



WESTFÄLISCHE  
WILHELMS-UNIVERSITÄT  
MÜNSTER



FACHBEREICH 10  
MATHEMATIK UND  
INFORMATIK

# Skript Lineare Algebra II.

Mitschrift der Vorlesung „Lineare Algebra II.“ von Prof. Dr. Arthur Bartels

Jannes Bantje

7. April 2015

Aktuelle Version verfügbar bei



<https://github.com/JaMeZ-B/latex-wwu>

GitHub ist eine Internetplattform, auf der viele OpenSource-Projekte gehostet werden. Diese Plattform nutzen wir zur Zusammenarbeit, also findet man hier neben den PDFs auch die  $\text{\TeX}$ -Dateien. Außerdem ist über diese Plattform auch direktes Mitarbeiten möglich, siehe nächste Seite.



<https://uni-muenster.sciebo.de/public.php?service=files&t=965ae79080a473eb5b6d927d7d8b0462>

Sciebo ist ein Dropbox-Ersatz der Hochschulen in NRW, der von der Uni Münster in leitender Position auf Basis der OpenSource-Software Owncloud aufgebaut wurde. Wenn man auf den Link klickt, kann man die Freigabe zum eigenen Speicher hinzufügen und hat dann immer automatisch die aktuellste Version.



B6WH2DISQ5QVYIRYIEZSF4ZR2IDVKPN3I

BTSync ist ein peer-to-peer Dateisynchronisations-Tool. Dabei werden die Dateien nur auf den Computern der Teilnehmer an einer Freigabe gespeichert. Ein Mini-Computer ist permanent online, sodass jederzeit die aktuellste Version verfügbar ist. Clients gibt es für jedes Betriebssystem. Zugang ist über das obige „Secret“ bzw. den QR-Code möglich




## Vorlesungshomepage


<http://wwwmath.uni-muenster.de/reine/u/topos/lehre/SS2013/LineareAlgebra2/index.html>

Hier ist ein Link zur offiziellen Vorlesungshomepage.

## Vorwort — Mitarbeit am Skript

Dieses Dokument ist eine Mitschrift aus der Vorlesung „Lineare Algebra II., SoSe 2013“, gelesen von Prof. Dr. Arthur Bartels. Der Inhalt entspricht weitestgehend dem Tafelanschrieb. Für die Korrektheit des Inhalts übernehme ich keinerlei Garantie! Für Bemerkungen und Korrekturen – und seien es nur Rechtschreibfehler – bin ich sehr dankbar. Korrekturen lassen sich prinzipiell auf drei Wegen einreichen:


- Persönliches Ansprechen in der Uni, Mails an [✉ j.bantje@wwu.de](mailto:j.bantje@wwu.de) (gerne auch mit annotieren PDFs) oder Kommentare auf <https://github.com/JaMeZ-B/latex-wwu> .
- *Direktes* Mitarbeiten am Skript: Den Quellcode poste ich auf GitHub (siehe oben), also stehen vielfältige Möglichkeiten der Zusammenarbeit zur Verfügung: Zum Beispiel durch Kommentare am Code über die Website und die Kombination Fork + Pull Request. Wer sich verdient macht oder ein Skript zu einer Vorlesung, die ich nicht besuche, beisteuern will, dem gewähre ich gerne auch Schreibzugriff.

Beachten sollte man dabei, dass dazu ein Account bei [github.com](https://github.com)  notwendig ist, der allerdings ohne Angabe von persönlichen Daten angelegt werden kann. Wer bei GitHub (bzw. dem zugrunde liegenden Open-Source-Programm „git“) – verständlicherweise – Hilfe beim Einstieg braucht, dem helfe ich gerne weiter. Es gibt aber auch zahlreiche empfehlenswerte Tutorials im Internet.<sup>1</sup>

- *Indirektes* Mitarbeiten:  $\text{\TeX}$ -Dateien per Mail verschicken.

Dies ist nur dann sinnvoll, wenn man einen ganzen Abschnitt ändern möchte (zB. einen alternativen Beweis geben), da ich die Änderungen dann per Hand einbauen muss! Ich freue mich aber auch über solche Beiträge!

---

<sup>1</sup> zB. <https://try.github.io/levels/1/challenges/1> , ist auf Englisch, aber dafür interaktives LearningByDoing

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Isometrien</b>	<b>1</b>
1.1. Definition Isometrie . . . . .	1
1.2. Satz über Isometrie und das Skalarprodukt . . . . .	1
1.3. Bemerkung für eine Orthonormalbasis . . . . .	1
1.4. Satz über Isometrie und Matrizenprodukt . . . . .	1
1.5. Korollar über die Determinante einer Isometrie . . . . .	2
1.6. Lemma über die Gruppe der Isometrien . . . . .	3
1.7. Definition orthogonale/unitäre Gruppe . . . . .	3
1.8. Bemerkung über die Spalten der Matrizen in $O(n)$ . . . . .	3
1.9. Beispiel für (spezielle) orthogonale Gruppen . . . . .	3
1.10. Bemerkung über „drehende“ Isometrie . . . . .	4
1.11. Beispiel einer spiegelnden Isometrie . . . . .	4
1.12. Lemma über die Eigenwerte einer Isometrie . . . . .	4
1.13. Satz über die Diagonalisierbarkeit von Isometrien auf unitären Vektorräumen . . . . .	4
1.14. Bemerkung über die Diagonalisierbarkeit von Isometrien auf euklidischen Vektorräumen . . . . .	5
<b>2. Volumen und Determinante</b>	<b>6</b>
2.1. Definition Parallelotop . . . . .	6
2.2. Bemerkung Parallelotope sind Teilmenge der linearen Hülle . . . . .	6
2.3. Beispiele für Parallelotope . . . . .	6
2.4. Frage: Was ist das Volumen eines $n$ -dimensionalen Parallelotops . . . . .	7
2.5. Beispiel für Probleme bei der Volumenberechnung . . . . .	7
2.6. Definition des Volumen per Determinante . . . . .	7
2.7. Lemma über die betragliche Gleichheit von Determinanten . . . . .	8
2.8. Satz über das Volumen in einem Unterraum . . . . .	8
2.9. Bemerkung über das Volumen eines Parallelotops unter einem Endomorphismus . . . . .	8
<b>3. Quotientenräume</b>	<b>9</b>
3.1. Lemma über die Existenz einer linearen Abbildung . . . . .	9
3.2. Bemerkung über die Quotientenabbildung . . . . .	9
3.3. Definition: Quotientenvektorraum . . . . .	9
3.4. Lemma über die Eindeutigkeit von $U/L$ . . . . .	9
3.5. Definition: Quotientenvektorraum . . . . .	10
3.6. Bemerkung über nicht-kanonisches Komplement und induzierte Abbildung . . . . .	10
3.7. Definition: induzierte Abbildung . . . . .	10
3.8. Lemma über Eigenschaften der induzierten Abbildung . . . . .	10
3.9. Satz über Herleitung von Isomorphie über die induzierten Abbildungen . . . . .	11
3.10. Definition von invarianten/stabilen Funktionen . . . . .	11
<b>4. Polynome</b>	<b>12</b>
4.1. Definition Polynom, Leitkoeffizient . . . . .	12
4.2. Bemerkung über die von einem Polynom definierte Funktion . . . . .	12
4.3. Bemerkung über das Multiplizieren mit Null . . . . .	12
4.4. Bemerkung über den Polynomring . . . . .	12
4.5. Bemerkung über Rechenregeln mit dem Grad eines Polynoms . . . . .	12
4.6. Lemma: Der Polynomring ist nullteilerfrei . . . . .	13
4.7. Division mit Rest bei Polynomen . . . . .	13
4.8. Beispiel für Polynomdivision . . . . .	13

4.9.	Korollar über Zerlegung mit Hilfe der Nullstelle . . . . .	13
4.10.	Bemerkung algebraisch abgeschlossen und Linearfaktoren . . . . .	14
4.11.	Der Euklid'sche Algorithmus . . . . .	14
4.12.	Definition von $r$ teilt $s$ . . . . .	14
4.13.	Satz über die Eigenschaften des Ergebnisses des Euklid'schen Algorithmus . . . . .	14
4.14.	Bemerkung größter gemeinsamer Teiler (ggT) . . . . .	15
4.15.	Definition irreduzibles Polynom . . . . .	15
4.16.	Satz, dass ein irreduzibles Polynom seine Faktoren teilt . . . . .	15
4.17.	Bemerkung Definition von prim und Einheit . . . . .	15
4.18.	Primfaktorzerlegung in $K[X]$ . . . . .	15
4.19.	Definition von Polynomen in $\text{End}_K(V)$ . . . . .	16
4.20.	Bemerkung über Rechenregeln . . . . .	16
4.21.	Definition Polynomring etc. . . . .	16
4.22.	Bemerkung zu einer Definition, die nicht zu einem Ring wird . . . . .	17
<b>5.</b>	<b>Normalformen</b>	<b>18</b>
5.1.	Erinnerung an konjugierte Matrizen und Endomorphismen . . . . .	18
5.2.	Normalformenproblem . . . . .	18
5.3.	Beispiele zu Invarianten . . . . .	18
5.4.	Bemerkung, dass Invarianten nicht reichen zur Unterscheidung der Konjugationsklassen	18
5.5.	Konjugationsklassen in $\mathbb{C}^{2 \times 2}$ . . . . .	18
5.6.	Bemerkung: Zusammenfassung von 5.5 . . . . .	19
5.7.	Beispiel zweier Matrizen, die alle Kriterien erfüllen, aber nicht konjugiert sind . . . . .	19
<b>6.</b>	<b>Charakteristisches Polynom</b>	<b>20</b>
6.1.	Bemerkung zur Definition der Determinante über einem Ring . . . . .	20
6.2.	Definition charakteristisches Polynom . . . . .	20
6.3.	Bemerkung, dass die Nullstellen mit den Eigenwerten übereinstimmen . . . . .	20
6.4.	Bemerkung über die Gleichheit der charakteristischen Polynome konjugierter Matrizen	20
6.5.	Definition: charakteristisches Polynom einer Abbildung $f$ . . . . .	20
6.6.	Bemerkung über Nullstellen und Eigenwerte . . . . .	20
6.7.	Bemerkung über das charakt. Polynom einer Diagonalmatrix . . . . .	21
6.8.	Satz über Diagonalisierbarkeit und Linearfaktoren des charakteristischen Polynoms . .	21
6.9.	Beispiel: Zerfallen einer unteren Dreiecksmatrix in Linearfaktoren . . . . .	21
6.10.	Satz: Zerfallen in Linearfaktoren $\Leftrightarrow$ Gestalt der Matrix . . . . .	21
6.11.	Satz über Zerlegung des charakteristischen Polynoms mit Hilfe von Unterräumen . . .	22
6.12.	Lemma: $L(v, f)$ ist invariant . . . . .	22
6.13.	Definition: zyklischer Endomorphismus . . . . .	22
6.14.	Lemma über die Eigenschaften von $L(v, f)$ . . . . .	22
6.15.	Definition: nilpotenter Endomorphismus . . . . .	23
6.16.	Bemerkung: Folgerung über Nilpotenz aus 6.14 . . . . .	23
6.17.	Definition: Stufe . . . . .	23
6.18.	Lemma über ein $v$ maximaler Stufe . . . . .	23
6.19.	Satz über $L(v, f)$ eines $v$ mit maximaler Stufe . . . . .	23
6.20.	Zerlegung eines Vektorraums in $f$ -invariante zyklische Unterräume . . . . .	24
6.21.	Lemma über einen nilpotenten Endomorphismus . . . . .	24
6.21.1.	Bemerkung Jordankästen . . . . .	25
6.22.	Definition: strikte obere Dreiecksmatrix . . . . .	25
6.23.	Bemerkung über die Potenz einer strikten oberen Dreiecksmatrix . . . . .	25
6.24.	Satz: äquivalente Aussagen über nilpotente Endomorphismen . . . . .	25

<b>7. Die Jordansche Normalform</b>	<b>26</b>
7.1. Bemerkung und Definition verallgemeinerte Eigenraum	26
7.2. Lemma: $\lambda$ ist der einzige Eigenwert von $f _{W_\lambda}$	26
7.3. Satz über eine Basis des verallgemeinerten Eigenraumes	27
7.4. Lemma über Teiler des charakteristischen Polynoms	27
7.5. Lemma über den Schnitt von verallgemeinerten Eigenräumen	27
7.6. Satz über Summe der verallg. Eigenräume und $\chi_f$ , wenn dies in Linearfaktoren zerfällt	28
7.7. Jordansche Normalform	28
7.8. Proposition: Binomischer Lehrsatz für Endomorphismen	29
7.9. Jordan-Chevalley-Zerlegung	30
7.10. Definition: unipotenter Endomorphismus	30
7.11. Bemerkung über unipotente Endomorphismen	30
7.12. Multiplikative Jordan-Chevalley-Zerlegung	30
<b>8. Das Minimalpolynom</b>	<b>31</b>
8.1. Erinnerung an zyklische Unterräume	31
8.2. Lemma über Gestalt von $\chi_f$ in 8.1	31
8.3. Satz von Cayley-Hamilton	31
8.4. Satz über Eigenschaften des Minimalpolynoms	31
8.5. Definition Minimalpolynom	31
8.6. Lemma: Nullstellen von $p_f$ sind Eigenwerte von $\chi_f$	31
8.7. Lemma über das Minimalpolynom, wenn $f$ diagonalisierbar	32
8.8. Lemma: $p_f$ ist Produkt von verschiedenen Linearfaktoren $\Rightarrow f$ ist diagonalisierbar	32
8.9. Satz: die Diagonalisierbarkeit von $f \iff$ Gestalt von $p_f$	32
8.10. Beispiel: Minimalpolynom eines Jordankastens	32
8.11. Satz über die Gestalt von $p_f$ , hergeleitet aus der JNF	33
8.12. Lemma über Vertäglichkeit von $m_B^B$ mit dem Minimalpolynom	33
8.13. Korollar über Gleichheit der Minimalpolynome von $f$ und $m_B^B(f)$	33
8.14. Bemerkung: Die Einsetzungshomomorphismen und $m_B^B$ sind Ringhomomorphismen	33
8.15. Bemerkung über Bilder der Einsetzungshomomorphismen	34
8.16. Satz: Beweis des Kochrezepts für die Jordan-Normalform	34
<b>9. Euklidische Ringe und Hauptidealringe</b>	<b>35</b>
9.1. Definition Ideal	35
9.2. Beispiele für Ideale	35
9.3. Definition Einheit	35
9.4. Lemma über Ideale und Einheiten	35
9.5. Bemerkung über die Ideale eines Körpers	35
9.6. Definition: kleinstes und erzeugtes Ideal	35
9.7. Definition: Hauptideal	36
9.8. Definition Integritätsring und Hauptidealring	36
9.9. Definition: Euklidischer Ring und Gradfunktion	36
9.10. Beispiel für euklidische Ringe	36
9.11. Satz: Euklidische Ringe sind Hauptidealringe	36
9.12. Definition von irreduzibel und prim in Integritätsringen	36
9.13. Lemma: prim impliziert irreduzibel	36
9.14. Satz: In Hauptidealringen ist prim äquivalent zu irreduzibel	37
9.15. Satz über die Existenz der Primfaktorzerlegung in Hauptidealringen	37
9.16. Lemma über eine aufsteigende Folge von Idealen	37
9.17. Eindeutige Primfaktorzerlegung in Hauptidealringen	37
9.18. Definition: Ring der Gaußsche Zahlen	38

9.19.	Lemma: Der Ring der Gaußschen Zahlen ist ein Hauptidealring . . . . .	38
9.20.	Lemma: Einheiten in den Gaußschen Zahlen . . . . .	38
9.21.	Satz: Lösung von $x^2 + 1 = y^3$ . . . . .	39
<b>10.</b>	<b>Tensorprodukte</b> . . . . .	<b>40</b>
10.1.	Wiederholung: bilineare Abbildungen . . . . .	40
10.2.	Definition Tensorprodukt . . . . .	40
10.3.	Bemerkung zur Eindeutigkeit des Tensorprodukts . . . . .	40
10.4.	Bemerkung: Verstehen bilinearer Abbildungen und das Tensorprodukt . . . . .	40
10.5.	Definition: $K$ -Vektorraum $K[X]$ . . . . .	41
10.6.	Bemerkung: Basis von $K[\mathfrak{M}]$ . . . . .	41
10.7.	Konstruktion von $V \otimes W$ . . . . .	41
10.8.	Nachweis der universellen Eigenschaft für $V \otimes W$ . . . . .	41
10.9.	Satz: Zusammensetzung einer Basis von $V \otimes W$ durch Basen von $V$ und $W$ . . . . .	41
10.10.	Bemerkung über den Vektorraum $V_L$ . . . . .	42
10.11.	Lemma: Basis von $V_L$ . . . . .	42
10.12.	Bemerkung über $L$ -lineare Abbildung von $V_L$ nach $W_L$ . . . . .	42
10.13.	Bemerkung über Matrizen von $f$ und $f_L$ . . . . .	43
10.14.	Bezeichnung von $V$ als Untervektorraum von $V_L$ . . . . .	43
10.15.	Beispiel anhand eines $\mathbb{R}$ -Vektorraums $V$ . . . . .	43
<b>11.</b>	<b>Die Jordansche Normalform über <math>\mathbb{R}</math></b> . . . . .	<b>44</b>
11.1.	Lemma über Eigenschaften reeller Polynome . . . . .	44
11.2.	Bemerkung: Liste der irreduziblen Polynome in $\mathbb{R}[X]$ . . . . .	44
11.3.	Satz über Zerlegung des Minimalpolynoms in teilerfremde Polynome . . . . .	44
11.4.	Proposition: Erhalten einer $\mathbb{R}$ -Basis von $V$ durch die Komplemente von $V_{\mathbb{C}}$ . . . . .	45
11.5.	Notation: komplex konjugiertes Polynom . . . . .	46
11.6.	Lemma: Gleichheit der Minimalpolynome eines Endomorphismus und seiner Komplexifizierung . . . . .	46
11.7.	Proposition: Jordansche Normalform mit $2 \times 2$ -Matrizen auf der Diagonalen . . . . .	46
11.8.	Definition: verallgemeinerter Jordankasten . . . . .	47
11.9.	Satz: Jordansche Normalform über $\mathbb{R}$ . . . . .	47
<b>12.</b>	<b>Der Dualraum</b> . . . . .	<b>49</b>
12.1.	Definition: Dualraum . . . . .	49
12.2.	Lemma: Basis des Dualraums . . . . .	49
12.3.	Definition: Duale Basis . . . . .	49
12.4.	Korollar: Isomorphismus zwischen endlich dimensionalem Vektorraum und seinem Dualraum . . . . .	49
12.5.	Bemerkung: Dieser Isomorphismus ist nicht kanonisch . . . . .	49
12.6.	Bemerkung zur vermeintlichen Basis $B^*$ von $V^*$ im unendlichdimensionalen Fall . . . . .	49
12.7.	Definition: Duale Abbildung . . . . .	49
12.8.	Proposition: Rechenregeln mit dualen Abbildungen . . . . .	50
12.9.	Proposition: Bilden von Matrizen der dualen Abbildung . . . . .	50
12.10.	Lemma: Kanonischer Isomorphismus zwischen euklidischem Vektorraum und seinem Dualraum . . . . .	50
12.11.	Bemerkung: Abbildung einer Orthonormalbasis . . . . .	51
12.12.	Bemerkung: In unitären Vektorräumen existiert dieser Isomorphismus nicht . . . . .	51
12.13.	Proposition zum adjungierten Homomorphismus . . . . .	51
12.14.	Lemma: Rechenregeln für adjungierte Homomorphismen . . . . .	51
12.15.	Proposition: Die duale Abbildung und die adjungierte Abbildung sind isomorph . . . . .	52

12.16. Bemerkung . . . . .	52
12.17. Bemerkung: Charakterisierung von selbstadjungierten Endomorphismen und Isometrien durch $f^*$ . . . . .	52
12.18. Lemma: Vergleich der Matrizen von $f$ und $f^*$ . . . . .	52
<b>13. Normale Endomorphismen</b>	<b>53</b>
13.1. Definition: Normaler Endomorphismus . . . . .	53
13.2. Beispiel . . . . .	53
13.3. Lemma: Charakterisierung von normal mit Hilfe des Skalarprodukts . . . . .	53
13.4. Lemma: Eigenschaften normaler Endomorphismen bezüglich Kern und Eigenvektoren .	53
13.5. Lemma über $f$ -Invarianz eines Unterraums und seines orthogonalen Komplements . .	53
13.6. Lemma über einen Unterraum, der sowohl $f$ - als auch $f^*$ -invariant ist . . . . .	54
13.7. Spektralsatz . . . . .	54
<b>14. Moduln</b>	<b>55</b>
14.1. Definition: $R$ -Modul . . . . .	55
14.2. Beispiele verschiedener Module . . . . .	55
14.3. Definition: Untermodul . . . . .	55
14.4. Definition: Quotientenmodul . . . . .	56
14.5. Beispiel . . . . .	56
14.6. Definition: Erzeugendensystem von Moduln . . . . .	56
14.7. Beispiel . . . . .	56
14.8. Beispiel . . . . .	56
14.9. Definition: $R$ -linear . . . . .	56
14.10. Bemerkung . . . . .	56
14.11. Definition: Kokern . . . . .	56
14.12. Lemma . . . . .	57
14.13. Definition: Isomorph . . . . .	57
14.14. Bemerkung . . . . .	57
14.15. Definition: Kurze exakte Folge . . . . .	57
14.16. Lemma: Kurze exakte Folge endlich erzeugter Moduln . . . . .	57
14.17. Satz über Untermoduln von $R^n$ , wenn $R$ Hauptidealring ist . . . . .	58
14.18. Satz . . . . .	58
14.19. Bemerkung . . . . .	59
14.20. Elementarmatrizen . . . . .	59
14.21. Lemma über die Kokerne zweier $R$ -linearen Abbildungen . . . . .	59
14.22. Korollar: Die Kokerne zweier Matrizen, die auseinander hervorgehen, sind isomorph . .	60
14.23. Satz: Erzeugen einer Diagonalmatrix im Fall euklidischer Ringe . . . . .	60
14.24. Bemerkung . . . . .	60
14.25. Satz: Konstruktion eines isomorphen Moduls mit $R^n$ . . . . .	60
14.26. Beispiel . . . . .	61
14.27. Klassifikationssatz für endlich erzeugte $\mathbb{Z}$ -Moduln . . . . .	61
14.28. Proposition . . . . .	61
<b>A. Ausblick in die Algebra</b>	<b>62</b>
A.1. Fundamentalsatz der Algebra . . . . .	62
A.2. Definition . . . . .	62
A.3. Definition . . . . .	62
A.4. Satz . . . . .	62
A.5. Konstruktion mit Zirkel und Lineal . . . . .	62



<b>B. Fragestunde</b>	<b>62</b>
B.1. Sind Linearfaktoren immer irreduzibel? . . . . .	62
B.2. Beispiel $\mathbb{Z}[X]$ . . . . .	62
<b>Index</b>	<b>A</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>C</b>



# 1. Isometrien

## 1.1. Definition

Sei  $(V, \langle | \rangle)$  ein euklidischer oder unitärer Vektorraum. Ein Endomorphismus  $f : V \rightarrow V$  heißt eine **Isometrie**, falls für alle  $v \in V$  gilt:

$$\|f(v)\| = \|v\|$$

## 1.2. Satz

$$f \text{ Isometrie} \iff \forall v, w \in V \text{ gilt } \langle f(v) | f(w) \rangle = \langle v | w \rangle \quad (\star)$$

### Beweis

Gilt  $(\star)$  so folgt

$$\|f(v)\|^2 = \langle f(v) | f(v) \rangle \stackrel{(\star)}{=} \langle v | v \rangle = \|v\|^2$$

Da  $\|f(v)\|, \|v\| \geq 0$  folgt  $\|f(v)\| = \|v\|$ . Sei nun umgekehrt  $f$  eine Isometrie. Für  $v, w \in V$  gilt dann

$$\langle f(v+w) | f(v+w) \rangle = \langle v+w | v+w \rangle$$

Also

$$\langle f(v) | f(v) \rangle + \langle f(v) | f(w) \rangle + \langle f(w) | f(v) \rangle + \langle f(w) | f(w) \rangle = \langle v | v \rangle + \langle v | w \rangle + \langle w | v \rangle + \langle w | w \rangle$$

Wegen  $\langle f(v) | f(v) \rangle = \langle v | v \rangle$  und  $\langle f(w) | f(w) \rangle = \langle w | w \rangle$  folgt

$$\langle f(v) | f(w) \rangle + \langle f(w) | f(v) \rangle = \langle v | w \rangle + \langle w | v \rangle$$

Ist  $V$  euklidisch so  $\langle f(v) | f(w) \rangle = \langle f(w) | f(v) \rangle$  und  $\langle v | w \rangle = \langle w | v \rangle$  und es folgt  $\langle f(v) | f(w) \rangle = \langle v | w \rangle$ . Ist  $V$  unitär so folgt nur

$$\operatorname{Re} \langle f(v) | f(w) \rangle = \operatorname{Re} \langle v | w \rangle$$

Es gilt aber auch  $\langle f(v+iw) | f(v+iw) \rangle = \langle v+iw | v+iw \rangle$ . Damit folgt analog zu  $(\diamond)$

$$\langle f(v) | if(w) \rangle + \langle if(w) | f(v) \rangle = \langle v | iw \rangle + \langle iw | v \rangle$$

Also

$$\begin{aligned} -i \langle f(v) | f(w) \rangle + i \langle f(w) | f(v) \rangle &= -i \langle v | w \rangle + i \langle w | v \rangle \\ \langle f(v) | f(w) \rangle - \langle f(w) | f(v) \rangle &= \langle v | w \rangle - \langle w | v \rangle \end{aligned}$$

Es folgt  $\operatorname{Im} \langle f(v) | f(w) \rangle = \operatorname{Im} \langle v | w \rangle$  □

## 1.3. Bemerkung

Sei  $e_1, \dots, e_n$  eine Orthonormalbasis von  $V$  und  $f \in \operatorname{End}(V)$ . Dann ist  $f$  genau dann eine Isometrie, wenn gilt

$$\langle f(e_i) | f(e_j) \rangle = \delta_{ij} \quad \text{für } i, j = 1, \dots, n$$

## 1.4. Satz

Sei  $B = (e_1, \dots, e_n)$  eine Orthonormalbasis und  $f \in \operatorname{End}(V)$ . Sei  $A = m_B^B(f)$ . Dann gilt:

$$f \text{ ist Isometrie} \iff A \cdot \overline{A}^t = I_n$$

### Beweis

Es ist  $A = (a_{ij})$  mit  $a_{ij} = \langle f(e_j) | e_i \rangle$  da  $f(e_j) = \sum_{i=1}^n \langle f(e_j) | e_i \rangle e_i$  ist. Sei  $f$  eine Isometrie. Dann

$$A \cdot \overline{A}^t = \left( \sum_{j=1}^n \langle f(e_j) | e_i \rangle \overline{\langle f(e_j) | e_k \rangle} \right)_{ik} =: (b_{ik})_{ik}$$

Da  $f$  eine Isometrie ist, ist  $f(B) = f(e_1), \dots, f(e_n)$  auch eine Orthonormalbasis und es folgt

$$\begin{aligned} b_{ik} &= \sum_{j=1}^n \langle f(e_j) | e_i \rangle \langle e_k | f(e_j) \rangle \\ &= \left\langle \sum_{j=1}^n \langle e_k | f(e_j) \rangle f(e_j) | e_i \right\rangle \\ &= \langle e_k | e_i \rangle = \delta_{ki} \end{aligned}$$

Sei  $A \cdot \overline{A}^t = I_n$ . Dann ist auch  $\overline{A}^t \cdot A = I_n$  und wir erhalten für alle  $i, k$

$$\sum_{j=1}^n \overline{\langle f(e_i) | e_j \rangle} \langle f(e_k) | e_j \rangle = \delta_{ik}$$

Es folgt

$$\begin{aligned} \langle f(e_k) | f(e_i) \rangle &= \left\langle \sum_{j=1}^n \langle f(e_k) | e_j \rangle e_j \mid \sum_{j=1}^n \langle f(e_i) | e_j \rangle e_j \right\rangle \\ &= \sum_{j=1}^n \langle f(e_k) | e_j \rangle \overline{\langle f(e_i) | e_j \rangle} \\ &= \delta_{ik} \end{aligned}$$

□

## 1.5. Korollar

Ist  $f$  eine Isometrie eines endlich dimensionalen euklidischen oder unitären Vektorraums, so ist

$$|\det f| = 1$$

### Beweis

Sei  $B$  Orthonormalbasis von  $V$ ,  $A = m_B^B(f)$ . Dann

$$\det f = \det A = \det A^t = \overline{\det A}^t$$

Nach 1.4 folgt

$$\det f \cdot \overline{\det f} = \det A \cdot \det \overline{A}^t = \det(A \cdot \overline{A}^t) = \det(I_n) = 1$$

Also  $|\det f| = 1$

□

## 1.6. Lemma

Sei  $V$  euklidischer oder unitärer Vektorraum. Seien  $f, g : V \rightarrow V$  Isometrien

- a)  $f \circ g$  ist eine Isometrie
- b)  $f$  ist injektiv  $\Rightarrow$  surjektiv, wenn  $\dim V < \infty$
- c) Ist  $f$  bijektiv, so ist auch  $f^{-1}$  eine Isometrie

Insbesondere bilden die Isometrien eine Gruppe, falls  $\dim V < \infty$

### Beweis

- a)  $\|f \circ g(v)\| \stackrel{f \text{ Isometrie}}{=} \|g(v)\| \stackrel{g \text{ Isometrie}}{=} \|v\|$
- b) Sei  $f(v) = 0 \Rightarrow \|v\| = \|f(v)\| = \|0\| = 0 \rightarrow v = 0$
- c)  $\|f^{-1}(v)\| = \|f(f^{-1}(v))\| = \|v\|$

□

## 1.7. Definition

- (i) Sei  $V$  ein endlich dimensionaler euklidischer Vektorraum

$$O(V) := \{f \in \text{End}(V) \mid f \text{ ist Isometrie}\}$$

heißt die **orthogonale Gruppe** von  $V$ . Die Untergruppe

$$SO(V) := \{f \in O(V) \mid \det f = 1\}$$

heißt die **spezielle orthogonale Gruppe** von  $V$ . Ist  $V = \mathbb{R}^n$  mit dem Standard-Skalarprodukt, so schreiben wir auch  $O(n) := O(\mathbb{R}^n)$  bzw  $SO(n) := SO(\mathbb{R}^n)$

- (ii) Sei  $V$  ein endlich dimensionaler unitärer Vektorraum

$$U(V) := \{f \in \text{End}(V) \mid f \text{ ist Isometrie}\}$$

heißt die **unitäre Gruppe** von  $V$ . Die Untergruppe

$$SU(V) := \{f \in U(V) \mid \det f = 1\}$$

heißt die **spezielle unitäre Gruppe** von  $V$ . Ist  $V = \mathbb{C}^n$  mit dem Standard-Skalarprodukt, so schreiben wir auch  $U(n) := U(\mathbb{C}^n)$  bzw  $SU(n) := SU(\mathbb{C}^n)$

## 1.8. Bemerkung

Wegen 1.3 ist  $O(n)$  die Menge der Matrizen deren Spalten eine Orthonormalbasis von  $\mathbb{R}^n$  (mit Standardskalarprodukt) bilden.  $U(n)$  ist die Menge der Matrizen deren Spalten eine Orthonormalbasis von  $\mathbb{C}^n$  (mit Standardskalarprodukt) bilden.

