

i Die Kategorie der affinen Varietäten

1 Affine Varietäten und Verschwindungsideale



Sei k stets ein Körper.

DEFINITION 1.1: Eine Teilmenge $V \subseteq k^n$ heißt *affine Varietät*, wenn es eine Menge von Polynomen $\mathcal{F} \subseteq k[X_1, \dots, X_n]$ mit

$$V = \mathfrak{V}(\mathcal{F}) := \{x = (x_1, \dots, x_n) \in k^n \mid f(x) = 0 \ \forall f \in \mathcal{F}\}$$

gibt.

BEISPIEL 1.2: (a) $k^n = \mathfrak{V}(\{0\})$

(b) $\emptyset = \mathfrak{V}(\{1\})$

Frage: Wie eindeutig ist das \mathcal{F} ? Zum Beispiel liefern Produkte und Summen von Polynomen keine neuen Nullstellen.

BEISPIEL: (a) $\mathfrak{V}(x^2 + y^2 + z^2 - 1) \supsetneq \mathfrak{V}(x^2 + y^2 + z^2 - 1, z - \frac{1}{2})$

(b) $\mathfrak{V}(x^2 + y^2 + z^2 - 1, z - \frac{1}{2}) = \mathfrak{V}(x^2 + y^2 + z^2 - 1, z - \frac{1}{2}, x^2 + y^2 + z^2 - 1 + z - \frac{1}{2})$.

BEMERKUNG 1.3: Seien $\mathcal{F}_1, \mathcal{F}_2 \subseteq k[X_1, \dots, X_n]$. Dann gilt:

(a) $\mathcal{F}_1 \subseteq \mathcal{F}_2 \implies \mathfrak{V}(\mathcal{F}_1) \supseteq \mathfrak{V}(\mathcal{F}_2)$

(b) Sei (\mathcal{F}) das von \mathcal{F} erzeugte Ideal. Dann gilt: $\mathfrak{V}(\mathcal{F}) = \mathfrak{V}((\mathcal{F}))$.

(c) Sei

$$\sqrt{(\mathcal{F})} := \{p \in k[X_1, \dots, X_n] \mid \exists d \geq 1 \text{ mit } p^d \in (\mathcal{F})\}$$

das *Radikal* von (\mathcal{F}) ($\sqrt{(\mathcal{F})}$ ist ein Ideal!). Ein Ideal mit $I = \sqrt{I}$ nennen wir *Radikalideal*. Es gilt: $\mathfrak{V}(\sqrt{(\mathcal{F})}) = \mathfrak{V}(\mathcal{F})$.

(d) Zu jeder affinen Varietät $V \subseteq k^n$ gibt es endlich viele Polynome f_1, \dots, f_r mit

$$V = \mathfrak{V}(\{f_1, \dots, f_r\}) =: \mathfrak{V}(f_1, \dots, f_r).$$

Beweis: (a) und (b) folgen direkt aus der Definition.

(c) Offenbar ist $\sqrt{(\mathcal{F})} \supseteq (\mathcal{F})$, also gilt nach (a) und (b):

$$\mathfrak{V}(\sqrt{(\mathcal{F})}) \subseteq \mathfrak{V}((\mathcal{F})) = \mathfrak{V}(\mathcal{F}).$$

Für die andere Richtung: Sei $x = (x_1, \dots, x_n) \in \mathfrak{V}(\mathcal{F})$ und $f \in \sqrt{(\mathcal{F})}$. Nach Definition existiert $d \in \mathbb{N}$, so dass $f^d \in (\mathcal{F})$. Also gilt $f^d(x) = 0$ und damit $f(x) = 0$, demnach ist $x \in \mathfrak{V}(\sqrt{(\mathcal{F})})$.

- (d) Nach (b) gilt $\mathfrak{V}(\mathcal{F}) = \mathfrak{V}((\mathcal{F}))$ und nach Hilberts Basissatz wird (\mathcal{F}) von endlich vielen Elementen erzeugt. \square

DEFINITION/BEMERKUNG 1.4: Sei $V \subseteq k^n$. Wir nennen

$$\mathfrak{I}(V) := \{f \in k[X_1, \dots, X_n] \mid f(x) = 0 \forall x \in V\}$$

das *Verschwindungsideal* von V . Es ist ein Ideal.

BEMERKUNG 1.5: Es gilt:

- (a) Seien $V_1, V_2 \subseteq k^n$ mit $V_1 \subseteq V_2$. Dann ist $\mathfrak{I}(V_1) \supseteq \mathfrak{I}(V_2)$.
- (b) Sei $V \subseteq k^n$. Dann ist $\mathfrak{I}(V)$ ein Radikalideal.
- (c) Sei V eine affine Varietät. Dann gilt $V = \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(V))$.

Es gilt sogar: $\mathfrak{I}(V)$ ist das größte Ideal mit dieser Eigenschaft, d.h. für jedes Ideal $J \subseteq k[X_1, \dots, X_n]$ mit $\mathfrak{V}(J) = V$ folgt schon $J \subseteq \mathfrak{I}(V)$.

- (d) Seien V_1, V_2 affine Varietäten. Dann gilt:

$$V_1 = V_2 \iff \mathfrak{I}(V_1) = \mathfrak{I}(V_2) \text{ und } V_1 \subseteq V_2 \iff \mathfrak{I}(V_1) \supseteq \mathfrak{I}(V_2).$$

Beweis: Die Aussagen (a) und (b) folgen sofort aus der Definition.

- (c) Sei zuerst $x \in V$. Dann gilt für alle $f \in \mathfrak{I}(V)$: $f(x) = 0$, also gilt $x \in \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(V))$.

Sei nun V eine affine Varietät. Dann gilt $V = \mathfrak{V}(\mathcal{F})$ für eine geeignete Menge \mathcal{F} . Es gilt $\mathcal{F} \subseteq \mathfrak{I}(V)$, also ist

$$V = \mathfrak{V}(\mathcal{F}) \supseteq \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(V)).$$

Der Rest der Behauptung folgt aus der Definition des Verschwindungsideals.

- (d) Die eine Richtung ist klar, bzw. folgt aus (a). Für die andere Richtung überlegt man sich, dass nach (c) $V_1 = \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(V_1)) = \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(V_2)) = V_2$ gilt. Die Aussage für die Inklusionen folgt analog. \square

Frage: Wir haben gesehen, dass die Zuordnung

$$V \longmapsto \mathfrak{I}(V)$$

injektiv ist. Ist sie auch surjektiv?

2 Zariski-Topologie



DEFINITION/BEMERKUNG 2.1: Sei $n \in \mathbb{N}$. Die affinen Varietäten im k^n bilden die abgeschlossenen Mengen einer Topologie auf dem k^n . Diese heißt *Zariski-Topologie*.

Beweis: (1) \emptyset und k^n sind affine Varietäten nach Beispiel 1.2.

- (2) Seien V_1, V_2 affine Varietäten, d.h. $V_1 = \mathfrak{V}(I_1)$ und $V_2 = \mathfrak{V}(I_2)$, wobei I_1, I_2 Ideale in $k[X_1, \dots, X_n]$ sind. Dann gilt:

$$V_1 \cap V_2 = \mathfrak{V}(I_1 \cup I_2) = \mathfrak{V}(I_1 + I_2).$$

Das gleiche Argument funktioniert für beliebige Familien V_λ mit $\lambda \in \Lambda$ und Λ Indexmenge, d.h. $\bigcap_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda$ ist wieder eine affine Varietät.

- (3) Seien V_1, V_2 affine Varietäten mit $I_1 = \mathfrak{I}(V_1)$ und $I_2 = \mathfrak{I}(V_2)$.

Zeige: $\mathfrak{V}(I_1 \cdot I_2) \subseteq V_1 \cup V_2 \subseteq \mathfrak{V}(I_1 \cap I_2) \subseteq \mathfrak{V}(I_1 \cdot I_2)$.

(i) $V_1 \cup V_2 \subseteq \mathfrak{V}(I_1 \cap I_2) \subseteq \mathfrak{V}(I_1 \cdot I_2)$ ist nach Definition klar.

(ii) Sei $x \in \mathfrak{V}(I_1 \cdot I_2)$. Angenommen $x \notin V_1$. Dann existiert $g \in I_1$ mit $g(x) \neq 0$. Sei $f \in I_2$. Dann ist $f \cdot g \in I_1 \cdot I_2$, folglich ist

$$(f \cdot g)(x) = f(x) \cdot g(x) = 0$$

und da $g(x) \neq 0$ ist $f(x) = 0$, also $x \in \mathfrak{V}(I_2) = V_2$.

DEFINITION 2.2: Wir schreiben $\mathbb{A}^n(k)$ für k^n mit der Zariski-Topologie.

BEMERKUNG 2.3: Sei $M \subseteq \mathbb{A}^n(k)$. Der Abschluss \overline{M} von M bezüglich der Zariski-Topologie ist $\overline{M} = \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(M))$.

Beweis: $\overline{M} \subseteq \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(M))$ folgt sofort aus der Definition.

Für die andere Inklusion überlegt man sich: Sei $\mathfrak{V}(J) \supseteq M$ eine abgeschlossene Obermenge von M . Dann ist $\mathfrak{I}(M) \supseteq \mathfrak{I}(\mathfrak{V}(J))$ und damit

$$\mathfrak{V}(\mathfrak{I}(M)) \subseteq \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(\mathfrak{V}(J))) = \mathfrak{V}(J). \quad \square$$

BEISPIEL 2.4: Sei $n = 1$. Dann gilt: $X \subseteq \mathbb{A}^1(k)$ ist genau dann abgeschlossen, wenn X eine endliche Teilmenge oder ganz $\mathbb{A}^1(k)$ ist.



„Kleine Umgebungen“ sind riesig groß!

BEMERKUNG 2.5: (a) Wenn k endlich ist, entspricht die Zariski-Topologie auf $\mathbb{A}^n(k)$ der diskreten Topologie.

(b) Wenn k unendlich ist, ist die Zariski-Topologie nicht hausdorffsch.

Beweis: (a) Punkte sind abgeschlossen, denn sei $x = (x_1, \dots, x_n) \in k^n$, dann ist

$$\{x\} = \mathfrak{V}(X_1 - x_1, \dots, X_n - x_n).$$

Damit sind auch endliche Vereinigungen von Punkten abgeschlossen und somit schon *alle* Teilmengen von $\mathbb{A}^n(k)$.

- (b) ERINNERUNG: Ein topologischer Raum X heißt hausdorffsch, wenn für alle Punkte $x, y \in X$ offene Umgebungen $U_x \ni x$ und $U_y \ni y$ mit $U_x \cap U_y = \emptyset$ existieren.

Für $n = 1$ folgt die Behauptung also aus Beispiel 2.4.

Den Fall $n \geq 2$ führen wir zurück auf den Fall $n = 1$:

Seien $x, y \in \mathbb{A}^n(k)$, U_x, U_y offene Umgebungen von x bzw. y . Wir setzen

$$V_1 := \mathbb{A}^n(k) \setminus U_x =: \mathfrak{V}(I_1) \text{ und } V_2 := \mathbb{A}^n(k) \setminus U_y =: \mathfrak{V}(I_2)$$

für entsprechende Ideale I_1 und I_2 . Ohne Einschränkung wählen wir x und y in $W := \mathfrak{V}(X_2, \dots, X_n)$, also auf der „ X_1 -Achse“. Dann gilt für alle Polynome $f \in I_1$ und $g \in I_2$, dass sie auf W nicht verschwinden, da x bzw. y in den Komplementen von V_1 bzw. V_2 liegen.

Dann besteht $V_1 \cap W$ aus nur endlich vielen Punkten, da diese Nullstellen von $f(X_1, 0, \dots, 0) \neq 0$ sein müssen. Gleiches gilt für $V_2 \cap W$. Also schneiden sich ihre Komplemente U_x und U_y sogar schon in W , da $|W| = |k| = \infty$. \square

DEFINITION/ERINNERUNG 2.6: Seien X, X_1, X_2 topologische Räume.

- (a) Sei $Y \subseteq X$. Definiere auf Y die *Spurtopologie* durch

$$U \subseteq Y \text{ offen} :\iff \exists V \subseteq X \text{ offen mit } U = V \cap Y.$$

- (b) Sei $X_1 \times X_2$ das kartesische Produkt (als Mengen) und seien

$$\begin{aligned} p_1: X_1 \times X_2 &\longrightarrow X_1, & (x_1, x_2) &\longmapsto x_1, \\ p_2: X_1 \times X_2 &\longrightarrow X_2, & (x_1, x_2) &\longmapsto x_2, \end{aligned}$$

die zugehörigen Projektionen. Die *Produkttopologie* auf $X_1 \times X_2$ ist die größte Topologie (d.h. möglichst wenig offene Mengen), so dass p_1 und p_2 stetig sind.

Daher ist $U \subseteq X_1 \times X_2$ genau dann offen, wenn U beliebige Vereinigung endlicher Schnitte von Urbildern offener Mengen in X_1 bzw. X_2 unter p_1 bzw. p_2 ist.

- (c) X heißt *reduzibel*, wenn es abgeschlossene echte Teilmengen

$$A, B \subsetneq X \text{ mit } X = A \cup B \text{ gibt.}$$

- (d) X heißt *irreduzibel*, wenn X nicht reduzibel ist.

- (e) Eine maximale irreduzible Teilmenge von X heißt *irreduzible Komponente*.

BEISPIEL 2.7: Sei X hausdorffsch und $M \subseteq X$. Dann gilt:

$$M \text{ ist irreduzibel (bzgl. Spurtopologie)} \iff |M| \leq 1,$$

M ist also einelementig oder leer.

Denn: Liegen $x \neq y$ in M , so finden wir (offene) Umgebungen U_x und U_y mit leerem Schnitt, können also

$$M = (M \setminus U_x) \cup (M \setminus U_y)$$

schreiben und sehen so, dass M reduzibel ist. \emptyset ist irreduzibel.

BEISPIEL 2.8: Sei k ein Körper mit unendlich vielen Elementen.

