

Grundkurs Mathematik II

Vorlesung 34

Untervektorräume

DEFINITION 34.1. Es sei K ein Körper und $n \in \mathbb{N}$. Eine Teilmenge $U \subseteq K^n$ heißt *Untervektorraum*, wenn die folgenden Eigenschaften gelten.

- (1) $0 \in U$.
- (2) Mit $u, v \in U$ ist auch $u + v \in U$.
- (3) Mit $u \in U$ und $s \in K$ ist auch $su \in U$.

Eine Familie von Vektoren $v_1, \dots, v_k \in U$ heißt wieder ein *Erzeugendensystem* von U , wenn man jeden Vektor aus U als eine Linearkombination $u = \sum_{i=1}^k s_i v_i$ schreiben kann, und eine *Basis* von U , wenn darüber hinaus diese Darstellung eindeutig ist. Mit einem Erzeugendensystem kann man einen Untervektorraum U in der Form

$$U = \left\{ \sum_{i=1}^k s_i v_i \mid s_i \in K \right\}$$

beschreiben. Umgekehrt definiert dabei die rechte Seite stets einen Untervektorraum, der von den Vektoren v_1, \dots, v_k *erzeugte Untervektorraum* heißt. Er wird mit $\langle v_1, \dots, v_k \rangle$ bezeichnet.

LEMMA 34.2. *Es sei K ein Körper und*

$$\begin{array}{rcl} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n & = & 0 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n & = & 0 \\ & \vdots & \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n & = & 0 \end{array}$$

ein homogenes lineares Gleichungssystem über K . Dann ist die Menge aller Lösungen des Gleichungssystems ein Untervektorraum des K^n (mit komponentenweiser Addition und Skalarmultiplikation).

Beweis. Siehe Aufgabe 34.9. □

Für einen Untervektorraum $U \subseteq K^n$ gibt es grundsätzlich zwei Beschreibungsmöglichkeiten: Als Lösungsraum eines homogenen linearen Gleichungssystems und als ein von Vektoren erzeugter Untervektorraum. Durch das Lösen eines linearen Gleichungssystems wird die zuerst genannte Darstellungsmöglichkeit in die zweite Darstellungsmöglichkeit umgewandelt.

BEMERKUNG 34.3. Man nennt zu einem homogenen linearen Gleichungssystem Lösungen v_1, \dots, v_k *Basislösungen*, wenn man jede Lösung eindeutig als Linearkombination dieser Basislösungen darstellen kann. Wenn ein solches System in den Variablen x_1, \dots, x_n gegeben ist, und wenn man die freien Variablen x_{i_1}, \dots, x_{i_k} identifiziert hat, so erhält man Basislösungen, wenn man diese freien Variablen an einer Stelle mit 1 und sonst mit 0 belegt und die anderen Einträge der abhängigen Variablen jeweils ausrechnet.

DEFINITION 34.4. Es sei K ein Körper und $n \in \mathbb{N}_+$. Eine Teilmenge $S \subseteq K^n$ heißt (affiner) *Unterraum*, wenn (S leer ist oder) es einen Untervektorraum $U \subseteq K^n$ und einen Punkt $P \in K^n$ mit

$$S = P + U = \{P + v \mid v \in U\}$$

gibt.

Statt von einem Unterraum spricht man auch von einem *affinen Unterraum*. Der Punkt P heißt ein *Aufpunkt* des Raumes und U heißt der zugehörige Untervektorraum. Ein Unterraum ist ein in eine bestimmte Richtung parallel verschobener Untervektorraum, wobei der Aufpunkt den Verschiebungsvektor bezeichnet.

LEMMA 34.5. *Es sei K ein Körper und*

$$\begin{array}{rcl} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \cdots + a_{1n}x_n & = & c_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \cdots + a_{2n}x_n & = & c_2 \\ & \vdots & \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \cdots + a_{mn}x_n & = & c_m \end{array}$$

ein inhomogenes lineares Gleichungssystem über K . Dann ist die Menge S aller Lösungen des Gleichungssystems ein (affiner) Unterraum des K^n . Dabei kann man jede Lösung $P \in S$ als Aufpunkt nehmen, und der zugehörige Untervektorraum ist der Lösungsraum zum zugehörigen homogenen linearen Gleichungssystem.

