

0.1 Notation

Im Folgenden seien, wenn nicht weiter erklärt, mit k, l, m, n immer natürliche Zahlen gemeint, mit hebräischen Buchstaben immer Kardinalzahlen.

Oftmals wird nicht zwischen Strukturen und deren Trägermengen unterschieden, insbesondere bei Paaren von Strukturen.

Als Topologie wird immer die Ordnungstopologie bzw. deren Produkttopologie verstanden, mit „Intervall“ ist immer ein offenes, nichtleeres Intervall mit Randpunkten in der Struktur oder $\pm\infty$ gemeint. Außerdem sei für $A \prec B$ und $X \subseteq B$ A -definierbar in T die Menge X_A die durch dieselbe definierende Formel in B definierbare Menge (für $X \subseteq A$ und X_B natürlich analog). Außerdem sei für Relationen P mit „ $\exists/\forall x \in P(\dots)$ “ die Formel „ $\exists x(P(x) \wedge \dots)/\forall x(P(x) \rightarrow \dots)$ “.

Mit $|\bar{a}|$ ist je nach Kontext unterschiedliches gemeint, einerseits die Supremumsnorm von \bar{a} , andererseits die Anzahl der Einträge. Da das eine ein Element der Struktur ist und das andere eine natürliche Zahl, ist immer klar erkennbar, was gemeint ist. Im Allgemeinen wird auch nicht immer zwischen Tupeln und Elementen unterschieden.

1 Paare algebraisch abgeschlossener Körper

1.1 Algebraische und lineare Disjunktheit von Körpern

In diesem Teil richten wir uns im Aufbau etwas nach [Del12] und in manchen Beweisen nach [Lan73].

Definition 1.1.1. Gegeben Körperinklusionen $C \subseteq K, L \subseteq M$ in Rautenform, nenne K und L **linear disjunkt über** C , falls alle Basen von K als C -Vektorraum auch über L linear unabhängig bleiben. Nenne K und L **algebraisch disjunkt über** C , falls alle Transzendenzbasen von K über C auch algebraisch unabhängig über L bleiben. Schreibe $K \text{ ld}_C L$ bzw. $K \text{ ad}_C L$.

Bemerkung. Es reicht, lineare Disjunktheit für eine Basis zu zeigen. Denn wenn man die lineare Unabhängigkeit über L für eine Basis verliert, verliert man sie per C -Basiswechsel auch für alle anderen.

Bemerkung. Es reicht, die Erhaltung der linearen/algebraischen Unabhängigkeit nur für beliebige endliche Mengen zu prüfen, weil lineare/algebraische Unabhängigkeit einer Menge genau dann gilt, wenn sie für alle endlichen Teilmengen gilt.

Bemerkung. Der Körper M kommt in der Definition nur vor, damit die Rechenoperationen zwischen K und L wohldefiniert sind. Die genaue Wahl ist irrelevant und daher nicht in der Notation berücksichtigt. Wir nehmen für die Zukunft einfach an, dass die Multiplikation klar definiert ist.

Lemma 1.1.2. Sei C ein Körper und $C \subseteq R, S$ Ringerweiterungen von Integritätsbereichen. Dann gilt $\text{Frac}(R) \text{ ld}_C \text{Frac}(S)$ genau dann wenn linear unabhängige Mengen in R über C auch linear unabhängig über S bleiben.

Beweis. Die Hinrichtung folgt leicht aus $R \subseteq \text{Frac}(R), S \subseteq \text{Frac}(S)$. Für die Rückrichtung seien $r_1 x_1^{-1}, \dots, r_n x_n^{-1} \in \text{Frac}(R)$ linear unabhängig über C , aber linear abhängig über $\text{Frac}(S)$ mit nichttrivialer Linearkombination

$$(s_1 y_1^{-1}) r_1 x_1^{-1}, \dots, (s_n y_n^{-1}) r_n x_n^{-1} = 0.$$

Dann gilt aber nach Multiplikation mit $\prod_{i=1}^n x_i y_i \neq 0$ die lineare Abhängigkeit über S

der über C unabhängigen Elemente $((\prod_{i \neq j} x_i) r_j)_{1, \dots, n} \in R$ mit der folgenden Gleichung:

$$0 = \sum_{j=1}^n (\prod_{i \neq j} x_i) r_j (\prod_{i \neq j} y_i) s_j$$

□

Bemerkung. Es reicht wieder, sich auf endliche Mengen zu beschränken. Alternativ kann man es auch wieder nur für eine C -Basis von R zeigen.

Lemma 1.1.3. Für Körper C, K, L wie oben gilt $K \text{ ld}_C L$ genau dann wenn $K[L] = L[K] \cong K \otimes_C L$ mit kanonischem Isomorphismus, daher ist ld symmetrisch.

Beweis. Der aufgespannte Ring erfüllt

$$K[L] = \{ \sum_{(k,l) \in X} kl \mid X \subset K \times L \text{ endlich} \} = L[K].$$

Wenn $(k_i)_I, (l_j)_J$ Basen von K, L über C sind, ist $(k_i \otimes l_j)_{i \in I, j \in J}$ eine Basis von $K \otimes_C L$. Der C -Homomorphismus

$$\sum_{i \in I_0, j \in J_0} c_{ij} k_i \otimes l_j \mapsto \sum_{i \in I_0, j \in J_0} c_{ij} k_i l_j$$

für $I_0 \subseteq I, J_0 \subseteq J$ endlich ist immer surjektiv, da klarerweise $E := (k_i l_j)_{i \in I, j \in J}$ ein Erzeugendensystem von $K[L]$ ist. Er ist injektiv genau dann, wenn E auch linear unabhängig über C ist, also keine Linearkombination

$$0 = \sum_{i \in I_0, j \in J_0} c_{ij} k_i l_j = \sum_{i \in I_0} (\sum_{j \in J_0} c_{ij} l_j) k_i$$

existiert mit $c_{ij} \neq 0$ für mindestens ein Paar (i, j) . Aber das ist genau dann der Fall, wenn keine $\tilde{c}_i = \sum_{j \in J_0} c_{ij} l_j \in L$ existieren für $i \in I_0$ mit $\tilde{c}_i \neq 0$ für mindestens ein i und $0 = \sum_{i \in I_0} \tilde{c}_i k_i$, also wenn die $(k_i)_I$ linear unabhängig über L sind. □

Bemerkung. Auch ad ist symmetrisch, denn $K \text{ ad}_C L$ genau dann, wenn $\dim(\bar{k}/C) = \dim(\bar{k}/L)$ für alle $\bar{k} \in K$ im Sinne der acl -Dimension in ACF , also gerade dann, wenn K und L unabhängig über C im modelltheoretischen Sinn als Teilmengen eines algebraisch abgeschlossenen Körpers.

Definition 1.1.4. • Eine Körpererweiterung $K \subseteq L$ heiße **regulär**, wenn $\bar{K} \text{ ld}_K L$.

- Für Körper $K, L \subseteq M$ sei $KL := K(L) = L(K)$.

Wir können einige Folgerungen und „Rechenregeln“ aus den definierten Eigenschaften ziehen:

Lemma 1.1.5. Gegeben die Körperinklusionen $C \subseteq L \subseteq M$ und $C \subseteq K$. Dann gilt $K \text{ld}_C M$ genau dann, wenn $K \text{ld}_C L$ und $KL \text{ld}_L M$.

Beweis. Sei $(k_h)_H$ eine Basis von K über C , $(l_i)_I$ eine von L über C und $(m_j)_J$ eine von M über L . $K \text{ld}_C M$ bedeutet, dass die C -Basis von K auch M -Basis von K ist, aber dann ist sie natürlich auch L -Basis, da $C \subseteq L \subseteq M$. Dann kann man sich überlegen, dass $(l_i m_j)_{I \times J}$ eine Basis von M über C ist und nach dem letzten Satz $(k_h)_H$ eine Basis von $L[K]$ als L -Vektorraum.

Wenn $KL \text{ld}_L M$ nicht gelten würde, würde nach den Bemerkungen oben auch schon die Basis $(k_h)_H$ von $L[K]$ über L linear abhängig über M werden, es gäbe also eine Linearkombination

$$\sum_{h \in H} \lambda_h k_h = 0, \quad M \ni \lambda_h = 0 \text{ für fast alle, aber nicht alle } h \in H.$$

Da $(k_h)_H$ aber die Basis von K über C ist, widerspricht das $K \text{ld}_C L$.

Für die Rückrichtung ist zu zeigen, dass $(l_i m_j)_{I \times J}$ linear unabhängig über K bleibt.

Wenn das nicht so ist und die Linearkombination

$$0 = \sum_{(i,j) \in I \times J} \lambda_{ij} l_i m_j, \quad K \ni \lambda_{ij} = 0 \text{ für fast alle, aber nicht alle } (i,j) \in I \times J$$

das bezeugt, schreibe

$$\lambda_{ij} =: \sum_{h \in H} c_{hij} k_h$$

als C -Basisdarstellung für alle $(i,j) \in I \times J$. Einsetzen und Umklammern bringt uns die Linearkombination

$$0 = \sum_{(i,j) \in I \times J} \lambda_{ij} l_i m_j = \sum_{(i,j) \in I \times J} \left(\sum_{h \in H} c_{hij} k_h \right) l_i m_j = \sum_{i \in I} \left(\sum_{(h,j) \in H \times J} c_{hij} k_h l_i \right) m_j,$$

$C \ni c_{hij} = 0$ für fast alle, aber nicht alle $(h,i,j) \in H \times I \times J$.

