

Mathematische Logik

SS 2017

Prof. Dr. Erich Grädel

Mathematische Grundlagen der Informatik
RWTH Aachen



This work is licensed under:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

Dieses Werk ist lizenziert unter:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

© 2017 Mathematische Grundlagen der Informatik, RWTH Aachen.

<http://www.logic.rwth-aachen.de>

Inhaltsverzeichnis

0	Notation und Konventionen	1
1	Aussagenlogik	3
1.1	Syntax und Semantik der Aussagenlogik	3
1.2	Boolesche Funktionen und Normalformen	10
1.3	Horn-Formeln	15
1.4	Der Kompaktheitssatz der Aussagenlogik	17
1.5	Aussagenlogische Resolution	24
1.6	Der aussagenlogische Sequenzenkalkül	31
2	Syntax und Semantik der Prädikatenlogik	39
2.1	Strukturen	40
2.2	Ein Zoo von Strukturen	42
2.3	Syntax der Prädikatenlogik	47
2.4	Semantik der Prädikatenlogik	52
2.5	Normalformen	56
2.6	Spieltheoretische Semantik	65
3	Definierbarkeit in der Prädikatenlogik	73
3.1	Definierbarkeit	73
3.2	Das Isomorphielemma	77
3.3	Theorien und elementar äquivalente Strukturen	81
3.4	Ehrenfeucht-Fraïssé-Spiele	83
4	Vollständigkeitsatz, Kompaktheitssatz, Unentscheidbarkeit	93
4.1	Der Sequenzenkalkül	93
4.2	Der Vollständigkeitsatz	96
4.3	Der Beweis des Vollständigkeitsatzes	98

4.4	Der Kompaktheitssatz, Axiomatisierbarkeit und Größe von Modellen	109
4.5	Unentscheidbarkeit der Prädikatenlogik	115
5	Modallogik, temporale Logiken und monadische Logik	121
5.1	Syntax und Semantik der Modallogik	121
5.2	Bisimulation	125
5.3	Abwicklungen und Baummodell-Eigenschaft	130
5.4	Temporale Logiken	131
5.5	Monadische Logik	137
	Symbole	139

2 Syntax und Semantik der Prädikatenlogik

Die Aussagenlogik behandelt ausschließlich Aussagen, welche aus atomaren Formeln mit Hilfe der aussagenlogischen Verknüpfungen \wedge, \vee, \neg etc. zusammengesetzt werden. Eine aussagenlogische Interpretation ordnet den atomaren Formeln Wahrheitswerte 0 oder 1 zu, und dies setzt sich fort zu einer Interpretation beliebiger aussagenlogischer Formeln. Insbesondere haben die atomaren Aussagen selbst keine innere Struktur, ja wir abstrahieren vollständig vom mathematischen, umgangssprachlichen oder technischen Inhalt einer atomaren Aussage, nur ihr Wahrheitswert ist maßgebend.

Für die meisten mathematischen Anwendungen ist die Aussagenlogik viel zu ausdruckschwach. Üblicherweise werden in der Mathematik Aussagen über konkrete Strukturen getroffen, z.B. „alle Quadratzahlen sind positiv, $25 = 5 \cdot 5$, also ist 25 positiv“. Bereits dieses kurze Argument widersetzt sich einer Formalisierung in der Aussagenlogik. Abstrakt hat es die Gestalt $\psi \wedge \varphi \rightarrow \theta$, aber ohne Zugriff auf die Struktur und den Zusammenhang der Teilaussagen ψ, φ, θ gibt es keinen Grund, warum eine solche Implikation wahr sein sollte.

Wir brauchen also ein ausdrucksstärkeres logisches System. Die Prädikatenlogik (abgekürzt FO für „first-order logic“) macht Aussagen, welche durch Strukturen und Elemente von Strukturen (also nicht durch bloße Wahrheitswerte) interpretiert werden. Bereits die atomaren Formeln haben eine kompliziertere Struktur, sie sprechen über Relationen zwischen Elementen einer Struktur (z.B. $2x < y + 3$) oder über die Gleichheit von Elementen (z.B. $x^2 = y$). Außerdem werden Aussagen nicht nur mit Hilfe der aussagenlogischen Junktoren miteinander verknüpft, es besteht auch die Möglichkeit, Existenz- oder Allaussagen über Elemente einer Struktur zu machen, der Art „es gibt eine reelle

Zahl x , so dass $x^2 = 2$ “ oder „zu jeder Primzahl gibt es eine größere“. Was wir hingegen nicht zulassen, sind Existenz- oder Allaussagen über Mengen, Funktionen oder Relationen auf der zugrundegelegten Struktur.

2.1 Strukturen

Mathematische Strukturen bestehen aus einem Universum und aus ausgezeichneten Funktionen und Relationen auf diesem Universum. Beispiele sind:

- die additive Gruppe der ganzen Zahlen: $(\mathbb{Z}, +, 0)$
- der geordnete Körper der reellen Zahlen: $(\mathbb{R}, +, \cdot, 0, 1, <)$
- Graphen: Die Punkte des Graphen sind das Universum, die zweistellige Relation E beschreibt die Kantenbeziehung.

Die Namen (Symbole) für die in einer Struktur auftretenden Relationen und Funktionen bilden die Signatur der Struktur.

Definition 2.1. Eine *Signatur* τ ist eine Menge von Funktions- und Relationssymbolen. Jedes dieser Symbole hat eine feste endliche Stelligkeit.

Eine Signatur heißt *relational*, wenn sie nur Relationssymbole enthält bzw. *funktional* oder *algebraisch*, wenn sie ausschließlich Funktionssymbole enthält. Nullstellige Funktionssymbole heißen auch *Konstantensymbole*.

Andere Bezeichnungen für eine Signatur sind *Symbolmenge* oder *Vokabular*.

Beispiel.

- Die Signatur der Arithmetik ist $\tau_{ar} = \{+, \cdot, 0, 1\}$, wobei $+$ und \cdot zweistellige Funktionssymbole, 0 und 1 Konstantensymbole sind.
- Die Signatur der geordneten Arithmetik ist $\tau_{ar}^< = \{+, \cdot, 0, 1, <\}$. Sie erweitert τ_{ar} um das zweistellige Relationssymbol $<$.
- Die Signatur von Graphen ist $\tau_G = \{E\}$, wobei E ein zweistelliges Relationssymbol ist.

Notation. Normalerweise verwenden wir

- $P, Q, R, \dots, P_i, \dots$ für Relationssymbole,
- $f, g, h, \dots, f_i, \dots$ für Funktionssymbole,
- $c, d, e, \dots, c_i, \dots$ für Konstantensymbole,
- σ, τ für Signaturen.

Relations- und Funktionssymbole in einer Signatur τ können natürlich in vielfältiger Weise durch konkrete Relationen und Funktionen interpretiert werden. Allgemein wird eine Struktur festgelegt durch Angabe ihres Universums und der Interpretation der Relations- und Funktionssymbole über diesem Universum.

Definition 2.2. Eine τ -Struktur \mathfrak{A} besteht aus

- einer nichtleeren Menge A , dem *Universum* (oder *Träger*) von \mathfrak{A} ,
- einer Interpretationsfunktion welche jedem n -stelligen Relationssymbol $P \in \tau$ eine n -stellige Relation $P^{\mathfrak{A}} \subseteq A^n$ und jedem n -stelligen Funktionssymbol $f \in \tau$ eine n -stellige Funktion $f^{\mathfrak{A}} : A^n \rightarrow A$ zuordnet.

Eine Struktur mit funktionaler Signatur τ heißt auch eine τ -Algebra.

Notation. Strukturen bezeichnen wir meist mit gotischen Buchstaben $\mathfrak{A}, \mathfrak{B}, \mathfrak{C}, \dots$, der entsprechende lateinische Buchstabe A, B, C, \dots steht für das Universum der Struktur. Mit $\mathfrak{A} = (A, P_1^{\mathfrak{A}}, P_2^{\mathfrak{A}}, \dots, f_1^{\mathfrak{A}}, f_2^{\mathfrak{A}}, \dots)$ bezeichnen wir also eine Struktur der Signatur $\tau = \{P_1, P_2, \dots, f_1, f_2, \dots\}$ mit Universum A .

Bemerkung. Es ist wichtig zwischen Relations- und Funktionssymbolen R_i, f_j und ihrer Interpretation durch konkrete Relationen $R_i^{\mathfrak{A}}$ bzw. Funktionen $f_j^{\mathfrak{A}}$ zu unterscheiden.

Insbesondere sind die Schreibweisen $(A, P_1, P_2, \dots, f_1, f_2, \dots)$ und (A, τ) immer als Abkürzung für $(A, P_1^{\mathfrak{A}}, P_2^{\mathfrak{A}}, \dots, f_1^{\mathfrak{A}}, f_2^{\mathfrak{A}}, \dots)$ zu verstehen.

Wir werden eine Reihe von Beispielen im nächsten Abschnitt diskutieren. Zuvor beschreiben wir zwei grundlegende Möglichkeiten, wie eine Struktur in einer anderen enthalten sein kann.

Definition 2.3. Seien \mathfrak{A} und \mathfrak{B} τ -Strukturen. \mathfrak{A} ist *Substruktur* von \mathfrak{B} (kurz: $\mathfrak{A} \subseteq \mathfrak{B}$), wenn

- $A \subseteq B$,
- für alle Relationssymbole $R \in \tau$ gilt: $R^{\mathfrak{A}} = R^{\mathfrak{B}} \cap A^n$ (wobei n die Stelligkeit von R ist),
- für alle Funktionssymbole $f \in \tau$ gilt $f^{\mathfrak{A}} = f^{\mathfrak{B}}|_A$, d.h. $f^{\mathfrak{A}}$ ist die *Restriktion* von $f^{\mathfrak{B}}$ auf A .

Wenn \mathfrak{A} Substruktur von \mathfrak{B} , so heißt \mathfrak{B} *Erweiterung* von \mathfrak{A} .

Ist \mathfrak{A} eine Substruktur der τ -Struktur \mathfrak{B} , so ist A τ -*abgeschlossen*, d.h. für alle n -stelligen $f \in \tau$ und alle $a_1, \dots, a_n \in A$ ist $f^{\mathfrak{B}}(a_1, \dots, a_n) \in A$. Umgekehrt gilt auch: Sei \mathfrak{B} eine τ -Struktur. Zu jeder nicht-leeren, τ -abgeschlossenen Teilmenge $A \subseteq B$ gibt es genau eine Substruktur von \mathfrak{B} mit Träger A . Wir nennen sie die *von A in \mathfrak{B} induzierte Substruktur*.

Beispiel. $2\mathbb{N} := \{2n : n \in \mathbb{N}\}$ ist $\{+\}$ -abgeschlossen. Also ist $(2\mathbb{N}, +) \subseteq (\mathbb{N}, +)$. Hingegen ist $2\mathbb{N} + 1 := \{2n + 1 : n \in \mathbb{N}\}$ nicht $\{+\}$ -abgeschlossen und kann somit nicht Träger einer Substruktur von $(\mathbb{N}, +)$ sein.

Während beim Begriffspaar Substruktur/Erweiterung die Signatur fest bleibt und das Universum verändert wird, ist dies beim Begriffspaar Redukt/Expansion genau umgekehrt.