- (a) $\mathbb{A}^1(k)$ ist irreduzibel, da echte abgeschlossene Teilmengen endlich sind.
- (b) $\mathfrak{V}(X \cdot Y) = \mathfrak{V}(X) \cup \mathfrak{V}(Y)$ ist reduzibel mit irreduziblen Komponenten $\mathfrak{V}(X)$ und $\mathfrak{V}(Y)$.

BEMERKUNG 2.9: Sei $V \subseteq \mathbb{A}^n(k)$ eine affine Varietät. Dann gilt:

$$V \text{ ist irreduzibel} \iff \mathfrak{I}(V) \text{ ist ein Primideal.}$$

Beweis: Sei zuerst V irreduzibel. Seien $f, g \in k[X_1, \dots, X_n]$ mit $f \cdot g \in \mathfrak{I}(V)$.

Angenommen $f \notin \mathfrak{I}(V)$, dann gilt auch $\mathfrak{V}(f) \not\supseteq \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(V)) = V$.

Außerdem gilt nach Definition/Bemerkung 2.1: $\mathfrak{V}(f) \cup \mathfrak{V}(g) = \mathfrak{V}(f \cdot g) \supseteq V$, also

$$V = (V \cap \mathfrak{V}(f)) \cup (V \cap \mathfrak{V}(g)),$$

wobei $V \cap \mathfrak{V}(f)$ und $V \cap \mathfrak{V}(g)$ in V abgeschlossen sind. Außerdem ist, nach Annahme, $V \neq V \cap \mathfrak{V}(f)$, also gilt, da V irreduzibel ist, $V = V \cap \mathfrak{V}(g)$. Daraus folgt $V \subseteq \mathfrak{V}(g)$ und damit ist $g \in \mathfrak{I}(V)$ und $\mathfrak{I}(V)$ ist somit ein Primideal.

Sei nun $\mathfrak{I}(V)$ ein Primideal. Seien V_1, V_2 Varietäten mit $V = V_1 \cup V_2$ und $I_1 := \mathfrak{I}(V_1)$, $I_2 := \mathfrak{I}(V_2)$.

Angenommen $V \neq V_1$, d.h. $V \supsetneq V_1$, dann ist auch $\mathfrak{I}(V) \subsetneq \mathfrak{I}(V_1) = I_1$.

Außerdem ist $V = V_1 \cup V_2 = \mathfrak{V}(I_1 \cdot I_2)$, also ist $I_1 \cdot I_2 \subseteq \mathfrak{I}(V)$. Das impliziert aber $I_2 \subseteq \mathfrak{I}(V)$, da $\mathfrak{I}(V)$ ein Primideal ist und $I_1 \not\subseteq \mathfrak{I}(V)$. Daher gilt

$$V_2 = \mathfrak{V}(I_2) \supseteq \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(V)) = V,$$

also ist schon $V = V_2$ und damit ist V irreduzibel. □

PROPOSITION 2.10: Sei X ein topologischer Raum. Dann ist jede irreduzible Teilmenge in einer irreduziblen Komponente enthalten.

Beweis: Verwende das Lemma von Zorn:

ERINNERUNG: Hat in einer halbgeordneten Menge \mathcal{M} jede Kette (d.h. totalgeordnete Teilmenge) eine obere Schranke, dann hat \mathcal{M} mindestens ein maximales Element.

Seien also $X' \subseteq X$ eine irreduzible Teilmenge,

$$\mathcal{M} := \{Y \subseteq X \mid Y \text{ irreduzibel, } Y \supseteq X'\}$$

und $\{Y_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ eine Familie aus \mathcal{M} , die totalgeordnet ist. Sei $Y := \bigcup_{\lambda \in \Lambda} Y_\lambda$.

ZEIGE: $Y \in \mathcal{M}$, d.h. Y ist irreduzibel.

Wir nehmen an, es gäbe abgeschlossene Mengen $A, B \subsetneq X$, so dass $Y \cap A$ und $Y \cap B$ echte Teilmengen von Y sind, für die $Y = (Y \cap A) \cup (Y \cap B)$ gilt. Insbesondere gilt dann:

$$(X \setminus A) \cap Y \neq \emptyset \neq (X \setminus B) \cap Y.$$

Folglich existieren ein λ_1 mit $(X \setminus A) \cap Y_{\lambda_1} \neq \emptyset$ und ein λ_2 mit $(X \setminus B) \cap Y_{\lambda_2} \neq \emptyset$. Da die Y_{λ_i} Teil einer Kette sind, können wir ohne Einschränkung $Y_{\lambda_1} \subseteq Y_{\lambda_2}$ annehmen. Damit ist aber auch $(X \setminus A) \cap Y_{\lambda_2} \neq \emptyset$ und wir finden eine echte Zerlegung

$$Y_{\lambda_2} = (Y_{\lambda_2} \cap A) \cup (Y_{\lambda_2} \cap B),$$

was im Widerspruch zur Irreduzibilität von Y_{λ_2} steht. Folglich hat jede Kette eine obere Schranke und nach dem Lemma von Zorn hat \mathcal{M} somit ein maximales Element. \square

Satz 1: Sei V eine affine Varietät. Dann gilt:

- (a) V ist eine endliche Vereinigung von irreduziblen affinen Varietäten.
- (b) V hat nur endlich viele irreduzible Komponenten V_1, \dots, V_r . Insbesondere ist die Zerlegung

$$V = V_1 \cup \dots \cup V_r$$

eindeutig.

Beweis: (a) Seien

$$\begin{aligned} \mathcal{B} &:= \{V \subseteq k^n \mid V \text{ ist affine Varietät und erfüllt nicht (a)}\}, \\ \mathcal{J} &:= \{\mathfrak{J}(V) \subseteq k[X_1, \dots, X_n] \mid V \in \mathcal{B}\}. \end{aligned}$$

Wir nehmen an, \mathcal{B} wäre nicht leer. Dann ist auch \mathcal{J} nicht leer. Da $k[X_1, \dots, X_n]$ noethersch ist, finden wir in \mathcal{J} ein maximales Element $I_0 = \mathfrak{J}(V_0)$. Damit ist V_0 ein minimales Element in \mathcal{B} . Dann ist V_0 aber *nicht* irreduzibel, also existieren affine Varietäten $V_1, V_2 \subsetneq V_0$ mit $V_0 = V_1 \cup V_2$. Insbesondere sind diese aber nicht in \mathcal{B} , da V_0 minimal gewählt war, lassen sich also als Vereinigung endlich vieler irreduzibler Varietäten schreiben. Dann geht das aber auch für V_0 und das ist ein Widerspruch, da $V_0 \in \mathcal{B}$.

- (b) Mit Hilfe von Proposition 2.10 und dem (a)-Teil sehen wir, dass wir

$$V = V_1 \cup \dots \cup V_r$$

schreiben können, wobei die V_i irreduzible Komponenten sind. Wir zeigen noch die Eindeutigkeit dieser Zerlegung: Sei W eine irreduzible Komponente

von V . Wir schreiben

$$W = (W \cap V_1) \cup \dots \cup (W \cap V_r)$$

und sehen, da W irreduzibel ist, dass es ein i mit $W = W \cap V_i$ gibt. Also gilt $W \subseteq V_i$ und damit schon $W = V_i$, da W als irreduzible *Komponente* eine *maximale* irreduzible Teilmenge von V ist. \square

3 Der Hilbertsche Nullstellensatz



Motivation: Bisher haben wir die Mengen

$$\mathcal{V}_n = \{V \subseteq k^n \mid V \text{ affine Varietät}\} \text{ und } \mathcal{J}_n = \{I \subseteq k[X_1, \dots, X_n] \mid I \text{ Radikalideal}\}$$

und zwischen ihnen die Abbildungen

$$\begin{aligned} \mathfrak{V}: \mathcal{J}_n &\longrightarrow \mathcal{V}_n, & I &\longmapsto \mathfrak{V}(I) \\ \mathfrak{I}: \mathcal{V}_n &\longrightarrow \mathcal{J}_n, & V &\longmapsto \mathfrak{I}(V) \end{aligned}$$

betrachtet. Wir haben gesehen, dass $\mathfrak{V} \circ \mathfrak{I} = \text{id}$ gilt. Gilt auch $\mathfrak{I} \circ \mathfrak{V} = \text{id}$?

BEISPIEL: Wenn k nicht algebraisch abgeschlossen ist, muss das nicht gelten: sei $k = \mathbb{R}$ und $I = (X^2 + 1)$. Dann ist $\mathfrak{V}(I) = \emptyset$, aber $\mathfrak{I}(\mathfrak{V}(I)) = k[X_1, \dots, X_n]$.

Wir werden sehen, dass $\mathfrak{I} \circ \mathfrak{V} = \text{id}$ gilt, falls k algebraisch abgeschlossen ist. Das einzige „Problem“ ist, dass $\mathfrak{V}(I) = \emptyset$ gilt, obwohl $I \neq k[X_1, \dots, X_n]$ ist.

Satz 2 (Hilbertscher Nullstellensatz): (a) **Algebraische Form:** Sei \mathfrak{m} ein maximales Ideal in $k[X_1, \dots, X_n]$. Dann ist $k[X_1, \dots, X_n]/\mathfrak{m}$ eine endliche algebraische Körpererweiterung von k .

(b) **Schwacher Hilbertscher Nullstellensatz:** Ist k ein algebraisch abgeschlossener Körper und $I \subsetneq k[X_1, \dots, X_n]$ ein echtes Ideal, dann ist $\mathfrak{V}(I) \neq \emptyset$.

(c) **Starker Hilbertscher Nullstellensatz:** Ist k ein algebraisch abgeschlossener Körper und $I \subseteq k[X_1, \dots, X_n]$ ein Ideal, dann ist $\mathfrak{I}(\mathfrak{V}(I)) = \sqrt{I}$.

Die Aussage wird in mehreren Schritten im Rest dieses Abschnitts bewiesen.

Wir nennen $x_1 := \overline{X_1}, \dots, x_n := \overline{X_n}$. Ohne Einschränkung können wir nach einer eventuellen Umsortierung der Variablen annehmen, dass x_1, \dots, x_l algebraisch unabhängig über k sind und x_{l+1}, \dots, x_n algebraisch über $k(x_1, \dots, x_l)$. Also:

$$k \subseteq S = k(x_1, \dots, x_l) \subseteq L = k[X_1, \dots, X_n] / \mathfrak{m},$$

dabei ist $k(x_1, \dots, x_l) \cong \text{Quot}(k[X_1, \dots, X_l])$ und L ist endlich erzeugt als S -Modul.

LEMMA 3.1: Seien R, S, T Ringe mit $R \subseteq S \subseteq T$, sodass gilt:

- R ist noethersch
- T ist endlich erzeugt als R -Algebra; seien x_1, \dots, x_n solche Erzeuger
- T ist endlich erzeugt als S -Modul; seien w_1, \dots, w_m solche Erzeuger

Dann ist S als R -Algebra endlich erzeugt.

Beweis: Wir schreiben

$$x_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} w_j \text{ mit } a_{ij} \in S, \quad w_i w_j = \sum_{l=1}^m b_{ijl} w_l \text{ mit } b_{ijl} \in S.$$

Sei S_0 die R -Unteralgebra von S , die von allen a_{ij} und b_{ijl} erzeugt wird. Nach dem Hilbertschen Basissatz ist S_0 ein noetherscher Ring. T wird von den w_i auch als S_0 -Modul erzeugt und ist noethersch als S_0 -Modul, da er ein endlich erzeugter Modul über einem noetherschen Ring ist. S ist ein S_0 -Untermodul von T . Damit ist S endlich erzeugt als S_0 -Modul, also auch als R -Algebra. \square

Insbesondere ist in der Situation im Beweis des Hilbertschen Nullstellensatzes $k(x_1, \dots, x_l)$ als k -Algebra endlich erzeugt.

LEMMA 3.2: Es sei k ein Körper und $r \geq 1$. Dann ist $k(X_1, \dots, X_r)$ nicht endlich erzeugt als k -Algebra.

Beweis: Wir nehmen an, wir hätten endlich viele Erzeuger h_1, \dots, h_l und schreiben $h_i = \frac{f_i}{g_i}$ mit $f_i, g_i \in k[X_1, \dots, X_r]$. Dann wählen wir ein Primpolynom p , das keines der g_i teilt und schreiben

$$\frac{1}{p} = \sum_{i=1}^N a_i h_{i_1} \cdots h_{i_{m_i}} \quad (a_i \in k, \quad m_i \in \{1, \dots, l\}).$$

Sei $H = g_1 \cdots g_l$. Multipliziert man obige Gleichung mit H durch, bekommt man

$$\frac{H}{p} \in k[X_1, \dots, X_r],$$

also ist p ein Teiler von H . Aber p war teilerfremd zu allen g_i gewählt. Das ist ein Widerspruch. \square

PROPOSITION 3.3: Die algebraische Version des Hilbertschen Nullstellensatzes stimmt.

Beweis: Das liegt daran, dass $k[X_1, \dots, X_n]/\mathfrak{m}$ nach Lemma 3.1 als k -Algebra endlich erzeugt ist und nach Lemma 3.2 folglich keine transzendenten Elemente enthält, also eine algebraische Körpererweiterung ist. \square

Um die Implikation $I \subsetneq k[X_1, \dots, X_n] \implies \mathfrak{V}(I) \neq \emptyset$ zu zeigen, betrachten wir für einen Punkt $p = (x_1, \dots, x_n) \in k^n$ den Einsetzungshomomorphismus

$$\varphi_p: k[X_1, \dots, X_n] \longrightarrow k, \quad f \longmapsto f(p)$$

(das ist ein k -Algebrenhomomorphismus). Dieser steigt genau dann auf $A = k[X_1, \dots, X_n]/I$ ab, wenn $p \in \mathfrak{V}(I)$ gilt. Außerdem ist jeder k -Algebrenhomomorphismus $\varphi: A \longrightarrow k$ von dieser Art: wähle

$$p = (\varphi(\overline{X_1}), \dots, \varphi(\overline{X_n})).$$

Ist $I = \mathfrak{m}$ ein maximales Ideal, dann ist $A = k[X_1, \dots, X_n]/\mathfrak{m}$ eine endliche algebraische Körpererweiterung von k . In diesem Fall existiert genau dann ein k -Algebrenhomomorphismus von A nach k , wenn $A = k$ gilt.

