

Probabilistische Datenwissenschaft für die Psychologie

Dirk Ostwald

2024-01-31

Inhaltsverzeichnis

Willkommen	4
Vorwort	5
I. Mathematische Grundlagen	6
1. Sprache und Logik	7
1.1. Mathematik ist eine Sprache	7
1.2. Grundbausteine mathematischer Kommunikation	8
1.3. Aussagenlogik	9
1.4. Beweistechniken	14
1.5. Selbstkontrollfragen	15
2. Mengen	16
2.1. Grundlegende Definitionen	16
2.2. Verknüpfungen von Mengen	18
2.3. Spezielle Mengen	19
2.4. Selbstkontrollfragen	22
3. Summen, Produkte, Potenzen	23
3.1. Summen	23
3.2. Produkte	25
3.3. Potenzen	26
3.4. Selbstkontrollfragen	27
4. Funktionen	28
4.1. Definition und Eigenschaften	28
4.2. Funktionentypen	30
4.3. Elementare Funktionen	33
4.4. Selbstkontrollfragen	37
5. Differentialrechnung	38
5.1. Definitionen und Rechenregeln	38
5.2. Analytische Optimierung	40
5.3. Differentialrechnung multivariater reellwertiger Funktionen	44
5.4. Selbstkontrollfragen	51
6. Folgen, Grenzwerte, Stetigkeit	52
6.1. Folgen	52
6.2. Grenzwerte	54
6.3. Stetigkeit	56

7. Integralrechnung	59
7.1. Unbestimmte Integrale	59
7.2. Bestimmte Integrale	61
7.3. Uneigentliche Integrale	68
7.4. Mehrdimensionale Integrale	69
7.5. Selbstkontrollfragen	70
8. Vektoren	72
8.1. Reeller Vektorraum	72
8.2. Euklidischer Vektorraum	76
8.3. Lineare Unabhängigkeit	84
8.4. Vektorraumbasen	86
8.5. Selbstkontrollfragen	89
 II. Wahrscheinlichkeitstheorie	 91
9. Wahrscheinlichkeitsräume	95
9.1. Definition und erste Eigenschaften	95
9.2. Wahrscheinlichkeitsfunktionen	100
9.3. Beispiele bei endlichem Ergebnisraum	101
9.4. Literaturhinweise	105
9.5. Selbstkontrollfragen	105
 Referenzen	 106

Willkommen

Dieses Werk ist lizenziert unter einer Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.

Vorwort

Teil I.

Mathematische Grundlagen

1. Sprache und Logik

1.1. Mathematik ist eine Sprache

Mathematik ist die Sprache der naturwissenschaftlichen Modellbildung. So entspricht zum Beispiel der Ausdruck

$$F = ma \tag{1.1}$$

im Sinne des zweiten Newtonschen Axioms einer Theorie zur Bewegung von Objekten unter der Einwirkung von Kräften (Newton (1687)). Gleichermäßen entspricht der Ausdruck

$$\max_{q(z)} \int q(z) \ln \left(\frac{p(y, z)}{q(z)} \right) dz \tag{1.2}$$

im Sinne der Variational Inference der zeitgenössischen Theorie zur Funktionsweise des Gehirns (Friston (2005), Friston et al. (2023), Ostwald et al. (2014), Blei et al. (2017)). Mathematische Symbolik dient dabei insbesondere der genauen Kommunikation wissenschaftlicher Erkenntnisse und zielt darauf ab, komplexe Sachverhalte exakt und effizient zu beschreiben. Wie beim reflektierten Umgang mit jeder Form von Sprache steht also die Frage “Was soll das heißen?” als Leitfrage im Umgang mit mathematischen Inhalten und Symbolismen immer im Vordergrund.

Als Sprachgebäude weist die Mathematik einige Besonderheiten auf. Zum einen sind ihre Inhalte oft abstrakt. Dies rührt daher, dass sich die Mathematik um eine möglichst breite Allgemeinverständlichkeit und Anwendbarkeit bemüht. Mathematische Zugänge zu den Phänomenen der Welt sind dabei an einer möglichst einfachen Transferierbarkeit von Erkenntnissen in andere Kontexte interessiert. Um dies zu ermöglichen, versucht die Mathematik möglichst genau und verständlich, also im Sinne präziser Begriffsbildungen zu arbeiten. Sie geht dabei insbesondere streng hierarchisch vor, so dass an späterer Stelle eingeführte Begrifflichkeiten oft ein gutes Verständnis der ihnen zugrundeliegenden und an früherer Stelle eingeführten Begrifflichkeiten voraussetzen.

Die Genauigkeit der mathematischen Sprache impliziert dabei eine hohe Informationsdichte. Sie ist daher eher nüchtern und lässt überflüssiges weg, so dass in mathematischen Texten im besten Fall *alles* für die Kommunikation einer Idee relevant ist. Als Rezipient:in mathematischer Texte nimmt man die Informationsdichte mathematischer Texte anhand des hohen Verbrauchs an kognitiver Energie beim Lesen eines Textes wahr. Dieser hohe Energieverbrauch gebietet insbesondere Ruhe und Langsamkeit bei einem auf ein gutes Verständnis abzielenden Lesen. Als Leitsatz im Umgang mit mathematischen Texten mag dabei folgendes Zitat dienen: “Einen mathematischen Text kann man nicht lesen wie einen Roman, man muss ihn sich erarbeiten” (Unger (2000)). Nach dem Lesen eines kurzen mathematischen Textes sollte man sich immer kritisch fragen, ob man das Gelesene wirklich verstanden hat oder ob man zur Klärung des Sachverhaltes weitere Quellen heranziehen sollte. Auch ist es hilfreich, sich im Sinne des berühmten Zitats

“What I cannot create, I do not understand” von Richard Feynman eigene Aufzeichnungen anzufertigen und mathematische Sprachgebäude selbst nachzubauen.

Möchte man sich also die Welt der naturwissenschaftliche Modellbildung erschließen, so ist es hilfreich, beim Umgang mit ihrer mathematischen Ausdrucksweise und Symbolik die gleichen Strategien wie beim Erlernen einer Fremdsprache anzuwenden. Hierzu gehört neben dem Eintauchen in den entsprechenden Sprachraum, also der ständige Exposition mit mathematischen Ausdrucksweisen, sicherlich auch zunächst einmal das Auswendiglernen von Begriffen und das aktive Lesen und das Übersetzen von Texten in die Alltagssprache. Ein tiefes und sicheres Verständnis mathematischer Modellbildung ergibt sich dann insbesondere durch die Anwendung mathematischer Herangehensweisen in schriftlicher und mündlicher Form.

1.2. Grundbausteine mathematischer Kommunikation

In diesem Abschnitt stellen wir mit den Begriffen der *Definition*, des *Theorems* und des *Beweises* drei Grundbausteine mathematischer Kommunikation vor, die uns durchgängig begleiten.

Definition

Eine *Definition* ist eine Grundannahme eines mathematischen Systems, die innerhalb dieses Systems weder begründet noch deduktiv abgeleitet wird. Definitionen können nur nach ihrer Nützlichkeit innerhalb eines mathematischen Systems bewertet werden. Eine Definition lernt man am besten erst einmal auswendig und hinterfragt sie erst dann, wenn man ihren Nutzen in der Anwendung verstanden hat oder von diesem nicht überzeugt ist. Etwas Entspannung und Ruhe beim Umgang mit auf den ersten Blick komplexen Definitionen ist generell hilfreich. Um zu kennzeichnen, dass wir ein Symbol als etwas definieren, nutzen wir die Schreibweise “:=”. Zum Beispiel definiert der Ausdruck “ $a := 2$ ” das Symbol a als die Zahl Zwei. Definitionen enden in diesem Text immer mit dem Symbol •.

Theorem

Ein *Theorem* ist eine mathematische Aussage, die mittels eines Beweises als wahr (richtig) erkannt werden kann. Dass heißt, ein Theorem wird immer aus Definitionen und/oder anderen Theoremen hergeleitet. Theoreme sind in diesem Sinne die empirischen Ergebnisse der Mathematik. Im Deutschen werden Theoreme auch oft als *Sätze* bezeichnet. In der angewandten, datenanalytischen Mathematik sind Theoreme oft für Berechnungen hilfreich. Es lohnt sich also, sie auswendig zu lernen, da sie meist die Grundlage für Datenauswertung und Dateninterpretation bilden. Oft tauchen in Theoremen Gleichungen auf. Diese ergeben sich dabei aus den Voraussetzungen des Theorems. Um Gleichungen zu kennzeichnen nutzen wir das Gleichheitszeichen “=”. So besagt also zum Beispiel der Ausdruck “ $a = 2$ ” in einem gegebenen Kontext, dass aufgrund bestimmter Voraussetzungen das Symbol oder die Variable a den Wert zwei hat. Theoreme enden in diesem Text immer mit dem Symbol ◦.

Beweis

Ein *Beweis* ist eine logische Argumentationskette, die auf bekannte Definitionen und Theoreme zurückgreift, um die Wahrheit (Richtigkeit) eines Theorems zu belegen. Kurze

Beweise tragen dabei oft zum Verständnis eines Theorems bei, lange Beweise eher nicht. Beweise sind also insbesondere die Antwort auf die Frage, warum eine mathematische Aussage gilt (“Warum ist das so?”). Beweise lernt man nicht auswendig. Wenn Beweise kurz sind, ist es sinnvoll, sie durchzuarbeiten, da sie meist als bekannt vorausgesetzte Inhalte wiederholen. Wenn sie lang sind, ist es sinnvoller sie zunächst zu übergehen, um sich nicht in Details zu verlieren und vom eigentlichen Weg durch das entsprechende mathematische Gebäude abzukommen. Beweise enden in diesem Text immer mit dem Symbol \square .

Neben den oben vorgestellten Begriffen gibt es mit *Axiomen*, *Lemmata*, *Korollaren* und *Vermutungen* noch weitere typische Grundbausteine mathematischer Texte. Wir werden diesen Begriff nicht verwenden und geben deshalb für sie nur einen kurzen Überblick.

Axiome sind unbeweisbare Theoreme, in dem Sinne, als dass sie als Grundannahmen zum Aufbau mathematischer Systeme dienen. Der Übergang zwischen Definitionen und Axiomen ist dabei oft fließend. Da wir mathematisch nicht besonders tief arbeiten, bevorzugen wir in den allermeisten Fällen den Begriff der Definition.

Ein *Lemma* ist ein “Hilfstheorem”, also eine mathematische Aussage, die zwar bewiesen wird, aber nicht so bedeutend ist wie ein Theorem. Da wir einerseits auf bedeutende Inhalte fokussieren und andererseits mathematische Aussagen nicht diskriminieren wollen, verzichten wir auf diesen Begriff und nutzen stattdessen den Begriff des Theorems.

Ein *Korollar* ist eine mathematische Aussage, die sich durch einen einfachen Beweis aus einem Theorem ergibt. Da die “Einfachheit” mathematischer Beweise eine relative Eigenschaft ist, verzichten wir auf diesen Begriff und nutzen stattdessen auch hier den Begriff des Theorems.

Vermutungen sind mathematische Aussagen von denen unbekannt ist, ob sie beweisbar oder widerlegbar sind. Da wir im Bereich der angewandten Mathematik arbeiten, treffen wir nicht auf Vermutungen.

1.3. Aussagenlogik

Nachdem wir nun einige Grundbausteine mathematischer Modellbildung kennengelernt haben, wollen wir uns mit der *Aussagenlogik* einem einfachen System nähern, das es erlaubt, Beziehungen zwischen mathematischen Aussagen herzustellen und zu formalisieren. Im Folgenden spielt die Aussagenlogik zum Beispiel in der Definition von Mengenoperationen, bei Optimierungsbedingungen von Funktionen und in vielen Beweisen eine tragende Rolle. In der mathematischen Anwendung ist Aussagenlogik die Grundlage der Booleschen Logik der Programmierung. In der mathematischen Psychologie ist die Aussagenlogik zum Beispiel die Grundlage der Repräsentationstheorie des Messens.

Wir beginnen mit der Definition des Begriffs der mathematischen *Aussage*.

Definition 1.1 (Aussage). Eine *Aussage* ist ein Satz, dem eindeutig die Eigenschaft *wahr* oder *falsch* zugeordnet werden kann.

•

Das Adjektiv *wahr* kann auch als *richtig* verstanden werden. Wir kürzen wahr mit “w” und falsch mit “f” ab. Im Körper der reellen Zahlen ist zum Beispiel die Aussage $1 + 1 = 2$ wahr und die Aussage $1 + 1 = 3$ falsch. Man beachte, dass die Binärität des Wahrheitsgehalts von Aussagen eine Grundannahme der Aussagenlogik und damit formal wissenschaftlich und nicht empirisch zu verstehen ist. Wahrheitsgehalte beziehen sich nicht auf Definitionen, Definitionen sind immer wahr. Eine erste Möglichkeit, mit Aussagen zu arbeiten, ist, sie zu negieren. Dies führt auf folgende Definition.

Definition 1.2 (Negation). A sei eine Aussage. Dann ist die *Negation von A* die Aussage, die falsch ist, wenn A wahr ist und die wahr ist, wenn A falsch ist. Die Negation von A wird mit $\neg A$, gesprochen als “nicht A ”, bezeichnet.

•

Beispielsweise ist die Negation der Aussage “Die Sonne scheint” die Aussage “Die Sonne scheint nicht”. Die Negation der Aussage $1 + 1 = 2$ ist die Aussage $1 + 1 \neq 2$ und die Negation der Aussage $x > 1$ ist die Aussage $x \leq 1$. Tabellarisch stellt man die Definition der Negation einer Aussage A wie folgt dar.

A	$\neg A$
w	f
f	w

Tabellen dieser Form nennt man *Wahrheitstafeln*. Sie sind ein beliebtes Hilfsmittel in der Aussagenlogik. Möchte man zwei Aussagen logisch verbinden, so bieten sich zunächst die Begriffe der *Konjunktion* und *Disjunktion* an.

Definition 1.3 (Konjunktion). A und B seien Aussagen. Dann ist die *Konjunktion von A und B* die Aussage, die dann und nur dann wahr ist, wenn A und B beide wahr sind. Die Konjunktion von A und B wird mit $A \wedge B$, gesprochen als “ A und B ”, bezeichnet.

•

Die Definition der Konjunktion impliziert folgende Wahrheitstafel.

A	B	$A \wedge B$
w	w	w
w	f	f
f	w	f
f	f	f

Als Beispiel sei A die Aussage $2 \geq 1$ und B die Aussage $2 > 1$. Da sowohl A und B wahr sind, ist auch die Aussage $2 \geq 1 \wedge 2 > 1$ wahr. Als weiteres Beispiel sei A die Aussage $1 \geq 1$ und B die Aussage $1 > 1$. Hier ist nun A wahr und B falsch. Also ist die Aussage $1 \geq 1 \wedge 1 > 1$ falsch.

Definition 1.4 (Disjunktion). A und B seien Aussagen. Dann ist die *Disjunktion von A und B* die Aussage, die dann und nur dann wahr ist, wenn mindestens eine der beiden Aussagen A und B wahr ist. Die Disjunktion von A und B wird mit $A \vee B$, gesprochen als “ A oder B ”, bezeichnet.

•

Die Definition der Disjunktion impliziert folgende Wahrheitstafel

A	B	$A \vee B$
w	w	w
w	f	w
f	w	w
f	f	f

$A \vee B$ ist also insbesondere auch dann wahr, wenn A und B beide wahr sind. Damit ist das hier betrachtete “oder” genauer ein “und/oder”. Man nennt die Disjunktion daher auch ein “nicht-exklusives oder”. Als Beispiel sei A die Aussage $2 \geq 1$ und B die Aussage $2 > 1$. A ist wahr und B ist wahr. Also ist die Aussage $2 \geq 1 \vee 2 > 1$ wahr. Sei nun wiederum A die Aussage $1 \geq 1$ wahr und B die Aussage $1 > 1$. Dann ist A wahr und B falsch. Also ist die Aussage $1 \geq 1 \vee 1 > 1$ wahr.

Eine Möglichkeit, Aussagen in einen mechanischen logischen Zusammenhang zu stellen, ist die *Implikation*. Diese ist wie folgt definiert.

Definition 1.5 (Implikation). A und B seien Aussagen. Dann ist die *Implikation*, bezeichnet mit $A \Rightarrow B$, die Aussage, die dann und nur dann falsch ist, wenn A wahr und B falsch ist. A heißt dabei die *Voraussetzung (Prämisse)* und B der *Schluss (Konklusion)* der Implikation. $A \Rightarrow B$ spricht man als “aus A folgt B ”, “ A impliziert B ”, oder “wenn A , dann B ”.

•

Man mag \Rightarrow auch als “daraus folgt” lesen. Die Definition der Implikation impliziert folgende Wahrheitstafel.

A	B	$A \Rightarrow B$
w	w	w
w	f	f
f	w	w
f	f	w

Ein Verständnis der Definition der Implikation im Sinne obiger Wahrheitstafel ergibt sich am ehesten, indem man sie als Versuch liest, die intuitive Vorstellung einer Folgerung im Kontext der Aussagenlogik abzubilden und zu formalisieren. Betrachtet man obige Wahrheitstafel unter diesem Gesichtspunkt, so sieht man, dass wenn A wahr ist und $A \Rightarrow B$ wahr ist, B wahr ist. Konstruiert man basierend auf einer wahren Aussage also (zum Beispiel durch das Umformen von Gleichungen) eine wahre Implikation so folgt, dass auch B wahr ist. Ist dies nicht möglich (dass also gilt, wenn A wahr ist, dass

$A \Rightarrow B$ immer falsch ist), dann ist auch B falsch. So mag man Aussagen widerlegen. Schließlich sieht man, dass wenn A falsch ist und $A \Rightarrow B$ wahr ist, B wahr oder falsch sein kann. Aus einer wahren Voraussetzung folgt also nur bei wahrer Implikation eine wahre Konklusion. Insbesondere genügt die Definition der Implikation damit der Forderung “Aus Falschem folgt beliebiges (ex falso sequitur quodlibet)”. Aus falschen Aussagen kann man also mithilfe der Implikation nichts richtiges folgern.

Im Kontext der Implikation ergeben sich die Begriffe der *hinreichenden* und der *notwendigen Aussagen (Bedingungen)*. Diese sind definiert wie folgt: wenn $A \Rightarrow B$ wahr ist, sagt man “ A ist *hinreichend* für B ” und “ B ist *notwendig* für A ”. Diese Sprachregelung erklärt sich folgendermaßen. Wenn $A \Rightarrow B$ wahr ist, gilt dass, wenn A wahr ist auch B wahr ist. Die Wahrheit von A reicht also für die Wahrheit von B aus. A ist also hinreichend (ausreichend) für B . Weiterhin gilt, dass wenn $A \Rightarrow B$ wahr ist, dass wenn B falsch ist, dann auch A falsch ist. Die Wahrheit von B ist also für die Wahrheit von A notwendig.

Eine sehr häufig auftretender Zusammenhang zwischen zwei Aussagen ist ihre *Äquivalenz*.

Definition 1.6 (Äquivalenz). A und B seien Aussagen. Die *Äquivalenz von A und B* ist die Aussage, die dann und nur dann wahr ist, wenn A und B beide wahr sind oder wenn A und B beide falsch sind. Die Äquivalenz von A und B wird mit $A \Leftrightarrow B$ bezeichnet und gesprochen als “ A genau dann wenn B ” oder “ A ist äquivalent zu B ”.

•

Die Definition der Äquivalenz impliziert folgende Wahrheitstafel

A	B	$A \Leftrightarrow B$
w	w	w
w	f	f
f	w	f
f	f	w

Die Definition des Begriffes der *logischen Äquivalenz* erlaubt es unter anderem, die Äquivalenz zweier Aussagen mithilfe von Implikationen nachzuweisen.

Definition 1.7 (Logische Äquivalenz). Zwei Aussagen heißen *logisch äquivalent*, wenn ihre Wahrheitstabellen gleich sind.

•

Als Beispiele für logische Äquivalenzen, die häufig in Beweisargumentationen genutzt werden, zeigen wir folgendes Theorem.

Theorem 1.1 (Logische Äquivalenzen).

A und B seien zwei Aussagen. Dann sind folgende Aussagen logisch äquivalent

- (1) $A \Leftrightarrow B$ und $(A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow A)$
- (2) $A \Rightarrow B$ und $(\neg B) \Rightarrow (\neg A)$

◦

Beweis. Nach Definition des Begriffs der logischen Äquivalenz müssen wir zeigen, dass die Wahrheitstabellen der betrachteten Aussagen gleich sind. Wir zeigen erst (1), dann (2).

(1) Wir erinnern an die Wahrheitstafel von $A \Leftrightarrow B$:

A	B	$A \Leftrightarrow B$
w	w	w
w	f	f
f	w	f
f	f	w

Wir betrachten weiterhin die Wahrheitstafel von $(A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow A)$:

A	B	$A \Rightarrow B$	$B \Rightarrow A$	$(A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow A)$
w	w	w	w	w
w	f	f	w	f
f	w	w	f	f
f	f	w	w	w

Der Vergleich der Wahrheitstafel von $A \Leftrightarrow B$ mit den ersten beiden und der letzten Spalte der Wahrheitstafel von $(A \Rightarrow B) \wedge (B \Rightarrow A)$ zeigt ihre Gleichheit.

(2) Wir erinnern an die Wahrheitstafel von $A \Rightarrow B$:

A	B	$A \Rightarrow B$
w	w	w
w	f	f
f	w	w
f	f	w

Wir betrachten weiterhin die Wahrheitstafel von $(\neg B) \Rightarrow (\neg A)$:

A	B	$\neg B$	$\neg A$	$(\neg B) \Rightarrow (\neg A)$
w	w	f	f	w
w	f	w	f	f
f	w	f	w	w
f	f	w	w	w

Der Vergleich der Wahrheitstafel von $A \Rightarrow B$ mit den ersten beiden und der letzten Spalte der Wahrheitstafel von $(\neg B) \Rightarrow (\neg A)$ zeigt ihre Gleichheit.

□

Die erste Aussage von Theorem 1.1 besagt, dass die Aussage “ A und” B sind äquivalent” logisch äquivalent zur Aussage “Aus A folgt B ” und aus “ B folgt A ” ist. Dies ist die Grundlage für viele sogenannte *direkte Beweise* mithilfe von Äquivalenzumformungen. Die zweite Aussage von Theorem 1.1 besagt, dass die Aussage “Aus A folgt” B ” logisch äquivalent zur Aussage “Aus nicht B folgt nicht A ” ist. Dies ist die Grundlage für die Technik des *indirekten Beweises*.

1.4. Beweistechniken

Im letzten Abschnitt wollen wir mit den Begriffen der *direkten* und *indirekten Beweise* sowie des *Beweises durch Widerspruch* kurz drei Beweistechniken skizzieren, von denen vor allem die erste in diesem Text immer wieder zur Begründung von Theoremen herangezogen wird. Dabei haben typische Theoreme die Form $A \Rightarrow B$ für Aussagen A und B .

Es gilt dabei

- *Direkte Beweise* nutzen Äquivalenzumformungen, um $A \Rightarrow B$ zu zeigen.
- *Indirekte Beweise* nutzen die logische Äquivalenz von $A \Rightarrow B$ und $(\neg B) \Rightarrow (\neg A)$.
- *Beweise durch Widerspruch* zeigen, dass $(\neg B) \wedge A$ falsch ist.

Um diese Techniken an einem Beispiel zu erläutern, erinnern wir kurz an folgende *Äquivalenzumformungen von Gleichungen*:

- Addition oder Subtraktion einer Zahl auf beiden Seiten der Gleichung, zum Beispiel

$$2x + 4 = 10 \Leftrightarrow 2x = 6, \quad (1.3)$$

- Multiplikation mit einer oder Division durch eine von Null verschiedene Zahl auf beiden Seiten der Gleichung, zum Beispiel

$$2x = 6 \Leftrightarrow x = 3, \quad (1.4)$$

- Anwendung einer injektiven Funktion auf beiden Seiten der Gleichung, zum Beispiel

$$\exp(x) = 2 \Leftrightarrow x = \ln(2), \quad (1.5)$$

sowie an folgende elementaren *Äquivalenzumformungen von Ungleichungen*:

- Addition oder Subtraktion einer Zahl auf beiden Seiten der Ungleichung, zum Beispiel

$$-2x + 4 \geq 10 \Leftrightarrow -2x \geq 6, \quad (1.6)$$

- Multiplikation mit einer Zahl oder Division durch eine von Null verschiedene Zahl auf beiden Seiten der Ungleichung, wobei die Multiplikation oder Division mit einer negativen Zahl die Umkehrung der Ungleichung impliziert, zum Beispiel

$$-2x \geq 6 \Leftrightarrow x \leq -3, \quad (1.7)$$

- Anwendung monotoner Funktionen auf beiden Seiten der Ungleichung

$$\exp(x) \geq 2 \Leftrightarrow x \geq \ln(2). \quad (1.8)$$

Damit ausgestattet wollen wir nun folgendes Theorem mithilfe eines direkten Beweises, eines indirekten Beweises und eines Beweises durch Widerspruch beweisen (vgl. Arens et al. (2018)).

Theorem 1.2 (Quadrate positiver Zahlen). *Es seien a und b zwei positive Zahlen. Dann gilt $a^2 < b^2 \Rightarrow a < b$.*

◦

Beweis. Wir geben zunächst einen *direkten Beweis*. Dazu sei $a^2 < b^2$ die Aussage A und $a < b$ die Aussage B . Dann gilt

$$a^2 < b^2 \Leftrightarrow 0 < b^2 - a^2 \Leftrightarrow 0 < (b + a)(b - a) \Leftrightarrow 0 < (b - a) \Leftrightarrow a < b. \quad (1.9)$$

Wir geben nun einen *indirekten Beweis*. Es sei $a^2 \geq b^2$ die Aussage $\neg A$. Weiterhin sei $a \geq b$ die Aussage $\neg B$. Dann gilt

$$a \geq b \Leftrightarrow a^2 \geq ab \wedge ab \geq b^2 \Leftrightarrow a^2 \geq b^2. \quad (1.10)$$

Schließlich geben wir einen *Beweis durch Widerspruch*. Wir zeigen, dazu, dass die Annahme $(\neg B) \wedge A$ auf eine falsche Aussage führt. Es gilt

$$a \geq b \wedge a^2 < b^2 \Leftrightarrow a^2 \geq ab \wedge a^2 < b^2 \Leftrightarrow ab \leq a^2 < b^2. \quad (1.11)$$

Weiterhin gilt

$$a \geq b \wedge a^2 < b^2 \Leftrightarrow ab \geq b^2 \wedge a^2 < b^2 \Leftrightarrow a^2 < b^2 \leq ab. \quad (1.12)$$

Insgesamt gilt dann also die falsche Aussage

$$ab \leq a^2 < b^2 \leq ab \Leftrightarrow ab < ab. \quad (1.13)$$

□

1.5. Selbstkontrollfragen

1. Erläutern Sie die Besonderheiten der mathematischen Sprache.
2. Was sind wesentliche Tätigkeiten zum Erlernen einer Sprache?
3. Erläutern Sie den Begriff der Definition.
4. Erläutern Sie den Begriff des Theorems.
5. Erläutern Sie den Begriff des Beweises.
6. Geben Sie die Definition einer mathematischen Aussage wieder.
7. Geben Sie die Definition der Negation einer mathematischen Aussage wieder.
8. Geben Sie die Definition der Konjunktion zweier mathematischer Aussagen wieder.
9. Geben Sie die Definition der Disjunktion zweier mathematischer Aussagen wieder.
10. Geben Sie die Definition der Implikation wieder.
11. Geben Sie die Definition der Äquivalenz wieder.
12. Geben Sie die Definition der logischen Äquivalenz wieder.
13. Erläutern Sie die Begriffe des direkten Beweises, des indirekten Beweises und des Beweises durch Widerspruch.

2. Mengen

2.1. Grundlegende Definitionen

Mengen fassen mathematische Objekte wie beispielsweise Zahlen zusammen und bilden die Grundlage der modernen Mathematik. Wir beginnen mit folgender Definition.

Definition 2.1 (Mengen). Nach Cantor (1895) ist eine *Menge* definiert als “eine Zusammenfassung M von bestimmten wohlunterschiedenen Objekten m unsere Anschauung oder unseres Denken (welche die Elemente der Menge genannt werden) zu einem Ganzen”. Wir schreiben

$$m \in M \text{ bzw. } m \notin M \quad (2.1)$$

um auszudrücken, dass m ein Element bzw. kein Element von M ist.

•

Zur Definition von Mengen gibt es mindestens folgende Möglichkeiten:

- Auflisten der Elemente in geschweiften Klammern, z.B. $M := \{1, 2, 3\}$.
- Angabe der Eigenschaften der Elemente, z.B. $M := \{x \in \mathbb{N} | x < 4\}$.
- Gleichsetzen mit einer anderen eindeutig definierten Menge, z.B. $M := \mathbb{N}_3$.

Die Schreibweise $\{x \in \mathbb{N} | x < 4\}$ wird gelesen als “ $x \in \mathbb{N}$, für die gilt, dass $x < 4$ ist”, wobei die Bedeutung von \mathbb{N} im Folgenden noch zu erläutern sein wird. Es ist wichtig zu erkennen, dass Mengen *ungeordnete* mathematische Objekte sind, dass heißt die Reihenfolge der Auflistung der Elemente einer Menge spielt keine Rolle. Zum Beispiel bezeichnen $\{1, 2, 3\}$, $\{1, 3, 2\}$ und $\{2, 3, 1\}$ dieselbe Menge, nämlich die Menge der ersten drei natürlichen Zahlen.

Grundlegende Beziehungen zwischen mehreren Mengen werden in der nächsten Definition festgelegt.

Definition 2.2 (Teilmengen und Mengengleichheit). A und B seien zwei Mengen.

- Eine Menge A heißt *Teilmenge* einer Menge B , wenn für jedes Element $a \in A$ gilt, dass auch $a \in B$. Ist A eine Teilmenge von B , so schreibt man

$$A \subseteq B \quad (2.2)$$

und nennt A *Untermenge* von B und B *Obermenge* von A .

- Eine Menge A heißt *echte Teilmenge* einer Menge B , wenn für jedes Element $a \in A$ gilt, dass auch $a \in B$, es aber zumindest ein Element $b \in B$ gibt, für das gilt $b \notin A$. Ist A eine echte Teilmenge von B , so schreibt man

$$A \subset B. \quad (2.3)$$

- Zwei Mengen A und B heißen *gleich*, wenn für jedes Element $a \in A$ gilt, dass auch $a \in B$, und wenn für jedes Element $b \in B$ gilt, dass auch $b \in A$. Sind die Mengen A und B gleich, so schreibt man

$$A = B. \quad (2.4)$$

•

Betrachten wir zum Beispiel die Mengen $A := \{1\}$, $B := \{1, 2\}$, und $C := \{1, 2\}$. Dann gilt mit obigen Definitionen, dass $A \subset B$, weil $1 \in A$ und $1 \in B$, aber $2 \in B$ und $2 \notin A$. Weiterhin gilt, dass $B \subseteq C$, weil $1 \in B$ und $1 \in C$ sowie $2 \in B$ und $2 \in C$ und es kein Element von C gibt, welches nicht in B ist. Ebenso gilt $C \subseteq B$, weil $1 \in C$ und $1 \in B$ sowie $2 \in C$ und $2 \in B$ und es kein Element von B gibt, welches nicht in C ist. Schließlich gilt sogar $B = C$, weil für jedes Element $b \in B$ gilt, dass auch $b \in C$, und gleichzeitig für jedes Element $c \in C$ gilt, dass auch $c \in B$.

Eine wichtige Eigenschaft einer Menge ist die Anzahl der in ihr enthaltenen Elemente. Diese wird als *Kardinalität* der Menge bezeichnet.

Definition 2.3 (Kardinalität). Die Anzahl der Elemente einer Menge M heißt *Kardinalität* und wird mit $|M|$ bezeichnet.

•

Eine besondere Menge ist die Menge ohne Elemente.

Definition 2.4. Eine Menge mit Kardinalität Null heißt *leere Menge* und wird mit \emptyset bezeichnet.

•

Als Beispiele seien $A := \{1, 2, 3\}$, $B = \{a, b, c, d\}$ und $C := \{ \}$. Dann gelten $|A| = 3$, $|B| = 4$ und $|C| = 0$.

Zu jeder Menge kann man die Menge aller Teilmengen dieser Menge betrachten. Dies führt auf den wichtigen Begriff der *Potenzmenge*.

Definition 2.5 (Potenzmenge). Die Menge aller Teilmengen einer Menge M heißt *Potenzmenge von M* und wird mit $\mathcal{P}(M)$ bezeichnet.

•

Man beachte, dass die leere Untermenge von M und M selbst auch immer Elemente von $\mathcal{P}(M)$ sind. Wir betrachten vier Beispiele zum Begriff der Potenzmenge.

- $M_0 := \emptyset$ sei die leere Menge. Dann gilt

$$\mathcal{P}(M_0) = \emptyset. \quad (2.5)$$

- M_1 sei die einelementige Menge $M_1 := \{a\}$. Dann gilt

$$\mathcal{P}(M_1) = \{\emptyset, \{a\}\}. \quad (2.6)$$

- Es sei $M_2 := \{a, b\}$. Dann hat M_2 sowohl ein- als auch zweielementige Teilmengen und es gilt

$$\mathcal{P}(M_2) = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{a, b\}\}. \quad (2.7)$$

- Schließlich sei $M_3 := \{a, b, c\}$. Dann hat M ein-, zwei-, als auch dreielementige Teilmengen und es gilt

$$\mathcal{P}(M_3) = \{\emptyset, \{a\}, \{b\}, \{c\}, \{a, b\}, \{a, c\}, \{b, c\}, \{a, b, c\}\}. \quad (2.8)$$

Hinsichtlich der Kardinalitäten einer Menge und ihrer Potenzmenge kann man beweisen, dass aus $|M| = n$ mit $n > 0$ folgt, dass die Kardinalität der Potenzmenge $|\mathcal{P}(M)| = 2^n$ ist. In den obigen Beispielen haben wir die Fälle $|M_1| = 1$ und somit $|\mathcal{P}(M_1)| = 2^1 = 2$, $|M_2| = 2$ und somit $|\mathcal{P}(M_2)| = 2^2 = 4$ und schließlich $|M_3| = 3$ und somit $|\mathcal{P}(M_3)| = 2^3 = 8$, wovon man sich durch Nachzählen schnell überzeugt.