## 1.9. Beispiel

$$O(2) = \left\{ \begin{pmatrix} a & -\varepsilon b \\ b & \varepsilon a \end{pmatrix} \mid a^2 + b^2 = 1, \varepsilon \in \{\pm 1\} \right\}$$

$$SO(2) = \left\{ \begin{pmatrix} a & -b \\ b & a \end{pmatrix} \mid a^2 + b^2 = 1, a, b \in \mathbb{R} \right\} = \left\{ \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \mid \varphi \in [0, 2\pi) \right\}$$

### 1.10. Bemerkung

$D(\varphi) := \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}$  wirkt als Drehung um den Winkel  $\varphi$  um den Nullpunkt auf  $\mathbb{R}^2$ .

### 1.11. Beispiel

Sei

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \in O(2) \setminus SO(2)$$

$S$  wirkt als Spiegelung an der Achse  $e_1$ . Es ist  $S^2 = I_2$ . Es gilt  $O(2) = SO(2) \cup SO(2) \cdot S$ . Jedes Element in  $SO(2) \cdot S$  ist eine Spiegelung.

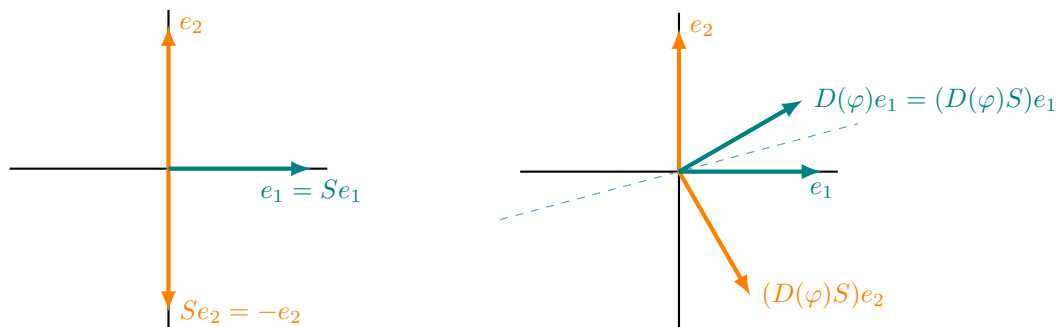


Abbildung 1: Veranschaulichung von Elementen in  $SO(2) \cdot S$

### 1.12. Lemma

Sei  $f : V \rightarrow V$  eine Isometrie.

- (i) Ist  $\lambda$  ein Eigenwert von  $f$  so gilt  $|\lambda| = 1$
- (ii) Ist  $U \leq V$  mit  $f(U) = U$  so gilt  $f(U^\perp) \subseteq U^\perp$

**Beweis**

- (i) Sei  $v$  ein Eigenvektor zum Eigenwert  $\lambda$ . Dann

$$\|v\| = \|f(v)\| = \|\lambda \cdot v\| = |\lambda| \cdot \|v\|$$

$v \neq 0 \Rightarrow \|v\| \neq 0$ . Also  $|\lambda| = 1$ . □

- (ii) Sei  $v \in U^\perp$ . Zu zeigen:  $\forall u \in U : \langle f(v) | u \rangle = 0$ .

Sei  $u \in U$ . Da  $U = f(U)$  gibt es  $u' \in U$  mit  $f(u') = u$ . Also

$$\langle f(v) | u \rangle = \langle f(v) | f(u') \rangle \stackrel{(1.2)}{=} \langle v | u' \rangle \stackrel{v \in U^\perp}{=} 0$$

□

### 1.13. Satz

Sei  $V$  ein endlich dimensionaler unitärer Vektorraum. Dann sind alle  $f \in U(V)$  diagonalisierbar<sup>2</sup>.

<sup>2</sup>  $\exists$  Basis  $B$  mit  $m_B^B(f)$  Diagonalmatrix oder  $\exists$  Basis  $B$  aus EV von  $f$

**Beweis**

(vgl. 15.5 LinA I) Induktion nach  $n := \dim V$ . Induktionsanfang:  $n = 0$  ✓

Induktionsschritt:  $n - 1 \mapsto n$

Nach dem Fundamentalsatz der Algebra hat  $\chi_f$  eine Nullstelle und  $f$  damit einen Eigenvektor  $v$ . Sei  $U := \langle v \rangle^\perp$ . Dann  $\dim U = n - 1$ . Wegen (1.12) (i) ist  $\langle f(v) \rangle = \langle v \rangle$ . Aus (1.12) (ii) folgt  $f(U) \subseteq U$ . Weiter ist  $f_0 := f|_U : U \rightarrow U$  eine Isometrie. Induktionsannahme  $\Rightarrow \exists$  Basis aus Eigenvektoren  $B_0$  für  $f_0$ . Dann ist  $B = \{v\} \cup B_0$  eine Basis aus Eigenvektoren für  $f$ .  $\square$

**Bemerkung**

In (1.13) gibt es sogar eine Orthonormalbasis aus Eigenvektoren für  $f$ .

**1.14. Bemerkung**

Ist  $V$  ein endlich dimensionaler euklidischer Vektorraum so sind nicht alle  $f \in O(V)$  diagonalisierbar.  $f \in O(2)$  ist genau dann diagonalisierbar wenn  $f \in \{\pm I_2\}$  oder  $f$  eine Spiegelung ist.

Aber es existiert eine Orthonormalbasis von  $f$  mit

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} \boxed{D(\varphi_1)} & & & & \\ & \boxed{D(\varphi_2)} & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \boxed{D(\varphi_i)} & \\ & & & & \boxed{I_n} \\ & & & & & \boxed{-I_n} \end{pmatrix}$$

## 2. Volumen und Determinante

### 2.1. Definition

Sei  $V$  ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum,  $v_1, \dots, v_r \in V$ . Dann heißt

$$P(v_1, \dots, v_r) := \left\{ \sum_{i=1}^r t_i v_i \mid t_i \in [0, 1] \right\}$$

der von  $v_1, \dots, v_r$  aufgespannte **Parallelotop**. Ist  $v_1, \dots, v_r$  linear unabhängig, so heißt  $P(v_1, \dots, v_r)$   **$r$ -dimensional**.

### 2.2. Bemerkung

$$P(v_1, \dots, v_r) \subseteq \langle v_1, \dots, v_r \rangle = \mathcal{L}(\{v_1, \dots, v_r\})$$

### 2.3. Beispiel

(i)  $V = \mathbb{R}^n$ ,  $P(e_1, \dots, e_n) = \left\{ \begin{pmatrix} t_1 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix} \mid t_i \in [0, 1] \right\}$

(ii)  $P(e_1, e_2)$  Quadrat der Kantenlänge 1.

(iii)  $P(e_1, e_2, e_3)$  Würfel der Kantenlänge 1.

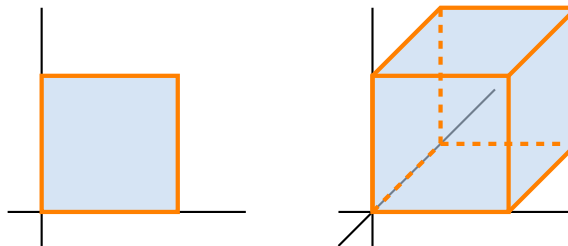


Abbildung 2: einfache Parallelotope in  $\mathbb{R}^2$  bzw.  $\mathbb{R}^3$

(iv)  $P(v_1, v_2)$

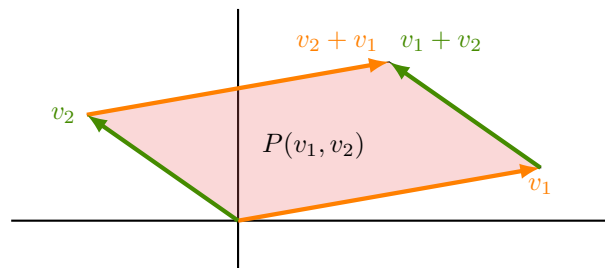


Abbildung 3: Parallelotop von Nicht-Standardvektoren in  $\mathbb{R}^2$



## 2.4. Frage

Was ist das Volumen eines  $n$ -dimensionalen Parallelotops in  $\mathbb{R}^n$ ? In anderen  $\mathbb{R}$ -Vektorraum?

Es sollte gelten:

- (1)  $\text{Vol}_{\mathbb{R}^n}(P(e_1, \dots, e_n)) = 1$
- (2)  $\text{Vol}_{\mathbb{R}^n}(P(\lambda_1 e_1, \dots, \lambda_n e_n)) = \lambda_1 \cdots \lambda_n$
- (3)  $v_1, \dots, v_n$  linear abhängig  $\implies \text{Vol}_{\mathbb{R}^n}(v_1, \dots, v_n) = 0$
- (4) Mit  $U := \langle v_1, \dots, v_{n-1} \rangle$

$$\text{Vol}_{\mathbb{R}^n}(P(v_1, \dots, v_n)) = \text{Vol}_U(P(v_1, \dots, v_{n-1})) \|v_n - P_U(v_n)\|$$

wobei  $P_U : V \rightarrow U$  die orthogonale Projektion ist.

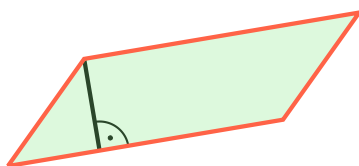


Abbildung 4: Veranschaulichung von 2.4((4))

## 2.5. Beispiel

$$\text{Vol}_{\mathbb{R}^n}(P(v_1, \dots, v_i + v'_i, v_{i+1}, \dots, v_n)) = ?$$

$$\text{Vol}_{\mathbb{R}^2}(P(v_1, v_2)) + \text{Vol}_{\mathbb{R}^2}(P(v_1, v'_2)) = \text{Vol}_{\mathbb{R}^2}(P(v_1, v_2 + v'_2))$$

**Aber:**  $\text{Vol}_{\mathbb{R}^2}(P(v_1, v_2 + \hat{v}_2)) = \text{Vol}_{\mathbb{R}^2}(P(v_1, v_2)) - \text{Vol}_{\mathbb{R}^2}(P(v_1, \hat{v}_2))$

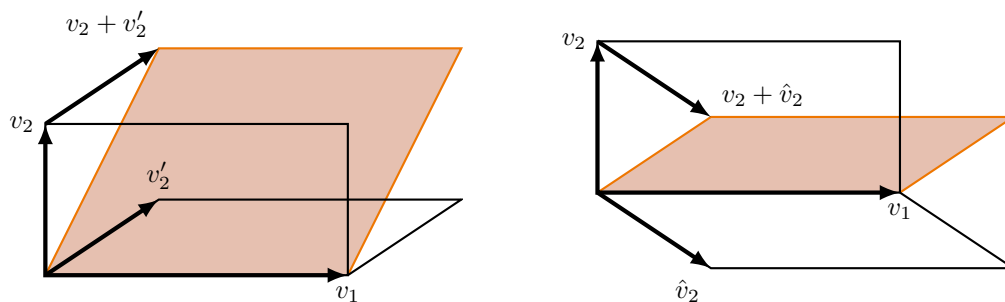


Abbildung 5: Veranschaulichung von Beispiel 2.5

## 2.6. Definition

Sei  $V$  ein  $n$ -dimensionaler euklidischer Vektorraum. Sei  $P = P(v_1, \dots, v_n)$  ein  $n$ -dimensionales Parallelotop in  $V$ . Sei  $(e_1, \dots, e_n)$  eine Orthonormalbasis von  $V$  und  $f : V \rightarrow V$  linear mit  $f(e_i) = v_i$ . Wir definieren

$$\text{Vol}(P) := |\det f|$$

Wir werden sehen, dass dies nicht von der Wahl der Orthonormalbasis abhängt. Offensichtlich sind ((1)) - ((3)) aus 2.4 erfüllt.

## 2.7. Lemma

Sei  $V$  ein  $n$ -dimensionaler euklidischer Vektorraum. Seien  $v_1, \dots, v_n \in V$  und  $B = (e_1, \dots, e_n)$  und  $B' = (e'_1, \dots, e'_n)$  zwei Orthonormalbasen. Seien  $f, f' : V \rightarrow V$  mit  $f(e_i) = v_i = f'(e'_i)$ . Dann gilt

$$|\det f| = |\det f'|$$

### Beweis

Sei  $\varphi \in O(V)$  mit  $\varphi(e_i) = e'_i$ . Dann  $f = f' \circ \varphi$ . Also

$$\det f = \det(f' \circ \varphi) = \det f' \cdot \det \varphi$$

Da  $\varphi$  eine Isometrie ist, gilt  $|\det \varphi| = 1$ . Es folgt  $|\det f| = |\det f'|$  □

## 2.8. Satz

Sei  $V$  ein euklidischer Vektorraum,  $\dim V = n$ . Sei  $P = P(v_1, \dots, v_n)$  ein  $n$ -dimensionaler Parallelotop in  $V$ . Sei  $U := \langle v_1, \dots, v_{n-1} \rangle$ . Dann ist

$$\text{Vol}_V(P) = \text{Vol}_U(P(v_1, \dots, v_{n-1})) \cdot \|v_n - P_U(v_n)\|$$

wobei  $P_U : V \rightarrow U$  die orthogonale Projektion<sup>3</sup> von  $V$  auf  $U$  ist.

### Beweis

Sei  $B = (e_1, \dots, e_n)$  eine Orthonormalbasis von  $V$  so, dass  $B' = (e_1, \dots, e_{n-1})$  eine Orthonormalbasis von  $U$  ist. Sei  $f \in \text{End}(V)$  mit  $f(e_i) = v_i$ . Also

$$\text{Vol}_V(P) = |\det f| \quad \text{Vol}_U(P(v_1, \dots, v_{n-1})) = |\det f|_U$$

Es ist

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} m_{B'}^{B'}(f|_U) & \langle f(e_n) | e_1 \rangle \\ & \langle f(e_n) | e_2 \rangle \\ & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & \langle f(e_n) | e_n \rangle \end{pmatrix}$$

Also

$$\det f = (\det f|_U) \cdot \langle f(e_n) | e_n \rangle$$

$$\|v_n - P_U(v_n)\| = \left\| \sum_{i=1}^n \langle v_n | e_i \rangle e_i - \sum_{i=1}^{n-1} \langle v_n | e_i \rangle e_i \right\| = \|\langle v_n | e_n \rangle e_n\| = |\langle v_n | e_n \rangle| = |\langle f(e_n) | e_n \rangle|$$

## 2.9. Bemerkung

Sei  $V$  ein euklidischer Vektorraum,  $\dim V = n$ . Sei  $f \in \text{End}(V)$ . Dann gilt für jeden Parallelotop  $P = P(v_1, \dots, v_n)$  mit  $f(P) = P(f(v_1), \dots, f(v_n))$

$$\text{Vol}_V(f(P)) = |\det f| \cdot \text{Vol}_V(P)$$

<sup>3</sup>  $U \leq V$ ,  $V$  eukl. VR,  $\dim V < \infty$ ,  $\text{Bild } P_U = U$ ,  $P_U \circ P_U = P_U$ ,  $P_U(v)$  ist der Vektor in  $U$  mit minimalem Abstand zu  $V$ , Formel:  $P_U(v) = \sum_{i=1}^r \langle v | e_i \rangle e_i$  wobei  $e_1, \dots, e_r$  ONB von  $U$

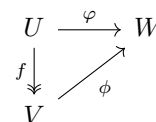
### 3. Quotientenräume

#### 3.1. Lemma

Seien  $f : U \rightarrow V$ ,  $\varphi : U \rightarrow W$  lineare Abbildungen wobei  $f$  surjektiv sei. Genau dann gibt es eine lineare Abbildung  $\phi : V \rightarrow W$  mit  $\varphi = \phi \circ f$ , wenn  $\text{Kern } f \subseteq \text{Kern } \varphi$  ist.

##### Beweis

Gilt  $\phi \circ f = \varphi$  so ist  $\text{Kern } f \subseteq \text{Kern } \varphi$ . Sei umgekehrt  $\text{Kern } f \subseteq \text{Kern } \varphi$ . Sei  $v \in V$ . Dann ist  $\varphi$  auf den Urbildern von  $v$  konstant: Ist  $f(u) = v = f(u')$  so gilt  $u - u' \in \text{Kern } f \subseteq \text{Kern } \varphi$ . Also  $\varphi(u - u') = 0 \Rightarrow \varphi(u) = \varphi(u')$ . Da außerdem  $f$  surjektiv ist, gibt es eine eindeutige Abbildung  $\phi : V \rightarrow W$  mit  $\phi(v) = \varphi(u)$  für alle  $u \in U, v \in V$  mit  $f(u) = v$ . Insbesondere  $\varphi = \phi \circ f$ .



##### $\phi$ ist linear

Seien  $v, v' \in V$ . Wähle  $u, u' \in U$  mit  $f(u) = v$ ,  $f(u') = v'$ . Dann ist auch  $f(u + u') = v + v'$ . Daher

$$\phi(v + v') = \varphi(u + u') = \varphi(u) + \varphi(u') = \phi(v) + \phi(v')$$

Genauso  $\phi(\lambda v) = \lambda \phi(v)$ . □

#### 3.2. Bemerkung

Sei  $f : U \rightarrow V$  linear und surjektiv. Sei  $L := \text{Kern } f$ . Dann nennen wir  $f$  eine **Quotientenabbildung** zum Unterraum  $L$  von  $U$ . Durch  $u \sim u' :\Leftrightarrow f(u) = f(u')$  wird eine Äquivalenzrelation auf  $U$  erklärt; es gilt

$$u \sim u' \Leftrightarrow u - u' \in \text{Kern } f = L$$

Die Äquivalenzklassen sind die Urbilder von Vektoren aus  $V$  und haben die Form

$$u + L := \{u + l \mid l \in L\}$$

Eine Teilmenge dieser Form heißt ein **affiner Unterraum** von  $U$  mit **Richtung**  $L$ .

#### 3.3. Definition

Sei  $L$  ein Unterraum von  $U$ . Die Äquivalenzklassen von  $u \sim u' :\Leftrightarrow u - u' \in L$  sind die affinen Unterräume von  $U$  mit Richtung  $L$ . Die Menge aller Äquivalenzklassen, also die Menge aller affinen Unterräume von  $U$  mit Richtung  $L$ , bezeichnen wir mit  $U/L$ . Sei  $p : U \rightarrow U/L$  die Quotientenabbildung mit  $p(u) = u + L$ .

#### 3.4. Lemma

Es gibt genau eine Vektorraumstruktur auf  $U/L$ , so dass  $p : U \rightarrow U/L$  linear wird. Es gilt dann

$$(u + L) + (u' + L) = (u + u') + L \quad \lambda(u + L) = \lambda u + L$$

##### Beweis

Da  $p$  linear sein soll muss gelten:

$$\begin{aligned} (u_1 + L) + (u_2 + L) &= (u_1 + u_2) + L \\ \lambda(u + L) &= (\lambda u) + L \end{aligned}$$

Damit folgt die Eindeutigkeit. Wir müssen zeigen, dass  $(*)$  und  $(\#)$  wohldefiniert sind. Zu  $(\#)$ : Sei  $u' + L = u + L$  und  $\lambda \in \mathbb{K}$ . Wir müssen zeigen:  $\lambda u' + L = \lambda u + L$ . Da  $u' + L = u + L$  ist  $u \in u' + L$ . Also gibt es  $l \in L$  mit  $u = u' + l$ . Also  $u - u' \in L$ . Dann auch  $\lambda u - \lambda u' \in L$  und damit  $\lambda u + L = \lambda u' + L$ .

$(*)$  genauso.

Die Vektorraumaxiome für  $U/L$  folgen leicht aus denen für  $U$ . □

### 3.5. Definition

Mit dieser Vektorraumstruktur heißt  $U/L$  der **Quotientenvektorraum** von  $U$  durch  $L$ .

### 3.6. Bemerkung

$$p(l) = 0 + L$$

Der Kern der Projektion  $p : U \rightarrow U/L$  ist  $L$ . Es gibt also zu jedem Unterraum  $L$  von  $U$  eine surjektive Abbildung mit Kern  $L$ . Alternativ könnte man ein Komplement  $K$  zu  $L$  wählen  $U = L \oplus K$  und  $p : U \rightarrow U/L$  mit  $p(l + k) = k + L$  betrachten. Diese Alternative ist aber nicht kanonisch, sie erfordert die Wahl von  $K$ .

Ist zum Beispiel  $f \in \text{End}(U)$  mit  $f(L) \subseteq L$ , gibt es nicht immer ein Komplement  $K$  von  $L$  mit  $f(K) \subseteq K$ . Andererseits induziert  $f$  mit  $f(L) \subseteq L$  eine lineare Abbildung  $F : U/L \rightarrow U/L$  mit  $F(u + L) = f(u) + L$ . Wegen  $f(L) \subseteq L$  ist diese wohldefiniert.

### 3.7. Definition

Seien  $L_0 \subseteq U_0$ ,  $L_1 \subseteq U_1$  Unterräume und  $f : U_0 \rightarrow U_1$  linear mit  $f(L_0) \subseteq L_1$ . Dann heißt

$$F : U_0/L_0 \rightarrow U_1/L_1 \text{ mit } F(u + L_0) := f(u) + L_1$$

die von  $f$  **induzierte Abbildung**.  $F$  ist wohldefiniert, da  $f(L_0) \subseteq L_1$  und linear, da  $f$  linear ist.

### 3.8. Lemma

Seien  $L_0 \subseteq U_0$ ,  $L_1 \subseteq U_1$  Unterräume,  $f : U_0 \rightarrow U_1$  linear mit  $f(L_0) \subseteq L_1$

- i)  $F$  ist die eindeutige bestimmte lineare Abbildung  $F : U_0/L_0 \rightarrow U_1/L_1$  für die  $F \circ p_0 = p_1 \circ f$  ist, also Abb. 6 kommutiert.

$$\begin{array}{ccccc} L_0 & \hookrightarrow & U_0 & \xrightarrow{p_0} & U_0/L_0 \\ f|_{L_0} \downarrow & & f \downarrow & & \downarrow F \\ L_1 & \hookrightarrow & U_1 & \xrightarrow{p_1} & U_1/L_1 \end{array}$$

Abbildung 6: Kommutierendes Diagramm zu Lemma 3.8

- ii) Sind  $f|_{L_0} : L_0 \rightarrow L_1$  und  $F : U_0/L_0 \rightarrow U_1/L_1$  bijektiv, so ist auch  $f$  bijektiv.

#### Beweis

- i) folgt aus (3.1)

- ii) Seien  $f|_{L_0}$  und  $F$  bijektiv.

$f$  ist **injektiv**: Sei  $f(u) = 0$ . Dann

$$F(p_0(u)) = p_1(f(u)) = p_1(0) = 0$$

Da  $F$  bijektiv ist, ist  $p_0(u) = 0$ . Also  $u \in \text{Kern } p_0 = L_0$ . Nun ist  $f|_{L_0}(u) = f(u) = 0$ . Da  $f|_{L_0}$  bijektiv ist, folgt  $u = 0$ .

$f$  ist **surjektiv**: Sei  $u_1 \in U_1$ . Da  $F$  surjektiv ist, gibt es  $u_0 + L_0 \in U_0/L_0$  mit  $F(u_0 + L_0) = u_1 + L_1$ . Da  $F(u_0 + L_0) = f(u_0) + L_1$  also  $u_1 - f(u_0) \in L_1$ . Da  $f|_{L_0}$  surjektiv ist, gibt es  $l_0 \in L_0$  mit  $f(l_0) = u_1 - f(u_0)$ . Es folgt

$$f(l_0 + u_0) = f(l_0) + f(u_0) = u_1 - f(u_0) + f(u_0) = u_1$$

□

### 3.9. Satz

Sei  $f : V \rightarrow W$  linear. Seien  $0 = V_0 \subseteq V_1 \subseteq \dots \subseteq V_r = V$  und  $0 = W_0 \subseteq W_1 \subseteq \dots \subseteq W_r = W$  mit  $f(V_i) \subseteq W_i$  für  $i = 0, \dots, r$ . Sei  $f_i : V_i/V_{i-1} \rightarrow W_i/W_{i-1}$  die durch  $f|_{V_i}$  induzierte Abbildung für  $i = 1, \dots, r$ .

Sind alle  $f_i$  Isomorphismen, so ist auch  $f$  ein Isomorphismus.

#### Beweis

Induktion nach  $r$  mittels (3.8) ii)

### 3.10. Definition

Sei  $f \in \text{End}(U)$ . Ein Unterraum  $L \leq U$  mit  $f(L) \subseteq L$  heißt  **$f$ -stabil** oder  **$f$ -invariant**. Es wird dann ein Endomorphismus  $F \in \text{End}(U/L)$  induziert.

## 4. Polynome

### 4.1. Definition

Sei  $K$  ein Körper. Ein formaler Ausdruck der Form

$$p = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + \dots + a_1 X + a_0$$

mit  $a_n, \dots, a_0 \in K$  heißt ein **Polynom** mit Koeffizienten in  $K$ . Die Menge aller Polynome wird mit  $K[X]$  bezeichnet.

