} \mu(A)$$

Jetzt nehmen wir Infimum über (A_n) , so folgt

$$\mu^*(A) \geq \mu(A),$$

also $\mu^*|_{\mathcal{R}} \geq \mu$, somit Gleichheit. ■

Satz. Ist μ ein Prämaß auf dem Ring \mathcal{R} , so wird μ durch das assoziierte äußere Maß μ^* zu einem Maß $\mu^*|_{\sigma(\mathcal{R})}$ auf dem von \mathcal{R} erzeugten σ -Algebra $\sigma(\mathcal{R})$ fortgesetzt.

Beweis. Aus $\mathcal{R} \subset \mathcal{A}^*$ folgt $\sigma(\mathcal{R}) \subset \mathcal{A}^*$, da \mathcal{A}^* eine σ -Algebra ist. Da $\mu^*|_{\mathcal{A}^*}$ ein Maß ist, ist $\mu^*|_{\sigma(\mathcal{R})} = (\mu^*|_{\mathcal{A}^*})|_{\sigma(\mathcal{R})}$ auch ein Maß. Das obige Lemma liefert dann, dass $\mu^*|_{\sigma(\mathcal{R})}$ den Inhalt μ fortsetzt. ■

Dies zeigt, dass Prämaße auf Ringen *auf mindestens eine Weise fortsetzbar zu Maßen* auf den von den Ringen erzeugten σ -Algebren.

I.5.6 Eindeutigkeit fortgesetzter Maße

Im folgenden betrachten wir

$$\begin{array}{ccccccc} \mathcal{R} & \subset & \mathcal{B} & \subset & \mathcal{A}^* & \subset & \mathcal{P}(X) \\ \text{Ring} & & \text{eine } \sigma\text{-Alg} & & \begin{array}{c} \sigma\text{-Alg der} \\ \mu^*\text{-messb. Mengen} \end{array} & & \end{array}$$

Weiter sei ν ein Maß, der das Prämaß μ fortsetzt. Es ist dann natürlich, $\mu^*|_{\mathcal{B}}$ mit ν zu vergleichen.

Lemma. Es gilt $\nu \leq \mu^*|_{\mathcal{B}}$.

Beweis. Sei $M \in \mathcal{B}$ und $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine abzählbare Überdeckung von M , $A_n \in \mathcal{R}$, $M \subset \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$. Dann gilt

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} \mu(A_n) \stackrel{\nu \text{ Forts.}}{=} \sum_{n \in \mathbb{N}} \nu(A_n) \stackrel{\nu \text{ Maß}}{\geq} \nu \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) \stackrel{\text{monot.}}{\geq} \nu(M)$$

Bilde nun Infimum über (A_n) , es folgt dann

$$\mu^*(M) \geq \nu(M)$$

■

Satz. Auf der Familie der Teilmengen aus \mathcal{B} , die eine abzählbare Überdeckung durch Teilmengen aus \mathcal{R} mit endlichem μ -Inhalt zulassen, stimmt ν mit μ^* überein.

Beweis. Sei $M \in \mathcal{B}$. Zunächst zeigen wir unter der Annahme: $\exists R \in \mathcal{R}$ mit $M \subset R$ und $\mu(R) < \infty$. Unter dieser Annahme gilt

$$\mu^*(M) + \mu^*(R \setminus M) \stackrel{\mu^* \text{ Maß}}{=} \mu^*(R) \stackrel{\mu \text{ Prämaß}}{=} \mu(R) \stackrel{\nu|_{\mathcal{R}} = \mu}{=} \nu(R) \stackrel{\nu \text{ Maß}}{=} \underbrace{\nu(M)}_{\leq \mu^*(M)} + \underbrace{\nu(R \setminus M)}_{\leq \mu^*(R \setminus M)}$$

Also muss es gelten $\nu(M) = \mu^*(M)$.

Jetzt unter der allgemeinen Annahme: M hat eine abzählbare Überdeckung durch $R_n \in \mathcal{R}$ mit $\mu(R_n) < \infty$. OBdA dürfen wir annehmen, dass alle R_i paarweise disjunkt sind, da \mathcal{R} ein Ring ist. Wir haben schon gezeigt: $\nu(\underbrace{M \cap R_n}_{\in \mathcal{B}}) = \mu^*(M \cap R_n)$. Da ν

und μ^* Maße sind, folgt

$$\nu\left(\underbrace{\bigcup_{n \in \mathbb{N}} (M \cap R_n)}_{=M}\right) = \mu^*\left(\underbrace{\bigcup_{n \in \mathbb{N}} (M \cap R_n)}_{=M}\right)$$

■

Dieser Satz zeigt, dass wir Eindeutigkeit unter geeigneten Endlichkeitsvoraussetzungen haben.⁸

Definition. Ein Inhalt μ auf einem Ring $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$ heißt

- (i) **endlich**, falls $X \in \mathcal{R}$ mit $\mu(X) < \infty$.
- (ii) **σ -endlich**, falls X eine abzählbare Überdeckung durch Teilmengen aus \mathcal{R} mit endlichem μ -Inhalt zulässt.

Korollar. Ein σ -endliches Prämaß auf einem Ring $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$ besitzt eine eindeutige Fortsetzung zu einem Inhalt auf $\sigma(\mathcal{R})$.

Definition. Da das Lebesgue-Prämaß $\lambda_{\mathcal{F}^d}^d$ auf $\mathcal{F}^d \subset \mathcal{P}(\mathbb{R}^d)$ σ -endlich ist, können wir es eindeutig fortsetzen zu einem Maß β^d auf der Borelschen σ -Algebra $\mathcal{B}^d = \sigma(\mathcal{F}^d)$. Wir nennen β^d **das Lebesgue-Borel-Maß**. Wir dehnen dieses Maß weiter aus auf alle (bzgl. des äußeren Maßes) messbaren Teilmengen $(\beta^d)^* \stackrel{(\dot{U})}{=} (\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^*$. Wir definieren $\mathcal{B}^d \subset \mathcal{L}^d \subset \mathcal{P}(\mathbb{R}^d)$ als **die σ -Algebra der $(\beta^d)^*$ -messbaren Teilmengen**. Das Maß $(\beta^d)^*|_{\mathcal{L}^d} =: \lambda^d$ heißt **d -dimensionale Lebesgue-Maß**.

Zusammengefasst:

$$\begin{array}{ccccccc} \mathcal{F}^d & \subset & \mathcal{B}^d = \sigma(\mathcal{F}^d) & \subset & \mathcal{L}^d & \subset & \mathcal{P}(\mathbb{R}^d) \\ & & \text{Borel-}\sigma\text{-Algebra} & & (\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^*\text{-messb. Teilmengen} & & \\ \lambda_{\mathcal{F}^d}^d & & \beta^d := \underbrace{(\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^*}_{\lambda^d} |_{\mathcal{B}^d} & & \lambda^d := (\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^* |_{\mathcal{L}^d} & & \\ \text{Lebesgue-Prämaß} & & \text{Lebesgue-Borel-Maß} & & \text{Lebesgue-Maß} & & \end{array}$$

⁸Nichteindeutigkeit schon in einfachen Situationen: Sei $\mathcal{R} = \{\emptyset\}$. Dann ist $\sigma(\mathcal{R}) = \{\emptyset, X\}$. Ist μ ein endlicher Inhalt auf \mathcal{R} , so können wir den Inhalt von X beliebig wählen. Das Problem besteht darin, dass μ nicht σ -endlich ist.

