

HALBEINFACHE UND NILPOTENTE ORBITEN

Jendrik Stelzner

Geboren am 1. September 1992 in Essen

24. Juli 2015

Bachelorarbeit Mathematik

Betreuerin: Prof. Dr. Catharina Stroppel

Zweitgutachter: Dr. Olaf Schnürer

MATHEMATISCHES INSTITUT

MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE FAKULTÄT DER
RHEINISCHEN FRIEDRICH-WILHELMS-UNIVERSITÄT BONN

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Ein wichtiges Hilfsmittel zur Untersuchung eines Endomorphismus $F \in \text{End}_{\mathbb{C}}(V)$ eines n -dimensionalen komplexen Vektorraum V ist seine Jordannormalform, durch die dieser als Summe $F = F_s + F_n$ eines diagonalisierbaren Endomorphismus F_s und nilpotenten Endomorphismus F_n geschrieben wird, so dass F_s und F_n kommutieren. Für eine endlichdimensionale komplexe, reductive Lie-Algebra \mathfrak{g} ergibt sich damit für jedes $X \in \mathfrak{g}$ eine analoge Zerlegung $X = X_s + X_n$, die abstrakte Jordanzerlegung, und damit auch ein Konzept halbeinfacher und nilpotenter Elemente.

Halbeinfache und nilpotente Elemente in \mathfrak{g} zeichnen sich dadurch aus, dass sie bezüglich der adjungierten Darstellung von \mathfrak{g} durch eine diagonalisierbare, bzw. nilpotente Derivation auf \mathfrak{g} wirken. Über diese Wirkungen lässt sich auch die Wirkung von X auf \mathfrak{g} verstehen, woraus wir anschließend Rückschlüsse auf X selbst ziehen können. Es ist daher begehrenswert, die halbeinfachen und nilpotenten Elemente in \mathfrak{g} möglichst gut zu verstehen.

Ein mögliches Idee hierfür ergibt sich aus der linearen Algebra: Statt den Endomorphismen in $\text{End}_{\mathbb{C}}(V)$ selbst betrachtet man dort ihre Konjugationsklassen unter $\text{GL}(V)$ und stellt diese durch ausgezeichnete Normalformen oder ausgewählte Parametrisierungen da. So lassen sich etwa die Konjugationsklassen der diagonalisierbarer Endomorphismen in $\text{End}_{\mathbb{C}}(V)$ durch \mathbb{C}^n/S_n parametrisieren, indem der Orbit $[(a_1, \dots, a_n)] \in \mathbb{C}^n/S_n$ die Konjugationsklasse der diagonalisierbaren Endomorphismen mit Eigenwerten a_1, \dots, a_n repräsentiert. Identifiziert man zusätzlich $\mathfrak{gl}(V)$ mit $\mathfrak{gl}_n(k)$, so ergeben sich die Diagonalmatrizen als Normalform der diagonalisierbaren Elemente. Die nilpotenten Elemente lassen sich in ähnlicher Weise über ihre Jordannormalform verstehen.

Es ist nun naheliegend, dieses Verfahren für die abstrakte Lie-Algebra \mathfrak{g} zu verallgemeinern. Hierfür benötigen wir eine Gruppenwirkung auf \mathfrak{g} , sowie Repräsentantensysteme für die halbeinfachen und nilpotenten Elemente. Für die halbeinfachen Elemente etwa ist es als typische Verallgemeinerung der Diagonalmatrizen naheliegend, eine Cartan-Unteralgebra zu betrachten. Mit diesem Gedanken im Hinterkopf zeigen wir in Kapitel 2, dass sich die Klassifikation der Konjugationsklassen diagonalisierbarer Endomorphismen aus $\text{End}_{\mathbb{C}}(V)$ durch die Wahl einer passenden Gruppenwirkung auf \mathfrak{g} und einer beliebigen Cartan-Unteralgebra von \mathfrak{g} direkt zu einer Klassifikation der G -Orbiten halbeinfacher Elemente in \mathfrak{g} verallgemeinert. Dabei orientieren wir uns in unserem Vorgehen an [?].

Das Problem an dieser Verallgemeinerung besteht darin, dass die Wahl einer Gruppenwirkung und einer Cartan-Unteralgebra erfordert, und es für diese im Allgemeinen keine ausgezeichneten Kandidaten gibt. Betrachten wir statt einer abstrakten Lie-Algebra \mathfrak{g} aber konkrete Beispiele, wie etwa $\mathfrak{gl}_n(k)$, $\mathfrak{so}_n(k)$ oder $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$, so ergibt sich häufig eine naheliegende Gruppenwirkung. Für $\mathfrak{gl}_n(k)$ etwa haben wir die Konjugati-

onswirkung durch $GL_n(k)$, für $\mathfrak{so}_n(k)$ die Konjugationswirkung durch die orthogonale Gruppe $O_n(k)$ oder spezielle orthogonale Gruppe $SO_n(k)$ und für $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ die Konjugationswirkung durch die symplektische $Sp_{2n}(k)$. Als Anwendung der in Kapitel 2 entwickelten Klassifikation bestimmen wir daher in Kapitel 3 die Orbits halbeinfacher Elemente in diesen Lie-Algebren unter den obigen Gruppenwirkungen. Im Vergleich zu der Parametrisierung k^n/S_n für die Konjugationsklassen diagonalisierbarer Endomorphismen in $\mathfrak{gl}(V)$ erhalten wir dabei für die Orbits in $\mathfrak{so}_n(k)$ und $\mathfrak{sp}_n(k)$ Parametrisierungen der Formen $k^n/(\mathbb{Z}_2^n \rtimes S_n)$ und $k^n/(\mathbb{Z}_2^{n-1} \rtimes S_n)$.

Als eine Verallgemeinerung der Klassifikation von Konjugationsklassen nilpotenter Endomorphismen in $\text{End}_{\mathbb{C}}(V)$ mithilfe der Jordannormalform, leiten wir schließlich in Kapitel ?? aus den Wundern der \mathfrak{sl}_2 -Theorie eine Klassifikation der Orbits nilpotenter Elemente in \mathfrak{g} her, auch hier bezüglich passender Gruppenwirkungen. Auch hierbei orientieren wir uns an [?].

Dabei besteht der Anspruch dieser Arbeit nicht in einer inhaltlichen Neuerung, sondern an einer der genutzten Methoden. Statt den Problemen mit der abstrakten Maschinerie der Lie-Gruppen zu begegnen, wie es etwa in [?] geschieht, behandeln wir sie mit den grundlegenden Konzepten der linearen Algebra sowie einem gewissen Grundwissen der Darstellungstheorie komplexer Lie-Algebren. Ein entscheidender Teil der Arbeit liegt dabei in dem Berechnen konkreter Beispiele und der damit verbundenen Veranschaulichung der entwickelten Methoden.

Mein Dank gilt zunächst Prof. Catharina Stroppel, die mich auf das Thema dieser Arbeit aufmerksam gemacht hat, und mich während des Erstellens der Arbeit begleitet hat. Ich danke außerdem meinen Kommilitonen Mark Pedron und Chiara Mazziotta für das Probelesen dieser Arbeit und ihre ständigen Verbesserungsvorschläge.

1 Vorbereitung

In diesem Kapitel erinnern wir an einige der benötigten Grundlagen aus der Theorie der Lie-Algebren und entwickeln vorbereitende Ergebnisse, die wir in den folgenden Kapiteln anwenden.

Dabei bewegen wir uns in diesem, sowie in allen weiteren Kapiteln, stets über einem algebraisch abgeschlossenen Körper k der Charakteristik 0. Alle von uns betrachteten Lie-Algebren und Vektorräume befinden sich dabei, sofern nicht anders angegeben, über diesem Grundkörper k , und mit einer Lie-Algebra meinen wir stets eine endlich-dimensionale Lie-Algebra.

1.1 Notationen und Grundlagen

Dieser Abschnitt dient in erster Linie zur Einführung von Notationen. In Folge dessen erinnern wir an einige grundlegende Aussagen der Theorie endlichdimensionaler Lie-Algebren, die aber ansonsten als bekannt vorausgesetzt werden. Sofern benötigt finden sich die entsprechenden Details in [?, §1 – §3].

1.1.1 Grundlegende Begriffe

Mit \mathbb{Z} bezeichnen wir die Menge der ganzen Zahlen, mit $\mathbb{N} = \mathbb{Z}_{\geq 0}$ die Menge der nicht-negativen ganzen Zahlen, und mit \mathbb{Q} die Menge der rationalen Zahlen. Mit \mathbb{Z}_2 bezeichnen wir die multiplikative Gruppe mit zwei Elementen, und wir realisieren diese als Untergruppe $\{1, -1\} \subseteq k^\times$. Mit $\delta_{i,j} = \delta(i, j)$ bezeichnen wir das Kronecker-Delta.

Für $n \in \mathbb{N}_{>0}$ bezeichnet $M_n(k)$ den Vektorraum der $(n \times n)$ -Matrizen über k . Für $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in k$ seien

$$\text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) := \begin{pmatrix} \lambda_1 & & \\ & \ddots & \\ & & \lambda_n \end{pmatrix} \in M_n(k)$$

sowie

$$\text{adiag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) := \begin{pmatrix} & & \lambda_1 \\ & \ddots & \\ \lambda_n & & \end{pmatrix} \in M_n(k).$$

Insbesondere seien

$$I_n := \text{diag}(1, \dots, 1) \in M_n(k) \quad \text{und} \quad J_n := \text{adiag}(1, \dots, 1) \in M_n(k).$$

Sofern ausreichend klar ist, um welche Größe n es sich handelt, schreiben wir auch nur I und J . Eine Diagonalmatrix heißt *regulär*, falls ihre Diagonaleinträge paarweise verschieden sind.

Für $n \in \mathbb{N}_{>0}$ bezeichnet $D_n(k) \subseteq GL_n(k)$ die Untergruppe der invertierbaren Diagonalmatrizen und $P_n(k) \subseteq GL_n(k)$ die Untergruppe der Permutationsmatrizen. Eine *Monomialmatrix* ist eine Matrix $S \in M_n(k)$, die in jeder Zeile und jeder Spalte genau einen Eintrag hat, der verschieden von 0 ist. Monomialmatrizen sind invertierbar und bilden eine Untergruppe $\text{Mon}_n(k) \subseteq GL_n(k)$. Es sind $D_n(k), P_n(k) \subseteq \text{Mon}_n(k)$ mit

$$\text{Mon}_n(k) = D_n(k) \rtimes P_n(k),$$

wobei \rtimes das innere semidirekte Produkt mit Normalteiler auf der linken Seite bezeichnet. Diese Zerlegung entspricht einer kurzen exakten Sequenz

$$0 \rightarrow D_n(k) \rightarrow \text{Mon}_n(k) \rightarrow P_n(k) \rightarrow 0$$

mit Schnitt $P_n(k) \hookrightarrow \text{Mon}_n(k)$.

Für einen Vektorraum V bezeichnet $GL(V)$ die Gruppe der k -linearen Automorphismen von V und $SL(V) = \{\phi \in GL(V) \mid \det \phi = 1\}$ die k -linearen Automorphismen von Determinante 1. Ferner bezeichnet $\mathfrak{gl}(V)$ die *lineare Lie-Algebra über V* , d.h. der Vektorraum $\text{End}_k(V)$ zusammen mit dem Kommutator

$$[f, g] = f \circ g - g \circ f \quad \text{für alle } f, g \in \text{End}_k(V)$$

als Lie-Klammer, und $\mathfrak{sl}(V) \subseteq \mathfrak{gl}(V)$ die Unteralgebra der spurlosen Endomorphismen.

Ein *Homomorphismus* $\mathfrak{g}_1 \rightarrow \mathfrak{g}_2$ zwischen Lie-Algebren \mathfrak{g}_1 und \mathfrak{g}_2 meint stets einen Homomorphismus von Lie-Algebren. Für eine Lie-Algebra \mathfrak{g} bezeichnet $\text{Aut } \mathfrak{g}$ die Gruppe der Lie-Algebra-Automorphismen von \mathfrak{g} , d.h.

$$\text{Aut } \mathfrak{g} = \{\phi \in GL(\mathfrak{g}) \mid \phi \text{ ist ein Homomorphismus}\}.$$

Mit einer *Unteralgebra* von \mathfrak{g} meinen wir stets eine Lie-Unteralgebra.

Die *adjungierte Darstellung* von \mathfrak{g} ist der Homomorphismus

$$\text{ad}_{\mathfrak{g}} : \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{gl}(\mathfrak{g}), \quad X \mapsto (Y \mapsto [X, Y]).$$

$\text{ad}_{\mathfrak{g}} X$ ist nach der Jacobi-Identität für alle $X \in \mathfrak{g}$ eine *Derivation* von \mathfrak{g} , d.h.

$$(\text{ad}_{\mathfrak{g}} X)[Y, Z] = [(\text{ad}_{\mathfrak{g}} X)(Y), Z] + [Y, (\text{ad}_{\mathfrak{g}} X)(Z)] \quad \text{für alle } X, Y, Z \in \mathfrak{g}.$$

Sofern ausreichend klar ist, über welcher Lie-Algebra \mathfrak{g} wir uns bewegen, schreiben wir auch nur ad anstelle von $\text{ad}_{\mathfrak{g}}$.

Für $n \in \mathbb{N}_{>0}$ bezeichnet $\mathfrak{gl}_n(k)$ bezeichnet die *allgemeine lineare Lie-Algebra*, also den Vektorraum $M_n(k)$ zusammen mit dem Kommutator

$$[A, B] = AB - BA \quad \text{für alle } A, B \in M_n(k)$$

als Lie-Klammer. Außerdem bezeichnet $\mathfrak{sl}_n(k) \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ die *spezielle lineare Lie-Algebra*, d.h. die Unteralgebra der spurlosen Matrizen. Es bezeichnet $\mathfrak{d}_n(k) \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$

die Unteralgebra der Diagonalmatrizen, $\mathfrak{t}_n(k) \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ die Unteralgebra der oberen Dreiecksmatrizen und $\mathfrak{n}_n(k) \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ die Unteralgebra der echten oberen Dreiecksmatrizen.

Das *Zentrum* einer Lie-Algebra \mathfrak{g} ist

$$Z(\mathfrak{g}) := \{X \in \mathfrak{g} \mid [X, Y] = 0 \text{ für alle } Y \in \mathfrak{g}\} = \ker \operatorname{ad}_{\mathfrak{g}}$$

und bildet ein Ideal in \mathfrak{g} . Für zwei Teilmengen $I, J \subseteq \mathfrak{g}$ ist

$$[I, J] := \operatorname{span}_k\{[X, Y] \mid X \in I, Y \in J\}.$$

Für Ideale I und J in \mathfrak{g} ist nach der Jacobi-Identität auch $[I, J]$ ein Ideal in \mathfrak{g} . Für $S \subseteq \mathfrak{g}$ ist

$$Z_{\mathfrak{g}}(S) := \{Y \in \mathfrak{g} \mid [X, Y] = 0 \text{ für alle } X \in S\}$$

der *Zentralisator* von S in \mathfrak{g} , und für ein Element $X \in \mathfrak{g}$ ist

$$\mathfrak{g}^X := Z_{\mathfrak{g}}(X) := Z_{\mathfrak{g}}(\{X\}) = \{Y \in \mathfrak{g} \mid [X, Y] = 0\}.$$

der *Zentralisator* von X in \mathfrak{g} . Nach der Jacobi-Identität ist \mathfrak{g}^X für alle $X \in \mathfrak{g}$ eine Unteralgebra von \mathfrak{g} und somit auch $Z_{\mathfrak{g}}(S) = \bigcap_{X \in S} \mathfrak{g}^X$ für alle $S \subseteq \mathfrak{g}$.

Die *Killing-Form* $\kappa_{\mathfrak{g}}: \mathfrak{g} \times \mathfrak{g} \rightarrow k$ einer Lie-Algebra \mathfrak{g} ist definiert als

$$\kappa_{\mathfrak{g}}(X, Y) := \operatorname{tr}(\operatorname{ad}_{\mathfrak{g}} X \operatorname{ad}_{\mathfrak{g}} Y) \quad \text{für alle } X, Y \in \mathfrak{g}.$$

Die Killing-Form ist eine symmetrische Bilinearform, und in dem Sinne *assoziativ*, dass

$$\kappa_{\mathfrak{g}}(X, [Y, Z]) = \kappa_{\mathfrak{g}}([X, Y], Z) \quad \text{für alle } X, Y, Z \in \mathfrak{g}.$$

Sofern ausreichend klar ist, über welcher Lie-Algebra \mathfrak{g} wir uns bewegen, schreiben wir auch nur κ statt $\kappa_{\mathfrak{g}}$.

Eine Lie-Algebra \mathfrak{g} heißt *einfach*, falls sie nicht abelsch ist, und genau zwei Ideale enthält. Diese sind dann notwendigerweise 0 und \mathfrak{g} selbst, mit $\mathfrak{g} \neq 0$. Ein Ideal $I \subseteq \mathfrak{g}$ heißt einfach, wenn es zusammen mit der Einschränkung der Lie-Klammer von \mathfrak{g} eine einfache Lie-Algebra ist.

Das *Radikal* von \mathfrak{g} ist das eindeutige maximale auflösbare Ideal von \mathfrak{g} , und wird mit $\operatorname{rad} \mathfrak{g}$ bezeichnet. Eine Lie-Algebra \mathfrak{g} heißt *halbeinfach* falls eine, und damit alle, der folgenden äquivalenten Bedingungen erfüllt ist.

1. $\operatorname{rad} \mathfrak{g} = 0$,
2. $\mathfrak{g} = I_1 \oplus \cdots \oplus I_n$ für einfache Ideale $I_1, \dots, I_n \subseteq \mathfrak{g}$,
3. $\kappa_{\mathfrak{g}}$ ist nicht-entartet.

Ist \mathfrak{g} halbeinfach, so ist $Z(\mathfrak{g}) = 0$ und $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] = \mathfrak{g}$. Siehe [?, §5.1, §5.2] für die entsprechenden Beweise.

$\mathfrak{sl}_n(k)$ ist für alle $n \geq 1$ einfach, und damit insbesondere halbeinfach, und die *triviale Lie-Algebra* 0 ist ebenfalls halbeinfach. Bis auf Isomorphie gibt es genau eine

eindimensionale Lie-Algebra sowie zwei zweidimensional Lie-Algebren, und diese sind alle auflösbar; daher ist jede halbeinfache, nicht-triviale Lie-Algebra mindestens dreidimensional.