Da wir aber $KL \text{ld}_C M$ annehmen, muss

$$\sum_{(h,j) \in H \times J} c_{hij} k_h l_i = 0 \text{ sein für alle } j \in J$$

, da wir $K \text{ld}_C L$ annehmen, folgt daraus $c_{hij} = 0$ für alle h, i, j . \square

Lemma 1.1.6. Wenn $C \subseteq K$ regulär ist und $K \text{ad}_C L$, folgt $K \text{ld}_C L$.

Beweis. Geht mit Bewertungen, steht zum Beispiel in [Lan73] (Seite 57, Theorem 3). \square

Lemma 1.1.7. 1. $K \text{ld}_C L$ impliziert $K \cap L = C$.

2. Wenn $C \subseteq K$ algebraisch und $C \subseteq L$ regulär, dann ist $K \text{ld}_C L$.

3. $K \text{ld}_C L$ impliziert $K \text{ad}_C L$.

4. $K \text{ad}_C L$ impliziert $\overline{K} \text{ad}_C \overline{L}$.

5. Wenn $K \text{ld}_C L, K \subset M$ und $X \subset M$ algebraisch unabhängig über KL , dann $K(X) \text{ld}_K KL$.

6. Wenn $C \subseteq K$ regulär ist und $K \text{ld}_C L$, folgt $K \text{ld}_C \overline{L}$ bzw. $L \subseteq KL$ regulär.

Beweis. 1. Die eine Inklusion ist klar. Für die Rückrichtung sei $x \in K \cap L \setminus C$. Dann ist $(1, x) \in K^2$ linear abhängig über L und somit über C . Aber dann ist x schon in C .

2. Wegen der Regularität gilt $L \text{ld}_C \overline{C}$ und wegen $C \subseteq K \subseteq \overline{C}$ und dem Lemma 1.1.5 gilt $L \text{ld}_C K$.

3. Seien $k_1, \dots, k_n \in K$ algebraisch abhängig über L , das heißt, es gibt ein Polynom $0 \neq f(X) = \sum_{|\alpha| \leq m} l_\alpha X^\alpha \in L[X_1, \dots, X_n]$ mit $f(k) = 0$, also insbesondere $(k^\alpha)_{|\alpha| \leq m}$ linear abhängig über L , per Annahme also auch über C . Dann existiert aber eine Linearkombination $\sum_{|\alpha| \leq m} c_\alpha k^\alpha = 0$ mit $c_\alpha \in C$ nicht alle Null, und diese bezeugt die algebraische Abhängigkeit über C .

4. Folgt aus $\dim(\cdot/L) = \dim(\cdot/\text{acl}(L))$ als Matroideneigenschaft.

5. Wegen algebraischer Unabhängigkeit ist $|\overline{x}| = \dim(\overline{x}/KL) \leq \dim(\overline{x}/K) \leq |\overline{x}|$ für alle $\overline{x} \in X$, also sind X und KL im modelltheoretischen Sinne unabhängig über K . Das gilt dann aber auch für $K \cup X$ und KL , $\text{acl}(K \cup X)$ und KL und auch für $K(X)$ und KL , also $K(X) \text{ad}_K KL$.

$K(X) \supseteq K$ ist außerdem regulär, denn $K[X]$ hat als K -Basis $(x^n)_{x \in X, n \in \mathbb{N}}$, wie man wegen algebraischer Unabhängigkeit sieht. Diese Basis bleibt aber linear unabhängig über \overline{K} , denn sonst wäre ein Polynom in $\overline{K}[X_1, X_2, \dots]$ gefunden,

was ein $x \in X$ algebraisiert, also $x \in \text{acl}(X \setminus \{x\} \cup \overline{K}) = \text{acl}(X \setminus \{x\} \cup K)$, also wäre X nicht mehr algebraisch unabhängig über K . Lemma 1.1.2 $K(X) = \text{Frac}(K[X]) \text{ld}_K \overline{K}$.

Also haben wir $K(X) \text{ad}_K KL$ und $K(X) \supseteq K$ regulär, woraus nach Lemma 1.1.6 $K(X) \text{ld}_K KL$ folgt.

6. Mit 3. folgt $K \text{ad}_C L$, mit 4. $\overline{K} \text{ad}_C \overline{L}$, mit Lemma 1.1.5 $K \text{ad}_C \overline{L}$, mit Lemma 1.1.6 $K \text{ld}_C \overline{L}$ (benutze $C \subseteq K$ regulär) und mit noch einmal Lemma 1.1.5 gilt schließlich für die Einbettungskette $C \subseteq L \subseteq \overline{L}$ die Regularitätsbedingung $LK \text{ld}_L \overline{L}$. \square

1.2 Paare algebraisch abgeschlossener Körper

Wir wollen Paare (K, E_K) von Körpern betrachten, wobei $E_K \subseteq K$. In der richtigen Sprache haben lassen diese sich axiomatisieren, dort haben echte Paare (d.h. $K \neq E_K$) algebraisch abgeschlossener Körper sogar Quantorenelimination und sind in einer kleineren Sprache modellvollständig. Diese Sprachen und einige der Folgerungen für ihre Strukturen wollen wir hier (angelehnt an [Del12]) einführen:

Definition 1.2.1. Wir definieren die Sprachen $\mathcal{L}^{ld} := \{0, 1, +, -, \cdot, (l_n)_{n \geq 2}\}$, $\mathcal{L}^f := \mathcal{L}^{ld} \cup \{f_{i,n} \mid n \geq 2, 1 \leq i \leq n\}$ und $\mathcal{L}^{f,c} := \mathcal{L}^f \cup \{-1\}$, wobei die (l_n) n -stellige Relationen sein sollen und die $f_{i,n}$ $n+1$ -stellige partielle Funktionen.

Lemma 1.2.2. Beliebige Paare (K, E_K) von Körpern werden kanonisch zu \mathcal{L}^{ld} -Strukturen, indem man folgendes setzt:

$$\models l_n(x_1, \dots, x_n) :\Leftrightarrow x_1, \dots, x_n \text{ sind linear unabhängig über } E_K$$

Dann kann man die Substruktur E_K auch definieren, da $x \in E_K \Leftrightarrow \models \neg l_2(1, x) =: E(x)$ und noch viel weitergehender auch

$$y \in \langle \overline{x} \rangle_{E_K} \text{ für } x_1, \dots, x_n \text{ linear unabhängig über } E_K \Leftrightarrow \models l_n(\overline{x}) \wedge \neg l_{n+1}(\overline{x}, y) =: \phi(\overline{x}, y).$$

Mit diesem Wissen setzt man jetzt in $\mathcal{L}^f, \mathcal{L}^{f,c}$

$$\models (z = f_{n,i}(y, \overline{x})) :\Leftrightarrow \models \phi(\overline{x}, y) \text{ und } z \text{ ist die } i\text{-te Koordinate von } y \text{ in der Basisdarstellung,}$$

wobei letzteres durch

$$\exists z_1, \dots, z_n (z = z_i \wedge y = x_1 z_1 + \dots + x_n z_n \wedge z_1, \dots, z_n \in E_K)$$

oder aber auch

$$\forall z_1, \dots, z_n (y = x_1 z_1 + \dots + x_n z_n \wedge z_1, \dots, z_n \in E_K \rightarrow z_i = z)$$

definierbar ist.

Lemma 1.2.3. Mit dem Ganzen sind echte algebraisch abgeschlossene Paare von Körpern definierbar in allen drei Sprachen \mathcal{L}^{ld} , \mathcal{L}^f , $\mathcal{L}^{f,c}$, nenne die Theorien $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{ld}}$, $\text{ACP}^{\mathcal{L}^f}$, $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}}$. Das einzig nicht offensichtliche hierbei ist, dass man in der Theorie sagen muss, dass $\neg l_2(1, x)$ einen Körper definiert.

An sich wird alles sowieso interdefinierbar zwischen Sprachen sein, aber manchmal ist es klüger, eine spezielle Sprache zu betrachten. Das Ziel ist jetzt, zu beweisen, dass $\text{ACP}^{\mathcal{L}^f}$, $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}}$ Quantorenelimination haben und $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{ld}}$ immerhin modellvollständig ist.

Dazu müssen wir erst einmal verstehen, wie $\mathcal{L}^{f,c}$ -Unterstrukturen von $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}}$ -Modellen aussehen.

Lemma 1.2.4. Betrachte einen Paar von Körpern (K, E_K) und eine Teilmenge $A \subseteq K$ sowie eine $\mathcal{L}^{f,c}$ -Struktur $\mathcal{A} := (A, 0, 1, +, -, \cdot, {}^{-1}, (l_n)_{n \geq 2}, (f_{i,n})_{n \geq 2, 1 \leq i \leq n})$. Dann ist $\mathcal{A} \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$ genau dann, wenn A ein Unterkörper von K ist, $\mathcal{A} = (A, E_A)$ für $E_A := A \cap E_K$, und $\text{Ald}_{E_A} E_K$.

