Ein super toller Titel für eure Abschlussarbeit

Fakultät für Muster und Beispiele
der Hochschule Musterhausen

Abschlussarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Engineering

vorgelegt von

Max Mustermann
geboren am 01.01.1900 in Musterhausen

im Dezember 2014

Erstprüfer:	Prof. Dr. med. Dr.-Ing. M. Mustermann
Zweitprüfer:	Prof. Dr.-Ing. F. Musterfrau

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

1 Einleitung

2 Visulaisierung höherer Dimensionen

2.1 platonische Körper

2.1.1 Teserract

3 Algebraische Strukturen

Wir werden uns mit der fundamentalsten aller algebraischen Strukturen, den Gruppen, befassen, um mit einem Zwischenstopp bei den Körpern die sogenannten Vektorräume über einen Körper K zu definieren.

3.1 Gruppen

Gruppen ermöglichen eine Abstrahierung von Rechenoperationen. Ebenso muss diese algebraische Struktur bestimmte Eigenschaften erfüllen, die im Folgenden nach einigen grundlegenden Definitionen neuer Begriffe aufgeführt werden.

Definition 3.1.1. Kartesisches Produkt
„Das kartesische Produkt $A \times B$ zweier Mengen A und B ist die Menge aller geordneten Paare (a, b) mit $a \in A$ und $b \in B$:

$$A \times B := \{(a, b) \mid a \in A, b \in B\}.\text{“ [\textbf{?}, S. 28]}$$

Bemerkung 3.1.2. Es kommt auf die Reihenfolge innerhalb des Paares an. Somit gilt $(a, b) \neq (b, a)$.

In Abschnitt 4.1.3 werden weitere Beispiele für das kartesische Produkt aufgeführt.

Definition 3.1.3. innere Verknüpfung
„Eine (innere) Verknüpfung auf einer Menge G ist eine Abbildung[[1]]

$$\mu : G \times G \to G\ .\text{“ [\textbf{?}, S. 19, 4.1]}$$

Bemerkung 3.1.4. Aus der Abbildungsvorschrift geht hervor, dass einem Paar (g_1, g_2) ein Element $\mu((g_1, g_1))$, – stattdessen schreiben wir auch $g_1 \cdot g_2$, $g_1 + g_2$ oder $g_1 \circ g_2$ –, aus der Zielmenge zugeordnet wird (vgl. [**?**, S. 19, 4.1]).

[1] Das Wort Abbildung ist ein Synonym zu Funktion.

Definition 3.1.5. Gruppe
„Eine Gruppe ist eine Menge G mit einer Verknüpfung

$$\circ[^2]\colon G \times G \to G$$

für die die folgenden Eigenschaften gelten

(i) (Assoziativität) Für alle $x, y, z \in G$ gilt

$$(x \circ y) \circ z = x \circ (y \circ z).$$

(ii) (Existenz eines neutralen Elements) Es gibt ein $e \in G$ mit

$$e \circ x = x = x \circ e \,\text{für alle}\, x \in G.$$

(iii) (Existenz von Inversen) Sei $x \in G$. Dann gibt es ein $y \in G$ mit

$$y \circ x = e = x \circ y.\text{“ [?, S. 19, 4.2]}$$

Definition 3.1.6. abelsche oder kommutative Gruppe
Man bezeichnet eine Gruppe auch als kommutativ oder abelsch, wenn für alle $a, b \in G$ gilt

$$a \circ b = b \circ a. \text{ [?, S. 19, 4.3]}$$

Im weiteren Verlauf werden einige Beispiele für Gruppen aufgeführt.