Eine *Darstellung* einer Lie-Algebra \mathfrak{g} ist ein Vektorraum V zusammen mit einem Homomorphismus $\rho: \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{gl}(V)$. Eine \mathfrak{g} -*Modulstruktur* auf V ist eine bilineare Abbildung $M: \mathfrak{g} \times V \rightarrow V, (X, v) \mapsto X \cdot v$, für die

$$[X, Y] \cdot v = X \cdot (Y \cdot v) - Y \cdot (X \cdot v) \quad \text{für alle } X, Y \in \mathfrak{g} \text{ und } v \in V. \quad (1)$$

Darstellungen von \mathfrak{g} und \mathfrak{g} -Moduln sind in dem Sinne äquivalent, dass es für jeden Vektorraum V eine Bijektion

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho: \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{gl}(V) \\ \left| \begin{array}{l} \rho \text{ ist ein Ho-} \\ \text{morphismus} \end{array} \right. \end{array} \right\} \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} M: \mathfrak{g} \times V \rightarrow V, \\ (X, v) \mapsto X \cdot v \\ \left| \begin{array}{l} \Phi \text{ erfüllt (1)} \end{array} \right. \end{array} \right\}$$

$$\rho \mapsto ((X, v) \mapsto \rho(X)(v))$$

$$(X \mapsto (v \mapsto X \cdot v)) \leftarrow M$$

gibt. Wir werden daher im Folgenden nicht zwischen den beiden Konzepten unterscheiden.

Ein grundlegendes Resultat über die Darstellungstheorie halbeinfache Lie-Algebren ist der Satz von Weyl, ein Beweis findet sich in [?, §6.3].

Theorem 1.1 (Weyl). *Ist \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra und V eine endlichdimensionale Darstellung, so ist V halbeinfach, d.h. V ist die direkte Summe von irreduziblen Unterdarstellungen.*

1.1.2 Lie-Algebra einer Bilinearform

Definition 1.2. Ist V ein Vektorraum und $\beta: V \times V \rightarrow k$ eine Bilinearform, so seien

$$\mathfrak{o}(V, \beta) := \{f \in \mathfrak{gl}(V) \mid \beta(f(v), w) + \beta(v, f(w)) = 0 \text{ für alle } v, w \in V\},$$

und

$$\mathfrak{O}(V, \beta) := \{\phi \in \text{GL}(V) \mid \beta(\phi(v), \phi(w)) = \beta(v, w) \text{ für alle } v, w \in V\}.$$

Ist $B \in M_n(k)$, so seien

$$\mathfrak{o}(B) := \{A \in \mathfrak{gl}_n(k) \mid A^\top B + BA = 0\}$$

und

$$\mathfrak{O}(B) := \{S \in \text{GL}_n(k) \mid S^\top B S = B\}.$$

Bemerkung 1.3. Ist W eine Darstellung einer Lie-Algebra \mathfrak{g} , so ist auch W^* ein Darstellung von \mathfrak{g} vermöge

$$(X \cdot \varphi)(w) = -\varphi(X \cdot w) \quad \text{für alle } X \in \mathfrak{g}, \varphi \in W^* \text{ und } w \in W,$$

und sind W_1 und W_2 Darstellungen von \mathfrak{g} , so ist auch $W_1 \otimes_k W_2$ eine Darstellung von \mathfrak{g} vermöge

$$X \cdot (w_1 \otimes w_2) = (X \cdot w_1) \otimes w_2 + w_1 \otimes (X \cdot w_2) \quad \text{für alle } X \in \mathfrak{g}, w_1 \in W_1 \text{ und } w_2 \in W_2.$$

In der Situation von Definition 1.2 trägt V eine naheliegende $\mathfrak{gl}(V)$ -Modulstruktur, über die auch $(V \otimes_k V)^*$ in obiger Weise eine Darstellung von \mathfrak{g} ist. Betrachten wir β als ein Element von $(V \otimes_k V)^*$, so gilt

$$\mathfrak{o}(V, \beta) = \{f \in \mathfrak{gl}(V) \mid f \cdot \beta = 0\}.$$

Ist V ein Vektorraum mit Bilinearform $\beta: V \times V \rightarrow k$, so wirkt $O(V, \beta)$ durch Konjugations auf $\mathfrak{o}(V, \beta)$, und für alle $B \in M_n(k)$ wirkt $O(B)$ per Konjugation auf $\mathfrak{o}(B)$.

Ist V zusätzlich endlichdimensional mit Basis $\mathcal{B} = (v_1, \dots, v_n)$, so wird β bezüglich \mathcal{B} durch eine Matrix $B \in M_n(k)$ dargestellt. Durch \mathcal{B} ergibt sich ein Isomorphismus $\Phi_{\mathcal{B}}: \mathfrak{gl}(V) \rightarrow \mathfrak{gl}_n(k)$, der jedem Endomorphismus seine darstellende Matrix bezüglich \mathcal{B} zuordnet. Unter diesem Endomorphismus korrespondieren die Unteralgebren $\mathfrak{o}(V, \beta)$ und $\mathfrak{o}(B)$, und unter dem induzierten Isomorphismus $\phi_{\mathcal{B}}: GL(V) \rightarrow GL_n(k)$ korrespondiert $O(V, \beta)$ zu $O(B)$.

Die Konjugationswirkung von $O(V, \beta)$ auf $\mathfrak{o}(V, \beta)$ und die Konjugationswirkung von $O(B)$ auf $\mathfrak{o}(B)$ sind mit den obigen Isomorphismen $\Phi_{\mathcal{B}}$ und $\phi_{\mathcal{B}}$ in dem Sinne verträglich, dass

$$\phi_{\mathcal{B}}(s) \cdot \Phi_{\mathcal{B}}(f) = \phi_{\mathcal{B}}(s \cdot f) \quad \text{für alle } s \in G(V, \beta) \text{ und } f \in \mathfrak{o}(V, \beta).$$

Ist $\mathcal{C} = (w_1, \dots, w_n)$ eine weitere Basis von V , so wird β bezüglich \mathcal{C} durch eine Matrix $C \in M_n(k)$ beschrieben. Der Basiswechsel von \mathcal{B} nach \mathcal{C} induziert einen Isomorphismus von Lie-Algebren

$$\Phi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} := \Phi_{\mathcal{C}} \Phi_{\mathcal{B}}^{-1}: \mathfrak{o}(B) \rightarrow \mathfrak{o}(C), \quad A \mapsto \Gamma A \Gamma^{-1}$$

und einen Isomorphismus von Gruppen

$$\phi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}} := \phi_{\mathcal{C}} \phi_{\mathcal{B}}^{-1}: O(B) \rightarrow O(C), \quad S \mapsto \Gamma S \Gamma^{-1},$$

wobei $\Gamma \in M_n(k)$ die Basiswechselmatrix von \mathcal{B} nach \mathcal{C} bezeichnet (d.h. die i -te Spalte von Γ sind die Koordinaten von v_i bezüglich \mathcal{C}). Auch $\Phi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ und $\phi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}$ sind mit der Konjugationswirkung verträglich in dem Sinne mit, dass

$$\phi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(S) \cdot \Phi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(A) = \Phi_{\mathcal{C}}^{\mathcal{B}}(S \cdot A) \quad \text{für alle } S \in O(B) \text{ und } A \in \mathfrak{o}(B).$$

Ein Beweis der folgenden Proposition findet sich in [?, S. 301].

Proposition 1.4. *Es sei V ein n -dimensionaler Vektorraum und β eine nicht-entartete, symmetrische oder alternierende Bilinearform auf V . Ist $n = 2$ und β symmetrisch, so ist $\mathfrak{o}(V, \beta)$ eindimensional und damit abelsch. Ansonsten ist $\mathfrak{o}(V, \beta)$ halbeinfach.*

Korollar 1.5. *Es sei $B \in M_n(k)$ invertierbar, sowie symmetrisch oder schief-symmetrisch. Ist $n = 2$ und B symmetrisch, so ist $\mathfrak{o}(B)$ eindimensional und damit abelsch. Ansonsten ist $\mathfrak{o}(B)$ halbeinfach.*

Beispiel 1.6. 1. Für die Einheitsmatrix $I \in M_n(k)$ ist

$$\mathfrak{so}_n(k) := \mathfrak{o}(I) = \{A \in M_n(k) \mid A^\top = -A\}.$$

Es ist $\mathfrak{so}_1(k) = 0$, $\mathfrak{so}_2(k)$ ist eindimensional und abelsch, und für $n \geq 3$ ist $\mathfrak{so}_n(k)$ halbeinfach.

2. Für

$$\Omega = \begin{pmatrix} & I_n \\ -I_n & \end{pmatrix} \in M_{2n}(k)$$

ist

$$\mathfrak{sp}_{2n}(k) := \mathfrak{o}(\Omega) = \{A \in M_{2n}(k) \mid A^\top \Omega + \Omega A = 0\}$$

für alle $n \geq 1$ halbeinfach. Durch eine Zerlegung in $(n \times n)$ -Blockmatrizen ergibt sich, dass für alle $n \geq 1$

$$\mathfrak{sp}_{2n}(k) = \left\{ \begin{pmatrix} P & Q \\ R & -P^\top \end{pmatrix} \mid P, Q, R \in M_n(k), Q^\top = Q, R^\top = R \right\}.$$

Wir führen noch die folgende Notation ein: Ist $B \in M_n(k)$, so ist

$$\mathrm{SO}(B) := \{T \in \mathrm{O}(B) \mid \det T = 1\}.$$

1.2 Jordanzerlegung

In diesem Abschnitt wiederholen wir die grundlegende Theorie der Jordanzerlegung in halbeinfachen Lie-Algebren, wobei wir zunächst an die Jordanzerlegung von Endomorphismen erinnern.

Definition 1.7. Es sei V ein endlichdimensionaler Vektorraum. Ein Endomorphismus $X \in \mathrm{End}_k(V)$ heißt *halbeinfach*, wenn er diagonalisierbar ist.

Bemerkung 1.8. Wegen der algebraischen Abgeschlossenheit von k ist $X \in \mathrm{End}_k(V)$ ist genau dann halbeinfach, wenn jeder X -invariante Untervektorraum ein X -invariantes direktes Komplement besitzt.

Die Jordanzerlegung eines Endomorphismus $X \in \mathrm{End}_k(V)$ schreibt diesen als Summe eines halbeinfachen Endomorphismus $X_s \in \mathrm{End}_k(V)$ und eines nilpotenten Endomorphismus $X_n \in \mathrm{End}_k(V)$. Ein Beweis findet sich in [?, §4.2].

Proposition 1.9 (Konkrete Jordanzerlegung). *Es sei V ein endlichdimensionaler Vektorraum und $X \in \mathrm{End}_k(V)$.*

1. *Es gibt eindeutige $X_s, X_n \in \mathrm{End}_k(V)$, so dass die folgenden Bedingungen erfüllt sind:*

- a) $X = X_s + X_n$.
- b) X_s ist halbeinfach und X_n nilpotent.

- c) X_s und X_n kommutieren.
2. Es gibt Polynome $P, Q \in k[T]$ mit $P(0) = Q(0) = 0$, so dass $X_s = P(X)$ und $X_n = Q(X)$. Insbesondere kommutiert $Y \in \text{End}_k(V)$ genau dann mit X , wenn Y mit X_s und X_n kommutiert.
3. Für Untervektorräume $U \subseteq W \subseteq V$ mit $X(W) \subseteq U$ ist auch $X_s(W) \subseteq U$ und $X_n(W) \subseteq U$.

Definition 1.10. Ist $X \in \text{End}_k(V)$, so heißt die Zerlegung $X = X_s + X_n$ aus Proposition 1.9 die *konkrete Jordanzerlegung* von X . Dabei ist X_s der *halbeinfache Teil* von X und X_n der *nilpotente Teil* von X . Ist $X = X_s$, also X halbeinfach, so heißt X auch *konkret halbeinfach*, und ist $X = X_n$, also X nilpotent, so heißt X auch *konkret nilpotent*.

Bemerkung 1.11. Analog zu Definition 1.7 sind halbeinfache Elemente in $M_n(k)$ definiert, und Proposition 1.9, sowie die daraus resultierende konkrete Jordanzerlegung aus Definition 1.10, verallgemeinern sich ebenso auf $M_n(k)$.

Wir wollen das Konzept eines halbeinfachen, bzw. nilpotenten Elementes auf Lie-Algebren verallgemeinern, wobei wir uns zunächst auf halbeinfache Lie-Algebren beschränken. Entscheidend hierfür ist der Begriff eines ad-halbeinfachen, bzw. ad-nilpotenten Elementes.

Definition 1.12. Ein Element X einer Lie-Algebra \mathfrak{g} heißt *ad-halbeinfach*, bzw. *ad-nilpotent*, falls $\text{ad } X$ halbeinfach, bzw. nilpotent ist.

Beispiel 1.13. Es sei $\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{gl}(V)$ eine lineare Lie-Algebra.

Ist $X \in \mathfrak{g}$ halbeinfach, so ist X auch ad-halbeinfach. Um dies zu sehen sei (v_1, \dots, v_n) eine Basis von V aus Eigenvektoren von X , wobei v_i ein Eigenvektor zum Eigenwert λ_i ist. Dann ist $(E_{ij})_{i,j=1,\dots,n}$ mit

$$E_{ij}(v_k) = \delta_{jk}v_i \quad \text{für alle } k = 1, \dots, n$$

eine Basis von $\mathfrak{gl}(V)$. Für alle $i, j, k = 1, \dots, n$ ist

$$\begin{aligned} [X, E_{ij}](v_k) &= XE_{ij}(v_k) - E_{ij}X(v_k) = \delta_{jk}X(v_i) - \lambda_k E_{ij}(v_k) \\ &= \lambda_i \delta_{jk}v_i - \lambda_k \delta_{jk}v_i = (\lambda_i - \lambda_k) \delta_{jk}v_i \\ &= (\lambda_i - \lambda_j) \delta_{jk}v_i = (\lambda_i - \lambda_j) E_{ij}(v_k), \end{aligned}$$

und somit

$$[X, E_{ij}] = (\lambda_i - \lambda_j) E_{ij} \quad \text{für alle } i, j = 1, \dots, n.$$

Also ist $\text{ad}_{\mathfrak{gl}(V)} X \in \text{End}_k(\mathfrak{gl}(V))$ halbeinfach, und somit auch $\text{ad}_{\mathfrak{g}} X = (\text{ad}_{\mathfrak{gl}(V)} X)|_{\mathfrak{g}}$.

Ist $X \in \mathfrak{g}$ nilpotent, so ist X auch ad-nilpotent. Es ist nämlich $\text{ad}_{\mathfrak{gl}(V)} X = \lambda_X - \rho_{-X}$, wobei λ_X die Linksmultiplikation mit X bezeichnet und ρ_{-X} die Rechtsmultiplikation mit $-X$. Da X nilpotent ist, sind es auch λ_X und ρ_{-X} . Da λ_X und ρ_{-X} kommutieren ist damit auch $\text{ad}_{\mathfrak{gl}(V)} X$ nilpotent. Also ist $\text{ad}_{\mathfrak{g}} X = (\text{ad}_{\mathfrak{gl}(V)} X)|_{\mathfrak{g}}$ nilpotent.

Analog ergibt sich für eine Unteralgebra $\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$, dass halbeinfache $X \in \mathfrak{g}$ ebenfalls ad-halbeinfach sind, und nilpotente X ebenfalls ad-nilpotent.

Das nächste Lemma erlaubt es uns, die konkrete Jordanzerlegung auf Unteralgebren einzuschränken, sofern diese halbeinfach sind. Ein Beweis findet sich in [?, §6.4].

Lemma 1.14. *Ist V ein endlichdimensionaler Vektorraum und $\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{gl}(V)$ eine halbeinfache Unteralgebra, so enthält \mathfrak{g} die halbeinfachen und nilpotenten Teile aller ihrer Elemente.*

Ist \mathfrak{g} eine beliebige halbeinfache Lie-Algebra, so ist $\ker \operatorname{ad} = Z(\mathfrak{g}) = 0$ und deshalb $\operatorname{ad}: \mathfrak{g} \rightarrow \operatorname{ad} \mathfrak{g}$ ein Isomorphismus von Lie-Algebren. Dies erlaubt zusammen mit dem vorherigen Lemma die Verallgemeinerung der Jordanzerlegung auf beliebige halbeinfache Lie-Algebren.

Proposition 1.15 (Abstrakte Jordanzerlegung). *Ist \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra, so gibt es für jedes Element $X \in \mathfrak{g}$ eindeutige $X_s, X_n \in \mathfrak{g}$, so dass*

1. $X = X_s + X_n$,
2. X_s ist ad-halbeinfach und X_n ist ad-nilpotent,
3. X_s und X_n kommutieren.

X_s und X_n sind eindeutig dadurch bestimmt, dass

$$\operatorname{ad}(X_s) = (\operatorname{ad} X)_s \quad \text{und} \quad \operatorname{ad}(X_n) = (\operatorname{ad} X)_n.$$

Ein Element $Y \in \mathfrak{g}$ kommutiert genau dann mit X , wenn Y mit X_s und X_n kommutiert.

Definition 1.16. Ist \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra und $X \in \mathfrak{g}$, so heißt die Zerlegung $X = X_s + X_n$ aus Proposition 1.15 die (abstrakte) Jordanzerlegung von X . Dabei ist X_s ist der halbeinfache Teil von X und X_n der nilpotente Teil von X . Ferner heißt X halbeinfach, falls $X = X_s$, und nilpotent falls $X = X_n$.

Bemerkung 1.17. Es sei \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra.

1. $X \in \mathfrak{g}$ ist genau dann halbeinfach, bzw. nilpotent, wenn X ad-halbeinfach, bzw. ad-nilpotent ist.
2. Ist \mathfrak{g} linear, so folgt aus der Eindeutigkeit der abstrakten Jordanzerlegung, dass die abstrakte und die konkrete Jordanzerlegung auf \mathfrak{g} übereinstimmen. Dementsprechend werden wir in diesem Fall nicht zwischen konkreter und abstrakter Jordanzerlegung unterscheiden.

Da für eine halbeinfache Lie-Algebra \mathfrak{g} der Isomorphismus $\operatorname{ad}: \mathfrak{g} \rightarrow \operatorname{ad} \mathfrak{g}$ mit der abstrakten und konkreten Jordan zerträglich ist, ergibt sich zusammen mit [?, Korollar 6.4] die Funktorialität der Jordanzerlegung.

Lemma 1.18 (Funktorialität der Jordanzerlegung). *Es seien \mathfrak{g}_1 und \mathfrak{g}_2 zwei halbeinfache Lie-Algebren und $X \in \mathfrak{g}_1$ mit Jordanzerlegung $X = X_s + X_n$. Ist $\phi: \mathfrak{g}_1 \rightarrow \mathfrak{g}_2$ ein Homomorphismus, so ist $\phi(X_s) = \phi(X)_s$ und $\phi(X_n) = \phi(X)_n$.*

Wir halten schließlich noch das folgende nützliches Ergebnis fest.