Definition 2.4. Seien $\sigma \subseteq \tau$ Signaturen, und sei \mathfrak{B} eine τ -Struktur. Das σ -*Redukt* $\mathfrak{B} \upharpoonright \sigma$ von \mathfrak{B} ist die σ -Struktur, die wir aus \mathfrak{B} erhalten, wenn wir die Relationen und Funktionen in $\tau \setminus \sigma$ einfach weglassen. Ist \mathfrak{A} Redukt einer τ -Struktur \mathfrak{B} , so nennen wir \mathfrak{B} eine τ -*Expansion* von \mathfrak{A} .

Beispiel. Die additive Gruppe der reellen Zahlen $(\mathbb{R}, +, 0)$ ist das $\{+, 0\}$ -Redukt des Körpers der reellen Zahlen $(\mathbb{R}, +, \cdot, 0, 1)$.

2.2 Ein Zoo von Strukturen

MENGEN. Sei $\tau = \emptyset$. Die \emptyset -Struktur mit Universum A ist einfach die Menge A .

GRAPHEN. Die Signatur von Graphen ist $\tau_G = \{E\}$, wobei E ein binäres Relationssymbol ist. Eine beliebige τ_G -Struktur ist ein *gerichteter Graph*. Ein *ungerichteter Graph* ist eine τ_G -Struktur $G = (V, E^G)$ mit Punktmenge V (dem Universum von G) und einer Relation $E^G \subseteq V \times V$, welche folgende Bedingungen erfüllt:

(Keine Schlingen) Für alle $v \in V$ gilt: $(v, v) \notin E^G$.

(Symmetrie) Für alle $u, v \in V$: Wenn $(u, v) \in E^G$, dann auch $(v, u) \in E^G$.

LINEARE UND PARTIELLE ORDNUMGEN. Eine partielle Ordnung ist eine $\{\langle \rangle\}$ -Struktur (A, \langle) welche folgende Bedingungen erfüllt:

(Irreflexivität) Für kein $a \in A$ gilt $a < a$.

(Transitivität) Wenn $a < b$ und $b < c$, dann auch $a < c$.

Daraus folgt insbesondere auch, dass \langle *antisymmetrisch* ist: Wenn $a < b$, dann *nicht* $b < a$.

Eine *lineare* oder *totale* Ordnung erfüllt als zusätzliche Bedingung:

(Vergleichbarkeit) Für alle a, b gilt $a < b$, $a = b$ oder $b < a$.

Offensichtlich sind (\mathbb{N}, \langle) und (\mathbb{R}, \langle) (mit der üblichen Interpretation von \langle) lineare Ordnungen. Für jede Menge A ist $(\mathcal{P}(A), \subset)$ eine partielle Ordnung, für $|A| > 1$ aber keine lineare Ordnung.

Eine lineare Ordnung ist *dicht*, wenn zu zwei beliebigen Elementen $a < b$ immer ein c existiert mit $a < c < b$.

Eine *Wohlordnung* ist eine lineare Ordnung (A, \langle) ohne unendliche absteigende Ketten: Es gibt keine unendliche Folge a_0, a_1, a_2, \dots in A so dass $a_{i+1} < a_i$ für alle $i \in \mathbb{N}$. Zum Beispiel ist (\mathbb{N}, \langle) eine Wohlordnung während (\mathbb{Z}, \langle) oder (\mathbb{Q}^+, \langle) keine Wohlordnungen sind.

WORTSTRUKTUREN. Sei Γ ein *Alphabet*, d.h. eine beliebige, in der Regel abzählbare, Menge von Symbolen. Ein *Wort* über Γ ist eine endliche Folge $w = w_0 \cdots w_{n-1}$ von Symbolen aus Γ . Jedem solchen Wort w ordnen wir eine Struktur $\mathfrak{B}(w)$ der Signatur $\{\langle \rangle\} \cup \{P_a : a \in \Gamma\}$ mit einstellig Relationssymbolen P_a zu. Das Universum von $\mathfrak{B}(w)$ ist die Menge $\{0, \dots, n-1\}$ der Positionen an denen Symbole stehen, \langle ist die übliche Ordnung auf dieser Menge und $P_a := \{i < n : w_i = a\}$

ist die Menge der Positionen an denen im Wort w das Symbol a steht. Das Wort $w = abbcab$ über dem Alphabet $\{a, b, c\}$ wird also durch die Wortstruktur

$$\mathfrak{B}(w) = (\{0, 1, 2, 3, 4, 5\}, <, P_a, P_b, P_c)$$

mit $P_a = \{0, 4\}$, $P_b = \{1, 2, 5\}$ und $P_c = \{3\}$ repräsentiert.

In der Logik wird die Menge der natürlichen Zahlen oft mit ω bezeichnet. Ein *unendliches Wort* oder ω -Wort ist eine unendliche Folge $z = z_0z_1 \dots \in \Gamma^\omega$ von Symbolen aus Γ . Die entsprechende Wortstruktur ist $\mathfrak{B}(z) := (\omega, <, (P_a)_{a \in \Gamma})$ mit $P_a = \{i \in \omega : z_i = a\}$.

Bemerkung (Bemerkung zur Anwendung). In der Automatentheorie wird häufig der Zusammenhang zwischen Logiken und Automatenmodellen untersucht. Dafür ist es notwendig, ein Wort (also die Eingabe für einen Automaten) als Struktur (also als Objekt, über dem Formeln ausgewertet werden können) darzustellen.

TRANSITIONSSYSTEME. Ein Transitionssystem besteht aus einer Menge S von *Zuständen* und aus einer Menge A von *Aktionen* oder *Programmen*, welche Zustände in neue Zustände überführen. Zusätzlich hat man in der Regel eine Menge B von *Eigenschaften*, welche die Zustände haben oder nicht haben können. Ein solches Transitionssystem wird beschrieben durch eine Struktur mit Universum S , einer Menge $\{P_b : b \in B\}$ von monadischen (d.h. einstelligen) Relationen und einer Menge $\{E_a : a \in A\}$ von binären Relationen auf S . Dabei soll P_b die Menge der Zustände mit der Eigenschaft b sein, und die Relation E_a soll auf ein Paar (s, t) von Zuständen zutreffen, genau dann, wenn das Programm a den Zustand s in den Zustand t überführt.

Eine wichtige Methode zur Verifikation paralleler Systeme besteht darin, diese als Transitionssysteme zu modellieren und Bedingungen wie Fairness, Sicherheit, Deadlock-Freiheit etc. in einer geeigneten logischen Sprache zu formulieren und auf dem Transitionssystem auszuwerten. Formale Spezifikation und Verifikation solcher Systeme ist eine der wichtigsten Anwendungen der Logik in der Informatik.

RELATIONALE DATENBANKEN. Eine relationale Datenbank ist, informell gesprochen, eine endliche Kollektion von endlichen Tabellen, welche sich zeitlich verändern. Jede Zeile in einer solchen Tabelle R ist ein Tupel $(a_1, \dots, a_n) \in D_1 \times \dots \times D_n$ wobei D_1, \dots, D_n die den einzelnen Spalten (im Datenbank-Jargon: den Attributen) zugeordneten *Domänen* sind (z.B. Integers, Strings, ...). Sei D die Vereinigung aller in der Datenbank vorkommenden Domänen. Die Tabelle R kann dann als eine n -stellige Relation über D aufgefasst werden: $R \subseteq D^n$.

Ein aktueller Zustand der Datenbank ist also eine endliche Kollektion von endlichen Relationen R_1, \dots, R_m über dem (in der Regel unendlichen) Universum D . Dies entspricht der Struktur $\mathfrak{D} = (D, R_1, \dots, R_m)$.

Für viele Zwecke ist aber diese Formalisierung problematisch: Elementare Operationen wie die Bildung des Komplements einer Relation führen zu unendlichen Relationen. Daher ist eine Formalisierung durch eine *endliche* Struktur oft zweckmäßiger. Anstelle des unendlichen Universums D betrachte man die *aktive Domäne* $\text{ad}(\mathfrak{D})$, welche aus all denjenigen Objekten besteht, die in einer der Relationen R_1, \dots, R_m vorkommen, also

$$\begin{aligned} \text{ad}(\mathfrak{D}) := \{a \in D : \text{es gibt ein } R_i \text{ und ein } (b_1, \dots, b_r) \in R_i, \\ \text{so dass } b_j = a \text{ für ein } j \leq r\}. \end{aligned}$$

Da alle Relationen R_i endlich sind, ist auch $\text{ad}(\mathfrak{D})$ endlich und die endliche Substruktur $(\text{ad}(\mathfrak{D}), R_1, \dots, R_m)$ von \mathfrak{D} ist eine adäquate endliche Formalisierung des Datenbank-Zustandes.

Anfragen an eine Datenbank entsprechen dem Auswerten logischer Formeln auf (endlichen) Strukturen. Es bestehen daher enge Verbindungen zwischen der Mathematischen Logik und der Theorie relationaler Datenbanken. Ein Teilgebiet der mathematischen Logik befasst sich sogar mit der Datenbanktheorie, was insbesondere Fragestellungen zur Ausdrucksstärke von Logiken umfasst.

ARITHMETISCHE STRUKTUREN. Die Signatur der Arithmetik ist $\tau_{\text{ar}} = \{+, \cdot, 0, 1\}$, die Signatur der geordneten Arithmetik $\tau_{\text{ar}}^< = \tau_{\text{ar}} \cup \{<\}$, wobei wir annehmen, dass die Symbole $+, \cdot, 0, 1, <$ in der üblichen Wei-

se interpretiert werden. Trotzdem gibt es natürlich ganz verschiedene arithmetische Strukturen, z.B.:

- $\mathfrak{N} = (\mathbb{N}, +, \cdot, 0, 1)$, die *Standard-Arithmetik* der natürlichen Zahlen. Die *geordnete Standard-Arithmetik* ist $\mathfrak{N}^< = (\mathbb{N}, +, \cdot, 0, 1, <)$. Sie ist eine Expansion von \mathfrak{N} .
- Beliebige *Ringe*, insbesondere der Ring $\mathfrak{Z} = (\mathbb{Z}, +, \cdot, 0, 1)$ der ganzen Zahlen. Offensichtlich ist \mathfrak{Z} eine Erweiterung der Standard-Arithmetik \mathfrak{N} .
- Beliebige *Körper*, etwa den Körper $\mathfrak{R} = (\mathbb{R}, +, \cdot, 0, 1)$ der reellen Zahlen, den Körper $\mathfrak{Q} = (\mathbb{Q}, +, \cdot, 0, 1)$ der rationalen Zahlen oder endliche Körper.
- Die Standard-Arithmetik \mathfrak{N} lässt sich durch Hinzunahme von ‘unendlichen Elementen’ zu neuen arithmetischen Strukturen erweitern. Die einfachste Variante ist $(\mathbb{N} \cup \{\infty\}, +, \cdot, 0, 1)$ mit

$$a + \infty = \infty + a = a \cdot \infty = \infty \cdot a = \infty$$

für alle $a \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$.

Beweise in der Mathematik lassen sich grundlegend auf Ableitungen prädikatenlogischer Formeln über arithmetischen und anderen bekannten mathematischen Strukturen zurückführen. Man kann sogar sagen, dass die Logik dazu dient, eine formale Grundlage für die Mathematik zu beschreiben.

