

Pizzaseminar zu konstruktiver Mathematik

2. November 2013

in Entstehung befindlich, nur grobe Zusammenfassung

Inhaltsverzeichnis

1. Was ist konstruktive Mathematik?	2
1.1. Widerspruchsbeweise vs. Beweise von Negationen	3
1.2. Informale Bedeutung logischer Aussagen	4
2. Beispiele	6
2.1. Diskretheit der natürlichen Zahlen	6
2.2. Minima von Teilmengen der natürlichen Zahlen	7
2.3. Potenzmengen	8
2.4. Die De Morganschen Gesetze	8
2.5. Weitere Beispiele	9
3. Nutzen konstruktiver Mathematik	9
4. Die Schlussregeln intuitionistischer Logik	13
4.1. Formale logische Sprache	13
4.2. Sequenzen	14
4.3. Ableitungen	15
4.4. Peano-Arithmetik und Heyting-Arithmetik	18
5. Beziehung zu klassischer Logik	19
5.1. Die Doppelnegationsübersetzung	20
5.2. Interpretation der übersetzten Aussagen	21
5.3. Die umgekehrte Richtung: Modelle für intuitionistische Logik	24
6. Beziehung zur theoretischen Informatik: die Curry-Howard-Korrespondenz	26
6.1. Beispiele	26
6.2. Interpretation	27
6.3. Genauere Formulierung	28

7. Hilberts Programm	28
7.1. Die mathematische Welt um 1900	28
7.2. Beispiel aus der Zahlentheorie: Friedmans Trick	30
7.3. Beispiel aus der Algebra: dynamische Methoden	33
8. Ein topostheoretischer Zugang zu Quantenmechanik	38
8.1. Gelfand-Dualität zwischen topologischen Räumen und C^* -Algebren	38
8.2. Örtlichkeiten für punktfreie Topologie	40
8.3. Algebraische Sicht auf klassische Mechanik und Quantenmechanik	41
8.4. Topoi als mathematische Alternativuniversen	44
8.5. Der Bohr-Topos zu einer nichtkommutativen C^* -Algebra	47
A. Ideale in Ringen	51
A.1. Grundlegende Konzepte	51
A.2. Historische Motivation für Idealtheorie	52
A.3. Die Ideale im Ring der ganzen Zahlen	52
A.4. Primideale und Nilpotenz	53
A.5. Radikalideale	55
B. Garben	55
B.1. Prägarben und Garben	55
B.2. Monomorphismen und Epimorphismen von Garben	57

1. Was ist konstruktive Mathematik?

Proposition 1.1. *Es gibt irrationale Zahlen x, y , sodass x^y rational ist.*

Beweis 1. Die Zahl $\sqrt{2}^{\sqrt{2}}$ ist rational oder nicht rational. Setze im ersten Fall $x := \sqrt{2}$, $y := \sqrt{2}$. Setze im zweiten Fall $x := \sqrt{2}^{\sqrt{2}}$, $y := \sqrt{2}$. \square

Beweis 2. Setze $x := \sqrt{2}$ und $y := \log_{\sqrt{2}} 3$. Dann ist die Potenz $x^y = 3$ sicher rational. Die Irrationalität von y lässt sich sogar einfacher als die von $\sqrt{2}$ beweisen: Gelte $y = p/q$ mit $p, q \in \mathbb{Z}$ und $q \neq 0$. Da $y > 0$, können wir sogar $p, q \in \mathbb{N}$ annehmen. Dann folgt $3 = (\sqrt{2})^{p/q}$, also $3^{2q} = 2^p$. Das ist ein Widerspruch zum Satz über die eindeutige Primfaktorzerlegung, denn auf der linken Seite kommt der Primfaktor 3 vor, auf der rechten aber nicht. \square

Der erste Beweis war *unkonstruktiv*: Einem interessierten Gegenüber kann man immer noch nicht ein Zahlenpaar mit den gewünschten Eigenschaften nennen. Der zweite Beweis dagegen war konstruktiv: Die Existenzbehauptung wurde durch explizite Konstruktion eines Beispiels nachgewiesen.

Es stellt sich heraus, dass von den vielen Schlussregeln klassischer Logik genau ein Axiom für die Zulässigkeit unkonstruktiver Argumente verantwortlich ist, nämlich das *Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten*:

Axiom 1.2 (vom ausgeschlossenen Dritten, LEM). Für jede Aussage φ gilt: $\varphi \vee \neg\varphi$.

Unter konstruktiver Mathematik im engeren Sinn, genauer *intuitionistischer Logik*, versteht man daher klassische Logik ohne LEM. Das *Prinzip der Doppelnegationselimination*, demnach man für jede Aussage φ voraussetzen darf, dass $\neg\neg\varphi \Rightarrow \varphi$ gilt, ist zu LEM äquivalent (Übungsaufgabe) und kann daher ebenfalls nicht verwendet werden.

In konstruktiver Mathematik behauptet man *nicht*, dass das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten falsch wäre: Intuitionistische Logik ist abwärtskompatibel zu klassischer Logik – jede konstruktiv nachweisbare Aussage gilt auch klassisch – und manche konkrete Instanzen des Prinzips lassen sich sogar konstruktiv nachweisen (siehe Proposition 2.1 für ein Beispiel). Stattdessen verwendet man das Prinzip einfach nur nicht. (Tatsächlich kann man leicht zeigen, dass es keine Gegenbeispiele des Prinzips geben kann: Für jede Aussage φ gilt $\neg(\neg\varphi \wedge \neg\neg\varphi)$.)

Bemerkung 1.3. Manche Dozenten erzählen Erstsemestern folgende vereinfachte Version der Wahrheit: Eine *Aussage* erkennt man daran, dass sie entweder wahr oder falsch ist. Diese Charakterisierung mag bei klassischer Logik noch irgendwie vertretbar sein, ist aber in einem konstruktiven Kontext offensichtlich unsinnig. Stattdessen erkennt man eine Aussage daran, dass sie rein von ihrer grammatikalischen Struktur her ein Aussagesatz ist (und natürlich dass alle vorkommenden Begriffe eine klare Bedeutung haben).

Bemerkung 1.4. In konstruktiver Mengenlehre muss man auf das Auswahlaxiom verzichten, denn in Gegenwart des restlichen Axiome impliziert dieses das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten.

1.1. Widerspruchsbeweise vs. Beweise von Negationen

Ein übliches Gerücht über konstruktive Mathematik besagt, dass der Begriff *Widerspruch* konstruktiv generell verboten ist. Dem ist nicht so. Man muss zwischen zwei für das klassische Auge sehr ähnlich aussehenden Beweisfiguren unterscheiden:

1. „Angenommen, es gilt $\neg\varphi$. Dann ..., Widerspruch; also gilt $\neg(\neg\varphi)$ und somit φ .“
2. „Angenommen, es gilt ψ . Dann ..., Widerspruch; also gilt $\neg\psi$.“

Argumente der ersten Form sind tatsächlich Widerspruchsbeweise und daher konstruktiv nicht pauschal zulässig – wenn man nicht anderweitig für die untersuchte Aussage φ begründen kann, dass aus ihrer Doppelnegation schon sie selbst folgt, beweist ein solches Argument nur die Gültigkeit von $\neg\neg\varphi$; das ist konstruktiv schwächer als φ .

Argumente der zweiten Form sind dagegen konstruktiv völlig einwandfrei: Sie sind Beweise negierter Aussagen und nicht Widerspruchsbeweise im eigentlichen Sinn. Die Zulässigkeit

erklärt sich direkt nach Definition: Die Negation wird (übrigens auch in klassischer Logik) als

$$\neg\psi := (\psi \Rightarrow \perp)$$

festgelegt. Dabei steht „ \perp “ für *Falschheit*, eine kanonische falsche Aussage. Wer mag, kann $1 = 0$ oder $\frac{1}{2}$ denken.

Hier ein konkretes Beispiel aus der Zahlentheorie, um den Unterschied zu demonstrieren:

Proposition 1.5. *Die Zahl $\sqrt{2}$ ist nicht rational.*

Beweis (nur klassisch zulässig). Angenommen, die Behauptung ist falsch, d. h. die Zahl $\sqrt{2}$ ist nicht nicht rational. Dann ist $\sqrt{2}$ also rational. Somit gibt es ganze Zahlen p und q mit $\sqrt{2} = p/q$. Daraus folgt die Beziehung $2q^2 = p^2$, die einen Widerspruch zum Satz über die Eindeutigkeit der Primfaktorzerlegung darstellt: Auf der linken Seite kommt der Primfaktor 2 ungerade oft, auf der rechten Seite aber gerade oft vor. \square

Beweis (auch konstruktiv zulässig). Angenommen, die Zahl $\sqrt{2}$ ist rational. Dann gibt es ganze Zahlen p, q mit $\sqrt{2} = p/q$. Daraus folgt die Beziehung $2q^2 = p^2$, die einen Widerspruch zum Satz über die Eindeutigkeit der Primfaktorzerlegung darstellt: Auf der linken Seite kommt der Primfaktor 2 ungerade oft, auf der rechten Seite aber gerade oft vor. \square

1.2. Informale Bedeutung logischer Aussagen

... über Belege (die Brouwer-Heyting-Kolmogorov-Interpretation)

Die Ablehnung des Prinzips vom ausgeschlossenen Dritten erscheint uns durch unsere klassische Ausbildung als völlig verrückt: *Offensichtlich* ist doch jede Aussage entweder wahr oder falsch! Die Verwunderung löst sich auf, wenn man akzeptiert, dass konstruktive Mathematiker zwar dieselbe *logische Sprache* verwenden ($\wedge, \vee, \Rightarrow, \neg, \forall, \exists$), aber eine andere Bedeutung im Sinn haben: Wenn eine konstruktive Mathematikerin eine Aussage φ behauptet, meint sie, dass sie einen *expliziten Beleg* für φ hat.

Den Basisfall bilden dabei die sog. *atomaren Aussagen*, von denen wir intuitiv wissen, wie ein Beleg ihrer Gültigkeit aussehen sollte. Atomare Aussagen sind solche, die nicht vermöge der logischen Operatoren $\wedge, \vee, \Rightarrow$ und der Quantoren \forall, \exists aus weiteren Teilformeln zusammengesetzt sind. In der Zahlentheorie sind atomare Aussagen etwa von der Form

$$n = m,$$

wobei n und m Terme für natürliche Zahlen sind; in der Mengenlehre sind atomare Aussagen von der Form

$$x \in M.$$

Für *zusammengesetzte Aussagen* zeigt Tafel 1, was unter Belegen jeweils zu verstehen ist. (An manchen Stellen steht dort „ $x : X$ “ – das hat einen Grund, aber momentan soll das

	klassische Logik	intuitionistische Logik
Aussage φ	Die Aussage φ gilt.	Wir haben Beleg für φ .
\perp	Es stimmt Falschheit.	Wir haben Beleg für Falschheit.
$\varphi \wedge \psi$	φ und ψ stimmen.	Wir haben Beleg für φ und für ψ .
$\varphi \vee \psi$	φ oder ψ stimmt.	Wir haben Beleg für φ oder für ψ .
$\varphi \Rightarrow \psi$	Sollte φ stimmen, dann auch ψ .	Aus Belegen für φ können wir (gleichmäßig) Belege für ψ konstruieren.
$\neg\varphi$	φ stimmt nicht.	Es kann keinen Beleg für φ geben.
$\forall x : X : \varphi(x)$	Für alle $x : X$ stimmt jeweils $\varphi(x)$.	Wir können (gleichmäßig) für alle $x : X$ Belege für $\varphi(x)$ konstruieren.
$\exists x : X : \varphi(x)$	Es gibt mindestens ein $x : X$, für das $\varphi(x)$ stimmt.	Wir haben ein $x : X$ zusammen mit Beleg für $\varphi(x)$.

Tafel 1: Informale rekursive Definition des Belegbegriffs.

einfach etwas seltsame Notation für „ $x \in X$ “ sein.) Etwa ist ein Beleg für eine Aussage der Form

$$\forall n : \mathbb{N} : \varphi(n) \Rightarrow \psi(n)$$

eine Vorschrift, wie man für jede natürliche Zahl $n : \mathbb{N}$ aus Belegen für $\varphi(n)$ Belege für $\psi(n)$ erhalten kann. Dies soll tatsächlich nur *eine* Vorschrift sein (welche mit allen natürlichen Zahlen zurechtkommt), nicht für jede natürliche Zahl jeweils eine. Das ist mit *gleichmäßig* in der Tabelle gemeint.

Beispiel 1.6. Unter dieser Interpretation meint das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten, dass wir für jede Aussage Beleg für sie oder ihre Negation haben. Das ist aber offensichtlich nicht der Fall.

Beispiel 1.7. Die Interpretation von $\neg\neg\varphi$ ist, dass es keinen Beleg für $\neg\varphi$ gibt. Daraus folgt natürlich noch nicht, dass wir tatsächlich Beleg für φ haben; gewissermaßen ist eine solche Aussage φ nur „potenziell wahr“.

Beispiel 1.8. Wenn wir wissen, dass sich unser Haustürschlüssel irgendwo in der Wohnung befinden muss (da wir ihn letzte Nacht verwendet haben, um die Tür aufzusperren), wir ihn momentan aber nicht finden, so können wir konstruktiv nur die doppelt negierte Aussage

$$\neg\neg(\exists x : \text{der Schlüssel befindet sich an Position } x)$$

vertreten.

Beispiel 1.9. Wir stehen im Supermarkt und erinnern uns, dass wir unbedingt gewisse Zutaten einkaufen müssen. Leider fällt uns momentan keine einzige der Zutaten mehr ein. Dann können wir zwar die Aussage, dass die Menge der zu besorgenden Zutaten nicht leer ist, vertreten, nicht jedoch die stärkere Aussage, dass diese Menge ein Element enthält.

Beispiel 1.10 ([24]). Es war ein Video aufgetaucht, dass Kate Moss beim Konsumieren von Drogen zeigte, und zwar entweder solche von einem Typ A oder solche von einem Typ B. Welcher Typ aber tatsächlich vorlag, konnte nicht entschieden werden. Daher gab es für keine der beiden Straftaten einen Beleg, Kate Moss wurde daher nicht strafrechtlich verfolgt.

... über Berechenbarkeit

Es gibt noch eine zweite Interpretation, die beim Verständnis konstruktiver Mathematik sehr hilfreich ist:

Motto 1.11. *Eine Aussage gilt konstruktiv genau dann, wenn es ein Computerprogramm gibt, welches sie in endlicher Zeit bezeugt.*

Etwa ist mit dieser Interpretation klar, dass die formale Aussage

$$\forall n \in \mathbb{N}: \exists p \geq n: p \text{ ist eine Primzahl},$$

eine Formulierung der Unendlichkeit der Primzahlen, auch konstruktiv stimmt: Denn man kann leicht ein Computerprogramm angeben, das eine natürliche Zahl n als Eingabe erwartet und dann, etwa über die Sieb-Methode von Eratosthenes, eine Primzahl $p \geq n$ produziert (zusammen mit einem Nachweis, dass p tatsächlich prim ist).

Bemerkung 1.12. Das Motto kann man tatsächlich zu einem formalen Theorem präzisieren, das ist Gegenstand der gefeierten Curry–Howard-Korrespondenz.

2. Beispiele

2.1. Diskretheit der natürlichen Zahlen

Manche konkrete Instanzen des Prinzips vom ausgeschlossenen Dritten lassen sich konstruktiv nachweisen:

Proposition 2.1. *Für beliebige natürlichen Zahlen $x, y \in \mathbb{N}$ gilt: $x = y \vee \neg(x = y)$.*

Beweis. Das ist konstruktiv *nicht* klar, aber beweisbar durch eine Doppelinduktion. \square

Diese Eigenschaft wird auch als Diskretheit der Menge der natürlichen Zahlen bezeichnet: Allgemein heißt eine Menge X genau dann *diskret*, wenn für alle $x, y \in X$ die Aussage $x = y \vee \neg(x = y)$ gilt. Klassisch ist jede Menge diskret.

Die reellen Zahlen sind in diesem Sinne nicht diskret. Das macht man sich am einfachsten über die algorithmische Interpretation klar: Es kann kein Computerprogramm geben, dass *in endlicher Zeit* zwei reelle Zahlen auf Gleichheit testet. Denn in endlicher Zeit

kann ein Programm nur endlich viele Nachkommaziffern (besser: endlich viele rationale Approximationen) abfragen; haben die beiden zu vergleichenden Zahlen dieselben Nachkommaziffern, so kann sich das Programm aber in endlicher Zeit nie sicher sein, ob irgendwann doch noch eine Abweichung auftreten wird.

Übrigens ist die Menge der algebraischen Zahlen durchaus diskret: Man kann ein Programm angeben, dass zwei algebraische Zahlen x, y zusammen mit *Zeugen* ihrer Algebraizität, also Polynomgleichungen mit rationalen Koeffizienten und x bzw. y als Lösung, als Eingabe erwartet und dann entscheidet, ob x und y gleich sind oder nicht. Der Beweis ist nicht trivial, aber auch nicht fürchterlich kompliziert; siehe etwa Proposition 1.6 in [23].

2.2. Minima von Teilmengen der natürlichen Zahlen

In klassischer Logik gilt folgendes Minimumsprinzip:

Proposition 2.2 (in klassischer Logik). *Sei $U \subseteq \mathbb{N}$ eine bewohnte Teilmenge. Dann enthält U ein kleinstes Element.*

Dabei heißt eine Menge U *bewohnt*, falls $\exists u \in U$. In konstruktiver Mathematik kann man diese Aussage nicht zeigen – wegen der Abwärtskompatibilität kann man zwar auch nicht ihr Gegenteil nachweisen, aber man kann ein sog. *brouwersches Gegenbeispiel* anführen:

Proposition 2.3. *Besitze jede bewohnte Teilmenge der natürlichen Zahlen ein Minimum. Dann gilt das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten.*

Beweis. Sei φ eine beliebige Aussage. Wir müssen zeigen, dass φ oder $\neg\varphi$ gilt. Dazu definieren wir die Teilmenge

$$U := \{n \in \mathbb{N} \mid n = 1 \vee \varphi\}.$$

Die Zugehörigkeitsbedingung ist etwas komisch, da die Aussage φ ja nicht von der frischen Variable n abhängt, aber völlig okay. Da U sicherlich bewohnt ist (durch $1 \in U$), besitzt U nach Voraussetzung ein Minimum $z \in U$.

Wegen der diskutierten Diskretheit der natürlichen Zahlen gilt $z = 0$ oder $z \neq 0$. Im ersten Fall folgt φ (denn $0 \in U$ ist gleichbedeutend mit $0 = 1 \vee \varphi$, also mit φ), im zweiten Fall folgt $\neg\varphi$ (denn wenn φ gälte, wäre $U = \mathbb{N}$ und somit $z = 0$ im Widerspruch zu $z \neq 0$). \square

Wir können das Minimumsprinzip retten, wenn wir eine klassisch triviale Zusatzbedingung stellen:

Definition 2.4. Eine Teilmenge $U \subseteq X$ heißt genau dann *herauslösbar*, wenn für alle $x \in X$ gilt: $x \in U \vee \neg(x \in U)$.

Proposition 2.5. *Sei $U \subseteq \mathbb{N}$ eine bewohnte und herauslösbare Teilmenge. Dann enthält U ein kleinstes Element.*

Beweis. Da U bewohnt ist, liegt eine Zahl n in U . Da ferner U diskret ist, gilt für jede Zahl $0 \leq m \leq n$: $m \in U$ oder $m \notin U$. Daher können wir diese Zahlen der Reihe nach durchgehen; die erste Zahl mit $m \in U$ ist das gesuchte Minimum. \square

Weg mag, kann diesen Beweis auch präzisieren und einen formalen Induktionsbeweis führen. Gut erkennbar ist, wie im Beweis ein expliziter Algorithmus zur Findung des Minimums enthalten ist.

Bemerkung 2.6. Statt eine Zusatzbedingung einzuführen, kann man auch die Behauptung abschwächen. Man kann nämlich mittels Induktion zeigen, dass jede bewohnte Teilmenge der natürlichen Zahlen *nicht* ein Minimum besitzt. Der algorithmische Inhalt eines Beweises dieser abgeschwächten Aussage ist sehr interessant und wir werden noch lernen, wie man ihn deuten kann.

2.3. Potenzmengen

Klassisch ist die Potenzmenge der einelementigen Menge $\{\star\}$ völlig langweilig: Sie enthält genau zwei Elemente, nämlich die leere Teilmenge und $\{\star\}$ selbst. Konstruktiv lässt sich das nicht zeigen, die Potenzmenge hat (potenziell!) viel mehr Struktur. Das ist Gegenstand einer Übungsaufgabe.

2.4. Die De Morganschen Gesetze

In klassischer Logik verwendet man oft die De Morganschen Gesetze, manchmal sogar implizit, um verschachtelte Aussagen zu vereinfachen. In konstruktiver Mathematik lässt sich nur noch eines der beiden Gesetze in seiner vollen Form nachweisen. Den Beweis der folgenden Proposition führen wir mit Absicht recht ausführlich, damit man eine Imitationsgrundlage für die Bearbeitung des ersten Übungsblatts hat. Es wird das Wort „Widerspruch“ vorkommen, aber wir haben ja schon in Abschnitt 1.1 diskutiert, dass das nicht automatisch unkonstruktiv ist.

Proposition 2.7. *Für alle Aussagen φ und ψ gilt*

$$a) \quad \neg(\varphi \vee \psi) \iff \neg\varphi \wedge \neg\psi,$$

$$b) \quad \neg(\varphi \wedge \psi) \iff \neg\varphi \vee \neg\psi.$$

Beweis. a) „ \Rightarrow “: Wir müssen $\neg\varphi$ und $\neg\psi$ zeigen:

- Angenommen, es gilt doch φ . Dann gilt auch $\varphi \vee \psi$. Da nach Voraussetzung $\neg(\varphi \vee \psi)$, folgt ein Widerspruch.
- Analog zeigt man $\neg\psi$.

„ \Leftarrow “: Wir müssen zeigen, dass $\neg(\varphi \vee \psi)$. Dazu nehmen wir an, dass $\varphi \vee \psi$ doch gilt, und streben einen Widerspruch an. Dann gibt es zwei Fälle:

- Falls φ gilt: Aus der Voraussetzung $\neg\varphi \wedge \neg\psi$ folgt insbesondere $\neg\varphi$. Somit folgt ein Widerspruch.