Lemma 1.19. *Es sei \mathfrak{g} eine Lie-Algebra, $X \in \mathfrak{g}$ ad-halbeinfach und $\mathfrak{g} = \bigoplus_{\lambda \in k} \mathfrak{g}_\lambda$ die Eigenraumzerlegung von $\text{ad } X$. Dann ist $[\mathfrak{g}_\lambda, \mathfrak{g}_\mu] \subseteq \mathfrak{g}_{\lambda+\mu}$ für alle $\lambda, \mu \in k$.*

Beweis. Für $Y_1 \in \mathfrak{g}_\lambda$ und $Y_2 \in \mathfrak{g}_\mu$ ist nach der Jacobi-Identität

$$[X, [Y_1, Y_2]] = [[X, Y_1], Y_2] + [Y_1, [X, Y_2]] = \lambda[Y_1, Y_2] + \mu[Y_1, Y_2] = (\lambda + \mu)[Y_1, Y_2],$$

also $[Y_1, Y_2] \in \mathfrak{g}_{\lambda+\mu}$. □

1.3 \mathfrak{sl}_2 -Theorie

Die Lie-Algebra $\mathfrak{sl}_2(k)$ ist die kleinste nicht-triviale halbeinfache Lie-Algebra, und die Klassifikation der endlichdimensionalen Darstellungen von $\mathfrak{sl}_2(k)$ ist ein klassisches und mächtiges Hilfsmittel zur Untersuchung halbeinfacher Lie-Algebren. Beweise der folgenden Aussagen finden sich in [?, §7].

Definition 1.20. Die Standardbasis (e, h, f) von $\mathfrak{sl}_2(k)$ ist gegeben durch

$$e := \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad h := \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad f := \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Für die Standardbasis von $\mathfrak{sl}_2(k)$ gilt

$$[h, e] = 2e, \quad [h, f] = -2f \quad \text{und} \quad [e, f] = h.$$

Ist V eine Darstellung von $\mathfrak{sl}_2(k)$, so schreiben wir

$$V_\lambda := \{v \in V \mid h \cdot v = \lambda v\} \quad \text{für alle } \lambda \in k.$$

Eine der fundamentalen Erkenntnisse über $\mathfrak{sl}_2(k)$ ist die Klassifikation der endlichdimensionalen, irreduziblen Darstellungen von $\mathfrak{sl}_2(k)$.

Proposition 1.21. *Für jedes $n \geq 1$ gibt es bis auf Isomorphie genau eine n -dimensionale irreduzible Darstellung V^n von $\mathfrak{sl}_2(k)$. Dabei ist*

$$V^n = V_{-n+1}^n \oplus V_{-n+3}^n \oplus \cdots \oplus V_{n-3}^n \oplus V_{n-1}^n$$

mit $\dim V_i^n = 1$ für alle $i = -n+1, -n+3, \dots, n-1$. Die Basiselemente e und f von $\mathfrak{sl}_2(k)$ wirken auf V^n durch

$$e \cdot V_\lambda^n = \begin{cases} V_{\lambda+2}^n & \text{falls } \lambda \neq -d-1, \\ 0 & \text{falls } \lambda = -d-1, \end{cases} \quad \text{und} \quad f \cdot V_\lambda^n = \begin{cases} V_{\lambda-2}^n & \text{falls } \lambda \neq d+1, \\ 0 & \text{falls } \lambda = d+1. \end{cases}$$

Insbesondere gibt es eine Basis $b_{-n+1}, b_{-n+3}, \dots, b_{n-1} \in V^n$ mit $b_i \in V_i$ für alle $i = -n+1, \dots, n-1$, so dass

$$e \cdot b_i = \begin{cases} b_{i+2} & \text{für } i = -n+1, \dots, n-3, \\ 0 & \text{für } i = n-1. \end{cases}$$

Da nach dem Satz von Weyl jede endlichdimensionale Darstellung von $\mathfrak{sl}_2(k)$ halbeinfach ist, lassen sich damit alle endlichdimensionalen Darstellungen von $\mathfrak{sl}_2(k)$ verstehen.

Korollar 1.22. *Es sei eine V eine endlichdimensionale Darstellung von $\mathfrak{sl}_2(k)$. Dann gibt es eine Zerlegung $V = \bigoplus_{d \geq 1} \bigoplus_{i=1}^{\nu_d} W^{d,i}$ in irreduzible Unterdarstellungen $W^{d,i}$ mit $\dim W^{d,i} = d$. Für alle $d \geq 1$ und $i = 1, \dots, \nu_d$ ist dann*

$$W^{d,i} = W_{-d+1}^{d,i} \oplus W_{-d+3}^{d,i} \oplus \dots \oplus W_{d-3}^{d,i} \oplus W_{d-1}^{d,i},$$

wobei alle Summanden eindimensional sind, und somit auch $V = \bigoplus_{n \in \mathbb{Z}} V_n$ mit

$$V_n = \bigoplus_{d \geq 1} \bigoplus_{i=1}^{\nu_d} W_n^{d,i} = \bigoplus_{\substack{p \geq 0 \\ d = |n| + 1 + 2p}} \bigoplus_{i=1}^{\nu_d} \underbrace{W_n^{d,i}}_{1\text{-dim.}}$$

Insbesondere ist $\dim V_n = \bigoplus_{p \geq 0, d = |n| + 1 + 2p} \nu_d$ und $\dim V_n = \dim V_{-n}$ für alle $n \geq 0$, sowie $\dim V = \dim V_0 + \dim V_1$. Zudem ist $\nu_d = \dim V_{d-1} - \dim V_{d+1}$ für alle $d \geq 1$. Insbesondere sind die Zahlen ν_d für alle $d \geq 1$ eindeutig.

Ist U eine weitere endlichdimensionale Darstellung von $\mathfrak{sl}_2(k)$ mit einer Zerlegung $U = \bigoplus_{d \geq 1} \bigoplus_{i=1}^{\mu_d} \overline{W}^{d,i}$ in irreduzible Unterdarstellungen, so sind V und U genau dann isomorph, wenn $\nu_d = \mu_d$ für alle $d \geq 0$.

Proposition 1.21 lässt sich auch nutzen, um einen endlichdimensionalen Vektorraum die zusätzliche Struktur einer irreduziblen Darstellung von $\mathfrak{sl}_2(k)$ zu geben.

Lemma 1.23. *Es sei V ein endlichdimensionaler Vektorraum mit $d := \dim V \geq 1$. Es sei $(b_{-d+1}, b_{-d+3}, \dots, b_{d-3}, b_{d-1})$ eine Basis von V . Dann lässt sich V die Struktur einer irreduziblen Darstellung von $\mathfrak{sl}_2(k)$ geben, so dass*

$$h \cdot b_i = ib_i \quad \text{für alle } i = -d+1, -d+3, \dots, d-3, d-1, \quad \text{und}$$

$$e \cdot b_i = \begin{cases} b_{i+2} & \text{für } i = -d+1, -d+3, \dots, d-3, \\ 0 & \text{für } i = d-1. \end{cases}$$

1.4 Cartan-Unteralgebren und Wurzelraumzerlegung

In diesem Abschnitt erinnern wir an das grundlegende Konzept einer Cartan-Unteralgebra einer halbeinfachen Lie-Algebra. Wir erläutern das Zustandekommen der resultierenden Wurzelraumzerlegung und halten einige ihrer elementaren Eigenschaften fest.

Definition 1.24. Eine Unteralgebra $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ einer Lie-Algebra \mathfrak{g} heißt *toral* falls \mathfrak{h} aus ad-halbeinfachen Elementen besteht.

Beispiel 1.25. 1. Die Unteralgebra der Diagonalmatrizen $\mathfrak{d}_n(k) \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ besteht aus halbeinfachen Elementen (in der Sinne der konkreten Jordanzerlegung) und damit aus ad-halbeinfachen Elementen.

2. Nach gleicher Argumentation ist $\mathfrak{h} := \mathfrak{d}_n(k) \cap \mathfrak{sl}_n(k)$ eine torale Unter algebra von $\mathfrak{sl}_n(k)$ und $\mathfrak{d}_n(k)$ eine torale Unter algebra von $\mathfrak{t}_n(k)$.
3. Ist allgemeiner $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine torale Unter algebra und $\mathfrak{g}' \subseteq \mathfrak{g}$ eine Unter algebra, so ist $\mathfrak{h}' := \mathfrak{h} \cap \mathfrak{g}'$ eine torale Unter algebra von \mathfrak{g}' : Für jedes $X \in \mathfrak{h}'$ ist $\text{ad}_{\mathfrak{g}} X$ halbeinfach, und somit auch $\text{ad}_{\mathfrak{g}'} X = (\text{ad}_{\mathfrak{g}} X)|_{\mathfrak{g}'}$.

In jedem der obigen Beispiele ist die torale Unter algebra abelsch. Wie in [?, §8.1] gezeigt wird, ist dies kein Zufall.

Lemma 1.26. *Torale Unter algebren sind abelsch.*

Diese Kommutativität hat entscheidende Konsequenzen für die adjungierte Darstellung einer toralen Unter algebra: Ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine torale Unter algebra, so besteht $\text{ad}_{\mathfrak{g}} \mathfrak{h} \subseteq \text{End}_k(\mathfrak{g})$ aus halbeinfachen, paarweise kommutierenden Endomorphismen. Diese sind simultan diagonalisierbar, weshalb $\mathfrak{g} = \bigoplus_{\alpha \in \mathfrak{h}^*} \mathfrak{g}_{\alpha}$ gilt, wobei

$$\mathfrak{g}_{\alpha} = \{X \in \mathfrak{g} \mid [H, X] = \alpha(H)X \text{ für alle } H \in \mathfrak{h}\}.$$

Die Elemente $\alpha \in \mathfrak{h}^*$ mit $\mathfrak{g}_{\alpha} \neq 0$ spielen eine bedeutende Rolle bei der Untersuchung von \mathfrak{g} durch \mathfrak{h} .

Definition 1.27. Für eine torale Unter algebra $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ einer Lie-Algebra \mathfrak{g} sei

$$\Phi(\mathfrak{g}, \mathfrak{h}) := \{\alpha \in \mathfrak{h}^* \setminus \{0\} \mid \mathfrak{g}_{\alpha} \neq 0\}.$$

In halbeinfachen Lie-Algebren, in denen (ad)-halbeinfache Elemente mithilfe der Jordanzerlegung verstanden werden können, spielen maximale torale Unter algebren eine besondere Rolle.

Definition 1.28. Eine *Cartan-Unteralgebra* (CSA) einer halbeinfachen Lie-Algebra \mathfrak{g} ist eine maximale torale Unter algebra $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$. Die Elemente von $\Phi(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ heißen *Wurzeln* von \mathfrak{g} bezüglich \mathfrak{h} .

Bemerkung 1.29. Ist \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra, so ist jedes halbeinfache Element von \mathfrak{g} in einer CSA enthalten. Mit dem halbeinfachen Element $0 \in \mathfrak{g}$ ergibt sich damit, dass \mathfrak{g} eine CSA enthält.

Ist \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra mit CSA $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$, so ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}_0$, da \mathfrak{h} abelsch ist. Wie in [?, §8.2] ergibt sich auch die Umkehrung.

Lemma 1.30. *Ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA einer halbeinfachen Lie-Algebra \mathfrak{g} , so ist $Z_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) = \mathfrak{h}$, d.h. \mathfrak{h} ist selbstzentralisierend.*

Für eine halbeinfache Lie-Algebra \mathfrak{g} und CSA $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ ergibt sich mit den Wurzeln $\Phi := \Phi(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ damit eine Zerlegung

$$\mathfrak{g} = \bigoplus_{\alpha \in \mathfrak{h}^*} \mathfrak{g}_{\alpha} = \mathfrak{g}_0 \oplus \bigoplus_{\alpha \in \Phi} \mathfrak{g}_{\alpha} = \mathfrak{h} \oplus \bigoplus_{\alpha \in \Phi} \mathfrak{g}_{\alpha},$$

da $\mathfrak{g}_{\alpha} = 0$ für $\alpha \notin \Phi \cup \{0\}$ und $\mathfrak{g}_0 = Z_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) = \mathfrak{h}$.

Definition 1.31. Es sei \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra und $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA. Die Zerlegung

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \oplus \bigoplus_{\alpha \in \Phi} \mathfrak{g}_\alpha$$

mit $\Phi := \Phi(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ ist die *Wurzelraumzerlegung* von \mathfrak{g} bezüglich \mathfrak{h} . Die Räume \mathfrak{g}_α , $\alpha \in \Phi$ sind die entsprechenden *Wurzelräume*.

Beispiel 1.32. Es sei $\mathfrak{g} = \mathfrak{sl}_n(k)$ und $\mathfrak{h} := \mathfrak{d}_n(k) \cap \mathfrak{sl}_n(k)$ die Unter algebra der spurlosen Diagonalmatrizen. Aus Beispiel 1.25 ist \mathfrak{h} eine torale Unter algebra von \mathfrak{g} , und es handelt sich bereits um eine CSA.

Um dies zu sehen sei $\mathfrak{h}' \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA. \mathfrak{h}' besteht aufgrund der Übereinstimmung der konkreten und abstrakten Jordanzerlegung aus halbeinfachen Elementen. Da \mathfrak{h}' abelsch ist, sind die Elemente aus \mathfrak{h}' simultan diagonalisierbar. Es gibt also $S \in \mathrm{GL}_n(k)$ mit $S\mathfrak{h}'S^{-1} \subseteq \mathfrak{d}_n(k)$. Die Konjugation mit S ist ein Lie-Algebra-Automorphismus von $\mathfrak{gl}_n(k)$, unter dem \mathfrak{g} invariant ist, der sich also zu einem Automorphismus von \mathfrak{g} einschränken lässt. Daher ist $S\mathfrak{h}'S^{-1}$ eine CSA von \mathfrak{g} mit $S\mathfrak{h}'S^{-1} \subseteq \mathfrak{h}$, woraus wegen der Maximalität von $S\mathfrak{h}'S^{-1}$ folgt, dass $\mathfrak{h} = S\mathfrak{h}'S^{-1}$. Da es eine CSA in $\mathfrak{sl}_n(k)$ gibt, ist damit auch \mathfrak{h} eine CSA von $\mathfrak{sl}_n(k)$.

Für $X = \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n) \in \mathfrak{h}$ ist

$$[X, E_{ij}] = (\lambda_i - \lambda_j)E_{ij} \quad \text{für alle } i, j = 1, \dots, n,$$

wobei $(E_{ij})_{1 \leq i, j \leq n}$ die Standardbasis von $\mathfrak{gl}_n(k)$ bezeichnet. Für $\varepsilon_1, \dots, \varepsilon_n \in \mathfrak{h}^*$ mit

$$\varepsilon_i(\mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)) = \lambda_i \quad \text{für alle } i = 1, \dots, n$$

ist daher

$$\mathfrak{g}_{\varepsilon_i - \varepsilon_j} = kE_{ij} \quad \text{für alle } 1 \leq i \neq j \leq n.$$

Damit ergeben sich für \mathfrak{g} bezüglich \mathfrak{h} die Wurzeln

$$\Phi(\mathfrak{g}, \mathfrak{h}) = \{\varepsilon_i - \varepsilon_j \mid 1 \leq i \neq j \leq n\}$$

und die Wurzelraumzerlegung

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \oplus \bigoplus_{\alpha \in \Phi} \mathfrak{g}_\alpha = \mathfrak{h} \oplus \bigoplus_{i \neq j} kE_{ij}.$$

In diesem Beispiel zeigen sich bereits einige elementare Eigenschaften der Wurzelraumzerlegung, die wir hier noch festhalten wollen. Beweise finden sich in [?, §8.3 – §8.5].

Proposition 1.33 (Eigenschaften der Wurzelraumzerlegung). *Es seien \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra, $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA und $\Phi := \Phi(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ die entsprechenden Wurzeln.*

1. Φ erzeugt \mathfrak{h}^* als k -Vektorraum.
2. Ist $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \Phi$ eine k -Basis von \mathfrak{h}^* , so ist $\Phi \subseteq \mathrm{span}_{\mathbb{Q}}(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$.

3. Für alle $\alpha \in \Phi$ ist $k\alpha \cap \Phi = \{-\alpha, \alpha\}$.
4. Die Wurzelräume \mathfrak{g}_α , $\alpha \in \Phi$ sind eindimensional und $\mathfrak{g}_0 = \mathfrak{h}$.
5. Für alle $\alpha, \beta \in \Phi$ ist

$$[\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_\beta] = \begin{cases} 0 & \text{falls } \alpha + \beta \notin \Phi, \\ \mathfrak{g}_{\alpha+\beta} & \text{falls } \alpha + \beta \in \Phi, \end{cases} \quad \text{und} \quad [\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}] \subseteq \mathfrak{h}.$$

6. Ist $\alpha \in \Phi$, so ist $[\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}] \subseteq \mathfrak{h}$ eindimensional und $\alpha([\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}]) \neq 0$.
Insbesondere gibt es ein eindeutiges Element $H_\alpha \in [\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}]$ mit $\alpha(H_\alpha) = 2$ und $kH_\alpha = [\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}]$, und

$$S_\alpha := \mathfrak{g}_\alpha \oplus kH_\alpha \oplus \mathfrak{g}_{-\alpha} \subseteq \mathfrak{h}$$

ist eine Unteralgebra mit $S_\alpha \cong \mathfrak{sl}_2(k)$.

1.5 Reduktive Lie-Algebren

Reduktive Lie-Algebren entstehen durch das Hinzufügen eines Zentrums zu einer halbeinfachen Lie-Algebra, und sind eine Verallgemeinerung der solchen. Die Lie-Algebra-Struktur einer reductiven Lie-Algebra ist durch die zugrundeliegende halbeinfache Lie-Algebra bereits eindeutig bestimmt. Dies führt dazu, dass sich viele Konzepte und Aussagen aus der Theorie halbeinfacher Lie-Algebren direkt auf reductive verallgemeinern lassen.

1.5.1 Definition

Lemma 1.34. Für eine Lie-Algebra \mathfrak{g} sind äquivalent:

1. $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ und $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ ist halbeinfach.
2. $\mathfrak{g} = \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{s}$ für ein abelsches Ideal \mathfrak{a} und ein halbeinfaches Ideal \mathfrak{s} .
3. Die adjungierte Darstellung von \mathfrak{g} ist halbeinfach.
4. $\text{rad } \mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g})$.

Ferner gilt in 2 bereits $\mathfrak{a} = Z(\mathfrak{g})$ und $\mathfrak{s} = [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$.

Beweis. (4 \Rightarrow 3) $\text{ad } \mathfrak{g}$ ist halbeinfach als Lie-Algebra, da

$$\text{ad } \mathfrak{g} \cong \mathfrak{g}/Z(\mathfrak{g}) = \mathfrak{g}/\text{rad } \mathfrak{g}.$$

Nach dem Satz von Weyl ist deshalb \mathfrak{g} halbeinfach als $(\text{ad } \mathfrak{g})$ -Modul.

(3 \Rightarrow 2) Es existiert eine Zerlegung

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{a}_1 \oplus \cdots \oplus \mathfrak{a}_n \oplus \mathfrak{s}_1 \oplus \cdots \oplus \mathfrak{s}_m$$

in irreduzible Ideale, wobei $\dim \mathfrak{a}_i = 1$ und $\dim \mathfrak{s}_j \geq 2$. Als Lie-Algebren sind die \mathfrak{a}_i damit abelsch und die \mathfrak{s}_j einfach. Also ist $\mathfrak{a} := \mathfrak{a}_1 \oplus \cdots \oplus \mathfrak{a}_n$ abelsch und $\mathfrak{s} = \mathfrak{s}_1 \oplus \cdots \oplus \mathfrak{s}_m$ halbeinfach mit $\mathfrak{g} = \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{s}$.

