

# Prozedurale Generierung von Wirbeltierskeletten

Masterarbeit von

Nina Zimbel

An der Fakultät für Informatik  
Institut für Visualisierung und Datenanalyse,  
Lehrstuhl für Computergrafik

25. Mai 2020

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Carsten Dachsbacher  
Zweitgutachter: Prof. Dr. Hartmut Prautzsch  
Betreuernder Mitarbeiter: Dr. Johannes Schudeiske

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Biologie der Wirbeltiere</b>	<b>2</b>
2.1. Das Skelett . . . . .	3
2.2. Von Groß und Klein . . . . .	4
2.3. Mythologie . . . . .	5
<b>3. Grundlagen</b>	<b>7</b>
3.1. Prozedurale Generierung . . . . .	7
3.2. Inverse Kinematik . . . . .	8
3.3. Animation von Figuren . . . . .	8
3.4. Grammatiken . . . . .	8
3.5. PCA . . . . .	9
3.6. Quantil-Quantil-Diagramme . . . . .	10
3.7. Genetische Algorithmen . . . . .	11
<b>4. Analyse von Skelettdaten mit Hilfe von PCA</b>	<b>12</b>
4.1. Haltung des Skeletts . . . . .	12
4.2. Datenerhebung . . . . .	13
4.3. Analyse der Eingabedaten . . . . .	15
4.4. Analyse der Ergebnisse . . . . .	20
4.5. Bedingte Verteilungen . . . . .	23
<b>5. Generierung von Skeletten</b>	<b>26</b>
5.1. Überblick über den Ablauf der Generierung . . . . .	26
5.2. Bestandteile eines Skeletts . . . . .	27
5.3. Aufbau als Grammatik . . . . .	28
5.4. Extremitäten . . . . .	32
5.4.1. Berechnung der Bodenhöhe . . . . .	34
5.4.2. Algorithmus zur Ausrichtung der Beine . . . . .	35
5.4.3. Zusätzliche Ansatzpunkte für Extremitäten . . . . .	38
5.5. Wirbel und Rippen . . . . .	40
5.6. Knochenmodelle . . . . .	42
<b>6. Zusätzliche Features</b>	<b>45</b>
6.1. Speichern und Laden von Skeletten . . . . .	45
6.2. Erzeugung von Variationen . . . . .	45
6.3. GUI . . . . .	46
<b>7. Implementierungsdetails</b>	<b>47</b>
7.1. Programmiersprache . . . . .	47
7.2. Dateiformate . . . . .	47
7.2.1. OpenSim . . . . .	47

7.2.2. OBJ . . . . .	48
7.2.3. FBX . . . . .	48
7.2.4. Alembic . . . . .	48
7.3. Aufbau der Software . . . . .	48
7.4. Zufall . . . . .	49
7.5. Transformationsmatrizen . . . . .	49
7.6. PCA . . . . .	49
7.6.1. Annotation der Bilder . . . . .	50
7.6.2. Anpassung der PCA-Ergebnisse zur Weiterverarbeitung . . . . .	50
7.7. Gelenke . . . . .	51
7.8. Probleme der Beinpositionierung bei kurzen Beinen . . . . .	51
<b>8. Erweiterungs- und Verbesserungsmöglichkeiten</b>	<b>53</b>
8.1. Muskeln . . . . .	53
8.2. Haut . . . . .	53
<b>Literatur</b>	<b>54</b>
<b>Anhang A. PCA Daten</b>	<b>57</b>
A.1. Eingabedaten für PCA . . . . .	57
A.1.1. Bilder . . . . .	57
A.1.2. Gewichte . . . . .	58



# 1. Einleitung

Idee und Ziel

- Theorie + Implementierung
- prozedurale Generierung
- Es gibt schon Pflanzen, Landschaften, Wolken etc. aber wenig zu Tieren
- viele verschiedene (und möglicherweise doch ähnliche) Tiere generieren für Spiel/Film
- Inspiration für Künstler, 3D-Animation
  - Skelett darf nicht zu abstrakt sein, da es sonst zu wenig Informationen zum konkreten Tier liefert.
  - Ein detailliertes Skelett ist für Wesen sinnvoll, die es so noch nicht gibt bzw. wo man keine richtige Vorstellung davon hat wie es „funktioniert“, z.B. bei mehr Gliedmaßen.
- Einschränkung auf Skelett, da sonst zu umfangreich für eine Masterarbeit
- Wirbeliere, da Skelette sehr ähnliche
- möglicherweise interaktive Bedienung
- auch fiktive Tiere

## 2. Biologie der Wirbeltiere

*„Nichts anderes in der Natur hat eine herrlichere Struktur als der Körper der Wirbeltiere.“*

— „Vergleichende und funktionelle Anatomie der Wirbeltiere“ [18, S. 1]

Dieses Kapitel soll einen Überblick über die biologische Beschaffenheit der Wirbeltiere geben. Da dies keine biologische Arbeit ist, werden nur diejenigen Merkmale und Eigenschaften weiter ausgeführt, die im Folgenden zum Verständnis nötig sind.

Wirbeltiere, oder auch Vertebrata, sind Tiere mit einer skelettartigen Schädelkapsel, einem Cranium. Deshalb werden sie auch Schädeltiere oder Craniota genannt.

Auf den ersten Blick ist diese Definition etwas überraschend, da als Haupteigenschaft nicht die Wirbelsäule, sondern der Schädel genannt wird. Das liegt daran, dass zu den Wirbeltieren auch einige Tiere gezählt werden, die gar keine Wirbelsäule sondern „nur“ eine Chorda dorsalis besitzen. Die Chorda dorsalis besteht aus weichem Gewebe, nicht aus Knochen. Sie ist das Achsenskelett der Chordatiere, einem Tierstamm, zu dem auch die Wirbeltiere gehören. [18, S. 27 f.]

Hier in dieser Arbeit soll es aber nur um Wirbeltiere mit Wirbelsäule gehen.

Es gibt fünf große Gruppen von Wirbeltieren. Die historisch ersten Wirbeltiere sind die Fische. Danach entwickelten sich die Tetrapoden, Wirbeltiere mit vier Gliedmaßen, zu denen alle anderen Gruppen gehören. Zunächst entstanden die Amphibien, die noch nicht vollkommen terrestrisch leben. Daraus entwickelten sich die Reptilien, die erste Klasse der Wirbeltiere, die alle Strukturen besitzt um vollkommen an Land zu leben. (Es gibt aber auch Reptilien die trotzdem wieder im Wasser leben.) Außerdem gibt es noch die Vögel, die sich auf das Fliegen spezialisiert haben, und die Säugetiere, die ihre Jungen säugen. [18, Kapitel 4]

Auch der Mensch ist ein Säugetier und besitzt eine Wirbelsäule. Da sich Wirbeltiere, vor allem in ihrem Skelett, sehr ähneln, lassen sich viele der im folgenden Abschnitt aufgeführten Eigenschaften des Skeletts, vermutlich leicht „am eigenen Leib“ nachvollziehen.

## 2.1. Das Skelett

*„Das innere, gelenkige Skelettsystem der Vertebraten ist einzigartig im Tierreich. Es ist das wichtigste aller Organsysteme für das Studium der Wirbeltiermorphologie.“ — [18, S. 131]*

Wirbeltiere haben ein inneres Skelett und ihr Körper ist bilateralsymmetrisch [18, S. 27]. Das bedeutet, dass ihre linke Körperseite symmetrisch zur rechten ist.

### Wirbelsäule

Aufbau und Form der Wirbelsäule hängen von der Lebensweise des entsprechenden Wirbeltiers ab. Ein wesentlicher Einflussfaktor sind die Kräfte, die auf die Wirbelsäule wirken. Bei Fischen muss die Wirbelsäule dem Druck der starken Axalmuskeln, die seitlich am Körper entlang führen, entgegenwirken. Bei Tetrapoden sind diese Axalmuskeln zurückgebildet, dafür muss die Wirbelsäule aber der Schwerkraft widerstehen. Und bei Vögeln ist die Wirbelsäule speziell an den Flug angepasst und deshalb u. a. besonders leicht. [18, Abschnitt 9.2, S. 168 ff.]

Auch die Anzahl der Wirbel unterscheidet sich teilweise erheblich. Die Halswirbelsäule ist z. B. bei den Fischen noch gar nicht herausgebildet. Amphibien haben einen Wirbel, der für die Beweglichkeit des Kopfes zuständig ist. Bei Reptilien ist die Halsregion meist schon stärker abgesetzt. Säugetiere haben, bis auf wenige Ausnahmen, genau 7 Halswirbel, egal wie lang der Hals ist. Vögel haben die meisten Halswirbel, nämlich 10 bis maximal 31 beim Trauerschwan [38], meistens aber zwischen 15 und 20. [18, Abschnitt 9.2]

Ebenso unterscheidet sich die Anzahl der Wirbel in anderen Teilen der Wirbelsäule. Teilweise sind Wirbel sogar miteinander zu einem größeren Knochen verwachsen. Betrachtet man nur die Gruppe der Säugetiere, so kommt man auf etwa 12 bis 14 Brustwirbel, 5 bis 7 Lendenwirbel, 3 bis 5 Kreuzwirbel und 4 bis 22 Schwanzwirbel [11].

Auch die Form der einzelnen Wirbel unterscheidet sich sowohl zwischen den verschiedenen Tieren als auch entlang der Wirbelsäule einer einzelnen Art [18, Abschnitt 9.1 und Abbildung 9.2]. Um diese Vielfalt zu abstrahieren wird hier mit Platzhaltern gearbeitet, die für alle Arten von Wirbeln stehen. Falls später eine genauere Unterscheidung nötig sein sollte, können diese leicht spezialisiert werden.

### Extremitäten

Die Extremitäten der Tetrapoden sind nach einem „Grundbauplan“ aufgebaut (siehe Abbildung 2.1a). Dieser wird jedoch vielfach abgewandelt. Einige Beispiele sind in Abbildung 2.1b zu sehen. [14, S. 487]

Bei Fischen haben die Extremitäten keine Verbindung zur Wirbelsäule. Erst Amphibien bilden Schulter- und Beckengürtel aus, da sie zur Fortbewegung an Land nötig sind. [18, Abschnitt 9.2.3] Der Einfachheit halber wird hier aber nicht weiter beachtet ob eine Verbindung zur Wirbelsäule besteht, oder nicht.

Schulter- und Beckengürtel bestehen jeweils aus mehreren Knochen, die je nach Art mehr oder weniger ausgebildet, unterschiedlich geformt oder sogar komplett zurückgebildet sein können [18, Absatz 9.7]. Um das im Folgenden zu vereinfachen, wird jeder Extremitätengürtel durch einen Knochen repräsentiert. Der Schultergürtel wird durch ein Schulterblatt ersetzt und der Beckengürtel durch einen „Beckenknochen“.

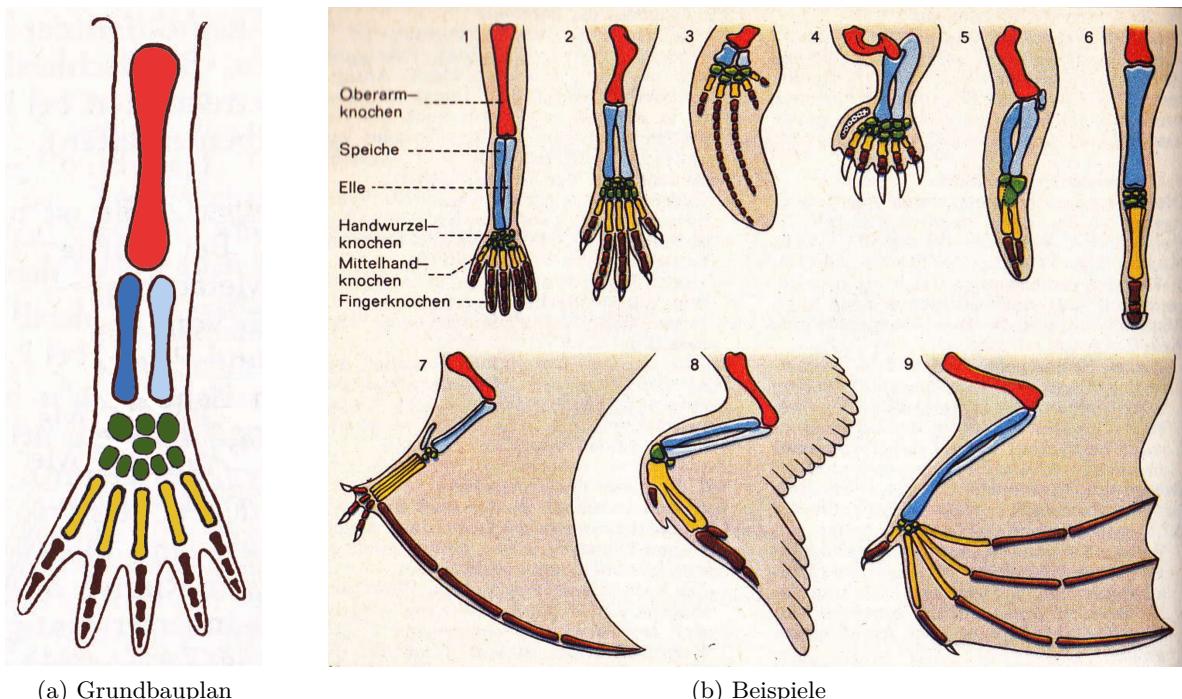


Abbildung 2.1.: Extremitäten von Tetrapoden, Oberarm rot, Speiche dunkelblau, Elle hellblau, Handwurzelknochen grün, Mittelhandknochen gelb, Finderknöchen braun  
 (a) Grundbauplan [14, S. 487, vereinfacht und eingefärbt],  
 (b) Beispiele für Vordergliedmaßen von Mensch (1), Eidechse (2), Wal (3), Maulwurf (4), Pinguin (5), Pferd (6), Flugsaurier (7), Vogel (8) und Fledermaus (9). [37, S. 474]

## Abstraktion

Das Skelett von Wirbeltieren ist im Allgemeinen also ein kompliziertes Konstrukt aus vielen Einzelteilen, die zwischen verschiedenen Arten stark variieren. Um einen Algorithmus zu entwerfen, der Skelette nachempfundene Gebilde konstruiert, ist es also notwendig ein erheblich vereinfachtes Modell zu erstellen.

In Abbildung 2.2 ist ein verallgemeinerter und abstrahierter Bauplan für Wirbeltiere zu sehen. Er ist reduziert auf die Wirbelsäule, Rippen, Schädel, Extremitäten, Schulterblatt und Beckenknochen. Die Extremitäten bestehen jeweils aus Oberarm/-schenkel, Unterarm/-schenkel und Hand/Fuß. Hände und Füße werden hier jeweils als ein „Knochen“ betrachtet, obwohl sie natürlich aus vielen Einzelteilen bestehen. Es kann maximal zwei Extremitätenpaare geben, jeweils einer an jedem Extremitätengürtel. Rippen, Hals- und Schwanzwirbelsäule sind optional und auch die Anzahl der Wirbel und Rippen variiert je nach Tier.

## 2.2. Von Groß und Klein

Dieser Abschnitt widmet sich der Frage nach Unterschieden und Gemeinsamkeiten von großen und kleinen Wirbeltieren. Kann man Wirbeltiere und ihre Skelette einfach vergrößern und verkleinern? Oder sind sie besonders an ihre Größe angepasst? Unterscheidet sich das Skelett einer Maus wesentlich von dem eines Elefanten?

Zunächst ein kurzer Überblick über die Dimensionen, in denen man sich hier bewegt: Das größte und schwerste Wirbeltier ist der Blauwal, er kann bis zu 120 Tonnen wiegen (siehe A.1.2). Das aktuell kleinste bekannte Wirbeltier, mit einer Länge von 7 bis 8mm, ist

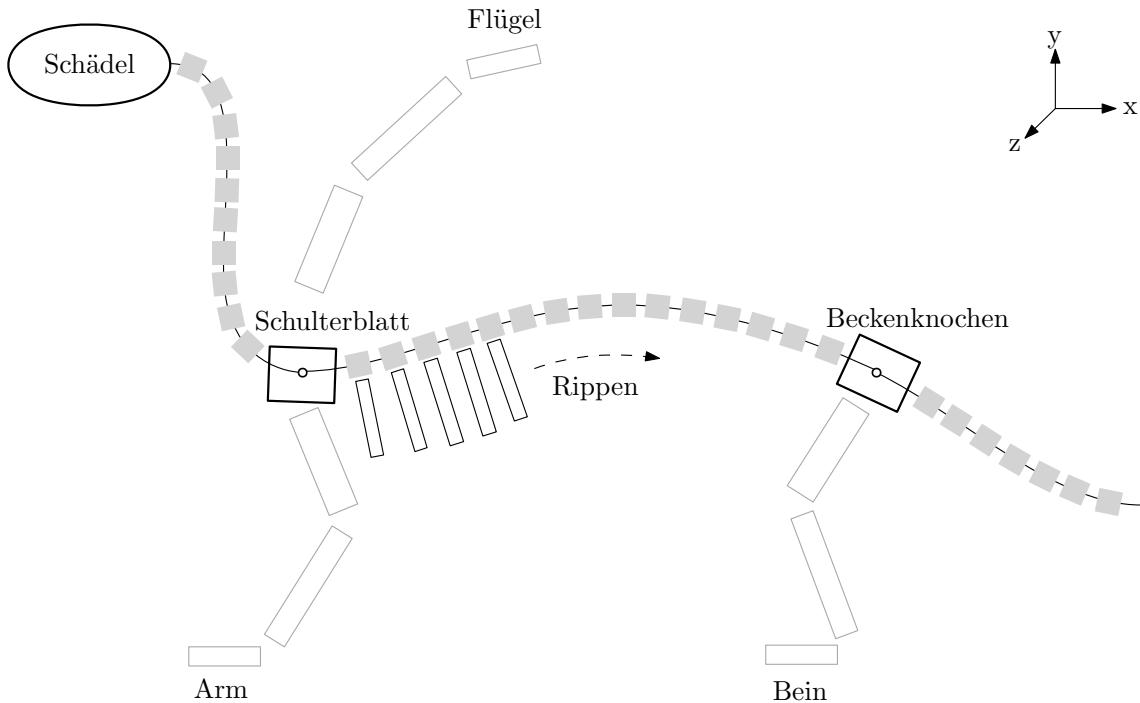


Abbildung 2.2.: Verallgemeinerter und abstrahierter Bauplan eines Wirbeltierskeletts. Es sind maximal zwei Extremitätenpaare erlaubt, jeweils eines an jedem Extremitätengürtel. Rippen und Hals- und Schwanzwirbelsäule sind optional. Die Anzahl der Wirbel und Rippen variiert je nach Tier. Oben rechts im Eck ist die Orientierung der Koordinatenachsen angegeben.

der Frosch *Paedophryne amauensis* [31]. Größe und Gewicht von Wirbeltieren kann also erheblich variieren.

Wenn eine Tierart im Laufe der Evolution wächst, so ändert sich die Größe gleichmäßig. Dieses Wachstum ist aber begrenzt. Der Grund dafür ist, dass die Oberfläche nicht proportional mit dem Volumen mitwächst. Beispielsweise produziert ein Säugetier Wärme proportional zu seinem Volumen. Es kann aber nur Wärme proportional zu seiner Oberfläche abgeben. Dadurch haben große Säugetiere eher Probleme Wärme abzugeben und kleine warm zu bleiben. Ein ähnliches Problem tritt bei Knochen auf. Die Last, die ein Knochen tragen kann, ist ungefähr proportional zu seiner Querschnittsfläche. Das Skelett muss aber das komplette Gewicht des Körpers tragen, was wiederum proportional zum Volumen ist. Aus diesem Grund müssten die Knochen großer Tiere eigentlich überproportional vergrößert sein. Das ist jedoch nicht unbedingt der Fall. Das Problem an dicken Knochen ist, dass sie den Bewegungsradius, z. B. der Extremitäten, stark einschränken. Deshalb passen viele Tiere stattdessen ihre Körperhaltung und Aktivität an, um Spitzenkräfte, wie Stöße oder Oszillationen, auf ihre Knochen zu vermeiden. Deshalb wirken große Tiere auch eher „behäbiger“ als kleine. [18, Kapitel 23]

Sehr große und sehr kleine Wirbeltiere können also nicht über einfaches Skalieren ineinander überführt werden. Dennoch ähneln sich ihre Skelette sehr.

## 2.3. Mythologie

In diesem Abschnitt wird ein kurzer Blick über die Biologie hinaus, auf fantastische Tiere aus der Mythologie geworfen. Ein Algorithmus, der wirbeltierähnliche Skelette erzeugt, bewegt sich ja schon über die Grenzen der Biologie hinaus. Da ist es nur ein kleiner Schritt auch fiktive Wirbeltiere mit zusätzlichen Gliedmaßen zu erzeugen. Einen guten Überblick

über solche Tiere, nicht nur aus der Mythologie sondern auch aus aktuellerer Literatur, Filmen oder Spielen, gibt die Webseite [36].

Hier sollen drei Beispiele hervorgehoben werden, die jeweils charakteristische Merkmale besitzen. Sie stammen aus der Mythologie und bilden oft auch die Grundlage für andere fiktive Wirbeltiere.

*Zentauren* haben einen Pferdekörper, aber statt eines Halses setzt ein menschlicher Oberkörper auf dem Schultergürtel auf [26]. Sie haben also zwei Schultergürtel.

Der *Pegasus* hat ebenfalls den Körper eines Pferdes, aber auch Flügel, die zusätzlich zu den Vorderbeinen am Schultergürtel ansetzen [27]. Es ist also „möglich“ an einem Extremitätengürtel zwei Paare von Extremitäten ansetzen zu lassen. Ein anderes Tier mit sechs Extremitäten an zwei Extremitätengürteln ist das Schreckenspferd (oder auch Direhorse) aus dem Film „Avatar“ [4]. Es besitzt vier Beine am Schultergürtel.

*Asiatische Drachen* haben einen langen, schlangenartigen Körper mit oft mehr als vier Beinen. Sie können als Inspiration für Tiere dienen, die mehr als nur zwei Extremitätengürtel entlang des Rückens besitzen.

## 3. Grundlagen

### 3.1. Prozedurale Generierung

Werden Inhalte, wie Texturen oder 3D-Objekte, generiert, ohne dass diese vor der Ausführung des Algorithmus festgelegt wurden, so wird dies als *prozedurale Generierung* (PG) bezeichnet. Ursprünglich wurde PG verwendet, weil der Speicherplatz auf Computern sehr begrenzt war. Große 3D-Landschaften oder andere vorgefertigte künstlerische Werke konnten nicht gespeichert werden.

Die Demoszene entstand in den 1980er Jahren und treibt PG ins Extreme. Sie zeigt mit künstlerischen Inhalten, dass beeindruckende Ergebnisse trotz stark limitiertem Speicherplatz möglich sind bzw. wie man das volle Potential von Computerhardware ausschöpft [8].

