

# **Modelltheorie**

**Wintersemester 2019/20**

**Mitschrift von Floris Remmert**

gehalten von Prof. Dr. Amador Martin-Pizarro

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Mathematisches Institut

28. Oktober 2019



# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Theorien und Quantorenelimination</b>	<b>1</b>
1	Erinnerung	1
2	Tarskis Test	4

# Teil I

## Theorien und Quantorenelimination

**Satz 0.1** (Morley)

Sei  $T$  eine Theorie, welche ein einziges (bis auf Isomorphie) Modell der Mächtigkeit  $\aleph_0$  besitzt. Dann besitzt  $T$  für jede Kardinalzahl  $\kappa > \aleph_0$  ein einziges Modell der Mächtigkeit  $\kappa$  (bis auf Isomorphie).

### 1 Erinnerung

**Definition 1.1** • Eine Sprache  $\mathcal{L}$  ist eine Kollektion von Konstanten-, Funktions-, und Relationszeichen

- Eine  $\mathcal{L}$ -Struktur  $\mathcal{A}$  besteht aus einer nicht-leeren Grundmenge (oder Universum)  $A$  zusammen mit Interpretationen der Symbole aus  $\mathcal{L}$ :

- Für jedes Funktionszeichen  $f$  der Stelligkeit  $n$

$$f^{\mathcal{A}} : A^n \longrightarrow A$$

- Für jedes Relationszeichen  $R$  der Stelligkeit  $m$

$$R^{\mathcal{A}} \subset A^m$$

- Eine Einbettung  $F$  von  $\mathcal{A}$  nach  $\mathcal{B}$  ist eine injektive Abbildung  $F : A \longrightarrow B$ , welche mit den Interpretationen kompatibel<sup>1</sup> ist
- Ein Isomorphismus ist eine surjektive Einbettung.
- $\mathcal{A}$  ist eine Unterstruktur von  $\mathcal{B}$ , falls  $A \subset B$  und die Inklusion  $\iota : A \longrightarrow B$  eine Einbettung bestimmt

*Bemerkung:* Sei  $\mathcal{B}$  eine  $\mathcal{L}$ -Struktur,  $\emptyset \neq A \subset B$ . Dann gibt es eine Unterstruktur von  $\mathcal{B}$ , welche von  $A$  erzeugt wird.

Das Universum besteht aus  $A$  zusammen mit dem Abschluss von  $A$  unter allen Interpretationen der Funktionszeichen von  $\mathcal{L}$ .

---

<sup>1</sup>das bedeutet, dass Funktions- und Relationszeichen bei Hin- und Rückrichtung erhalten bleiben

**Definition 1.2**

Sei  $(I, <)$  eine partielle Ordnung. Die Ordnung ist gerichtet, falls für  $i, j \in I$  gibt es  $k \in I$  mit  $i \leq k$  und  $j \leq k$ .

*Bemerkung:* Sei  $(\mathcal{A}_i)_{i \in I}$  eine Familie von  $\mathcal{L}$ -Strukturen indexiert nach der gerichteten partiellen Ordnung  $I$  derart, dass für  $i \leq j$  gilt:  $\mathcal{A}_i \subseteq_{US} \mathcal{A}_j$ .

Die Menge  $A = \bigcup_{i \in I} A_i$  ist das Universum einer (eindeutig bestimmten)  $\mathcal{L}$ -Struktur

$$\mathcal{A} = \bigcup_{i \in I} \mathcal{A}_i \quad (1)$$

Falls  $I$  eine lineare Ordnung ist, dann ist  $(\mathcal{A}_i)_{i \in I}$  eine Kette.

Zu 1:

- $c^{\mathcal{A}} = c^{\mathcal{A}_i}$  für ein (alle)  $i \in I$ , denn  $c^{\mathcal{A}_i} = c^{\mathcal{A}_j} = c^{\mathcal{A}_k}$ , wegen gerichteter Ordnung
- $a_1, \dots, a_n \in A = \bigcup_{i \in I} A_i \implies \exists i \in I$  mit  $a_1, \dots, a_n \in A_i$ . Also ist  $f^{\mathcal{A}}(a_1, \dots, a_n) = f^{\mathcal{A}_i}(a_1, \dots, a_n)$  wohldefiniert.
- $(a_1, \dots, a_m) \in R^{\mathcal{A}}$  gdw es ein  $i \in I$  gibt mit  $a_1, \dots, a_m \in A_i$  und  $(a_1, \dots, a_m) \in R^{\mathcal{A}_i}$

Beachte, dass  $\mathcal{A}_i \subseteq_{US} \mathcal{A}$  für alle  $i \in I$ .