Beweis. A ist genau dann Unterkörper von K , wenn es $0, 1$ enthält, unter $+, -, \cdot, {}^{-1}$ abgeschlossen ist und die entsprechenden Abbildungsvorschriften erbt.

Außerdem ist $\text{Ald}_{E_A} E_K$ genau dann, wenn für alle $\bar{a} \in A$ aus \bar{a} linear abhängig über E_K schon äquivalent zu linearer Abhängigkeit über E_A ist; per kanonischer Definition also genau dann wenn $(A, E_A) \models l_{|\bar{a}|}(\bar{a}) \Leftrightarrow (K, E_K) \models l_{|\bar{a}|}(\bar{a})$.

Wenn \mathcal{A} Unterstruktur ist, dann gilt für alle $\bar{a} \in A$

$$\begin{aligned} \mathcal{A} \models l_{|\bar{a}|}(\bar{a}) &\Leftrightarrow (K, E_K) \models l_{|\bar{a}|}(\bar{a}) \\ &\Leftrightarrow \bar{a} \text{ linear unabhängig über } E_K \Leftrightarrow \bar{a} \text{ linear unabhängig über } E_A, \end{aligned}$$

wobei die letzte Äquivalenz davon herrührt, dass die lineare Abhängigkeit bezeugende Linearkombination sich z.B. durch Projektionen und Nullen als Koeffizienten schreiben lässt und Projektionen von Elementen aus A wegen Unterstruktureigenschaft wieder in A sind. Also stimmen die Interpretationen der l_n in \mathcal{A} mit denen in (A, E_A) überein und es ist $\text{Ald}_{E_A} E_K$. Da die definierende Formel der $(f_{i,n})$ bis auf die Angabe des Bildbereiches eine Ringformel ist, und da $f_{i,n}(\bar{a}) \in E_K \cap A$, stimmen auch die Interpretationen der $f_{i,n}$ in \mathcal{A} und in (A, E_A) überein. Damit ist $\mathcal{A} = (A, E_A)$.

Die Rückrichtung folgt mit den ersten Zeilen dieses Beweises und, da die definierende Eigenschaft der $f_{n,i}$ „fast nur“ als Ringformel gegeben ist (s.o.). \square

Lemma 1.2.5. Wenn $(A, E_A) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$ und $X \subseteq K$ algebraisch unabhängig über AE_K ist, dann ist $(A(X), E_A) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$.

Beweis. Nach vorigem Lemma ist $A \text{ld}_{E_A} E_K$, daher gilt mit Lemma 1.1.7 (5.) $A(X) \text{ld}_{E_A} E_K$ und da $A(X)$ Unterkörper von K ist, gilt mit der Rückrichtung des letzten Lemmas $(A(X), E_A) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$. \square

Lemma 1.2.6. Sei $(A, E_A) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$ und $E_A \subseteq B \subseteq E_K$ ein Zwischenkörper. Dann ist $(A, E_A) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (AB, B) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$.

Beweis. Es ist nur $A \text{ld}_{E_A} B, AB \text{ld}_B E_K$ zu zeigen. Wegen $(A, E_A) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$ gilt $A \text{ld}_{E_A} E_K$ und mit Lemma 1.1.5 gilt schon beides. \square

Lemma 1.2.7. Im Falle dass das vorige Lemma auf $(A, E_A) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K), (\tilde{A}, E_{\tilde{A}}) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (\tilde{K}, E_{\tilde{K}}), E_A \subseteq B \subseteq E_K$ und $E_{\tilde{A}} \subseteq \tilde{B} \subseteq E_{\tilde{K}}$ angewendet wird und dass gilt $A \cong \tilde{A}, B \cong \tilde{B}, E_A \cong E_{\tilde{A}}$ (wobei die ersten Isomorphismen den dritten fortsetzen), sind (AB, B) und $(\tilde{A}\tilde{B}, \tilde{B})$ schon isomorph als $\mathcal{L}^{f,c}$ -Strukturen.

Beweis. Mit Lemma 1.1.3 erhält man wegen $A \text{ld}_{E_A} B, \tilde{A} \text{ld}_{E_{\tilde{A}}} \tilde{B}$ den Isomorphismus

$$A[B] \cong A \otimes_{E_A} B \cong \tilde{A} \otimes_{E_{\tilde{A}}} \tilde{B} \cong \tilde{A}[\tilde{B}],$$

der sich zu einem Isomorphismus der Quotientenkörper AB und $\tilde{A}\tilde{B}$ fortsetzt und A auf \tilde{A} , B auf \tilde{B} und E_A auf $E_{\tilde{A}}$ abbildet. Als Körperisomorphismus erhält er auch lineare Disjunktheit, weswegen er auch ein $\mathcal{L}^{f,c}$ -Isomorphismus ist. \square

Lemma 1.2.8. Wenn $(A, E_A) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$ und (K, E_K) Paar algebraisch abgeschlossener Körper ist, ist $E_A \subseteq A$ regulär.

Beweis. Die Aussage folgt aus $A \text{ld}_{E_A} E_K$ und der Körperinklusion $E_A \subseteq \overline{E_A} \subseteq E_K$ mit dem Lemma 1.1.5. \square

Lemma 1.2.9. Unter denselben Bedingungen wie im vorigen Lemma ist $(\overline{A}, \overline{E_A})$ Zwischenstruktur.

Beweis. Laut Lemma 1.2.6 ist $(\overline{AE_A}, \overline{E_A})$ Zwischenstruktur und damit insbesondere

$$A \text{ld}_{E_A} \overline{E_A}, \overline{AE_A} \text{ld}_{\overline{E_A}} E_K.$$

Klarerweise ist

$$(A, E_A) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (\overline{AE_A}, \overline{E_A}) = (\overline{A}, \overline{E_A}),$$

weil $\overline{AE_A}$ in der Bedingung $A \text{ld}_{E_A} \overline{E_A}$ gar nicht vorkommt und die Erweiterung also nichts ändert.

Lemma 1.1.7 (6.) ergibt wegen $\overline{E_A} \subseteq E_K$ regulär

$$\overline{A} = \overline{AE_A} \text{ld}_{\overline{E_A}} E_K,$$

was $(\overline{A}, \overline{E_A}) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$ beweist. \square

Satz 1.2.10. $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}}$ hat Quantorenelimination und ist vollständig, wenn man noch eine Charakteristik vorgibt.

Beweis. Gegeben sei eine beliebige unendliche Kardinalität κ . Zeige die Aussage mit dem Back&Forth-System der Isomorphismen zwischen maximal κ großen Unterstrukturen von κ^+ -saturierten Modellen $(K, E_K), (L, E_L)$: Dieses ist nichtleer, denn wenn \mathbb{P} der Primkörper der Charakteristik ist, ist (\mathbb{P}, \mathbb{P}) Unterstruktur von allen Modellen (wegen Gleichheit des Paares ist lineare Disjunktheit klar), bilde das als Unterstruktur von K auf sich selbst als Unterstruktur von L ab. Sei $(M, E_M) \rightarrow (N, E_N)$ im B&F-System. $K \supset E_K, L \supset E_L$ haben Transzendenzgrad ∞ .

Das kann man zum Beispiel erreichen, indem die Erweiterung offenkundig transzendent ist, und man dann jeweils den partiellen Typ über \emptyset betrachtet, der die algebraische Unabhängigkeit von n Elementen über E_K bzw. E_L beschreibt, dieser hat folgende Gestalt:

$$\{\forall \bar{e} \in E \setminus \{0\} (f(\bar{e}, \bar{x}) \neq 0) \mid 0 \neq f \in \mathbb{P}(T_1, T_2, \dots, \bar{x})\}$$

Er ist endlich erfüllbar, da für m größer als der größte Polynomgrad im endlichen Teilfragment und x transzendent über E_K bzw. E_L die Elemente x, x^m, x^{m^2}, \dots algebraisch unabhängig über Polynome von Grad kleiner m sind.

(E ist $(M, E_M)(N, E_N)$ jeweils algebraisch abgeschlossen. Denn Lemma 1.2.6 erzeugt einen Isomorphismus zwischen den Zwischenstrukturen

$$(ME_M^{\text{alg } K}, E_M^{\text{alg } K}) \text{ und } (NE_N^{\text{alg } L}, E_N^{\text{alg } L}),$$

der sich auf einen Isomorphismus

$$(M^{\text{alg } K}, E_M^{\text{alg } K}) \cong (N^{\text{alg } L}, E_N^{\text{alg } L})$$

fortsetzt.

Sei jetzt $a \in K$. Wenn $a \in M$ liegt, dann kann man die Abbildung auf triviale Weise auf a fortsetzen.

