5 Script zur Vorlesung: Lineare Algebra I

Prof. Dr. Salma Kuhlmann

Definition 5.1.

(i) Seien $m, n \in \mathbb{N}$. Ein *lineares Gleichungssystem* mit m Gleichungen und n Variablen über K ist:

$$(S) \quad \left.\begin{array}{llll} a_{11}x_1 & + \ldots + & a_{1n}x_n & = b_1 \\ a_{21}x_1 & + \ldots + & a_{2n}x_n & = b_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{m1}x_1 & + \ldots + & a_{mn}x_n & = b_m \end{array}\right\} \quad \begin{array}{lll} G_1 & = & b_1 \\ G_2 & = & b_2 \\ & \vdots & \\ G_m & = & b_m \end{array}$$

(ii) Eine *Lösung für (S)* ist $\underline{x} = (x_1, \ldots, x_n) \in K^n$ ein n-Tupel, so dass $\underline{x}$ eine (simultane) Lösung für alle Gleichungen in (S) ist.

Notation
$L(S) := \{\underline{x} \in K^n; \underline{x} \text{ ist Lösung }\}$
$L(S)$: die Lösungsmenge.

Ziel: Finde und beschreibe $L(S)$.

(iii) (S) ist *homogen*, falls $b_i = 0$ für alle $i = 1, \ldots, m$.

(iv) (S) ist *konsistent*, falls $L(S) \neq \emptyset$.
(S) ist ansonsten *inkonsistent* $(L(S) = \emptyset)$.

(v) (S) homogen $\Rightarrow \underline{x} = \underline{0} := (0, \ldots, 0) \in L(S)$ (die triviale Lösung). Also insbesondere (S) homogen $\Rightarrow (S)$ konsistent.

Beispiel 5.2.
3 Gleichungen in 3 Variablen über $\mathbb{R}$

$$(S_1) \left\{\begin{array}{rcrcrcl} 0x_1 & + & 0x_2 & + & 2x_3 & = & 6 \\ 2x_1 & + & 2x_2 & + & 0x_3 & = & 4 \\ x_1 & + & 0x_2 & + & 0x_3 & = & 1 \end{array}\right.$$

(Typ 1 - Umformung)
Vertauschen der ersten mit der dritten Gleichung ergibt

$$\left\{\begin{array}{lrcl} x_1 & & = & 1 \\ 2x_1 + 2x_2 & & = & 4 \\ & 2x_3 & = & 6 \end{array}\right.$$

(Typ 3 - Umformung)
Addition des (-2)-fachen der ersten Gleichung zur zweiten:

$$\left\{\begin{array}{lccl} x_1 & & & = 1 \\ & 2x_2 & & = 2 \\ & & 2x_3 & = 6 \end{array}\right.$$

(Typ 2 - Umformung)
Multiplikation der Zweiten und der dritten Gleichung mit 1/2 ergibt schließlich:

$$(S_2)\left\{\begin{array}{ccccc} x_1 & & & = & 1 \\ & x_2 & & = & 1 \\ & & x_3 & = & 3 \end{array}\right.$$

Damit ist $(1,1,3)$ eine Lösung (prüfe durch Einsetzen).

$L(S_1) = \{(1,1,3)\}$?
Die Frage ist, ob man durch die Umformung obiger Gleichung keine Lösungen verloren hat. Wir wollen zeigen, dass die Lösungsmenge unter den elementaren Gleichungsumformungen invariant ist. Wir untersuchen sie nun.

Typ 1:
Vertauschen

$$(S_1)\left.\begin{array}{ccc} G_1 & = & b \\ & \vdots & \\ G_i & = & b_i \\ & \updownarrow & \\ G_j & = & b_j \\ G_m & = & b_m \end{array}\right\} \xrightarrow{Typ\ 1} \left.\begin{array}{ccc} & \vdots & \\ & \vdots & \\ G_j & = & b_j \\ & \vdots & \\ G_i & = & b_i \\ & \vdots & \end{array}\right\}(S_2)$$

Bemerkung 5.3.
(i) $(S_2) \xrightarrow{Typ 1} (S_1)$

(ii) $\underline{x}$ Lösung von $(S_1) \Rightarrow \underline{x}$ Lösung von (S_2)

Typ 2:
Multiplizieren einer Gleichung mit $\lambda \in K^\times$

$$(S_1)\left\{\begin{array}{ccc} G_1 & = & b_1 \\ & \vdots & \\ G_i & = & b_i \\ & \vdots & \\ G_m & = & b_m \end{array}\right. \xrightarrow{Typ\ 2} \left.\begin{array}{ccc} G_1 & = & b \\ & \vdots & \\ \lambda G_i & = & \lambda b_i \\ & \vdots & \\ G_m & & \end{array}\right\}(S_2)$$

Bemerkung 5.4.
(i) $(S_2) \xrightarrow{Typ\ 2} (S_1)$ (Multiplikation durch λ^{-1})

(ii) $G_i = b_i \Rightarrow \lambda G_i = \lambda b_i$ (folgt aus Körperaxiome), also
$\underline{x}$ Lösung von $(S_1) \Rightarrow \underline{x}$ Lösung von (S_2)

Typ 3:
Addieren des λ-fachen der i-ten Gleichung zur j-ten Gleichung
$i \neq j; \lambda \in K$

$$(S_1) \left\{ \begin{array}{rcl} G_1 & = & b_1 \\ & \vdots & \\ G_i & = & b_i \\ & \vdots & \\ G_j & = & b_j \\ & \vdots & \\ G_m & = & b_m \end{array} \right. \xrightarrow{Typ\ 3} \begin{array}{ccc} G_1 & = & b \\ & \vdots & \\ G_i & = & b_i \\ & \vdots & \\ \lambda G_i + G_j & = & \lambda b_i + b_j \\ & \vdots & \\ G_m & = & b_m \end{array}$$

Bemerkung 5.5.

