27. Script zur Vorlesung: Lineare Algebra I

Prof. Dr. Salma Kuhlmann, Dr. Merlin Carl

WS2011/2012: 10. Februar 2012

(WS 2015/2016: Korrekturen vom 1. Februar 2016)

Erinnerung

(1) $[\alpha]_W = \alpha + W$ ist die Nebenklasse von α mod W. Ein $\beta \in [\alpha]_W$ heißt *Repräsentant* der Äquivalenzklasse.

(2) $V/W :=$ Menge der Nebenklassen. Versehen mit einer Verknüpfung $+$:
$$(\alpha_1 + W) + (\alpha_2 + W) := (\alpha_1 + \alpha_2) + W$$
und einer Verknüpfung *Skalarmultiplikation*:
$$c \cdot (\alpha + W) := (c\alpha) + W \text{ für } c \in K.$$

Lemma Diese Verknüpfungen sind wohldefiniert, unabhängig von der Wahl der Repräsentanten, i.e.

(a) $\alpha \equiv \alpha'$ mod W und $\beta \equiv \beta'$ mod $W \Rightarrow \alpha + \beta \equiv \alpha' + \beta'$ mod W

(b) $\alpha \equiv \alpha'$ mod W und $c \in K \Rightarrow c\alpha \equiv c\alpha'$ mod W.

Beweis

(a) $\alpha - \alpha' \in W$ und $\beta - \beta' \in W \Rightarrow \underbrace{(\alpha - \alpha')}_{\in W} + \underbrace{(\beta - \beta')}_{\in W} =$
$(\alpha + \beta) - (\alpha' + \beta') \in W \Rightarrow \alpha + \beta \equiv \alpha' + \beta'$ mod W.

(b) $\alpha - \alpha' \in W \Rightarrow c(\alpha - \alpha') \in W \Rightarrow c\alpha - c\alpha' \in W \Rightarrow c\alpha \equiv c\alpha'$ mod W. $\square$

Lemma 1 V/W mit diesen Verknüpfungen ist ein K-Vektorraum.

Beweis ÜA: Was ist 0?
$0_{V/W} = 0 + W = W$ ist der Nullvektor in V/W.
Was ist eine additive Inverse?
$(\alpha + W) + \big((-\alpha) + W\big) = 0 + W = W = 0_{V/W}$. $\square$

Notation $\overline{\alpha} := \alpha + W$. Also

(i) $\overline{\alpha_1} + \overline{\alpha_2} = \overline{\alpha_1 + \alpha_2}$

(ii) $c\overline{\alpha_1} = \overline{c\alpha_1}$

(iii) $\overline{\alpha} = 0 \Leftrightarrow \alpha + W = W \Leftrightarrow \alpha \in W$

Satz 1 (Die kanonische Projektion)
$\pi_W : V \twoheadrightarrow V/W$
$\pi_W(\alpha) := \overline{\alpha}$ ist eine surjektive lineare Tranformation mit $\ker(\pi_W) = W$.

Beweis $\pi_W(c\alpha_1 + \alpha_2) = (c\alpha_1 + c\alpha_2) + W = (c\alpha_1 + W) + (c\alpha_2 + W) = c(\alpha_1 + W) + (\alpha_2 + W)$.
Sei $\overline{\alpha} \in V/W$, dann ist $\overline{\alpha} = \pi_W(\alpha)$.
$\alpha \in \ker(\pi_W) \Leftrightarrow \overline{\alpha} = 0_{V/W} \Leftrightarrow \alpha + W = W \Leftrightarrow \alpha \in W$. $\square$

Korollar 1 $\dim W + \dim(V/W) = \dim V$.

Satz 2 (Homomorphiesatz)
Seien V, Z zwei K-Vektorräume und $T : V \longrightarrow Z$ linear. Es gilt:
$$V/\ker(T) \simeq R_t.$$

Beweis Definiere $\overline{T} : V/\ker(T) \twoheadrightarrow R_T$ mit $\overline{T}(\alpha + \ker(T)) = \overline{T}(\overline{\alpha}) = T(\alpha)$.