2.2. Verknüpfungen von Mengen

Zwei Mengen können auf unterschiedliche Weise miteinander verknüpft werden. Das Ergebnis einer solchen Verknüpfung ist eine weitere Menge. Wir bezeichnen die Verknüpfung zweier Mengen als *Mengenoperation* und geben folgende Definitionen.

Definition 2.6 (Mengenoperationen). M und N seien zwei Mengen.

- Die *Vereinigung von M und N* ist definiert als die Menge

$$M \cup N := \{x | x \in M \vee x \in N\}, \quad (2.9)$$

wobei \vee wie immer im inklusiven Sinne als und/oder zu verstehen ist.

- Der *Durchschnitt von M und N* ist definiert als die Menge

$$M \cap N := \{x | x \in M \wedge x \in N\}. \quad (2.10)$$

Wenn für M und N gilt, dass $M \cap N = \emptyset$, dann heißen M und N *disjunkt*.

- Die *Differenz von M und N* ist definiert als die Menge

$$M \setminus N := \{x | x \in M \wedge x \notin N\}. \quad (2.11)$$

Die Differenz M und N heißt, insbesondere bei $M \subseteq N$, auch das *Komplement von N bezüglich M* und wird mit N^c bezeichnet.

- Die *symmetrische Differenz von M und N* ist definiert als die Menge

$$M \Delta N := \{x | (x \in M \vee x \in N) \wedge x \notin M \cap N\}, \quad (2.12)$$

Die symmetrische Differenz kann also als *exklusives oder* verstanden werden.

•

Als Beispiel betrachten wir die Mengen $M := \{1, 2, 3\}$ und $N := \{2, 3, 4, 5\}$. Dann gelten

- $M \cup N = \{1, 2, 3, 4, 5\}$, weil $1 \in M$, $2 \in M$, $3 \in M$, $4 \in N$ und $5 \in N$.
- $M \cap N = \{2, 3\}$, weil nur für 2 und 3 gilt, dass $2 \in M$, $3 \in M$ und auch $2 \in N$, $3 \in N$. Für 1 gilt lediglich, dass $1 \in M$ und für 4 und 5 gelten lediglich, dass $4 \in N$ und $5 \in N$.
- $M \setminus N = \{1\}$, weil $1 \in M$, aber $1 \notin N$ und $2 \in M$, aber auch $2 \in N$.
- $N \setminus M = \{4, 5\}$, weil $2 \in N$ und $3 \in N$, aber auch $2 \in M$ und $3 \in M$. Dies zeigt insbesondere, dass die Differenz von M und N *nicht* symmetrisch ist, also dass *nicht* zwangsläufig gilt, dass $M \setminus N$ gleich $N \setminus M$ ist.
- $M \Delta N = \{1, 4, 5\}$, weil $1 \in M$, aber $1 \notin \{2, 3\}$, $2 \in M$, aber $2 \in \{2, 3\}$, $3 \in M$, aber $3 \in \{2, 3\}$, $4 \in N$, aber $4 \notin \{2, 3\}$ und $5 \in N$, aber $5 \notin \{2, 3\}$.

Schließlich wollen wir noch den Begriff der Partition einer Menge einführen.

Definition 2.7 (Partition). M sei eine Menge und $P := \{N_i\}$ sei eine Menge von Mengen N_i mit $i = 1, \dots, n$, so dass gilt

$$M = \bigcup_{i=1}^n N_i \wedge N_i \cap N_j = \emptyset \text{ für } i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n, i \neq j. \quad (2.13)$$

Dann heißt P eine *Partition von M* .

•

Intuitiv entspricht die Partition einer Menge also dem Aufteilen der Menge in disjunkte Teilmengen. Partitionen sind generell nicht eindeutig, d.h. es gibt meist verschiedene Möglichkeiten eine gegebene Menge zu partitionieren. Betrachten wir zum Beispiel die Menge $M := \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$. Dann sind $P_1 := \{\{1\}, \{2, 3, 4, 5, 6\}\}$, $P_2 := \{\{1, 2, 3\}, \{4, 5, 6\}\}$ und $P_3 := \{\{1, 2\}, \{3, 4\}, \{5, 6\}\}$ drei mögliche Partitionen von M .

2.3. Spezielle Mengen

In der Naturwissenschaft versucht man, Phänomene der Welt mit Zahlen zu beschreiben. Je nach Phänomen bieten sich dazu *diskrete* oder *kontinuierliche* Zahlenmengen an. Die Mathematik stellt dazu unter anderem die in folgender Definition gegebenen Zahlenmengen bereit.

Definition 2.8 (Zahlenmengen). Es bezeichnen

- $\mathbb{N} := \{1, 2, 3, \dots\}$ die *natürlichen Zahlen*,
- $\mathbb{N}_n := \{1, 2, 3, \dots, n\}$ die *natürlichen Zahlen der Ordnung n* ,
- $\mathbb{N}^0 := \mathbb{N} \cup \{0\}$ die *natürlichen Zahlen* und Null,
- $\mathbb{Z} := \{\dots, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$ die *ganzen Zahlen*,
- $\mathbb{Q} := \{\frac{p}{q} | p, q \in \mathbb{Z}, q \neq 0\}$ die *rationalen Zahlen*,
- \mathbb{R} die *reellen Zahlen*, und
- $\mathbb{C} := \{a + ib | a, b \in \mathbb{R}, i := \sqrt{-1}\}$ die *komplexen Zahlen*.

•

Die natürlichen und ganzen Zahlen eignen sich insbesondere zum Quantifizieren diskreter Phänomene. Die rationalen und insbesondere die reellen Zahlen eignen sich zum Quantifizieren kontinuierlicher Phänomene. \mathbb{R} umfasst dabei die rationalen Zahlen und die sogenannten *irrationalen Zahlen* $\mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$. Rationale Zahlen sind Zahlen, die sich, wie oben definiert, durch Brüche ganzer Zahlen ausdrücken lassen. Dies sind alle ganzen Zahlen sowie die negativen und positiven Dezimalzahlen wie z.B. $-\frac{9}{10} = -0.9$, $\frac{1}{3} = 1.3\bar{3}$, und $\frac{196}{100} = 1.96$. Irrationale Zahlen sind Zahlen, die sich nicht als rationale Zahlen ausdrücken lassen. Beispiele für irrationale Zahlen sind die *Eulersche Zahl* $e \approx 2.71$, die *Kreiszahl* $\pi \approx 3.14$ und die Quadratwurzel von 2, $\sqrt{2} \approx 1.41$.

Die reellen Zahlen enthalten als Teilmengen die natürlichen, ganzen, und die rationalen Zahlen. Es gibt also sehr viele reelle Zahlen. Tatsächlich kann man beweisen (Cantor (1892)), dass es mehr reelle Zahlen als natürliche Zahlen gibt, obwohl es sowohl unendlich viele reelle Zahlen als auch unendlich viele natürliche Zahlen gibt. Diese Eigenschaft der reellen Zahlen bezeichnet man als die *Überabzählbarkeit* der reellen Zahlen. Insbesondere gilt

$$\mathbb{N} \subset \mathbb{Z} \subset \mathbb{Q} \subset \mathbb{R}. \quad (2.14)$$

Zwischen zwei reellen Zahlen gibt es unendlich viele weitere reelle Zahlen. Positiv-Unendlich (∞) und Negativ-Unendlich ($-\infty$) sind keine Zahlen, mit denen in der Standardmathematik gerechnet werden kann. Sie gehören auch nicht zu den in obiger Definition gegebenen Zahlenmengen, es gilt also sowohl $\infty \notin \mathbb{R}$ als auch $-\infty \notin \mathbb{R}$.

Komplexe Zahlen eignen sich zur Beschreibung zweidimensionaler kontinuierlicher Phänomene. Dabei werden die Werte der ersten Dimension im reellen Teil a und die Werte der zweiten Dimension im komplexen Teil b einer komplexen Zahl repräsentiert. Komplexe Zahlen kommen insbesondere bei der Modellierung physikalischer Phänomene und im Bereich der Fourieranalyse zum Einsatz. Wir vertiefen die Theorie komplexer Zahlen an dieser Stelle nicht.

Wichtige Teilmengen der reellen Zahlen sind die sogenannten *Intervalle*. Wir geben folgende Definitionen.

Definition 2.9. Zusammenhängende Teilmengen der reellen Zahlen heißen *Intervalle*. Für $a, b \in \mathbb{R}$ unterscheidet man

- das *abgeschlossene Intervall*

$$[a, b] := \{x \in \mathbb{R} | a \leq x \leq b\}, \quad (2.15)$$

- das *offene Intervall*

$$]a, b[:= \{x \in \mathbb{R} | a < x < b\}, \quad (2.16)$$

- und die *halboffenen Intervalle*

$$]a, b] := \{x \in \mathbb{R} | a < x \leq b\} \text{ und } [a, b[:= \{x \in \mathbb{R} | a \leq x < b\}. \quad (2.17)$$

•

Wie oben erwähnt sind Positiv-Unendlich (∞) und Negativ-Unendlich ($-\infty$) keine Elemente von \mathbb{R} . Es gilt also immer $] - \infty, b]$ oder $] - \infty, b[$ bzw. $]a, \infty[$ oder $[a, \infty[$, sowie $\mathbb{R} =] - \infty, \infty[$.

Oft möchte man mehrere Eigenschaften eines Phänomens gleichzeitig quantitativ beschreiben. Zu diesem Zweck können die oben definierten eindimensionalen Zahlenmenge durch Bildung *Kartesischer Produkte* auf mehrdimensionale Zahlenmengen erweitert werden. Die Elemente Kartesischer Produkte nennt man *geordnete Tupel* oder auch *Vektoren*.

Definition 2.10 (Kartesische Produkte). M und N seien zwei Mengen. Dann ist das *Kartesische Produkt der Mengen M und N* die Menge aller geordneten Tupel (m, n) mit $m \in M$ und $n \in N$, formal

$$M \times N := \{(m, n) | m \in M, n \in N\}. \quad (2.18)$$

Das Kartesische Produkt einer Menge M mit sich selbst wird bezeichnet mit

$$M^2 := M \times M. \quad (2.19)$$

Seien weiterhin M_1, M_2, \dots, M_n Mengen. Dann ist das *Kartesische Produkt der Mengen M_1, \dots, M_n* die Menge aller geordneten n -Tupel (m_1, \dots, m_n) mit $m_i \in M_i$ für $i = 1, \dots, n$, formal

$$\prod_{i=1}^n M_i := M_1 \times \dots \times M_n := \{(m_1, \dots, m_n) | m_i \in M_i \text{ für } i = 1, \dots, n\}. \quad (2.20)$$

Das n -fache Kartesische Produkt einer Menge M mit sich selbst wird bezeichnet mit

$$M^n := \prod_{i=1}^n M := \{(m_1, \dots, m_n) | m_i \in M\}. \quad (2.21)$$

•

Im Gegensatz zu Mengen sind die in Definition 2.10 eingeführten Tupel *geordnet*. Das heißt, für Mengen gilt zum Beispiel $\{1, 2\} = \{2, 1\}$, aber für Tupel gilt $(1, 2) \neq (2, 1)$.

Wie oben beschrieben eignen sich insbesondere die reellen Zahlen zur Beschreibung kontinuierlicher Phänomene. Zur simultanen Beschreibung mehrere Aspekte eines kontinuierlichen Phänomens bietet sich entsprechend die *Menge der reellen Tupel n -ter Ordnung* an.

Definition 2.11 (Menge der reellen Tupel n -ter Ordnung). Das n -fache Kartesische Produkt der reellen Zahlen mit sich selbst wird bezeichnet mit

$$\mathbb{R}^n := \prod_{i=1}^n \mathbb{R} := \{x := (x_1, \dots, x_n) | x_i \in \mathbb{R}\} \quad (2.22)$$

und wird “ \mathbb{R} hoch n ” gesprochen. Wir schreiben die Elemente von \mathbb{R}^n als Spalten

$$x := \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

und nennen sie *n -dimensionale Vektoren*. Zu Abgrenzung nennen wir die Elemente von $\mathbb{R}^1 = \mathbb{R}$ auch *Skalare*.

•

Ein Beispiel für $x \in \mathbb{R}^4$ ist

$$x = \begin{pmatrix} 0.16 \\ 1.76 \\ 0.23 \\ 7.11 \end{pmatrix}. \quad (2.24)$$

2.4. Selbstkontrollfragen

1. Geben Sie die Definition einer Menge nach Cantor (1895) wieder.
2. Nennen Sie drei Möglichkeiten zur Definition einer Menge.
3. Erläutern Sie die Ausdrücke $m \in M$, $m \notin N$, $M \subseteq N$, $M \subset N$ für zwei Mengen M und N .
4. Geben Sie die Definition der Kardinalität einer Menge wieder.
5. Geben Sie die Definition der Potenzmenge einer Menge wieder.
6. Es sei $M := \{1, 2\}$. Bestimmen Sie $\mathcal{P}(M)$.
7. Es seien $M := \{1, 2\}$, $N := \{1, 4, 5\}$. Bestimmen Sie $M \cup N$, $M \cap N$, $M \setminus N$, $M \Delta N$.
8. Erläutern Sie die Symbole \mathbb{N} , \mathbb{N}_n , und \mathbb{N}^0 .
9. Erläutern Sie die Unterschiede zwischen \mathbb{N} und \mathbb{Z} und zwischen \mathbb{R} und \mathbb{Q} .
10. Geben Sie die Definition abgeschlossener, offener, und halboffener Intervalle wieder.
11. Es seien M und N Mengen. Erläutern Sie die Notation $M \times N$.
12. Geben Sie die Definition von \mathbb{R}^n wieder.

3. Summen, Produkte, Potenzen

3.1. Summen

Diese Einheit führt einige Schreibweisen für die Grundrechenarten ein.

Definition 3.1 (Summenzeichen). Es bezeichnet

$$\sum_{i=1}^n x_i = x_1 + x_2 + \cdots + x_n. \quad (3.1)$$

Dabei stehen

- Σ für das griechische *Sigma*, mnemonisch für *Summe*,
- das Subskript $i = 1$ für den *Laufindex* und den *Startindex*,
- das Superskript n für den *Endindex* und
- x_1, x_2, \dots, x_n für die *Summanden*.

•

Für die sinnvolle Benutzung des Summenzeichens ist es essentiell, dass mit mithilfe des Subskripts und des Superskripts Anfang und Ende der Summation festgelegt werden. Die genaue Bezeichnung des Laufindex ist dagegen für den Wert der Summe irrelevant, es gilt

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{j=1}^n x_j. \quad (3.2)$$

Manchmal wird der Laufindex auch als Element einer *Indexmenge* angegeben. Ist z.B. die Indexmenge $I := \{1, 5, 7\}$ definiert, so ist

$$\sum_{i \in I} x_i := x_1 + x_5 + x_7. \quad (3.3)$$

Im Folgenden wollen wir kurz einige Beispiele für die Benutzung des Summenzeichens betrachten.

- *Summation vordefinierter Summanden*. Es seien $x_1 := 2$, $x_2 := 10$, $x_3 := -4$. Dann gilt

$$\sum_{i=1}^3 x_i = x_1 + x_2 + x_3 = 2 + 10 - 4 = 8. \quad (3.4)$$

- *Summation natürlicher Zahlen*. Es gilt

$$\sum_{i=1}^5 i = 1 + 2 + 3 + 4 + 5 = 15. \quad (3.5)$$

- *Summation gerader natürlicher Zahlen.* Es gilt

$$\sum_{i=1}^5 2i = 2 \cdot 1 + 2 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + 2 \cdot 4 + 2 \cdot 5 = 2 + 4 + 6 + 8 + 10 = 30. \quad (3.6)$$

- *Summation ungerader natürlicher Zahlen.* Es gilt

$$\sum_{i=1}^5 (2i-1) = 2 \cdot 1 - 1 + 2 \cdot 2 - 1 + 2 \cdot 3 - 1 + 2 \cdot 4 - 1 + 2 \cdot 5 - 1 = 1 + 3 + 5 + 7 + 9 = 25. \quad (3.7)$$

Der Umgang mit dem Summenzeichen wird oft durch die Anwendung folgender Rechenregeln vereinfacht.

Theorem 3.1 (Rechenregeln für Summen).

- (1) *Summen gleicher Summanden*

$$\sum_{i=1}^n x = nx \quad (3.8)$$

- (2) *Assoziativität bei Summen gleicher Länge*

$$\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n (x_i + y_i) \quad (3.9)$$

- (3) *Distributivität bei Multiplikation mit einer Konstante*

$$\sum_{i=1}^n ax_i = a \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.10)$$

- (4) *Aufspalten von Summen mit $1 < m < n$*

$$\sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^m x_i + \sum_{i=m+1}^n x_i \quad (3.11)$$

- (5) *Umindizierung*

$$\sum_{i=0}^n x_i = \sum_{j=m}^{n+m} x_{j-m} \quad (3.12)$$

◦

Beweis. Man überzeugt sich von diesen Rechenregeln durch Ausschreiben der Summen und Anwenden der Rechenregeln von Addition und Multiplikation. Wir zeigen hier exemplarisch die Assoziativität bei Summen gleicher Länge und die Distributivität bei Multiplikation mit einer Konstante. Hinsichtlich ersterer haben wir

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n x_i + \sum_{i=1}^n y_i &= x_1 + x_2 + \cdots + x_n + y_1 + y_2 + \cdots + y_n \\ &= x_1 + y_1 + x_2 + y_2 + \cdots + x_n + y_n \\ &= \sum_{i=1}^n (x_i + y_i). \end{aligned} \quad (3.13)$$

Hinsichtlich letzterer gilt

$$\begin{aligned}\sum_{i=1}^n ax_i &= ax_1 + ax_2 + \cdots + ax_n \\ &= a(x_1 + x_2 + \cdots + x_n) \\ &= a \sum_{i=1}^n x_i.\end{aligned}\tag{3.14}$$

□

Als Beispiel für die Anwendung einer Rechenregel betrachten wir die Auswertung eines *Mittelwertes* (manchmal auch *Durchschnitt* genannt). Dazu seien x_1, x_2, \dots, x_n reelle Zahlen. Der Mittelwert dieser Zahlen entspricht der Summe von x_1, x_2, \dots, x_n geteilt durch die Anzahl der Zahlen n . Dabei ist es nach obiger Rechenregel (3) irrelevant, ob zunächst die Zahlen aufaddiert werden und dann die resultierende Summe durch n geteilt wird, oder die Zahlen jeweils einzeln durch n geteilt werden und die entsprechenden Ergebnisse dann aufaddiert werden. Genauer gilt durch Anwendung von Rechenregel (3) mit $a = 1/n$, dass

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n}.\tag{3.15}$$

So ist zum Beispiel der Mittelwert von $x_1 := 1, x_2 := 4, x_3 := 2, x_4 := 1$ gegeben durch

$$\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i = \frac{1}{4}(1 + 4 + 2 + 1) = \frac{8}{4} = 2 = \frac{8}{4} = \frac{1}{4} + \frac{4}{4} + \frac{2}{4} + \frac{1}{4} = \sum_{i=1}^4 \frac{x_i}{4}.\tag{3.16}$$

3.2. Produkte

Eine analoge Schreibweise zum Summenzeichen bietet das Produktzeichen für Produkte.

Definition 3.2 (Produktzeichen). Es bezeichnet

$$\prod_{i=1}^n x_i = x_1 \cdot x_2 \cdot \cdots \cdot x_n.\tag{3.17}$$

Dabei stehen

- \prod für das griechische *Pi*, mnemonisch für *Produkt*,
- das Subskript $i = 1$ für den *Laufindex* und den *Startindex*,
- das Superskript n für den *Endindex*,
- x_1, x_2, \dots, x_n für die *Produktterme*

•

Analog zum Summenzeichen gilt, dass das Produktzeichen nur mit Subskript und Superskripten zu Lauf- und Endindex Sinn ergibt. Die genaue Bezeichnung des Laufindex ist wiederum irrelevant, es gilt

$$\prod_{i=1}^n x_i = \prod_{j=1}^n x_j.\tag{3.18}$$

Auch hier wird in seltenen Fällen der Laufindex als Element einer Indexmenge angegeben. Ist z.B. die Indexmenge $J := \mathbb{N}_2^0$ definiert, so ist

$$\prod_{j \in J} x_j := x_0 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (3.19)$$

3.3. Potenzen

Produkte von Zahlen mit sich selbst können mithilfe der Potenzschreibweise abgekürzt werden.

Definition 3.3 (Potenz). Für $a \in \mathbb{R}$ und $n \in \mathbb{N}^0$ ist die n -te Potenz von a definiert durch

$$a^0 := 1 \text{ und } a^{n+1} := a^n \cdot a. \quad (3.20)$$

Weiterhin ist für $a \in \mathbb{R} \setminus 0$ und $n \in \mathbb{N}^0$ die negative n -te Potenz von a definiert durch

$$a^{-n} := (a^n)^{-1} := \frac{1}{a^n}. \quad (3.21)$$

a wird dabei *Basis* und n wird *Exponent* genannt.

•

Die Art der Definition von a^{n+1} mit Rückbezug auf die Potenz a^n in obiger Definition nennt man *rekursiv*. Die Definition $a^0 := 1$ nennt man dabei den *Rekursionsanfang*; er macht die rekursive Definition von a^{n+1} erst möglich. Die Definition $a^{n+1} := a^n \cdot a$ nennt man auch *Rekursionsschritt*. Folgende Rechenregeln vereinfachen das Rechnen mit Potenzen.

Theorem 3.2 (Rechenregeln für Potenzen). Für $a, b \in \mathbb{R}$ und $n, m \in \mathbb{Z}$ mit $a \neq 0$ bei negativen Exponenten gelten folgende Rechenregeln:

$$a^n a^m = a^{n+m} \quad (3.22)$$

$$(a^n)^m = a^{nm} \quad (3.23)$$

$$(ab)^n = a^n b^n \quad (3.24)$$

◦

Wir verzichten auf einen Beweis. Beispielsweise gelten also

$$2^2 \cdot 2^3 = (2 \cdot 2) \cdot (2 \cdot 2 \cdot 2) = 2^5 = 2^{2+3}, \quad (3.25)$$

$$(3^2)^3 = (3 \cdot 3)^3 = (3 \cdot 3) \cdot (3 \cdot 3) \cdot (3 \cdot 3) = 3^6 = 3^{2 \cdot 3}, \quad (3.26)$$

und

$$(2 \cdot 4)^2 = (2 \cdot 4) \cdot (2 \cdot 4) = (2 \cdot 2) \cdot (4 \cdot 4) = 2^2 \cdot 4^2. \quad (3.27)$$

In enger Beziehung zur Potenz steht die Definition der n ten Wurzel:

Definition 3.4 (*n*-te Wurzel). Für $a \in \mathbb{R}$ und $n \in \mathbb{N}$ ist die *n*-te Wurzel von a definiert als die Zahl r , so dass

$$r^n = a. \quad (3.28)$$

•

Beim Rechnen mit Wurzeln ist die Potenzschreibweise von Wurzeln oft hilfreich, da sie die direkte Anwendung der Rechenregeln für Potenzen ermöglicht.

Theorem 3.3 (Potenzschreibweise der *n*-ten Wurzel). Es sei $a \in \mathbb{R}$, $n \in \mathbb{N}$, und r die *n*-te Wurzel von a . Dann gilt

$$r = a^{\frac{1}{n}} \quad (3.29)$$

◦

Beweis. Es gilt

$$\left(a^{\frac{1}{n}}\right)^n = a^{\frac{1}{n}} \cdot a^{\frac{1}{n}} \cdot \dots \cdot a^{\frac{1}{n}} = a^{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n}} = a^1 = a. \quad (3.30)$$

Also gilt mit der Definition der *n*-ten Wurzel, dass $r = a^{\frac{1}{n}}$.

□

Das Rechnen mit Quadratwurzeln wird durch die Potenzschreibweise $\sqrt{x} = x^{\frac{1}{2}}$ sehr erleichtert. Zum Beispiel gilt

$$\frac{2\pi}{\sqrt{2\pi}} = \frac{2\pi}{(2\pi)^{\frac{1}{2}}} = (2\pi)^1 \cdot (2\pi)^{-\frac{1}{2}} = (2\pi)^{1-\frac{1}{2}} = (2\pi)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{2\pi}. \quad (3.31)$$

3.4. Selbstkontrollfragen

1. Geben Sie die Definition des Summenzeichens wieder.
2. Berechnen Sie die Summen $\sum_{i=1}^3 2$, $\sum_{i=1}^3 i^2$, und $\sum_{i=1}^3 \frac{2}{3}i$.
3. Schreiben Sie die Summe $1 + 3 + 5 + 7 + 9 + 11$ mithilfe des Summenzeichens.
4. Schreiben Sie die Summe $0 + 2 + 4 + 6 + 8 + 10$ mithilfe des Summenzeichens.
5. Geben Sie die Definition des Produktzeichens wieder.
6. Geben Sie die Definition der *n*-ten Potenz von $a \in \mathbb{R}$ wieder.
7. Berechnen Sie $2^2 \cdot 2^3$ und 2^5 und geben Sie die zugehörige Potenzregel wieder.
8. Berechnen Sie 6^2 und $2^2 \cdot 3^2$ und geben Sie die zugehörige Potenzregel wieder.
9. Begründen Sie, warum die *n*-te Wurzel von a als $a^{\frac{1}{n}}$ geschrieben werden kann.
10. Berechnen Sie $(\sqrt{2})^{\frac{2}{3}}$, $9^{\frac{1}{2}}$, und $4^{-\frac{1}{2}}$.

4. Funktionen

Funktionen bilden zusammen mit den Mengen die Grundpfeiler mathematischer Modellierung. In dieser Einheit definieren wir den Begriff der Funktion, führen erste Eigenschaften von Funktionen ein und geben eine Übersicht über einige elementare Funktionen. Funktionen werden äquivalent auch als Abbildungen bezeichnet.

4.1. Definition und Eigenschaften

Definition 4.1 (Funktion). Eine *Funktion* oder *Abbildung* f ist eine Zuordnungsvorschrift, die jedem Element einer Menge D genau ein Element einer Zielmenge Z zuordnet. D wird dabei *Definitionsmenge* von f und Z wird *Zielmenge* von f genannt. Wir schreiben

$$f : D \rightarrow Z, x \mapsto f(x), \quad (4.1)$$

wobei $f : D \rightarrow Z$ gelesen wird als “die Funktion f bildet alle Elemente der Menge D eindeutig auf Elemente in Z ab” und $x \mapsto f(x)$ gelesen wird als “ x , welches ein Element von D ist, wird durch die Funktion f auf $f(x)$ abgebildet, wobei $f(x)$ ein Element von Z ist”. Der Pfeil \rightarrow steht für die Abbildung zwischen den Mengen D und Z , der Pfeil \mapsto steht für die Abbildung zwischen einem Element von D und einem Element von Z .

•

Es ist zentral, zwischen der *Funktion* f als Zuordnungsvorschrift und einem *Wert der Funktion* $f(x)$ als Element von Z zu unterscheiden. x ist das *Argument* der Funktion (der *Input* der Funktion), $f(x)$ der Wert, den die Funktion f für das Argument x annimmt (der *Output* der Funktion). Üblicherweise folgt in der Definition einer Funktion $f(x)$ die Definition der *funktionalen Form von f* , also einer Regel, wie aus x der Wert $f(x)$ zu bilden ist. Zum Beispiel wird in folgender Definition einer Funktion

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}_{\geq 0}, x \mapsto f(x) := x^2 \quad (4.2)$$

die Definition der Potenz genutzt.

Funktionen sind immer *eindeutig*, in dem Sinne dass sie jedem $x \in D$ bei jeder Anwendung der Funktion immer dasselbe $f(x) \in Z$ zuordnen. Funktionen setzen dabei Elemente von Mengen miteinander in Beziehung. Die Mengen dieser Elemente erhalten spezielle Bezeichnungen.

Definition 4.2 (Bildmenge und Urbildmenge). Es sei $f : D \rightarrow Z, x \mapsto f(x)$ eine Funktion und es seien $D' \subseteq D$ und $Z' \subseteq Z$. Die Menge

$$f(D') := \{z \in Z \mid \text{Es gibt ein } x \in D' \text{ mit } z = f(x)\} \quad (4.3)$$

heißt die *Bildmenge von D'* und $f(D) \subseteq Z$ heißt der *Wertebereich von f* . Weiterhin heißt die Menge

$$f^{-1}(Z') := \{x \in D \mid f(x) \in Z'\} \quad (4.4)$$

die *Urbildmenge von Z'* . $x \in D$ mit $z = f(x) \in Z$ heißt auch *Urbild von z* .

•

Man beachte, dass der Wertebereich $f(D)$ von f und die Zielmenge Z von f sind nicht notwendigerweise identisch sein müssen. Grundlegende Eigenschaften von Funktionen werden in folgender Definition festgelegt.

Definition 4.3 (Injektivität, Surjektivität, Bijektivität). $f : D \rightarrow Z, x \mapsto f(x)$ sei eine Funktion. f heißt *injektiv*, wenn es zu jedem Bild $z \in f(D)$ genau ein Urbild $x \in D$ gibt. Äquivalent gilt, dass f injektiv ist, wenn aus $x_1, x_2 \in D$ mit $x_1 \neq x_2$ folgt, dass $f(x_1) \neq f(x_2)$ ist. f heißt *surjektiv*, wenn $f(D) = Z$ gilt, wenn also jedes Element der Zielmenge Z ein Urbild in der Definitionsmenge D hat. Schließlich heißt f *bijektiv*, wenn f injektiv und surjektiv ist. Bijektive Funktionen werden auch *eineindeutige Funktionen* (engl. *one-to-one mappings*) genannt.

•

Abbildung 4.1 verdeutlicht diese Definitionen anhand dreier (Gegen)beispiele.

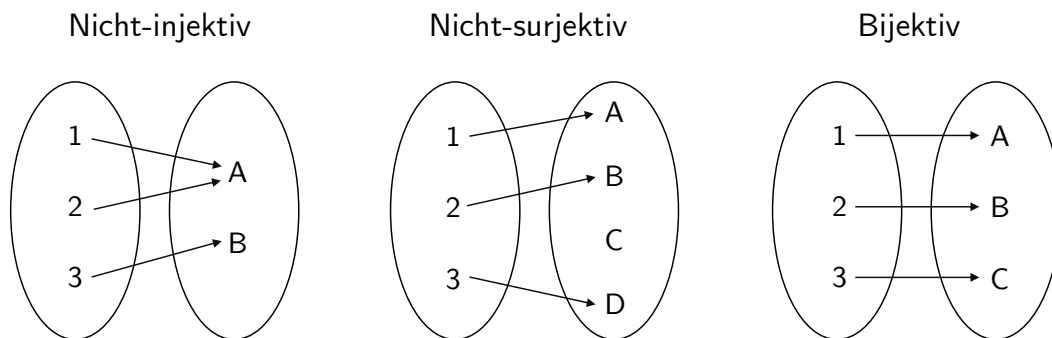


Abbildung 4.1. Injektivität, Surjektivität, Bijektivität.

Abbildung 4.1 A visualisiert die *nicht-injektive* Funktion

$$f : \{1, 2, 3\} \rightarrow \{A, B\}, x \mapsto f(x) := \begin{cases} f(1) & := A \\ f(2) & := A \\ f(3) & := B \end{cases} \quad (4.5)$$

Die Funktion ist nicht-injektiv, weil es zum Element A in der Bildmenge von f mehr als ein Urbild in der Definitionsmenge von f gibt, nämlich 1 und 2.

Abbildung 4.1 B visualisiert die nicht-surjektive Funktion

$$g : \{1, 2, 3\} \rightarrow \{A, B, C, D\}, x \mapsto g(x) := \begin{cases} g(1) & := A \\ g(2) & := B \\ g(3) & := D \end{cases} \quad (4.6)$$

Die Funktion ist nicht surjektiv, weil das Element D in der Zielmenge von f kein Urbild in der Definitionsmenge von f hat. Abbildung 4.1 C schließlich visualisiert die bijektive Funktion

$$h : \{1, 2, 3\} \rightarrow \{A, B, C\}, x \mapsto g(x) := \begin{cases} h(1) & := A \\ h(2) & := B \\ h(3) & := C \end{cases} \quad (4.7)$$

Zu *jedem* Element in der Zielmenge von h gibt es *genau ein* Urbild, die Funktion ist also injektiv und surjektiv und damit bijektiv.

Als weiteres Beispiel betrachten wir die Funktion

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := x^2 \quad (4.8)$$

Diese Funktion ist nicht injektiv, weil z.B. für $x_1 = 2 \neq -2 = x_2$ gilt, dass $f(x_1) = 2^2 = 4 = (-2)^2 = f(x_2)$. Weiterhin ist f auch nicht surjektiv, weil z.B. $-1 \in \mathbb{R}$ kein Urbild unter f hat. Schränkt man die Definitionsmenge von f allerdings auf die nicht-negativen reellen Zahlen ein, definiert man also die Funktion

$$\tilde{f} : [0, \infty[\rightarrow [0, \infty[, x \mapsto \tilde{f}(x) := x^2, \quad (4.9)$$

so ist \tilde{f} im Gegensatz zu f injektiv und surjektiv, also bijektiv.

4.2. Funktionentypen

Durch Verkettung lassen sich aus Funktionen weitere Funktionen bilden.

Definition 4.4 (Verkettung von Funktionen). Es seien $f : D \rightarrow Z$ und $g : Z \rightarrow S$ zwei Funktionen, wobei die Wertemenge von f mit der Definitionsmenge von g übereinstimmen sollen. Dann ist durch

$$g \circ f : D \rightarrow S, x \mapsto (g \circ f)(x) := g(f(x)) \quad (4.10)$$

eine Funktion definiert, die die *Verkettung von f und g* genannt wird.

•

Die Schreibweise für verkettete Funktionen ist etwas gewöhnungsbedürftig. Wichtig ist es zu erkennen, dass $g \circ f$ die verkettete Funktion und $(g \circ f)(x)$ ein Element in der Zielmenge der verketteten Funktion bezeichnen. Intuitiv wird bei der Auswertung von $(g \circ f)(x)$ zunächst die Funktion f auf x angewendet und dann die Funktion g das Element auf $f(x)$ von R angewendet. Dies ist in der funktionalen Form $g(f(x))$ festgehalten. Der Einfachheit halber benennt man die Verkettung zweier Funktionen auch oft mit einem einzelnen Buchstaben und schreibt beispielsweise, $h := g \circ f$ mit $h(x) = g(f(x))$.

Leicht zur Verwirrung kann es führen, wenn Elemente in der Zielmenge von f mit y bezeichnet werden, also die Schreibweise $y = f(x)$ und $h(x) = g(y)$ genutzt wird. Allerdings ist diese Schreibweise manchmal zur notationellen Vereinfachung nötig.