(i) $(S_2) \xrightarrow{Typ\ 3} (S_1)$
(Addition $(-\lambda)$-fach der i-ten Gleichung zur j-ten)

(ii) $G_i = b_i \Rightarrow \lambda G_i = \lambda b_i$ und addiere $G_j = b_j$
also (Körperaxiome) $\lambda G_i + G_j = \lambda b_i + b_j$.
Also $\underline{x}$ Lösung von $(S_1) \Rightarrow \underline{x}$ Lösung von (S_2)

Definition 5.6.
(S_2) ist *äquivalent* zu (S_1), falls man (S_2) aus (S_1) durch endlich viele elementare Gleichungsumformungen erhält.

Bemerkung 5.7.
Durch Bemerkung 5.3 (i), 5.4 (i) und 5.5 (i) bekommt man sofort:
(S_2) äquivalent $(S_1) \Rightarrow (S_1)$ äquivalent (S_2).
Also sagen wir: (S_1) *und* (S_2) *sind äquivalent.*

Satz 5.8.
Äquivalente Systeme haben die gleiche Lösungsmenge.

Beweis
Aus Bemerkung 5.3 (ii), 5.4 (ii) und 5.5 (ii) haben wir:
$L(S_1) \subseteq L(S_2)$.
Aus Bemerkung 5.3 (i), 5.4 (i) und 5.5 (i) bekommt man nun umgekehrt
$L(S_2) \subseteq L(S_1)$. Also $L(S_1) = L(S_2)$.

Bemerkung 5.9.
Wir werden die Umkehrung vom Satz später studieren!

Also wollen wir die Gleichung umformen, um "einfachere" Systeme zu bekommen. Wir müssen den Begriff "einfacher" formalisieren. Dafür führen wir nun Matrizen ein.

Kapitel 1: § 3 Matrizen

Definition 5.10.
Seien $m, n \in \mathbb{N}$. Eine $m \times n$ Matrix über K ist eine Familie in K der Gestalt

$$A = (a_{ij})_{1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n}$$

wobei $a_{ij} \in K$ für alle i, j.

Darstellung

(i)

$$\begin{array}{ccc} & S_j := j\text{-te Spalte} & \\ m\text{-Zeilen} \Rightarrow & \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} & \leftarrow R_i := i\text{-te Zeile} \\ & \Uparrow n\text{-Spalten} & \end{array}$$

(ii) Die *Koeffizientenmatrix* zum System (S) ist

$$A(S) := \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix}$$

und die erweiterte Koeffizientenmatrix ist

$$(A, \underline{b}) := \left(\begin{array}{ccc|c} a_{11} & \cdots & a_{1n} & b_1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} & b_m \end{array}\right)$$

Matrix-Darstellung von (S) ist: $A\underline{x} = \underline{b}$, wobei

$$\underline{x} := \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix}$$

(Eine $n \times 1$ Matrix mit Variablen als Koeffizienten.)

und

$$\underline{b} := \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{pmatrix}$$

(Eine $m \times 1$-Matrix über K.)

(iii) Die *elementaren Zeilenumformungen* von Typ 1, Typ 2 und Typ 3 entsprechen genau den elementaren Gleichungsumformungen.

(iv) Seien A, B $m \times n$ Matrizen. A und B sind *Zeilenäquivalent*, falls man B aus A durch endlich viele Zeilenumformungen erhält (und / oder umgekehrt).
Das ist die Matrix analog von Definition 5.6 für Systeme.

Satz 5.11.
(Matrix analog von Satz 5.8)
Bei elementaren Zeilenumformungen (auf die erweiterte Koeffizientenmatrix) ändert sich die Lösungsmenge des linearen Gleichungssytems nicht.

Nun wollen wir endlich beschreiben, was wir mit "einfacher" meinen.

Definition 5.12.
Eine $m \times n$-Matrix A ist in *reduzierter Zeilenform* (Abkürzung: r.Z.F) falls

(a) der erste Koeffizient $\neq 0$ ist 1 in einer Zeile $R_i \not\equiv 0$.
(Dieser erste Koeffizient verschieden von Null heißt *Hauptkoeffizient* bzw. *Haupteins.*
Bedeutung von $R_i \equiv 0$: eine Reihe der Matirx heißt "Nullreihe", falls alle Koeffizienten, die darin vorkommen, gleich Null sind.

(b) Jede Spalte von A, in der sich eine Haupteins befindet, hat alle anderen Koeffizienten gleich Null.

Beispiel 5.13.
(Matrix-Form): Erweiterte Matrix von (S_1):

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 0 & 0 & 2 & 6 \\ 2 & 2 & 0 & 4 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right) \textbf{ nicht in r.Z.F.}$$

Erweiterte Matrix von (S_2) dagegen:

$$\left(\begin{array}{ccc|c} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{array}\right)$$