LEMMA 3.4: Aus der algebraischen Version folgt der schwache Hilbertsche Nullstellensatz.

Beweis: Sei \mathfrak{m} ein maximales Ideal mit $I \subseteq \mathfrak{m}$. Da k algebraisch abgeschlossen ist, ist also, nach Satz 2 (a), $L = k[X_1, \dots, X_n]/\mathfrak{m} \cong k$. Sei $\varphi: L \longrightarrow k$ ein Isomorphismus und

$$p = (\varphi(\overline{X_1}), \dots, \varphi(\overline{X_n})) \in k^n.$$

Für $f \in \mathfrak{m}$ gilt dann $f(p) = \varphi(f(\overline{X_1}, \dots, \overline{X_n})) = \varphi(\overline{f(X_1, \dots, X_n)}) = \varphi(0) = 0$.

Also ist $p \in \mathfrak{V}(I)$ und damit $\mathfrak{V}(I) \neq \emptyset$. \square

LEMMA 3.5 (Schluss von Rabinowitsch): Der starke Hilbertsche Nullstellensatz folgt aus dem schwachen Hilbertschen Nullstellensatz.

Beweis: Zu zeigen ist $\mathfrak{I}(\mathfrak{V}(I)) = \sqrt{I}$. Die Inklusion „ \supseteq “ ist klar. Für die andere Inklusion nehmen wir uns ein $g \in \mathfrak{I}(\mathfrak{V}(I))$ und zeigen: es gibt ein $d \geq 1$ mit $g^d \in I$.

Wir betrachten k^{n+1} und definieren

$$J = (I, gX_{n+1} - 1).$$

Dann ist $\mathfrak{V}(J) = \emptyset$, denn wäre $p = (x_1, \dots, x_{n+1}) \in \mathfrak{V}(J)$, dann wäre $(x_1, \dots, x_n) \in \mathfrak{V}(I)$, also $g(x_1, \dots, x_n) = 0$, aber damit wäre

$$(gX_{n+1} - 1)(p) = -1 \neq 0,$$

was ein Widerspruch ist.

Nach Satz 2 (b) muss dann also $J = k[X_1, \dots, X_{n+1}]$ gelten. Also gibt es

$$b_1, \dots, b_{n+1} \in k[X_1, \dots, X_{n+1}],$$

sodass

$$1 = b_1 f_1 + \dots + b_n f_n + b_{n+1} (gX_{n+1} - 1)$$

gilt. Wir verwenden den k -Algebrenhomomorphismus

$$\varphi: k[X_1, \dots, X_{n+1}] \longrightarrow k(X_1, \dots, X_n), \quad X_i \longmapsto \begin{cases} X_i, & \text{für } i \in \{1, \dots, n\}, \\ \frac{1}{g}, & \text{für } i = n+1. \end{cases}$$

und erhalten so

$$1 = \varphi(1) = \varphi(b_1) f_1 + \dots + \varphi(b_n) f_n + 0.$$

Nun schreiben wir $\varphi(b_i) = \frac{\tilde{b}_i}{g} a_i$ für $\tilde{b}_i \in k[X_1, \dots, X_n]$. Durchmultiplizieren mit g^d für genügend großes d ergibt dann $g^d \in I$. \square

KOROLLAR 3.6: Ist k algebraisch abgeschlossen, dann entsprechen die affinen Varietäten in $\mathbb{A}^n(k)$ bijektiv den Radikalidealen in $k[X_1, \dots, X_n]$ via $V \longmapsto \mathfrak{I}(V)$.

4 Morphismen zwischen affinen Varietäten



Ziel: In diesem Abschnitt sollen Morphismen definiert werden. Die Idee dabei ist, Abbildungen zu betrachten, die von Polynomen herkommen.

DEFINITION 4.1: (a) Seien $V \subseteq k^n, W \subseteq k^m$ affine Varietäten. Wir nennen eine Abbildung $f: V \longrightarrow W$ einen *Morphismus*, wenn es Polynome $f_1, \dots, f_m \in k[X_1, \dots, X_n]$ mit

$$f(p) = (f_1(p), \dots, f_m(p)) \in k^m \text{ gibt.}$$

- (b) Ein Morphismus $f: V \longrightarrow W$ heißt *Isomorphismus*, wenn es einen Morphismus $g: W \longrightarrow V$ mit $g \circ f = \text{id}_V$ und $f \circ g = \text{id}_W$ gibt.
- (c) Gibt es einen Isomorphismus zwischen V und W , so heißen V und W *isomorph*.

BEMERKUNG 4.2: Die affinen Varietäten über k bilden zusammen mit den Morphismen eine Kategorie: \mathcal{AffVar}_k . Dabei sind die Objekte gerade die affinen Varietäten und die Morphismen zwischen zwei affinen Varietäten sind wie in Definition 4.1 gegeben. Man beachte, dass die Verkettung von Polynomen wieder ein Polynom ist, d.h. die Verkettung zweier Morphismen ist auch wieder ein Morphismus.

BEISPIEL 4.3: (a) Projektionen bzw. Einbettungen $\mathbb{A}^n(k) \longrightarrow \mathbb{A}^m(k)$

$$\begin{cases} (x_1, \dots, x_n) \longmapsto (x_1, \dots, x_m), & \text{falls } n \geq m, \\ (x_1, \dots, x_n) \longmapsto (x_1, \dots, x_n, 0, \dots, 0), & \text{falls } n < m, \end{cases}$$

sind Morphismen.

- (b) Jedes $f \in k[X_1, \dots, X_n]$ definiert einen Morphismus $\mathbb{A}^n(k) \longrightarrow \mathbb{A}^1(k)$.
- (c) Seien $V = \mathbb{A}^1(k)$, $W = \mathfrak{V}(Y^2 - X^3) \subseteq \mathbb{A}^2(k)$. Die Abbildung

$$f: V \longrightarrow W, \quad x \longmapsto (x^2, x^3)$$

definiert einen Morphismus. Ihr Bild heißt *Neilsche Parabel*.

Hierbei ist f bijektiv mit Umkehrabbildung

$$g(x, y) = \begin{cases} y/x, & \text{falls } x \neq 0, \\ 0, & \text{falls } x = 0. \end{cases}$$

Ist k unendlich, so ist g kein Morphismus. Also sind bijektive Morphismen im Allgemeinen keine Isomorphismen.

- (d) Sei $\text{char}(k) = p > 0$. Dann heißt $f: \mathbb{A}^n(k) \longrightarrow \mathbb{A}^n(k)$ gegeben durch

$$f(x_1, \dots, x_n) = (x_1^p, \dots, x_n^p)$$

Frobeniusmorphismus. Bekanntermaßen sind die Nullstellen des Polynoms $X^p - X$ genau die Elemente aus \mathbb{F}_p . Damit sind die Fixpunkte des Frobeniusmorphismus gerade die Punkte mit Koordinaten in \mathbb{F}_p .

BEMERKUNG 4.4: (a) Morphismen sind stetig bezüglich der Zariski-Topologie.

(b) Sind $V \subseteq \mathbb{A}^n(k)$, $W \subseteq \mathbb{A}^m(k)$ affine Varietäten, dann lässt sich jeder Morphismus $f: V \longrightarrow W$ zu einem Morphismus $f^n: \mathbb{A}^n(k) \longrightarrow \mathbb{A}^m(k)$ fortsetzen.

Beweis: (a) Seien V und W affine Varietäten, $f: V \longrightarrow W$ ein Morphismus und $Z = \mathfrak{V}(J) \subseteq W$ abgeschlossen. Setze $I = \{g \circ f \mid g \in J\}$. Dann ist $f^{-1}(Z) = \mathfrak{V}(I)$, denn:

$$x \in f^{-1}(Z) \iff f(x) \in Z \iff g(f(x)) = 0 \text{ für alle } g \in J \iff x \in \mathfrak{V}(I).$$

Also ist $f^{-1}(Z)$ abgeschlossen und f damit stetig.

(b) Das folgt direkt aus Definition 4.1, da Polynome global definierbar sind. \square



Im Allgemeinen gibt es viel mehr stetige Abbildungen als Morphismen.

Beispielsweise ist jede bijektive Abbildung von k nach k stetig, was wir mit Hilfe von Beispiel 2.4 einsehen können.

DEFINITION 4.5: Sei $V \subseteq \mathbb{A}^n(k)$ eine affine Varietät. Dann heißt

$$k[V] = \{f: V \longrightarrow \mathbb{A}^1 \mid f \text{ ist Morphismus}\}$$

der *affine Koordinatenring*.

BEMERKUNG 4.6: (a) Der Koordinatenring $k[V]$ ist eine *reduzierte* k -Algebra, das heißt aus $f^n = 0$ folgt $f = 0$.

(b) Es gilt $k[V] \cong k[X_1, \dots, X_n]/\mathfrak{I}(V)$.

Beweis: (a) folgt aus (b), wobei Addition, Multiplikation und Skalarmultiplikation komponentenweise definiert sind. Die Reduziertheitsaussage ist klar, da $\mathfrak{I}(V)$ ein Radikalideal ist.

(b) Definiere

$$\varphi: k[X_1, \dots, X_n] \longrightarrow k[V], \quad p \longmapsto p|_V.$$

Dann ist φ nach Definition der Morphismen surjektiv, vgl. Definition 4.1. Weiter gilt:

$$p \in \text{Kern}(\varphi) \iff p|_V \equiv 0 \iff \forall x \in V: p(x) = 0 \iff p \in \mathfrak{I}(V).$$

Mit dem Homomorphiesatz folgt die Behauptung. \square

BEMERKUNG 4.7: Seien $V \subseteq \mathbb{A}^n(k)$, $W \subseteq \mathbb{A}^m(k)$ affine Varietäten. Dann gilt:

- (a) Jeder Morphismus $f: V \longrightarrow W$ induziert einen k -Algebrenhomomorphismus

$$f^\sharp: k[W] \longrightarrow k[V], \quad g \longmapsto g \circ f.$$

- (b) Jeder k -Algebrenhomomorphismus zwischen $k[W]$ und $k[V]$ wird von einem solchen f induziert.

- (c) Die Abbildung

$$\sharp: \text{Mor}(V, W) \longrightarrow \text{Hom}_k(k[W], k[V]), \quad f \longmapsto f^\sharp$$

ist sogar bijektiv.

Beweis: (a) Die Algebrenhomomorphismeigenschaften zu überprüfen ist elementar.

- (b) Sei $\varphi: k[W] \longrightarrow k[V]$ ein k -Algebrenhomomorphismus und

$$k[W] \ni p_i: W \longrightarrow k$$

sei die Projektion auf die i -te Koordinate. Definiere nun $f: V \longrightarrow W$ durch

$$x = (x_1, \dots, x_n) \longmapsto (\varphi(p_1)(x), \dots, \varphi(p_m)(x)).$$

Wir zeigen, dass f wohldefiniert ist und dass $f^\sharp = \varphi$ ist.

Zuerst sehen wir, dass die p_i 's $k[W]$ als k -Algebra erzeugen und nach der Definition von f ist

$$f^\sharp(p_i) = p_i \circ f = \varphi(p_i).$$

Es bleibt also nur noch die Wohldefiniertheit zu zeigen, d.h. f bildet wirklich nach $W = \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(W))$ ab.

Wir zeigen also: Für alle $g \in \mathfrak{I}(W)$ und $x \in V$ gilt $g(f(x)) = 0$.

Sei also $g \in \mathfrak{I}(W)$. Dann ist g als Element in $k[W]$ schon 0 und damit ist auch $\varphi(g) = 0$ in $k[V]$.

Nun definieren wir uns $\widehat{\varphi}$, indem wir $X_i \in k[X_1, \dots, X_m]$ auf ein Urbild von $\varphi(p_i)$ in $k[X_1, \dots, X_n]$ schicken. Das dürfen wir, da der Polynomring frei ist und daher kommutiert das folgende Diagramm:

$$\begin{array}{ccc} k[X_1, \dots, X_m] & \xrightarrow{\widehat{\varphi}} & k[X_1, \dots, X_n] \\ \downarrow \pi_W & & \downarrow \pi_V \\ k[W] = k[X_1, \dots, X_m] / \mathfrak{I}(W) & \xrightarrow{\varphi} & k[V] = k[X_1, \dots, X_n] / \mathfrak{I}(V) \end{array}$$

Also folgt die Behauptung, da

$$g(\varphi(p_1)(x), \dots, \varphi(p_m)(x)) = \widehat{\varphi}(g)(x) = 0$$

für $g \in \mathfrak{I}(W)$, da $\widehat{\varphi}(g) \in \mathfrak{I}(V)$ liegt, da das Diagramm kommutiert.

- (c) Die Surjektivität der Abbildung wurde gerade gezeigt, also bleibt nur die Injektivität zu zeigen. Sei also $f_1^\# = f_2^\#$, d.h. $g \circ f_1 = g \circ f_2$ für alle $g \in k[W]$. Insbesondere gilt das für die Projektionen auf die einzelnen Koordinaten. Damit sind f_1 und f_2 in allen Komponenten gleich und es folgt $f_1(x) = f_2(x)$ für alle $x \in V$. \square

Satz 3: Wir bezeichnen die Kategorie der endlich erzeugten, reduzierten k -Algebren mit \mathcal{RedAlg}_k .

- (a) Die Zuordnung $V \longmapsto k[V]$ induziert einen kontravarianten Funktor Φ .
 (b) Ist $K = k$ algebraisch abgeschlossen, so induziert Φ eine Äquivalenz der Kategorien \mathcal{AffVar}_K und \mathcal{RedAlg}_K .