Ist  $a_n \neq 0$  so sagen wir:  $p$  hat den **Grad**  $d(p) := n$  und den **Leitkoeffizienten**  $l(p) := a_n$ . Polynome mit  $a_i = 0$  für  $i \geq 1$  heißen **konstant**. Für das Nullpolynom  $0 := (0 \cdot x^n)$  setzen wir  $d(0) := -\infty$  und  $l(0) := 0$ . Ist  $l(p) = 1$  so heißt  $p$  **normiert**.

### 4.2. Bemerkung

Durch

$$\lambda \mapsto p(\lambda) := a_n \lambda^n + a_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + a_1 \lambda + a_0$$

wird eine Abbildung  $f_p : K \rightarrow K$  definiert. Es gibt aber Beispiele ( $K = \mathbb{F}_2, p = X^2 + X$ ) in denen  $p \neq 0$  aber  $f_p = 0$ . Also sollte man zwischen dem Polynom  $p$  und der zugehörigen Funktion  $f_p$  unterscheiden.

### 4.3. Bemerkung

$$0 \cdot X^n = 0$$

### 4.4. Bemerkung

Durch

$$\left( \sum_{k=0}^n a_k X^k \right) + \left( \sum_{k=0}^n b_k X^k \right) := \sum_{k=0}^n (a_k + b_k) X^k$$

und

$$\left( \sum_{k=0}^n a_k X^k \right) \cdot \left( \sum_{l=0}^m b_l X^l \right) := \sum_{j=0}^{n+m} \left( \sum_{k+l=j} a_k \cdot b_l \right) X^j$$

wird  $K[X]$  zu einem kommutativen Ring. Das Einselement ist das konstante Polynom 1, das Nullelement ist das Nullpolynom 0.

**Beispiel**

$K = \mathbb{Q}$ .

$$(x^2 + x + 4) \cdot (x + 3) = x^3 + 4x^2 + 7x + 12$$

### 4.5. Bemerkung

Es gelten:

$$\begin{aligned} d(p \cdot q) &= d(p) + d(q) \\ l(p \cdot q) &= l(p) \cdot l(q) \\ d(p + q) &\leq \max\{d(p), d(q)\} \end{aligned}$$

#### 4.6. Lemma

$K[X]$  ist nullteilerfrei, d.h. aus  $p \cdot q = 0$  folgt  $p = 0$  oder  $q = 0$ .

**Beweis**

$$p \cdot q = 0 \implies -\infty = d(p \cdot q) = d(p) + d(q)$$

$$\implies d(p) = -\infty \text{ oder } d(q) = -\infty \implies p = 0 \text{ oder } q = 0$$

□

#### 4.7. Division mit Rest

Für  $f, g \in K[X], g \neq 0$  gibt es eine eindeutige Darstellung  $f = q \cdot g + r$  mit  $d(r) < d(g)$ .

**Beweis**

**Eindeutigkeit:** Sei  $f = q_0 g + r_0 = q_1 g + r_1, d(r_0), d(r_1) < d(g)$ .

$$\implies (q_0 - q_1)g = r_1 - r_0 \quad d(r_1 - r_0) < d(g)$$

Es folgt  $d(q_0 - q_1) = d(r_1 - r_0) = -\infty$ , da  $d(g) \neq 0$ . Also  $q_0 = q_1$  und  $r_1 = r_0$ .

**Existenz:** Per Induktion nach  $d(f)$ . Ist  $d(f) < d(g)$  so setze  $q = 0, r = f$ . Sei also  $f = aX^{n+k} + \dots, g = bX^n + \dots$  mit  $k \geq 0$ . Dann hat  $f - \frac{a}{b}X^k g$  einen kleineren Grad als  $f$  und es gibt per Induktion  $q_0, r_0$  mit  $d(r_0) < d(g)$  und

$$\left(f - \frac{a}{b}X^k g\right) = q_0 \cdot g + r_0$$

Dann

$$f = \underbrace{\left(q_0 + \frac{a}{b}X^k\right)}_{:=q} g + r_0$$

Also  $f = q \cdot g + r$ .

□

#### 4.8. Beispiel

schriftliche Division

$$(x^3 - 2x^2 - 4x + 8) = (x^2 + x - 2) \cdot (x - 3) + (x + 2)$$

#### 4.9. Korollar

Ist  $\alpha \in K$  eine **Nullstelle** von  $p \in K[X]$ , d.h.  $p(\alpha) = 0$ , so gilt

$$p = q \cdot (X - \alpha) \quad \text{mit } q \in K[X]$$

**Beweis**

Division mit Rest:  $p = q(X - \alpha) + r$  mit  $d(r) < 1$ , also  $r \in K$  konstant. Mit Einsetzen folgt

$$0 = p(\alpha) = q(\alpha) \cdot (\alpha - \alpha) + r = r$$

Beispiele:

- $\alpha = 2$  ist Nullstelle von  $x^3 - 2x^2 - 4x + 8 = (x + 2)(x - 2)^2$

$$(x^3 - 2x^2 - 4x + 8) : (x - 2) = x^2 - 4 = (x + 2)(x - 2)$$

- $\alpha = \sqrt{2}$  ist Nullstelle von  $x^3 + x^2 - 2x - 2 \in \mathbb{R}[K]$

#### 4.10. Bemerkung

Ein Körper  $K$  heißt **algebraisch abgeschlossen**, wenn jedes nicht konstante Polynom  $p \in K[X]$  eine Nullstelle in  $K$  hat. Es folgt dann, dass jedes Polynom ein Produkt von **Linearfaktoren**  $(x - \alpha_i)$  und einem konstanten Polynom ist:

$$p = l(p)(X - \alpha_1) \cdot \dots \cdot (X - \alpha_n)$$

wobei  $\alpha_i$  die Nullstellen von  $p$  (mit Vielfachheit!) sind. Man sagt  $p$  zerfällt in Linearfaktoren.

#### 4.11. Der Euklid'sche Algorithmus

Seien  $f_1, f_2 \in K[X]$ , beide ungleich 0, mit  $d(f_2) \leq d(f_1)$ . Wiederholte Division mit Rest liefert:

$$\begin{aligned} f_1 &= q_1 \cdot f_2 + f_3 & d(f_3) < d(f_2) \\ f_2 &= q_2 \cdot f_3 + f_4 & d(f_4) < d(f_3) \\ f_{n-1} &= q_{n-1} \cdot f_n \end{aligned}$$

Da  $d(f_i)$  fällt, muss irgendwann der Rest Null auftreten und der Algorithmus endet.

1)

$$\begin{aligned} 420 &= 33 \cdot 12 + 24 \\ 33 &= 24 \cdot 1 + 9 \\ 24 &= 9 \cdot 2 + 6 \\ 9 &= 6 \cdot 1 + 3 \\ 6 &= \boxed{3} \cdot 2 \end{aligned}$$

2)

$$\begin{aligned} x^3 - 2x^2 - 4x + 8 &= (x^2 + x - 2)(x - 3) + (x - 2) \\ x^2 + x - 2 &= \boxed{(x + 2)}(x - 1) \end{aligned}$$

#### 4.12. Definition

Sei  $R$  ein kommutativer Ring. Seien  $r, s \in R$ . Wir sagen  $r$  teilt  $s$  (in Zeichen:  $r \mid s$ ), wenn es  $q \in R$  gibt mit  $q \cdot r = s$ .

#### 4.13. Satz

Seien  $f_1, f_2$  und  $d := f_n$  wie in (4.11). Dann gelten:

- a)  $d \mid f_1$  und  $d \mid f_2$
- b) Gilt für  $g \in K[X]$   $g \mid f_1$  und  $g \mid f_2$ , so gilt auch  $g \mid d$
- c) Es gibt  $p_1, p_2 \in K[X]$  mit  $d = p_1 f_1 + p_2 f_2$



**Beweis**

- a) Es gilt  $d \mid f_k$ ,  $d \mid f_{k-1} \Rightarrow d \mid f_{k-2}$ . Induktiv folgt, (4.11) aufsteigend,  $d \mid f_1$  und  $d \mid f_2$
- b) Es gilt  $g \mid f_k$  und  $g \mid f_{k+1} \Rightarrow g \mid f_{k+2}$ . Induktiv folgt, (4.11) absteigend,  $g \mid f_n = d$
- c) Sei  $f_k = v_k f_1 + u_k f_2$  und  $f_{k+1} = v_{k+1} f_1 + u_{k+1} f_2$ . Dann folgt

$$\begin{aligned} f_{k+2} &= f_k - q_k f_{k+1} \\ &= v_k f_1 + u_k f_2 - q_k v_{k+1} f_1 - q_k u_{k+1} f_2 \\ &= (v_k - q_k v_{k+1}) f_1 + (u_k - q_k u_{k+1}) f_2 \end{aligned}$$

Induktiv, (4.11) absteigend, folgt die Behauptung:

$$\begin{aligned} d &= f_n = p_1 f_1 + p_2 f_2 \\ p_1 &= v_{n-2} - q_{n-2} v_{n-1} \\ p_2 &= u_{n-2} - q_{n-2} u_{n-1} \end{aligned}$$

□

**4.14. Bemerkung**

Wegen a) und b) nennen wir  $d$  einen **größten gemeinsamen Teiler**(ggT) von  $f_1$  und  $f_2$ . Er ist eindeutig bis auf Multiplikation mit einem konstanten Polynom ungleich 0.

**4.15. Definition**

Ein nichtkonstantes Polynom  $f$  heißt **irreduzibel**, wenn für jede Faktorisierung  $f = g \cdot h$  in  $K[X]$  gilt  $g$  oder  $h$  ist konstant.

*die konstanten Polynome sind die Einheiten des Polynomrings*

**4.16. Satz**

Sei  $f$  irreduzibel und es gelte  $f \mid g \cdot h$ . Dann gilt  $f \mid g$  oder  $f \mid h$ .

**Beweis**

Angenommen  $f \nmid g$ . Da  $f$  irreduzibel ist, ist dann 1 der ggT von  $f$  und  $g$ . Mit (4.13) c)  $\Rightarrow \exists p, q \in K[X]$  mit

$$1 = p \cdot f + q \cdot g$$

Dann  $1 \cdot h = h \cdot p \cdot f + h \cdot q \cdot g$ . Da  $f \mid h \cdot p \cdot f$  und  $f \mid h \cdot q \cdot g = q \cdot g \cdot h$  folgt  $f \mid h$ .

□

**4.17. Bemerkung**

In nullteilerfreien kommutativen Ringen heißen Elemente  $p \in R, p \neq 0, p \notin R^\times = \{v \in R \mid \exists v^{-1} \in R : 1 = v \cdot v^{-1}\}$  mit der Eigenschaft  $(p \mid a \cdot b \Rightarrow p \mid a \vee p \mid b)$  auch **prim**. ( $R^\times$  ist die Menge aller Einheiten auf  $R$ )  
 Wegen (4.16) sind irreduzible Polynome prim.

**4.18. Primfaktorzerlegung in  $K[X]$** 

Jedes nichtkonstante Polynom  $f$  besitzt eine bis auf die Reihenfolge der Faktoren eindeutige Produktzerlegung als

$$f = a \cdot p_1 \cdots p_k \quad a = l(f), l(p_i) = 1, p_1, \dots, p_k \text{ irreduzibel}$$

### Beweis

**Existenz:** Eine Produktzerlegung von  $f$  kann nicht mehr als  $d(f)$  nicht-konstante Faktoren haben. In einer Zerlegung mit maximaler Faktorzahl sind daher alle nichtkonstanten Faktoren irreduzibel. Durch Multiplikation geeigneter Konstanten erreichen wir, dass sie alle normiert sind.

**Eindeutigkeit** Seien  $f = a \cdot p_1 \cdot \dots \cdot p_k = a \cdot q_1 \cdot \dots \cdot q_l$  zwei solche Zerlegungen. Da  $p_1 \mid f$  folgt mit (4.13), dass es ein  $j$  gibt mit  $p_1 \mid q_j$ . Da  $q_j$  irreduzibel ist und  $p_1$  und  $q_j$  normiert sind, folgt  $p_1 = q_j$ . Die Eindeutigkeit folgt nun per Induktion.  $\square$

### 4.19. Definition

Sei  $f \in \text{End}_K(V)$  und

$$p = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + \dots + a_0 = \sum_{k=0}^n a_k X^k \in K[X]$$

Dann setzen wir

$$p(f) := a_n f^n + a_{n-1} f^{n-1} + \dots + a_1 f + a_0 \text{id}_V = \sum_{k=0}^n a_k f^k \in \text{End}_K(V)$$

### 4.20. Bemerkung

$$\begin{aligned} (p+q)(f) &= p(f) + q(f) \\ (p \cdot q)(f) &= p(f) \cdot q(f) \\ (c)(f) &= c \cdot \text{id}_V \quad c \in K[X] \text{ konstant} \end{aligned}$$

### 4.21. Definition

Sei  $R$  ein Ring.

$$\begin{aligned} R[X] &:= \left\{ \sum_{k=0}^n r_k X^k \mid n \in \mathbb{N}, r_0, \dots, r_n \in R \right\} \\ R[[X]] &:= \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} r_k X^k \mid r_0, \dots, r_n \in R \right\} \\ R[X, X^{-1}] &:= \left\{ \sum_{k=-m}^n r_k X^k \mid n, m \in \mathbb{N}, r_{-m}, r_{-m+1}, \dots, r_n \in R \right\} \\ R[[X]][X^{-1}] &:= \left\{ \sum_{k=-m}^{\infty} r_k X^k \mid m \in \mathbb{N}, r_{-m}, r_{-m+1}, \dots, r_n \in R \right\} \end{aligned}$$

werden durch die Multiplikation und Addition aus (4.4) zu Ringen.

$R[X]$	Polynomring über $R$
$R[[X]]$	Ring der formalen Potenzreihen
$R[X, X^{-1}]$	Ring der Laurent-Polynome
$R[[X]][X^{-1}]$	Ring der formalen Laurent-Reihen

#### 4.22. Bemerkung

$$\left\{ \sum_{k=-\infty}^{\infty} r_k x^k \mid r_k \in R \text{ für } k \in \mathbb{Z} \right\}$$

wird nicht durch (4.4) zu einem Ring. Die Multiplikation aus (4.4) ist nicht sinnvoll.

## 5. Normalformen

### 5.1. Erinnerung

Matrizen  $A_1, A_2 \in K^{n \times n}$  heißen ähnlich (bzw. konjugiert), wenn es  $S \in GL(n, K)$  gibt mit  $A_1 = SA_2S^{-1}$ . Endomorphismen  $f_1, f_2 \in \text{End}(V)$  heißen konjugiert, wenn es  $\varphi \in GL(V)$  gibt mit  $f_1 = \varphi f_2 \varphi^{-1}$ .

Sind  $B_1$  und  $B_2$  zwei endliche Basen von  $V$ , so sind  $f_1$  und  $f_2$  genau dann konjugiert, wenn  $A_1 := m_{B_1}^{B_1}(f_1)$  und  $A_2 := m_{B_2}^{B_2}(f_2)$  konjugiert sind. Insbesondere sind  $m_{B_1}^{B_1}(f_1)$  und  $m_{B_2}^{B_2}(f_2)$  konjugiert.

### 5.2. Normalformenproblem

Für Matrizen bezüglich Konjugation:

- (1) Bestimmung aller Äquivalenzklassen bezüglich Konjugation (=Konjugationsklassen) auf  $\mathbb{K}^{n \times n}$ .
- (2) Bestimmung eines ausgezeichneten (möglichst einfachen) Elements in jeder Konjugationsklasse. Ein solches Element nennen wir dann die **Normalform** für die Konjugationsklasse.
- (3) Bestimmung von **Invarianten** für Konjugationsklassen.

(im Bezug auf die Äquivalenz von Matrizen ist dies recht simpel)

### 5.3. Beispiel

- i)  $\det : K^{n \times n} \rightarrow K$  und  $\text{Sp} : K^{n \times n} \rightarrow K$  und  $\text{rg} : K^{n \times n} \rightarrow \mathbb{N}$  sind Invarianten für Konjugationsklassen: Sind  $A$  und  $B$  konjugiert, so gilt  $\det A = \det B$  und  $\text{Sp } A = \text{Sp } B$ .
- ii) Die Menge der Eigenwerte ist ebenfalls invariant unter Konjugation: Ist  $A_1$  konjugiert zu  $A_2$ , so gilt

$$\{\lambda \mid \lambda \text{ ist Eigenwert zu } A_1\} = \{\lambda \mid \lambda \text{ ist Eigenwert zu } A_2\}$$

### 5.4. Bemerkung

Die Invarianten aus (5.3) sind nicht stark genug, um alle Konjugationsklassen zu unterscheiden:  $0 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$  und  $N = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$  sind nicht konjugiert, obwohl  $\text{Sp } 0 = \text{Sp } N = 0$ ,  $\det 0 = \det N = 0$  und sowohl  $0$  als auch  $N$  nur  $0$  als Eigenwert haben. (Aber:  $\text{rg } 0 = 0 \neq 1 = \text{rg } N$ )

### 5.5. Konjugationsklassen in $\mathbb{C}^{2 \times 2}$

Sei  $A \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$ . Da  $\mathbb{C}$  algebraisch abgeschlossen ist, besitzt  $A$  mindestens einen Eigenwert  $\lambda$ . Wir unterscheiden zwei Fälle:

- 1)  $A$  besitzt zwei verschiedene Eigenwerte  $\lambda \neq \mu$ . Dann ist  $A$  diagonalisierbar und damit konjugiert zu  $\begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix}$ . In diesem Fall bestimmt die Menge der Eigenwerte die Konjugationsklasse von  $A$ .
- 2)  $A$  besitzt nur  $\lambda$  als Eigenwert: Ergänze einen Eigenvektor  $v$  zu einer Basis  $B = (v, w)$  von  $\mathbb{C}^{2 \times 2}$ . Dann ist  $A$  konjugiert zu  $A' := m_B^B(A) = \begin{pmatrix} \lambda & \alpha \\ 0 & \beta \end{pmatrix}$ . Da  $\beta$  eine Nullstelle des charakteristischen Polynoms ist, ist  $\beta$  ein Eigenwert. Also  $\beta = \lambda$ . Also auch  $A' = \begin{pmatrix} \lambda & \alpha \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$ .

Es ergeben sich zwei Unterfälle:

- a)  $\alpha = 0$ . Dann  $A' = \begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix} = \lambda \cdot I_2$ . Da  $\lambda \cdot I_2 = S(\lambda \cdot I_2)S^{-1}$  für alle  $S \in GL(2, \mathbb{C})$  folgt  $A = \lambda \cdot I_2$  und die Konjugationsklasse von  $A$  besteht genau aus  $A$ .

b)  $\alpha \neq 0$ . Ist  $\lambda \neq 0$ , so sei  $w' = w - \frac{\alpha}{\lambda}v$ . Ist  $\lambda = 0$ , so sei  $w' = \frac{w}{\alpha}$ . Mit  $B' = (v, w')$  gilt:

$$m_{B'}^{B'}(A) = \begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$$

Also ist  $A$  konjugiert zu  $\begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$ .

## 5.6. Bemerkung

Man kann (5.5) so zusammenfassen:  $A, B \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$  sind genau dann konjugiert wenn:

- (i) Eigenwert  $A$  = Eigenwert  $B$
- (ii)  $A$  ist genau dann diagonalisierbar, wenn  $B$  diagonalisierbar ist.

Die Matrizen  $\begin{pmatrix} \lambda & 0 \\ 0 & \mu \end{pmatrix}$  und  $\begin{pmatrix} \lambda & 1 \\ 0 & \lambda \end{pmatrix}$  mit  $\lambda, \mu \in \mathbb{C}$  sind die Normalformen für Konjugationsklassen in  $\mathbb{C}^{2 \times 2}$ . Im ersten Fall ist diese Normalform für  $\lambda \neq \mu$  nicht ganz eindeutig da  $\begin{pmatrix} \lambda & \\ & \mu \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} \mu & \\ & \lambda \end{pmatrix}$

## 5.7. Beispiel

$$\begin{aligned} \det \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} &= 1 = \det \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{Sp} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} &= 2 = \text{Sp} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{rg} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} &= 2 = \text{rg} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \\ \text{EW von } \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} &= \{1\} = \text{EW von } \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Aber  $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  und  $\begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$  sind nicht konjugiert. (warum?)

## 6. Charakteristisches Polynom

### 6.1. Bemerkung

Die Determinante  $\det : K^{n \times n} \rightarrow K$  lässt sich durch dieselbe Formel wie über einen Körper auch für Matrizen über einen kommutativen Ring erklären:  $\det_R R^{n \times n} \rightarrow R$ . Es gilt:

$$(i) \det_R(I_n) = 1$$

$$(ii) \det_R(A \cdot B) = \det_R A \cdot \det_R B$$

$$(iii) A \in R^{n \times n} \text{ ist invertierbar} \iff \det_R A \in R \text{ ist invertierbar.}$$

analog:  $\det A$  ist eine  
Einheit

### 6.2. Definition

Sei  $A \in K^{n \times n}$ . Dann ist  $(X \cdot I_n - A) \in K[X]^{n \times n}$ . Das Polynom

$$\chi_A := \det_{K[X]}(X \cdot I_n - A) \in K[X]$$

heißt das **charakteristische Polynom** von  $A$ .  $\chi_A$  ist ein normiertes Polynom vom Grad  $n$ .

### 6.3. Bemerkung

Es gilt für  $\lambda \in K$

$$\chi_A(\lambda) = \det_K(\lambda \cdot I_n - A) \in K$$

Insbesondere gilt: Die Eigenwerte von  $A$  sind genau die Nullstellen von  $\chi_A$ .

### 6.4. Bemerkung

Sei  $A \in K^{n \times n}$ ,  $S \in GL(n, K)$ . Die charakteristischen Polynome konjugierter Matrizen stimmen überein:

$$\begin{aligned} \chi_{SAS^{-1}} &= \det_{K[X]}(X \cdot I_n - SAS^{-1}) = \det_{K[X]}(SXI_nS^{-1} - SAS^{-1}) = \det_{K[X]}(S \cdot (X \cdot I_n - A)S^{-1}) \\ &= \det_K S \cdot \det_{K[X]}(X \cdot I_n - A) \cdot \det_K S^{-1} \\ &= \det_{K[X]}(X \cdot I_n - A) = \chi_A \end{aligned}$$

### 6.5. Definition

Sei  $V$  ein endlich dimensionaler Vektorraum. Sei  $f \in \text{End}(V)$  und  $B$  eine Basis von  $V$ . Dann hängt  $\chi_f := \chi_{m_B^B(f)}$  nur von  $f$  und nicht von der Wahl von  $B$  ab und heißt das charakteristische Polynom von  $f$ .

### 6.6. Bemerkung

Die Nullstellen von  $\chi_f$  sind genau die Eigenwerte von  $f$ .

## 6.7. Bemerkung

Ist  $A = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ , so

$$\chi_A = \det_{K[X]} \begin{pmatrix} (x - \lambda_1) & & \\ & (x - \lambda_2) & \\ & & (x - \lambda_n) \end{pmatrix} = (x - \lambda_1) \cdot \dots \cdot (x - \lambda_n)$$

Insbesondere zerfällt  $\chi_A$  in Linearfaktoren. Es gilt: Die Dimension von  $V(\lambda) = \{v \in K^n \mid A \cdot v = \lambda \cdot v\}$  (Eigenraum zum Eigenwert  $\lambda$ ) ist genau die Vielfachheit von  $(x - \lambda)$  in  $\chi_A$ .

## 6.8. Satz

Sei  $A \in K^{n \times n}$ . Dann sind äquivalent:

- (1)  $A$  ist diagonalisierbar.
- (2)  $\chi_A = (x - \lambda_1)^{n_1} \dots (x - \lambda_k)^{n_k}$ ,  $\lambda_i \neq \lambda_j$  für  $i \neq j$ , zerfällt in Linearfaktoren und es gilt:  $\dim V(\lambda_i) = n_i$  für  $i = 1, \dots, k$ .

### Beweis

(1)  $\Rightarrow$  (2) folgt aus (6.7) und (6.4)

(2)  $\Rightarrow$  (1) <sup>4</sup> Es ist  $n = \text{Grad } \chi_A = \sum_{i=1}^k n_i$ . Es ist immer  $V(\lambda_1) + \dots + V(\lambda_k) = V(\lambda_1) \oplus \dots \oplus V(\lambda_k)$ . Also  $\dim(V(\lambda_1) \oplus \dots \oplus V(\lambda_k)) = \sum_{i=1}^k n_i = n = \dim V$ . Es folgt

$$V = V(\lambda_1) \oplus \dots \oplus V(\lambda_k) \quad \square$$

## 6.9. Beispiel

Sei  $A = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ * & \lambda_n \end{pmatrix}$  eine untere Dreiecksmatrix. Dann ist  $\chi_A = (x - \lambda_1) \cdot \dots \cdot (x - \lambda_n)$ .

## 6.10. Satz

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim(V) < \infty$ . Dann sind äquivalent:

- (1)  $\chi_f$  zerfällt in Linearfaktoren
- (2) Es existiert eine Basis  $B$ , so dass  $m_B^B(f)$  eine untere Dreiecksmatrix ist.

### Beweis

(2)  $\Rightarrow$  (1) siehe (6.9)

(1)  $\Rightarrow$  (2) Sei  $\chi_f = (x - \lambda_1) \dots (x - \lambda_n)$ . Sei  $b$  ein Eigenvektor zum Eigenwert  $\lambda_1$ . Dann ist  $U := \langle b \rangle$   $f$ -invariant. Sei  $F : V/U \rightarrow V/U$  von  $f$  induziert. Dann zerfällt auch  $\chi_F$  als Faktor von  $\chi_f$  auch in Linearfaktoren. Per Induktion nach  $\dim V$  gibt es eine Basis  $\bar{B} = (b_1 + U, \dots, b_{n-1} + U)$  von  $V/U$ , so dass  $m_{\bar{B}}^{\bar{B}}(F)$  eine untere Dreiecksmatrix ist. Dann ist  $B = (b_1, \dots, b_{n-1}, b)$  die gesuchte Basis:

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} m_{\bar{B}}^{\bar{B}}(F) & 0 \\ * & \lambda \end{pmatrix} \quad \square$$

<sup>4</sup> Wiederholung LA I:  $\text{End}(V) \ni f$  diagonalisierbar  $\Leftrightarrow \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V(\lambda) = V$

### 6.11. Satz

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim(V) < \infty$ . Sei  $U$  ein  $f$ -invarianter Unterraum von  $V$ . Sei  $f|_U : U \rightarrow U$  die Einschränkung von  $f$  auf  $U$  und  $F : V/U \rightarrow V/U$  durch  $f$  induziert. Dann gilt:

$$\chi_f = \chi_{f|_U} \cdot \chi_F$$

#### Beweis

Wir ergänzen eine Basis  $B_0 = (b_1, \dots, b_k)$  von  $U$  zu einer Basis  $B = (b_1, \dots, b_k, b_{k+1}, \dots, b_n)$  von  $V$ . Dann

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} m_{B_0}^{B_0}(f|_U) & * \\ 0 & m_{B_1}^{B_1}(F) \end{pmatrix}$$

wobei  $B_1 = (b_{k+1} + U, \dots, b_n + U)$  die von  $b_{k+1}, \dots, b_n$  induzierte Basis von  $V/U$  ist. Es folgt

$$\begin{aligned} \chi_f &= \det(X \cdot I_n - m_B^B(f)) = \det \begin{pmatrix} X \cdot I_k - m_{B_0}^{B_0}(f|_U) & -* \\ 0 & X \cdot I_{n-k} - m_{B_1}^{B_1}(F) \end{pmatrix} \\ &= \det_{K[X]}(X \cdot I_k - m_{B_0}^{B_0}(f|_U)) \cdot \det_{K[X]}(X \cdot I_{n-k} - m_{B_1}^{B_1}(F)) \\ &= \chi_{f|_U} \cdot \chi_F \end{aligned} \quad \square$$

### 6.12. Lemma

Sei  $f \in \text{End}(V)$  und  $v \in V$ . Dann ist der Unterraum  $L(v, f) := \langle v, f(v), f^2(v), \dots \rangle$   $f$ -invariant.