Wenn ansonsten a algebraisch über $E_K M$ ist, ist $a \in \text{acl}(E_K M)$, also existiert $X \subset E_K$ endlich mit $a \in \text{acl}(MX)$. OBdA sei X jetzt schon ein Oberkörper von E_M , wichtig ist nur der endliche Transzendenzgrad über E_M . Für einen beliebigen algebraisch abgeschlossenen Zwischenkörper $E_N \subseteq Y \subseteq E_L$ von gleichem Transzendenzgrad (den gibt es, da die Saturation Transzendenzgrad ∞ von $E_N \subset E_L$ ergibt) kann $E_M \cong E_N$ fortgesetzt werden zu einem Isomorphismus $X \cong Y$. Diesen kann man wie in Lemma 1.2.7 fortsetzen zu einem $\mathcal{L}^{f,c}$ -Isomorphismus zwischen den Zwischenstrukturen $(\overline{MX}, X), (\overline{NY}, Y)$, wobei die erste a enthält.

Wenn a transzendent über $E_K M$ ist, gibt es ein $b \in L$ transzendent über $E_L M$, denn der entsprechende Typ ist konsistent, wenn $|L| > |E_L|$. So etwas lässt sich aber in einer elementaren Oberstruktur erreichen (für die endliche Konsistenz ist die genaue Kardinalität des Transzendenzgrads von $E_L \subset L$ egal) und wenn der Typ dort konsistent ist, dann auch unten.

a und b erzeugen dann einen Isomorphismus $C := \overline{M(a)} \stackrel{\phi}{\cong} \overline{N(b)}$. Setze

$$E := \overline{M(a)} \cap E_K \cap \phi^{-1}(E_L \cap \overline{N(b)}),$$

dann gilt $(C, E) \cong_{\mathcal{L}^{f,c}} (\phi(C), \phi(E))$ und $b \in \phi(C)$.

Zu zeigen ist nun nur noch

$$(M, E_M) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (C, E) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K), (N, E_N) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (\phi(C), \phi(E)) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K) :$$

Aus $(M, E_M) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K)$ folgt mit Lemma 1.2.5

$$(M, E_M) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (M(a), E_M) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K),$$

daraus mit Lemma 1.2.6 und $E_M \subseteq E \subseteq E_K$

$$(M, E_M) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (M(a)E, E) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K),$$

daraus folgt mit Lemma 1.2.9 und $E \subseteq \overline{M(a)} = C$ schließlich

$$(M, E_M) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (C, E) \subseteq_{\mathcal{L}^{f,c}} (K, E_K).$$

□

Lemma 1.2.11. Es gilt:

$$\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}} \models \forall x_1, \dots, x_n \forall y_1, \dots, y_n \neq 0 (l_n(x_1 y_1^{-1}, \dots, x_n y_n^{-1})$$

$$\leftrightarrow l_n(x_1 \prod_{i=1 \dots n, i \neq 1} y_i, \dots, x_n \prod_{i=1 \dots n, i \neq n} y_i)$$

$$\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}} \models \forall x_1, \dots, x_n \forall e_1, \dots, e_n \in E (l_n(e_1 x_1, \dots, e_n x_n) \leftrightarrow l_n(x_1, \dots, x_n))$$

$$\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}} \models \forall x_1, \dots, x_n, y \forall e_1, \dots, e_n, e \in E (f_{n,i}(ey, e_1 x_1, \dots, e_n x_n) = f_{n,i} \frac{e}{e_i} f_{n,i}(y, x_1, \dots, x_n))$$

$$\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}} \models \forall a, b, x_2, \dots, x_n (\neg t_n(a + b, x_2, \dots, x_n) \leftrightarrow \neg t_{n-1}(x_2, \dots, x_n) \vee$$

$$t_{n-1}(x_2, \dots, x_n) \wedge ((l_n(b, x_2, \dots, x_n) \wedge \neg l_{n+1}(a, b, x_2, \dots, x_n)) \vee$$

$$(\neg l_n(b, x_2, \dots, x_n) \wedge l_n(a, x_2, \dots, x_n)))$$

$$\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}} \models \forall a, b, x_1, \dots, x_n (f_{i,n}(a + b, x_1, \dots, x_n) = f_{i,n}(a, x_1, \dots, x_n) + f_{i,n}(b, x_1, \dots, x_n))$$

für alle $i = 1, \dots, n$

$$\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}} \models \forall a, b, x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n, z (f_{i,n}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, a + b, x_{i+1}, \dots, x_n) =$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} f_{i,n+1}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, a, b, x_{i+1}, \dots, x_n) & a, b, \bar{x} \text{ unabhängig} \\ f_{i,n}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, a, x_{i+1}, \dots, x_n) & \text{wenn nicht und } b \in \langle \bar{x} \rangle_E \\ f_{i,n-1}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) & \text{wenn nicht und } z \in \langle \bar{x} \rangle_E \\ \frac{f_{i,n}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, b, x_{i+1}, \dots, x_n)}{1 + f_{i,n}(a, x_1, \dots, x_{i-1}, b, x_{i+1}, \dots, x_n)} & \text{wenn nicht} \end{array} \right)$$

für alle $i = 1, \dots, n$

$$\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}} \models \forall a, b, x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n, z (f_{j,n}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, a + b, x_{i+1}, \dots, x_n) =$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{j+1_{j>i}, n+1}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, a, b, x_{i+1}, \dots, x_n) \\ a, b, \bar{x} \text{ unabhängig} \\ f_{j,n}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, a, x_{i+1}, \dots, x_n) \\ -f_{i,n}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, a, x_{i+1}, \dots, x_n) f_{j-1_{j>i}, n-1}(b, x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n) \\ \text{wenn nicht und } b \in \langle \bar{x} \rangle_E \\ f_{j,n}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, b, x_{i+1}, \dots, x_n) \\ -f_{i,n}(z, x_1, \dots, x_{i-1}, a + b, x_{i+1}, \dots, x_n) f_{j,n}(a, x_1, \dots, x_{i-1}, b, x_{i+1}, \dots, x_n) \\ \text{wenn nicht} \end{array} \right)$$

für alle $i = 1, \dots, n$ für alle $j \neq i$

Beweis. Die Rechnung will keiner sehen :)

□

Folgerung 1.2.12. Man kann jede Formel mit Parametern aus X modulo $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}}$ schreiben als

1. quantorenfreie Formel in \mathcal{L}_X^f oder
2. boolesche Kombination aus „ l_n (Monome mit Koeffizienten in X)“ und „(Polynom in $\mathbb{P}[X])(f_{i_1,n_1}(\text{Monome in } X), \dots, f_{i_m,n_m}(\text{Monome in } X)) = 0$ “,

wobei \mathbb{P} den Primkörper der entsprechenden Charakteristik bezeichne.

Folgerung 1.2.13. In jedem Modell (K, E_K) ist jede definierbare Menge $X \subset E_K^n$ schon beschreibbar als $X = E_K^n \cap Z$, wobei Z definierbar in der Ringsprache ist. Dementsprechend ist $E(x)$ eine streng minimale Formel und für $e_1, \dots, e_n \in E_K$ ist $\text{RM}(\bar{e}) = \dim_{\text{ACL}}(\bar{e})$.

Folgerung 1.2.14. $\text{ACP}^{\mathcal{L}^f}$ hat ebenfalls Quantorenelimination. Da in Lemma 1.2.2 gezeigt wurde, dass die $f_{i,n}$ sowohl existenziell als auch universell definierbar sind, ist jede Formel modulo $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{ld}}$ immerhin universell und $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{ld}}$ ist modellvollständig.

Definition 1.2.15. Wenn es keine Rolle spielt, in welcher Sprache man gerade ist, schreibe einfach **ACP** für die drei Theorien.

Folgerung 1.2.16. Man kann sich leicht überlegen, dass $\text{ACP} \cup \{„\text{Charakteristik} = p“\}$ das Primmodell $(\overline{\mathbb{P}(e)}, \overline{\mathbb{P}})$ hat für \mathbb{P} als Primkörper und ein beliebiges e transzendent über \mathbb{P} .

Satz 1.2.17. ACP ist ω -stabil.

Beweis. Betrachte die Menge der Typen in einem Modell (K, E_K) über einer vorgegebenen Menge $S \subset K$ und wähle als Sprache $\mathcal{L}^{f,c}$. \mathfrak{C} ist das Modell schon $|S|^+$ -saturiert und S Träger einer Unterstruktur. Aus dem B&F-System in Satz 1.2.10 geht hervor, dass es die folgenden Typen über S gibt:

- Den Typ eines Elementes in S
- Die Typen eines Elementes a in $\overline{SE_K} \setminus S$ (bestimmt durch den endlichen Transzendenzgrad über S des minimalen Unterkörpers $E_S \subseteq X \subseteq E_K$, sodass $a \in \overline{SX}$, sowie durch den Isomorphietyp des Minimalpolynoms von a über SX)
- Den Typ eines Elementes in $K \setminus \overline{SE_K}$

Der erste Typ hat klarerweise Morleyrang 0. Sei a ein Realisator eines Typen der zweiten Art. Dann ist a algebraisch über $S\bar{e}$ für gewisse $e_1, \dots, e_n \in E_K$, also

$$\text{RM}(a) \leq \text{RM}(\bar{e}) = \dim_{\text{ACL}}(\bar{e}) < \omega.$$

Der dritte Typ kann keinen Morleyrang $> \omega$ haben, denn dann müsste es einen Typen mit Morleyrang ω geben, die anderen Arten von Typen haben aber endlichen Rang. Sei (a_n) eine Folge von Elementen, sodass $n < \text{RM}(a_n) < \omega$ für alle $n \in \mathbb{N}$ (TODO: sowas gibt es). Dann ist im Stoneraum $\lim_{n \rightarrow \infty} \text{tp}(a_n) = p$ für den Typen p der dritten Art: Denn a_n kann jeweils nicht mehr algebraisch über SX sein für alle $E_S \subset X$ von Transzendenzgrad $\leq n$. Also sind für jede Umgebung, die das Nichterfüllen einer bestimmten Art von Polynom über SE_K beschreibt, fast alle a_n enthalten. Aber diese Umgebungen bestimmen den Typen p eindeutig, also sind für jedes $\phi \in p$ fast alle $\text{tp}(a_n)$ in \mathcal{U}_ϕ .