Beweis: (a) Wir definieren Φ auf den Morphismen durch

$$\text{Mor}(V, W) \longrightarrow \text{Hom}_k(k[W], k[V]), \quad g \longmapsto g^\#.$$

Dann gilt $\Phi(g_1 \circ g_2) = (g_1 \circ g_2)^\# = g_2^\# \circ g_1^\#$ und $\Phi(\text{id}) = \text{id}$.

- (b) Nun zeigen wir, dass Φ eine natürliche Äquivalenz definiert. Genauer:
- Φ ist ein volltreuer Funktor (d.h. induziert Bijektion auf den Morphismen).
 - Für jede endlich erzeugte, reduzierte K -Algebra A gibt es eine affine Varietät V mit $\Phi(V) \cong A$.

Alternativ könnte man auch zeigen: Es existiert ein Funktor

$$\Psi: \mathcal{RedAlg}_K \longrightarrow \mathcal{AffVar}_K$$

mit $\Psi \circ \Phi \cong \text{id}_{\mathcal{AffVar}_K}$ und $\Phi \circ \Psi \cong \text{id}_{\mathcal{RedAlg}_K}$.

Zuerst stellen wir fest: Nach Bemerkung 4.7 ist Φ volltreu.

Sei nun A eine endlich erzeugte K -Algebra mit Erzeugern a_1, \dots, a_n . Definiere den Homomorphismus

$$\varphi: K[X_1, \dots, X_n] \longrightarrow A \text{ durch } X_i \longmapsto a_i.$$

Aus der Reduziertheit von A folgt, dass $I = \text{Kern}(\varphi)$ ein Radikalideal ist. Setze nun $V = \mathfrak{V}(I)$. Da K algebraisch abgeschlossen ist, gilt $\mathfrak{I}(V) = \sqrt{(I)} = I$. Insgesamt gilt mit dem Homomorphiesatz:

$$K[V] \cong K[X_1, \dots, X_n] / \mathfrak{I}(V) = K[X_1, \dots, X_n] / I \cong A. \quad \square$$

BEISPIEL 4.8: In diesem Beispiel sei wieder K algebraisch abgeschlossen.

- (a) Ist $V = \mathbb{A}^n(K)$, so ist $\mathfrak{I}(V) = (0)$ und damit $K[V] \cong K[X_1, \dots, X_n]$.
 (b) Im anderen Extremfall $V = \emptyset$ gilt $\mathfrak{I}(V) = K[X_1, \dots, X_n]$, d.h. $K[V] \cong \{0\}$.

- (c) Ist V ein Punkt, d.h. $V = \{(x_1, \dots, x_n)\}$, dann ist $\mathfrak{I}(V) = (X_1 - x_1, \dots, X_n - x_n)$. Also gilt dann $K[V] \cong K$. Das passt auch zu der Sichtweise, dass die maximalen Ideale in einem algebraisch abgeschlossenen Körper gerade den Punkten entsprechen.
- (d) Sei V eine Hyperebene, d.h. $\mathfrak{I}(V) = (a_1 X_1 + \dots + a_n X_n + c)$ mit mindestens einem $a_i \neq 0$. Dann ist $K[V] \cong K[X_1, \dots, X_{n-1}]$ und $V \cong \mathbb{A}^{n-1}$.
- (e) Wir betrachten die Neilsche Parabel aus Beispiel 4.3. Wir haben also

$$V = \mathfrak{V}(Y^2 - X^3) \text{ sowie } I = (Y^2 - X^3), \text{ also } \mathfrak{V}(I) = \{(t^2, t^3) \mid t \in K\}.$$

Folglich gilt

$$K[V] \cong K[X, Y] / (Y^2 - X^3).$$

Man beachte, dass $\mathbb{A}^1(K)$ und V birational äquivalent sind. Es gilt also $K(V) \cong K(\mathbb{A}^1(K))$.

Konkreter: Die Äquivalenzklasse von X^3 ist ein Quadrat in $K(V)$, also ist auch die Klasse von X ein Quadrat. Wie sieht eine Wurzel von der Klasse von X aus?

Betrachte dazu

$$r_1: \begin{cases} \mathbb{A}^1(K) \longrightarrow V \\ t \longmapsto (t^2, t^3) \end{cases} \quad \text{und} \quad r_2: \begin{cases} V \longrightarrow \mathbb{A}^1(K) \\ (x, y) \longmapsto y/x \end{cases}$$

Dann sind r_1 und r_2 birationale Abbildungen und induzieren

$$\begin{aligned} \alpha_1: K(V) &\longrightarrow K(\mathbb{A}^1(K)) = K(t), \\ \alpha_2: K(\mathbb{A}^1(K)) &\longrightarrow K(V), \end{aligned}$$

wobei $\alpha_1(X) = t^2$ und $\alpha_2(t) = Y/X$. Also gilt in $K(V)$: $Y^2/X^2 = X$.

Im Koordinatenring $K[V]$ gibt es hingegen keine Wurzel aus der Klasse von X . Denn ansonsten gäbe es $P \in K[X, Y]$ mit $P^2 - X \in (Y^2 - X^3)$. Also gäbe es ein

$$f \in K[X, Y] \text{ mit } P^2(X, Y) = X + f(X, Y)(Y^2 - X^3).$$

Insbesondere wäre dann

$$P^2(X, 0) = X - f(X, 0) \cdot X^3 = X(1 - f(X, 0)X^2) \text{ in } K[X].$$

Also wäre $P^2(X, 0)$ durch X , aber nicht durch X^2 teilbar, was unmöglich ist.

Daher ist $K[V]$ hier nicht isomorph zu $K[X]$.

5 Die Garbe der regulären Funktionen



In diesem Abschnitt wollen wir Morphismen „lokal“, d.h. auf offenen Mengen definieren.

In diesem Abschnitt sei stets K ein algebraisch abgeschlossener Körper.

DEFINITION/BEMERKUNG 5.1: Sei $f \in K[X_1, \dots, X_n]$ und

$$\mathfrak{D}(f) := \{x \in \mathbb{A}^n(K) \mid f(x) \neq 0\} = \mathbb{A}^n(K) \setminus \mathfrak{V}(f).$$

Das ist eine offene Teilmenge des $\mathbb{A}^n(K)$. Die Menge $\{\mathfrak{D}(f) \mid f \in K[X_1, \dots, X_n]\}$ ist eine Basis der Zariski-Topologie.

Beweis: Sei $U \subseteq \mathbb{A}^n(K)$ eine offene Menge, $V = \mathbb{A}^n(K) \setminus U$ und $I = \mathfrak{I}(V)$. Dann gilt für alle $f \in I$ und $p \in \mathfrak{D}(f)$, dass $f(p) \neq 0$, also $p \notin V = \mathfrak{V}(I)$ und damit $p \in U$. Also ist U die Vereinigung aller $\mathfrak{D}(f)$ für $f \in I$. \square

BEMERKUNG 5.2: Sei V eine affine Varietät und $h \in K[X_1, \dots, X_n]$. Dann gilt

$$\begin{aligned} \mathfrak{V}(h) \cap V = \emptyset &\iff \mathfrak{I}(V) + (h) = K[X_1, \dots, X_n] \\ &\iff 1 = gh + f \text{ für passende } g \in K[X_1, \dots, X_n], f \in \mathfrak{I}(V) \\ &\iff \bar{1} = \bar{g}\bar{h} \text{ in } K[V] \\ &\iff \bar{h} \text{ ist in } K[V] \text{ invertierbar.} \end{aligned}$$

DEFINITION 5.3: Sei $V \subseteq \mathbb{A}^n(K)$ eine affine Varietät und $U \subseteq V$ offen (bzgl. der Spurtopologie).

- (a) Sei $p \in U$. Eine Funktion $r: U \longrightarrow \mathbb{A}^1(K)$ heißt *regulär in p* , wenn es eine Umgebung U_p von p gibt und $f_p, g_p \in K[V]$ mit $g_p(x) \neq 0$ für alle $x \in U_p$, sodass

$$r(x) = \frac{f_p(x)}{g_p(x)} \text{ für alle } x \in U_p \text{ gilt.}$$

Die Funktion r heißt *regulär*, wenn sie für alle $p \in U$ regulär ist.

- (b) Die Menge

$$\mathcal{O}_V(U) = \{r: U \longrightarrow \mathbb{A}^1(K) \mid r \text{ regulär}\}$$

heißt *K -Algebra der regulären Funktionen* oder *regulärer Ring*.

BEISPIEL: Für $V = \mathbb{A}^1(K)$ und $U = V \setminus \{0\}$ ist z.B. $\frac{1}{x} \in \mathcal{O}_V(U)$.

BEMERKUNG 5.4: Sei $V \subseteq \mathbb{A}^n(K)$ eine affine Varietät und $U \subseteq V$ offen und dicht. Dann ist $\mathcal{O}_V(U)$ eine K -Algebra, die $K[V]$ umfasst.

BEMERKUNG 5.5 (Restriktion der regulären Funktionen): Für offene Mengen $U, U' \subseteq V$ mit $U' \subseteq U$ ist die Restriktionsabbildung

$$\rho_{U'}^U: \mathcal{O}_V(U) \longrightarrow \mathcal{O}_V(U'), \quad f \longmapsto f|_{U'}$$

ein K -Algebrenhomomorphismus mit folgenden Eigenschaften:

- (a) Für in V offene Mengen $U'' \subseteq U' \subseteq U$ gilt $\rho_{U''}^U = \rho_{U''}^{U'} \circ \rho_{U'}^U$.
 (b) Ist U offen in V und $(U_i)_{i \in I}$ eine offene Überdeckung von U , so gilt

- (i) Für alle $f \in \mathcal{O}_V(U)$ gilt $f = 0$ genau dann wenn $\rho_{U_i}^U(f) = 0$ für alle $i \in I$.
- (ii) Ist eine Familie $(f_i)_{i \in I}$ mit $f_i \in \mathcal{O}_V(U_i)$ gegeben, die

$$\rho_{U_i \cap U_j}^{U_i}(f_i) = \rho_{U_i \cap U_j}^{U_j}(f_j)$$

für alle $i, j \in I$ erfüllt, dann gibt es ein $f \in \mathcal{O}_V(U)$ mit $\rho_{U_i}^U(f) = f_i$ für alle $i \in I$ („Verklebeigenschaft“).

Beweis: (a) Folgt aus den Eigenschaften von Einschränkungen von Funktionen.

(b) (i) Klar.

- (ii) Definiere $f(x) = f_i(x)$, falls $x \in U_i$. Dann ist f wohldefiniert und eine reguläre Funktion, denn auf jedem U_i stimmt f mit f_i überein und f_i ist auf U_i regulär. \square

DEFINITION 5.6: (a) Sei X ein topologischer Raum. Für jede offene Menge $U \subseteq X$ sei eine K -Algebra $\mathcal{O}(U)$ gegeben. Weiter sei für jede Inklusion von offenen Mengen $U' \subseteq U$ ein K -Algebren-Homomorphismus $\rho_{U'}^U: \mathcal{O}(U) \longrightarrow \mathcal{O}(U')$ gegeben, sodass die Eigenschaften (a) und (b) aus Bemerkung 5.5 gelten. Dann heißt $\{\mathcal{O}(U), \rho_{U'}^U\}_{U' \subseteq U \text{ offen}}$ eine *Garbe von K -Algebren* auf X und die $\rho_{U'}^U$ heißen *Restriktionshomomorphismen*.

- (b) Garben von Vektorräumen, Ringen, Mengen etc. sind analog definiert.
- (c) Aus der Bedingung (i) in Bemerkung 5.5 folgt die Eindeutigkeit von f in (ii).
- (d) Sei X ein topologischer Raum und \mathcal{O}_X eine Garbe von Ringen auf X . Dann heißt (X, \mathcal{O}_X) ein *geringter Raum* und \mathcal{O}_X heißt *Strukturgarbe* auf X .

BEMERKUNG 5.7: Sei V eine affine Varietät über K . Die regulären Ringe $\mathcal{O}_V(U)$ aus Definition 5.3 bilden eine Garbe von K -Algebren.

BEISPIEL 5.8: Weitere Beispiele für Garben:

- topologischer Raum mit Garbe der stetigen Funktionen,
- differenzierbare Mannigfaltigkeiten mit C^k -Funktionen,
- Riemannsche Flächen mit Garbe der holomorphen Funktionen.

Ziel: Wir wollen reguläre Funktionen möglichst global definieren. Dazu zeigen wir zunächst, dass endlich viele der U_p reichen und dass $\mathcal{O}_V(V) = K[V]$.

BEMERKUNG 5.9: Sei V eine affine Varietät.

- (a) V ist ein *noetherscher topologischer Raum*, d.h. jede absteigende Kette abgeschlossener Mengen $V_1 \supseteq V_2 \supseteq V_3 \supseteq \dots$ wird stationär.
- (b) Offene Teilmengen U von V sind *quasikompakt*, d.h. jede offene Überdeckung besitzt eine endliche Teilüberdeckung.
- (c) Für $g \in K[V]$ sei $\mathfrak{D}(g) = \{x \in V \mid g(x) \neq 0\}$. Die Mengen $\mathfrak{D}(g)$ bilden eine Basis der Topologie von V . Es gilt sogar, dass jede offene Menge in V Vereinigung von endlich vielen der $\mathfrak{D}(g)$ ist.

Beweis: (a) Das gilt, weil $K[V]$ noethersch als Ring ist.

(b) Wenn das nicht so wäre, dann gäbe es in einer offenen Überdeckung

$$U \subseteq \bigcup_{i \in I} U_i$$

eine Folge i_1, i_2, i_3, \dots , so dass man kein U_{i_j} weglassen kann. Damit wäre

$$U_{i_1} \subseteq U_{i_1} \cup U_{i_2} \subseteq U_{i_1} \cup U_{i_2} \cup U_{i_3} \subseteq \dots$$

eine aufsteigende Kette offener Mengen, die nie stationär wird. Dies ist ein Widerspruch zu (a).