Auf heutigen Rechnern ist der Speicherplatz nicht mehr so begrenzt und es kann viel Inhalt für z. B. PC-Spiele von Künstlern vorgefertigt werden. Trotzdem behält PG ihre Daseinsberechtigung, denn der Entwurf komplexer Inhalte, wie beispielsweise Landschaften mit viel Vegetation, ist aufwändig und benötigt viel Zeit. Hier können wieder Algorithmen aus der PG eingesetzt werden um Zeit und Arbeit zu sparen. Sie können sowohl verwendet werden um fertige 3D-Modelle zu generieren, als auch um als Inspiration und Hilfe für den Künstler zu dienen. *SpeedTree* [34] ist ein Beispiel für Software, die für die Generierung von Vegetation verwendet wird. Sie unterstützt und beschleunigt die Erstellung von Szenen mit viel Vegetation. [6]

Dinge, die oft prozedural generiert werden, sind Landschaften, Straßennetze, Gebäude, Menschen oder auch Geschichten [12]. humanoide Charaktere für Computerspiele werden z. B. in der Masterarbeit [21] erzeugt. Die Zusammenstellung [6] untersucht PG von Wesen, die Videospiele bevölkern. Obwohl einige Arbeiten genannt werden, die sich mit diesem Thema beschäftigen, wird auch festgestellt, dass dieser Themenbereich noch wenig erforscht ist.

Ein Beispiel, das erst nach Erscheinen dieser Zusammenstellung auf den Markt gekommen ist, ist das Computerspiel „No Man’s Sky“ [25]. Darin gibt es viele prozedural generierte fantastische Tiere. Die Generierung dieser Tiere funktioniert so, dass zunächst prozedural ein Modell generiert wird, in welches anschließend ein Skelett eingepasst wird [9]. Die dort verwendeten Skelette sind nicht wirklichkeitsgetreu, sondern werden nur für die Animation verwendet (siehe Abschnitt 3.3).

(**perlin noise (nicht ausreichend für Skelette, mehr Einschränkungen nötig ToDo sonst würden nur Monster generiert) + weitere Methodenbeispiele**)

### 3.2. Inverse Kinematik

Inverse Kinematik wird unter anderem in der Robotik zur Bewegung von Robotern verwendet. Gegeben ist eine Kette von Gelenken, die über starre Verbindungsteile miteinander verbunden sind. Für ein oder mehrere Punkte dieser Kette können Zielpunkte im Raum angegeben werden. Das Ziel ist es dann eine Konfiguration der Gelenke zu berechnen, so dass alle Punkte ihr Ziel erreichen.

Es gibt viele verschiedene Methoden Probleme aus der inversen Kinematik zu lösen. Diese finden jeweils in Abhängigkeit von der konkreten Problemstellung ihre Anwendung. Beispielsweise geht es in [13] um die Animation von Beinen. Ein Überblick über die verschiedenen Techniken ist in der Zusammenstellung [3] zu finden.

### 3.3. Animation von Figuren

Um Figuren für Computerspiele oder Filme zu animieren, ist außer dem 3D-Modell ein Skelett nötig. Dieses Skelett ist oft sehr abstrakt und hat wenig mit lebensechten Skeletten zu tun. Es gibt eine Baumstruktur auf den Einzelteilen der Figur vor. Diese Baumstruktur ist für viele Algorithmen, die zur Animation verwendet werden essentiell, z. B. für inverse Kinematik (siehe Abschnitt 3.2). Als Wurzel für das Skelett wird ein Knochen nahe des Schwerpunkts der Figur verwendet. Das ist bei humanoiden Figuren die Hüfte.

Weit verbreitete Editoren für Animation, Modellierung, Simulation und Rendering sind Maya [23] und 3ds Max [1]. Auch hier werden solche Skelette verwendet [24]. 3ds Max stellt z. B. in einer Komponente namens Biped vorgefertigte Skelette für humanoide Figuren zur Verfügung, die einfach in schon existierende 3D-Modelle eingefügt werden können [2].

Animationen werden dann mit Hilfe sogenannte Keyframes erzeugt. Keyframes sind Positionen, die die Figur im Laufe der Bewegung einnehmen soll. Interpolation zwischen den einzelnen Keyframes ergibt dann eine flüssige Bewegung. [17, Kapitel 3]

Im Computerspiel Spore [35] werden sogar zur Laufzeit Animationen für Figuren erzeugt, deren Aufbau vorher noch nicht bekannt war. Dazu werden vorher abstrakte Animationen, unabhängig vom Aufbau der speziellen Figur, erzeugt. Diese werden dann zur Laufzeit auf die konkreten Figuren angewandt. [17]

Um besonders lebensecht wirkende Tiere zu erzeugen, ist es nötig den Aufbau des entsprechenden Tieres möglichst wirklichkeitsgetreu zu modellieren. Dazu sind Modelle für Skelett, Muskeln und Haut nötig. Solche Modelle lassen sich beispielsweise mit dem Maya-Plugin Ziva [43] erzeugen. [44]

Der Algorithmus, der hier erarbeitet wird, erzeugt Skelette mit lebensechten Knochenmodellen. Er kann als Inspiration zur Erstellung neuer Charaktere dienen oder auch als Grundlage für ein Tier, das ein realitätsnahe Skelett haben soll.

### 3.4. Grammatiken

Eine *Grammatik* ist ein Tupel  $G = (\Sigma, N, S, P)$  mit

- dem endlichen Alphabet  $\Sigma$  der Terminalsymbole
- dem endlichen Alphabet  $N$  der Nichtterminalsymbole
- dem Startsymbol  $S \in N$  und
- der Menge von Produktionen  $P \subseteq (N \cup \Sigma)^* N (N \cup \Sigma)^* \rightarrow (N \cup \Sigma)^*$

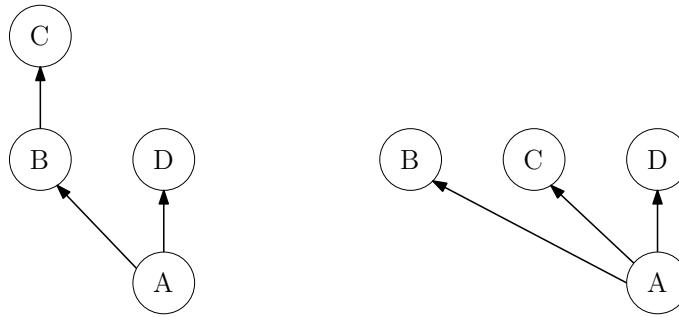


Abbildung 3.1.: Visualisierung der Beispielklammerausdrücke,  
links der Ausdruck  $A(BC)D$ , rechts  $A(B)(C)D$ .

Eine Teilmenge der Grammatiken bilden *kontextsensitive* Grammatiken. Ihre Produktions haben die Form

$$\alpha A \beta \rightarrow \alpha \gamma \beta \text{ oder } S \rightarrow \epsilon$$

mit  $A \in N$ ,  $\alpha, \beta, \gamma \in ((N \setminus \{S\}) \cup \Sigma)^*$ ,  $\gamma \neq \epsilon$  und dem leeren Wort  $\epsilon$ .

Wiederum eine Teilmenge davon bilden *kontextfreie* Grammatiken mit Produktionen der Form

$$A \rightarrow w \text{ mit } A \in N \text{ und } w \in (\Sigma \cup N)^*.$$

[15, Abschnitte 1.4 und 1.5]

*L-Systeme* oder Lindenmayer-Systeme sind spezielle Grammatiken. Sie wurden 1968 von dem Biologen Aristid Lindenmayer vorgestellt, mit dem Zweck das Wachstum vielzelliger Lebewesen zu modellieren. Im Unterschied zu Grammatiken, bei denen Produktionen einzeln nacheinander angewendet werden, werden bei L-Systemen alle Symbole gleichzeitig ersetzt. Dies soll modellieren, dass viele Zellteilungen zur gleichen Zeit stattfinden können. Es gibt auch hier wieder verschiedene Teilmengen wie z. B. kontextfreie und kontextsensitive L-Systeme. Kontextfreie L-Systeme sind aber beispielsweise keine Teilmenge kontextfreier Grammatiken. Es gibt Sprachen, die von kontextfreien L-Systemen, aber nicht von kontextfreien Grammatiken erzeugt werden können und anders herum [30, Abbildung 1.2]. Oft werden L-Systeme verwendet um das Wachstum von Pflanzen zu modellieren. Es gibt aber auch andere Anwendungsbeispiele, wie z. B. die Generierung von Städten [28].

Bei Pflanzen treten oft Verzweigungen auf. Um diese zu modellieren, werden Klammerstrukturen verwendet. Das Teilwort innerhalb einer Klammer repräsentiert einen „Ast“, der wiederum in sich verzweigt sein kann. Wenn zwei Symbole direkt aufeinander folgen, so bedeutet das, dass das linke Element das Elternelement des rechten ist. Kommt in einem Wort  $A(BC)D$  mit  $A, B, C, D \in \Sigma \cup N$  ein Klammerausdruck vor, so bedeutet dies, dass  $A$  sowohl das Elternelement von  $B$  als auch von  $D$  ist. Das Elternelement von  $C$  ist  $B$ . Es können auch Mehrfachverzweigungen auftreten. In  $A(B)(C)D$ , was gleichbedeutend ist zu  $A(B)(C)(D)$ , ist  $A$  das Elternelement von  $B, C$  und  $D$ . Eine Visualisierung der beiden Beispiele ist in Abbildung 3.1 zu finden. [30, Kapitel 1]

### 3.5. PCA

*Principal Component Analysis* (PCA) oder auch Hauptkomponentenanalyse [20] wird meist mit dem Ziel angewendet die Dimensionalität einer Menge von Datenpunkten zu verringern, dabei aber möglichst wenig Information zu verlieren. Beispielsweise wird dies in [7] bei 3D-Modellen von Gesichtern oder in [32] bei 3D-Modellen von menschlichen Körpern gemacht. Auch im Zusammenhang mit prozeduraler Generierung wird PCA oft

verwendet, z. B. zur Generierung von humanoiden Charakteren für Videospiele [21] oder Texturen für Gesichter [5].

Als Ausgangspunkt für eine PCA dient eine Menge von Datenpunkten (oder Beispielen)  $D$  im  $n$ -dimensionalen Raum. Voraussetzung ist, dass die Punkte in jeder Dimension normalverteilt sind. Die Datenpunkte  $D$  sind dann nach einer  $n$ -dimensionalen Normalverteilung verteilt. Betrachtet man nun die Wahrscheinlichkeitsdichte dieser Normalverteilung, so bilden alle Punkte, bei denen die Dichte einen Wert größer als  $\epsilon$  annimmt das Innere eines  $(n - 1)$ -dimensionalen Hyperellipsoids. In diesem Volumen liegen die meisten der Datenpunkte  $D$ . Den Mittelpunkt bildet ihr Mittelwert.

Nun ist das Ziel herauszufinden wo die Achsen des Ellipsoids liegen. Betrachtet man die Komponenten der Datenpunkte  $D$  in den Richtungen der Achsen, so sind diese wiederum normalverteilt und die Verteilungen sind jeweils unabhängig voneinander. Um die Achsen des Ellipsoids zu berechnen, wird zunächst die Kovarianzmatrix der Datenpunkte  $D$  aufgestellt und dann diagonalisiert. In den Spalten der Basiswechselmatrix stehen dann die Eigenvektoren und auf der Diagonalen der diagonalisierten Kovarianzmatrix die Eigenwerte. Die Eigenvektoren sind die Achsen des Ellipsoids und die Eigenwerte geben die Varianz der Normalverteilung entlang der Achsen an.

Jetzt können die Datenpunkte  $D$  vom Eingabekoordinatensystem in dasjenige Koordinatensystem transformiert werden, das von den Achsen des Ellipsoids aufgespannt wird. Dazu stellt man die Punkte als Linearkombinationen der Eigenvektoren dar. Um nun die Dimensionalität der Eingabedaten zu reduzieren, werden alle Dimensionen weggelassen, die nicht zu den Hauptkomponenten gehören. Je weniger Streuung die Datenpunkte auf denjenigen Achsen aufweisen, die weggelassen werden, desto weniger Information wird verworfen.

Will man einen zufälligen Datenpunkt erzeugen, der die gleichen Verteilungen aufweist, wie die Eingabebeispiele, so funktioniert das im transformierten Koordinatensystem sehr gut. Da die einzelnen Dimensionen unabhängig voneinander sind, kann man einfach für jede Dimension eine normalverteilte Zufallszahl mit entsprechender Varianz generieren.

### 3.6. Quantil-Quantil-Diagramme

Quantil-Quantil-Diagramme sind eine grafische Methode um zu testen, ob eine Stichprobe einer bestimmten Verteilung unterliegt.

Seien  $x_1, x_2, \dots, x_n$  die Elemente einer Stichprobe und  $F$  die Verteilungsfunktion derjenigen Verteilung, gegen die getestet werden soll. Die Verteilungsfunktion gibt für einen Wert  $x$  an, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass die Zufallsvariable einen Wert  $\leq x$  annimmt.

Nun werden die empirischen Quantile der Stichprobe mit den entsprechenden Quantilen von  $F$  verglichen. Dazu wird die Stichprobe aufsteigend sortiert, was  $x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}$  ergibt. Das empirische  $\frac{i}{n}$ -Quantil der Stichprobe ist  $x_{(i)}$ , da  $i$  Werte  $\leq x_{(i)}$  beobachtet wurden. Die inverse Verteilungsfunktion gibt für einen Wert  $y$  den kleinsten Wert  $x$  an, für den gilt, dass  $F(x) > y$ , also das  $y$ -Quantil. Das  $\frac{i}{n}$ -Quantil von  $F$  ist also  $F^{-1}\left(\frac{i}{n}\right)$ .

Trägt man nun die sortierte Stichprobe gegen die entsprechenden Quantile in ein Diagramm ab, und die angenommene Verteilung ist korrekt, so liegen die Punkte annähernd auf einer Geraden mit Steigung 1 durch den Ursprung. [22, Kapitel 1 und 2]

Den Werten  $x_{(i)}$  einfach das  $\frac{i}{n}$ -Quantil zuzuordnen ist aber insofern schwierig, als dass es suggeriert, dass alle Werte, die mit der angenommenen Verteilung generiert werden, kleiner als  $x_{(n)}$  sind. Deshalb gibt es verschiedene andere Möglichkeiten die Quantile zuzuordnen. Sie liefern aber für  $n \rightarrow \infty$  alle das gleiche Ergebnis. Sogenannte „Rankit Plots“ verwenden

folgende Zuordnung:

$$x_{(i)} \approx F^{-1} \left( \frac{i - 0,5}{n} \right).$$

Diese Zuordnung wird auch in dieser Arbeit verwendet.

### 3.7. Genetische Algorithmen

als Alternative zu Variationen mit PCA

- introduction to evolutionary design (bently)
- basics on genetic algorithms (Holland 1992) -> bei Bib bestellt
- interactive evolutionary computation (Takagi 2001) (fitness function = human evaluation)
- jon hudson thesis: creature generation using genetic algorithms [19]
  - relativ simple Regeln, nicht orientiert an spezieller Tierklasse, Einschränkung für Anzahl Beine, für Houdini, kein Skelett sondern 3D-Modell, Rig wird auch generiert
  - auch Variationen eines Tiers und Crossover zwischen mehreren Exemplaren möglich
- Grammar based genetic programming (a survey)

## 4. Analyse von Skelettdaten mit Hilfe von PCA

Das Ziel dieser Arbeit ist es einen Algorithmus zu entwerfen, der in der Lage ist Skelette zu generieren, die denjenigen von Wirbeltieren ähnlich sehen. Ein Skelett ist nicht nur eine Ansammlung von Knochen, sondern wirkt auch wesentlich durch seine Haltung. Die Skelette sollen also in einer natürlich wirkenden Haltung dargestellt werden, einer Haltung, die das dargestellte Tier auch einnehmen würde.

Wie solch eine Haltung generiert werden könnte, wird in Abschnitt 4.1 erörtert. Das Hilfsmittel, das schließlich für die Generierung verwendet wird, ist die PCA (siehe Abschnitt 3.5). Wie sie in diesem Zusammenhang verwendet wird, wird in den folgenden Abschnitten genauer erklärt. Abschnitt 4.2 beleuchtet die Datenerhebung. In Abschnitt 4.3 werden die Eingabedaten genauer analysiert, z. B. darauf ob sie normalverteilt sind. Die Ergebnisse der PCA werden dann in Abschnitt 4.4 vorgestellt. Im letzten Abschnitt wird gezeigt wie die Eingabe für die PCA auf Skelette mit gewissen Eigenschaften eingeschränkt werden kann.

### 4.1. Haltung des Skeletts

#### Gleichgewicht

Ein erster Ansatz dafür ein Skelett in einer natürlichen Haltung zu erzeugen, könnte sein, in jedem Schritt auszurechnen, ob das Skelett ausbalanciert ist. Dazu benötigt man den Schwerpunkt des Körpers und Position und Gewicht der Knochen. Damit können dann die Drehmomente der einzelnen Knochen um den Schwerpunkt berechnet werden. Addieren sie sich alle zu null auf, ist das Skelett im Gleichgewicht.

Hierbei tauchen gleich mehrere Fragen auf:

**Gewicht** Wie wird das Gewicht der Knochen bestimmt? Hängt es von der Größe der Knochen ab? Außerdem müsste eigentlich das ganze Gewicht des Tieres, nicht nur das der Knochen berücksichtigt werden. Wie kann bestimmt werden wieviel anderes Gewebe an einem Knochen hängt?

**Schwerpunkt** Wo liegt der Schwerpunkt? Wird am Anfang ein Quader festgelegt, in dem das Skelett liegen muss und dessen Mittelpunkt der Schwerpunkt des Skeletts ist? Verändert der Schwerpunkt seine Position je nachdem welche Knochen schon generiert wurden?

**Gleichgewicht** Wann wird überprüft ob sich das Skelett im Gleichgewicht befindet? Ist das Gleichgewicht eine Invariante, die während der Generierung aufrecht erhalten wird? Oder wird das erst am Ende überprüft? Was passiert, wenn sich das Skelett nicht im Gleichgewicht befindet?

Das Hauptproblem ist hier, dass nicht klar ist wie das Gewicht der einzelnen Körperteile bestimmt werden soll ohne zusätzlich auch noch anderes Gewebe, wie Muskeln oder Ein geweide, zu betrachten. Da sich diese Arbeit aber nur auf das Skelett beschränken soll, wurde ein anderer Ansatz erarbeitet.

### Verlauf der Wirbelsäule

Die Wirbelsäule ist ein zentraler Teil des Wirbeltierkörpers und bestimmt wesentlich das Aussehen des Skeletts. Ihre Form variiert von relativ gerade, z. B. bei Fischen oder Schlangen, bis hin zu stark geschwungenen Hälsen, v. a. bei Vögeln, und langen Schwänzen, z. B. bei Mäusen. Außerdem zeigt sie wie aufrecht ein Tier ist. Große Unterschiede sind hier zwischen Fischen und Vierbeinern gegenüber Vögeln zu beobachten, da Vögel nur auf ihren Hinterbeinen stehen und deshalb ihr Schwerpunkt nach hinten verschoben ist. Es gibt aber auch aufrechtere Exemplare unter den „Vierbeinern“ wie beispielsweise das Känguru oder den Tyrannosaurus Rex. Der Mensch ist natürlich auch ein Beispiel für ein sehr aufrechtes Wirbeltier. Seine Haltung unterscheidet sich aber so stark von der anderer Wirbeltiere, dass er hier außen vor gelassen werden soll.

Viele Knochen setzen direkt an der Wirbelsäule an, wie z. B. der Kopf, die Rippen oder die Hüfte. Durch die Wirbelsäule wird also schon sehr viel vorgegeben. Deshalb eignet sie sich sehr gut als Startpunkt für die Generierung eines Skeletts. Ausgehend von ihr kann dann der Rest des Skeletts generiert werden.

Wie soll aber nun die Lage der Wirbelsäule bestimmt werden?

Hierfür schien es sinnvoll viele Beispiele zu betrachten und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Eigenschaften der Tiere und dem Verlauf der Wirbelsäule zu suchen. Ein geeignetes Werkzeug hierfür ist die *Principal Component Analysis* (siehe Abschnitt 3.5 des Grundlagenkapitels).

## 4.2. Datenerhebung

Die Beispiele, die erhoben werden konnten, sind vor allem durch die Datenlage bzw. die zugänglichen Quellen eingeschränkt. Trotzdem wurde darauf geachtet, möglichst viele unterschiedliche Tierarten mit viel Variation in den erhobenen Merkmalen zu finden.

Viele Beispiele entstammen Zoologiebüchern, in denen sie als Beispiele für Erklärungen angegeben waren (Bildquellen siehe Anhang A.1.1). Dem ist auch geschuldet, dass recht viele Dinosaurierskelette dabei sind, denn von anderen Tieren gibt es als alternative Darstellungsmöglichkeit eine Außenansicht des lebenden Tieres. Das geht bei ausgestorbenen Tieren im Allgemeinen nicht.

### Erhobene Merkmale

Die Merkmale, die zur Datenerhebung ausgesucht wurden, sind charakteristisch für ein Skelett, tragen also viel zum Gesamteindruck bei. Das sind vor allem der Verlauf der Wirbelsäule und der Aufbau der Extremitäten.

Eingeschränkt wurde die Erhebung natürlich auch durch die begrenzte Datenlage. 2D-Bilder mit Seitenansichten von Skeletten waren gut verfügbar. Merkmale, die Tiefeninformationen benötigen, z. B. den Abstand der Füße, sind durch sie aber nicht zu bekommen.