**Definition 1.3**

Eine atomare Formel ist ein Ausdruck der Form  $(t_1 \dot{=} t_2)$ ,  $t_1, \dots, t_k$  Terme,  $R(t_1, \dots, t_k)$ .

Die Kollektion von Formeln ist die kleinste Klasse, welche alle atomaren Formeln enthält und derart, dass:

$$\begin{aligned} \varphi \text{ Formel} &\implies \neg \varphi \text{ Formel} \\ \varphi, \psi \text{ Formel} &\implies (\varphi \vee \psi) \text{ Formel} \\ \varphi \text{ Formel}, x \text{ Variable} &\implies \exists x \varphi \text{ Formel, } (x \text{ heißt dann „gebunden“}) \end{aligned}$$

Abk.:

$$\begin{aligned} (\varphi \wedge \psi) &= \neg(\neg\varphi \vee \neg\psi) \\ \forall x \varphi &= \neg \exists x \neg \varphi \\ (\varphi \rightarrow \psi) &= (\neg\varphi \vee \psi) \\ (\varphi \leftrightarrow \psi) &= ((\varphi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \varphi)) \end{aligned}$$

*Bemerkung:* • Jede Formel  $\varphi[x_1, \dots, x_n]$  lässt sich in pränexer Normalform umschreiben:  $Q_1 y_1 Q_2 y_2 \dots Q_m y_m \psi[x_1, \dots, x_n, y_1, \dots, y_m]$ . Das ist eine quantorfreie Formel, diese lässt sich weiter zerlegen in KNF bzw. DNF.

- Eine Formel ohne freie Variablen ist eine Aussage
- Eine Theorie ist eine Kollektion von Aussagen

#### Beispiel 1.4

Sei  $\mathcal{A}$  eine  $\mathcal{L}$ -Struktur. Erweitere die Sprache zu der Sprache  $\mathcal{L}_A = \mathcal{L} \cup \{d_a\}_{a \in A}$ .

$\mathcal{A}$  ist eine  $\mathcal{L}_A$ -Struktur,  $d_a^{\mathcal{A}} = a$ .

- $\text{Diag}^{at}(\mathcal{A}) = \{\text{quantorenfreie } \mathcal{L}_A\text{-Aussagen } \chi \text{ mit } \mathcal{A} \models \chi\}$  heißt „atomares Diagramm“
- $\text{Diag}(\mathcal{A}) = \{\mathcal{L}\text{-Aussagen } \theta \text{ mit } \mathcal{A} \models \theta\}$  heißt „vollständiges Diagramm“

Sei nun  $\mathcal{B}$  eine  $\mathcal{L}_A$ -Struktur.

$\mathcal{B} \models \text{Diag}^{at}(\mathcal{A}) \Leftrightarrow \mathcal{A} \hookrightarrow \mathcal{B}$  einbetten lässt

$$A \longrightarrow B$$

$$a \mapsto d_a^{\mathcal{B}}$$

$\mathcal{B} \models \text{Diag}(\mathcal{A}) \Leftrightarrow$  die obige Abbildung ist elementar

$\mathcal{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \Leftrightarrow \mathcal{B} \models \varphi[F(a_1), \dots, F(a_n)], a_1, \dots, a_n \in A, \varphi[x_1, \dots, x_n]$  Formel

**Definition 1.5** •  $T$  ist konsistent, falls  $T$  ein Modell besitzt.

- $T$  ist vollständig, falls  $T$  konsistent ist und je zwei Modelle von  $T$  elementar äquivalent sind.

**Satz 1.6** (Kompaktheitssatz)

Eine Theorie ist genau dann konsistent, wenn sie endlich konsistent<sup>2</sup> ist.

Wie zeigen wir, dass  $\mathcal{A} \equiv \mathcal{B}$ ?

**Satz 1.7** (Back & Forth)

$S = \{F : \underset{\substack{\mathcal{C} \\ \subseteq \\ \mathcal{A}}}{\mathcal{C}} \longrightarrow \underset{\substack{\mathcal{D} \\ \subseteq \\ \mathcal{B}}}{\mathcal{D}}, F \text{ partieller Isomorphismus zwischen } \mathcal{C} \text{ und } \mathcal{D} \text{ geeignet}^3\}$ .