Beispiel 3.1.7. Die Verknüpfung $+$ auf der Menge der natürlichen Zahlen $\mathbb{N}$ erfüllt die Eigenschaften (i), (ii) – das neutrale Element ist hierbei die Zahl 0 – , aber nicht (iii), weil das Inverse einer natürlichen Zahl n die Lösung der Gleichung $n + x = 0 = x + n$ für $x \in \mathbb{N}$ ist, wobei $x = -n$ ergibt, aber $-n \notin \mathbb{N}$, sondern $-n \in \mathbb{Z}$. Somit ist die Verknüpfung $+$ auf der Menge der ganzen Zahlen, man schreibt auch $(\mathbb{Z}, +)$, eine Gruppe. Insbesondere ist sie *kommutativ* oder *abelsch*.

Beispiel 3.1.8. Ebenso bildet die Verknüpfung $\cdot$ (die Multiplikation) auf der Menge der rationalen Zahlen $\mathbb{Q} \setminus \{0\}$ eine *kommutative* Gruppe. Das neutrale Element bezüglich der Addition ist die 1, das auch als „Einselement“ [?, S. 20, 4.1] bezeichnet wird. Die Null ist

[2] Die innere Verknüpfung wird als „$\circ$“ bezeichnet. Anstatt des Zeichens kann eine Rechenoperation wie $+$ oder $\cdot$ verwendet werden.

ausgeschlossen, weil sie kein Inverses hat, also eine Zahl aus $\mathbb{Q}$, die multipliziert mit Null das 1 ergibt, existiert nicht. Der Kehrbruch einer beliebigen rationalen Zahl ist sein inverses Element.

Beispiel 3.1.9. Da $\mathbb{Z}$, $\mathbb{Q} \setminus \{0\} \subset \mathbb{R}$ sind, folgt insbesondere, dass $(\mathbb{R}, +)$ und $(\mathbb{R} \setminus \{0\}, \cdot)$ abelsche Gruppen sind.

Aus dem letzten Beispiel geht hervor, dass es einfacher wäre zwei verschiedene Verknüpfungen $+$ und $\cdot$ auf einer Menge K für die Addition bzw. auf der Menge $K \setminus \{0\}$ für die Multiplikation in eine neue algebraische Struktur zusammenzufasssen. Diese nennen wir wie folgt:

3.2 Körper

Definition 3.2.1. Körper Ein Körper besteht aus zwei Mengen K und $K \setminus \{0\}$ mit zwei Verknüpfungen

$$\begin{aligned} + &: K \times K \to K \\ \cdot &: K \times K \to K \end{aligned}$$

für die gelten:

(i) $(K, +)$ ist eine abelsche Gruppe mit $e = 0$ als das neutrale Element.

(ii) $(K \setminus \{0\}, \cdot)$ ist eine kommutative Gruppe mit dem Einselement $e = 1$ als das neutrale Element.

(iii) (Distrivbutivgesetze) Für alle $a, b, c \in K$ gilt

$$\begin{aligned} a \cdot (b + c) &= a \cdot b + a \cdot c \\ (a + b) \cdot c &= a \cdot c + b \cdot c \ \text{. (vgl. [?])} \end{aligned}$$

Beispiel 3.2.2. Die Menge der rationalen Zahlen $\mathbb{Q}$ und der reellen Zahlen $\mathbb{R}$ bilden mit der uns geläufigen Addition und Multiplikation offensichtlich[3] einen Körper. (vgl. [**?**, S. 26])

[3] Der Beweis ist nicht Gegenstand dieser Seminararbeit.

4 Vektorräume

4.1 Vektorräume

Definition 4.1.1. Vektorraum
„Sei K ein Körper. Ein Vektorraum[1] über K (oder K-Vektorraum) ist eine kommutative Gruppe $(V, +)$[2] zusammen mit einer äußeren Verknüpfung

$$\begin{aligned} \cdot : K \times V &\to V \\ (\lambda, v) &\mapsto \lambda \cdot v \end{aligned}$$

(genannt Skalarmultiplikation) mit folgenden Eigenschaften: Für alle $\lambda, \lambda_1, \lambda_2 \in K$ und $v, v_1, v_2 \in V$ gilt

(i) $(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot v = \lambda_1 \cdot v + \lambda_2 \cdot v$