Auch Informationen zu sehr kleinen Knochen, wie Handwurzelknochen oder die unterschiedlichen Fingerknochen, sind schwierig zu erheben, da sie teilweise schwer zu erkennen und zu markieren sind. Deshalb ist die Erhebung auf folgende Daten eingeschränkt:

- Ein Bild mit der Seitenansicht des Skeletts. Darin wurde die Lage der *Wirbelsäule* und die Länge der Knochen der *Vorder- und Hintergliedmaßen* markiert, falls vorhanden. Hier hätte man zusätzlich auch die Positionen der Knochen und damit auch die Winkel an den Gelenken erheben können. Da die Position der Extremitäten auf den Abbildungen aber wenig vergleichbar und relativ beliebig ist, ist das nicht sinnvoll.
- Die *Tierklasse*, also ob das Tier ein Fisch, eine Amphibie, ein Reptil oder ein Säugetier ist. Dieses Merkmal lässt sich nicht auf einer kontinuierlichen Skala abbilden und ist deshalb nicht als Eingabedimension für die PCA geeignet. Es wurde trotzdem erhoben, da es für eine anderweitige Auswertung hilfreich sein könnte. Auch andere Merkmale wie etwa der Lebensraum könnten für weitere Analysen interessant sein. Man könnte sie, je nach Ziel, in zukünftigen Analysen mit aufnehmen.
- Ob *Flügel* vorhanden sind oder nicht. Dieses Merkmal kann in den erhobenen Beispielen nur zwei Werte annehmen. Flügel sind entweder vorhanden (1) oder nicht (0). Betrachtet man die Werte aber auf einer kontinuierlichen Skala, so lassen sie sich als Wahrscheinlichkeit dafür betrachten, dass das Tier Flügel hat.
- Die Anzahl der Paare von *Beinen mit Bodenkontakt*. Hier werden sowohl Vorder- als auch Hinterbeine berücksichtigt. Außerdem werden nur Paare berücksichtigt, da ein Tier keine ungerade Anzahl von Beinen haben kann. Auch hier können, wie bei den *Flügeln*, nur diskrete Werte in den Beispielen angenommen werden. Werte in [0, 1] bzw. in [1, 2] lassen sich aber wiederum als Wahrscheinlichkeiten dafür interpretieren, ob das Tier ein bzw. zwei Beinpaare hat.
- Das ungefähre *Gewicht* eines ausgewachsenen Exemplars der Tierart oder -gattung, zu dem das Skelett gehört, in Kilogramm. Dieses Merkmal wurde mitaufgenommen, da die tatsächliche Größe der Tiere nicht durch die Abbildungen dargestellt wird. Hier wurden oft Angaben zum maximalen Gewicht der Tiere verwendet, da keine Angaben zum Durchschnittsgewicht zu finden waren. Teilweise gibt es auch verschiedene Tierarten einer Gattung, die unterschiedlich schwer werden können, deren Skelette aber, bei der Auflösung der hier erhobenen Daten, gleich aussehen. In diesem Fall wurde ein beliebiger Wert gewählt, der zwischen dem Gewicht der leichtesten und dem der schwersten Art liegt. (Die Quellen zu den Gewichten sind im Anhang A.1.2 zu finden.)

Wie genau die Datenerhebung auf den Bildern der Skelette durchgeführt wurde ist im Kapitel „Implementierungsdetails“ im Abschnitt 7.6 nachzulesen. Das Ergebnis der Erhebung sind annotierte Bilddateien und eine Textdatei, in der Tierklasse, Flügel, Beine und Gewicht erfasst werden.

Die Lage der Wirbelsäule wird durch drei kubische Bézierkurven erfasst, jeweils eine für Hals, Rücken und Schwanz. Hals und Rücken gehen an der Schulter ineinander über und Rücken und Schwanz an der Hüfte. Diese Bézierkurven benötigen 20 Eingabedimensionen der PCA (10 zweidimensionale Punkte). Bei manchen Tieren ist kein Hals oder kein Schwanz vorhanden. In diesen Fällen werden die 3 fehlenden Punkte jeweils mit dem ersten bzw. letzten Punkt des Rückens ersetzt.

Bézierkurven wurden aufgrund ihrer einfachen Handhabung verwendet. Sie werden von Programmen unterstützt, mit denen Vektorgrafiken erstellt werden können, sind leicht in die Beispielbilder einzutragen und leicht zu interpretieren. Es könnten aber natürlich auch andere Repräsentationen, wie B-Splines, verwendet werden. B-Splines und Bézierkurven können sogar ineinander umgewandelt werden [29].

Bei der Annotation der Bilder sind folgende Schwierigkeiten aufgetreten:

- Bei Fischen ist nicht klar wo der Rücken in den Schwanz übergeht, da der Beckengürtel sich teilweise am Kopf befindet oder gar nicht vorhanden ist (siehe auch Abschnitt 2.1). Bei der Datenerhebung wurde der Übergang ungefähr bei der Rücken- oder der Afterflosse festgelegt. Alternativ hätte man auch die komplette Wirbelsäule als Rücken klassifizieren können.
- Manche Hälse und Schwänze sind mit einer kubischen Bézierkurve nicht darstellbar. Das ist unter den verwendeten Beispielen der Hals von Ichthyornis und Schwan und der Schwanz von Ichthyosaurus und Koboldmaki (siehe Abbildungen A.1 p, ag, q und w). In diesen Fällen wurde versucht die Form möglichst gut anzunähern oder Fortsätze (wie am Schwanz vom Ichthyosaurus) einfach wegzulassen.
- Die Schwanzposition bei Tieren mit sehr langen Schwänzen ist auf den Bildern relativ beliebig. Hier wurde versucht, den Schwanz möglichst gerade nach hinten fortzusetzen, auch wenn er auf dem Bild eine andere Position hat.

### 4.3. Analyse der Eingabedaten

Insgesamt wurden 44 Datenpunkte erhoben. Das entspricht bei 29 Dimensionen  $44 \cdot 29 = 1276$  Zahlen als Eingabe. Das Ergebnis der PCA sind im Wesentlichen 29 Eigenwerte und -vektoren. Das sind  $29^2 + 29 = 870$  Zahlen als Ausgabe. Die Datengrundlage ist also immerhin größer als die Ausgabe, da  $1276 > 870$  und  $44 > 29$ . Dennoch wäre es besser mehr Datenpunkte zu haben, um die Ergebnisse aussagekräftiger zu machen.

#### Untersuchung auf Normalverteilung

Eine Voraussetzung dafür, dass die PCA korrekt funktioniert, ist, dass die Eingabedaten in jeder Dimension normalverteilt sind. Das soll im Folgenden genauer untersucht werden. Visualisierungen der Eingabedaten in den einzelnen Dimensionen sind in den Abbildungen A.2 und A.3 im Anhang zu finden.

Es gibt die beiden Merkmale *Flügel* und *Beine mit Bodenkontakt*, die offensichtlich nicht normalverteilt sind, da sie diskret sind und nur zwei bzw. drei verschiedene Werte annehmen können. Sie können jedoch hilfreiche Informationen zur Weiterverarbeitung durch den Algorithmus liefern, weshalb sie nicht ganz außen vor gelassen werden sollten. Da das Hauptaugenmerk der PCA aber auf der Position der Wirbelsäule und dem Aufbau der Extremitäten liegt, sollen diese beiden Merkmale keinen großen Einfluss auf die Hauptkomponenten haben. Deshalb wurde der Einfluss dieser Merkmale verringert. Dazu weiter unten mehr.

Die anderen Merkmale wurden mithilfe eines Quantil-Quantil-Diagramms (siehe Abschnitt 3.6) mit der Normalverteilung verglichen. Die Diagramme zeigen für alle Merkmale, außer dem Gewicht, dass sie recht gut normalverteilt sind (Beispiele in Abbildung 4.1 und eine vollständige Aufzählung im Anhang in den Abbildungen A.4 und A.5).

Das Merkmal *Gewicht* ist überhaupt nicht normalverteilt (siehe Abbildung 4.2 a und b). Verwendet man es als Eingabe für die PCA und generiert dann zufällig normalverteilte Punkte im Ergebnisraum, treten schnell Gewichte kleiner null auf. Betrachtet man das Gewicht jedoch auf einer logarithmischen Skala, so ist es normalverteilt (siehe Abbildung 4.2 c). Deshalb ist es sinnvoll das Gewicht zunächst zu logarithmieren, bevor es in die PCA eingeht. Welcher Logarithmus hier zur Umrechnung der Daten verwendet wird schlägt sich nur als linearer Faktor nieder und ist eine Frage der Skalierung. Es wurde der Zehnerlogarithmus verwendet. Da das Gewicht, genauso wie die Merkmale *Flügel* und *Beine mit Bodenkontakt*, kein Hauptmerkmal für die Untersuchung sein sollte, wurde es ebenfalls kleiner skaliert.

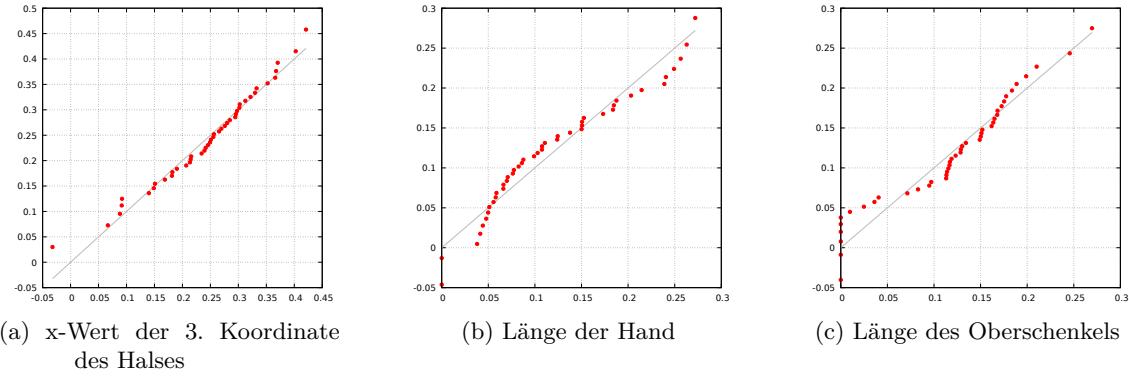


Abbildung 4.1.: Beispielhaft ausgewählte Quantil-Quantil-Diagramme von drei Eingabedimensionen. (a) weicht nicht stark von der Normalverteilung ab, (b) und (c) hingegen schon mehr, sind aber trotzdem noch akzeptabel verteilt.

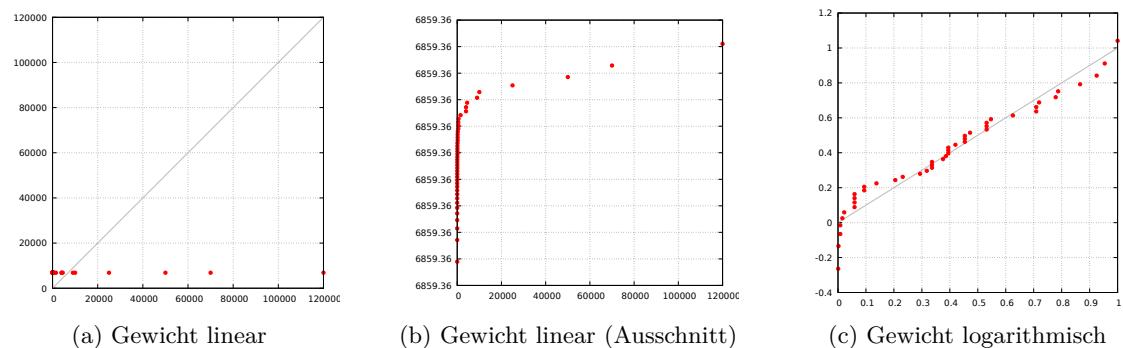


Abbildung 4.2.: Quantil-Quantil-Diagramme des Gewichts, einmal linear (a,b) und einmal mit logarithmischer Skala (c)

### Skalierung der Merkmale

Generell bewirkt die Skalierung eines Merkmals eine Gewichtung, denn durch eine Skalierung ändert sich die (Ko-)Varianz und somit auch die Kovarianzmatrix. Seien beispielsweise  $s, t \in \mathbb{R}$ , dann bewirkt eine Skalierung des Merkmals  $x$  mit  $s$  und eine Skalierung des Merkmals  $y$  mit  $t$  eine Skalierung von  $s \cdot t$  der Kovarianz  $\text{Cov}(x, y)$  von  $x$  mit  $y$ , da  $\text{Cov}(sx, ty) = (sx - s\mu_x)(ty - t\mu_y) = st \cdot \text{Cov}(x, y)$ , mit Erwartungswert  $\mu_i$  für Merkmal  $i$ .

Wie genau werden die einzelnen Merkmale nun skaliert?

Zunächst werden alle Merkmale auf das Intervall  $[0, 1]$  skaliert, damit alle den gleichen Einfluss haben. Bei Koordinaten oder Längen im Bild bedeutet das, dass sie durch 1000 geteilt werden, da sie in Pixeln dargestellt werden und das Bild eine Größe von  $1000 \times 1000$  Pixeln hat. Bei Längen von Strecken im Bild wären dabei theoretisch auch Werte größer 1000px möglich. Solche Längen wären aber unrealistisch und werden deshalb ignoriert. Koordinaten und Längen im Bild sind diejenigen Merkmale, die hier am interessantesten sind. Sie stellen den Verlauf der Wirbelsäule und die Längen der Knochen der Extremitäten dar. Deshalb sollten sie den größten Einfluss auf die Hauptkomponenten der PCA haben. Alle anderen Merkmale werden kleiner skaliert.

Man könnte statt einer Skalierung mit 0.001 auch für jedes einzelne Merkmal den maximal und minimal angenommenen Wert ermitteln und sie dann so skalieren, dass sie Intervalle gleicher Länge abdecken. Das würde ausgleichen, dass z.B. kleine Längen eine kleinere Varianz und damit auch einen kleineren Einfluss haben. Da aber kleine Elemente im Bild auch weniger zum Gesamteindruck beitragen, wirkt es natürlich, dass sie auch weniger Einfluss auf die Hauptkomponenten haben. Deshalb wird die oben beschriebene Variante verwendet. Falls es in Zukunft Gründe für eine andere Gewichtung gäbe, ließe sich das aber leicht anpassen.

Die diskreten Merkmale *Flügel* und *Beine mit Bodenkontakt* und das logarithmische *Gewicht* werden zunächst ebenfalls auf das Intervall  $[0, 1]$  skaliert. Das bedeutet für das angepasste Gewicht  $\bar{w} = \frac{\log(w+1)}{\log(\max+1)}$ . Das schwerste Wirbeltier ist der Blauwal mit 120 Tonnen (siehe Abschnitt 2.2). Deshalb ist hier  $\max = 120.000\text{kg}$ .

Danach werden die Werte noch einmal durch 100 geteilt, um ihren Einfluss zu verringern. Das Ziel ist, dass diese Merkmale nicht als große Einträge in den größten Eigenvektoren (den Hauptkomponenten) auftauchen. Ohne diese Skalierung sind diese Merkmale recht dominant. Mit der Skalierung hingegen sind sie in den größten Eigenvektoren unter den kleinsten Werten zu finden.

Obwohl die Merkmale nun sehr kleine Werte annehmen, sind ihre Korrelationen mit anderen Merkmalen trotzdem noch vorhanden. Wird ein zufälliger  $n$ -dimensionaler Punkt  $p$  mit der gegebenen Normalverteilung generiert, so enthält er also trotzdem Informationen zu *Flügeln* und *Beinen mit Bodenkontakt*. Erst wenn  $p$  auf seine Hauptkomponenten reduziert wird, fallen die meisten Informationen dazu weg.

Interessant ist die Projektion der Eingabedaten auf die größten beiden Eigenvektoren. In Abbildung 4.3 ist gut zu vergleichen was die Effekte der Skalierung der Eingabedaten sind. Ganz links sind die Ergebnisse zu sehen, die entstehen, wenn alle Merkmale nur auf das Intervall  $[0, 1]$  skaliert werden. In der Mitte geht das Gewicht nicht mehr linear, sondern logarithmisch ein und ganz rechts sind *Flügel*, *Anzahl Beine* und *Gewicht* zusätzlich klein skaliert. Gut zu sehen ist, wie sich die Clusterbildung durch die Skalierung verringert. Gibt es weniger Cluster, ist die Verteilung der Daten näher an einer Normalverteilung.

In Abbildung 4.4 ist noch einmal jeweils die Projektion der skalierten Daten auf die ersten beiden Eigenvektoren zu sehen. Diesmal sind die Daten anhand der verschiedenen diskret erhobenen Merkmale markiert. Es ist z.B. schön zu sehen, dass alle Tiere mit Flügeln

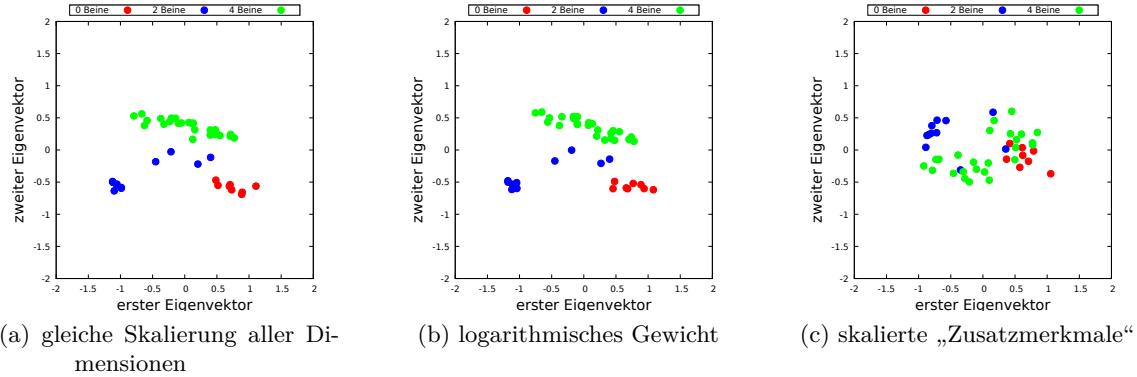


Abbildung 4.3.: Dargestellt sind hier jeweils die Projektionen der Eingabedaten auf die ersten beiden Eigenvektoren. Für jede Version wurden die Eingabedaten unterschiedlich vorverarbeitet. (a) Skalierung aller erhobenen Daten auf das Intervall [0, 1], (b) zusätzlich Verwendung von logarithmischem Gewicht, statt linearem, (c) zusätzliche Skalierung der Merkmale *Flügel*, *Anzahl Beine* und *Gewicht* mit 0,01.

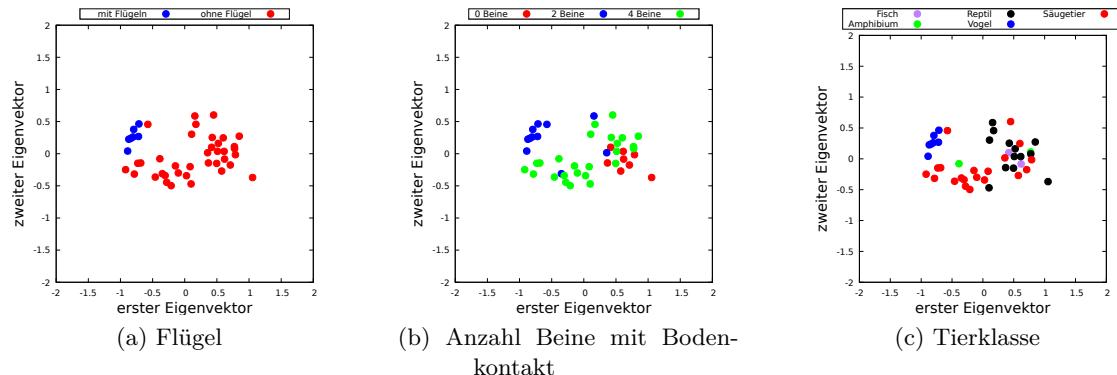


Abbildung 4.4.: Projektion der, wie in Abbildung 4.3c skalierten, Eingabedaten auf die Ebene, die durch den ersten und zweiten Eigenvektor aufgespannt wird. Markiert sind jeweils ob Flügel vorhanden sind (a), die Anzahl der Beinpaare (b) und die Tierklasse (c).

auch Vögel sind und dass fast alle Tiere, die zwei Beine haben, Vögel sind. Vier Tiere haben zwei Beine, sind aber keine Vögel: Ohrenrobbe, Seehund, Tyrannosaurus Rex und Känguru.

Auch im Koordinatensystem der Eigenvektoren sollten die Daten wieder normalverteilt sein. Dies wurde ebenfalls mit Quantil-Quantil-Diagrammen untersucht. In Abbildung 4.5 sind die Ergebnisse für die ersten drei Eigenvektoren zu sehen. Es gibt, wie bei den Eingabedaten, keine allzu großen Abweichungen.

### Spezielle Punkte

Der Mittelwert der skalierten Eingabedaten ist in Abbildung 4.6 visualisiert. Wie auch bei der Datenerhebung ist hier die Position der Wirbelsäule in einem  $1000 \times 1000$  Pixel Bild gezeigt. Da von den Knochen der Vorder- und Hinterextremitäten nur die Längen erhoben wurden, sind ihre Positionen nicht realistisch. Die restlichen Daten sind nicht visualisiert, sondern nur in Textform angegeben.

Den minimalen Abstand zum Mittelpunkt hat der Klippschliefer (siehe Abbildung 4.7a).

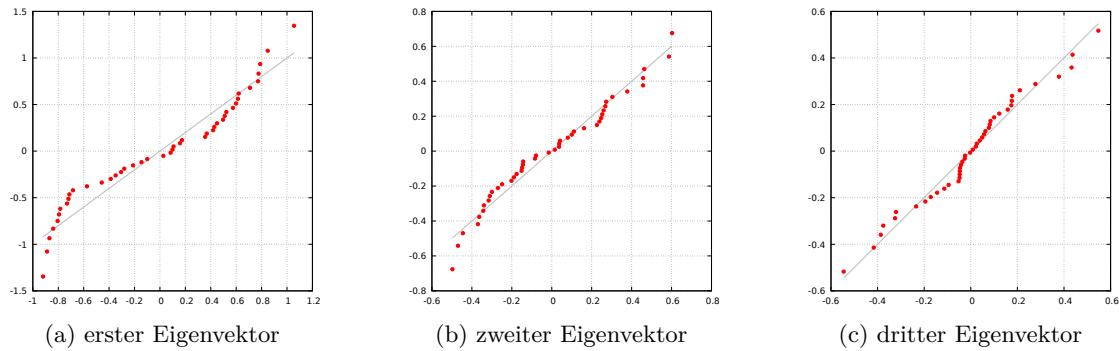


Abbildung 4.5.: Quantil-Quantil-Diagramme der Eingabedaten projiziert auf die größten drei Eigenvektoren.