I.5.7 Approximation messbarer Teilmengen

Sei μ ein Prämaß auf dem Ring $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$, $\sigma(\mathcal{R})$ die von \mathcal{R} erzeugte σ -Algebra und \mathcal{A}^* die Familie der μ^* -messbaren Teilmengen. Wir wollen nun $\sigma(\mathcal{R})$ mit \mathcal{A}^* vergleichen. Erster Erinnerung: μ^* -Nullmengen sind μ^* -messbar, liegen also in \mathcal{A}^* .

Sprechweise: Es seien $M, M' \subset X$ mit $\mu^*(M \Delta M') = 0$. Wir nennen dann M, M' **Modifikationen** voneinander durch μ^* -Nullmengen. Wir sagen, dass sie “bis auf μ^* -Nullmengen übereinstimmen”.

Lemma. Für $M, M' \subset X$ mit $\mu^*(M \Delta M') = 0$ gilt:

- (i) $\mu^*(M) = \mu^*(M')$,
- (ii) $M \in \mathcal{A}^* \iff M' \in \mathcal{A}^*$.

Beweis. Zu (i): Aus $M \cup M' = (M \cap M') \cup (M \Delta M')$ folgt

$$\mu^*(M \cup M') \leq \mu^*(M \cap M') + \underbrace{\mu^*(M \Delta M')}_{=0} = \mu^*(M \cap M')$$

Also $\mu^*(M \cup M') = \mu^*(M \cap M')$. Wegen $\mu^*(M \cap M') \leq \mu^*(M) \leq \mu^*(M \cup M')$ folgt Gleichheit überall. Insbesondere gilt $\mu^*(M) = \mu^*(M')$.

Zu (ii): Wir erkennen zunächst $M \Delta M' = \mathbb{C}M \Delta \mathbb{C}M'$. Sei $S \subset X$. Dann gilt

$$(S \cap M) \Delta (S \cap M') = S \cap (M \Delta M') \subset M \Delta M'$$

Es folgt

$$\mu^*((S \cap M) \Delta (S \cap M')) = 0$$

und analog für die Komplemente: $\mu^*((S \cap \mathbb{C}M) \Delta (S \cap \mathbb{C}M')) = 0$. Es folgt (wegen (i))

$$\mu^*(S \cap M) + \mu^*(S \cap \mathbb{C}M) = \mu^*(S \cap M') + \mu^*(S \cap \mathbb{C}M')$$

Dies zeigt, dass $\mu^*(S \cap M) + \mu^*(S \cap \mathbb{C}M) = \mu^*(S)$ genau dann gilt, wenn $\mu^*(S \cap M') + \mu^*(S \cap \mathbb{C}M') = \mu^*(S)$. Also $M \in \mathcal{A}^*$ genau dann wenn $M' \in \mathcal{A}^*$. ■

18.11.2019

Wir wollen jetzt (angelehnt an Archimedes-Kompressionsmethode) beliebige Teilmengen von innen/außen im Volumen-Sinne durch Teilmengen aus $\sigma(\mathcal{R})$ (möglich “nah verwandt”⁹ mit \mathcal{R}) approximieren. Für *messbare* Teilmengen werden wir Approximationen bis auf μ^* -Nullmengen erhalten.

Satz. Sei $M \subset X$ mit $\mu^*(M) < \infty$. Dann existieren Teilmengen $I, A \in \sigma(\mathcal{R})$ mit $I \subset M \subset A$ sodass $\mu^*(A) = \mu^*(M)$ und $\mu^*(A \setminus I) = \mu^*(A \setminus M)$.¹⁰ Diese sind eindeutig bis auf Modifikationen durch μ^* -Nullmengen. Es gilt außerdem: $M \in \mathcal{A}^* \iff \mu^*(A \setminus I) = 0$.¹¹

⁹im Sinne der Borel-Hierarchie

¹⁰ I steht für innen, A steht für außen.

¹¹ M ist genau dann μ^* -messbar, wenn M bis auf μ^* -Nullmengen mit der inneren bzw. äußeren Approximation aus $\sigma(\mathcal{R})$ übereinstimmt.

Beweis.

- Die *äußere* Approximation: Aus der Definition von μ^* folgt, dass es abzählbare Überdeckungen von M durch Teilmengen aus \mathcal{R} existieren, deren Gesamtvolumen $\mu^*(M)$ beliebig gut approximiert. D.h. Zu jedem $\varepsilon > 0$ existiert ein $A_\varepsilon \in \sigma(\mathcal{R})$ sodass $M \subset A_\varepsilon$ und $\mu^*(A_\varepsilon) < \mu^*(M) + \varepsilon$. Wir wählen

$$A := \underbrace{\bigcap_{n \in \mathbb{N}} A_{\frac{1}{n}}}_{\supset M} \in \sigma(\mathcal{R}).$$

Es erfüllt $\mu^*(A) = \mu^*(M)$.

- Die *innere* Approximation geschieht durch die äußere Approximation von $A \setminus M$. Weil $\mu^*(A \setminus M) \leq \mu^*(M) < \infty$, können wir $A \setminus M$ von außen approximieren. Nämlich gibt es ein $B \in \sigma(\mathcal{R})$ so, dass $A \setminus M \subset B$ und $\mu^*(B) = \mu^*(A \setminus M)$. Wir wählen $I := A \setminus B \subset M$. Weil $A \setminus I = B$, folgt $\mu^*(A \setminus I) = \mu^*(A \setminus M)$. Das obige Argument zeigt die Existenz der Approximationen.
- Zur *Eindeutigkeit* bis auf Nullmengen: Sei $A' \in \sigma(\mathcal{R})$ mit $M \subset A'$ und $\mu^*(A') = \mu^*(M)$ eine weitere äußere Approximation. Dann gilt $\mu^*(A \cap A') = \mu^*(M) = \mu^*(A) = \mu^*(A')$. Weil $A, A', A \cap A'$ μ^* -messbar sind und endliche Volumina haben, folgt $\mu^*(A \triangle A') = \mu^*(A) + \mu^*(A') - 2\mu^*(A \cap A') = 0$. Dies zeigt, dass die äußere Approximation eindeutig bis auf Nullmengen ist. (Analog für die innere Approximation.)
- Ist $M \in \mathcal{A}^*$, so gilt $\mu^*(A \setminus I) = \mu^*(A \setminus M) \stackrel{M \in \mathcal{A}^*}{\stackrel{\text{endl. Vol.}}{=}} \mu^*(A) - \mu^*(M) = 0$.
Ist umgekehrt $\mu^*(A \setminus I) = 0$, so gilt $\mu^*(A \triangle I) = 0$ (weil $I \subset A$) und somit stimmen I, M, A bis auf Nullmengen überein. Weil $I, A \in \mathcal{A}^*$, folgt wegen des obigen Lemmas auch $M \in \mathcal{A}^*$. ■

Bemerkung. Die Aussage des Satzes gilt allgemeiner für Teilmengen $M \subset X$, die abzählbare Vereinigungen von Teilmengen endlichen μ^* -Volumens sind. Begründung: Sei $M = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} M_n$ mit $\mu^*(M_n) < \infty$. oBdA sei M_n paarweise disjunkt. Der obige Satz liefert, dass es $I_n, A_n \in \sigma(\mathcal{R})$ existieren mit $I_n \subset M_n \subset A_n$ und $\mu^*(A_n \setminus I_n) = 0$. Die gewünschten Approximationen folgen durch Bildung der Vereinigungen $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_n \subset M \subset \bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n$, denn aus

$$\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) \setminus \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_n \right) = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} \underbrace{\left(A_n \setminus \bigcup_{m \in \mathbb{N}} I_m \right)}_{\subset A_n \setminus I_n} \subset \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (A_n \setminus I_n)$$

$$\text{folgt } \mu^* \left(\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n \right) \setminus \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} I_n \right) \right) = 0.$$

Für *Struktur* von messbaren Teilmengen folgt:

Korollar.