Jedes $\phi \in S_1(S)$ mit $\text{RM}(\phi) < \omega$ ist dann nur in endlich vielen $\text{tp}(a_n)$ enthalten (nämlich maximal $\text{RM}(\phi)$ vielen), also ist $\text{RM}(p) \geq \omega$, damit herrscht Gleichheit.

Da alle Typen Morleyrang $< \infty$ haben, haben alle Formeln in einer freien Variable Morleyrang $< \infty$ und die Theorie ist ω -stabil. \square

2 Dichte Paare o-minimaler Strukturen

2.1 Allgemeine Betrachtungen und Anforderungen an die Theorien

Viele Techniken und Gedanken aus dem vorigen Kapitel werden jetzt auf o-minimale Theorien übertragen: Im Folgenden halten wir einfach eine vollständige o-minimale Theorie T in der Sprache \mathcal{L} fest und betrachten die Theorie T^2 in der Sprache $\mathcal{L}_P := \mathcal{L} \cup \{P(x)\}$, sodass die Modelle von T^2 Modelle von T sind und in jedem Modell \mathcal{M} die Menge $P(M)$ ebenfalls Modell von T ist. Schreibe so ein Paar dann auch als (B, A) mit $A = P(B)$.

Wir setzen voraus, dass T eine durch $+$ dicht und linear angeordnete abelsche Gruppe mit einem positiven Element 1 beschreibt, sodass Definable Choice gilt. Dann sind die Skolemfunktionen definierbar und \mathbb{C} ist \mathcal{L} schon so eine definitorische Erweiterung, dass T Quantorenelimination hat und universell axiomatisierbar ist (wobei bei einzelnen Theorien die Frage interessant wäre, welche Skolemfunktionen man dafür überhaupt hinzufügen muss). Außerdem seien alle Modelle genug saturiert, dass die üblichen Rechenregeln für die Dimension gelten.

Aus T universell mit Quantorenelimination folgt, dass Unterstrukturen von Modellen von T schon elementare Unterstrukturen sind. Also ist für jede Teilmenge S eines Modells $\text{dcl}(S)$ schon eine elementare Substruktur; zur Vereinfachung bezeichne in Zukunft $AB := \text{dcl}(A \cup B)$ für zwei Teilmengen A, B eines Modells.

P beschreibt also eine elementare Unterstruktur, mit T^d wird nun die Theorie beschrieben, die ausdrückt, dass P eine dichte echte Unterstruktur ist (diese zwei Sachen oder deren Gegenteil müssen auf jeden Fall von der Theorie beschrieben werden, wenn sie vollständig sein soll). Klar ist dann, dass Unterstrukturen von T^d automatisch Modelle von T^2 sind.

Dem Verlauf in [vdD98] folgend, wird zunächst die Vollständigkeit und eine Art von Quantorenelimination für T^d gezeigt, wofür aber eine genauere Betrachtung von sogenannten kleinen Mengen vonnöten ist.

2.2 Kleine Mengen

Definition 2.2.1. Sei $(B, A) \models T^d$, dann ist eine definierbare Menge $S \subseteq B$ **klein**, wenn eine B -definierbare Funktion $f : B^n \rightarrow B$ existiert mit $S \subseteq f(A^n)$.

Das Ziel ist jetzt, zu zeigen, dass definierbare Intervalle nicht klein sind.

Im folgenden Lemma meint $(\cdot, +)$ nicht unbedingt die Operationen in \mathcal{L} , sondern nur

irgendwelche definierbaren Verknüpfungen.

Lemma 2.2.2. Seien $A \prec B \models T$, $f : B^{n+1} \rightarrow B$ A -definierbar, $b \in B \setminus A$, $\beta, \gamma \in A$ mit $\beta < b < \gamma$ und einer angeordneten A -definierbaren Körperstruktur $(\cdot, +)$ auf $(\beta, \gamma) =: I$. Dann existieren $a_0, \dots, a_n \in I_A$ mit

$$a_n b^n + a_{n-1} b^{n-1} + \dots, a_0 \in I \setminus f(A^n \times \{b\}).$$

Beweis. Wenn die Aussage nicht gilt, dann gilt mit $p(x, y) := x_n y^n + x_{n-1} y^{n-1} + \dots, x_0$, dass für jedes $a \in (I_A)^{n+1}$ ein $\alpha \in A^n$ existiert mit $p(a, b) = f(\alpha, b)$. Es muss für festes $a \in I_A$ ein Intervall um b in I_A mit dieser Eigenschaft geben, denn sonst wäre $b \in \text{dcl}(A) = A$.

Sei jetzt a nicht mehr fixiert, dann existiert mit Definable Choice eine definierbare Zuordnung $a \mapsto \alpha(a)$, sodass $p(a, \cdot) = f(\alpha(a), \cdot)$ auf einem Intervall gilt. Da jedes a $n+1$ viele Einträge hat und jedes $\alpha(a)$ n viele, müssen unendlich viele $a \in (I_A)^{n+1}$ existieren, die durch α auf das selbe Element abgebildet werden. Denn wenn das nicht so wäre, wäre ein generisches Element aus $(I_A)^{n+1}$ algebraisch über einem Element aus A^n , was der Generizität widerspricht. Da es unendlich viele Elemente gibt, sodass α auf ihnen konstant ist, gibt es schon eine Zelle von Dimension > 0 mit der Eigenschaft und damit insbesondere eine Zelle E von Dimension 1 (Als Teilmenge einer Zelle lässt sich immer eine von kleinerer Dimension finden). Nenne den konstanten Wert dann α^* . Da also gilt: Für alle $a \in E$ existiert ein Intervall J mit $p(a, \cdot) = f(\alpha^*, \cdot)$ auf J ; existieren mit Definable Choice $\beta^*, \gamma^* : E \rightarrow I_A$, sodass $p(a, \cdot) = f(\alpha^*, \cdot)$ auf $(\beta^*(a), \gamma^*(a))$ gilt. (Seien β^* und γ^* jetzt schon stetig auf E und ein $e \in E$ beliebig. Dann existiert für ε hinreichend klein eine E -Umgebung U um e , sodass

$$\beta^* < \frac{1}{2}(\beta^*(e) + \gamma^*(e)) - \varepsilon, \quad \frac{1}{2}(\beta^*(e) + \gamma^*(e)) + \varepsilon < \gamma^*$$

auf U , also

$$p(a, x) = f(\alpha^*, x) \text{ für alle } a \in U, x \in \left(\frac{1}{2}(\beta^*(e) + \gamma^*(e)) - \varepsilon, \frac{1}{2}(\beta^*(e) + \gamma^*(e)) + \varepsilon\right)$$

gilt. Es kann aber nicht $p(a - a', x) = p(a, x) - p(a', x) = f(\alpha^*, x) - f(\alpha^*, x) = 0$ für $a, a' \in U$ verschieden und unendlich viele x sein, weil ein Nichtnullpolynom nicht unendlich viele Nullstellen haben kann. \square

Lemma 2.2.3. Sei \mathcal{A} eine o-minimale Erweiterung eines angeordneten Vektorraums über einem angeordneten Körper F und $g : A^{p+1} \rightarrow A$ definierbar, außerdem existiere für unendlich viele $\lambda \in F$ ein $a_\lambda \in A^p$ mit $g(a_\lambda, x) = \lambda x$ für unendlich viele $x \in A$.

Dann existiert ein Intervall I in A , sodass auf I eine A -definierbare Körperstruktur existiert, die mit $<$ kompatibel ist (was automatisch einen reell abgeschlossenen Körper impliziert).

Beweis. TODO: Geht irgendwie aus [PS97] hervor. \square

Lemma 2.2.4. Es sei $(A, B) \models T^d$, $f : B^{n+1} \rightarrow B$ A -definierbar in B und $b \in B \setminus A$. Dann enthält $f(A^n \times \{b\})$ kein Intervall um b .