Als Beispiel für die Verkettung zweier Funktionen betrachten wir

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := -x^2 \quad (4.11)$$

und

$$g : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto g(x) := \exp(x). \quad (4.12)$$

Die Verkettung von f und g ergibt sich in diesem Fall zu

$$g \circ f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto (g \circ f)(x) := g(f(x)) = \exp(-x^2). \quad (4.13)$$

Eine erste Anwendung der Verkettung von Funktionen findet sich in folgender Definition.

Definition 4.5 (Inverse Funktion). Es sei $f : D \rightarrow Z, x \mapsto f(x)$ eine bijektive Funktion. Dann heißt die Funktion f^{-1} mit

$$f^{-1} \circ f : D \rightarrow D, x \mapsto (f^{-1} \circ f)(x) := f^{-1}(f(x)) = x \quad (4.14)$$

inverse Funktion, Umkehrfunktion oder einfach *Inverse von f* .

•

Inverse Funktionen sind immer bijektiv. Dies folgt, weil f bijektiv ist und damit jedem $x \in D$ genau ein $f(x) = z \in Z$ zugeordnet wird. Damit wird aber auch jedem $z \in Z$ genau ein $x \in D$, nämlich $f^{-1}(f(x)) = x$ zugeordnet.

Intuitiv macht die inverse Funktion von f den Effekt von f auf ein Element x rückgängig. Betrachtet man den Graphen einer Funktion in einem Kartesischen Koordinatensystem, so führt die Anwendung von einem Wert auf der x -Achse zu einem Wert auf der y -Achse. Die Anwendung der inversen Funktion führt dementsprechend von einem Wert auf der y -Achse zu einem Wert auf der x -Achse. Betrachten wir zum Beispiel die Funktion

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := 2x =: y. \quad (4.15)$$

Dann ist die inverse Funktion von f gegeben durch

$$f^{-1} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, y \mapsto f^{-1}(y) := \frac{1}{2}y, \quad (4.16)$$

weil für jedes $x \in \mathbb{R}$ gilt, dass

$$(f^{-1} \circ f)(x) := f^{-1}(f(x)) = f^{-1}(2x) = \frac{1}{2} \cdot 2x = x. \quad (4.17)$$

Eine wichtige Klasse von Funktionen sind *lineare Abbildungen*.

Definition 4.6 (Lineare Abbildung). Eine Abbildung $f : D \rightarrow Z, x \mapsto f(x)$ heißt *lineare Abbildung*, wenn für $x, y \in D$ und einen Skalar c gelten, dass

$$f(x + y) = f(x) + f(y) \quad f(cx) = cf(x) \quad (\text{Additivität})$$

und

$$f(cx) = cf(x) \quad (\text{Homogenität})$$

Eine Abbildung, für die obige Eigenschaften nicht gelten, heißt *nicht-lineare Abbildung*.

•

Lineare Abbildungen sind oft als “gerade Linien” bekannt. Die allgemeine Definition linearer Abbildungen ist mit dieser Intuition nicht komplett kongruent. Insbesondere sind lineare Abbildungen nur solche Funktionen, die den Nullpunkt auf den Nullpunkt abbilden. Wir zeigen dazu folgendes Theorem.

Theorem 4.1 (Lineare Abbildung der Null). *$f : D \rightarrow Z$ sei eine lineare Abbildung. Dann gilt*

$$f(0) = 0. \quad (4.18)$$

◦

Beweis. Wir halten zunächst fest, dass mit der Additivität von f gilt, dass

$$f(0) = f(0 + 0) = f(0) + f(0). \quad (4.19)$$

Addition von $-f(0)$ auf beiden Seiten obiger Gleichung ergibt dann

$$\begin{aligned} f(0) - f(0) &= f(0) + f(0) - f(0) \\ 0 &= f(0) \end{aligned} \quad (4.20)$$

und damit ist alles gezeigt.

□

Wir wollen den Begriff der linearen Abbildung noch an zwei Beispielen verdeutlichen.

- Für $a \in \mathbb{R}$ ist die Abbildung

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := ax \quad (4.21)$$

eine lineare Abbildung, weil gilt, dass

$$f(x+y) = a(x+y) = ax+ay = f(x)+f(y) \text{ und } f(cx) = acx = cax = cf(x). \quad (4.22)$$

- Für $a, b \in \mathbb{R}$ ist dagegen die Abbildung

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := ax + b \quad (4.23)$$

nicht-linear, weil z.B. für $a := b := 1$ gilt, dass

$$f(x+y) = 1(x+y) + 1 = x+y+1 \neq x+1+y+1 = f(x)+f(y). \quad (4.24)$$

Eine Abbildung der Form $f(x) := ax + b$ heißt *linear-affine Abbildung* oder *linear-affine Funktion*. Etwas unsauber werden Funktionen der Form $f(x) := ax + b$ auch manchmal als *lineare Funktionen* bezeichnet.

Neben den bisher diskutierten Funktionentypen gibt es noch viele weitere Klassen von Funktionen. In folgender Definition klassifizieren wir Funktionen anhand der Dimensionalität ihrer Definitions- und Zielmengen. Diese Art der Funktionsklassifikation ist oft hilfreich, um sich einen ersten Überblick über ein mathematisches Modell zu verschaffen.

Definition 4.7 (Funktionenarten). Wir unterscheiden

- *univariate reellwertige Funktionen* der Form

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x), \tag{4.25}$$

- *multivariate reellwertige Funktionen* der Form

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) = f(x_1, \dots, x_n), \tag{4.26}$$

- und *multivariate vektorwertige Funktionen* der Form

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m, x \mapsto f(x) = \begin{pmatrix} f_1(x_1, \dots, x_n) \\ \vdots \\ f_m(x_1, \dots, x_n) \end{pmatrix}, \tag{4.27}$$

wobei $f_i, i = 1, \dots, m$ die *Komponenten(funktionen)* von f genannt werden.

•

In der Physik werden multivariate reellwertige Funktionen *Skalarfelder* und multivariate vektorwertige Funktionen *Vektorfelder* genannt. In manchen Anwendungen treten zum Beispiel auch *matrixvariate matrixwertige Funktionen* auf.

4.3. Elementare Funktionen

Als *elementare Funktionen* bezeichnen wir eine kleine Schar von univariaten reellwertigen Funktionen, die häufig als Bausteine komplexerer Funktionen auftreten. Dies sind die *Polynomfunktionen*, die *Exponentialfunktion*, die *Logarithmusfunktion* und die *Gammafunktion*. Im Folgenden geben wir wesentliche Eigenschaften dieser Funktionen und ihre Graphen an. Für Beweise der Eigenschaften der hier vorgestellten Funktionen verweisen wir auf die weiterführende Literatur.

Definition 4.8 (Polynomfunktionen). Eine Funktion der Form

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := \sum_{i=0}^k a_i x^i = a_0 + a_1 x^1 + a_2 x^2 + \dots + a_k x^k \tag{4.28}$$

heißt *Polynomfunktion* k -ten Grades mit *Koeffizienten* $a_0, a_1, \dots, a_k \in \mathbb{R}$.

•

Einige ausgewählte Polynomfunktionen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet, Abbildung 4.2 zeigt die entsprechende Graphen.

Tabelle 4.1. Ausgewählte Polynomfunktionen

Name	Funktionale Form	Koeffizienten
Konstante Funktion	$f(x) = a$	$a_0 := a, a_i := 0, i > 0$
Identitätsfunktion	$f(x) = x$	$a_0 := 0, a_1 := 1, a_i := 0, i > 1$
Linear-affine Funktion	$f(x) = ax + b$	$a_0 := b, a_1 := a, a_i := 0, i > 1$
Quadratfunktion	$f(x) = x^2$	$a_0 := 0, a_1 := 0, a_2 := 1, a_i := 0, i > 2$

Ein wichtiges Funktionenpaar sind die Exponentialfunktion und die Logarithmusfunktion. Die Graphen der Exponential- und Logarithmusfunktion sind in Abbildung 4.3 abgebildet.

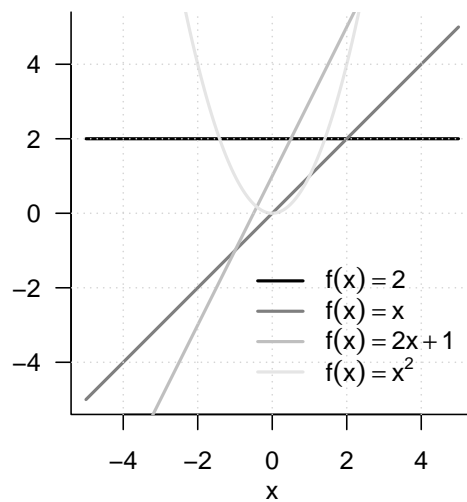


Abbildung 4.2. Ausgewählte Polynomfunktionen

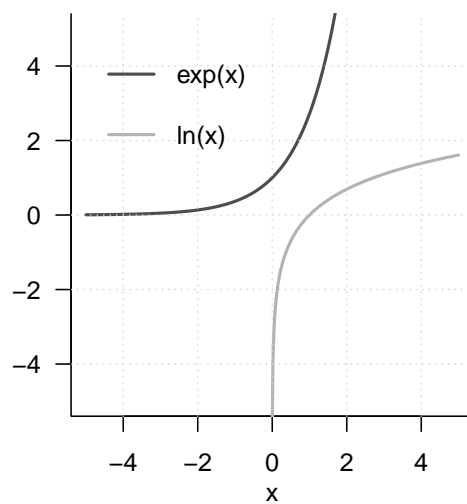


Abbildung 4.3. Exponentialfunktion und Logarithmusfunktion

Definition 4.9 (Exponentialfunktion). Die *Exponentialfunktion* ist definiert als

$$\exp : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \exp(x) := e^x := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \dots \quad (4.29)$$

•

Die Exponentialfunktion hat unter anderem folgende Eigenschaften.

Wertebereich der Exponentialfunktion

- $x \in]-\infty, 0[\Rightarrow \exp(x) \in]0, 1[$
- $x \in]0, \infty[\Rightarrow \exp(x) \in]1, \infty[$

Insbesondere nimmt die Exponentialfunktion also nur positive Werte an.

Monotonieeigenschaft der Exponentialfunktion

- $x < y \Rightarrow \exp(x) < \exp(y)$

Spezielle Werte der Exponentialfunktion

- $\exp(0) = 1$
- $\exp(1) = e \approx 2.71$

Die Logarithmusfunktion schneidet die y -Achse also bei 0. Die Zahl e heißt *Eulersche Zahl*.

Summationseigenschaft und Subtraktionseigenschaft der Exponentialfunktion

- $\exp(x + y) = \exp(x) \exp(y)$
- $\exp(x - y) = \frac{\exp(x)}{\exp(y)}$

Mit den speziellen Werten der Exponentialfunktion gilt dann insbesondere auch

$$\exp(x) \exp(-x) = \exp(x - x) = \exp(0) = 1. \quad (4.30)$$

Definition 4.10 (Logarithmusfunktion). Die *Logarithmusfunktion* ist definiert als inverse Funktion der Exponentialfunktion,

$$\ln :]0, \infty[\rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \ln(x) \text{ mit } \ln(\exp(x)) = x \text{ für alle } x \in \mathbb{R}. \quad (4.31)$$

•

Die Logarithmusfunktion hat unter anderem folgende Eigenschaften.

Wertebereich der Logarithmusfunktion

- $x \in]0, 1[\Rightarrow \ln(x) \in]-\infty, 0[$
- $x \in]1, \infty[\Rightarrow \ln(x) \in]0, \infty[$

Die Logarithmusfunktion nimmt also sowohl negative als auch positive Werte an.

Monotonie der Logarithmusfunktion

- $x < y \Rightarrow \ln(x) < \ln(y)$

Spezielle Werte der Logarithmusfunktion

- $\ln(1) = 0$ und $\ln(e) = 1$.

Die Logarithmusfunktion schneidet die x -Achse also bei 1.

Produkteigenschaft, Potenz eigenschaft und Divisionseigenschaft der Logarithmusfunktion

- $\ln(xy) = \ln(x) + \ln(y)$
- $\ln(x^c) = c \ln(x)$
- $\ln\left(\frac{1}{x}\right) = -\ln(x)$

Letztere Eigenschaft sind beim Rechnen Logarithmusfunktionen zentral. Man merkt sie sich intuitiv als “Die Logarithmusfunktion wandelt Produkte in Summen und Potenzen in Produkte um.”

Ein häufiger Begleiter in der Wahrscheinlichkeitstheorie ist die *Gammafunktion*. Ein Ausschnitt des Graphen der Gammafunktion ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

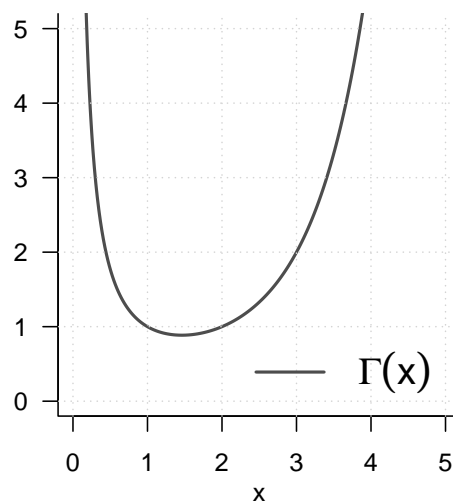


Abbildung 4.4. Gammafunktion

Definition 4.11 (Gammafunktion). Die *Gammafunktion* ist definiert durch

$$\Gamma : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \Gamma(x) := \int_0^{\infty} \xi^{x-1} \exp(-\xi) d\xi \quad (4.32)$$

•

Die Gammafunktion hat folgende Eigenschaften:

Spezielle Werte der Gammafunktion

- $\Gamma(1) = 1$
- $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$
- $\Gamma(n) = (n-1)!$ für $n \in \mathbb{N}$.

Rekursionseigenschaft der Gammafunktion

- Für $x > 0$ gilt $\Gamma(x+1) = x\Gamma(x)$

4.4. Selbstkontrollfragen

1. Geben Sie die Definition einer Funktion wieder.
2. Geben Sie die Definition der Begriffe Bildmenge, Wertebereich, und Urbildmenge wieder.
3. Geben Sie die Definitionen der Begriffe Surjektivität, Injektivität, und Bijektivität wieder.
4. Erläutern Sie, warum $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := x^2$ weder injektiv noch surjektiv ist.
5. Erläutern Sie, warum $f: [0, \infty[\rightarrow [0, \infty[, x \mapsto f(x) := x^2$ bijektiv ist.
6. Geben Sie die Definition der Verkettung von Funktionen wieder.
7. Geben Sie die Definition des Begriffs der inversen Funktion wieder.
8. Geben Sie die inverse Funktion von x^2 auf $[0, \infty[$ an.
9. Geben Sie die Definition des Begriffs der linearen Abbildung wieder.
10. Geben Sie die Definitionen der Begriffe der univariat-reellwertigen, multivariat-reellwertigen und multivariat-vektorwertigen Funktion wieder.
11. Skizzieren Sie die Identitätsfunktion und die konstante Funktion für $a := 1$.
12. Skizzieren Sie die linear-affine Funktion $f(x) = ax + b$ für $a = 2$ und $b = 3$.
13. Skizzieren Sie die Funktionen $f(x) := (x-1)^2$ und $g(x) := (x+3)^2$.
14. Skizzieren Sie die Exponential- und Logarithmusfunktionen.
15. Geben Sie die Summations- und Subtraktionseigenschaften der Exponentialfunktion an.
16. Geben Sie die Produkt-, Potenz- und Divisionseigenschaften der Logarithmusfunktion an.

5. Differentialrechnung

Die Differentialrechnung befasst sich mit der Änderung von Funktionen. Sie bildet einerseits die Grundlage für die mathematische Modellierung mithilfe von *Differentialgleichungen*, also der Beschreibung von Funktionen anhand ihrer Änderungsraten. Zum anderen bildet die Differentialrechnung die Grundlage der *Optimierung*, also des Bestimmens von Extremstellen von Funktionen. In Kapitel 5.1 führen wir zunächst den Begriff der Ableitung und mit ihm verbundene elementare Rechenregeln ein. In Kapitel 5.2 widmen wir uns dann der Frage, wie man mithilfe von Ableitungen Extremstellen von Funktionen bestimmen kann.

5.1. Definitionen und Rechenregeln

Wir beginnen mit folgender Definition.

Definition 5.1 (Differenzierbarkeit und Ableitung). Es sei $I \subseteq \mathbb{R}$ ein Intervall und

$$f : I \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) \quad (5.1)$$

eine univariate reellwertige Funktion. f heißt in $a \in I$ *differenzierbar*, wenn der Grenzwert

$$f'(a) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad (5.2)$$

existiert. $f'(a)$ heißt dann die *Ableitung von f an der Stelle a* . Ist f differenzierbar für alle $x \in I$, so heißt f *differenzierbar* und die Funktion

$$f' : I \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f'(x) \quad (5.3)$$

heißt *Ableitung von f* .

•

Für $h > 0$ heißt der Ausdruck

$$\frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad (5.4)$$

Newtonscher Differenzquotient. Der Newtonsche Differenzquotient misst die Änderung $f(a+h) - f(a)$ von f pro Strecke h auf der x -Achse. Wenn also zum Beispiel $f(a)$ und $f(a+h)$ die Position eines Objektes zu einem Zeitpunkt a und zu einem späteren Zeitpunkt $a+h$ repräsentieren, dann ist $f(a+h) - f(a)$ die von diesem Objekt in der Zeit h zurückgelegte Strecke, also seine durchschnittliche Geschwindigkeit über den Zeitraum h . Für $h \rightarrow 0$ misst der Newtonsche Differenzquotient die instantane Änderungsrate von f in a , also im Beispiel die Geschwindigkeit des Objektes zu einem Zeitpunkt a .

Aus mathematischer Sicht ist es wichtig, bei der Definition der Ableitung zwischen den Symbolen $f'(a)$ und f' zu unterscheiden. Wie üblich bezeichnet $f'(a)$ den Wert einer

Funktion, also eine Zahl. f' dagegen bezeichnet eine Funktion, nämlich die Funktion, deren Werte als $f'(a)$ für alle $a \in \mathbb{R}$ bestimmt sind.

Es existieren in der Literatur verschiedene, historisch gewachsene Notationen für Ableitungen, welche alle das identische Konzept der Ableitung repräsentieren.

Definition 5.2 (Notation für Ableitungen univariater reellwertiger Funktionen). Es sei f eine univariate reellwertige Funktion. Äquivalente Schreibweisen für die Ableitung von f und die Ableitung von f an einer Stelle x sind

- die *Lagrange-Notation* f' und $f'(x)$,
- die *Leibniz-Notation* $\frac{df}{dx}$ und $\frac{df(x)}{dx}$,
- die *Newton-Notation* \dot{f} und $\dot{f}(x)$, sowie
- die *Euler-Notation* Df und $Df(x)$,

respektive

•

Wir werden im Folgenden für univariate reellwertige Funktionen vor allem die Lagrange-Notation f' und $f'(x)$ als Bezeichner wählen. In Berechnungen nutzen wir auch eine adaptierte Form der Leibniz-Notation und verstehen dort die Schreibweise $\frac{d}{dx}f(x)$ als den Auftrag, die Ableitung von f zu berechnen. Die Newton-Notation wird vor allem eingesetzt, wenn das Funktionsargument die Zeit repräsentiert und dann üblicherweise mit t für “time” bezeichnet wird. $\dot{f}(t)$ bezeichnet dann die Änderungsrate von f zum Zeitpunkt t . Die Euler-Notation ist vor allem im Kontext multivariater reell- oder vektorwertiger Funktionen nützlich.

Basierend auf der Definition der Ableitung einer univariaten reellwertigen Funktionen lassen sich leicht weitere Ableitungen einer solchen Funktion definieren.

Definition 5.3 (Höhere Ableitungen). Es sei f eine univariate reellwertige Funktion und

$$f^{(1)} := f' \tag{5.5}$$

sei die Ableitung von f . Die k -te Ableitung von f ist rekursiv definiert durch

$$f^{(k)} := (f^{(k-1)})' \text{ für } k \geq 0, \tag{5.6}$$

unter der Annahme, dass $f^{(k-1)}$ differenzierbar ist. Insbesondere ist die *zweite Ableitung* von f definiert durch die Ableitung von f' , also

$$f'' := (f')' \tag{5.7}$$

•

In Analogie zu oben Gesagtem schreiben wir in Berechnungen auch $\frac{d^2}{dx^2}f(x)$ für den Auftrag, die zweite Ableitung einer Funktion f zu bestimmen. Die nullte Ableitung $f^{(0)}$ von f ist f selbst. Der Tradition und Einfachheit halber schreibt man für $k < 4$ gemäß der Lagrange-Notation meist f' , f'' und f''' anstelle von $f^{(1)}$, $f^{(2)}$ und $f^{(3)}$.

Zum Bestimmen der Ableitung einer Funktion sind eine Reihe von Rechenregeln hilfreich, die es erlauben, die Ableitung einer Funktion aus den Ableitungen ihrer Unterfunktionen herzuleiten. Für Beweise der in folgendem Theorem eingeführten Rechenregeln verweisen wir auf die weiterführende Literatur

Theorem 5.1 (Rechenregeln für Ableitungen). Für $i = 1, \dots, n$ seien g_i reellwertige univariate differenzierbare Funktionen. Dann gelten folgende Rechenregeln:

(1) *Summenregel*

$$\text{Für } f(x) := \sum_{i=1}^n g_i(x) \text{ gilt } f'(x) = \sum_{i=1}^n g'_i(x). \quad (5.8)$$

(2) *Produktregel*

$$\text{Für } f(x) := g_1(x)g_2(x) \text{ gilt } f'(x) = g'_1(x)g_2(x) + g_1(x)g'_2(x). \quad (5.9)$$

(3) *Quotientenregel*

$$\text{Für } f(x) := \frac{g_1(x)}{g_2(x)} \text{ gilt } f'(x) = \frac{g'_1(x)g_2(x) - g_1(x)g'_2(x)}{g_2^2(x)}. \quad (5.10)$$

(4) *Kettenregel*

$$\text{Für } f(x) := g_1(g_2(x)) \text{ gilt } f'(x) = g'_1(g_2(x))g'_2(x). \quad (5.11)$$

◦

Erste Beispiele für die Anwendung obiger Rechenregeln lernen wir im Abschnitt Kapitel 5.2 kennen. Wir setzen eine Reihe von Ableitungen elementarer Funktionen als bekannt voraus, diese sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt. Für Beweise verweisen wir wiederum auf die weiterführende Literatur.

Tabelle 5.1. Ableitungen elementarer Funktionen

Name	Definition	Ableitung
Polynomfunktion	$f(x) := \sum_{i=0}^n a_i x^i$	$f'(x) = \sum_{i=1}^n i a_i x^{i-1}$
Konstante Funktion	$f(x) := a$	$f'(x) = 0$
Identitätsfunktion	$f(x) := x$	$f'(x) = 1$
Linear-affine Funktion	$f(x) := ax + b$	$f'(x) = a$
Quadratfunktion	$f(x) := x^2$	$f'(x) = 2x$
Exponentialfunktion	$f(x) := \exp(x)$	$f'(x) = \exp(x)$
Logarithmusfunktion	$f(x) := \ln(x)$	$f'(x) = \frac{1}{x}$

In Abbildung 5.1 visualisieren wir die Identitätsfunktion, eine lineare Funktion und die Quadratfunktion zusammen mit ihrer jeweiligen Ableitung. In Abbildung 5.2 visualisieren wir die Exponential- und Logarithmusfunktionen zusammen mit ihrer jeweiligen Ableitung.

5.2. Analytische Optimierung

Eine wichtige Anwendung der Differentialrechnung ist das Bestimmen von Extremstellen von Funktionen. Dabei geht es im Kern um die Frage, für welche Werte ihrer Definitionsmenge eine Funktion ein Maximum oder ein Minimum annimmt. Bei einfachen Funktionen ist dies analytisch möglich. Die generelle Vorgehensweise dabei ist oft auch unter dem Stichwort “Kurvendiskussion” bekannt. In der Anwendung ist ein

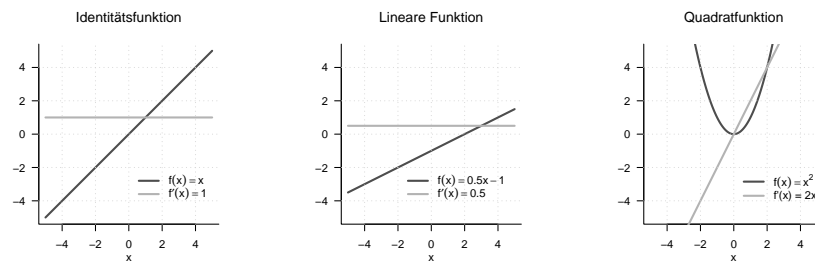


Abbildung 5.1. Ableitungen dreier elementarer Funktionen

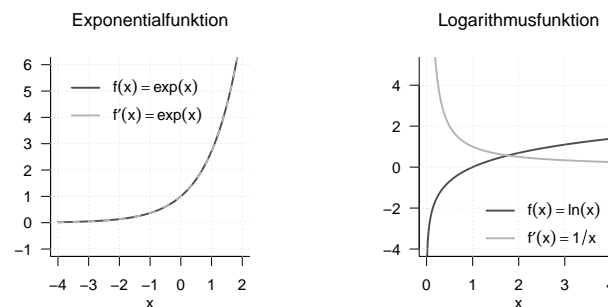


Abbildung 5.2. Ableitungen von Exponentialfunktion und Logarithmusfunktion

analytisches Vorgehen zur Optimierung von Funktionen meist nicht möglich und es werden Computeralgorithmen zur Bestimmung von Extremstellen genutzt. Ein Verständnis dieser Algorithmen setzt allerdings ein Verständnis der Prinzipien der analytischen Optimierung voraus. In diesem Abschnitt geben wir eine Einführung in die analytische Optimierung von univariaten reellwertigen Funktionen. Wir gehen dabei eher informell vor. Einen formalen Zugang geben wir an späterer Stelle im Kontext der nichtlinearen Optimierung. Wir beginnen damit, die Begriffe der erwähnten Maxima und Minima von univariaten reellwertigen Funktionen zu präzisieren.

Definition 5.4 (Extremstellen und Extremwerte). Es seien $U \subseteq \mathbb{R}$ und $f : U \rightarrow \mathbb{R}$ eine univariate reellwertige Funktion. f hat an der Stelle $x_0 \in U$

- ein *lokales Minimum*, wenn es ein Intervall $I :=]a, b[$ gibt mit $x_0 \in]a, b[$ und

$$f(x_0) \leq f(x) \text{ für alle } x \in I \cap U, \quad (5.12)$$

- ein *globales Minimum*, wenn gilt, dass

$$f(x_0) \leq f(x) \text{ für alle } x \in U, \quad (5.13)$$

- ein *lokales Maximum*, wenn es ein Intervall $I :=]a, b[$ gibt mit $x_0 \in]a, b[$ und

$$f(x_0) \geq f(x) \text{ für alle } x \in I \cap U, \quad (5.14)$$

- ein *lokales Maximum*, wenn gilt, dass

$$f(x_0) \geq f(x) \text{ für alle } x \in U. \quad (5.15)$$

Der Wert $x_0 \in U$ der Definitionsmenge von f heißt entsprechend *lokale* oder *globale Minimalstelle* oder *Maximalstelle*, der Funktionswert $f(x_0) \in \mathbb{R}$ heißt entsprechend *lokales* oder *globales Minimum* oder *Maximum*. Generell heißt der Wert $x_0 \in U$ *Extremstelle* und der Funktionswert $f(x_0) \in \mathbb{R}$ *Extremwert*.

•

Extremstellen von Funktionen werden häufig mit

$$\operatorname{argmin}_{x \in I \cap U} f(x) \text{ oder } \operatorname{argmax}_{x \in I \cap U} f(x) \quad (5.16)$$

bezeichnet und Extremwerte von Funktionen werden häufig mit

$$\min_{x \in I \cap U} f(x) \text{ oder } \max_{x \in I \cap U} f(x) \quad (5.17)$$

bezeichnet.

Die analytische Optimierung von univariaten reellwertigen Funktionen basiert auf den sogenannten *notwendigen* und *hinreichenden Bedingungen für Extrema*. Erstere macht eine Aussage über das Verhalten der ersten Ableitung einer Funktion an einer Extremstelle, letztere macht eine Aussage über das Verhalten einer Funktion an einer Stelle, die bestimmten Forderungen an ihre erste und zweite Ableitung genügt.

Theorem 5.2 (Notwendige Bedingung für Extrema). *f sei eine univariate reellwertige Funktion. Dann gilt*

$$x_0 \text{ ist Extremstelle von } f \Rightarrow f'(x_0) = 0. \quad (5.18)$$

◦

Wenn x_0 eine Extremstelle von f ist, dann ist also die erste Ableitung von f in x_0 gleich null. Anstelle eines Beweises überlegen wir uns, dass zum Beispiel an eine lokaler Maximalstelle x_0 von f gilt: links von x_0 steigt f an, rechts von x_0 fällt f ab. In x_0 aber steigt f weder an, noch fällt f ab, es ist also nachvollziehbar, dass $f'(x_0) = 0$ ist.

Theorem 5.3 (Hinreichende Bedingungen für lokale Extrema). *f sei eine zweimal differenzierbare univariate reellwertige Funktion.*

- Wenn für $x_0 \in U \subseteq \mathbb{R}$

$$f'(x_0) = 0 \text{ und } f''(x_0) > 0 \quad (5.19)$$

gilt, dann hat f an der Stelle x_0 ein Minimum.

- Wenn für $x_0 \in U \subseteq \mathbb{R}$

$$f'(x_0) = 0 \text{ und } f''(x_0) < 0 \quad (5.20)$$

gilt, dann hat f an der Stelle x_0 ein Maximum.

◦

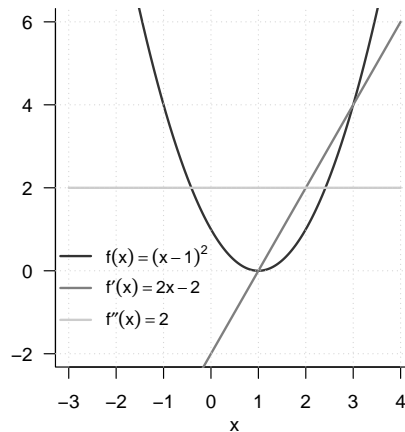


Abbildung 5.3. Analytische Optimierung von $f(x) := (x - 1)^2$

Wir verzichten wiederum auf einen Beweis und verdeutlichen uns die Bedingung an dem in Abbildung 5.3 gezeigtem Beispiel. Hier ist offenbar $x_0 = 1$ eine lokale Minimalstelle von $f(x) = (x - 1)^2$. Man erkennt: links von x_0 fällt f ab, rechts von x_0 steigt f an. In x_0 steigt f weder an, noch fällt f ab, also ist $f'(x_0) = 0$. Weiter gilt, dass links und rechts von x_0 und in x_0 die Änderung f'' von f' positiv ist: links von x_0 schwächt sich die Negativität von f' zu 0 ab und rechts von x_0 verstärkt sich die Positivität von f' .

Insbesondere die hinreichende Bedingung für das Vorliegen von Extremstellen legt folgendes *Standardverfahren* zur Bestimmung von lokalen Extremstellen nahe.

Theorem 5.4 (Standardverfahren der analytischen Optimierung). *f sei eine univariate reellwertige Funktion. Lokale Extremstellen von f können mit folgendem Standardverfahren der analytischen Optimierung identifiziert werden:*

1. Berechnen der ersten und zweiten Ableitung von f .
2. Bestimmen von Nullstellen x^* von f' durch Auflösen von $f'(x^*) = 0$ nach x^* . Die Nullstellen von f' sind dann Kandidaten für Extremstellen von f .
3. Evaluation von $f''(x^*)$: Wenn $f''(x^*) > 0$ ist, dann ist x^* lokale Minimumstelle von f ; wenn $f''(x^*) < 0$ ist, dann ist x^* lokale Maximumstelle von f ; wenn $f''(x^*) = 0$ ist, dann ist x^* keine Extremstelle von f .

◦

Anstelle eines Beweises betrachten wir beispielhaft die Funktion

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := (x - 1)^2. \quad (5.21)$$

aus Abbildung 5.3. Die erste Ableitung von f ergibt sich mit der Kettenregel zu

$$f'(x) = \frac{d}{dx} ((x - 1)^2) = 2(x - 1) \cdot \frac{d}{dx} (x - 1) = 2x - 2. \quad (5.22)$$

Die zweite Ableitung von f ergibt sich zu

$$f''(x) = \frac{d}{dx} f'(x) = \frac{d}{dx} (2x - 2) = 2 > 0 \text{ für alle } x \in \mathbb{R}. \quad (5.23)$$

Auflösen von $f'(x^*) = 0$ nach x^* ergibt

$$f'(x^*) = 0 \Leftrightarrow 2x^* - 2 = 0 \Leftrightarrow 2x^* = 2 \Leftrightarrow x^* = 1. \quad (5.24)$$

$x^* = 1$ ist folglich eine Minimalstelle von f mit zugehörigen Minimalwert $f(1) = 0$.

5.3. Differentialrechnung multivariater reellwertiger Funktionen

Wir erinnern zunächst an den Begriff der multivariaten reellwertigen Funktion.

Definition 5.5 (Multivariate reellwertige Funktion). Eine Funktion der Form

$$f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) = f(x_1, \dots, x_n) \quad (5.25)$$

heißt *multivariate reellwertige Funktion*.

•

Die Argumente multivariater reellwertiger Funktionen sind also reelle n -Tupel der Form $x := (x_1, \dots, x_n)$ während ihre Funktionswerte reelle Zahlen sind. Ein Beispiel für eine multivariate reellwertige für $n := 2$ ist

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := x_1^2 + x_2^2 \quad (5.26)$$

Wir visualisieren diese Funktion in Abbildung 5.4. Dabei zeigt die rechte Abbildung eine Darstellung mithilfe sogenannter *Isokonturen*, also Linien im Definitionsbereich der Funktion, für die die Funktion identische Werte annimmt. Die entsprechenden Werte sind für ausgewählte Isokonturen in der Abbildung vermerkt.

Wir wollen nun beginnen, die Begriffe der Differenzierbarkeit und der Ableitung univariater reellwertiger Funktionen auf den Fall multivariater reellwertiger Funktion zu erweitern. Dazu führen wir zunächst die Begriffe der *partiellen Differenzierbarkeit* und der *partiellen Ableitung* ein.