- (i) Jede μ^* -Nullmenge wird von einer μ^* -Nullmenge aus $\sigma(\mathcal{R})$ eingeschlossen.
- (ii) Lässt $M \in \mathcal{A}^*$ eine abzählbare Überdeckung durch (oBdA messbare) Teilmengen endlichen μ^* -Inhalts zu, so ist M die Vereinigung einer Teilmenge^a aus $\sigma(\mathcal{R})$ mit einer μ^* -Nullmenge.

^awähle z.B. die innere Approximation

Korollar. Für ein σ -endliches Prämaß μ auf einem Ring $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$ stimmen alle μ^* -messbaren Teilmengen bis auf Modifikationen durch μ^* -Nullmengen mit Teilmengen aus $\sigma(\mathcal{R})$ überein.^a

^aWir können es so interpretieren, dass die Kompliziertheit messbarer Teilmengen im Vergleich zu Teilmengen aus $\sigma(\mathcal{R})$ von Nullmengen “aufgefangen” wird. Letztere sind oft vernachlässigbar.

Wir betrachten nun speziell *Lebesgue-messbare* (d.h. bezüglich des äußeren Maßes $(\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^* = (\beta^d)^* = (\lambda^d)^*$) Teilmengen in \mathbb{R}^d . Das letzte Korollar liefert einen Vergleich von Borel- und Lebesgue-Messbarkeit für Teilmengen des \mathbb{R}^d .

Korollar. Jede Lebesgue-messbare Teilmenge stimmt bis auf eine Lebesgue-Nullmenge (d.h. $(\lambda^d)^*(N) = 0$) überein mit einer Borel-messbaren Teilmenge. (Wir nennen eine Borel-messbare Teilmenge kurz eine **Borel-Menge**.)

Um eine bessere geometrische Vorstellung von messbaren Teilmengen des \mathbb{R}^d zu bekommen, vergleichen wir jetzt die *messbare* und *topologische* Struktur auf \mathbb{R}^d , d.h. die σ -Algebra \mathcal{B}^d mit einem geometrisch natürlichen Erzeuger, nämlich der *Topologie*.

Definition. Eine Teilmenge eines topologischen Raums heißt

- (i) G_δ -Menge, falls sie ein abzählbarer Durchschnitt offener Mengen ist.
- (ii) F_σ -Menge, falls sie eine abzählbare Vereinigung abgeschlossener Mengen ist.

Topologische Approximation einer messbaren Teilmenge $M \in \mathcal{L}^d \subset \mathcal{P}(\mathbb{R}^d)$

- **1. Schritt:** Sei M beschränkt, d.h. $M \subset B$, wobei B ein offener Ball ist. Es gilt $\lambda^d(M) < \infty$. Weil $M \in \mathcal{L}^d$, existiert zu jedem $\varepsilon > 0$ eine abzählbare Überdeckung von M durch Teilmengen aus \mathcal{F}^d mit Gesamtvolumen $< \lambda^d(M) + \varepsilon$. Durch offene Aufdickung von Quadern bzw. Figuren existiert ebenfalls ein O_ε offen mit

$$M \subset O_\varepsilon \subset B \quad \text{und} \quad \lambda^d(O_\varepsilon) < \lambda^d(M) + \varepsilon.$$

Analog (durch äußere Approximation von $\overline{B} \setminus M$) existiert ein O'_ε offen sodass

$$\overline{B} \setminus M \subset O'_\varepsilon \quad \text{mit} \quad \lambda^d(O'_\varepsilon) < \lambda^d(\overline{B} \setminus M) + \varepsilon \stackrel{M \text{ messbar}}{=} \lambda^d(\overline{B}) - \lambda^d(M) + \varepsilon.$$

Es ist

$$\overline{B} \subset O_\varepsilon \cup O'_\varepsilon \quad \text{mit} \quad \lambda^d(O_\varepsilon) + \lambda^d(O'_\varepsilon) < \lambda^d(\overline{B}) + 2\varepsilon.$$

Wir wählen

$$K_\varepsilon := \overline{B} \setminus O'_\varepsilon \subset M.$$

Dann ist K_ε eine kompakte *innere* Approximation, denn

$$\lambda^d(K_\varepsilon) = \lambda^d(\overline{B}) - \lambda^d(O'_\varepsilon) > \lambda^d(O'_\varepsilon) - 2\varepsilon.$$

Also $K_\varepsilon \subset M \subset O_\varepsilon$ mit $\lambda^d(O_\varepsilon \setminus K_\varepsilon) < 2\varepsilon$.

- **2. Schritt:** Jetzt sei $M \in \mathcal{L}^d$ beliebig. Dann gibt es eine Darstellung $M = \bigcup_{n \in \mathbb{N}} M_n$ mit $M_n \in \mathcal{L}^d$ beschränkt, sodass (M_n) eine *lokal endliche* Familie bildet, d.h. jeder Ball in \mathbb{R}^d schneidet nur endlich viele M_n . Der erste Schritt liefert, dass es Approximationen $K_n \subset M_n \subset O_n$ für jedes M_n gibt sodass $\lambda^d(O_n \setminus K_n) < \varepsilon_n$. Die ε_n sind positiv beliebig vorgebar. Durch die Vereinigung erhalten wir $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} K_n \subset M \subset \bigcup_{n \in \mathbb{N}} O_n$. Weil (K_n) lokal endlich sind und der Schnitt einer abgeschlossenen Menge mit jedem Kompaktum wieder kompakt ist, ist $\bigcup_{n \in \mathbb{N}} K_n$ abgeschlossen. Es gilt

$$\lambda^d\left(\underbrace{\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} O_n\right) \setminus \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} K_n\right)}_{\subset \bigcup_{n \in \mathbb{N}} (O_n \setminus K_n)}\right) < \sum_{n \in \mathbb{N}} \varepsilon_n$$

positiv beliebig
klein wählbar

Dies zeigt:

Satz. Sei $M \in \mathcal{L}^d$. Dann existiert zu jedem $\varepsilon > 0$ $A_\varepsilon, O_\varepsilon \subset \mathbb{R}^d$ mit A_ε abgeschlossen und O_ε offen, sodass $A_\varepsilon \subset M \subset O_\varepsilon$ und $\lambda^d(O_\varepsilon \setminus A_\varepsilon) < \varepsilon$. Falls $\lambda^d(M) < \infty$, kann A_ε kompakt gewählt werden.

Es folgt:

Satz. Sei $M \in \mathcal{L}^d$. Dann existieren eine F_σ -Menge $F \subset \mathbb{R}^d$ und eine G_δ -Menge^a $G \subset \mathbb{R}^d$ sodass $F \subset M \subset G$ und $\lambda^d(G \setminus F) = 0$.

^aSie sind Borel-messbar, "nah verwandt" (1.Grades) mit der Topologie.

Folgerung für das Lebesgue-Maß: für $M \in \mathcal{L}^d$ gilt

$$\sup\{\lambda^d(K) \mid K \subset M, K \text{ kompakt}\} = \lambda^d(M) = \inf\{\lambda^d(O) \mid O \supset M, O \text{ offen}\}.$$

21.11.2019

I.5.8 Vervollständigung von Maßen

Im folgenden sei ν ein Maß auf einer σ -Algebra $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$.

Definition. Eine Menge $N \in \mathcal{A}$ mit $\nu(N) = 0$ heißt **ν -Nullmenge**.

Es ist klar, dass abzählbare Vereinigungen von ν -Nullmengen wegen der σ -(Sub)Additivität von Maßen wieder ν -Nullmengen sind. Zu \mathcal{A} gehörige Teilmengen von ν -Nullmengen sind ν -Nullmengen.