(c) Dass die $\mathfrak{D}(g)$ eine Basis bilden, sieht man wie in Definition/Bemerkung 5.1. Es reichen endlich viele, weil jedes Ideal in $K[V]$ endlich erzeugt ist. \square

PROPOSITION 5.10: Sei V eine affine Varietät. Dann gibt es für $g \in K[V]$ und eine reguläre Funktion $r \in \mathcal{O}_V(\mathfrak{D}(g))$ ein $f \in K[V]$ und ein $d \in \mathbb{N}_0$, sodass $r = \frac{f}{g^d}$.

Beweis: (1) Ohne Einschränkung kann in Definition 5.3 $U_p = \mathfrak{D}(g_p)$ gewählt werden, denn: Wir finden zunächst $f_p, g_p \in K[V]$, so dass $r(x) = \frac{f_p(x)}{g_p(x)}$ für alle $x \in U_p$. Wir wählen ein $\tilde{g}_p \in K[V]$ mit $p \in \mathfrak{D}(\tilde{g}_p) \subseteq U_p \subseteq \mathfrak{D}(g_p)$. Damit ist $\tilde{g}_p \in \sqrt{(g_p)}$, es gibt also ein $h \in K[V]$ und ein $d \in \mathbb{N}$ mit $\tilde{g}_p^d = h \cdot g_p$. Wir wählen $\hat{f}_p = f_p \cdot h$ und $\hat{g}_p = \tilde{g}_p^d$ und haben dann

$$r(x) = \frac{f_p(x)}{g_p(x)} = \frac{f_p(x)h(x)}{g_p(x)h(x)} = \frac{\hat{f}_p(x)}{\hat{g}_p(x)}$$

auf $\mathfrak{D}(\hat{g}_p) = \mathfrak{D}(\tilde{g}_p) \subseteq \mathfrak{D}(g_p)$.

(2) Nach Bemerkung 5.9 (b) genügen endlich viele der $\mathfrak{D}(g_p)$, also können wir

$$\mathfrak{D}(g) = \mathfrak{D}(g_1) \cup \dots \cup \mathfrak{D}(g_n)$$

schreiben und haben nach (1) $r = \frac{f_i}{g_i}$ auf $\mathfrak{D}(g_i)$ mit $f_i, g_i \in K[V]$.

Wir basteln nun $\tilde{f}_i, \tilde{g}_i \in K[V]$, so dass $r = \frac{\tilde{f}_i}{\tilde{g}_i}$ auf $\mathfrak{D}(\tilde{g}_i) = \mathfrak{D}(g_i)$ und $\tilde{f}_i \tilde{g}_j = \tilde{f}_j \tilde{g}_i$ in $K[V]$ gilt.

Es gilt $f_i(x)g_j(x) - f_j(x)g_i(x) = 0$ für alle $x \in \mathfrak{D}(g_i) \cap \mathfrak{D}(g_j) = \mathfrak{D}(g_i g_j)$. Also gilt

$$g_i(x)g_j(x) \cdot (f_i(x)g_j(x) - f_j(x)g_i(x)) = 0$$

für alle $x \in V$, da $V = \mathfrak{D}(g_i g_j) \cup \mathfrak{V}(g_i g_j)$. Wir wählen $\tilde{f}_i = f_i g_i$ und $\tilde{g}_i = g_i^2$. Dann ist

$$r(x) = \frac{f_i(x)g_i(x)}{g_i^2(x)} = \frac{\tilde{f}_i(x)}{\tilde{g}_i(x)}$$

auf $\mathfrak{D}(g_i) = \mathfrak{D}(\tilde{g}_i)$ und $\tilde{f}_i \tilde{g}_j - \tilde{f}_j \tilde{g}_i = 0$ auf ganz V .

Es gilt

$$\mathfrak{D}(g) = \bigcup_{i=1}^n \mathfrak{D}(g_i), \text{ also } \mathfrak{V}(g) = \bigcap_{i=1}^n \mathfrak{V}(g_i).$$

Nach dem starken Hilbertschen Nullstellensatz gilt also $g \in \sqrt{(g_1, \dots, g_n)}$, d.h. es gibt ein $d \in \mathbb{N}$ mit $g^d = h_1 g_1 + \dots + h_n g_n$ mit $h_i \in K[V]$. Damit ist für alle j :

$$f_j g^d = \sum_{i=1}^n h_i g_i f_j = \sum_{i=1}^n h_i g_j f_i = g_j \sum_{i=1}^n h_i f_i.$$

Wir setzen $f = \sum_{i=1}^n h_i f_i$ und haben dann für alle j

$$r(x) = \frac{f_j(x)}{g_j(x)} = \frac{f(x)}{g^d(x)}$$

auf $\mathfrak{D}(g_j)$. □

KOROLLAR 5.11: (a) $\mathcal{O}_V(\mathfrak{D}(g)) \cong K[V][\frac{1}{g}] = K[V]_{\{g^d | d \in \mathbb{N}_0\}}$

(b) Ist V irreduzibel, so gilt $\mathcal{O}_V(\mathfrak{D}(g)) = \{\frac{f}{g^d} \in \text{Quot}(K[V])\}$.

(c) $\mathcal{O}_V(V) = K[V]$

Beweis: (a) Die Abbildung

$$K[V][\frac{1}{g}] \longrightarrow \mathcal{O}_V(\mathfrak{D}(g)), \quad \frac{f}{g^d} \longmapsto \left(x \longmapsto \frac{f(x)}{g^d(x)} \right)$$

ist ein wohldefinierter K -Algebren-Homomorphismus, denn $\frac{f_1}{g^{d_1}} = \frac{f_2}{g^{d_2}}$ gilt genau dann, wenn es ein $\tilde{d} \in \mathbb{N}_0$ gibt, sodass

$$g^{\tilde{d}}(f_1 g^{d_2} - f_2 g^{d_1}) = 0$$

ist. Da $g(x) \neq 0$ auf $\mathfrak{D}(g)$ gilt, ist das äquivalent zu

$$\frac{f_1(x)}{g^{d_1}(x)} = \frac{f_2(x)}{g^{d_2}(x)} \text{ für alle } x \in \mathfrak{D}(g).$$

Außerdem ist die Abbildung offenbar injektiv und wegen Proposition 5.10 auch surjektiv.

(b) Das folgt aus (a), denn hier ist $K[V]$ nullteilerfrei.

(c) Hier wählen wir $g = 1$, sodass $\mathfrak{D}(g) = V$ und nach (a) $\mathcal{O}_V \cong K[V]$ gilt. □

PROPOSITION 5.12: Seien $V \subseteq \mathbb{A}^n(K)$, $W \subseteq \mathbb{A}^m(K)$ affine Varietäten. Genau dann ist eine Abbildung $f: V \longrightarrow W$ ein Morphismus, wenn f stetig ist und reguläre Funktionen erhält, d.h. für alle offenen $U \subseteq W$ und $r \in \mathcal{O}_W(U)$ gilt $r \circ f \in \mathcal{O}_V(f^{-1}(U))$.

Beweis: Sei zuerst f ein Morphismus. Dann ist f stetig nach Bemerkung 4.4. Sei $r \in \mathcal{O}_W(U)$. Dann lässt sich r lokal schreiben als

$$r(x) = \frac{g_p(x)}{h_p(x)} \text{ mit } g_p, h_p \in K[W].$$

Weil $g_p \circ f = f^\#(g_p)$ und $h_p \circ f = f^\#(h_p)$ in $K[V]$ liegen, ist $r \circ f(x) = \frac{g_p \circ f(x)}{h_p \circ f(x)}$ eine lokale Darstellung von $r \circ f$. Also ist $r \circ f$ eine reguläre Funktion.

Sei nun umgekehrt f eine stetige Abbildung, die reguläre Funktionen erhält. Für die Koordinatenfunktionen

$$p_i: \mathbb{A}^m(K) \longrightarrow \mathbb{A}^1(K), (x_1, \dots, x_m) \longmapsto x_i,$$

wollen wir $p_i \circ f \in K[V]$ zeigen. Dies gilt, denn $p_i \in K[W] = \mathcal{O}_W(W)$, also nach Voraussetzung $p_i \circ f \in \mathcal{O}_V(V) = K[V]$ mit Korollar 5.11 (c). \square

BEMERKUNG 5.13: Sei V eine affine Varietät.

- (a) Sei $U \subseteq V$ offen, $r \in \mathcal{O}_V(U)$ und $A = \{p \in U \mid r(p) = 0\}$. Dann ist A abgeschlossen in U .
- (b) („Identitätssatz“) Sind $U_1, U_2 \subseteq V$ offen und $r_1 \in \mathcal{O}_V(U_1)$, $r_2 \in \mathcal{O}_V(U_2)$ und gibt es ein $\tilde{U} \subseteq U_1 \cap U_2$, das in $U_1 \cap U_2$ dicht liegt und so, dass $r_1|_{\tilde{U}} = r_2|_{\tilde{U}}$, dann gilt $r_1|_{U_1 \cap U_2} = r_2|_{U_1 \cap U_2}$.

Beweis: (a) Sei $q \in U \setminus A$. Wir schreiben $r = \frac{f}{g}$ auf einem $\mathfrak{D}(g) \subseteq U$. Dann ist $r(q) \neq 0$, also $f(q) \neq 0$. Insbesondere ist $r(x) \neq 0$ für alle $x \in \mathfrak{D}(f) \cap \mathfrak{D}(g)$. Also ist $\mathfrak{D}(f) \cap \mathfrak{D}(g)$ eine Umgebung von q in $U \setminus A$.

- (b) Setze $r = r_1|_{U_1 \cap U_2} - r_2|_{U_1 \cap U_2} \in \mathcal{O}_V(U_1 \cap U_2)$. Es ist $r = 0$ auf \tilde{U} . Da die Nullstellenmenge nach (a) abgeschlossen ist und \tilde{U} dicht liegt, folgt $r = 0$ auf $U_1 \cap U_2$. \square

DEFINITION/BEMERKUNG 5.14: (a) Eine *quasi-affine Varietät* W ist eine Zariski-offene Teilmenge einer affinen Varietät.

- (b) Eine Abbildung $f: W_1 \longrightarrow W_2$ zwischen quasi-affinen Varietäten heißt *Morphismus* oder *reguläre Abbildung*, wenn f stetig ist und reguläre Funktionen erhält. Die quasi-affinen Varietäten bilden zusammen mit den Morphismen eine Kategorie.
- (c) Eine quasi-affine Varietät W heißt *affin (als abstrakte Varietät)*, wenn es einen Isomorphismus $f: W \longrightarrow V$ gibt, sodass $V = \mathfrak{V}(I)$ eine affine Varietät in einem $\mathbb{A}^n(K)$ ist.
- (d) Seien $W_1 \subseteq \mathbb{A}^n(K)$, $W_2 \subseteq \mathbb{A}^m(K)$ quasi-affine Varietäten und $f: W_1 \longrightarrow W_2$. Dann ist f genau dann eine reguläre Abbildung, wenn es reguläre Funktionen

$$f_1, \dots, f_m \in \mathcal{O}_{\overline{W_1}}(W_1) \text{ mit } f = (f_1, \dots, f_m)$$

gibt, denn f ist genau dann ein Morphismus, wenn f stetig ist und reguläre Funktionen erhält. Analog zu Proposition 5.12 lässt sich f also lokal als Quotient von regulären Funktionen schreiben.

- (e) Sei V eine affine Varietät und $U \subseteq V$ offen. Dann ist

$$\mathcal{O}_V(U) = \mathcal{O}_{\overline{U}}(U) =: \mathcal{O}(U).$$

Denn: Nach Definition ist jedes Element aus $\mathcal{O}_V(U)$ lokal auf einer offenen Teilmenge \widehat{U} von V von der Form $\frac{g}{h}$ mit $g, h \in K[V]$. Insbesondere stimmt das dann auch auf $\widehat{U} \cap \overline{U}$. Umgekehrt können wir, wenn $r = \frac{g}{h}$ lokal auf $\widetilde{U} \subseteq \overline{U}$ für $g, h \in K[V]$ gilt, ein offenes $\widehat{U} \subseteq V$ mit $\widehat{U} \cap \overline{U} = \widetilde{U}$ wählen.

BEISPIEL 5.15: (a) Sei $f \in K[X_1, \dots, X_n]$. Dann ist $\mathfrak{D}(f)$ affin als abstrakte Varietät, denn: Definiere $\tilde{f} \in K[X_1, \dots, X_{n+1}]$ durch $\tilde{f} = f \cdot X_{n+1} - 1$ und $I = (\tilde{f})$. Dann ist $\mathfrak{V}(I) = \{(x_1, \dots, x_{n+1}) \in \mathbb{A}^{n+1}(K) \mid f(x_1, \dots, x_n) \cdot x_{n+1} = 1\}$. Definiere weiter

$$\begin{aligned} r_1: \mathfrak{D}(f) &\longrightarrow \mathfrak{V}(I), & (x_1, \dots, x_n) &\longmapsto \left(x_1, \dots, x_n, \frac{1}{f(x_1, \dots, x_n)}\right), \\ r_2: \mathfrak{V}(I) &\longrightarrow \mathfrak{D}(f), & (x_1, \dots, x_{n+1}) &\longmapsto (x_1, \dots, x_n). \end{aligned}$$

Dann sind r_1 und r_2 wohldefinierte reguläre Abbildungen und zueinander invers.

- (b) $\mathbb{A}^1(K) \setminus \{0\} = \mathfrak{D}(X)$ ist nach (a) affin als abstrakte Varietät.
(c) $\mathbb{A}^2(K) \setminus \{(0, 0)\}$ ist nicht affin als abstrakte Varietät; siehe Übungsblatt.
(d) Für $\mathrm{GL}_n(K) = \{A \in K^{n \times n} \mid \det A \neq 0\} \subseteq K^{n^2}$ gilt $\mathrm{GL}_n(K) = \mathfrak{D}(\det(\cdot))$. Mit (a) kann $\mathrm{GL}_n(K)$ als affine Varietät in $\mathbb{A}^{n^2+1}(K)$ aufgefasst werden, nämlich als $\{(A, y) \in K^{n^2+1} \mid y \cdot \det A - 1 = 0\}$.