Beweis. Sei die Lösungsmenge S nicht leer und sei $P = \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{pmatrix} \in S$ ein belie-

big gewählter Punkt. Es sei U der Lösungsraum zum zugehörigen homogenen linearen Gleichungssystem, der nach Lemma 34.2 ein Untervektorraum von K^n ist. Wir müssen die Mengengleichheit $S = P + U$ zeigen. Wenn

$v = \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \in U$ ist, so bedeutet dies

$$\sum_{j=1}^n a_{ij}v_j = 0$$

für alle $i = 1, \dots, m$. Für $P + v = \begin{pmatrix} p_1 + v_1 \\ \vdots \\ p_n + v_n \end{pmatrix}$ ist dann

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} (p_j + v_j) = \sum_{j=1}^n a_{ij} p_j + \sum_{j=1}^n a_{ij} v_j = c + 0 = c,$$

also ist dieser Punkt eine Lösung des inhomogenen Gleichungssystems und

somit ist $P + v \in S$. Wenn umgekehrt $Q = \begin{pmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} \in S$ eine Lösung ist, so

ist

$$Q - P = \begin{pmatrix} q_1 - p_1 \\ \vdots \\ q_n - p_n \end{pmatrix}$$

und diese Differenz erfüllt

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} (q_j - p_j) = \sum_{j=1}^n a_{ij} q_j - \sum_{j=1}^n a_{ij} p_j = c - c = 0.$$

Also ist $Q - P \in U$ und somit $Q = P + (Q - P) \in P + U$. \square

Wenn man also die Lösungsmenge eines inhomogenen Gleichungssystems beschreiben möchte, so nimmt man eine spezielle Lösung als Aufpunkt und eine Basis des Lösungsraumes des zugehörigen homogenen Gleichungssystems.

Der leere Raum und jeder einzelne Punkt ist für sich ein affiner Unterraum. Richtig interessant wird es mit Geraden.

DEFINITION 34.6. Unter einer *Geraden (in Punktvektorform)* versteht man einen affinen Unterraum $G \subseteq K^n$ der Form

$$G = P + Kv = \{P + sv \mid s \in K\}$$

mit einem von 0 verschiedenen Vektor $v \in K^n$ und einem Aufpunkt $P \in K^n$.

Man spricht auch von der *Punktrichtungsform* oder der Parameterdarstellung der Geraden, wobei das s als Parameter bezeichnet wird. Für eine Gerade gibt es stets die bijektive Abbildung

$$K \longrightarrow G, s \longmapsto P + sv,$$

die auch eine *Parametrisierung* der Geraden heißt.

Geraden in der Ebene

Wir besprechen die vorstehenden Begriffe und Aussagen in niedrigen Dimensionen.

Wir betrachten Geraden in der Ebene K^2 . Unter der *Gleichungsform* einer Geraden in der Ebene versteht man eine lineare Gleichung der Form

$$ax + by = c$$

mit $(a, b) \neq (0, 0)$. Es ist einfach, aus der Gleichungsform eine Punkttrichungsform zu erhalten.

KOROLLAR 34.7. *Es sei K ein Körper und sei*

$$ax + by = c$$

eine lineare Gleichung in zwei Variablen über K mit $(a, b) \neq 0$. Dann ist die Lösungsmenge eine Gerade in K^2 . Als Richtungsvektor kann man den Vektor $\begin{pmatrix} b \\ -a \end{pmatrix}$ nehmen.

Beweis. Dies folgt aus Lemma 34.5, da $\begin{pmatrix} b \\ -a \end{pmatrix}$ eine Basislösung der zugehörigen homogenen linearen Gleichung $ax + by = 0$ ist. \square



KOROLLAR 34.8. *Es seien im K^2 zwei Geraden G und H in Gleichungsform durch*

$$ax + by = c$$

bzw.

$$rx + sy = d$$

(mit $(a, b) \neq (0, 0)$ und $(r, s) \neq (0, 0)$) gegeben. Dann ist der Durchschnitt $G \cap H$ der beiden Geraden die Lösungsmenge des linearen Gleichungssystems, das aus diesen beiden Gleichungen besteht. Dabei gibt es die drei Möglichkeiten:

- (1) *Es ist $G = H$.*
- (2) *Es ist $G \cap H = \emptyset$.*
- (3) *Der Durchschnitt besteht aus einem einzigen Punkt.*

Beweis. Siehe Aufgabe 34.19. \square

Im zweiten Fall (manchmal auch im ersten Fall) spricht man von *parallelen Geraden*. Der dritte Fall tritt genau dann ein, wenn zwischen (a, b) und (r, s) keine Vielfachheitsbeziehung besteht.