Definition (Vollständigkeit von Maßen). Das Maß ν heißt **vollständig**, wenn alle Teilmengen von ν -Nullmengen zu \mathcal{A} gehören, also ν -Nullmengen sind.

Beispiel. Die Einschränkung $\mu^*|_{\mathcal{A}^*}$ eines äußeren Maßes auf die σ -Algebra der μ^* -messbaren Teilmengen ist vollständig.

Proposition. Ist $\mathcal{N} \subset \mathcal{P}(X)$ die Familie aller Teilmengen von ν -Nullmengen, so ist

$$\begin{aligned}\widetilde{\mathcal{A}} &:= \{A \cup N \mid A \in \mathcal{A}, N \in \mathcal{N}\} \\ &= \{\tilde{A} \subset X \mid \exists A \in \mathcal{A} \text{ mit } \tilde{A} \Delta A \in \mathcal{N}\}\end{aligned}$$

eine σ -Algebra und ν lässt sich in eindeutiger Weise zu einem Maß $\tilde{\nu}$ auf $\widetilde{\mathcal{A}}$ fortsetzen. Für $\tilde{A} \in \widetilde{\mathcal{A}}$ und $A \in \mathcal{A}$ mit $\tilde{A} \Delta A \in \mathcal{N}$ gilt $\tilde{\nu}(\tilde{A}) = \nu(A)$.

Beweis.

- Ist $A \in \mathcal{A}, N \in \mathcal{N}$, so ist $(A \cup N) \Delta A = N \in \mathcal{N}$, d.h. \subseteq .
- Sei $\tilde{A} \subset X$ so, dass es ein $A \in \mathcal{A}$ existiert mit $A \Delta \tilde{A} \in \mathcal{N}$. Dann ist $\tilde{A} = A \cup (\tilde{A} \Delta A)$, also \supseteq .

Also stimmen beide Familien überein. Die erste Beschreibung der Familie zeigt, dass sie σ - \cup -stabil ist. Die zweite Beschreibung zeigt, dass sie \mathfrak{C} -stabil ist. (da $\mathfrak{C}\tilde{A} \Delta \mathfrak{C}A = \tilde{A} \Delta A$.) Also ist sie eine σ -Algebra. Ein ν auf \tilde{A} fortsetzendes Maß $\tilde{\nu}$ erfüllt

$$\tilde{\nu}(\tilde{A}) = \nu(A) \text{ für } \tilde{A} \in \widetilde{\mathcal{A}} \text{ mit } \tilde{A} \Delta A \in \mathcal{N} \text{ und } A \in \mathcal{A}. \quad (\text{I.8})$$

Wir definieren nun die Fortsetzung $\tilde{\nu}$ von ν durch (I.8).

- *Wohldefiniertheit:* Wir wollen zeigen, dass $\tilde{\nu}(\tilde{A})$ nicht von der Auswahl von $A \in \mathcal{A}$ abhängt. Seien hierzu $A, A' \in \mathcal{A}$ und N, N' zwei ν -Nullmengen sodass $\tilde{A} \Delta A \subset N$ und $\tilde{A} \Delta A' \subset N'$. Weil $A \Delta A' \subset (A \Delta \tilde{A}) \cup (A' \Delta \tilde{A})$, ist $A \Delta A' \in \mathcal{A}$ eine ν -Nullmenge. Es folgt $\nu(A) = \nu(A')$. Also gibt (I.8) wohldefiniertes $\tilde{\nu}$.
- Es bleibt zu überprüfen, dass $\tilde{\nu}$ tatsächlich ein Maß ist, d.h. σ -additiv ist. Sei $(A_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in \mathcal{A} und $(N_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge in \mathcal{N} sodass die $\underbrace{A_n \cup N_n}_{\in \widetilde{\mathcal{A}}}$

paarweise disjunkt sind. Es gilt

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} \tilde{\nu}(A_n \cup N_n) \stackrel{\text{Def}}{=} \sum_{n \in \mathbb{N}} \tilde{\nu}(A_n) \stackrel{A_n \text{ disj. } \nu \text{ Maß}}{=} \nu\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) \stackrel{\text{Def}}{=} \tilde{\nu}\left(\underbrace{\left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} A_n\right) \cup \left(\bigcup_{n \in \mathbb{N}} N_n\right)}_{\bigcup_{n \in \mathbb{N}} (A_n \cup N_n)}\right)$$

Also ist $\tilde{\nu}$ auch σ -additiv. ■

Definition. Das Maß $\tilde{\nu}$ heißt die **Vervollständigung** des Maßes ν .

Wir erinnern uns an ein früheres Korollar: Ist μ ein σ -endliches Prämaß auf einem Ring $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$, so stimmen alle μ^* -messbaren Teilmengen bis auf Nullmengen mit Teilmengen aus $\sigma(\mathcal{R})$ überein. Daraus folgt folgendes Korollar:

Korollar. Ist μ ein σ -endliches Prämaß auf einem Ring $\mathcal{R} \subset \mathcal{P}(X)$, so ist $\mu^*|_{\mathcal{A}^*}$ die Vervollständigung von $\mu^*|_{\sigma(\mathcal{R})}$.

Hauptbeispiel. λ^d ist die Vervollständigung von β^d .

I.5.9 Bildmaße

Wir kommen kurz zurück auf die messbare Kategorie.

Definition. Ein **Maßraum** ist ein Tripel (X, \mathcal{A}, μ) , besteht aus einer Menge X , einer σ -Algebra $\mathcal{A} \subset \mathcal{P}(X)$ und einem Maß μ auf \mathcal{A} .

Maße können mittel Abbildungen “nach vorne” (kovariant im Sinne der Kategorientheorie) transportiert werden:

Definition. Sei $f : (X, \mathcal{A}) \rightarrow (Y, \mathcal{B})$ eine *messbare* Abbildung zwischen Maßräumen. Ist μ ein Maß auf \mathcal{A} , so ist das **Bildmaß** $f_*\mu$ auf \mathcal{B} gegeben durch für $B \in \mathcal{B}$

$$(f_*\mu)(B) := \mu(\underbrace{f^{-1}(B)}_{\in \mathcal{A}})$$

Klar ist, dass $f_*\mu$ wieder σ -additiv ist, also tatsächlich ein Maß. Wir betrachten

$$(X, \mathcal{A}) \xrightarrow[\text{messbar}]{f} (Y, \mathcal{B}) \xrightarrow[\text{messbar}]{g} (Z, \mathcal{C}).$$

Es gilt die *Transitivität* $(g \circ f)_*\mu = g_*(f_*\mu)$, denn für $C \in \mathcal{C}$ gilt:

$$((g \circ f)_*\mu)(C) = \mu((g \circ f)^{-1}(C)) = \mu(f^{-1}(g^{-1}(C))) = (f_*\mu)(g^{-1}(C)) = (g_*(f_*\mu))(C).$$

Eine messbare Abbildung $f : (X, \mathcal{A}, \mu) \rightarrow (Y, \mathcal{B}, \nu)$ heißt **maßerhaltend**, falls $f_*\mu = \nu$. Ist f bijektiv, maßerhaltend und $f^*\mathcal{B} = \mathcal{A}$, so ist f ein **Isomorphismus von Maßräumen**. Ist eine Selbstabbildung $f : (X, \mathcal{A}, \mu) \rightarrow (X, \mathcal{A}, \mu)$ maßerhaltend, so sagt man, dass das Maß μ unter der messbaren Abbildung f **invariant** ist. Die maßerhaltenden bijektiven Selbstabbildungen eines Maßraums nennt man seine **Automorphismen**. Sie bilden eine Gruppe.

Bemerkung.