#### Beweis

Für  $w = \sum_{i=0}^n \lambda_i f^i(v) \in L(v, f)$  ist

$$f(w) = f\left(\sum_{i=0}^n \lambda_i f^i(v)\right) = \sum_{i=0}^n \lambda_i f^{i+1}(v) \in L(v, f) \quad \square$$

### 6.13. Definition

$f \in \text{End}(V)$  heißt **zyklisch**, falls es  $v \in V$  gibt mit  $V = L(v, f)$ .

### 6.14. Lemma

Sei  $f \in \text{End}(V)$  und  $v \in V$ . Sei  $n = \dim L(v, f) < \infty$ . Dann gilt:

- (1)  $B = (v, f(v), \dots, f^{n-1}(v))$  ist eine Basis von  $L(v, f)$ .
- (2) Ist  $f^n(v) = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i f^i(v)$ , so ist

$$m_B^B(f|_{L(v,f)}) = \begin{pmatrix} 0 & & & \lambda_0 \\ 1 & \ddots & & \lambda_1 \\ & \ddots & 0 & \vdots \\ & & 1 & \lambda_{n-1} \end{pmatrix}$$

$$\text{und } \chi_f = X^n - \lambda_{n-1}X^{n-1} - \dots - \lambda_1X - \lambda_0$$



**Beweis**

- (1) Sei  $k$  minimal mit  $f^k(v) \in \langle v, \dots, f^{k-1}(v) \rangle =: U$ . Dann ist  $U$   $f$ -invariant und daher  $f^l(v) \in U$  für alle  $l$ . Also  $L(v, f) = U$ . Da  $k$  minimal ist, ist  $v, f^1, \dots, f^{k-1}$  linear unabhängig. Es folgt  $k = n$  und die Behauptung.  $\square$
- (2) Die behauptete Gestalt von  $m_B^B(f|_{L(v, f)})$  folgt direkt aus der Definition. Die Formel für  $\chi_f$  folgt mit der Entwicklung der ersten Spalte und Induktion.  $\square$

**6.15. Definition**

Ein Endomorphismus  $f \in \text{End}(V)$  heißt **nilpotent**, wenn es  $N \in \mathbb{N}$  gibt mit  $f^N = 0$

**6.16. Bemerkung**

Ist in (6.14)(2)  $V = L(v, f)$  und  $f^n(v) = 0$ , dann ist  $f$  nilpotent (mit  $n = N$ ) und  $\chi_f = x^n$

**Beispiel**

$$A \in K^{n \times n} \quad A^N = 0$$

$$(1) \quad A = 0 \quad N = 1 \quad \checkmark$$

(2)

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ * & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ * & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & & & 0 \\ 0 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & \\ * & & 0 & 0 \end{pmatrix} \rightsquigarrow \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ * & 0 \end{pmatrix}^n = 0$$

untere (bzw. obere) Dreiecksmatrizen mit 0 auf der Diagonalen sind nilpotent.

(3)  $A$  nilpotent,  $S \in GL(n, k)$  und  $A^N = 0$ . Dann

$$(SAS^{-1})^N = SAS^{-1} \cdot SAS^{-1} \cdot \dots \cdot SAS^{-1} = SA^N S^{-1} = 0$$

**6.17. Definition**

Sei  $f \in \text{End}(V)$  nilpotent. Das kleinste  $k \in \mathbb{N}$  mit  $f^k(v) = 0$  heißt die **Stufe** von  $v$  bezüglich  $f$ .

**6.18. Lemma**

Sei  $f \in \text{End}(V)$  nilpotent und  $v \in V$  von maximaler Stufe bezüglich  $f$ . Ist  $V \neq L(v, f)$  so gibt es  $u \in V \setminus L(v, f)$  mit  $f(u) = 0$ .

**Beweis**

Sei  $x \in V \setminus L(v, f)$ . Da  $f$  nilpotent ist, gibt es ein minimales  $k$  mit  $f^k(x) \in L(v, f)$ . Indem wir  $x$  durch  $f^{k-1}(x)$  ersetzen, erhalten wir  $x \in V \setminus L(v, f)$  mit  $f(x) \in L(v, f)$ . Da  $L(v, f) = \langle v, f(v), f^2(v), \dots \rangle$  gibt es  $\lambda \in K$  und  $y \in L(v, f)$  mit  $f(x) = \lambda v + f(y)$ . Es folgt  $f^k(x) = \lambda f^{k-1}(v) + f^k(y)$ .

Sei nun  $k$  die Stufe von  $v$ . Da  $k$  die maximale Stufe ist, folgt  $f^k(x) = 0 = f^k(y)$ . Es folgt  $\lambda f^{k-1}(v) = 0$ . Da  $k$  die Stufe von  $v$  ist, ist  $f^{k-1}(v) \neq 0$ . Also  $\lambda = 0$ . Es folgt  $f(x) = f(y)$ , also  $u = x - y \in \text{Kern } f$ . Da  $x \notin L(v, f)$ ,  $y \in L(v, f)$  folgt  $u = x - y \notin L(v, f)$ .  $\square$

**6.19. Satz**

Sei  $\dim V < \infty$ ,  $f \in \text{End}(V)$  nilpotent. Sei  $v \in V$  von maximaler Stufe bezüglich  $f$ . Dann besitzt  $L(v, f)$  ein  $f$ -invariantes Komplement.

### Beweis

Sei  $U$  ein maximaler  $f$ -invarianter Unterraum von  $V$  mit  $U \cap L(v, f) = \{0\}$ . Sei  $F \in \text{End}(V/U)$  mit  $F(v+U) = f(v)+U$ . Dann ist  $\bar{v} := v+U$  ein Vektor maximaler Stufe bezüglich  $F$ .

Annahme:  $L(\bar{v}, F) \subsetneq V/U$ . Dann gibt es nach (6.18)  $\bar{u} \in V/U$  mit  $\bar{u} \in V/U \setminus L(\bar{v}, F)$  mit  $F(\bar{u}) = 0$ . Sei  $u \in V$  mit  $\bar{u} = u+U$ . Dann  $f(u) \in U$ , da  $F(\bar{u}) = 0$ . Insbesondere ist  $U^+ := \langle U, u \rangle$   $f$ -invariant.

Wegen  $\bar{u} \in V/U \setminus L(\bar{v}, F)$  und  $U \cap L(v, f) = 0$  ist auch  $U^+ \cap L(v, f) = 0$  (Denn:  $\lambda u + \tilde{u} \in L(v, f)$ ,  $\lambda \in K, \tilde{u} \in U$ )

$$\Rightarrow \lambda u \in L(\bar{v}, F) \Rightarrow \lambda = 0 \rightarrow \tilde{u} \in L(v, f) \cap U = 0$$

↯ zur Maximalität von  $U$ . Es folgt  $L(\bar{v}, F) = V/U(\star)$ .

Wir müssen nur zeigen:  $V = U + L(v, f)$

Sei nun  $w \in V$ . Wegen  $(\star)$  gibt es  $\lambda_0, \dots, \lambda_n \in K$  mit

$$\begin{aligned} w + U &= (\lambda_0 v + U) + (\lambda_1 f(v) + U) + \dots + (\lambda_n f^n(v) + U) \\ &= \underbrace{(\lambda_0 v + \lambda_1 f(v) + \dots + \lambda_n f^n(v))}_{=: x \in L(v, f)} + U \end{aligned}$$

Aus  $w + U = x + U$  folgt  $w - x \in U$ . Also  $w = (w - x) + x \in U + L(v, f)$ . □

### 6.20. Satz

Sei  $f \in \text{End}(V)$  nilpotent und  $\dim V < \infty$ . Dann gibt es eine Zerlegung  $V = V_1 \oplus \dots \oplus V_r$  in  $f$ -invariante zyklische Unterräume  $V_i = L(v_i, f)$ .

### Beweis

Induktion nach  $\dim V$ . Induktionsschritt: (6.19) □

### 6.21. Lemma

Sei  $f \in \text{End}(V)$  nilpotent und  $\dim V = n$ . Dann gilt  $f^n = 0$ .

### Beweis

Sei  $N$  minimal mit  $f^N = 0$ . Betrachte

$$0 = \text{Kern } f^0 \subseteq \text{Kern } f^1 \subseteq \text{Kern } f^2 \subseteq \dots \subseteq \text{Kern } f^N = V$$

Wegen der Minimalität von  $N$  ist  $\text{Kern } f^{N-1} \subsetneq \text{Kern } f^N$ .

Angenommen:  $\text{Kern } f^i = \text{Kern } f^{i+1}$ . Dann folgt auch  $\text{Kern } f^{i+1} = \text{Kern } f^{i+2}$ : Sei  $v \in \text{Kern } f^{i+2} \Rightarrow f(v) \in \text{Kern } f^{i+1} = \text{Kern } f^i$ . Also

$$f^{i+1}(v) = f^i(f(v)) = 0 \Rightarrow v \in \text{Kern } f^{i+1}$$

Da  $\text{Kern } f^{N-1} \subsetneq \text{Kern } f^N$  folgt:

$$0 = \text{Kern } f^0 \subsetneq \text{Kern } f^1 \subsetneq \text{Kern } f^2 \subsetneq \dots \subsetneq \text{Kern } f^N = V$$

Es folgt  $0 < \dim \text{Kern } f < \dim \text{Kern } f^2 < \dots < \dim \text{Kern } f^N = \dim V = n$ . Daher  $N \leq n$ . □

**6.21.1. Bemerkung**

- i) Sei  $f \in \text{End}(V)$  nilpotent und zyklisch mit  $V = L(v, f)$  und  $\dim V = n$ . Für die Basis  $B = (v, f(v), \dots, f^{n-1}(v))$  gilt dann

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} 0 & & & \\ 1 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

- ii) Sei  $f \in \text{End}(V)$  nilpotent,  $\dim V < \infty$ . Mit (6.20) folgt:  $\exists$  Basis  $B$  mit

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} 0 & & \\ 1 & \diagdown & \\ & 1 & 0 \end{matrix}} & & \\ & \diagdown & \\ & & \boxed{\begin{matrix} 0 & & \\ 1 & \diagdown & \\ & 1 & 0 \end{matrix}} \end{pmatrix}$$

Die Kästen heißen **Jordankästen**. Sie entsprechen genau den  $V_i$  aus (6.20).

**6.22. Definition**

Eine Matrix  $A = (a_{ij}) \in K^{n \times n}$  heißt eine **strikte obere Dreiecksmatrix**, wenn  $a_{ij} = 0$  für  $i \leq j$ .

$\leq^a !!!$

**6.23. Bemerkung**

Ist  $A \in K^{n \times n}$  eine strikte obere Dreiecksmatrix, so gilt  $A^n = 0$

(siehe auch 6.16 Beispiel)

**6.24. Satz**

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V = n < \infty$ . Dann sind äquivalent:

- (1)  $f$  ist nilpotent
- (2)  $\exists$  Basis  $B$ , so dass  $m_B^B(f)$  eine strikte untere Dreiecksmatrix ist.
- (3)  $\chi_f = X^n$

**Beweis**

(1) $\Rightarrow$ (2): (6.21.1) ii))

(2) $\Rightarrow$ (1): (6.23)

(2) $\Rightarrow$ (3): Sei  $m_B^B(f)$  eine strikte untere Dreiecksmatrix. Dann  $\chi_f = \det_{K[X]}(X \cdot I_n - m_B^B(f)) = X^n$

(3) $\Rightarrow$ (2): Ist  $\chi_f = X^n$ , so zerfällt  $\chi_f$  insbesondere in Linearfaktoren. Nach (6.10) gibt es eine Basis  $B$  so dass  $m_B^B(f) = \begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 \\ * & \lambda_n \end{pmatrix}$  eine untere Dreiecksmatrix ist. Es ist

$$X^n = \chi_f = \chi_{m_B^B(f)} = \det_{K[X]} \begin{pmatrix} x - \lambda_1 & & 0 \\ & \diagdown & \\ -* & & x - \lambda_n \end{pmatrix} = (x - \lambda_1) \dots (x - \lambda_n)$$

Also ist  $\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_n = 0$

□

Abbildung 7: Beispiel eines nilpotenten Endomorphismus

$$\begin{pmatrix} \overset{x}{0} & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & & & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & & & & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & & & & & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & & & & & & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & & & & & & & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & & & & & & & & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & & & & & & & & & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} & \overset{x}{0} \\ & & & & & & & & & & \overset{x}{1} & \overset{x}{0} \\ & & & & & & & & & & & \overset{x}{1} \\ & & & & & & & & & & & & \overset{x}{0} \\ & & & & & & & & & & & & & \overset{x}{0} \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \text{Kern } f &= \text{Eigenraum zum Eigenwert } 0 \\ &= \langle \textcolor{red}{xxxxx} \rangle \\ \text{Kern } f^2 &= \langle \textcolor{green}{xxxx} \textcolor{red}{xxxx} \rangle \\ \text{Kern } f^3 &= \langle \textcolor{blue}{xxx} \textcolor{green}{xxx} \textcolor{red}{xxxxxx} \rangle \\ \text{Kern } f^4 &= \langle \textcolor{blue}{xx} \textcolor{green}{xxx} \textcolor{red}{xxxxxxxx} \rangle \end{aligned}$$

## 7. Die Jordansche Normalform

### 7.1. Bemerkung

Sei  $f \in \text{End}(V)$  und  $\lambda \in K$  ein Eigenwert von  $f$ . Für  $t \in \mathbb{N}$  sei  $V^t(\lambda) := \text{Kern}(f - \lambda \text{id})^t$ . Dann ist

$$0 = V^0(\lambda) \subseteq V^1(\lambda) \subseteq V^2(\lambda) \subseteq V^3(\lambda) \subseteq \dots$$

$$W_\lambda := \bigcup_{t=0}^{\infty} V^t(\lambda)$$

heißt der **verallgemeinerte Eigenraum** von  $f$  zum Eigenwert  $\lambda$ . Ist  $\dim V < \infty$ , so gibt es ein minimales  $k \geq 1$  mit  $V^l(\lambda) = V^k(\lambda)$  für alle  $l \geq k$ . Dann  $W_\lambda = V^k(\lambda)$ .

### 7.2. Lemma

$W_\lambda$  ist  $f$ -invariant.  $\lambda$  ist der einzige Eigenwert von  $f|_{W_\lambda}$

#### Beweis

Da  $(f - \lambda) \circ f = f \circ (f - \lambda)$  ist auch  $(f - \lambda)^t \circ f = f \circ (f - \lambda)^t$ . Ist  $v \in V^t(\lambda)$ , so ist

$$(f - \lambda)^t(f(v)) = f(\underbrace{(f - \lambda)^t(v)}_{=0 \text{ da } v \in V^t(\lambda)}) = 0 \implies f(v) \in V^t(\lambda)$$

Es sind also sogar alle  $V^t(\lambda)$   $f$ -invariant. Sei nun  $\mu$  ein Eigenwert von  $f|_{W_\lambda}$ , also  $f(w) = \mu \cdot w$  mit  $w \in W_\lambda, w \neq 0$ . Dann  $(f - \lambda)(w) = (\mu - \lambda) \cdot w$  und damit  $(f - \lambda)^t(w) = (\mu - \lambda)^t \cdot w$ . Da  $w \in W_\lambda$  gibt es  $k$  mit  $(f - \lambda)^k(w) = 0$ . Es folgt

$$0 = (\mu - \lambda)^k(w) \stackrel{w \neq 0}{\implies} (\mu - \lambda)^k = 0 \implies \mu - \lambda = 0 \implies \mu = \lambda$$

□

### 7.3. Satz

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ ,  $\lambda$  ein Eigenwert von  $f$ . Sei  $f_\lambda := f|_{W_\lambda}$ . Dann existiert eine Basis  $B$  von  $W_\lambda$  mit

$$m_B^B(f_\lambda) = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{smallmatrix} \lambda & & \\ 1 & \diagdown & \\ & 1 & \end{smallmatrix}} & & \\ & \diagdown & \\ & & \boxed{\begin{smallmatrix} \lambda & & \\ 1 & \diagdown & \\ & 1 & \end{smallmatrix}} \end{pmatrix}$$

#### Beweis

$g := (f_\lambda - \lambda)$  ist auf  $W_\lambda$  nilpotent, da  $W_\lambda = \text{Kern}(f - \lambda)^k$  für ein geeignet großes  $k$ . Nach (6.21.1) (i) gibt es eine Basis  $B$ , so dass  $m_B^B(g)$  die obige Form mit  $\lambda = 0$  hat. Nun ist  $m_B^B(f_\lambda) = m_B^B(g + \lambda) = m_B^B(g) + m_B^B(\lambda) = m_B^B(g) + \lambda \cdot I_n$  mit  $n = \dim W_\lambda$ . Also

$$m_B^B(f_\lambda) = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{smallmatrix} 0 & & \\ 1 & \diagdown & \\ & 1 & \end{smallmatrix}} & & \\ & \diagdown & \\ & & \boxed{\begin{smallmatrix} 0 & & \\ 1 & \diagdown & \\ & 1 & \end{smallmatrix}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \lambda & & \\ & \diagdown & \\ & & \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{smallmatrix} \lambda & & \\ 1 & \diagdown & \\ & 1 & \end{smallmatrix}} & & \\ & \diagdown & \\ & & \boxed{\begin{smallmatrix} \lambda & & \\ 1 & \diagdown & \\ & 1 & \end{smallmatrix}} \end{pmatrix} \quad \square$$

### 7.4. Lemma

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ . Sei  $\lambda$  ein Eigenwert von  $f$ . Dann teilt  $(X - \lambda)^k$  genau dann das charakteristische Polynom  $\chi_f$ , wenn  $k \leq \dim W_\lambda$ .

#### Beweis

Sei  $F : V/W_\lambda \rightarrow V/W_\lambda$  von  $f$  induziert. Nach (6.11) gilt:  $\chi_f = \chi_{f|_{W_\lambda}} \cdot \chi_F$ . Wegen (7.3) ist  $\chi_{f|_{W_\lambda}} = (X - \lambda)^n$  mit  $n = \dim W_\lambda$ . Insbesondere gilt  $\chi_f = (X - \lambda)^n \cdot \chi_F$ .

Es bleibt zu zeigen:  $(X - \lambda) \nmid \chi_F$ , also  $\chi_F(\lambda) \neq 0$ . Angenommen doch:  $\chi_F(\lambda) = 0$ . Dann ist  $\lambda$  Eigenwert von  $F$ . Sei  $\bar{v} = v + W_\lambda \in V/W_\lambda$  ein zugehöriger Eigenvektor. Also  $f(v) + W_\lambda = F(\bar{v}) = \lambda \bar{v} = \lambda v + W_\lambda$ . Also auch  $w := f(v) - \lambda v \in W_\lambda$ . Sei nun  $k \in \mathbb{N}$  mit  $(f - \lambda)^k(w') = 0 \forall w' \in W_\lambda$ . Insbesondere  $(f - \lambda)^k(w) = 0$ . Dann ist

$$(f - \lambda \text{id})^{k+1}(v) = (f - \lambda \text{id})^k(w) = 0 \quad \text{also } v \in W_\lambda$$

Es folgt  $\bar{v} = v + W_\lambda = 0 \notin W_\lambda$  zu  $\bar{v}$  ist Eigenvektor (also  $\neq 0$ ) □

### 7.5. Lemma

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ . Sei  $\Lambda$  die Menge der Eigenwerte von  $f$ . Für alle  $\lambda \in \Lambda$  gilt dann:

$$W_\lambda \cap \sum_{\substack{\mu \in \Lambda \\ \mu \neq \lambda}} W_\mu = 0$$

### Beweis

Wähle  $n_\mu$  mit  $W_\mu = \text{Kern}(f - \mu)^{n_\mu}$ . Da  $(X - \lambda)^{n_\lambda}$  und  $\prod_{\mu \neq \lambda, \mu \in \Lambda} (X - \mu)^{n_\mu}$  teilerfremd sind, gibt es Polynome  $p_1, p_2 \in K[X]$  mit

$$1 = p_1 \cdot (X - \lambda)^{n_\lambda} + p_2 \prod_{\substack{\mu \neq \lambda \\ \mu \in \Lambda}} (X - \mu)^{n_\mu}$$

Es folgt (durch Einsetzen von  $f$ ).

$$\text{id} = \underbrace{p_1(f) \circ (f - \lambda \text{id})^{n_\lambda}}_{=: f_1} + \underbrace{p_2(f) \circ \prod_{\substack{\mu \neq \lambda, \mu \in \Lambda}} (f - \mu \text{id})^{n_\mu}}_{=: f_2}$$

Es ist  $f_1(w) = 0 \forall w \in W_\lambda = \text{Kern}(f - \lambda)^{n_\lambda}$ . Da  $(f - \mu)(f - \mu') = (f - \mu')(f - \mu)$  gilt  $f_2(w) = 0$  für alle  $w \in \sum_{\mu \neq \lambda, \mu \in \Lambda} W_\mu$ . Es folgt  $W_\lambda \cap \sum_{\mu \neq \lambda} W_\mu = 0$ , da  $f_1 + f_2 = \text{id}$ .  $\square$

### 7.6. Satz

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ . Sei  $\Lambda$  die Menge der Eigenwerte von  $f$ . Weiter zerfalle  $\chi_f$  in Linearfaktoren. Dann gilt

$$V = \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} W_\lambda, \quad \chi_f = \prod_{\lambda \in \Lambda} (X - \lambda)^{n_\lambda} \quad \text{mit } n_\lambda = \dim W_\lambda$$

### Beweis

Es ist  $\chi_f = \prod_{\lambda \in \Lambda} (X - \lambda)^{m_\lambda}$  für geeignete  $m_\lambda \geq 1$ . Wegen (7.4) ist  $m_\lambda = n_\lambda = \dim W_\lambda$ . Wegen (7.5) ist  $\sum_{\lambda \in \Lambda} W_\lambda = \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} W_\lambda$ . Da

$$\dim V = d(\chi_f) = \sum_{\lambda \in \Lambda} n_\lambda = \dim \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} W_\lambda$$

folgt  $V = \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} W_\lambda$ .  $\square$

### 7.7. Jordansche Normalform

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ .  $\chi_f$  zerfalle in Linearfaktoren. Dann gibt es eine Basis  $B$  von  $V$  mit

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} \boxed{K_1} & & \\ & \boxed{K_2} & \\ & & \ddots \\ & & & \boxed{K_r} \end{pmatrix}$$

wobei jedes  $K_i = \begin{pmatrix} \lambda_i & & \\ 1 & \ddots & \\ & \ddots & 1 & \lambda_i \end{pmatrix}$  ein Jordankasten ist. Jeder Eigenwert taucht mindestens einmal als Eigenwert eines der  $K_i$  auf.

### Beispiel

$$A = \begin{pmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 4 & 2 \end{pmatrix} \quad \chi_A = \det_{K[X]} \begin{pmatrix} X-2 & -1 & 0 \\ 0 & X-2 & 0 \\ 0 & -4 & X-2 \end{pmatrix} = (X-2)^3$$

Mögliche Jordansche Normalform für  $A$ :

$$J_1 = \begin{pmatrix} \boxed{2} & & \\ \boxed{1} & \boxed{2} & \\ & \boxed{1} & \boxed{2} \end{pmatrix} \quad J_2 = \begin{pmatrix} \boxed{2} & & \\ \boxed{1} & \boxed{2} & \\ & & \boxed{2} \end{pmatrix} \quad J_3 = \begin{pmatrix} \boxed{2} & & \\ & \boxed{2} & \\ & & \boxed{2} \end{pmatrix}$$

Eigenraum von  $J_1$  zum Eigenwert 2 hat die Dimension:  $\dim \text{Kern}(2I_3 - J_1) = \dim \text{Kern} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \\ -1 & -1 & 0 \\ & 0 & 0 \end{pmatrix} = 1$

Eigenraum von  $J_2$  zum Eigenwert 2 hat die Dimension:  $\dim \text{Kern}(2I_3 - J_2) = \dim \text{Kern} \begin{pmatrix} 0 & 0 & \\ -1 & -1 & 0 \\ & 0 & 0 \end{pmatrix} = 2$

Also ist  $J_2$  die Jordansche Normalform von  $A$ .

### Frage

Seien  $A, B \in K^{n \times n}$  mit  $\chi_A = \chi_B \forall$  Eigenwerte  $\lambda$  ist  $\dim V_\lambda(A) = \dim V_\lambda(B)$ . Sind dann  $A$  und  $B$  konjugiert? (bzw. sind die Jordanschen Normalformen gleich)

Nein! Betrachte  $A = \begin{pmatrix} \boxed{2} & & \\ \boxed{1} & \boxed{2} & \\ & \boxed{2} & \\ & & \boxed{1} & \boxed{2} \end{pmatrix}$  und  $B = \begin{pmatrix} \boxed{2} & & \\ \boxed{1} & \boxed{2} & \\ & \boxed{1} & \boxed{2} & \\ & & & \boxed{2} \end{pmatrix}$  Es gilt

$$(B - 2 \cdot I_4)^2 = \begin{pmatrix} \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \\ \boxed{0} & \boxed{0} & \boxed{0} & \\ \boxed{1} & \boxed{0} & \boxed{0} & \\ & & & \boxed{0} \end{pmatrix} \neq 0 \quad \text{aber} \quad (A - 2 \cdot I_4)^2 = \begin{pmatrix} \boxed{0} & & & \\ \boxed{1} & \boxed{0} & & \\ & \boxed{0} & & \\ & & \boxed{0} & \\ & & & \boxed{1} & \boxed{0} \end{pmatrix}^2 = 0$$

## 7.8. Proposition

Seien  $f, g \in \text{End}(V)$  mit  $fg = gf$ . Dann gilt

$$(f + g)^n = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^k g^{n-k}$$

### Beweis

Für die Binomialkoeffizienten

$$\binom{n}{k} = \begin{cases} \frac{n!}{k!(n-k)!}, & \text{falls } 0 \leq k \leq n \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

gilt  $\binom{n+1}{k} = \binom{n}{k} + \binom{n}{k-1}$ . Die Aussage folgt per Induktion:

$$\begin{aligned} (f + g)^{n+1} &= (f + g) + (f + g)^n = (f + g) \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^k g^{n-k} \\ &= \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^{k+1} g^{n-k} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^k g^{n-k+1} \\ &= \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n}{k-1} f^k g^{n+1-k} + \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} f^k g^{n+1-k} \\ &= \sum_{k=0}^{n+1} \left( \binom{n}{k-1} + \binom{n}{k} \right) f^k g^{n+1-k} \\ &= \sum_{k=0}^{n+1} \binom{n+1}{k} f^k g^{n+1-k} \end{aligned}$$

□

## 7.9. Jordan-Chevalley-Zerlegung

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ ,  $\chi_f$  zerfalle in Linearfaktoren. Dann gibt es eine eindeutige Zerlegung  $f = h + n$  mit

- 1)  $h$  ist diagonalisierbar
- 2)  $n$  ist nilpotent
- 3)  $hn = nh$

### Beweis

**Existenz:** folgt aus (7.7)

**Eindeutigkeit:** Behauptung: Für  $\lambda \in K$  gilt  $(\star) \ W_\lambda(f) = V_\lambda(h)$ . Sei  $v \in V_\lambda(h)$ , also  $h(v) = \lambda v$ . Dann gilt:

$$(h+n-\lambda)^N(v) = (n+(h-\lambda))^N(v) = \sum_{k=0}^N \binom{N}{k} n^k (h-\lambda)^{N-k}(v) \stackrel{h(v)=\lambda v}{=} n^N \cdot (h-\lambda)^0(v) = n^N(v)$$

Da  $n$  nilpotent ist, gibt es ein  $N$  mit  $n^N = 0$ . Es folgt  $(f-\lambda)^N(v) = (h+n-\lambda)^N(v) = 0$  für dieses  $N$ . Also  $v \in W_\lambda(f)$ . Da

$$\bigoplus_{\lambda \in \Lambda} W_\lambda(f) = V \stackrel{h \text{ diagonalisierbar}}{=} \bigoplus_{\lambda \in \Lambda} V_\lambda(h)$$

folgt nun aus  $V_\lambda(h) \subseteq W_\lambda(f)$  schon  $V_\lambda(h) = W_\lambda(f)$ . Sei nun  $f = h' + n'$  eine zweite Zerlegung mit 1)-3). Dann

$$V_\lambda(h) = W_\lambda(f) = V_\lambda(h') \quad \text{wegen } (\star)$$

Da  $h$  und  $h'$  diagonalisierbar sind, folgt  $h = h'$ . Dann folgt auch  $n = f - h = f - h' = n'$ .  $\square$

## 7.10. Definition

Ein Endomorphismus der Form  $f = \text{id} + n$  mit  $n$  nilpotent heißt **unipotent**.