BEISPIEL 34.9. Wir berechnen zu den durch

$$4x - 7y = 13$$

bzw.

$$5x - 8y = -9$$

gegebenen Geraden den Durchschnitt. Wenn man von der zweiten Gleichung das $\frac{5}{4}$ -fache der ersten Gleichung abzieht, so erhält man

$$\left(-8 + \frac{5}{4} \cdot 7\right)y = -9 - \frac{5}{4} \cdot 13,$$

also

$$\frac{3}{4}y = -\frac{101}{4}$$

und somit

$$y = -\frac{101}{3}$$

und

$$x = -\frac{167}{3}.$$

Der Durchschnitt besteht also aus einem einzigen Schnittpunkt mit den Koordinaten $\left(-\frac{167}{3}, -\frac{101}{3}\right)$.

Geraden und Ebenen im Raum

DEFINITION 34.10. Unter einer *Ebene* (in Punktvektorform oder Parameterform) versteht man einen affinen Unterraum $E \subseteq K^n$ der Form

$$E = P + Kv + Kw = \{P + sv + tw \mid s, t \in K\}$$

mit zwei Vektoren $v, w \in K^n$, die kein Vielfaches voneinander¹ sind, und einem Aufpunkt $P \in K^n$.

Dabei heißen hier die Zahlen s, t die Parameter. Für eine Ebene gibt es stets die bijektive Abbildung

$$K^2 \longrightarrow E, (s, t) \longmapsto P + sv + tw,$$

die auch eine *Parametrisierung* der Ebene heißt. Die Bijektivität beruht dabei darauf, dass keine Vielfachheitsbeziehung zwischen den Richtungsvektoren v und w besteht.

¹D.h. dass weder v noch w der Nullvektor ist und dass der eine Vektor nicht ein Vielfaches des anderen Vektors ist.

LEMMA 34.11. *Es sei K ein Körper und sei*

$$ax + by + cz = d$$

eine lineare Gleichung in drei Variablen über K mit $(a, b, c) \neq 0$. Dann ist die Lösungsmenge eine Ebene im K^3 . Wenn $a \neq 0$ ist, so kann man als

Richtungsvektoren die beiden Vektoren $\begin{pmatrix} b \\ -a \\ 0 \end{pmatrix}$ und $\begin{pmatrix} c \\ 0 \\ -a \end{pmatrix}$ nehmen.

Beweis. Dies folgt aus Lemma 34.5 und daraus, dass die beiden angegebenen Vektoren offenbar Lösungen der zugehörigen homogenen linearen Gleichung sind, die wegen $a \neq 0$ kein Vielfaches voneinander sind. Man kann auch jede Lösung als Linearkombination dieser beiden Lösungen schreiben, es ist nämlich

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = -\frac{y}{a} \begin{pmatrix} b \\ -a \\ 0 \end{pmatrix} - \frac{z}{a} \begin{pmatrix} c \\ 0 \\ -a \end{pmatrix}.$$

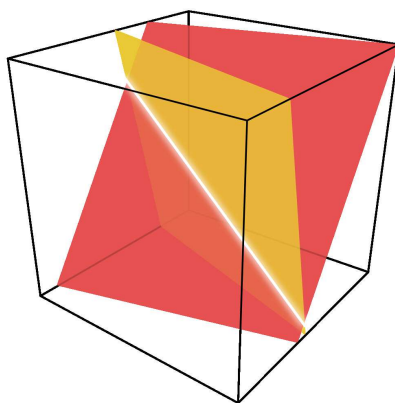
Also handelt es sich um Basislösungen. □

BEISPIEL 34.12. Wir betrachten die Menge

$$E = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{Q}^3 \mid 5x - y + 3z = 0 \right\}.$$

Nach Lemma 34.11 hat diese Ebene in Punkttrichtungsform die Beschreibung

$$E = \left\{ r \begin{pmatrix} 3 \\ 0 \\ -5 \end{pmatrix} + s \begin{pmatrix} 1 \\ 5 \\ 0 \end{pmatrix} \mid r, s \in \mathbb{Q} \right\}.$$



Zwei Ebenen im Raum, die sich in einer Geraden schneiden.