Beweis. Nimm an, dass das Gegenteil gelte für das Intervall J (\mathbb{E} mit Randpunkten in A): Dann existiert insbesondere für jedes $q \in \mathbb{Q}$ hinreichend nahe bei 1 ein $a_q \in A^n$ mit $f(a_q, b) = qb$. Dann existiert wieder ein Intervall $I_q \subseteq J_A$ mit $f(a_q, x) = qx$ für alle $x \in I_q$. \mathbb{E} ist dieses Intervall schon beschränkt und die Randpunkte seien $c_q < d_q$. Definiere dann

$$r_q := \frac{c_q + d_q}{2}, s_q := \frac{d_q - c_q}{2} \in A,$$

$$g : (u, v, x) \mapsto f(u, v + x) - f(u, v) \quad u \in A^n, v, x \in A.$$

Dann gilt für alle $x \in (-s_q, s_q)$

$$g(a_q, r_q, x) = f(a_q, r_q + x) - f(a_q, r_q) = q(r_q + x) - qr_q = qx.$$

Also existiert nach dem letzten Lemma ein Intervall in A mit einer A -definierbaren Körperstruktur als RCF. Durch Translation (benutze Dichtheit) nehme an, dass $b \in I_B$ liegt. Dann existiert nach Lemma 2.2.2 ein Element $c \in I_B \setminus f(A^n \times \{b\})$. \mathbb{E} sei schon $\inf J, \sup J \in I$, sonst ersetze J durch ein kleineres Intervall.

Seien $d, e \in I$ mit $d < c < e$ und φ die orientierungserhaltende, A -definierbare affine Abbildung in I mit $\varphi(d) = \inf J, \varphi(e) = \sup J$. Dann ist $\varphi(c) \in J \setminus (\phi \circ f)(A^n \times \{b\})$ und da das Verketteten mit einer A -definierbaren invertierbaren Abbildung nichts an der Aussage ändert, gibt es einen Widerspruch. \square

Satz 2.2.5. Wenn $(B, A) \models T^d$, dann ist kein Intervall eine kleine Teilmenge.

Beweis. Sei $f : B^n \rightarrow B$ eine durch $\varphi(x, y, b)$ definierbare Abbildung mit φ eine \mathcal{L}_A -Formel und $b \in B^m$ für ein $m \in \mathbb{N}$ definiert. Für $\dim(b/A) = 0$ ist $f(A^n) \subseteq A$ klar, deswegen sei $\mathbb{E} \dim(b/A) \geq 1$. Definiere

$$g(x, z) := \begin{cases} \text{das eindeutige } y \in B & \text{für alle } z, \text{ für die } \varphi(x, y, z) \\ \text{mit } B \models \varphi(x, y, z) & \text{bei festem } \text{ eine Funktion definiert} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases},$$

Dann ist g in B A -definierbar und $g(\cdot, b) = f$. Falls $\dim(b/A) > 1$, füge genug Komponenten von b zu A hinzu, sodass $\dim(b/A) = 1$. Das Hinzufügen ändert nichts, denn Ab_i ist nach den Eingangsbemerkungen Modell von T und Ab_i ist erst recht dicht in B . Finde also b_i , sodass A -definierbare (h_j) existieren mit $b_j = h_j(b_i)$ für alle j . Wenn jetzt $J \subseteq f(A^n) = g(A^n, b) = g(A^n, h(b_i))$ für ein Intervall J , dann widerspricht das der Aussage des letzten Lemmas für die Funktion $(x, y) \mapsto g(x, h(y))$. \square

Definition 2.2.6. Schreibe ab jetzt $P(\bar{x}) := \bigwedge_{i=1}^{|\bar{x}|} P(x_i)$.

Lemma 2.2.7. Wenn (B, A) für ein unendliches $\kappa > |T|$ ein κ -saturiertes Modell von T^d ist, ist $\dim(B/A) \geq \kappa$.

Beweis. Sei S eine Basis von B/A mit $|S| < \kappa$; zeige nun, dass es kein Erzeugendensystem sein kann. Das folgt aus der Saturation angewandt auf den partiellen Typen

$$\{\forall \bar{y} \in P(x \neq t(\bar{y})) \mid t \text{ } \mathcal{L}_E\text{-Term}\},$$

der endlich erfüllbar ist, weil die Negation jeder dieser Formeln „ x ist in einer kleinen Menge“ impliziert. Wenn der Typ also nicht endlich erfüllbar wäre, würde eine endliche Vereinigung von kleinen Mengen ganz B überdecken. Das kann aber nicht gelten, denn eine endliche Vereinigung von kleinen Mengen ist wieder klein (in der das erzeugenden Abbildung kann man das durch Erhöhen der Dimension des Urbildes und Fallunterscheidung über eine Koordinate beweisen). \square

Folgerung 2.2.8. Der Beweis zeigt sogar, dass in einem κ -saturiertem Modell $(B, A) \models T^d$, gegeben Menge, $S, S', S'' \subset B$ mit $|S|, |S'|, |S''| < \kappa$, ein transzendentes Element b über SA gefunden werden kann mit $a < b$ für alle $a \in S'$ und $b < c$ für alle $c \in S''$, sofern dieser Ordnungstyp von b überhaupt konsistent ist.

2.3 Formelreduzierung in T^d

In diesem Abschnitt wird gezeigt, dass sich \mathcal{L}_P -Formeln modulo T^d sehr stark vereinfachen lassen. Indem dieses mit einem Back&Forth-System gezeigt wird, erhält man zusätzlich eine sehr große Klasse von elementaren Abbildungen zwischen Modellen von T^d .

In diesem Kontext wird wieder die acl-Unabhängigkeit in einem Modell von T relevant, die im ersten Kapitel mit „algebraisch disjunkt“ bezeichnet wurde. Man kann sich dafür folgende (teilweise schon bekannte) Fakten überlegen.

Lemma 2.3.1. Seien A, B, C, D Mengen in irgendeinem Modell von T .

1. Wenn A und B unabhängig über C sind, sind B und A unabhängig über C und $A \cap B \subseteq C$ (in fast allen Fällen wird sowieso $A, B \supseteq C$ gelten).
2. Wenn A und B unabhängig über C sind und $S \subseteq B$, dann sind auch $A \cup S$ und B unabhängig über $C \cup S$.
3. Wenn A und B unabhängig über C sind, $A \subseteq S \subseteq \text{acl}(A)$, $B \subseteq S' \subseteq \text{acl}(B)$, dann sind S und S' unabhängig über C .
4. Wenn A und B unabhängig über C sind und D unabhängig über AB , dann sind $A \cup D$ und B unabhängig über C .
5. Wenn $(D, C) \preceq (B, A) \models T^2$, dann sind A und D unabhängig über C .
6. Wenn $(D, C) \subseteq (B, A) \models T^2$, $S \subseteq A$ und A und D unabhängig über C sind, dann sind A und DS unabhängig über CS , $\langle D \cup S \rangle_{\mathcal{L}_P} = (DS, CS)$ und daher $(D, C) \subseteq (DS, CS) \subseteq (B, A)$.
7. Wenn $(D, C) \subseteq (B, A) \models T^2$ und $S \subseteq B$ unabhängig über DA ist, dann sind A und DS unabhängig über C , $\langle D \cup S \rangle_{\mathcal{L}_P} = (DS, C)$ und daher $(D, C) \subseteq (DS, C) \subseteq (B, A)$.

Beweis. 1.-4. sind bekannt.

5. Wenn $\bar{d} \in D$ algebraisch unabhängig über C ist, aber nicht über A , dann existiert eine \mathcal{L}_A -Formel $\varphi(\bar{x}, \bar{a})$, sodass $(\exists d_1$ von $\varphi(x_1, d_2, d_3 \dots, \bar{a})$ algebraisiert wird ($(\exists$ wird d_1 schon durch φ definiert)). Also erfüllt \bar{d} die \mathcal{L}_P -Formel

$$\exists \bar{y} \in P(\varphi(\bar{x}, \bar{y}) \wedge \forall z_2, z_3, \dots \exists! z_1(\varphi(\bar{z}, \bar{y})))$$

in (B, A) , also auch in (D, C) . Es existiert also $\bar{c} \in C$ mit

$$B \models \varphi(\bar{d}, \bar{c}) \wedge \forall z_2, z_3, \dots \exists! z_1 (\varphi(\bar{z}, \bar{c})),$$

was im Widerspruch zur Unabhängigkeit von \bar{d} über C steht.

6. Dass A und DS unabhängig über CS sind, ergibt sich in der Kombination von 2. und dann 3.

Dass die Trägermenge von $\langle D \cup S \rangle_{\mathcal{L}_P}$ die Menge DS ist, ergibt sich direkt per Definition als $DS = \text{del}(D \cup S) = \langle D \cup S \rangle_{\mathcal{L}}$. Weil A und DS unabhängig über CS sind, folgt

$$P(\langle D \cup S \rangle_{\mathcal{L}_P}) = DS \cap P(B) = DS \cap A = CS.$$

7 Es ergibt sich aus 4. und 3. dass A und DS unabhängig über CS sind. Der Rest geht analog zu 6. \square

Lemma 2.3.2. Sei $(B, A) \models T^d$. Dann ist A auch kodicht in B .