(ii) $\lambda \cdot (v_1 + v_2) = \lambda \cdot v_1 + \lambda \cdot v_2$

(iii) $\lambda_1 \cdot (\lambda_2 \cdot v) = (\lambda_1 \cdot \lambda_2) \cdot v$

(iv) $1 \cdot v = v$." [**?**, S. 28, 6.1]

Bemerkung 4.1.2. Vektorräume beinhalten zwei verschiedene Additionen und Multiplikationen, die allerdings aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht extra gekennzeichnet werden. Zum einen gibt es die Addition in K und in V, ebenso die Multiplikation in K, zum anderen die sogenannte Skalarmultiplikation[3] $\lambda \cdot v$ für $\lambda \in K$ und $v \in V$. (vgl. [**?**, S. 28, 6.1])

Definition 4.1.3. Mehrfaches kartesisches Produkt

[1] Über den Vektoren befinden sich in der höheren Mathematik keine Pfeile mehr und man notiert sie, um Platz zu sparen, meist waagrecht.
[2] Vektoraddition
[3] Wir kennen sie unter der Streckung oder Stauchung eines Vektors mit einem Skalar.

Das mehrfache kartesische Produkt einer Menge K wird wie folgt definiert:

$$\underbrace{K \times K \times ... \times K}_{n\text{-mal}} := K^n. \text{ (vgl. [?, S. 28])}$$

Beispiel 4.1.4. n-faches kartesisches Produkt als K-Vektorraum Sei K ein Körper. Für $n \in \mathbb{N}$ machen wir

$$\text{„}K^n = \{(x_1, ..., x_n) \mid x_1, ..., x_n \in K\}\text{“ [?, S. 28, 6.2]}$$

zu einem K-Vektorraum mit folgender Definition von komponentenweisen Addition

$$\text{„}(x_1, ..., x_n) + (y_1, ..., y_n) := (x_1 + y_1, x_2 + y_2, ..., x_n + y_n)\text{“ [?, S. 28, 6.2]}$$

und Skalarmultiplikation

$$\text{„}\lambda \cdot (x_1, ..., x_n) := (\lambda x_1, \lambda x_2, ..., \lambda x_n)\text{“ [?, S. 28, 6.2].}$$

Beispiel 4.1.5. Ebene und Raum Das uns bekannte zweidimensionale Koordinatensystem

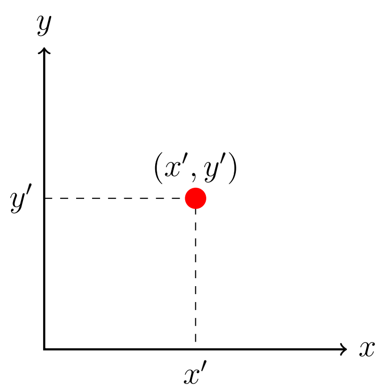

Abbildung 4.1: $\mathbb{R}^2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$

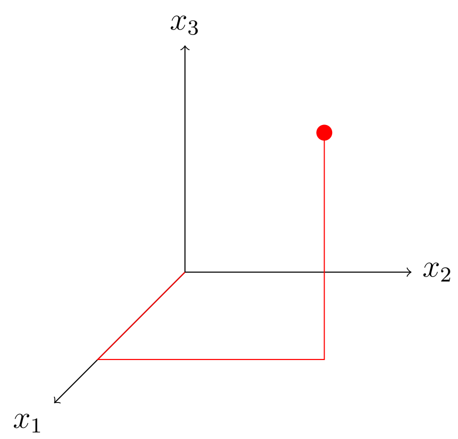

Abbildung 4.2: $\mathbb{R}^3 = \mathbb{R} \times \mathbb{R} \times \mathbb{R}$

$\mathbb{R}^2$ ist das kartesische Produkt aus $\mathbb{R} \times \mathbb{R}$. Jeder Punkt der x-y-Ebene lässt sich durch ein „Paar von Koordinaten[4], (x, y),“ [?, S. 28] für alle $x, y \in \mathbb{R}$ beschreiben. Das dreidimensionale Koordinatensystem $\mathbb{R}^3$ ist das dreifache kartesische Produkt der Menge der reellen Zahlen. Die Koordinaten werden als „Tripel“ [?, S. 28] (x_1, x_2, x_3) für alle $x_1, x_2, x_3 \in \mathbb{R}$ bezeichnet.