Definition 5.6 (Partielle Differenzierbarkeit und partielle Ableitung). Es sei $D \subseteq \mathbb{R}^n$ eine Menge und

$$f : D \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) \quad (5.27)$$

eine multivariate reellwertige Funktion. f heißt in $a \in D$ nach x_i *partiell differenzierbar*, wenn der Grenzwert

$$\frac{\partial}{\partial x_i} f(x) := \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a + h e_i) - f(a)}{h} \quad (5.28)$$

existiert. $\frac{\partial}{\partial x_i} f(a)$ heißt dann die *partielle Ableitung von f nach x_i an der Stelle a* . Wenn f für alle $x \in D$, nach x_i partiell differenzierbar ist, dann heißt f *nach x_i partiell differenzierbar* und die Funktion

$$\frac{\partial}{\partial x_i} f : D \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \frac{\partial}{\partial x_i} f(x) \quad (5.29)$$

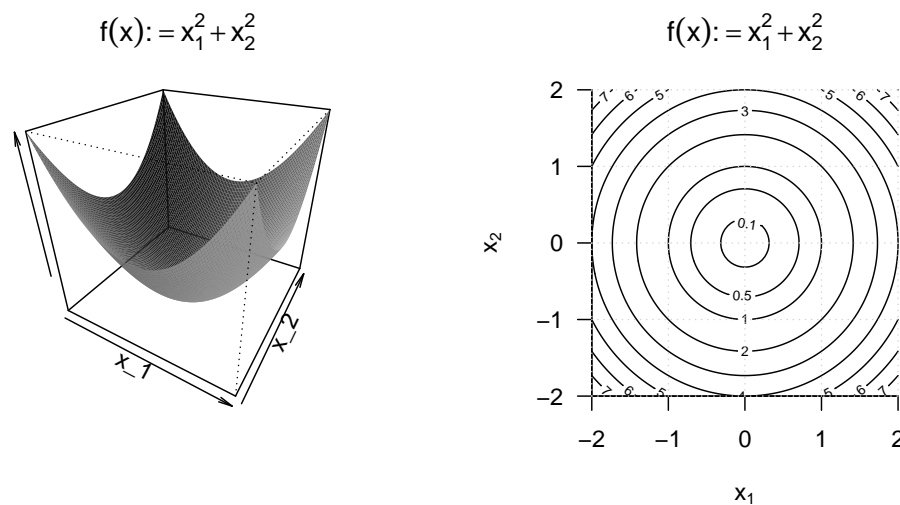


Abbildung 5.4. Visualisierungen einer bivariaten Funktion.

heißt *partielle Ableitung von f nach x_i* . f heißt *partiell differenzierbar in $x \in D$* , wenn f für alle $i = 1, \dots, n$ in $x \in D$ nach x_i partiell differenzierbar ist, und f heißt *partiell differenzierbar*, wenn f für alle $i = 1, \dots, n$ in allen $x \in D$ nach x_i partiell differenzierbar ist.

•

In Definition 5.6 bezeichnet $e_i \in \mathbb{R}^n$ bezeichnet den i ten kanonischen Einheitsvektor, für den gilt, dass $e_{i_j} = 1$ für $i = j$ und $e_{i_j} = 0$ für $i \neq j$ mit $j = 1, \dots, n$ (vgl. Definition 8.14). In Analogie und Verallgemeinerung zum Newtonschen Differenzquotienten misst der hier auftretende Differenzquotient

$$\frac{f(x + he_i) - f(x)}{h} \quad (5.30)$$

die Änderung $f(x + he_i) - f(x)$ von f pro Strecke h in Richtung e_i . Für $h \rightarrow 0$ misst der Differenzquotient entsprechend die *Änderungsrate* von f in x in Richtung e_i . Wie bei der Betrachtung von Ableitungen gilt, dass $\frac{\partial}{\partial x_i} f(x)$ eine Zahl, $\frac{\partial}{\partial x_i} f$ dagegen eine Funktion ist. Praktisch berechnet man $\frac{\partial}{\partial x_i} f$ als die (einfache) Ableitung

$$\frac{d}{dx_i} \tilde{f}_{x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n}(x_i) \quad (5.31)$$

der univariaten reellwertigen Funktion

$$\tilde{f}: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x_i \mapsto \tilde{f}_{x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n}(x_i) := f(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n). \quad (5.32)$$

Man betrachtet für die i te partielle Ableitung also alle x_j mit $j \neq i$ als Konstanten und ist auf das gewohnte Berechnen von Ableitungen von univariaten reellwertigen Funktionen geführt. Wir wollen das Vorgehen zum Berechnen von partiellen Ableitungen an einem ersten Beispiel verdeutlichen.

Beispiel (1)

Wir betrachten die Funktion

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := x_1^2 + x_2^2. \quad (5.33)$$

Weil die Definitionsmenge dieser Funktion zweidimensional ist, kann man zwei partielle Ableitungen berechnen

$$\frac{\partial}{\partial x_1} f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \text{ und } \frac{\partial}{\partial x_2} f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \frac{\partial}{\partial x_2} f(x). \quad (5.34)$$

Um die erste dieser partiellen Ableitungen zu berechnen, betrachtet man die Funktion

$$f_{x_2} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x_1 \mapsto f_{x_2}(x_1) := x_1^2 + x_2^2, \quad (5.35)$$

wobei x_2 hier die Rolle einer Konstanten einnimmt. Um explizit zu machen, dass x_2 kein Argument der Funktion ist, die Funktion aber weiterhin von x_2 abhängt haben wir die Subskriptnotation $f_{x_2}(x_1)$ verwendet. Um nun die partielle Ableitung zu berechnen, berechnen wir die (einfache) Ableitung von f_{x_2} ,

$$f'_{x_2}(x) = 2x_1. \quad (5.36)$$

Es ergibt sich also

$$\frac{\partial}{\partial x_1} f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \frac{\partial}{\partial x_1} f(x) = \frac{\partial}{\partial x_1} (x_1^2 + x_2^2) = f'_{x_2}(x) = 2x_1. \quad (5.37)$$

Analog gilt mit der entsprechenden Formulierung von f_{x_1} , dass

$$\frac{\partial}{\partial x_2} f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto \frac{\partial}{\partial x_2} f(x) = \frac{\partial}{\partial x_2} (x_1^2 + x_2^2) = f'_{x_1}(x) = 2x_2. \quad (5.38)$$

Wie bei der Ableitung einer univariaten reellwertigen Funktion ist es auch für eine multivariate reellwertige Funktion möglich, rekursiv eine höhere Ableitung zu definieren.

Definition 5.7 (Zweite partielle Ableitungen). $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ sei eine multivariate reellwertige Funktion und $\frac{\partial}{\partial x_i} f$ sei die partielle Ableitung von f nach x_i . Dann ist die zweite partielle Ableitung von f nach x_i und x_j definiert als

$$\frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_i} f(x) := \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial}{\partial x_i} f \right). \quad (5.39)$$

•

Man beachte, dass es zu jeder partiellen Ableitung $\frac{\partial}{\partial x_i} f$ für $i = 1, \dots, n$ insgesamt n zweite partiellen Ableitungen $\frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_i} f$ für $j = 1, \dots, n$ gibt. Die so resultierenden n^2 zweiten partiellen Ableitungen sind jedoch nicht alle verschieden. Dies ist eine wesentliche Aussage des *Satzes von Schwarz*

Theorem 5.5 (Satz von Schwarz). $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ sei eine partiell differenzierbare multivariate reellwertige Funktion. Dann gilt

$$\frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_i} f(x) = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f(x) \text{ für alle } 1 \leq i, j \leq n. \quad (5.40)$$

◦

Für einen Beweis verweisen wir auf die weiterführende Literatur. Der Satz von Schwarz besagt insbesondere also auch, dass bei Bildung der zweiten partiellen Ableitungen die Reihenfolge des partiellen Ableitens irrelevant ist. Das Theorem erleichtert auf diese Weise die Berechnung von zweiten partiellen Ableitungen und hilft zudem, analytische Fehler bei der Berechnung zweiter partieller Ableitungen aufzudecken. Wir verdeutlichen dies in Fortführung obigen Beispiels.

Beispiel (1)

Wir wollen die partiellen Ableitungen zweiter Ordnung der Funktion

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := x_1^2 + x_2^2. \quad (5.41)$$

berechnen. Mit den Ergebnissen für die partiellen Ableitungen erster Ordnung dieser Funktion ergibt sich

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_1} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} (2x_1) = 2 \\ \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} (2x_2) = 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_1} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_2} (2x_1) = 0 \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_2} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_2} (2x_2) = 2 \end{aligned} \quad (5.42)$$

Offenbar gilt

$$\frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} f(x) = \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_1} f(x). \quad (5.43)$$

Beispiel (2)

Als weiteres Beispiel wollen wir die partiellen Ableitungen erster und zweiter Ordnung der Funktion

$$f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := x_1^2 + x_1 x_2 + x_2 \sqrt{x_3}. \quad (5.44)$$

berechnen. Mit den Rechenregeln für Ableitungen ergibt sich für die partiellen Ableitungen erster Ordnung

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_1} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_1} (x_1^2 + x_1 x_2 + x_2 \sqrt{x_3}) = 2x_1 + x_2, \\ \frac{\partial}{\partial x_2} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_2} (x_1^2 + x_1 x_2 + x_2 \sqrt{x_3}) = x_1 + \sqrt{x_3}, \\ \frac{\partial}{\partial x_3} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_3} (x_1^2 + x_1 x_2 + x_2 \sqrt{x_3}) = \frac{x_2}{2\sqrt{x_3}}. \end{aligned} \quad (5.45)$$

Für die zweiten partiellen Ableitungen hinsichtlich x_1 ergibt sich

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_1} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} (2x_1 + x_2) = 2, \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_1} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_2} (2x_1 + x_2) = 1, \\ \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_1} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_3} (2x_1 + x_2) = 0. \end{aligned} \quad (5.46)$$

Für die zweiten partiellen Ableitungen hinsichtlich x_2 ergibt sich

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} (x_1 + \sqrt{x_3}) = 1, \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_2} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_2} (x_1 + \sqrt{x_3}) = 0, \\ \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_2} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_3} (x_1 + \sqrt{x_3}) = \frac{1}{2\sqrt{x_3}}.\end{aligned}\tag{5.47}$$

Beispiel (2) Für die zweiten partiellen Ableitungen hinsichtlich x_3 ergibt sich

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{x_2}{2} \sqrt{x_3} \right) = 0, \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{x_2}{2\sqrt{x_3}} \right) = \frac{1}{2\sqrt{x_3}}, \\ \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_3} f(x) &= \frac{\partial}{\partial x_3} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} f(x) \right) = \frac{\partial}{\partial x_3} \left(x_2 \frac{1}{2} x_3^{-\frac{1}{2}} \right) = -\frac{1}{4} x_2 x_3^{-\frac{3}{2}}.\end{aligned}\tag{5.48}$$

Weiterhin erkennt man, dass die Reihenfolge der partiellen Ableitungen irrelevant ist, denn es gilt

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} f(x) &= \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_1} f(x) = 1, \\ \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} f(x) &= \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_1} f(x) = 0, \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} f(x) &= \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_2} f(x) = \frac{1}{2\sqrt{x_3}}.\end{aligned}\tag{5.49}$$

Wie oben gesehen gibt es für eine multivariate reellwertige Funktion $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ insgesamt n erste partielle Ableitungen und n^2 zweite partielle Ableitungen. Diese werden im *Gradienten* und der *Hesse-Matrix* einer multivariaten reellwertigen Funktion zusammengefasst.

Definition 5.8 (Gradient). $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ sei eine multivariate reellwertige Funktion. Dann ist der *Gradient* $\nabla f(x)$ von f an der Stelle $x \in \mathbb{R}^n$ definiert als

$$\nabla f(x) := \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \\ \frac{\partial}{\partial x_2} f(x) \\ \vdots \\ \frac{\partial}{\partial x_n} f(x) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^n.\tag{5.50}$$

•

Man beachte, dass Gradienten multivariate vektorwertige Funktionen der

$$\nabla f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n, x \mapsto \nabla f(x)\tag{5.51}$$

sind. Für $n = 1$ gilt $\nabla f(x) = f'(x)$. Eine wichtige Eigenschaft des Gradienten ist, dass $-\nabla f(x)$ die Richtung des steilsten Abstiegs von f in \mathbb{R}^n anzeigt. Diese Einsicht ist aber

nicht trivial und soll an späterer Stelle vertieft werden. Als Beispiele betrachten wir die Gradienten der oben analysierten Funktionen

Beispiel (1)

Für die in Beispiel (1) betrachtete Funktion $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ gilt

$$\nabla f(x) := \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \\ \frac{\partial}{\partial x_2} f(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2x_1 \\ 2x_2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2. \quad (5.52)$$

In Abbildung 5.5 visualisieren wir ausgewählte Werte dieses Gradienten für

$$x := \begin{pmatrix} 0.7 \\ 0.7 \end{pmatrix}, \quad , \quad x := \begin{pmatrix} -0.3 \\ 0.1 \end{pmatrix}, \quad x := \begin{pmatrix} -0.5 \\ -0.4 \end{pmatrix}, \quad x := \begin{pmatrix} 0.1 \\ -1.0 \end{pmatrix}$$

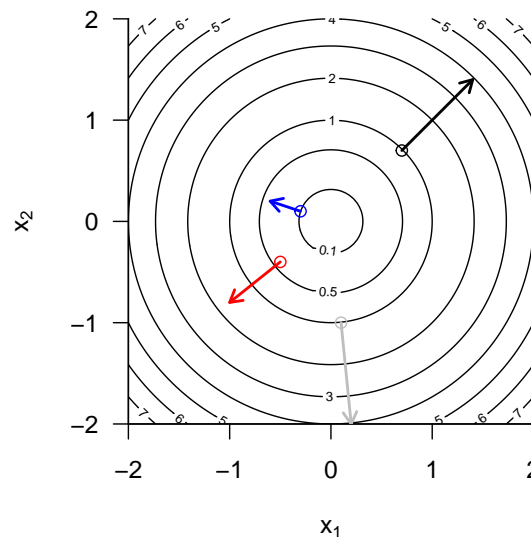


Abbildung 5.5. Exemplarische Gradientenwerte der bivariaten Funktion $f(x) = x_1^2 + x_2^2$.

Beispiel (2)

Für die in Beispiel (2) betrachtete Funktion $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ gilt

$$\nabla f(x) := \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_1} f(x) \\ \frac{\partial}{\partial x_2} f(x) \\ \frac{\partial}{\partial x_3} f(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2x_1 + x_2 \\ x_1 + \sqrt{x_3} \\ \frac{x_2}{2\sqrt{x_3}} \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3. \quad (5.53)$$

Schließlich widmen wir uns der Zusammenfassung der zweiten partiellen Ableitungen einer multivariaten reellwertigen Funktion in der *Hesse-Matrix*.

Definition 5.9 (Hesse-Matrix). $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ sei eine multivariate reellwertige Funktion. Dann ist die *Hesse-Matrix* $\nabla^2 f(x)$ von f an der Stelle $x \in \mathbb{R}^n$ definiert als

$$\nabla^2 f(x) := \begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_1} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} f(x) & \cdots & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_n} f(x) \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_1} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_2} f(x) & \cdots & \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_n} f(x) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2}{\partial x_n \partial x_1} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_n \partial x_2} f(x) & \cdots & \frac{\partial^2}{\partial x_n \partial x_n} f(x) \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{n \times n}. \quad (5.54)$$

•

Man beachte, dass Hesse-Matrizen multivariate matrixwertige Abbildungen der Form

$$\nabla^2 f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^{n \times n}, x \mapsto \nabla^2 f(x) \quad (5.55)$$

sind. Für $n = 1$ gilt $\nabla^2 f(x) = f''(x)$. Weiterhin folgt aus

$$\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} f(x) = \frac{\partial^2}{\partial x_j \partial x_i} f(x) \text{ für } 1 \leq i, j \leq n \quad (5.56)$$

dass die Hesse-Matrix symmetrisch ist, dass also

$$(\nabla^2 f(x))^T = \nabla^2 f(x) \quad (5.57)$$

gilt.

Beispiel (1)

Für die in Beispiel (1) betrachtete Funktion $f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}$ gilt

$$\nabla^2 f(x) := \begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_1} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} f(x) \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_1} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_2} f(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 0 \\ 0 & 2 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{2 \times 2} \quad (5.58)$$

Die Hesse-Matrix dieser Funktion ist also eine konstante Funktion, die nicht von x abhängt.

Beispiel (2)

Für die in Beispiel (2) betrachtete Funktion $f : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$ gilt

$$\nabla^2 f(x) := \begin{pmatrix} \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_1} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_2} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_1 \partial x_3} f(x) \\ \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_1} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_2} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} f(x) \\ \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_1} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_2} f(x) & \frac{\partial^2}{\partial x_3 \partial x_3} f(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & \frac{1}{2\sqrt{3}} \\ 0 & \frac{1}{2\sqrt{3}} & -\frac{1}{4}x_2x_3^{-3/2} \end{pmatrix}. \quad (5.59)$$

Im Gegensatz zu Beispiel (1) ist die Hesse-Matrix der hier betrachteten Funktion keine konstante Funktion und ihr Wert hängt vom Wert des Funktionsarguments $x \in \mathbb{R}^3$ ab.

5.4. Selbstkontrollfragen

1. Geben Sie die Definition des Begriffs der Ableitung $f'(a)$ einer Funktion f an einer Stelle a wieder.
2. Geben Sie die Definition des Begriffs der Ableitung f' einer Funktion f .
3. Erläutern Sie die Symbole $f'(x)$, $\dot{f}(x)$, $\frac{df(x)}{dx}$, und $\frac{d}{dx}f(x)$.
4. Geben Sie die Definition des Begriffs der zweiten Ableitung f'' einer Funktion f wieder.
5. Geben Sie die Summenregel für Ableitungen wieder.
6. Geben Sie die Produktregel für Ableitungen wieder.
7. Geben Sie die Quotientenregel für Ableitungen wieder.
8. Geben Sie die Kettenregel für Ableitungen wieder.
9. Bestimmen Sie die erste Ableitung der Funktion $f(x) := 3x^2 + \exp(-x^2) - x \ln(x)$.
10. Bestimmen Sie die erste Ableitung der Funktion $f(x) := \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$ für $\mu \in \mathbb{R}$.
11. Geben Sie die Definition der Begriffe des globalen und lokalen Maximums/Minimums einer univariaten reellwertigen Funktion wieder.
12. Geben Sie die notwendige Bedingung für ein Extremum einer Funktion wieder.
13. Geben Sie die hinreichende Bedingung für ein lokales Extremum einer Funktion wieder.
14. Geben Sie das Standardverfahren der analytischen Optimierung wieder.
15. Bestimmen Sie einen Extremwert von $f(x) := \exp(-\frac{1}{2}(x - \mu)^2)$ für $\mu \in \mathbb{R}$.
16. Berechnen Sie die partiellen Ableitungen der Funktion

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := \exp\left(-\frac{1}{2}(x_1^2 + x_2^2)\right). \quad (5.60)$$

17. Berechnen Sie die zweiten partiellen Ableitungen obiger Funktion f .
18. Geben Sie den Satz von Schwarz wieder.
19. Geben Sie die Definition des Gradienten einer multivariaten reellwertigen Funktion wieder.
20. Geben Sie den Gradienten der Funktion in Gleichung 5.60 an und werten Sie ihn in $x = (1, 2)^T$ aus.
21. Geben Sie die Definition der Hesse-Matrix einer multivariaten reellwertigen Funktion wieder.
22. Geben Sie die Hesse-Matrix der Funktion in Gleichung 5.60 an und werten Sie sie in $x = (1, 2)^T$ aus.

6. Folgen, Grenzwerte, Stetigkeit

Die in diesem Kapitel behandelten Themen sind in der probabilistischen Datenanalyse nicht zentral, sondern bilden Grundpfeiler der reellen Analysis. Durch die enge Verschränkung der modernen Wahrscheinlichkeitstheorie mit analytischen Ansätzen dienen sie jedoch dem Verständnis von zum Beispiel dem Zentralen Grenzwertsatz, der eine Hauptgrundlage für die weit verbreitete Normalverteilungsannahme in der probabilistischen Datenanalyse darstellt. In aller Kürze ist der Zentrale Grenzwertsatz eine Aussage über die Grenzfunktion einer Funktionenfolge, nämlich einer Folge von Zufallsvariablen. Das Wissen um das Wesen von Folgen, Funktionenfolgen und ihren Grenzwerten erlaubt also ein tieferes Verständnis wichtiger Grundannahmen der probabilistischen Datenanalyse. Weiterhin ermöglichen die in diesem Kapitel behandelten Themen zumindest einen ersten Einstieg in das Verständnis der Stetigkeit und Glattheit von Funktionen, die insbesondere in der nichtlinearen Optimierung zu Bestimmung von Parameterschätzern in probabilistischen Modellen wichtige Grundkonzepte bilden.

6.1. Folgen

Wir beginnen mit der Definition des Begriffs der *reellen Folge*.

Definition 6.1 (Reelle Folge). Eine *reelle Folge* ist eine Funktion der Form

$$f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}, n \mapsto f(n) \quad (6.1)$$

Die Funktionswerte $f(n)$ einer reellen Folge werden üblicherweise mit x_n bezeichnet und *Folgenglieder* genannt. Übliche Schreibweisen für Folgen sind

$$(x_1, x_2, \dots) \text{ oder } (x_n)_{n=1}^{\infty} \text{ oder } (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ oder } (x_n). \quad (6.2)$$

•

Man beachte, dass weil es unendlich viele natürliche Zahlen gibt, eine reelle Folge immer unendlich viele Folgenglieder hat. Dies sollte man sich insbesondere bei der Schreibweise (x_1, x_2, \dots) bewusst machen. Wir wollen zwei Standardbeispiele für reelle Folgen betrachten.

Beispiele für reelle Folgen

(1) Reelle Folgen der Form

$$f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}, n \mapsto f(n) := \left(\frac{1}{n}\right)^{\frac{p}{q}} \text{ mit } p, q \in \mathbb{N} \quad (6.3)$$

nennen wir *harmonische Folgen*. Für $p := q := 1$ hat eine harmonische Folge die Folgengliederform

$$\left(\frac{1}{1}, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \dots\right). \quad (6.4)$$

(2) Reelle Folgen der Form

$$f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}, n \mapsto f(n) := q^n \text{ mit } q \in]-1, 1[\quad (6.5)$$

werden *geometrische Folgen* genannt. Für $q := \frac{1}{2}$ hat eine geometrische Folge die Folengliederform

$$\begin{aligned} \left(\left(\frac{1}{2}\right)^1, \left(\frac{1}{2}\right)^2, \left(\frac{1}{2}\right)^3, \dots \right) &= \left(\left(\frac{1}{2}\right)^1, \left(\frac{1}{2}\right)^2, \left(\frac{1}{2}\right)^3, \dots \right) \\ &= \left(\frac{1^1}{2^1}, \frac{1^2}{2^2}, \frac{1^3}{2^3}, \dots \right) \\ &= \left(\frac{1}{2}, \frac{1}{4}, \frac{1}{8}, \dots \right) \end{aligned} \quad (6.6)$$

Neben den reellen Folgen, die Folgen reeller Zahlen sind, kann man auch Folgen anderer mathematischer Objekte betrachten. Eine wichtige Folgenart sind die *Funktionenfolgen*.

Definition 6.2 (Funktionenfolge). Es sei ϕ eine Menge univariater reellwertiger Funktionen mit Definitionsmenge $D \subseteq \mathbb{R}$. Dann ist eine Funktionenfolge eine Funktion der Form

$$F : \mathbb{N} \rightarrow \phi, n \mapsto F(n). \quad (6.7)$$

Die Funktionswerte $F(n)$ einer Funktionenfolgen werden üblicherweise mit f_n bezeichnet und *Folenglieder* genannt. Übliche Schreibweisen für Funktionenfolgen sind

$$(f_1, f_2, \dots) \text{ oder } (f_n)_{n=1}^{\infty} \text{ oder } (f_n)_{n \in \mathbb{N}} \text{ oder } (f_n). \quad (6.8)$$

•

Die Definition einer Funktionenfolge ist offenbar analog zur Definition einer reellen Folge. Der Unterschied zwischen einer reellen Folge und einer Funktionenfolge ist, dass die Folenglieder einer reellen Folge reelle Zahlen, die Folenglieder einer Funktionenfolgen dagegen univariate reellwertige Funktionen sind. Auch hier wollen wir zwei Standardbeispiel diskutieren.

Beispiele für Funktionenfolgen

(1) Wir betrachten die Menge ϕ der univariaten reellwertigen Funktionen der Form

$$\phi := \{f_n | f_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f_n(x) := x^n \text{ für } n \in \mathbb{N}\} \quad (6.9)$$

Dann definiert

$$F : \mathbb{N} \rightarrow \phi, n \mapsto F(n) \quad (6.10)$$

eine Funktionenfolge. Für die Funktionswerte der Folenglieder von F gilt

$$f_1(x) := x^1, f_2(x) := x^2, f_3(x) := x^3, \dots \quad (6.11)$$

(2) Wir betrachten die Menge ϕ der univariaten reellwertigen Funktionen der Form

$$\phi := \{f_n | f_n : [-a, a] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f_n(x) := \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} \text{ für } n \in \mathbb{N}\} \quad (6.12)$$

Dann definiert

$$F : \mathbb{N} \rightarrow \phi, n \mapsto F(n) \quad (6.13)$$

eine Funktionenfolge. Für die Funktionswerte der Folgenglieder von F gilt

$$f_1(x) := \sum_{k=0}^1 \frac{x^k}{k!}, f_2(x) := \sum_{k=0}^2 \frac{x^k}{k!}, f_3(x) := \sum_{k=0}^3 \frac{x^k}{k!}, \dots \quad (6.14)$$

6.2. Grenzwerte

Wenn man die Folgenglieder einer Folge betrachtet, kann man sich fragen, welche Werte eine Folge wohl annimmt, wenn der Folgenindex n sehr groß wird, also gegen unendlich strebt. Wenn in diesem Fall die Folgenglieder sehr ähnliche Werte annehmen (und nicht etwa auch unendlich groß werden), so ist man auf den Begriff des *Grenzwerts* für reelle Folgen bzw. der *Grenzfunktion* für Funktionenfolgen geführt.

Definition 6.3 (Grenzwert einer Folge). $x \in \mathbb{R}$ heißt Grenzwert einer reellen Folge $(x_n)_{n=1}^\infty$, wenn es zu jedem $\epsilon > 0$ ein $m \in \mathbb{N}$ gibt, so dass

$$|x_n - x| < \epsilon \text{ für alle } n \geq m. \quad (6.15)$$

Eine Folge, die einen Grenzwert besitzt, wird *konvergente Folge* genannt, eine Folge die keinen Grenzwert besitzt, wird *divergente Folge* genannt. Dafür, dass $x \in \mathbb{R}$ Grenzwert der Folge $(x_n)_{n=1}^\infty$ ist, schreibt man auch

$$\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = x \text{ oder } x_n \rightarrow x \text{ für } n \rightarrow \infty \text{ oder } x_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} x. \quad (6.16)$$

•

Der Grenzwert einer Folge kann also, aber muss nicht existieren. So hat zum Beispiel die Folge

$$f : \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}, n \mapsto f(n) := n \quad (6.17)$$

keinen Grenzwert, da hier sowohl n als auch $f(n)$ unendlich groß werden. Die oben betrachteten Beispiele für reelle Folgen dagegen haben Grenzwert. Dies ist Inhalt folgender Beispiele

Beispiele

(1) Für die verallgemeinerten harmonischen Folgen gilt mit $p, q \in \mathbb{N}$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{p}{q}} = 0. \quad (6.18)$$

(2) Für die geometrischen Folgen gilt mit $q \in]-1, 1[$

$$\lim_{n \rightarrow \infty} q^n = 0. \quad (6.19)$$

Man nennt die harmonischen und geometrischen Folgen entsprechend auch *Nullfolgen*. Für Beweise von Gleichung 6.18 und Gleichung 6.19 verweisen wir auf die weiterführende Literatur. Tatsächlich sind diese Beweise nicht trivial und rühren an die Grundannahmen über das Wesen der reellen Zahlen. Wir visualisieren die ersten zehn Folgenglieder sowie die Grenzwerte der harmonischen Folge für $p := q := 1$ und der geometrischen Folge für $q := 1/2$ in Abbildung 6.1.

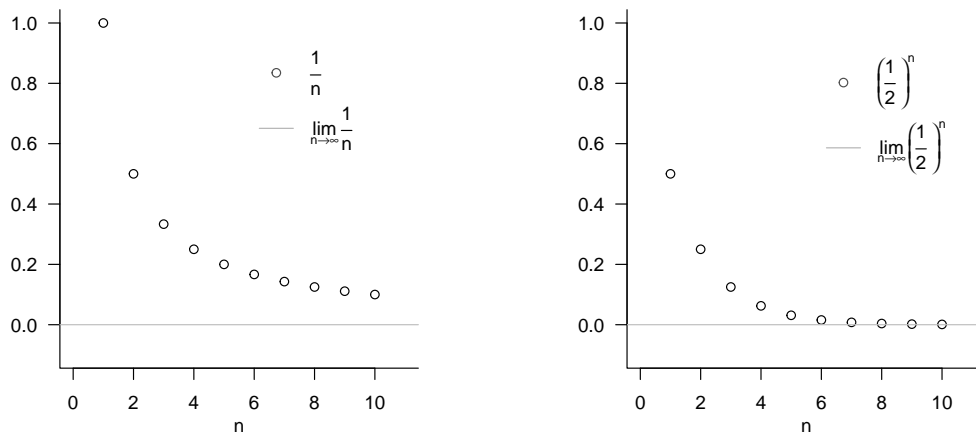


Abbildung 6.1. Beispiele für Grenzwerte reeller Folgen.

Für Funktionenfolgen ist eine Möglichkeit der Erweiterung der Begriffe der Konvergenz und des Grenzwertes folgende.

Definition 6.4 (Punktweise Konvergenz und Grenzfunktion einer Funktionenfolge). $F = (f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ sei eine Funktionenfolge von univariaten reellwertigen Funktionen mit Definitionsbereich D . F heißt *punktweise konvergent*, wenn die reelle Folge $(f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ für jedes $x \in D$ eine konvergente Folge ist, also einen Grenzwert besitzt. Die Funktion, die jedem $x \in D$ diesen Grenzwert von $(f_n(x))_{n \in \mathbb{N}}$ zuordnet, heißt dann die *Grenzfunktion* der Funktionenfolge F und hat die Form

$$f : D \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x). \quad (6.20)$$

•

Man beachte, dass die Grenzwerte von konvergenten reellen Folgen reelle Zahlen sind, die Grenzfunktionen von punktweise konvergenten Funktionenfolgen dagegen sind Funktionen. Neben der punktweisen Konvergenz von Funktionenfolgen gibt es noch den mächtigeren Begriff der *gleichmäßigen Konvergenz* von Funktionenfolgen, für den wir aber auf die weiterführende Literatur verweisen. Als Beispiel betrachten wir die Grenzfunktionen der oben diskutierten Funktionenfolgen, wobei wir für Beweise ebenfalls auf die weiterführende Literatur verweisen.

Beispiele

(1) Wir betrachten die Funktionenfolge

$$F : \mathbb{N} \rightarrow \phi, n \mapsto F(n) \quad (6.21)$$

mit

$$\phi := \{f_n | f_n : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f_n(x) := x^n \text{ für } n \in \mathbb{N}\} \quad (6.22)$$

Dann ist F punktweise konvergent mit Grenzfunktion

$$f : [0, 1] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := \begin{cases} 0, & \text{für } x \in [0, 1[\\ 1, & \text{für } x = 1 \end{cases} \quad (6.23)$$

da $f_n(x) := x^n$ für $x \in [0, 1[$ eine geometrische Folge und damit eine Nullfolge ist und $f_n(x) := x^n$ für $x = 1$ eine konstante Folge ist, für die alle Folgenglieder den Abstand 0 von 1 haben. Die Funktionenfolge F konvergiert also gegen eine Funktion, die auf dem gesamten Intervall $[0, 1]$ gleich Null ist, außer im Punkt 1. Diese Funktion hat offenbar einen Sprung.

(2) Wir betrachten die Funktionenfolge

$$F : \mathbb{N} \rightarrow \phi, n \mapsto F(n) \quad (6.24)$$

mit

$$\phi := \{f_n | f_n : [-a, a] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f_n(x) := \sum_{k=0}^n \frac{x^k}{k!} \text{ für } n \in \mathbb{N}\} \quad (6.25)$$

Dann ist F punktweise konvergent mit Grenzfunktion

$$f : [-a, a] \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} =: \exp(x) \quad (6.26)$$

Die Funktionenfolge F konvergiert also gegen die Exponentialfunktion auf $[-a, a]$. Umgekehrt betrachtet ist die Exponentialfunktion gerade durch

$$\exp(x) := \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!} \quad (6.27)$$

definiert.

6.3. Stetigkeit

In diesem Abschnitt versuchen wir uns dem Begriff der *Stetigkeit* einer Funktion zu nähern. Intuitiv ist eine Funktion stetig, wenn sie keine Sprünge hat oder äquivalent, wenn kleine Änderungen in ihren Argumenten stets nur zu kleinen Änderungen in ihren Funktionswerten (und damit eben keinen Sprüngen) führen. Zur Definition der Stetigkeit benötigen wir zunächst den Begriff des *Grenzwertes einer Funktion*.

Definition 6.5 (Grenzwert einer Funktion).