6 Rationale Abbildungen



In diesem Abschnitt wollen wir alle regulären Funktionen, die auf einem in V dichten U definiert sind, gleichzeitig betrachten.

In diesem Abschnitt sei stets K algebraisch abgeschlossen und V eine affine Varietät.

DEFINITION/BEMERKUNG 6.1: (a) Eine *rationale Funktion* auf V ist eine Äquivalenzklasse von Paaren (U, f) , wobei U eine dichte, offene Teilmenge von V mit $f \in \mathcal{O}_V(U)$ ist. Hierbei sei

$$(U, f) \sim (U', f') \iff f|_{U \cap U'} = f'|_{U \cap U'}.$$

- (b) In jeder Äquivalenzklasse gibt es ein maximales Element (bzgl. Inklusion auf U) (U, f) . Dieses U heißt *Definitionsbereich* und $V \setminus U$ heißt *Polstellenmenge*.
(c) Die rationalen Funktionen auf V bilden eine K -Algebra. Schreibweise: $\mathrm{Rat}(V)$.
(d) Ist V irreduzibel, so ist $\mathrm{Rat}(V)$ isomorph zu $\mathrm{Quot}(K[V]) = K(V)$.

Beweis: (a) Zu zeigen: \sim definiert eine Äquivalenzrelation. Es bleibt nur die Transitivität zu zeigen. Seien $(U_1, f_1) \sim (U_2, f_2)$ und $(U_2, f_2) \sim (U_3, f_3)$. Dann stimmen f_1 und f_3 auf $U_1 \cap U_2 \cap U_3$ überein. Da $U_1 \cap U_2 \cap U_3$ dicht in V ist, folgt mit dem Identitätssatz Bemerkung 5.13:

$$f_1|_{U_1 \cap U_3} = f_3|_{U_1 \cap U_3}$$

(b) Ist $(U, f) \sim (U', f')$, so kann auf $U \cup U'$ die reguläre Funktion \widehat{f} definiert werden, indem man

$$\widehat{f}(x) = \begin{cases} f(x), & \text{falls } x \in U, \\ f'(x), & \text{falls } x \in U', \end{cases}$$

setzt.

Setze also $U_{\max} = U \cup U'$, wobei U' alle offenen Mengen durchläuft für die es ein $f' \in \mathcal{O}(U')$ gibt mit $(U', f') \sim (U, f)$.

- (c) Summen und Produkte von rationalen Funktionen sind wieder rational und das ist mit der Äquivalenzrelation verträglich. Dabei ist zu beachten, dass man die Definitionsbereiche schneiden muss.
- (d) Definiere den K -Algebrenhomomorphismus α durch

$$\alpha: K(V) \longrightarrow \text{Rat}(V), \quad \frac{g}{h} \longmapsto \left[\left(\mathfrak{D}(h), \frac{g}{h} \right) \right].$$

Sei (U, r) mit $r \in \mathcal{O}(U)$ eine rationale Funktion. Da r regulär ist, gibt es $U' \subseteq U$ mit $r|_{U'} = \frac{g}{h}$, wobei $g, h \in K[V]$ und $h \in \mathcal{O}(U')$. Da V irreduzibel ist, ist U' bereits dicht. Also gilt $\alpha(\frac{g}{h}) = [(U, r)]$ und α ist surjektiv.

Die Injektivität ist klar, da $K(V)$ ein Körper ist. \square

DEFINITION 6.2: Sei V irreduzibel. Der Körper $K(V) \cong \text{Rat}(V)$ heißt *Funktionenkörper*.



Ist V irreduzibel, so repräsentiert der gekürzte Bruch $\frac{g}{h} \in K(V)$ die rationale Funktion $r := [(\mathfrak{D}(h), \frac{g}{h})]$.

Aber $\mathfrak{D}(h)$ kann eine *echte* Teilmenge des Definitionsbereichs $\text{Def}(r)$ sein.

Ist jedoch $K[V]$ faktoriell, so gilt $\mathfrak{D}(h) = \text{Def}(r)$ (vgl. dazu auch Übungsblätter 4 und 5).

PROPOSITION 6.3: Seien V, W irreduzible, affine Varietäten, $f: V \longrightarrow W$ ein Morphismus und $f^\sharp: K[W] \longrightarrow K[V]$ der induzierte K -Algebrenhomomorphismus. Dann gilt:

- (a) f^\sharp kann genau dann zu einem Körperhomomorphismus von $K(W) \longrightarrow K(V)$ fortgesetzt werden, wenn f^\sharp injektiv ist.

(b) $f^\#$ ist genau dann injektiv, wenn $f(V)$ dicht in W ist.

Beweis: (a) Die Notwendigkeit der Injektivität von $f^\#$ ist klar. Ist umgekehrt $f^\#$ injektiv, so definiert man $f^\#(\frac{a}{b}) = \frac{f^\#(a)}{f^\#(b)}$. Die Injektivität impliziert die Wohldefiniertheit und man sieht, dass man auf diese Art einen Körperhomomorphismus erhält.

(b) Für $f^\#$ gilt: Für jede Untervarietät $Z \subseteq V$ ist $f^{\#-1}(\mathfrak{I}(Z)) = \mathfrak{I}(f(Z))$. Denn:

$$\begin{aligned} g \in f^{\#-1}(\mathfrak{I}(Z)) &\iff g \circ f \in \mathfrak{I}(Z) \iff g \circ f(x) = 0 \quad \forall x \in Z \\ &\iff g(y) = 0 \quad \forall y \in f(Z) \iff g \in \mathfrak{I}(f(Z)). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Nun gilt: } f^\# \text{ ist injektiv} &\iff 0 = f^{\#-1}(0) = f^{\#-1}(\mathfrak{I}(V)) = \mathfrak{I}(f(V)) = \\ &\mathfrak{I}(\overline{f(V)}) \\ &\iff \overline{f(V)} = W. \quad \square \end{aligned}$$

DEFINITION 6.4: Ein Morphismus $f: V \longrightarrow W$ mit $\overline{f(V)} = W$ heißt *dominant*.

DEFINITION/BEMERKUNG 6.5: Seien $V \subseteq \mathbb{A}^n(K)$, $W \subseteq \mathbb{A}^m(K)$ affine Varietäten.

(a) Eine *rationale Abbildung* $f: V \dashrightarrow W$ ist eine Äquivalenzklasse (U, f_U) , wobei die U offen und dicht in V liegen und die $f_U: U \longrightarrow W$ reguläre Abbildungen sind. Dabei ist

$$(U, f_U) \sim (U', f'_U) \iff f_U|_{U \cap U'} = f'_U|_{U \cap U'}.$$

(b) Rationale Abbildungen nach $\mathbb{A}^1(K)$ sind rationale Funktionen.

(c) Jede rationale Abbildung $r: V \dashrightarrow W$ hat einen maximalen Definitionsbereich $\text{Def}(r)$, der offen ist.

(d) Sind V und W irreduzibel, so ist die Komposition von dominanten rationalen Abbildungen wieder eine dominante rationale Abbildung, d.h. für U dicht in V ist

$$\overline{r(U)} = W.$$

(e) Sind V und W irreduzibel, so induziert jede dominante rationale Abbildung

$$f: V \dashrightarrow W$$

einen Körperhomomorphismus $f^\#: K(W) \longrightarrow K(V)$ mit

$$f^\#(g) = g \circ f.$$

(f) Eine rationale Abbildung $f: V \dashrightarrow W$ heißt *birational*, wenn es eine rationale Abbildung $g: W \dashrightarrow V$ gibt, so dass $f \circ g$ und $g \circ f$ definiert sind und jeweils die Identität ergeben.

BEISPIEL 6.6: (a) Seien $V_1 = \mathfrak{V}(X \cdot Y)$, $V_2 = \mathbb{A}^1(K)$ und $V_3 = \mathbb{A}^1(K)$. Weiter seien folgende rationale Abbildungen gegeben:

$$\begin{aligned} f: V_1 &\dashrightarrow V_2, & (x, y) &\longmapsto x, \\ g: V_2 &\dashrightarrow V_3, & x &\longmapsto \frac{1}{x}, \end{aligned}$$

Hier ist $\text{Def}(g \circ f) \subseteq \mathfrak{V}(Y)$, also insbesondere nicht dicht in V_1 .

(b) Die Abbildung $\sigma: \mathbb{A}^2(K) \longrightarrow \mathbb{A}^2(K)$, $(x, y) \longmapsto (\frac{1}{x}, \frac{1}{y})$ ist auf $\mathbb{A}^2(K) \setminus \mathfrak{V}(X \cdot Y)$ definiert, also eine rationale Abbildung.

Beachte: $\sigma \circ \sigma = \text{id}|_{\mathbb{A}^2(K) \setminus \mathfrak{V}(X \cdot Y)}$, folglich ist σ sogar birational.

(c) Seien $V_1 = \mathbb{A}^1(K)$, $V_2 = \mathfrak{V}(Y^2 - X^3)$ (vgl. Beispiel 4.8 (e)). Betrachte die rationalen Abbildungen

$$\begin{aligned} r_1: V_1 &\longrightarrow V_2, & t &\longmapsto (t^2, t^3), \\ r_2: V_2 &\supseteq \mathfrak{D}(X) \longrightarrow V_1, & (x, y) &\longmapsto \frac{y}{x}, \end{aligned}$$

Dann erhalten wir:

- $r_2 \circ r_1 = \text{id}_{U_1}$ mit $U_1 = \text{Def}(r_2 \circ r_1) = \mathbb{A}^1(K) \setminus \{0\}$.
- $r_1 \circ r_2 = \text{id}_{U_2}$ mit $U_2 = \text{Def}(r_1 \circ r_2) = V_2 \setminus \{(0, 0)\}$.

Also ist $\mathfrak{V}(Y^2 - X^3)$ birational äquivalent zu $\mathbb{A}^1(K)$, aber sie sind nicht isomorph.

BEMERKUNG: Irreduzible affine Varietäten bilden zusammen mit den dominanten rationalen Abbildungen eine Kategorie.

Satz 4: Sei K algebraisch abgeschlossen. Dann ist die Kategorie der endlich erzeugten Körpererweiterungen L/K mit K -Algebrenhomomorphismen äquivalent zur Kategorie der irreduziblen affinen Varietäten mit dominanten rationalen Abbildungen.

Beweis: Wir definieren

$$\Phi: \begin{cases} V \longmapsto K(V) \\ f \longmapsto f^\# \end{cases}$$

und zeigen, dass das eine Äquivalenz von Kategorien liefert. Dazu zeigen wir:

- Für jede endlich erzeugte Körpererweiterung L/K gibt es eine irreduzible affine Varietät V mit $K(V) \cong L$.
- Φ ist volltreu, d.h. induziert eine Bijektion auf den Morphismenmengen.

Zum ersten Punkt: Wir wählen endlich viele Erzeuger x_1, \dots, x_n der Körpererweiterung L/K , d.h. $L = K(x_1, \dots, x_n)$. Wir definieren $A = K[x_1, \dots, x_n]$ als die von x_1, \dots, x_n erzeugte K -Algebra in L . Dann ist A eine endlich erzeugte, reduzierte, nullteilerfreie K -Algebra. Deshalb gibt es nach Satz 3 eine affine Varietät V mit $K[V] \cong A$. Da A nullteilerfrei ist, ist V irreduzibel und es gilt $K(V) \cong \text{Quot}(A) \cong L$.

Zum zweiten Punkt zeigen wir: Sind V, W affine Varietäten und $\alpha: K(W) \longrightarrow K(V)$ ein K -Algebrenhomomorphismus, so gibt es eine rationale Abbildung

$$f = f_\alpha: V \dashrightarrow W \text{ mit } \alpha = f^\#.$$

Für den Beweis dieser Aussage seien g_1, \dots, g_m Erzeuger von $K[W]$.

Dann ist $\alpha(g_i) \in K(V)$ und $\bigcup_{i=1}^m \text{Def}(\alpha(g_i))$ ist offen und dicht in V . Wähle

$$U := \mathfrak{D}(g) \subseteq \bigcap_{i=1}^m \text{Def}(\alpha(g_i)) \text{ mit } g \in K[V].$$

Nach Beispiel 5.15 ist $\mathfrak{D}(g)$ affin, also existiert eine affine Varietät Z und ein Isomorphismus $\Psi: Z \longrightarrow \mathfrak{D}(g)$. So erhalten wir

$$\Psi^\# \circ \alpha: K[W] \longrightarrow \mathcal{O}(Z) = K[Z]$$

und das induziert $\tilde{f}: Z \longrightarrow W$.

Damit ist $\hat{f} := \tilde{f} \circ \Psi^{-1}$ eine reguläre Abbildung von U nach W . Diese induziert eine rationale Abbildung $f: V \dashrightarrow W$, da U dicht in V liegt. Da $\Psi^\# \circ \alpha$ injektiv ist, ist f dominant nach Proposition 6.3.

Nun bleibt nur noch zu zeigen, dass Φ treu ist. Seien dazu $r_1, r_2: V \dashrightarrow W$ rationale Abbildungen und $r_1^\# = r_2^\# = \alpha$. Wir wählen U offen, affin und so klein, dass r_1 und r_2 auf U definiert sind. Dann induzieren r_1 und r_2 aber als Abbildungen von $U \cong Z$ nach W aufgefasset das selbe

$$\alpha: K[W] \longrightarrow \mathcal{O}(U) \cong K[Z].$$

Nun können wir Satz 3 anwenden und sehen $r_1|_U = r_2|_U$ und da U dicht in V liegt, folgt $r_1 = r_2$. □

7 Spektrum eines Rings



ERINNERUNG 7.0 (aus Algebra II): Seien R, S Ringe und $f: R \longrightarrow S$ ein Ringhomomorphismus.