(2 \Rightarrow 1) Es ist $Z(\mathfrak{g}) = Z(\mathfrak{a}) \oplus Z(\mathfrak{s}) = \mathfrak{a}$ und $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}] = [\mathfrak{s}, \mathfrak{s}] = \mathfrak{s}$.

(1 \Rightarrow 4) Es ist $\text{rad } \mathfrak{g} = \text{rad}(Z(\mathfrak{g})) \oplus \text{rad}([\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]) = Z(\mathfrak{g})$. □

Definition 1.35. Eine Lie-Algebra \mathfrak{g} heißt *reduktiv* falls sie eine (und damit alle) der Bedingungen in Lemma 1.34 erfüllt.

Bemerkung 1.36. Nach Lemma 1.34 ist die Zerlegung einer reduktiven Lie-Algebra in eine abelsches und halbeinfaches Ideal eindeutig.

Beispiel 1.37. 1. Abelsche und halbeinfache Lie-Algebren sind reduktiv. Endliche Produkte von reduktiven Lie-Algebren sind ebenfalls reduktiv.

2. $\mathfrak{gl}_n(k)$ ist reduktiv, denn es gilt $Z(\mathfrak{gl}_n(k)) = kI$ und $[\mathfrak{gl}_n(k), \mathfrak{gl}_n(k)] = \mathfrak{sl}_n(k)$ mit Zerlegung $\mathfrak{gl}_n(k) = kI \oplus \mathfrak{sl}_n(k)$.

3. Die oberen Dreiecksmatrizen $\mathfrak{t}_n(k)$ sind für $n \geq 2$ nicht reduktiv. Zum einen ist $Z(\mathfrak{t}_n(k)) = kI$ und $[\mathfrak{t}_n(k), \mathfrak{t}_n(k)] = \mathfrak{n}_n(k)$, aber $\mathfrak{t}_n(k) \neq kI \oplus \mathfrak{n}_n(k)$. Zum anderen ist auch $\text{rad } \mathfrak{t}_n(k) = \mathfrak{t}_n(k) \neq kI = Z(\mathfrak{t}_n(k))$.

4. Das Beispiel $\mathfrak{t}_n(k) \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ zeigt auch, dass Unteralgebren reduktiver Lie-Algebren nicht notwendigerweise selber reduktiv sind.

5. Quotienten reduktiver Lie-Algebren sind ebenfalls reduktiv: Es sei \mathfrak{g} eine reduktive Lie-Algebra und $I \subseteq \mathfrak{g}$ ein Ideal. Es gilt zu zeigen, dass die adjungierte Darstellung von \mathfrak{g}/I halbeinfach ist. Die adjungierte Darstellung von \mathfrak{g} induziert eine \mathfrak{g} -Modulstruktur auf \mathfrak{g}/I . Es ist dann \mathfrak{g}/I der Quotientenmodul von \mathfrak{g} an I , und die adjungierte Darstellung von \mathfrak{g}/I ist genau dann halbeinfach, wenn \mathfrak{g}/I ein halbeinfacher \mathfrak{g} -Modul ist. Da aber \mathfrak{g} selbst ein halbeinfacher \mathfrak{g} -Modul ist, folgt, dass auch der Quotient \mathfrak{g}/I ein halbeinfacher \mathfrak{g} -Modul ist.

Die Zerlegung einer reduktiven Lie-Algebra in ihr Zentrum und ihren halbeinfachen Teil ist in gewissem Rahmen mit Homomorphismen verträglich.

Lemma 1.38. Es seien \mathfrak{g}_1 und \mathfrak{g}_2 zwei reduktive Lie-Algebren mit $\mathfrak{s}_1 := [\mathfrak{g}_1, \mathfrak{g}_1]$ und $\mathfrak{s}_2 := [\mathfrak{g}_2, \mathfrak{g}_2]$. Ist $\phi: \mathfrak{g}_1 \rightarrow \mathfrak{g}_2$ ein Homomorphismus, so ist $\phi(\mathfrak{s}_1) \subseteq \mathfrak{s}_2$.

Beweis. Es ist $\mathfrak{s}_1 = [\mathfrak{s}_1, \mathfrak{s}_1]$, da \mathfrak{s}_1 halbeinfach ist. Also ist

$$\phi(\mathfrak{s}_1) = \phi([\mathfrak{s}_1, \mathfrak{s}_1]) = [\phi(\mathfrak{s}_1), \phi(\mathfrak{s}_1)] \subseteq [\mathfrak{g}_2, \mathfrak{g}_2] = \mathfrak{s}_2. \quad \square$$

Bemerkung 1.39. Die analoge Aussage für die Zentren von \mathfrak{g}_1 und \mathfrak{g}_2 gilt im Allgemeinen nicht. So ist etwa die Inklusion $\mathfrak{d}_2(k) \hookrightarrow \mathfrak{gl}_2(k)$ ein Homomorphismus, aber $Z(\mathfrak{d}_2(k)) = \mathfrak{d}_2(k) \subsetneq kI = Z(\mathfrak{gl}_2(k))$.

1.5.2 Halbeinfache und Nilpotente Elemente

Wir wollen auch das Konzept halbeinfacher und nilpotenter Elemente auf reductive Lie-Algebren verallgemeinern.

In $M_n(k)$, sowie $\text{End}_k(V)$ für einen endlichdimensionalen Vektorraum V , sind die halbeinfachen und nilpotenten Elemente über die konkrete Jordanzerlegung charakterisiert. In einer halbeinfachen Lie-Algebra \mathfrak{g} sind halbeinfache und nilpotente Elemente durch die adjungierte Darstellung charakterisiert, über die sich aus der konkreten Jordanzerlegung in $\text{ad } \mathfrak{g}$ die abstrakte Jordanzerlegung in \mathfrak{g} ergibt.

Die verschiedenen Konzepte von Halbeinfachheit und Nilpotenz in \mathfrak{g} sind miteinander verträglich: $X \in \mathfrak{g}$ genau dann halbeinfach, bzw. nilpotent, wenn X ad-halbeinfach, bzw. ad-nilpotent ist. Ist \mathfrak{g} zusätzlich linear, so stimmen diese Begriffe außerdem mit denen der konkreten Jordanzerlegung überein.

Für eine reductive Lie-Algebra \mathfrak{g} entsteht das Problem, dass $Z(\mathfrak{g})$ nicht notwendigerweise trivial ist. Insbesondere sind die Element in $Z(\mathfrak{g})$ sowohl ad-halbeinfach als auch ad-nilpotent. Ist \mathfrak{g} zusätzlich linear, so können wir halbeinfache und nilpotente Element in \mathfrak{g} deshalb nicht notwendigerweise über die adjungierte Darstellung beschreiben.

Beispiel 1.40. Die Lie-Algebra

$$\mathfrak{g} := \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & a \end{pmatrix} \mid a, b \in k \right\}$$

ist abelsch, da sich eine Basis aus zwei kommutierenden Elementen hat, und ist damit reaktiv. Da die adjungierte Darstellung trivial ist können wir über sie keine Rückschlüsse auf einzelne Elemente in \mathfrak{g} ziehen. Insbesondere liefert die adjungierte Darstellung *keine* Aussagen über Halbeinfachheit und Nilpotenz eines Elementes in \mathfrak{g} .

Im Allgemeinen dürfen wir also nicht darauf hoffen, die halbeinfachen und nilpotenten Elemente einer linearen reductiven Lie-Algebra über die adjungierte Darstellung charakterisieren zu können.

Um ein Konzept von halbeinfachen und nilpotenten Elementen in einer reductiven Lie-Algebra zu entwickeln, charakterisieren wir zunächst ad-halbeinfache und ad-nilpotente Elemente über die zugrundeliegende halbeinfache Lie-Algebra.

Lemma 1.41. *Es sei \mathfrak{g} eine reductive Lie-Algebra mit $\mathfrak{s} := [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$. Es sei $X \in \mathfrak{g}$ mit Zerlegung $X = X_1 + X_2$ bezüglich $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}$. Dann gilt:*

1. *X genau dann ad-halbeinfach, bzw. ad-nilpotent, wenn $X_2 \in \mathfrak{s}$ halbeinfach, bzw. nilpotent ist (im Sinne der abstrakten Jordanzerlegung in \mathfrak{s}).*
2. *Ist \mathfrak{g} zusätzlich linear, so ist dies außerdem äquivalent dazu, dass X_2 konkret halbeinfach, bzw. konkret nilpotent ist.*

Beweis. Bezüglich $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}$ ist

$$\text{ad}_{\mathfrak{g}} X = 0 \oplus \text{ad}_{\mathfrak{s}} X_2 \quad \text{und} \quad \text{ad}_{\mathfrak{s}} X_2 = (\text{ad}_{\mathfrak{g}} X)|_{\mathfrak{s}}.$$

Deshalb ist X genau dann $\text{ad}_{\mathfrak{g}}$ -halbeinfach, bzw. $\text{ad}_{\mathfrak{g}}$ -nilpotent, wenn X_2 $\text{ad}_{\mathfrak{s}}$ -halbeinfach, bzw. $\text{ad}_{\mathfrak{s}}$ -nilpotent ist. Der zweite Teil der Aussage folgt aus der Übereinstimmung der abstrakten und konkreten Jordanzerlegung in halbeinfachen Lie-Algebren. \square

Ist also \mathfrak{g} eine lineare reductive Lie-Algebra, so deren Zentrum sich gut genug verhält, so können wir deshalb die halbeinfachen und nilpotenten Elemente über die adjungierte Darstellung charakterisieren.

Lemma 1.42. *Es sei \mathfrak{g} eine lineare reductive Lie-Algebra, so dass $Z(\mathfrak{g})$ aus halbeinfachen Elementen besteht. Dann gilt für alle $X \in \mathfrak{g}$:*

1. X ist genau dann halbeinfach, wenn X ad-halbeinfach ist.
2. X ist genau dann nilpotent, wenn X ad-nilpotent ist und $X \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$.

Beweis. Es sei $\mathfrak{s} := [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$.

1. Ist X halbeinfach, so ist X nach Beispiel 1.13 auch ad-halbeinfach. Andererseits sei $X \in \mathfrak{g}$ ad-halbeinfach mit Zerlegung $X = X_1 + X_2$ bezüglich $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}$. Nach Lemma 1.41 ist X_2 halbeinfach. Da $X_1 \in Z(\mathfrak{g})$ kommutieren X_1 und X_2 auch miteinander. Somit ist X als Summe zweier kommutierender, halbeinfacher Elemente selbst halbeinfach.
2. Ist X $\text{ad}_{\mathfrak{g}}$ -nilpotent mit $X \in \mathfrak{s}$, so ist X nach Lemma 1.41 nilpotent.

Es sei andererseits X nilpotent. Dann ist X nach Beispiel 1.13 insbesondere ad-nilpotent und es gilt zu zeigen, dass $X \in \mathfrak{s}$. Es sei $X = X_1 + X_2$ bezüglich $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}$. Nach Annahme ist X_1 halbeinfach. Nach Lemma 1.41 folgt aus der ad-Nilpotenz von X , dass X_2 nilpotent ist. Da $X_1 \in Z(\mathfrak{g})$ kommutieren X_1 und X_2 miteinander. Damit erfüllen X_1 und X_2 alle Eigenschaften der konkreten Jordanzerlegung von X , wobei X_1 der halbeinfache Teil von X und X_2 der nilpotente Teil von X ist. Da X nilpotent ist gilt bereits $X = X_2 \in \mathfrak{s}$. \square

Dies motiviert die Definition halbeinfacher und nilpotenter Elemente in einer beliebigen reductiven Lie-Algebra.

Definition 1.43. Es sei \mathfrak{g} eine reductive Lie-Algebra. Ein Element $X \in \mathfrak{g}$ heißt *halbeinfach*, wenn es ad-halbeinfach ist. X heißt *nilpotent*, wenn $X \in [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ und X ad-nilpotent ist. Gegebenenfalls wird X auch *abstrakt halbeinfach*, bzw. *abstrakt nilpotent* genannt.

Ist \mathfrak{g} eine lineare reductive Lie-Algebra, so haben wir bereits in Beispiel 1.40 gesehen, dass die abstrakt halbeinfachen, bzw. abstrakt nilpotenten Elemente nicht notwendigerweise mit den konkret halbeinfachen, bzw. konkret nilpotenten Elementen übereinstimmen. Ob sie übereinstimmen, hängt nach Lemma 1.42 allein von $Z(\mathfrak{g})$ ab.

Korollar 1.44. *Ist \mathfrak{g} eine lineare reductive Lie-Algebra, so stimmen die abstrakt halbeinfachen, bzw. abstrakt nilpotenten Elemente genau dann mit den konkret halbeinfachen, bzw. konkret nilpotenten überein, wenn $Z(\mathfrak{g})$ aus konkret halbeinfachen Elementen besteht.*

Beweis. Besteht $Z(\mathfrak{g})$ aus konkret halbeinfachen Elementen, so sind die abstrakt halbeinfachen, bzw. abstrakt nilpotenten Elemente nach Lemma 1.42 bereits konkret halbeinfach, bzw. konkret nilpotent.

Andererseits besteht $Z(\mathfrak{g})$ aus abstrakt halbeinfachen Elementen, und sofern diese mit den konkret halbeinfachen übereinstimmen, somit auch aus konkret halbeinfachen. \square

So wie wir für lineare halbeinfache Lie-Algebren nicht zwischen der abstrakten und konkreten Jordanzerlegung unterscheiden, werden wir für lineare reductive Lie-Algebren wie in Lemma 1.42 auch nicht zwischen abstrakt halbeinfachen, bzw. abstrakt nilpotenten Elementen und konkret halbeinfachen, bzw. konkret nilpotenten unterscheiden.

Bemerkung 1.45. Ist \mathfrak{g} eine lineare reductive Lie-Algebra, so geht aus dem Beweis von Lemma 1.42 hervor, dass alle abstrakt nilpotenten Elemente von \mathfrak{g} bereits konkret nilpotent sind, und alle konkret halbeinfachen Elemente auch abstrakt halbeinfach.

Beispiel 1.46. 1. Ist \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra, so stimmen die abstrakt halbeinfachen, bzw. abstrakt nilpotenten Elemente in \mathfrak{g} in Sinne von Definition 1.43 mit den halbeinfachen, bzw. nilpotenten Elementen in Sinne von Definition 1.16, d.h. im Sinne der abstrakten Jordanzerlegung, überein.

2. Ist \mathfrak{g} eine lineare halbeinfache Lie-Algebra, so ist stimmen die abstrakt halbeinfachen, bzw. abstrakt nilpotenten Elemente in \mathfrak{g} deshalb insbesondere mit den konkret halbeinfachen, bzw. konkret nilpotenten überein. Dies lässt sich auch mit Lemma 1.42 sehen, da $Z(\mathfrak{g}) = 0$.

3. Da $Z(\mathfrak{gl}_n(k)) = kI$ stimmen die abstrakt halbeinfachen, bzw. abstrakt nilpotenten Elemente in $\mathfrak{gl}_n(k)$ nach Lemma 1.42 mit den halbeinfachen, bzw. nilpotenten im üblichen Sinne überein, d.h. im Sinne der konkreten Jordanzerlegung überein.

4. In der abelschen Lie-Algebra

$$\mathfrak{g} := \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & a \end{pmatrix} \mid a, b \in k \right\}$$

sind alle Elemente abstrakt halbeinfach, und 0 ist das einzige abstrakt nilpotente Element. Dieser Unterschied zu den konkret halbeinfachen und konkret nilpotenten Elementen liegt daran, dass $Z(\mathfrak{g}) = \mathfrak{g}$ nicht aus konkret halbeinfachen Elementen besteht.

1.5.3 Cartan-Unteralgebren

In diesem Abschnitt verallgemeinern wir den Begriff einer Cartan-Unteralgebra auf reductive Lie-Algebren und untersuchen, wie die Cartan-Unteralgebren einer reductiven Lie-Algebra mit denen der unterliegenden halbeinfachen Lie-Algebra zusammenhängen.

Definition 1.47. Eine *Cartan-Unteralgebra* einer reductiven Lie-Algebra \mathfrak{g} ist eine maximale torale Unter algebra $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ und die Elemente von $\Phi(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ sind die *Wurzeln* von \mathfrak{g} bezüglich \mathfrak{h} .

Bemerkung 1.48. 1. Eine CSA einer reductiven Lie-Algebra besteht aus halbeinfachen Elementen und ist maximal mit dieser Eigenschaft.

2. Jedes halbeinfache Element $X \in \mathfrak{g}$ ist in einer CSA enthalten: Der von X erzeugte Untervektorraum kX ist eine torale Unter algebra von \mathfrak{g} , und unter den toralen Unter algebren, die kX enthalten, gibt es eine von maximaler Dimension. Diese ist dann auch schon eine maximale torale Unter algebra von \mathfrak{g} .

3. Insbesondere ergibt sich mit $X = 0$, dass in jeder reductiven Lie-Algebra CSA existieren.

Beispiel 1.49. 1. Ist \mathfrak{g} eine abelsche Lie-Algebra, so ist \mathfrak{g} selbst die eindeutige CSA in \mathfrak{g} .

2. $\mathfrak{d}_n(k) \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ ist nach Beispiel 1.13 eine torale Unter algebra. Da $\mathfrak{d}_n(k)$ nach Korollar 1.44 aus halbeinfachen Elementen besteht, ergibt sich analog zu Beispiel 1.32, dass $\mathfrak{d}_n(k)$ bereits eine CSA von $\mathfrak{gl}_n(k)$ ist; es ergibt sich ebenfalls analog, dass alle CSA in $\mathfrak{gl}_n(k)$ unter der Konjugationswirkung von $GL_n(k)$ konjugiert zu $\mathfrak{d}_n(k)$ sind.

Um die CSA einer reductiven Lie-Algebra zu verstehen, genügt es, die CSA der zugrundeliegenden halbeinfachen Lie-Algebra zu verstehen. Genauer gilt die folgende Korrespondenz:

Lemma 1.50. *Es sei \mathfrak{g} eine reductive Lie-Algebra, $\mathfrak{a} := Z(\mathfrak{g})$ und $\mathfrak{s} := [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$. Dann gibt es eine Bijektion*

$$\begin{array}{ccc} \{CSA \text{ in } \mathfrak{g}\} & \xleftrightarrow{1:1} & \{CSA \text{ in } \mathfrak{s}\}, \\ \mathfrak{h} & \longmapsto & \mathfrak{h} \cap \mathfrak{s}, \\ \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{h}' & \longleftarrow & \mathfrak{h}'. \end{array}$$

Beweis. 1. Ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA, so ist $\mathfrak{a} \subseteq \mathfrak{g}$. Denn es ist $\mathfrak{a} + \mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine Unter algebra, und da $\text{ad}_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{a} + \mathfrak{h}) = \text{ad}_{\mathfrak{g}} \mathfrak{h}$ ist $\mathfrak{a} + \mathfrak{h}$ toral. Wegen der Maximalität von \mathfrak{h} folgt, dass $\mathfrak{a} + \mathfrak{h} = \mathfrak{h}$ und somit $\mathfrak{a} \subseteq \mathfrak{h}$.