- Falls ψ gilt, folgt ein Widerspruch auf analoge Art und Weise.
- b) Wir müssen zeigen, dass $\neg(\varphi \wedge \psi)$. Dazu nehmen wir an, dass doch $\varphi \wedge \psi$ (also dass φ und dass ψ), und streben einen Widerspruch an. Nach Voraussetzung können wir zwei Fälle unterscheiden:
 - Falls $\neg\varphi$: Dann folgt ein Widerspruch zu φ .
 - Falls $\neg\psi$: Dann folgt ein Widerspruch zu ψ . □

Die Hinrichtung in Regel b) lässt sich konstruktiv nicht nachweisen. Im Belegdenken ist das plausibel: Wenn wir lediglich wissen, dass es keinen Beleg für $\varphi \wedge \psi$ gibt, wissen wir noch nicht, ob es keinen Beleg für φ oder keinen Beleg für ψ gibt. Tatsächlich ist die Hinrichtung in Regel b) äquivalent zu einer schwächeren Version des Prinzips vom ausgeschlossenen Dritten:

Proposition 2.8. *Folgende Prinzipien sind zueinander äquivalent:*

1. *LEM für negierte Aussagen: Für alle Aussagen φ gilt $\neg\varphi \vee \neg\neg\varphi$.*
2. *Für alle Aussagen φ und ψ gilt $\neg(\varphi \wedge \psi) \implies \neg\varphi \vee \neg\psi$.*

Es ist besser, diese Proposition selbstständig zu beweisen als den folgenden Beweis zu lesen. Denn wenn man nicht genau den Beweisvorgang mitverfolgt, verirrt man sich leicht in den vielen Negationen.

Beweis. „1. \implies 2.“: Seien φ und ψ beliebige Aussagen. Gelte $\neg(\varphi \wedge \psi)$. Nach Voraussetzung gilt $\neg\varphi$ oder $\neg\neg\varphi$. Im ersten Fall sind wir fertig. Im zweiten Fall folgt tatsächlich $\neg\psi$: Denn wenn ψ gälte, gälte auch $\neg\varphi$ (denn wenn φ , folgt ein Widerspruch zu $\neg(\varphi \wedge \psi)$), aber das wäre ein Widerspruch zu $\neg\neg\varphi$.

„2. \implies 1.“: Sei φ eine beliebige Aussage. Da $\neg(\varphi \wedge \neg\varphi)$ (wieso?), folgt nach Voraussetzung $\neg\varphi \vee \neg\neg\varphi$, das war zu zeigen. □

2.5. Weitere Beispiele

Wer auf den Geschmack gekommen ist, kann die Bücher [22] und [4] studieren. Das erste ist ein konstruktiver Zugang zu kommutativer Algebra, das zweite einer zu Analysis.

3. Nutzen konstruktiver Mathematik

Spaß. Konstruktive Mathematik macht Spaß!

Philosophie. Konstruktive Logik ist philosophisch einfacher zu rechtfertigen als klassische Logik.

Eleganzassistentz. Konstruktive Mathematik kann einen dabei unterstützen, Aussagen, Beweise und ganze Theoriegebäude eleganter zu formulieren. Etwa hat man klassisch oft *Angst vor Spezialfällen* wie etwa der leeren Menge, einem nulldimensionalen Vektorraum oder einer leeren Mannigfaltigkeit. Aussagen formuliert dann nur für nichtleere Mengen, nichttriviale Vektorräume und so weiter, obwohl diese Einschränkungen tatsächlich aber oftmals gar nicht notwendig sind. In konstruktiver Mathematik wird man nun insofern darauf aufmerksam gemacht, als dass der Nachweis, dass diese Einschränkungen in bestimmten Fällen erfüllt sind, nicht mehr trivial ist, sondern Nachdenken erfordert.

Ein konkretes Beispiel liefert folgende Proposition, die oft als Übungsaufgabe in einer Anfängervorlesung gestellt wird:

Proposition 3.1. *Sei $f : X \rightarrow Y$ eine Abbildung und $f^{-1}[_] : \mathcal{P}(Y) \rightarrow \mathcal{P}(X)$ die Urbildoperation (welche eine Teilmenge $U \in \mathcal{P}(Y)$ auf $\{x \in X \mid f(x) \in U\}$ schickt). Dann gilt: Genau dann ist f surjektiv, wenn $f^{-1}[_]$ injektiv ist.*

Beweis der Rückrichtung (umständlich, nur klassisch zulässig). Angenommen, die Abbildung f ist nicht surjektiv. Dann gibt es Element $y \in Y$, welches nicht im Bild von f liegt. Wenn wir die spezielle Teilmenge $\{y\} \in \mathcal{P}(Y)$ betrachten, sehen wir

$$f^{-1}[\{y\}] = \emptyset = f^{-1}[\emptyset].$$

Wegen der vorausgesetzten Injektivität folgt $\{y\} = \emptyset$; das ist ein Widerspruch. □

Beweis der Rückrichtung (elegant, auch konstruktiv zulässig). Bezeichne im f die Bildmenge von f . Dann gilt $f^{-1}[\text{im } f] = f^{-1}[X]$ und damit $\text{im } f = X$, also ist f surjektiv. □

Mentale Hygiene. Arbeit in konstruktiver Logik ist gut für die mentale Hygiene: Man lernt, genauer auf die Formulierung von Aussagen zu achten, nicht unnötigerweise Verneinungen einzuführen und aufzupassen, an welchen bestimmten Stellen klassische Axiome nötig sind. Bei passenden Formulierungen ist das nämlich viel seltener, als man auf den ersten Blick vielleicht vermutet.

Wertschätzung. Klassische Mathematik kann man besser wertschätzen, wenn man verstanden hat, wie anders sich konstruktive Mathematik anfühlt. Die Frage, *inwieweit genau* ein konstruktiver Beweis einer Aussage mehr Inhalt als ein klassischer Beweis hat, kann in Einzelfällen sehr diffizil und interessant sein. Wir werden zu diesem Thema noch einen mathematischen Zaubertrick kennenlernen.

Feinere Unterschiede. Konstruktiv kann man feinere Unterscheidungen treffen. Etwa kann man intuitionistisch den Bedeutungsunterschied zwischen

- *Ich weiß, wo der Haustürschlüssel liegt.* und
- *Ich weiß, dass der Schlüssel hier irgendwo sein muss, ich weiß aber nicht, wo.*

abbilden: Die erste Aussage übersetzt sich als

$$(\exists x: \text{der Schlüssel befindet sich an Position } x),$$

die zweite als deren doppelte Verneinung. Klassisch sind diese beiden Übersetzungen dagegen äquivalent, klassisch kann man den Unterschied also nicht formalisieren.

Motto 3.2. *Intuitionistische Logik ist schwächer, aber auch feiner als klassische Logik.*

Programmextraktion. Aus jedem konstruktiven Beweis einer Behauptung kann man maschinell, ohne manuelles Zutun, ein Computerprogramm extrahieren, welches die untersuchte Behauptung bezeugt (und bewiesenermaßen korrekt arbeitet). Etwa ist in jedem konstruktiven Beweis der Behauptung

Sei S eine endliche Menge von Primzahlen. Dann gibt es eine weitere Primzahl, welche nicht in S liegt.

ein Algorithmus versteckt, welcher zu endlich vielen gegebenen Primzahlen ganz konkret eine weitere Primzahl berechnet. Unterschiedliche Beweise können dabei in unterschiedlich effizienten Algorithmen resultieren.

Solch maschinelle Programmextraktion ist wichtig in der Informatik: Anstatt in einem ersten Schritt ein Programm per Hand zu entwickeln und dann in einem zweiten Schritt umständlich seine Korrektheit bezüglich einer vorgegebenen Spezifikation zu zeigen, kann man auch direkt einen konstruktiven Beweis der Erfüllbarkeit der Spezifikation führen und dann automatisch ein entsprechendes Programm extrahieren lassen. In der akademischen Praxis wird dieses Vorgehen tatsächlich angewendet.

Auch kann Programmextraktion didaktisch sinnvoll sein: Um etwa eine Existenzbehauptung zu verstehen, ist es bekanntermaßen oftmals hilfreich, sie in einem konkreten Beispielfall durchzudenken. Einen konstruktiven Beweis der Existenzbehauptung kann man für diesen Zweck stets Schritt für Schritt durchgehen und so am Ende das gesuchte Objekt erhalten. Mit einem Beweis, der nur klassisch zulässig ist, ist das dagegen im Allgemeinen nicht möglich.

Traummathematik. Nur in einem konstruktiven Kontext ist die Arbeit mit sog. *Traumaxiomen*, wie etwa

Jede Abbildung $\mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ ist stetig.

oder

Es gibt infinitesimale reelle Zahlen ε mit $\varepsilon^2 = 0$, aber $\varepsilon \neq 0$.

möglich: Denn in klassischer Logik sind diese Axiome offensichtlich schlichtweg falsch. Sie sind aber durchaus interessant: Sie können die Arbeit rechnerisch und konzeptionell vereinfachen (man muss nur einen Blick zu den Physikern werfen), und es gibt Metatheoreme, die garantieren, dass Folgerungen aus diesen Axiomen, welche nur mit konstruktiven Schlussregeln getroffen wurden und eine bestimmte logische Form aufweisen, auch im üblichen klassischen Sinn gelten.

Bemerkung 3.3. Hier ein kurzer Einschub, wieso das erstgenannte Traumaxiom in einem konstruktiven Kontext zumindest nicht offensichtlich widersprüchlich ist. Man könnte denken, dass die Signumfunktion

$$x \mapsto \begin{cases} -1, & \text{falls } x < 0, \\ 0, & \text{falls } x = 0, \\ 1, & \text{falls } x > 0 \end{cases}$$

ein triviales Gegenbeispiel ist. Konstruktiv kann man aber nicht zeigen, dass diese Funktion tatsächlich auf ganz \mathbb{R} definiert ist: Die Definitionsmenge ist nur

$$\{x \in \mathbb{R} \mid x < 0 \vee x = 0 \vee x > 0\}.$$

Andrej Bauer diskutiert dieses Beispiel in seinem Blog ausführlicher [3].

Alternative Mathematik-Universen. Wenn man ganz normal Mathematik betreibt, arbeitet man tatsächlich *intern im Topos der Mengen*: Alle üblicherweise untersuchten mathematischen Objekte sind aus Mengen aufgebaut. Es gibt aber auch andere interessante Topoi; diese kommen mit einer *internen Sprache*, welcher der üblichen formalen mathematischen Sprache sehr stark ähnelt, sodass man fast wie gewohnt in ihnen arbeiten kann – mit der einzigen Einschränkung, dass diese interne Sprache fast immer nicht klassisch ist. Das liefert einen rein sachlichen Grund, konstruktive Mathematik zu betreiben.

- Vielleicht hat man einen bestimmten topologischen Raum X besonders gern und möchte daher, dass alle untersuchten Objekte vom aktuellen Aufenthaltsort in dem Raum abhängen. Dann möchte man im *Topos der Garben auf X* arbeiten.
- Vielleicht ist man auch ein besonderer Freund einer bestimmten Gruppe G . Dann möchte man vielleicht, dass alle untersuchten Objekte eine G -Wirkung tragen und dass alle untersuchten Abbildungen G -äquivariant sind. Dann sollte man im *Topos der G -Mengen* arbeiten.
- Vielleicht interessiert man sich vor allem dafür, was Turingmaschinen berechnen können. Dann kann man im *effektiven Topos* arbeiten, der nur solche Morphismen enthält, die durch Turingmaschinen algorithmisch gegeben werden können.

Eine genauere Diskussion würde an dieser Stelle zu weit führen. Es seien nur noch zwei Beispiele dafür erwähnt, was mit der Topossichtweise möglich ist:

- Aus dem recht einfach nachweisbaren Faktum konstruktiver linearer Algebra, dass jeder endlich erzeugte Vektorraum *nicht nicht* eine endliche Basis besitzt, folgt *ohne weitere Arbeit* sofort folgende offensichtlich kompliziertere Aussage, wenn man nur das Faktum intern im Garbentopos eines reduzierten Schemas X interpretiert: Jeder \mathcal{O}_X -Modul, der lokal von endlichem Typ ist, ist auf einer dichten Teilmenge sogar lokal frei.
- Zu quantenmechanischen Systemen kann man eine C^* -Algebra assoziieren. Wichtiges Merkmal ist, dass diese in allen interessanten Fällen *nichtkommutativ* sein wird. Nun gibt es aber ein alternatives Universum, den sog. *Bohr-Topos*, aus dessen Sicht diese

Algebra kommutativ ist; auf diese Weise vereinfacht sich manches. (Was genau, werden wir noch gemeinsam herausfinden.)
 Siehe [19] für eine informale Einführung in Topostheorie und [21] für ein Lehrbuch, das auch die interne Sprache ausführlich diskutiert. Als Referenzen sind [16] für Topostheorie und [18] speziell für kategorielle Logik geeignet.

4. Die Schlussregeln intuitionistischer Logik

In den folgenden Abschnitten wollen wir *Meta-Mathematik* betreiben: In Abgrenzung von der sonst betriebenen Mathematik wollen wir nicht die üblichen mathematischen Objekte wie Mengen, Vektorräume, Mannigfaltigkeiten untersuchen, sondern *Beweise*. Dazu müssen wir präzise festlegen, was unter einem (intuitionistischen oder klassischen) Beweis zu verstehen ist.

4.1. Formale logische Sprache

Variablenkontexte

Definition 4.1. Ein *Kontext* ist eine endliche Folge von Variablendeklarationen der Form

$$x_1 : A_1, \dots, x_n : A_n.$$

Dabei sind die A_i *Typen* der untersuchten formalen Systems.

Wir werden Kontexte oft kürzer als $\vec{x} : \vec{A}$ notieren. Etwa ist die Aussage

$$n = m$$

eine Aussage im Kontext $n : \mathbb{N}, m : \mathbb{N}$. Dagegen ist die Aussage

$$\forall m : \mathbb{N}: n = m$$

lediglich eine Aussage im reduzierten Kontext $n : \mathbb{N}$: Die Variable m kommt nicht mehr *frei*, sondern nur noch *gebunden* vor. Wir vereinbaren, dass die kollisionsfreie Umbenennung gebundener Variablen die Aussage nicht verändert. Die anders geschriebene Aussage

$$\forall u : \mathbb{N}: n = u$$

sehen wir also als dieselbe Aussage an. Wenn wir auch noch über die Variable n quantifizieren, erhalten wir eine Aussage im *leeren Kontext*:

$$\forall n : \mathbb{N}: \forall u : \mathbb{N}: n = u.$$

Substitution von Variablen

Ist φ eine Aussage im Kontext x_1, \dots, x_n . Sind dann Terme s_1, \dots, s_n (in einem neuen Kontext y_1, \dots, y_m) gegeben, so kann man die x_i *simultan durch die s_i ersetzen*. Als Ergebnis erhält man eine Formel im Kontext y_1, \dots, y_m , die man „ $\varphi[s_1/x_1, \dots, s_n/x_n]$ “ oder kürzer „ $\varphi[\vec{s}/\vec{x}]$ “ schreibt.

Bei der Substitution muss man Variablenkollisionen verhindern. Etwa gilt für die Aussage

$$\varphi \equiv (\forall n : \mathbb{N} : n = m)$$

im Kontext $m : \mathbb{N}$, dass

$$\varphi[n^2/m] \equiv (\forall \tilde{n} : \mathbb{N} : \tilde{n} = n^2).$$

4.2. Sequenzen

Definition 4.2. Eine *Sequenz* in einem Kontext $\vec{x} : \vec{A}$ ist ein Ausdruck der Form

$$\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi,$$

wobei φ und ψ Aussagen in diesem Kontext sind. Aussprache: *Aus der Voraussetzung φ ist die Aussage ψ ableitbar.*

Welche Aussagen aus welchen Voraussetzungen ableitbar sind, entscheiden die *Ableitungsregeln* des untersuchten formalen Systems. Auf diese kommen wir gleich, wollen aber vorher einen rein formalen Aspekt genauer beleuchten.

Sequenzen vs. Implikationen

Wenn man das erste Mal mit der Definition einer Sequenz konfrontiert wird, fragt man sich vielleicht, was der Unterschied zwischen

$$\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi \quad \text{und} \quad \top \vdash_{\vec{x}} (\varphi \Rightarrow \psi)$$

ist. Tatsächlich ist es bei Kenntnis der Ableitungsregeln für Implikation und Konjunktion eine leichte Übungsaufgabe, die Äquivalenz der beiden Urteile zu zeigen. Die Interpretation ist aber eine völlig andere:

- Die erste Sequenz besagt, dass unter der Globalvoraussetzung φ die Aussage ψ ableitbar ist. Eine typische Übungsaufgabe nach diesem Muster sieht wie folgt aus:

Sei n eine Primzahl ≥ 3 . Zeige, dass $n + 1$ keine Primzahl ist.

- Die zweite Sequenz besagt, dass unter keiner besonderen Voraussetzung (zur Verfügung stehen also nur die gegebenen Ableitungsregeln) die hypothetische Implikation $\varphi \Rightarrow \psi$ folgt. Eine Beispielformulierung für diese Art ist folgende:

Zeige, dass wenn n eine Primzahl ≥ 3 ist, die Zahl $n + 1$ keine Primzahl ist.

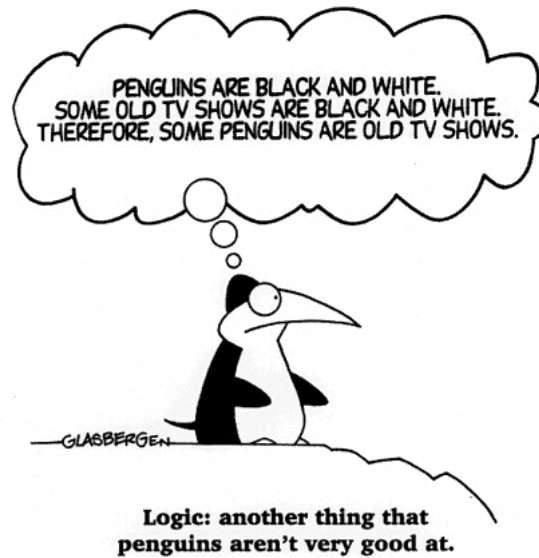


Abbildung 1: Ein Beispiel für einen (ungültigen) Syllogismus (Randy Glasbergen, verwendet ohne Erlaubnis).

Der Unterschied ist subtil, aber sprachlich durchaus vorhanden.

Bemerkung 4.3. Logiker untersuchen auch formale Systeme, die deutlich weniger sprachliche Mittel haben als klassische oder intuitionistische Logik – etwa solche, in denen Implikation als Junktor nicht vorkommt. Das antike System der *Syllogismen* (siehe Abbildung 1) ist ein Beispiel. Dann ist das Sequenzkonzept unverzichtbar.

4.3. Ableitungen

Definition 4.4. Seien φ und ψ Aussagen in einem Kontext $\vec{x} : \vec{A}$. Genau dann ist ψ aus der Voraussetzung φ *ableitbar*, in Symbolen $\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi$, wenn es eine entsprechende endliche *Ableitung* gibt, welche nur die in Tafel 2 aufgeführten Ableitungsregeln verwendet.

Aus dem Kontext muss hervorgehen, ob man eine Sequenz nur als solche diskutieren möchte oder ob man ihre Ableitbarkeit unterstellt. Außerdem muss man sich an die Notation der Ableitungsregeln gewöhnen, drei Beispiele seien im Folgenden genauer erklärt.

Die Schnittregel

Oberhalb des horizontalen Strichs in der sog. *Schnittregel*

$$\frac{\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi \quad \psi \vdash_{\vec{x}} \chi}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \chi}$$

Strukturelle Regeln

$$\frac{}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \varphi} \quad \frac{\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi}{\varphi[\vec{s}/\vec{x}] \vdash_{\vec{y}} \psi[\vec{s}/\vec{x}]} \quad \frac{\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi \quad \psi \vdash_{\vec{x}} \chi}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \chi}$$

Regeln für Konjunktion

$$\frac{}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \top} \quad \frac{}{\varphi \wedge \psi \vdash_{\vec{x}} \varphi} \quad \frac{}{\varphi \wedge \psi \vdash_{\vec{x}} \psi} \quad \frac{\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi \quad \varphi \vdash_{\vec{x}} \chi}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi \wedge \chi}$$

Regeln für Disjunktion

$$\frac{}{\perp \vdash_{\vec{x}} \varphi} \quad \frac{}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \varphi \vee \psi} \quad \frac{}{\psi \vdash_{\vec{x}} \varphi \vee \psi} \quad \frac{\varphi \vdash_{\vec{x}} \chi \quad \psi \vdash_{\vec{x}} \chi}{\varphi \vee \psi \vdash_{\vec{x}} \chi}$$

Doppelregel für Implikation

$$\frac{\varphi \wedge \psi \vdash_{\vec{x}} \chi}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi \Rightarrow \chi}$$

Doppelregeln für Quantifikation

$$\frac{\varphi \vdash_{\vec{x},y} \psi}{\exists y : Y. \varphi \vdash_{\vec{x}} \psi} \quad (y \text{ keine Variable von } \psi) \quad \frac{\varphi \vdash_{\vec{x},y} \psi}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \forall y : Y. \psi} \quad (y \text{ keine Variable von } \varphi)$$

Tafel 2: Die Schlussregeln intuitionistischer Logik.

Regeln für Gleichheit

$$\frac{}{\top \vdash_x x = x} \quad \frac{}{(\vec{x} = \vec{y}) \wedge \varphi \vdash_z \varphi[\vec{y}/\vec{x}]} \\ (\text{Dabei steht „}\vec{x} = \vec{y}\text{“ für } x_1 = y_1 \wedge \cdots \wedge x_n = y_n.)$$

Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten

$$\frac{}{\top \vdash_{\vec{x}} \varphi \vee \neg \varphi}$$

Tafel 3: Weitere Schlussregeln mancher formaler Systeme.

sind, nur durch horizontalen Freiraum getrennt, die Voraussetzungen der Regel aufgeführt. Unterhalb des Strichs steht dann das Urteil, das man aus diesen Voraussetzungen ziehen darf. Die Schnittregel besagt also: Ist in einem Kontext \vec{x} aus φ die Aussage ψ ableitbar, und ist ferner aus ψ die Aussage χ ableitbar, so ist auch aus φ direkt χ ableitbar. Die Schnittregel rechtfertigt also die Modularisierung mathematischer Argumente in Lemmata.