BOOLESCHE ALGEBREN. Sei A eine beliebige Menge. Die Boolesche Algebra über A ist $BA(A) = (\mathcal{P}(A), \cup, \cap, \bar{}, \emptyset, A)$, wobei $\cup, \cap, \bar{}$ Vereinigung, Durchschnitt und Komplement in A bedeuten.

GRUPPEN. Wie können Gruppen (im Sinne der Algebra) durch Strukturen gemäß Definition 2.2 formalisiert werden? Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten, abhängig davon, welche in Gruppen vorkommenden Funktionen und Relationen explizit (d.h. in der Signatur) vorkommen sollen. Mit den üblichen Bezeichnungen \circ für die Gruppenoperation, e für das neutrale Element, g^{-1} für das zu g inverse Element ergeben sich sofort die Möglichkeiten

- (1) $\mathfrak{G} = (G, \circ)$,
- (2) $\mathfrak{G} = (G, \circ, e)$ und
- (3) $\mathfrak{G} = (G, \circ, e, {}^{-1})$.

Die Wahl der Signatur ist abhängig von der jeweiligen Absicht: Will man eine möglichst minimale Formalisierung, wird man (1) oder (2) wählen, da die Gruppe dadurch bereits eindeutig festgelegt ist. Andererseits gibt es algebraische Überlegungen, welche die dritte Möglichkeit nahelegen: Wenn die Funktion ${}^{-1}$ hinzugenommen wird, sind die Substrukturen von \mathfrak{G} genau die Untergruppen. Dies ist nicht der Fall bei den beiden ersten Formalisierungen. So ist etwa $(\mathbb{N}, +, 0)$ eine Substruktur von $(\mathbb{Z}, +, 0)$ (der additiven Gruppe der ganzen Zahlen), aber offensichtlich keine Untergruppe.

In der Praxis sind oft noch ganz andere Operationen wesentlich, etwa die Multiplikation mit erzeugenden Elementen der Gruppe.

VEKTORRÄUME. Zum Abschluss diskutieren wir das Problem der Formalisierung von Vektorräumen. Interessant ist dies deshalb, weil hier Objekte verschiedener Art auftreten: Vektoren und Skalare.

Sei etwa V ein Vektorraum über dem Körper K . Man kann eine Formalisierung wählen, in der das Universum ausschließlich aus den Vektoren besteht, und die Elemente des Grundkörpers als Operationen auf dem Universum in Erscheinung treten. Dem Vektorraum entspricht dann die algebraische Struktur $(V, +, 0, (f_k)_{k \in K})$ mit $f_k(v) := kv$ (Multiplikation mit Skalar k). Für algebraische Überlegungen ist dies bei festem Grundkörper K die geeignete Formalisierung, da die Substrukturen genau den linearen Unterräumen entsprechen (Abgeschlossenheit unter Addition und unter Multiplikation mit Skalaren). Wenn wir im folgenden über Vektorräume sprechen, ist meistens diese Formalisierung gemeint.

2.3 Syntax der Prädikatenlogik

Wir fixieren eine Signatur τ und definieren die Menge der τ -Terme und die Menge der τ -Formeln induktiv als Wortmengen über einem Alphabet $\text{Alph}(\tau)$, welches aus folgenden Symbolen besteht:

- den Relations- und Funktionssymbolen in τ ,
- einer festen abzählbar unendlichen Menge $\text{VAR} = \{v_0, v_1, v_2, \dots\}$ von Variablen,
- dem Gleichheitszeichen $=$,
- den aussagenlogischen Junktoren \neg, \wedge, \vee und \rightarrow ,
- dem Existenzquantor \exists und dem Allquantor \forall ,
- den Klammersymbolen $(,)$.

τ -Terme sind bestimmte Wörter über diesem Alphabet, welche aus Variablen und Funktionszeichen zusammengesetzt sind. Wir verwenden hier eine klammerfreie Notation.

Definition 2.5. Die Menge $T(\tau)$ der τ -Terme ist induktiv wie folgt definiert:

- $\text{VAR} \subseteq T(\tau)$, d.h. jede Variable ist ein τ -Term.
- Sind t_1, \dots, t_n τ -Terme und f ein n -stelliges Funktionssymbol aus τ , so ist auch $ft_1 \cdots t_n$ ein τ -Term.

Wenn wir einen Term in der Form $t(x_1, \dots, x_n)$ schreiben, dann meinen wir, dass x_1, \dots, x_n paarweise verschiedene Variablen sind und dass in t keine anderen Variablen als diese vorkommen.

Man beachte, dass insbesondere jedes Konstantensymbol c aus τ ein τ -Term ist. Ein *Grundterm* ist ein Term in dem keine Variablen auftreten.

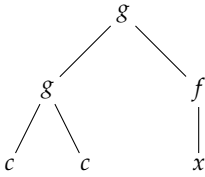
Beispiel. Die Signatur τ enthalte die Funktionssymbole f (einstellig), g (zweistellig) und c (nullstellig). Sei $x \in \text{VAR}$ eine Variable. Dann sind die folgenden Wörter τ -Terme.

$$x, c, fx, fc, gxx, gfxc, ggccfx.$$

Dabei sind c und fc Grundterme.

Es ist oft nützlich, Terme als Bäume aufzufassen. Die Baumnotation

des Terms $ggccfx$ ist:



Eindeutige Lesbarkeit von Termen. Jedes Wort in $\text{Alph}(\tau)^*$ kann auf höchstens eine Weise als ein Term aufgefasst werden. Um dies nachzuweisen, zeigt man zunächst per Induktion über den Termaufbau, dass kein τ -Term ein echtes Anfangsstück eines andern τ -Terms sein kann. Daraus folgt, dass für jeden Term $ft_1 \cdots t_n$ die unmittelbaren Unterterme t_1, \dots, t_n eindeutig bestimmt sind.

Definition 2.6. Die Menge $\text{FO}(\tau)$ der τ -Formeln der Prädikatenlogik ist induktiv definiert wie folgt:

- (1) Sind t_1, t_2 τ -Terme dann ist $t_1 = t_2$ eine τ -Formel.
- (2) Sind t_1, \dots, t_n τ -Terme und ist $P \in \tau$ ein n -stelliges Relationssymbol, dann ist $Pt_1 \cdots t_n$ eine τ -Formel.
- (3) Wenn ψ eine τ -Formel ist, dann auch $\neg\psi$.
- (4) Wenn ψ und φ τ -Formeln sind, dann auch $(\psi \wedge \varphi)$, $(\psi \vee \varphi)$ und $(\psi \rightarrow \varphi)$.
- (5) Wenn ψ eine τ -Formel ist und $x \in \text{VAR}$ eine Variable, dann sind $\exists x\psi$ und $\forall x\psi$ τ -Formeln.

Eine Formel, die nur nach den Regeln (1) und (2) definiert ist, heißt *atomar*, *Atom-Formel* oder einfach *Atom*. *Literale* sind Atome und deren Negationen. Formeln, die nur nach den Regeln (1) – (4) definiert sind, heißen *quantorenfrei*.

Wie in der Aussagenlogik ist auch die Syntax der Prädikatenlogik induktiv definiert. Man beachte allerdings, dass die Atome bereits induktiv definiert und damit beliebig komplexe Objekte sind.

Beispiel. Sei $\tau = \{E, f\}$, wobei E ein zweistelliges Relationssymbol und f ein einstelliges Funktionssymbol sind. Hier sind einige Formeln aus $\text{FO}(\{E, f\})$:

- $v_0 = v_1$,
- $((Ev_0v_0 \vee fv_0 = v_1) \wedge \neg Ev_1fv_0)$,
- $\forall v_0 \forall v_1 (\neg v_0 = v_1 \rightarrow Ev_0v_1)$,
- $\forall v_0 \forall v_1 (Ev_0v_1 \rightarrow \exists v_2 (Ev_0v_2 \wedge Ev_2v_0))$.

KONVENTIONEN ZUR NOTATION VON FORMELN. Wie bei der Aussagenlogik benutzen wir auch bei der Prädikatenlogik abkürzende oder vereinfachende Schreibweisen. Zum Beispiel bezeichnen wir Variablen in der Regel mit anderen Symbolen, etwa x, y, z, x_0, x_1, \dots , anstelle von $v_0, v_1, \dots \in \text{VAR}$. Für Terme, die aus Funktionssymbolen wie $+$, \cdot , \circ etc. gebildet werden, verwenden wir in der Regel die Infix-Notation $x + y$ statt $+xy$; ähnliches gilt für Atome wie etwa $t_1 < t_2$ oder gelegentlich auch xEy . Anstelle von $\neg t_1 = t_2$ schreiben wir $t_1 \neq t_2$. Wo dies für die Lesbarkeit nützlich ist, werden wir von der klammerfreien Notation von Termen abweichen: Zum Beispiel schreiben wir $x + (y + z) = (x + y) + z$ anstelle von $+x + yz = ++xyz$. Andererseits werden wir in Formeln oft Klammern weglassen, welche für das Verständnis überflüssig sind. Allerdings sind Klammern zur eindeutigen Lesbarkeit von Formeln mit Quantoren oft notwendig. So bezeichnet die Schreibweise $\forall x \varphi \vee \psi$ nicht die Formel $\forall x (\varphi \vee \psi)$, sondern könnte (weniger formal) auch als $(\forall x \varphi) \vee \psi$ geschrieben werden. Wie später bei der Definition der Semantik deutlich wird, sind diese Formeln nicht logisch äquivalent.

Man beachte, dass diese anschaulichen Mittelungsweisen keine Terme und Formeln im eigentlichen Sinn mehr sind sondern metasprachliche Umschreibungen solcher Objekte. Die präzise formale Definition der syntaktischen Objekte ist notwendig für die Präzisierung des Begriffs einer logischen Aussage, für die Analyse des Beweisbegriffs und insbesondere für die maschinelle Verarbeitung mathematischer Aussagen. Für die metasprachliche Kommunikation ist eine allzu formale Notation hingegen eher hinderlich als hilfreich. Dies gilt nicht nur für logische Formeln; auch in der Kommunikation über andere

syntaktische Objekte, etwa Computer-Programme (für die eine präzise Syntax natürlich zwingend erforderlich ist), wird man, etwa bei der Konzeption und Analyse informellere Beschreibungen vorziehen.

Wir weisen außerdem darauf hin, dass ein Ausdruck $t_1 = t_2$ je nach Kontext entweder eine Formel aus $\text{FO}(\tau)$ oder aber eine metasprachliche Aussage sein kann, welche die Gleichheit der beiden Terme t_1, t_2 als syntaktische Objekte ausdrückt. Um diese mögliche Quelle von Konfusionen zu vermeiden, kann man entweder zwei verschiedene Gleichheitszeichen einführen oder einfach versuchen, sorgfältig zu sein. Wir wählen hier die zweite Möglichkeit.

FREIE UND GEBUNDENE VARIABLEN. Ein Vorkommen einer Variablen x in einer Formel ψ kann *frei* oder *gebunden* sein. Es ist gebunden, wenn es in einer Unterformel der Form $\exists x\psi$ oder $\forall x\psi$ stattfindet, andernfalls ist es frei.