Für $D \subseteq \mathbb{R}$ und $Z \subseteq \mathbb{R}$ sei $f : D \rightarrow Z, x \mapsto f(x)$ eine Funktion und es seien $a, b \in \mathbb{R}$. b heißt *Grenzwert der Funktion f für x gegen a* , wenn

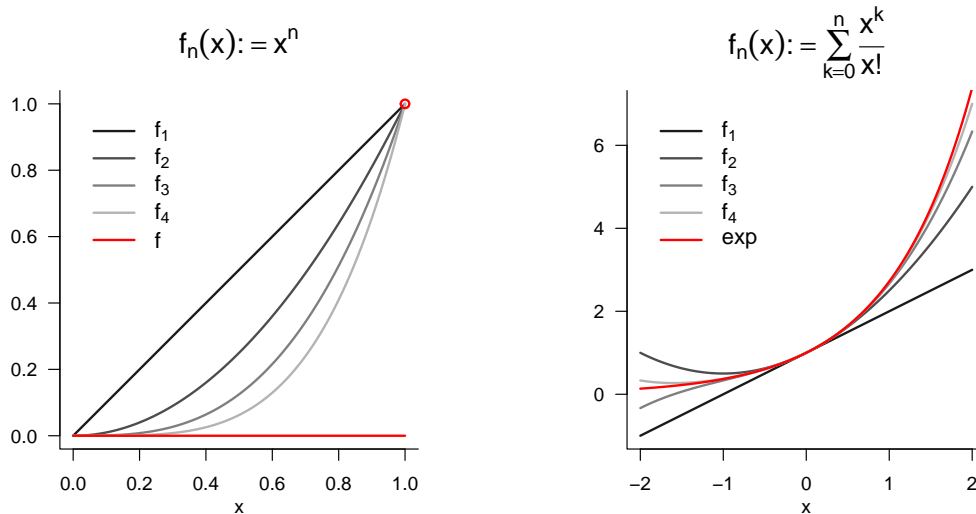


Abbildung 6.2. Beispiele für Grenzwerte von Funktionenfolgen

- (1) es eine reelle Folge $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ mit Folgengliedern in D mit Grenzwert a gibt, also $\lim_{n \rightarrow \infty} x_n = a$ gilt, und
- (2) für jede solche Folge gilt, dass b der Grenzwert der Folge der Funktionswerte $f(x_n)$ der Folgenglieder von $(x_n)_{n=1}^{\infty}$ ist, also $\lim_{n \rightarrow \infty} f(x_n) = b$ gilt.

Wenn b Grenzwert der Funktion f für x gegen a ist, so schreibt man auch $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = b$.

•

In [Abbildung 6.3](#) visualisieren wir den Grenzwert der Exponentialfunktion in $a = 1$ durch Darstellung von Folgengliedern $x_n \rightarrow 1$ und den entsprechenden Folgengliedern $f(x_n)$. Offenbar gilt $\lim_{x \rightarrow 1} \exp(x) = e$.

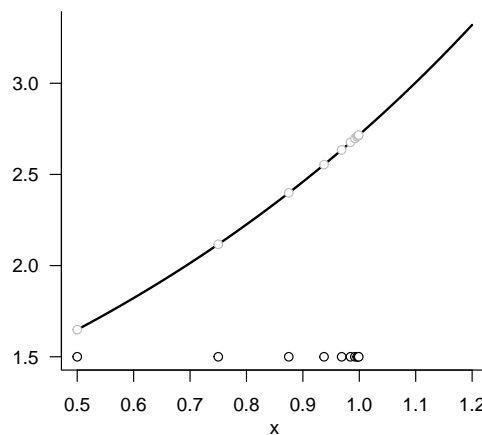


Abbildung 6.3. Beispiele für einen Grenzwert einer Funktion

Wir können nun den Begriff der Stetigkeit einer Funktion definieren.

Definition 6.6 (Stetigkeit einer Funktion). Eine Funktion $f : D \rightarrow Z$ mit $D \subseteq \mathbb{R}, Z \subseteq \mathbb{R}$ heißt *stetig in* $a \in D$, wenn

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a). \quad (6.28)$$

Ist f in jedem $x \in D$ stetig, so heißt f *stetig auf* D .

•

Man beachte, dass für eine in a stetige Funktion folgt, dass

$$\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f\left(\lim_{x \rightarrow a} x\right) \quad (6.29)$$

Bei stetigen Funktion können also Grenzwertbildung und Auswertung der Funktion vertauscht werden.

7. Integralrechnung

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über zentrale Begriffe der Integralrechnung. Das Hauptaugenmerk liegt dabei durchgängig auf der Klärung von Begrifflichkeiten, ihrer mathematischen Symbolik und der durch sie vermittelten Intuition und weniger auf der konkreten Berechnung von Integralen.

7.1. Unbestimmte Integrale

Wir beginnen mit der Definition des unbestimmten Integrals und dem Begriff der Stammfunktion.

Definition 7.1 (Unbestimmtes Integral und Stammfunktion). Für ein Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$ sei $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine univariate reellwertige Funktion. Dann heißt eine differenzierbare Funktion $F : I \rightarrow \mathbb{R}$ mit der Eigenschaft

$$F' = f \tag{7.1}$$

Stammfunktion von f . Ist F eine Stammfunktion von f , dann heißt

$$\int f(x) dx := F + c \text{ mit } c \in \mathbb{R} \tag{7.2}$$

unbestimmtes Integral der Funktion f . Das unbestimmte Integral einer Funktion bezeichnet damit die Menge aller Stammfunktionen einer Funktion.

•

Obige Definition besagt, dass die Ableitung der Stammfunktion einer Funktion f eben f ist. Das unbestimmte Integral einer Funktion f ist darüber hinaus die Menge *aller* durch Addition verschiedener Konstanten $c \in \mathbb{R}$ gegebenen Stammfunktionen von f . Eine solche Konstante $c \in \mathbb{R}$ heißt auch *Integrationskonstante*; es gilt natürlich $\frac{d}{dx}c = 0$. Das Symbol $\int f(x) dx$ ist als $F + c$ definiert. $f(x)$ wird in diesem Ausdruck *Integrand* genannt. \int und dx haben keine eigentliche Bedeutung, sondern sind reine Symbole.

Für die in vorherigen Abschnitten eingeführten elementaren Funktionen ergeben sich die in Tabelle 7.1 aufgelisteten Stammfunktionen. Man überzeugt sich davon durch Ableiten der jeweiligen Stammfunktion mithilfe der Rechenregeln der Differentialrechnung. Die uneigentlichen Integrale dieser elementaren Funktionen ergeben sich dann direkt aus diesen Stammfunktionen durch Addition einer Integrationskonstanten.

Tabelle 7.1. Stammfunktionen elementarer Funktionen

Name	Definition	Stammfunktion
Polynomfunktion	$f(x) := \sum_{i=0}^n a_i x^i$	$F(x) = \sum_{i=0}^n \frac{a_i}{i+1} x^{i+1}$
Konstante Funktion	$f(x) := a$	$F(x) = ax$

Name	Definition	Stammfunktion
Identitätsfunktion	$f(x) := x$	$F(x) = \frac{1}{2}x^2$
Linear-affine Funktion	$f(x) := ax + b$	$F(x) = \frac{1}{2}ax^2 + bx$
Quadratfunktion	$f(x) := x^2$	$F(x) = \frac{1}{3}x^3$
Exponentialfunktion	$f(x) := \exp(x)$	$F(x) = \exp(x)$
Logarithmusfunktion	$f(x) := \ln(x)$	$F(x) = x \ln x - x$

Die in nachfolgendem Theorem zusammengestellten Rechenregeln sind oft hilfreich, um Stammfunktionen von Funktionen zu bestimmen, die sich aus Funktionen mit bekannten Stammfunktionen zusammensetzen.

Theorem 7.1 (Rechenregeln für Stammfunktionen). *f und g seien univariate reellwertige Funktion, die Stammfunktionen besitzen, und g sei invertierbar. Dann gelten folgende Rechenregeln für die Bestimmung von Stammfunktionen*

(1) *Summenregel*

$$\int af(x) + bg(x) dx = a \int f(x) dx + b \int g(x) dx \text{ für } a, b \in \mathbb{R} \quad (7.3)$$

(2) *Partielle Integration*

$$\int f'(x)g(x) dx = f(x)g(x) - \int f(x)g'(x) dx \quad (7.4)$$

(3) *Substitutionsregel*

$$\int f(g(x))g'(x) dx = \int f(t) dt \text{ mit } t = g(x) \quad (7.5)$$

◦

Beweis. Für einen Beweis der Summenregel verweisen wir auf die weiterführende Literatur. Die Rechenregel der partiellen Integration ergibt sich durch Integration der Produktregel der Differentiation. Wir erinnern uns, dass gilt

$$(f(x)g(x))' = f'(x)g(x) + f(x)g'(x). \quad (7.6)$$

Integration beider Seiten der Gleichung und Berücksichtigung der Summenregel für Stammfunktionen ergibt dann

$$\begin{aligned} \int (f(x)g(x))' dx &= \int f'(x)g(x) + f(x)g'(x) dx \\ &\Leftrightarrow f(x)g(x) = \int f'(x)g(x) dx + \int f(x)g'(x) dx \\ &\Leftrightarrow \int f'(x)g(x) dx = f(x)g(x) - \int f(x)g'(x) dx. \end{aligned} \quad (7.7)$$

Die Substitutionsregel ergibt sich für $F' = f$ durch Anwendung der Kettenregel der Differentiation auf die verkettete Funktion $F(g)$. Speziell gilt zunächst

$$(F(g(x)))' = F'(g(x))g'(x) = f(g(x))g'(x). \quad (7.8)$$

Integration beider Seiten der Gleichung

$$(F(g(x)))' = f(g(x))g'(x) \quad (7.9)$$

ergibt dann

$$\begin{aligned} \int (F(g(x)))' dx &= \int f(g(x))g'(x) dx \\ &\Leftrightarrow F(g(x)) + c = \int f(g(x))g'(x) dx \\ &\Leftrightarrow \int f(g(x))g'(x) dx = \int f(t) dt \text{ mit } t := g(x). \end{aligned} \quad (7.10)$$

Dabei ist die rechte Seite der letzten obigen Gleichung zu verstehen als $F(g(x)) + c$, also als Stammfunktion von f evaluiert an der Stelle $t := g(x)$. Das dt ist nicht durch $dg(x)$ zu ersetzen, sondern rein notationeller Natur.

□

Unbestimmte Integrale nehmen in der Lösung von Differentialgleichungen einen zentralen Platz ein. Naheliegender ist aber zunächst die Anwendung unbestimmter Integrale im Kontext der Auswertung *bestimmter Integrale*, wie im nächsten Abschnitt eingeführt.

7.2. Bestimmte Integrale

Anschaulich entspricht ein bestimmtes Integral der vorzeichenbehafteten und auf ein Intervall $[a, b]$ beschränkten Fläche zwischen dem Graphen einer Funktion f und der x -Achse (vgl. Abbildung 7.1). *Vorzeichenbehaftet* heißt dabei, dass Flächen zwischen der x -Achse und positiven Werten von f positiv zur Fläche beitragen, Flächen zwischen der x und negativen Werten von f dagegen negativ. So ergeben sich zum Beispiel der Wert des in Abbildung 7.1 A gezeigten bestimmten Integral zu 0.68, der Wert des in Abbildung 7.1 B gezeigten bestimmten Integrals zu 0.95 (die eingezeichnete Fläche ist offensichtlich größer als in Abbildung 7.1 A) und der Wert des in Abbildung 7.1 C gezeigten bestimmten Integrals zu 0 (die eingezeichneten positiven und negativen Flächen gleichen sich genau aus). Letzteres Beispiel legt auch die Interpretation des Integrals als Durchschnittswert einer Funktion f über einem Intervall $[a, b]$ nahe.

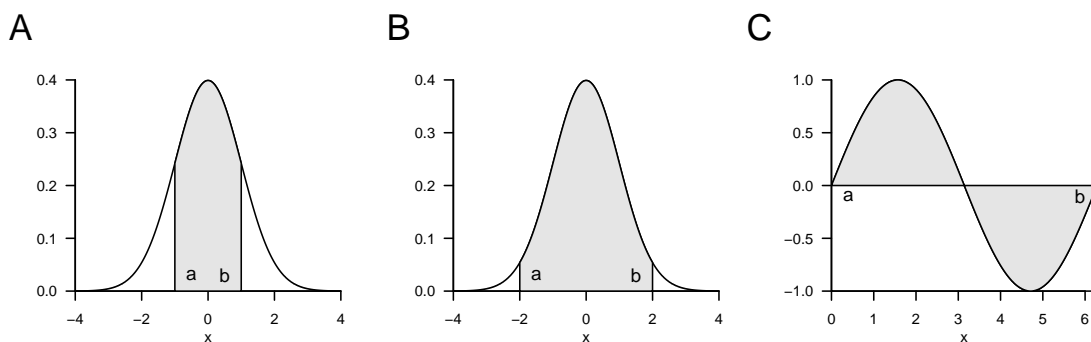


Abbildung 7.1. Beispiele bestimmter Integrale

Um den Begriff des *bestimmten Integrals* im Sinne des *Riemannsches Integrals* einführen zu können, müssen wir zunächst etwas Vorarbeit leisten. Wir beginnen damit, einen Begriff für die Aufteilung eines Intervalls in kleinere Abschnitte einzuführen.

Definition 7.2 (Zerlegung eines Intervalls und Feinheit). Es sei $[a, b] \subset \mathbb{R}$ ein Intervall und $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n \in [a, b]$ eine Menge von Punkten mit

$$a =: x_0 < x_1 < x_2 \cdots < x_n := b \quad (7.11)$$

und

$$\Delta x_i := x_i - x_{i-1} \text{ für } i = 1, \dots, n. \quad (7.12)$$

Dann heißt die Menge

$$Z := \{[x_0, x_1], [x_1, x_2], \dots, [x_{n-1}, x_n]\} \quad (7.13)$$

der durch $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$ definierten Teilintervalle von $[a, b]$ eine *Zerlegung von $[a, b]$* . Weiterhin heißt

$$Z_{\max} := \max_{i \in n} \Delta x_i, \quad (7.14)$$

also die größte der Teilintervalllängen Δx_i , die *Feinheit von Z* .

•

Anschaulich ist Δx_i die Breite der Rechtecke in Abbildung 7.2, wie wir in der Folge sehen werden. Mithilfe der Begriffe der Zerlegung eines Intervalls können wir nun den Begriff der *Riemannschen Summen* einführen.

Definition 7.3 (Riemannsche Summen). $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ sei eine beschränkte Funktion auf $[a, b]$, d.h. $|f(x)| < c$ für $0 < c < \infty$ und alle $x \in [a, b]$, Z sei eine Zerlegung von $[a, b]$ mit Teilintervalllängen Δx_i für $i = 1, \dots, n$. Weiterhin sei ξ_i für $i = 1, \dots, n$ ein beliebiger Punkt im Teilintervall $[x_{i-1}, x_i]$ der Zerlegung Z . Dann heißt

$$R(Z) := \sum_{i=1}^n f(\xi_i) \Delta x_i \quad (7.15)$$

Riemannsche Summe von f auf $[a, b]$ bezüglich der Zerlegung Z .

•

Wählt man zum Beispiel in der Riemannschen Summe in jedem Teilintervall das Maximum von f , so ergibt sich die sogenannte *Riemannsche Obersumme*,

$$R_o(Z) := \sum_{i=1}^n \left(\max_{[x_{i-1}, x_i]} f(\xi_i) \right) \Delta x_i. \quad (7.16)$$

Wählt man dagegen in jedem Teilintervall dagegen das Minimum von f , so ergibt sich die sogenannte *Riemannsche Untersumme*.

$$R_u(Z) := \sum_{i=1}^n \left(\min_{[x_{i-1}, x_i]} f(\xi_i) \right) \Delta x_i. \quad (7.17)$$

Abbildung 7.2 verdeutlicht die Definition dieser Riemannschen Summen: die dunkelgrauen Rechtecke haben jeweils die Fläche $[x_{i-1}, x_i] \cdot \min_{[x_{i-1}, x_i]} f(\xi)$ und bilden damit die Summenterme in der Riemannschen Untersumme

$$R_u(Z) := \sum_{i=1}^4 \left(\min_{[x_{i-1}, x_i]} f(\xi_i) \right) \cdot \Delta x_i. \quad (7.18)$$

Die vertikale Kombination aus dunkelgrauen und hellgrauen Rechtecken hat jeweils die Fläche $[x_{i-1}, x_i] \cdot \max_{[x_{i-1}, x_i]} f(\xi)$ und bilden damit die Summenterme in der Riemannschen Obersumme

$$R_o(Z) := \sum_{i=1}^4 \left(\max_{[x_{i-1}, x_i]} f(\xi_i) \right) \cdot \Delta x_i. \quad (7.19)$$

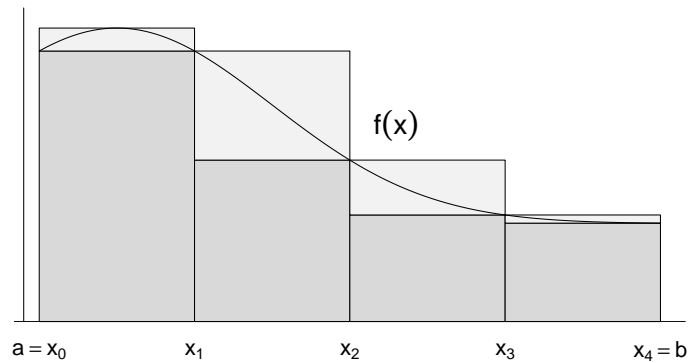


Abbildung 7.2. Riemannsche Summen

Stellt man sich nun vor, dass man Δx_i für alle $i = 1, \dots, n$ gegen Null gehen lässt, verkleinert man die Feinheit der Zerlegung Z also immer weiter, so werden sich die Werte von $\min_{[x_{i-1}, x_i]} f(\xi_i)$ und $\max_{[x_{i-1}, x_i]} f(\xi_i)$ und damit auch die Werte von $R_u(Z)$ und $R_o(Z)$ immer weiter annähern. Diesen Grenzprozess macht man sich in der Definition des Riemannschen Integrals zunutze.

Definition 7.4 (Bestimmtes Riemannsches Integral). $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ sei eine beschränkte reellwertige Funktion auf $[a, b]$. Weiterhin sei für Z_k mit $k = 1, 2, 3, \dots$ eine Folge von Zerlegungen von $[a, b]$ mit zugehörigen Feinheit $Z_{\max, k}$. Wenn für jede Folge von Zerlegungen Z_1, Z_2, \dots mit $|Z_{\max, k}| \rightarrow 0$ für $k \rightarrow \infty$ und für beliebig gewählte Punkte ξ_{ki} mit $i = 1, \dots, n$ im Teilintervall $[x_{k,i-1}, x_{k,i}]$ der Zerlegung Z_k gilt, dass die Folge der zugehörigen Riemannschen Summen $R(Z_1), R(Z_2), \dots$ gegen den gleichen Grenzwert strebt, dann heißt f auf $[a, b]$ *integrierbar*. Der entsprechende Grenzwert der Folge von Riemannschen Summen wird *bestimmtes Riemannsches Integral* genannt und mit

$$\int_a^b f(x) dx := \lim_{k \rightarrow \infty} R(Z_k) \text{ für } |Z_{\max, k}| \rightarrow 0 \quad (7.20)$$

bezeichnet. Die Werte a und b bezeichnet man in diesem Kontext als *untere* und *obere* Integrationsgrenzen, respektive, $f(x)$ als *Integrand* und x als *Integrationsvariable*.

•

Die Riemannsche Integrierbarkeit einer Funktion und der Wert eines bestimmten Riemannschen Integrals sind also im Sinne einer Grenzwertbildung definiert. Die Theorie der Riemannschen Integrale lässt sich allerdings um die Hauptsätze der Differential- und Integralrechnung erweitern, so dass zur konkreten Berechnung eines bestimmten Integrals die Bildung von Zerlegungen und die Bestimmung eines Grenzwertes nur selten nötig ist. Der Einfachheit halber verzichten wir in der Folge auf die Bezeichnungen *Riemannsche* und sprechen einfach von *bestimmten Integralen*.

Ein erster Schritt zur Vereinfachung der Berechnung von bestimmten Integralen ist das Feststellen folgender Rechenregeln, für deren Beweis wir auf die weiterführende Literatur verweisen.

Theorem 7.2 (Rechenregeln für bestimmte Integrale). *Es seien f und g integrierbare Funktionen auf $[a, b]$. Dann gelten folgende Rechenregeln.*

(1) *Linearität. Für $c_1, c_2 \in \mathbb{R}$ gilt*

$$\int_a^b (c_1 f(x) + c_2 g(x)) dx = c_1 \int_a^b f(x) dx + c_2 \int_a^b f(x) dx. \quad (7.21)$$

(2) *Additivität. Für $a < c < b$ gilt*

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^c f(x) dx + \int_c^b f(x) dx. \quad (7.22)$$

(3) *Vorzeichenwechsel bei Umkehrung der Integralgrenzen*

$$\int_a^b f(x) dx = - \int_b^a f(x) dx. \quad (7.23)$$

(4) *Unabhängigkeit von der Wahl der Integrationsvariable*

$$\int_a^b f(x) dx = \int_a^b f(y) dy. \quad (7.24)$$

(5) *Unabhängigkeit des Integrals von Art des Intervalls. Es gilt*

$$\int_a^b f(x) dx = \int_{[a,b[} f(x) dx = \int_{[a,b[} f(x) dx = \int_{]a,b]} f(x) dx = \int_{[a,b]} f(x) dx. \quad (7.25)$$

wobei \int_I das bestimmte Integral von f auf dem Intervall $I \subseteq \mathbb{R}$ bezeichnet.

◦

Eine graphische Darstellung der Rechenregel der Additivität findet sich in Abbildung 7.3. Die Summe der durch die bestimmten Integrale gegebenen Flächen $\int_a^c f(x) dx$ und $\int_c^b f(x) dx$ mit $a < c < b$ ergibt sich dabei zur Fläche von $\int_a^b f(x) dx$.

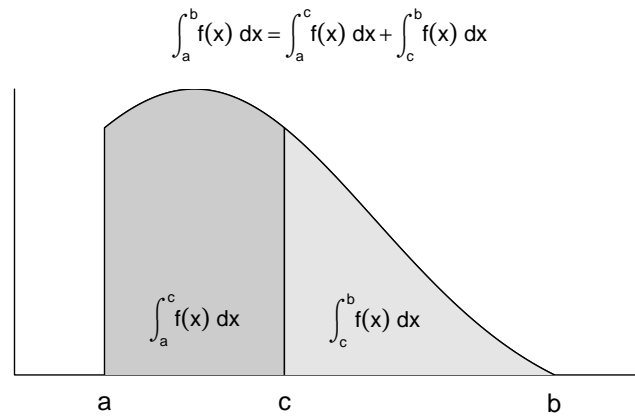
Die in der Nachfolge vermerkten Hauptsätze der Differential- und Integralrechnung schließlich, ermöglichen es, bestimmte Integrale einer Funktion f direkt mithilfe der Stammfunktion F von f zu berechnen.

Theorem 7.3 (Erster Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung). *Ist $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ eine auf dem Intervall $I \subset \mathbb{R}$ stetige Funktion, dann ist die Funktion*

$$F : I \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto F(x) := \int_a^x f(t) dt \text{ mit } x, a \in I \quad (7.26)$$

eine Stammfunktion von f .

◦

**Abbildung 7.3.** Additivität bestimmter Integrale

Beweis. Wir betrachten den Differenzquotienten

$$\frac{1}{h}(F(x+h) - F(x)) \quad (7.27)$$

Mit der Definition $F(x) := \int_a^x f(t) \, dt$ und der Additivität des bestimmten Integrals gilt dann

$$\frac{1}{h}(F(x+h) - F(x)) = \frac{1}{h} \left(\int_a^{x+h} f(t) \, dt - \int_a^x f(t) \, dt \right) = \frac{1}{h} \int_x^{x+h} f(t) \, dt \quad (7.28)$$

Mit dem Mittelwertsatz der Integralrechnung gibt es also ein $\xi \in]x, x+h[$, so dass

$$\frac{1}{h}(F(x+h) - F(x)) = f(\xi) \quad (7.29)$$

Grenzwertbildung ergibt dann

$$\lim_{h \rightarrow 0} \frac{1}{h}(F(x+h) - F(x)) = \lim_{h \rightarrow 0} f(\xi) \text{ für } \xi \in]x, x+h[\Leftrightarrow F'(x) = f(x). \quad (7.30)$$

□

Für den Beweis des Ersten Hauptsatzes der Differential- und Integralrechnung benötigen wir offenbar den Mittelwertsatz der Integralrechnung, welchen wir hier ohne Beweis wiedergeben und in [Abbildung 7.4](#) veranschaulichen.

Theorem 7.4 (Mittelwertsatz der Integralrechnung). *Für eine stetige Funktion $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ existiert ein $\xi \in]a, b[$ mit*

$$\int_a^b f(x) \, dx = f(\xi)(b-a) \quad (7.31)$$

◦

Der Mittelwertsatz der Integralrechnung garantiert die Existenz eines $\xi \in [a, b]$, so dass das bestimmte Integral $\int_a^b f(x) \, dx$ gleich dem Produkt aus der “Rechteckhöhe” $f(\xi)$ und

und der “Rechteckbreite” $(b - a)$ ist. In Abbildung 7.4 liegt dieses ξ genau mittig zwischen a und b . Dass die sich so ergebene grau eingefärbte Rechteckfläche gleich $\int_a^b f(x) dx$ ist, ergibt sich aus der visuell zumindest nachvollziehbaren Tatsache, dass die Flächen zwischen $f(x)$ und $f(\xi)$ im Intervall $[a, \xi]$ und zwischen $f(\xi)$ und $f(x)$ im Intervall $[\xi, b]$ den gleichen Betrag haben, erstere aber mit einem negativen Vorzeichen behaftet ist. Der Mittelwertsatz der Integralrechnung garantiert im Allgemeinen aber nur die Existenz eines $\xi \in [a, b]$ mit der diskutierten Eigenschaft, gibt aber keine Formel zu Bestimmung von ξ an.

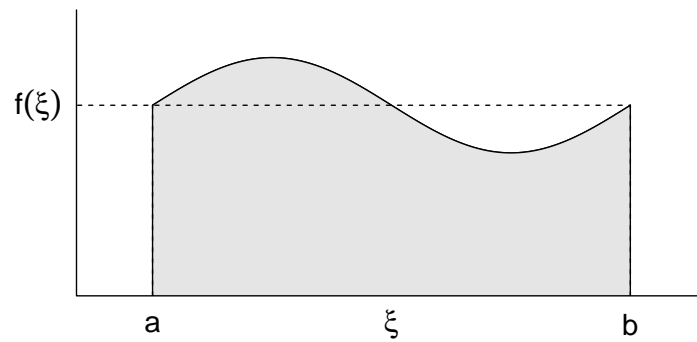


Abbildung 7.4. Zum Mittelwertsatz der Integralrechnung

Der Zweite Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung schließlich besagt, wie man mithilfe der Stammfunktion ein bestimmtes Integral berechnet.

Theorem 7.5 (Zweiter Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung). *Ist F eine Stammfunktion einer stetigen Funktion $f : I \rightarrow \mathbb{R}$ auf einem Intervall I , so gilt für $a, b \in I$ mit $a \leq b$*

$$\int_a^b f(x) dx = F(b) - F(a) =: F(x)|_a^b \quad (7.32)$$

◦

Beweis. Mit den Rechenregeln für bestimmte Integrale und dem ersten Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung ergibt sich

$$F(b) - F(a) = \int_a^b f(t) dt - \int_a^a f(t) dt = \int_a^b f(x) dx \quad (7.33)$$

□

Wir wollen den Zweiten Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung in drei Beispielen anwenden (vgl. Abbildung 7.5).

Beispiel (1)

Wir betrachten die Identitätsfunktion

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := x \quad (7.34)$$

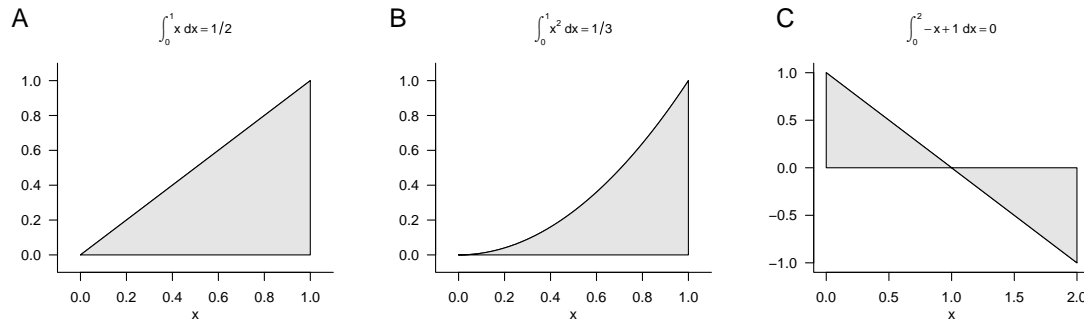


Abbildung 7.5. Beispiele zum Zweiten Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung

und wollen das bestimmte Integral dieser Funktion auf dem Intervall $[0, 1]$, also

$$\int_0^1 f(x) \, dx = \int_0^1 x \, dx \quad (7.35)$$

berechnen. Dazu erinnern wir uns, dass eine Stammfunktion von f durch

$$F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto F(x) := \frac{1}{2}x^2 \quad (7.36)$$

gegeben ist, weil

$$F'(x) = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{2}x^2 \right) = 2 \cdot \frac{1}{2}x^{2-1} = x. \quad (7.37)$$

Einsetzen in den Zweiten Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung ergibt dann sofort

$$\int_0^1 x \, dx = \frac{1}{2}1^2 - \frac{1}{2}0^2 = \frac{1}{2}. \quad (7.38)$$

Dieses Ergebnis ist mit der Intuition, die sich anhand der grauen Fläche in Abbildung 7.5 A, ergibt kongruent.

Beispiel (2)

Als nächstes betrachten wird die Quadratfunktion

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := x^2 \quad (7.39)$$

und wollen das bestimmte Integral auch dieser Funktion auf dem Intervall $[0, 1]$, also

$$\int_0^1 f(x) \, dx = \int_0^1 x^2 \, dx \quad (7.40)$$

berechnen. Dazu erinnern wir uns, dass eine Stammfunktion von f durch

$$F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto F(x) := \frac{1}{3}x^3 \quad (7.41)$$

gegeben ist, weil

$$F'(x) = \frac{d}{dx} \left(\frac{1}{3}x^3 \right) = 3 \cdot \frac{1}{3}x^{3-1} = x^2. \quad (7.42)$$

Einsetzen in den Zweiten Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung ergibt dann sofort

$$\int_0^1 x^2 dx = \frac{1}{3}1^3 - \frac{1}{3}0^3 = \frac{1}{3}. \quad (7.43)$$

Dieses Ergebnis ist mit der Intuition, die sich aus dem Vergleich der grauen Flächen in Abbildung 7.5 A und Abbildung 7.5 B ergibt, kongruent.

Beispiel (3)

Schließlich betrachten wir die lineare Funktion

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) := -x + 1 \quad (7.44)$$

und wollen das bestimmte Integral auch dieser Funktion auf dem Intervall $[0, 2]$, also

$$\int_0^2 f(x) dx = \int_0^2 -x + 1 dx \quad (7.45)$$

berechnen. Dazu erinnern wir uns, dass eine Stammfunktion der linearen Funktion mit $a = -1$ und $b = 1$ (vgl. Tabelle 7.1) durch

$$F : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto F(x) := -\frac{1}{2}x^2 + x \quad (7.46)$$

gegeben ist, weil

$$F'(x) = \frac{d}{dx} \left(-\frac{1}{2}x^2 + x \right) = -2 \cdot \frac{1}{2}x^{2-1} + 1 \cdot x^{1-1} = -x + 1. \quad (7.47)$$

Einsetzen in den Zweiten Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung ergibt dann sofort

$$\int_0^2 -x + 1 dx = \left(-\frac{1}{2}2^2 + 2 \right) - \left(-\frac{1}{2}0^2 + 0 \right) = -2 + 2 - 0 = 0. \quad (7.48)$$

Dieses Ergebnis ist mit der Intuition kongruent, dass sich die “positive” und die “negative” graue Fläche in Abbildung 7.5 C ausgleichen, kongruent.

7.3. Uneigentliche Integrale

Uneigentliche Integrale sind bestimmte Integrale bei denen mindestens eine Integrationsgrenze keine reelle Zahl ist, sondern $-\infty$ oder ∞ . Wir beleuchten die Natur uneigentlicher Integrale mit folgender Definition und einem Beispiel.

Definition 7.5 (Uneigentliche Integrale). $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ sei eine univariate reellwertige Funktion. Mit den Definitionen

$$\int_{-\infty}^b f(x) dx := \lim_{a \rightarrow -\infty} \int_a^b f(x) dx \text{ und } \int_a^{\infty} f(x) dx := \lim_{b \rightarrow \infty} \int_a^b f(x) dx \quad (7.49)$$

und der Additivität von Integralen

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = \int_{-\infty}^b f(x) dx + \int_b^{\infty} f(x) dx \quad (7.50)$$

wird der Begriff des bestimmten Integrals auf die unbeschränkten Integrationsintervalle $]-\infty, b]$, $[a, \infty[$ und $]-\infty, \infty[$ erweitert. Integrale mit unbeschränkten Integrationsintervallen heißen *uneigentliche Integrale*. Wenn die entsprechenden Grenzwerte existieren, sagt man, dass die uneigentlichen Integrale *konvergieren*.

•

Als Beispiel betrachten wir das uneigentliche Integral der Funktion

$$f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, x \mapsto f(x) \frac{1}{x^2} \quad (7.51)$$

auf dem Intervall $[1, \infty[$, also

$$\int_1^\infty \frac{1}{x^2} dx. \quad (7.52)$$

Nach den Festlegungen in der Definition uneigentlicher Integrale gilt

$$\int_1^\infty \frac{1}{x^2} dx = \lim_{b \rightarrow \infty} \int_1^b \frac{1}{x^2} dx. \quad (7.53)$$

Mit der Stammfunktion $F(x) = -x^{-1}$ von $f(x) = x^{-2}$ ergibt sich für das bestimmte Integral in obiger Gleichung

$$\int_1^b \frac{1}{x^2} dx = F(b) - F(1) = -\frac{1}{b} - \left(-\frac{1}{1}\right) = -\frac{1}{b} + 1. \quad (7.54)$$

Es ergibt sich also

$$\int_1^\infty \frac{1}{x^2} dx = \lim_{b \rightarrow \infty} \int_1^b \frac{1}{x^2} dx = \lim_{b \rightarrow \infty} \left(-\frac{1}{b} + 1\right) = -\lim_{b \rightarrow \infty} \frac{1}{b} + \lim_{b \rightarrow \infty} 1 = 0 + 1 = 1. \quad (7.55)$$

7.4. Mehrdimensionale Integrale

Bisher haben wir nur Integrale univariater reellwertiger Funktionen betrachtet. Der Integralbegriff lässt sich auch auf multivariate reellwertige Funktionen erweitern. Allerdings ist dann der Integrationsbereich der Funktion nicht notwendigerweise so einfach zu beschreiben wie ein Intervall; insbesondere sind zum Beispiel schon im zweidimensionalen arbiträr geformte zweidimensionale Integrationsbereiche möglich. Wir wollen hier nun den einfachsten Fall eines Hyperrechtecks betrachten. In diesem Fall können wir mehrdimensionale bestimmte Integrale wie folgt definieren.