2. Ist $\mathfrak{h}' \subseteq \mathfrak{s}$ eine torale Unter algebra, so ist $\mathfrak{a} \oplus \mathfrak{h}' \subseteq \mathfrak{g}$ eine torale Unter algebra. Denn $X \in \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{h}'$ wirkt trivial auf \mathfrak{a} und halbeinfach auf \mathfrak{s} , und somit halbeinfach auf \mathfrak{g} . Also ist X halbeinfach.

3. Ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine torale Unter algebra, so ist $\mathfrak{h}' := \mathfrak{h} \cap \mathfrak{s} \subseteq \mathfrak{s}$ eine torale Unter algebra. Denn als Schnitt zweier Unter algebren ist \mathfrak{h}' eine Unter algebra von \mathfrak{g} und damit auch von \mathfrak{s} . Für $X \in \mathfrak{h}'$ ist $\text{ad}_{\mathfrak{g}} X$ halbeinfach und \mathfrak{s} ist $\text{ad}_{\mathfrak{g}} X$ -invariant, also ist auch $\text{ad}_{\mathfrak{s}} X = (\text{ad}_{\mathfrak{g}} X)|_{\mathfrak{s}}$ halbeinfach.

4. Ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA, so ist $\mathfrak{h}' := \mathfrak{h} \cap \mathfrak{s} \subseteq \mathfrak{s}$ eine CSA. Denn \mathfrak{h}' ist toral, und wäre \mathfrak{h}' keine CSA, so gebe es eine CSA $\hat{\mathfrak{h}} \subseteq \mathfrak{s}$ die \mathfrak{h}' echt enthält. Da $\mathfrak{g} = \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{s}$ und $\mathfrak{a} \subseteq \mathfrak{h}$ ist

$$\mathfrak{h} = \mathfrak{a} \oplus (\mathfrak{h} \cap \mathfrak{s}) = \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{h}'.$$

Deshalb wäre $\mathfrak{a} \oplus \hat{\mathfrak{h}} \subseteq \mathfrak{g}$ eine torale Untereralgebra, die \mathfrak{h} echt enthält, im Widerspruch zur Maximalität von \mathfrak{h} .

5. Ist $\mathfrak{h}' \subseteq \mathfrak{s}$ eine CSA, so ist $\mathfrak{h} := \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{h}' \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA. Denn wäre \mathfrak{h} keine CSA, so gebe es eine CSA $\hat{\mathfrak{h}} \subseteq \mathfrak{g}$ die \mathfrak{h} echt enthält. Da $\mathfrak{g} = \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{s}$ und $\mathfrak{a} \subseteq \hat{\mathfrak{h}}$ wäre dann

$$\mathfrak{a} \oplus (\hat{\mathfrak{h}} \cap \mathfrak{s}) = \hat{\mathfrak{h}} \supsetneq \mathfrak{h} = \mathfrak{a} \oplus \mathfrak{h}',$$

und somit $\hat{\mathfrak{h}} \cap \mathfrak{s} \supsetneq \mathfrak{h}'$. Da $\hat{\mathfrak{h}} \cap \mathfrak{s}$ eine torale Untereralgebra ist widerspricht dies der Maximalität von \mathfrak{h}' . \square

Damit können wir viele Aussagen, die für CSA in halbeinfachen Lie-Algebren gelten, auf reductive verallgemeinern. Wir beginnen mit Lemma 1.30.

Korollar 1.51. *Es sei \mathfrak{g} eine reductive Lie-Algebra und $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine torale Untereralgebra. Dann ist \mathfrak{h} genau dann eine CSA, wenn \mathfrak{h} selbstzentralisierend ist.*

Beweis. Wegen der Reduktivität von \mathfrak{g} ist $\mathfrak{s} := [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ halbeinfach.

Ist \mathfrak{h} eine CSA von \mathfrak{g} so gibt es nach Lemma 1.50 eine CSA \mathfrak{h}' von \mathfrak{s} mit $\mathfrak{h} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{h}'$. Nach Lemma 1.30 ist $Z_{\mathfrak{s}}(\mathfrak{h}') = \mathfrak{h}'$. Da $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}$ ist damit

$$Z_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) = Z_{Z(\mathfrak{g})}(Z(\mathfrak{g})) \oplus Z_{\mathfrak{s}}(\mathfrak{h}') = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{h}' = \mathfrak{h}.$$

Ist andererseits \mathfrak{h} keine CSA, so gibt es eine CSA \mathfrak{h}' von \mathfrak{g} die \mathfrak{h} echt enthält. Da torale Untereralgebren abelsch sind ist $\mathfrak{h} \subsetneq \mathfrak{h}' \subseteq Z_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h})$. Also ist \mathfrak{h} nicht selbstzentralisierend. \square

Hieraus ergibt sich die Verträglichkeit von CSA mit passenden Untereralgebren.

Korollar 1.52. *Es sei \mathfrak{g} eine reductive Lie-Algebra, $\mathfrak{g}' \subseteq \mathfrak{g}$ eine reductive Untereralgebra und $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA mit $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}'$. Dann ist \mathfrak{h} eine CSA von \mathfrak{g}' .*

Beweis. Da \mathfrak{h} eine torale Untereralgebra von \mathfrak{g} ist, besteht $\text{ad}_{\mathfrak{g}} X$ aus $\text{ad}_{\mathfrak{g}}$ -halbeinfachen Elementen. Für jedes $X \in \mathfrak{h}'$ ist deshalb auch $\text{ad}_{\mathfrak{g}'} X = (\text{ad}_{\mathfrak{g}} X)|_{\mathfrak{g}'}$ halbeinfach. Das zeigt, dass \mathfrak{h} eine torale Untereralgebra von \mathfrak{g}' ist.

Es ist $Z_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) = \mathfrak{h}$, da \mathfrak{h} eine CSA von \mathfrak{g} ist. Daher ist auch $Z_{\mathfrak{g}'}(\mathfrak{h}) = \mathfrak{h}$, also \mathfrak{h} nach Korollar 1.51 bereits eine CSA von \mathfrak{g}' . \square

Bemerkung 1.53. Ist \mathfrak{g} eine reductive Lie-Algebra, $\mathfrak{g}' \subseteq \mathfrak{g}$ eine reductive Untereralgebra und $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA, so ist $\mathfrak{h} \cap \mathfrak{g}'$ zwar eine torale Untereralgebra von \mathfrak{g}' , aber nicht notwendigerweise eine CSA. So ist etwa $\mathfrak{h} := \mathfrak{d}_2(k)$ eine CSA von $\mathfrak{gl}_2(k)$, und

$$\mathfrak{g}' := \left\{ \begin{pmatrix} a & b \\ 0 & a \end{pmatrix} \mid a, b \in k \right\}$$

eine abelsche, und damit reductive, Untereralgebra von \mathfrak{g} . Die einzige CSA von \mathfrak{g}' ist \mathfrak{g}' selbst, weshalb $\mathfrak{h} \cap \mathfrak{g}' = kI$ keine CSA von \mathfrak{g}' ist.

1.6 Innere Automorphismen

In diesem Abschnitt gehen wir auf die Konjugationsbeziehung von CSA in halbeinfache Lie-Algebren ein und verallgemeinern diese auf reductive Lie-Algebren. Eine besondere Rolle spielen hierbei die inneren Automorphismen einer Lie-Algebra \mathfrak{g} , die eine Untergruppe $\text{Int } \mathfrak{g}$ von $\text{Aut } \mathfrak{g}$ bilden. Diese können wir besser kontrollieren und verstehen als die gesamte Automorphismengruppe $\text{Aut } \mathfrak{g}$. Alle Konjugationsaussagen, die wir im Folgenden treffen werden, beziehen sich auf $\text{Int } \mathfrak{g}$. Dabei orientieren wir uns in unserer anfänglicher Behandlung innerer Automorphismen an [?, §2.3].

Es sei \mathfrak{g} eine Lie-Algebra und $a: \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ ein nilpotenter Endomorphismus von \mathfrak{g} . Dann ist

$$\exp(a) := \sum_{n=0}^{\infty} \frac{a^n}{n!}$$

ein wohldefinierter Endomorphismus von \mathfrak{g} . Ist $b: \mathfrak{g} \rightarrow \mathfrak{g}$ ein weiterer nilpotenter Endomorphismus von \mathfrak{g} , der mit a kommutiert, so ist auch ab nilpotent und

$$\exp(ab) = \exp(a)\exp(b).$$

Insbesondere ist

$$\exp(a)\exp(-a) = \exp(0) = \text{id}_{\mathfrak{g}}$$

und somit $\exp(a) \in \text{GL}(\mathfrak{g})$ mit $\exp(a)^{-1} = \exp(-a)$.

Ist a zusätzlich eine Derivation von \mathfrak{g} , also

$$a([X, Y]) = [a(X), Y] + [X, a(Y)] \quad \text{für alle } X, Y \in \mathfrak{g},$$

so ergibt sich aus der Leibniz-Regel

$$a^n([X, Y]) = \sum_{\ell=0}^n \binom{n}{\ell} [a^\ell(X), a^{n-\ell}(Y)] \quad \text{für alle } X, Y \in \mathfrak{g}, n \in \mathbb{N},$$

dass $\exp(a)$ sogar ein Lie-Algebra-Automorphismus von \mathfrak{g} ist. Insbesondere ist damit $\exp(\text{ad } X) \in \text{Aut } \mathfrak{g}$ für jedes ad-nilpotente $X \in \mathfrak{g}$.

Definition 1.54. Für eine Lie-Algebra \mathfrak{g} ist $\text{Int } \mathfrak{g} \subseteq \text{Aut } \mathfrak{g}$ die Untergruppe, die von den Automorphismen $\exp(\text{ad } X)$, mit ad-nilpotenten $X \in \mathfrak{g}$, erzeugt wird. Die Elemente von $\text{Int } \mathfrak{g}$ heißen *innere Automorphismen*.

Beispiel 1.55. In der Standardbasis (e, h, f) von $\mathfrak{sl}_2(k)$ ist e nilpotent und damit auch ad-nilpotent. Bezüglich der Standardbasis ist

$$\text{ad } e = \begin{pmatrix} 0 & -2 & 0 \\ & 0 & 1 \\ & & 0 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \text{ad } -e = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 0 \\ & 0 & -1 \\ & & 0 \end{pmatrix}$$

und somit

$$\exp(\text{ad } e) = \begin{pmatrix} 1 & -2 & -1 \\ & 1 & 1 \\ & & 1 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \exp(\text{ad } -e) = \begin{pmatrix} 1 & 2 & -1 \\ & 1 & -1 \\ & & 1 \end{pmatrix}.$$

Es gilt außerdem, dass

$$\exp(e) = \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ & 1 \end{pmatrix} \quad \text{mit} \quad \exp(e)^{-1} = \exp(-e) = \begin{pmatrix} 1 & -1 \\ & 1 \end{pmatrix},$$

und die Konjugation

$$\phi: \mathfrak{sl}_2(k) \rightarrow \mathfrak{sl}_2(k), \quad X \mapsto \exp(e)X \exp(e)^{-1}$$

wird bezüglich der Standardbasis durch

$$\phi = \begin{pmatrix} 1 & -2 & -1 \\ & 1 & 1 \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

dargestellt. Also ist $\phi = \exp(\text{ad } e)$.

Diese Beobachtung ist kein Zufall.

Lemma 1.56. *Es sei \mathfrak{g} eine lineare Lie-Algebra und $X \in \mathfrak{g}$ konkret nilpotent. Dann ist X auch ad-nilpotent und*

$$\exp(\text{ad } X)(Y) = \exp(X)Y \exp(X)^{-1} \quad \text{für alle } Y \in \mathfrak{g}.$$

Beweis. Es ist $\text{ad } X = \lambda_X + \rho_{-X}$, wobei λ_X die Linksmultiplikation mit X und ρ_{-X} die Rechtsmultiplikation mit $-X$ bezeichnet. Da X nilpotent ist, sind es auch λ_X und ρ_{-X} . Für alle $Y \in \mathfrak{g}$ ist

$$\exp(\lambda_X)(Y) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\lambda_X)^n}{n!}(Y) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{X^n Y}{n!} = \left(\sum_{n=0}^{\infty} \frac{X^n}{n!} \right) Y = \lambda_{\exp(X)}(Y),$$

sowie analog auch

$$\exp(\rho_{-X}) = \rho_{\exp(-X)} = \rho_{\exp(X)^{-1}}.$$

Da λ_X und ρ_{-X} kommutieren ist daher für alle $Y \in \mathfrak{g}$

$$\begin{aligned} \exp(\text{ad } X)(Y) &= \exp(\lambda_X + \rho_{-X})(Y) = \exp(\lambda_X) \exp(\rho_{-X})(Y) \\ &= \lambda_{\exp(X)} \rho_{\exp(X)^{-1}}(Y) = \exp(X)Y \exp(X)^{-1}, \end{aligned}$$

was genau die zu zeigende Aussage ist. □

Korollar 1.57. *Es sei $\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ eine lineare reductive Lie-Algebra und $G \subseteq \text{GL}_n(k)$ eine Untergruppe mit $\exp(X) \in G$ für jedes konkret nilpotente $X \in \mathfrak{g}$. Dann ist jeder innere Automorphismus durch Konjugation mit einem Element aus G gegeben.*

Beweis. Es sei $\mathfrak{s} := [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$. Es genügt die Aussage für ad-nilpotentes $X \in \mathfrak{g}$ zu zeigen. Ist $X = X_1 + X_2$ bezüglich $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}$, so ist X_2 nach Lemma 1.41 konkret nilpotent. Deshalb ist für jedes $Y \in \mathfrak{g}$

$$\exp(\text{ad } X)(Y) = \exp(\text{ad } X_2)(Y) = \exp(X_2)Y \exp(X_2)^{-1},$$

wobei nach Annahme $\exp(X_2) \in G$. □

Beispiel 1.58. 1. Jeder innere Automorphismus von $\mathfrak{gl}_n(k)$ ist durch Konjugation mit einem Element $S \in \mathrm{GL}_n(k)$ gegeben.

2. Es sei $B \in \mathrm{M}_n(k)$, so dass $\mathfrak{o}(B)$ reduktiv ist. Ist $X \in \mathfrak{o}(B)$ konkret nilpotent, so ist $\exp(X) \in \mathrm{O}(B)$. Deshalb ist dann ist bereits jeder innere Automorphismus durch Konjugation mit einem Element aus $\mathrm{O}(B)$ gegeben.

Die Lie-Klammer einer reduktiven Lie-Algebra hängt nur von der Lie-Klammer der unterliegenden halbeinfachen Lie-Algebra ab. Dementsprechend lassen sich auch die inneren Automorphismen einer reduktiven Lie-Algebra durch die inneren Automorphismen der unterliegenden halbeinfachen Lie-Algebra verstehen.

Lemma 1.59. *Es sei \mathfrak{g} reduktiv und $\mathfrak{s} := [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$. Dann ist \mathfrak{s} invariant unter $\mathrm{Int} \mathfrak{g}$ und*

$$\begin{aligned} \mathrm{Int} \mathfrak{g} &= \mathrm{Int}(Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}) \cong \mathrm{Int} \mathfrak{s}, \\ \sigma &\mapsto \sigma|_{\mathfrak{s}}, \\ \mathrm{id}_{Z(\mathfrak{g})} \oplus \tau &\leftrightarrow \tau. \end{aligned}$$

Beweis. Es sei $X \in \mathfrak{g}$ mit $X = X_1 + X_2$ bezüglich $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}$. Dann ist

$$\mathrm{ad}_{\mathfrak{g}} X = 0 \oplus \mathrm{ad}_{\mathfrak{s}} X_2 \quad \text{und} \quad \mathrm{ad}_{\mathfrak{s}} X_2 = (\mathrm{ad}_{\mathfrak{g}} X)|_{\mathfrak{s}},$$

und X ist genau dann ad-nilpotent in \mathfrak{g} , wenn X_2 ad-nilpotent in \mathfrak{s} ist. Ferner gilt dann

$$\exp(\mathrm{ad}_{\mathfrak{g}} X) = \exp(0 \oplus \mathrm{ad}_{\mathfrak{s}} X_2) = \mathrm{id}_{Z(\mathfrak{g})} \oplus \exp(\mathrm{ad}_{\mathfrak{s}} X_2).$$

Damit ist

$$\mathrm{Int} \mathfrak{s} = \langle \exp(\mathrm{ad}_{\mathfrak{s}} X) \mid X \in \mathfrak{s} \text{ ist nilpotent} \rangle$$

und

$$\mathrm{Int} \mathfrak{g} = \langle \mathrm{id}_{Z(\mathfrak{g})} \oplus \exp(\mathrm{ad}_{\mathfrak{s}} X) \mid X \in \mathfrak{s} \text{ ist nilpotent} \rangle,$$

wodurch sich die Aussage ergibt. □

Wir kommen nun zu der grundlegenden Konjugationsaussage dieses Abschnittes. Wie wir bereits in Beispiel 1.32 gesehen haben, sind je zwei CSA von $\mathfrak{sl}_n(k)$ unter der Konjugationswirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$ konjugiert zueinander. Dies verallgemeinert sich auf beliebige halbeinfache Lie-Algebren unter der Wirkung von $\mathrm{Int} \mathfrak{g}$. Ein Beweis findet sich in [?, §16.4].

Lemma 1.60. *Ist \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra so sind alle CSA von \mathfrak{g} konjugiert unter $\mathrm{Int} \mathfrak{g}$, d.h. für je zwei CSA $\mathfrak{h}_1, \mathfrak{h}_2 \subseteq \mathfrak{g}$ gibt es $\sigma \in \mathrm{Int} \mathfrak{g}$ mit $\sigma(\mathfrak{h}_1) = \mathfrak{h}_2$.*

Wie wir bereits in Beispiel 1.49 gesehen haben, sind auch in der reduktiven Lie-Algebra $\mathfrak{gl}_n(k)$ alle CSA unter der Konjugationswirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$ konjugiert zueinander. Für eine beliebige reductive Lie-Algebra ergibt sich dies als Verallgemeinerung von Lemma 1.60.

Korollar 1.61. *Ist \mathfrak{g} eine reductive Lie-Algebra, so sind alle CSA von \mathfrak{g} konjugiert unter $\text{Int } \mathfrak{g}$.*

Beweis. Es seien $\mathfrak{h}_1, \mathfrak{h}_2 \subseteq \mathfrak{g}$ zwei CSA. Nach Lemma 1.50 gibt es in $[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ zwei CSA $\mathfrak{h}'_1, \mathfrak{h}'_2$ mit $\mathfrak{h}_1 = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{h}'_1$ und $\mathfrak{h}_2 = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{h}'_2$. Nach Lemma 1.60 gibt es $\tau \in \text{Int}[\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ mit $\tau(\mathfrak{h}'_1) = \mathfrak{h}'_2$. Nach Lemma 1.59 ist $\sigma := \text{id}_{Z(\mathfrak{g})} \oplus \tau \in \text{Int } \mathfrak{g}$ mit

$$\sigma(\mathfrak{h}_1) = (\text{id}_{Z(\mathfrak{g})} \oplus \tau)(Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{h}'_1) = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{h}'_2 = \mathfrak{h}_2. \quad \square$$

Ist $\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ eine reductive Unteralgebra, so wird $\text{Int } \mathfrak{g}$ durch die Konjugationen mit $\exp(X)$ für konkret nilpotente $X \in \mathfrak{g}$ erzeugt. Für diese X ist die Konjugation mit $\exp(X)$ auch ein innerer Automorphismus von $\mathfrak{gl}_n(k)$. Daher lässt sich jeder innere Automorphismus von \mathfrak{g} zu einem inneren Automorphismus von $\mathfrak{gl}_n(k)$ fortsetzen. Diese Beobachtung können wir auf beliebige reductive Lie-Algebren verallgemeinern.