Eine der Disjunktionsregeln

Die Disjunktionsregel

$$\frac{\varphi \vdash_{\vec{x}} \chi \quad \psi \vdash_{\vec{x}} \chi}{\varphi \vee \psi \vdash_{\vec{x}} \chi}$$

besagt, dass, wenn aus φ die Aussage χ ableitbar ist, und wenn ferner auch aus ψ die Aussage χ ableitbar ist, dass dann auch aus $\varphi \vee \psi$ die Aussage χ ableitbar ist. Diese Regel rechtfertigt also, bei einer Disjunktion als Voraussetzung einen Beweis durch Unterscheidung der beiden möglichen Fälle zu führen.

Die Doppelregel für den Allquantor

Der Doppelstrich in der Regel

$$\frac{\varphi \vdash_{\vec{x}, y} \psi}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \forall y : Y. \psi}$$

für den Allquantor, die nur angewendet werden darf, wenn y keine freie Variable in φ ist, deutet an, dass die Regel sowohl wie üblich von oben nach unten, als auch von unten nach oben gelesen werden kann. Sie besagt, dass die beiden Urteile

- „Im Kontext $\vec{x} : \vec{A}, y : Y$ ist aus φ die Aussage ψ ableitbar.“
- „Im Kontext $\vec{x} : \vec{A}$ ist aus φ die Allaussage $\forall y : Y. \psi$ ableitbar.“

äquivalent sind. Sie rechtfertigt daher das bekannte Standardvorgehen, um Allaussagen nachzuweisen: Man nimmt sich ein „beliebiges, aber festes“ $y : Y$, von dem man außer der Zugehörigkeit zu Y keine weiteren Eigenschaften unterstellt, und weist die Behauptung dann für *dieses* y nach.

Aufgabe 4.5. Wieso sind die Variablenbeschränkungen in den Regeln für den Existenz- und Allquantor nötig?

Umfang der Ableitungsregeln

Motto 4.6. Alle Beweise gewöhnlicher Mathematik, die man gemeinhin als „vollständig und präzise ausformuliert“, lassen sich als Ableitungen im Sinne der Definition formalisieren (ggf. unter Hinzunahme klassischer logischer Axiome, Mengentheorieaxiome oder Typtheorieaxiome).

Aufgabe 4.7. Überzeuge dich von dieser Behauptung. *Tipp:* Formalisiere so viele Beweise deiner Wahl, bis du keine Lust mehr hast.

Wer nicht so viel Zeit hat, dem sei verraten, dass Tafel 2 kein Haufen ungeordneter Ableitungsregeln ist. Stattdessen sind die Axiome nach den sie betreffenden Junktoren bzw. Quantoren gruppiert: Sie legen für jedes sprachliche Konstrukt fest, wie man es *eingführt* (etwa: „aus $\varphi \wedge \psi$ folgt schlicht φ “) und *eliminiert* (etwa: „kann man sowohl φ als auch ψ ableiten, so auch $\varphi \wedge \psi$ “).

Bemerkung 4.8. Neben den strukturellen Regeln sticht einzig das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten aus diesem System von Einführungs- und Eliminationsprinzipien heraus. Das ist ein rein formal-ästhetisches Argument gegen klassische Logik.

Beispiel 4.9. Hier ein längeres Beispiel für eine Ableitung (ein Scan aus dem Elephant-Buch, Seite 832):

$$\begin{array}{c}
 \frac{((\phi \wedge \psi) \vdash_{\vec{x}, \vec{y}} \phi)}{((\exists \vec{y})(\phi \wedge \psi) \vdash_{\vec{x}} \phi)} \quad \frac{\frac{((\phi \wedge \psi) \vdash_{\vec{x}, \vec{y}} \psi) \quad ((\exists \vec{y})\psi \vdash_{\vec{x}} (\exists \vec{y})\psi)}{(\psi \vdash_{\vec{x}, \vec{y}} (\exists \vec{y})\psi)} \quad ((\phi \wedge \psi) \vdash_{\vec{x}, \vec{y}} (\exists \vec{y})\psi)}{((\exists \vec{y})(\phi \wedge \psi) \vdash_{\vec{x}} (\exists \vec{y})\psi)} \\
 \hline
 ((\exists \vec{y})(\phi \wedge \psi) \vdash_{\vec{x}} (\phi \wedge (\exists \vec{y})\psi))
 \end{array}$$

Diese Ableitung beweist (eine Richtung des) *Frobenius-Prinzips*.

Nicht verschwiegen werden sollte folgende Ergänzung des formalistischen Kredos:

Motto 4.10. Das *optimistische* Motto 4.6 stimmt nur in erster Näherung. Es gibt mathematische Gedanken, die nicht formalisierbar sind.

Das ausführen!

4.4. Peano-Arithmetik und Heyting-Arithmetik

Definition 4.11. Das formale System *Heyting-Arithmetik* ist gegeben durch

- intuitionistische Logik,
- die Gleichheitsregeln (siehe Tafel 3),
- einem einzigen Typ \mathbb{N} ,
- einer Termkonstante $0 : \mathbb{N}$,

- einem 1-adischen Termkonstruktor S (für successor): Ist $n : \mathbb{N}$ ein Term vom Typ \mathbb{N} , so ist $S(n) : \mathbb{N}$ ebenfalls ein Term vom Typ \mathbb{N} ,
- die Axiome

$$\frac{}{S(n) = 0 \vdash_n \perp} \qquad \frac{}{S(n) = S(m) \vdash_{n,m} n = m}$$

und das Induktionsprinzip

$$\frac{\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi[0/m] \quad \varphi \vdash_{\vec{x},m} \psi \Rightarrow \psi[S(m)/m]}{\varphi \vdash_{\vec{x}} \forall m : \mathbb{N} : \psi}$$

- sowie Regeln für alle primitiv-rekursiven Funktionen, insbesondere also die erwarteten Regeln für Addition und Multiplikation.

Definition 4.12. Das formale System *Peano-Arithmetik* ist genau wie Heyting-Arithmetik gegeben, nur mit klassischer statt intuitionistischer Logik.

Definition 4.13. Ein formales System heißt genau dann *inkonsistent*, wenn es in ihm eine Ableitung der Sequenz $\top \vdash \perp$ (im leeren Kontext) gibt. Andernfalls heißt es *konsistent*.

5. Beziehung zu klassischer Logik

Auf den ersten Blick scheint intuitionistische Logik schlichtweg weniger mächtig als klassische Logik zu sein: Viele Aussagen sind klassisch, aber nicht intuitionistisch ableitbar. Das ist aber nur die halbe Wahrheit: Es gibt nämlich die *Doppelnegationsübersetzung*, die Aussagen derart umformt, dass die Übersetzung genau dann konstruktiv gilt, wenn die ursprüngliche Aussage klassisch gilt. In diesem Sinn lässt sich also klassische Logik in intuitionistische einbetten – man hat also klassische Logik zur Verfügung, wenn man sie ausnahmsweise verwenden möchte.

Eine Übersetzung in die andere Richtung gibt es leider nicht, man muss größeren Aufwand treiben, um in einem klassischen Kontext die Sichtweise konstruktiver Mathematiker zu verstehen. Darauf gehen wir am Ende dieses Abschnitts ein.

5.1. Die Doppelnegationsübersetzung

Definition 5.1. Die *Doppelnegationsübersetzung* (nach Kolmogorov, Gentzen, Gödel und anderen) wird rekursiv wie folgt definiert:

$$\begin{aligned}
 \varphi^\circ &:= \neg\neg\varphi \text{ für atomare Aussagen } \varphi \\
 \top^\circ &:= \top \\
 \perp^\circ &:= \perp \\
 (\varphi \wedge \psi)^\circ &:= \neg\neg(\varphi^\circ \wedge \psi^\circ) \\
 (\varphi \vee \psi)^\circ &:= \neg\neg(\varphi^\circ \vee \psi^\circ) \\
 (\varphi \Rightarrow \psi)^\circ &:= \neg\neg(\varphi^\circ \Rightarrow \psi^\circ) \\
 (\forall x : X : \varphi)^\circ &:= \neg\neg\forall x : X : \varphi^\circ \\
 (\exists x : X : \varphi)^\circ &:= \neg\neg\exists x : X : \varphi^\circ
 \end{aligned}$$

Bemerkung 5.2. Da $\neg\varphi := (\varphi \Rightarrow \perp)$, gilt $(\neg\varphi)^\circ \equiv \neg(\varphi^\circ)$.

Aufgabe 5.3. Beweise durch Induktion über den Aussageaufbau, dass man auf die grau gesetzten Doppelnegationen verzichten kann. Gewissermaßen besteht also der einzige Unterschied zwischen klassischer und intuitionistischer Logik in der Interpretation der Disjunktion und der Existenzquantifikation: Diese sagen konstruktiv mehr aus als in klassischer Logik.

Satz 5.4. Seien φ, ψ beliebige Aussagen in einem Kontext \vec{x} .

- a) *Klassisch gilt:* $\varphi^\circ \iff \varphi$.
- b) *Intuitionistisch gilt:* $\neg\neg\varphi^\circ \implies \varphi^\circ$.
- c) *Wenn $\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi$ klassisch, dann $\varphi^\circ \vdash_{\vec{x}} \psi^\circ$ intuitionistisch; und umgekehrt.*

Beweis. a) Klar, für jede Aussage χ ist $\neg\neg\chi \Leftrightarrow \chi$ eine klassische Tautologie.

b) Induktion über den Aussageaufbau, ausgelassen.

c) Die Rückrichtung ist wegen der Abwärtskompatibilität intuitionistischer Logik und Teilaussage a) trivial.

Für die Hinrichtung müssen wir in einer Induktion über den Aufbau klassischer Ableitungen nachweisen, dass wir jeden logischen Schluss klassischer Logik in der Doppelnegationsübersetzung intuitionistisch nachvollziehen können. (Aus diesem Grund mussten wir im vorherigen Abschnitt formal definieren, was wir unter Ableitungen verstehen wollen.)

Etwa müssen wir zeigen, dass die übersetzte Schnittregel gültig ist:

$$\frac{\varphi^\circ \vdash_{\vec{x}} \psi^\circ \quad \psi^\circ \vdash_{\vec{x}} \chi^\circ}{\varphi^\circ \vdash_{\vec{x}} \chi^\circ}$$

Aber das ist klar, denn das ist wieder eine Instanz der intuitionistisch zulässigen Schnittregel. Ein interessanteres Beispiel ist die übersetzte Form von einer der Disjunktionsregeln:

$$\frac{}{\varphi^\circ \vdash_{\vec{x}} \neg\neg(\varphi^\circ \vee \psi^\circ)}$$

Die Gültigkeit dieser Regel folgt aus der Disjunktionsregel und der intuitionistischen Tautologie $\chi \Rightarrow \neg\neg\chi$. Als letztes und wichtigstes Beispiel wollen wir die Übersetzung des klassischen Axioms vom ausgeschlossenen Dritten diskutieren:

$$\frac{}{\top \vdash_{\vec{x}} \neg\neg(\varphi^\circ \vee \neg\varphi^\circ)}$$

Dass diese Regel intuitionistisch zulässig ist, haben wir in Übungsblatt 1 gesehen. Die Untersuchung aller weiteren Schlussregeln überlassen wir den Leser (Übungsblatt 2). \square

Korollar 5.5. *Zeigt Peano-Arithmetik einen Widerspruch, so auch Heyting-Arithmetik.*

Beweis. Man kann leicht nachprüfen, dass die Doppelnegationsübersetzungen der Peano-Axiome wiederum Instanzen der Peano-Axiome sind und daher auch in Heyting-Arithmetik gelten. Daher kann man eine Ableitung von \perp in Peano-Arithmetik in eine Ableitung von $\perp^\circ \equiv \perp$ in Heyting-Arithmetik überführen. \square

Folgendes Lemma werden wir erst später, im Abschnitt über Friedmans Trick, benötigen:

Lemma 5.6. *Sei φ eine Aussage, in der nur \top , \perp , \wedge , \vee und \exists (über bewohnte Typen), aber nicht \Rightarrow oder \forall vorkommen. Dann gilt intuitionistisch: $\varphi^\circ \iff \neg\neg\varphi$.*

Beweis. Induktion über den Aussageaufbau. \square

5.2. Interpretation der übersetzten Aussagen

Die konstruktive Bedeutung übersetzter Aussagen lässt sich wegen der Vielzahl vorkommender nichttrivialer doppelter Verneinungen nicht sofort überblicken. Es gibt aber eine aus der theoretischen Informatik stammende *Zeitsprungmetapher*, mit der man den Inhalt übersetzter Aussagen doch verstehen kann.

Dazu erinnern wir zunächst an die Dialogmetapher zur Interpretation logischer Aussagen: Wir stellen uns ein besonders kritisches Gegenüber vor, das unsere Behauptung bezweifelt. In einem Dialog versuchen wir dann, das Gegenüber zu überzeugen. Eine typische Stetigkeitsüberzeugung sieht etwa wie folgt aus:

Eve: Ich gebe dir $x = \dots$ und $\varepsilon = \dots$ vor.

Alice: Gut, dann setze ich $\delta = \dots$.

Eve: Dann ist hier ein $\tilde{x} = \dots$ zusammen mit einem Beleg von $|x - \tilde{x}| < \delta$.

Alice: Dann gilt tatsächlich $|f(x) - f(\tilde{x})| < \varepsilon$, wie von mir behauptet, denn ...

In Tafel 1 (Seite 5) ist festgelegt, nach welchen Spielregeln Alice und Eve bei solchen Dialogen miteinander kommunizieren müssen. Exemplarisch seien einige nochmal betont:

- Wenn Eve von Alice einen Beleg von $\varphi \vee \psi$ fordert, muss Alice einen Beleg von φ oder einen Beleg von ψ präsentieren. Sie darf sich nicht mit einem „angenommen, keines von beiden gälte“ herausreden.
- Wenn Eve von Alice einen Beleg von $\varphi \Rightarrow \psi$ fordert, muss Alice ihr versprechen, Belege von φ in Belege von ψ überführen zu können. Dieses Versprechen kann Eve herausfordern, indem sie einen Beleg von φ präsentiert; Alice muss dann in der Lage sein, mit einem Beleg von ψ zu antworten.
- Für die Negation als Spezialfall der Implikation gilt folgende Spielregel: Wenn Eve von Alice einen Beleg von $\neg\varphi \equiv (\varphi \Rightarrow \perp)$ verlangt, muss Alice in der Lage sein, aus einem präsentierten Beleg von φ einen Beleg von \perp zu produzieren. Wenn das betrachtete formale System konsistent ist, gibt es keinen solchen Beleg; Alice kann unter der Konsistenzannahme also nur dann $\neg\varphi$ vertreten, wenn es keinen Beleg von φ gibt.

Als Motto können wir festhalten:

Motto 5.7. *Eine Aussage φ intuitionistisch zu behaupten, bedeutet, in jedem Dialog φ belegen zu können.*

Dank der Doppelnegationsübersetzung können wir damit auch eine Dialoginterpretation klassischer Behauptungen angeben. Es stellt sich heraus, dass die folgende Metapher sehr tragfähig ist. Diese wollen wir dann erst an einem Beispiel veranschaulichen bevor wir sie begründen.

Motto 5.8. *Eine Aussage φ klassisch zu behaupten (also φ° intuitionistisch zu behaupten), bedeutet, in jedem Dialog φ belegen zu können, wobei man aber beliebig oft Zeitsprünge in die Vergangenheit durchführen darf.*

Beispiel: das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten

Wir wollen sehen, wie man das klassische Prinzip $\varphi \vee \neg\varphi$ mit Hilfe von Zeitsprüngen vertreten kann.

Eve: Zeige mir $\varphi \vee \neg\varphi$!

Alice: Gut! Es gilt $\neg\varphi$.

Wenn φ eine allgemeine Aussage ist, kann Alice nicht wissen, ob φ oder $\neg\varphi$ gilt. Sie hat daher an dieser Stelle geblufft. Da sie eine behauptet – nämlich $(\varphi \Rightarrow \perp)$ –, ist nun Eve wieder an der Reihe. Sie kann nur dann in ihrem Vorhaben, Alice zu widerlegen, fortfahren, wenn sie einen Beleg von φ präsentiert und dann Alice herausfordert, ihr Versprechen, daraufhin einen Beleg von \perp zu präsentieren, einzulösen.

Wenn es keinen Beleg von φ gibt, ist das Streitgespräch daher an dieser Stelle beendet, und Alice hat sogar die Wahrheit gesagt. Andernfalls geht es weiter:

Eve: Aber hier ist ein Beleg von φ : x . Belege mir nun \perp !

Wenn Alice nicht die Inkonsistenz des untersuchten formalen Systems nachweisen kann, hat sie nun ein Problem: Ihre Lüge von Beginn straft sich, sie kann das Gespräch nicht fortsetzen. Sie muss daher in einem Logikwölkchen verschwinden und in der Zeit zurückspringen:

Eve: Zeige mir $\varphi \vee \neg\varphi$!

Alice: Gut! Es gilt φ , hier ist ein Beleg: x .

Damit ist das Gespräch abgeschlossen.

Wer Zeitsprünge dieser Form betrügerisch findet, hat die Grundüberzeugung konstruktiver Mathematik bereits verinnerlicht: In diesem (und nur diesem) Sinn ist klassische Logik tatsächlich betrügerisch. Das macht klassische Logik aber nicht trivial: Auch mit Zeitsprüngen kann man nicht jede beliebige Aussage in einem Dialog vertreten. Wenn man etwa obiges Vorgehen mit der im Allgemeinen ungerechtfertigten Aussage $\varphi \vee \neg\psi$ versucht, wird man sehen, dass auch die Fähigkeit zu Zeitsprüngen nicht hilft.

Dasselbe Beispiel, konservativer interpretiert

Um zu sehen, dass die Zeitsprungmetapher berechtigt ist, wollen wir exemplarisch dasselbe Beispiel erneut untersuchen, diesmal aber ohne die Metapher. Wir wollen also einen Dialog zur Doppelnegationsübersetzung des Prinzips vom ausgeschlossenen Dritten, also zu $\neg\neg(\varphi^\circ \vee \neg\varphi^\circ)$, führen. Da wir für beliebige Aussagen φ sogar das Prinzip $\neg\neg(\varphi \vee \neg\varphi)$ nachweisen können, ausgeschrieben

$$((\varphi \vee \neg\varphi) \Rightarrow \perp) \Rightarrow \perp,$$

und dieses geringfügig übersichtlicher ist, wollen wir tatsächlich dieses in Dialogform belegen.

Eve: Zeige mir $\neg\neg(\varphi \vee \neg\varphi)$! Präsentiere mir also einen Beleg von \perp , wobei du auf mich zurückkommen kannst, wenn du einen Beleg von $\varphi \vee \neg\varphi$ hast; dann würde ich Beleg von \perp produzieren.

Alice: Gut! Dann komme ich sofort auf dich zurück, denn ich habe einen Beleg von $\neg\varphi$. (★)

Wie oben ist das Gespräch an dieser Stelle beendet, wenn Eve nicht einen Beleg von φ produzieren kann, mit dem sie Alice herausfordern könnte. Falls sie das doch schafft, geht es wie folgt weiter:

Eve: Ach wirklich? Hier ist ein Beleg von φ : x . Zeige mir nun einen Beleg von \perp !

Alice: Dann komme ich auf deine Verpflichtung mir gegenüber ein zweites Mal zurück – hier ist ein Beleg von $\varphi \vee \neg\varphi$: x .

Eve: Stimmt. Dann ist hier Beleg von \perp : y .

Alice: Danke. Dann ist hier ein Beleg von \perp : y . Damit habe ich meine Pflicht erfüllt.

Eve: Stimmt. Dann erfülle ich meinen Teil der Verpflichtung (Stelle (★)), hier ist Beleg von \perp : z .

Alice: Danke. Dann ist hier Beleg von \perp , wie gefordert: z .

Doppelnegationsübersetzung, Continuation-Passing-Style Transformation, LCM, Stein der Weisen, ...

5.3. Die umgekehrte Richtung: Modelle für intuitionistische Logik

Mit der Doppelnegationsübersetzung kann eine konstruktive Mathematikerin auf eine sehr einfache Art und Weise einen klassischen Kollegen verstehen: Wenn ein klassischer Mathematiker eine Aussage φ behauptet, muss man als konstruktiv nur φ° verstehen.

Für die umgekehrte Richtung gibt es keine Übersetzung: Es gibt keine Formeltransformation $\varphi \mapsto \varphi^\#$ mit den Eigenschaften

- a) $\varphi \iff \varphi^\#$ intuitionistisch und
- b) wenn $\varphi \vdash_{\mathcal{X}} \psi$ intuitionistisch, dann $\varphi^\# \vdash_{\mathcal{X}} \psi^\#$ klassisch.

Denn aus der ersten Eigenschaft würde wegen der Abwärtskompatibilität intuitionistischer Logik zu klassischer Logik ja klassisch die Äquivalenz $\varphi \iff \varphi^\#$ folgen; das ist mit Eigenschaft b) unverträglich.

Eine klassische Mathematikerin hat es also schwerer, konstruktiv arbeitende Kollegen zu verstehen. Sie muss dazu geeignete *Modelle* betrachten.

Topologische Modelle für propositionale intuitionistische Logik

Mit *propositionaler* Logik bezeichnet man das Fragmet, in dem keine Variablen und daher insbesondere keine Quantoren vorkommen. (Ihre klassische Variante kann man noch mit Wahrheitstafeln vollständig verstehen.)

Jeder topologischer Raum X liefert ein Modell $\mathcal{O}(X)$ für propositionale intuitionistische Logik: Wenn man zu jeder atomaren Aussage φ eine bestimmte offene Menge $\llbracket \varphi \rrbracket \subseteq X$ zuordnet, kann man die Interpretation der restlichen Formeln gemäß folgender Definition festlegen.