[4] Alternativ nennen wir es auch Tupel.

Der $\mathbb{R}^2$ und $\mathbb{R}^3$ (vgl. 4.1.5) kann mit Hilfe eines kartesischen Koordinatensystems sehr gut visualisiert werden. Funktioniert das beispielsweise auch für den $\mathbb{R}^4$, den $\mathbb{R}^5$ oder sogar den $\mathbb{R}^n$? Es fehlt uns lediglich die Vorstellungskraft über die übrigen Richtungen im größer-drei-dimensionalen Raum. In diesem Kapitel werden wir den Begriff der Dimension definieren. Auch lernen wir eine Möglichkeit, uns höherdimensionale Vektorräume „formal" vorzustellen.

4.2 Erzeugendensysteme

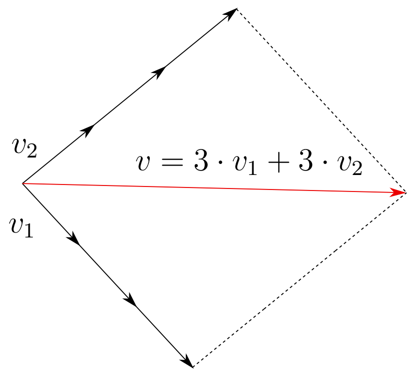

Abbildung 4.3: $\sum_{i=1}^{2} \lambda_i v_i = \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2$, wobei hier $\lambda_1 = \lambda_2 = 3$ ist

Aus dem Schulunterricht kennen wir bereits den Begriff der Linearkombination, eine Summe aus mehreren gestreckt und gestauchten Vektoren, woraus wiederum ein neuer Vektor entsteht. Im Folgenden wird dieser Sachverhalt auf eine allgemeinere mathematische Ebene gebracht, sodass es für beliebig viele Vektoren aus jedem Vektorraum und für beliebig viele Skalare aus jedem Körper gilt.

Definition 4.2.1. Linearkombination
Sei K ein Körper, V ein K-Vektorraum und $v_1, ..., v_k \in V$. Ein Vektor $v \in V$ lässt sich mit $v_1, ..., v_k$ und den Koeffizienten $\lambda_i \in K$ für $i = 1, ..., k$ und $k \in \mathbb{N}$ wir folgt *linear kombinieren*:

$$v = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i v_i = \lambda_1 v_1 + \lambda_2 v_2 + \lambda_3 v_3 + ... + \lambda_k v_k. \text{ (vgl. [\textbf{?}, S. 298, 16.3])}$$

Definition 4.2.2. lineare Hülle
Sei V ein Vektorraum über den Körper K und $A \subset V$. Die Menge aller Linearkombinationen

$$„\langle A \rangle_K := \{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i a_i \mid n \in \mathbb{N}, \lambda_i \in K, a_i \in X \text{ für } i = 1, ..., n\}“[\textbf{?}, \text{S. } 30]$$

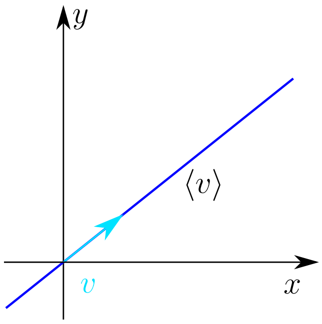

Abbildung 4.4: $\langle v \rangle_{\mathbb{R}} \in \mathbb{R}^2$ ist eine Gerade.