Beispiel. In der folgenden Formel sind unterstrichene Vorkommen von Variablen gebunden, nicht unterstrichene Vorkommen sind frei.

$$\exists \underline{x}(Eyz \wedge \forall \underline{z}(z = \underline{x} \vee Eyz)).$$

Man beachte, dass z in dieser Formel sowohl frei als auch gebunden vorkommt.

Formal ist die Menge der in einer Formel frei auftretenden Variablen wie folgt definiert.

Definition 2.7. Sei $t \in \text{T}(\tau)$ ein Term und $\psi \in \text{FO}(\tau)$ eine Formel. Mit $\text{var}(t)$ bzw. $\text{var}(\psi)$ bezeichnen wir die Menge aller in t bzw. ψ auftretenden Variablen. Die Menge $\text{frei}(\psi)$ der freien Variablen von ψ ist induktiv wie folgt definiert:

- Für atomare Formeln ψ ist $\text{frei}(\psi) := \text{var}(\psi)$.
- $\text{frei}(\neg\psi) := \text{frei}(\psi)$.
- $\text{frei}(\psi \circ \varphi) := \text{frei}(\psi) \cup \text{frei}(\varphi)$ für $\circ \in \{\wedge, \vee, \rightarrow\}$.
- $\text{frei}(\exists x\psi) = \text{frei}(\forall x\psi) := \text{frei}(\psi) \setminus \{x\}$.

Oft bezeichnen wir eine Formel in der Form $\psi(x_1, \dots, x_k)$, um anzudeuten, dass höchstens die Variablen x_1, \dots, x_k in ψ frei vorkommen. Ein τ -Satz ist eine τ -Formel ohne freie Variablen.

Mächtigkeit von $T(\tau)$ und $FO(\tau)$. Wenn τ abzählbar ist, dann auch das Alphabet $\text{Alph}(\tau)$. Es folgt dann, dass auch $\text{Alph}(\tau)^*$, und damit insbesondere $T(\tau)$ und $FO(\tau)$ abzählbar sind. Andererseits sind $T(\tau)$ und $FO(\tau)$ auch bei endlicher Signatur τ (sogar bei $\tau = \emptyset$) unendlich. In der Tat enthält $T(\tau)$ alle Variablen und $FO(\tau)$ alle Formeln $x = y$ für $x, y \in \text{VAR}$.

2.4 Semantik der Prädikatenlogik

Definition 2.8 (Modellbeziehung). Sei τ eine Signatur. Eine τ -Interpretation ist ein Paar $\mathfrak{J} = (\mathfrak{A}, \beta)$, wobei \mathfrak{A} eine τ -Struktur und $\beta : X \rightarrow A$ eine Belegung von Variablen durch Elemente von A ist. Dabei ist $X = \text{dom}(\beta) \subseteq \text{VAR}$. Eine τ -Interpretation $\mathfrak{J} = (\mathfrak{A}, \beta)$ ordnet

- jedem Term $t \in T(\tau)$ mit $\text{var}(t) \subseteq \text{dom}(\beta)$ einen Wert $\llbracket t \rrbracket^{\mathfrak{J}} \in A$ zu, und
- jeder Formel $\psi \in FO(\tau)$ mit $\text{frei}(\psi) \subseteq \text{dom}(\beta)$ einen Wahrheitswert $\llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}} \in \{0, 1\}$. (Wie üblich steht 0 für *falsch* und 1 für *wahr*.)

Die Zuordnung dieser Werte erfolgt induktiv gemäß dem Aufbau der Terme und Formeln. Für einen Term t ist $\llbracket t \rrbracket^{\mathfrak{J}}$ definiert durch:

- Für $x \in \text{dom}(\beta)$ ist $\llbracket x \rrbracket^{\mathfrak{J}} := \beta(x)$.
- Für $t = ft_1 \cdots t_n$ ist $\llbracket t \rrbracket^{\mathfrak{J}} := f^{\mathfrak{A}}(\llbracket t_1 \rrbracket^{\mathfrak{J}}, \dots, \llbracket t_n \rrbracket^{\mathfrak{J}})$.

Für atomare Formeln ψ ist $\llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}}$ wie folgt definiert:

- $\llbracket t_1 = t_2 \rrbracket^{\mathfrak{J}} := \begin{cases} 1 & \text{wenn } \llbracket t_1 \rrbracket^{\mathfrak{J}} = \llbracket t_2 \rrbracket^{\mathfrak{J}}, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$
- $\llbracket Pt_1 \cdots t_n \rrbracket^{\mathfrak{J}} := \begin{cases} 1 & \text{wenn } (\llbracket t_1 \rrbracket^{\mathfrak{J}}, \dots, \llbracket t_n \rrbracket^{\mathfrak{J}}) \in P^{\mathfrak{A}}, \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$

Die Bedeutung der Junktoren \neg, \wedge, \vee und \rightarrow ist genau die gleiche wie in der Aussagenlogik:

- $\llbracket \neg\psi \rrbracket^{\mathfrak{J}} := 1 - \llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}}$.
- $\llbracket \psi \vee \varphi \rrbracket^{\mathfrak{J}} := \max(\llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}}, \llbracket \varphi \rrbracket^{\mathfrak{J}})$.
- $\llbracket \psi \wedge \varphi \rrbracket^{\mathfrak{J}} := \min(\llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}}, \llbracket \varphi \rrbracket^{\mathfrak{J}})$.
- $\llbracket \psi \rightarrow \varphi \rrbracket^{\mathfrak{J}} := \llbracket \neg\psi \vee \varphi \rrbracket^{\mathfrak{J}} = \max(1 - \llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}}, \llbracket \varphi \rrbracket^{\mathfrak{J}})$.

Um $\llbracket \exists x\psi \rrbracket^{\mathfrak{J}}$ und $\llbracket \forall x\psi \rrbracket^{\mathfrak{J}}$ zu definieren, verwenden wir folgende Notation: Sei $\beta : X \rightarrow A$ eine Belegung, x eine Variable und a ein Element von A . Wir definieren eine neue Belegung $\beta[x/a] : X \cup \{x\} \rightarrow A$ durch

$$\beta[x/a](y) := \begin{cases} \beta(y) & \text{wenn } y \neq x, \\ a & \text{sonst.} \end{cases}$$

und definieren:

- $\llbracket \exists x\psi \rrbracket^{\mathfrak{J}} := \max_{a \in A} \llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}[x/a]}$.
- $\llbracket \forall x\psi \rrbracket^{\mathfrak{J}} := \min_{a \in A} \llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}[x/a]}$.

Es gilt also genau dann $\llbracket \exists x\psi \rrbracket^{\mathfrak{J}} = 1$, wenn ein $a \in A$ existiert, so dass $\llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}[x/a]} = 1$, und $\llbracket \forall x\psi \rrbracket^{\mathfrak{J}} = 1$, wenn für alle $a \in A$ gilt, dass $\llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}[x/a]} = 1$.

Ein *Modell* einer Formel ψ ist eine Interpretation $\mathfrak{J} = (\mathfrak{A}, \beta)$, so dass $\text{frei}(\psi) \subseteq \text{dom}(\beta)$ und $\llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{J}} = 1$. Wir schreiben dann: $(\mathfrak{A}, \beta) \models \psi$ oder auch $\mathfrak{A} \models \psi[\beta]$ und sagen, dass ψ in \mathfrak{A} unter der Belegung β gilt. Ist ψ ein Satz, schreiben wir auch $\mathfrak{A} \models \psi$.

Ein *Modell einer Formelmenge* $\Phi \subseteq \text{FO}(\tau)$ ist eine τ -Interpretation $\mathfrak{J} = (\mathfrak{A}, \beta)$, so dass $\mathfrak{A} \models \varphi[\beta]$ für alle $\varphi \in \Phi$ gilt. Ein Modell einer Formelmenge erfüllt also alle Formeln in dieser Menge gleichzeitig.

Man beachte, dass eine Formel $\psi \in \text{FO}(\sigma)$ auch zu $\text{FO}(\tau)$ gehört, wenn $\sigma \subseteq \tau$. Eine Interpretation (\mathfrak{A}, β) ist also *passend* für eine Formel ψ (oder eine Formelmenge Φ) wenn alle Funktions- und Relationssymbole von ψ (bzw. Φ) in der Signatur von \mathfrak{A} enthalten sind und alle freien Variablen von ψ (bzw. Φ) zum Definitionsbereich von β gehören. Offensichtlich ist für die Modellbeziehung die Interpretation der Relations- und Funktionssymbole, welche in ψ gar nicht vorkommen, sowie die Belegung der in ψ nicht frei auftretenden Variablen unerheblich. Dieser Sachverhalt, den man durch eine einfache, aber langweilige

Induktion über den Formelaufbau nachweisen kann, wird durch das Koinzidenzlemma ausgedrückt.

Lemma 2.9 (Koinzidenzlemma). Sei $\psi \in \text{FO}(\sigma \cap \tau)$, (\mathfrak{A}, β) eine σ -Interpretation und (\mathfrak{A}', β') eine τ -Interpretation, so dass folgendes gilt:

- (i) \mathfrak{A} und \mathfrak{A}' haben dasselbe $(\sigma \cap \tau)$ -Redukt: $\mathfrak{A} \upharpoonright (\sigma \cap \tau) = \mathfrak{A}' \upharpoonright (\sigma \cap \tau)$.
- (ii) $\text{frei}(\psi) \subseteq \text{dom}(\beta) \cap \text{dom}(\beta')$ und $\beta(x) = \beta'(x)$ für alle $x \in \text{frei}(\psi)$.

Dann gilt $\mathfrak{A} \models \psi[\beta]$ genau dann, wenn $\mathfrak{A}' \models \psi[\beta']$.

Notation. Wie erwähnt, deuten wir mit der Notation $\psi(x_1, \dots, x_k)$ an, dass $\text{frei}(\psi) \subseteq \{x_1, \dots, x_k\}$. Sei nun (\mathfrak{A}, β) eine Interpretation welche die Variablen x_1, \dots, x_k durch die Elemente $a_1 = \beta(x_1), \dots, a_k = \beta(x_k)$ bewertet. Wir schreiben dann anstelle von $\mathfrak{A} \models \psi[\beta]$ meistens $\mathfrak{A} \models \psi(a_1, \dots, a_k)$. (Diese Notation ist durch das Koinzidenzlemma gerechtfertigt, denn es gilt dann $\mathfrak{A} \models \psi[\beta']$ für *alle* Belegungen β' , welche x_1, \dots, x_k auf a_1, \dots, a_k abbilden.) Ist ψ ein Satz (also $\text{frei}(\psi) = \emptyset$) so schreiben wir $\llbracket \psi \rrbracket^{\mathfrak{A}} = 1$ bzw. $\mathfrak{A} \models \psi$ und nennen \mathfrak{A} ein Modell von ψ .

Beispiel. Sei $\psi := \exists z(Exz \wedge Ezy)$ und $\varphi := \forall x \forall y(Exy \rightarrow \psi)$. Offensichtlich ist ψ eine $\{E\}$ -Formel mit $\text{frei}(\psi) = \{x, y\}$ und φ ein $\{E\}$ -Satz.