## 7.11. Bemerkung

Ist  $f = \text{id} + n$  unipotent mit  $n^N = 0$ , so ist  $f$  invertierbar mit

$$f^{-1} = \text{id} - n + n^2 - n^3 + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} (-n)^k = \sum_{k=0}^{N-1} (-n)^k$$

## 7.12. Multiplikative Jordan-Chevalley-Zerlegung

Sei  $f \in GL(V)$ ,  $\dim V < \infty$ ,  $\chi_f$  zerfalle in Linearfaktoren. Dann gibt es eine eindeutige Faktorisierung  $f = h \cdot u$  mit

- 1)  $h$  ist diagonalisierbar
- 2)  $u$  ist unipotent
- 3)  $h \cdot u = u \cdot h$

### Beweis

Sind  $h, n$  wie in (7.9) so erfüllt  $(h, u = \text{id} + n)$  1) - 3) aus (7.12). Erfülle  $h, u$  1) - 3) aus (7.12) so erfüllen  $(h, u - \text{id})$  1) - 3) aus (7.9).



## 8. Das Minimalpolynom

### 8.1. Erinnerung

Sei  $f \in \text{End}(V)$  zyklisch mit  $V = L(v, f)$ . Ist  $n = \dim V$  so ist  $B = (v, f(v), \dots, f^{n-1}(v))$  eine Basis von  $V$  und ist  $f^n(v) = \sum_{i=0}^{n-1} \lambda_i f^i(v)$  so ist  $\chi_f = X^n - \lambda_{n-1}X^{n-1} - \dots - \lambda_0$ . (vergleiche 6.14)

### 8.2. Lemma

In der Situation von (8.1) gilt:  $\chi_f(f)(v) = 0$

**Beweis**

$$\chi_f(f)(v) = f^n(v) - \lambda_{n-1}f^{n-1}(v) - \dots - \lambda_0 f^0(v) = 0$$

□

### 8.3. Satz von Cayley-Hamilton

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ . Dann ist  $\chi_f(f) = 0$

**Beweis**

Sei  $v \in V$ . Sei  $f_0$  die Einschränkung von  $f$  auf den  $f$ -invarianten Unterraum  $U := L(v, f)$ . Dann ist  $\chi_{f_0}(f)v = \chi_{f_0}(f_0) = 0$  wegen (8.2). Sei  $F : V/U \rightarrow V/U$  von  $f$  induziert. Dann  $\chi_f = \chi_{f_0} \cdot \chi_F = \chi_F \cdot \chi_{f_0}$ . Es folgt

$$\chi_f(f)(v) = (\chi_F(f) \cdot \chi_{f_0}(f))(v) = \chi_F(f) \cdot (\chi_{f_0}(f)(v)) = 0$$

Also  $\chi_f(f)(v) = 0$  für alle  $v \in V$ .

□

### 8.4. Satz

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ . Dann gibt es ein eindeutiges normiertes Polynom  $p \in K[X]$  minimalen Grades mit  $p(f) = 0$ . Es gilt  $p \mid \chi_f$ .

**Beweis**

**Existenz:** folgt aus Cayley-Hamilton

**Eindeutigkeit:** Ist  $q \in K[X]$  ein zweites normiertes Polynom mit  $q(f) = 0$ . Ist  $d(p) = d(q)$ , so ist  $d(p - q) < d(p) = d(q)$ . Da  $(p - q)(f) = 0$  ist, folgt  $p - q = 0$  wegen der Minimalität von  $d(p)$ .

Division mit Rest liefert  $\chi_f = l \cdot p + r$  mit  $d(r) < d(p)$ . Da  $r(f) = \chi_f(f) - l(f)p(f) = 0$  ist folgt mit der Minimalität von  $d(p)$  wieder  $r = 0$ . □

### 8.5. Definition

$p$  aus (8.4) heißt das **Minimalpolynom** von  $f$ . Wir bezeichnen es mit  $p_f$ .

### 8.6. Lemma

$p_f(\lambda) = 0 \iff \lambda$  ist Eigenwert von  $f$ .

**Beweis**

Ist  $\lambda$  eine Nullstelle von  $p_f$  so ist  $\lambda$  auch eine Nullstelle von  $\chi_f$  (da  $p_f \mid \chi_f$ ) und damit ein Eigenwert von  $f$ . Ist umgekehrt  $\lambda$  ein Eigenwert von  $f$  mit Eigenvektor  $v$ , so folgt mit  $p_f = a_n X^n + a_{n-1} X^{n-1} + \dots + a_0$

$$0 = p_f(f)(v) = \sum_{k=0}^n a_k f^k(v) = \sum_{k=0}^n a_k \lambda^k \cdot v = p_f(\lambda) \cdot v$$

Da  $v \neq 0$  ist, folgt  $p_f(\lambda) = 0$ .

□

### 8.7. Lemma

Ist  $f$  diagonalisierbar, so ist

$$p_f = \prod_{\lambda \text{ Eigenwert von } f} (X - \lambda)$$

#### Beweis

Sei  $q$  die rechte Seite von  $(*)$ . Wegen (8.6) teilt  $q$  das Minimalpolynom  $p_f$ . Es bleibt zu zeigen  $q(f) = 0$ . Sei  $v$  ein Eigenvektor von  $f$  zum Eigenwert  $\lambda$ . Schreibe  $q = q_0(X - \lambda)$ . Dann

$$q(f)(v) = q_0(f)(\underbrace{(f - \lambda)(v)}_{=0}) = 0$$

Da  $f$  diagonalisierbar ist, gibt es eine Basis von  $V$  aus Eigenvektoren von  $f$ . Nun wirkt  $q(f)$  trivial auf dieser Basis. Damit folgt  $q(f) = 0$ .  $\square$

### 8.8. Lemma

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ . Weiter sei  $p_f = (X - \lambda_1) \cdot \dots \cdot (X - \lambda_n)$  das Produkt von paarweise verschiedenen Linearfaktoren. Dann ist  $f$  diagonalisierbar.

#### Beweis

Mit Division mit Rest erhalten wir mit einem festen  $i$

$$\prod_{j \neq i} (X - \lambda_j) = q_i \cdot (X - \lambda_i) + c_i \quad c_i \in K, q_i \in K[X]$$

da die  $\lambda_j$  paarweise verschieden sind, ist  $c_i \neq 0$ . Es folgt für  $v \in V$

$$c_i v = \underbrace{\prod_{j \neq i} (f - \lambda_j)(v)}_{v_i} - \underbrace{(f - \lambda_i)q_i(f)(v)}_{w_i}$$

Es ist  $v_i \in \text{Kern}(f - \lambda_i)$ , da  $0 = p_f(f) = \prod_j (f - \lambda_j)$ . Weiter ist  $w_i \in \text{Bild}(f - \lambda_i)$ . Es gilt also

$$\begin{aligned} V &= \text{Kern}(f - \lambda_i) \oplus \text{Bild}(f - \lambda_i) \\ &= V_{\lambda_i} \oplus \text{Bild}(f - \lambda_i) \end{aligned}$$

Sei  $U := \bigoplus_i V_{\lambda_i} \subseteq V$ . Wegen  $(*)$  ist die von  $(f - \lambda_i)$  induzierte Abbildung auf  $V/U$  surjektiv. Also induziert auch  $0 = (f - \lambda_1) \cdot \dots \cdot (f - \lambda_n)$  eine surjektive Abbildung auf  $V/U$ . Es folgt  $V/U = \{0\}$ . Also  $V = U = \bigoplus_i V_{\lambda_i}$  und  $f$  ist diagonalisierbar.  $\square$

### 8.9. Satz

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ . Dann ist  $f$  genau dann diagonalisierbar, wenn  $p_f$  ein Produkt von paarweise verschiedenen Linearfaktoren ist.

#### Beweis

(8.7) und (8.8)

### 8.10. Beispiel

Sei  $J = \begin{bmatrix} \lambda & & \\ 1 & \backslash & \\ & \backslash & 1 \\ & & \lambda \end{bmatrix}$  ein Jordankasten der Größe  $n$ . Dann gilt  $p_J = (X - \lambda)^n$

**Beweis**

Es ist  $\chi_J = (X - \lambda)^n$ . Da  $p_J \mid \chi_J$  ist  $p_J = (X - \lambda)^k$  mit  $k \leq n$ . Da  $(J - \lambda) = \begin{pmatrix} 0 & & \\ 1 & \ddots & \\ & \ddots & 1 \\ & & 0 \end{pmatrix}$  ist leicht zu sehen, dass  $(J - \lambda)^k \neq 0$  für  $k < n$ . Es folgt  $p_J = (X - \lambda)^n$ .  $\square$

**8.11. Satz**

Sei

$$A = \begin{pmatrix} J_1 & & \\ & \ddots & \\ & & J_n \end{pmatrix}$$

wobei jedes  $J_i$  ein Jordankasten mit  $\lambda_i$  auf der Diagonalen ist. Für jeden Eigenwert  $\lambda$  von  $A$  sei  $n_\lambda$  die Größe des größten Jordankasten zum Eigenwert  $\lambda$ . Dann gilt:

$$p_A = \prod_{\lambda \text{ EW}} (X - \lambda)^{n_\lambda}$$

**Beweis**Folgt mit (8.10)  $\square$ **8.12. Lemma**

Sei  $p \in K[X]$  und  $B$  eine endliche Basis von  $V$ . Für  $f \in \text{End}(V)$  gilt  $p(m_B^B(f)) = m_B^B(p(f))$

**Beweis**

$m_B^B : \text{End}(V) \rightarrow K^{n \times n}$  ist linear und verträglich mit Komposition. Ist  $p = \sum_{k=0}^n a_k X^k$  so folgt:

$$p(m_B^B(f)) = \sum_{k=0}^n a_k (m_B^B(f))^k = \sum_{k=0}^n a_k \cdot m_B^B(f^k) = m_B^B\left(\sum_{k=0}^n a_k f^k\right) = m_B^B(p(f)) \quad \square$$

**8.13. Korollar**

$$pf = p_{m_B^B(f)}$$

**Beweis**(8.12)  $\square$ **8.14. Bemerkung**

Zu  $f \in \text{End}(V)$ ,  $A \in K^{n \times n}$  sind die Einsetzungshomomorphismen

$$\Phi_f : K[X] \rightarrow \text{End}(V), \Phi_f(p) := p(f)$$

$$\Phi_A : K[X] \rightarrow K^{n \times n}, \Phi_A(p) := p(A)$$

Ringhomomorphismen. Ebenso ist  $m_B^B : \text{End}(V) \rightarrow K^{n \times n}$  ein **Ringhomomorphismus**. Nach (8.12) kommutiert das Diagramm

$$\begin{array}{ccc} K[X] & \xrightarrow{\Phi_f} & \text{End}(V) \\ & \searrow \Phi_{m_B^B(f)} & \downarrow m_B^B \\ & & K^{n \times n} \end{array}$$

### 8.15. Bemerkung

$\text{Bild}(\Phi_f) \subseteq \text{End}(V)$  und  $\text{Bild}(\Phi_A) \subseteq K^{n \times n}$  sind kommutative Unterringe von  $\text{End}(V)$  bzw.  $K^{n \times n}$

### 8.16. Satz

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ . Das charakteristische Polynom  $\chi_f$  zerfalle in Linearfaktoren. Sei  $\Lambda$  die Menge der Eigenwerte von  $f$ . Für  $\lambda \in \Lambda$  sei  $d_{\lambda,k} := \dim \text{Kern}(f - \lambda)^k$  und  $d_{\lambda,0} := 0$ . Sei  $j_{\lambda,k}$  die Anzahl der  $k \times k$  Jordankästen zum Eigenwert  $\lambda$ . Dann gilt:

$$j_{\lambda,k} = 2 \cdot d_{\lambda,k} - (d_{\lambda,k+1} + d_{\lambda,k-1})$$

**Beweis**

Sei  $J = \begin{pmatrix} \boxed{J_1} & & \\ & \ddots & \\ & & \boxed{J_n} \end{pmatrix}$  die Jordan-Normalform zu  $f$ . Dann gilt

$$(J - \lambda)^k = \begin{pmatrix} (J_1 - \lambda)^k & & \\ & \ddots & \\ & & (J_n - \lambda)^k \end{pmatrix}$$

Also ist  $d_{\lambda,k} = \sum_{i=1}^n \dim \text{Kern}(J_i - \lambda)^k$ . Ist  $J_i$  ein  $l \times l$  Jordankasten zum Eigenwert  $\mu$ , so gilt

$$\dim \text{Kern}(J_i - \lambda)^k = \begin{cases} 0, & \text{falls } \lambda \neq \mu \\ \min\{k, l\}, & \text{falls } \lambda = \mu \end{cases}$$

Es folgt:

$$\begin{aligned} d_{\lambda,1} &= \sum_{l=1}^{\dim V} j_{\lambda,l} \\ d_{\lambda,2} &= \sum_{l=1}^{\dim V} j_{\lambda,l} + \sum_{l=2}^{\dim V} j_{\lambda,l} \\ &\vdots \\ d_{\lambda,k} &= d_{\lambda,k-1} + \sum_{l=k}^{\dim V} j_{\lambda,l} \implies d_{\lambda,k} - d_{\lambda,k-1} = \sum_{l=k}^{\dim V} j_{\lambda,l} \end{aligned}$$

Also ist

$$2 \cdot d_{\lambda,k} - (d_{\lambda,k+1} + d_{\lambda,k-1}) = (d_{\lambda,k} - d_{\lambda,k-1}) - (d_{\lambda,k+1} - d_{\lambda,k}) = \sum_{l=k}^{\dim V} j_{\lambda,l} - \sum_{l=k+1}^{\dim V} j_{\lambda,l} = j_{\lambda,k} \quad \square$$

## 9. Euklidische Ringe und Hauptidealringe

### 9.1. Definition

Sei  $R$  ein kommutativer Ring. Eine Teilmenge  $I \subset R$  heißt **Ideal** falls gilt:

- i)  $I \subseteq R$  ist eine Untergruppe bezüglich  $+$
- ii)  $\forall a \in I, \forall r \in R : r \cdot a \in I$

### 9.2. Beispiele

- i)  $I = R, I = \{0\} \subseteq R$
- ii) Sei  $R = \mathbb{Z}$ ,  $2\mathbb{Z} = \{2n \mid n \in \mathbb{Z}\} \subseteq \mathbb{Z}$  ist ein Ideal
- iii) Sei  $R = \mathbb{Z}$ ,  $n$  fest.  $n\mathbb{Z} = \{n \cdot z \mid z \in \mathbb{Z}\} \subseteq \mathbb{Z}$  ist ein Ideal
- iv)  $I = \left\{ \sum_{k=1}^n a_k X^k \mid a_k \in 2\mathbb{Z} \right\} \subseteq \mathbb{Z}[X]$  ist ein Ideal

### 9.3. Definition

$u \in R$  heißt **Einheit**, falls es ein  $r \in R$  gibt, so dass  $u \cdot r = 1$ . Die Einheiten eines Ringes bilden eine Gruppe  $R^\times$ .

### 9.4. Lemma

Sei  $I \subset R$  ein Ideal. Dann sind äquivalent:

- (i)  $I = R$
- (ii)  $1 \in I$
- (iii)  $I$  enthält eine Einheit

#### Beweis

(i)  $\Rightarrow$  (ii) klar

(ii)  $\Rightarrow$  (iii) klar

(iii)  $\Rightarrow$  (i)  $I \subseteq R$  per Definition. Also nu  $R \subseteq I$  zu zeigen:

Sei  $r \in R$  und  $u$  die Einheit in  $I$ . Dann ist  $r = (r \cdot u^{-1}) \cdot u \in I$

□

### 9.5. Bemerkung

$\{0\}$  und  $K$  sind die einzigen Ideale des Körpers  $K$ .

### 9.6. Definition

Seien  $a_1, \dots, a_n \in R$ . Mit  $(a_1, \dots, a_n)$  bezeichnen wir das kleinste Ideal von  $R$ , das  $a_1, \dots, a_n$  enthält. Also

$$(a_1, \dots, a_n) := \bigcap_{I \subset R, a_1, \dots, a_n \in I} I$$

$(a_1, \dots, a_n)$  heißt das von  $a_1, \dots, a_n$  erzeugte Ideal.

### Bemerkung

$$(a_1, \dots, a_n) = \left\{ \sum_{i=1}^n r_i a_i \mid r_i \in R \right\}$$

### 9.7. Definition

Ideale, die von einem Element erzeugt werden, heißen **Hauptideale**

### 9.8. Definition

Ein **Integritätsring**  $R$  ist ein kommutativer nullteilerfreier Ring. Ein Integritätsring heißt **Hauptidealring** (HIR), wenn alle Ideale Hauptideale sind.

#### Beispiel

Jeder Körper ist ein Hauptidealring.

### 9.9. Definition

Ein Integritätsring heißt **euklidischer Ring**, wenn es eine Abbildung  $\delta : R \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N}$  mit folgenden Eigenschaften gibt  $\forall a, b \in R, b \neq 0 \exists q, r \in R : a = qb + r, \delta(r) < \delta(b)$  oder  $r = 0$ .  $\delta$  heißt dann eine **Gradfunktion**

### 9.10. Beispiel

- (i)  $\mathbb{Z}$  ist ein euklidischer Ring ( $\delta(n) := |n|$ )
- (ii)  $K[X]$  ist ein euklidischer Ring ( $\delta(p) := d(p)$  vgl. 4.7)

### 9.11. Satz

Euklidische Ringe sind Hauptidealringe.

#### Beweis

Sei  $I \subseteq R$  ein Ideal. Ist  $I = \{0\}$ , so ist nichts mehr zu tun. Sei also  $\{0\} \neq I$ . Wähle  $b \in I \setminus \{0\}$  so, dass  $\delta(b)$  minimal ist. Behauptung:  $I = (b)$

„ $\subseteq$ “: Sei  $a \in I$ . Dann ist  $a = qb + r$  mit  $r = 0$  oder  $\delta(r) < \delta(b)$ . Da  $r = a - qb \in I$  ist und  $\delta(b)$  minimal war, folgt  $\delta(r) \geq \delta(b)$   $\nmid$ . Also  $r = 0$ . Es folgt  $a = q \cdot b$ , also  $a \in (b)$

„ $\supseteq$ “: klar, da  $b \in I$

□

### 9.12. Definition

Sei  $R$  ein Integritätsring. Sei  $p \in R, p \neq 0, p \notin R^\times$

- (i)  $p$  heißt **irreduzibel**, falls  $p = a \cdot b \quad a, b \in R \Rightarrow a \in R^\times$  oder  $b \in R^\times$
- (ii)  $p$  heißt **prim**, falls  $p \mid a \cdot b \quad a, b \in R \Rightarrow p \mid a$  oder  $p \mid b$

### 9.13. Lemma

Ist  $p$  prim, so ist  $p$  irreduzibel

**Beweis**

Sei  $p = a \cdot b$ ,  $p$  prim  $\Rightarrow p \mid a$  oder  $p \mid b$ . oBdA  $p \mid a$ . D.h.  $\exists u \in R$ , so dass  $p \cdot u = a$ . Daraus folgt  $p = ab = pub \Leftrightarrow p - pub = 0 \Rightarrow p(1 - ub) = 0 \xrightarrow{\text{nullteilerfrei}} 1 - ub = 0$ , also  $ub = 1$ . Also ist  $b$  eine Einheit.  $\square$

**9.14. Satz**

Sei  $R$  ein Hauptidealring. Dann gilt:  $p$  ist prim  $\iff p$  irreduzibel

**Beweis**

„ $\Rightarrow$ “: 9.13

„ $\Leftarrow$ “: Sei  $p$  irreduzibel. Seien  $a, b \in R$  mit  $p \mid a \cdot b$ ,  $p \nmid a$ . Zu zeigen:  $p \mid b$ .

Dazu  $R$  Hauptidealring, d.h.  $\exists d \in R$  mit  $(a, p) = (d)$ . Also  $\exists c \in R$  mit  $p = c \cdot d$ . Da  $p$  irreduzibel ist, muss  $c \in R^\times$  oder  $d \in R^\times$  gelten. Angenommen  $c \in R^\times$ . Dann ist  $d = c^{-1}p$ . Wegen  $a \in (d)$  gibt es nun  $f \in R$  mit  $a = f \cdot d \Rightarrow a = f c^{-1} p \Rightarrow p \mid a$   $\nmid$  zur Voraussetzung.

Also muss  $d \in R^\times$  gelten. Also  $(d) = R = (a, p)$ . Also gibt es  $r, s \in R$  mit  $1 = ra + sp \Rightarrow b = rab + spb \Rightarrow p \mid b$   $\square$

**9.15. Satz**

Sei  $R$  ein Hauptidealring. Dann lässt sich jedes  $a \in R$ ,  $a \neq 0$ ,  $a \notin R^\times$  als ein Produkt von endlich vielen Primelementen aus  $R$  schreiben.

**Beweis (mit 9.16)**

Wir nennen  $a \in R$ ,  $a \neq 0$ ,  $a \notin R^\times$  „gut“, falls es das Produkt von endlich vielen Primelementen ist. Angenommen  $a \in R \setminus \{0\} \cup R^\times$  ist nicht „gut“. Dann ist  $a$  nicht prim, also nach (9.14) auch nicht irreduzibel. Also  $a = a_1 b_1$  für  $a_1, b_1 \notin R^\times$ . Dann ist entweder  $a_1$  nicht gut oder  $b_1$ . Sei o.B.d.A also  $a_1$  nicht gut.  $\leadsto$  Folge  $a_1 a_2, \dots, b_1 b_2, \dots \in R \setminus R^\times$  mit  $a_i = a_{i+1} b_{i+1}$  ( $a = a_0$ ). Also  $(a) \subseteq (a_1) \subseteq (a_2) \subseteq \dots$ . Wegen (9.16)  $\exists N$  mit  $(a_N) = (a_{N+1}) = (a_N b_N)$ . Also  $\exists u \in R$  mit  $a_N = a_N b_N u$ . Da  $R$  nullteilerfrei ist folgt  $b_N u = 1 \Rightarrow b_N \in R^\times$   $\nmid$   $\square$

**9.16. Lemma**

Sei  $R$  ein Hauptidealring. Sei  $I_1 \subseteq I_2 \subseteq \dots$  eine aufsteigende Folge von Idealen in  $R$ . Dann gibt es eine  $N \in \mathbb{N}$  so dass  $I_n = I_N \forall n \geq N$ .

**Beweis**

Definiere  $I := \bigcup_{n=1}^{\infty} I_n$  ist ein Ideal. Also  $\exists a \in R$  mit  $I = (a)$ . Sei  $a \in I_N$ . Es folgt

$$I = (a) \subseteq I_N \subseteq I_n \subseteq I_{n+1} \subseteq \dots \subseteq I$$

Also  $I_N = I_n \forall n \geq N$ .  $\square$

**9.17. Eindeutige Primfaktorzerlegung in Hauptidealringen**

Sei  $R$  ein Hauptidealring.

- 1) Jedes  $a \in R$ ,  $a \neq 0$ ,  $a \notin R^\times$  ist das Produkt von endlich vielen Primelementen  $a = p_1 \cdot \dots \cdot p_N$
- 2) Ist  $p_1 \cdot \dots \cdot p_N = q_1 \cdot \dots \cdot q_M$  mit  $p_i, q_j$  prim, so gilt  $N = M$  und es gibt  $u_1, \dots, u_N \in R^\times$  so dass (nach Umnummerierung)  $p_i = q_i u_i$

### Beweis

1) (9.15)

2) per Induktion nach  $N$ .

$$N = 1 \quad \checkmark$$

- $N - 1 \mapsto N$  • Ist  $p_1 \cdot \dots \cdot p_N = q_1 \cdot \dots \cdot q_M$  mit  $p_i, q_i$  prim, so gilt insbesondere  $p_1 \mid q_1 \cdot \dots \cdot q_M$
- Da  $p_1$  prim, folgt o.B.d.A.  $p_1 \mid q_1 \Rightarrow cp_1 = q_1$ .
  - Da  $q_1$  prim (und somit irreduzibel) ist, folgt  $p_1 = u_1 q_1$  mit  $u_1 \in R^\times$ .

Also ist

$$q_1 \cdot \dots \cdot q_M = p_1 \cdot \dots \cdot p_N = q_1 u_1 p_2 \cdot \dots \cdot p_N \xrightarrow{R \text{ nullteilerfrei}} q_2 \cdot \dots \cdot q_M = u_1 p_2 \cdot \dots \cdot p_M \xrightarrow{\text{I.V.}} \text{Beh.} \quad \square$$

### 9.18. Definition

Der Ring

$$\mathbb{Z}[i] := \{a + bi \mid a, b \in \mathbb{Z}\} \subset \mathbb{C}$$

heißt Ring der **Gaußschen Zahlen**.

### 9.19. Lemma

$\mathbb{Z}[i]$  ist ein Euklidischer Ring (und damit ein Hauptidealring).

#### Beweis

- $\mathbb{Z}[i]$  ist Integritätsring, definiere  $N : \mathbb{Z}[i] \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N}$  mit  $a + ib \mapsto a^2 + b^2 = |a + ib|^2$ . Damit ist  $N$  multiplikativ. Sei nun  $z, \zeta \in \mathbb{Z}[i], \zeta \neq 0$ . Zu zeigen:  $\exists q, r \in \mathbb{Z}[i]$  mit  $z = q\zeta + r$  und  $r = 0$  oder  $N(r) < N(\zeta)$ . Es gilt

$$- \zeta \in \mathbb{C}^\times \Rightarrow z \cdot \zeta^{-1} \in \mathbb{C}$$

$$- \text{Für benachbarte } f, g \in \mathbb{Z}[i] \text{ ist } |f - g| \leq \sqrt{2}$$

$$\text{Also gibt es zu } h \in \mathbb{C} \text{ eine Gaußsche Zahl } q \text{ mit } |h - q| \leq \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2}\sqrt{2}$$

- Wähle so ein  $q \in \mathbb{Z}[i]$  für  $h = z \cdot \zeta^{-1}$  und setze  $r := z - q \cdot \zeta \in \mathbb{Z}[i]$ . Dann ist  $z = q \cdot \zeta + r$  und

$$|r| = |z - q\zeta| = |\zeta| \cdot \underbrace{|z\zeta^{-1} - q|}_{\leq \frac{1}{\sqrt{2}} < 1} \leq |\zeta|$$

$$\text{mit } \zeta \neq 0 \text{ folgt } N(r) < N(\zeta)$$

$\square$

### 9.20. Lemma

$$\text{a) } \mathbb{Z}[i]^\times = \{\pm 1, \pm i\}$$

$$\text{b) Ist } c \in \mathbb{Z}[i] \text{ mit } N(c) = |c|^2 = 1, \text{ so ist } c \in \mathbb{Z}[i]^\times$$

#### Beweis

a) „ $\supseteq$ “: klar

„ $\subseteq$ “: Sei  $u \in \mathbb{Z}[i]^\times$ . Dann ist  $1 = N(1) = N(uu^{-1}) = N(u) \cdot N(u^{-1})$ . Dann ist  $N(u) = 1$ . Sei  $u = a + ib$ , also  $1 = a^2 + b^2 \Rightarrow$  Behauptung

b) schon erledigt

$\square$



## 9.21. Satz

Die einzige ganzzahlige Lösung der Gleichung  $x^2 + 1 = y^3$  ist  $x = 0, y = 1$ .

### Beweis

Seien  $x, y \in \mathbb{Z}$  mit  $x^2 + 1 = y^3$ . Ist  $x = 0$  folgt  $y = 1$ . Die Annahme  $x = \pm 1$  führt zu  $y^3 = 2$ , was in  $\mathbb{Z}$  nicht lösbar ist. Also können wir  $x \notin \{0, \pm 1\}$  annehmen.

i) Betrachte  $y^3 = x^2 + 1 = (x + i)(x - i)$  in  $\mathbb{Z}[i]$ . Da  $x \neq 0$  ist  $x + 1, x - 1 \notin \mathbb{Z}[i]^\times$ . (siehe 9.20)

ii) Behauptung: Ist  $c$  ein gemeinsamer Teiler von  $x + i$  und  $x - i$  ist, so ist  $c$  bereits eine Einheit.