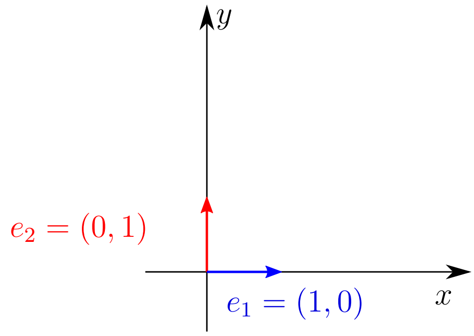

Abbildung 4.5: $E = \{e_1, e_2\} \subset \mathbb{R}^2 \Rightarrow \langle E \rangle_{\mathbb{R}} = \mathbb{R}^2$.

bezeichnen wir als den, die „*lineare Hülle*“ [?, S. 298, 16.4], das „*Erzeugnis*“ [?, S. 298, 16.4] oder den „*Span*“ [?, S. 298, 16.4] von X.

Definition 4.2.3. Erzeugendensystem
„Eine Teilmenge M eines K-Vektorraums V heißt Erzeugendensystem von V, wenn $V = \langle M \rangle_K$. V heißt *endlich erzeugt* [von M][5], wenn es ein endliches Erzeugendensystem gibt.“ [?, S. 39, 9.4]

Definition 4.2.4. Lineare Unabhängigkeit
„Sei K ein Körper und V ein K-Vektorraum, $v_1, ..., v_k \in V$. Wie nennen das System $(v_1, ..., v_k)$ *linear unabhängig*, wenn gilt

$$\sum_{i=1}^{k} \lambda_i v_i = 0 \Longrightarrow \lambda_i = 0 \,[...]\, [\text{für alle}]\; i.$$

Andernfalls heißt $(v_1, ..., v_k)$ *linear abhängig.*“ [?, S. 298, 16.5]

Sei eine Menge linear unabhängig und sei dies zu überprüfen. So folgt ist die Gleichung in 4.2.4 nur durch die „trivial[e]“ [?, S. 307, 16.5] Lösung, also alle Koeffizienten $\lambda_i = 0$, lösbar. Sei dagegeben eine Menge linear abhängig und sei dies zu überprüfen, dann ist mindestens ein $\lambda_i \neq 0$. An dieser Stelle sei für Beispiele auf diesen und diesen Abschnitt hingewiesen.

4.3 Basis

Theorem 4.3.1. Basis

[5] Sei $M = \{m_1, m_2, ..., m_n\}$ eine n-elementige Teilmenge von V aus den Vektoren $m_1, m_2, ..., m_n$.

„Sei V ein K-Vektorraum. Eine Teilmenge $B \subseteq V$ heißt Basis von V, wenn die folgenden äquivalenten Bedingungen gelten:

(i) B ist ein *Erzeugendensystem* und *linear unabhängig.*

(ii) B ist [ein] *minimales*[6] *Erzeugendensystem.*

(iii) B ist [eine] *maximale*[7] *linear unabhängige Teilmenge.*“ [**?**, S. 41, 9.16]

Um das Theorem bestehend aus der Äquivalenzaussage (i) $\Leftrightarrow$ (ii) $\Leftrightarrow$ (iii) zu zeigen, reicht es den Beweis des sogenannten Ringschlusses für die Implikationen (i) $\Rightarrow$ (ii), (ii) $\Rightarrow$ (iii) und (iii) $\Rightarrow$ (i) zu führen.
Im folgenden erfolgen die Beweise alle durch Widerspruch. Um oftmals die Inkonsistenzen zu finden, bedarf es einer gründlichen Arbeit mit den Voraussetzungen, welche zur Vereinfachung gekennzeichnet werden.