- (a) Ist $J \subseteq S$ ein Ideal, ist $I = f^{-1}(J) \subseteq R$ ein Ideal. Ist dabei J ein Primideal, so ist auch I ein Primideal.
- (b) Ist f surjektiv und $I \subseteq R$ ein Ideal, dann ist $J = f(I) \subseteq S$ ein Ideal. Ist dabei I ein Primideal und Kern $f \subseteq I$, dann ist J ein Primideal.

Insgesamt gilt also: Primideale in S entsprechen Primidealen in R , die den Kern von f enthalten (falls f surjektiv ist).

ERINNERUNG/BEMERKUNG 7.1: Sei $V \subseteq \mathbb{A}^n(K)$ eine affine Varietät (K algebraisch abgeschlossen). Dann haben wir Bijektionen

$$\begin{aligned} \text{(a) } \{ \text{Untervarietäten von } V \} &\longleftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{Radikalideale in } K[X_1, \dots, X_n], \\ \text{die } \mathfrak{I}(V) \text{ enthalten} \end{array} \right\} \\ &\longleftrightarrow \{ \text{Radikalideale in } K[V] \} \end{aligned}$$

- (b) $\{\text{irreduzible Untervarietäten von } V\} \longleftrightarrow \{\text{Primideale in } K[V]\}$
 (c) $\{\text{Punkte in } V\} \longleftrightarrow \{\text{maximale Ideale in } K[V]\}$

Beweis: (a) Das folgt aus Bemerkung 1.3, Bemerkung 1.5, Satz 2 und Erinnerung 7.0.

(b) Das folgt aus Bemerkung 2.9 und Erinnerung 7.0.

(c) Die eine Zuordnung ist

$$p = (x_1, \dots, x_n) \longmapsto \mathfrak{m}_p = \mathfrak{I}(\{p\}) = (X_1 - x_1, \dots, X_n - x_n).$$

Für die andere sei \mathfrak{m} ein maximales Ideal in $K[V]$, dann gibt es einen Isomorphismus

$$\alpha: K[X_1, \dots, X_n] / \mathfrak{m} \longrightarrow K$$

und wir wählen $p = (\alpha(\overline{X_1}), \dots, \alpha(\overline{X_n}))$. □

DEFINITION/BEMERKUNG 7.2: Sei R ein kommutativer Ring mit Eins.

- (a) Die Menge $\text{Spec } R := \{\wp \subseteq R \mid \wp \text{ ist Primideal}\}$ heißt *Spektrum von } R*.
 (b) Für eine Teilmenge $S \subseteq R$ heißt $\mathfrak{V}(S) := \{\wp \in \text{Spec } R \mid \wp \supseteq S\}$ *Verschwindungsmenge von } S* und es gilt $\mathfrak{V}(S) = \mathfrak{V}((S))$.
 (c) Die Mengen $\mathfrak{V}(I)$ für Ideale $I \subseteq R$ bilden die abgeschlossenen Mengen einer Topologie auf $\text{Spec } R$, diese heißt *Zariski-Topologie*.
 (d) Für $Z \subseteq \text{Spec } R$ heißt $\mathfrak{I}(Z) := \bigcap_{\wp \in Z} \wp$ das *Verschwindungsideal von } Z*.

Beweis: (b) Die Inklusion „ \supseteq “ ist klar. Für die umgekehrte Inklusion sei $\wp \in \mathfrak{V}(S)$, also $\wp \supseteq S$. Da \wp ein Ideal ist, folgt $\wp \supseteq (S)$, also $\wp \in \mathfrak{V}((S))$.

(c) Das zeigt man wie in Definition/Bemerkung 2.1, insbesondere gilt

$$\bigcap_{\lambda \in \Lambda} \mathfrak{V}(I_\lambda) = \mathfrak{V}\left(\bigcup_{\lambda \in \Lambda} I_\lambda\right) = \mathfrak{V}\left(\sum_{\lambda \in \Lambda} I_\lambda\right)$$

und $\mathfrak{V}(I_1) \cup \mathfrak{V}(I_2) = \mathfrak{V}(I_1 \cap I_2) = \mathfrak{V}(I_1 \cdot I_2)$. □

DEFINITION/BEMERKUNG 7.3: (a) Elemente aus R können als Funktionen aufgefasst werden:

$$r: \text{Spec } R \longrightarrow \bigcup_{\wp \in \text{Spec } R} \text{Quot}(R/\wp), \quad \wp \longmapsto \bar{r} \in \text{Quot}(R/\wp)$$

- (b) Ein Primideal \wp ist genau dann Nullstelle von $r \in R$, wenn $\bar{r} = 0$ in R/\wp , also wenn $r \in \wp$ gilt.

BEISPIEL 7.4: (a) Sei $R = K[V]$ für eine affine Varietät V und einen algebraisch abgeschlossenen Körper K . Dann enthält $\text{Spec } R$ je einen Punkt für jede irreduzible Untervarietät von V . Ist \mathfrak{m} ein maximales Ideal in $\text{Spec } R$, dann ist $\text{Quot}(R/\mathfrak{m}) \cong K$.

- (b) Für $R = \mathbb{Z}$ ist $\text{Spec } R = \{(p) \mid p \in \mathbb{P}\} \cup \{(0)\}$, kann also als $\mathbb{P} \cup \{0\}$ aufgefasst werden.

BEMERKUNG 7.5: (a) Für $Z \subseteq \operatorname{Spec} R$ ist $\mathfrak{V}(\mathfrak{I}(Z)) = \overline{Z}$ der Abschluss von Z .

(b) Für $f \in R$ sei $\mathfrak{D}(f) = \operatorname{Spec} R \setminus \mathfrak{V}(f) = \{\wp \in \operatorname{Spec} R \mid f \notin \wp\}$. Die Mengen $\mathfrak{D}(f)$ bilden eine Basis der Topologie auf $\operatorname{Spec} R$.

(c) Sei $V \subseteq \operatorname{Spec} R$ nichtleer. Dann ist V genau dann irreduzibel, wenn $\mathfrak{I}(V)$ ein Primideal ist.

Beweis: (a) Es gilt:

$$\mathfrak{V}(\mathfrak{I}(Z)) = \{\wp \in \operatorname{Spec} R \mid \wp \supseteq \mathfrak{I}(Z)\} = \{\wp \in \operatorname{Spec} R \mid \wp \supseteq \bigcap_{q \in Z} q\} \supseteq Z.$$

Daraus folgt, dass der Abschluss von Z in $\mathfrak{V}(\mathfrak{I}(Z))$ liegt. Für die andere Inklusion sei $\overline{Z} = \mathfrak{V}(J) = \{q \in \operatorname{Spec} R \mid q \supseteq J\}$. Da $Z \subseteq \overline{Z}$, gilt für alle $\wp \in Z$, dass $\wp \supseteq J$. Sei nun $q \in \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(Z))$. Dann gilt

$$q \supseteq \bigcap_{\wp \in Z} \wp \supseteq J,$$

also $q \in \mathfrak{V}(J)$.

(b) Das geht wie in Bemerkung 5.9 (c).

(c) Das geht wie in Bemerkung 2.9. □

BEMERKUNG 7.6: (a) Für $\wp \in \operatorname{Spec} R$ gilt $\overline{\{\wp\}} = \{q \in \operatorname{Spec} R \mid q \supseteq \wp\} = \mathfrak{V}(\wp)$.

(b) Für $\wp \in \operatorname{Spec} R$ ist $\{\wp\}$ genau dann abgeschlossen, wenn \wp ein maximales Ideal ist.

(c) Sei R nullteilerfrei. Dann gilt $\overline{\{(0)\}} = \operatorname{Spec} R$.

BEMERKUNG 7.7: Sei X ein topologischer Raum und $x \in X$ mit $\overline{\{x\}} = X$. Dann heißt x *generischer Punkt*.

BEISPIEL 7.8: Sei V eine affine Varietät.

(a) Die abgeschlossenen Punkte in $\operatorname{Spec} K[V]$ entsprechen bijektiv den Punkten der affinen Varietät V .

(b) Ist V irreduzibel, dann ist $\{(0)\}$ ein generischer Punkt. Dazu gehört gerade V als Untervarietät von V .

BEMERKUNG 7.9: Sei $\alpha: R \longrightarrow R'$ ein Ringhomomorphismus.

(a) α induziert eine stetige Abbildung

$$f_\alpha: \operatorname{Spec} R' \longrightarrow \operatorname{Spec} R, \quad \wp \longmapsto \alpha^{-1}(\wp).$$

(b) Ist $I \subseteq R$ ein Ideal, so ist $f_\alpha^{-1}(\mathfrak{V}(I)) = \mathfrak{V}(\alpha(I))$.

Beweis: (a) Nach Erinnerung 7.0 ist f_α wohldefiniert. Die Stetigkeit folgt aus (b).

(b) $\wp \in f_\alpha^{-1}(\mathfrak{V}(I)) \iff f_\alpha(\wp) \in \mathfrak{V}(I) \iff f_\alpha(\wp) \supseteq I$

$$\iff \alpha^{-1}(\wp) \supseteq I \iff \wp \supseteq \alpha(I) \iff \wp \in \mathfrak{V}(\alpha(I)) \quad \square$$

PROPOSITION 7.10: Sei K algebraisch abgeschlossen und $V \subseteq \mathbb{A}^n(K)$ eine affine Varietät. Dann ist die Abbildung

$$\mathfrak{m}: V \longrightarrow \operatorname{Spec} K[V], \quad x \longmapsto \mathfrak{m}_x = \{f \in K[V] \mid f(x) = 0\}$$

injektiv und stetig.

Beweis: Die Injektivität folgt aus Erinnerung/Bemerkung 7.1. Für den Beweis der Stetigkeit sei $I \subseteq K[V]$ ein Ideal und $Z := \mathfrak{V}(I) \subseteq \operatorname{Spec} K[V]$. Für die affine Varietät Z gilt

$$x \in \mathfrak{V}(I) \iff f(x) = 0 \text{ für alle } f \in I \iff f \in \mathfrak{m}_x \text{ für alle } f \in I \iff I \subseteq \mathfrak{m}_x.$$

Damit gilt $\mathfrak{m}^{-1}(Z) = \{x \in V \mid \mathfrak{m}_x \in Z\} = \{x \in V \mid \mathfrak{m}_x \supseteq I\} = \mathfrak{V}(I) \subseteq V$. Also sind Urbilder abgeschlossener Mengen abgeschlossen. \square

PROPOSITION 7.11: Sei R ein kommutativer Ring mit Eins, $I \subseteq R$ ein Ideal und $V \subseteq \operatorname{Spec} R$ eine abgeschlossene Menge. Dann gelten:

$$(a) \quad \mathfrak{V}(\mathfrak{I}(V)) = V$$

$$(b) \quad \mathfrak{I}(\mathfrak{V}(I)) = \sqrt{I}$$

Beweis: (a) Aus Bemerkung 7.5 (a) folgt $\mathfrak{V}(\mathfrak{I}(V)) = \overline{V} = V$.

$$(b) \quad \text{Nach Lemma 7.12 gilt } \mathfrak{I}(\mathfrak{V}(I)) = \bigcap_{\wp \in \mathfrak{V}(I)} \wp = \bigcap_{\wp \supseteq I} \wp = \sqrt{I}. \quad \square$$

LEMMA 7.12 (Lemma von Krull): Sei R ein kommutativer Ring mit Eins.

(a) Sei $S \subseteq R$ ein multiplikatives System und $I \subseteq R$ ein Ideal, das disjunkt zu S ist. Dann gibt es ein Primideal $\wp \subseteq R$, das I enthält und ebenfalls zu S disjunkt ist.

$$(b) \quad \text{Es gilt: } \bigcap_{\substack{\wp \in \operatorname{Spec} R \\ \wp \supseteq I}} \wp = \sqrt{I}.$$

Beweis: (b) Die Inklusion „ \supseteq “ gilt, weil der Schnitt von Radikalidealen wieder ein Radikalideal ist. Die andere Inklusion folgt aus (a): Sei $a \in R \setminus \sqrt{I}$ und $S := \{a^n \mid n \in \mathbb{N}_0\}$. Dann ist S ein multiplikatives System und $I \cap S = \emptyset$. Nach (a) gibt es dann ein Primideal \wp mit $\wp \supseteq I$ und $\wp \cap S = \emptyset$. Damit fliegt a im Schnitt raus.

(a) Betrachte den kanonischen Ringhomomorphismus $\varphi: R \longrightarrow R_S$. Sei $I' = \langle \varphi(I) \rangle$ das von $\varphi(I)$ erzeugte Ideal in R_S , also $I' = \{\frac{f}{a} \in R_S \mid f \in I, a \in S\}$. Zunächst überlegen wir uns, dass $I' \neq R_S$, also $1 \notin I'$. Denn wäre $1 \in I'$, dann gäbe es $f \in I$ und $a \in S$ mit $1 = \frac{f}{a}$ in R_S , d.h. es gäbe ein

$$t \in S \text{ mit } t(f - a) = 0.$$

Dann wäre $tf = ta$ sowohl in I als auch in S —ein Widerspruch zur Disjunktheit!

Somit ist I' ein echtes Ideal und damit in einem maximalen Ideal \mathfrak{m}' enthalten. Dann ist $\wp := \varphi^{-1}(\mathfrak{m}')$ ein Primideal, enthält I und hat leeren Schnitt mit S , denn sonst wäre für $s \in S \cap I$ das Bild $\varphi(s)$ eine Einheit in R_S . \square

Ziel: Wir suchen eine Strukturgarbe \mathcal{O}_X auf $X = \operatorname{Spec} R$ mit $\mathcal{O}_X(\mathfrak{D}(f)) \cong R_f$.

Ab jetzt verwenden wir folgende SCHREIBWEISEN:

- Für $f \in R$ und $S := \{f^n \mid n \in \mathbb{N}_0\}$ schreiben wir $R_f := R_S$.
- Für ein Primideal $\wp \subseteq R$ und $S := R \setminus \wp$ schreiben wir $R_\wp := R_S$.

Wir erinnern uns außerdem daran, dass in R_S genau dann $a = 0$ gilt, wenn es ein $t \in S$ gibt mit $ta = 0$.