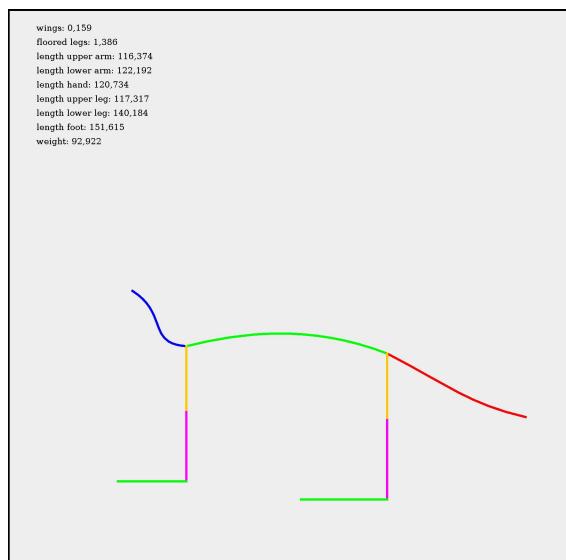


Abbildung 4.6.: Visualisierung des Mittelwerts der skalierten Eingabedaten. Die Werte, die nicht grafisch visualisiert sind, sind folgende: *Flügel 0, 159, Beine mit Bodenkontakt 1,39, Gewicht 93kg.*

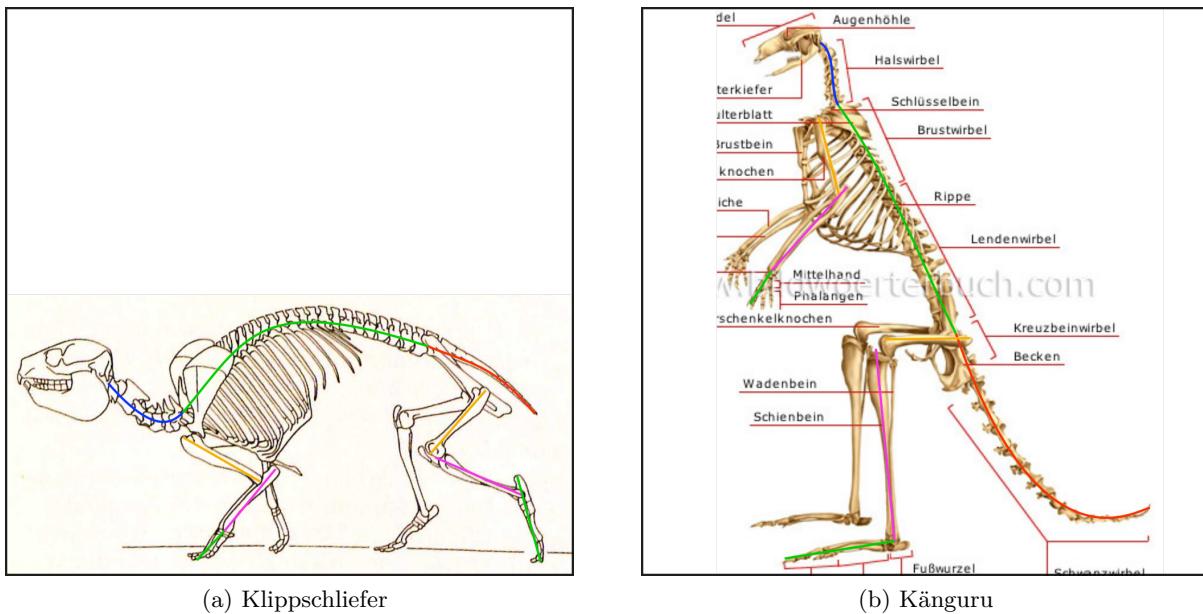


Abbildung 4.7.: Annotierte Bild des Skeletts eines Klippschliefers (a) und eines Kängurus (b). Die Teile der Wirbelsäule und die Knochen der Extremitäten sind hier jeweils mit der gleichen Farbe markiert wie in der Visualisierung des Mittelwerts (Abbildung 4.6)

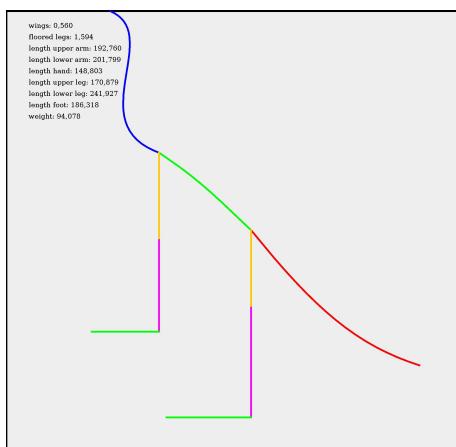
Zusätzlich zum Bild wurde für den Klippschliefer folgende Daten erhoben: *Tierklasse Säugetier, Flügel nein, Beine mit Bodenkontakt 2, Gewicht 4kg.*

Den maximalen Abstand hat die Schlange. Die erhobenen Daten sind hier: *Tierklasse Reptil, Flügel nein, Beine mit Bodenkontakt 0, Gewicht 50kg.* Die Schlange ist allerdings das einzige Tier zu dem es kein „echtes“ Bild des Skeletts gibt. Das liegt daran, dass es keine seitlichen Abbildungen von ausgestreckten Schlangen gibt. Sie werden eigentlich immer gekrümmmt dargestellt, da sonst das Bild sehr lang und schmal werden würde. Da aber versucht wurde eine möglichst große Variation an Skeletten zu erheben und ein Schlangenskelett, in der hier nötigen Auflösung, sehr einfach darzustellen ist, wurde trotzdem ein Bild erstellt. Dieses Bild enthält nur eine horizontale Linie knapp über dem unteren Bildrand, die den Rücken darstellen soll. Extremitäten und ersichtliche Punkte, an denen der Rücken in Hals oder Schwanz übergeht, gibt es bei Schlangen nicht.

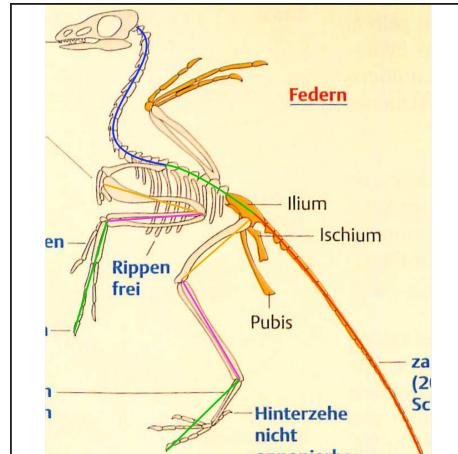
Der Punkt mit dem zweitgrößten Abstand zum Mittelwert ist das Känguru (siehe Abbildung 4.7b). Zusätzlich zum Bild gibt es hier folgende Daten: *Tierklasse Säugetier, Flügel nein, Beine mit Bodenkontakt 1, Gewicht 50kg*

#### 4.4. Analyse der Ergebnisse

Zu 29 Eingabedimensionen gibt es auch 29 Eigenvektoren mit Eigenwerten größer 0. Der kleinste Eigenwert ist 0,000001. Von den Eigenwerten sind 6 größer als 0,01. Leider reichen diese 6 Dimensionen noch nicht aus, um die Eingabedaten hinreichend anzunähern. Bei manchen Tieren funktioniert das zwar ganz gut (siehe Archaeopteryx, Abbildung 4.8), bei anderen aber eher schlechter (siehe Frosch, Abbildung 4.9). Die Daten konnten somit von der PCA nicht sehr gut komprimiert werden. Trotzdem sind die berechneten Eigenvektoren hilfreich um zufällige Punkte mit der Verteilung der Eingabebeispiele zu generieren (wie auch beschrieben in Abschnitt 3.5).

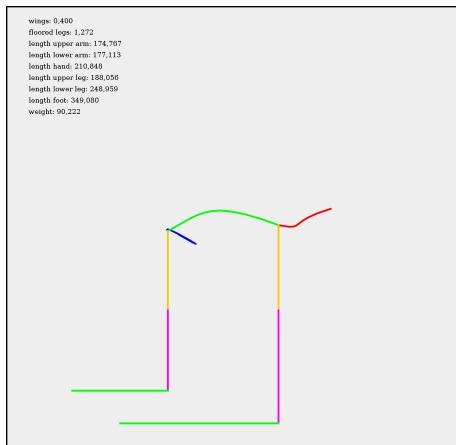


(a) Rekonstruktion aus 6 Eigenvektoren

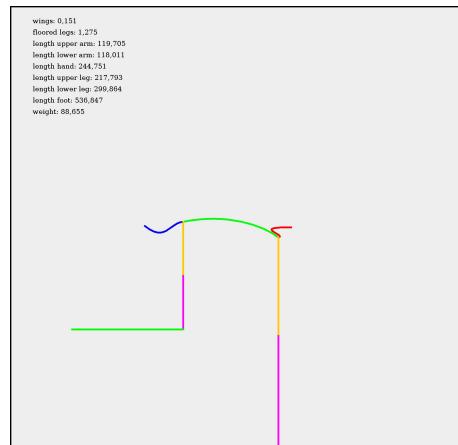


(b) Eingabebild

Abbildung 4.8.: Archaeopteryx nicht visualisierte Daten der Rekonstruktion: *Flügel* 0,56, *Beine mit Bodenkontakt* 1,594, *Gewicht* 94,1kg, Originalwert für das *Gewicht*: 1kg



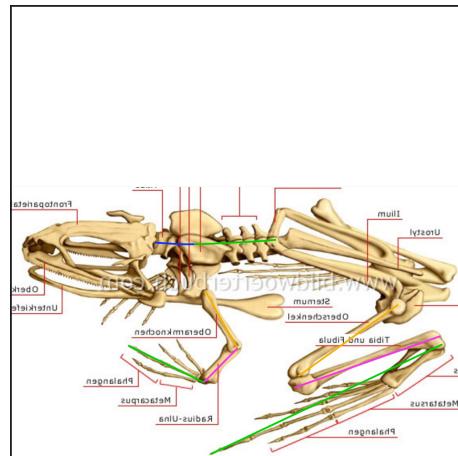
(a) 6 Eigenvektoren, Flügel 0, 4, Beine mit Bodenkontakt 1, 27, Gewicht 90, 2kg



(b) 10 Eigenvektoren, Flügel 0,151, Beine mit Bodenkontakt 1,28, Gewicht 88,7kg



(c) 20 Eigenvektoren, Flügel 0, 217, Bei-  
ne mit Bodenkontakt 1, 7, Gewicht  
89, 2kg



(d) Eingabebild

Abbildung 4.9.: Frosch, Rekonstruktionen aus den größten 6, 10 und 20 Eigenvektoren und das Eingabebild (d). Der Originalwert für das *Gewicht* ist 0,01kg.

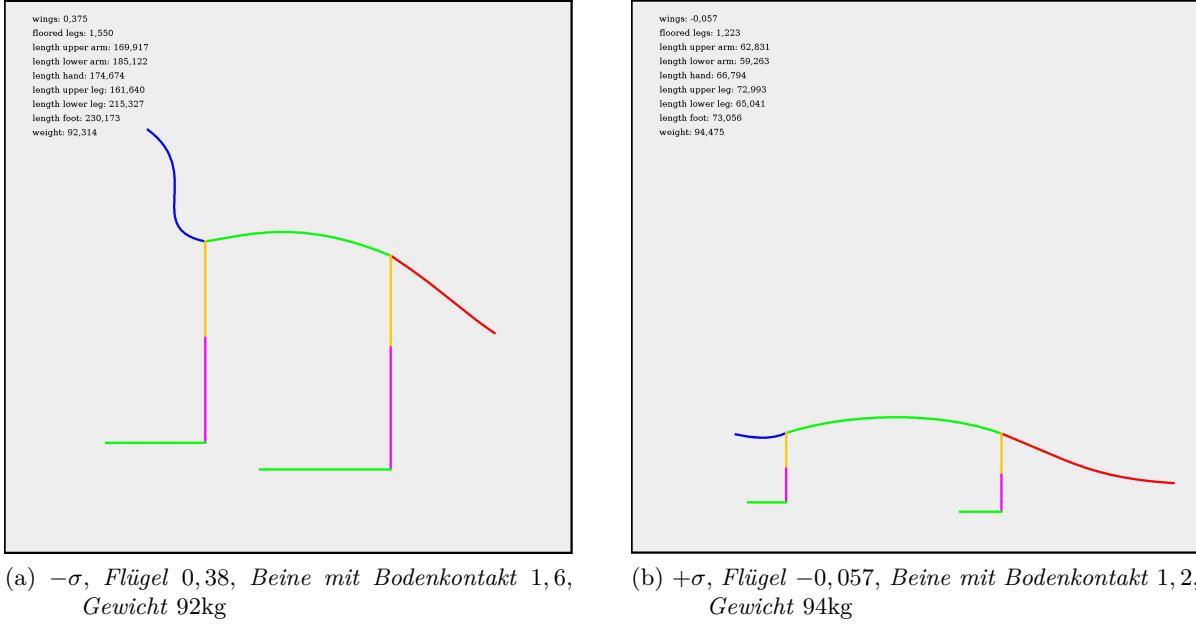


Abbildung 4.10.: Datenpunkte im PCA-Koordinatensystem. Die Koordinate für den Eigenvektor zum größten Eigenwert nimmt den Wert der positiven bzw. negativen Standardabweichung  $\sigma$  an, alle anderen sind null. Für Abbildungen zu den größten sechs Eigenvektoren siehe Abbildung A.6 im Anhang

Um zu verstehen in welchem Bereich sich die zufällig generierten Punkte bewegen, ist es sinnvoll sich anzuschauen was die Hauptkomponenten „bedeuten“. In Abbildung 4.10 sind zwei Datenpunkte zu sehen, die auf der Koordinatenachse liegen, die zum Eigenvektor mit dem größten Eigenwert gehört. Ihr Wert in dieser Dimension ist jeweils die positive bzw. negative Standardabweichung. Die Varianz entlang eines Eigenvektors ist gegeben durch den Eigenwert. Die Standardabweichung ist also die Wurzel des entsprechenden Eigenwerts. Es ist zu sehen wie sich die Punkte verändern, wenn sie sich entlang dieser Achse bewegen bzw. welchen Einfluss der Eigenvektor ausübt. Abbildungen nach dem gleichen Schema für die sechs größten Eigenvektoren sind im Anhang in Abbildung A.6 zu finden.

### Auswirkungen von Veränderungen auf den Eingabedaten

Bei allen Eingabedimensionen, außer der Position der Wirbelsäule, kann man die Frage stellen, ob sie nötig sind, oder ob sie die Ergebnisse der PCA eher verschlechtern. Deshalb wurden versuchsweise verschiedene (Kombinationen von) Merkmalen weggelassen. Die Ergebnisse unterscheiden sich aber kaum von der PCA mit allen Daten.

Leider gibt es keine gute Möglichkeit die Qualität der Ergebnisse der PCA zu messen. Man könnte den Unterschied zwischen den Eingabedaten und den Rekonstruktionen aus den Linearkombinationen der Eigenvektoren mit den größten Eigenwerten messen. Da aber verschiedene Dimensionen fehlen, ist nicht klar wie dieser Unterschied einheitlich gemessen werden soll. Jedes Merkmal, das nicht verworfen wird liefert dem Algorithmus, der später Skelette generieren soll, mehr Informationen. Deshalb wurde kein Merkmal verworfen.

Außerdem gibt es die Möglichkeit die Eingabedaten in mehrere Mengen aufzuteilen und diese einzeln zu analysieren. Hierbei gibt es zunächst das Problem, dass sich dann die Anzahl der Datenpunkte noch weiter reduziert, was die Ergebnisse nicht mehr repräsentativ macht.

Merkmale, die sich zur Unterteilung in Mengen anbieten würden, sind die diskreten, also

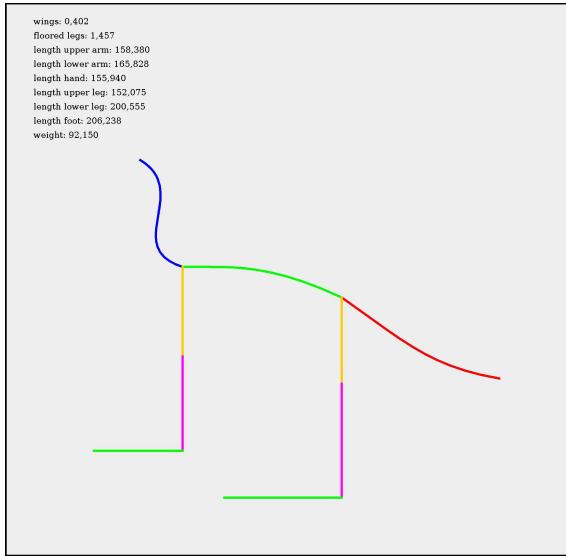


Abbildung 4.11.: Visualisierung eines Punktes, der, projiziert auf die ersten beiden Eigenvektoren, zwischen den Eingabedaten mit Flügeln und jenen ohne Flügel liegt. Die Werte, die auf den jeweiligen Achsen angenommen werden, sind  $-0,4$  für den ersten Eigenvektor und  $0,2$  für den zweiten. Werte für die ursprünglichen Merkmale, die nicht visualisiert sind, sind folgende: *Flügel* 0, 402, *Beine mit Bodenkontakt* 1, 46 und *Gewicht* 92, 2kg.

*Flügel* und *Beine mit Bodenkontakt*. Sie sind auch klar als Cluster im Koordinatensystem der PCA ohne angepasste Skalierung zu erkennen (Abbildung 4.3 a). Getestet wurde die Aufteilung anhand der Werte für die Flügel, da sich dadurch nur zwei Gruppen ergeben. Tatsächlich liefert sie bessere Rekonstruktionen aus den größten Eigenvektoren. Das liegt aber natürlich in erster Linie daran, dass die zu untersuchende Datenmenge jeweils verkleinert wurde.

Ein weiteres Problem daran, die Daten in mehrere Mengen aufzuteilen, ist, dass dann keine Skelette mehr erzeugt werden können, die zwischen den beiden Gruppen liegen. Tatsächlich sehen die Datenpunkte, die zwischen den Gruppen erzeugt werden, aber relativ sinnvoll aus (siehe Abbildung 4.11). Auch das ist ein Argument dafür keine Aufteilung vorzunehmen.

## 4.5. Bedingte Verteilungen

Aus den Ergebnissen der PCA lassen sich sehr gut zufällige Skelette erzeugen. Es ist aber schwer gezielt Eigenschaften festzulegen.

### Bedingungen an explizit erhobene Merkmale

Der erste Schritt dies zu erreichen ist Eigenschaften, die so schon in den erhobenen Daten vorkommen, auf spezifische Werte festzulegen. Das können beispielsweise die Anzahl der Beine sein oder ob das Skelett Flügel haben soll.

Dazu kann man, statt die ursprünglichen Daten und deren Verteilung zu verwenden, die entsprechenden bedingten Verteilungen bilden. Dazu muss der bedingte Mittelwert und die bedingte Kovarianzmatrix, wie in [10, S. 116 f.] beschrieben, bestimmt werden.

Seien

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, \mu = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \mu_2 \end{pmatrix} \text{ und } \Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} \\ \Sigma_{21} & \Sigma_{22} \end{pmatrix}.$$

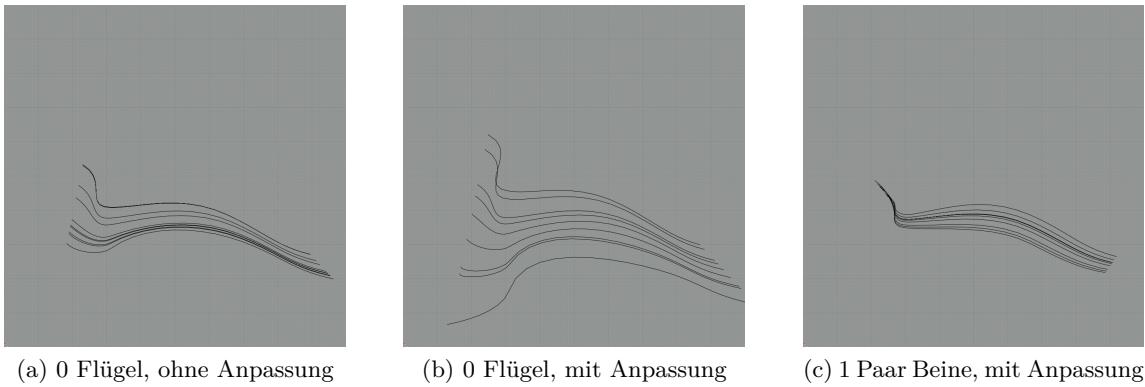


Abbildung 4.12.: Jeweils 10 bedingt zufällig generierte Wirbelsäulen. (a) und (b) ohne Flügel, (c) mit einem Paar Beine. In (b) und (c) wird ein zufälliger Wert aus  $[-0.5, 0.5]$  auf die Bedingung (Flügel = 0 bzw. Beine = 1) aufaddiert.

Der Zufallsvektor  $x$  enthält  $n$  normalverteilte Zufallsvariablen,  $q \leq n$  Variablen im Vektor  $x_1$  und  $n - q$  in  $x_2$ . Die Einträge in  $\mu$  sind die jeweils zugehörigen Mittelwerte und  $\Sigma$  ist die Kovarianzmatrix. Die Verteilung für  $x_1$  unter der Bedingung, dass  $x_2 = b$ , hat den Mittelwert  $\bar{\mu}$  und Kovarianzmatrix  $\bar{\Sigma}$  mit

$$\bar{\mu} = \mu_1 + \Sigma_{12} \Sigma_{22}^{-1} (b - \mu_2), \quad \bar{\Sigma} = \Sigma_{11} - \Sigma_{12} \Sigma_{22}^{-1} \Sigma_{21}.$$

Verwendet man nun  $\bar{\Sigma}$  als Eingabe für die PCA, so erhält man nur noch Daten für Skelette unter den vorher festgelegten Bedingungen  $b$ . Zu beachten ist hier, dass die Eigenvektoren sich im Vergleich zur PCA ohne Bedingungen verändern. Falls man diese also zur Bestimmung eines Datenpunktes verwendet hat (z. B. in einer Benutzeroberfläche), so müssen die Werte für die neuen Eigenvektoren neu ausgerechnet werden.

Erzeugt man nun in diesem bedingten Raum zufällige Beispiele, zeigt sich sehr deutlich, dass das Festlegen von nur einer Dimension auch die anderen Dimensionen stark einschränken kann. Legt man z. B. fest, dass das Skelett keine Flügel haben soll, so sind sich die Wirbelsäulen der Skelette, die dann bedingt zufällig generiert werden, sehr ähnlich (siehe Abbildung 4.12a).

Um das zu umgehen, wird die Eingabe als Intervall aufgefasst, aus dem zufällig ein Wert gezogen wird. Legt der Benutzer z. B. einen ganzzahligen Wert fest, so wird ein kleiner zufälliger Wert aufaddiert oder abgezogen. So wird nicht immer genau der gleiche Wert verwendet. Zwei Beispiele sind in den Abbildungen 4.12 b und c gezeigt. Zusätzlich ist dieses Vorgehen hilfreich, weil dann vom Benutzer nicht verlangt wird Bedingungen für *Flügel* oder *Beine* anzugeben, die nicht ganzzahlig sind, um mehr Variation zu bekommen.

Schaut man sich nun die erzeugten Wirbelsäulen mit einem Paar tragender Beine an (Abbildung 4.12c), so liegen sie alle recht nah an der mittleren Wirbelsäule (Abbildung 4.6). Das wirkt zunächst überraschend, da die meisten Tiere in den erhobenen Beispielen, die zwei Beine haben, Vögel sind. Sie haben eine Wirbelsäule, die hoch über dem Boden liegt und relativ aufrecht ist. Dann gibt es noch Känguru und Tyrannosaurus Rex. Bei ihnen liegt die Wirbelsäule ähnlich. Deshalb könnte man eine mittlere Wirbelsäule erwarten, die ebenfalls diese Eigenschaften besitzt.