Beweis. Zu zeigen ist, dass für alle $a, c \in B$ ein $b \in B \setminus A$ existiert mit $a < b < c$. Durch Translation und Inversion kann man annehmen, dass $a = 0$. Wähle jetzt ein $d \in B \setminus A$ beliebig und $e \in A$ mit $d - c < e < d$. Dann ist $d - e$ nicht in A (denn sonst wäre es d) und $0 = e - e < d - e < d - (d - c) = c$. \square

Für die Konstruktion des gewünschten Back&Forth-Systems sei $\kappa > |T|$ eine beliebige, aber feste Kardinalzahl und $(B, A), (D, C) \models T^d$ zwei κ -saturierte Modelle.

Satz 2.3.3. Sei S die Menge aller partiellen Isomorphismen zwischen Unterstrukturen (B', A') von (B, A) und (D', C') von (D, C) der Mächtigkeit $< \kappa$, sodass B' und A unabhängig über A' sind und D' und C unabhängig über C' . Dann bildet S ein nichtleeres B&F-System und T^d ist insbesondere vollständig.

Beweis. Das System ist nichtleer, denn es gibt ein Primmodell \mathcal{M} von T , weil T vollständig ist und in jedem Modell A alle Eigenschaften von $\mathcal{M}_A := \langle \emptyset \rangle_{\mathcal{L}}$ in T beschrieben werden. Klarerweise ist $|M| = |T| < \kappa$. Der Isomorphismus $(\mathcal{M}_A, \mathcal{M}_A) \cong (\mathcal{M}_C, \mathcal{M}_C)$ liegt in S , denn Unabhängigkeit ist bei zwei gleichen Mengen offensichtlich.

Sei jetzt $S \ni i : (B', A') \rightarrow (D', C')$ und $b \in B$. Wenn $b \in B'$ ist, ist nichts zu zeigen. Wenn $b \in A \setminus B'$, betrachte den partiellen Typ

$$\{\alpha < x \mid i^{-1}(\alpha) < b\} \cup \{x < \beta \mid b < i^{-1}(\beta)\} \cup \{P(x)\}.$$

Dieser ist konsistent, da i ein Isomorphismus ist und C dicht in D ; mit Saturation existiert ein $d \in C \setminus D'$ mit diesem Ordnungstyp. i setzt sich dann eindeutig zu einem

Isomorphismus $i' : (B'b, A'b) \rightarrow (D'd, C'd)$ mit $i(b) = d$ fort, der gegeben ist durch die Abbildung $t(b) \mapsto i(t)(d)$ für t einen $\mathcal{L}_{B'}$ -Term und $i(t)$ den durch i geshifteten Term. Die Surjektivität dieser Abbildung ist klar, ebenso dass $i'(A'b) = C'd$. Wohldefiniertheit, Injektivität und Isomorphismeigenschaft gelten, denn:

$Rt_1(b) \dots t_n(b)$ gilt für $\mathcal{L}_{B'}$ -Terme t_1, \dots, t_n und eine Relation R genau dann, wenn es ein B' -definierbares Intervall I um b mit dieser Eigenschaft gibt (denn sonst wäre b definierbar über B' und somit in B'). Schickt man $I \cap B'$ mit i nach $J := i(I \cap B')$, so gilt für alle Elemente $z \in J$, dass $Ri(t_1)(z) \dots i(t_n)(z)$, da i ein Isomorphismus ist. Wäre jetzt nicht $Ri(t_1)(d) \dots i(t_n)(d)$, so gäbe es ein D' -definierbares Intervall I' um d , sodass das nicht gilt; insbesondere ist I' disjunkt zu J . Allerdings ist

$$b \in I' \cap \text{convex}(J) = I' \cap (i(\inf I), i(\sup I)),$$

also können I' und J nicht disjunkt sein. Es gilt also $Ri(t_1)(d) \dots i(t_n)(d)$.

Die Rückrichtung geht analog.

Zu zeigen ist nun, dass $B'b$ und A frei über $A'b$ sowie $D'd$ und C frei über $C'd$ sind, ebenso zu zeigen ist noch, dass $(B'b, A'b) \subseteq (B, A)$, $(D'd, C'd) \subseteq (D, C)$. Das alles folgt aber aus Lemma 2.3.1 (6.). Außerdem gilt $|D'd| = |B'b| = |B'| + |T| < \kappa$.

Sei jetzt $b \in B'A \setminus (A \cup B')$. Dann gibt es $\bar{a} \in A$ mit $b \in B'\bar{a}$. Erweitere wie schon bekannt i , sodass $\bar{a} \in \text{dom}(i)$; dann ist schon ganz $B'\bar{a} \subseteq \text{dom}(i)$, also auch b .

Abschließend sei $b \in B \setminus B'A$; wie oben erfülle dann den mit i geshifteten Ordnungstyp von b über B' mit einem Element $d \in D \setminus D'C$ (mit Folgerung 2.2.8 geht das). Wie oben kann i dann auf einen Isomorphismus $(B'b, A') \rightarrow (D'd, C')$ fortgesetzt werden und nach Lemma 2.3.1 (7.) erfüllen $(B'b, A')$, $(D'd, C')$ auch die hinreichenden Eigenschaften. \square

Dieses B&F-System beweist die Formelreduzierung in T^d .

Satz 2.3.4. Jede \mathcal{L}_P -Formel ist modulo T^d äquivalent zu einer booleschen Kombination von Formeln der Gestalt

$$\exists \bar{y} \in P(\phi(\bar{x}, \bar{y}))$$

für ϕ eine \mathcal{L} -Formel. Nenne eine solche boolesche Kombination eine **gute Formel** und eine Formel der Gestalt wie beschrieben eine **gute Formel in Reinform**.

Beweis. Hilfsaussage:

Es reicht zu zeigen, dass für alle Modelle $(B, A), (D, C) \models T^d$ und für alle $b \in B^n, d \in D^n$ gilt: Wenn b und d dieselben guten Formeln erfüllen, sind ihre Typen in (B, A) und (D, C) dieselben.

Dass dies ausreicht, erkennt man mit dem Ziegler'schen Trennungslemma: Sei $\psi \in$

$\mathcal{F}_n(\mathcal{L}_P)$ nicht äquivalent zu einer guten Formel und nenne die Menge aller guten Formeln in n freien Koordinaten K . Dann ist K abgeschlossen unter \wedge, \vee und enthält \top, \perp . Wenn ψ nicht äquivalent zu einer Formel aus K ist, sind $T^d \cup \{\psi\}$ und $T^d \cup \{\neg\psi\}$ nicht durch K trennbar, also existieren $(B, A), (D, C) \models T^d, b \in B^n, d \in D^n$, sodass $(B, A) \models \psi(b)$ und $(D, C) \models \neg\psi(d)$, aber $(B, A) \models \chi(b)$ genau dann, wenn $(D, C) \models \chi(d)$ für alle $\chi \in K$. Dann erfüllen b und d dieselben guten Formeln, aber haben nicht denselben Typ - ein Widerspruch!

Beweis der Hilfsaussage. Seien b, d wie verlangt und $(B, A), (D, C)$ schon $(\aleph_0 + |T|^+)$ -saturiert (das ändert nichts an Typen und dem Erfüllen von guten Formeln). Sei $a \in A^m$ für ein hinreichend großes m , mit der Eigenschaft dass $\dim(b/a) \leq \dim(b/A)$ (es folgt dann Gleichheit, da über einer kleineren Menge nicht mehr interdefinierbar werden kann). Für $A' := \text{dcl}(a), B' := \text{dcl}(a, b)$ gilt dann, dass A und B' unabhängig über A' sind. Es sind nämlich per Definition von a die Mengen A und b unabhängig über a (eben wegen $\dim(b/a) = \dim(b/A)$), mit Lemma 2.3.1 (2.) sind dann auch A und $b \cup (A')$ unabhängig über A' und mit 3. sind A und $B' = \text{dcl}(b \cup A')$ unabhängig über A' . Außerdem sind A' und B' maximal $|T| + \omega$ groß.