Definition 7.6 (Mehrdimensionale Integrale). $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ sei eine multivariate reellwertige Funktion. Dann heißen Integrale der Form

$$\int_{[a_1, b_1] \times \dots \times [a_n, b_n]} f(x) dx = \int_{a_1}^{b_1} \dots \int_{a_n}^{b_n} f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (7.56)$$

mehrdimensionale bestimmte Integrale auf Hyperrechtecken. Weiterhin heißen Integrale der Form

$$\int_{\mathbb{R}^n} f(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} f(x_1, \dots, x_n) dx_1 \dots dx_n \quad (7.57)$$

mehrdimensionale uneigentliche Integrale.

•

Wie schon erwähnt kann man multivariate reellwertige Funktion nicht nur auf Hyperrechtecken, sondern im Prinzip auf beliebigen Hyperflächen integrieren. Dies kann sich jedoch oft schwierig gestalten.

Als Beispiel betrachten wir das zweidimensionale bestimmte Integral der Funktion

$$f : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}, (x_1, x_2) \mapsto f(x_1, x_2) := x_1^2 + 4x_2 \quad (7.58)$$

auf dem Rechteck $[0, 1] \times [0, 1]$. Der *Satz von Fubini* der Theorie mehrdimensionaler Integrale besagt, dass man mehrdimensionale Integrale in beliebiger Koordinatenfolge auswerten kann. Es gilt also zum Beispiel, dass

$$\int_{a_1}^{b_1} \left(\int_{a_2}^{b_2} f(x_1, x_2) dx_2 \right) dx_1 = \int_{a_2}^{b_2} \left(\int_{a_1}^{b_1} f(x_1, x_2) dx_1 \right) dx_2. \quad (7.59)$$

In diesem Sinne betrachten wir für das Beispiel

$$\int_0^1 \int_0^1 x_1^2 + 4x_2 dx_1 dx_2 = \int_0^1 \left(\int_0^1 x_1^2 + 4x_2 dx_1 \right) dx_2 \quad (7.60)$$

also zunächst das innere Integral. x_2 nimmt dabei die Rolle einer Konstanten ein. Eine Stammfunktion von $g(x_1) := x_1^2 + 4x_2$ ist $G(x_1) = \frac{1}{3}x_1^3 + 4x_2x_1$, wie man sich durch Ableiten von G überzeugt. Es ergibt sich also für das innere Integral

$$\begin{aligned} \int_0^1 x_1^2 + 4x_2 dx_1 &= G(1) - G(0) \\ &= \frac{1}{3} \cdot 1^3 + 4x_2 \cdot 1 - \frac{1}{3} \cdot 0^3 - 4x_2 \cdot 0 \\ &= \frac{1}{3} + 4x_2. \end{aligned} \quad (7.61)$$

Betrachten des äußeren Integrals ergibt dann mit der Stammfunktion

$$H(x_2) = \frac{1}{3}x_2 + 2x_2^2 \quad (7.62)$$

von

$$h(x_2) := \frac{1}{3} + 4x_2, \quad (7.63)$$

dass

$$\begin{aligned} \int_0^1 \int_0^1 x_1^2 + 4x_2 dx_1 dx_2 &= \int_0^1 \frac{1}{3} + 4x_2 dx_2 \\ &= H(1) - H(0) \\ &= \frac{1}{3} \cdot 1 + 4 \cdot 1^2 - \frac{1}{3} \cdot 0 + 4 \cdot 0^2 \\ &= \frac{13}{3}. \end{aligned} \quad (7.64)$$

7.5. Selbstkontrollfragen

1. Geben Sie die Definition des Begriffs der Stammfunktion wieder.

2. Geben Sie die Definition des Begriffs des unbestimmten Integrals wieder.
3. Erläutern Sie die intuitive Bedeutung des Begriff des Riemannschen Integrals.
4. Geben Sie den ersten Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung wieder.
5. Geben Sie den zweiten Hauptsatz der Differential- und Integralrechnung wieder.
6. Erläutern Sie den Begriff des uneigentlichen Integrals.
7. Erläutern Sie den Begriff des mehrdimensionalen Integrals.

8. Vektoren

In der naturwissenschaftlichen Modellbildung betrachtet man häufig Phänomene, die sich durch das Vorliegen mehrerer quantitativer Merkmale auszeichnen. So ist zum Beispiel die Position eines Objektes im dreidimensionalen Raum durch drei Koordinaten hinsichtlich der drei Achsen eines Kartesischen Koordinatensystems festgelegt. Analog mag der Gesundheitszustand einer Person durch das Vorliegen dreier Messwerte, z.B. einen Selbstauskunftscore, einen Biomarker und eine Expert:inneneinschätzung charakterisiert sein. Zum modellieren und analysieren solcher mehrdimensionalen quantitativen Phänomene stellt die Mathematik mit dem reellen Vektorraum ein vielseitig einsetzbares Hilfsmittel bereit. In diesem Kapitel wollen wir zunächst den Begriff des reellen Vektorraums und das grundlegende Rechnen mit Vektoren einführen (Kapitel 8.1). Eine Vektorraumstruktur, die sich stark an der dreidimensionalen räumlichen Intuition orientiert bietet dann der Euklidische Vektorraum (Kapitel 8.2). Mithilfe der Vektorrechnung können alle Vektoren eines Vektorraums aus einer kleinen Schar ausgezeichneten Vektoren gebildet werden. Die diesem Prinzip zugrundeliegenden Konzepte diskutieren wir in (Kapitel ?? und Kapitel 8.4).

8.1. Reeller Vektorraum

Wir beginnen mit der allgemeinen Definition eines Vektorraums, die grundlegende Regeln zum Rechnen mit Vektoren festlegt.

Definition 8.1 (Vektorraum). Es seien V eine nichtleere Menge und S eine Menge von Skalaren. Weiterhin sei eine Abbildung

$$+ : V \times V \rightarrow V, (v_1, v_2) \mapsto +(v_1, v_2) =: v_1 + v_2, \quad (8.1)$$

genannt *Vektoraddition*, definiert. Schließlich sei eine Abbildung

$$\cdot : S \times V \rightarrow V, (s, v) \mapsto \cdot(s, v) =: sv, \quad (8.2)$$

genannt *Skalarmultiplikation* definiert. Dann wird das Tupel $(V, S, +, \cdot)$ genau dann *Vektorraum* genannt, wenn für beliebige Elemente $v, w, u \in V$ und $a, b \in S$ folgende Bedingungen gelten:

(1) *Kommutativität der Vektoraddition.*

$$v + w = w + v.$$

(2) *Assoziativität der Vektoraddition.*

$$(v + w) + u = v + (w + u)$$

(3) *Existenz eines neutralen Elements der Vektoraddition.*

Es gibt einen Vektor $0 \in V$ mit $v + 0 = 0 + v = v$.

(4) *Existenz inverser Elemente der Vektoraddition*

Für alle Vektoren $v \in V$ gibt es einen Vektor $-v \in V$ mit $v + (-v) = 0$.

(5) *Existenz eines neutralen Elements der Skalarmultiplikation.*

Es gibt einen Skalar $1 \in S$ mit $1 \cdot v = v$.

(6) *Assoziativität der Skalarmultiplikation.*

$$a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c.$$

(7) *Distributivität hinsichtlich der Vektoraddition.*

$$a \cdot (v + w) = a \cdot v + a \cdot w.$$

(8) *Distributivität hinsichtlich der Skalaraddition.*

$$(a + b) \cdot v = a \cdot v + b \cdot v.$$

•

Es fällt auf, dass Definition 8.1 zwar festlegt, wie mit Vektoren gerechnet werden soll, jedoch keine Aussage darüber macht, was ein Vektor, über ein Element einer Menge hinaus, eigentlich ist. Dies ist der Tatsache geschuldet, dass es verschiedenste mathematische Objekte gibt, für die Vektorraumstrukturen definiert werden können. Beispiele dafür sind die Menge der reellen m -Tupel, die Menge der Matrizen, die Menge der Polynome, die Menge der Lösungen eines linearen Gleichungssystems, die Menge der reellen Folgen, die Menge der stetigen Funktionen u.v.a.m.

Wir sind hier zunächst nur am Vektorraum der Menge reellen m -Tupel interessiert. Wir erinnern dazu daran, dass wir die reellen m -Tupel mit

$$\mathbb{R}^m := \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} \mid x_i \in \mathbb{R} \text{ für alle } 1 \leq i \leq m \right\} \quad (8.3)$$

bezeichnen und \mathbb{R}^m als “ \mathbb{R} hoch m ” aussprechen. Die Elemente $x \in \mathbb{R}^m$ nennen wir *reelle Vektoren* oder auch einfach *Vektoren*. Wir wollen nun der Definition eines Vektorraums die Menge \mathbb{R}^m zugrunde legen. Dazu definieren wir zunächst die Vektoraddition für Elemente von \mathbb{R}^m und die Skalarmultiplikation für Elemente von \mathbb{R} und \mathbb{R}^m

Definition 8.2 (Vektoraddition und Skalarmultiplikation in \mathbb{R}^m). Für alle $x, y \in \mathbb{R}^m$ und $a \in \mathbb{R}$ sei die *Vektoraddition* durch

$$+ : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m, (x, y) \mapsto x + y = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_m \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ \vdots \\ x_m + y_m \end{pmatrix} \quad (8.4)$$

und die *Skalarmultiplikation* durch

$$\cdot : \mathbb{R} \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^m, (a, x) \mapsto ax = a \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} ax_1 \\ \vdots \\ ax_m \end{pmatrix} \quad (8.5)$$

definiert.

•

Es ergibt sich dann folgendes Resultat.

Theorem 8.1 (Reeller Vektorraum). $(\mathbb{R}^m, +, \cdot)$ mit den Rechenregeln der Addition und Multiplikation in \mathbb{R} einen Vektorraum.

◦

Für einen Beweis, auf den wir hier verzichten wollen, muss man die Bedingungen (1) bis (8) aus Definition 8.1 für die hier betrachtete Menge und die hier festgelegten Formen der Vektoraddition und der Skalarmultiplikation nachweisen. Diese ergeben sich aber leicht aus den Rechenregeln von Addition und Multiplikation in \mathbb{R} und der Tatsache, dass Vektoraddition und Skalarmultiplikation für Elemente von \mathbb{R}^m in Definition 8.2 komponentenweise definiert wurden. Wir definieren damit den Begriff des *reellen Vektorraums*.

Definition 8.3 (Reeller Vektorraum). Für \mathbb{R}^m seien $+$ und \cdot die in Definition 8.2 definierte Vektoraddition und Skalarmultiplikation. Dann nennen wir auf Grundlage von Theorem 8.1 den Vektorraum $(\mathbb{R}^m, +, \cdot)$ den *reellen Vektorraum*.

•

Auf Grundlage von Definition 8.3 wollen wir uns nun das Rechnen mit reellen Vektoren anhand einiger Beispiele verdeutlichen.

Beispiele

(1) Für

$$x := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4 \text{ und } y := \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4$$

gilt

$$x + y = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1+2 \\ 2+1 \\ 3+0 \\ 4+1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 3 \\ 5 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^4.$$

In **R** implementiert dieses Beispiel wie folgt

```
1 x = matrix(c(1,2,3,4), nrow = 4)      # Vektordefinition
2 y = matrix(c(2,1,0,1), nrow = 4)      # Vektordefinition
```

```
3  x + y                                # Vektoraddition
```

```
      [,1]
[1,]    3
[2,]    3
[3,]    3
[4,]    5
```

(2) Für

$$x := \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2 \text{ und } y := \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2$$

gilt

$$x - y = \begin{pmatrix} 2 \\ 3 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2-1 \\ 3-3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^2.$$

In **R** implementiert man dieses Beispiel wie folgt

```
1  x = matrix(c(2,3), nrow = 2)        # Vektordefinition
2  y = matrix(c(1,3), nrow = 2)        # Vektordefinition
3  x - y                                # Vektorsubtraktion
```

```
      [,1]
[1,]    1
[2,]    0
```

(3) Für

$$x := \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3 \text{ und } a := 3 \in \mathbb{R}$$

gilt

$$ax = 3 \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \cdot 2 \\ 3 \cdot 1 \\ 3 \cdot 3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 6 \\ 3 \\ 9 \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^3.$$

In **R** implementiert man dieses Beispiel wie folgt

```
1  x = matrix(c(2,1,3), nrow = 3)      # Vektordefinition
2  a = 3                                # Skalardefinition
3  a*x                                  # Skalarmultiplikation
```

```
      [,1]
[1,]    6
[2,]    3
[3,]    9
```

Für $m \in \{1, 2, 3\}$ kann man sich reelle Vektoren und das Rechnen mit ihnen visuell veranschaulichen. Für $m > 3$, wenn also zum Beispiel für eine Person mehr als drei quantitative Merkmale zu ihrem Gesundheitszustand vorliegen, was in der Anwendung regelmäßig der Fall ist, ist dies nicht möglich. Trotzdem mag die visuelle Intuition für $m \leq 3$ einen Einstieg in das Verständnis von Vektorräumen erleichtern. Wir fokussieren

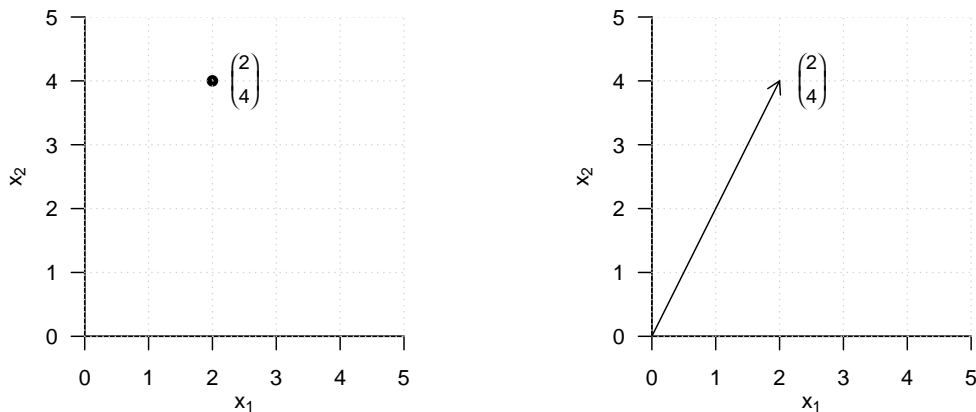


Abbildung 8.1. Visualisierung von Vektoren in \mathbb{R}^2

hier auf den Fall $m := 2$. In diesem Fall liegen die betrachteten reellen Vektoren in der zweidimensionalen Ebene und werden üblicherweise als Punkte oder Pfeile visualisiert (Abbildung 8.1).

Abbildung 8.2 visualisiert die Vektoraddition

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 4 \\ 3 \end{pmatrix}. \quad (8.6)$$

Der Summenvektor entspricht dabei der Diagonale des von den beiden Summanden aufgespannten Parallelogramms.

Abbildung 8.3 visualisiert die Vektorsubtraktion

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -3 \\ -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8.7)$$

Der resultierende Vektor entspricht dabei der Diagonale des von dem ersten Vektors und dem entgegengesetzten Vektor des zweiten Vektors aufgespannten Parallelogramms.

Abbildung 8.4 schließlich visualisiert die Skalarmultiplikation

$$3 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix} \quad (8.8)$$

Die Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar ändert dabei immer nur seine Länge, nicht jedoch seine Richtung.

8.2. Euklidischer Vektorraum

Der reelle Vektorraum kann durch Definition des *Skalarprodukts* im Sinne eines *Euklidischen Vektorraums* mit räumlich-geometrischer Intuition versehen werden. Diese ermöglicht es insbesondere, Begriffe wie die *Länge eines Vektors*, den *Abstand zwischen*

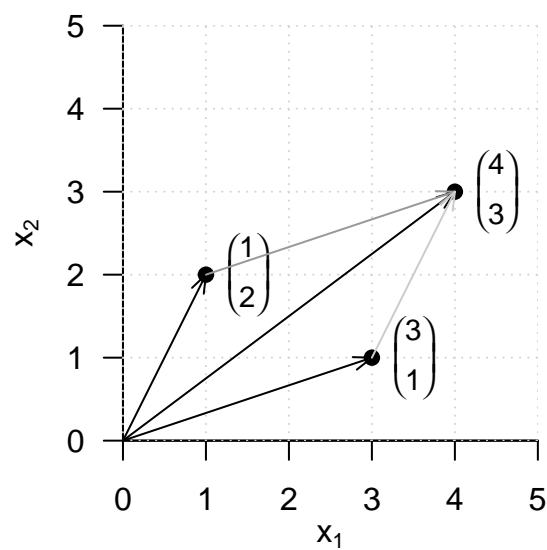


Abbildung 8.2. Vektoraddition in \mathbb{R}^2

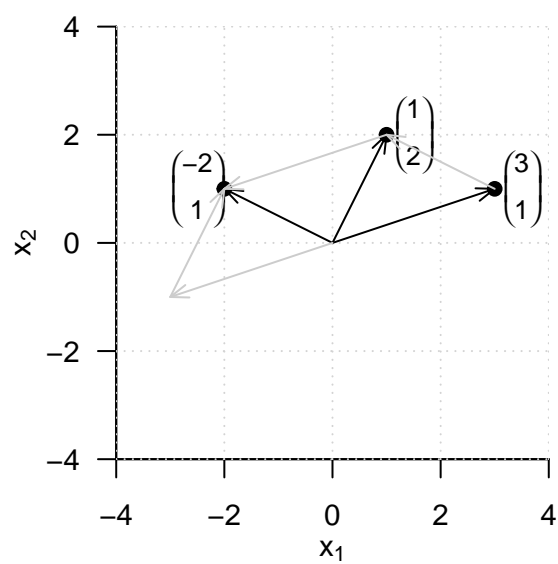


Abbildung 8.3. Vektorsubtraktion in \mathbb{R}^2

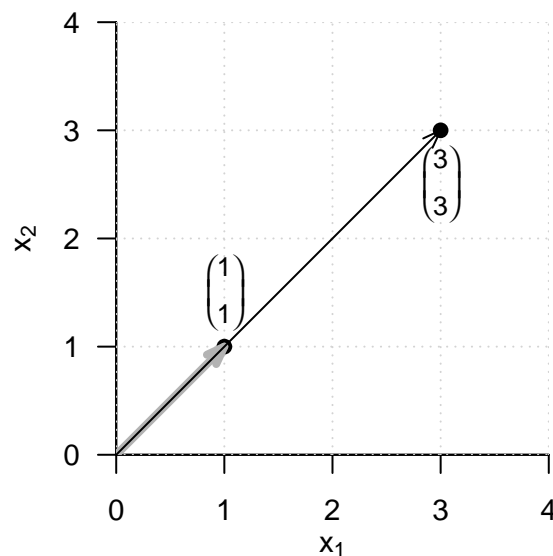


Abbildung 8.4. Skalarmultiplikation in \mathbb{R}^2

zwei Vektoren, und nicht zuletzt den *Winkel zwischen zwei Vektoren* zu definieren und zu berechnen. Wir führen zunächst das *Skalarprodukt* ein.

Definition 8.4 (Skalarprodukt auf \mathbb{R}^m). Das *Skalarprodukt auf \mathbb{R}^m* ist definiert als die Abbildung

$$\langle \rangle : \mathbb{R}^m \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}, (x, y) \mapsto \langle (x, y) \rangle := \langle x, y \rangle := \sum_{i=1}^m x_i y_i. \quad (8.9)$$

•

Das Skalarprodukt heißt Skalarprodukt, weil es einen Skalar ergibt, nicht etwa, weil mit Skalaren multipliziert wird. Das Skalarprodukt steht in enger Beziehung zum Matrixprodukt, wie wir an späterer Stelle sehen werden. Wir betrachten zunächst ein Beispiel und seine Implementation in **R**.

Beispiel

Es seien

$$x := \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix} \text{ und } y := \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (8.10)$$

Dann ergibt sich

$$\langle x, y \rangle = x_1 y_1 + x_2 y_2 + x_3 y_3 = 1 \cdot 2 + 2 \cdot 0 + 3 \cdot 1 = 2 + 0 + 3 = 5. \quad (8.11)$$

In **R** gibt es verschiedene Möglichkeiten, ein Skalarprodukt auszuwerten. Wir führen zwei von ihnen für das gegebene Beispiel untenstehend auf.

```

1 # Vektordefinitionen
2 x = matrix(c(1,2,3), nrow = 3)
3 y = matrix(c(2,0,1), nrow = 3)
4
5 # Skalarprodukt mithilfe von R's komponentenweiser Multiplikation und sum() Funktion
6 sum(x*y)

```

```
[1] 5
```

```

1 # Skalarprodukt mithilfe von R's Matrixtransposition und -multiplikation
2 t(x) %*% y

```

```

      [,1]
[1,]     5

```

Mithilfe des Skalarprodukts kann der Begriff des reellen Vektorraums zum Begriff des *reellen kanonischen Euklidischen Vektorraums* erweitert werden.

Definition 8.5 (Euklidischer Vektorraum). Das Tupel $((\mathbb{R}^m, +, \cdot), \langle \rangle)$ aus dem reellen Vektorraum $(\mathbb{R}^m, +, \cdot)$ und dem Skalarprodukt $\langle \rangle$ auf \mathbb{R}^m heißt *reeller kanonischer Euklidischer Vektorraum*.

•

Generell heißt jedes Tupel aus einem Vektorraum und einem Skalarprodukt “Euklidischer Vektorraum”. Informell sprechen wir aber oft auch einfach von \mathbb{R}^m als “Euklidischer Vektorraum” und insbesondere bei $((\mathbb{R}^m, +, \cdot), \langle \rangle)$ vom “Euklidischen Vektorraum”. Ein Euklidischer Vektorraum ist ein Vektorraum mit geometrischer Struktur, die durch das Skalarprodukt induziert wird. Insbesondere bekommen im Euklidischen Vektorraum nun die geometrischen Begriffe von *Länge*, *Abstand* und *Winkel* eine Bedeutung. Wir definieren sie wie folgt.

Definition 8.6. $((\mathbb{R}^m, +, \cdot), \langle \rangle)$ sei der Euklidische Vektorraum.

(1) Die *Länge* eines Vektors $x \in \mathbb{R}^m$ ist definiert als

$$\|x\| := \sqrt{\langle x, x \rangle}. \quad (8.12)$$

(2) Der *Abstand* zweier Vektoren $x, y \in \mathbb{R}^m$ ist definiert als

$$d(x, y) := \|x - y\|. \quad (8.13)$$

(3) Der *Winkel* α zwischen zwei Vektoren $x, y \in \mathbb{R}^m$ mit $x, y \neq 0$ ist definiert durch

$$0 \leq \alpha \leq \pi \text{ und } \cos \alpha := \frac{\langle x, y \rangle}{\|x\| \|y\|} \quad (8.14)$$

•

Die Länge $\|x\|$ eines Vektors $x \in \mathbb{R}^m$ heißt auch *Euklidische Norm von x* oder ℓ_2 -Norm von x oder einfach *Norm von x* . Sie wird häufig auch mit $\|x\|_2$ bezeichnet. Wir betrachten drei Beispiele für die Bestimmung der Länge eines Vektors und ihre entsprechende **R** Implementation. Wir veranschaulichen diese Beispiele in Abbildung 8.5.

Beispiel (1)

$$\left\| \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \right\| = \sqrt{\left\langle \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle} = \sqrt{2^2 + 0^2} = \sqrt{4} = 2.00 \quad (8.15)$$

```
1 norm(matrix(c(2,0),nrow = 2), type = "2")           # Vektorlänge = l_2 Norm
```

```
[1] 2
```

Beispiel (2)

$$\left\| \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right\| = \sqrt{\left\langle \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right\rangle} = \sqrt{2^2 + 2^2} = \sqrt{8} \approx 2.83 \quad (8.16)$$

```
1 norm(matrix(c(2,2),nrow = 2), type = "2")           # Vektorlänge = l_2 Norm
```

```
[1] 2.828427
```

Beispiel (3)

$$\left\| \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix} \right\| = \sqrt{\left\langle \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 4 \end{pmatrix} \right\rangle} = \sqrt{2^2 + 4^2} = \sqrt{20} \approx 4.47 \quad (8.17)$$

```
1 norm(matrix(c(2,4),nrow = 2), type = "2")           # Vektorlänge = l_2 Norm
```

```
[1] 4.472136
```

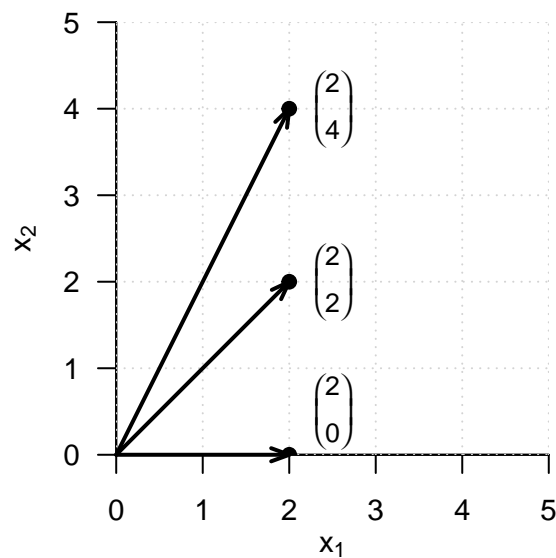
Für den Abstand $d(x, y)$ zweier Vektoren $x, y \in \mathbb{R}^m$ halten wir ohne Beweis fest, dass er zum einen nicht-negativ und symmetrisch ist, also dass

$$d(x, y) \geq 0, d(x, x) = 0 \text{ und } d(x, y) = d(y, x) \quad (8.18)$$

gelten. Zudem erfüllt $d(x, y)$ die sogenannte *Dreiecksungleichung*, die besagt, dass die direkte Wegstrecke zwischen zwei Punkten im Raum immer kürzer ist als eine indirekte Wegstrecke über einen dritten Punkt,

$$d(x, y) \leq d(x, z) + d(z, y). \quad (8.19)$$

Damit erfüllt $d(x, y)$ wichtige Aspekte der räumlichen Anschauung. Wir geben zwei Beispiele für die Bestimmung von Abständen von Vektoren in \mathbb{R}^2 , die wir in Abbildung 8.6 visualisieren.

Abbildung 8.5. Vektorlänge in \mathbb{R}^2 **Beispiel (1)**

$$d\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix}\right) = \left\| \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 2 \\ 2 \end{pmatrix} \right\| = \left\| \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \end{pmatrix} \right\| = \sqrt{(-1)^2 + (-1)^2} = \sqrt{2} \approx 1.41 \quad (8.20)$$

```
1 norm(matrix(c(1,1),nrow = 2) - matrix(c(2,2),nrow = 2), type = "2")
```

```
[1] 1.414214
```

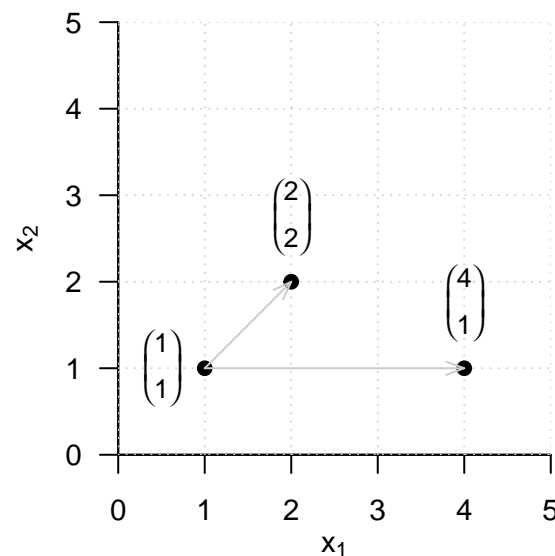
Beispiel (2)

$$d\left(\begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \end{pmatrix}\right) = \left\| \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 4 \\ 1 \end{pmatrix} \right\| = \left\| \begin{pmatrix} -3 \\ 0 \end{pmatrix} \right\| = \sqrt{(-3)^2 + 0^2} = \sqrt{9} = 3 \quad (8.21)$$

```
1 norm(matrix(c(1,1),nrow = 2) - matrix(c(4,1),nrow = 2), type = "2")
```

```
[1] 3
```

Schließlich halten wir fest, dass für die Berechnung des Winkels zwischen zwei Vektoren anhand obiger Definition gilt, dass die Kosinusfunktion \cos auf $[0, \pi]$ bijektiv, also invertierbar mit der Umkehrfunktion \arccos , der Arkuskosinusfunktion, ist. Auch für den

Abbildung 8.6. Vektorabstände in \mathbb{R}^2

Begriff des Winkels wollen wir zwei Beispiele betrachten. Man beachte dabei insbesondere, dass die Definition 8.6 den Winkel in Radians angibt. Für eine Angabe in Grad ist eine entsprechende Umrechnung erforderlich.

Beispiel (1)

$$\arccos\left(\frac{\left\langle \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix} \right\rangle}{\left\| \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix} \right\| \left\| \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix} \right\|}\right) = \arccos\left(\frac{3 \cdot 3 + 0 \cdot 3}{\sqrt{3^2 + 0^2} \cdot \sqrt{3^2 + 3^2}}\right) = \arccos\left(\frac{9}{3 \cdot \sqrt{18}}\right) = \frac{\pi}{4} \approx 0.785 \quad (8.22)$$

Die Umrechnung in Grad ergibt dann

$$0.785 \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = 45^\circ \quad (8.23)$$

In **R** implementiert man dies wie folgt.

```
1 x = matrix(c(3,0), nrow = 2) # Vektor 1
2 y = matrix(c(3,3), nrow = 2) # Vektor 2
3 w = acos(sum(x*y)/(sqrt(sum(x*x))*sqrt(sum(y*y)))) * 180/pi # Winkel in Grad
4 print(w)
```

[1] 45

Beispiel (2)

$$\alpha = \arccos \left(\frac{\left\langle \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix} \right\rangle}{\left\| \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \end{pmatrix} \right\| \left\| \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix} \right\|} \right) = \arccos \left(\frac{3 \cdot 0 + 0 \cdot 3}{\sqrt{3^2 + 0^2} \cdot \sqrt{0^2 + 3^2}} \right) = \arccos \left(\frac{0}{3 \cdot 3} \right) = \frac{\pi}{2} \approx 1.57 \quad (8.24)$$

Die Umrechnung in Grad ergibt dann

$$\frac{\pi}{2} \cdot \frac{180^\circ}{\pi} = 90^\circ \quad (8.25)$$

Die entsprechende **R** Implementation lautet wie folgt.

```
1 x = matrix(c(3,0), nrow = 2)           # Vektor 1
2 y = matrix(c(0,3), nrow = 2)           # Vektor 2
3 w = acos(sum(x*y)/(sqrt(sum(x*x))*sqrt(sum(y*y)))) * 180/pi # Winkel in Grad
4 print(w)
```

[1] 90

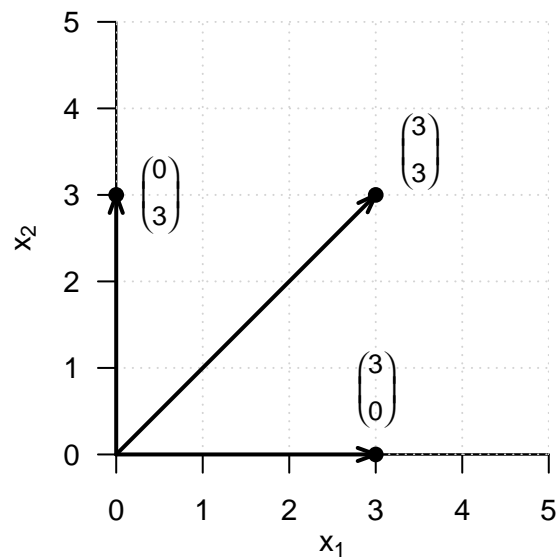


Abbildung 8.7. Winkel in \mathbb{R}^2

Die Tatsache, dass zwei Vektoren einen rechten Winkel bilden können, also gewissermaßen maximal nicht-parallel sein können, ist ein wichtiges geometrisches Prinzip und wird deshalb mit folgender Definition speziell ausgezeichnet.

Definition 8.7 (Orthogonalität und Orthonormalität von Vektoren). $((\mathbb{R}^m, +, \cdot), \langle \rangle)$ sei der Euklidische Vektorraum.

(1) Zwei Vektoren $x, y \in \mathbb{R}^m$ heißen *orthogonal*, wenn gilt, dass

$$\langle x, y \rangle = 0 \quad (8.26)$$

(2) Zwei Vektoren $x, y \in \mathbb{R}^m$ heißen *orthonormal*, wenn gilt, dass

$$\langle x, y \rangle = 0 \text{ und } \|x\| = \|y\| = 1. \quad (8.27)$$

•

Für orthogonale und orthonormale Vektoren gilt also insbesondere auch

$$\cos \alpha = \frac{\langle x, y \rangle}{\|x\| \|y\|} = \frac{0}{\|x\| \|y\|} = 0, \quad (8.28)$$

also

$$\alpha = \frac{\pi}{2} = 90^\circ. \quad (8.29)$$

8.3. Lineare Unabhängigkeit

In diesem Abschnitt führen wir den Begriff der *linearen Unabhängigkeit* von Vektoren ein. Wir definieren dazu zunächst den Begriff der *Linearkombination* von Vektoren.

Definition 8.8 (Linearkombination). $\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ sei eine Menge von k Vektoren eines Vektorraums V und a_1, a_2, \dots, a_k seien Skalare. Dann ist die *Linearkombination* der Vektoren in $\{v_1, v_2, \dots, v_k\}$ mit den *Koeffizienten* a_1, a_2, \dots, a_k definiert als der Vektor

$$w := \sum_{i=1}^k a_i v_i \in V. \quad (8.30)$$

•

Beispiel

Es seien

$$v_1 := \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}, v_2 := \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, v_3 := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ und } a_1 := 2, a_2 := 3, a_3 := 0. \quad (8.31)$$

Dann ergibt sich die Linearkombination von v_1, v_2, v_3 mit den Koeffizienten a_1, a_2, a_3 zu

$$\begin{aligned} w &= a_1 v_1 + a_2 v_2 + a_3 v_3 \\ &= 2 \cdot \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix} + 3 \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} + 0 \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 4 \\ 2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} 7 \\ 5 \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (8.32)$$

Basierend auf dem Begriff der Linearkombination kann man nun den Begriff der *Linearen Unabhängigkeit* von Vektoren definieren.