Es muss aber auch einen Übergang von bodennahen Vierbeinern wie Krokodilen oder Fröschen über Zweibeiner zu Fischen ohne Beine geben, auch wenn es dafür in der Natur eher wenige Beispiele gibt. In den erhobenen Daten sind das nur der Seehund und die Ohrenrobbe. Das ist der Grund, weshalb die mittlere Wirbelsäule für Zweibeiner verhältnismäßig flach verläuft.

### Bedingungen an implizit enthaltene Merkmale

Nun möchte man vielleicht Bedingungen an das zu generierende Skelett stellen, die nicht schon genau so in den erhobenen Daten repräsentiert sind. Bedingungen an Dimensionen, die gar nicht erhoben wurden, können entweder, unabhängig von der PCA, in den Ersetzungsregeln erzwungen werden, wie z. B. die Anzahl der Flossen, oder sie müssen in die Erhebung eingefügt werden.

Bedingungen, die schon implizit in den erhobenen Daten enthalten sind, sind beispielsweise die Schwanz- oder Halslänge. Um an sie Bedingungen stellen zu können, könnte man ebenfalls eine zusätzliche Dimension einfügen. Sie kann einfach aus den schon bestehenden Dimensionen errechnet werden. Dabei wäre aber das Problem, dass nur die Dimensionalität der Daten erhöht wird, nicht aber die eingegebenen Informationen. Es wären also mehr Eingabebeispiele nötig, nur dafür, dass die PCA eine offensichtliche Korrelation der Dimensionen erkennt.

Die bessere Alternative ist die Eingabedimensionen der PCA umzuparametrisieren. Der Abstand vom Anfangs- zum Endpunkt des Schwanzes in x-Richtung, ist z. B. implizit in der Differenz der x-Koordinaten des ersten und letzten Kontrollpunktes der Bézierkurve des Schwanzes enthalten. Ersetzt man nun den absoluten x-Wert des letzten Kontrollpunktes durch den Abstand in x-Richtung zum ersten Kontrollpunkt, so lässt sich diese Länge ganz einfach als Bedingung an die PCA stellen.

Betrachtet man nun konkret den Wunsch die Schwanzlänge festzulegen, ist das nicht ganz so einfach. Der Abstand vom Anfangs- zum Endpunkt des Schwanzes in x- und y-Richtung lässt sich zwar leicht festlegen, diese Längen sagen aber im Allgemeinen noch nicht viel über die tatsächliche Länge der Bézierkurve aus. Verlangt man z. B. eine Länge von 0px in x-Richtung, so haben die generierten Datenpunkte einen Schwanz der zwar auf gleicher Höhe beginnt und endet, aber trotzdem vorhanden ist und einen kleinen Bogen beschreibt. Um die wirkliche Länge des Schwanzes zu messen, müsste man also noch mehr Aufwand in die Umparametrisierung stecken oder doch eine zusätzliche Dimension für die PCA in Kauf nehmen.

# 5. Generierung von Skeletten

In diesem Kapitel werden die einzelnen Bestandteile zusammengefügt, die zur Generierung eines Skeletts notwendig sind. Abschnitt 5.1 gibt einen Überblick über den Ablauf des kompletten Algorithmus. Fehlende Details werden in den darauffolgenden Abschnitten beschrieben. In Abschnitt 5.2 geht es um die Einzelteile aus denen ein fertiges Skelett besteht. Dann wird das Regelwerk zu ihrer Generierung in Abschnitt 5.3 vorgestellt. Die Positionierung der Extremitäten ist mit etwas mehr Aufwand verbunden und lässt viel Spielraum für Variationen. Deshalb widmet sich Abschnitt 5.4 den Extremitäten. Auf Wirbel und Rippen konzentriert sich Abschnitt 5.5 und zuletzt geht es in Abschnitt 5.6 um die Erzeugung eines konkreten 3D-Modells.

## 5.1. Überblick über den Ablauf der Generierung

### Generierung eines Skeletts

0. Lies die Benutzereingabe ein.
1. Führe eine PCA auf den gegebenen Beispielskeletten durch.
2. Bestimme einen Punkt  $p$  im PCA-Raum und dessen Grundlage die Parameter für die Grammatik  $G$ .
3. Verwende die Grammatik  $G$  um die Bestandteile des Skeletts zu erzeugen.
4. Spiegle alle Elemente, die nicht auf der Wirbelsäule liegen.
5. Generiere ein 3D-Modell.

Bevor der Algorithmus beginnt wird ausgelesen was der Benutzer für Zusatzbedingungen, z. B. an die Anzahl der Flügel, gestellt hat. Welche Eingaben möglich sind und wie diese Verarbeitet werden, wird in Abschnitt 6.3 genauer erläutert.

Im ersten Schritt des Algorithmus wird eine PCA auf den gegebenen Beispieldaten ausgeführt (siehe Kapitel 4). Dazu werden zunächst die Beispieldaten eingelesen und dann der Basiswechsel in das neue Koordinatensystem, im Folgenden als *PCA-Raum* bezeichnet,

berechnet. Im PCA-Raum kann nun ein Punkt  $p$  bestimmt werden, der als Grundlage für die weitere Generierung verwendet wird. Dieser Punkt kann entweder (bedingt) zufällig oder auch nach anderen Vorgaben ausgewählt werden.

Auf Grundlage von  $p$  und Teilen der Benutzereingabe werden die Parameter bestimmt, die im nächsten Schritt von der kontextfreien Grammatik  $G$  verwendet werden. Dazu wird  $p$  in das Koordinatensystem zurücktransformiert, in dem Merkmale wie die Lage der Wirbelsäule einfach abgelesen werden können. Die Grammatik  $G$  wird in Abschnitt 5.3 definiert. Mit ihr werden die Einzelteile des Skeletts (siehe Abschnitt 5.2) generiert. Gleichzeitig werden auch Position und Ausdehnung der terminalen Elemente festgelegt.

Danach werden alle Elemente, die nicht auf der Wirbelsäule liegen, gespiegelt. Das sind Extremitäten, Rippen und Schulterblatt. (Technische Details zur Spiegelung der Transformationsmatrizen sind in Abschnitt 7.5 zu finden.)

Zum Schluss wird ein 3D-Modell erzeugt. Dazu wird für jedes terminale Element, also jeden Knochen, ein eigenes Modell erzeugt und dann an der richtigen Position in das 3D-Modell des gesamten Skeletts eingefügt (siehe Abschnitt 5.6).

## 5.2. Bestandteile eines Skeletts

Ein Skelett besteht aus Knochen und Gelenken. Zwei Knochen sind jeweils durch ein Gelenk miteinander verbunden. Im Folgenden werden sowohl Knochen als auch Gelenke genauer beschrieben.

### Knochen

Jeder Knochen hat sein eigenes lokales Koordinatensystem und wird zunächst als Quader dargestellt. Der Ursprung des Koordinatensystems befindet sich in einer Ecke des Quaders. Zur Darstellung eines Knochens sind also seine Ausdehnung in alle drei Raumrichtungen (die Kantenlängen des Quaders) und die Position und Orientierung des Ursprungs im globalen Koordinatensystem erforderlich.

Die Knochen sollten eine Hierarchie (einen Baum) bilden, da das von Algorithmen für Animationen so erwartet wird (siehe Abschnitt 3.3). Da der Wirbeltierbauplan aus Abbildung 2.2 verwendet wird, ist das auch möglich. Im Allgemeinen ist ein Skelett aber weder zusammenhängend noch ohne Kreise.

Für eine Hierarchie ist ein oberstes Element nötig, die Wurzel des Baums. Dafür bietet sich ein Knochen in der Nähe des Schwerpunkts an. Oft wird hierfür die Hüfte verwendet. Da aber nicht jedes Wirbeltier eine Hüfte besitzt und es die Generierung vereinfacht, wird als Wurzelknochen ein Knochen ohne Ausdehnung in der Mitte der Rückenwirbelsäule verwendet. Dieser Knochen wird im Folgenden als *Wurzelknochen* bezeichnet. Liegt Knochen  $B$  in der Hierarchie direkt unter Knochen  $A$ , so ist  $A$  der *Elternknochen* von  $B$  und  $B$  ein *Kindknochen* von  $A$ .

Es ist sinnvoll für jeden Knochen nicht die Position im globalen Koordinatensystem anzugeben, sondern seine Position im Koordinatensystem des Elternknochens. Verfolgt man den Pfad von einem Knochen zurück zum Wurzelknochen, so kann die Position im globalen Koordinatensystem trotzdem ausgerechnet werden.

Für die Darstellung werden Transformationsmatrizen mit homogenen Koordinaten verwendet. Genauere Informationen zu diesen Transformationsmatrizen und wie sie in verschiedenen Situationen berechnet werden können sind in Absatz 7.5 zu finden.

## Gelenke

Ein Gelenk ist, wie auch in der Natur, ein Verbindungsstück zwischen zwei Knochen. Es legt fest wie die beiden Knochen sich relativ zueinander bewegen können. Im Gegensatz zu echten Gelenken haben Gelenke hier aber keine Ausdehnung. Sie werden am Ende im 3D-Modell nicht dargestellt.

Ein Gelenk wird im Koordinatensystem des Elternknochens dargestellt. Es wird beschrieben durch seine Position im Elternkoordinatensystems und Bewegungseinschränkungen für den Kindknochen. Ein Gelenk kann null bis zwei Freiheitsgrade haben. Haben alle Winkel einen Wert von  $0^\circ$ , hat das Kindelement die gleiche Ausrichtung wie das Eltern-element. Die meisten Knochen werden aber direkt in ihrer Endposition generiert, sodass zusätzliche Bewegungseinschränkungen gar nicht nötig sind. Nur bei der Positionierung der Extremitäten (siehe Abschnitt 5.4.2) spielen die Gelenke eine Rolle. In Abbildung 5.3 sind alle Gelenke der Extremitäten dargestellt. Der Einfachheit halber haben sie alle nur einen Freiheitsgrad.

Im folgenden Abschnitt wird die Grammatik vorgestellt, die verwendet wird um die Einzelteile des Skeletts zu generieren. Die Menge der terminalen Symbole, die sie verwendet, enthält nur Knochen, keine Gelenke. Gelenke werden als Bestandteile des Elternknochens dargestellt und zusammen mit ihm generiert. Die Transformationsmatrix des Kindelements, lässt sich dann aus den Informationen zum Elternknochen und der Ausrichtung seines Gelenks berechnen.

## 5.3. Aufbau als Grammatik

Das Regelwerk für die Generierung der Knochen des Skeletts ist durch eine kontextfreie Grammatik (siehe 3.4) gegeben.

### Kontextfreie Grammatik

Die verwendete kontextfreie Grammatik  $G = (\Sigma, N, S, P, p)$  unterstützt Klammerausdrücke, um die Baumstruktur des Skeletts darzustellen (so wie sie auch bei L-Systemen verwendet werden, siehe dazu Abschnitt 3.4). Außerdem bekommt sie als zusätzliche Eingabe eine Menge von Parametern  $p$  aus  $\mathbb{N}_0$ , die in den Produktionen  $P$  verwendet werden.

$$\begin{aligned}\Sigma &= \{(, ), \text{Wurzelknochen}, \text{Wirbel}, \text{Rippe}, \text{Schädel}, \\ &\quad \text{Schulterblatt}, \text{Oberarm}, \text{Unterarm}, \text{Hand}, \\ &\quad \text{Beckenknochen}, \text{Oberschenkel}, \text{Unterschenkel}, \text{Fuß}\} \\ N &= \{\text{Skelett}, \text{Vorderteil}, \text{Hinterteil}, \text{Schulterpartie}, \text{Schultergürtel}, \text{Beckengürtel} \\ &\quad \text{Hals}, \text{Vorderextremität}, \text{Hinterextremität}\} \\ S &= \text{Skelett} \\ p &= \{w_{rv}, w_{rh}, h, s, w_h, w_s, r, e_v, e_h\}\end{aligned}$$

Die Parameter werden im vorherigen Schritt des Algorithmus bestimmt (siehe Überblick 5.1). Genaueres dazu weiter unten. Sie haben folgende Bedeutungen:

- $w_{rv}$ : Anzahl der Wirbel auf der vorderen Hälfte der Rückenwirbelsäule, mit  $w_{rv} \geq 3$
- $w_{rh}$ : Anzahl der Wirbel auf der hinteren Hälfte der Rückenwirbelsäule
- $h \in \{0, 1\}$  gibt an, ob es eine Halswirbelsäule gibt
- $s \in \{0, 1\}$  gibt an, ob es eine Schwanzwirbelsäule gibt
- $w_h$ : Anzahl der Wirbel auf der Halswirbelsäule, mit  $h > 0 \Rightarrow w_h \geq 7$

- $w_s$ : Anzahl der Wirbel auf der Schwanzwirbelsäule
- $r$ : Anzahl der Rippen, mit  $r \leq w_{rv} + w_{rh}$
- $e_v$ : Anzahl der Vorderextremitäten, mit  $e_v \in \{0, 1\}$
- $e_h$ : Anzahl der Hinterextremitäten, mit  $e_h \in \{0, 1\}$

Im folgenden sind alle Produktionen aus  $P$  aufgeführt.

$$\begin{aligned}
 \text{Skelett} &\rightarrow \text{Wurzelknochen } (\text{ Vorderteil } ) \text{ Hinterteil} \\
 \text{Vorderteil} &\rightarrow \text{Wirbel}^{(w_{rv}-r)^+} \\
 &\quad [\text{Wirbel } ( \text{ Rippe } )]^{(\min(w_{rv}-1, r-1))^+} \\
 &\quad \text{Wirbel } ( \text{ Schulterpartie } ) \\
 &\quad \text{Hals} \\
 \text{Schulterpartie} &\rightarrow \text{Rippe}^{\min(1, r)} \text{ Schultergürtel}^{e_v} \\
 \text{Schultergürtel} &\rightarrow \text{Schulterblatt } \text{ Vorderextremität} \\
 \text{Vorderextremität} &\rightarrow \text{Oberarm Unterarm Hand} \\
 \text{Hals} &\rightarrow [\text{Wirbel}^{w_h}]^h \\
 &\quad \text{Schädel} \\
 \text{Hinterteil} &\rightarrow [\text{Wirbel } ( \text{ Rippe } )]^{(r-w_{rv})^+} \\
 &\quad \text{Wirbel}^{(w_{rh}-(r-w_{rv})^+-1)^+} \\
 &\quad \text{Wirbel } ( \text{ Beckengürtel } ) \\
 &\quad [\text{Wirbel}^{w_s}]^s \\
 \text{Beckengürtel} &\rightarrow [\text{Beckenknochen } \text{ Hinterextremität}]^{e_h} \\
 \text{Hinterextremität} &\rightarrow \text{Oberschenkel Unterschenkel Fuß}
 \end{aligned}$$

Der Ausdruck  $A^x$  mit  $A \in (\Sigma \cup N)^*$  bedeutet, dass  $A$  genau  $x$ -mal hintereinander kommt. Der Ausdruck  $A^{(x)^+}$  kann ersetzt werden durch  $A^{\max(0, x)}$ . Die angegebene Anzahl  $x$  wird also nur verwendet, wenn sie positiv ist. Sonst wird  $x$  durch 0 ersetzt.

Die Produktionen stellen sicher, dass die Rippen an aufeinanderfolgenden Wirbeln ansetzen und beim ersten Wirbel auf der Rückenwirbelsäule starten. Dieser erste Wirbel ist derjenige, an dem auch der Schultergürtel ansetzt.

Für jedes Nichtterminal gibt es in  $P$  genau eine Produktion und alle Parameter  $p$  sind vor der Anwendung der Grammatik  $G$  festgelegt. Das bedeutet  $G$  ist deterministisch und es wird genau ein Wort erzeugt. Die Darstellung als Grammatik ist also gar nicht unbedingt nötig. Die Grammatik sorgt jedoch dafür, dass Teile des Skeletts einfach verfeinert werden können. Es ist z.B. leicht  $G$  so anzupassen, dass der Fuß kein Terminalsymbol mehr ist, sondern in kleinere Einzelteile verfeinert werden kann. Außerdem können natürlich auch zusätzliche Produktionen für bestehende Nichtterminalsymbole eingefügt werden, z. B. für einen anders gearteten Schultergürtel.

Während die Bestandteile des Skeletts durch die Grammatik  $G$  generiert werden, wird auch gleichzeitig Position und Ausdehnung der erzeugten Terminalsymbole festgelegt. Nichtterminale haben weder Position noch Ausdehnung. Aus diesem Grund haben Nichtterminale niemals Kindelemente. Wäre dies erlaubt, könnte es passieren, dass Nichtterminalsymbole terminale Kinder haben. Für diese wäre dann nicht klar wie sie positioniert werden müssten, da ihre Position von der ihrer Eltern abhängig ist.

Die Positionen der meisten terminalen Bestandteile sind durch den Verlauf der Wirbelsäule festgelegt. Wirbel werden beispielsweise entlang der Wirbelsäule positioniert (näheres dazu in Abschnitt 5.5) und Rippen, Schulterblätter und Beckenknochen so, dass sie an den zugehörigen Wirbeln ansetzen. Der Schädel befindet sich Ende der Halswirbelsäule. Kompliziertere Berechnungen werden nur zur Positionierung der Extremitäten gebraucht. Diese werden in Abschnitt 5.4 genauer ausgeführt.

Die Länge der Knochen der Extremitäten ist durch den Punkt im PCA-Raum festgelegt und die Länge der Wirbel ergibt sich durch ihre Positionierung auf der Wirbelsäule. Alle anderen Ausdehnungen von terminalen Elementen sind relativ beliebig im Code festgelegt und sind bei jedem erzeugten Skelett gleich.

## Darstellung als Baum

Um die Baumstruktur besser zu visualisieren, kann das erzeugte Wort  $w$  auch als Graph bzw. Baum dargestellt werden.

Der Baum  $B = (V, E)$  hat eine Knotenmenge  $V \subset (\Sigma \cup N)$  und eine Kantenmenge  $E \subset (\Sigma \cup (N \setminus S)) \times \Sigma$ . Eine Kante  $(a, b)$  führt vom Knoten  $a$  zu seinem Elternknoten  $b$ . Nichtterminale Knoten können keine Kindknoten haben, sind also Blätter. Für jeden nicht-terminalen Knoten  $v$  gibt es mindestens eine Ersetzungsregel aus  $P$ , die  $v$  durch einen Baum  $B_v$  ersetzt. In diesem Prozess wird  $v$  aus  $B$  gelöscht und alle Knoten und Kanten von  $B_v$  in  $B$  eingefügt. Außerdem wird eine Kante zwischen der Wurzel von  $B_v$  und dem Elternknoten von  $v$  eingefügt, falls  $v$  nicht die Wurzel von  $B$  war. Wenn  $B$  vor der Anwendung der Ersetzungsregel ein Baum war, so ist  $G$  nach der Ersetzung also immer noch ein Baum.

Die Skelettgenerierung startet konkret mit einem Graphen  $B$ , der nur aus dem nicht-terminalen Knoten *Skelett* besteht. Der initiale Graph  $B$  ist also ein Baum. Die Ersetzungsregeln, die im weiteren Verlauf verwendet werden, sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Elliptische Knoten stellen nichtterminale Knoten dar, eckige sind terminale Knoten. Die türkisfarbenen Kanten, die von einem nichtterminalen Knoten  $v$  ausgehen, führen zu den Knoten des Baumes  $B_v$ , durch den  $v$  bei Anwendung der Ersetzungsregel ersetzt wird. Die grauen Kanten, die von nichtterminalen Knoten ausgehen, führen zum jeweiligen Elternelement des Knotens. Terminale Knoten liegen auf durchgehenden, gerichteten Kurven. Die Richtung der Kurve gibt jeweils an in welcher Richtung das dazugehörige Elternelement liegt. Die aufeinanderfolgende Wirbel sind in der Abbildung teilweise zu einem Knoten vereinfacht. Alle Benennungen von Wirbeln stehen für das Terminal „Wirbel“. Sie sind nur der Übersichtlichkeit halbe unterschiedlich benannt. Auch die Rippen sind eigentlich separate Knoten, die jeweils Kindknoten genau eines Rückenwirbels sind.

Außerdem sind, wie in den Produktionen  $P$  definiert, manche Teile des Skeletts optional. Gegebenenfalls werden also nichtterminale Knoten nur durch Teilmengen der hier angegebenen Knoten ersetzt. Schulterblatt und Beckenknochen werden beispielsweise nur dann generiert, wenn es auch Extremitäten gibt, die daran ansetzen sollen. Der Schultergürtel ist Kindknoten der Rippe am Schulterwirbel. Existiert diese Rippe jedoch nicht, ist er direkter Kindknoten des Schulterwirbels. Bei allen anderen Knoten gilt: fehlt das Elternelement, so wird dieser Knoten nicht eingefügt.

## Berechnung der Zusatzbedingungen

Bevor die Grammatik verwendet wird, müssen die Zusatzbedingungen in den Produktionen spezifiziert werden. Bei Ausdrücken  $A^x$  muss  $x$  bestimmt werden, also wie oft  $A$  vorkommt. Als Grundlage für diese Entscheidungen dient der vorher gewählte Punkt  $p$  (siehe Überblick 5.1).