- Eine bijektive Abbildung von Mengen $f : X \rightarrow Y$ induziert eine ebenfalls bijektive Abbildung $f_* : \mathcal{P}(Y) \rightarrow \mathcal{P}(X)$, $M \mapsto f^{-1}(M)$ mit der Umkehrabbildung $M \mapsto f(M)$.

- Ist $f : (X, \mathcal{T}_X) \longrightarrow (Y, \mathcal{T}_Y)$ eine Bijektion topologischer Räume, so ist f genau dann Homöomorphismus, wenn $f^*\mathcal{T}_Y = \mathcal{T}_X$. In diesem Fall gilt auch $f^*(\underbrace{\mathcal{B}(Y)}_{\sigma(\mathcal{T}_Y)}) = \underbrace{\sigma(f^*\mathcal{T}_Y)}_{\mathcal{T}_X} = \mathcal{B}(X)$. D.h. f und f^{-1} messbar, also ist $f : (X, \mathcal{B}(X)) \longrightarrow (Y, \mathcal{B}(Y))$ ein Isomorphismus von Messräumen.

I.5.10 Produktmaße

Wir konstruieren nun endliche Produkte von Maßen bzw. Maßräumen.

Seien $(X_i, \mathcal{A}_i, \mu_i)$ Maßräume. Dann wird die Produkt- σ -Algebra $\mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n \subset \mathcal{P}(X_1 \times \dots \times X_n)$ erzeugt von dem Halbring $\mathcal{Q} = \mathcal{A}_1 * \dots * \mathcal{A}_n$ der Quander sowie dem Ring $\mathcal{F} = \mathcal{A}_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mathcal{A}_n$ der Figuren. Der Produktinhalt $\mu_1 \times \dots \times \mu_n$ auf \mathcal{Q} wird eindeutig fortgesetzt zu dem Produktinhalt $\mu_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mu_n$ auf \mathcal{F} .

Weil μ_i Maße (insb. Prämaße) sind, ist $\mu_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mu_n$ auch ein Prämaß und wird fortgesetzt zu einem Maß auf der Produkt- σ -Algebra

$$\mu_1 \otimes \dots \otimes \mu_n = (\mu_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mu_n)^*|_{\mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n}$$

Sind alle μ_i σ -endlich, so ist $\mu_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mu_n$ auch σ -endlich. Somit ist $\mu_1 \otimes \dots \otimes \mu_n$ die *eindeutige* Fortsetzung des Prämaßes $\mu_1 \boxtimes \dots \boxtimes \mu_n$ zu einem Maß auf $\mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n$. In diesem Fall heißt $\mu_1 \otimes \dots \otimes \mu_n$ das **Produktmaß** (der μ_i) und

$$(X_1 \times \dots \times X_n, \mathcal{A}_1 \otimes \dots \otimes \mathcal{A}_n, \mu_1 \otimes \dots \otimes \mu_n)$$

das Produkt der Maßräume $(X_i, \mathcal{A}_i, \mu_i)$.

I.5.11 Charakterisierung des Lebesgue-Maßes

Wir wollen zeigen, dass das Lebesgue-Maß *eine natürliche Lösung* des eingangs diskutierten “(post-paradoxalen) Maßproblems¹² ist und dadurch *charakterisiert* wird.

Geometrische Transformationen des \mathbb{R}^d

- **Affine Transformationen** des \mathbb{R}^d sind Abbildung $\Phi_{A,v}$ der Form

$$\Phi_{A,v}(x) = Ax + v \quad \text{mit } A \in \text{GL}(d, \mathbb{R}), v \in \mathbb{R}^d$$

linearer Anteil

Sie sind geometrisch charakterisierbar als injektive Selbstabbildungen, welche

- Geraden erhalten¹³,
- Teilverhältnisse kollinear¹⁴ Triple werden erhalten.

¹²Man definiere eine Volumenfunktion $\mathcal{F} \longrightarrow [0, \infty]$ mit geforderten Eigenschaften (σ -additiv, Bewegungsinvarianz und Normierung) auf einer möglich flexiblen und reichhaltigen Familie (jetzt σ -Algebra) $\mathcal{F} \subset \mathcal{P}(\mathbb{R}^d)$.

¹³D.h. Geraden werden auf Geraden abgebildet.

¹⁴Punkte, die auf einer Geraden liegen, sind kollinear.

Affine Transformationen sind *Homöomorphismen*, also auch Automorphismen¹⁵ von $(\mathbb{R}^d, \mathcal{B}^d, \beta^d)$. Die affinen Transformationen des \mathbb{R}^d bilden die *affine Gruppe* (Lie-Gruppe) $\text{Aff}(\mathbb{R}^d) \subset \text{Homöos}(\mathbb{R}^d) \subset \text{messb. Autom.}$

- **Bewegungen** bzw. **Isometrien** des \mathbb{R}^d sind die Selbstabbildungen $\mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d$, die die metrische Struktur, d.h. den *euklidischen Abstand* erhalten. Sie sind genau die affinen Transformationen $\Phi_{A,v}$, für die gilt $A \in \text{O}(n)$ ¹⁶. Sie bilden ebenfalls eine Bewegungsgruppe und es gilt $\text{Trans}(\mathbb{R}^d) \subset \text{Isom}(\mathbb{R}^d) \subset \text{Aff}(\mathbb{R}^d)$.

25.11.2019

Zusammengefasst:

$$\begin{array}{ccccc}
 \text{Aff}(\mathbb{R}^d) & \supset & \text{Isom}(\mathbb{R}^d) & \supset & \text{Trans}(\mathbb{R}^d) \\
 \text{affine Transformationen} & & \text{Bewegungen} & & \text{Translationen} \\
 & & (\text{Isometrien}) & & \\
 \Phi_{A,v} = Ax + v & & A \text{ orthogonal} & & \text{trivialer lin. Anteil} \\
 A \in \text{GL}(d, \mathbb{R}) & & (\text{Rotationsanteil}) & & A = \text{id}_{\mathbb{R}^d}
 \end{array}$$

Bemerkung. Die lineare Abbildung $\text{lin} : \text{Aff}(\mathbb{R}^d) \rightarrow \text{GL}(d, \mathbb{R}), \Phi_{A,v} \mapsto A$ ist ein Epimorphismus. Ihr Kern sind die Translationen, also ein Normalteiler¹⁷ in $\text{Aff}(\mathbb{R}^d)$, also $\text{Trans}(\mathbb{R}^d) \triangleleft \text{Aff}(\mathbb{R}^d)$. Im Sinne der Algebra ist

$$\text{Trans}(\mathbb{R}^d) \xrightarrow[\text{inj.}]{\text{Inklusion}} \text{Aff}(\mathbb{R}^d) \xrightarrow[\text{surj.}]{\text{linear}} \text{GL}(d, \mathbb{R})$$

eine exakte Sequenz.¹⁸ Bezüglich der Einschränkung auf den Isometrien

$$\text{Isom}(\mathbb{R}^d) \xrightarrow[\text{Epimorphismus}]{\text{lin}|_{\text{Isom}(\mathbb{R}^d)} =: \text{rot}} \text{O}(d)$$

ist

$$\text{Trans}(\mathbb{R}^d) \rightarrow \text{Isom}(\mathbb{R}^d) \rightarrow \text{O}(d)$$

eine exakte Sequenz.

Wir untersuchen nun den Effekt affiner Transformationen $\Phi : \mathbb{R}^d \rightarrow \mathbb{R}^d$ auf Lebesgue-Maß λ^d .

Weil Φ ein Homöomorphismus ist, erhält Φ die Borelsche- σ -Algebra \mathcal{B}^d . Es gilt nämlich $\Phi^* \mathcal{B}^d = \Phi^*(\sigma(\mathcal{T}_{\mathbb{R}^d})) = \sigma(\Phi^*(\mathcal{T}_{\mathbb{R}^d})) = \sigma(\mathcal{T}_{\mathbb{R}^d}) = \mathcal{B}^d$, d.h. Φ ist Borel-messbar.¹⁹

¹⁵Ein Automorphismus ist ein *Isomorphismus* auf sich selbst.