Definition 5.9 (topologische Interpretation zusammengesetzter Aussagen).

$$\begin{aligned}
 \llbracket \top \rrbracket &:= X \\
 \llbracket \perp \rrbracket &:= \emptyset \\
 \llbracket \varphi \wedge \psi \rrbracket &:= \llbracket \varphi \rrbracket \cap \llbracket \psi \rrbracket \\
 \llbracket \varphi \vee \psi \rrbracket &:= \llbracket \varphi \rrbracket \cup \llbracket \psi \rrbracket \\
 \llbracket \varphi \Rightarrow \psi \rrbracket &:= \llbracket \varphi \rrbracket^c \cup \llbracket \psi \rrbracket = \text{int}(\llbracket \varphi \rrbracket^c \cup \llbracket \psi \rrbracket)
 \end{aligned}$$

Dabei bezeichnet U^c das Komplement von U in X . Die Verwendung von $(\llbracket \varphi \rrbracket^c \cup \llbracket \psi \rrbracket)$ würde die Menge der offenen Mengen von X verlassen und ist daher schon aus diesem formalen Grund keine gute Idee; Abhilfe schafft das Nehmen des inneren Kerns.

Anschaulich kann man sich $\llbracket \varphi \rrbracket$ als den Ort, wo φ erfüllt ist, vorstellen. Wenn $\llbracket \varphi \rrbracket = \emptyset$ gilt, gilt φ also nirgendwo; wenn $\llbracket \varphi \rrbracket = X$ gilt, gilt φ überall; wenn X nicht gerade nur zwei offene Mengen besitzt, sind aber auch viele weitere Abstufungen möglich. In diesem Sinn ist $\mathcal{O}(X)$ ein Modell mit mehr als zwei Wahrheitswerten.

Beispiel 5.10. Sei X die Erdoberfläche. Dann kann man zwei atomare Aussagen A und B mit den Interpretationen

$$\begin{aligned}\llbracket A \rrbracket &:= \{x \in X \mid \text{an der Stelle } x \text{ regnet es}\} \\ \llbracket B \rrbracket &:= \{x \in X \mid \text{an der Stelle } x \text{ hat es mehr als 20 Grad}\}\end{aligned}$$

definieren. Die Aussage $A \wedge B$ hat dann die Interpretation $\llbracket A \wedge B \rrbracket = \llbracket A \rrbracket \cap \llbracket B \rrbracket$, beschreibt also den Ort derjenigen Stellen auf der Erde, an denen es bei mehr als 20 Grad regnet.

Die folgende Definition zeigt, dass diese Definition die Regeln intuitionistischen Schließens respektiert und daher sinnvoll ist:

Proposition 5.11. *Wenn $\varphi \vdash \psi$ intuitionistisch (im Fragment ohne Variablen), dann $\llbracket \varphi \rrbracket \subseteq \llbracket \psi \rrbracket$.*

Beweis. Wir müssen zeigen, dass die offenen Mengen von X den Schlussregeln propositionaler intuitionistischer Logik gehorchen. Etwa lautet die Interpretation der Schnittregel

$$\frac{\llbracket \varphi \rrbracket \subseteq \llbracket \psi \rrbracket \quad \llbracket \psi \rrbracket \subseteq \llbracket \chi \rrbracket}{\llbracket \varphi \rrbracket \subseteq \llbracket \chi \rrbracket}$$

und ist offensichtlich erfüllt: Wenn $\llbracket \varphi \rrbracket \subseteq \llbracket \psi \rrbracket$ und $\llbracket \psi \rrbracket \subseteq \llbracket \chi \rrbracket$, dann auch $\llbracket \varphi \rrbracket \subseteq \llbracket \chi \rrbracket$. Die Interpretation einer der Konjunktionsregeln lautet

$$\frac{}{\llbracket \varphi \wedge \psi \rrbracket \subseteq \llbracket \varphi \rrbracket}$$

und ist ebenfalls erfüllt: Denn $\llbracket \varphi \wedge \psi \rrbracket = \llbracket \varphi \rrbracket \cap \llbracket \psi \rrbracket \subseteq \llbracket \varphi \rrbracket$. Die restlichen Fälle überlassen wir dem Leser. \square

Eine andere Definition als die oben gegebene ist im Übrigen gar nicht möglich, wenn man möchte, dass diese Proposition gültig bleibt. Schnell kann man das wie folgt einsehen: Die Schlussregeln beschreiben *universelle Eigenschaften* für \top , \perp , \wedge , \vee und \Rightarrow und legen daher ihre Interpretationen schon eindeutig fest.

Bemerkung 5.12. Wenn man auch in seiner Meta-Logik konstruktiv arbeiten möchte, sollte man besser

$$\llbracket \varphi \Rightarrow \psi \rrbracket := \bigcup \{U \mid U \subseteq X \text{ offen, } U \cap \llbracket \varphi \rrbracket \subseteq \llbracket \psi \rrbracket\}$$

definieren. Da in klassischer Logik genau dann $U \subseteq V^c \cup W$, wenn $U \cap V \subseteq W$, ist diese Definition in klassischer Logik zu obiger äquivalent.

Topologische Interpretation des Prinzips vom ausgeschlossenen Dritten

Die topologische Interpretation von $\varphi \vee \neg\varphi$ ist die offene Menge

$$\llbracket \varphi \vee \neg\varphi \rrbracket = \llbracket \varphi \rrbracket \cup \text{int}(\llbracket \varphi \rrbracket^c),$$

also die Vereinigung von $\llbracket \varphi \rrbracket$ mit dem Inneren ihres Komplements. Es ist klar, dass diese Vereinigung in den meisten interessanten Fällen nicht gleich ganz X ist; das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten gilt also in den wenigsten topologischen Modellen.

Ausblick: Garbenmodelle für intuitionistische Prädikatenlogik

Ein Modell für intuitionistische Prädikatenlogik benötigt nicht nur Wahrheitswerte, sondern auch Objekte, aus denen die Variablenwerte gezogen werden können. [Hinführung auf Garbenmodelle](#)

6. Beziehung zur theoretischen Informatik: die Curry-Howard-Korrespondenz

Unter der Curry-Howard-Korrespondenz versteht man grob folgendes fundamentale Motto, das intuitionistische Logik und theoretische Information in Beziehung setzt:

Motto 6.1. *Eine Aussage φ ist genau dann intuitionistisch ableitbar, wenn es ein Computerprogramm vom Typ φ gibt.*

Hierbei wird φ einerseits als Aussage, andererseits als Typ interpretiert. Beispiele sollen diesen Doppelgebrauch deutlich machen.

6.1. Beispiele

Beispiel 1

Konstruktiv gilt offensichtlich $A \Rightarrow A$. Ein expliziter Beweis verläuft wie folgt: *Gelte A . Dann gilt A .* Wenn man dem Leser noch weiter helfen möchte, kann man den zweiten Schritt noch explizit begründen:

*Gelte A . (\star)
Wegen (\star) gilt dann auch A .*

Man kann sich auch trauen, den gegebenen Zeugen von A mit einem Kleinbuchstaben statt einem Symbol zu bezeichnen. Dann kann man schreiben:

Sei $p : A$. Dann gilt $p : A$.

Hieraus ist nun folgendes Computerprogramm ableitbar:

$$\begin{array}{l} A \longrightarrow A \\ p \longmapsto p \end{array}$$

Dieses Computerprogramm hat den *Typ* $(A \rightarrow A)$. Man beachte, dass dasselbe Symbol „ A “ hier je nach Kontext als *Aussage* oder als *Typ* (den man sich in erster Näherung als Menge der Zeugen der Aussage A vorstellen kann) verwendet wird.

Beispiel 2

Konstruktiv gilt $A \Rightarrow (B \Rightarrow A)$. Ein Beweis verläuft wie folgt:

Sei $p:A$, dann ist $(B \Rightarrow A)$ zu zeigen. Sei dazu $q:B$ gegeben, dann ist A zu zeigen. Das ist klar wegen $p:A$.

Daraus kann man folgendes Programm ableiten:

$$\begin{array}{l} A \longrightarrow B^A \\ p \longmapsto (q \mapsto p) \end{array}$$

Dabei bezeichnet „ B^A “ den Typ der Funktionen von A nach B .

Beispiel 3

Konstruktiv gilt $A \wedge B \Rightarrow A$, mit folgendem Beweis:

Sei $p:(A \wedge B)$. Dann steckt in p ein Zeuge von A .

Das zugehörige Computerprogramm lautet wie folgt:

$$\begin{array}{l} A \times B \longrightarrow A \\ (p, q) \longmapsto p \end{array}$$

Hierfür ist der zu $A \wedge B$ gehörige Typ $A \times B$.

6.2. Interpretation

Die Curry-Howard-Korrespondenz hat einen ganz praktischen Nutzen: Aus intuitionistischen Beweisen kann man Computerprogramme extrahieren und umgekehrt. Beide Richtungen sind interessant: Etwa kann man offensichtlich ein Computerprogramm schreiben, das zu einer Eingabe $n:\mathbb{N}$ eine Primzahl $p \geq n$ produziert. Daher ist auch die entsprechende Aussage ableitbar: $\forall n:\mathbb{N}: \exists p \geq n: p \text{ prim.}$

Die Umkehrung ist im Kontext formaler Methoden in der Informatik wichtig. **Ausführen!**

6.3. Genauere Formulierung

Eine genauere Formulierung ist folgende: Es gibt eine 1:1-Korrespondenz zwischen *Ableitungen* einer Aussage φ einerseits und *Termen* vom Typ φ andererseits. Für eine völlig präzise Formulierung muss man nur noch das gewählte Ableitungssystem und den gewählten Termkalkül sowie die Übersetzung von Aussagen zu Typen festlegen. Als Termkalkül kann man etwa den einfach getypten λ -Kalkül verwenden.

Als Korollar folgt aus der präziseren Formulierung das oben angegebene Motto: Genau dann gibt es eine Ableitung, wenn es einen entsprechenden Term gibt.

Der Beweis ist übrigens trivial, wenn man die Behauptung nur präzise genug formuliert hat. Denn die Ableitungsregeln entsprechen 1:1 den Termkonstruktionsregeln.

7. Hilberts Programm

7.1. Die mathematische Welt um 1900 [unvollständig und fehlerhaft]

Man erzählt sich folgende Geschichte. Im letzten Viertel des 19. Jahrhunderts kamen in der Mathematik neue, abstrakte Methoden auf. Dazu gehörte vor allem Cantors Mengenlehre, die mit ihrer Akzeptanz des *aktual Unendlichen* ein Tabu brach: Es war zwar jeder mit dem Konzept *potenzieller* Unendlichkeit vertraut, wie etwa der Vorstellung, dass die natürlichen Zahlen „nie aufhören“, dass man „immer weiter zählen kann“. Aber manche hatten Angst davor, unendlich viele Objekte zu einer vollendeten Menge zusammenzufassen.

Insbesondere wurde die Verwendung des Prinzips

$$\neg \forall x : X : \neg \varphi(x) \implies \exists x : X : \varphi(x)$$

kritisiert. Dies erscheint von unserem heutigen Standpunkt verwunderlich: Denn dieses Prinzip folgt ja sofort aus dem Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten, welches man stets als evident annahm. Man muss aber zwischen verschiedenen mächtigen Instanzen des Prinzips unterscheiden. Etwa ist für natürliche Zahlen n die Aussage

$$n = 0 \quad \vee \quad n \neq 0$$

völlig unkritisch, sie ist sogar konstruktiv beweisbar. Die analoge Aussage für reelle Zahlen x ist zwar nicht konstruktiv haltbar, aber im 19. Jahrhundert war noch nicht der Rahmen gegeben, um das einzusehen bzw. überhaupt die Frage nach formaler konstruktiver Ableitbarkeit zu stellen. Stattdessen wurde diese Aussage ebenfalls als einleuchtend empfunden und akzeptiert.

Widerspruchsbeweise wurden also durchaus akzeptiert. (Die manchmal behauptete Aussage, klassische Logik sei erst im 20. Jahrhundert aufgekommen, ist also nicht richtig.) Angst bestand nur vor Anwendungen des Prinzips vom ausgeschlossenen Dritten in

Kombination mit unendlich großen Mengen. So zerfielen die Mathematiker in zwei Lager: Solche, die neue abstrakte Methoden mit Begeisterung aufnahmen, und solche, die den neuen Entwicklungen kritisch gegenüber standen.

David Hilbert gehörte zu den Fans, nicht zuletzt deswegen, weil er selbst mit nichtkonstruktiven Methoden seinen *Basissatz* bewies, mit dem er international bekannt wurde: Dieser besagt, dass jedes Ideal des Polynomrings $k[X_1, \dots, X_n]$ endlich erzeugt ist. Vor Hilberts Beweis war das überhaupt nicht klar, und es gab eine große Industrie, um explizit Erzeuger in konkreten Fällen zu bestimmen. Da Hilbert kein Verfahren angeben konnte, um die Erzeuger zu berechnen, sondern lediglich zeigte, dass die Annahme, es gäbe kein endliches Erzeugendensystem, zu einem Widerspruch führte, vertrat etwa Paul Gordan, der *König der Invariantentheorie*, folgende Meinung über Hilberts Resultat:

Das ist nicht Mathematik, das ist Theologie.

Um seine Kritiker zufrieden zu stellen, wollte Hilbert daher zeigen, dass man die neuen abstrakten Methoden *eliminieren* konnte. Damit hat er nicht die Abschaffung derselbigen gemeint – im Gegenteil: Er wollte ihre Zulässigkeit rechtfertigen, indem er zeigen wollte, dass man aus jedem Beweis einer konkreten Aussage, der abstrakte Methoden verwendet, einen Beweis erhalten kann, der nur finitistisch zulässige Schlussweisen verwendet.

Hilberts Programm. Zeige, dass man aus jedem Beweis einer konkreten Aussage, welcher beliebige ideelle Prinzipien (etwa das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten für beliebige Aussagen, das Auswahlaxiom oder maximale Ideale in der Algebra) verwendet, einen finitistisch zulässigen Beweis erhalten kann.

Dabei ist eine *konkrete Aussage* eine solche, in deren Formulierung nur die natürlichen Zahlen, aber keine höheren Konzepte wie Mengen natürlicher Zahlen oder gar Mengen von Mengen vorkommen. Diese Beschränkung in Hilberts Programm ist sicherlich notwendig: Etwa kann man offensichtlich keine Aussage über Mengen ohne Verwendung von Mengen zu beweisen.

Beispiel 7.1. Die Aussage, dass die Menge der Primzahlen nicht endlich ist, ist nicht konkret. Äquivalent ist aber die Aussage, dass zu jeder vorgegebenen Schranke eine Primzahl existiert, die Größer als die Schranke ist; und diese ist konkret.

In voller Allgemeinheit gilt Hilberts Programm seit 19xx als *gescheitert*. Denn in diesem Jahr veröffentlichte Gödel sein Unvollständigkeitsresultat: Die Aussage *Peano-Arithmetik ist konsistent* lässt sich als „konkrete Aussage“ formulieren und leicht mit abstrakten Methoden beweisen (in üblicher Mengenlehre liefert die unendliche Menge \mathbb{N} ein Modell), kann aber keinen finitistisch zulässigen Beweis besitzen, da es nach Gödels Unvollständigkeitssatz nicht einmal einen Beweis in der stärkeren Peano-Arithmetik geben kann.

Teilweise kann Hilberts Programm jedoch schon realisiert werden, unter anderem in Analysis und Algebra: Mittels *proof mining* kann aus klassischen Beweisen mehr oder weniger systematisch noch konstruktiver Inhalt extrahiert werden. Je nach Situation kann *konstruktiver Inhalt* etwa

- explizite Schranken für Konstanten,
 - stetige (oder noch bessere) Abhängigkeit von Parametern,
 - explizite Zeugen von Existenzbehauptungen oder
 - Algorithmen
- umfassen.

Motto 7.2. *In einem Beweis einer Aussage steckt viel mehr Inhalt als die bloße Information, dass die Aussage wahr ist.*

Dieses Motto ist keine tiefe Einsicht: *Natürlich* steckt in einem Beweis einer Aussage viel mehr Inhalt als in einer bloßen Wahrheitsbekundung – nämlich ein *Grund*, wieso die Aussage stimmt. Interessant ist, dass man dieses Motto auch formal ernst nehmen kann.

Siehe [25] für eine ausführlichere Darstellung von Hilberts Programm und [17] für ein Lehrbuch zu proof mining. Einen kurzen Überblick geben auch die Vortragsfolien [1].

Später änderte Gordan übrigens seine Meinung:

Ich habe erkannt, dass auch Theologie nützlich sein kann.

7.2. Beispiel aus der Zahlentheorie: Friedmans Trick

Definition 7.3. Die *Friedmanübersetzung* wird für eine feste Aussage F wie folgt rekursiv definiert:

$$\begin{aligned}
\varphi^F &:= \varphi \vee F \text{ für atomare Aussagen } \varphi \\
\top^F &:= \top \\
\perp^F &:= F \\
(\varphi \wedge \psi)^F &:= (\varphi^F \wedge \psi^F) \\
(\varphi \vee \psi)^F &:= (\varphi^F \vee \psi^F) \\
(\varphi \Rightarrow \psi)^F &:= (\varphi^F \Rightarrow \psi^F) \\
(\forall x : X : \varphi)^F &:= (\forall x : X : \varphi^F) \\
(\exists x : X : \varphi)^F &:= (\exists x : X : \varphi^F)
\end{aligned}$$

Wenn in F Variablen vorkommen, muss man ggf. manche Variablen umbenennen, um Variablenkollisionen zu vermeiden.

Bemerkung 7.4. Da $\neg\varphi := (\varphi \Rightarrow \perp)$, gilt $(\neg\varphi)^F \equiv (\varphi^F \Rightarrow F)$.

Satz 7.5. a) Sei φ eine Aussage, in der Existenzquantoren nur über bewohnte Typen gehen. Dann gilt intuitionistisch: $F \Longrightarrow \varphi^F$.

b) Sei φ eine Aussage, in der nur \top , \perp , \wedge , \vee und \exists (über bewohnte Typen), aber nicht \Rightarrow oder \forall vorkommen. Dann gilt intuitionistisch: $\varphi^F \Longleftrightarrow \varphi \vee F$.

- c) Seien φ und ψ beliebige Aussagen in einem Kontext \vec{x} , in der Existenzquantoren nur über bewohnte Typen gehen. Wenn $\varphi \vdash_{\vec{x}} \psi$ intuitionistisch, dann gilt auch $\varphi^F \vdash_{\vec{x}} \psi^F$ intuitionistisch.

Beweis. a) Induktion über den Aussageaufbau. Exemplarisch zeigen wir den Fall

$$F \implies (\exists x : X : \varphi)^F.$$

Gelte also F . Da X bewohnt ist, gibt es ein $x : X$. Nach Induktionsvoraussetzung gilt $F \implies \varphi^F$. Somit folgt φ^F , das war zu zeigen.

b) Induktion über den Aussageaufbau.

- c) Induktion über den Aufbau intuitionistischer Ableitungen. Wie beim analogen Theorem über die Doppelnegationsübersetzung (Satz 5.4) muss man zeigen, dass die Friedmanübersetzungen der Schlussregeln gültig sind. Das ist sogar einfacher als bei der Doppelnegationsübersetzung. \square

Korollar 7.6. *Peano-Arithmetik ist für Aussagen der Form $\forall(\dots \implies \dots)$, wobei die Teilaussagen den Beschränkungen aus 7.5b) unterliegen müssen, konservativ über Heyting-Arithmetik: Aus jedem Beweis in Peano-Arithmetik lässt sich ein Beweis in Heyting-Arithmetik gewinnen.*

Beweis. Gelte $\top \vdash (\forall x : X : \varphi \implies \psi)$ in Peano-Arithmetik. Dann gilt auch

$$\varphi \vdash_x \psi$$

in Peano-Arithmetik; so schaffen wir den Allquantor und die Implikation weg. Nach dem Satz über die Doppelnegationsübersetzung (Satz 5.4) folgt die Ableitbarkeit der übersetzten Sequenz in Heyting-Arithmetik. Da φ und ψ den genannten Einschränkungen unterliegen, sind φ° und ψ° intuitionistisch äquivalent zu ihren Doppelnegationen (Lemma 5.6); also ist die Sequenz

$$\neg\neg\varphi \vdash_x \neg\neg\psi$$

in Heyting-Arithmetik ableitbar. Nun können wir die Friedmanübersetzung bezüglich einer erst noch unspezifizierten Aussage F anwenden. Da sich leicht die Friedmanübersetzungen der Peano-Axiome in Heyting-Arithmetik zeigen lassen, folgt die Ableitbarkeit von

$$((\varphi^F \implies F) \implies F) \vdash_x ((\psi^F \implies F) \implies F)$$

in Heyting-Arithmetik. Dass φ und ψ den genannten Einschränkungen unterliegen, können wir ein weiteres Mal ausnutzen: Heyting-Arithmetik kann die Sequenz

$$((\varphi \vee F \implies F) \implies F) \vdash_x ((\psi \vee F \implies F) \implies F)$$

zeigen. *Friedmans Trick* besteht nun darin, für F speziell φ zu wählen. Dann vereinfachen sich die Ausdrücke und wir erhalten die Ableitbarkeit von $\varphi \vdash_x \psi$, also von

$$\top \vdash (\forall x : X : \varphi \implies \psi)$$

in Heyting-Arithmetik. □

Bemerkenswert ist, dass dieses Konservativitätsresultat nur eine Forderung an die Form der untersuchten Aussage stellt, nicht aber an die Form des gegebenen klassischen Beweises. Dieser kann Hilfsaussagen beliebiger Form verwenden. Somit kann man das Resultat als eine (äußerst limierte) partielle Realisierung von Hilberts Programm ansehen: Denn es besagt, dass für Aussagen der beschriebenen Form das ideelle Prinzip des ausgeschlossenen Dritten eliminiert werden kann.

Beispiel 7.7. Die Aussage der Zahlentheorie, dass es unendlich viele Primzahlen gibt, lässt sich in der Form

$$\forall n : \mathbb{N} : \exists p : \mathbb{N} : p \geq n \wedge p \text{ ist prim}$$

schreiben. Zur Formalisierung der Primalitätsaussage benötigt man nur *beschränkte Allquantifikation*, für welche die Konservativitätsaussage ebenfalls gilt. Also kann man aus jedem klassischen Beweis der Unendlichkeit der Primzahlen einen konstruktiven extrahieren.

Beispiel 7.8. Das Konservativitätsresultat trifft insbesondere auf Π_2^0 -Aussagen zu – das sind solche der Form

$$\forall \dots \forall \exists \dots \exists (\dots),$$

wobei die abschließende Teilaussage keine Quantoren mehr enthält. Zu diesen gehört die Aussage, dass eine gegebene Turingmaschine bei jeder beliebigen Eingabe schlussendlich terminiert („ \forall Eingaben \exists Stoppzeitpunkt“).