Back: Für alle  $F \in S$  und  $b \in B$ ,  $F : \mathcal{C} \longrightarrow \mathcal{D}$  gibt es  $G \in S$  mit  $G \supset F$  Erweiterung und  $b \in \text{Im}(G)$ .

<sup>2</sup>endlich konsistent bedeutet: jede Teilmenge der Theorie besitzt ein Modell.

<sup>3</sup>bspw. endlich erzeugt

Forth: Für alle  $F \in S$  und  $a \in A$ ,  $F : \mathcal{C} \longrightarrow \mathcal{D}$  gibt es  $H \in S$ , mit  $H \supset F$  Erweiterung mit  $a \in \text{Dom}(H)$

$\mathcal{A}$  und  $\mathcal{B}$  heißen dann „Back & Forth äquivalent“

$\rightarrow$  ist jedes  $F \in S$  elementar, so gilt insbesondere  $\mathcal{A} \equiv \mathcal{B}$ .

## 2 Tarskis Test

**Lemma 2.1** (Tarskis Test)

Sei  $\mathcal{B}$  eine  $\mathcal{L}$ -Struktur und  $A \subset B$  Teilmenge derart, dass für jede  $\mathcal{L}$ -Formel  $\varphi[x_1, \dots, x_n]$  und Elemente  $a_1, \dots, a_n \in A$ :

falls:

$$\mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n, b] \text{ für ein } b \in B \Rightarrow \text{ existiert } a \in A \text{ sodass } \mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n, a] \quad (2)$$

dann ist  $A$  das Universum einer elementaren Unterstruktur von  $\mathcal{B}$ .

Insbesondere: Falls  $\mathcal{A} \subset \mathcal{B}$  Unterstruktur, ist  $\mathcal{A} \leq \mathcal{B} \Leftrightarrow \mathcal{A}$  erfüllt 2.

Beweis. Betrachte  $A \neq \emptyset \rightarrow$  Betrachte  $\varphi[y] = (y \doteq y)$ .  $B \neq \emptyset \rightarrow \exists b \in B$  mit  $\mathcal{B} \models \varphi[b]$ .  
 $\hookrightarrow \exists a \in A$  mit  $\mathcal{B} \models \varphi[a]$

Beh.: Für jedes Konstantenzeichen  $c \in \mathcal{L}$  ist  $c^{\mathcal{B}} \in A$ .  $\hookrightarrow \varphi[y] = (y \doteq c)$ ,  $\mathcal{B} \models \varphi[c^{\mathcal{B}}] \Rightarrow$  es gibt  $a \in A$  mit  $a = c^{\mathcal{B}}$ .

Beh.:  $A$  ist unter den Funktionen  $f^{\mathcal{B}}$  abgeschlossen, für jedes Funktionszeichen  $f \in \mathcal{L}$ .

Sei  $\varphi[x_1, \dots, x_n, y] = (y \doteq f(x_1, \dots, x_n))$  ✓

Für  $R \in \mathcal{L}$   $m$ -stellig setze  $R^{\mathcal{A}} = A^m \cap R^{\mathcal{B}} \longrightarrow$  somit bildet  $A$  eine  $\mathcal{L}$ -Unterstruktur  $\mathcal{A}$  von  $\mathcal{B}$ .

Noch zu zeigen:  $\mathcal{A} \leq \mathcal{B}$ , d. h.  $\varphi[x_1, \dots, x_n]$   $\mathcal{L}$ -Formel.

Seien dazu  $a_1, \dots, a_n \in A$ .

$$\mathcal{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \Leftrightarrow \mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \quad (3)$$

Induktiv über den Aufbau von  $\varphi$ .

$\varphi$  ist atomar  $\longrightarrow \checkmark$

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{A} \not\models \psi[a_1, \dots, a_n] & \Leftrightarrow & \mathcal{B} \not\models \psi[a_1, \dots, a_n] \\ \Updownarrow & & \Updownarrow \\ \mathcal{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] & & \mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \end{array}$$

$\varphi = \neg\psi \longrightarrow \checkmark$

$\varphi = (\psi_1 \vee \psi_2) \longrightarrow \checkmark$

$\varphi = \exists y \psi[x_1, \dots, x_n, y]$ :  $\mathcal{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \Rightarrow$  es gibt ein  $a \in A$  sodass  $\mathcal{A} \models \psi[a_1, \dots, a_n, a] \Rightarrow \mathcal{B} \models \psi[a_1, \dots, a_n, a]$  für ein  $a \in A \subset B \Rightarrow \mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n]$

$\mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \Rightarrow$  es gibt  $b \in B$  mit  $\mathcal{B} \models \psi[a_1, \dots, a_n, b] \xRightarrow{2} \Rightarrow$  es gibt ein  $a \in A$  mit  $\mathcal{B} \models \psi[a_1, \dots, a_n, a] \xRightarrow{3} \mathcal{A} \models \psi[a_1, \dots, a_n, a] \Rightarrow \mathcal{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n]$ .