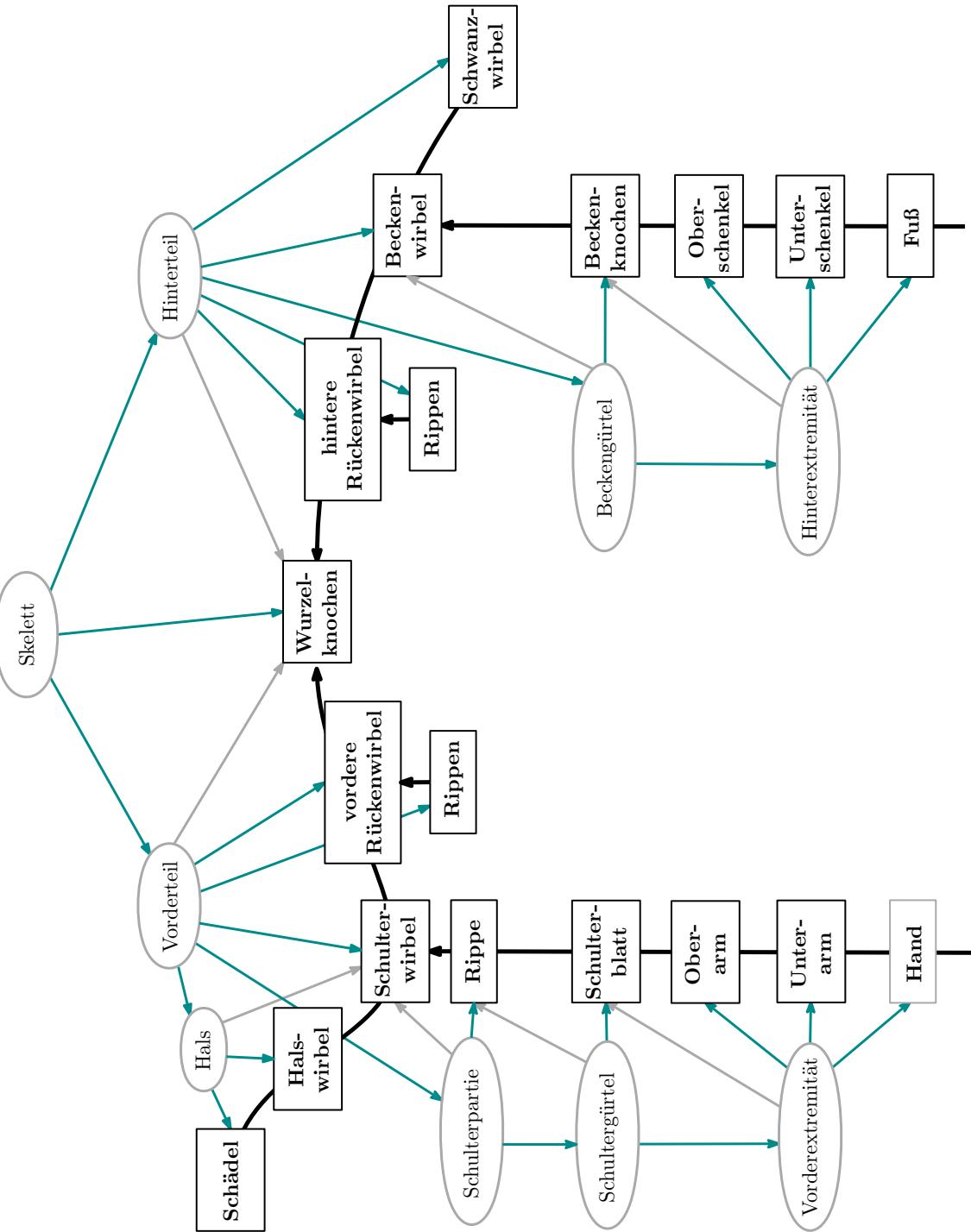


Abbildung 5.1.: Darstellung der Ersetzungsregeln bzw. Produktionen der Grammatik  $G$  als Graph. Elliptische Knoten sind Nichtterminalsymbole, rechteckige Knoten Terminalsymbole. Türkisfarbene Kanten zeigen auf diejenigen Symbole, durch die ein Nichtterminal bei Anwendung der entsprechenden Regel ersetzt wird. Graue Pfeile zeigen auf das Elternelement eines nichtterminalen Knotens und schwarze Kurven zeigen für Terminale in welcher Richtung das jeweilige Elternelement liegt.

- Wie die Anzahl der Wirbel auf Hals ( $w_h$ ), Schwanz ( $w_s$ ) und Rücken ( $w_{rv} + w_{rh}$ ) bestimmt werden, wird in Abschnitt 5.5 erklärt.
- Wieviele Rippen ( $r$ ) generiert werden wird zufällig bestimmt (siehe ebenfalls Abschnitt 5.5).
- Ob überhaupt eine Hals- bzw. Schwanzwirbelsäule generiert wird hängt davon ab, ob dieser Teil der Wirbelsäule in der Wirbelsäule vorkommt, die durch  $p$  vorgegeben wird.
- *Schultergürtel* und *Beckengürtel* werden generiert wenn das Skelett Vorder- bzw. Hinterextremitäten besitzt. Um das zu bestimmen wird u. a. betrachtet welchen Wert der Punkt  $p$  im Merkmal *Beine mit Bodenkontakt* und welchen Wert er im Merkmal *Flügel* annimmt. Genaueres dazu ist in Abschnitt 5.4 zu finden.

## 5.4. Extremitäten

Die Bestandteile einer Extremität sind durch den Grundbauplan (Abbildung 2.2) vorgegeben und die Länge der Bestandteile durch die entsprechenden Merkmale des PCA-Datenpunkts. Die Schwierigkeit besteht nun darin in den entsprechenden Ersetzungsregeln (siehe Abbildung 5.1) auch die Positionierung vorzunehmen.

### Positionierung

Das Skelett soll in einer Art Ruheposition dargestellt werden (siehe auch Abschnitt 4.1). Im Allgemeinen ist aber nicht klar wie die Ruheposition einer Extremität aussieht. Das ist schon allein daran zu erkennen, dass auf Darstellungen von Wirbeltierskeletten Flügel manchmal ausgestreckt und manchmal eingefaltet sind. Auch Beine sind meist so angeordnet, dass es aussieht als würde das entsprechende Tier gerade laufen. Dies ist auf Abbildung 4.7a am Beispiel des Klippschliefers sehr gut zu sehen.

Wie in Kapitel 4 zur PCA schon erwähnt, ist es deshalb auch schwer möglich die Ausrichtung der Extremitäten bzw. die Winkel an den Gelenken zu erheben und als zusätzliche Dimension in den PCA-Raum mitaufzunehmen. Die Positionierung der Extremitäten bleibt also ein Problem mit unklaren Anforderungen und vielen Freiheitsgraden.

Ein erster Schritt an das Problem heranzugehen ist es in kleinere Unterprobleme zu zerlegen. Extremitäten können anhand ihrer Funktion in vier Kategorien eingeteilt werden: Flügel, Flossen, Extremitäten mit Bodenkontakt (im Folgenden als Beine bezeichnet), und Extremitäten ohne Bodenkontakt, die weder Flügel noch Flossen sind, (im Folgenden als Arme bezeichnet).

Für Flügel, Flossen und Arme gibt es keine besonderen Anforderungen außer, dass sie als solche zu erkennen sein sollten. Deshalb werden sie nach folgenden simplen Anweisungen orientiert (siehe auch Abbildung 5.2):

- Flossen: Ausrichtung gerade nach hinten (orientiert an Welt- $x$ -Achse)
- Arme: Der Oberarm zeigt senkrecht nach unten (orientiert an Welt- $y$ -Achse), im Ellenbogengelenk ist ein  $90^\circ$  Winkel und die Hand verlängert Unterarm nach vorne.
- Flügel: Jedes beteiligte Gelenk hat ein Intervall mit festen Grenzen speziell für Flügel, aus dem zufällig ein Winkel gewählt wird.

Nun bleibt nur doch die Ausrichtung der Beine, für die die zusätzliche Anforderung gilt, dass sie den Boden berühren sollen.

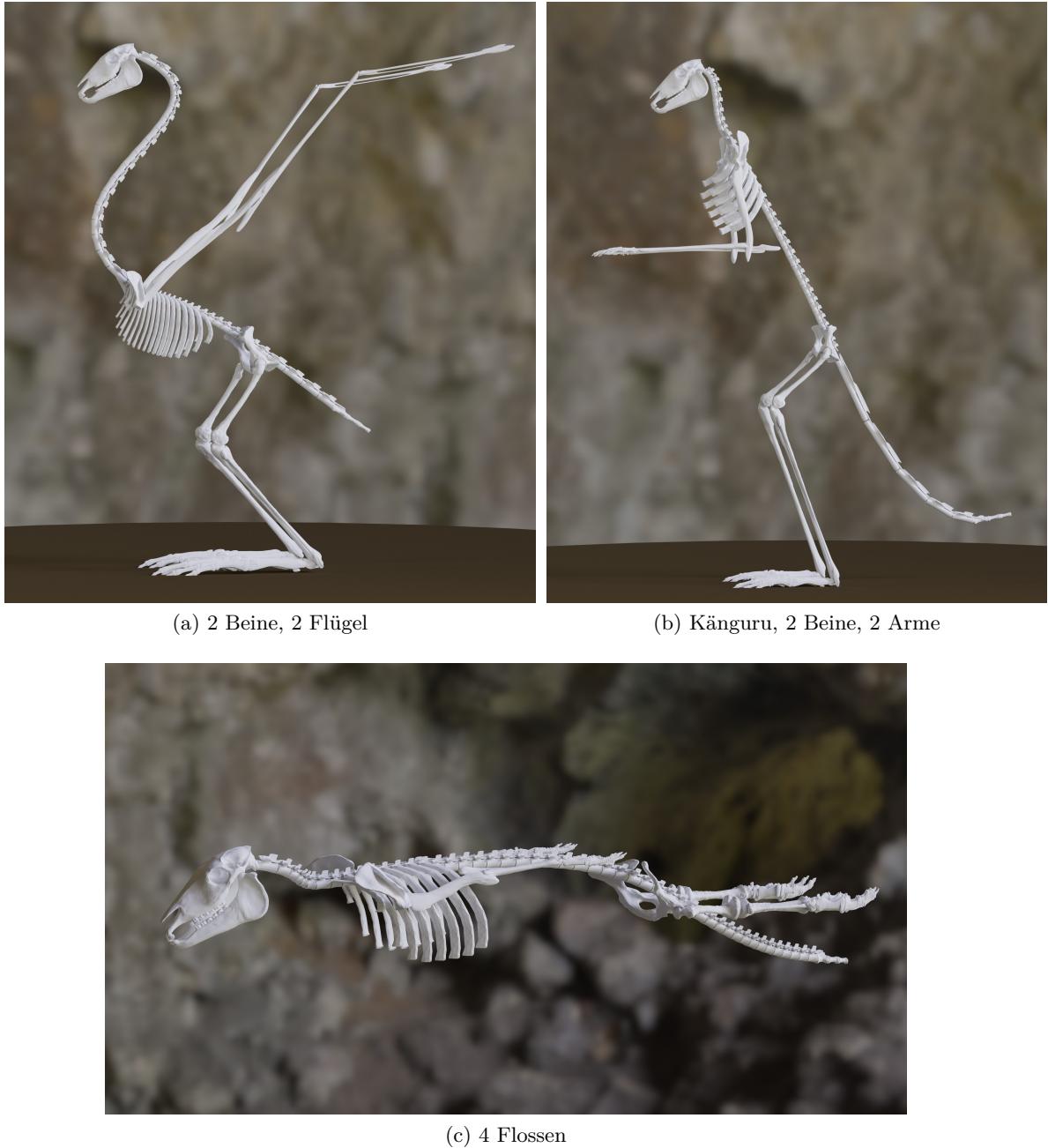


Abbildung 5.2.: Beispiele generierter Skelette mit verschiedenen Arten von Extremitäten. Die Bedingungen, die verwendet wurden, um die Skelette zu generieren, sind jeweils unter den Bildern zu finden. In (b) wurden die Daten verwendet, die für das Känguru erhoben wurden (siehe dazu auch Abschnitt 6.1), mit den zusätzlichen Bedingungen, dass das Skelett 2 Beine und 2 Arme haben soll. Als Hintergrund wurde [16] verwendet.

## Bestimmung von Art und Anzahl

Je nach Art wird die Anzahl der entsprechenden Extremitäten unterschiedlich bestimmt. Als Grundlagen dient der gewählte Punkt  $p$  im PCA-Raum. Hier werden die Werte  $w_b$  und  $w_f$  betrachtet, die  $p$ , zurücktransformiert ins ursprünglichen Koordinatensystem, für *Beine mit Bodenkontakt* und *Flügel* annimmt. Priorisiert werden die verschiedenen Arten von Extremitäten in der Reihenfolge, wie sie im Folgenden aufgezählt sind.

- Beine: Der Wert  $w_b$  liegt im Intervall  $[0, 2]$  bzw. wenn  $w_b < 0$  oder  $w_b > 2$ , so wird  $w_b$  auf 0 bzw. 2 festgelegt. Gilt  $w_b \in [0, 1]$ , so wird mit Wahrscheinlichkeit  $w_b$  ein Hinterbein und kein Vorderbein generiert. Gilt  $w_b \in [1, 2]$ , so wird mit Wahrscheinlichkeit 1 ein Hinterbein und mit Wahrscheinlichkeit  $w_b - 1$  ein Vorderbein generiert.
- Flügel: Der Wert  $w_f$  liegt in  $[0, 1]$  bzw. wird, wie bei den Beinen, darauf eingeschränkt. Wenn am Schultergürtel noch keine Extremität festgelegt ist, so wird dort mit Wahrscheinlichkeit  $w_f$  ein Flügel generiert.
- Arme: Die Berechnung basiert auf  $w_f$  und funktioniert gleich wie bei den Flügeln.
- Flossen: Wenn die Gesamtlänge der entsprechenden Extremität klein genug<sup>1</sup> ist, so wird an jedem Extremitätengürtel ohne Extremität eine Flosse generiert.

Diese Berechnungen können dazu führen, dass Tiere, wie der Tyrannosaurus Rex, keine Arme bekommen, oder Fische ohne Flossen generiert werden. Deshalb verlässt sich der Algorithmus zusätzlich auf Benutzereingaben, deren Priorität über den hier angegebenen Berechnungen liegt.

### 5.4.1. Berechnung der Bodenhöhe

Zunächst könnte man davon ausgehen, dass die Bodenhöhe einfach auf null festgelegt werden sollte. Das Problem hierbei ist aber, dass die von der PCA berechneten Längen für die Extremitäten meist so kurz sind, dass die Beine dann den Boden nicht mehr erreichen würden. Das liegt daran, dass auf den Bildern, die als Eingabebeispiele für die PCA verwendet wurden, der Boden meistens nicht ganz am unteren Rand ist. Hier würde rigoroses Abschneiden der Bilder auf Fußhöhe wahrscheinlich helfen, es würde in vielen Fällen aber auch ein Großteil der Füße verloren gehen.

Die Höhe des Bodens wird also anhand der Längen der Extremitäten festgelegt. Theoretisch würde es reichen einfach das kürzeste Bein im komplett ausgestreckten Zustand zu betrachten und den Boden auf die Höhe dessen Endpunkts festzulegen. Das führt aber zu unnatürlich aussehenden Beinen, da das kürzeste Bein dann genau senkrecht nach unten führen muss um den Boden zu erreichen. Deshalb wird nur ein bestimmter Anteil<sup>2</sup> der Länge der Beine betrachtet. So wird erzwungen, dass die Beine, wenn sie auf dem neu definierten Boden stehen, auch etwas gekrümmmt sind.

Wie in Kapitel 2 beschrieben, gibt es verschiedene Arten von Füßen bzw. Händen. Die oben beschriebene Berechnung geht davon aus, dass der Boden mit der Fußspitze berührt wird. Aber natürlich gibt es auch Wirbeltiere, die mit dem flachen Fuß auf der Erde stehen. Deshalb wird zusätzlich zur Bodenhöhe noch eine Wahrscheinlichkeit berechnet, dass Ferse bzw. Handgelenk den Boden berühren.

Wird die Bodenhöhe nach oben verschoben, weil die Beine insgesamt zu kurz sind, ist diese Wahrscheinlichkeit null. Sind die Beine so lang, dass schon ohne die Bodenhöhe

<sup>1</sup>Die maximale Länge wurde im Code auf 200px festgelegt. Das ist aber ein beliebig gewählter Wert.

<sup>2</sup>Dieser Anteil ist in der Implementierung mit 0.8 festgelegt, lässt sich aber natürlich auch variieren.

anzupassen die Ferse bzw. das Handgelenk auf den Boden reicht, so ist sie eins. Ansonsten ist die Wahrscheinlichkeit

$$\frac{\text{Beinlänge} - \text{Höhe des Extremitätengürtels über 0}}{\text{Länge des Fußes}}$$

Wenn es Vorder- und Hinterbeine gibt, so wird für beide diese Wahrscheinlichkeit berechnet und dann der Mittelwert genommen. Denn es ist sinnvoll, dass alle Beine mit dem gleichen Punkt den Boden berühren. Deshalb legt auch das erste Bein, das generiert wird, basierend auf der oben berechneten Wahrscheinlichkeit, fest, welcher Punkt gewählt wird.

#### 5.4.2. Algorithmus zur Ausrichtung der Beine

Eine Herangehensweise dieses Problem zu lösen, wäre inverse Kinematik zu verwenden (siehe Abschnitt 3.2). Da das vorliegende Problem aber recht viele Randbedingungen hat, die ausgenutzt werden können, ist es gar nicht unbedingt nötig einen schwergewichtigen Algorithmus zu implementieren, der ein allgemeineres Problem löst.

Hier ist z. B. in den allermeisten Fällen klar in welche Richtung ein Gelenk gedreht werden muss um den Fuß dem Boden zu nähern oder ihn vom Boden zu entfernen. Außerdem ist gar kein spezieller Punkt auf dem Boden vorgegeben, der erreicht werden soll. Deshalb wurde hier ein eigener, recht simpler Algorithmus entwickelt, der auf dieses spezielle Problem angepasst ist.

Die Gelenke in den Extremitäten werden hier so vereinfacht, dass genau einen Freiheitsgrad haben. Eltern- und Kindknochen sind also auf einer gemeinsamen Ebene festgelegt. Die verwendeten Gelenke mit ihren Einschränkungen sind in Abbildung 5.3 zu sehen. Der minimale und maximale Winkel für die Gelenke an Schulterblatt und Beckenknochen orientieren sich an der Welt- $y$ -Achse, da außerhalb dieses Bereichs keine sinnvollen Ruhepositionen entstehen würden.

Theoretisch haben das Hüft- und das Schultergelenk nicht nur einen, sondern zwei Freiheitsgrade. Sie lassen sich nicht nur nach vorne und hinten bewegen, sondern auch seitlich abspreizen. Das lässt sich auch leicht als zweite Art von Gelenk im Code abbilden. Allerdings macht es den Algorithmus komplizierter und liefert oft seltsam anmutende breitbeinige Tiere. Deshalb wurde der zweite Freiheitsgrad hier außen vor gelassen. Obwohl es natürlich in der Natur auch viele Tiere mit nach außen gestellten Beinen gibt, wie z. B. Echsen.

#### Ablauf

Der Algorithmus geht iterativ vor. In jedem Schritt wird für jedes Gelenk berechnet ob sein Winkel vergrößert oder verkleinert werden muss, um den dazugehörigen Knochen näher zum Boden zu bewegen. Mit dem „dazugehörigen“ Knochen ist hier derjenige der beiden an das Gelenk anschließenden Knochen gemeint, der das Kindelement des anderen ist. Die Drehrichtung lässt sich relativ leicht herausfinden indem die Ausrichtung des Knochens mit der Welt- $y$ -Achse verglichen wird. Je senkrechter der Knochen ausgerichtet ist, desto ausgestreckter ist das Bein. Es gibt also globale Randbedingungen und lokale Einschränkungen je nach Gelenk.

Die Startposition der Extremität ist maximal angewinkelt. Die Gelenke beginnen also mit ihren kleinst- bzw. größtmöglichen Winkeln. In den folgenden Iterationen wird dann derjenige Endpunkt der Extremität dem Boden genähert, der zum Schluss Bodenkontakt haben soll. Eine andere Möglichkeit wäre mit einer komplett ausgestreckten Extremität zu beginnen und den Fuß von unten der Bodenhöhe anzunähern. Das würde wahrscheinlich genauso gut funktionieren.

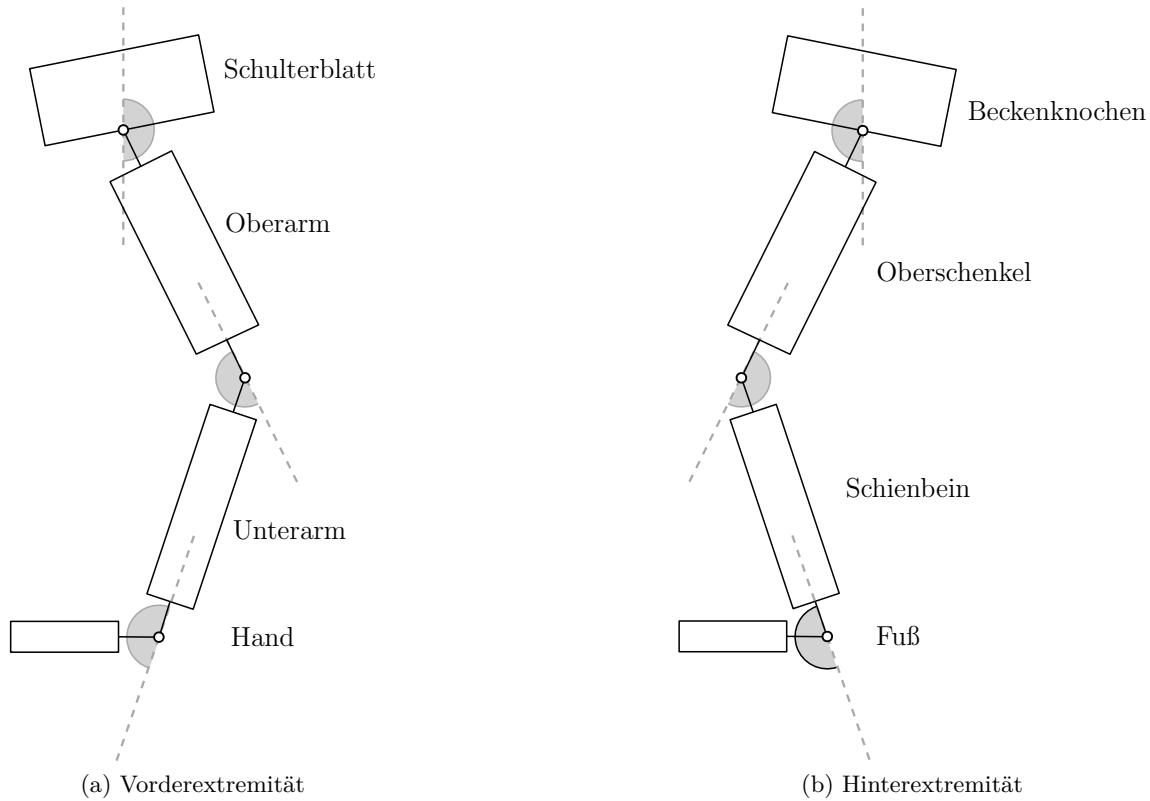


Abbildung 5.3.: Visualisierung der Bewegungsradien für die Gelenke in Extremitäten mit Bodenkontakt. Darstellung in Seitenansicht (wie in Abbildung 2.2). Die grauen Halbkreise zeigen die möglichen Winkel für eine Ruheposition des Skeletts. Unterarm, Unterschenkel und Fuß können jeweils maximal die Verlängerung des darüberliegenden Knochens bilden und minimal komplett an ihm anliegen. Oberarm und Oberschenkel können nicht über die Senkrechte hinaus gedreht werden.

Ohne weitere Einschränkungen kann es nun passieren, dass unnatürliche Positionen auftreten, in denen sich z. B. der Fußspann näher am Boden befindet als die Fußsohle. Oder es kann passieren, dass ein Knochen über die positive Welt- $y$ -Achse hinaus gedreht wird. Das Problem dabei ist, dass die Einschränkungen an den Gelenken nicht zulassen, dass der Knochen sich unbegrenzt in diese Richtung weiterdreht und der Knochen dann „feststeckt“. Deshalb wird nach jeder Drehung festgestellt ob solch eine Situation eingetreten ist und wenn ja, wird die Drehung rückgängig gemacht. Die Drehung wird ebenfalls rückgängig gemacht, falls sie bewirkt, dass ein Knochen unterhalb der Bodenhöhe liegt. So ist zu jeder Zeit durch Invarianten garantiert, dass die Knochen auf der „richtigen“ Seite der  $y$ -Achse und nicht unterhalb der Bodenhöhe liegen.