Wenn man den partiellen \mathcal{L}_P -Typ $\text{tp}_{\mathcal{L}}(a/b) \cup \{P(\bar{x})\}$ betrachtet, bleibt er konsistent unter der Ersetzung $b \mapsto d$ in den Formeln. Seien nämlich $\psi_1(\bar{x}, b), \dots, \psi_n(\bar{x}, b) \in \text{tp}_{\mathcal{L}}(a/b)$, dann ist

$$\exists \bar{x} \in P\left(\bigwedge_{i=1}^n \psi_i(\bar{x}, \bar{y})\right)$$

eine gute Formel, die von b und daher auch von d erfüllt wird. Also ist der ersetzte partielle Typ endlich konsistent, wegen Saturation habe er den Erfüller $c \in C$ und es gilt $\text{tp}_{\mathcal{L}}(a, b) = \text{tp}_{\mathcal{L}}(c, d)$. Wegen der Typengleichheit folgt insbesondere $\dim(b/a) = \dim(d/c)$; es bleibt noch zu zeigen, dass $\dim(b/A) = \dim(d/C)$, damit dann gilt $\dim(d/C) = \dim(b/A) = \dim(b/a) = \dim(d/c)$ und wie oben C und $D' := \text{dcl}(c, d)$ frei über $C' := \text{dcl}(c)$ sind. Die Gleichheit $\dim(b/A) = \dim(d/C)$ gilt aber, da für jede \mathcal{L} -Formel ψ und $j_1, \dots, j_n \in \mathbb{N}$ die Formel zu

„es existiert $\bar{y} \in P$, sodass $\psi(\bar{x}, \bar{y})$ x_i über x_{j_1}, \dots, x_{j_m} definiert“

eine gute Formel ist, die also genau dann von b erfüllt wird, wenn sie von d erfüllt wird. Da (a, b) und (c, d) den gleichen \mathcal{L} -Typ haben, gibt es einen partiellen Isomorphismus i von $B' = \text{dcl}(a, b)$ nach $D' = \text{dcl}(c, d)$ mit $i((a, b)) = (c, d)$, die Einschränkung auf $A' = \text{dcl}(a)$ bildet einen Isomorphismus nach $C' = \text{dcl}(c)$. Also ist i partieller

Isomorphismus $(B, A) \rightarrow (D, C)$, damit im B&F-System, also elementare Abbildung, weswegen b und d denselben \mathcal{L}_P -Typen haben. \square

\square

Folgerung 2.3.5. Für ein dichtes Paar (B, A) und $S \subseteq B^n$ eine A_0 -definierbare Menge in \mathcal{L}_P (wobei $A_0 \subseteq A$) ist $S \cap A^n$ eine A_0 -definierbare Menge in A .

Beweis. Nach der Formelreduzierung sei S (E) durch eine gute Formel definiert. Da die Definierbarkeit abgeschlossen unter booleschen Kombinationen ist, reicht es, eine Formel in Reinform zu betrachten.

Da aber für jede \mathcal{L}_{A_0} -Formel $\varphi(x, y, a')$ und jedes $a \in A^n$ die Aussagen

„Es existiert ein $y \in A^m$ mit $(B, A) \models \varphi(a, y, a')$ “,

„Es existiert ein $y \in A^m$ mit $B \models \varphi(a, y, a')$ “,

„Es existiert ein $y \in A^m$ mit $A \models \varphi(a, y, a')$ “

äquivalent sind wegen φ als \mathcal{L} -Formel und $A \prec B$, folgt, dass

$$\exists y \in P(\varphi(x, y, a'))(B) \cap A^n = \exists y(\varphi(x, y, a'))(A).$$

\square

2.4 Folgen der Existenz des B&F-Systems

Im Folgenden werden einige Anordnungen von wechselseitigen Inklusionen von Modellen von T betrachtet, in der Gleichheit von bestimmten Typen folgt.

Lemma 2.4.1. Für dichte Paare $(B, A), (D, C)$ mit $(D, C) \subseteq (B, A)$ sind folgende Eigenschaften äquivalent:

1. $(D, C) \preceq (B, A)$
2. D und A sind unabhängig über C .

Beweis. „1. \Rightarrow 2.“ : Diese Richtung ist schon aus Lemma 2.3.1 (5.) bekannt.

\square

.1 Ein Alternativbeweis zur ω -Stabilität von ACP

Beweis. Nach Folgerung 1.2.12 kann man jede Formel modulo $\text{ACP}^{\mathcal{L}^{f,c}}$ schreiben als boolesche Kombination aus „ $l_n(\text{Monome in } \mathbb{P}(X))$ “ und

„ $(\text{Polynom in } \mathbb{P}(X))(f_{i_1, n_1}(\text{Monome in } \mathbb{P}(X)), \dots, f_{i_m, n_m}(\text{Monome in } \mathbb{P}(X))) = 0$ “.

Diese beiden Arten von Formeln lassen sich weiterentwickeln zu Formeln der Art $\exists \bar{e} \in E(f(\bar{e}, \bar{x}) = 0)$ für $f(\bar{T}, \bar{x}) \in \mathbb{P}(\bar{T})[\bar{x}]$ und der Art

$$\begin{aligned} \exists z_{1,2}, \dots, z_{1,n_1+1}, z_{2,2}, \dots, z_{2,n_2+1}, \dots \in E(p(z_{1,i_1-1}, \dots, z_{k,i_k-1}) = 0 \\ \bigwedge_{i=1}^k m_{i,1} = z_{i,2}m_{i,2}(\bar{x}) + \dots + z_{i,n_i}m_{i,n_i}(\bar{x})) \end{aligned}$$

für Monome $(m_{i,j}) \in \mathbb{P}(X)[\bar{x}]$ und ein Polynom $p \in \mathbb{P}(X)[\bar{x}]$. Nenne die Menge aller Formeln der ersten Art A und die aller Formeln der zweiten Art B . Insbesondere wurde die Menge der „interessanten“ Formeln nur vergrößert, das heißt, dass ein Typ p eindeutig durch

$$(p \cap A) \cup (p \cap B) \cup (p \cap \neg A) \cup (p \cap \neg B)$$

festgelegt wird.

Das bedeutet, in einem vorgegebenen Modell \mathcal{M} mit $X \subseteq M$, $|X| \leq \omega$ zerfällt $S_n(X)$ in folgende Teilmengen:

1. Typen, die eine Formel aus A und eine aus B enthalten.
2. Typen, die eine Formel aus A und keine aus B enthalten.
3. Typen, die eine Formel aus B und keine aus A enthalten.
4. Typen, die keine Formel aus $A \cup B$ enthalten.

Für einen Typen p ist im Fall 3./4. $p \cap A = \emptyset$, also $p \cap (A \cup \neg A)$ eindeutig gegeben durch die Verneinung aller möglichen Formeln in A mit n freien Variablen. Analog ist in Fall 2./4. $p \cap (B \cup \neg B)$ eindeutig bestimmt.

Es bleibt nun noch zu zeigen, dass es im Fall 1./2. jeweils nur abzählbar viele Möglichkeiten für Einschränkungen $p \cap (A \cup \neg A)$ geben kann und im Fall 1./3. nur abzählbar viele Möglichkeiten für Einschränkungen $p \cap (B \cup \neg B)$.

Zunächst zum ersten Teil: Definiere für ein Polynom $g \in E(X)[\bar{x}]$ die Relation

$$\begin{aligned} g \in \in p : \Leftrightarrow \text{es existiert } f(\bar{T}, \bar{x}) \in \mathbb{P}(\bar{T})[\bar{x}], \text{ es existieren } a_1, \dots, a_n \in E \text{ mit} \\ f(\bar{a}, \bar{x}) = g(\bar{x}) \text{ und } \exists \bar{e} \in E(f(\bar{e}, \bar{x}) = 0) \in p. \end{aligned}$$

$I := \{g \in E(X)[\bar{x}] \mid g \in p\}$ ist offenbar ein Ideal im Noetherschen Ring $E(X)[\bar{x}]$ (es ist nichtleer im Fall 1./2.) und daher endlich erzeugt durch $h_1, \dots, h_m \in I$. Da jedes Element $g \in I$ mit einem Element $\exists \bar{e} \in E(\bar{g}(\bar{e}, \bar{x}) = 0) \in p$ korrespondiert, ist $p \cap (A \cup \neg A)$ isoliert durch die übertragenen Erzeuger $\exists \bar{e} \in E(\bar{h}_1(\bar{e}, \bar{x}) = 0), \dots, \exists \bar{e} \in E(\bar{h}_m(\bar{e}, \bar{x}) = 0)$, also gibt es nur abzählbar viele Möglichkeiten für $p \cap (A \cup \neg A)$.

Formeln der zweiten Art kann man in Konjunktionen von Formeln der ersten Art umwandeln, indem man $(z_{l,i_l-1})_{l=1\dots k}$ zu freien Variablen macht. Auf diese Weise kann man partielle Typen in B zu partiellen Typen in A in mehr Variablen umformen (am angenehmsten geht es wahrscheinlich, wenn man annimmt, dass \mathcal{M} schon hinreichend saturiert ist und einen Erfüller \bar{a} von einem p der Art 1./3. betrachtet, eine Belegung $(b_{i,j})$ für die $(z_{i,j})$ in einer der Formeln findet und dann $\text{tp}(\bar{a}, (b_{l,i_l-1})_{l=1\dots k}/X)$ betrachtet). Aber wie auch immer man das macht, es können nur mehr Typen werden, dafür landet man wieder in Fall 1./2., wo wir wissen, dass es nur abzählbar viele Möglichkeiten gibt. \square

Literaturverzeichnis

- [Del12] Françoise Delon. *Elimination Des Quantificateurs Dans Les Paires De Corps Algébriquement Clos*. World Scientific Publishing Company, 2012.
- [Lan73] Serge Lang. *Introduction To Algebraic Geometry*. Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1973.
- [PS97] Ya'akov Peterzil and Sergei Starchenko. *A Trichotomy Theorem for o-minimal Structures*. Proceedings of the London Mathematical Society, 1997.
- [vdD98] Lou van den Dries. *Dense Pairs of o-minimal Structures*. Fundamenta Mathematicae, 1998.