Für „insbesondere“: Angenommen, dass  $\mathcal{A} \leq \mathcal{B}$ . Sei  $\varphi[x_1, \dots, x_n, y]$  eine  $\mathcal{L}$ -Formel,  $a_1, \dots, a_n \in A$ . Dann:  $\mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n, b]$  für ein  $b \in B \Rightarrow \mathcal{B} \models (\exists y \varphi)[a_1, \dots, a_n] \xRightarrow{\mathcal{A} \leq \mathcal{B}} \mathcal{A} \models (\exists y \varphi)[a_1, \dots, a_n] \Rightarrow$  es gibt ein  $a \in A$  mit  $\mathcal{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n, a] \xRightarrow{\mathcal{A} \leq \mathcal{B}} \mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n, a] \checkmark$   
□

**Proposition 2.2** (aufwärts Löwenheim-Skolem)

Sei  $\mathcal{A}$  eine unendliche  $\mathcal{L}$ -Struktur, und  $\kappa < \max\{|A|, |\mathcal{L}|\}$ . Dann gibt es eine elementare  $\mathcal{L}$ -Erweiterung  $\mathcal{B} \geq \mathcal{A}$  der Mächtigkeit  $\kappa$ .

*Beweis.*  $\text{Diag}(\mathcal{A}) \cup \{\neg(c_\alpha \doteq c_\beta)\}_{\alpha \neq \beta < \kappa}$ , wobei  $\{c_\alpha\}_{\alpha < \kappa}$  eine Menge neuer Konstantenzeichen ist, ist konsistent weil sie endlich konsistent<sup>4</sup> ist.

Aus der Konstruktion von Henkin hat  $\text{Diag}(\mathcal{A}) \cup \{\neg(c_\alpha \doteq c_\beta)\}_{\alpha \neq \beta < \kappa}$  ein Modell der Mächtigkeit der Sprache.

$\rightarrow$  ein Modell der Mächtigkeit  $\kappa$ . □

*Bemerkung:*  $|A| = n \in \mathbb{N}$ ,  $\mathcal{B} \geq \mathcal{A} \Rightarrow |B| = n$

**Proposition 2.3** (abwärts Löwenheim-Skolem)

Sei  $\mathcal{B}$  eine  $\mathcal{L}$ -Struktur und  $S \subset B$  beliebig. Dann gibt es eine elementare Unterstruktur  $\mathcal{A} \leq \mathcal{B}$  mit  $A \supset S$  und  $|A| \leq \max\{|S|, |\mathcal{L}|, \aleph_0\}$ .

*Bemerkung:*  $\mathbb{C}$  in der Ringsprache  $\mathcal{L}_{\text{Ring}}$ ,  $S = \emptyset \Rightarrow$  es gibt eine abzählbare elementare Unterstruktur von  $\mathbb{C}$ .  $\rightarrow \mathbb{Q} \leq \mathbb{C}$

---

<sup>4</sup>Kompaktheit



## 2 Tarskis Test

*Beweis 2.3.* Setze  $S_0 = S$ . Angenommen  $S_k$  wurde bereits konstruiert, wähle für jedes  $n \in \mathbb{N}$ , jede  $\mathcal{L}$ -Formel  $\varphi[x_1, \dots, x_n, y]$  und Elemente  $a_1, \dots, a_n \in S_k$  ein Element  $a_{\varphi[a_1, \dots, a_n, y]} \in B$  derart, dass  $\mathcal{B} \models ((\exists y \in \varphi)[a_1, \dots, a_n] \rightarrow \varphi[a_1, \dots, a_n, a_{\varphi[a_1, \dots, a_n, y]}])$ . Setze  $S_{k+1} = S_k \cup \{a_{\varphi}\}_{\varphi \mathcal{L}\text{-Formel}, (a_1, \dots, a_n) \in S_k}$

Definiere  $A = \bigcup_{k \in \mathbb{N}} S_k \supset S$ . Wir überprüfen, dass  $A$  den Test von Tarski erfüllt. Sei  $\varphi = \varphi[x_1, \dots, x_n, y]$  eine  $\mathcal{L}$ -Formel,  $a_1, \dots, a_n \in A$ .