Die Interpretation $\mathfrak{J} = (\mathfrak{A}, \beta)$ mit $\mathfrak{A} = (\mathbb{N}, E^{\mathfrak{A}})$, $E^{\mathfrak{A}} = \{(m, n) : m \text{ ist ein echter Teiler von } n\}$ und $\beta(x) = 2, \beta(y) = 36$ ist ein Modell von $\psi(x, y)$, d.h. $\mathfrak{A} \models \psi(2, 36)$. In der Tat existiert ein $m \in \mathbb{N}$ (z.B. $m = 6$), so dass unter der Belegung $\beta[z/m]$ die Formel $(Exz \wedge Ezy)$ in \mathfrak{A} gilt. Jedoch gilt *nicht* $\mathfrak{A} \models \varphi$, denn unter der Belegung $x \mapsto 2, y \mapsto 4$ ist $(Exy \rightarrow \psi)$ falsch in \mathfrak{A} (2 ist echter Teiler von 4, aber es gibt keine Zahl, welche echt von 2 geteilt wird und ihrerseits 4 echt teilt). Hingegen ist $(\mathbb{Q}, <)$ ein Modell von φ , da \mathbb{Q} dicht geordnet ist.

Definition 2.10. Sei Φ eine Menge von τ -Sätzen. Die *Modellklasse* von Φ (kurz: $\text{Mod}(\Phi)$) besteht aus allen τ -Strukturen \mathfrak{A} mit $\mathfrak{A} \models \Phi$. Eine Klasse \mathcal{K} von τ -Strukturen ist *axiomatisiert durch* Φ , wenn $\mathcal{K} = \text{Mod}(\Phi)$. Wir nennen Φ dann ein *Axiomensystem* für \mathcal{K} .

Beispiel.

- Die Klasse aller *ungerichteten Graphen* ist die Modellklasse von

$$\Phi_{\text{Graph}} = \{\forall x \neg Exx, \forall x \forall y (Exy \rightarrow Eyx)\}.$$

- Die Klasse aller *Gruppen* $(G, \circ, e, {}^{-1})$ ist axiomatisiert durch

$$\Phi_{\text{Gruppe}} = \{\forall x \forall y \forall z (x \circ (y \circ z) = (x \circ y) \circ z), \\ \forall x (x \circ e = x), \forall x (x \circ x^{-1} = e)\}.$$

- Ein Axiomensystem für die Klasse aller *linearen Ordnungen* ist

$$\Phi_{<} = \{\forall x \neg x < x, \forall x \forall y \forall z (x < y \wedge y < z \rightarrow x < z), \\ \forall x \forall y (x < y \vee x = y \vee y < x)\}.$$

- Für eine beliebige Signatur τ und $n \in \mathbb{N}$ sei $\mathcal{K}_{\geq n}$ die Klasse der τ -Strukturen mit mindestens n Elementen. $\mathcal{K}_{\geq n}$ ist (für $n \geq 2$) axiomatisiert durch den Satz

$$\varphi_{\geq n} := \exists x_1 \cdots \exists x_n \bigwedge_{1 \leq i < j \leq n} x_i \neq x_j.$$

Die Klasse \mathcal{K}_{∞} aller unendlichen τ -Strukturen ist axiomatisiert durch das unendliche Axiomensystem $\Phi_{\infty} = \{\varphi_{\geq n} : n \in \mathbb{N}\}$.

Die semantische Folgerungsbeziehung $\Phi \models \psi$ („ ψ folgt aus Φ “), sowie die Begriffe „erfüllbar“, „allgemeingültig“ und „logisch äquivalent“ ($\varphi \equiv \psi$) sind wie für die Aussagenlogik definiert.

Definition 2.11 (Semantische Folgerungsbeziehung). Sei $\Phi \subseteq \text{FO}(\tau)$ eine Formelmenge, $\psi \in \text{FO}(\tau)$ eine Formel. Wir sagen, dass ψ aus Φ folgt (kurz: $\Phi \models \psi$), wenn jede zu $\Phi \cup \{\psi\}$ passende Interpretation, welche ein Modell von Φ ist, auch Modell von ψ ist. Wenn $\Phi = \{\varphi\}$ schreiben wir auch $\varphi \models \psi$ anstelle von $\{\varphi\} \models \psi$.

Beispiel.

- $\Phi_{\text{Gruppe}} \models \psi$ bedeutet, dass ψ in jeder Gruppe gilt. Man beachte, dass Φ_{Gruppe} eine Menge von Sätzen ist, dass aber in ψ durchaus

freie Variablen vorkommen dürfen. Da jedes Modell von Φ_{Gruppe} auch ein Modell von ψ sein muss, bedeutet $\Phi_{\text{Gruppe}} \models \psi$, dass $(\mathcal{G}, \beta) \models \psi$ für jede Gruppe \mathcal{G} und jede Belegung β . Zum Beispiel gilt $\Phi_{\text{Gruppe}} \models x^{-1} \circ x = e$ (da in jeder Gruppe das (Rechts-)Inverse jedes Elements auch Linksinverses ist.) Hingegen ist $\Phi_{\text{Gruppe}} \not\models x \circ y = y \circ x$, da nicht jede Gruppe kommutativ ist.

- $\Phi_{\infty} \models \psi$ bedeutet, dass ψ in allen unendlichen Strukturen gilt.

Definition 2.12. Hat eine Formel ψ (oder eine Formelmenge Φ) ein Modell, so heißt ψ (bzw. Φ) *erfüllbar*, andernfalls *unerfüllbar*. Eine Formel ψ heißt *allgemeingültig* (kurz: $\models \psi$), wenn jede zu ψ passende Interpretation ein Modell von ψ ist. Dies ist äquivalent zu $\emptyset \models \psi$. Zwei Formeln ψ und φ heißen *logisch äquivalent* (kurz: $\psi \equiv \varphi$), wenn $\psi \models \varphi$ und $\varphi \models \psi$.

Definition 2.13. Sei ψ eine Formel mit freien Variablen x_1, \dots, x_k . Dann nennen wir die Sätze $\exists x_1 \dots \exists x_k \psi$ und $\forall x_1 \dots \forall x_k \psi$ den *existentiellen* bzw. *universellen Abschluss* von ψ .

Lemma 2.14.

- Eine Formel ist genau dann erfüllbar, wenn ihr existentieller Abschluss erfüllbar ist.
- Eine Formel ist genau dann allgemeingültig, wenn ihr universeller Abschluss allgemeingültig ist.

2.5 Normalformen

Der Begriff einer Normalform taucht in vielen Gebieten der Mathematik auf. Die allgemeine Situation ist die, dass auf einer Menge M von mathematischen Objekten (hier: von Formeln) ein Begriff der Äquivalenz gegeben ist (formalisiert durch eine Äquivalenzrelation¹ \sim). Angestrebt wird eine Aussage der Art, dass für eine bestimmte Teilmenge $N \subseteq M$ (von Objekten „in Normalform“) jede \sim -Äquivalenzklasse einen Repräsentanten in N besitzt. Oft sind auch stärkere Aussagen erwünscht, etwa über die effiziente Konstruierbarkeit solcher Repräsentanten. Ein

¹Erinnerung: Eine Äquivalenzrelation ist reflexiv, symmetrisch und transitiv. Die Äquivalenzklasse von a unter \sim ist $[a] = \{b \mid a \cong b\}$, Elemente von $[a]$ heißt Repräsentanten.

bekanntes Beispiel aus der Linearen Algebra sind die Sätze über Normalformen von Matrizen.

Wir sind hier interessiert an Normalformen für Formeln der Prädikatenlogik. Die zugrunde gelegte Äquivalenzrelation ist in der Regel die logische Äquivalenz; wir werden aber am Ende dieses Abschnitts auch eine Normalform für eine schwächere Äquivalenzrelation betrachten, nämlich die *Skolem-Normalform*.

Wir beginnen mit einer einfachen Beobachtung, welche die Technik begründet, Transformationen in äquivalente Formeln per Induktion über den Formelaufbau durchzuführen.

Lemma 2.15 (Ersetzungslemma). Für beliebige Formeln $\psi, \psi', \varphi, \varphi' \in \text{FO}(\tau)$ gilt:

- (i) Wenn $\psi \equiv \varphi$, dann auch $\neg\psi \equiv \neg\varphi$.
- (ii) Wenn $\psi \equiv \psi'$ und $\varphi \equiv \varphi'$, dann auch $(\psi \circ \varphi) \equiv (\psi' \circ \varphi')$ für $\circ \in \{\wedge, \vee, \rightarrow\}$.
- (iii) Wenn $\psi \equiv \varphi$, dann auch $\exists x\psi \equiv \exists x\varphi$ und $\forall x\psi \equiv \forall x\varphi$.
- (iv) Sei ϑ eine Teilformel von ψ und sei $\vartheta \equiv \varphi$. Sei weiter $\psi[\vartheta/\varphi]$ diejenige Formel, die man aus ψ erhält, indem man ϑ durch φ ersetzt. Dann ist $\psi \equiv \psi[\vartheta/\varphi]$.

Beweis. Die Aussagen (i)–(iii) sind trivial; (iv) ergibt sich durch Induktion über den Formelaufbau mittels (i)–(iii). Q.E.D.

REDUZIERTE FORMELN. Aus der Definition der Modellbeziehung ergibt sich sofort, dass für beliebige Formeln ψ, φ folgende Äquivalenzen gelten. (1) und (2) kennen wir bereits aus der Aussagenlogik.

- (1) $\psi \wedge \varphi \equiv \neg(\neg\psi \vee \neg\varphi)$,
- (2) $\psi \rightarrow \varphi \equiv \neg\psi \vee \varphi$ und
- (3) $\forall x\psi \equiv \neg\exists x\neg\psi$.

Daraus folgt, dass wir uns ohne Verlust an Ausdrucksstärke etwa auf die Junktoren \vee, \neg und den Quantor \exists beschränken können. Wir nennen Formeln, in denen die Symbole \wedge, \rightarrow und \forall nicht vorkommen, *reduziert*.

Lemma 2.16. Zu jeder Formel $\psi \in \text{FO}(\tau)$ kann man effektiv eine logisch äquivalente reduzierte Formel konstruieren.

Wir können daher in vielen Fällen die Betrachtung auf reduzierte Formeln beschränken. Der Vorteil der Verwendung reduzierter Formeln liegt darin, dass sie aus weniger Symbolen aufgebaut sind und daher konzisere Definitionen und kürzere Induktionsbeweise erlauben.² Ein Nachteil reduzierter Formeln ist, dass sie länger und schlechter lesbar werden.

NEGATIONSNORMALFORM. In manchen Situationen (z.B. für Auswertungsalgorithmen oder für die spieltheoretische Deutung der Semantik, siehe Abschnitt 2.6) ist es praktisch, den nicht-monotonen Junktor \rightarrow auszuschließen und die Anwendung der Negation auf atomare Formeln einzuschränken.

Definition 2.17. Eine Formel ist in *Negationsnormalform*, wenn sie aus Literalen (d.h. atomaren Formeln und Negationen atomarer Formeln) nur mit Hilfe der Junktoren \vee, \wedge und der Quantoren \exists und \forall aufgebaut ist.

Satz 2.18 (Satz über die Negationsnormalform). Jede Formel aus FO ist logisch äquivalent zu einer Formel in Negationsnormalform.