Beweis: Ist  $c \mid x + i \wedge c \mid x - i$ , so ist auch  $c \mid (x + i) - (x - i) = 2i$ . Wegen  $N(2i) = 4$ , muss  $N(c) \in \{1, 2, 4\}$  gelten. Ist  $N(c) = 1$  so folgt mit (9.20)  $c \in \mathbb{Z}[i]^\times$ . Ist also  $N(c) = 4$ , so ist  $c = \pm 2$

$N$  multiplikativ

$N(a + bi) = a^2 + b^2$	1	2	3	4
$a + bi$	$\pm 1, \pm i$	$\pm 1 + i, \pm 1 - i$		$\pm 2, \pm 2i$

Tabelle 1: Lösungen für  $N(a + bi) \in \{1, 2, 3, 4\}$

oder  $\pm 2i$ , so folgt  $c \nmid x + 1$  in  $\mathbb{Z}[i]$ .  $\nmid$

Ist  $N(c) = 2$  folgt  $c \in \{\pm 1 + i, \pm 1 - i\} \Rightarrow c = 1 + i$  bis auf Multiplikation mit einer Einheit. Es folgt

$$1 + i \mid (x + i)(x - i) = y^3 \xrightarrow{(\star)} 1 + i \mid y \Rightarrow (1 + i)^3 \mid y^3 = (x + i)(x - i) \stackrel{\text{PFZ}}{=} (p_1 \cdots p_N)(q_1 \cdots q_M)$$

zu  $(\star)$ :  $1 + i$  ist prim in  $\mathbb{Z}[i]$ , da aus  $1 + i = z_1 z_2$  folgt  $0 = N(1 + i) = N(z_1) \cdot N(z_2) \Rightarrow \text{o.B.d.A.}$   
 $N(z_1) = 1$  also  $z_1 \in \mathbb{Z}[i]^\times$

$$\Rightarrow (1 + i)(1 + i)(1 + i) \cdot (r_1 + r_k) = (p_1 \cdots p_N)(q_1 \cdots q_M)$$

Es folgt  $(1 + i)^2 = 2i \mid x + i$  oder  $(1 + i)^2 = 2i \mid (x - i) \Rightarrow 2 \mid x + i$  oder  $2 \mid x - i$   $\nmid$

Also kann  $c$  nur noch eine Einheit sein.

iii) Die Primfaktorzerlegung liefert

$$y^3 = (t_1 \cdots t_L)^3 = t_1 t_1 t_1 \cdots t_L t_L t_L = x^2 + 1 = (x + i)(x - i)$$

mit Behauptung ii) folgt nach Umnummerierung  $(x + i) = t_1^3 \cdots t_\nu^3$  und  $x - i = t_{\nu+1}^3 \cdots t_L^3$ . Also existieren  $a, b \in \mathbb{Z}$  mit  $(x + i) = (a + ib)$ .

Hieraus ergibt sich wie folgt ein Widerspruch;

$$(x + i) = (a + bi)^3 = (a^3 - 3ab^2) + (3a^2b - b^3)i$$

Also  $b(3a^2 - b^2) = 1 \Rightarrow b = \pm 1$  und  $3a^2 = 2$   $\nmid$  zu  $a \in \mathbb{Z}$ . Oder:  $3a^2 = 0 \Rightarrow a = 0 \Rightarrow x = 0$   $\nmid$  zur Annahme. Also ist  $x = 0, y = 1$ .  $\square$

Anmerkung: Der Beweis ist in den Vorlesungsnotizen etwas kürzer, da dort die Primfaktorzerlegung weniger formal durchgeführt wird. Die Notizen zu diesem Kapitel befinden sich HIER

## 10. Tensorprodukte

### 10.1. Wiederholung

Seien  $V, W$  und  $U$   $K$ -Vektorräume. Eine Abbildung  $\varphi : V \times W \rightarrow U$  heißt **bilinear** falls gilt:

- (1)  $\varphi(v + v', w) = \varphi(v, w) + \varphi(v', w)$ ,  $\varphi(\lambda v, w) = \lambda \cdot \varphi(v, w)$
- (2)  $\varphi(v, w + w') = \varphi(v, w) + \varphi(v, w')$ ,  $\varphi(v, \lambda w) = \lambda \cdot \varphi(v, w)$

Den  $K$ -Vektorraum aller solchen Abbildungen bezeichnen wir mit  $\text{Hom}_{\text{bi}}(V \times W, U)$ .

### 10.2. Definition

Seien  $V, W$   $K$ -Vektorräume. Ein Vektorraum  $V \otimes W$  zusammen mit einer bilinearen Abbildung  $\phi : V \times W \rightarrow V \otimes W$  heißt **Tensorprodukt** von  $V$  mit  $W$  falls folgende **universelle Eigenschaft** erfüllt ist:

Zu jeder bilinearen Abbildung  $\varphi : V \times W \rightarrow U$  gibt es eine eindeutige lineare Abbildung  $f_\varphi : V \otimes W \rightarrow U$  so dass  $\varphi = f_\varphi \circ \phi$

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\varphi} & U \\ \phi \downarrow & \nearrow f_\varphi & \\ V \otimes W & & \end{array}$$

Das Tensorprodukt ermöglicht das Zurückführen bilinearer Abbildungen auf lineare Abbildungen

### 10.3. Bemerkung

Durch die universelle Eigenschaft wird das Tensorprodukt bis auf kanonischen Isomorphismus eindeutig festgelegt:

Sei  $\tilde{\phi} : V \times W \rightarrow V \tilde{\otimes} W$  ein zweites Tensorprodukt. Indem wir die universelle Eigenschaft zweimal anwenden erhalten wir kanonische Abbildungen

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\tilde{\phi}} & V \tilde{\otimes} W \\ \phi \downarrow & \nearrow f_{\tilde{\phi}} & \\ V \otimes W & & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\phi} & V \otimes W \\ \tilde{\phi} \downarrow & \nearrow f_\phi & \\ V \tilde{\otimes} W & & \end{array}$$

Nun können wir die Eindeutigkeit in der universellen Eigenschaft anwenden und erhalten

$$\begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\tilde{\phi}} & V \tilde{\otimes} W \\ \phi \downarrow & \nearrow \text{id} = f_\phi \circ f_{\tilde{\phi}} & \\ V \otimes W & & \end{array} \quad \begin{array}{ccc} V \times W & \xrightarrow{\phi} & V \otimes W \\ \tilde{\phi} \downarrow & \nearrow \text{id} = f_{\tilde{\phi}} \circ f_\phi & \\ V \tilde{\otimes} W & & \end{array}$$

Als ist  $f_\phi$  der gesuchte kanonische Isomorphismus. □

### 10.4. Bemerkung

$\varphi \mapsto f_\varphi$  definiert einen Isomorphismus  $\text{Hom}_{\text{bi}}(V \times W, U) \xrightarrow{\cong} \text{Hom}(V \otimes W, U)$ . Sein Inverses ist durch  $f \mapsto f \circ \phi$  definiert. Um  $\text{Hom}_{\text{bi}}(V \times W, U)$  zu verstehen, genügt es also  $V \otimes W$  zu verstehen. Ein Vorteil ist nun, dass  $V \otimes W$  unabhängig von  $U$  ist. Wir müssen aber die Existenz des Tensorprodukts noch nachweisen!

## 10.5. Definition

Sei  $\mathfrak{M}$  eine beliebige Menge. Mit  $K[\mathfrak{M}]$  bezeichnen wir den  $K$ -Vektorraum aller formalen Summen  $\sum_{x \in \mathfrak{M}} \lambda_x \cdot x$  mit  $\lambda_x \in K$  und  $|\{x \mid \lambda_x \neq 0\}| < \infty$ .

## 10.6. Bemerkung

Sei  $x \in \mathfrak{M}$ . Sei  $\sigma(x) := \sum_{y \in \mathfrak{M}} \delta_{x,y} y$ . Dies definiert eine Abbildung  $\sigma : \mathfrak{M} \rightarrow K[\mathfrak{M}]$ . Nun ist  $\sigma(x), x \in \mathfrak{M}$  eine Basis von  $K[\mathfrak{M}]$ . Oft wird  $\sigma$  ignoriert und man schreibt kurz  $\sigma(x) = x$ .

## 10.7. Konstruktion von $V \otimes W$

Betrachte  $K[V \times W]$ . Wir erhalten  $\sigma : V \times W \rightarrow K[V \times W]$ , aber diese Abbildung ist (noch) nicht bilinear. Um dies zu korrigieren betrachten wir den folgenden Unterraum:

$$R := \langle \begin{array}{ll} (v + v', w) - (v, w) - (v', w), & (\lambda v, w) - \lambda(v, w), \\ (v, w + w') - (v, w) - (v, w'), & (v, \lambda w) - \lambda(v, w) \end{array} \mid v, v' \in V \ w, w' \in W \ \lambda \in K \rangle$$

und definieren  $V \otimes W := K[V \times W]/R$  und  $\phi(v, w) := (v, w) + R$ . Nach Definition von  $R$  ist  $\phi$  bilinear.

Üblicherweise schreibt man  $v \otimes w$  für  $(v, w) + R = \phi(v, w)$ . Mit dieser Schreibweise gelten dann:

$$\begin{aligned} (v + v') \otimes w &= v \otimes w + v' \otimes w & (\lambda v) \otimes w &= \lambda(v \otimes w) \\ v \otimes (w + w') &= v \otimes w + v \otimes w' & v \otimes (\lambda w) &= \lambda(v \otimes w) \end{aligned}$$

## 10.8. Nachweis der universellen Eigenschaft für $V \otimes W$

Sei  $\varphi : V \times W \rightarrow U$  bilinear. Da  $V \times W$  eine Basis von  $K[V \times W]$  ist, gibt es eine eindeutige lineare Abbildung  $\hat{f} : K[V \times W] \rightarrow U$  mit  $\hat{f}_\varphi((v, w)) = \varphi(v, w) \in U$ , die also  $\varphi : V \times W \rightarrow U$  fortsetzt. Da  $\varphi$  bilinear ist, liegt  $R$  im Kern von  $\hat{f}$  und wir erhalten eine induzierte lineare Abbildung  $f_\varphi : V \otimes W \rightarrow U$  mit  $f_\varphi(v \otimes w) = \varphi(v, w)$ . Dies ist die eindeutige lineare Abbildung mit  $f_\varphi \circ \phi = \varphi$   $\square$

## 10.9. Satz

Seien  $V, W$   $K$ -Vektorräume mit Basen  $A, B$ . Dann bilden die  $a \otimes b, a \in A, b \in B$  eine Basis von  $V \otimes W$ .

### Beweis

Nach Konstruktion ist  $\{v \otimes w \mid v \in V, w \in W\}$  ein Erzeugendensystem von  $V \otimes W$ . Seien  $v \in V$  und  $w \in W$  beliebig. Ist  $v = \sum_{a \in A} \lambda_a \cdot a, w = \sum_{b \in B} \lambda_b \cdot b$  mit  $\lambda_a, \lambda_b \in K$ , so ist

$$v \otimes w = \left( \sum_{a \in A} \lambda_a \cdot a \right) \otimes \left( \sum_{b \in B} \lambda_b \cdot b \right) = \sum_{\substack{a \in A \\ b \in B}} \lambda_a \cdot \lambda_b (a \otimes b)$$

Daher ist auch  $\{a \otimes b \mid a \in A, b \in B\}$  ein Erzeugendensystem. Sei nun  $\sum_{a \in A, b \in B} (\lambda_{a,b}) a \otimes b = 0 \in V \otimes W$ . Seien  $a_0 \in A, b_0 \in B$  beliebig. Dann gibt es  $\alpha_0 \in \text{Hom}(V, K), \beta_0 \in \text{Hom}(W, K)$  mit  $\alpha_0(a) = \delta_{a_0, a}, \beta_0(b) = \delta_{b_0, b}$  für  $a \in A, b \in B$ . Nun ist  $\varphi : V \times W \rightarrow K$  mit  $\varphi(v, w) = \alpha_0(v) \cdot \beta_0(w)$  bilinear. Es gibt also eine lineare Abbildung  $f_\varphi : V \otimes W \rightarrow K$   $f_\varphi(v \otimes w) = \alpha_0(v) \cdot \beta_0(w) \ \forall v \in V, w \in W$ . Insbesondere gilt

$$f_\varphi(a \otimes b) = \begin{cases} 1, & \text{falls } a = a_0, b = b_0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

für  $a \in A, b \in B$ . Es folgt

$$0 = f_\varphi(0) = f_\varphi\left(\sum_{\substack{a \in A \\ b \in B}} (\lambda_{a,b}) \cdot a \otimes b\right) = \sum_{\substack{a \in A \\ b \in B}} \lambda_{a,b} f_\varphi(a \otimes b) = \lambda_{a_0, b_0}$$

Da  $a_0$  und  $b_0$  beliebig waren, folgt  $\lambda_{a,b} = 0$  für alle  $a \in A, b \in B$ . Damit ist  $\{a \otimes b \mid a \in A, b \in B\}$  linear unabhängig.  $\square$

### 10.10. Bemerkung

Sei  $K$  ein Unterkörper von  $L$ . Dann ist  $L$  insbesondere ein  $K$ -Vektorraum. Zu einem  $K$ -Vektorraum  $V$  betrachte nun das Tensorprodukt  $L \otimes_K V$ . Dann wird  $L \otimes_K V$  durch

$$L \times L \otimes_K V \rightarrow L \otimes_K V \quad (\lambda, l \otimes v) \mapsto (\lambda \cdot l) \otimes v$$

zu einem  $L$ -Vektorraum. Wir bezeichnen ihn oft mit  $V_L := L \otimes_K V$ .

### 10.11. Lemma

Sei  $K$  ein Unterkörper von  $L$ . Sei  $B$  eine Basis des  $K$ -Vektorraums  $V$ . Dann ist  $\{1 \otimes b \mid b \in B\}$  eine Basis von  $V_L$ .

#### Beweis

Sei  $v \in V$ . Dann ist  $v = \sum_{b \in B} k_b \cdot b$  für geeignete  $k_b \in K$ . Für  $l \in L$  gilt dann

$$l \otimes v = l \otimes \sum_{b \in B} k_b \cdot b = \sum_{b \in B} l \cdot k_b \cdot (1 \otimes b)$$

Da  $V_L$  von allen  $l \otimes v$  erzeugt wird, ist daher  $\{1 \otimes b \mid b \in B\}$  ein Erzeugendensystem von  $V_L$ .

Sei  $\sum_{b \in B} l_b (1 \otimes b) = 0$ . Sei  $b_0 \in B$  beliebig. Sei  $\beta_0 \in \text{Hom}_K(V, K)$  mit  $\beta_0(b) = \delta_{b_0, b}$  für  $b \in B$ . Nun ist  $\varphi : L \times V \rightarrow L$  mit  $\varphi(l, v) = l \cdot \beta(v)$   $K$ -bilinear. Daher gibt es  $f_\varphi \in \text{Hom}_K(V_L, L)$  mit  $f_\beta(l \otimes v) = l \cdot \beta(v)$ .

$$f_\varphi(1 \otimes b) = \delta_{b_0, b}$$

Wegen

$$f_\varphi(l \cdot (l' \otimes v)) = f_\varphi(l' \cdot l \otimes v) = (l \cdot l') \cdot \beta(v) = l' \cdot (l \cdot \beta(v)) = l' \cdot f_\varphi(l \otimes v)$$

ist  $f_\varphi$  sogar  $L$ -linear. Es folgt

$$0 = f_\varphi(0) = f_\varphi\left(\sum_{b \in B} l_b (1 \otimes b)\right) = \sum_{b \in B} l_b f_\varphi(1 \otimes b) = l_{b_0}$$

Also ist  $l_b = 0$  für alle  $b$  und  $\{1 \otimes b \mid b \in B\}$   $L$ -linear unabhängig.  $\square$

### 10.12. Bemerkung

Sei  $K$  ein Unterkörper von  $L$ . Ist  $f : V \rightarrow W$  eine  $K$ -lineare Abbildung, so gibt es eine eindeutige  $L$ -lineare Abbildung  $f_L : V_L \rightarrow W_L$  mit  $f_L(l \otimes v) := l \otimes f(v)$ .

Ist  $g : W \rightarrow U$  eine weitere  $K$ -lineare Abbildung, so gilt  $(g \circ f)_L = g_L \circ f_L$ . Weiter ist  $(\text{id}_V)_L = \text{id}_{(V_L)}$ . (Man sagt auch, dass  $(V \mapsto V_L, f \mapsto f_L)$  ein **Funktor** von der Kategorie der  $K$ -Vektorräume in die Kategorie der  $L$ -Vektorräume ist.)

### 10.13. Bemerkung

Sei  $K$  ein Unterkörper von  $L$ . Sei  $B$  eine endliche  $K$ -Basis des  $K$ -Vektorraums  $V$ . Sei  $B_L = \{1 \otimes b \mid b \in B\}$  die zugehörige  $L$ -Basis von  $V_L$ . Ist  $f \in \text{End}_K(V)$ , so gilt

$$K^{n \times n} \ni m_B^B(f) = m_{B_L}^{B_L}(f_L) \in L^{n \times n}$$

### 10.14. Bezeichnung

Sei  $K$  ein Unterkörper von  $L$  und  $V$  ein  $K$ -Vektorraum. Indem wir  $v = 1 \otimes v$  schreiben, können wir  $V$  als Teilmenge von  $V_L$  auffassen. Dann wird  $V$  zu einem  $K$ -Untervektorraum von  $V_L$ . Es gilt  $l \cdot v = l \otimes v$  für  $l \in L, v \in V$ .

### 10.15. Beispiel

Sei  $V$  ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum

- i) Jeder Vektor  $\omega \in V_{\mathbb{C}}$  lässt sich dann eindeutig schreiben als  $\omega = x + iy$  mit  $x, y \in V$
- ii) Durch  $\omega = x + iy \mapsto \bar{\omega} := x - iy$  wird ein  $\mathbb{R}$ -linearer(!) Endomorphismus von  $V_{\mathbb{C}}$  definiert. Es gilt  $V = \{\omega \in V_{\mathbb{C}} \mid \omega = \bar{\omega}\}$ . Weiter ist für  $\omega = x + iy$   $x = \frac{\omega + \bar{\omega}}{2}$  und  $y = \frac{\omega - \bar{\omega}}{2i}$
- iii) Es gilt  $\overline{\alpha\omega} = \bar{\alpha} \cdot \bar{\omega}$  für  $\omega \in V_{\mathbb{C}}, \alpha \in \mathbb{C}$ . Man sagt,  $\omega \mapsto \bar{\omega}$  ist  $\mathbb{C}$ -**antilinear**.
- iv) Ist  $f : V \rightarrow W$   $\mathbb{R}$ -linear, so wird  $f_{\mathbb{C}} : V_{\mathbb{C}} \rightarrow W_{\mathbb{C}}$  festgelegt durch

$$f_{\mathbb{C}}(x + iy) = f(x) + if(y) \quad \text{für } x, y \in V$$

Es gilt dann  $f_{\mathbb{C}}(\bar{\omega}) = \overline{f_{\mathbb{C}}(\omega)}$ .

## 11. Die Jordansche Normalform über $\mathbb{R}$

### 11.1. Lemma

Sei  $p = c_n X^n + c_{n-1} X^{n-1} + \dots + c_0 \in \mathbb{R}[X]$ .

- (i) Für  $\lambda \in \mathbb{C}$  gilt  $p(\lambda) = 0 \iff p(\bar{\lambda}) = 0$ .
- (ii) Ist  $p = g \cdot f$  mit  $0 \neq g \in \mathbb{R}[X], f \in \mathbb{C}[X]$ , so ist  $f \in \mathbb{R}[X]$ .
- (iii) Ist  $p$  irreduzibel, so ist  $d(p) \leq 2$ .

#### Beweis

(i)

$$\begin{aligned} p(\bar{\lambda}) &= c_n \bar{\lambda}^n + c_{n-1} \bar{\lambda}^{n-1} + \dots + c_0 \\ &= \overline{c_n \lambda^n + c_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + c_0} \\ &= \overline{(c_n \lambda^n + c_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + c_0)} = \overline{p(\lambda)} = 0 \end{aligned}$$

(ii) Division mit Rest in  $\mathbb{R}[X]$  liefert:  $p = gq + r$  mit  $r, q \in \mathbb{R}[X], d(r) < d(g)$ . Daher  $g \cdot f = p = g \cdot q + r$ . Also  $r = g(f - q)$ . Da  $g \neq 0$  und  $d(r) < d(g)$ , folgt  $f - q = 0$  also  $f = q \in \mathbb{R}[X]$ .

(iii) Angenommen  $d(p) \geq 3$ . Sei  $\lambda \in \mathbb{C}$  eine Nullstelle von  $p$ . Da  $p$  irreduzibel über  $\mathbb{R}[X]$  ist, ist  $\lambda \notin \mathbb{R}$ . Da  $\lambda \neq \bar{\lambda}$  und  $\lambda, \bar{\lambda}$  Nullstellen von  $p$  sind, gilt  $(X - \lambda)(X - \bar{\lambda}) \mid p$  in  $\mathbb{C}[X]$ . Da

$$(X - \lambda)(X - \bar{\lambda}) = X^2 - \underbrace{(\lambda + \bar{\lambda})}_{\in \mathbb{R}} X + \underbrace{\lambda \bar{\lambda}}_{\in \mathbb{R}}$$

gilt wegen (ii)  $(X - \lambda)(X - \bar{\lambda}) \mid p$  schon in  $\mathbb{R}[X]$ .  $\nexists$  zu  $p$  irreduzibel und  $d(p) \geq 3$  □

### 11.2. Bemerkung

Die normierten irreduziblen Polynome  $p \in \mathbb{R}[X]$  sind genau

- (i)  $X - a, a \in \mathbb{R}$
- (ii)  $(X - a)^2 + b^2, a, b \in \mathbb{R} b > 0$

### 11.3. Satz

Sei  $f \in \text{End}_K(V), \dim_K V < \infty$ . Sei  $p_f = g \cdot h \in K[X]$  mit  $g, h$  teilerfremd und normiert. Dann gilt:

- (i)  $\text{Kern } g(f) = \text{Bild } h(f), \text{Kern } h(f) = \text{Bild } g(f)$
- (ii)  $V = \text{Kern } g(f) \oplus \text{Kern } h(f)$
- (iii)  $\text{Kern } g(f)$  und  $\text{Kern } h(f)$  sind  $f$ -invariant
- (iv) Für  $f_g := f|_{\text{Kern } g(f)}, f_h = f|_{\text{Kern } h(f)}$  gilt  $p_{f_g} = g, p_{f_h} = h$ .

**Beweis**

Da  $g$  und  $h$  teilerfremd sind, gibt es  $\alpha, \beta \in K[X]$  mit  $1 = \alpha g + \beta h$ . Insbesondere  $\text{id}_V = \alpha(f)g(f) + \beta(f)h(f)$ .

(i) Sei also  $v = h(f)(w) \in \text{Bild } h(f)$  mit  $w \in V$ . Dann gilt

$$g(f)(v) = g(f)(h(f)(w)) = (g \cdot h)(f)(v) = p_f(f)(v) = 0$$

Also  $v \in \text{Kern } g(f)$ .

Sei nun  $v \in \text{Kern } g(f)$ .

$$v = \alpha(f) \underbrace{g(f)(v)}_{=0} + \beta(f)h(f)(v) = \beta(f)h(f)(v) = h(f)\beta(f)(v) \in \text{Bild } h(f)$$

Es folgt  $\text{Kern } g(f) = \text{Bild } h(f)$ . Genauso folgt  $\text{Kern } h(f) = \text{Bild } g(f)$ . □

(ii) Sei  $v \in V$ . Dann

$$\begin{aligned} v &= \alpha(f)g(f)(v) + \beta(f)h(f)(v) = g(f)\alpha(f)(v) + h(f)\beta(f)(v) \\ &\in \text{Bild } g(f) + \text{Bild } h(f) = \text{Kern } h(f) + \text{Kern } g(f) \end{aligned}$$

Sei  $v \in \text{Kern } h(f) \cap \text{Kern } g(f)$ . Dann

$$v = \alpha(f) \underbrace{g(f)(v)}_{=0} + \beta(f) \underbrace{h(f)(v)}_{=0} = 0$$

Also  $V = \text{Kern } h(f) + \text{Kern } g(f)$  und  $\text{Kern } h(f) \cap \text{Kern } g(f) = \{0\}$ . Damit  $V = \text{Kern } g(f) \oplus \text{Kern } h(f)$ . □

(iii) Wegen  $g(f) \cdot f = f \cdot g(f)$  ist  $\text{Kern } g(f)$   $f$ -invariant. Sei  $v \in \text{Kern } g(f)$ . Dann  $g(f)(f(v)) = f(g(f)(v)) = 0$ . Also  $f(v) \in \text{Kern } g(f)$ . Genauso ist  $\text{Kern } h(f)$   $f$ -invariant.

(iv) Für  $v \in \text{Kern}(f)$  gilt  $g(f_g)(v) = g(f)(v) = 0$ . Also  $g(f_g) = 0$ . Es folgt (mit Division mit Rest)  $p_{f_g} \mid g$ . Ebenso  $p_{f_h} \mid h$ . Für  $v \in \text{Kern } g(f)$  gilt

$$(p_{f_h} \cdot p_{f_g})(f)(v) = (p_{f_h} \cdot p_{f_g})(f_g)(v) = p_{f_h}(f_g) \cdot p_{f_g}(f_g)(v) = 0$$

Genauso gilt für  $v \in \text{Kern } h(f)$ :  $(p_{f_h} \cdot p_{f_g})(f)(v) = 0$

Da  $V = \text{Kern } g(f) \oplus \text{Kern } h(f)$  folgt  $(p_{f_h} \cdot p_{f_g})(f)(v) = 0$  für alle  $v \in V$ . Also  $(p_{f_h} \cdot p_{f_g})(f) = 0$ . Daher  $p_f \mid p_{f_h} \cdot p_{f_g}$ . Also  $p_{f_h} \cdot p_{f_g} \mid g \cdot h = p_f$  und  $p_f \mid p_{f_h} \cdot p_{f_g}$ . Daher  $p_{f_h} \cdot p_{f_g} = p_f = g \cdot h$ . Da  $g, h$  normiert sind und  $p_{f_h} \mid h, p_{f_g} \mid g$  folgt auch

$$p_{f_h} = h \quad \text{und} \quad p_{f_g} = g \quad \text{□}$$

**11.4. Proposition**

Sei  $V$  ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum. Sei  $W \subseteq V_{\mathbb{C}}$  ein  $\mathbb{C}$ -Unterraum. Sei  $\overline{W} := \{\overline{w} \mid w \in W\}$ . Sei  $w_1, \dots, w_n$   $\mathbb{C}$ -Basis von  $W$ . Sei für  $i = 1, \dots, n$   $x_i := \frac{w_i + \overline{w_i}}{2}$  und  $y_i := \frac{w_i - \overline{w_i}}{2i}$ . Ist  $V_{\mathbb{C}} = W \oplus \overline{W}$  so ist  $x_1, y_1, \dots, x_n, y_n$  eine  $\mathbb{R}$ -Basis von  $V$ .