VORÜBERLEGUNG: In $\operatorname{Spec} R$ ist $\mathfrak{D}(g) \subseteq \mathfrak{D}(f)$ äquivalent zu $\mathfrak{V}(g) \supseteq \mathfrak{V}(f)$. In diesem Fall gilt $g \in \sqrt{(f)}$, d.h. es gibt ein $m \in \mathbb{N}$ und $h \in R$ mit $g^m = fh$. Wir erhalten so eine Abbildung

$$\rho_{\mathfrak{D}(g)}^{\mathfrak{D}(f)}: R_f \longrightarrow (R_f)_h = R_{fh} = R_{g^m} = R_g.$$

Wir setzen $\mathcal{B} = \{\mathfrak{D}(g) \mid g \in R\}$, was eine Basis der Topologie auf $\operatorname{Spec} R$ ist.

PROPOSITION 7.13: Sei R ein noetherscher kommutativer Ring mit Eins. Auf $\operatorname{Spec} R$ gibt es eine eindeutige Garbe \mathcal{F} von Ringen mit $\mathcal{F}(\mathfrak{D}(f)) \cong R_f$ und für $\mathfrak{D}(g) \subseteq \mathfrak{D}(f)$ ist die Restriktionsabbildung $\rho_{\mathfrak{D}(g)}^{\mathfrak{D}(f)}$ wie in der Vorüberlegung definiert.

Beweis: Wir definieren $\mathcal{F}(\mathfrak{D}(f)) = R_f$ und zeigen

(a) \mathcal{F} erfüllt auf \mathcal{B} die Garbeneigenschaften, d.h.

- (G1) $\rho_{U''}^U = \rho_{U''}^{U'} \circ \rho_{U'}^U$ und $\rho_U^U = \operatorname{id}_{\mathcal{F}(U)}$ für $U, U', U'' \in \mathcal{B}$ mit $U'' \subseteq U' \subseteq U$.
- (G2) Ist $U = \bigcup_{i \in I} U_i$ (mit $U, U_i \in \mathcal{B}$), $f_i \in \mathcal{F}(U_i)$ und gilt für alle $U' \in \mathcal{B}$ mit $U' \subseteq U_i \cap U_j$, dass $\rho_{U'}^{U_i} = \rho_{U'}^{U_j}$, dann gibt es genau ein $f \in \mathcal{F}(U)$ mit $\rho_{U_i}^U(f) = f_i$.

(b) \mathcal{F} lässt sich eindeutig zu einer Garbe fortsetzen.

zu (a): Die erste Garbeneigenschaft ist klar.

Für die zweite sei ohne Einschränkung $I = \{1, \dots, m\}$ endlich (denn wie in Bemerkung 5.9 sind offene Mengen quasikompakt). Sei $U = \mathfrak{D}(f)$ und $U_i = \mathfrak{D}(f_i)$. Wegen

$$\mathfrak{D}(f) = \mathfrak{D}(f_1) \cup \dots \cup \mathfrak{D}(f_m)$$

ist $\mathfrak{V}(f) = \mathfrak{V}(f_1, \dots, f_m)$, also:

$$\text{Es gibt ein } k \in \mathbb{N} \text{ mit } f^k \in (f_1, \dots, f_m). \quad (*)$$

EINDEUTIGKEIT: Seien $g_1, g_2 \in \mathcal{F}(U) = R_f$ mit $\rho_{U_i}^U(g_j) = f_i$ für alle $i \in \{1, \dots, m\}$ und $j \in \{1, 2\}$ und $g := g_1 - g_2 \in R_f$, also $g = 0$ in allen R_{f_i} . Dann gibt es ein $M \in \mathbb{N}$ mit $gf_i^M = 0$ für alle $i \in I$. Für genügend großes N gilt

$$(f_1, \dots, f_m)^N \subseteq (f_1^M, \dots, f_m^M).$$

Mit (*) folgt $f^{kN} \in (f_1, \dots, f_m)^N \subseteq (f_1^M, \dots, f_m^M)$, also gibt es a_i mit

$$f^{kN} = a_1 f_1^M + \dots + a_m f_m^M.$$

Dann gilt $f^{kN} g = a_1 f_1^M g + \dots + a_m f_m^M g = 0$, also gilt $g = 0$ in R_f und damit $g_1 = g_2$.

EXISTENZ: Gegeben $g_i \in R_{f_i}$, sodass $g_i = g_j$ in $R_{f_i f_j}$, suchen wir ein $g \in R_f$, sodass $g = g_i$ in allen R_{f_i} gilt. Da $g_i = g_j$ in $R_{f_i f_j}$, gibt es ein genügend großes N , für das

$$g_i f_i^N f_j^N = g_j f_i^N f_j^N$$

gilt, und das ohne Einschränkung nicht von i und j abhängt. Insbesondere gibt es wie gerade eben ein $w \in \mathbb{N}$ mit

$$f^w \in (f_1^N, \dots, f_m^N) \text{ und } f^w = \sum_{i=1}^m a_i f_i^N.$$

Wir definieren

$$g = \frac{1}{f^w} \sum_{i=1}^m a_i f_i^N g_i \in R_f.$$

Dann gilt in R_{f_i}

$$g f_j^N = \frac{1}{f^w} \sum_{i=1}^m a_i f_i^N f_j^N g_i = \frac{1}{f^w} f^w g_j f_j^N = g_j f_j^N,$$

also $g = g_j$ in R_{f_j} .

zu (b): Das folgt aus dem folgenden Lemma 7.14. \square

LEMMA 7.14: Sei X ein topologischer Raum und \mathcal{B} eine Basis. Eine \mathcal{B} -Garbe besteht aus einem Ring $\mathcal{F}(U)$ für jedes $U \in \mathcal{B}$ und Restriktionsabbildungen $\rho_{U'}^U$, für alle $U, U' \in \mathcal{B}$ mit $U' \subseteq U$, sodass die Garbeneigenschaften (G1) und (G2) aus Proposition 7.13 erfüllt sind.

Jede \mathcal{B} -Garbe lässt sich eindeutig zu einer Garbe auf X fortsetzen.

Beweis: Sei $U \subseteq X$ eine beliebige offene Menge. Wir definieren

$$\mathcal{F}_U = \varprojlim_{\substack{\tilde{U} \subseteq U \\ \tilde{U} \in \mathcal{B}}} \mathcal{F}(\tilde{U}) = \left\{ f_{\tilde{U}} \in \prod_{\substack{\tilde{U} \subseteq U \\ \tilde{U} \in \mathcal{B}}} \mathcal{F}(\tilde{U}) \mid \rho_{\tilde{U}}^{\tilde{U}}(f_{\tilde{U}}) = f_{\tilde{U}} \text{ für } \hat{U}, \tilde{U} \in \mathcal{B} \text{ mit } \hat{U} \subseteq \tilde{U} \subseteq U \right\}.$$

Mit den Restriktionsabbildungen

$$\rho_{U'}^U : (f_{\tilde{U}})_{\substack{\tilde{U} \subseteq U \\ \tilde{U} \in \mathcal{B}}} \longmapsto (f_{\tilde{U}})_{\substack{\tilde{U} \subseteq U' \\ \tilde{U} \in \mathcal{B}}} \text{ (wobei } U' \subseteq U)$$

ist \mathcal{F} eine Garbe. Außerdem stimmt für $U \in \mathcal{B}$ das neue $\mathcal{F}(U)$ mit dem ursprünglichen $\mathcal{F}(U)$ überein via dem Isomorphismus

$$(f_{\tilde{U}})_{\substack{\tilde{U} \subseteq U \\ \tilde{U} \in \mathcal{B}}} \longmapsto f_U.$$

Schließlich ist \mathcal{F} eindeutig bestimmt, denn für einen weiteren Kandidaten \mathcal{G} stimmen \mathcal{F} und \mathcal{G} auf jeder Basismenge überein und damit nach (G2) auch auf allen offenen Mengen. \square

BEMERKUNG 7.15: In Proposition 7.13 muss R nicht noethersch sein! Es gilt für beliebige Ringe R und $f \in R$, dass $\mathfrak{D}(f)$ quasikompakt ist (siehe Bemerkung 7.16).

BEMERKUNG 7.16: Sei R ein beliebiger kommutativer Ring mit Eins und f, f_i ($i \in I$) aus R .

(a) Es gilt $\mathfrak{D}(f) = \bigcup_{i \in I} \mathfrak{D}(f_i)$ genau dann, wenn $\sqrt{(f)} = \sqrt{(f_i \mid i \in I)}$.

Insbesondere gilt $\text{Spec } R = \bigcup_{i \in I} \mathfrak{D}(f_i)$ genau dann, wenn $1 \in (f_i \mid i \in I)$.

(b) $\mathfrak{D}(f)$ ist quasikompakt.

(c) Wenn R noethersch ist, ist $\text{Spec } R$ ein noetherscher topologischer Raum.



Die Gegenrichtung stimmt nicht! Außerdem ist $\text{Spec } R$ nicht immer ein noetherscher topologischer Raum.

Beweis: (a) Es gilt

$$\mathfrak{D}(f) = \bigcup_{i \in I} \mathfrak{D}(f_i) \iff \mathfrak{V}(f) = \bigcap_{i \in I} \mathfrak{V}(f_i) \iff \sqrt{(f)} = \sqrt{(f_i \mid i \in I)}.$$

Für den zweiten Teil verwende $\mathfrak{D}(1) = \text{Spec } R$.

(b) Sei $\mathfrak{D}(f) = \bigcup_{i \in I} U_i$ und ohne Einschränkung $U_i = \mathfrak{D}(f_i)$ für $f_i \in R$, da die $\mathfrak{D}(g)$ eine Basis der Topologie bilden. Nach (a) gibt es ein $m \in \mathbb{N}$ und $i_1, \dots, i_n \in I$ mit $f^m \in (f_{i_1}, \dots, f_{i_n})$. Damit folgt

$$\mathfrak{D}(f) = \mathfrak{D}(f^m) \subseteq \bigcup_{j=1}^n \mathfrak{D}(f_{i_j}) \subseteq \bigcup_{i \in I} \mathfrak{D}(f_i) = \mathfrak{D}(f),$$

also $\mathfrak{D}(f) = \mathfrak{D}(f_{i_1}) \cup \dots \cup \mathfrak{D}(f_{i_n})$. Es genügen also endlich viele, um $\mathfrak{D}(f)$ zu überdecken.

(c) Wenn wir eine absteigende Kette $V_1 \supsetneq V_2 \supsetneq V_3 \supsetneq \dots$ von abgeschlossenen Mengen hätten, die nicht stationär wird, wäre $\mathfrak{I}(V_1) \subsetneq \mathfrak{I}(V_2) \subsetneq \mathfrak{I}(V_3) \subsetneq \dots$ eine aufsteigende Kette von Idealen, die ebenfalls nicht stationär wird, im Widerspruch dazu, dass R noethersch ist. \square

DEFINITION 7.17: (a) Sei R ein beliebiger kommutativer Ring mit Eins, $X = \text{Spec } R$ und \mathcal{O}_X die Garbe aus Proposition 7.13. Der geringste Raum (X, \mathcal{O}_X) heißt *affines Schema zu R* .

(b) Ist R noethersch, so heißt (X, \mathcal{O}_X) ein *noethersches affines Schema*.

PROPOSITION 7.18: Sei V eine affine Varietät über einem algebraisch abgeschlossenen Körper K und $R = K[V]$. Das affine Schema zu R ist noethersch und für die stetige Injektion

$$\mathfrak{m}: V \hookrightarrow \operatorname{Spec} R, \quad x \longmapsto \mathfrak{m}_x = \{f \in K[V] \mid f(x) = 0\}$$

gilt $\mathfrak{m}_* \mathcal{O}_V \cong \mathcal{O}_{\operatorname{Spec} R}$.

Hierbei ist \mathcal{O}_V die Garbe der regulären Funktionen auf V , $\mathfrak{m}_* \mathcal{O}_V$ die Bildgarbe auf $\operatorname{Spec} R$, definiert durch $\mathfrak{m}_* \mathcal{O}_V(U) = \mathcal{O}_V(\mathfrak{m}^{-1}(U))$ (siehe auch Aufgabe 5 auf Übungsblatt 4); und $\mathfrak{m}_* \mathcal{O}_V \cong \mathcal{O}_X$ heißt: für jedes offene U existiert ein Isomorphismus

$$\theta_U: \mathfrak{m}_* \mathcal{O}_V(U) \longrightarrow \mathcal{O}_X(U)$$

und diese Isomorphismen sind mit den Restriktionsabbildungen verträglich, d.h. für $U' \subseteq U$ ist das Diagramm

$$\begin{array}{ccc} \mathfrak{m}_* \mathcal{O}_V(U) & \xrightarrow{\theta_U} & \mathcal{O}_X(U) \\ \downarrow \rho_{U'}^U & & \downarrow \rho_{U'}^U \\ \mathfrak{m}_* \mathcal{O}_V(U') & \xrightarrow{\theta_{U'}} & \mathcal{O}_X(U') \end{array}$$

kommutativ.

Beweis: Wir zeigen, dass die Garben auf der Basis übereinstimmen. Dann folgt die Behauptung aus Lemma 7.14. Sei $U = \mathfrak{D}(f) = \{\wp \in \operatorname{Spec} R \mid \wp \not\ni f\}$. Aus Proposition 7.13 folgt einerseits $\mathcal{O}_X(\mathfrak{D}(f)) = R_f$. Andererseits gilt

$$\mathfrak{m}^{-1}(U) = \{x \in V \mid \mathfrak{m}_x \not\ni f\} = \{x \in V \mid f(x) \neq 0\} = \mathfrak{D}(f) \subseteq V,$$

also $\mathfrak{m}_* \mathcal{O}_V(U) = \mathcal{O}_V(\mathfrak{m}^{-1}(U)) \cong R_f$ wegen Korollar 5.11. Außerdem passen die Restriktionsabbildungen zusammen. \square