Lemma 1.62. *Es sei $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}$ eine reductive Lie-Algebra und $\mathfrak{g}' \subseteq \mathfrak{g}$ eine reductive Unteralgebra mit $\mathfrak{g}' = Z(\mathfrak{g}') \oplus \mathfrak{s}'$. Dann lässt sich jeder innere Automorphismus von \mathfrak{g}' zu einem inneren Automorphismus von \mathfrak{g} fortsetzen.*

Beweis. Es genügt die Aussage für $\exp(\text{ad}_{\mathfrak{g}'} X)$ für $\text{ad}_{\mathfrak{g}'}$ -nilpotentes $X \in \mathfrak{g}'$ zu zeigen. Hierfür sei $X = X_1 + X_2$ bezüglich $\mathfrak{g}' = Z(\mathfrak{g}') \oplus \mathfrak{s}'$.

Nach Lemma 1.41 ist X_2 ein nilpotentes Element der halbeinfachen Lie-Algebra \mathfrak{s}' . Mit der Inklusion $\mathfrak{g}' \hookrightarrow \mathfrak{g}$ folgt aus Lemma 1.38, dass $X_2 \in \mathfrak{s}$. Aus der Funktorialität der Jordanzerlegung (Lemma 1.18) ergibt sich außerdem, dass X_2 bereits ein nilpotentes Element von \mathfrak{s} ist.

Also ist $\text{ad}_{\mathfrak{s}} X_2$ nilpotent und damit auch $\text{ad}_{\mathfrak{g}} X_2 = 0 \oplus (\text{ad}_{\mathfrak{s}} X_2)$ nilpotent. Damit ist $\exp(\text{ad}_{\mathfrak{g}} X_2) \in \text{Int } \mathfrak{g}$, und es gilt

$$\text{ad}_{\mathfrak{g}'} X = \text{ad}_{\mathfrak{g}'} X_2 = (\text{ad}_{\mathfrak{g}} X_2)|_{\mathfrak{g}'}$$

ist

$$\exp(\text{ad}_{\mathfrak{g}'} X) = \exp(\text{ad}_{\mathfrak{g}} X_2)|_{\mathfrak{g}'}$$

Also ist $\exp(\text{ad}_{\mathfrak{g}} X_2)$ eine Fortsetzung von $\exp(\text{ad}_{\mathfrak{g}'} X)$ auf \mathfrak{g} . □

2 Klassifikation halbeinfacher Orbiten

Jede halbeinfache Matrix ist konjugiert zu einer Diagonalmatrix, und je zwei Diagonalmatrizen sind genau dann konjugiert zueinander, wenn sie bis auf Reihenfolge die gleichen Diagonaleinträge mit jeweils gleicher Vielfachheit aufweisen. Die Orbiten der halbeinfachen Elemente in $\mathfrak{gl}_n(k)$ unter der Konjugationswirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$ werden deshalb durch die Orbiten k^n/S_n parametrisiert, wobei S_n durch Permutation der Einträge auf k^n wirkt, indem man einem Orbit $[(a_1, \dots, a_n)]$ die Konjugationsklasse der Diagonalmatrix $\mathrm{diag}(a_1, \dots, a_n)$ zuordnet.

In diesem Kapitel verallgemeinern wir dieses Vorgehen eine allgemeine reductive Lie-Algebra \mathfrak{g} , indem wir davon ausgehen, dass auf dieser eine Wirkung durch eine Gruppe G gegeben ist. Wir zeigen, dass unter gewissen Voraussetzungen an diese Gruppenwirkung die halbeinfachen Elemente in \mathfrak{g} invariant unter G sind, und dass sich aus jeder CSA $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ ein Repräsentantensystem der G -Orbiten halbeinfacher Elemente wählen lässt. Insbesondere erhalten wir damit in Theorem 2.19, dass sich die G -Orbiten der halbeinfachen Elemente in \mathfrak{g} durch den Quotienten $\mathfrak{h}/N_G(\mathfrak{h})$ identifizieren lassen.

Bevor wir diesen abstrakten Fall behandeln, kehren wir allerdings zu dem Spezialfall der reductiven Lie-Algebra $\mathfrak{gl}_n(k)$ zurück, und formulieren für diese Theorem 2.8 als Spezialfall von Theorem 2.19. Dabei betrachten wir als Gruppenwirkung die Konjugationswirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$, und fixieren eine beliebige CSA in $\mathfrak{gl}_n(k)$. Durch die Wahl der Diagonalmatrizen $\mathfrak{d}_n(k)$ als CSA erhalten wir anschließend in Korollar 2.10 aus Theorem 2.8 erneut die Parametrisierung der GL_n -Orbiten halbeinfacher Elemente in \mathfrak{g} , also der Konjugationsklassen halbeinfacher Elemente, durch k^n/S_n .

2.1 Klassifikationssatz für $\mathfrak{gl}_n(k)$

Definition 2.1. Für $X \in \mathfrak{gl}_n(k)$ sei

$$\mathcal{O}_X := \{SXS^{-1} \mid S \in \mathrm{GL}_n(k)\}$$

der *Orbit* von X unter der Wirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$. Ein Orbit $\mathcal{O} \subseteq \mathfrak{g}$ heißt *halbeinfach*, falls er aus halbeinfachen Elementen besteht. Mit

$$\mathcal{S}(\mathfrak{gl}_n(k), \mathrm{GL}_n(k)) := \{\mathcal{O} \subseteq \mathfrak{g} \mid \mathcal{O} \text{ ist ein halbeinfacher Orbit}\}$$

wird die Menge der halbeinfachen Orbiten bezeichnet.

Ob ein Element $X \in \mathfrak{gl}_n(k)$ halbeinfach ist, hängt nur von seinen Orbit ab: Da X genau dann halbeinfach ist, wenn SXS^{-1} für alle $S \in \mathrm{GL}_n(k)$ halbeinfach ist, ist X genau dann halbeinfach, wenn der Orbit \mathcal{O}_X halbeinfach ist.

Unser erster Schritt zur Bestimmung der halbeinfachen Orbiten $\mathcal{S}(\mathfrak{gl}_n(k), \mathrm{GL}_n(k))$ besteht darin, den Zentralisator eines halbeinfachen Elementes zu verstehen.

Lemma 2.2. *Ist $\mathfrak{g} := \mathfrak{gl}_n(k)$ und $X \in \mathfrak{g}$ halbeinfach, so ist \mathfrak{g}^X reduktiv.*

Beweis. Da X halbeinfach (also diagonalisierbar) ist, gibt es $S \in \mathrm{GL}_n(k)$ mit

$$SXS^{-1} = \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_1, \dots, \lambda_r, \dots, \lambda_r), \quad (1)$$

wobei $\lambda_i \neq \lambda_j$ für $i \neq j$, und λ_i mit einer Vielfachheit $n_i \in \mathbb{N}$, $n_i > 1$ vorkommt. Konjugation mit S ist ein Automorphismus von $\mathfrak{gl}_n(k)$, der X auf SXS^{-1} abbildet, und damit auch \mathfrak{g}^X auf $\mathfrak{g}^{SXS^{-1}}$. Es genügt daher die Aussage unter der Annahme zu zeigen, dass X bereits eine Diagonalmatrix der Form (1) ist. Es sei dann

$$X = \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_1, \dots, \lambda_r, \dots, \lambda_r) = \mathrm{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n) \quad (2)$$

und $A = (a_{ij}) \in \mathfrak{g}$. Der (i, j) -te Eintrag von AX ist dann $\mu_j a_{ij}$ und der (i, j) -te Eintrag von XA ist $\mu_i a_{ij}$. Deshalb ist genau dann $A \in \mathfrak{g}^X$, wenn

$$\mu_i = \mu_j \quad \text{oder} \quad a_{ij} = 0 \quad \text{für alle } i, j = 1, \dots, n.$$

Aus (2) und $\lambda_i \neq \lambda_j$ für $i \neq j$ folgt deshalb, dass

$$\mathfrak{g}^X = \left\{ \left(\begin{array}{ccc|ccc} A_1 & & & & & \\ & \ddots & & & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & A_r & & \end{array} \right) \mid A_1 \in \mathfrak{gl}_{n_1}(k), \dots, A_r \in \mathfrak{gl}_{n_r}(k) \right\}.$$

Deshalb ist

$$\mathfrak{g}^X \cong \mathfrak{gl}_{n_1}(k) \times \dots \times \mathfrak{gl}_{n_r}(k),$$

und somit insbesondere reduktiv. \square

Aus dem Beweis von Lemma 2.2 ergibt sich als Spezialfall die folgende Beobachtung.

Korollar 2.3. *Es sei $\mathfrak{g} := \mathfrak{gl}_n(k)$ und $X \in \mathfrak{g}$ eine reguläre Diagonalmatrix. Dann ist $\mathfrak{g}^X = \mathfrak{d}_n(k)$.*

Hieraus folgt wiederum ein nützliches Kriterium zur Konstruktion von CSA in linearen reductiven Lie-Algebren.

Korollar 2.4. *Es sei $\mathfrak{g} \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ eine reductive Unteralgebra, die eine reguläre Diagonalmatrix X enthält. Dann ist $\mathfrak{d}_n(k) \cap \mathfrak{g}$ eine CSA von \mathfrak{g} .*

Beweis. Wie bereits in Beispiel 1.49 bemerkt, ist $\mathfrak{d}_n(k)$ eine CSA von $\mathfrak{gl}_n(k)$. Deshalb ist zum einen $Z_{\mathfrak{gl}_n(k)}(\mathfrak{d}_n(k)) = \mathfrak{d}_n(k)$, und zum anderen $\mathfrak{h} := \mathfrak{d}_n(k) \cap \mathfrak{g}$ eine torale Unteralgebra von $\mathfrak{gl}_n(k)$, und damit auch von \mathfrak{g} . Nach Annahme ist X regulär, weshalb nach Korollar 2.3 $Z_{\mathfrak{gl}_n(k)}(X) = \mathfrak{d}_n(k)$. Da $X \in \mathfrak{h}$ ist deshalb

$$Z_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) \subseteq Z_{\mathfrak{gl}_n(k)}(X) \cap \mathfrak{g} = \mathfrak{d}_n(k) \cap \mathfrak{g} = \mathfrak{h},$$

und \mathfrak{h} somit selbstzentralisierend in \mathfrak{g} . Nach Korollar 1.51 ist \mathfrak{h} deshalb bereits eine CSA von \mathfrak{g} . \square

Bemerkung 2.5. Beliebige Zentralisatoren in reductiven Lie-Algebren sind nicht notwendigerweise reductiv. Es sei etwa $\mathfrak{g} := \mathfrak{gl}_3(k)$ und

$$X := \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ & 0 & 0 \\ & & 0 \end{pmatrix} \in \mathfrak{g}.$$

Durch direktes Nachrechnen ergibt sich, dass

$$\mathfrak{g}^X = \left\{ \begin{pmatrix} a & b & c \\ & d & e \\ & & a \end{pmatrix} \mid a, b, c, d, e \in k \right\}.$$

Dann ergibt sich auch, dass

$$Z(\mathfrak{g}^X) = \left\{ \begin{pmatrix} a & 0 & b \\ & a & 0 \\ & & a \end{pmatrix} \mid a, b \in k \right\}.$$

Außerdem ist $[\mathfrak{g}^X, \mathfrak{g}^X] \subseteq [\mathfrak{t}_3(k), \mathfrak{t}_3(k)] = \mathfrak{n}_3(k)$. Da \mathfrak{g}^X schon nicht in $Z(\mathfrak{g}^X) \oplus \mathfrak{n}_3(k)$ enthalten ist, muss dann $\mathfrak{g}^X \neq Z(\mathfrak{g}^X) \oplus [\mathfrak{g}^X, \mathfrak{g}^X]$ sein.

Wir zeigen nun, dass eine beliebigen CSA $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ die halbeinfachen Orbiten in $\mathcal{S}(\mathfrak{gl}_n(k), \mathrm{GL}_n(k))$ alle nichttrivial schneidet, und erhalten hieraus das versprochene Theorem.

Lemma 2.6. *Es sei $\mathfrak{g} := \mathfrak{gl}_n(k)$, $\mathcal{O} \subseteq \mathfrak{g}$ ein halbeinfacher Orbit und $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA. Dann gibt es $X \in \mathfrak{h}$ mit $\mathcal{O} = \mathcal{O}_X$.*

Beweis. Es sei $X' \in \mathcal{O}$, also $\mathcal{O} = \mathcal{O}_{X'}$. Dann ist X' halbeinfach, da \mathcal{O} ein halbeinfacher Orbit ist. Also ist X' in einer CSA $\mathfrak{h}' \subseteq \mathfrak{g}$ enthalten. Wie bereits in Beispiel 1.49 gesehen sind alle CSA von \mathfrak{g} konjugiert unter $\mathrm{GL}_n(k)$. Also gibt es $S \in \mathrm{GL}_n(k)$ mit $S\mathfrak{h}'S^{-1} = \mathfrak{h}$. Insbesondere ist $SX'S^{-1} \in \mathfrak{h}$ mit

$$\mathcal{O} = \mathcal{O}_{X'} = \mathcal{O}_{SX'S^{-1}}. \quad \square$$

Definition 2.7. Ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ eine CSA, so sei

$$W(\mathfrak{h}, \mathrm{GL}_n(k)) := N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h}) / Z_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h}),$$

wobei $N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$ den Normalisator und $Z_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$ den Zentralisator bezeichnet.

Ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ eine CSA, so induziert die Wirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$ auf \mathfrak{g} eine Wirkung der Gruppe $W(\mathfrak{h}, \mathrm{GL}_n(k))$ auf \mathfrak{h} .

Theorem 2.8 (Klassifikationssatz für $\mathfrak{gl}_n(k)$). *Es sei $\mathfrak{g} := \mathfrak{gl}_n(k)$ und $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA. Dann ist die Abbildung*

$$\begin{aligned} \Phi: \mathfrak{h} / W(\mathfrak{h}, \mathrm{GL}_n(k)) &\xrightarrow{\sim} \mathcal{S}(\mathfrak{gl}_n(k), \mathrm{GL}_n(k)) \\ [X] &\longmapsto \mathcal{O}_X \end{aligned}$$

eine wohldefinierte Bijektion.

Beweis. Es genügt die Aussage für $N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$ statt für $W(\mathfrak{h}, \mathrm{GL}_n(k))$ zu zeigen, da eine Gleichheit von Orbiten $\mathfrak{h}/N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h}) = \mathfrak{h}/W(\mathfrak{h}, \mathrm{GL}_n(k))$ gilt.

Da \mathfrak{h} eine CSA von \mathfrak{g} ist, besteht \mathfrak{h} nach Korollar 1.44 aus halbeinfachen Elementen. Deshalb ist \mathcal{O}_X für jedes $X \in \mathfrak{h}$ ein halbeinfacher Orbit. Also ist die Abbildung

$$\tilde{\Phi}: \mathfrak{h} \rightarrow \mathcal{S}(\mathfrak{gl}_n(k), \mathrm{GL}_n(k)), \quad X \mapsto \mathcal{O}_X$$

wohldefiniert. Nach Lemma 2.6 ist $\tilde{\Phi}$ surjektiv. Für $X \in \mathfrak{h}$ ist $\mathcal{O}_X = \mathcal{O}_{SX S^{-1}}$ für alle $S \in \mathrm{GL}_n(k)$, insbesondere also für alle $S \in N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$. Also faktorisiert $\tilde{\Phi}$ über eine wohldefinierte Abbildung

$$\Phi: \mathfrak{h}/N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h}) \rightarrow \mathcal{S}(\mathfrak{gl}_n(k), \mathrm{GL}_n(k)), [X] \mapsto \mathcal{O}_X.$$

Insbesondere ist Φ ebenfalls surjektiv.

Für die Injektivität von Φ gilt es zu zeigen, dass $X_1, X_2 \in \mathfrak{h}$ mit $\mathcal{O}_{X_1} = \mathcal{O}_{X_2}$ bereits durch ein Element aus $N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$ konjugiert sind. Da $\mathcal{O}_{X_1} = \mathcal{O}_{X_2}$ gilt, gibt es zumindest $T \in \mathrm{GL}_n(k)$ mit $TX_2T^{-1} = X_1$. Da Konjugation mit T ein Automorphismus von \mathfrak{g} ist, sind \mathfrak{h} und $T\mathfrak{h}T^{-1}$ zwei CSA von \mathfrak{g} , die X_1 enthalten. Da CSA abelsch sind, folgt, dass bereits $\mathfrak{h}, T\mathfrak{h}T^{-1} \subseteq \mathfrak{g}^{X_1}$. Nach Lemma 2.2 ist \mathfrak{g}^{X_1} reduktiv, und nach Korollar 1.52 sind \mathfrak{h} und $T\mathfrak{h}T^{-1}$ daher zwei CSA von \mathfrak{g}^{X_1} .

Nach Korollar 1.61 gibt es somit $\sigma \in \mathrm{Int} \mathfrak{g}^{X_1}$ mit $\sigma(T\mathfrak{h}T^{-1}) = \mathfrak{h}$. Ist $Y \in \mathfrak{g}^{X_1}$ nilpotent, so ist $(\mathrm{ad}_{Z_{\mathfrak{g}}(X_1)} Y)(X_1) = 0$, somit

$$\exp(Y)X_1 \exp(Y)^{-1} = \exp(\mathrm{ad}_{Z_{\mathfrak{g}}(X_1)} Y)(X_1) = X_1,$$

und deshalb $\exp(Y) \in Z_{\mathrm{GL}_n(k)}(X_1)$. Nach Korollar 1.57 ist daher σ durch Konjugation mit einem Element $S \in Z_{\mathrm{GL}_n(k)}(X)$ gegeben.

Zusammengefasst ist daher

$$(ST)X_2(ST)^{-1} = STX_2T^{-1}S^{-1} = SX_1S^{-1} = X_1,$$

und da

$$(ST)\mathfrak{h}(ST)^{-1} = ST\mathfrak{h}T^{-1}S^{-1} = \sigma(T\mathfrak{h}T^{-1}) = \mathfrak{h},$$

ist auch $ST \in N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$. Also sind X_2 und X_1 durch ein Element aus $N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$ konjugiert zueinander. \square

Wir wollen nun Theorem 2.8 für eine konkrete Berechnung der halbeinfachen Orbiten in $\mathfrak{g} := \mathfrak{gl}_n(k)$ nutzen.