### Beweis

$\bar{w}_1, \dots, \bar{w}_n$  ist eine  $\mathbb{C}$ -Basis von  $\bar{W}$ . Es folgt

$$2n = \dim_{\mathbb{C}} W + \dim_{\mathbb{C}} \bar{W} = \dim_{\mathbb{C}} V_{\mathbb{C}} = \dim_{\mathbb{R}} V$$

Es genügt nun zu zeigen, dass  $x_1, y_1, \dots, x_n, y_n$  ein  $\mathbb{R}$ -Erzeugendensystem von  $V$  ist. Sei  $v \in V$ . Da  $w_1, \bar{w}_1, \dots, w_n, \bar{w}_n$  eine  $\mathbb{C}$ -Basis von  $V_{\mathbb{C}} = W \oplus \bar{W}$  ist, gibt es daher  $\alpha_1, \beta_1, \dots, \alpha_n, \beta_n \in \mathbb{C}$  mit

$$\begin{aligned} v &= \alpha_1 w_1 + \beta_1 \bar{w}_1 + \dots + \alpha_n w_n + \beta_n \bar{w}_n \\ \Rightarrow v &= \bar{v} = \bar{\alpha}_1 \bar{w}_1 + \bar{\beta}_1 w_1 + \dots + \bar{\alpha}_n \bar{w}_n + \bar{\beta}_n w_n \end{aligned}$$

Es folgt, da  $w_1, \bar{w}_1, \dots, w_n, \bar{w}_n$   $\mathbb{C}$ -Basis von  $V_{\mathbb{C}}$  ist, gilt  $\alpha_i = \bar{\beta}_i$  für  $i = 1, \dots, n$

$$\Rightarrow v = \underbrace{(\alpha_1 + \bar{\alpha}_1)}_{\in \mathbb{R}} \underbrace{\frac{w_1 + \bar{w}_1}{2}}_{=x_1} + i \underbrace{(\alpha_1 - \bar{\alpha}_1)}_{\in \mathbb{R}} \underbrace{\frac{w_1 - \bar{w}_1}{2i}}_{=y_1} + \dots + \underbrace{(\alpha_n + \bar{\alpha}_n)}_{\in \mathbb{R}} \underbrace{\frac{w_n + \bar{w}_n}{2}}_{=x_n} + i \underbrace{(\alpha_n - \bar{\alpha}_n)}_{\in \mathbb{R}} \underbrace{\frac{w_n - \bar{w}_n}{2i}}_{=y_n}$$

□

### 11.5. Notation

Sei  $p = \alpha_n X^n + \alpha_{n-1} X^{n-1} + \dots + \alpha_1 X + \alpha_0 \in \mathbb{C}[X]$ . Dann setzen wir

$$\bar{p} := \bar{\alpha}_n X^n + \bar{\alpha}_{n-1} X^{n-1} + \dots + \bar{\alpha}_1 X + \bar{\alpha}_0$$

Es gilt  $p = \bar{p} \iff p \in \mathbb{R}[X]$ .

### 11.6. Lemma

Sei  $V$  ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum,  $\dim_{\mathbb{R}} V < \infty$ ,  $f \in \text{End}_{\mathbb{R}}(V)$ . Dann ist  $p_{f_{\mathbb{C}}} = p_f$ .

#### Beweis

Sei  $w = x + iy \in V_{\mathbb{C}}$ ,  $x, y \in V$ . Dann ist

$$(p_f(f_{\mathbb{C}}))(w) = p_f(f_{\mathbb{C}})(x + iy) = p_f(f_{\mathbb{C}})(x) + i \cdot p_f(f_{\mathbb{C}})(y) = p_f(f)(x) + i \cdot p_f(f)(y) = 0$$

Es folgt  $p_{f_{\mathbb{C}}} \mid p_f$ . Sei  $p_{f_{\mathbb{C}}} = \alpha_n \lambda^n + \alpha_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + \alpha_1 \lambda + \alpha_0$ . Für  $w = x + iy$  gilt

$$\bar{p}_{f_{\mathbb{C}}}(w) = \sum_{k=0}^n \bar{\alpha}_k f_{\mathbb{C}}^k(w) = \sum_{k=0}^n \bar{\alpha}_k \overline{f_{\mathbb{C}}^k(w)} = \overline{p_{f_{\mathbb{C}}}(f_{\mathbb{C}})(w)} = 0$$

Es folgt  $\bar{p}_{f_{\mathbb{C}}} = p_{f_{\mathbb{C}}}$ . Also  $p_{f_{\mathbb{C}}} \in \mathbb{R}[X]$ . Wegen  $p_{f_{\mathbb{C}}}(f_{\mathbb{C}}) = 0$  ist auch  $p_{f_{\mathbb{C}}}(f) = 0$ . Es folgt weiter  $p_f \mid p_{f_{\mathbb{C}}}$ . Also  $p_f = p_{f_{\mathbb{C}}}$ . □

### 11.7. Proposition

Sei  $V$  ein  $\mathbb{R}$ -Vektorraum,  $\dim V < \infty$ ,  $f \in \text{End}_{\mathbb{R}}(V)$ . Sei  $p_f = ((X - a)^2 + b^2)^N$  mit  $a, b \in \mathbb{R}, b > 0$ . Dann gibt es eine Basis  $B = (x_1, y_1, \dots, x_n, y_n)$  von  $V$  mit

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} A & & & \\ D_1 & \ddots & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & D_{n-1} & A \end{pmatrix} \quad \text{mit } A = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \quad D_i = \{I_2, 0\}$$



**Beweis**

Sei  $\alpha = a + bi \in \mathbb{C}$ . Dann ist  $p_{f_{\mathbb{C}}} = p_f = (X - \alpha)^N (X - \bar{\alpha})^N$ . Da  $b > 0$  ist, ist  $\alpha \neq \bar{\alpha}$ . Daher sind  $(X - \alpha)^N$  und  $(X - \bar{\alpha})^N$  teilerfremd. Es folgt mit (11.3)

$$V_{\mathbb{C}} = \text{Kern}(f_{\mathbb{C}} - \alpha)^N \oplus \text{Kern}(f_{\mathbb{C}} - \bar{\alpha})^N$$

Sei  $W := \text{Kern}(f_{\mathbb{C}} - \alpha)^N$  und  $f_W := f_{\mathbb{C}}|_W$ . Dann ist  $p_{f_W} = (X - \alpha)^N$  nach (11.3). Daher ist  $\alpha$  der einzige Eigenwert von  $f_W$ . Jordannormalform für  $f_W \Rightarrow$  Es existiert eine Basis  $w_1, \dots, w_n$  von  $W$  mit

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} \alpha & & \\ \delta_1 & \ddots & \\ & \ddots & \ddots \\ & & \delta_n & \alpha \end{pmatrix} \quad \text{mit } \delta_1, \dots, \delta_n \in \{0, 1\}$$

Also  $f_{\mathbb{C}}(w_j) = \alpha w_j + \delta_j w_{j+1}$ . Für  $w = x + iy \in V_{\mathbb{C}}$  mit  $x, y \in V$  gilt

$$(f_{\mathbb{C}} - \bar{\alpha})(\bar{w}) = f_{\mathbb{C}}(\bar{w}) - \bar{\alpha}\bar{w} = \overline{f_{\mathbb{C}}(w)} - \bar{\alpha}\bar{w} = \overline{(f_{\mathbb{C}} - \alpha)(w)}$$

Es folgt  $(f_{\mathbb{C}} - \bar{\alpha})^N(\bar{w}) = \overline{(f_{\mathbb{C}} - \alpha)^N(w)}$ . Daher ist  $\bar{W} = \text{Kern}(f_{\mathbb{C}} - \bar{\alpha})^N$ . Damit ist  $V_{\mathbb{C}} = W \oplus \bar{W}$  und wir können (11.4) anwenden:

Setze:  $x_j := \frac{w_j + \bar{w}_j}{2}$ ,  $y_j := \frac{w_j - \bar{w}_j}{2i}$ . Dann ist  $B = x_1, y_1, \dots, x_n, y_n$  eine Basis von  $V$ . Es ist

$$\begin{aligned} f(x_j) &= f_{\mathbb{C}}\left(\frac{w_j + \bar{w}_j}{2}\right) = \frac{1}{2}\left(f_{\mathbb{C}}(w_j) + \overline{f_{\mathbb{C}}(w_j)}\right) = \frac{1}{2}(\alpha w_j + \delta_j w_{j+1} + \bar{\alpha}\bar{w}_j + \delta_j \bar{w}_{j+1}) \\ &= \frac{1}{2}(aw_j + ibw_j + a\bar{w}_j - ib\bar{w}_j) + \delta_j \left(\frac{w_{j+1} + \bar{w}_{j+1}}{2}\right) \\ &= a \frac{(w_j + \bar{w}_j)}{2} + ib \frac{(w_j - \bar{w}_j)}{2} + \delta_j x_{j+1} \\ &= a \frac{(w_j + \bar{w}_j)}{2} - b \frac{(w_j - \bar{w}_j)}{2i} + \delta_j x_{j+1} \\ &= ax_j - by_j + \delta_j x_{j+1} \end{aligned}$$

Genauso rechnet man aus  $f(y_j) = by_j + ay_j + \delta_j y_{j+1}$ . □

**11.8. Definition**

Eine reelle Matrix der Gestalt

$$\begin{pmatrix} A & & \\ I_2 & A & \\ & \ddots & \\ & & I_2 & A \end{pmatrix} \quad \text{mit } A = \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \quad \text{mit } a, b \in \mathbb{R}, \quad b > 0$$

heißt **verallgemeinerter Jordankasten**.

**11.9. Satz**

Sei  $f \in \text{End}(V)$ ,  $\dim V < \infty$ . Dann gibt es eine Basis  $B$  von  $V$ , so dass

$$m_B^B(f) = \begin{pmatrix} J_1 & & \\ & \ddots & \\ & & J_n \end{pmatrix}$$

wobei jedes  $J_j$  ein Jordankasten oder verallgemeinerter Jordankasten ist.

### Beweis

Sei  $p_f = q_1^{k_1} \cdot \dots \cdot q_N^{k_N}$  die Primfaktorzerlegung. Sei  $V_j := \text{Kern } q_j(f)^{k_j}$ . Wegen (11.3) sind die  $V_j$   $f$ -invariant und

- $V = V_1 \oplus \dots \oplus V_N$
- $p(f|_{V_j}) = q_j^{k_j}$

Nach (11.2) ist jedes  $q_j$  entweder ein Linearfaktor oder  $q_j = (X - a_j)^2 + b_j$  mit  $a_j, b_j \in \mathbb{R}, b_j > 0$ . Ist  $q_j$  ein Linearfaktor, so können wir die übliche Jordansche Normalform auf  $f_j := f|_{V_j}$  anwenden und erhalten eine Basis  $B_j$  von  $V_j$  so dass  $m_{B_j}^{f_j}(f_j)$  aus Jordankästen besteht. Andernfalls können wir (11.7) anwenden und erhalten eine Basis  $B_j$  von  $V_j$  für die  $m_{B_j}^{f_j}(f_j)$  aus verallgemeinerten Jordankästen besteht. Also ist  $B = B_1 \cup \dots \cup B_N$  die gesuchte Basis.  $\square$

## 12. Der Dualraum

### 12.1. Definition

Sei  $V$  ein  $K$ -Vektorraum. Dann heißt  $V^* := \text{Hom}_K(V, K)$  der **Dualraum** von  $V$ .

### 12.2. Lemma

Sei  $B = (b_1, \dots, b_n)$  eine Basis von  $V$ . Sei für  $i = 1, \dots, n$   $\beta_i : V \rightarrow K$  die eindeutig bestimmte lineare Abbildung mit  $\beta_i(b_j) = \delta_{ij}$  für alle  $j = 1, \dots, n$ . Dann ist  $B^* = (\beta_1, \dots, \beta_n)$  eine Basis von  $V^*$ .

#### Beweis

$B^*$  ist linear unabhängig: Sei  $\lambda_1\beta_1 + \dots + \lambda_n\beta_n = 0$  mit  $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in K$ . Dann gilt

$$0 = (\lambda_1\beta_1 + \dots + \lambda_n\beta_n)(b_j) = \lambda_1\beta_1(b_j) + \dots + \lambda_n\beta_n(b_j) = \lambda_j$$

Also  $\lambda_1 = \dots = \lambda_n = 0$ .

$B^*$  ist ein EZS: Sei  $\varphi \in V^*$ . Betrachte  $\sum_{i=1}^n \varphi(b_i) \cdot \beta_i$ . Dann gilt für  $j = 1, \dots, n$

$$\left( \sum_{i=1}^n \varphi(b_i) \beta_i \right) (b_j) = \sum_{i=1}^n \varphi(b_i) \beta_i(b_j) = \varphi(b_j)$$

Also  $\varphi = \sum_{i=1}^n \varphi(b_i) \beta_i$ . □

Bemerkung: Sei  $\dim V < \infty$ ,  $B = b_1, \dots, b_n$  Basis und  $B^* = \beta_1, \dots, \beta_n$  die duale Basis. Dann gilt

$$(i) \quad \forall \varphi \in V^* : \varphi = \sum_{i=1}^n \varphi(b_i) \beta_i$$

$$(ii) \quad \forall v \in V : v = \sum_{i=1}^n \beta_i(v) b_i$$

### 12.3. Definition

$B^*$  aus (12.2) heißt die **duale Basis** zu  $B$ .

### 12.4. Korollar

Ist  $\dim V < \infty$ , so sind  $V$  und  $V^*$  isomorph.

### 12.5. Bemerkung

Der Isomorphismus  $V \cong V^*$  aus (12.4) ist nicht kanonisch.

### 12.6. Bemerkung

Ist  $B$  eine unendliche Basis von  $V$ , also  $\dim V = \infty$ , so kann man  $B^*$  wie in (12.2) definieren.  $B^*$  ist dann linear unabhängig, aber kein Erzeugendensystem für  $V^*$ . Ist  $\dim V = \infty$ , so sind  $V$  und  $V^*$  nicht isomorph. (Übung)

### 12.7. Definition

Sei  $f : V \rightarrow W$  linear. Dann heißt die durch  $f^*(\varphi) := \varphi \circ f$  definierte lineare Abbildung  $f^* : W^* \rightarrow V^*$  die zu  $f$  **duale Abbildung**.

$$V \xrightarrow{f} W \xrightarrow{\varphi} K$$

## 12.8. Proposition

$f \mapsto f^*$  linear

- (1) Für  $f, g \in \text{Hom}(V, W)$  gilt  $(f + g)^* = f^* + g^*$
- (2) Für  $\lambda \in K, f \in \text{Hom}(V, W)$  gilt  $(\lambda f)^* = \lambda f^*$
- (3) Für  $f \in \text{Hom}(V, W), g \in \text{Hom}(W, U)$  gilt  $(g \circ f)^* = f^* \circ g^*$

### Beweis

- (1) Sei  $\varphi \in W^*$ . Dann

$$(f + g)^*(\varphi) = \varphi \circ (f + g) = \varphi \circ f + \varphi \circ g = f^*(\varphi) + g^*(\varphi) = (f^* + g^*)(\varphi)$$

$$\text{Also } (f + g)^* = f^* + g^*.$$

- (2) Sei  $\varphi \in W^*$ . Dann

$$(\lambda f)^*(\varphi) = \varphi \circ (\lambda f) = \lambda \varphi \circ f = \lambda f^*(\varphi)$$

$$\text{Also } (\lambda f)^* = \lambda(f^*).$$

- (3) Sei  $\varphi \in U^*$ . Dann gilt

$$(f^* \circ g^*)(\varphi) = f^*(g^*(\varphi)) = f^*(\varphi \circ g) = (\varphi \circ g) \circ f = \varphi \circ (g \circ f) = (g \circ f)^*(\varphi)$$

$$\text{Also } (g \circ f)^* = f^* \circ g^*.$$

□

## 12.9. Proposition

Sei  $B$  eine endliche Basis von  $V$  und  $f \in \text{End}(V)$ . Dann gilt

$$m_{B^*}^{B^*}(f^*) = (m_B^B(f))^t$$

### Beweis

Sei  $m_B^B(f) = (a_{ij})$ . Die definierenden Gleichungen für die  $a_{ij}$  sind

$$f(b_j) = \sum_{i=1}^n a_{ij} b_i$$

Zu zeigen: Für  $j = 1, \dots, n$  ist  $f^*(\beta_k) = \sum_{i=1}^n a_{ki} \beta_i$ . Es ist

$$f^*(\beta_k)(b_j) = \beta_k(f(b_j)) = \beta_k\left(\sum_{i=1}^n a_{ij} b_i\right) = a_{kj}$$

und

$$\left(\sum_{i=1}^n a_{ki} \beta_i\right)(b_j) = \sum_{i=1}^n a_{ki} \beta_i(b_j) = a_{kj}$$

□

## 12.10. Lemma

Sei  $V$  ein euklidischer Vektorraum mit  $\dim V < \infty$ . Definiere  $\phi_V : V \rightarrow V^*$  durch  $\phi_V(v)(w) := \langle v | w \rangle$ . Dann ist  $\phi$  ein kanonischer Isomorphismus

**Beweis**

Wegen  $\dim V = \dim V^*$  genügt es zu zeigen, dass  $\phi_V$  injektiv ist. Sei  $v \in V$  mit  $\phi_V(v) = 0$ . Dann ist

$$0 = \phi_V(v)(v) = \langle v | v \rangle = \|v\|^2$$

Also  $v = 0$ . □

**12.11. Bemerkung**

- a) Der Isomorphismus  $\phi_V$  ist kanonisch, er hängt nicht von Wahlen ab.
- b) Ist  $B$  eine Orthonormalbasis von  $V$ , so bildet  $\phi_V$  die Basis  $B$  auf die zugehörige duale Basis  $B^*$  ab.

**12.12. Bemerkung**

Ist  $V$  ein unitärer Vektorraum, so wird durch  $\phi(v)(w) := \langle w | v \rangle$  eine Abbildung  $\phi : V \rightarrow V^*$  definiert, sie ist aber  $\mathbb{C}$ -antilinear.

**12.13. Proposition**

Sei  $f : V \rightarrow W$  eine lineare Abbildung zwischen endlich dimensionalen euklidischen Vektorräumen. Dann gibt es eine eindeutig bestimmte lineare Abbildung  $f^\# : W \rightarrow V$  mit

$$\langle f(v) | w \rangle_W = \langle v | f^\#(w) \rangle_V$$

für alle  $v \in V, w \in W$ . Die gleiche Aussage gilt auch für endlich dimensionale unitäre Vektorräume.

**Beweis**

**Eindeutigkeit:** Ist  $\tilde{f}^\#$  eine zweite solche Abbildung so gilt für alle  $v \in V, w \in W$

$$\langle v | f^\#(w) - \tilde{f}^\#(w) \rangle = \langle v | f^\#(w) \rangle - \langle v | \tilde{f}^\#(w) \rangle = \langle f(v) | w \rangle - \langle f(v) | w \rangle = 0$$

Also  $f^\#(w) = \tilde{f}^\#(w)$ .

**Existenz:** Sei  $B$  eine Orthonormalbasis von  $V$ . Definiere  $f^\#(w) := \sum_{b \in B} \langle f(b) | w \rangle b$ . Dann gilt für  $b_0 \in B, w \in W$

$$\langle b_0 | f^\#(w) \rangle = \sum_{b \in B} \langle b_0 | \langle f(b) | w \rangle b \rangle = \sum_{b \in B} \langle f(b) | w \rangle \langle b_0 | b \rangle = \langle f(b_0) | w \rangle$$

Es folgt  $\langle v | f^\#(w) \rangle = \langle f(v) | w \rangle \quad \forall v \in V, w \in W$ . □

**Bezeichnung**

$f^\#$  heißt der zu  $f$  **adjungierte Homomorphismus**.

**12.14. Lemma**

Seien  $U, V, W$  endlich dimensionale euklidische Vektorräume

- 1) Für  $f_1, f_2 : V \rightarrow W$  gilt  $(f_1 + f_2)^\# = f_1^\# + f_2^\#$
- 2) Für  $f : U \rightarrow V, \lambda \in \mathbb{R}$  gilt  $(\lambda \cdot f)^\# = \lambda f^\#$  ( $= \bar{\lambda} f^\#$ ) im unitären Fall
- 3) Für  $f : U \rightarrow V, g : V \rightarrow W$  gilt  $(g \circ f)^\# = f^\# \circ g^\#$
- 4) Für  $f : U \rightarrow V$  gilt  $(f^\#)^\# = f$

### Beweis

1) Übung

2) Übung

3) Es genügt zu zeigen, dass  $\langle u | f^\# \circ g^\#(w) \rangle = \langle u | (g \circ f)^\#(w) \rangle$  für alle  $u \in U, w \in W$  gilt:

$$\langle u | f^\#(g^\#(w)) \rangle = \langle f(u) | g^\#(w) \rangle = \langle (g \circ f)(u) | w \rangle = \langle u | (g \circ f)^\#(w) \rangle$$

4) Zu zeigen:  $\forall u \in U, v \in V$  gilt  $\langle f(u) | v \rangle = \langle (f^\#)^\#(u) | v \rangle$

$$\langle f(u) | v \rangle = \langle u | f^\#(v) \rangle = \langle f^\#(v) | u \rangle = \langle v | (f^\#)^\#(u) \rangle = \langle (f^\#)^\#(u) | v \rangle \quad \square$$

### 12.15. Proposition

Seien  $V, W$  endlich dimensionale euklidische Vektorräume. Sei  $f : V \rightarrow W$  linear. Dann gelten

$$f^\# = \phi_V^{-1} \circ f^* \circ \phi_W \quad \text{und} \quad f^* = \phi_V \circ f^\# \circ \phi_W^{-1}$$

### Beweis

$\phi_V$  und  $\phi_W$  sind Isomorphismen. Es genügt also zu zeigen, dass

$$\begin{array}{ccc} V & \xleftarrow{f^\#} & W \\ \phi_V \downarrow & & \downarrow \phi_W \\ V^* & \xleftarrow{f^*} & W^* \end{array}$$

kommutiert. Sei  $w \in W$ . Wir zeigen:  $\forall v \in V$  ist  $\phi_V(f^\#(w))(v) = f^*(\phi_W(w))(v)$ .

$$\begin{aligned} \phi_V(f^\#(w))(v) &= \langle f^\#(w) | v \rangle = \langle w | f(v) \rangle \\ f^*(\phi_W(w))(v) &= \phi_W(w)(f(v)) = \langle w | f(v) \rangle \end{aligned} \quad \square$$

### 12.16. Bemerkung

Oft wird sowohl für die adjungierte als für die duale Abbildung die Notation  $f^*$  benutzt und so werden wir es auch halten. (12.15) sagt, dass für endlich dimensionale euklidische Vektorräume die adjungierte und die duale Abbildung bis auf die kanonischen Isomorphismen  $\phi_V$  und  $\phi_W$  übereinstimmen.

### 12.17. Bemerkung

Ist  $V$  ein endlich dimensionaler unitärer oder euklidischer Vektorraum und  $f \in \text{End}(V)$ , so gilt

$$\begin{aligned} f \text{ ist selbstadjungiert} &\iff f = f^* \\ f \text{ ist Isometrie} &\iff \forall v: \|f(v)\| = \|v\| \iff \forall v, w \in V: \langle f(v) | f(w) \rangle = \langle v | w \rangle \iff f^* = f^{-1} \end{aligned}$$

### 12.18. Lemma

Sei  $V$  ein endlich dimensionaler unitärer oder euklidischer Vektorraum. Sei  $f \in \text{End}(V)$  und  $B$  eine Orthonormalbasis von  $V$ . Dann gilt

$$m_B^B(f^*) = \overline{m_B^B(f)}^t$$

### Beweis

(Übung)

## 13. Normale Endomorphismen

In diesem Kapitel ist  $V$  immer ein endlich dimensionaler euklidischer oder unitärer Vektorraum. Sei  $K = \mathbb{R}$  oder  $\mathbb{C}$  entsprechend.

### 13.1. Definition: Normaler Endomorphismus

$f \in \text{End}(V)$  heißt **normal** falls  $f^* \circ f = f \circ f^*$ .

### 13.2. Beispiel

Isometrien und selbstadjungierte Endomorphismen sind normal. Siehe (12.17)

### 13.3. Lemma

$f \in \text{End}(V)$  ist genau dann normal, wenn

$$\langle f(v) | f(w) \rangle = \langle f^*(v) | f^*(w) \rangle \quad \text{für alle } v, w \in V$$

**Beweis**

Folgt aus

$$\begin{aligned} \langle f(v) | f(w) \rangle &= \langle f^* f(v) | w \rangle \\ \langle f^*(v) | f^*(w) \rangle &= \langle f f^*(v) | w \rangle \end{aligned} \quad \square$$

### 13.4. Lemma

Sei  $f \in \text{End}(V)$  normal. Dann gilt

- (i)  $\text{Kern } f = \text{Kern } f^*$
- (ii) Für  $v \in V, \lambda \in K$  sind äquivalent
  - a)  $v$  ist Eigenvektor von  $f$  zum Eigenwert  $\lambda$ .
  - b)  $v$  ist Eigenvektor von  $f^*$  zum Eigenwert  $\bar{\lambda}$

**Beweis**

- (i) Für  $v \in V$  ist  $\|f(v)\|^2 = \langle f(v) | f(v) \rangle \stackrel{13.3}{=} \langle f^*(v) | f^*(v) \rangle = \|f^*(v)\|^2$ . Also  $f(v) = 0 \iff f^*(v) = 0$
- (ii) Es ist  $(\lambda - f)^* = (\bar{\lambda} - f^*)$  und mit  $f$  ist auch  $\lambda - f$  normal. Für  $v \in V$  folgt

$$\text{a) } \iff v \in \text{Kern}(\lambda - f) \stackrel{(i)}{\iff} v \in \text{Kern}(\bar{\lambda} - f^*) \iff \text{b) } \quad \square$$

### 13.5. Lemma

Sei  $f \in \text{End}_K(V)$ . Sei  $U \leq V$ . Dann ist  $U$  genau dann  $f$ -invariant, wenn  $U^\perp$   $f^*$ -invariant ist.

**Beweis**

Sei  $U$   $f$ -invariant. Sei  $w \in U^\perp$ . Für alle  $u \in U$  gilt dann

$$\langle f^*(w) | u \rangle = \langle \underset{\in U^\perp}{w} | \underset{\in U}{f(u)} \rangle = 0$$

Also  $f^*(w) \in U^\perp$ . Damit ist  $U^\perp$   $f^*$ -invariant. Wegen  $(f^*)^* = f$  und  $(U^\perp)^\perp = U$  gilt auch die Umkehrung.  $\square$

### 13.6. Lemma

Sei  $f \in \text{End}_K(V)$  normal und  $U \leq V$  invariant unter  $f$  und  $f^*$ . Dann  $U^\perp$  auch invariant unter  $f$  und  $f^*$ . Weiter ist  $f^*|_U = (f|_U)^*$  und  $f^*|_{U^\perp} = (f|_{U^\perp})^*$ . Insbesondere sind auch  $f|_U$  und  $f|_{U^\perp}$  normal.

#### Beweis

Für  $u, u' \in U$  ist

$$\langle (f|_U)^* u | u' \rangle = \langle u | f|_U(u') \rangle = \langle u | f(u') \rangle = \langle f^*(u) | u' \rangle = \langle f^*|_U(u) | u' \rangle$$

Also  $(f|_U)^* = f^*|_U$ . Genauso folgt  $(f|_{U^\perp})^* = f^*|_{U^\perp}$ .  $\square$

### 13.7. Spektralsatz

Sei  $f \in \text{End}_K(V)$  ein Endomorphismus, dessen charakteristisches Polynom über  $K$  vollständig in Linearfaktoren zerfällt. Dann sind äquivalent:

- (i)  $f$  ist normal
- (ii) Es gibt eine Orthonormalbasis aus Eigenvektoren von  $f$

#### Beweis

(i)  $\Rightarrow$  (ii): per Induktion nach  $n := \dim_K V$ .

$n = 0$ : Klar

$n - 1 \mapsto n$ : Da  $\chi_f$  zerfällt, gibt es einen Eigenwert  $\lambda \in K$  für  $f$ . Sei  $e_1 \in V$  ein zugehöriger Eigenvektor mit  $\|e_1\| = 1$ . Betrachte  $V = \langle e_1 \rangle \oplus \langle e_1 \rangle^\perp$ .  $\langle e_1 \rangle$  ist  $f$ -invariant. Sei  $v \in \langle e_1 \rangle^\perp$ . Dann gilt

$$\langle f(v) | e_1 \rangle = \langle v | f^*(e_1) \rangle \stackrel{13.4 \text{ ii)}}{=} \langle v | \bar{\lambda} e_1 \rangle = \lambda \langle v | e_1 \rangle = 0$$

Also  $f(v) \in \langle e_1 \rangle^\perp$ . Daher ist  $\langle e_1 \rangle^\perp$   $f$ -invariant. Es folgt

$$\chi_f = \chi_{(f|_{\langle e_1 \rangle})} \cdot \chi_{(f|_{\langle e_1 \rangle^\perp})}$$

Wegen (13.5) und (13.6) ist auch  $f|_{\langle e_1 \rangle^\perp}$  normal, da  $\chi_{(f|_{\langle e_1 \rangle^\perp})}$  dann auch in Linearfaktoren zerfällt. Daher gibt es nach Induktionsannahme eine Orthonormalbasis  $e_2, \dots, e_n$  von  $\langle e_1 \rangle^\perp$  aus Eigenvektoren von  $f|_{\langle e_1 \rangle^\perp}$ . Insgesamt ist  $e_1, \dots, e_n$  die gesuchte Orthonormalbasis.