$\mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n, b]$  für ein  $b \in B \Rightarrow$  es gibt ein  $k \in \mathbb{N}$  mit  $a_1, \dots, a_n \in S_k \Rightarrow$  es gibt ein  $a_{\varphi[a_1, \dots, a_n, y]} \in S_{k+1} \subset A$  mit  $\mathcal{B} \models \varphi[a_1, \dots, a_n, a] \checkmark$

Ferner ist  $|A| \leq \max\{\aleph_0, |\mathcal{L}|, |S|\}$ . □

### Folgerung 2.4

Sei  $(\mathcal{A}_i)_{i \in I}$  eine gerichtete Familie von  $\mathcal{L}$ -Strukturen, sodass für  $i \leq j$  ist  $\mathcal{A}_i \leq \mathcal{A}_j$ . Dann ist  $\mathcal{A} = \bigcup_{i \in I} \mathcal{A}_i$  eine elementare Erweiterung jeder  $\mathcal{A}_i$ .

*Beweis.* Wir beweisen induktiv über den Aufbau von  $\varphi = \varphi[x_1, \dots, x_n]$ , dass für alle  $i \in I$ , für alle  $a_1, \dots, a_n \in A_i$ :  $\mathcal{A}_i \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \Leftrightarrow \mathcal{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n]$ .

$\varphi$  atomar  $\rightarrow$  klar, denn  $\mathcal{A}_i \subseteq_{US} \mathcal{A}$

$\varphi = \neg \varphi \Rightarrow$  ok!

$\varphi = (\varphi_1 \vee \varphi_2) \Rightarrow$  ok!

$\varphi = \exists y \psi[x_1, \dots, x_n, y]$ :  $\mathcal{A}_i \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \Rightarrow$  es gibt ein  $a \in A_i$  mit  $\mathcal{A}_i \models \psi[a_1, \dots, a_n, a]$   
 $\Rightarrow \mathcal{A} \models \psi[a_1, \dots, a_n, a] \Rightarrow \mathcal{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n]$   
ind. über  $\psi$

$\mathcal{A} \models \varphi[a_1, \dots, a_n] \Rightarrow$  es gibt ein  $b \in A = \bigcup_{i \in I} \mathcal{A}_i$  mit  $\mathcal{A} \models \psi[a_1, \dots, a_n, b] \Rightarrow$  es gibt  $j \in I$  mit  $b \in \mathcal{A}_j \Rightarrow$  es existiert  $k \in I$  mit  $i \leq k, j \leq k, a_1, \dots, a_n, b \in \mathcal{A}_k$   
 $\Rightarrow \mathcal{A}_k \models \psi[a_1, \dots, a_n, b] \Rightarrow$  es gibt ein  $a \in \mathcal{A}_k$  mit  $\mathcal{A}_i \models \psi[a_1, \dots, a_n, a] \Rightarrow \mathcal{A}_i \models \varphi[a_1, \dots, a_n]$ . □

### Definition 2.5

Eine Theorie  $T$  hat Quantorenelimination, falls jede  $\mathcal{L}$ -Formel  $\varphi[x_1, \dots, x_n]$  äquivalent modulo  $T$  zu einer quantorenfreien  $\mathcal{L}$ -Formel  $\psi[x_1, \dots, x_n]$  ist.

$$T \models \forall x_1 \dots \forall x_n (\varphi[x_1, \dots, x_n] \leftrightarrow \psi[x_1, \dots, x_n])$$

### Beispiel 2.6

Sei  $\mathcal{L} := (\mathbb{R}, 0, 1, +, -, \cdot)$  gegeben. Betrachte die Menge  $\{(a, b, c) \in \mathbb{R}^3 \mid a \neq 0 \text{ und es gibt } x \in \mathbb{R} \text{ mit } ax^2 + bx + c = 0\} = \{(a, b, c) \in \mathbb{R}^3 \mid a \neq 0 \text{ und } b^2 - 4ac \geq 0\}$ .

## 2 Tarskis Test

*Diese Formel ist in  $\mathcal{L}$  nicht äquivalent zu einer quantorenfreien Formel, in  $\mathcal{L}_1 := (\mathbb{R}, 0, 1, +, -, \cdot, <)$  hingegen doch. Somit ist die Menge in  $\mathcal{L}_1$  quantorenfrei.*