Markovs Regel

In klassischer Logik gilt *Markovs Prinzip*: Für jede Aussage φ (in der unter anderem die Variable x vorkommt) gilt

$$\neg\neg\exists x : \varphi \implies \exists x : \varphi.$$

Dieses Prinzip folgt sofort aus dem Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten. Konstruktiv lässt sich dieses Prinzip nicht zeigen (etwa liefert fast jeder Garbentopos ein Gegenbeispiel). In Heyting-Arithmetik gilt aber zumindest Markovs *Regel*:

Korollar 7.9 (Markovs Regel). *Sei φ eine Aussage, die den Beschränkungen aus 7.5b) unterliegt. Wenn intuitionistisch*

$$\vdash_{\vec{x}} \neg\neg\exists y : \mathbb{N} : \varphi$$

ableitbar ist, so ist auch

$$\vdash_{\vec{x}} \exists y : \mathbb{N} : \varphi$$

intuitionistisch ableitbar.

7.3. Beispiel aus der Algebra: dynamische Methoden

In der kommutativen Algebra sind einige Techniken gebräuchlich, mit deren Hilfe man viele konkrete Aussagen beweisen kann, deren Zulässigkeit man aber nur in klassischer Logik und unter Verwendung starker Auswahlprinzipien beweisen kann. Drei Beispiele sind folgende:

- Um zu zeigen, dass ein Element x eines Rings R nilpotent ist (dass also eine gewisse Potenz x^n Null ist), genügt es zu zeigen, dass x in allen Primidealen von R liegt (siehe Proposition A.14).
- Um zu zeigen, dass ein Element x im Jacobson-Radikal liegt (dass also $1 - rx$ für alle $r \in R$ invertierbar ist), genügt es zu zeigen, dass x in allen maximalen Idealen von R liegt.
- Um zu zeigen, dass ein Element x eines Körpers K ganz über einem Unterring R ist, genügt es zu zeigen, dass x in allen Bewertungsringen liegt.
- Um zu zeigen, dass zwischen Polynomen $f_1, \dots, f_m \in K[X_1, \dots, X_n]$, wobei K ein algebraisch abgeschlossener Körper ist, eine Relation der Form $1 = p_1 f_1 + \dots + p_m f_m$ besteht, genügt es zu zeigen, dass die f_i keine gemeinsame Nullstelle besitzen.

Mit sog. *dynamischen Methoden* kann man aus Beweisen, die diese Prinzipien verwenden, noch konstruktiven Inhalt retten. Siehe [12, 11] für relevante Originalartikel und [10, 20] für Vortragsfolien zum Thema.

Standardbeispiel: Nilpotente Polynome

Die Nützlichkeit des Nilpotenzkriteriums wird oft an folgendem Standardbeispiel demonstriert. Alle benötigten Vorkenntnisse aus der Idealtheorie sind in Anhang A zusammengefasst.

Proposition 7.10 (auch konstruktiv). *Sei $f \in R[X]$ ein Polynom über einem Ring R . Dann gilt:*

$$f \text{ ist nilpotent} \iff \text{alle Koeffizienten von } f \text{ sind nilpotent.}$$

Beweis (nur klassisch). Die Rückrichtung ist einfach: Sei $f = \sum_{i=0}^n a_i X^i$ mit $a_i^m = 0$ für alle $i = 0, \dots, n$. Dann überzeugt man sich durch Ausmultiplizieren und dem Schubfachprinzip, dass die Potenz $f^{(m-1)(n+1)+1}$ Null ist.

Interessant ist die Hinrichtung. Gelte $f^m = 0$. Sei ein beliebiges Primideal $\mathfrak{p} \subseteq R$ gegeben. Dann liegen alle Koeffizienten von f^m in \mathfrak{p} . Nach einem allgemeinem Lemma (Lemma A.16) liegen dann schon alle Koeffizienten von einem der Faktoren, also von f , in \mathfrak{p} . Das zeigt schon die Behauptung. \square

Der Beweis gelingt also völlig mühelos: Man muss nur das Nilpotenzkriterium (Proposition A.14) und das auch anderweitig nützliche Lemma A.16 verwenden. Allerdings ist der Beweis in dieser Form *ineffektiv*: Man erhält keine Abschätzung der Nilpotenzindizes

der Koeffizienten, also der minimal möglichen Exponenten m_i mit $a_i^{m_i} = 0$. Auch ist die Abhängigkeit der m_i von den Daten nicht klar: Gibt es eine universelle Schranke, die für jeden Ring und jedes Polynom gültig wäre? Oder kann der Nilpotenzindex bei schlimmen Ringen oder Polynomen beliebig hoch werden?

Diese Fragen könnte man durch eine manuelle Untersuchung, etwa mit verschachtelten Induktionsbeweisen, klären. Es gibt aber auch ein systematisches Verfahren, das ganz ohne weitere Arbeit direkt aus obigem Beweis die gesuchten Schranken extrahiert. Der Schlüssel zu diesem Verfahren liegt in folgender Erkenntnis: Der Beweis verwendet gar nicht die speziellen Eigenschaften der Primideale des Rings R (welche das auch immer sein mögen). Stattdessen verwendet er nur die *allgemeinen Primidealaxiome*. Gewissermaßen zeigt er also nicht nur, dass die Koeffizienten in allen Primidealen enthalten sind, sondern dass sie in *dem generischen Primideal* enthalten sind.

Motto 7.11. *Die generische Verwendung ideeller Konzepte (Primideale, maximale Ideale, Bewertungen, ...) lässt sich eliminieren.*

Axiomatisierung des generischen Primideals

Sei R ein Ring.

Definition 7.12. Die Axiome für das *generische Primideal* sind folgende.

1. $\top \vdash Z(0)$.
2. $Z(x) \wedge Z(y) \vdash Z(x + y)$ für alle $x, y \in R$.
3. $Z(x) \vdash Z(rx)$ für alle $r, x \in R$.
4. $Z(1) \vdash \perp$.
5. $Z(xy) \vdash Z(x) \vee Z(y)$ für alle $x, y \in R$.

Satz 7.13. *Aus einem Beweis der Sequenz*

$$Z(a_1) \wedge \cdots \wedge Z(a_n) \vdash Z(b)$$

welcher als sprachliche Mittel nur \top , \perp , \wedge und \vee , nicht aber \Rightarrow oder die Quantoren, und als Schlussregeln neben den Axiomen aus Definition 7.12 nur die strukturellen Regeln und die Regeln für Konjunktion und Disjunktion verwendet (siehe Tafel 2), kann man einen expliziten Zeugen der Aussage

$$b \in \sqrt{(a_1, \dots, a_n)}$$

extrahieren (siehe Definitionen A.6 und A.17 für die Notation), also eine natürliche Zahl $m \geq 0$ und Ringelemente $u_1, \dots, u_n \in R$ mit

$$b^m = u_1 a_1 + \cdots + u_n a_n.$$

Der Satz ist eine beeindruckende Demonstration von Motto 7.2, demnach in Beweisen von Aussagen viel mehr Inhalt steckt als die bloße Information über die Wahrheit der Behauptung. Bevor wir den Beweis führen (welcher erstaunlich einfach ist), wollen wir das Resultat noch genauer diskutieren.

Korollar 7.14. *Aus einem Beweis der Sequenz*

$$\top \vdash Z(x)$$

folgt die Nilpotenz von x , und man kann sogar eine explizite Schranke für den Nilpotenzindex von x , d. h. eine Zahl $m \geq 0$ mit $x^m = 0$, extrahieren.

Beweis des Korollars. Mit den Axiomen kann man die Äquivalenz von \top mit $Z(0)$ zeigen. Nach dem Satz folgt daher, dass man einen expliziten Zeugen der Zugehörigkeit $x \in \sqrt{(0)}$ extrahieren kann. \square

Mit der Interpretation des Korollars und des Satzes muss man ein wenig vorsichtig sein. Die Aussage ist *nicht*, dass aus der Zugehörigkeit von x zu allen Primidealen die Nilpotenz von x folgt. Diese stärkere Aussage kann man (bewiesenermaßen) nur in einem klassischen Rahmen zeigen. Stattdessen kann man lediglich aus einem entsprechend formalisierten *Beweis*, dass x in allen Primidealen enthalten ist, die Nilpotenz von x folgern.

Bemerkung 7.15. Man kann sich die Frage stellen, ob das generische Primideal durch ein gewöhnliches Primideal realisiert werden kann, ob es also ein Primideal $\mathfrak{p} \subseteq R$ gibt, das genau die Eigenschaften hat, die auch das generische Primideal hat. Das ist nicht zu erwarten – jedes konkrete Primideal kann nicht die Vorstellung des generischen Primideals fassen – und in der Tat im Allgemeinen auch nicht der Fall. Denn wenn ein Primideal \mathfrak{p} für alle $x \in R$ die Äquivalenz

$$x \in \mathfrak{p} \iff \top \vdash Z(x)$$

erfüllt, gilt schon $\mathfrak{p} = \sqrt{(0)} = (\text{Ideal aller nilpotenten Elemente})$. Also ist jeder Nullteiler in R nilpotent. Das ist aber eine besondere Eigenschaft, die nur wenige Ringe haben. (Etwa ist in $\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}$ das Element $(1, 0)$ ein Nullteiler, aber nicht nilpotent. In der algebraischen Geometrie lernt man, dass ein Ring R genau dann diese besondere Eigenschaft hat, wenn sein Spektrum als topologischer Raum irreduzibel ist.)

Bemerkung 7.16. Die Beschränkungen in Satz 7.13 an die Form des gegebenen Beweises sind unnötig restriktiv, insbesondere können anders als dort beschrieben durchaus Quantoren verwendet werden. Das diskutieren wir im übernächsten Abschnitt.

Beweis des Satzes

Beweis von Satz 7.13. Wir geben ein explizites *Modell* des in der Formulierung des Satzes beschriebenen Axiomensystems an. Die Aussagen φ der Sprache wollen wir als

gewisse Radikalideale $\llbracket \varphi \rrbracket \subseteq R$ interpretieren, die Ableitungsrelation \vdash als umgekehrte Idealinklusion. Lemma A.20 ist für das Verständnis der folgenden Übersetzungstabelle hilfreich. Konkret definieren wir

$$\begin{aligned}\llbracket Z(x) \rrbracket &:= \sqrt{(x)} \\ \llbracket \top \rrbracket &:= \sqrt{(0)} \\ \llbracket \perp \rrbracket &:= (1) \\ \llbracket \varphi \wedge \psi \rrbracket &:= \sup\{\llbracket \varphi \rrbracket, \llbracket \psi \rrbracket\} = \sqrt{\llbracket \varphi \rrbracket + \llbracket \psi \rrbracket} \\ \llbracket \varphi \cap \psi \rrbracket &:= \inf\{\llbracket \varphi \rrbracket, \llbracket \psi \rrbracket\} = \llbracket \varphi \rrbracket \cap \llbracket \psi \rrbracket\end{aligned}$$

und

$$\varphi \models \psi \quad :\Longleftrightarrow \quad \llbracket \varphi \rrbracket \supseteq \llbracket \psi \rrbracket.$$

Dann kann man nachrechnen, dass diese semantisch definierte Relation \models die geforderten Axiome erfüllt. Etwa gilt

$$\begin{aligned}Z(x) \wedge Z(y) \models Z(x + y), \quad &\text{denn } \sqrt{\sqrt{(x)} + \sqrt{(y)}} \supseteq \sqrt{(x + y)}, \text{ und} \\ Z(xy) \models Z(x) \vee Z(y), \quad &\text{denn } \sqrt{(xy)} \supseteq \sqrt{(x)} \cap \sqrt{(y)},\end{aligned}$$

die restlichen Nachweise überlassen wir dem Leser. Jeden Beweis, der nur die angegebenen Schlussregeln verwendet, kann man also in der Menge der Radikalideale nachbauen. Nun ist es leicht, die Behauptung zu zeigen:

$$\begin{aligned}Z(a_1) \wedge \cdots \wedge Z(a_n) \vdash Z(b) &\implies \llbracket Z(a_1) \wedge \cdots \wedge Z(a_n) \rrbracket \models \llbracket Z(b) \rrbracket \\ &\Longleftrightarrow \sqrt{(b)} \subseteq \sqrt{(a_1, \dots, a_n)} \\ &\Longleftrightarrow b^m = u_1 a_1 + \cdots + u_n a_n \\ &\quad \text{für gewisse } m \geq 0, u_1, \dots, u_n \in R. \quad \square\end{aligned}$$

Nur zur Illustration wollen wir auch noch einen Alternativbeweis des Satzes führen, welcher die speziellen Möglichkeiten klassischer Logik nutzt, daher keinen expliziten Zeugen liefert und somit völlig witzlos ist:

Beweis von Satz 7.13 (nur klassisch). Da die einzelnen Axiome des generischen Primideals von jedem tatsächlichen Primideal \mathfrak{p} erfüllt werden, folgt aus dem gegebenen Beweis von $Z(a_1) \wedge \cdots \wedge Z(a_n) \vdash Z(b)$, dass für jedes Primideal \mathfrak{p} die Implikation

$$a_1, \dots, a_n \in \mathfrak{p} \implies b \in \mathfrak{p}$$

gilt. In klassischer Logik folgt daraus die Behauptung: Für $n = 0$ ist das gerade die Aussage der nur klassisch gültigen Proposition A.14; für $n > 0$ ist das ebenfalls eine Standardaussage aus kommutativer Algebra (welche man durch Rückführung auf den Spezialfall beweist). \square

Erweiterungen

Satz 7.13 hat gezeigt, dass man die klassische Vorgehensweise

Um zu zeigen, dass ein Element $x \in R$ nilpotent ist, zeige, dass es in allen Primidealen liegt.

konstruktiv rechtfertigen kann – obwohl konstruktiv nicht bewiesen werden kann, dass der Schnitt aller Primideale nur die Menge der nilpotenten Elemente ist. Klassisch gibt es aber auch noch folgendes stärkeres Prinzip:

Lemma 7.17 (in dieser Form nur klassisch). *Sei $x \in R$ ein Element eines Rings R . Wenn x in jedem algebraisch abgeschlossenen Oberkörper von R Null ist, wenn also für jeden Ringhomomorphismus $\varphi : R \rightarrow K$, wobei K ein algebraisch abgeschlossener Körper ist, das Element $\varphi(x) \in K$ Null ist, dann ist x nilpotent.*

In diesem Abschnitt wollen wir zeigen, dass auch dieses Prinzip in einem konstruktiven Kontext verwendbar ist – obwohl die Existenz algebraischer Abschlüsse, und schon die Existenz von Zerfällungskörpern, konstruktiv eine diffizile Angelegenheit ist. In diesem Abschnitt setzen wir etwas mehr Vorwissen aus kommutativer Algebra voraus.

Beweis des Lemmas (nur klassisch). Wir weisen nach, dass x in allen Primidealen von R liegt, klassisch genügt das ja. Sei also \mathfrak{p} ein beliebiges Primideal. Dann ist der Faktoring R/\mathfrak{p} ein Integritätsbereich und wir können seinen Quotientenkörper betrachten. Diesen wiederum können wir in einen algebraisch abgeschlossenen Oberkörper K einbetten (hier geht klassische Logik ein). Wir haben also Ringhomomorphismen

$$R \longrightarrow R/\mathfrak{p} \hookrightarrow \text{Quot}(R/\mathfrak{p}) \hookrightarrow K.$$

Nach Voraussetzung ist das Bild von x in K Null. Daher ist auch das Bild von x in $\text{Quot}(R/\mathfrak{p})$ Null, somit auch das Bild von x in R/\mathfrak{p} , und daher liegt x in \mathfrak{p} . \square

Die konstruktive Umsetzung dieses Prinzips im Rahmen der dynamischen Methoden ist folgende:

Satz 7.18. *Aus einem Beweis der Sequenz*

$$Z(a_1) \wedge \cdots \wedge Z(a_n) \vdash Z(b)$$

welcher als sprachliche Mittel nur \top , \perp , \wedge , \vee sowie die Quantoren, nicht aber \Rightarrow , und als Schlussregeln

1. die Axiome aus Definition 7.12 (jetzt in beliebigen Kontexten, nicht nur im leeren),
2. $\top \vdash_{\vec{x}} Z(x) \vee \exists y: Z(1 - xy)$,
3. $\top \vdash_{\vec{x}} \exists y: Z(y^n + a_{n-1}y^{n-1} + \cdots + a_1y + a_0)$, und
4. die strukturellen Regeln, die Regeln für Konjunktion, Disjunktion, Allquantifikation und Existenzquantifikation

verwendet, kann man einen expliziten Zeugen der Aussage

$$b \in \sqrt{(a_1, \dots, a_n)} \subseteq R$$

extrahieren.

Beweis. Wird nachgeliefert. Die Idee ist wieder, ein Modell anzugeben. Die Interpretation einer Aussage im Kontext x_1, \dots, x_n soll dabei ein Radikalideal in $R[x_1, \dots, x_n]$ sein. \square

8. Ein topostheoretischer Zugang zu Quantenmechanik

Als Anwendung konstruktiver Mathematik wollen wir einen topostheoretischen Zugang zu (manchen Grundlagen von) Quantenmechanik vorstellen. Dieser geht auf eine wegweisende Arbeit von Jeremy Butterfield, John Hamilton und Chris Isham zurück [7], welche dann von weiteren mathematischen Physikern, unter anderem Andreas Döring, Chris Heunen und Nicolaas Landsman, und den konstruktiven Mathematikern Thierry Coquand und Bas Spitters aufgegriffen wurde. Unsere Darstellung ist im Wesentlichen eine Zusammenfassung der Artikel [15] und [8]. Einen genaueren Abriss der Geschichte findet sich in [8] und den dort genannten Referenzen.

Die grundlegende Idee ist folgende: Klassisch-mechanische Systeme können durch kommutative C^* -Algebren und dazugehörige Phasenräume beschrieben werden. Die C^* -Algebra zu quantenmechanischen Systemen ist dagegen im Allgemeinen nichtkommutativ und die schöne Idee eines Phasenraums bricht zusammen. Man kann nun das mathematische Universum, in dem man arbeitet, wechseln; ein geeignetes Alternativuniversum enthält ein Abbild der nichtkommutativen C^* -Algebra, welches dort kommutativ erscheint und dort auch einen Phasenraum zulässt. In diesem (restriktiven) Sinn wird Quantenmechanik in diesem anderen Universum zu klassischer Mechanik.

Um diesen Ansatz zu verstehen, sind drei Zutaten nötig: die Dualität zwischen Räumen und Algebren; eine für diese Zwecke geeignete Formulierung von klassischer Mechanik und Quantenmechanik; und die Auffassung von Topoi als mathematische Alternativuniversen. Diese Zutaten wollen wir in den folgenden Abschnitten grob umreißen.

8.1. Gelfand-Dualität zwischen topologischen Räumen und C^* -Algebren

Grundlegend für das Wechselspiel zwischen Geometrie und Algebra ist folgende Erkenntnis: Zu einem geometrischen Objekt X kann man die Menge der (reellwertigen, komplexwertigen, allgemeineren) Funktionen auf X betrachten. Diese Menge trägt algebraische Struktur (ist etwa ein Ring) und kann daher mit Mitteln der Algebra untersucht werden. Dabei besteht die Hoffnung, dadurch etwas über X zu lernen; in guten Fällen legt die Algebra von Funktionen das geometrische Objekt X sogar schon eindeutig fest.

Dieses Motto hat in mehreren Teilgebieten der Mathematik konkrete Ausprägungen. Etwa ist in algebraischer Geometrie folgende Proposition fundamental:

Proposition 8.1. *Die Kategorie der affinen Schemata ist dual äquivalent zur Kategorie der Ringe:*

$$\begin{aligned} (\text{Kat. der affinen Schemata})^{\text{op}} &\simeq (\text{Kat. der Ringe}) \\ X &\mapsto \Gamma(X, \mathcal{O}_X) = \text{Ring der regulären Funktionen auf } X \\ \text{Spektrum von } A = \text{Spec } A &\leftarrow A \end{aligned}$$

Für unsere Zwecke ist die *Gelfand-Dualität* wichtig, die zwischen kompakten Hausdorffräumen einerseits und C^* -Algebren andererseits vermittelt.

Definition 8.2. Eine C^* -Algebra A ist ein Banachraum über \mathbb{C} (also ein vollständiger normierter Vektorraum über \mathbb{C}) zusammen mit einer Multiplikationsoperation $A \times A \rightarrow A$ und einer Involution $(_)^* : A \rightarrow A$, sodass gewisse natürliche Axiome erfüllt sind.

Prototypbeispiele für C^* -Algebren sind \mathbb{C} mit der komplexen Konjugation als Involution und $L(H, H) = \{f : H \rightarrow H \mid f \text{ linear und stetig}\}$ mit der Zuordnung $f \mapsto f^* =$ (adjungierter Operator zu f) als Involution.

Satz 8.3 (Gelfand-Dualität, so nur klassisch). *Die Kategorie der kompakten Hausdorffräume ist dual äquivalent zur Kategorie der kommutativen C^* -Algebren (mit Eins):*

$$\begin{aligned} (\text{Kat. der kompakten Hausdorffräume})^{\text{op}} &\simeq (\text{Kat. der kommutativen } C^*\text{-Algebren}) \\ X &\mapsto C(X, \mathbb{C}) = \{f : X \rightarrow \mathbb{C} \mid f \text{ stetig}\} \\ \text{Spec } A &\leftarrow A \end{aligned}$$

Dabei wird $C(X, \mathbb{C})$ vermöge der punkweisen Addition, Multiplikation und Konjugation sowie der Supremumsnorm zu einer C^ -Algebra. Die Punkte von $\text{Spec } A$ sind genau die C^* -Algebrenhomomorphismen $A \rightarrow \mathbb{C}$.*

Beweis. Führt hier zu weit. Wir wollen nur anmerken, dass der Homöomorphismus $X \rightarrow \text{Spec } C(X, \mathbb{C})$ durch $x \mapsto _ (x)$ mit $_ (x) = (f \mapsto f(x))$ gegeben ist. An einer Stelle im Beweis muss man geeignete Algebrenhomomorphismen $A \rightarrow \mathbb{C}$ konstruieren; dazu benötigt man das Auswahlaxiom. \square

Unter der Korrespondenz des Satzes entsprechen die selbstadjungierten Elemente $a \in A$ gerade den stetigen Abbildungen $X \rightarrow \mathbb{R}$.