BEISPIEL 34.13. Wir betrachten die beiden Mengen

$$E = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{Q}^3 \mid 5x - y + 3z = 0 \right\}$$

(aus Beispiel 34.12) und

$$F = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{Q}^3 \mid 4x + 2y - 7z = 0 \right\}$$

und interessieren uns für den Durchschnitt

$$G := E \cap F = \left\{ \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \in \mathbb{Q}^3 \mid 5x - y + 3z = 0 \text{ und } 4x + 2y - 7z = 0 \right\}.$$

Ein Punkt liegt genau dann im Durchschnitt, wenn er simultan beide Bedingungen, also beide Gleichungen (nennen wir sie I und II), erfüllt, es geht also um die Lösungsmenge des linearen Gleichungssystems

$$\begin{aligned} 5x - y + 3z &= 0 \\ 4x + 2y - 7z &= 0. \end{aligned}$$

Mit dem Eliminationsverfahren erhält man die Gleichung

$$4I - 5II = -14y + 47z = 0.$$

Daher ist

$$y = \frac{47}{14}z$$

und

$$x = \frac{1}{5}y - \frac{3}{5}z = \frac{1}{5} \cdot \frac{47}{14}z - \frac{3}{5}z = \frac{47}{70}z - \frac{42}{70}z = \frac{1}{14}z$$

sein. Somit ist

$$G = \left\{ \begin{pmatrix} \frac{1}{14}z \\ \frac{47}{14}z \\ z \end{pmatrix} \mid z \in \mathbb{R} \right\}.$$

Wir besprechen ein geometrisches Beispiel ähnlich zu Beispiel 34.13, wobei jetzt die Gleichungen nicht homogen sein müssen.

BEISPIEL 34.14. Im \mathbb{R}^3 seien zwei Ebenen

$$E = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid 4x - 2y - 3z = 5\}$$

und

$$F = \{(x, y, z) \in \mathbb{R}^3 \mid 3x - 5y + 2z = 1\}$$

gegeben. Wie kann man die Schnittgerade $G = E \cap F$ beschreiben? Ein Punkt $P = (x, y, z)$ liegt genau dann auf der Schnittgerade, wenn er die beiden *Ebenengleichungen* erfüllt; es muss also sowohl

$$4x - 2y - 3z = 5 \text{ als auch } 3x - 5y + 2z = 1$$

gelten. Wir multiplizieren die erste Gleichung mit 3 und ziehen davon das 4-fache der zweiten Gleichung ab und erhalten

$$14y - 17z = 11.$$

Wenn man $y = 0$ setzt, so muss $z = -\frac{11}{17}$ und $x = \frac{13}{17}$ sein. D.h. der Punkt $P = \left(\frac{13}{17}, 0, -\frac{11}{17}\right)$ gehört zu G . Ebenso findet man, indem man $z = 0$ setzt, den Punkt $Q = \left(\frac{23}{14}, \frac{11}{14}, 0\right)$. Damit ist die Schnittgerade die Verbindungsgerade dieser Punkte, also

$$G = \left\{ \left(\frac{13}{17}, 0, -\frac{11}{17} \right) + t \left(\frac{209}{238}, \frac{11}{14}, \frac{11}{17} \right) \mid t \in \mathbb{R} \right\}.$$

Abbildungsverzeichnis

Quelle = Two parallel lines a b.svg , Autor = Masur, Lizenz = gemeinfrei	4
Quelle = OpenMeanderM1.svg , Autor = Benutzer FirefoxRocks auf Commons, Lizenz = gemeinfrei	5
Quelle = Intersecting Planes 2.svg , Autor = Benutzer ShahabELS auf Commons, Lizenz = CC-by-sa 3.0	7
Erläuterung: Die in diesem Text verwendeten Bilder stammen aus Commons (also von http://commons.wikimedia.org) und haben eine Lizenz, die die Verwendung hier erlaubt. Die Bilder werden mit ihren Dateinamen auf Commons angeführt zusammen mit ihrem Autor bzw. Hochlader und der Lizenz.	9
Lizenzklärung: Diese Seite wurde von Holger Brenner alias Bocardodarapti auf der deutschsprachigen Wikiversity erstellt und unter die Lizenz CC-by-sa 3.0 gestellt.	9