(ii)  $\Rightarrow$  (i): Sei  $B$  eine Orthonormalbasis aus Eigenvektoren von  $f$ . Dann ist  $m_B^B(f)$  eine Diagonalmatrix. Wegen (12.18) ist auch

$$m_B^B(f^*) = \overline{m_B^B(f)}^t$$

eine Diagonalmatrix. Es folgt

$$m_B^B(f \circ f^*) = m_B^B(f) \cdot m_B^B(f^*) = m_B^B(f^*) \cdot m_B^B(f) = m_B^B(f^* \circ f)$$

und damit auch  $f \circ f^* = f^* \circ f$ .  $\square$

normale Endomorphismen sind diagonalisierbar, wenn  $\chi_f$  zerfällt



## 14. Moduln

### 14.1. Definition

Sei  $R$  ein Ring. Ein  **$R$ -Modul** ist eine Menge  $M$  zusammen mit zwei Abbildungen

$$\begin{aligned} M \times M &\rightarrow M, & (v, w) &\mapsto v + w \\ R \times M &\rightarrow M, & (r, v) &\mapsto r \cdot v \end{aligned}$$

Dabei müssen folgende Axiome erfüllt sein:

- (i)  $(M, +)$  ist eine abelsche Gruppe
- (ii)  $\forall r \in R, v, w \in M : r(v + w) = rv + rw$
- (iii)  $\forall r, s \in R, v \in M : (r + s)v = rv + sv$
- (iv)  $\forall r, s \in R, v \in M : (r \cdot s) \cdot v = r \cdot (s \cdot v)$
- (v)  $\forall v \in M : 1_R \cdot v = v$

### 14.2. Beispiel

- (1)  $K$  ein Körper:  $K$ -Modul =  $K$ -Vektorraum
- (2)  $\mathbb{Z}$ -Modul = abelsche Gruppe
- (3)  $I \subseteq R$  ist  $R$ -Modul  $\iff I$  Ideal
- (4) Sei  $V$  ein  $K$ -Vektorraum,  $f \in \text{End}_K(V)$ . Dann wird  $V$  zu einem  $K[X]$ -Modul durch:

$$p \cdot v := p(f)(v)$$

- (5)  $R^n = \left\{ \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \mid x_i \in R \right\}$  mit

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} x_1 + y_1 \\ \vdots \\ x_n + y_n \end{pmatrix} \quad r \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} rx_1 \\ \vdots \\ rx_n \end{pmatrix}$$

ist ein  $R$ -Modul.  $e_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, e_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}, \dots, e_n = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$  heißt **Standardbasis von  $R^n$**

### 14.3. Definition

Eine Teilmenge  $U$  eines  $R$ -Moduls  $M$  heißt ein **Untermodul**, falls gilt:

- (i)  $\forall r, w \in U : v + w \in U$
- (ii)  $\forall v \in U, r \in R : r \cdot v \in U$
- (iii)  $U \neq \emptyset$

#### 14.4. Definition

Sei  $U \leq V$  ein Untermodul. Dann heißt  $V/U := \{v + U \mid v \in V\}$  der **Quotientenmodul** von  $V$  nach  $U$ . Er wird durch  $(v + U) + (v' + U) := (v + v') + U$  und  $r \cdot (v + U) := (r \cdot v) + U$  zu einem  $R$ -Modul. Dabei steht  $v + U$  für die Menge  $\{v + u \mid u \in U\}$ . Dies ist auch die Äquivalenzklasse von  $v$  bezüglich  $x \sim y : \Leftrightarrow x - y \in U$ . Es gilt  $v + U = v' + U \iff v - v' \in U$ .

#### 14.5. Beispiel

Ist  $I \subseteq R$  ein Ideal in  $R$ , so ist  $R/I$  ein  $R$ -Modul. (Ist  $R$  kommutativ oder ist  $I$  ein **zweiseitiges Ideal**, so ist  $R/I$  ein Ring mit  $(r + I) \cdot (s + I) = r \cdot s + I$ )

#### 14.6. Definition

Sei  $M$  ein  $R$ -Modul und  $S \subseteq M$  eine Teilmenge. Dann heißt

$$\langle S \rangle_R = \langle S \rangle = \mathcal{L}(S) := \left\{ \sum_{i=1}^n r_i s_i \mid r_1, \dots, r_n \in R, s_1, \dots, s_n \in S \right\}$$

der von  $S$  **erzeugte** Untermodul. Ist  $\langle S \rangle = M$  so heißt  $S$  ein **Erzeugendensystem**. Besitzt  $M$  ein endliches Erzeugendensystem, so heißt  $M$  **endlich erzeugt**. Wird  $M$  von einem Element erzeugt, so heißt  $M$  **zyklisch**.

#### 14.7. Beispiel

Ist  $I \subseteq R$  ein Ideal, so erzeugt  $1 + I$  den  $R$ -Modul  $R/I$ . Insbesondere ist  $R/I$  zyklisch.

#### 14.8. Beispiel

$\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  wird als  $\mathbb{Z}$ -Modul von  $1 + n\mathbb{Z}$  erzeugt. Für jedes  $k \in \mathbb{Z}$  mit  $n \mid k$  ist  $k(1 + n\mathbb{Z}) = 0$ . Insbesondere ist  $1 + n\mathbb{Z}$  keine „Basis“ für  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$ .

#### 14.9. Definition

Eine Abbildung  $f : M \rightarrow N$  zwischen  $R$ -Moduln heißt  **$R$ -linear**, falls:

- (i)  $\forall r \in R, v \in M : f(r \cdot v) = r \cdot f(v)$
- (ii)  $\forall v, w \in M : f(v + w) = f(v) + f(w)$

$\text{Bild}(f) := \{f(v) \mid v \in M\} \subseteq N$  ist ein Untermodul.

$\text{Kern}(f) := \{v \mid f(v) = 0\} \subseteq M$  ist ein Untermodul.

#### 14.10. Bemerkung

$\text{Bild } f = N \iff f$  surjektiv.  $\text{Kern } f = 0 \iff f$  injektiv

#### 14.11. Definition

Sei  $f : M \rightarrow N$   $R$ -linear.

$$\text{Koker}(f) := N/\text{Bild}(f)$$

heißt der **Kokern** von  $f$ . Es gilt  $\text{Koker}(f) = 0 \iff f$  surjektiv.

### 14.12. Lemma

Ein  $R$ -Modul  $M$  ist genau dann endlich erzeugt, wenn es  $n \in \mathbb{N}$  und eine surjektive  $R$ -lineare Abbildung  $f : R^n \rightarrow M$  gibt.

#### Beweis

Ist  $f : R^n \rightarrow M$  surjektiv, so ist  $f(e_1), \dots, f(e_n)$  ein Erzeugendensystem von  $M$ . Ist umgekehrt  $s_1, \dots, s_n$  ein Erzeugendensystem von  $M$ , so definiert

$$f \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} := \sum_{i=1}^n x_i \cdot s_i$$

eine surjektive  $R$ -lineare Abbildung  $f : R^n \rightarrow M$ . □

### 14.13. Definition

$R$ -Module  $M$  und  $N$  heißen **isomorph**, falls es eine  $R$ -lineare bijektive Abbildung  $f : M \rightarrow N$  gibt. (So eine Abbildung heißt ein Isomorphismus). Wir schreiben  $M \cong N$ , falls  $M$  und  $N$  isomorph sind.

### 14.14. Bemerkung

- (i) Nicht jeder endlich erzeugte  $R$ -Modul ist isomorph zu  $R^n$  für geeignetes  $n$  (Beispiel:  $\mathbb{Z}/n\mathbb{Z}$  als  $\mathbb{Z}$ -Modul).

Nicht jedes endlich erzeugte  $R$ -Modul besitzt eine Basis

- (ii) Es gibt Ringe  $R$  mit  $R^n \cong R^m$  aber  $n \neq m$ .

### 14.15. Definition

Eine **kurze exakte Folge** von  $R$ -Moduln besteht aus  $R$ -linearen Abbildungen  $M_0 \xrightarrow{i} M_1 \xrightarrow{p} M_2$  wobei

- (i)  $i$  injektiv ist
- (ii)  $\text{Bild } i = \text{Kern } p$
- (iii)  $p$  surjektiv ist.

Bemerkung:

- (i) Ist  $M_1 = M_0 \oplus M_2$ , so ist  $M_0 \hookrightarrow M_0 \oplus M_2 \rightarrow M_2$   $x \mapsto (x, 0)$ ,  $(x, y) \mapsto y$
- (ii) Beispiel  $\mathbb{Z} \xrightarrow{i} \mathbb{Z} \xrightarrow{p} \mathbb{Z}/2\mathbb{Z}$
- (iii) oft schreibt man  $0 \rightarrow M_0 \rightarrow M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow 0$

### 14.16. Lemma

Sei  $M_0 \xrightarrow{i} M_1 \xrightarrow{p} M_2$  eine kurze exakte Folge von  $R$ -Moduln. Sind  $M_0$  und  $M_2$  endlich erzeugt, so ist auch  $M_1$  endlich erzeugt.

### Beweis

Seien  $\{s_1, \dots, s_n\} \subseteq M_2$  und  $\{t_1, \dots, t_m\} \subseteq M_0$  Erzeugendensysteme. Da  $p$  surjektiv ist, gibt es  $\{\tilde{s}_1, \dots, \tilde{s}_n\} \subseteq M_1$  mit  $p(\tilde{s}_i) = s_i$  für  $i = 1, \dots, n$ . Zu zeigen:  $\{\tilde{s}_1, \dots, \tilde{s}_n, i(t_1), \dots, i(t_m)\} \subseteq M_1$  ist ein Erzeugendensystem. Sei  $v \in M_1$ . Dann  $p(v) = \sum_{i=1}^n r_i \cdot s_i$ . Es ist

$$P\left(v - \sum_{i=1}^n r_i \cdot \tilde{s}_i\right) = p(v) - p\left(\sum_{i=1}^n r_i \cdot \tilde{s}_i\right) = p(v) - \sum_{i=1}^n r_i \cdot s_i = 0$$

Also  $v - \sum_{i=1}^n r_i \tilde{s}_i \in \text{Kern } p = \text{Bild } i$ . Sei  $w \in M_0$  mit  $i(w) = v - \sum_{i=1}^n r_i \tilde{s}_i$ . Nun ist  $w = \sum_{j=1}^m r'_j t_j$

$$\Rightarrow v = i(w) + \sum_{i=1}^n r_i \tilde{s}_i = \sum_{j=1}^m r'_j i(t_j) + \sum_{i=1}^n r_i \tilde{s}_i \quad \square$$

### 14.17. Satz

Sei  $R$  ein Hauptidealring und  $U \leq R^n$  ein Untermodul. Dann ist  $U$  endlich erzeugt.

#### Beweis

Induktion nach  $n$ :

**n=0:** Klar

**n=1:** Untermoduln von  $R$  sind genau die Ideale. Da  $R$  ein Hauptidealring ist, wird jedes Ideal von einem Element erzeugt.

**n  $\mapsto$  n+1:** Sei  $U \leq R^{n+1}$ . Betrachte  $p : R^{n+1} \rightarrow R$  mit  $p(x_1, \dots, x_{n+1}) := x_{n+1}$ . Wir erhalten eine kurze exakte Folge.

$$\begin{array}{ccccc} R^n \cong \text{Kern } p & \hookrightarrow & R^{n+1} & \xrightarrow{p} & R \\ & & \cup & & \cup \\ U \cap \text{Kern } p & \hookrightarrow & U & \rightarrow & p(U) \end{array} \quad \text{dann ist auch}$$

eine kurze exakte Folge. Nach Induktionsvoraussetzung bzw. dem Fall  $n = 1$  sind  $U \cap \text{Kern } p$  und  $p(U)$  endlich erzeugt. Mit 14.16 folgt, dass  $U$  endlich erzeugt ist.  $\square$

### 14.18. Satz

Sei  $R$  ein Hauptidealring und  $M$  ein endlich erzeugter  $R$ -Modul. Dann gibt es eine  $R$ -lineare Abbildung  $f : R^m \rightarrow R^n$  mit  $M \cong \text{Koker}(f) = R^n / \text{Bild } f$ .

#### Beweis

Da  $M$  endlich erzeugt ist, folgt mit (14.12):  $\exists p : R^n \rightarrow M$  surjektiv. Nun ist  $\text{Kern } p \subseteq R^n$  endlich erzeugt. Mit (14.12) folgt wieder:  $\exists \tilde{f} : R^m \rightarrow \text{Kern } p$  surjektiv. Wir erhalten also  $f : R^m \rightarrow R^n$  mit  $\text{Bild } f = \text{Kern } p$ . Nun ist  $f$  die gesuchte Abbildung. Ein Isomorphismus

$$\text{Koker}(f) = R^n / \text{Bild } f = R^n / \text{Kern}(p) \rightarrow M$$

$$\ni x + \text{Kern}(p) \mapsto p(x)$$

wird von  $p$  induziert.  $\square$

### 14.19. Bemerkung

Sei  $f : R^m \rightarrow R^n$  linear mit  $f(e_j) = \begin{pmatrix} a_{1j} \\ \vdots \\ a_{nj} \end{pmatrix} = \sum_{i=1}^n a_{ij} e_i$ . Dann gilt

$$f \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{pmatrix} = \sum_{j=1}^m x_j f(e_j) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_j a_{ij} e_i = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m x_j a_{ij} \right) \cdot e_i$$

Insbesondere werden  $R$ -lineare Abbildungen  $R^m \rightarrow R^n$  durch  $n \times m$ -Matrizen über  $R$  beschrieben:  
 $\text{Hom}_R(R^m, R^n) \cong R^{n \times m}$

### 14.20. Elementarmatrizen

I) für  $i \neq j, r \in R$

$$E(i, j; r) := \in R^{n \times m}$$

*hier fehlen noch die Matrizen ...*

II) Für  $i \neq j$

$$T(i, j) := \in R^{n \times m}$$

III) Für  $i \in \{1, \dots, n\}, u \in R^\times$

$$E(i; u) := \in R^{n \times m}$$

Wie über Körper sind diese Elementarmatrizen **invertierbar** und entsprechen elementaren Zeilen- bzw. Spaltenumformungen.

### 14.21. Lemma

Seien  $f_0, f_1 : R^m \rightarrow R^n$   $R$ -linear und  $\alpha : R^m \rightarrow R^m$  und  $\beta : R^n \rightarrow R^n$  Isomorphismen mit  $\beta \circ f_0 = f_1 \circ \alpha$ . Dann gilt

$$\text{Koker } f_0 \cong \text{Koker } f_1$$

#### Beweis

$R^m \xrightarrow{f_0} R^n \rightarrow \text{Koker } f_0 = R^n / \text{Bild } f_0 \xrightarrow{f_1} R^n \rightarrow \text{Koker}(f_1) = R^n / \text{Bild } f_1$  Definiere  $h : R^n / \text{Bild } f_0 \rightarrow$

$$\begin{array}{ccc} R^m & \xrightarrow{f_0} & R^n \longrightarrow \text{Koker}(f_0) = R^n / \text{Bild } f_0 \\ \downarrow \alpha & & \downarrow \beta \\ R^m & \xrightarrow{f_1} & R^n \longrightarrow \text{Koker}(f_1) = R^n / \text{Bild } f_1 \end{array}$$

Abbildung 8: Diagramm zum Beweis von (14.21)

$R^n / \text{Bild } f_1$  durch  $h(v + \text{Bild } f_0) := \beta(v) + \text{Bild } f_1$ . Wegen

$$\beta(\text{Bild } f_0) = f_1(\text{Bild } \alpha) \subseteq \text{Bild } f_1$$

ist dies wohldefiniert. Für  $w + \text{Bild } f_1$  ist  $h(\beta^{-1}(w) + \text{Bild } f_0) = w + \text{Bild } f_1$ , also  $h$  surjektiv. Ist  $v + \text{Bild } f_0$  mit  $h(v + \text{Bild } f_0) = 0$  so gilt:  $\exists w \in R^m$  mit  $\beta(v) = f_1(w)$ . Dann  $f_0(\alpha^{-1}(w)) = \beta^{-1}(f_1(w)) = v$ . Also  $v \in \text{Bild } f_0 \Rightarrow v + \text{Bild } f_0 = 0$ . Damit ist  $h$  auch injektiv.  $\square$

## 14.22. Korollar

Seien  $A_0, A_1 \in R^{n \times m}$ . Geht  $A_1$  aus  $A_0$  durch elementare Umformungen (Zeilen und Spalten) hervor, so gilt

$$\text{Koker } A_0 \cong \text{Koker } A_1$$

### Beweis

(14.20) + (14.21)

□

## 14.23. Satz

Sei  $R$  ein euklidischer Ring. Sei  $A \in R^{n \times m}$ . Dann gibt es eine Matrix

$$B = \begin{pmatrix} b_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & b_k & \\ 0 & & & 0 \end{pmatrix}$$

die aus  $A$  durch Zeilen- und Spaltenumformungen hervorgeht. Weiter können wir erreichen:  $b_1 \mid b_2, b_2 \mid b_3, \dots, b_{k-1} \mid b_k$ .

### Beweis

Sei  $\text{obdA } A \neq 0$ . Sei  $\mathfrak{M}$  die Menge aller Matrizen, die durch Zeilen- und Spaltenumformungen aus  $A$  hervorgehen und deren Eintrag an der Stelle  $(1, 1)$  nicht 0 ist. Sei  $B_1 \in \mathfrak{M}$  so dass  $b_1 := (1, 1)$ -Eintrag von  $B_1$  von minimalem Grad ist. Dann teilt  $b_1$  alle Einträge der ersten Zeile und der ersten Spalte, denn andernfalls könnten wir Division mit Rest und Zeilen/Spaltenumformungen benutzen um eine Matrix in  $\mathfrak{M}$  zu finden, deren  $(1, 1)$ -Eintrag von kleinerem Grad als  $b_1$  ist. Durch weitere Umformungen finden wir nun

$$\begin{pmatrix} b_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & B'_1 & & \\ 0 & & & \end{pmatrix} \in \mathfrak{M}$$

Indem wir das gleiche Verfahren auf  $B'_1$  anwenden, finden wir  $\begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ & B'_2 \end{pmatrix} \in \mathfrak{M}$ . Die Minimalität von  $b_1$  impliziert  $b_1 \mid b_2$ . Induktiv folgt die Behauptung. □

## 14.24. Bemerkung

Bis auf Multiplikation mit Einheiten sind die  $b_i$  in (14.23) eindeutig.

## 14.25. Satz

Sei  $R$  ein euklidischer Ring und  $M$  ein endlich erzeugtes  $R$ -Modul. Dann gibt es  $N \in \mathbb{N}_0$  und  $a_1, \dots, a_k \in R \setminus (\{0\} \cup R^\times)$  mit

$$M \cong R^N \oplus R/(a_1) \oplus \dots \oplus R/(a_k) \quad \text{und} \quad a_1 \mid a_2, a_2 \mid a_3, \dots, a_{k-1} \mid a_k$$

**Beweis**

Nach (14.18) gibt es  $f : R^m \rightarrow R^n$  mit  $M \cong \text{Koker } f$ . Nach (14.19) wird  $f$  durch  $A \in R^{n \times m}$  beschrieben, also  $M \cong \text{Koker } A$ . Wegen (14.22) und (14.23) können wir annehmen, dass

$$A = \begin{pmatrix} a_1 & & & 0 \\ & \ddots & & \\ & & a_k & \\ 0 & & & 0 \end{pmatrix}$$

ist. Dann ist  $\text{Koker } A \cong R/(a_1) \oplus \dots \oplus R/(a_k) \oplus R^{n-k}$ . Ist  $a_i = 0$ , so  $R/(a_i) \cong R$ . Ist  $a_i \in R^\times$ , so  $R/(a_i) = 0$ . Daher können wir annehmen, dass  $a_i \notin \{0\} \cup R^\times$  für alle  $i$ .  $\square$

**14.26. Beispiel**

Sei  $f : \mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \times \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$  definiert durch  $f(n + 6\mathbb{Z}) := (n + 2\mathbb{Z}, n + 3\mathbb{Z})$ . Ist  $n + 6\mathbb{Z} \in \text{Kern } f$ , so folgt  $2 \mid n$  und  $3 \mid n$ , also  $6 \mid n$ . Daher ist  $f$  injektiv. Da  $|\mathbb{Z}/6\mathbb{Z}| = 6 = 2 \cdot 3 = |\mathbb{Z}/2\mathbb{Z}| \cdot |\mathbb{Z}/3\mathbb{Z}|$  ist  $f$  auch surjektiv, also

$$\mathbb{Z}/6\mathbb{Z} \cong \mathbb{Z}/2\mathbb{Z} \oplus \mathbb{Z}/3\mathbb{Z}$$

**14.27. Klassifikationssatz für endlich erzeugte  $\mathbb{Z}$ -Moduln**

Sei  $M$  ein endlich erzeugtes  $\mathbb{Z}$ -Modul. Dann

$$M \cong \mathbb{Z}^d \oplus \mathbb{Z}/q_1\mathbb{Z} \oplus \dots \oplus \mathbb{Z}/q_l\mathbb{Z}$$

wobei die  $q_i$  Primzahlpotenzen sind. Weiter sind  $d$  und  $l$  eindeutig. Die  $q_i$  sind bis auf Umnummerierung auch eindeutig.

**14.28. Proposition**

Sei  $R$  ein Hauptidealring und  $c = a \cdot b$  wobei  $a$  und  $b$  teilerfremd sind. Dann  $R/(c) \cong R/(a) \oplus R/(b)$

**Beweis**

Betrachte  $f : R/(c) \rightarrow R/(a) \oplus R/(b)$  mit  $f(r + (c)) = (r + (a), r + (b))$ . Wie in Beispiel (14.26) ist  $f$  injektiv. Betrachte das Ideal  $I = \{ra + sb \mid r, s \in R\}$ . Da  $R$  ein Hauptidealring ist, ist  $I = (x)$  für ein geeignetes  $x \in I$ . Da  $a, b \in I$  teilt dann  $x$  sowohl  $a$  als auch  $b$ . Da  $a$  und  $b$  teilerfremd sind, ist  $x$  eine Einheit und  $I = R$ . Also gibt es  $r, s \in R$  mit  $1 = ra + sb$ . Nun ist

$$\begin{aligned} f(ra + (c)) &= (ra + (a), ra + (b)) = (0, 1) \\ f(sb + (c)) &= (sb + (a), sb + (b)) = (1, 0) \end{aligned}$$

Also  $f(xra + ysb + (c)) = (y + (a), x + (b))$ . Damit ist  $f$  auch surjektiv.  $\square$

## A. Ausblick in die Algebra

### A.1. Fundamentalsatz der Algebra

Jedes Polynom  $p \in \mathbb{C}[X]$ ,  $d(p) \geq 1$  hat eine Nullstelle.

Problem Finde die Nullstelle!

Beispiel:  $X^2 + aX + b = (X + \frac{a}{2})^2 - \frac{a^2}{4} + b$  Nullstelle mit  $pq$ -Formel

### A.2. Definition

$\leadsto$  Minimalpolynom  
von  $\alpha$

$\alpha \in \mathbb{C}$  heißt **algebraisch** (über  $\mathbb{Q}$ ), falls es  $p \in \mathbb{Q}[X]$ ,  $p \neq 0$  gibt mit  $p(\alpha) = 0$ .

Beispiel für algebraische Zahlen:  $\frac{3}{7}$ ,  $\sqrt{2}$ ,  $\sqrt{\sqrt[3]{7} + 25\sqrt[7]{3}}$

Können wir alle algebraischen Zahlen so hinschreiben?

### A.3. Definition

Sei  $p \in \mathbb{Q}[X]$ ,  $p \neq 0$  irreduzibel. Sei  $K \subseteq \mathbb{C}$  der kleinster Körper der alle Nullstellen von  $p$  enthält. Sei

$$\text{Gal}(p) := \{\sigma : K \rightarrow K \text{ ist Körperautomorphismus}\}$$

### A.4. Satz

Die Nullstellen von  $p$  lassen sich durch Wurzeln beschreiben  $\iff \text{Gal}(p)$  ist auflösbar.

### A.5. Konstruktion mit Zirkel und Lineal

Winkelteilung möglich, Winkeldreiteilung nicht möglich

Quadratur des Kreises ?

## B. Fragestunde

### B.1. Sind Linearfaktoren immer irreduzibel?


Sei  $R = K[X]$ .  $p = X - \alpha$   $\alpha \in K$ .  $p = a \cdot b$   $d(p) = 1 \iff d(a) + d(b) = 1$ . Also  $d(a) = 0$  oder  $d(b) = 0$   
 $\Rightarrow a \in K^\times$  oder  $b \in K^\times$ . Also sind Linearfaktoren irreduzibel

### B.2. Beispiel $\mathbb{Z}[X]$

$2X - 2$  ist nicht irreduzibel.  $2X - 2 = 2(X - 1)$



## Index

Die **Seitenzahlen** sind mit **Hyperlinks** zu den entsprechenden Seiten versehen, also anklickbar 

adjungierte Homomorphismus, 51  
affiner Unterraum, 9  
algebraisch, 62  
algebraisch abgeschlossen, 14

bilinear, 40

$\mathbb{C}$ -antilinear, 43  
charakteristische Polynom, 20

duale Abbildung, 49  
duale Basis, 49  
Dualraum, 49

Eigenwerte, 4, 18  
Einheit, 35  
Erzeugendensystem, 56  
euklidischer Ring, 36

$f$ -invariant, 11  
 $f$ -stabil, 11  
Funktor, 42

Gaußschen Zahlen, 38  
Gradfunktion, 36  
größter gemeinsamer Teiler, 15

Hauptideale, 36  
Hauptidealring, 36

Ideal, 35  
    erzeugtes, 35  
    kleinstes, 35  
induzierte Abbildung, 10  
Integritätsring, 36  
Invarianten, 18  
invertierbar, 59  
irreduzibel, 36  
Isometrie, 1, 2  
isomorph, 57

Jordankasten, 25  
    verallgemeinerter, 47  
Jordansche Normalform, 28

Kokern, 56  
Konjugationsklasse, 18

kurze exakte Folge, 57

Leitkoeffizienten, 12  
Linearfaktoren, 14

Matrix  
    Rang, 18  
    Spur, 18  
Minimalpolynom, 31

nilpotent, 23  
normal, 53  
Normalform, 18  
Nullstelle, 13

orthogonale Gruppe, 3  
Orthonormalbasis, 1

Parallelotop, 6  
Polynom, 12  
    Grad, 12  
    irreduzibel, 15  
    konstantes, 12  
    normiertes, 12

prim, 15, 36  
Projektion  
    orthogonale, 7

Quotientenabbildung, 9  
Quotientenmodul, 56  
Quotientenvektorraum, 10

$r$ -dimensional, 6  
 $R$ -linear, 56  
 $R$ -Modul, 55  
Richtung, 9  
Ringhomomorphismus, 33

spezielle orthogonale Gruppe, 3  
spezielle unitäre Gruppe, 3  
Standardbasis von  $R^n$ , 55  
strikte obere Dreiecksmatrix, 25  
Stufe, 23

Tensorprodukt, 40

unipotent, 30  
unitäre Gruppe, 3  
universelle Eigenschaft, 40  
Untermodul, 55

verallgemeinerte Eigenraum, 26

zweiseitiges Ideal, 56

zyklisch, 22, 56

## Abbildungsverzeichnis

1. Veranschaulichung von Elementen in $SO(2) \cdot S$	4
2. einfache Parallelotope in $\mathbb{R}^2$ bzw. $\mathbb{R}^3$	6
3. Parallelotop von Nicht-Standardvektoren in $\mathbb{R}^2$	6
4. Veranschaulichung von 2.4((4))	7
5. Veranschaulichung von Beispiel 2.5	7
6. Kommutierendes Diagramm zu Lemma 3.8	10
7. Beispiel eines nilpotenten Endomorphismus	26
8. Diagramm zum Beweis von (14.21)	59