¹⁶ $\text{O}(d) := \{A \in \text{GL}(d, \mathbb{R}) \mid AA^t = \text{id}_{\mathbb{R}^d}\} \subset \text{End}(\mathbb{R}^d)$, ist (überall) eine \mathcal{C}^∞ -Untermannigfaltigkeit von $\text{End}(\mathbb{R}^d) \cong \mathbb{R}^{d^2}$.

¹⁷Eine Untergruppe H einer Gruppe G heißt Normalteil, falls für jedes $g \in G$ gilt $gH = Hg$. D.h. für jedes $g \in G$ stimmt die Linksnebenklasse mit der Rechtsnebenklasse überein. Man kann zeigen, dass die folgenden Aussagen äquivalent sind:

- (i) H ist ein Normalteil von G .
- (ii) Es existiert ein Gruppenhomomorphismus aus G , dessen Kern H ist.
- (iii) Für jedes $h \in H$ und $g \in G$ gilt $g \circ h \circ g^{-1} \in H$.

¹⁸Eine Sequenz $A' \rightarrow A \rightarrow A''$ von Objekten und Morphismen in einer geeigneten Kategorie heißt exakt an der Stelle A , wenn $\text{im}(A' \rightarrow A) = \text{ker}(A \rightarrow A'')$.

¹⁹Vorsicht: Nicht alle Homöomorphismen erhalten \mathcal{L}^d ! Dies ist äquivalent dazu, dass Nullmengen erhalten werden (von Φ und Φ^{-1}).

Affine Transformationen sind auch Lebesgue-messbar, d.h. $\Phi^* \mathcal{L}^d = \mathcal{L}^d$. Dies folgt sowohl aus der Lipschitz-Stetigkeit (und damit werden Nullmengen erhalten), als auch aus dem Skalierungsverhalten von λ^d unter $\text{Aff}(\mathbb{R}^d)$ (siehe spätere Diskussion).

Wir untersuchen zunächst den Effekt von Translationen auf λ^d . Weil die Translationen Volumina von Quadern erhalten, also $\lambda_{\mathcal{Q}^d}^d$ (der Elementarinhalt) invariant unter Translationen, folgt, dass β^d translationsinvariant ist. Außerdem ist $\mathcal{B}^d = \sigma(\mathcal{Q}^d)$ translationsinvariant, weil \mathcal{Q}^d translationsinvariant ist.

Lemma. Die σ -Algebren \mathcal{B}^d und \mathcal{L}^d sowie die Maße β^d und λ^d sind invariant unter Translationen, ebenso das äußere Maß $(\beta^d)^* = (\lambda^d)^*$.

Beweis. Seien $Q = [a, b] \in \mathcal{Q}^d$, $a < b$ (d.h. $a_i < b_i \forall i$) und $v \in \mathbb{R}^d$. Es ist

$$\underbrace{T_v^{-1}(Q)}_{T_{-v}} = [a - v, b - v] \subset \mathcal{Q}^d$$

und

$$((T_v)_* \lambda_{\mathcal{Q}^d}^d)(Q) = \lambda_{\mathcal{Q}^d}^d(T_v^{-1}(Q)) = \prod_{i=1}^d ((b_i - v_i) - (a_i - v_i)) = \prod_{i=1}^d (b_i - a_i) = \lambda_{\mathcal{Q}^d}^d(Q).$$

Also ist $T_v^* \mathcal{Q}^d = \mathcal{Q}^d$ und $(T_v)_* \lambda_{\mathcal{Q}^d}^d = \lambda_{\mathcal{Q}^d}^d$. Da Figuren endliche Vereinigungen von Quadern sind, folgt die Translationsinvarianz des von \mathcal{Q}^d erzeugten Rings \mathcal{F}^d sowie die Translationsinvarianz des den Inhalt $\lambda_{\mathcal{Q}^d}^d$ eindeutig fortsetzenden Inhalts $\lambda_{\mathcal{F}^d}^d$ (Lebesgue-Prämaß) $T_v^* \mathcal{F}^d = \mathcal{F}^d$ und $(T_v)_* \lambda_{\mathcal{F}^d}^d \stackrel{20}{=} \lambda_{\mathcal{F}^d}^d$.

Weiter folgt: die von \mathcal{Q}^d erzeugte σ -Algebra \mathcal{B}^d ist invariant unter Translationen, da $T_v^* \mathcal{B}^d = T_v^*(\sigma(\mathcal{F}^d)) = \sigma(T_v^*(\mathcal{F}^d)) = \sigma(\mathcal{F}^d) = \mathcal{B}^d$. Ebenfalls ist das äußere Maß $(\lambda^d)^* = (\beta^d)^* = (\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^* = (\lambda_{\mathcal{Q}^d}^d)^*$ translationsinvariant:

$$(T_v)_*(\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^* = ((T_v)_* \lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^* = (\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^*$$

Es folgt, dass die σ -Algebra der $(\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^*$ -messbaren Teilmengen invariant (unter Translationen) ist, damit auch $\lambda^d = (\lambda_{\mathcal{F}^d}^d)^*|_{\mathcal{L}^d}$. Also $T_v^* \mathcal{L}^d = \mathcal{L}^d$ und $(T_v)_* \lambda^d = \lambda^d$. Es folgt, dass $\beta^d = \lambda^d|_{\mathcal{B}^d}$ ebenfalls translationsinvariant ist, denn

$$(T_v)_* \beta^d = (T_v)_*(\lambda^d|_{\mathcal{B}^d}) = (T_v)_* \lambda^d|_{T_v^* \mathcal{B}^d} = \lambda^d|_{\mathcal{B}^d} = \beta^d$$

■

Es war ein großer Schritt zur Lösung des Maßproblems, denn β^d ist translationsinvariant und normiert durch $\beta^d([0, 1]^d) = \lambda_{\mathcal{F}^d}^d([0, 1]^d) = 1$. Diese Eigenschaften charakterisieren das Lebesgue-Borel-Maß bereits:

²⁰Inhalt, der $(T_v)_* \lambda_{\mathcal{Q}^d}^d$ auf \mathcal{Q}^d eindeutig fortsetzt.

Satz. Ist μ ein translationsinvariant Maß auf \mathcal{B}^d mit $\mu([0, 1]^d) = c < \infty$, so ist μ ein Vielfaches des Lebesgue-Borel-Maßes, d.h. $\mu = c \cdot \beta^d$.

Beweis. Weil μ translationsinvariant ist, hängt das μ -Volumen von Quadern in \mathcal{Q}^d nur von deren euklidischen Kantenlängen ab. Wir betrachten einen kleineren Erzeuger von \mathcal{B}^d , nämlich

$$\mathcal{Q}_{\mathbb{Q}}^d := \{\text{Quader aus } \mathcal{Q}^d \text{ mit Ecken in } \mathbb{Q}^d\} \subset \mathcal{Q}^d.$$

Es folgt unmittelbar, dass die Kantenlängen der Quader aus $\mathcal{Q}_{\mathbb{Q}}^d$ rational sind.