Definition 8.9 (Lineare Unabhängigkeit). V sei ein Vektorraum. Eine Menge $W := \{w_1, w_2, \dots, w_k\}$ von Vektoren in V heißt *linear unabhängig*, wenn die einzige Repräsentation des Nullelements $0 \in V$ durch eine Linearkombination der $w \in W$ die sogenannte *triviale Repräsentation*

$$0 = a_1 w_1 + a_2 w_2 + \dots + a_k w_k \text{ mit } a_1 = a_2 = \dots = a_k = 0 \quad (8.33)$$

ist. Wenn die Menge W nicht linear unabhängig ist, dann heißt sie *linear abhängig*. •

Um zu prüfen, ob eine gegebene Menge von Vektoren linear abhängig oder unabhängig ist, muss man prinzipiell für jede mögliche Linearkombination der gegebenen Vektoren, ob sie Null ist. Theorem 8.2 und Theorem 8.3 zeigen, wie dies für zwei bzw. endliche viele Vektoren auch mit weniger Aufwand gelingen kann.

Theorem 8.2 (Lineare Abhängigkeit von zwei Vektoren). V sei ein Vektorraum. Zwei Vektoren $v_1, v_2 \in V$ sind linear abhängig, wenn einer der Vektoren ein skalares Vielfaches des anderen Vektors ist. ◦

Beweis. v_1 sei ein skalares Vielfaches von v_2 , also

$$v_1 = \lambda v_2 \text{ mit } \lambda \neq 0. \quad (8.34)$$

Dann gilt

$$v_1 - \lambda v_2 = 0. \quad (8.35)$$

Dies aber entspricht der Linearkombination

$$a_1 v_1 + a_2 v_2 = 0 \quad (8.36)$$

mit $a_1 = 1 \neq 0$ und $a_2 = -\lambda \neq 0$. Es gibt also eine Linearkombination des Nullelementes, die nicht die triviale Repräsentation ist, und damit sind v_1 und v_2 nicht linear unabhängig. □

Theorem 8.3 (Lineare Abhängigkeit einer Menge von Vektoren). V sei ein Vektorraum und $w_1, \dots, w_k \in V$ sei eine Menge von Vektoren in V . Wenn einer der Vektoren w_i mit $i = 1, \dots, k$ eine Linearkombination der anderen Vektoren ist, dann ist die Menge der Vektoren linear abhängig. ◦

Beweis. Die Vektoren w_1, \dots, w_k sind genau dann linear abhängig, wenn gilt, dass $\sum_{i=1}^k a_i w_i = 0$ mit mindestens einem $a_i \neq 0$. Es sei also zum Beispiel $a_j \neq 0$. Dann gilt

$$0 = \sum_{i=1}^k a_i w_i = \sum_{i=1, i \neq j}^k a_i w_i + a_j w_j \quad (8.37)$$

Also folgt

$$a_j w_j = - \sum_{i=1, i \neq j}^k a_i w_i \quad (8.38)$$

und damit

$$w_j = -a_j^{-1} \sum_{i=1, i \neq j}^k a_i w_i = - \sum_{i=1, i \neq j}^k (a_j^{-1} a_i) w_i \quad (8.39)$$

Also ist w_j eine Linearkombination der w_i für $i = 1, \dots, k$ mit $i \neq j$. □

8.4. Vektorraumbasen

In diesem Abschnitt wollen wir den Begriff der *Vektorraumbasis* einführen. Eine Basis eines Vektorraums ist eine Untermenge von Vektoren des Vektorraums, die zur Darstellung aller Vektoren des Vektorraums genutzt werden kann. Im Sinne der linearen Kombination von Vektoren enthält also eine Vektorraumbasis alle nötige Information zur Konstruktion des entsprechenden Vektorraums. Allerdings ist eine Vektorraumbasis in der Regel nicht eindeutig und die viele Vektorräume haben in der Tat unendlich viele Basen. Die folgenden Definition sagt zunächst aus, wie aus einer beschränkten Anzahl von Vektoren mithilfe von Linearkombinationen unendlich viele Vektoren gebildet werden können.

Definition 8.10 (Lineare Hülle und Aufspannen). V sei ein Vektorraum und es sei $W := \{w_1, \dots, w_k\} \subset V$. Dann ist die *lineare Hülle* von W definiert als die Menge aller Linearkombinationen der Elemente von W ,

$$\text{Span}(W) := \left\{ \sum_{i=1}^k a_i w_i \mid a_1, \dots, a_k \text{ sind skalare Koeffizienten} \right\} \quad (8.40)$$

Man sagt, dass eine Menge von Vektoren $W \subseteq V$ *einen Vektorraum V aufspannt*, wenn jedes $v \in V$ als eine Linearkombination von Vektoren in W geschrieben werden kann.

•

Wir definieren nun den Begriff der *Basis* eines Vektorraums.

Definition 8.11 (Basis). V sei ein Vektorraum und es sei $B \subseteq V$. B heißt eine *Basis* von V , wenn

- (1) die Vektoren in B linear unabhängig sind und
- (2) die Vektoren in B den Vektorraum V aufspannen.

•

Basen von Vektorräumen haben folgende wichtige Eigenschaften.

Theorem 8.4 (Eigenschaften von Basen).

- (1) *Alle Basen eines Vektorraums beinhalten die gleiche Anzahl von Vektoren.*
- (2) *Jede Menge von m linear unabhängigen Vektoren ist Basis eines m -dimensionalen Vektorraums.*

◦

Für einen Beweis dieses sehr tiefen Theorems verweisen wir auf die weiterführende Literatur. Die mit obigem Theorem benannte eindeutige Anzahl der Vektoren einer Basis eines Vektorraums heißt die *Dimension des Vektorraums*. Da es in der Regel unendlich viele Mengen von m linear unabhängigen Vektoren in einem Vektorraum gibt, haben Vektorräume in der Regel unendlich viele Basen.

Betrachtet man nun einen einzelnen Vektor in einem Vektorraum, so kann man sich fragen, wie man diesen mithilfe einer Vektorraumbasis darstellen kann. Dies führt auf folgende Begriffsbildungen.

Definition 8.12 (Basisdarstellung und Koordinaten). $B := \{b_1, \dots, b_m\}$ sei eine Basis eines m -dimensionalen Vektorraumes V und es sei $v \in V$. Dann heißt die Linearkombination

$$v = \sum_{i=1}^m c_i b_i \quad (8.41)$$

die *Darstellung von v bezüglich der Basis B* und die Koeffizienten c_1, \dots, c_m heißen die *Koordinaten von v bezüglich der Basis B* . •

Bei fester Basis sind auch die Koordinaten eines Vektors bezüglich dieser Basis fest und eindeutig. Dies ist die Aussage folgenden Theorems.

Theorem 8.5 (Eindeutigkeit der Basisdarstellung). *Die Basisdarstellung eines $v \in V$ bezüglich einer Basis B ist eindeutig.* ◦

Beweis. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit nehmen wir an, dass der Vektorraum von Dimension m ist. Nehmen wir an, dass zwei Darstellungen von v bezüglich der Basis B existieren, also dass

$$\begin{aligned} v &= a_1 b_1 + \dots + a_m b_m \\ v &= c_1 b_1 + \dots + c_m b_m \end{aligned} \quad (8.42)$$

Subtraktion der unteren von der oberen Gleichung ergibt

$$0 = (a_1 - c_1)b_1 + \dots + (a_m - c_m)b_m \quad (8.43)$$

Weil die b_1, \dots, b_m linear unabhängig sind, gilt aber, dass $(a_i - c_i) = 0$ für alle $i = 1, \dots, m$ und somit sind die beiden Darstellungen von v bezüglich der Basis B identisch. □

Zum Abschluss dieses Abschnitts wollen wir eine spezielle Basis des reellen Vektorraums betrachten.

Definition 8.13 (Orthonormalbasis von \mathbb{R}^m). Eine Menge von m Vektoren $v_1, \dots, v_m \in \mathbb{R}^m$ heißt *Orthonormalbasis* von \mathbb{R}^m , wenn v_1, \dots, v_m jeweils die Länge 1 haben und wechselseitig orthogonal sind, also wenn

$$\langle v_i, v_j \rangle = \begin{cases} 1 & \text{für } i = j \\ 0 & \text{für } i \neq j \end{cases} \quad (8.44)$$
•

Wir wollen zunächst ein Beispiel für eine Orthonormalbasis betrachten.

Beispiel (1)

Es ist

$$B_1 := \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\} \quad (8.45)$$

eine Orthonormalbasis von \mathbb{R}^2 , denn B_1 besteht aus zwei Vektoren und es gelten

$$\left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right\rangle = 1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 = 1 + 0 = 1 \quad (8.46)$$

sowie

$$\left\langle \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle = 0 \cdot 0 + 1 \cdot 1 = 0 + 1 = 1 \quad (8.47)$$

und

$$\left\langle \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\rangle = 1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 = 0 + 0 = 0 \quad (8.48)$$

Für allgemeine reelle Vektorräume werden Basen der Form von B_1 mit dem Begriff der *kanonischen Basis* speziell ausgezeichnet.

Definition 8.14 (Kanonische Basis und kanonische Einheitsvektoren). Die Orthonormalbasis

$$B := \{e_1, \dots, e_m \mid e_{i_j} = 1 \text{ für } i = j \text{ und } e_{i_j} = 0 \text{ für } i \neq j\} \subset \mathbb{R}^m \quad (8.49)$$

heißt die *kanonische Basis* von \mathbb{R}^m und die e_{i_j} heißen *kanonische Einheitsvektoren*.

•

B_1 aus Beispiel (1) ist also die kanonische Basis von \mathbb{R}^2 .

Die kanonische Basis von \mathbb{R}^3 ist

$$B := \left\{ \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}. \quad (8.50)$$

Allerdings gibt es auch nicht kanonische Orthonormalbasen. Dazu betrachten wir ein weiteres Beispiel

Beispiel (2)

Es ist auch

$$B_2 := \left\{ \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \right\} \quad (8.51)$$

eine Orthonormalbasis von \mathbb{R}^2 , denn B_2 besteht aus zwei Vektoren und es gelten

$$\left\langle \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1, \quad (8.52)$$

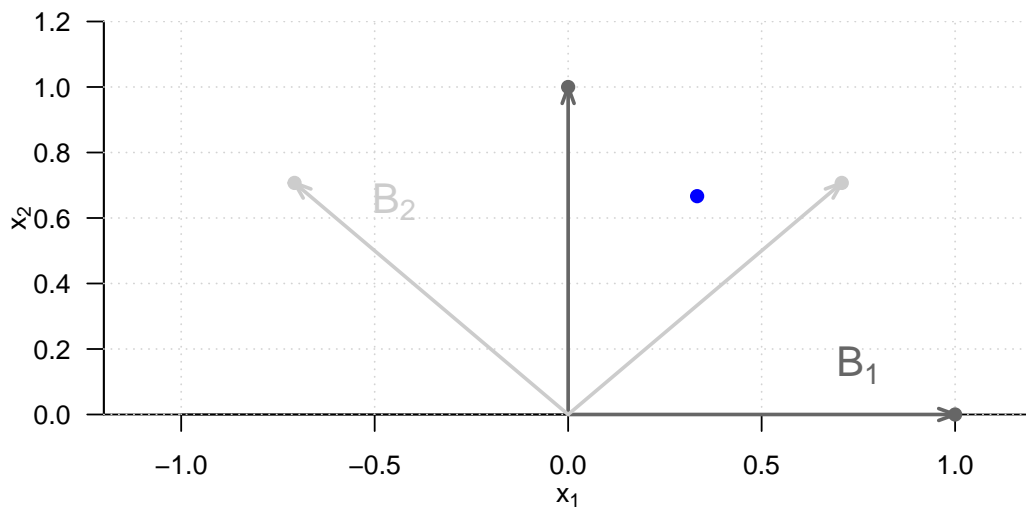
sowie

$$\left\langle \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \right\rangle = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1 \quad (8.53)$$

und

$$\left\langle \begin{pmatrix} -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \right\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 0 \quad (8.54)$$

Wir visualisieren die beiden Orthonormalbasen B_1 und B_2 von \mathbb{R}^2 in Abbildung 8.8.

Abbildung 8.8. Zwei Basen von \mathbb{R}^2

8.5. Selbstkontrollfragen

1. Geben Sie die Definition eines Vektorraums wieder.
2. Geben Sie die Definition des reellen Vektorraums wieder.
3. Es seien

$$x := \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \end{pmatrix}, y := \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \text{ und } a := 2. \quad (8.55)$$

Berechnen Sie

$$v = a(x + y) \text{ und } w = \frac{1}{a}(y - x) \quad (8.56)$$

4. Geben Sie die Definition des Skalarproduktes auf \mathbb{R}^m wieder.
5. Für

$$x := \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 3 \end{pmatrix}, y := \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, z := \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (8.57)$$

berechnen Sie

$$\langle x, y \rangle, \langle x, z \rangle, \langle y, z \rangle \quad (8.58)$$

6. Geben Sie die Definition des Euklidischen Vektorraums wieder.
7. Geben Sie die Definition der Länge eines Vektors im Euklidischen Vektorraum wieder,
8. Berechnen Sie die Längen der Vektoren x, y, z aus Gleichung 8.57.
9. Geben Sie Definition des Abstands zweier Vektoren im Euklidischen Vektorraum wieder.
10. Berechnen Sie $d(x, y), d(x, z)$ und $d(y, z)$ für x, y, z aus Gleichung 8.57.
11. Geben Sie die Definition des Winkels zwischen zwei Vektoren im Euklidischen Vektorraum wieder.
12. Berechnen Sie die Winkel zwischen den Vektoren x und y , x und z , sowie y und z aus Gleichung 8.57.
13. Geben Sie die Definitionen der Orthogonalität und Orthonormalität von Vektoren wieder.
14. Geben Sie die Definition der Linearkombination von Vektoren wieder.
15. Geben Sie die Definition der linearen Unabhängigkeit von Vektoren wieder.

16. Woran kann man erkennen, ob zwei reelle Vektoren linear abhängig sind oder nicht?
17. Geben Sie die Definition der linearen Hülle einer Menge von Vektoren wieder.
18. Geben Sie die Definition der Basis eines Vektorraums wieder.
19. Geben Sie das Theorem zu den Eigenschaften von Vektorraumbasen wieder.
20. Geben Sie die Definition der Basisdarstellung eines Vektors wieder.
21. Geben Sie die Definition einer Orthonormalbasis von \mathbb{R}^m wieder.
22. Geben Sie die Definition der kanonischen Basis von \mathbb{R}^m wieder.

Teil II.

Wahrscheinlichkeitstheorie

Vorbemerkungen

Die Wahrscheinlichkeitstheorie ist ein mathematisches Modell zur Beschreibung von und zum quantitativen Schlussfolgern über *Zufallsvorgänge* der Wirklichkeit (Abbildung 8.9). Unter Zufallsvorgängen verstehen wir dabei alle Phänomene, die von uns nicht mit absoluter Sicherheit vorhergesagt werden können, deren Ergebnis also mit Unsicherheit behaftet ist. Offensichtliche und vertraute Beispiele für Zufallsvorgänge sind das Werfen eines Würfels oder einer Münze. Allerdings ist der Begriff des Zufallsvorgangs und damit der Anwendungsbereich der Wahrscheinlichkeitstheorie als sehr viel weiter gefasst zu verstehen. Nicht mit vollständiger Sicherheit vorhersagbar und damit mit Unsicherheit behaftet sind zum Beispiel auch der Ausgang einer Wahl, das morgige Wetter, der Messwert einer EEG-Elektrode zu einem bestimmten Zeitpunkt nach Applikation eines Reizes, oder der Effekt einer Psychotherapieintervention auf den Gesundheitszustand einer Patient:in. Beginnt man darüber nachzudenken, welche Phänomene der Wirklichkeit mit Unsicherheit behaftet sind, so fällt es schwer, nichttriviale Phänomene anzugeben, hinsichtlich deren Ergebnis man vollständige Sicherheit besitzt.

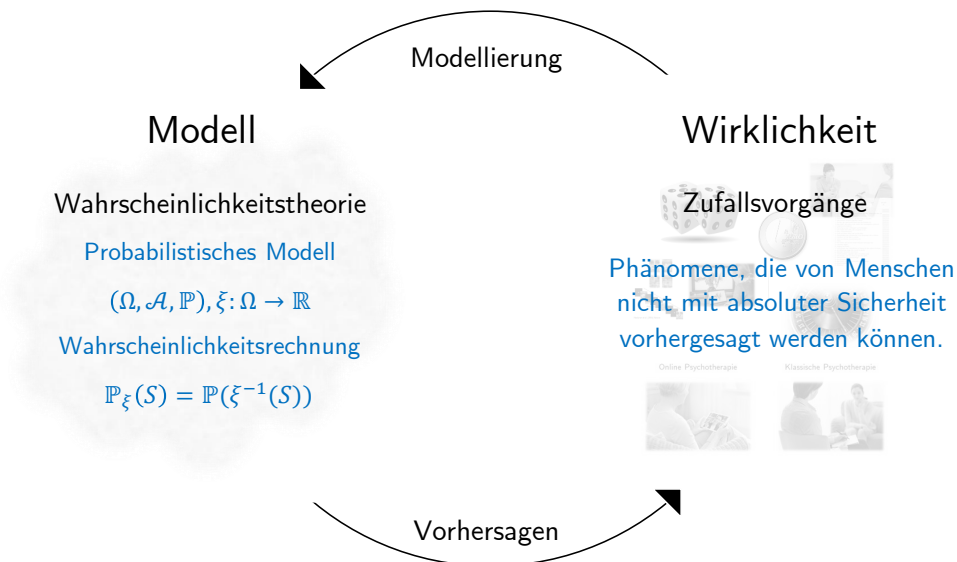


Abbildung 8.9. *Wahrscheinlichkeitstheorie als Modell von Zufallsvorgängen.* Ausgangspunkt der Wahrscheinlichkeitstheorie ist die Absicht, über einen Zufallsvorgang, also ein mit Unsicherheit behaftetes Phänomen der Wirklichkeit, logisch-quantitative Schlüsse zu ziehen. Die Repräsentation zentraler Aspekte des Zufallsvorgangs mithilfe wahrscheinlichkeitstheoretischer Begrifflichkeiten bezeichnet man als Modellierung. Das wahrscheinlichkeitstheoretische Modell selbst garantiert dann im Sinne der Wahrscheinlichkeitsrechnung die Korrektheit logisch-quantitativer Schlussfolgerungen, welche zur Vorhersage von Aspekten des Zufallsvorgangs genutzt werden können.

Als mathematisches Modell von Zufallsvorgängen erlaubt die Wahrscheinlichkeitstheorie insbesondere das vernunftbasierte, quantitative Schlussfolgern über Zufallsvorgänge. Dies schlägt sich primär in der sogenannten *Wahrscheinlichkeitsrechnung* nieder. Quantitative Schlussfolgerungen der Wahrscheinlichkeitsrechnung haben beispielsweise folgende Form: Wenn ich annehme, dass das Ereignis A mit Wahrscheinlichkeit x und Ereignis B mit Wahrscheinlichkeit y eintritt, dann ergibt sich für die Wahrscheinlichkeit von Ereignis C eine Wahrscheinlichkeit von z . Dabei ist der Schluss auf die Wahrscheinlichkeit von C logisch-mathematisch abgesichert, in dem Sinne wie zum Beispiel logisch-mathematisch

abgesichert ist, dass $1 + 1 = 2$ ist. Ob die Annahmen hinsichtlich der Wahrscheinlichkeiten von A und B aber den Gegebenheiten des Zufallsvorgangs in der Wirklichkeit entsprechen, darüber macht die Wahrscheinlichkeitstheorie keine Aussagen.

Die Wahrscheinlichkeitstheorie selbst bedient sich dabei der mathematischen Theorie der Mengen und Funktionen. Spätestens seit Kolmogoroff (1933) herrscht dabei ein axiomatischer Zugang vor: Man fragt in der Wahrscheinlichkeitstheorie selbst nicht, was denn eine Wahrscheinlichkeit sei oder inwieweit die Vorhersagen der Wahrscheinlichkeitstheorie mit der Wirklichkeit übereinstimmen, sondern versucht ein in sich schlüssiges formal-mathematisches System von unbegründeten, aber intuitiv plausiblen, Grundannahmen und ihren Folgerungen zu entwickeln. Ausgangspunkt dieser Entwicklung ist das *Wahrscheinlichkeitsraummodell* eines Zufallsvorgangs, das wir in Kapitel 9 einführen werden. In der Tat gibt es neben dem formal-mathematischen System der Wahrscheinlichkeitstheorie bis heute mathematisch-philosophische Diskussionen darüber, was genau denn unter dem Begriff der “Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses” zu verstehen ist (vgl. Hájek (2019)). Dabei sind grob gesagt zwei etwas gegensätzliche Interpretationen vorherrschend, die sogenannte *Frequentistische Interpretation* und die sogenannte *Bayesianische Interpretation*.

Nach der *Frequentistischen Interpretation* ist die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses die idealisierte relative Häufigkeit, mit der ein Ereignis unter den gleichen äußeren Bedingungen eintreten pflegt. Zum Beispiel ist die Frequentistische Interpretation der Aussage “Mit einer Wahrscheinlichkeit von $1/6$ zeigt der Würfel im nächsten Wurf eine 2” die folgende: “Wenn man einen Würfel unendlich oft werfen würde und dabei die relative Häufigkeit des Ereignisses, dass der Würfel eine 2 zeigt, bestimmen würde, dann wäre diese relative Häufigkeit gleich $1/6$ ”. Man beachte bei dieser Interpretation, dass man de-facto die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses nicht empirisch bestimmen kann, da man einen Würfel nicht unendlich oft werfen kann. Natürlich kann man die Wahrscheinlichkeit in dieser Interpretation aber empirisch schätzen. Schätzvorgänge selbst wiederum sind allerdings kein Teil der Wahrscheinlichkeitstheorie, sondern der *Frequentistischen* oder *Bayesianischen Inferenz*.

Nach der *Bayesianischen Interpretation* ist die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses der Grad der Sicherheit, den eine Beobachter:in aufgrund ihrer subjektiven Einschätzung der Lage dem Eintreten des Ereignisses A zuschreibt. Zum Beispiel ist die Bayesianische Interpretation der Aussage “Mit einer Wahrscheinlichkeit von $1/6$ zeigt der Würfel im nächsten Wurf eine Zwei” dann etwa die folgende: “Basierend auf meiner eigenen und der tradierten Erfahrung mit dem Werfen eines Würfels bin ich mir zu 16.6% sicher, dass der Würfel beim nächsten Wurf eine Zwei zeigt.”

In Modellen von tatsächlich zumindest unter ähnlichen Umständen wiederholbaren Zufallsvorgängen wie dem Werfen eines Würfels ist der Unterschied zwischen Frequentistischer und Bayesianischer Interpretation oft eher subtil. Es gibt aber wie oben angedeutet viele Zufallsvorgänge, die mit Wahrscheinlichkeiten beschrieben werden können, bei denen aufgrund ihrer Einmaligkeit eine Frequentistische Interpretation nicht angemessen ist. Zum Beispiel machen Aussagen der Form “Die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die weltweiten Hitzerekorde im Jahr 2023 nicht auf den Klimawandel zurückzuführen sind, ist kleiner als 0.01” (vgl. Philip et al. (2020)) nur unter der Bayesianischen Interpretation Sinn, da es sich bei den Wetteraufzeichnungen des Jahres 2023 um ein einmaliges, nicht wiederholbares Ereignis handelt.

Obwohl also die Interpretation des Begriffes der Wahrscheinlichkeit durchaus nicht eindeutig ist, unterscheiden sich die formalen Definitionen und Rechenregeln für Wahrscheinlichkeiten nicht. Sowohl die Frequentistische als auch die Bayesianische Inferenz, auf die wir an späterer Stelle eingehen, haben mit der Wahrscheinlichkeitstheorie also ein identisches mathematisches Bezugssystem und gemeinsames Fundament.

9. Wahrscheinlichkeitsräume

Ein *Wahrscheinlichkeitsraum* ist ein sehr allgemein gehaltenes formal-mathematisches Modell eines Zufallsvorgangs. Die zentrale Bedeutung dieses Modells für die Wahrscheinlichkeitstheorie und probabilistische Inferenz ergibt sich daraus, dass das Wahrscheinlichkeitsraummodell eine Anleitung dafür gibt, wie man beliebige Zufallsvorgänge über die man quantitativ schlussfolgern möchte, in das formal-mathematische System der Wahrscheinlichkeitstheorie übersetzen kann. Gleichzeitig garantiert das Wahrscheinlichkeitsraummodell und die auf ihm aufgebauten Konzepte, dass die Mechanik der Wahrscheinlichkeitsrechnung zu logisch sinnvollen quantitativen Schlüssen über Zufallsvorgänge der Wirklichkeit führen. In diesem Kapitel führen den Begriff des Wahrscheinlichkeitsraums ein (Kapitel 9.1) und geben dann mithilfe von Wahrscheinlichkeitsfunktionen (Kapitel 9.2) erste Beispiele für die Modellierung von Zufallsvorgängen durch Wahrscheinlichkeitsräume (Kapitel 9.3).

9.1. Definition und erste Eigenschaften

Wir beginnen mit der Definition des Wahrscheinlichkeitsraummodells nach Kolmogoroff (1933), das wir dann nachfolgend in seinen Einzelteilen aus Frequentistischer Perspektive erläutern wollen.

Definition 9.1 (Wahrscheinlichkeitsraum). Ein *Wahrscheinlichkeitsraum* ist ein Triple $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$, wobei

- Ω eine beliebige nichtleere Menge von *Ergebnissen* ω ist und *Ergebnismenge* heißt,
- \mathcal{A} eine Menge von Teilmengen von Ω mit den Eigenschaften
 - $\Omega \in \mathcal{A}$,
 - für alle $A \in \mathcal{A}$ gilt, dass auch $A^c := \Omega \setminus A \in \mathcal{A}$ ist,
 - aus $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$ folgt, dass auch $\cup_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{A}$ ist, ist, σ -Algebra auf Ω genannt wird und *Ereignissystem* heißt,
- \mathbb{P} eine Abbildung der Form $\mathbb{P} : \mathcal{A} \rightarrow [0, 1]$ mit den Eigenschaften
 - $\mathbb{P}(A) \geq 0$ für alle $A \in \mathcal{A}$ (*Nicht-Negativität*),
 - $\mathbb{P}(\Omega) = 1$ (*Normiertheit*) und
 - $\mathbb{P}(\cup_{i=1}^{\infty} A_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_i)$ für paarweise disjunkte $A_i \in \mathcal{A}$ (σ -Additivität) ist und *Wahrscheinlichkeitsmaß* heißt.

•

Ergebnismenge und Mechanik

Wir beginnen mit Erläuterungen zum Begriff der *Ergebnismenge* Ω und der impliziten Mechanik des Wahrscheinlichkeitsraummodells. Um den Einstieg zu erleichtern betrachten wir im Folgenden zunächst vor allem *endliche Wahrscheinlichkeitsräume*, bei denen die Kardinalität von Ω nicht unendlich groß ist. Es sei also $|\Omega| < \infty$, Ω habe also nur endlich viele Elemente. Zum Modellieren des Werfen eines Würfels könnte man zum Beispiel $\Omega := \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ definieren.

Hinter der formalen Definition des Wahrscheinlichkeitsraummodells stehen folgende Frequentistisch-geprägten Annahmen über seine Mechanik als Modell eines Zufallsvorgangs. Wir stellen uns zunächst sequentielle Durchgänge eines Zufallsvorgangs vor, also zum Beispiel das wiederholte Werfen eines Würfels. Nach Annahme des Wahrscheinlichkeitsraummodells wird in jedem dieser Durchgänge genau ein ω aus Ω *realisiert*, also als tatsächlich vorliegend ausgewählt. Wirft man zum Beispiel einen Würfel und fällt eine Zwei, so sagt man, dass eine Zwei realisiert wurde. Die Wahrscheinlichkeit, mit der ein ω aus Ω in einem Durchgang realisiert wird, wird durch den Wert $\mathbb{P}(\{\omega\}) \in [0, 1]$ beschrieben. Ist zum Beispiel $\mathbb{P}(\{\omega\}) = 1$, so wird dieses ω in jedem Durchgang des Zufallsvorgangs realisiert; ist $\mathbb{P}(\{\omega\}) = 0$, so wird dieses ω in keinem Durchgang des Zufallsvorgangs realisiert; und ist $\mathbb{P}(\{\omega\}) = 1/2$, so wird ω in etwa der Hälfte der Durchgänge des Zufallsvorgangs realisiert. Beim Modell des Werfens eines fairen Würfels nimmt man üblicherweise $\mathbb{P}(\{\omega\}) = 1/6$ für alle $\omega \in \Omega$ an. Hier könnte zum Beispiel im ersten Durchgang eine Vier realisiert werden, im zweiten Durchgang eine Eins, im dritten Durchgang eine Fünf, dann vielleicht wieder eine Vier und so weiter.

Ereignisse und Ereignissystem

Den Begriff des *Ereignisses* $A \in \mathcal{A}$ stellt man sich am besten als konzeptionelle Zusammenfassung ein oder mehrerer Ergebnisse vor. Beim Werfen eines Würfels sind mögliche Ereignisse zum Beispiel “Es fällt eine gerade Augenzahl”, das heißt $\omega \in \{2, 4, 6\}$; “Es fällt eine Augenzahl größer als Zwei”, das heißt $\omega \in \{3, 4, 5, 6\}$; oder etwa “Es fällt eine Eins oder eine Fünf”, das heißt $\omega \in \{1, 5\}$. Man beachte, dass zum Beispiel das Ereignis “Es fällt eine gerade Augenzahl” vor dem Hintergrund der Mechanik des Wahrscheinlichkeitsraums genau dann eintritt, wenn in einem Durchgang des Zufallsvorgangs *Werfen eines Würfels* das realisierte ω ein Element der Menge $\{2, 4, 6\}$ ist, wenn also zum Beispiel eine Vier fällt. Man mag das Eintreten des Ereignisses “Es fällt eine Augenzahl größer als Zwei” also auch lesen als “In einem Durchgang des Zufallsvorgangs *Werfen eines Würfels* wird ein Element von $\{3, 4, 5, 6\}$ realisiert”, d.h. konkret fällt entweder eine Drei, eine Vier, eine Fünf oder eine Sechs. Natürlich sind auch die Ergebnisse $\omega \in \Omega$ selbst mögliche Ereignisse, so dass zum Beispiel folgende Interpretationen gelten: Das Ereignis “Es fällt eine Eins” entspricht der Realisation $\omega \in \{1\}$ und das Ereignis “Es fällt eine Sechs” entspricht der Realisation $\omega \in \{6\}$. Betrachtet man in diesem Zusammenhang ein Ergebnis $\omega \in \Omega$ als Ereignis, so nennt man es *Elementarereignis* und schreibt es als einelementige Menge $\{\omega\}$.

Insgesamt entspricht dieses Vorgehen zur Beschreibung zufälliger Ereignisse dem inhärenten Ziel der Definition des Wahrscheinlichkeitsraums. Kolmogoroff (1933) schreibt dazu “Wir haben die eigentlichen Objekte unserer weiteren Betrachtungen - die zufälligen Ereignisse - als Mengen definiert.” Dies hat den Vorteil, dass Mengen mathematische Objekte sind, mit denen mathematisch gearbeitet werden kann und damit ein Aspekt der

Wirklichkeit, ein “zufälliges Ereignis”, in den Modellbereich der Mathematik übersetzt wurde.

Alleiniger Sinn des *Ereignissystems* \mathcal{A} ist es nun, alle Ereignisse, die sich basierend auf einer gegebenen Ergebnismenge bei Auswahl eines $\omega \in \Omega$ ergeben können, mathematisch zu repräsentieren. Es soll also keine Ereignisse in der Wirklichkeit geben, die nicht im Vorhinein im Wahrscheinlichkeitsraummodells des Zufallsvorgangs mitgedacht wurden. Wäre dies der Fall, so wäre das Modell defizitär, da es für bestimmte, in der Wirklichkeit eintretende Ereignisse keine Wahrscheinlichkeiten angeben könnte. Das Ereignissystem \mathcal{A} soll also die vollständige Menge aller möglichen Ereignisse bei vorgegebenem Ω sein. Die Forderung, dass \mathcal{A} zu diesem Zweck die sogenannten σ -Algebra Kriterien erfüllen soll, begründet sich dabei intuitiv wie folgt.

- Es soll zunächst einmal sichergestellt sein, dass $\omega \in \Omega$ für ein beliebiges ω , dass also irgendein Ergebnis realisiert wird, eines der möglichen Ereignisse ist. Dies entspricht der Eigenschaft $\Omega \in \mathcal{A}$.
- Zu jedem Ereignis soll es weiterhin auch möglich sein, dass dieses Ereignis gerade nicht eintritt. Dies entspricht der Eigenschaft, dass aus $A \in \mathcal{A}$ folgen soll, dass $A^c := \Omega \setminus A$ auch in \mathcal{A} ist. Dies impliziert insbesondere auch, dass $\emptyset = \Omega \setminus \Omega \in \mathcal{A}$. Ein Ereignis ist also, dass kein Elementarereignis eintritt, allerdings passiert dies nur mit Wahrscheinlichkeit Null, $\mathbb{P}(\emptyset) = 0$. Es tritt also sicher immer zumindest ein Elementarereignis ein.
- Schließlich soll die Kombination von Ereignissen auch immer ein Ereignis sein. Bei der Modellierung des Werfen eines Würfels soll also zum Beispiel neben den Ereignissen “Es fällt eine gerade Zahl” und “Es fällt eine Zahl größer Zwei” auch das Ereignis “Es fällt eine gerade Zahl und/oder diese Zahl ist größer als Zwei” ein Ereignis sein. Dies entspricht, in allgemeiner Form, dass aus $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$ folgen soll, dass auch $\bigcup_{i=1}^{\infty} A_i \in \mathcal{A}$ ist.

Wenn auch die Begriffe des Ereignissystems und der σ -Algebra etwas abstrakt anmuten mögen, so stellt ihre Definition in der praktischen Modellierung von Zufallsvorgängen meist keine großen Herausforderung dar, da sowohl für endliche Ergebnismengen als auch für unendliche (abzählbare und überabzählbare) Ergebnismengen passende Ereignissysteme schon lange bekannt sind. So erfüllt bei Ergebnismengen mit endlicher Kardinalität die Potenzmenge der Ergebnismenge immer die Anforderungen eines Ereignissystems und kann immer zur Modellformulierung eines Zufallsvorgangs mit endlicher Ergebnismenge genutzt werden. Dies ist die Aussage folgenden Theorems.