Beweis. Vor.: Sei $B = \{v_1, ..., v_k\}$. B ist Erzeugendensystem und **linear unabhängig**.
Beh.: (i) $\Rightarrow$ (ii)
Bew.: Angenommen B ist nicht minimal. Dann ist B ohne v_k für $k = 1, ..., n$ immer noch ein Erzeugendensystem:
Sei $\lambda_i \in K$ für $i = 1, ..., n$.

$$\Rightarrow v_k = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} \lambda_i v_i \Leftrightarrow 0 = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n} \lambda_i v_i - v_k$$

$\Rightarrow \lambda_k \neq 0 \Rightarrow$ **linear abhängig** $\lightning$ $\Rightarrow$ Beh.
In Wortform: Der Nullvektor erhält somit eine nichttriviale Darstellung, da $\lambda_k = 1 \neq 0$. Insbesondere ist das System B mit v_k für $k = 1, ..., n$ **linear abhängig**, was ein Widerspruch zu der Voraussetzung der linearen Unabhängigkeit ist, woraus folgt, dass die Behauptung wahr ist. (vgl. [**?**, S. 41, 9.16 (a) $\Rightarrow$ (b)])

Vor.: B ist ein **minimales Erzeugendensystem**.
Beh.: (ii) $\Rightarrow$ (iii)
Bew.: Zuerst zeigen wir, dass B linear unabhängig ist.
Angenommen B ist linear abhängig. Sei λ_i für $i = 1, ..., n$. Dann hat die Gleichung $\sum\limits_{i=1}^{k} \lambda_i v_i = 0$

[6]Diese Eigenschaft gilt nicht mehr, wenn ein Element aus B entfernt wird.
[7]Wird ein $v \in V$ zu B hinzugefügt, so ist B nicht mehr linear unabhängig.

mindestens ein $\lambda_i \neq 0$ mit $i = 1, ..., n$ als Lösung.
Wir nehmen o.B.d.A[8] an: Sei $\lambda_j \neq 0$ für $j \in 1, ..., n$. B ist linear abhängig aufgrund v_j.

$$\Rightarrow \lambda_j v_j + \sum_{\substack{i=1\\i\neq j}}^{n} \lambda_i v_i = 0$$

$$\Leftrightarrow \lambda_j v_j = -\sum_{\substack{i=1\\i\neq j}}^{n} \lambda_i v_i$$

$$\Leftrightarrow v_j = -\sum_{\substack{i=1\\i\neq j}}^{n} \frac{\lambda_i}{\lambda_j} v_i \in \langle B \setminus \{v_j\} \rangle_K$$

Der Vektor v_j liegt in $B \setminus \{v_j\}$. Wir benötigen, um den Widerspruch zu erhalten, einen Zwischenbeweis, der aussagt, dass die Menge $B \setminus \{v_j\}$ entgegen der Minimalität ein Erzeugendensystem ist.

Zw.vor.: $v_j \in B \setminus \{v_j\}$, also $v_j \cup B \setminus \{v_j\}$ linear abhängig.
Zw.beh.:$B \setminus \{v_j\}$ ist ein Erzeugendensystem
Zw.bew.: Angenommen, $B \setminus \{v_j\}$ sei kein Erzeugendensystem. Dann gibt es ein $v_j \notin B \setminus \{v_j\}$ für $k \in \{1, ..., n\}$. Daraus folgt allerdings: Die Menge $B \setminus \{v_j\} \cup v_j = B \cup v_j$ ist linear unabhängig, was der Voraussetzung, dass $B \cup v_j$ linear abhängig ist, widerspricht.[9]

Daher ist $B \setminus \{v_j\}$ ein Erzeugendensystem, was im Gegensatz zu der **Minimalität des Erzeugendensystems** von B steht. Also ist B linear unabhängig.
Es ist noch zu zeigen , dass B *maximal* linear unabhängig ist.
Angenommen, B ist keine maximal linear unabhängige Teilmenge. Dann gibt es ein $v \in V$, sodass $B \cup \{v\}$ linear unabhängig ist $-$ v wäre nicht im Span von B $-$, aber B **erzeugt** laut Voraussetzung alle Vektoren in V, somit gilt $v \in \langle B \rangle$, was der Widerspruch ist. Daraus folgt, dass B *maximal* linear unabhängig ist. (vgl. [**?**, S. 41, 9.16 (b) $\Rightarrow$ (c)])