Bemerkung 8.4. Die Gelfand-Dualität liefert einen Ansatz für *nichtkommutative Geometrie*: Wie man die Definition eines topologischen Raums abändern sollte, sodass sie nicht mehr „kommutativ“ wäre, ist völlig unklar, denn in der Definition kommen ja gar keine binären Verknüpfungen vor. Auf der algebraischen Seite ist es dagegen einfach. Daher kann man das formale Duale zur Kategorie der (nicht notwendigerweise kommutativen) C^* -Algebren als erste Approximation für eine Kategorie nichtkommutativer Räume verwenden.

8.2. Örtlichkeiten für punktfreie Topologie

In der obigen Formulierung gilt die Gelfand-Dualität leider nur in einem klassischen Kontext. Da wir sie später in einem alternativen Mathematik-Universum (dem Bohr-Topos zu einer nichtkommutativen C^* -Algebra) nutzen wollen, in dem das Auswahlaxiom unabhängig von unseren philosophischen Vorlieben schlichtweg *nicht gilt*, ist das unzureichend. Im Zeitraum von etwa 20 Jahren wurde glücklicherweise auch folgende konstruktiv zulässige Variante entwickelt:

Satz 8.5 (auch konstruktiv). *Die Kategorie der kompakten und vollständig regulären Örtlichkeiten (Locales) ist dual äquivalent zur Kategorie der kommutativen C^* -Algebren. Dabei geht analog zur klassischen Formulierung eine Örtlichkeit X auf die Algebra der stetigen Abbildungen $X \rightarrow \mathbb{C}$. (Auf die hierfür nötige konstruktiv geeignete Definition der komplexen Zahlen gehen wir nicht ein.)*

Dabei ist das Konzept einer *Örtlichkeit* (Locale) eine milde Verallgemeinerung des Konzepts eines topologischen Raums, bei dem *Punkte* nicht im Vordergrund stehen: Während ein topologischer Raum bekanntlich durch eine Menge von Punkten sowie der Deklaration gewisser Mengen von Punkten als offen gegeben ist, besteht eine Örtlichkeit nur aus der Angabe von gewissen *offenen Dingen*, welche nicht notwendigerweise Mengen von Punkten sein müssen. Von den offenen Teilmengen eines topologischen Raums schaut man sich die Axiome ab, die die offenen Dinge einer Örtlichkeit erfüllen sollen:

Definition 8.6. Eine *Örtlichkeit* X besteht aus einem Verband $\text{Ouv}(X)$ *offener Dinge* (also einer Halbordnung zusammen mit Operationen \wedge und \vee , die geeignete Axiome erfüllen), in dem zusätzliche beliebige Suprema existieren und für diese folgendes Distributivitätsgesetz gilt:

$$u \wedge \bigvee_i v_i = \bigvee_i (u \wedge v_i).$$

Beispiel 8.7. Jeder topologische Raum X liefert ein Beispiel für eine Örtlichkeit X mit $\text{Ouv}(X) = \{U \subseteq X \mid U \text{ offen}\}$ und $\wedge = \cap$, $\vee = \cup$, $\bigvee = \cup$.

Beispiel 8.8. Speziell ist der einpunktige Raum pt als Örtlichkeit durch $\text{Ouv}(\text{pt}) = \mathcal{P}(\{\star\})$ gegeben.

Das Konzept eines Punkts ist in der Theorie der Örtlichkeiten nicht grundlegend, kann aber sehr wohl definiert werden: Ein *Punkt* einer Örtlichkeit X ist eine Morphismus $\text{pt} \rightarrow X$ von Örtlichkeiten. Die Menge aller Punkte einer Örtlichkeit kann man mit einer natürlichen Topologie versehen; der so entstehende topologische Raum spiegelt aber nur dann die Örtlichkeit getreu wieder, wenn diese *räumlich* war. Insbesondere gibt es nichttriviale und interessante Örtlichkeiten, die keinen einzigen Punkt besitzen: Die Vorstellung eines Punkts ist gewissermaßen ein ideelles und schwerer fassbares Konzept als das eines offenen Teils eines Raums. Auch, wenn es einem Raum an Punkten mangelt, kann man manchmal dennoch von offenen Teilbereichen sprechen.

Beispiel 8.9. Folgende Örtlichkeiten sind nichttrivial und besitzen keine Punkte: die Örtlichkeit aller Surjektionen $\mathbb{N} \twoheadrightarrow \mathbb{R}$, die Örtlichkeit aller zufälligen 0/1-Folgen, der örtlichkeitstheoretische Schnitt beliebig vieler dichter Unterörtlichkeiten einer Örtlichkeit.

Umgekehrt spiegelt auch die Örtlichkeit zu einem topologischen Raum diesen nur dann getreu wieder, wenn dieser *nüchtern* war. Jeder Hausdorffraum ist nüchtern. Stattet man aber etwa eine aus mehr als nur einem Element bestehende Menge mit der indiskreten Topologie aus, erhält man einen topologischen Raum, der nicht nüchtern ist: Die Vielzahl seiner Punkte schlägt sich nicht in seiner Topologie nieder. Seine *Nüchternifizierung* (*Ausnüchterung*?) ist der einpunktige Raum.

Hier ist nicht der richtige Ort, um auf die vielen Vorteile (und die Nachteile) von Örtlichkeiten gegenüber topologischen Räumen einzugehen. Es sei nur erwähnt, dass durch den Wegfall von Punkten als grundlegendes Konzept diese auch seltener konstruiert werden müssen. Da man zur Angabe spezieller Punkte oft das Auswahlaxiom oder andere klassische Prinzipien benötigt, eignen sich Örtlichkeiten also besser, wenn man solche nicht verwenden möchte oder (wie bei der Arbeit in anderen Topoi) nicht verwenden kann.

Wir wollen mit einem Zitat von Alexander Grothendieck über Topoi [14], das aber genauso gut auf Örtlichkeiten anwendbar ist, schließen:¹

Ces “nuages probabilistes”, remplaçant les rassurantes particules matérielles d’antan, me rappellent étrangement les élusifs “voisinages ouverts” qui peuplent les topos, tels des fantômes évanescents, pour entourer des “points” imaginaires, [...].

8.3. Algebraische Sicht auf klassische Mechanik und Quantenmechanik

Klassische Mechanik

Zu einem klassisch-mechanischen System gehört ein Phasenraum Σ , dessen Punkte die reinen Zustände des Systems sind.

Beispiel 8.10. Der Phasenraum des freien Teilchens im \mathbb{R}^3 ist $\Sigma = \mathbb{R}^3 \times \mathbb{R}^3$, denn durch Position und Impuls ist die Systemkonfiguration eindeutig festgelegt. Die beiden Projektionen $\Sigma \rightarrow \mathbb{R}^3$ sind die Observablen *Position* und *Impuls*.

Auf der algebraischen Seite gehört zum Phasenraum Σ eine C^* -Algebra $A := C(\Sigma, \mathbb{C})$; es ergibt sich dann folgendes Wörterbuch zwischen Formulierungen auf der geometrischen und der algebraischen Seite:

1. „Diese ‚Wahrscheinlichkeitswolken‘, welche die beruhigenden materiellen Partikel von früher ersetzen, erinnern mich irgendwie an die flüchtigen ‚offenen Umgebungen‘ der Topoi – wie dahinschwindende Phantome, um die fiktiven ‚Punkte‘ zu umgeben, [...].“

- *Reine Zustände* sind Punkte $x \in \Sigma$ oder, da $\Sigma \cong \text{Spec } A$, äquivalent C^* -Algebrenhomomorphismen $A \rightarrow \mathbb{C}$.
- *Gemischte Zustände* sind Wahrscheinlichkeitsmaße μ auf Σ oder äquivalent lineare Abbildungen $\rho : A \rightarrow \mathbb{C}$, welche normiert (d. h. $\rho(1) = 1$) und positiv sind (d. h. $\rho(a^*a) \geq 0$ für alle $a \in A$).

Der Zusammenhang zwischen den beiden Sichtweisen wird durch

$$\rho(f) = \int_{\Sigma} f(x) d\mu(x)$$

für alle $f \in A$ gegeben: Ein Wahrscheinlichkeitsmaß μ definiert über diese Setzung eine normierte, positive und lineare Abbildung; dass umgekehrt jedes solche Funktional von dieser Form ist, garantiert der Darstellungssatz von Riesz-Markov-Kakutani.

Unter dieser Korrespondenz entspricht ein reiner Zustand $x \in \Sigma$ dem in x konzentrierten Dirac-Maß bzw. der Abbildung ρ mit $\rho(f) = f(x)$.

- *Observable* sind stetige Funktionen $\Sigma \rightarrow \mathbb{R}$ oder äquivalent selbstadjungierte Elemente $a \in A$.

Eine spezielle Observable ist die Eins von A , also die Funktion, die konstant den Wert $1 \in \mathbb{R}$ annimmt.

- Der Erwartungswert einer Observablen a in einem Zustand ρ ist $\rho(a)$. Ist ρ durch ein Wahrscheinlichkeitsmaß μ gegeben, lässt sich dieser Ausdruck auch als $\int_{\Sigma} a(x) d\mu(x)$ schreiben; diese Form ist vielleicht vertrauter.

Die Forderung, dass ρ normiert ist, ist dann anschaulich: Denn der Erwartungswert der konstanten Observable $1 \in A$ sollte auch tatsächlich 1 sein.

Ist $\rho = _ (x)$ ein reiner Zustand, so ist $\rho(a) = a(x)$ nicht nur der Erwartungswert, sondern der tatsächliche Wert von a .

Phasenräume sind doch eher symplektische Mannigfaltigkeiten oder Poisson-Mannigfaltigkeiten. Wieso ignoriert man die glatte Struktur? Wieso erlaubt man beliebige stetige Abbildungen?

Wie heißt die mathematische Theorie, die tatsächlich so wie oben beschrieben vorgeht?

Quantenmechanik

Quantenmechanische Systeme können nicht mehr durch einen Phasenraum im traditionellen Sinn beschrieben werden. Es bleibt aber die Möglichkeit, sie durch nichtkommutative C^* -Algebren zu beschreiben.

Beispiel 8.11. Wird ein System durch einen Hilbertraum H beschrieben, so ist $A := L(H, H) = \{f : H \rightarrow H \mid f \text{ linear und stetig}\}$ die zugehörige C^* -Algebra.

Grundlegende Konzepte können also nicht mehr geometrisch über einen Phasenraum verstanden werden, sondern müssen algebraisch formuliert werden. In Analogie zur klassischen Situation könnte man definieren:

- *Reine Zustände* sind C^* -Algebrenhomomorphismen $A \rightarrow \mathbb{C}$.

- *Gemischte Zustände* sind normierte, positive und lineare Abbildungen $A \rightarrow \mathbb{C}$.
- *Observablen* sind selbstadjungierte Elemente von A .
- Der Erwartungswert einer Observablen a in einem Zustand ρ ist $\rho(a)$.

Beispiel 8.12. Jeder reine Zustand ist auch ein gemischter Zustand, da C^* -Algebrenhomomorphismen $\rho : A \rightarrow \mathbb{C}$ automatisch normiert (da sie das Einselement auf die komplexe Zahl 1 schicken müssen) und positiv sind (da $\rho(a^*a) = \rho(a)^*\rho(a) = |\rho(a)|^2 \geq 0$).

Beispiel 8.13. – Ist $\psi \in H$ eine normierte Wellenfunktion, so ist ρ mit $\rho(a) = (\psi, a(\psi))$ ein gemischter Zustand, im Allgemeinen aber kein reiner.

- Ist $(\psi_i)_i$ eine Familie normierter Wellenfunktionen und $(p_i)_i$ eine Familie nichtnegativer Zahlen mit $\sum_i p_i = 1$, so ist ρ mit $\rho(a) = \sum_i p_i \cdot (\psi_i, a(\psi_i))$ ein gemischter Zustand.
- Ist $a : H \rightarrow H$ ein selbstadjungierter Operator, so ist $a \in A$ eine Observable.

Bei näherer Betrachtung stellt sich dieser Ansatz jedoch als zu naiv heraus. Das Problem steckt in der unscheinbaren Bedingung

$$\rho(a + b) = \rho(a) + \rho(b) \quad \text{für alle } a, b \in A$$

an gemischte Zustände ρ bzw. der analogen Forderung der Multiplikativität ab reine Zustände. Man kann nämlich argumentieren [15, Seite 27], dass zwei Observable a und b nur dann physikalisch sinnvoll addierbar sind, wenn sie gemeinsam messbar sind, also miteinander kommutieren. Die mathematischen Physiker, die nicht nur vorgeben, sich mit diesem Thema auszukennen, begründen das mit einer Referenz auf Bohrs *Doktrin klassischer Konzepte*, auf die wir weiter unten eingehen. Jedenfalls sollte man besser folgende Definition treffen:

Definition 8.14. a) Ein *reiner Quasi-Zustand* einer C^* -Algebra A ist eine Abbildung $A \rightarrow \mathbb{C}$, die auf jeder kommutativen Unter- C^* -Algebra $C \subseteq A$ ein C^* -Algebrenhomomorphismus ist.

- b) Ein *gemischter Quasi-Zustand* einer C^* -Algebra A ist eine Abbildung $A \rightarrow \mathbb{C}$, welche normiert, positiv und auf jeder kommutativen Unter- C^* -Algebra $C \subseteq A$ linear ist.

Bemerkung 8.15. In der Praxis ist der Unterschied zwischen Zuständen und den besser motivierten Quasi-Zuständen nicht so groß: Denn nach Gleasons Theorem ist jeder Quasi-Zustand auf $A = L(H, H)$ mit $\dim H \geq 3$ schon ein Zustand.

Bemerkung 8.16. Es gibt einen Grund, wieso wir kein Beispiel eines reinen Quasi-Zustands angeführt haben: Das Kochen-Specker-Theorem besagt, dass es zumindest im interessanten Fall $A = L(H, H)$ mit $\dim H \geq 3$ keinen solchen gibt. Das hat eine physikalische Interpretation: Ein reiner Quasi-Zustand würde allen Observablen konsistente Zahlenwerte als Messwerte zuweisen. So etwas ist nicht möglich.

8.4. Topoi als mathematische Alternativuniversen

Topostheorie hat viele Facetten. Hier betonen wir nur eine, nämlich die Auffassung von Topoi als mathematische Alternativuniversen. Unter anderem hat Topostheorie aber auch eine geometrische Komponente: Topoi kann man als verallgemeinerte Räume ansehen. Eine informale Einführung in Topostheorie von Tom Leinster [19] diskutiert auch diese anderen Standpunkte.

In diesem und im folgenden Abschnitt setzen wir etwas Grundkenntnisse in Kategorientheorie voraus. Alle benötigten Konzepte kann man etwa im Skript zum vorherigen Pizzaseminar [5] nachlesen. Gelegentlich werden wir auch über Garben sprechen; die wesentlichen Definitionen dazu sind in Anhang B zusammengestellt. Man kann solche Passagen aber auch überlesen.

Was ist ein Topos?

Definition 8.17. Ein *Topos* ist eine Kategorie, die endliche Limiten besitzt, kartesisch abgeschlossen ist und über einen Unterobjektklassifizierer verfügt.

Notwendig und hinreichend für die Existenz endlicher Limiten ist die Existenz eines terminalen Objekts (eines Objekts 1 , sodass für jedes Objekt X genau ein Morphismus $X \rightarrow 1$ existiert), von Produkten $X \times Y$ für je zwei Objekte X und Y und von Differenzkernen für je zwei parallele Morphismen $X \rightarrow Y$.

Kartesisch abgeschlossen bedeutet, dass es zu je zwei Objekten X und Y nicht nur wie in jeder Kategorie eine Menge (oder Klasse) $\text{Hom}(X, Y)$ von Morphismen zwischen X und Y gibt, sondern dass man sinnvoll von einem internen *Hom-Objekt* $\underline{\text{Hom}}(X, Y)$ der Kategorie sprechen kann. Das ist etwa in der Kategorie der Mengen und beinahe in der Kategorie der topologischen Räume der Fall (da man die Hom-Mengen mit einer Topologie versehen kann).

Ein *Unterobjektklassifizierer* ist ein spezielles Objekt Ω , sodass Unterobjekte eines Objekts X in 1:1-Korrespondenz zu Morphismen $X \rightarrow \Omega$ stehen. In der Kategorie der Mengen ist $\Omega = \mathcal{P}(\{\star\})$ ein solches (in klassischer Logik also $\Omega = \{0, 1\}$): Denn bekanntlich können Teilmengen U einer Menge X ja eindeutig durch ihre klassifizierende Abbildung $X \rightarrow \Omega$, $x \mapsto \{\star \mid x \in U\}$ (also $x \mapsto 1$, falls $x \in U$, und $x \mapsto 0$, falls $x \notin U$) beschrieben werden.

Obige Definition ist völlig korrekt, für unsere Zwecke aber aus zwei Gründen nicht gut geeignet: Zum einen ist sie nur dann anschaulich verständlich, wenn man schon einige Erfahrung mit Kategorientheorie hat. Zum anderen ist sie in einem gewissen Sinn sogar irreführend, denn ein Topos hat viel mehr Struktur, als die auf Minimalität getrimmte Definition vermuten ließe. Eine umfassendere Definition, die diese weiteren wesentlichen Strukturen nicht verschweigt, ist etwa folgende: Ein *Topos* ist eine lokal kartesisch abgeschlossene, endlich vollständige und kovollständige Heyting-Kategorie, welche exakt und extensiv ist und über einen Unterobjektklassifizierer verfügt.

Für unsere Zwecke genügen ein Motto und Beispiele für Topoi.

Motto 8.18. *Ein Topos ist eine Kategorie, die dadurch, dass sie ähnliche kategorielle Eigenschaften wie die Kategorie der Mengen hat, über eine interne Sprache verfügt.*

Beispiel 8.19. Archetypisches Beispiel für einen Topos ist die Kategorie Set der Mengen und Abbildungen.

Beispiel 8.20. Ist X ein topologischer Raum (oder eine Örtlichkeit), so ist die Kategorie der mengenwertigen Garben über X und der Garbenmorphisamen ein Topos. Das terminale Objekt ist die konstante Garbe $U \mapsto \{\star\}$, das initiale die Garbe $U \mapsto \{\star \mid U = \emptyset\}$ und der Unterobjektklassifizierer ist die Garbe $U \mapsto \{V \subseteq U \mid V \text{ offen}\}$.

Beispiel 8.21. Die Kategorien der Gruppen, Vektorräume und topologischer Räume sind keine Topoi.

Was ist die interne Sprache?

Die interne Sprache eines Topos \mathcal{E} erlaubt es, Objekte und Morphismen des Topos zu konstruieren, Eigenschaften über diese zu formulieren und gegebenenfalls solche Eigenschaften zu beweisen – und zwar in einer *naiven, element-basierten* Sprache, die der üblichen formalen mathematischen Sprache sehr stark ähnelt.

Etwa erscheint ein Objekt von \mathcal{E} , das also vielleicht eine komplizierte Garbe von Mengen ist, aus Sicht der internen Sprache wie eine gewöhnliche Menge². Folgerichtig erscheint ein Morphismus von \mathcal{E} , der tatsächlich vielleicht eine komplizierte unendliche Familie von Abbildungen ist, aus Sicht der internen Sprache wie eine gewöhnliche Abbildung zwischen Mengen.

Diese Auffassung ist sehr tragfähig: Etwa sieht das initiale Objekt aus Sicht der internen Sprache auch in der Tat wie die leere Menge, ein Monomorphismus wie eine injektive Abbildung und ein Epimorphismus wie eine surjektive Abbildung aus, siehe Tafel 4.

Wichtige Eigenschaft der internen Sprache ist, dass sie *korrekt* (engl. *sound*) bezüglich konstruktiver Logik ist. Jeder konstruktive Beweis lässt sich also auch in der internen Sprache beliebiger Topoi interpretieren. Im Folgenden Abschnitt illustrieren wir das anhand des anschaulichen Garbentopos zu einem topologischen Raum.

Die interne Sprache eines Garbentopos

Sei X ein topologischer Raum (oder eine Örtlichkeit). Dann definieren wir rekursiv

$$U \models \varphi \quad (\text{„}\varphi \text{ gilt auf } U\text{“})$$

für offene Teilmengen $U \subseteq X$ und Aussagen φ gemäß der Regeln in Tafel 5 (der *Kripke-Joyal-Semantik*).

2. Besser sollte man hier *Typ* schreiben. Auf den Unterschied wollen wir hier nicht eingehen.

externe Sicht	interne Sicht
Objekt von \mathcal{E}	gewöhnliche Menge
Morphismus von \mathcal{E}	gewöhnliche Abbildung zwischen Mengen
initiales Objekt von \mathcal{E}	leere Menge
terminales Objekt von \mathcal{E}	einelementige Menge
Unterobjektklassifizierer von \mathcal{E}	Menge $\mathcal{P}(\{\star\})$ der Wahrheitswerte
Monomorphismus in \mathcal{E}	injektive Abbildung
Epimorphismus in \mathcal{E}	surjektive Abbildung

Tafel 4: Externe und interne Sicht auf Objekte und Morphismen eines Topos \mathcal{E}

Beispiel 8.22. Seien $s, t \in \Gamma(X, \mathcal{F})$ globale Schnitte einer Garbe \mathcal{F} . Dann gilt $U \models s = t$ genau dann, wenn $s|_U = t|_U$, und $U \models \neg\neg(s = t)$ genau dann, wenn es eine dichte offene Teilmenge $V \subseteq U$ mit $s|_V = t|_V$ gibt.

Auf den ersten Blick erscheinen die Regeln der Kripke-Joyal-Semantik völlig willkürlich. Tatsächlich sind sie aber fein aufeinander abgestimmt, schon kleine Änderungen führen dazu, dass das gesamte System zusammenbricht. Nur so gilt folgende grundlegende Proposition:

Proposition 8.23. *Die interne Sprache von $\text{Sh}(X)$ hat folgende Eigenschaften:*

- a) Lokalität: *Sei $U = \bigcup_i U_i$ eine offene Überdeckung. Dann gilt genau dann $U \models \varphi$, wenn für alle i jeweils $U_i \models \varphi$ gilt.*
- b) Korrektheit: *Wenn $U \models \varphi$ und intuitionistisch $\varphi \vdash \psi$ ableitbar ist, dann gilt auch $U \models \psi$.*

Diese Proposition ist der Grund für die Nützlichkeit der internen Sprache: Wenn man eine garbentheoretische Implikation $A \Rightarrow B$ beweisen möchte, kann man vielleicht Voraussetzung und Behauptung als Interpretationen gewisser naiv-sprachlicher Aussagen \tilde{A} bzw. \tilde{B} mit der Kripke-Joyal-Semantik erkennen. Um dann die Implikation zu beweisen, genügt es, in naiver Sprache einen konstruktiven Beweis von $\tilde{A} \Rightarrow \tilde{B}$ zu führen.