Zu $Q, Q' \in \mathcal{Q}_{\mathbb{Q}}^d$ existieren $n, n' \in \mathbb{N}$ und ein weiterer größerer Quader $\in \mathcal{Q}_{\mathbb{Q}}^d$, der disjunkt sowohl in n Translate von Q zerlegt werden kann als auch disjunkt in n' Translate von Q' . Es folgt

$$\begin{cases} n \cdot \mu(Q) = n' \cdot \mu(Q') \\ n \cdot \underbrace{\beta^d(Q)}_{>0} = n' \cdot \underbrace{\beta^d(Q')}_{>0} \end{cases}$$

Also ist $\frac{\mu(Q)}{\beta^d(Q)}$ unabhängig von Auswahl $Q \in \mathcal{Q}_{\mathbb{Q}}^d$. Es ist $\frac{\mu(Q)}{\beta^d(Q)} = \frac{\mu([0, 1]^d)}{\beta^d([0, 1]^d)} = c \in [0, \infty)$. Es folgt $\mu|_{\mathcal{Q}_{\mathbb{Q}}^d} = c \cdot \beta^d|_{\mathcal{Q}_{\mathbb{Q}}^d}$. Weil die Fortsetzung von Inhalten von Halbringen auf Ringen eindeutig ist, folgt $\mu|_{\mathcal{F}_{\mathbb{Q}}^d} = c \cdot \beta^d|_{\mathcal{F}_{\mathbb{Q}}^d}$. $\mu|_{\mathcal{F}_{\mathbb{Q}}^d}$ ist ein Prämaß (da Einschränkung von Maß β^d) und σ -endlich. Wegen der Eindeutigkeit der Fortsetzung von σ -endlichen Prämaßen auf Ringen \mathcal{R} zu Maßen auf $\sigma(\mathcal{R})$ folgt $\mu = c \cdot \beta^d$, denn $\mathcal{B}^d = \sigma(\mathcal{F}_{\mathbb{Q}}^d)$. ■

Korollar (Charakterisierung des Lebesgue-Borel-Maßes). β^d ist das eindeutig bestimmte translationsinvariante Maß auf \mathcal{B}^d mit $\beta([0, 1]^d) = 1$.

Wir nutzen diese Charakterisierung jetzt, um die *Bewegungsinvarianz* von β^d einzusehen. Dies basiert auf der Struktur der affinen Gruppen, nämlich dass $\text{Trans}(\mathbb{R}^d) \triangleleft \text{Aff}(\mathbb{R}^d)$. Die natürliche Operation $\text{Aff}(\mathbb{R}^d) \curvearrowright \{\text{Maße auf } \mathcal{B}^d\}$ erhält die Fixpunktmenge des Normalteilers $\text{Trans}(\mathbb{R}^d)$, d.h. die translationsinvarianten Maße $\{c \cdot \beta^d \mid c \geq 0\}$

Lemma. Ist μ ein translationsinvariantes Maß auf \mathcal{B}^d und $\Phi \in \text{Aff}(\mathbb{R}^d)$, so ist das Bildmaß $\Phi_*\mu$ auch translationsinvariant.

Beweis. Weil $\text{Trans}(\mathbb{R}^d) \triangleleft \text{Aff}(\mathbb{R}^d)$, gilt

$$\Phi^{-1}T_v\Phi \in \text{Trans}(\mathbb{R}^d)$$

Die Invarianz unter Translationen von μ liefert

$$(T_v)_*\Phi_*\mu = \Phi_*\underbrace{(\Phi^{-1})_*(T_v)_*\Phi_*\mu}_{\substack{(\Phi^{-1}T_v\Phi)_* \\ \text{Translation}}} = \Phi_*\mu$$

Also ist $\Phi_*\mu$ translationsinvariant. ■

Weil laut der Charakterisierung alle translationsinvarianten Maße zueinander proportional sind, folgt

Korollar. Es existiert ein Gruppenhomomorphismus $c : \text{Aff}(\mathbb{R}^d) \longrightarrow \mathbb{R}^+$ sodass $\Phi_*\beta^d = c(\Phi)\beta^d$ für $\Phi \in \text{Aff}(\mathbb{R}^d)$.

Beweis. Das letzte Lemma zusammen mit dem Charakterisierungssatz liefert eine Funktion $c : \text{Aff}(\mathbb{R}^d) \longrightarrow \mathbb{R}^+$. Seien $\Phi, \Psi \in \text{Aff}(\mathbb{R}^d)$. Ihre Multiplikativität folgt aus

$$c(\Psi \circ \Phi) \cdot \beta^d = \underbrace{(\Psi \circ \Phi)_*}_{\Psi_* \circ \Phi_*} \beta^d = \Psi_* \underbrace{(\Phi_* \beta^d)}_{c(\Phi)\beta^d} = c(\Psi) \cdot c(\Phi) \cdot \beta^d$$

Weil $\beta^d \neq 0$ folgt $c(\Psi \circ \Phi) = c(\Psi) \cdot c(\Phi)$. ■

28.11.2019

Wir haben also gesehen: der Effekt affiner Transformationen auf Lebesgue-Maß ist die Skalierung. Die Translationsinvarianz entspricht der Tatsache, dass

$$c|_{\text{Trans}(\mathbb{R}^d)} \equiv 1.$$

Weil das Lebesgue-Maß invariant unter Translationen ist, ist c bereits bestimmt durch seine Werte auf linearen Transformationen, d.h. durch $c|_{\text{GL}(d, \mathbb{R})}$:

$$c(\Phi_{A,v}) = c(A)$$

bzw.

$$(\Phi_{A,v})_*\beta^d = c(A) \cdot \beta^d.$$

Lemma. $c|_{\text{Isom}(\mathbb{R}^d)} = 1$.²¹

Beweis. Sei $A \in \text{O}(d)$ und $B = B_1(0)$. Insbesondere ist $B_1(0)$ $\text{O}(d)$ -invariant. Es ist

$$\underbrace{(A_*\beta^d)}_{c(A)\beta^d}(B) = \beta^d(A^{-1}(B)) = \beta^d(B).$$

Wegen $0 < \beta^d(B) < \infty$ folgt $c(A) = 1$. ■

Satz (Bewegungsinvarianz des Lebesgue-Maßes). Die σ -Algebren \mathcal{B}^d und \mathcal{L}^d sowie die Maße β^d und λ^d sind invariant unter Bewegungen des \mathbb{R}^d , ebenso $(\beta^d)^* = (\lambda^d)^*$.

Beweis. \mathcal{B}^d ist invariant unter allen Homöomorphismen des \mathbb{R}^d , also insbesondere unter Bewegungen. Die Bewegungsinvarianz von β^d folgt aus dem Lemma. Daraus folgt weiter die Invarianz des assoziierten äußeren Maßes $(\beta^d)^*$ und seiner Nullmengen, also auch die Invarianz von \mathcal{L}^d als Vervollständigung von \mathcal{B}^d und λ^d als Einschränkung von $(\beta^d)^*$. ■

²¹ $c|_{\text{Isom}(\mathbb{R}^d)}$ ist wiederum bestimmt durch $c|_{\text{O}(d)}$.

Wir haben also gesehen, dass λ^d eine befriedigende Lösung des Maßproblems auf \mathbb{R}^d ist.²²

Bemerkung. \mathcal{L}^d ist unter allen affinen Transformationen invariant, denn $(\beta^d)^*$ wird skaliert, Nullmengen bleiben also Nullmengen. λ^d hat deshalb dasselbe Transformationsverhalten wie β^d . Es ist nämlich $\Phi_*\lambda^d = c(\Phi) \cdot \lambda^d$.

Um den gesamten Homomorphismen c zu bestimmen, machen wir eine weitere Beobachtung.