In jeder Iteration werden die Winkel, um den die Gelenke gedreht werden, um einen bestimmten Anteil verkleinert. Zu Beginn soll mit großen Veränderungen eine grobe Ausrichtung der Gelenke vorgenommen werden, die dann immer weiter verfeinert wird. Der Startwinkel darf nicht zu klein sein, weil die Gelenke sonst ihre Zielpositionen nicht erreichen können. Ist der Startwinkel allerdings zu groß, bewirkt das in vielen Fällen, dass in den ersten Schritten des Algorithmus keine Drehung durchgeführt werden kann, weil die oben genannten Randbedingungen durch den großen Winkel verletzt werden.

Die Verkleinerung des Winkels darf nicht zu schnell geschehen, weil dann auch die Endposition nicht erreicht werden kann. Wenn sie aber zu langsam geschieht passiert in vielen Schritten wiederum nichts wegen verletzter Randbedingungen.

Durch Ausprobieren wurden folgende Zahlen als sinnvoll erachtet: Startwinkel  $40^\circ$ , später dann jeweils  $\frac{6}{7}$  davon.

Falls sich der Abstand zum Boden kaum verändert, liegt also die Vermutung nahe, dass die Gradzahl zu groß ist und deshalb alle möglichen Winkeländerungen invalide sind. Deshalb wird in diesem Fall die Gradzahl für die nächste Iteration stärker verkleinert (halbiert).

Treten sehr kurzen Beinen auf, hat der Algorithmus außerdem einige kleine Probleme. Diese werden genauer in Abschnitt 7.8 beschrieben. Da die Beine aber in diesen Fällen, wie gesagt, sehr kurz sind, ist es für den Gesamteindruck gar nicht besonders wichtig wie genau sie angeordnet sind.

### Vergleich mit echten Beinstellungen

Wie in Kapitel 6 beschrieben, lassen sich auch die Eingabebeispiele der PCA laden. Bei ihnen sind dann alle Attribute, die die PCA liefert, schon festgelegt. Alle anderen müssen jedoch noch generiert werden. Dazu gehören auch die Beine. Vergleicht man nun die Beinstellung, die der oben beschriebene Algorithmus generiert, mit der Beinstellung auf dem Eingabebild, lassen sich teilweise sehr große Unterschiede feststellen. In Abbildung 5.2 b wurde ein Känguru generiert. Hier ist die Beinstellung relativ realistisch. Beim Elefanten in Abbildung 5.4 hingegen weicht die Beinstellung stark vom Eingabebild ab.

Um in allen Fällen eine realistisch wirkende Positionierung der Beine zu bekommen, müsste noch sehr viel mehr Arbeit in den Algorithmus gesteckt werden. Außerdem bräuchte der Algorithmus mehr Informationen zum Tier. Solche Zusatzinformationen könnten beispielsweise die Art des Fusses oder die Fortbewegungsart sein. Auch könnte es helfen, wenn es eine sinnvolle Möglichkeit gäbe die Winkel an den Gelenken als Dimension für die PCA mitaufzunehmen. Dafür müsste man sich aber, wie zu Beginn des Kapitels schon erwähnt, auf eine kanonische Ruheposition einigen und dann auch noch Beispiele in genau dieser Position finden.

Ein fertig generiertes Skelett wird höchstwahrscheinlich auch noch weiterverarbeitet. Soll z. B. ein animiertes Tier daraus werden, so müssen Bewegungszyklen geschaffen werden. Dafür muss jedes Gelenk vielfach bewegt werden. Soll ein Tier mit Haut und Muskeln

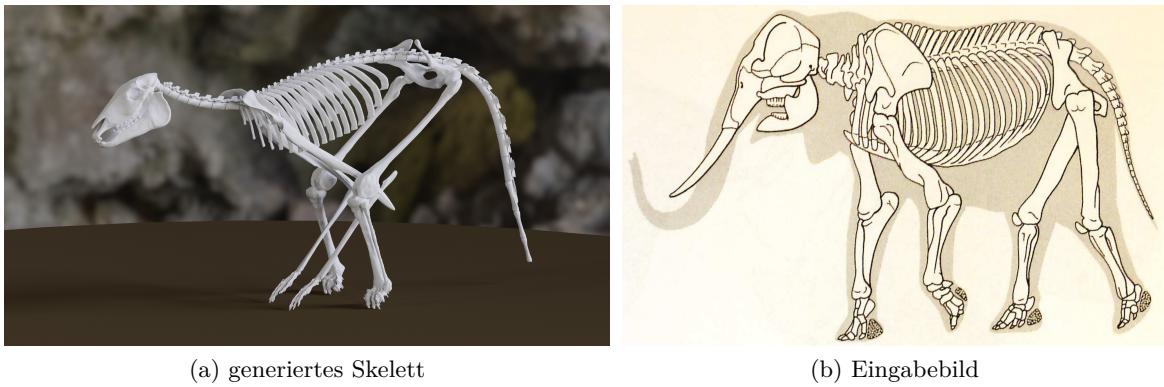


Abbildung 5.4.: (a) Skelett eines Elefanten, das anhand der erhobenen Daten generiert wurde. Als Hintergrund wurde [16] verwendet. (b) Die Abbildung des Skeletts eines Elefanten, die auch als Eingabe für die PCA verwendet wurde.

daraus werden, so müssen Muskeln an den Knochen ansetzen, die dann einen nicht unerheblichen Anteil an der Positionierung der Beine haben.

Die von dem hier beschriebenen Algorithmus generierte Position kann also gut als erster Eindruck dienen muss aber in den meisten Fällen noch angepasst werden. Ausgehend von der gegebenen Datenlagen und von den zu erwartenden Anwendungen ist es aber nicht sinnvoll den Algorithmus weiter zu verfeinern.

#### 5.4.3. Zusätzliche Ansatzpunkte für Extremitäten

Ansatzpunkte für Extremitäten sind zunächst der Hüftgürtel und der Schultergürtel. Um auch die Generierung fantastischer Tiere (siehe Abschnitt 2.3) zu ermöglichen, ist es aber möglich dies zu erweitern. Um die Anzahl der zusätzlichen Extremitäten zu bestimmen, ist es am einfachsten sich auf Benutzereingaben zu verlassen. Die Beispieldaten für die PCA sind nur echte Wirbeltierskelette. Deshalb lassen sich aus Punkten im PCA-Raum keine Informationen zu zusätzlichen Extremitäten ableiten.

##### Zwei Extremitätenpaare pro Extremitätengürtel

Eine einfache Möglichkeit ist zunächst die Anzahl der möglichen Extremitätenpaare von zwei auf vier zu erhöhen, indem einfach an der Hüfte und der Schulter jeweils zwei Paare ansetzen dürfen. Dafür wurden an der Hüfte bzw. der Schulter mehrere Gelenke direkt hintereinander angelegt. Das ermöglicht beispielsweise Tiere wie den Pegasus (siehe Abbildung 5.5).

Um das zu ermöglichen, wird die, in Abschnitt 5.3 eingeführte, Grammatik  $G = (\Sigma, N, S, P, p)$  zu einer Grammatik  $G' = (\Sigma', N', S, P', p')$  mit  $\Sigma' = \Sigma \cup \{\text{Beckenknochen2}\}$  und  $N' = N \cup \{\text{Schulterpartie2}\}$  erweitert. Das Terminal „Beckenknochen2“ steht hier für einen Beckenknochen mit zwei Gelenken für Extremitäten. Die Produktionen in  $P$  für *Vorderteil*, *Schulterpartie* und *Beckengürtel* werden in  $P'$  durch folgende Produktionen ersetzt. Außerdem wird eine Produktion für *Schulterpartie2* eingefügt. Die Parameter in  $p'$  sind die gleichen wie in  $p$ , nur dass  $e_v$  und  $e_h$  (die Anzahl der Vorder- bzw. Hinterextremitäten) in  $p'$  auch den Wert 2 annehmen können.

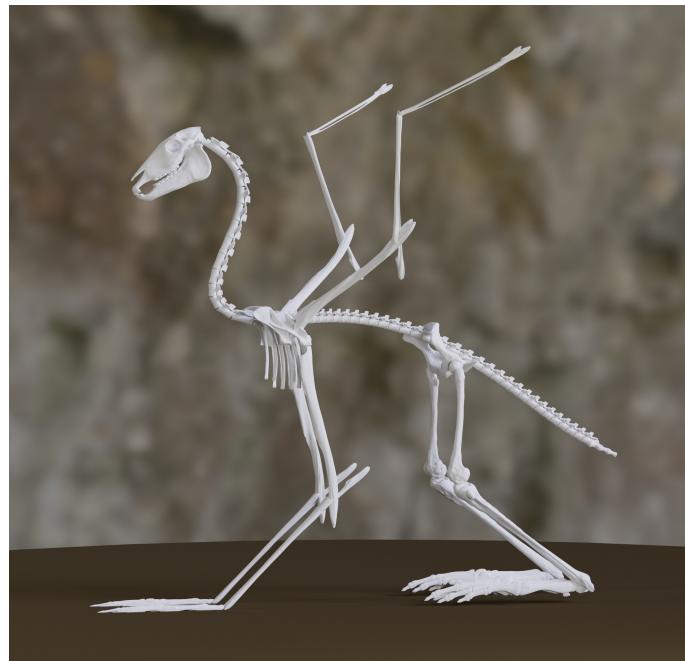


Abbildung 5.5.: Beispiel für ein Skelett, dass mit folgenden Bedingungen generiert wurde:  
4 Beine, 2 Flügel. Mehrere Extremitätenpaare pro Extremitätengürtel waren erlaubt.  
Als Hintergrund wurde [16] verwendet.

$$\begin{aligned}
 & Vorderteil \rightarrow \text{Wirbel}^{(w_{rv}-r)^+} \\
 & \quad [\text{Wirbel } (\text{ Rippe })]^{(\min(w_{rv}-3,r-3))^+} \\
 & \quad \text{Wirbel } (\text{ Schulterpartie2 }) \\
 & \quad \text{Wirbel } (\text{ Rippe}^{(\min(1,r-1))^+}) \\
 & \quad \text{Wirbel } (\text{ Schulterpartie }) \\
 & \quad Hals \\
 & Schulterpartie2 \rightarrow \text{Rippe}^{\min(1,r-2)} \text{ Schultergürtel}^{(e_v-1)^+} \\
 & Schulterpartie \rightarrow \text{Rippe}^{\min(1,r)} \text{ Schultergürtel}^{\min(1,e_v)} \\
 & Beckengürtel \rightarrow [\text{Beckenknochen } Hinterextremität]^{\min(1,e_h) \cdot |e_h - 2|} \\
 & \quad [\text{Beckenknochen2 } (\text{ Hinterextremität }) Hinterextremität]^{(e_h-1)^+}
 \end{aligned}$$

Die zweite Schulterpartie beginnt am zweiten Wirbel hinter der ersten Schulterpartie und erzeugt ebenfalls einen Schultergürtel, falls zwei Extremitäten an der Schulter des Tieres ansetzen sollen. Am Beckengürtel wird anhand der Anzahl der Extremitäten entschieden ob der einfache Beckenknochen oder der „Beckenknochen2“ mit zwei Gelenken erzeugt werden soll.

Flügel und Arme dürfen hierbei nur an der Schulter ansetzen, Beine und Flossen an beiden Stellen. Der Grund dafür ist, dass die meisten generierten Skelette seltsam wirken, wenn an der Hüfte Flügel oder Arme ansetzen und dafür an der Schulter Beine beginnen. Das liegt daran, dass existierende Tiere mit Flügeln oder Armen ihren Schwerpunkt im hinteren Bereich haben und sie auf den Hinterbeinen stehen. Deshalb wird die Wirbelsäule durch die PCA auch dementsprechend angelegt.

## Mehrere Extremitätengürtel entlang der Rückenwirbelsäule

Eine Überlegung könnte auch sein zwischen Schulter und Hüfte weitere Extremitätengürtel zu erlauben, um z. B. Tiere wie den asiatischen Drachen erzeugen zu können. Das stellt sich aber als schwierig heraus. Die Wirbelsäule ist zwischen Hüfte und Schulter meist nach oben geschwungen und im Bauchraum befinden sich viele Organe. Ein zusätzlicher Extremitätengürtel würde den Bauchraum einschränken. Außerdem wirkt dann auch die nach oben geschwungene Wirbelsäule anatomisch seltsam. Verdoppelt man die Schwingung der Wirbelsäule und hängt einfach einen weiteren Rücken hinten oder vorne an, so wirkt es ebenso seltsam, da dann die „Höcker“ der Wirbelsäule für das Tier wahrscheinlich nicht wirklich ein Vorteil sind und nur die Fortbewegung erschweren. Asiatische Drachen sind ein Spezialfall, bei dem die zusätzlichen Hüften nicht seltsam wirken, denn sie besitzen einen langen, schlangenartigen Körper, bei dem die Wirbelsäule gerade verläuft.

## Zweiter Schultergürtel

Eine weitere Idee, die auch umgesetzt wurde, ist, Zentauren zu ermöglichen. Hat das Tier, das generiert wird, einen Hals, der lang genug ist, kann darauf ein weiterer Schultergürtel kurz unterhalb vom Kopf angebracht werden. An diesem Schultergürtel dürfen dann alle Arten von Extremitäten außer Beinen ansetzen. Das wirkt tatsächlich meist auch anatomisch einigermaßen sinnvoll (siehe Abbildung 5.6).

Hierfür wird die Grammatik  $G' = (\Sigma', N, S, P', p')$  zu einer Grammatik  $G'' = (\Sigma', N, S, P'', p'')$  mit  $p'' = p' \cup \{e_{v2}\}$  erweitert. Der Parameter  $e_{v2} \in \{0, 1, 2\}$  steht für die Anzahl der Vorderextremitäten am zweiten Schultergürtel. Die Produktion in  $P'$  bzw.  $P$  für den *Hals* wird in  $P''$  durch folgende Produktion ersetzt.

$$\begin{aligned}
 Hals \rightarrow & \text{ Wirbel}^{(w_h - 5)^+} \\
 & \text{Wirbel ( } Schulterg\ddot{u}rtel^{(e_{v2} - 1)^+} \text{ )} \\
 & \text{Wirbel} \\
 & \text{Wirbel ( } Schulterg\ddot{u}rtel^{\min(1, e_{v2})} \text{ )} \\
 & \text{Wirbel}^2 \\
 & \text{Schädel}
 \end{aligned}$$

Wie an der Schulter, werden auf dem Hals, mit dem Abstand von einem Wirbel, zwei Schultergürtel erzeugt. Die Gesamtzahl der Wirbel bleibt dabei gleich. Dies funktioniert auch problemlos, da der Hals, falls vorhanden, immer  $\geq 7$  Wirbel besitzt.

Ein solcher Schultergürtel wirkt aber nur sinnvoll, wenn der Hals lang genug ist. Deshalb wird die Benutzereingabe, die einen zweiten Schultergürtel erzwingt in eine Bedingung für die Halslänge umgewandelt und an die PCA weitergegeben (siehe Abschnitt 4.5). Gibt es keine Benutzereingabe, so wird ein zweiter Schultergürtel nur generiert, wenn der Hals lang genug ist.

## 5.5. Wirbel und Rippen

Weitere Dinge, die festgelegt werden müssen, sind die Anzahl der Wirbel auf den einzelnen Teilen der Wirbelsäule und die Anzahl der Rippen.

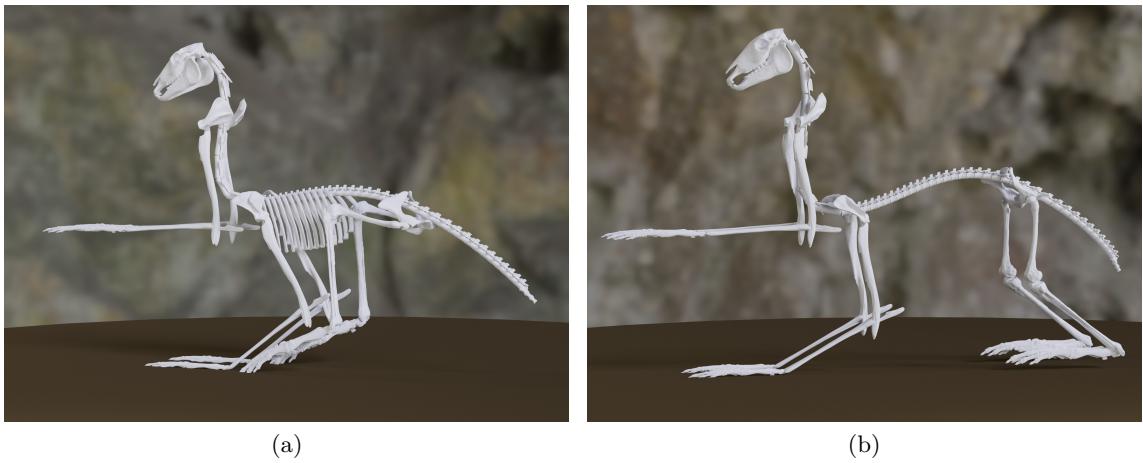


Abbildung 5.6.: Zwei Beispiele für Skelette, die mit folgenden Bedingungen generiert wurden: 4 Beine, 2 Arme und ein zusätzlicher Schultergürtel. Mehrere Extremitäten pro Extremitätengürtel sind nicht erlaubt. Als Hintergrund wurde [16] verwendet.

## Wirbel

Die Anzahl der Wirbel orientiert sich an echten Wirbeltierskeletten (siehe Absatz 2.1). Auf dem Hals werden 7 Wirbel generiert, außer das Tier hat Flügel. Dann wird angenommen, dass ein Vogel generiert wird. Dementsprechend liegt die Anzahl dann zwischen 10 und 30. Auf dem Rücken liegen 25 Wirbel und auf dem Schwanz 5 bis 20. Da der Wurzelknochen in der Mitte der Rückenwirbelsäule liegt (oder zumindest ungefähr, da Bezierkurve bei 0,5 ausgewertet), wird die Rückenwirbelsäule in zwei Teile geteilt. Es werden 13 Wirbel auf der vorderen Hälfte und 12 auf der hinteren generiert.

Eine Bézierkurve ist ein Weg im  $\mathbb{R}^2$ . Sie ist parametrisiert auf  $[0, 1]$  und im Allgemeinen nicht nach Bogenlänge parametrisiert. Das heißt die Geschwindigkeit, mit der die Kurve durchlaufen wird, ist nicht konstant. Wertet man die Kurve also bei 0,5 aus, wurde nicht notwendigerweise die Hälfte der Strecke zurückgelegt.

Für die Generierung von  $n$  Wirbeln wurde die Kurve einfach an den Stellen  $\frac{i}{n}$  ausgewertet, für  $0 \leq i \leq n$ . Die Länge des  $i$ -ten Wirbels ergibt sich dann einfach aus den Abstand zwischen den Stellen  $\frac{i-1}{n}$  und  $\frac{i}{n}$  auf der Bézierkurve. Durch den oben genannten Effekt variiert dann die Länge der Wirbel über den Kurvenverlauf. Die Wirbel werden also auf der Bézierkurve aufgereiht und so positioniert, dass sie an den ausgewerteten Stellen aneinander stoßen.

Wird die Bézierkurve  $B$  nach Bogenlänge umparametrisieren, so erhält man als neuen Parameter:

$$p(t) = \int_0^t \|B'(s)\| \, ds.$$

Die umparametisierte Bézierkurve ist dann  $t \mapsto B(p(t))$ .

Das obenstehende Integral ist jedoch schwer zu berechnen, da im Allgemeinen keine Stammfunktion des Integranden zur Verfügung steht. Es gibt jedoch numerische Methoden, mit denen das Problem gelöst werden kann. [39]

Betrachtet man echte Wirbeltiere, so sind keine einfachen Regeln für die Länge ihrer Wirbel ersichtlich. Es gibt beispielsweise eine Studie, die die Beschaffenheit der Wirbel von Mäusen untersucht [33]. In dieser Studie auf Seite 19, Abbildung 5, ist sehr gut zu sehen, dass die Länge der Wirbel allein bei Mäusen im Verlauf der Wirbelsäule sehr stark schwankt.

## Rippen

Die Anzahl der Rippen und auch die Ausdehnung des Brustkorbs variiert zwischen Wirbeltieren sehr stark. Es gibt Tiere, die an jedem Wirbel der Rückenwirbelsäule Rippen haben und es gibt Tiere die haben nur ein paar wenige auf dem vorderen Teil. Deshalb wird die Anzahl der Wirbel  $r$  zufällig bestimmt aus dem Intervall  $[0, n]$ , mit  $n = \text{Anzahl der Rückenwirbel}$ , bestimmt. Einige verschiedene Beispiele sind auch unter den Beispielbildern für die PCA in Abbildung A.1 im Anhang zu finden.

## 5.6. Knochenmodelle

Um ein 3D-Modell des gesamten Skeletts zu erstellen, wird zunächst jeder terminale Knochen als Quader dargestellt. Diese Quader ergeben sich aus Position, Orientierung und Abmessungen des zugehörigen Knochens. Sie ergeben zusammen ein rudimentäres Modell. Jedoch lassen sie sich auch relativ leicht durch feinere 3D-Modelle der entsprechenden Knochen ersetzen.

### Vorverarbeitung der Knochenmodelle

Die Knochenmodelle müssen im .obj-Format vorliegen, da auch das resultierende Modell dieses Format hat. Außerdem muss jedes Modell an den Koordinatenachsen ausgerichtet und so verzerrt sein, dass es einen Würfel mit Kantenlänge 1 in jeder Richtung möglichst gut ausfüllt. So ist es sehr einfach die Längen der Knochen auf das entsprechende 3D-Modell zu übertragen.

Bei dieser Vorgehensweise treten jedoch einige Schwierigkeiten auf. Es ist z. B. relativ schwierig herauszufinden wie man die einzelnen Knochen skalieren muss, sodass sie an den Gelenken gut zusammenpassen und nicht verzerrt aussehen. Im Folgenden sind einige Anpassungen aufgezählt, die die Positionierung vereinfachen.

- Kleine Fortsätze, die nicht wirklich zur (optischen) Größe des Knochens beitragen, z. B. die Fortsätze der Wirbel, ragen aus dem Würfel heraus. Der Knochen ist somit an manchen Stellen etwas länger als vorgegeben.
- Kantenlängen, bei denen es wichtig ist, dass sie eine bestimmte Länge haben, sind genau auf die Kantenlänge des Würfels abgestimmt. So können sie leicht auf die richtige Länge skaliert werden. Ein Beispiel dafür ist die Länge der Wirbel entlang der Wirbelsäule. Die Wirbel müssen genau aneinander ansetzen. Mit dieser Skalierung lässt sich einfach die Länge des Wirbels auf das Modell übertragen.