Beispiel 8.24. In einer Grundvorlesung zeigt man, dass die Verkettung surjektiver Abbildungen wieder surjektiv ist. Da der Beweis konstruktiv ist, folgt durch Interpretation im Garbentopos daraus sofort, dass die Verkettung von Epimorphismen von Garben wieder ein Epimorphismus ist. Der Beweis der Aussage, dass jede surjektive Abbildung f einen Schnitt g (eine Abbildung in die umgekehrte Richtung mit $g \circ f = \text{id}$) zulässt, erfordert dagegen das Auswahlaxiom und lässt sich daher nicht in der internen Sprache interpretieren; tatsächlich haben auch Epimorphismen von Garben nur in den seltensten Fällen Rechtsinverse.

Beispiel 8.25. Nur um Neugierde zu wecken hier ein komplexeres Beispiel: Konstruktiv kann man nicht zeigen, dass jeder endlich erzeugte Vektorraum über einem Körper eine

$$U \models f = g : \mathcal{F} \quad :\Longleftrightarrow \quad f|_U = g|_U \in \Gamma(U, \mathcal{F})$$

$$U \models \varphi \wedge \psi \quad :\Longleftrightarrow \quad U \models \varphi \text{ und } U \models \psi$$

$$U \models \varphi \vee \psi \quad :\Longleftrightarrow \quad \text{\textcolor{red}{~~U \models \varphi oder U \models \psi~~}}$$

es gibt eine Überdeckung $U = \bigcup_i U_i$ sodass für alle i :

$$U_i \models \varphi \text{ or } U_i \models \psi$$

$$U \models \varphi \Rightarrow \psi \quad :\Longleftrightarrow \quad \text{für alle offenen } V \subseteq U: V \models \varphi \text{ impliziert } V \models \psi$$

$$U \models \forall f : \mathcal{F}. \varphi(f) \quad :\Longleftrightarrow \quad \text{für alle Schnitte } f \in \Gamma(V, \mathcal{F}), V \subseteq U: V \models \varphi(f)$$

$$U \models \exists f : \mathcal{F}. \varphi(f) \quad :\Longleftrightarrow \quad \text{\textcolor{red}{~~es gibt einen Schnitt } f \in \Gamma(U, \mathcal{F}) \text{ mit } U \models \varphi(f)~~}}$$

es gibt eine Überdeckung $U = \bigcup_i U_i$ sodass für alle i :

$$\text{es gibt } f_i \in \Gamma(U_i, \mathcal{F}) \text{ sodass } U_i \models \varphi(f_i)$$

Tafel 5: Die Kripke-Joyal-Semantik eines Garbentopos $\text{Sh}(X)$.

Basis besitzt. Das liegt nicht etwa daran, dass solche plötzlich unendlichdimensional werden, sondern schlichtweg daran, dass man konstruktiv keine Basis explizit angeben kann. Man kann aber die schwächere Behauptung zeigen, dass jeder endlich erzeugte Vektorraum *nicht nicht* eine Basis besitzt. Diese Aussage zieht durch Interpretation im Garbentopos $\text{Sh}(X)$ eines reduzierten Schemas X sofort folgendes Korollar nach sich: Jeder \mathcal{O}_X -Modul, der lokal von endlichem Typ ist, ist zwar nicht unbedingt lokal frei, aber zumindest auf einer dichten offenen Teilmenge lokal frei. (Die Reduziertheitsvoraussetzung geht insofern ein, als dass \mathcal{O}_X aus Sicht der internen Sprache genau dann ein geeignetes Körperaxiom erfüllt, wenn X reduziert ist.)

Aufgabe 8.26. Sei $\alpha : \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{G}$ ein Morphismus von Garben auf X . Zeige:

- Der Morphismus α ist genau dann ein Monomorphismus von Garben, wenn $X \models \forall x, y : \mathcal{F}. \alpha(x) = \alpha(y) \Rightarrow x = y$.
- Der Morphismus α ist genau dann ein Epimorphismus von Garben, wenn $X \models \forall y : \mathcal{G}. \exists x : \mathcal{F}. \alpha(x) = y$.

8.5. Der Bohr-Topos zu einer nichtkommutativen C^* -Algebra

Sei A die nichtkommutative C^* -Algebra eines quantenmechanischen Systems.

- Definition 8.27.**
- Ein *klassischer Kontext* von A ist eine kommutative Unter- C^* -Algebra $C \subseteq A$.
 - Die bezüglich der Inklusion geordnete Menge aller klassischen Kontexte von A sei $\mathcal{C}(A)$.

Die Idee hinter dieser Namensgebung ist folgende: Die Observablen (selbstadjungierten Elemente) einer kommutativen Unteralgebra $C \subseteq L(H, H)$ lassen sich *simultan* diagonalisieren und erlauben daher einen konsistenten Satz von Messwerten – ohne, dass Heisenbergs Unschärferelation in die Quere kommt.

Definition 8.28. Der *Bohr-Topos* zur C^* -Algebra A ist die Koprägarbenkategorie

$$\text{Bohr}(A) := [\mathcal{C}(A), \text{Set}]$$

aller Funktoren $\mathcal{C}(A) \rightarrow \text{Set}$ und natürlichen Transformationen zwischen ihnen.

Ein solcher Funktor $F : \mathcal{C}(A) \rightarrow \text{Set}$ ordnet auf konsistente Art und Weise jedem klassischen Kontext $C \subseteq A$ eine Menge $F(C)$ zu. Gewissermaßen setzt daher der Topos solcher Funktoren Bohrs Doktrin klassischer Konzepte um – in seinen eigenen Worten [6, Seite 209] (Hervorhebung im Original)³:

[...] *however far the phenomena transcend the scope of classical physical explanation, the account of all evidence must be expressed in classical terms.*

The argument is simply that by the word “experiment” we refer to a situation where we can tell others what we have done and what we have learned and that, therefore, the account of the experimental arrangements and of the results of the observations must be expressed in unambiguous language with suitable application of the terminology of classical physics.

Bemerkung 8.29. Wer die Definition von Garben als Funktoren $\text{Ouv}(X)^{\text{op}} \rightarrow \text{Set}$ kennt, findet die unterschiedliche Wahl der Varianz an dieser Stelle vielleicht überraschend. Tatsächlich aber ist diese zu erwarten: Offene Mengen werden umso interessanter, je kleiner sie werden, da sie dann genauere Information über die Lage ihrer enthaltenen Punkte vermitteln. Kommutative Unteralgebren werden dagegen umso interessanter, je größer sie werden, denn für Elemente wird es umso schwerer, miteinander zu kommutieren, je mehr sie werden. Man bedenke auch, dass beliebige Vereinigungen (aber nicht beliebige Schnitte) offener Mengen offen sind, und dass umgekehrt beliebige Schnitte (aber nicht beliebige Vereinigungen) kommutativer Unteralgebren kommutativ sind.

Die nichtkommutative C^* -Algebra A besitzt nun ein Abbild \underline{A} im Bohr-Topos. Diese *interne* C^* -Algebra ist *kommutativ*. In diesem (restriktiven) Sinn wird Quantenmechanik bei interner Betrachtung zu klassischer Mechanik.

Definition 8.30. Die tautologisch definierte Koprägarbe

$$\begin{array}{ccc} \underline{A} : \mathcal{C}(A) & \longrightarrow & \text{Set} \\ C & \longmapsto & C \end{array}$$

3. „Inwieweit auch die Phänomene die Grenzen klassischer physikalischer Erklärungen sprengen, die Darstellung aller Anhaltspunkte muss trotzdem in klassischer Sprache ausgedrückt werden. Das Argument ist einfach: Mit dem Wort ‚Experiment‘ drücken wir eine Situation aus, in der wir anderen erzählen können, was wir getan und gelernt haben. Deshalb müssen Versuchsanordnung und Beobachtungsergebnisse in unmissverständlicher Sprache ausgedrückt werden – unter passender Anwendung der Terminologie klassischer Physik.“

heißt *Bohrifizierung* von A .

Proposition 8.31. *Die Bohrifizierung von A ist aus der internen Sicht des Bohr-Topos eine kommutative C^* -Algebra.*

Beweis. Die additive und multiplikative Struktur erhält \underline{A} objektweise: Für jeden klassischen Kontext $C \subseteq A$ gibt es auf $\underline{A}(C) = C$ offensichtlich eine Addition und Multiplikation. Da diese mit den Inklusionen $C \subseteq C'$ verträglich sind, werden so Morphismen $\underline{A} \times \underline{A} \rightarrow \underline{A}$ festgelegt.

An Eigenschaften weisen wir nur die Kommutativität nach, denn um die restlichen Eigenschaften zu diskutieren, müssten wir sie zunächst auf geeignete Art und Weise formulieren, und das würde unnötig ablenken. (Man kann nicht die klassische Definition einer C^* -Algebra naiv übernehmen, da diese sich in einem konstruktiven Kontext wie dem Bohr-Topos nicht gut verhält. Die geeignet umformulierte Definition ist in klassischer Logik äquivalent zur üblichen Definition.)

Wir zeigen also

$$\text{Bohr}(A) \models \forall a, b : \underline{A}. ab = ba.$$

Nach der Kripke-Joyal-Semantik in Koprägarbentopoi (in diesem Skript nicht angegeben) müssen wir dazu

$$\forall C \in \mathcal{C}(A). \forall a, b \in \underline{A}(C). ab = ba$$

nachweisen. Das ist trivial. □

Mit dem Bohr-Topos können wir also das formale Kunststück vollführen, die Familie aller kommutativen Unteralegebren von A als eine einzige kommutative Algebra anzusehen.

Gemischte Quasi-Zustände

Die Bohrifizierung \underline{A} wäre nicht interessant, wenn sich die Quasi-Zustände von A nicht irgendwie in \underline{A} widerspiegeln würden. Tatsächlich gibt es folgendes schönes Resultat:

Proposition 8.32. *Die gemischten Quasi-Zustände von A stehen in Bijektion zu den gemischten Zuständen von \underline{A} .*

Beweis. Mit dem internen Objekt komplexer Zahlen $\underline{\mathbb{C}}$ meinen wir die konstante Koprägarbe $C \mapsto \underline{\mathbb{C}}$. Sei $\rho : A \rightarrow \underline{\mathbb{C}}$ ein Quasi-Zustand von A . Dann definiert die Familie $(\rho|_C)_{C \in \mathcal{C}(A)}$ von Einschränkungen eine natürliche Transformation $\underline{\rho} : \underline{A} \rightarrow \underline{\mathbb{C}}$, also einen Morphismus im Bohr-Topos. Es ist klar, dass dieser aus interner Sicht normiert, positiv und homogen ist. Dass er aus interner Sicht additiv ist, dass also

$$\text{Bohr}(A) \models \forall a, b : \underline{A}. \underline{\rho}(a + b) = \underline{\rho}(a) + \underline{\rho}(b)$$

gilt, bedeutet tatsächlich

$$\forall C \in \mathcal{C}(A). \forall a, b : \underline{A}(C). \rho_C(a + b) = \rho_C(a) + \rho_C(b).$$

Das ist gerade die Aussage, dass ρ auf kommutativen Unteralgebren additiv ist.

Sei umgekehrt ein Morphismus $\eta : \underline{A} \rightarrow \underline{\mathbb{C}}$ gegeben, der aus Sicht der internen Sprache normiert, positiv und linear ist. Dann können wir eine Abbildung $\rho : A \rightarrow \mathbb{C}$ durch die Setzung

$$\rho(a) := \eta_C(a), \quad \text{wobei } C \in \mathcal{C}(A) \text{ beliebig mit } a \in C,$$

definieren. Denn für jedes $a \in A$ existiert eine solche kommutative Unteralgebra (man kann etwa die von a erzeugte nehmen), und die Wahl von C spielt wegen der Natürlichkeitseigenschaft von η keine Rolle. Man kann nachrechnen, dass diese Abbildung ρ normiert, positiv und auf allen kommutativen Unteralgebren linear ist.

Es ist klar, dass diese Zuordnungen zueinander invers sind. \square

Eine geometrische Interpretation

Da die interne C^* -Algebra \underline{A} kommutativ ist, ist auf diese wieder – wie in der Situation klassischer Mechanik – Gelfand-Dualität anwendbar. Die *interne Örtlichkeit* $\underline{\Sigma} := \text{Spec } \underline{A}$ des Bohr-Topos ist also eine Art Phasenraum für das gegebene quantenmechanische System.

Folglich lassen sich Quasi-Zustände von A geometrisch als interne Wahrscheinlichkeitsmaße auf $\underline{\Sigma}$ deuten – ganz so, wie es bei klassischen Systemen auch im üblichen mathematischen Universum möglich ist.

Motto 8.33. *Nichtkommutative C^* -Algebren A besitzen zwar keine zugehörige Örtlichkeit im üblichen mathematischen Universum, wohl aber im speziell auf sie zugeschnittenen Topos $\text{Bohr}(A)$.*

Observable

Proposition 8.34. *Jede Observable von A induziert eine interne stetige Abbildung $\underline{\Sigma} \rightarrow \underline{\mathbb{R}}$. Diese Zuordnung von Observablen zu internen Örtlichkeitsmorphismen ist injektiv.*

Beweis. Siehe [15, Prop. 15]. Mit $\underline{\mathbb{R}}$ ist eine spezielle Art eines Objekts reeller Zahlen gemeint. \square

Reine Quasi-Zustände

Analog zu den gemischten Zuständen stehen die reinen Quasi-Zustände in 1:1-Korrespondenz zu den internen reinen Zuständen von \underline{A} , bzw. wegen Gelfand-Dualität äquivalent zu internen Punkten von $\underline{\Sigma}$ (stetigen Abbildungen $\text{pt} \rightarrow \underline{\Sigma}$). Da wir in Bemerkung 8.16 schon festgehalten haben, dass es im interessanten Fall $A = L(H, H)$ mit $\dim H \geq 3$ keine reinen Quasi-Zustände gibt, ist $\underline{\Sigma}$ also eine exotische Örtlichkeit: Sie ist nichttrivial, besitzt aber trotzdem keine Punkte.

A. Ideale in Ringen

A.1. Grundlegende Konzepte

Definition A.1. Ein *kommutativer Ring mit Eins* (kurz *Ring*) besteht aus

- einer Menge R ,
 - einer additiv geschriebenen Verknüpfung $+: R \times R \rightarrow R$,
 - einer multiplikativ geschriebenen Verknüpfung $\cdot: R \times R \rightarrow R$,
 - einem ausgezeichneten Element $0 \in R$ und
 - einem ausgezeichneten Element $1 \in R$,
- sodass
- Addition und Multiplikation assoziativ sind,
 - Addition und Multiplikation kommutativ sind,
 - Addition über Multiplikation distribuiert,
 - das Element 0 neutral bezüglich der Addition ist,
 - das Element 1 neutral bezüglich der Multiplikation ist und
 - jedes Element ein bezüglich der Addition inverses Element besitzt.

Definition A.2. Ein *Körper* ist ein Ring, in dem jedes Element *entweder* Null *oder* (bezüglich der Multiplikation) invertierbar ist.

Beispiel A.3. Die Mengen \mathbb{Z} , \mathbb{Q} , \mathbb{R} , $\mathbb{Z}/(n)$, $\mathbb{Z}[X]$, $\mathbb{Q}[X]$ bilden bezüglich ihrer üblichen Additionen und Multiplikationen Ringe. Für n prim ist $\mathbb{Z}/(n)$ sogar ein Körper. Die Menge \mathbb{N} bildet bezüglich der üblichen Addition und Multiplikation noch keinen Ring, da bis auf die Null kein Element ein Negatives besitzt.

Definition A.4. Ein *Ideal* eines Rings R ist eine Teilmenge $\mathfrak{a} \subseteq R$, die

- die Null enthält: $0 \in \mathfrak{a}$,
- abgeschlossen unter Addition ist: $x + y \in \mathfrak{a}$ für alle $x, y \in \mathfrak{a}$, und
- die *Magneteigenschaft* erfüllt: $rx \in \mathfrak{a}$ für alle $r \in R, x \in \mathfrak{a}$.

Die Axiome werden durch folgendes Beispiel motiviert:

Beispiel A.5. Sei R ein Ring (zum Beispiel $R = \mathbb{Z}$) und $u \in R$ ein Element (zum Beispiel deine Lieblingszahl). Dann ist die Menge

$$(u) := \{ru \mid r \in R\} \subseteq R$$

aller Vielfachen von u ein Ideal, das sog. *von u erzeugte Ideal*. Denn die Null ist ein Vielfaches von u (das Null-fache), die Summe zweier Vielfachen von u ist ein Vielfaches von u , und ist x ein Vielfaches von u , so ist rx für ein beliebiges Element $r \in R$ „umso mehr“ ein Vielfaches von u .

In Körpern K ist der Idealbegriff dagegen langweilig: Körper besitzen stets nur genau zwei Ideale, nämlich das sog. Nullideal $(0) = \{0\}$ und das sog. Einsideal $(1) = K$.

Definition A.6. Seien x_1, \dots, x_n Elemente eines Rings R . Dann heißt das Ideal

$$(x_1, \dots, x_n) := \{r_1x_1 + \dots + r_nx_n \mid r_1, \dots, r_n \in R\} \subseteq R$$

das von x_1, \dots, x_n erzeugte Ideal.

Beispiel A.7. Für den Ring der ganzen Zahlen gilt $(2, 3) = (1) = \mathbb{Z}$.

Definition A.8. Ein Ideal $\mathfrak{p} \subseteq R$ heißt genau dann *Primideal*, wenn

- die Eins nicht enthalten ist: $1 \notin \mathfrak{p}$, und
- wann immer ein Produkt in \mathfrak{p} enthalten ist, schon ein Faktor in \mathfrak{p} liegt:

$$xy \in \mathfrak{p} \implies x \in \mathfrak{p} \vee y \in \mathfrak{p} \quad \text{für alle } x, y \in R.$$

Beispiel A.9. Sei $u \in \mathbb{Z}$. Dann ist das von u erzeugte Ideal $(u) \subseteq \mathbb{Z}$ genau dann ein Primideal, wenn u Null ist oder wenn u oder $-u$ eine Primzahl ist.

A.2. Historische Motivation für Idealtheorie

Historisch gab es eine große Motivation, dieses Konzept einzuführen. Vom Ring der ganzen Zahlen war natürlich bekannt, dass sich (bis auf die Null) jedes Element auf eindeutige Weise als Produkt von Primfaktoren schreiben lässt. Man fragte sich nun, ob gewisse für die Zahlentheorie relevante Ringe dieselbe Eigenschaft hatten: Das wäre zum einen recht „nett“, zum anderen aber auch enorm nützlich: Denn man kannte schon einfache Beweise von Fermats letztem Satz, welche als einzige ungesicherte Zutat diese Eigenschaft voraussetzten.

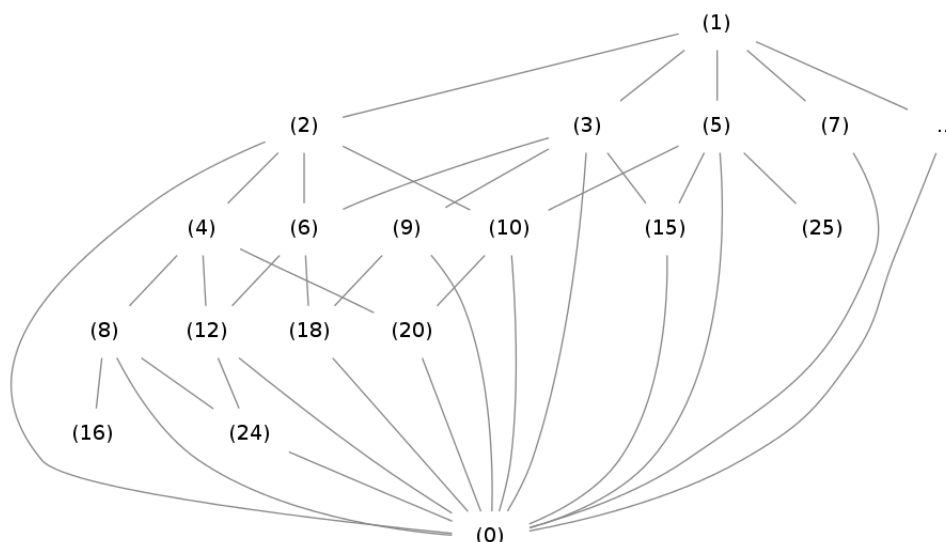
Leider stellte es sich heraus, dass diese Eigenschaft vielen der interessanten Ringe *nicht* zu kam. Kronecker hatte nun die geniale Einsicht, von Zahlen zu Idealen und von Primzahlen zu Primidealen zu verallgemeinern. Denn in diesen Ringen gilt zumindest noch, dass sich jedes *Ideal* eindeutig als Produkt von *Primidealen* schreiben lässt. Mit dieser schwächeren Eigenschaft lässt sich zwar kein allgemeiner Beweis von Fermats letztem Satz führen, zumindest lässt sich jedoch eine große Klasse von Spezialfällen damit behandeln.

Wer sich für dieses Thema interessiert, dem sei das deutschsprachige Buch [26] von Alexander Schmidt empfohlen. Als Vorwissen setzt es nur Schulkenntnisse voraus.

A.3. Die Ideale im Ring der ganzen Zahlen

Tafel 6 zeigt die Ideale des Rings \mathbb{Z} . Ergänzt man die aus Platzgründen ausgelassenen Ideale, ist das sogar eine vollständig Übersicht über *alle* Ideale von \mathbb{Z} – wenn man klassische Logik voraussetzt.