Vor.: B ist ein maximale linear unabhängige Teilmenge.
Beh.: (iii) $\Rightarrow$ (i)
Bew.: Es sind zwei Tatsachen zu zeigen, zum einen dass aus (iii) die Lineare Unabhängigkeit

[8] Ohne Beschränkung der Algmeinheit. Wir schauen uns einfachheitshalber einen Spezialfall an, um die Aussage im Allgemeinen zu beweisen. Die anderen Fälle würden analog zu zeigen sein.
[9] Zw.bew. ist eigens vom Verfasser geführt worden.

von B folgt, was offensichtlich aus der Voraussetzung folgt, und zum anderen dass B ein Erzeugendensystem ist.
Angenommen, B ist kein Erzeugendensystem. Dann gibt es ein $v \in V$, sodass $v \notin \langle B \rangle$ gilt, also nicht im Erzeugnis von B liegt. Daraus folgt, dass $\{v\} \cup B$ linear unabhängig ist, was der **Maximalität** von B widerspricht. (vgl. [**?**, S. 59]) □

Definition 4.3.2. Dimension eines Vektorraums
„Ist B eine Basis eines endlich erzeugten Vektorraums V, so nennt man $n := |B| \in \mathbb{N}_0$ die Dimension von V. Wir schreiben dafür $\dim(V) = n$. Ist V nicht endlich erzeugt, so setzen wir $\dim(V) := \infty$." [**?**, S. 504]

Definition 4.3.3. Einheitsvektoren
„Dabei sei $e_i \in K^n$ für $i = 1, ..., n$ der i-te Einheitsvektor, also

$$e_i = (0, ..., 0, 1, 0, ..., 0),$$

wobei die 1 genau an der i-ten Stelle steht. Auf präzisere Weise können wir

$$[...]\,[e_i = (\delta_{1i}, \delta_{2i}, ..., \delta_{ii}, ..., \delta_{ni})]$$

schreiben mit

$$\delta_{hi} = \begin{cases} 1 \text{ für } h = i \\ 0 \text{ [...] [für } h \neq i] \end{cases}$$

δ_{hi} ist das so genannte *Kronecker-Symbol*.[10]" [**?**, S. 31]

Beispiel 4.3.4. Einheitsvektoren
In der Abbildung **??** siehen wir die Einheitsvektoren des $\mathbb{R}^2$, die zudem auch eine Basis bilden. Nun werden wir die Standardbasisvektoren für den K^n-Vektorraum für jedes $n \in \mathbb{N}$ kennenlernen. Es ist noch zu zeigen, dass die Einheitsvektoren eine Basis bilden. Hierzu nutzen wir die Eigenschaften aus (i) des Theorems 4.3: „Es ist $\{e_1, ..., e_n\}$ ein Erzeugendensystem von K^n (denn für $v = (\lambda_1, ..., \lambda_n) \in K^n$ ist $v = \sum\limits_{i=1}^{n} \lambda_i e_i$)."" [**?**, S. 40, 9.9]
„In K^n sind die Einheitsvektoren $e_1, ..., e_n$ linear unabhängig:

$$0 = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i e_i = (\lambda_1, ..., \lambda_n).$$

[10]Nur wenn beide Indizes gleich sind ,dann $\delta_{ii} = 1$

Aus der Definition 4.3 folgt: $\lambda_1 = ... = \lambda_n = 0$." [**?**, S. 41, 9.14]
Somit ist $e_1, ..., e_n$ eine Basis von K^n. Wir bezeichnen sie auch als „kanonische Basis" [**?**, S. 42, 9.17] . Daraus folgt, dass „$dim(K^n) = n$" [**?**, S. 44, 9.24 (a)] ist.

4.4 Dimensionen

4.5 Dimensionsformeln

5 unendlichdimensionale Vektorräume

5.1 Polynomvektorräume

∞ ∞ ∞ ∞ ∞ ∞ ∞

5.2 Vektorraum der unendlichen Folgen

6 Schluss