Beweis. Wir haben bereits gesehen, dass \rightarrow eliminiert werden kann. Durch wiederholte Anwendung der De Morganschen Regeln

$$\neg(\psi \wedge \varphi) \equiv (\neg\psi \vee \neg\varphi), \quad \neg(\psi \vee \varphi) \equiv (\neg\psi \wedge \neg\varphi)$$

und den Quantorenregeln

$$\neg\exists x\psi \equiv \forall x\neg\psi, \quad \neg\forall x\psi \equiv \exists x\neg\psi$$

sowie der Regel

$$\frac{}{\neg\neg\psi \equiv \psi}$$

²Aus diesem Grund wird in einigen Lehrbüchern die Prädikatenlogik nur mit den Junktoren \vee, \neg und dem Existenzquantor eingeführt. Formeln mit $\wedge, \vee, \rightarrow$ und \forall werden als abkürzende, informelle Schreibweisen für die eigentlichen, reduzierten Formeln verstanden.

kann jede FO-Formel in eine äquivalente Formel transformiert werden, in der Negationen nur noch auf Atome angewandt werden. Q.E.D.

Beispiel. Um die Formel $\neg\exists x(Rxy \wedge \forall z(Sxz \rightarrow Ryy))$ in Negationsnormalform zu überführen, zieht man die Negationen schrittweise „nach innen“ und eliminiert \rightarrow :

$$\begin{aligned} \neg\exists x(Rxy \wedge \forall z(Sxz \rightarrow Ryy)) &\equiv \forall x\neg(Rxy \wedge \forall z(Sxz \rightarrow Ryy)) \\ &\equiv \forall x(\neg Rxy \vee \neg\forall z(Sxz \rightarrow Ryy)) \\ &\equiv \forall x(\neg Rxy \vee \exists z\neg(Sxz \rightarrow Ryy)) \\ &\equiv \forall x(\neg Rxy \vee \exists z(Sxz \wedge \neg Ryy)) \end{aligned}$$

TERMREDUZIERTE FORMELN. Eine weitere Normalform, welche insbesondere für die Elimination von Funktionen nützlich ist, betrifft die Komplexität der darin auftretenden Terme. Eine Formel heißt *termreduziert*, wenn sie nur Atome der Form $R\bar{x}$, $f\bar{x} = y$ und $x = y$ enthält (also insbesondere keine Terme der Tiefe ≥ 2).

Termreduzierte Formeln ermöglichen einfachere Induktionsbeweise, weil so keine Induktion über den Aufbau der atomaren Formeln notwendig ist.

Lemma 2.19. Zu jeder Formel gibt es eine logisch äquivalente termreduzierte Formel.

Beweis. Wenn ψ nicht termreduziert ist, dann enthält ψ einen Term t der Form $t = f\bar{x}$, der in ψ an einer „verbotenen“ Stelle auftritt (z.B. als Argument in einem Atom $R\dots t\dots$ oder $t = t'$, oder als Subterm eines komplizierteren Terms). Führe eine neue Variable x_t ein und ersetze jedes Atom α , das t an einer solchen Stelle enthält, durch $\exists x_t(x_t = t \wedge \alpha[t/x_t])$, wobei $\alpha[t/x_t]$ die Formel sein soll, die man durch Ersetzen von t durch x_t gewinnt. Offensichtlich ist die modifizierte Formel logisch äquivalent zu ψ . Dieser Eliminationsschritt wird solange ausgeführt, bis ψ termreduziert ist. Q.E.D.

PRÄNEX-NORMALFORM. Wir betrachten zunächst einige logische Äquivalenzen für einfache Quantorenanwendungen.

Lemma 2.20. Für alle Formeln $\psi, \varphi \in \text{FO}(\tau)$ gelten die folgenden logischen Äquivalenzen.

(i) $\exists x(\psi \vee \varphi) \equiv \exists x\psi \vee \exists x\varphi$ und $\forall x(\psi \wedge \varphi) \equiv \forall x\psi \wedge \forall x\varphi$.

(ii) Falls x nicht in ψ vorkommt, gilt:

$$\psi \vee \exists x\varphi \equiv \exists x(\psi \vee \varphi), \quad \psi \wedge \exists x\varphi \equiv \exists x(\psi \wedge \varphi),$$

$$\psi \vee \forall x\varphi \equiv \forall x(\psi \vee \varphi), \quad \psi \wedge \forall x\varphi \equiv \forall x(\psi \wedge \varphi).$$

(iii) $\neg\exists x\psi \equiv \forall x\neg\psi$ und $\neg\forall x\psi \equiv \exists x\neg\psi$.

(iv) $\exists x\exists y\psi \equiv \exists y\exists x\psi$ und $\forall x\forall y\psi \equiv \forall y\forall x\psi$.

Beweis. Wir führen exemplarisch den Beweis für die erste Behauptung in (ii) vor. Für jede zu beiden Seiten der Äquivalenz passende Interpretation $\mathcal{I} = (\mathfrak{A}, \beta)$ gilt:

$$\mathcal{I} \models \psi \vee \exists x\varphi$$

gdw. $\mathcal{I} \models \psi$ oder es gibt ein $a \in A$, so dass $\mathcal{I}[x/a] \models \varphi$

gdw. es gibt ein $a \in A$, so dass $\mathcal{I}[x/a] \models \psi$ oder $\mathcal{I}[x/a] \models \varphi$

(Da $x \notin \text{frei}(\psi)$ gilt nach dem Koinzidenzlemma,

dass $\mathcal{I} \models \psi$ gdw. $\mathcal{I}[x/a] \models \psi$.)

gdw. es gibt ein $a \in A$, so dass $\mathcal{I}[x/a] \models \psi \vee \varphi$

gdw. $\mathcal{I} \models \exists x(\psi \vee \varphi)$.

Q.E.D.

Man beachte, dass einige zu (i) ganz ähnlich aussehende Formelpaare *nicht* äquivalent sind:

$$\exists x(\psi \wedge \varphi) \not\equiv \exists x\psi \wedge \exists x\varphi,$$

$$\forall x(\psi \vee \varphi) \not\equiv \forall x\psi \vee \forall x\varphi.$$

Weiter ist zu beachten, dass die Äquivalenzen in (ii) nicht gelten müssen, wenn x in ψ vorkommt.

Beispiel. Die Formel $\forall x(Px \vee Qx)$ ist weder zu $\forall xPx \vee \forall xQx$ noch zu $Px \vee \forall xQx$ äquivalent.

Wir sehen also, dass wir auf Konflikte zwischen freien und gebundenen Variablen achten müssen. Offensichtlich können wir aber gebundene Variablen umbenennen. Wenn die Variable y in $\exists x\psi$ nicht vorkommt, dann ist nämlich $\exists x\psi \equiv \exists y\psi[x/y]$. Wir nennen eine Formel ψ *bereinigt*, wenn keine Variable in ψ sowohl frei wie gebunden auftritt, und wenn keine Variable mehr als einmal quantifiziert wird. Per Induktion über den Formelaufbau folgt, dass man durch systematisches Umbenennen gebundener Variablen zu jeder Formel eine äquivalente bereinigte Formel konstruieren kann.

Definition 2.21. Eine Formel ist in *Pränex-Normalform* (PNF), wenn sie bereinigt ist und die Form $Q_1x_1 \cdots Q_rx_r\varphi$ hat, wobei φ quantorenfrei und $Q_i \in \{\exists, \forall\}$ ist. Das Anfangsstück $Q_1x_1 \cdots Q_rx_r$ nennt man das (*Quantoren-*)*Präfix* der Formel.

Die Pränex-Normalform ermöglicht es also, den quantorenfreien Teil einer Formel und das Quantorenpräfix unabhängig voneinander zu untersuchen. Außerdem wird oft die Ausdrucksstärke von prädikatenlogischen Formeln anhand der Struktur des Quantorenpräfix klassifiziert.

Satz 2.22 (Satz über die Pränex-Normalform). Jede Formel $\psi \in \text{FO}(\tau)$ lässt sich in eine logisch äquivalente Formel in Pränex-Normalform transformieren.

Beweis. Der Beweis wird per Induktion über den Aufbau von ψ geführt. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit können wir annehmen, dass ψ den Junktor \rightarrow nicht enthält.

- Quantorenfreie Formeln sind bereits in PNF.
- Sei $\psi = \neg\varphi$. Nach Induktionsvoraussetzung kann φ in eine logisch äquivalente Formel $\varphi' = Q_1x_1 \cdots Q_rx_r\vartheta'$ transformiert werden. Durch wiederholte Anwendung von Lemma 2.20 (iii) folgt, dass

$$\psi \equiv \overline{Q_1}x_1 \cdots \overline{Q_r}x_r\neg\vartheta'$$

wobei $\overline{\exists} := \forall$ und $\overline{\forall} := \exists$. Diese Formel hat die gewünschte Form.

- Sei $\psi = \varphi_1 \circ \varphi_2$ für $\circ \in \{\vee, \wedge\}$. Nach Induktionsvoraussetzung lassen sich φ_1 und φ_2 in logisch äquivalente Formeln in PNF umformen. Durch Umbenennung gebundener Variablen erreichen wir, dass diese Formeln die Form $\varphi'_1 = Q_1x_1 \cdots Q_r x_r \vartheta_1$ und $\varphi'_2 = Q'_1y_1 \cdots Q'_s y_s \vartheta_2$ haben, wobei $x_1, \dots, x_r, y_1, \dots, y_s$ paarweise verschieden und verschieden von allen freien Variablen in φ_1 und φ_2 sind. Sei nun

$$\psi' := Q_1x_1 \cdots Q_r x_r Q'_1y_1 \cdots Q'_s y_s (\vartheta'_1 \circ \vartheta'_2).$$

Diese Formel hat die gewünschte Form, und da die Variablen y_1, \dots, y_s nicht in φ'_1 und x_1, \dots, x_r nicht in φ'_2 vorkommen, folgt mit Lemma 2.20 (ii), dass $\psi \equiv \psi'$.

- Sei $\psi = Qx\varphi$ für $Q \in \{\exists, \forall\}$ und sei $\varphi' := Q_1x_1 \cdots Q_r x_r \vartheta'$ eine zu φ äquivalente Formel in PNF. Durch Umbenennen kann erreicht werden, dass die gebundenen Variablen von φ' von x verschieden sind. Dann ist $Qx\varphi'$ eine zu ψ äquivalente Formel in PNF. Q.E.D.

Beispiel. Sei $\psi := \neg\forall x\neg Rxx \wedge \forall x\exists y(Rxy \wedge (\neg Ryy \wedge \exists xRyx))$. Die Transformation in eine äquivalente Formel in PNF, gemäß dem im Beweis beschriebenen Verfahren, ergibt:

$$\begin{aligned} \psi &\equiv \exists xRxx \wedge \forall x\exists y(Rxy \wedge \exists x(\neg Ryy \wedge Ryx)) \\ &\equiv \exists uRu u \wedge \forall x\exists y\exists z(Rxy \wedge (\neg Ryy \wedge Ryz)) \\ &\equiv \exists u\forall x\exists y\exists z(Ruu \wedge Rxy \wedge \neg Ryy \wedge Ryz). \end{aligned}$$

Übung 2.1. Geben Sie zu den folgenden Formeln äquivalente Formeln in PNF an:

- $\forall x\exists yPxy \vee (\neg Qz \wedge \neg\exists xRxy),$
- $\exists yRxy$ gdw. $\forall xRxx.$

SKOLEM-NORMALFORM. Im Gegensatz zur Pränex-Normalform ist die *Skolem-Normalform* einer Formel im Allgemeinen nicht zur ursprünglichen Formel logisch äquivalent; sie ist jedoch *erfüllbarkeitsäquivalent*

(d.h. die Formel in Skolem-Normalform genau dann erfüllbar, wenn die ursprüngliche Formel erfüllbar ist).