Um Theorem 2.8 anzuwenden, müssen wir eine CSA \mathfrak{h} von \mathfrak{g} wählen; wir entscheiden uns für die Diagonalmatrizen $\mathfrak{h} := \mathfrak{d}_n(k)$. Um die Orbiten $\mathfrak{h}/W(\mathfrak{h}, \mathrm{GL}_n(k))$ zu bestimmen, berechnen wir zunächst $N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$ und $Z_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$, und anschließend $W(\mathfrak{h}, \mathrm{GL}_n(k))$ selbst. Entscheidend hierfür ist, dass \mathfrak{h} eine reguläre Diagonalmatrix enthält.

Aus Korollar 2.3 folgt damit bereits, dass $Z_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$ aus Diagonalmatrizen besteht, also $Z_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h}) \subseteq \mathrm{D}_n(k)$. Da Diagonalmatrizen kommutieren, gilt damit schon $\mathrm{D}_n(k) \subseteq Z_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$. Zur Berechnung von $N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h})$ wollen wir die folgende Aussage festhalten.

Lemma 2.9. *Es sei $U \subseteq \mathfrak{d}_n(k)$ eine Teilmenge, und es gebe eine reguläre Diagonalmatrix $X \in U$. Unter der Konjugationswirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$ auf $\mathfrak{gl}_n(k)$ besteht dann*

$$N_{\mathrm{GL}_n(k)}(U) = \{S \in \mathrm{GL}_n(k) \mid SUS^{-1} = U\}$$

aus Monomialmatrizen.

Beweis. Es ist $X = \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$ mit $\lambda_i \neq \lambda_j$ für alle $i \neq j$. Es sei $S \in N_{\mathrm{GL}_n(k)}(U)$ mit Einträgen $S = (s_{ij})$. Dann ist auch $SXS^{-1} \in U$, also $SXS^{-1} = \mathrm{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n)$ für passende $\mu_1, \dots, \mu_n \in k$, und somit

$$SX = \mathrm{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n)S.$$

Der (i, j) -te Eintrag auf der linken Seite ist $\lambda_j s_{ij}$, der (i, j) -te Eintrag auf der rechten Seite $\mu_i s_{ij}$. Es ist also

$$\lambda_j s_{ij} = \mu_i s_{ij} \quad \text{für alle } i, j = 1, \dots, n.$$

Für alle $i, j, j' = 1, \dots, n$ ist damit

$$\lambda_j s_{ij} s_{ij'} = \mu_i s_{ij} s_{ij'} = s_{ij} (\mu_i s_{ij'}) = s_{ij} (\lambda_{j'} s_{ij'}) = \lambda_{j'} s_{ij} s_{ij'}.$$

Da $\lambda_j \neq \lambda_{j'}$ für $j \neq j'$ ist damit $s_{ij} s_{ij'} = 0$ für alle $i = 1, \dots, n$ und $j \neq j'$. In jeder Zeile hat S also höchstens einen Eintrag, der verschieden von 0 ist. Da S invertierbar ist, befindet sich in jeder Zeile auch mindestens ein Eintrag, der verschieden von 0 ist. Also ist in jeder Zeile von S genau ein Eintrag verschieden von 0.

Da mit $S \in N_{\mathrm{GL}_n(k)}(U)$ auch $S^{-1} \in N_{\mathrm{GL}_n(k)}(U)$ gibt es auch $\mu_1, \dots, \mu_n \in k$ mit $\mathrm{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n) \in U$ und

$$XS = S \mathrm{diag}(\mu_1, \dots, \mu_n).$$

Hieraus ergibt sich analog zur obigen Rechnung, dass S in jeder Spalte genau einen Eintrag hat, der verschieden von 0 ist. \square

Da \mathfrak{h} eine reguläre Diagonalmatrix enthält, ist $N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h}) \subseteq \mathrm{Mon}_n(k)$ nach Lemma 2.9. Andererseits wird \mathfrak{h} von $\mathrm{D}_n(k)$ und $\mathrm{P}_n(k)$ normalisiert, und damit auch von $\mathrm{Mon}_n(k) = \mathrm{D}_n(k) \rtimes \mathrm{P}_n(k)$. Also ist $N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h}) = \mathrm{Mon}_n(k)$. Somit ist

$$\begin{aligned} W(\mathfrak{h}, \mathrm{GL}_n(k)) &:= N_{\mathrm{GL}_n(k)}(\mathfrak{h}) / Z_{\mathrm{GL}_n(k)} = \mathrm{Mon}_n(k) / \mathrm{D}_n(k) \\ &= (\mathrm{D}_n(k) \rtimes \mathrm{P}_n(k)) / \mathrm{D}_n(k) \cong \mathrm{P}_n(k) \cong S_n, \end{aligned}$$

wobei die Wirkung von $W(\mathfrak{h}, \mathrm{GL}_n(k))$ auf \mathfrak{h} der Permutation der Diagonaleinträge durch S_n entspricht. Zusammen mit der zusätzliche Identifikation

$$k^n \cong \mathfrak{h}, \quad (\lambda_1, \dots, \lambda_n) \mapsto \mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)$$

ergibt sich damit die Klassifikation der halbeinfachen Orbiten in $\mathfrak{gl}_n(k)$ unter der Konjugationswirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$:

Korollar 2.10. *Es gibt eine wohldefinierte Bijektion*

$$\begin{aligned} k^n / S_n &\xrightarrow{\sim} \mathcal{S}(\mathfrak{gl}_n(k), \mathrm{GL}_n(k)), \\ [(\lambda_1, \dots, \lambda_n)] &\longmapsto \mathcal{O}_{\mathrm{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_n)}, \end{aligned}$$

wobei S_n auf k^n durch Permutation der Einträge wirkt.

2.2 Reduktive Lie-Algebren

In diesem Abschnitt verallgemeinern wir das für $\mathfrak{gl}_n(k)$ und $\mathrm{GL}_n(k)$ beschriebene Vorgehen auf beliebige reductive Lie-Algebren unter passenden Gruppenwirkungen. Entscheidend ist hierbei, dass wir, wie bereits für $\mathfrak{gl}_n(k)$, Cartan-Unteralgebren und ihr Konjugationsverhalten ausnutzen wollen.

In diesem Abschnitt bezeichnet \mathfrak{g} eine reductive Lie-Algebra, und G eine Gruppe, die per Lie-Algebra-Homomorphismen auf \mathfrak{g} wirkt.

Definition 2.11. Für $X \in \mathfrak{g}$ ist

$$\mathcal{O}_X := \{s \cdot X \mid s \in G\}$$

der *Orbit* von X unter G . Ein Orbit $\mathcal{O} \subseteq \mathfrak{g}$ heißt *halbeinfach*, wenn \mathcal{O} aus halbeinfachen Elementen besteht. Mit

$$\mathcal{S}(\mathfrak{g}, G) := \{\mathcal{O} \subseteq \mathfrak{g} \mid \mathcal{O} \text{ ist ein halbeinfacher } G\text{-Orbit}\}$$

wird die Menge der halbeinfachen Orbits bezeichnet.

Für $X \in \mathfrak{g}$ ist

$$\mathrm{ad} \phi(X) = \phi(\mathrm{ad} X)\phi^{-1} \quad \text{für alle } \phi \in \mathrm{Aut} \mathfrak{g}.$$

Deshalb ist X genau dann halbeinfach, wenn der Orbit \mathcal{O}_X halbeinfach ist.

Für das weitere Vorgehen stellen wir an die Wirkung von G auf \mathfrak{g} die zusätzliche Bedingung, dass es für jedes $\sigma \in \mathrm{Int} \mathfrak{g}$ ein $s \in G$ gibt, das durch σ auf \mathfrak{g} wirkt.

Beispiel 2.12. 1. $\mathrm{GL}_n(k)$ wirkt durch Konjugation auf $\mathfrak{gl}_n(k)$ und nach Korollar 1.57 ist jeder innere Automorphismus von $\mathfrak{gl}_n(k)$ durch Konjugation mit einem Element aus $\mathrm{GL}_n(k)$ gegeben.

Analoges gilt für die Konjugationswirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$ auf $\mathfrak{sl}_n(k)$.

2. Es sei $B \in M_n(k)$, so dass

$$\mathfrak{o}(B) = \{A \in \mathfrak{gl}_n(k) \mid A^\top B + BA = 0\}$$

reduktiv ist. Dann wirkt die Gruppe

$$\mathrm{O}(B) = \{S \in \mathrm{GL}_n(k) \mid S^\top B S = B\}$$

durch Konjugation auf $\mathfrak{o}(B)$, und für konkret nilpotentes $X \in \mathfrak{o}(B)$ ergibt sich durch explizites Nachrechnen, dass $\exp(X) \in \mathrm{O}(B)$. Also ist nach Korollar 1.57 jeder innere Automorphismus von $\mathfrak{o}(B)$ durch Konjugation mit einem Element aus $\mathrm{O}(B)$ gegeben. Hieraus ergeben sich die folgenden konkrete Beispiele.

- a) Für $B = 0$ ergibt sich erneut die Konjugationswirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$ auf $\mathfrak{gl}_n(k)$
- b) Wie bereits in Beispiel 1.6 gesehen ist $\mathfrak{so}_n(k)$ für alle $n \geq 1$ reduktiv. Für die Einheitsmatrix $I_n \in M_n(k)$ ergibt sich die Konjugationswirkung der orthogonalen Gruppe

$$\mathrm{O}_n(k) := \mathrm{O}(I_n) = \{S \in \mathrm{GL}_n(k) \mid S^\top = S^{-1}\}$$

auf $\mathfrak{so}_n(k) = \mathfrak{o}(I_n)$.

- c) Wie bereits in Beispiel 1.6 gesehen ist $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ für alle $n \geq 1$ halbeinfach, und somit ebenfalls reduktiv. Daher ergibt sich für

$$\Omega = \begin{pmatrix} & I_n \\ -I_n & \end{pmatrix} \in M_{2n}(k)$$

die Konjugationswirkung der symplektischen Gruppe

$$\mathrm{Sp}_{2n}(k) := \mathrm{O}(\Omega) = \{S \in \mathrm{GL}_{2n}(k) \mid S^\top \Omega S = \Omega\}$$

auf $\mathfrak{sp}_{2n}(k) = \mathfrak{o}(\Omega)$.

3. Ist $G \subseteq \mathrm{Aut} \mathfrak{g}$ eine Untergruppe, so wirkt G auf naheliegende Weise auf \mathfrak{g} , und G erfüllt die gewünschte Bedingung genau dann, wenn $\mathrm{Int} \mathfrak{g} \subseteq G$. Spezialfälle hiervon sind $\mathrm{Int} \mathfrak{g}$ selbst sowie $\mathrm{Aut} \mathfrak{g}$.

Ist $X \in M_n(k)$ konkret nilpotent, so ist $\det \exp(X) = 1$. Denn da X nilpotent ist, gibt es $S \in \mathrm{GL}_n(k)$, so dass SXS^{-1} eine echte obere Dreiecksmatrix ist. Deshalb ist $\sum_{m=1}^{\infty} (SXS^{-1})^m / m!$ eine echte obere Dreiecksmatrix, und somit $\exp(SXS^{-1})$ eine obere Dreiecksmatrix mit Einsen auf der Diagonalen. Daraus folgt, dass

$$1 = \det(\exp(SXS^{-1})) = \det(S \exp(X) S^{-1}) = \det(\exp(X)).$$

Wir erhalten daher aus Beispiel 2.12 noch weitere Beispiele:

Beispiel 2.13. 1. Statt der Konjugationswirkung von $\mathrm{GL}_n(k)$ auf $\mathfrak{gl}_n(k)$ und $\mathfrak{sl}_n(k)$ lässt sich auch die Konjugationswirkung von $\mathrm{SL}_n(k)$ auf $\mathfrak{gl}_n(k)$ und $\mathfrak{sl}_n(k)$ betrachten.

2. Ist $B \in M_n(k)$, so dass $\mathfrak{o}(B)$ reduktiv ist, so ist jeder innere Automorphismus von $\mathfrak{o}(B)$ bereits durch Konjugation mit einem Element aus

$$\mathrm{SO}(B) = \{S \in \mathrm{O}(B) \mid \det(S) = 1\}$$

gegeben. Insbesondere ergibt sich für $B = I_n$ die Konjugationswirkung von

$$\mathrm{SO}_n(k) := \{S \in \mathrm{O}_n(k) \mid \det S = 1\}$$

auf $\mathfrak{so}_n(k)$.

3. Ist \mathfrak{g} reduktiv, so ist für jedes ad-nilpotente $X \in \mathfrak{g}$ bereits $\exp(\mathrm{ad} X) \in \mathrm{SL}(\mathfrak{g})$ und somit

$$\mathrm{Int} \mathfrak{g} \subseteq \{\phi \in \mathrm{Aut} \mathfrak{g} \mid \det \phi = 1\}.$$

Wir wollen uns nun der Klassifikation der halbeinfachen Orbiten zuwenden. Motiviert von Lemma 2.2 besteht unser erster Schritt darin, die Zentralisatoren halbeinfacher Elemente zu verstehen. Wir nutzen im Folgenden die Eigenschaften und Notationen der Wurzelraumzerlegung aus Proposition 1.33, und legen dem Leser gegebenenfalls nahe, sich noch einmal mit diesen vertraut zu machen.

Proposition 2.14. *Es sei \mathfrak{g} eine halbeinfache Lie-Algebra, $X \in \mathfrak{g}$ ein halbeinfaches Element, und $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA, die X enthält. Es seien $\Phi := \Phi(\mathfrak{g}, \mathfrak{h})$ die entsprechenden Wurzeln und*

$$\Phi_X := \{\alpha \in \Phi \mid \alpha(X) = 0\}. \quad (3)$$

Dann ist

$$\mathfrak{g}^X = \mathfrak{h} \oplus \bigoplus_{\alpha \in \Phi_X} \mathfrak{g}_\alpha, \quad (4)$$

und der Zentralisator \mathfrak{g}^X ist reduktiv.

Beweis. Es sei

$$\mathfrak{g} = \mathfrak{h} \oplus \bigoplus_{\alpha \in \Phi} \mathfrak{g}_\alpha \quad (5)$$

die Wurzelraumzerlegung von \mathfrak{g} bezüglich \mathfrak{h} . Hat $Y \in \mathfrak{g}$ bezüglich (5) die Zerlegung $Y = Y_0 + \sum_{\alpha \in \Phi} Y_\alpha$, so ist

$$[X, Y] = \sum_{\alpha \in \Phi} \alpha(X) Y_\alpha.$$

Daraus folgt mit der Direktheit der Zerlegung (5), dass

$$Y \in \mathfrak{g}^X \Leftrightarrow \alpha(X) Y_\alpha = 0 \text{ f\u00fcr alle } \alpha \in \Phi.$$

Hieraus ergibt sich (4).

Das Zentrum von \mathfrak{g}^X ergibt sich als

$$Z(\mathfrak{g}^X) = \bigcap_{\alpha \in \Phi_X} \ker \alpha. \quad (6)$$

Es ist n\u00e4mlich $Z(\mathfrak{g}^X) \subseteq Z_{\mathfrak{g}}(\mathfrak{h}) = \mathfrak{h}$, und f\u00fcr $Y \in \mathfrak{h}$ ist $[Y, \mathfrak{g}^X] = \bigoplus_{\alpha \in \Phi_X} \alpha(Y) \mathfrak{g}_\alpha$, also genau dann $[Y, \mathfrak{g}^X] = 0$, wenn $\alpha(Y) = 0$ f\u00fcr alle $\alpha \in \Phi_X$.

F\u00fcr die Reduktivit\u00e4t von \mathfrak{g}^X gilt es zu zeigen, dass $Z(\mathfrak{g}^X) = \text{rad } \mathfrak{g}^X$. Da bereits $Z(\mathfrak{g}^X) \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X$ gen\u00fcgt es zu zeigen, dass $\text{rad } \mathfrak{g}^X \subseteq Z(\mathfrak{g}^X)$. Entscheidend hierf\u00fcr ist die folgende Beobachtung:

Behauptung 1. Es gibt kein $\alpha \in \Phi_X$ mit $\mathfrak{g}_\alpha \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X$.

Beweis. Angenommen es gebe $\alpha \in \Phi_X$ mit $\mathfrak{g}_\alpha \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X$. Da $\alpha \in \Phi_X$ ist dann auch $-\alpha \in \Phi_X$ und somit $\mathfrak{g}_{-\alpha} \subseteq \mathfrak{g}^X$. Damit ist auch $kH_\alpha = [\mathfrak{g}_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}] \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X$ und $\mathfrak{g}_{-\alpha} = [H_\alpha, \mathfrak{g}_{-\alpha}] \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X$, da $\text{rad } \mathfrak{g}^X$ ein Ideal in \mathfrak{g}^X ist. Es ist also

$$S_\alpha = \mathfrak{g}_\alpha \oplus kH_\alpha \oplus \mathfrak{g}_{-\alpha} \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X.$$

Dies steht im Widerspruch dazu, dass $S_\alpha \cong \mathfrak{sl}_2(k)$ nicht aufl\u00f6sbar ist (hier nutzen wir, dass $\text{char } k \neq 0$). \square

Behauptung 2. Es gibt $H \in \mathfrak{h}$ mit $\alpha(H) \neq 0$ f\u00fcr alle $\alpha \in \Phi$ und $\alpha(H) \neq \beta(H)$ f\u00fcr alle $\alpha, \beta \in \Phi$ mit $\alpha \neq \beta$.

Beweis. Wegen des Isomorphismus $\mathfrak{h} \rightarrow \mathfrak{h}^{**}, H \mapsto (\phi \mapsto \phi(H))$ genügt es ein Element $\varphi \in \mathfrak{h}^{**}$ zu konstruieren, so dass $\varphi(\alpha) \neq 0$ für alle $\alpha \in \Phi$ und $\varphi(\alpha) \neq \varphi(\beta)$ für alle $\alpha, \beta \in \Phi$ mit $\alpha \neq \beta$.