Aufgabe A.10. Zeige, dass wenn alle Ideale von \mathbb{Z} von der Form (x) für eine ganze Zahl x sind, das Prinzip vom ausgeschlossenen Dritten gilt. *Tipp:* Betrachte für eine beliebige Aussage φ das Ideal (wieso sind die Idealaxiome erfüllt?) $\{x \in \mathbb{Z} \mid x = 0 \vee \varphi\} \subseteq \mathbb{Z}$.



Tafel 6: Modulo Platz und klassische Logik eine vollständige Übersicht über alle Ideale von \mathbb{Z} .

A.4. Primideale und Nilpotenz

Definition A.11. Ein Element $x \in R$ eines Rings R heißt genau dann *nilpotent*, wenn eine gewisse Potenz Null ist:

$$x^n = 0 \quad \text{für ein } n \geq 0.$$

Beispiel A.12. Im Ring $\mathbb{Z}/(4)$ ist das Element $[2]$ nilpotent.

Proposition A.13. *Die nilpotenten Elemente eines Rings liegen in allen Primidealen des Rings.*

Beweis. Sei x mit $x^n = 0$ ein nilpotentes Element. Sei \mathfrak{p} ein beliebiges Primideal. Dann ist also x^n in \mathfrak{p} enthalten. Wegen der Primalitätsbedingung ist daher auch x in \mathfrak{p} enthalten. Das war zu zeigen. \square

Interessant ist nun, dass – in einem klassischen Kontext – auch die Umkehrung dieser Proposition gilt. Somit hat man ein einfaches Kriterium an der Hand, um die Nilpotenz eines Ringelements nachzuweisen.

Proposition A.14 (nur klassisch). *Im Schnitt aller Primideale eines Rings liegen nur die nilpotenten Elemente.*

Beweis. Sei x ein Element von R , welches in allen Primidealen liegt. Wir wollen zeigen, dass x nilpotent ist; dazu führen wir einen Widerspruchsbeweis, nehmen also an, dass x nicht nilpotent ist. Dann enthält die Menge

$$S := \{x^n \mid n \geq 0\} \subseteq R$$

also nicht die Null. Wir betrachten nun das bezüglich der Teilmengeninklusionsrelation partiell geordnete Mengensystem

$$\mathcal{U} := \{\mathfrak{a} \subseteq R \mid \mathfrak{a} \text{ ist ein Ideal mit } \mathfrak{a} \cap S = \emptyset\}.$$

Dieses ist bewohnt: Das Nullideal liegt wegen $0 \notin S$ in \mathcal{U} . Außerdem liegt die Vereinigung $\bigcup_i \mathfrak{a}_i$ einer in \mathcal{U} liegenden Kette von Elementen aus \mathcal{U} wieder in \mathcal{U} . Damit sind alle Voraussetzung des Lemmas von Zorn erfüllt, womit \mathcal{U} also ein maximales Element \mathfrak{m} enthält.

Man kann nun nachrechnen, dass \mathfrak{m} ein Primideal ist. Da $x \notin \mathfrak{m}$ (wegen $x \in S$), ist das ein Widerspruch zur Voraussetzung. \square

Dieser Beweis ist aus zwei Gründen inhärent klassisch: Zum einen, weil er ein echter Widerspruchsbeweis ist; zum anderen, weil das Lemma von Zorn verwendet wird (dieses ist zum Auswahlaxiom äquivalent). Man kann sogar zeigen, dass ein konstruktiver Beweis dieser Proposition nicht möglich ist. Daher ist folgendes Metatheorem absolut erstaunlich:

Wunder A.15. *Sei $x \in R$ ein Element eines Rings. Sei ein klassischer Beweis (einer gewissen Form) der Aussage $x \in \mathfrak{p}$, wobei man von \mathfrak{p} nur die Axiome eines Primideals voraussetzen darf, gegeben. Dann ist x nilpotent (konstruktiv!). Aus dem klassischen Beweis kann man also auf konstruktive Art und Weise einen konstruktiven Beweis der Nilpotenzbehauptung extrahieren.*

Die genaue Formulierung steht im Haupttext als Satz 7.13.

Polynome mit Koeffizienten in Primidealen

Für das Beispiel in Abschnitt 7.3 benötigen wir folgendes Lemma.

Lemma A.16. *Seien $f, g \in R[X]$ Polynome über einem Ring R . Sei $\mathfrak{p} \subseteq R$ ein Primideal. Wenn alle Koeffizienten von fg in \mathfrak{p} liegen, so liegen schon alle Koeffizienten von f oder alle Koeffizienten von g in \mathfrak{p} .*

Wenn man mit der Faktorringkonstruktion vertraut ist, lässt sich das Lemma einfacher formulieren: Ist ein Produkt in $(R/\mathfrak{p})[X]$ Null, so ist schon einer der Faktoren in $(R/\mathfrak{p})[X]$ Null. Diese Aussage ist Instanz eines noch allgemeineren Lemmas: Ist ein Ring S ein Integritätsbereich, so auch $S[X]$.

A.5. Radikalideale

Definition A.17. a) Ein Ideal $\mathfrak{a} \subseteq R$ eines Rings R heißt genau dann *Radikalideal*, wenn für alle $x \in R$ und $n \geq 0$ aus $x^n \in \mathfrak{a}$ schon $x \in \mathfrak{a}$ folgt.

b) Sei $\mathfrak{a} \subseteq R$ ein Ring. Dann heißt das Ideal

$$\sqrt{\mathfrak{a}} := \{x \in R \mid \exists n \geq 0: x^n \in \mathfrak{a}\}$$

das *Radikal* von \mathfrak{a} . Es ist stets ein Radikalideal, und zwar das kleinste, das \mathfrak{a} umfasst.

Beispiel A.18. Das Ideal $(12) \subseteq \mathbb{Z}$ ist kein Radikalideal, $\sqrt{(12)} = (6)$ dagegen schon.

Bemerkung A.19. Die Zuordnung von Radikalen zu Idealen bildet einen Linksadjungierten zum Vergissfunctor der Kategorie der Radikalideale von R in die Kategorie aller Ideale von R .

Lemma A.20. Für die bezüglich der Inklusionsbeziehung partiell geordnete Menge $\text{Rad}(R)$ der Radikalideale eines Rings R gilt:

- a) Das kleinste Element ist $\sqrt{(0)}$, das Ideal aller nilpotenten Elemente.
- b) Das größte Element ist (1) , das Einsideal.
- c) Das Supremum zweier Elemente $\mathfrak{a}, \mathfrak{b}$, also das kleinste Radikalideal, das \mathfrak{a} und \mathfrak{b} umfasst, ist

$$\sqrt{\mathfrak{a} + \mathfrak{b}} := \{x \in R \mid x^n = u + v \text{ für ein } n \geq 0, u \in \mathfrak{a}, v \in \mathfrak{b}\}.$$

- d) Das Infimum zweier Elemente $\mathfrak{a}, \mathfrak{b}$, also das größte Radikalideal, das in \mathfrak{a} und \mathfrak{b} enthalten ist, ist

$$\mathfrak{a} \cap \mathfrak{b}.$$

Beweis. Nachrechnen. □

Beispiel A.21. Für den Ring der ganzen Zahlen gilt $(6) \cap (5) = (30)$ und $(6) \cap (15) = (30)$.

Beispiel A.22. Allgemein gilt

$$\sup\{\sqrt{(x)}, \sqrt{(y)}\} = \sqrt{\sqrt{(x)} + \sqrt{(y)}} = \sqrt{(x, y)}.$$

B. Garben

B.1. Prägarben und Garben

Definition B.1. a) Eine *Prägarbe* auf einem topologischen Raum X (oder einer Örtlichkeit) ist eine Prägarbe im kategoriellen Sinne auf der als dünne Kategorie

aufgefassten Halbordnung $\text{Ouv}(X)$ der offenen Teilmengen (bzw. offenen Dinge) von X , also ein Funktor $\text{Ouv}(X)^{\text{op}} \rightarrow \text{Set}$.

b) Ein *Morphismus von Prägarben* $\mathcal{F} \rightarrow \mathcal{G}$ ist eine natürliche Transformation $\mathcal{F} \rightarrow \mathcal{G}$.

Ist \mathcal{F} eine Prägarbe auf X und $U \subseteq X$ eine offene Menge, so schreibt man auch „ $\Gamma(U, \mathcal{F})$ “ für $\mathcal{F}(U)$ und nennt die Elemente dieser Menge *Schnitte von \mathcal{F} auf U* . Wenn $V \subseteq U$, schreibt man die induzierte Abbildung $F(„V \subseteq U“): \mathcal{F}(U) \rightarrow \mathcal{F}(V)$ auch als „ $(_)|_V$ “. Diese Schreibweise rührt von den wichtigsten Beispielen für Prägarben her.

Die Prototyp-Beispiele für Prägarben stammen nämlich von verschiedenen Funktionsbegriffen ab. Etwa gibt es auf jedem topologischen Raum X die Prägarbe \mathcal{C}^0 der stetigen Funktionen, definiert über

$$\begin{aligned} \text{Ouv}(X)^{\text{op}} &\longrightarrow \text{Set} \\ U &\longmapsto \{U \xrightarrow{f} \mathbb{R} \mid f \text{ stetig}\} \\ „V \subseteq U“ &\longmapsto \text{res}_V^U \end{aligned}$$

mit $\text{res}_V^U: \mathcal{C}^0(U) \rightarrow \mathcal{C}^0(V), f \mapsto f|_V$ der Einschränkungabbildung. Trägt X sogar die Struktur einer glatten Mannigfaltigkeit, kann man analog auch die Garbe \mathcal{C}^∞ der glatten Funktionen definieren – man setzt $\Gamma(U, \mathcal{C}^\infty) := \{U \xrightarrow{f} \mathbb{R} \mid f \text{ glatt}\}$.

Die Garbenbedingung

Definition B.2. a) Eine Prägarbe \mathcal{F} auf X heißt genau dann *Garbe*, wenn folgendes Verklebeaxiom erfüllt ist: Ist $U = \bigcup_i U_i \subseteq X$ eine offene Überdeckung einer offenen Teilmenge und ist $(s_i)_{i \in I}$ eine Familie von Schnitten mit $s_i \in \Gamma(U_i, \mathcal{F})$, welche auf Überlapps übereinstimmen, also $s_i|_{U_i \cap U_j} = s_j|_{U_i \cap U_j}$ für alle Indizes i, j erfüllen, so soll es genau einen Schnitt $s \in \Gamma(U, \mathcal{F})$ mit $s|_{U_i} = s_i$ für alle i geben.

b) Ein *Morphismus von Garben* ist ein Morphismus der zugrundeliegenden Prägarben.

Die Kategorie der Garben auf X , $\text{Sh}(X)$, ist also eine volle Unterkategorie der Kategorie der Prägarben auf X , $\text{PSh}(X)$.

Beispiel B.3. Die Prägarben \mathcal{C}^0 und \mathcal{C}^∞ (sofern definierbar) sind Garben: Man kann stetige bzw. glatte Funktionen, die auf Überlapps übereinstimmen, miteinander *verkleben*; die resultierende Funktion wird wieder stetig bzw. glatt sein.

Beispiel B.4. Die Prägarbe $\mathcal{C}_{\text{const}}$ der konstanten Funktionen,

$$\Gamma(U, \mathcal{C}_{\text{const}}) = \{U \xrightarrow{f} \mathbb{R} \mid f \text{ konstant}\},$$

ist außer in pathologischen Fällen keine Garbe. Denn wenn zwei konstante Funktionen $f_1: U_1 \rightarrow \mathbb{R}$ und $f_2: U_2 \rightarrow \mathbb{R}$ auf zwei sich nicht überlappenden offenen Mengen definiert sind, ist die Kompatibilitätsbedingung leer, sie lassen sich jedoch im Allgemeinen nicht zu

einer konstanten Funktion auf $U_1 \cup U_2$ zusammensetzen: Das geht genau dann, wenn sie denselben konstanten Wert haben. Die analog definierte Prägarbe \mathcal{C}_{lc} der lokal konstanten Funktionen ist dagegen durchaus eine Garbe. (Eine Funktion heißt genau dann lokal konstant, wenn es eine Überdeckung ihres Urbildbereichs gibt, sodass die Einschränkungen der Funktion auf die Überdeckungsmengen jeweils konstant sind.)

Bemerkung B.5. Es gibt eine allgemeine Technik, die *Garbifizierung*, mit der man auf universelle Art und Weise aus Prägarben Garben machen kann. (Genauer ist der Garbifizierungsfunktor linksadjungiert zum Vergissfunktor $\text{Sh}(X) \rightarrow \text{PSh}(X)$.) Die Garbifizierung der Prägarbe der konstanten Funktionen ist dann gerade die Garbe der lokal konstanten Funktionen.

Globale Schnitte

Historisch eine der wichtigsten Garben ist die Garbe \mathcal{O}_X der holomorphen Funktionen auf einer komplexen Mannigfaltigkeit X (etwa $X = \mathbb{C}$ oder $X = \hat{\mathbb{C}} = \mathbb{C} \cup \{\infty\}$, die riemannsche Zahlenkugel), definiert über

$$\Gamma(U, \mathcal{O}_X) = \{f : U \rightarrow \mathbb{C} \mid f \text{ holomorph}\}.$$

Sie hat die für viele Garben typische Eigenschaft, oftmals nur recht wenige *globale Schnitte* (Elemente von $\Gamma(X, \mathcal{O}_X)$) zu besitzen – im Fall der riemannschen Zahlenkugel sind das (nach dem Satz von Liouville) etwa nur die konstanten Funktionen; nichttrivial sind nur die Schnitte, die auf kleineren offenen Teilmengen definiert sind.

Sinnvolle Bedingungen an Garben oder Garbenmorphismen erhält man in der Regel also nur dann, wenn man alle offenen Mengen einbezieht, nicht nur X selbst. Die Kripke-Joyal-Semantik zur Interpretation der internen Sprache eines Garbentopos achtet von selbst darauf (siehe Abschnitt 8.4).

B.2. Monomorphismen und Epimorphismen von Garben

Proposition B.6. *Sei $\alpha : \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{G}$ ein Morphismus von Garben. Dann gilt:*

- a) *Der Morphismus α ist genau dann ein Monomorphismus in $\text{Sh}(X)$, wenn für alle offenen Teilmengen $U \subseteq X$ die Komponente $\alpha_U : \Gamma(U, \mathcal{F}) \rightarrow \Gamma(U, \mathcal{G})$ eine injektive Abbildung ist, wenn also gilt:*

$$\forall U \subseteq X \text{ offen. } \forall s, t \in \Gamma(U, \mathcal{F}). \alpha_U(s) = \alpha_U(t) \Rightarrow s = t.$$

- b) *Der Morphismus α ist genau dann ein Epimorphismus in $\text{Sh}(X)$, wenn jeder Schnitt von \mathcal{G} lokal ein Urbild besitzt, d. h. wenn für alle offenen Teilmengen $U \subseteq X$ und Schnitte $s \in \Gamma(U, \mathcal{G})$ eine Überdeckung $U = \bigcup U_i$ und Schnitte $t_i \in \Gamma(U_i, \mathcal{F})$ mit $\alpha_{U_i}(t_i) = s|_{U_i}$ existieren.*

Wenn man sich das erste Mal mit Garben beschäftigt, verwundert vielleicht die Charakterisierung von Epimorphismen: Vielleicht hätte man eher die Bedingung, dass alle Komponentenabbildungen α_U surjektiv sind, erwartet. Diese stärkere Bedingung ist zwar ebenfalls hinreichend für Epimorphie, aber nur in der größeren Kategorie aller Prägarben notwendig.

Beispiel B.7. Sei \mathcal{O}_X die Garbe der holomorphen Funktionen auf $X = \mathbb{C}$. Sei \mathcal{O}_X^\times die Untergarbe der bezüglich der Multiplikation invertierbaren holomorphen Funktionen, also der nirgends verschwindenden Funktionen. Dann ist der „exp“ genannte Garbenmorphismus

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{O}_X & \longrightarrow & \mathcal{O}_X^\times \\ \text{auf } U \subseteq X: f \in \mathcal{O}_X(U) & \longmapsto & \exp \circ f \in \mathcal{O}_X^\times(U) \end{array}$$

ein Epimorphismus (da man *lokal* die Exponentialfunktion mittels eines geeigneten Zweigs des Logarithmus umkehren kann). Aber seine Komponentenabbildungen \exp_U sind nicht alle surjektiv.

Bemerkung B.8. In den meisten Lehrbüchern sind *Mono-* und *Epimorphismus* speziell definierte Begriffe: Ein Morphismus $\alpha : \mathcal{F} \rightarrow \mathcal{G}$ heißt dort genau dann mono- bzw. epimorph, wenn die induzierten Abbildungen $\alpha_x : \mathcal{F}_x \rightarrow \mathcal{G}_x$, $x \in X$, auf allen *Halmen* injektiv bzw. surjektiv sind. Diese Definition ist äquivalent zur allgemeinen kategoriellen Definition und somit zur Charakterisierung aus der Proposition. Sie hat allerdings den Nachteil, dass sie nicht unmittelbar auf Örtlichkeiten übertragbar ist.

Literatur

- [1] J. AVIGAD. *Proof mining*. Vortragsfolien. 2004. URL: <http://www.andrew.cmu.edu/user/avigad/Talks/as104.pdf>.
- [2] A. BAUER. *Mathematics and computation*. Blog. URL: <http://math.andrej.com/category/constructive-math/>.
- [3] A. BAUER. *Sometimes all functions are continuous*. Artikel des Blogs *Mathematics and computation*.
- [4] E. BISHOP und D. BRIDGES. *Constructive Analysis*. Springer, 1985.
- [5] Ingo BLECHSCHMIDT. *Pizzaseminar zu Kategorientheorie*. 2013. URL: <http://pizzaseminar.speicherleck.de/skript1/pizzaseminar.pdf>.
- [6] N. BOHR. „Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics“. In: *Albert Einstein: Philosopher–Scientist*. Hrsg. von P. A. SCHILPP. Cambridge University Press, 1949, S. 200–241. URL: <http://www.tuhh.de/rzt/rzt/it/QM/schilpp.html>.
- [7] J. BUTTERFIELD, J. HAMILTON und C. ISHAM. „A topos perspective on the Kochen–Specker theorem, I. quantum states as generalized valuations“. In: *Internat. J. Theoret. Phys.* 37.11 (1998), S. 2669–2733.

- [8] The nLab CONTRIBUTORS. *Bohr topos*. 2013. URL: <http://ncatlab.org/nlab/show/Bohr+topos>.
- [9] T. COQUAND. „Computational content of classical logic“. In: *Semantics and Logics of Computation*. Hrsg. von A. PITTS und P. DYBJER. Cambridge University Press, 1997, S. 33–78.
- [10] T. COQUAND. *Dynamical methods in algebra*. Vortragsfolien *Calculus, 11th Symposium on the Integration of Symbolic Computation and Mechanized Reasoning*. 2003. URL: <http://www.cse.chalmers.se/~coquand/sitesur.pdf>.
- [11] T. COQUAND und H. LOMBARDI. „A logical approach to abstract algebra“. In: *Math. Structures Comput. Sci* 16.5 (2006), S. 885–900. URL: <http://www.cse.chalmers.se/~coquand/FISCHBACHAU/AlgebraLogicCoqLom.pdf>.
- [12] M. COSTE, H. LOMBARDI und M.-F. ROY. „Dynamical method in algebra: effective Nullstellensätze“. In: *Ann. Pure Appl. Logic* 111.3 (2001), S. 203–256. URL: <http://perso.univ-rennes1.fr/michel.coste/publis/clar.pdf>.
- [13] D. van DALEN. „Intuitionistic logic“. In: *The Blackwell Guide to Philosophical Logic*. Hrsg. von L. GOBLE. Blackwell Publishers, 2011, S. 224–257.
- [14] A. GROTHENDIECK. *Récoltes et Semailles, Réflexions et témoignages sur un passé de mathématicien*. 1986. URL: <http://www.math.jussieu.fr/~leila/grothendieckcircle/RetS.pdf>.
- [15] C. HEUNEN, N. LANDSMAN und B. SPITTERS. „A Topos for Algebraic Quantum Theory“. In: *Comm. Math. Phys.* 291.1 (2009), S. 63–110. URL: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00220-009-0865-6>.
- [16] P. T. JOHNSTONE. *Sketches of an Elephant: A Topos Theory Compendium*. Oxford University Press, 2002.
- [17] U. KOHLENBACH. *Applied Proof Theory: Proof Interpretations and their Use in Mathematics*. Springer-Verlag, 2008.
- [18] J. LAMBEK und P. SCOTT. *Introduction to Higher-Order Categorical Logic*. Bd. 7. Cambridge Studies in Advanced Mathematics. Cambridge University Press, 1988.
- [19] T. LEINSTER. „An informal introduction to topos theory“. In: *Publications of the nLab* 1.1 (2011). URL: <http://ncatlab.org/publications/published/Leinster2011>.
- [20] H. LOMBARDI. *Hilbert’s Program for Abstract Algebra does work*. Vortragsfolien *International conference on abelian groups and modules over commutative rings*. 2007. URL: <http://hlombardi.free.fr/publis/AGAMOCRSslide.pdf>.
- [21] S. MAC LANE und I. MOERDIJK. *Sheaves in Geometry and Logic: a First Introduction to Topos Theory*. Universitext. Springer-Verlag, 1992.
- [22] R. MINES, F. RICHMAN und W. RUITENBURG. *A Course in Constructive Algebra*. Universitext. Springer-Verlag, 1988.

- [23] M. NIEPER-WISSKIRCHEN. *Galoissche Theorie*. 2013. URL: http://alg.math.uni-augsburg.de/lehre/vorlesungsskripte/einfuehrung-in-die-algebra/at_download/file.
- [24] D. PIPONI. *Drugs, Kate Moss, and Intuitionistic Logic*. Artikel des Blogs *A Neighbourhood of Infinity*. 2008. URL: <http://blog.sigfpe.com/2008/06/drugs-kate-moss-and-intuitionistic.html>.
- [25] P. RAATIKAINEN. „Hilbert’s Program Revisited“. In: *Synthese* 137.1-2 (2003), S. 157–177. URL: <http://www.mv.helsinki.fi/home/praatika/Hilbert's%20Program%20Revisited.pdf>.
- [26] A. SCHMIDT. *Einführung in die algebraische Zahlentheorie*. Springer-Verlag, 2007.
- [27] A. S. TROELSTRA und D. van DALEN. *Constructivism in Mathematics: An Introduction*. North-Holland Publishing, 1988.