Theorem 9.1 (Ereignissystem bei endlicher Ergebnismenge). $\Omega := \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ mit $n \in \mathbb{N}$ sei eine endliche Menge. Dann ist die Potenzmenge $\mathcal{P}(\Omega)$ von Ω eine σ -Algebra auf Ω und damit ein geeignetes Ereignissystem im Wahrscheinlichkeitsraummodell.

◦

Beweis. Die Potenzmenge von Ω ist die Menge aller Teilmengen von Ω . Wir überprüfen die σ -Algebra Eigenschaften. Zunächst gilt, dass Ω selbst eine der Teilmengen von Ω ist, also ist die erste σ -Algebra Eigenschaft erfüllt. Sei nun A eine Teilmenge von Ω . Dann ist auch $A^c = \Omega \setminus A$ eine Teilmenge von Ω und somit ist auch die zweite σ -Algebra Eigenschaft erfüllt. Schließlich betrachten wir die Vereinigung von n Teilmengen $A_1, A_2, \dots, A_n \subseteq \Omega$. Dann ist $\bigcup_{i=1}^n A_i$ die Menge der $\omega \in \Omega$ für die gilt, dass $\omega \in A_1$ und/oder $\omega \in A_2$... und/oder $\omega \in A_n$. Da für alle diese ω gilt, dass $\omega \in \Omega$ ist also auch $\bigcup_{i=1}^n A_i$ eine Teilmenge von Ω und damit auch die dritte σ -Algebra Eigenschaft erfüllt. Die Potenzmenge erfüllt also die geforderten Eigenschaften an ein Ereignissystem.

□

Bei überabzählbaren Ergebnismengen wie den reellen Zahlen \mathbb{R} oder dem n -dimensionalen reellen Raum \mathbb{R}^n ist die Konstruktion eines geeigneten Ereignissystems komplexer, so dass wir in dieser Hinsicht für formale Entwicklungen auf die weiterführende Literatur verweisen wollen (z.B. Meintrup & Schäffler (2005), Schmidt (2009)). Mit der auf Borel (1898) zurückgehenden sogenannten *Borelschen σ -Algebra* ist jedoch ein Mengensystem bekannt, das den Anforderungen einer σ -Algebra auf überabzählbaren Ergebnismengen genügt. Wir bezeichnen die Borelsche σ -Algebra auf \mathbb{R}^n mit $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ und die Borelsche σ -Algebra auf \mathbb{R}^n mit $\mathcal{B}(\mathbb{R}^n)$. Als Menge von Teilmengen von \mathbb{R} bzw. \mathbb{R}^n enthalten $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ bzw. $\mathcal{B}(\mathbb{R}^n)$ alle Mengen, an denen man hinsichtlich ihrer durch \mathbb{P} zugeordneten Wahrscheinlichkeit interessiert sein mag. Intuitiv mag man sich die Borelschen σ -Algebren $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ und $\mathcal{B}(\mathbb{R}^n)$ also als die Potenzmengen von \mathbb{R} bzw. \mathbb{R}^n denken, auch wenn dies formal falsch ist. Tatsächlich enthält die Borelsche σ -Algebra nur Teilmengen, die durch abzählbare Mengenoperationen generiert werden, nicht aber durch überabzählbare.

Insgesamt ergibt sich also folgendes Vorgehen zur Auswahl von Ereignissystemen in Abhängigkeit von der Ergebnismenge Ω . Ist Ω endlich, so wählt man als Ereignissystem \mathcal{A} die Potenzmenge $\mathcal{P}(\Omega)$ von Ω . Ist Ω gegeben durch \mathbb{R} , so wählt man als Ereignissystem \mathcal{A} die Borelsche σ -Algebra $\mathcal{B}(\mathbb{R})$. Ist Ω schließlich gegeben durch \mathbb{R}^n , so wählt man für \mathcal{A} die Borelsche σ -Algebra $\mathcal{B}(\mathbb{R}^n)$. In Spezialfällen und für sehr spezielle Ergebnismengen Ω mag man von diesem Vorgehen abweichen wollen, allgemein decken die drei betrachteten Fälle jedoch die meisten Anwendungen ab.

Wahrscheinlichkeitsmaß \mathbb{P}

Mit Ω und \mathcal{A} , die in Tupleform (Ω, \mathcal{A}) auch als *Messraum* bezeichnet werden, haben wir bisher die *strukturelle Basis* eines Wahrscheinlichkeitsraummodells genauer betrachtet. Viele Wahrscheinlichkeitsräume, zum Beispiel für Zufallsvorgänge die reellen Zahlen betreffend, sind hinsichtlich ihres Messraums identisch. Das *Wahrscheinlichkeitsmaß* \mathbb{P} nun repräsentiert die probabilistischen Charakteristika eines Wahrscheinlichkeitsraummodells und formt damit die *funktionelle Basis* eines Wahrscheinlichkeitsraummodells. Wir werden im Folgenden, insbesondere nach Einführung der Begriffe der Zufallsvariablen und Zufallsvektoren, sehr viele verschiedene Wahrscheinlichkeitsmaße kennenlernen. An dieser Stelle wollen wir zunächst nur allgemeine Eigenschaften von Wahrscheinlichkeitsmaßen betrachten.

Mit der Definition

$$\mathbb{P} : \mathcal{A} \rightarrow [0, 1], A \mapsto \mathbb{P}(A) \quad (9.1)$$

gilt zunächst einmal, dass ein Wahrscheinlichkeitsmaß auf einer Menge von Mengen definiert ist und den Elementen dieser Menge, also den Mengen $A \in \mathcal{A}$, Wahrscheinlichkeiten, also Werte im Intervall $[0, 1]$, zuordnet. Natürlich gilt mit $\{\omega\} \in \mathcal{A}$ für alle $\omega \in \Omega$, dass \mathbb{P} auch den Elementareignissen Wahrscheinlichkeiten zuordnet, aber eben nicht nur. Wir betonen auch, dass nach Definition die Wahrscheinlichkeit $\mathbb{P}(A)$ eines Ereignisses $A \in \mathcal{A}$ eine Zahl im Intervall $[0, 1]$ ist und nicht etwa eine Prozentzahl oder ein Verhältnis. Wir wollen nachfolgend die definierenden Eigenschaften der *Nicht-Negativität*, der *Normiertheit* und der *σ -Additivität* von \mathbb{P} näher beleuchten.

Die *Nicht-Negativität* $\mathbb{P}(A) \geq 0$ für alle $A \in \mathcal{A}$ ist natürlich in der Definition $[0, 1]$ der Zielmenge von \mathbb{P} implizit. Tatsächlich ist die Abbildungsform von \mathbb{P} eine von uns

vorgenommene Ergänzung der Formulierung von Kolmogoroff (1933), die der Klarheit dienen soll. Formal folgt die Form der Zielmenge von \mathbb{P} eigentlich aus den definierenden Eigenschaften der Nicht-Negativität, Normiertheit, und σ -Additivität von \mathbb{P} .

Die *Normiertheit* $\mathbb{P}(\Omega) = 1$ entspricht der Tatsache, dass in jedem Durchgang eines Zufallsvorgangs sicher gilt, dass ein realisiertes ω ein Element von Ω ist. In jedem Durchgang eines Zufallsvorgangs tritt also ein Elementarereignis ein und, je nach Beschaffenheit des Messraums, noch viele weitere. Beim Modell des Werfen eines Würfels gilt also, dass das in einem Durchgang des Zufallsvorgangs realisierte Ergebnis/Elementarereignis mit Wahrscheinlichkeit 1 ein Element von $\Omega := \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ist. Ist das realisierte Ergebnis zum Beispiel eine Eins, so treten neben dem Ereignis “Es fällt eine Eins” auch noch die Ereignisse “Eine ungerade Zahl fällt”, “Eine Zahl kleiner als Drei fällt”, “Eine ungerade Zahl kleiner als Drei fällt” und viele weitere ein.

Die σ -Additivität des Wahrscheinlichkeitsmaßes \mathbb{P} schließlich bildet das Fundament der *Wahrscheinlichkeitsrechnung*, also die Grundlage für das Rechnen mit Wahrscheinlichkeiten. Die σ -Additivität von \mathbb{P} erlaubt es nämlich, aus bereits bekannten Ereigniswahrscheinlichkeiten die Wahrscheinlichkeiten anderer Ereignisse zu berechnen. Man kann damit basierend auf einer Definition von Ω, \mathcal{A} und \mathbb{P} also Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Ereignisse eines Wahrscheinlichkeitsraummodells berechnen. Ob diese Wahrscheinlichkeiten nun aber tatsächlich etwas mit den realen Ereignissen bezüglich eines Zufallsvorgangs der Wirklichkeit zu tun haben, kommt darauf an, ob die Modellierung einigermaßen gelungen ist oder nicht. Dabei werden berechnete Wahrscheinlichkeiten aber zumindest rational, also nach den Regeln der Vernunft, d.h. der Logik und der Mathematik, bestimmt. Insgesamt erlaubt das Wahrscheinlichkeitsmodell damit das schlussfolgernde Nachdenken über mit Unsicherheit behaftete Phänomene.

Wir wollen abschließend das auf der σ -Additivität von \mathbb{P} beruhende Rechnen mit Wahrscheinlichkeiten noch an zwei grundlegenden Beispielen verdeutlichen.

Das erste Beispiel besagt, dass die Wahrscheinlichkeit dafür, dass das in einem Durchgang eines Zufallsvorgangs realisierte ω kein Element der Ergebnismenge ist, gleich Null ist.

Theorem 9.2 (Wahrscheinlichkeit des unmöglichen Ereignisses). $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ sei ein Wahrscheinlichkeitsraum. Dann gilt

$$\mathbb{P}(\emptyset) = 0. \quad (9.2)$$

◦

Beweis. Für $i = 1, 2, \dots$ sei $A_i := \emptyset$. Dann ist A_1, A_2, \dots eine Folge disjunkter Ereignisse, weil gilt, dass $\emptyset \cap \emptyset = \emptyset$ und es ist $\cup_{i=1}^{\infty} A_i = \emptyset$. Mit der σ -Additivität von \mathbb{P} folgt dann, dass

$$\mathbb{P}(\emptyset) = \mathbb{P}(\cup_{i=1}^{\infty} A_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{P}(\emptyset). \quad (9.3)$$

Das unendliche Aufaddieren der Zahl $\mathbb{P}(\emptyset) \in [0, 1]$ soll also wieder $\mathbb{P}(\emptyset)$ ergeben. Dies ist aber nur möglich, wenn $\mathbb{P}(\emptyset) = 0$.

□

Man beachte, dass hier intuitiv natürlich eine mögliche Unzulänglichkeit des Wahrscheinlichkeitsraums als Modell für Zufallsvorgänge in der Wirklichkeit auftritt: Fällt beim Würfelspiel der Würfel zum Beispiel unerreichbar unter das Sofa, so ist ein

Elementarereignis $\omega \notin \Omega$ eingetreten, obwohl seine modellierte Wahrscheinlichkeit gleich Null ist.

Als zweites Beispiel wollen wir zeigen, dass die σ -Additivität, die in der Definition des Wahrscheinlichkeitsraums (nur) für die Vereinigung unendlich vieler disjunkter Ereignisse definiert ist, die σ -Additivität endlich vieler disjunkter Ereignisse, wie sie in in der Anwendung oft vorkommen, impliziert.

Theorem 9.3 (σ -Additivität bei endlichen Folgen disjunkter Ereignisse). *$(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ sei ein Wahrscheinlichkeitsraum und A_1, \dots, A_n sei eine endliche Folge paarweise disjunkter Ereignisse. Dann gilt*

$$\mathbb{P}(\cup_{i=1}^n A_i) = \sum_{i=1}^n \mathbb{P}(A_i). \quad (9.4)$$

◦

Beweis. Wir betrachten eine unendliche Folge von paarweise disjunkten Ereignissen A_1, A_2, \dots wobei für ein $n \in \mathbb{N}$ gelten soll, dass $A_i := \emptyset$ für $i > n$. Dann gilt mit der σ -Additivität von \mathbb{P} zunächst, dass

$$\mathbb{P}(\cup_{i=1}^n A_i) = \mathbb{P}(\cup_{i=1}^{\infty} A_i) = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_i) = \sum_{i=1}^n \mathbb{P}(A_i) + \sum_{i=n+1}^{\infty} \mathbb{P}(A_i). \quad (9.5)$$

Mit $\mathbb{P}(A_i) = \mathbb{P}(\emptyset) = 0$ für $i = n+1, n+2, \dots$ folgt dann direkt

$$\mathbb{P}(\cup_{i=1}^n A_i) = \sum_{i=1}^n \mathbb{P}(A_i) + 0 = \sum_{i=1}^n \mathbb{P}(A_i). \quad (9.6)$$

□

9.2. Wahrscheinlichkeitsfunktionen

In diesem Abschnitt wollen wir mit den *Wahrscheinlichkeitsfunktionen* eine erste Möglichkeit kennenlernen, für Wahrscheinlichkeitsräume mit endlicher Ergebnismenge Wahrscheinlichkeitsmaße festzulegen. In Kapitel 9.3 nutzen wir dieses Hilfsmittel intensiv, um erste Beispiele für die Modellierung von Zufallsvorgängen mithilfe von Wahrscheinlichkeitsräumen geben zu können. Wir definieren den Begriff der Wahrscheinlichkeitsfunktion wie folgt.

Definition 9.2 (Wahrscheinlichkeitsfunktion). Ω sei eine endliche Menge. Dann heißt eine Funktion $\pi : \Omega \rightarrow [0, 1]$ *Wahrscheinlichkeitsfunktion*, wenn gilt, dass

$$\sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) = 1. \quad (9.7)$$

Sei weiterhin \mathbb{P} ein Wahrscheinlichkeitsmaß. Dann heißt die durch

$$\pi : \Omega \rightarrow [0, 1], \omega \mapsto \pi(\omega) := \mathbb{P}(\{\omega\}) \quad (9.8)$$

definierte Funktion *Wahrscheinlichkeitsfunktion* von \mathbb{P} auf Ω .

•

Wir merken an, dass weil \mathbb{P} per Definition σ -additiv ist, insbesondere auch gilt, dass

$$\mathbb{P}(\Omega) = \mathbb{P}(\cup_{\omega \in \Omega} \{\omega\}) = \sum_{\omega \in \Omega} \mathbb{P}(\{\omega\}) = \sum_{\omega \in \Omega} \pi(\omega) = 1. \quad (9.9)$$

Zur Konstruktion von Wahrscheinlichkeitsmaßen durch Wahrscheinlichkeitsfunktionen stellt folgendes Theorem die formale Basis bereit. Es besagt insbesondere, dass bei endlichem Ω die Wahrscheinlichkeiten *aller* möglichen Ereignisse aus den Wahrscheinlichkeiten der Elementarereignisse $\pi(\omega)$ berechnet werden können.

Theorem 9.4. *$(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ sei ein Wahrscheinlichkeitsraum mit endlicher Ergebnismenge und $\pi : \Omega \rightarrow [0, 1]$ sei eine Wahrscheinlichkeitsfunktion. Dann existiert ein Wahrscheinlichkeitsmaß \mathbb{P} auf Ω mit π als Wahrscheinlichkeitsfunktion von \mathbb{P} . Dieses Wahrscheinlichkeitsmaß ist definiert als*

$$\mathbb{P} : \mathcal{A} \rightarrow [0, 1], A \mapsto \mathbb{P}(A) := \sum_{\omega \in A} \pi(\omega). \quad (9.10)$$

◦

Beweis. Wir überprüfen zunächst die Wahrscheinlichkeitsmaßeigenschaften von \mathbb{P} . Weil $\pi(\omega) \in [0, 1]$ für alle $\omega \in \Omega$, gilt auch immer $\sum_{\omega \in A} \pi(\omega) \geq 0$ und damit die Nicht-Negativität von \mathbb{P} . Ferner folgt wie oben gesehen mit der Normiertheit von π direkt die Normiertheit von \mathbb{P} . Seien nun $A_1, A_2, \dots \in \mathcal{A}$. Dann gilt

$$\mathbb{P}(\cup_{i=1}^{\infty} A_i) = \sum_{\omega \in \cup_{i=1}^{\infty} A_i} \pi(\omega) = \sum_{i=1}^{\infty} \sum_{\omega \in A_i} \pi(\omega) = \sum_{i=1}^{\infty} \mathbb{P}(A_i). \quad (9.11)$$

und damit die σ -Additivität von \mathbb{P} .

□

Definiert man also für eine gegebene Ergebnismenge Ω eine Funktion $\pi : \Omega \rightarrow [0, 1]$ und stellt sicher, dass sich die Funktionswerte $\pi(\omega)$ über alle $\omega \in \Omega$ hinweg zu 1 summieren und interpretiert den einzelnen Funktionswert $\pi(\omega)$ dann als die Wahrscheinlichkeit $\mathbb{P}(\{\omega\})$ des Elementarereignisses $\{\omega\} \in \mathcal{A}$, so hat man ein Wahrscheinlichkeitsmaß konstruiert.

9.3. Beispiele bei endlichem Ergebnisraum

Aus dem bis hierin Gesagtem lässt sich nun zusammenfassend folgendes Vorgehen zur Modellierung eines Zufallsvorganges mithilfe eines Wahrscheinlichkeitsraums $(\Omega, \mathcal{A}, \mathbb{P})$ festhalten:

- (1) In einem ersten Schritt überlegt man sich eine sinnvolle Definition der Ergebnismenge Ω , also der Ergebnisse bzw. Elementarereignisse, die in jedem Durchgang des Zufallsvorgangs realisiert werden sollen.
- (2) In einem zweiten Schritt wählt man dann ein geeignetes Ereignissystem; im Falle einer endlichen Ergebnismenge bietet sich die Potenzmenge $\mathcal{P}(\Omega)$ an, im Falle der überabzählbaren Ergebnismenge $\Omega := \mathbb{R}$ bietet sich die Borelsche σ -Algebra $\mathcal{B}(\mathbb{R})$ an.

- (3) Schließlich definiert man ein Wahrscheinlichkeitsmaß \mathbb{P} , das die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten aller möglichen Ereignisse repräsentiert. Im Falle einer endlichen Ergebnismenge gelingt dies insbesondere durch Definition der Wahrscheinlichkeiten der Elementarereignisse. In der Folge verdeutlichen wir dieses Vorgehen anhand von Beispielen. Im Falle der überabzählbaren Ergebnismenge $\Omega := \mathbb{R}$ bietet sich die Definition von \mathbb{P} mithilfe von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen an, wie wir später sehen werden.

Würfeln mit einem Würfel

[illegible]

Da es sich um eine endliche Ergebnismenge handelt, wählen wir als σ -Algebra \mathcal{A} die Potenzmenge $\mathcal{P}(\Omega)$. \mathcal{A} enthält dann automatisch alle möglichen Ereignisse. Die Kardinalität von $\mathcal{A} := \mathcal{P}(\Omega)$ ist $|\mathcal{P}(\Omega)| = 2^{|\Omega|} = 2^6 = 64$. In untenstehender Tabelle listen wir sechs dieser 64 Ereignisse in ihrer verbalen Beschreibung und als Teilmenge A von Ω auf.

Tabelle 9.1. Ausgewählte Ereignisse beim Modell des Werfen eines Würfels.

Beschreibung	Mengenform
Es fällt eine beliebige Augenzahl	$\omega \in A = \Omega$
Keine Augenzahl fällt	$\omega \in A = \emptyset$
Es fällt eine Augenzahl größer als 4	$\omega \in A = \{5, 6\}$
Es fällt eine gerade Augenzahl	$\omega \in A = \{2, 4, 6\}$
Es fällt eine Sechs	$\omega \in A = \{6\}$
Eine Eins, eine Drei oder eine Sechs fällt	$\omega \in A = \{1, 3, 6\}$

Damit ist die Definition des Messraum (Ω, \mathcal{A}) in der Modellierung des Werfens eines Würfels abgeschlossen.

Wie in Kapitel 9.2 beschrieben kann das Wahrscheinlichkeitsmaß \mathbb{P} durch Festlegung von $\mathbb{P}(\{\omega\})$ für alle $\omega \in \Omega$ festgelegt werden. Für das Modell eines unverfälschten Würfels würde man

$$\mathbb{P}(\{\omega\}) := \frac{1}{|\Omega|} := 1/6 \text{ für alle } \omega \in \Omega \quad (9.12)$$

wählen. Für ein Modell eines verfälschten Würfels, der das Werfen einer Sechs bevorzugt, könnte man zum Beispiel definieren, dass

$$\mathbb{P}(\{\omega\}) := \frac{1}{8} \text{ für } \omega \in \{1, 2, 3, 4, 5\} \text{ und } \mathbb{P}(\{6\}) := \frac{3}{8}. \quad (9.13)$$

Im Fall des unverfälschten Würfel ergibt sich beispielsweise die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis “Es fällt eine gerade Augenzahl” mit der σ -Additivät von \mathbb{P} dann zu

$$\mathbb{P}(\{2, 4, 6\}) = \mathbb{P}(\{2\} \cup \{4\} \cup \{6\}) = \mathbb{P}(\{2\}) + \mathbb{P}(\{4\}) + \mathbb{P}(\{6\}) = \frac{1}{6} + \frac{1}{6} + \frac{1}{6} = \frac{3}{6}. \quad (9.14)$$

Im Fall des obigen Modells eines verfälschten Würfels ergibt sich für das gleiche Ereignis die Wahrscheinlichkeit zu

$$\mathbb{P}(\{2, 4, 6\}) = \mathbb{P}(\{2\} \cup \{4\} \cup \{6\}) = \mathbb{P}(\{2\}) + \mathbb{P}(\{4\}) + \mathbb{P}(\{6\}) = \frac{1}{8} + \frac{1}{8} + \frac{3}{8} = \frac{5}{8}. \quad (9.15)$$

Das betrachtete Ereignis hat im Modell des verfälschten Würfels eine höhere Wahrscheinlichkeit als im Modell des unverfälschten Würfels, was intuitiv sinnvoll ist, da die Sechs eine gerade Zahl ist.

Gleichzeitiges Würfeln mit einem blauen und einem roten Würfel

Wir wollen nun das gleichzeitige Werfen eines blauen und eines roten Würfels modellieren. Dazu ist es sinnvoll, die Ergebnismenge als

$$\Omega := \{(r, b) | r \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, b \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}\} \quad (9.16)$$

mit Kardinalität $|\Omega| = 36$ zu definieren, wobei r die Augenzahl des blauen Würfels und b die Augenzahl des roten Würfels repräsentieren soll.

Wiederum bietet sich die Wahl der Potenzmenge von Ω als σ -Algebra an, wir definieren also wieder $\mathcal{A} := \mathcal{P}(\Omega)$. Die Anzahl der in diesem Modell möglichen Ereignisse ergibt sich zu $|\mathcal{A}| = 2^{|\Omega|} = 2^{36} = 68.719.476.736$. In untenstehender Tabelle listen wir sechs dieser Ereignisse in ihrer verbalen Beschreibung und als Teilmenge A von Ω auf.

Tabelle 9.2. Ausgewählte Ereignisse beim Modell des Werfens eines roten und eines blauen Würfels.

Beschreibung	Mengenform
Auf dem roten Würfel fällt eine Drei	$\omega \in A = \{(3, 1), (3, 2), (3, 3), (3, 4), (3, 5), (3, 6)\}$
Auf dem blauen Würfel fällt eine Drei	$\omega \in A = \{(1, 3), (2, 3), (3, 3), (4, 3), (5, 3), (6, 3)\}$
Auf beiden Würfeln fällt eine Drei	$\omega \in A = \{(3, 3)\}$
Es fällt eine Pasch	$\omega \in A = \{(1, 1), (2, 2), (3, 3), (4, 4), (5, 5), (6, 6)\}$
Die Summe der gefallen Zahlen ist Vier	$\omega \in A = \{(1, 3), (3, 1), (2, 2)\}$

Die Definition des Messraum (Ω, \mathcal{A}) ist damit abgeschlossen. Ein Wahrscheinlichkeitsmaß \mathbb{P} kann wiederum durch Definition von $\mathbb{P}(\{\omega\})$ für alle $\omega \in \Omega$ festgelegt werden. Für das Modell zweier unverfälschter Würfel würde man

$$\mathbb{P}(\{\omega\}) := \frac{1}{|\Omega|} = \frac{1}{36} \text{ für alle } \omega \in \Omega \quad (9.17)$$

wählen. Unter diesem Wahrscheinlichkeitsmaß ergibt sich dann beispielsweise die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis “Die Summe der gefallen Zahlen ist Vier” mit der σ -Additivität von \mathbb{P} zu

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\{(1, 3), (3, 1), (2, 2)\}) &= \mathbb{P}(\{(1, 3)\} \cup \{(3, 1)\} \cup \{(2, 2)\}) \\ &= \mathbb{P}(\{(1, 3)\}) + \mathbb{P}(\{(3, 1)\}) + \mathbb{P}(\{(2, 2)\}) \\ &= 1/36 + 1/36 + 1/36 \\ &= 1/12. \end{aligned}$$

Werfen einer Münze

Wir modellieren das Werfen einer Münze, deren eine Seite Kopf (Heads) und deren andere Seite Zahl (Tails) zeigt. Es ist sinnvoll, die Ergebnismenge als $\Omega := \{H, T\}$ zu definieren, wobei H “Heads” und T “Tails” repräsentiert. Allerdings wäre auch jede andere binäre Definition von Ω möglich, z.B. $\Omega := \{0, 1\}$, $\Omega := \{-1, 1\}$, oder $\Omega := \{1, 2\}$.

Die Potenzmenge $\mathcal{A} := \mathcal{P}(\Omega)$ enthält alle möglichen Ereignisse. In diesem Fall können wir das gesamte Mengensystem \mathcal{A} leicht, wie in untenstehender Tabelle gezeigt, komplett auflisten.

Tabelle 9.3. Ereignissystem \mathcal{A} beim Modell des Werfens einer Münze.

Beschreibung	Mengenform
Weder Kopf noch Zahl fällt	$\omega \in A = \emptyset$
Kopf fällt	$\omega \in A = \{H\}$
Zahl fällt	$\omega \in A = \{T\}$
Kopf oder Zahl fällt	$\omega \in A = \{H, T\}$

Die Definition des Messraums (Ω, \mathcal{A}) ist damit abgeschlossen.

Ein Wahrscheinlichkeitsmaß \mathbb{P} kann wiederum durch Definition von $\mathbb{P}(\{\omega\})$ für alle $\omega \in \Omega$ festgelegt werden. Die Normiertheit von Ω bedingt hier insbesondere, dass

$$\mathbb{P}(\Omega) = 1 \Leftrightarrow \mathbb{P}(\{H\}) + \mathbb{P}(\{T\}) = 1 \Leftrightarrow \mathbb{P}(\{T\}) = 1 - \mathbb{P}(\{H\}). \quad (9.18)$$

Bei Festlegung der Wahrscheinlichkeit des Elementarereignisses $\{H\}$ wird also die Wahrscheinlichkeit des Elementarereignis $\{T\}$ sofort mit festgelegt, andersherum gilt dies natürlich ebenso. Für das Modell einer fairen Münze würde man $\mathbb{P}(\{H\}) = \mathbb{P}(\{T\}) := 1/2$ wählen. Die Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Ereignisse ergeben sich in diesem Fall zu

$$\mathbb{P}(\emptyset) = 0, \mathbb{P}(\{H\}) = 1/2, \mathbb{P}(\{T\}) = 1/2 \text{ und } \mathbb{P}(\{H, T\}) = 1. \quad (9.19)$$

Zweifaches Werfen einer Münze

Wir modellieren das zweifache Werfen einer Münzen. Basierend auf dem Modell des einfachen Münzwurfs ist es sinnvoll, die Ergebnismenge als $\Omega := \{HH, HT, TH, TT\}$ zu definieren. Die Potenzmenge $\mathcal{A} := \mathcal{P}(\Omega)$ enthält wiederum alle $2^{|\Omega|} = 2^4 = 16$ möglichen Ereignisse. In untenstehender Tabelle listen wir vier davon.

Tabelle 9.4. Ausgewählte Ereignisse beim Modell des zweifachen Werfens einer Münze.

Beschreibung	Mengenform
Kopf fällt im ersten Wurf	$\omega \in A = \{HH, HT\}$
Kopf fällt im zweiten Wurf	$\omega \in A = \{HH, TH\}$
Kopf fällt nicht	$\omega \in A = \{TT\}$
Zahl fällt mindestens einmal	$\omega \in A = \{HT, TH, TT\}$

Die Definition des Messraum (Ω, \mathcal{A}) ist damit abgeschlossen. Ein Wahrscheinlichkeitsmaß \mathbb{P} kann wiederum durch Definition von $\mathbb{P}(\{\omega\})$ für alle $\omega \in \Omega$ festgelegt werden. Für das Modell des zweifachen Werfens einer fairen Münze würde man

$$\mathbb{P}(\{HH\}) = \mathbb{P}(\{HT\}) = \mathbb{P}(\{TH\}) = \mathbb{P}(\{TT\}) := \frac{1}{4} \quad (9.20)$$

definieren.

9.4. Literaturhinweise

Die Monographie “Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung” von Andrey Kolmogorov (Kolmogoroff (1933)) symbolisiert die Grundlage der modernen Wahrscheinlichkeitsrechnung. Neben der hier diskutierten axiomatischen Einführung des Wahrscheinlichkeitsraummodells betrachtet Kolmogoroff (1933) noch viele weitere Aspekte der Wahrscheinlichkeitrechnung und bietet so einen gut lesbaren Einstieg in das gesamte Gebiet der Wahrscheinlichkeitstheorie. Natürlich ist der von Kolmogoroff (1933) formulierte Zugang nur ein vorläufiges Endprodukt der langen geschichtlichen Entwicklung der Wahrscheinlichkeitstheorie. Schließlich ist die Entwicklung der mathematischen Modellierung von Zufallvorgängen auch mit Kolmogoroff (1933) keinesfalls an einem Ende angelangt. Spätere Arbeiten im 20. Jahrhundert betrafen insbesondere die Interpretation des Wahrscheinlichkeitsbegriffs (vgl. De Finetti (1975)) oder führen verallgemeinerte quantitative Maße subjektiver Unsicherheit ein (vgl. Walley (1991)). Einen aktuellen Überblick zur Interpretation des Wahrscheinlichkeitsbegriffs und seiner formalen Grundlagen gibt Hájek (2019).

9.5. Selbstkontrollfragen

1. Geben Sie die Definition des Begriffs der σ -Algebra wieder.
2. Geben Sie die Definition des Begriffs des Wahrscheinlichkeitsmaßes wieder.
3. Geben Sie die Definition des Begriffs des Wahrscheinlichkeitsraums wieder.
4. Erläutern Sie den Begriff der Ergebnismenge Ω .
5. Erläutern Sie die stillschweigende Mechanik des Wahrscheinlichkeitsraummodells.
6. Erläutern Sie den Begriff eines Ereignisses $A \in \mathcal{A}$.
7. Erläutern Sie den Begriff des Ereignissystems \mathcal{A} .
8. Welche σ -Algebra wählt man sinnvoller Weise für einen Wahrscheinlichkeitsraum mit endlicher Ergebnismenge?
9. Erläutern Sie den Begriff des Wahrscheinlichkeitsmaßes \mathbb{P} .
10. Geben Sie die Definition des Begriffs der Wahrscheinlichkeitsfunktion wieder.
11. Warum ist der Begriff der Wahrscheinlichkeitsfunktion bei der Modellierung eines Zufallsvorgangs durch einen Wahrscheinlichkeitsraum mit endlicher Ergebnismenge hilfreich?
12. Erläutern Sie die Modellierung des Werfens eines Würfels mithilfe eines Wahrscheinlichkeitsraums.
13. Erläutern Sie die Modellierung des gleichzeitigen Werfens eines roten und eines blauen Würfels mithilfe eines Wahrscheinlichkeitsraums.

Referenzen

- Arens, T., Hettlich, F., Karpfinger, C., Kockelkorn, U., Lichtenegger, K., & Stachel, H. (2018). *Mathematik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56741-8>
- Blei, D. M., Kucukelbir, A., & McAuliffe, J. D. (2017). Variational Inference: A Review for Statisticians. *Journal of the American Statistical Association*, 112(518), 859–877. <https://doi.org/10.1080/01621459.2017.1285773>
- Borel, É. (1898). *Leçons Sur La Théorie Des Fonctions*. Paris: Gauthier Villars.
- Cantor, G. (1892). Über Eine Eigenschaft Des Inbegriffes Aller Reellen Algebraischen Zahlen. *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*, 1.
- Cantor, G. (1895). Beiträge Zur Begründung Der Transfiniten Mengenlehre. *Mathematische Annalen*, 46(4), 481–512. <https://doi.org/10.1007/BF02124929>
- De Finetti, B. (1975). *Theory of Probability*. John Wiley & Sons.
- Friston, K. (2005). A Theory of Cortical Responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 815–836. <https://doi.org/10.1098/rstb.2005.1622>
- Friston, K., Da Costa, L., Sakthivadivel, D. A. R., Heins, C., Pavliotis, G. A., Ramstead, M., & Parr, T. (2023). Path Integrals, Particular Kinds, and Strange Things. *Physics of Life Reviews*, 47, 35–62. <https://doi.org/10.1016/j.plrev.2023.08.016>
- Hájek, A. (2019). Interpretations of Probability. In E. N. Zalta (Hrsg.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2019). Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Kolmogoroff, A. (1933). *Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-49888-6>
- Meintrup, D., & Schäffler, S. (2005). *Stochastik: Theorie und Anwendungen*. Springer.
- Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Royal Society.
- Ostwald, D., Kirilina, E., Starke, L., & Blankenburg, F. (2014). A Tutorial on Variational Bayes for Latent Linear Stochastic Time-Series Models. *Journal of Mathematical Psychology*, 60, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.jmp.2014.04.003>
- Philip, S., Kew, S., Van Oldenborgh, G. J., Otto, F., Vautard, R., Van Der Wiel, K., King, A., Lott, F., Arrighi, J., Singh, R., & Van Aalst, M. (2020). A Protocol for Probabilistic Extreme Event Attribution Analyses. *Advances in Statistical Climatology, Meteorology and Oceanography*, 6(2), 177–203. <https://doi.org/10.5194/ascmo-6-177-2020>
- Schmidt, K. D. (2009). *Maß und Wahrscheinlichkeit*. Springer.
- Unger, L. (2000). *Grundkurs Mathematik*.
- Walley, P. (1991). *Statistical Reasoning with Imprecise Probabilities* (1st ed). Chapman and Hall.