Da $\mathfrak{h}^* = \text{span}_k \Phi$ gibt es eine k -Basis $\alpha_1, \dots, \alpha_n \in \Phi$ von \mathfrak{h}^* . Der Körper k ist algebraisch abgeschlossen mit $\text{char } k = 0$, also unendlichdimensional über \mathbb{Q} . Deshalb gibt es $z_1, \dots, z_n \in k$, die linear unabhängig über \mathbb{Q} sind. Es sei $\varphi: \mathfrak{h}^* \rightarrow k$ die k -lineare Abbildung mit $\varphi(\alpha_i) = z_i$ für alle $i = 1, \dots, n$. Per Konstruktion ist φ auf $\text{span}_{\mathbb{Q}}(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ injektiv. Da $0 \notin \Phi$ und $\Phi \subseteq \text{span}_{\mathbb{Q}}(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$ erfüllt φ die gewünschten Bedingungen. \square

Um zu zeigen, dass $\text{rad } \mathfrak{g}^X \subseteq Z(\mathfrak{g}^X)$, zeigen wir zunächst, dass $\text{rad } \mathfrak{g}^X \subseteq \mathfrak{h}$: Andernfalls gebe es $Y \in \text{rad } \mathfrak{g}^X$ mit $Y = Y_0 + \sum_{\alpha \in \Phi_X} Y_\alpha$ bezüglich (4) und $\Psi \neq \emptyset$ für

$$\Psi := \{\alpha \in \Phi_X \mid Y_\alpha \neq 0\}.$$

Für alle $H \in \mathfrak{h}$ und $p \geq 1$ ist dann auch

$$(\text{ad } H)^p(Y) = \sum_{\alpha \in \Psi} \alpha(H)^p Y_\alpha \in \text{rad } \mathfrak{g}^X,$$

da $\text{rad } \mathfrak{g}^X$ ein Ideal in \mathfrak{g}^X ist. Es sei $H \in \mathfrak{h}$ wie in Behauptung 2 und $\Psi = \{\alpha_1, \dots, \alpha_n\}$ mit $\alpha_i \neq \alpha_j$ für $i \neq j$. Für $p = 1, \dots, n$ sei

$$Z_p := (\text{ad } H)^p(Y) = \sum_{\alpha \in \Psi} \alpha(H)^p Y_\alpha \in \text{rad } \mathfrak{g}^X.$$

Da die Wurzelräume \mathfrak{g}_α für alle $\alpha \in \Phi$ eindimensional sind, ist $(Y_{\alpha_1}, \dots, Y_{\alpha_n})$ eine Basis von $\bigoplus_{\alpha \in \Psi} \mathfrak{g}_\alpha$. Damit ist auch (Z_1, \dots, Z_n) eine Basis von $\bigoplus_{\alpha \in \Psi} \mathfrak{g}_\alpha$, da

$$\begin{aligned} & \det \begin{pmatrix} \alpha_1(h) & \alpha_1(h)^2 & \cdots & \alpha_1(h)^n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_n(h) & \alpha_n(h)^2 & \cdots & \alpha_n(h)^n \end{pmatrix} \\ &= \alpha_1(h) \cdots \alpha_n(h) \det \begin{pmatrix} 1 & \alpha_1(h) & \cdots & \alpha_1(h)^{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \alpha_n(h) & \cdots & \alpha_n(h)^{n-1} \end{pmatrix} \\ &= \alpha_1(h) \cdots \alpha_n(h) \prod_{1 \leq i < j \leq n} (\alpha_j(h) - \alpha_i(h)) \neq 0. \end{aligned}$$

Da $Z_1, \dots, Z_n \in \text{rad } \mathfrak{g}^X$ ist damit $\bigoplus_{\alpha \in \Psi} \mathfrak{g}_\alpha \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X$, also $\mathfrak{g}_\alpha \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X$ für alle $\alpha \in \Psi$. Da nach Annahme $\Psi \neq \emptyset$ gibt deshalb insbesondere $\alpha \in \Psi$ mit $\mathfrak{g}_\alpha \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X$. Dies steht im Widerspruch zu Behauptung 1, und zeigt, dass $\text{rad } \mathfrak{g}^X \subseteq \mathfrak{h}$ gilt.

Ist $Y \in \text{rad } \mathfrak{g}^X \subseteq \mathfrak{h}$ mit $Y \notin Z(\mathfrak{g}^X)$, so gibt es nach (6) ein $\alpha \in \Phi_X$ mit $\alpha(Y) \neq 0$. Dann ist

$$\mathfrak{g}_\alpha = [Y, \mathfrak{g}_\alpha] \subseteq \text{rad } \mathfrak{g}^X,$$

da $\text{rad } \mathfrak{g}^X$ ein Ideal in \mathfrak{g}^X ist. Dies steht im Widerspruch zu Behauptung 1 und zeigt deshalb, dass $\text{rad } \mathfrak{g}^X \subseteq Z(\mathfrak{g}^X)$ gilt. \square

Korollar 2.15. *Es sei \mathfrak{g} eine reductive Lie-Algebra und $X \in \mathfrak{g}$ halbeinfach. Dann ist auch der Zentralisator \mathfrak{g}^X reaktiv.*

Beweis. Es sei $\mathfrak{s} := [\mathfrak{g}, \mathfrak{g}]$ und $X = X_1 + X_2$ bezüglich $\mathfrak{g} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}$. Nach Lemma 1.41 ist X_2 ein halbeinfaches Element der halbeinfachen Lie-Algebra \mathfrak{s} . Damit ist \mathfrak{s}^{X_2} nach Proposition 2.14 reaktiv und somit auch

$$\mathfrak{g}^X = Z(\mathfrak{g})^{X_1} \oplus \mathfrak{s}^{X_2} = Z(\mathfrak{g}) \oplus \mathfrak{s}^{X_2},$$

da $Z(\mathfrak{g})$ abelsch ist. \square

Wie bereits im Fall von $\mathfrak{gl}_n(k)$ wollen wir uns zur Klassifikation der halbeinfachen Orbits $\mathcal{S}(\mathfrak{g}, G)$ auf die Wirkung von G auf eine CSA von $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ einschränken können, indem wir $N_G(\mathfrak{h})$ betrachten. Die Rechtfertigung hierfür liefern uns die folgenden Aussagen.

Lemma 2.16. *Es seien $\mathfrak{h}_1, \mathfrak{h}_2 \subseteq \mathfrak{g}$ zwei CSA. Dann gibt es $s \in G$ mit $s \cdot \mathfrak{h}_1 = \mathfrak{h}_2$.*

Beweis. Nach Korollar 1.61 gibt es $\sigma \in \text{Int } \mathfrak{g}$ mit $\sigma(\mathfrak{h}_1) = \mathfrak{h}_2$ und nach Annahme gibt es $s \in G$, das durch σ auf \mathfrak{g} wirkt, für das also $s \cdot \mathfrak{h}_1 = \mathfrak{h}_2$. \square

Korollar 2.17. *Es sei $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA und $\mathcal{O} \in \mathcal{S}(\mathfrak{g}, G)$ ein halbeinfacher Orbit. Dann gibt es $X \in \mathfrak{h}$ mit $\mathcal{O}_X = \mathcal{O}$.*

Beweis. Es sei $X' \in \mathcal{O}$. Dann ist X' halbeinfach und in einer CSA $\mathfrak{h}' \subseteq \mathfrak{g}$ enthalten. Nach Lemma 2.16 gibt es $s \in G$ mit $s \cdot \mathfrak{h}' = \mathfrak{h}$. Damit ist $s \cdot X' \in \mathfrak{h}$ ein Element mit $\mathcal{O} = \mathcal{O}_{X'} = \mathcal{O}_{s \cdot X'}$. \square

Definition 2.18. Ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA, so sei

$$W(\mathfrak{h}, G) := N_G(\mathfrak{h})/Z_G(\mathfrak{h}).$$

Theorem 2.19. *Ist $\mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}$ eine CSA, so ist die Abbildung*

$$\begin{aligned} \Phi: \mathfrak{h}/W(\mathfrak{g}, G) &\longrightarrow \mathcal{S}(\mathfrak{g}, G), \\ [X] &\longmapsto \mathcal{O}_X \end{aligned}$$

eine wohldefinierte Bijektion.

Beweis. Es genügt die Aussage für $N_G(\mathfrak{h})$ statt für W zu zeigen, da eine Gleichheit von Orbits $\mathfrak{h}/W(\mathfrak{g}, G) = \mathfrak{h}/N_G(\mathfrak{h})$ gilt.

Da \mathfrak{h} aus halbeinfachen Elementen besteht, und $\mathcal{O}_{s \cdot X} = \mathcal{O}_X$ für alle $X \in \mathfrak{g}$ und $s \in G$, ist Φ wohldefiniert. Nach Korollar 2.17 ist Φ surjektiv.

Es seien $X_1, X_2 \in \mathfrak{h}$ mit $\mathcal{O}_{X_1} = \mathcal{O}_{X_2}$. Für die Injektivität von Φ gilt es zu zeigen, dass X_1 und X_2 bereits unter $N_G(\mathfrak{h})$ konjugiert zueinander sind. Da $X_1 \in \mathcal{O}_{X_1} = \mathcal{O}_{X_2}$ gibt es $t \in G$ mit $t \cdot X_2 = X_1$. Dann G durch Lie-Algebra-Automorphismen auf \mathfrak{g} wirkt, sind \mathfrak{h} und $t \cdot \mathfrak{h}$ zwei CSA von \mathfrak{g} , die X_1 enthalten. Da CSA abelsch sind, ist bereits $\mathfrak{h}, t \cdot \mathfrak{h} \subseteq \mathfrak{g}^{X_1}$. Nach Proposition 2.14 ist \mathfrak{g}^{X_1} reaktiv, und nach Korollar 1.52 sind \mathfrak{h} und $s \cdot \mathfrak{h}$ zwei CSA von \mathfrak{g}^{X_1} .

Nach Korollar 1.61 gibt es $\sigma \in \text{Int } \mathfrak{g}^{X_1}$ mit $\sigma(t \cdot \mathfrak{h}) = \mathfrak{h}$. Für jedes nilpotente Element $Y \in \mathfrak{g}^{X_1} = Z_{\mathfrak{g}}(X_1)$ ist $(\text{ad}_{Z_{\mathfrak{g}}(X_1)} Y)(X_1) = 0$ und somit

$$\exp(\text{ad}_{Z_{\mathfrak{g}}(X_1)} Y)(X_1) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(\text{ad}_{Z_{\mathfrak{g}}(X_1)} Y)^n}{n!}(X_1) = X_1.$$

Da $\text{Int } \mathfrak{g}^{X_1}$ von Elementen der Form $\exp(\text{ad}_{Z_{\mathfrak{g}}(X_1)} Y)$ für nilpotente $Y \in \mathfrak{g}^{X_1}$ erzeugt wird, folgt daraus, dass X_1 von jedem inneren Automorphismus aus $\text{Int } \mathfrak{g}^{X_1}$ stabilisiert wird. Insbesondere also von σ , weshalb $\sigma(X_1) = X_1$.

Nach Lemma 1.62 lässt sich σ zu einem inneren Automorphismus $\hat{\sigma} \in \text{Int } \mathfrak{g}$ fortsetzen, und nach Annahme gibt es $s \in G$, das durch $\hat{\sigma}$ auf \mathfrak{g} wirkt. Zum einen ist deshalb

$$s \cdot t \cdot X_2 = s \cdot X_1 = \hat{\sigma}(X_1) = \sigma(X_1) = X_1,$$

und zum anderen ist

$$s \cdot t \cdot \mathfrak{h} = \hat{\sigma}(t \cdot \mathfrak{h}) = \sigma(t \cdot \mathfrak{h}) = \mathfrak{h}.$$

Also sind X_2 und X_1 durch $s \cdot t \in N_G(\mathfrak{h})$ konjugiert zueinander. \square

Bemerkung 2.20. 1. Statt dem Normalisator $N_G(\mathfrak{h})$ selbst betrachten wir die Gruppe $W(\mathfrak{h}, G)$, da diese im weiteren Vorgehen eine schönere Form hat als der Normalisator.

2. Unter passenden Gruppenwirkungen, wie etwa in [?, §2], stellt sich zudem heraus, dass $W(\mathfrak{h}, G)$ isomorph zur Weyl-Gruppe von \mathfrak{g} bezüglich \mathfrak{h} ist.

3 Halbeinfache Orbitalen in $\mathfrak{so}_n(k)$ und $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$

Als eine direkte Anwendung der in Kapitel 2 entwickelten Theorie bestimmen wir in diesem Kapitel die halbeinfachen Orbitalen in $\mathfrak{so}_n(k)$ unter den Konjugationswirkung von $O_n(k)$ und $SO_n(k)$, sowie die halbeinfachen Orbitalen in $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ unter der Konjugationswirkung von $Sp_{2n}(k)$

Dabei meinen wir im Folgenden mit der Wirkung von $O_n(k)$ und $SO_n(k)$ auf $\mathfrak{so}_n(k)$, sowie der Wirkung von $Sp_{2n}(k)$ auf $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ stets die entsprechende Konjugationswirkung. Wir nutzen im Folgenden die Definitionen und Notationen aus Abschnitt 1.1.2, und raten dem Leser, sich mit diesen gegebenenfalls noch einmal vertraut zu machen.

Wie wir bereits in Beispiel 1.6 gesehen haben, ist die Lie-Algebra \mathfrak{so}_n für $n = 2$ eindimensional und abelsch, und für $n \neq 2$ halbeinfach, also stets reduktiv. Die Lie-Algebra \mathfrak{sp}_{2n} ist für alle $n \geq 1$ halbeinfach und damit ebenfalls reduktiv. In den Beispielen 2.12 und 2.13 haben wir außerdem gesehen, dass jeder innere Automorphismus von $\mathfrak{so}_n(k)$ nicht nur durch Konjugation mit einem Element aus $O_n(k)$ gegeben ist, sondern bereits mit einem Element aus $SO_n(k)$. Außerdem ist jeder innere Automorphismus von $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ durch Konjugation mit einem Element aus $Sp_{2n}(k)$ gegeben. Es sind daher alle Bedingungen erfüllt, um die halbeinfachen Orbitalen in $\mathfrak{so}_n(k)$ unter den Wirkungen von $O_n(k)$ und $SO_n(k)$, sowie die halbeinfachen Orbitalen in $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ unter der Wirkung von $Sp_{2n}(k)$, mithilfe der Klassifikation aus Theorem 2.19 zu bestimmen.

Um Theorem 2.19 auf $\mathfrak{so}_n(k)$ anwenden zu können, müssen wir zunächst eine CSA $\mathfrak{h}_n \subseteq \mathfrak{so}_n(k)$ wählen, und anschließend die Gruppen $W(\mathfrak{h}_n, O_n(k))$ und $W(\mathfrak{h}_n, SO_n(k))$ berechnen. Hierfür ist es begehrenswert, dass \mathfrak{h}_n eine Form hat, mit der sich möglichst leicht arbeiten lässt. Unser Ziel ist es, den Schnitt $\mathfrak{d}_n(k) \cap \mathfrak{so}_n(k)$ als CSA wählen zu können, da wir bereits verschiedene Aussagen über die daraus entstehenden Zentralisatoren und Normalisatoren kennen, etwa Korollar 2.3 und Lemma 2.9. Da aber $\mathfrak{so}_n(k) \subseteq \mathfrak{gl}_n(k)$ genau die Unteralgebra der schiefsymmetrischen Matrizen ist, führt dies für kein $n \geq 2$ zum Erfolg.

Um dieses Dilemma zu umgehen, wollen wir statt mit $\mathfrak{so}_n(k)$ selbst mit einer isomorphen Lie-Algebra \mathfrak{g}_n arbeiten, so dass \mathfrak{g}_n nicht nur eine möglichst schöne Form hat, sondern auch $\mathfrak{d}_n \cap \mathfrak{g}_n$ eine CSA in \mathfrak{g}_n ist. Um eine solche Lie-Algebra \mathfrak{g}_n zu konstruieren, nutzen wir aus, dass $\mathfrak{so}_n(k) = \mathfrak{o}(I_n)$ über die darstellende Matrix I_n einer Bilinearform definiert ist. Ist dann $B \in M_n(k)$ eine Matrix, die die gleiche Bilinearform bezüglich einer anderen Basis beschreibt, so sind $\mathfrak{so}_n(k)$ und $\mathfrak{o}(B)$ isomorphe Lie-Algebren.

Dieses Vorgehen ist ein geläufiger Trick, um eine äquivalente Definition von $\mathfrak{so}_n(k)$ zu erhalten, die für die jeweiligen Zwecke besser geeignet ist. In [?, §1] etwa werden $\mathfrak{so}_{2n}(k)$ und $\mathfrak{so}_{2n+1}(k)$ nicht über die Einheitsmatrizen I_{2n} und I_{2n+1} definiert, sondern

über die Matrizen

$$\begin{pmatrix} & I_n \\ I_n & \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \begin{pmatrix} 1 & \\ & I_n \end{pmatrix}.$$

Auch $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ wollen wir durch eine isomorphe Lie-Algebra ersetzen, wenn auch aus anderen Gründen: Aus Beispiel 1.6 bekannt, dass

$$\mathfrak{sp}_{2n}(k) = \left\{ \begin{pmatrix} P & Q \\ R & -P^\top \end{pmatrix} \mid P, Q, R \in M_n(k), Q^\top = Q, R^\top = R \right\},$$

$\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ enthält also für alle $n \geq 1$ eine reguläre Diagonalmatrix. Nach Korollar 2.4 ist daher $\mathfrak{h}_{2n} := \mathfrak{d}_{2n}(k) \cap \mathfrak{sp}_{2n}(k)$ eine CSA in $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ für alle $n \geq 1$. Es ist daher naheliegend, mit $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ selbst und der CSA \mathfrak{h}_{2n} zu arbeiten. Tatsächlich liefern uns die Berechnungen, die wir im Folgenden durchführen, durch das Vertauschen und Modifizieren einiger Indizes die hierfür nötigen Rechnungen. Gerade deshalb werden wir aber auch $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ durch eine leicht abgeänderte, isomorphe Lie-Algebra ersetzen, da wir so alle essenziellen Rechnungen und Konstruktion nur einmal durchführen müssen, und uns für die konkreten Orbiten auf die jeweils entscheidenden Details konstruieren können.

Um die entsprechenden isomorphen Lie-Algebren zu konstruieren nutzen wir jeweils, dass $\mathfrak{so}_n(k)$ und $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ über die darstellenden Matrizen von Bilinearformen definiert sind. Hierfür betrachten wir zunächst, wie sich die halbeinfachen Orbiten unter den entsprechenden Isomorphismen verhalten, und geben diese dann für $\mathfrak{so}_n(k)$ und $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ explizit an. Im mittleren Teil des Kapitels untersuchen wir die halbeinfachen Orbiten in den isomorphen Lie-Algebren, um am Ende schließlich die halbeinfachen Orbiten in $\mathfrak{so}_n(k)$ und $\mathfrak{sp}_{2n}(k)$ selbst zu erhalten.

3.1 Gemeinsames Vorgehen

3.1.1 Halbeinfache Orbiten unter verträglichen Isomorphismen

Definition 3.1. Es seien G_1 und G_2 zwei Gruppen, X_1 eine G_1 -Menge und X_2 eine G_2 -Menge. Eine Abbildung $F: X_1 \rightarrow X_2$ und ein Gruppenhomomorphismus $f: G_1 \rightarrow G_2$ heißen *verträglich*, falls

$$f(g) \cdot F(x) = F(g \cdot x) \quad \text{für alle } g \in G_1 \text{ und } x \in X_1.$$

Lemma 3.2. Für $i = 1, 2$ sei G_i eine Gruppe, die durch Lie-Algebra-Automorphismen auf einer reductiven Lie-Algebra \mathfrak{g}_i wirkt. Es sei $\Phi: \mathfrak{g}_1 \rightarrow \mathfrak{g}_2$ ein Isomorphismus von Lie-Algebren und $\phi: G_1 \rightarrow G_2$ ein verträglicher Isomorphismus von Gruppen. Dann induziert Φ eine Bijektion zwischen den halbeinfachen Orbiten

$$\mathcal{S}(\mathfrak{g}_1, G_1) \xrightarrow{\sim} \mathcal{S}(\mathfrak{g}_2, G_2), \quad \mathcal{O}_X \mapsto \mathcal{O}_{\Phi(X)}.$$