Lemma. Für Diagonalmatrizen $D \in \text{GL}(d, \mathbb{R})$, $De_i = \lambda_i e_i$ mit $\lambda_i \in \mathbb{R} \setminus \{0\}$ für $i = 1, \dots, d$ gilt²³

$$c(D) = |\det(D)^{-1}|.$$

Beweis. Sei $Q = [a, b] \in \mathcal{Q}^d$, $a_i < b_i \forall i$. Es ist $D^*(Q) = D^{-1}(Q) = [D^{-1}a, D^{-1}b]$ und

$$\underbrace{(D_*\beta^d)}_{c(D)\beta^d}(Q) = \beta^d(D^{-1}(Q)) = \prod_{i=1}^d |\lambda_i^{-1}(b_i - a_i)| = \underbrace{\left| \prod_{i=1}^d \lambda_i^{-1} \right|}_{|\det D^{-1}|} \cdot \beta^d(Q).$$

Es folgt $c(D) = |\det D^{-1}|$. ■

Satz. Jede Matrix $A \in \text{GL}(d, \mathbb{R})$ lässt sich in der Form $A = RDR'$ darstellen mit $R, R' \in \text{O}(d)$ und einer Diagonalmatrix $D \in \text{GL}(d, \mathbb{R})$.²⁴

Beweis. Dies ist eine Konsequenz aus der Tatsache, dass zu je zwei Skalarprodukten auf \mathbb{R}^d eine gemeinsame Orthogonalbasis existiert. Betrachte das Standardskalarprodukt $\langle \cdot, \cdot \rangle$ sowie sein Bild $\underbrace{(A_*\langle \cdot, \cdot \rangle)}_{:= \langle A^{-1}\cdot, A^{-1}\cdot \rangle} (u, v) := \langle A^{-1}u, A^{-1}v \rangle$. Es existiert also eine Basis

(v_i) von \mathbb{R}^d , die bzgl. beider Skalarprodukte orthogonal ist, und o.B.d.A. sei (v_i) ein Orthonormalbasis bzgl. $\langle \cdot, \cdot \rangle$. Dann existiert ein $R \in \text{O}(d)$ sodass $v_i = Re_i \forall i$. Somit ist also (e_i) orthogonal bzgl. $R_*^{-1}A_*\langle \cdot, \cdot \rangle = \langle A^{-1}R\cdot, A^{-1}R\cdot \rangle$. Gehe zu ONB über durch geeignete Skalierung der Vektoren. Es existiert eine Diagonalmatrix $D \in \text{GL}(d, \mathbb{R})$ sodass (De_i) sogar orthogonal ist bzgl. dieses Skalarprodukts. Es folgt, dass (e_i) orthonormal ist bezüglich $D_*^{-1}R_*^{-1}A_*\langle \cdot, \cdot \rangle = \langle A^{-1}RD\cdot, A^{-1}RD\cdot \rangle$. Dies bedeutet $(D^{-1}R^{-1}A)_*\langle \cdot, \cdot \rangle = D_*^{-1}R_*^{-1}A_*\langle \cdot, \cdot \rangle = \langle \cdot, \cdot \rangle$. Es folgt $D^{-1}R^{-1}A =: R' \in \text{O}(d)$ und $A = RDR'$. ■

Korollar. $c = |\det^{-1}|$ auf $\text{GL}(d, \mathbb{R})$.

Beweis. Dies gilt auf $\text{O}(d)$, somit auf Diagonalmatrizen. Wegen des beiden Satzes und der Multiplikativität von c gilt dies auf ganz $\text{GL}(d, \mathbb{R})$. ■

Also $c(\Phi_{A,v}) = |\det A^{-1}|$.

²²*Bemerkung.* Es existieren bewegungsinvariante Fortsetzungen von λ^d auf echt größere σ -Algebren (Szpilrajn, 1935), jedoch keine maximale Fortsetzung (Ciesielski-Pele, 1985).

²³ D hat die Gestalt $\begin{pmatrix} \lambda_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & \lambda_d \end{pmatrix}$.

²⁴Dies entspricht der "KAK-Zerlegung" (K steht für kompakt, hier: orthogonal, A steht für abelsch, hier: diagonal) in der Lie-Gruppe $\text{GL}(d, \mathbb{R})$.

Satz (Skalierungsverhalten des Lebesgue-Maßes unter affinen Transformationen). \mathcal{B}^d und \mathcal{L}^d sind invariant unter affinen Transformationen des \mathbb{R}^d . Für $\Phi_{A,v} \in \text{Aff}(\mathbb{R}^d)$ gilt

$$(\Phi_{A,v})_*(\lambda^d) = |\det A^{-1}| \cdot \lambda^d$$

bzw

$$(\Phi_{A,v})_*((\lambda^d)^*) = |\det A^{-1}| \cdot ((\lambda^d)^*).$$

Dieser Satz besagt also, dass die Volumenverzerrung von Φ durch den Faktor $|\det A|$ bestimmt ist, wobei A der lineare Anteil von Φ ist.

I.5.12 Existenz nicht Lebesgue-messbarer Teilmengen

Wir weisen die Existenz nicht Lebesgue-messbaren Teilmengen nach mit Hilfe des Auswahlaxioms. (Dieses ist zum Nachweis nötig (Solovay, 1970)).

Wir gehen zurück zu Vitali-Argument (vgl. Beginn der Vorlesung). Der Ausgangspunkt war eine (überabzählbare) Partition \mathcal{P} von $\mathbb{R}^{|\mathbb{Q}^d| \geq 1}$ durch die (abzählbaren) Nebenklassen $a + \mathbb{Q}^d$ der Untergruppe $\mathbb{Q}^d \subset \mathbb{R}^d$. Um die Nebenklassen “ohne Wiederholung” aufzulisten, braucht man Repräsentantensystem (es folgt aus dem Auswahlaxiom) $M \subset \mathbb{R}^d$, d.h. M enthält genau ein Element aus jeder Nebenklasse $a + \mathbb{Q}^d$. Äquivalent dazu: jedes $x \in \mathbb{R}^d$ besitzt eine eindeutige Zerlegung

$$x = m + q, m \in M, q \in \mathbb{Q}^d.$$

Es folgt, dass auch $M + q$ ein Repräsentantensystem ist, d.h.

$$\mathbb{R}^d = \bigsqcup_{q \in \mathbb{Q}^d} (M + q). \quad (\text{I.9})$$

Es folgt, die abzählbare Partition \mathcal{P}^* transversal bzw. komplementär durch überabzählbare viele Translate $M + q, q \in \mathbb{Q}^d$. Wir wollen zeigen, dass $M \notin \mathcal{L}^d$. Weil λ^d und $(\lambda^d)^*$ translationsinvariant sind, ist $(\lambda^d)(M + q)$ unabhängig von $q \in \mathbb{Q}^d$. Die σ -Subadditivität äußerer Maße zusammen mit $\lambda^d(\mathbb{R}^d) > 0$ und (I.9) impliziert, dass

$$0 < \lambda^d(\mathbb{R}^d) \leq \sum_{q \in \mathbb{Q}^d} \underbrace{(\lambda^d)^*(M + q)}_{\text{unabhängig von } q}.$$

Es folgt, dass $(\lambda^d)^*(M) > 0$.

Satz. Alle Lebesgue-messbaren Teilmengen eines Repräsentantensystems sind Nullmengen.

Beweis. Sei $N \subset M, N \in \mathcal{L}^d$. Wir nehmen zunächst an, dass N beschränkt ist. Wir argumentieren mit Packungsargument: abzählbar unendlich viele Translate $N + q$ für $q \in \mathbb{Q}^d \cap B_1(0)$ haben beschränkte Vereinigung, diese haben also endliches λ^d -Volumen. Weil N messbar ist, folgt, dass $\lambda^d(N) = 0$. Falls N nicht beschränkt ist, dann ist N eine abzählbare Vereinigung von beschränkten messbaren Teilmengen von M . Die Vereinigung hat also Maß 0. ■

Korollar. Repräsentantensysteme sind nicht Lebesgue-messbar.