Formeln werden oft in Skolem-Normalform überführt, bevor sie algorithmisch verarbeitet werden, z.B. in automatisierten Beweissystemen oder für prädikatenlogische Resolution (eine Variante der zuvor vorgestellten aussagenlogischen Resolution).

Satz 2.23 (Satz über die Skolem-Normalform). Zu jedem Satz $\psi \in \text{FO}(\sigma)$ lässt sich ein Satz $\varphi \in \text{FO}(\tau)$ mit $\sigma \subseteq \tau$ konstruieren, so dass gilt:

- (i) $\varphi = \forall y_1 \cdots \forall y_s \varphi'$, wobei φ' quantorenfrei ist.
- (ii) $\varphi \models \psi$.
- (iii) Zu jedem Modell von ψ existiert eine Expansion, welche Modell von φ ist.

Die letzten beiden Punkte implizieren insbesondere, dass ψ und φ über den selben Universen erfüllbar sind.

Beweis. Nach dem Satz über die Pränex-Normalform können wir ohne Beschränkung der Allgemeinheit annehmen, dass

$$\psi = Q_1 x_1 \dots Q_r x_r \vartheta(x_1, \dots, x_r),$$

wobei $\vartheta(x_1, \dots, x_r)$ quantorenfrei ist. Für jedes $k \leq r$ sei

$$\psi_k(x_1, \dots, x_k) := Q_{k+1} x_{k+1} \dots Q_r x_r \vartheta(x_1, \dots, x_k, x_{k+1}, \dots, x_r).$$

Wir eliminieren Existenzquantoren schrittweise von außen nach innen durch folgenden Algorithmus. Sei Q_k der vorderste Existenzquantor. Die gegebene Formel hat also die Form

$$\psi = \forall x_1 \dots \forall x_{k-1} \exists x_k \psi_k(x_1, \dots, x_k).$$

Sei f ein neues, d.h. nicht in ψ vorkommendes, $(k-1)$ -stelliges Funktionssymbol (für $k=1$ also ein Konstantensymbol). Setze

$$\psi' := \forall x_1 \dots \forall x_{k-1} \psi_k(x_1, \dots, x_{k-1}, f x_1 \cdots x_{k-1}).$$

Also ist ψ' die Formel, die wir aus ψ erhalten, indem wir die vorderste existentiell quantifizierte Variable x_k durch den Term $f x_1 \dots x_{k-1}$ ersetzen und den dazugehörigen Existenzquantor $\exists x_k$ eliminieren. Offensichtlich liefert die Iteration dieses Eliminationsschrittes schließlich eine Formel der gewünschten syntaktischen Gestalt. Zu zeigen bleibt, dass $\psi' \models \psi$ und dass jedes Modell von ψ zu einem Modell von ψ' expandiert werden kann.

Zur ersten Behauptung nehmen wir an, dass

$$\mathfrak{A} \models \psi' := \forall x_1 \dots \forall x_{k-1} \psi_k(x_1, \dots, x_{k-1}, f x_1 \dots x_{k-1}).$$

Also folgt, dass für alle $a_1, \dots, a_{k-1} \in A$, und für $b := f^{\mathfrak{A}}(a_1, \dots, a_{k-1})$ gilt, dass $\mathfrak{A} \models \psi_k(a_1, \dots, a_{k-1}, b)$. Damit ist gezeigt, dass

$$\mathfrak{A} \models \forall x_1 \dots \forall x_{k-1} \exists x_k \psi_k(x_1, \dots, x_k),$$

also $\mathfrak{A} \models \psi$.

Zur zweiten Behauptung nehmen wir an, dass $\mathfrak{A} \models \psi$. Da f in ψ nicht vorkommt, können wir annehmen, dass f nicht in der Signatur von \mathfrak{A} enthalten ist. Wir definieren eine Funktion $f^{\mathfrak{A}} : A^{k-1} \rightarrow A$, so dass die Expansion $(\mathfrak{A}, f^{\mathfrak{A}})$ ein Modell von ψ' ist.

Da $\mathfrak{A} \models \forall x_1 \dots \forall x_{k-1} \exists x_k \psi_k(x_1, \dots, x_k)$ gibt es für alle a_1, \dots, a_k ein b , so dass $\mathfrak{A} \models \psi_k(a_1, \dots, a_{k-1}, b)$. Wir wählen nun für jedes Tupel (a_1, \dots, a_{k-1}) ein solches b und setzen $f^{\mathfrak{A}}(a_1, \dots, a_{k-1}) := b$. Offensichtlich gilt also für alle a_1, \dots, a_{k-1} , dass $(\mathfrak{A}, f^{\mathfrak{A}}) \models \psi_k(a_1, \dots, a_{k-1}, b)$. Damit folgt, dass

$$(\mathfrak{A}, f^{\mathfrak{A}}) \models \forall x_1 \dots \forall x_{k-1} \psi_k(x_1, \dots, x_{k-1}, f x_1 \dots x_{k-1}),$$

d.h. $(\mathfrak{A}, f^{\mathfrak{A}}) \models \psi'$.

Q.E.D.

Übung 2.2 (Relationale Skolem-Normalform). Zeigen Sie, dass zu jeder Formel $\psi \in \text{FO}(\sigma)$ eine *relationale* Formel $\varphi \in \text{FO}(\tau)$ der Gestalt $\forall x_1 \dots \forall x_r \exists y_1 \dots \exists y_s \eta$ mit quantorenfreiem η existiert, so dass ψ und φ über den selben Universen erfüllbar sind.

2.6 Spieltheoretische Semantik

Denn, um es endlich auf einmal herauszusagen,
 der Mensch spielt nur,
 wo er in voller Bedeutung des Wortes Mensch ist,
 und er ist nur da ganz Mensch, wo er spielt.

Friedrich Schiller: Über die ästhetische Erziehung des Menschen

Nessuno ha mai sostenuto seriamente che i giochi siano inutili.

Umberto Eco: Über Gott und die Welt

Die Semantik der Prädikatenlogik kann man auch spieltheoretisch formulieren. Diese Formulierung liefert oft eine intuitivere Sichtweise auf komplexere Formeln. Aus dem hier vorgestellten Auswertungsspiel ergibt sich außerdem ein Algorithmus zur Auswertung von prädikatenlogischen Formeln.

Ein FO-Satz ψ und eine dazu passende Struktur \mathfrak{A} definieren ein *Auswertungsspiel* (Model-Checking-Spiel) $MC(\mathfrak{A}, \psi)$ zwischen zwei Spielern, der *Verifiziererin* V und dem *Falsifizierer* F . Die Verifiziererin möchte zeigen, dass \mathfrak{A} ein Modell für ψ ist, der Falsifizierer möchte nachweisen, dass dies nicht der Fall ist.

Der Einfachheit halber nehmen wir hier an, dass ψ in Negationsnormalform ist. Die Positionen des Spiels sind Paare (φ, β) bestehend aus einer Unterformel φ von ψ und einer Belegung $\beta : \text{frei}(\varphi) \rightarrow A$. Für $\varphi = \varphi(\bar{x})$ und $\beta : \bar{x} \mapsto \bar{a}$ bezeichnen wir die Position (φ, β) in der Regel durch $\varphi(\bar{a})$.

Das Spiel beginnt bei der Position ψ . Sei $\varphi(\bar{a})$ die aktuelle Position. Dann geht das Spiel, abhängig von der Gestalt von φ , wie folgt weiter:

- Wenn φ ein Literal ist, dann ist das Spiel beendet. Die Verifiziererin hat gewonnen, falls $\mathfrak{A} \models \varphi(\bar{a})$, andernfalls hat der Falsifizierer gewonnen.
- An einer Position $(\vartheta \vee \eta)$ ist die Verifiziererin am Zug und kann entweder zu ϑ oder zu η ziehen.
- Analog zieht von einer Position $(\vartheta \wedge \eta)$ der Falsifizierer entweder zu ϑ oder zu η .

- An einer Position der Form $\exists x\vartheta(x, \bar{b})$ wählt die Verifiziererin ein Element $a \in A$ und zieht zu $\vartheta(a, \bar{b})$.
- Entsprechend darf an einer Position der Form $\forall x\vartheta(x, \bar{b})$ der Falsifizierer ein Element $a \in A$ auswählen und zur Position $\vartheta(a, \bar{b})$ ziehen.

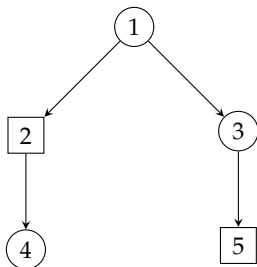


Abbildung 2.1. Ein Spielgraph

ENDLICHE SPIELE. Wir geben hier eine allgemeinere Beschreibung von Spielen an (genauer: von Zweipersonenspielen mit vollständiger Information und positionalen Gewinnbedingungen). Wir bezeichnen die Spieler als Spieler 0 und Spieler 1 und beschreiben das Spiel durch einen Spielgraphen $\mathcal{G} = (V, V_0, E)$ bestehend aus

- der Menge V aller *Spielpositionen*,
- der Teilmenge $V_0 \subseteq V$ der Positionen, an denen Spieler 0 am Zug ist; entsprechend ist $V_1 := V \setminus V_0$ die Menge der Positionen an denen Spieler 1 am Zug ist,
- der Menge $E \subseteq V \times V$ der möglichen *Züge*.

Beispiel. Abbildung 2.1 zeigt einen Spielgraphen. Dabei ist die Menge V_0 mit Kreisen, die Menge V_1 mit Rechtecken dargestellt.

Für eine Position v sei $vE := \{w : (v, w) \in E\}$ die Menge der unmittelbaren Nachfolgepositionen. Eine Position v mit $vE = \emptyset$ ist eine *Endposition*. Wenn im Spiel eine Endposition erreicht wird, hat der Spieler verloren der am Zug ist (aber nicht ziehen kann). Mit anderen

Worten: Für $\sigma \in \{0, 1\}$ ist die Menge T_σ der Endpositionen, an denen Spieler σ gewonnen hat, definiert durch

$$T_\sigma := \{v \in V_{1-\sigma} : vE = \emptyset\}.$$

Beispiel. Im Beispielgraphen hat also Spieler 0 in Knoten 4 verloren, und Spieler 1 verliert in Knoten 5.

Eine *Partie* mit Anfangsposition v_0 ist ein endlicher oder unendlicher Pfad (v_0, v_1, \dots, v_m) bzw. (v_0, v_1, \dots) , so dass $(v_{i-1}, v_i) \in E$ für alle $i > 0$ und v_m eine Endposition ist.

Beispiel. Partien sind z.B. die Folgen $(1, 2, 4)$ und $(3, 5)$ im Beispielgraphen.