(i) Ist $\overline{T}$ wohldefiniert ? $\overline{\alpha} = \overline{\alpha'} \Rightarrow T(\alpha) = T(\alpha')$?
$\alpha - \alpha' \in \ker(T) \Leftrightarrow T(\alpha - \alpha') = 0 \Leftrightarrow T(\alpha) = T(\alpha')$

(ii) Linear ?
$\overline{T}(\overline{\alpha_1}+\overline{\alpha_2}) = \overline{T}(\overline{\alpha_1 + \alpha_2}) = T(\alpha_1+\alpha_2) = T(\alpha_1)+T(\alpha_2) = \overline{T}(\overline{\alpha_1})+\overline{T}(\overline{\alpha_2})$.
Analog zeigt man: Für $c \in K$ und $\alpha \in V$ ist $\bar{T}(c\bar{\alpha}) = c\bar{T}(\bar{\alpha})$.

(iii) $T(\alpha) \in R_T$. Es ist $\overline{T}(\overline{\alpha}) = T(\alpha)$. Also ist $\overline{T}$ surjektiv.

(iv) $\overline{T}$ injektiv ?
$\overline{\alpha} \in \ker(\overline{T}) \Leftrightarrow \overline{T}(\overline{\alpha}) = 0 \Leftrightarrow T(\alpha) = 0 \Leftrightarrow \alpha \in \ker(T) \Leftrightarrow \overline{\alpha} = 0$. So ist $\overline{T}$ regulär. □

Korollar 2
$$\frac{W \oplus W'}{W} \simeq W',$$
wobei W, W' Unterräume von V und $V = W \oplus W'$ sind.

Beweis $V = W \oplus W'$ bedeutet für alle $v \in V$, dass genau ein $w \in W$ und genau ein $w' \in W'$ existieren, so dass $v = w + w'$.
Definiere $\underline{P}_{W'} : V \twoheadrightarrow W'; v \mapsto w'$.

ÜA: Ist $\underline{P}_{W'}$ linear? Surjektiv?
$v \in \ker(P_{W'}) \Leftrightarrow P_{W'}(v) = 0 \Leftrightarrow w' = 0 \Leftrightarrow v \in W$.
Satz 2 $\Rightarrow V/\ker(P_{W'}) \simeq$ Bild $(P_{W'})$. □

Korollar 3
$$(V/W)^* \simeq W^0,$$
wobei $W \subseteq V$ ein Unterraum ist.

Beweis Sei $\pi_W : V \twoheadrightarrow V/W$. Betrachte $\pi_W^t : (V/W)^* \to V^*$. Setze $T := \pi_W$.
$R_{T^t} = \big(\ker(T)\big)^0 = W^0$. $\ker(T^t) = (R_T)^0 = (V/W)^0 = \{0\}$.
Also ist T^t regulär und surjektiv auf W^0. □

Fragestellung Sei $W \subseteq V$ ein Unterraum. Was ist die Beziehung zwischen W^* und V^* ?

Korollar 4
$$W^* \simeq V^*/W^0,$$
wobei $W \subseteq V$ ein Unterraum ist.

Beweis 1 $Id : W \longrightarrow V$ Identitätsabbildung
$Id^t : V^* \longrightarrow W^*$
$\ker(Id^t) = (R_{Id})^0 = W^0$
$R_{Id^t} = (\ker(Id))^0 = (\{0\})^0 = W^*$. $\square$

Beweis 2 Übungsaufgabe
Betrachte die Abbildung $\rho : V^* \longrightarrow W^*; \rho(f) := f/W$ (die Restringierung).
Ist ρ linear? Was ist $\ker(\rho)$? Was ist R_ρ?
Benutze Homomorphiesatz (nach der Berechnung von $\ker(\rho)$ und R_ρ). $\square$