Auswertungsspiele für FO sind insofern speziell als alle Partien endlich sind (da jeder Zug die Komplexität der Formel reduziert). Spiele mit dieser Eigenschaft nennt man *fundiert*.³

Eine *Strategie* für Spieler σ ist eine Funktion

$$f : \{v \in V_\sigma : vE \neq \emptyset\} \rightarrow V,$$

so dass $(v, f(v)) \in E$; sie ordnet also jeder nicht-terminalen Position von Spieler σ einen Zug zu. Wenn Spieler σ jede Partie mit Anfangsposition v_0 gewinnt, wenn er mit Strategie f spielt, dann ist f eine *Gewinnstrategie* von Position v_0 aus. Formaler: Eine Partie $v_0v_1\dots$ ist konsistent mit der Strategie f wenn für alle i mit $v_i \in V_\sigma$ gilt, dass $v_{i+1} = f(v_i)$; f ist Gewinnstrategie für Spieler σ von v_0 , wenn jede bei v_0 beginnende und mit f konsistente Partie endlich ist und in einer Position in T_σ endet. Die *Gewinnregion* von Spieler σ ist

$$W_\sigma := \{v : \text{Spieler } \sigma \text{ hat eine Gewinnstrategie von Position } v\}.$$

Ein Spiel ist *determiniert*, wenn von jeder Position aus einer der beiden Spieler eine Gewinnstrategie hat, d.h. wenn $W_0 \cup W_1 = V$.

Beispiel. Die Strategien für Spieler 0 im Spiel in Abbildung 2.1 sind die

³Allgemeine Spiele lassen auch unendliche Partien zu. In der Theorie unendlicher Spiele braucht man daher Gewinnbedingungen für unendliche Partien. Hier werten wir unendliche Partien als unentschieden.

Funktionen $f : 1 \mapsto 2, 3 \mapsto 5$ und $g : 1 \mapsto 3, 3 \mapsto 5$. Nur g ist auch eine Gewinnstrategie von Position 1 aus. Die Partie $(1, 3, 5)$ ist konsistent mit g . Die Gewinnregion von Spieler 0 ist $\{1, 3, 5\}$, die Gewinnregion von Spieler 1 ist $\{2, 4\}$. Das Spiel ist also determiniert.

Übung 2.3. Zeigen Sie, dass fundierte Spiele determiniert sind.

Sei nun $\psi \in \text{FO}$ und \mathfrak{A} eine zu ψ passende Struktur. Per Induktion über den Aufbau von $\varphi(\bar{x})$ zeigt man leicht, dass in dem Spiel $\text{MC}(\mathfrak{A}, \psi)$ die Verifiziererin eine Gewinnstrategie von Position $\varphi(\bar{a})$ hat, wenn $\mathfrak{A} \models \varphi(\bar{a})$, und dass der Falsifizierer eine Gewinnstrategie von Position $\varphi(\bar{a})$ hat, wenn $\mathfrak{A} \models \neg\varphi(\bar{a})$. Insbesondere folgt damit:

Satz 2.24. Für jeden Satz $\psi \in \text{FO}(\tau)$ und jede τ -Struktur \mathfrak{A} gilt: $\mathfrak{A} \models \psi$ genau dann, wenn die Verifiziererin eine Gewinnstrategie für das Spiel $\text{MC}(\mathfrak{A}, \psi)$ von der Anfangsposition ψ hat.

ALGORITHMEN FÜR STRATEGIEPROBLEME. Sei **GAME** das Strategieproblem für Spiele mit endlichen Spielgraphen, d.h.

$$\text{GAME} = \{(\mathcal{G}, v) : \text{Spieler 0 hat eine Gewinnstrategie für } \mathcal{G} \text{ von Position } v\}.$$

Es ist nicht schwer einzusehen, dass man **GAME** in Polynomialzeit lösen kann. Sei W_σ^n die Menge der Positionen von denen Spieler σ eine Strategie hat, um in höchstens n Zügen zu gewinnen. Dann ist $W_\sigma^0 = T_\sigma = \{v \in V_{1-\sigma} : vE = \emptyset\}$ die Menge der Endpositionen an denen Spieler σ gewonnen hat, und wir können die Mengen W_σ^n induktiv berechnen mit

$$W_\sigma^{n+1} := \{v \in V_\sigma : vE \cap W_\sigma^n \neq \emptyset\} \cup \{v \in V_{1-\sigma} : vE \subseteq W_\sigma^n\}$$

bis $W_\sigma^{n+1} = W_\sigma^n$.

Beispiel. Für den Beispielgraphen in Abbildung 2.1 würden die Gewinnregionen wie folgt berechnet. W_0^0 besteht aus allen Knoten in V_1 , die keine Nachfolger haben, also $W_0^0 = \{5\}$. Analog gilt $W_1^0 = \{4\}$. W_0^1 besteht aus allen Knoten, in denen Spieler 0 am Zug ist und die

mindestens einen Nachfolger in W_0^0 haben, sowie Knoten von Spieler 1, die nur Nachfolger in W_0^0 haben. Also $W_0^1 = \{3, 5\}$ und $W_1^1 = \{2, 4\}$. Schließlich gilt $W_0^2 = \{1, 3, 5\}$, da $1 \in V_0$ und $3 \in W_0^1$.

Man kann das GAME-Problem sogar in *Linearzeit* lösen. Der folgende Algorithmus ist eine Variante der Tiefensuche und berechnet die Gewinnregionen W_σ für beide Spieler in Zeit $O(|V| + |E|)$.

Satz 2.25. Die Gewinnregionen von endlichen Spielen kann man in Linearzeit berechnen.

Beweis. Wir präsentieren einen Algorithmus welcher für jede Position bestimmt, ob einer der Spieler von dieser Position aus eine Gewinnstrategie hat, und wenn ja welcher. Wir benutzen die folgenden Arrays:

- $\text{win}[v]$ enthält entweder $\sigma \in \{0, 1\}$, wenn schon festgelegt ist, dass $v \in W_\sigma$ oder \perp , wenn dies noch nicht ausgerechnet ist, oder wenn keiner der Spieler von v aus eine Gewinnstrategie hat.
- $P[v]$ enthält die Vorgänger von v .
- $n[v]$ ist die Anzahl der Nachfolger $w \in vE$ für die $\text{win}[w] = \perp$.

Der Kern von Algorithmus 2.1 ist die Prozedur $\text{Propagate}(v, \sigma)$ welche immer dann aufgerufen wird, wenn festgestellt wurde, dass Spieler σ eine Gewinnstrategie von Position v hat. $\text{Propagate}(v, \sigma)$ speichert dies ab und untersucht, ob wir nun den Gewinner für die Vorgänger von v bestimmen können. Dies wird mit folgenden Regeln festgestellt:

- Wenn der Vorgänger u auch eine Position von Spieler σ ist, dann hat er eine Gewinnstrategie, indem er im ersten Zug zu v zieht.
- Wenn der Gegner von Position u zieht, $\text{win}[u]$ noch undefiniert ist, und der Gewinner für alle Nachfolger w von u bereits festgestellt ist, dann ist $\text{win}[w] = \sigma$ für alle diese w , und Spieler σ gewinnt daher auch von u unabhängig vom Zug seines Gegners.

Da (4) und (5) für jede Position v nur einmal erreicht werden, wird der innere Teil der Schleife in (5) höchstens $\sum_v |P[v]| = |E|$ -mal durchlaufen. Die Laufzeit des Algorithmus ist daher $O(|V| + |E|)$.

Die Korrektheit des ausgerechneten Wertes $\text{win}[v]$ beweist man durch Induktion über die minimale Anzahl der Züge mit der ein Spieler

Algorithmus 2.1. Ein Linearzeit-Algorithmus für das GAME-Problem

Input: Ein Spiel $\mathcal{G} = (V, V_0, E)$

```

for all  $v \in V$  do                                (* 1: Initialisierung *)
    win[v] :=  $\perp$ 
    P[v] :=  $\emptyset$ 
    n[v] := 0
end do

for all  $(u, v) \in E$  do                            (* 2: Berechne P und n *)
    P[v] :=  $P[v] \cup \{u\}$ 
    n[u] :=  $n[u] + 1$ 
end do

for all  $v \in V_0$                                     (* 3: Berechne win *)
    if  $n[v] = 0$  then Propagate( $v, 1$ )
for all  $v \in V \setminus V_0$ 
    if  $n[v] = 0$  then Propagate( $v, 0$ )
return win

procedure Propagate( $v, \sigma$ )
    if win[v]  $\neq \perp$  then return
    win[v] :=  $\sigma$                                     (* 4: Markiere v als gewinnend für  $\sigma$  *)
    for all  $u \in P[v]$  do                            (* 5: Propagiere zu Vorgängern *)
        n[u] :=  $n[u] - 1$ 
        if  $u \in V_\sigma$  or  $n[u] = 0$  then Propagate( $u, \sigma$ )
    end do
end

```

von v aus gewinnen kann. Man beachte, dass die Positionen mit $n[v] = 0$ in (3) genau die Endpositionen sind, auch wenn $n[v]$ durch Propagate modifiziert wird. Q.E.D.

Übung 2.4 (Auswertung von FO auf endlichen Strukturen). Konstruieren Sie (auf der Basis des Auswertungsspiels) einen möglichst effizienten Auswertungsalgorithmus für FO-Sätze auf endlichen Strukturen. Schätzen Sie die Laufzeit und den Speicherbedarf des Algorithmus ab, abhängig von der Größe der gegebenen Struktur und der Länge (oder Komplexität) des gegebenen Satzes.

Übung 2.5. Formulieren Sie ein Auswertungsspiel für FO-Formeln, welche nicht notwendigerweise in Negationsnormalform sind. Welcher spieltheoretischen Operation entspricht die Negation?

Übung 2.6. Wir wissen bereits, dass das Erfüllbarkeitsproblem für aussagenlogische Hornformeln in Polynomialzeit lösbar ist. Mit Hilfe des GAME-Problems kann man auf relativ einfache Weise zeigen, dass es sogar einen Linearzeit-Algorithmus gibt.

Konstruieren Sie zu einer gegebenen Hornformel $\psi = \bigwedge_{i \in I} C_i$ mit Aussagenvariablen X_1, \dots, X_n und Horn-Implikationen C_i der Form $X_{i_1} \wedge \dots \wedge X_{i_m} \rightarrow Z$ ein Spiel \mathcal{G}_ψ : Die Positionen von Spieler 0 sind die Anfangsposition 0 und die Aussagenvariablen X_1, \dots, X_n , die Positionen von Spieler 1 sind die C_i . Spieler 0 kann von einer Position X zu irgendeiner Implikation C_i mit rechter Seite X ziehen, und Spieler 1 kann von Position C_i zu irgendeiner Variable ziehen, die auf der linken Seite von C_i vorkommt. Zeigen Sie, dass Spieler 0 genau dann eine Gewinnstrategie für \mathcal{G}_ψ von Position X hat, wenn $\psi \models X$. Insbesondere ist ψ genau dann unerfüllbar, wenn Spieler 0 von der Anfangsposition 0 gewinnt.

Übung 2.7 (Umkehrung der letzten Übung). Konstruieren Sie zu jedem Spiel \mathcal{G} eine aussagenlogische Hornformel $\psi_{\mathcal{G}}$, deren Aussagenvariablen die Positionen von \mathcal{G} sind und deren minimales Modell gerade die Gewinnregion W_0 ist. Insbesondere ist $v \in W_0$ genau dann, wenn $\psi_{\mathcal{G}} \wedge (v \rightarrow 0)$ unerfüllbar ist.