Es kann aber auch um Längen gehen, die nur einen Teil des Knochens betreffen. Rippen müssen z. B. mit ihrer Breite in  $x$ -Richtung zur Breite des Wirbels passen, an welchem sie ansetzen. Deshalb ist das 3D-Modell der Rippe so skaliert, dass die Kantenlänge des Würfels in  $x$ -Richtung genau auf die Breite des Wirbels skaliert werden kann und die resultierende Breite der Rippe dann genau dazu passt.

Da die Rippe stark gebogen ist, führt das dazu, dass die Gesamtlänge der Rippe in  $x$ -Richtung viel länger ist als die Kantenlänge des Würfels. Das Problem daran ist, dass die gegebenen Abmessungen des Knochens dann nicht mehr viel mit der Ausdehnung des eingesetzten 3D-Modells haben. Je nach dem um welchen Knochen es sich handelt, möchte man diesen Effekt evtl. vermeiden.

- Kantenlängen, die nicht speziell vorgegeben werden, z. B. die Dicke der Extermitätenknochen, sind einfacher passend zu bestimmen, wenn sie nicht komplett unabhängig von den anderen Raumrichtungen sind. Ist z. B. die  $x$ - und  $y$ -Skalierung eines Knochens vorgegeben, und die Skalierung in  $z$ -Richtung soll nur möglichst gut dazu passen, so ist es sinnvoll das 3D-Modell schon so zu speichern, dass die  $z$ -Richtung relativ zu einer anderen Richtungen angegeben werden kann. Tut man dies nicht, so führt das leicht dazu, dass die Knochen verzerrt aussehen.

## Offsets zwischen Knochen

Es ist eventuell nicht ganz leicht zu erkennen wie die Knochen ineinander greifen bzw. wie die Gelenke die Ausrichtung der Knochen beeinflussen. Das erfordert etwas Wissen zur Anatomie und viel „finetuning“.

Für jeden Knochen sind für diese Ausrichtung zwei Offsets gespeichert: das Offset zu dem Gelenk, das ihn mit seinem Elternknochen verbindet und das Offset zu dem Gelenk, das ihn mit seinem Kindknochen verbindet (oder mehrere, falls vorhanden). Dies sorgt dafür, dass die Positionierung der Knochen stimmt, egal wie groß sie sind. Ist ein Knochen sehr groß und ein anschließender sehr klein (oder anders herum), so kommt es natürlich trotzdem vor, dass die Gelenke nicht wirklich ineinander passen. Für solche Situationen bräuchte man verschiedene 3D-Modelle, die je nach Gegebenheit eingesetzt werden.

Es wurden vor allem Modelle von Pferde- und Menschenknochen verwendet, da sie leicht verfügbar waren. Manche Knochen sind jedoch auch von anderen Tieren oder keinem speziellen Tier zugeordnet. Das führt z. B. bei dem verwendeten Unterarmknochen vom Pferd dazu, dass er etwas überdimensionierte Fortsätze am Ellenbogen bekommen, wenn man ihn stark verlängert. Das liegt daran, dass dieser Knochen beim Pferd eigentlich relativ kurz ist. Ansonsten passen die Knochen verschiedener Wirbeltiere aber erstaunlich gut ineinander.

Leider unterscheiden sich die Knochen verschiedener Tiere dennoch so stark, dass die Offsets für jeden Knochentyp individuell bestimmt werden müssen. Dies, und die oben genannten Abweichungen von einem Würfel mit Kantenlänge 1, führt dazu, dass die 3D-Modelle nicht einfach austauschbar sind. Um andere 3D-Modelle für Knochen zu verwenden, müsste nicht nur das Modell ausgetauscht werden, sondern eben auch die Offsets angepasst werden. Das ist momentan im Programm nicht möglich ohne den Code zu ändern. Dies ließe sich aber leicht hinzufügen. Die Offsets könnten z. B. in einer Textdatei gespeichert werden und zusammen mit den Modellen eingelesen werden.

## Spezielle Knochen

Für die meisten Knochentypen wird genau ein 3D-Modell verwendet. Bei manchen Knochen und in manchen Fällen wirkt das recht seltsam. Man möchte also eigentlich etwas mehr Variation haben.

Besonders stark ist dies am *Schädelknochen* zu beobachten. Er variiert, im Gegensatz zu anderen Knochen, bei Wirbeltieren sehr stark. Hier ist es also ein großer Mehrwert verschiedene Modelle anzubieten. Die Frage ist dann nur wie entschieden wird welcher Schädelknochen wann verwendet wird. Eine Möglichkeit wäre in die Grammatik spezifischere Terminalsymbole für verschiedene Schädel und dazugehörige Regeln einzufügen. Tut man dies nicht, gibt es wenig Anhaltspunkte. Es ist deshalb sinnvoll die Auswahl des passenden Schädelknochens dem Nutzer zu überlassen.

Bezüglich der Offsets ist der Schädelknochen ein recht einfacher Fall. Die verschiedenen Modelle lassen sich leicht alle gleich skalieren, sodass keine verschiedenen Offsets gespeichert werden müssen.

Bei *Händen und Füßen* ist das Problem ebenso, dass es sehr viele verschiedene Ausprägungen davon gibt (siehe z. B. Abbildung 2.1). Diese lassen sich jedoch gut nach Extremitätentyp unterscheiden, wobei diese Unterscheidung natürlich beliebig fein sein kann. Hier wurde die Unterscheidung verwendet, die auch bei der Positionierung der Extremitäten zum Einsatz kommt (siehe Abschnitt 5.4).

Es gibt also Flügel, Arme, Flossen und Beine mit Bodenkontakt. Wobei bei Beinen mit Bodenkontakt zusätzlich noch nach dem Winkel unterschieden wird mit dem der Fuß auf den Boden aufkommt. Bei weniger als 45° wird eine menschliche Hand eingesetzt, sonst ein

Pferdehuf. Arme bekommen ebenfalls eine Hand. Für Flossen wurde kein spezielles Modell eingefügt, bei ihnen wird ebenfalls eine Hand eingesetzt. Flügel haben ein eigenes Modell. In Ermangelung gemeinfreier Modelle fehlen hier aber leider einzelne Bestandteile.

Es gibt ein Modell für *Wirbel*. Aber es gibt bei echten Wirbeltieren sehr viele unterschiedliche Wirbel, die auch in ihrer Größe stark variieren. Ein Beispiel ist das Ende der Schwanzwirbelsäule. Hier werden die Wirbel bei echten Tieren kleiner. Um das Gesamtmodell realistischer zu machen, lassen sich die Modelle der Wirbel verfeinern. Als Beispiel wurde ein zusätzliches Modell eingeführt, dass die letzten drei Schwanzwirbel ersetzt. Es besteht aus drei aufeinanderfolgenden Wirbeln, die zum Ende hin kleiner werden. Das sieht in den meisten Fällen auch gut aus. Ein Nachteil davon ist ein Modell mit drei Wirbeln zu haben, aber, dass die Positionierung dann nicht mehr so fein erfolgen kann. Anfangs- und Endpunkt des Modells werden auf der Bézierkurve positioniert. Aber die Anfangs- und Endpunkte der einzelnen Wirbel können teilweise stark vom Verlauf der Kurve abweichen. Dies lässt sich natürlich leicht durch eine weitere Verfeinerung der Modelle beheben, indem jeder der drei Wirbel ein eigenes Modell bekommt.

Setzen mehrere *Extremitäten* an einer Hüfte an, so ist ein realistisches Modell des Beckenknochens nicht mehr ausreichend, da nicht genug Gelenke vorhanden sind. Dieses Problem wurde so behoben, dass für den Beckenknochen ein kombiniertes 3D-Modell aus zwei einzelnen Beckenknochen erstellt wurde, an dem nun zwei Gelenke vorhanden sind.

## 6. Zusätzliche Features

### 6.1. Speichern und Laden von Skeletten

Um ein Skelett zu speichern reicht es jene Metadaten herauszuschreiben, aus denen der Algorithmus das Skelett wieder reproduzieren kann. Zu den benötigten Daten gehören die Daten, die die PCA liefert (Position der Wirbelsäule, Länge der Knochen in den Extremitäten, Gewicht) und Daten, die durch den Algorithmus generiert werden (Anzahl der Wirbel, Intervall auf der Wirbelsäule, in dem sich Rippen befinden, Anzahl und Art der Extremitäten an den jeweiligen Extremitätengürteln und die Winkel an Gelenken der Extremitäten, Art des einzusetzenden Kopfes). Das alles wird in ein paar wenigen Java-Klassen gebündelt und über Java-Serialisierung in eine Textdatei geschrieben. Diese Datei kann dann wieder eingelesen werden um die Klassen wieder herzustellen. (**PCA Beispiele** **ToDo** können auch geladen werden)

Das funktioniert natürlich nur über das implementierte Programm und liefert keine Metainformationen zu dem generierten Skelett nach außen. (**Ideen für Zusatzinfos, die sinnvoll sein könnten, aufschreiben / future work (zB Knochenhierarchie); während aber wsh nicht super hilfreich, weil für Animation etc. sowieso nochmal alles angefasst werden muss**) **ToDo**

(**Möglichkeiten Zusatzinfos abzuspeichern (fbx, alembic, universal scene description <https://graphics.pixar.com/usd/docs/index.html>), python script für Blender etc. um Knochen anzulegen**) **ToDo**

### 6.2. Erzeugung von Variationen

- was genau wird variiert
- PCA Daten normalverteilt variieren (Verteilung bleibt Gauß, Erwartungswert bleibt gleich, Überlegungen dazu wie sie sich ändert durch Aufaddieren der Variation / Faltung mit anderem Gauß)
- Variation der Daten, die nicht von PCA abhängen, beschreiben; generische Algorithmen zitieren (auch hinzufügen und löschen oder ändern von Features um Variationen/Verbesserungen zu erzeugen)
- create variations on existing models: simmons wilhelms van gelder 2002 [https://www.researchgate.net/publication/234776823\\_Model-based\\_reconstruction\\_for\\_creature\\_animation](https://www.researchgate.net/publication/234776823_Model-based_reconstruction_for_creature_animation)

### 6.3. GUI

Welche Eingaben sind möglich?

#### ToDo

(**Funktionen beschreiben + wie verknüpft mit Programm**) JavaView zum anzeigen für groben Überblick (Lizenz checken)

Interaktivität

- Eine Anwendung, bei der nach Eingabe von Parametern sofort das komplette Tier generiert wird, ist weniger hilfreich als eine, bei der schrittweise Teile davon generiert werden können (und auch rückgängig gemacht werden können)
- Teile, die einem nicht gefallen, sollten geändert werden können
- Änderungen können Auswirkungen auf den Rest des Körpers haben (durch Regeln) bzw. manche Änderungen sind nicht möglich
- Könnte verwendet werden um schnell verschiedene Möglichkeiten zu testen

# 7. Implementierungsdetails

## 7.1. Programmiersprache

- Rust: nicht geeignet, da Datenstrukturen die zyklische Referenzen auf veränderbare Objekte verwenden nicht oder nur kompliziert umsetzbar sind.
- Java: scheint gut zu funktionieren. Es gibt Bibliotheken zum im-/exportieren von obj-Dateien und Unterstützung für OpenGL  
Außerdem gibt es Bibliotheken, die PCA (bzw. Kovarianzmatrizen etc.) unterstützen und JavaView um objs darzustellen

## 7.2. Dateiformate

- Einfachstes Format (nur für die Darstellung von 3D-Objekten ohne Zusatzinformationen): obj
- Erster Schritt: einfaches .obj erzeugen und mit Blender darstellen; einfach Knochen als Bounding Box darstellen, später Verwendung von OpenGL mit vertex shadern etc. (Plan erwähnen? wurde ja doch nicht gemacht...)
- Jeder Editor geht mit Muskeln und Gelenken anders um. Gibt es ein Dateiformat, das nicht speziell zu einem Editor gehört, dass Bedingungen an die Rotation von Gelenken speichern kann?
- Eigenes Format erzeugen? Dann bräuchte man Plugins um es in verschiedenen Editoren laden zu können. Viel verwendeter Editor: Houdini (kostenlos für Studenten aber nicht Open Source). Oder selbst darstellen (siehe Interaktivität).
- Vorschlag von Jo: „Memory dumps“, also direkt die structs aus dem Speicher auf Platte rauschreiben. Am besten wenn sie am Stück liegen mit einem fwrite() und zurücklesen mit einem fread(). Es ist nützlich dazu am Anfang der Datei ein bisschen Metadaten zu speichern (magic number, version, array size etc.).

### 7.2.1. OpenSim

- <https://simtk-confluence.stanford.edu:8443/display/OpenSim/OpenSim+Documentation>
- Open Source Software Platform für die Modellierung und Simulation von Menschen, Tieren, etc.  
aber vor allem gedacht zur Auswertung von experimentellen Daten

- Import von .obj Dateien möglich. Außerdem zusätzliche Daten wie Winkel von Gelenken über .mot oder .sto Dateien (eigenes Format von OpenSim, siehe <https://simtk-confluence.stanford.edu:8443/display/OpenSim/Preparing+Your+Data>)
- Export in andere Dateiformate nicht möglich (?)
- für Download und Zugang zur „Community“ Account nötig
- für Windows und Mac OS (Linux Support gibt es auch, ist aber schwieriger: <https://simtk-confluence.stanford.edu:8443/display/OpenSim/Linux+Support>)

### 7.2.2. OBJ

- Beschreibung des Formats: <https://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/egff.htm>
- Erzeugung mit Rust: obj\_exporter <https://docs.rs/obj-exporter/0.2.0/obj-exporter/index.html>
- Erzeugung mit Java: javagl Obj <https://github.com/javagl/Obj>, unterstützt auch Umwandlung von obj-Daten in Daten, die direkt für vertex buffer objects in OpenGL verwendet werden können
- Reicht wahrscheinlich für die ersten Dinge aus. Finetuning wird sowieso mit anderer Software gemacht

### 7.2.3. FBX

- Verwendung am besten über Autodesk FBX SDK für C++.
- Dokumentation: <http://help.autodesk.com/view/FBX/2019/ENU/> und <http://docs.autodesk.com/FBX/2014/ENU/FBX-SDK-Documentation/index.html>
- Es gibt auch fbxcel, eine FBX library für Rust. Ist aber relativ low level und nicht ganz offensichtlich wie zu verwenden.
- Einschränkungen für Gelenke können in FBX nicht gespeichert werden [http://docs.autodesk.com/FBX/2014/ENU/FBX-SDK-Documentation/index.html?url=cpp\\_ref/class\\_fbx\\_constraint.html&topicNumber=cpp\\_ref\\_class\\_fbx\\_constraint\\_htmlc57a3f99-513a-44a0-a24f-445e9077c99f](http://docs.autodesk.com/FBX/2014/ENU/FBX-SDK-Documentation/index.html?url=cpp_ref/class_fbx_constraint.html&topicNumber=cpp_ref_class_fbx_constraint_htmlc57a3f99-513a-44a0-a24f-445e9077c99f)

### 7.2.4. Alembic

- [www.alembic.io](http://www.alembic.io)
- Wird u.a. dafür verwendet Knochen (+ Animationen) in Ziva zu importieren
- Es kann mit Python (PyAlembic) und C++ verwendet werden.  
PyAlembic Doku: <http://docs.alembic.io/python/examples.html#pyalembic-intro>  
C++ API Refernce (enthält sehr wenig Infos): <http://docs.alembic.io/reference/index.html>
- Für Rust gibt es keine Bibliothek (?)

## 7.3. Aufbau der Software

- ein Wort zur Softwarearchitektur?
- Erweiterbarkeit der Software?

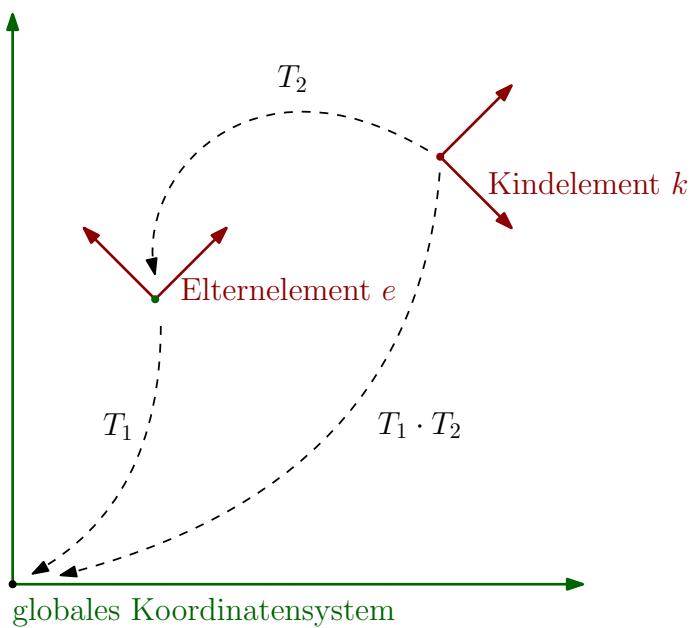


Abbildung 7.1.: Gegeben sei das Element  $e$ . Die Abbildung, die die lokalen Koordinaten von  $e$  in globale Koordinaten umrechnet sei  $T_1$ . Jedes Kindelement  $k$  von  $e$  speichert eine Transformationsmatrix  $T_2$ , die angibt wo der Ursprung des Koordinatensystems von  $k$  relativ zum Koordinatensystem von  $e$  liegt. Will man nun Koordinaten von  $k$  in globale Koordinaten umrechnen, benötigt man die Abbildung  $T_1 \cdot T_2$ .

## 7.4. Zufall

Linearer Kongruenzgenerator reicht für Zufallszahlen aus, da nur wenige erzeugt werden (erkennbare Muster entstehen erst bei mehr Zufallszahlen) (**erwähnen?**)

**ToDo**

## 7.5. Transformationsmatrizen

(**Recherchiere warum rechtshändige Koordinatensysteme bzw. konsistente Koordinatensysteme wichtig sind (back face culling, Rotationsrichtung der Matrizen bei positiven Winkeln)**)

**ToDo**

Jedes Element im Skelett speichert, relativ zu seinem Elternelement, die Position des Ursprungs seines Koordinatensystems. Um den Überblick über die Transformationsmatrizen bzw. Abbildungen behalten, die vom einen ins andere Koordinatensystem umwandeln, hier zwei Übersichtsgrafiken: (**Erzeugung von Elementen auf der Wirbelsäule mit gegebener Weltposition + gespiegelte Elemente**)

**ToDo**

## 7.6. PCA

Die Bilder der Skelette wurden folgendermaßen für die Datenerhebung vorbereitet:

1. Zuschneiden des Bildes, so dass möglichst nur das Skelett mit wenig Rand außen herum zu sehen ist.
2. Einfügen in eine  $1000 \times 1000$  Pixel große Bildumgebung.
3. Verschieben innerhalb der Bildumgebung an den unteren Rand und horizontal in die Mitte.

Ist das geschehen kann die Lage der Wirbelsäule und die Länge der Knochen der Extremitäten annotiert werden.

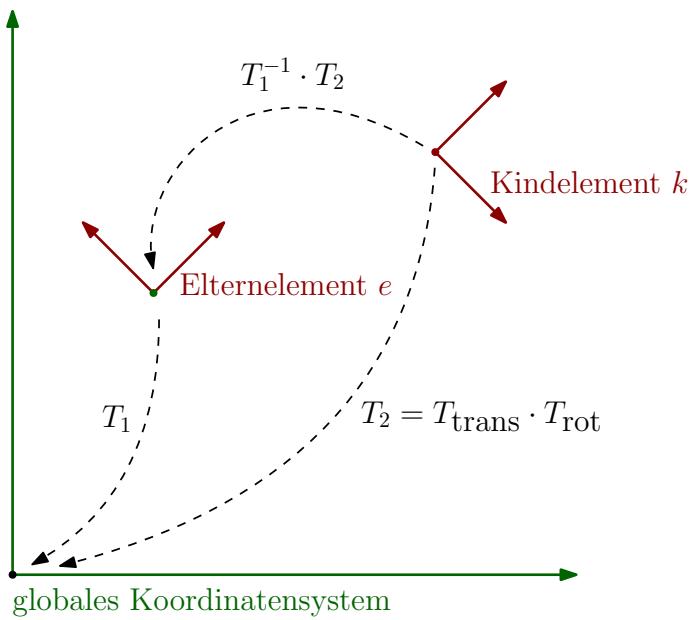


Abbildung 7.2.: Will man ein Element  $k$  erzeugen, das Kindelement von  $e$  ist und dessen globale Koordinaten bekannt sind, muss man die Abbildung berechnen, die die relative Position von  $k$  angibt. Seien  $T_1$  und  $T_2$  jeweils die Transformationen in das globale Koordinatensystem von  $e$  bzw.  $k$ . Dann ist die gesuchte Abbildung  $T_1^{-1} \cdot T_2$ .

### 7.6.1. Annotation der Bilder

Die Annotation der Bilder wurde per Hand mit dem Programm Inkscape<sup>1</sup> durchgeführt. Für jedes zu markierende Element wurde eine Strecke oder eine Bézierkurve eingefügt und mit einem vorher festgelegten Namen benannt. Diese Elemente wurden dann durch Inkscape als Pfade in der erzeugten svg-Datei gespeichert. Aus dieser Datei wurden dann automatisiert die eingetragenen Pfade mit ihren Koordinaten ausgelesen.

Folgende Details sind wichtig zu beachten, damit dieser Vorgang reibungslos abläuft.

- Man kann in Inkscape einstellen, dass Koordinaten immer absolut angegeben werden. Das ist sinnvoll um die Koordinaten leichter auslesen zu können.
- Der Ursprung des Koordinatensystems in Inkscape ist unten links, im svg-Format ist er aber oben links.
- Ebenen sollten in Inkscape nicht verschoben sein, sonst verschieben sich mit ihnen auch die Koordinaten.

### 7.6.2. Anpassung der PCA-Ergebnisse zur Weiterverarbeitung

- Um Wirbelsäule aus PCA Daten differenzierbar zu machen, wurden jeweils der vorletzte und der zweite Punkt von Hals und Rücken bzw. Rücken und Schwanz um den Kontaktspunkt um den gleichen Winkel in gegensätzliche Richtungen gedreht, damit beide Bézierkurven an dem Kontaktspunkt die gleiche Steigung haben. (**beste Lösung?**)
- An den Kontaktspunkten der Wirbelsäulenteile ist die Steigung nicht unbedingt gleich (die Wirbelsäule als ganzes ist nicht  $C^1$ ). Deshalb müssen vor der Weiterverwendung die jeweils nächsten Kontrollpunkte nach dem Kontaktspunkt verschoben werden. Das

**To Do**

<sup>1</sup>Programm zum erstellen und bearbeiten von Vektorgrafiken, <https://inkscape.org/de>

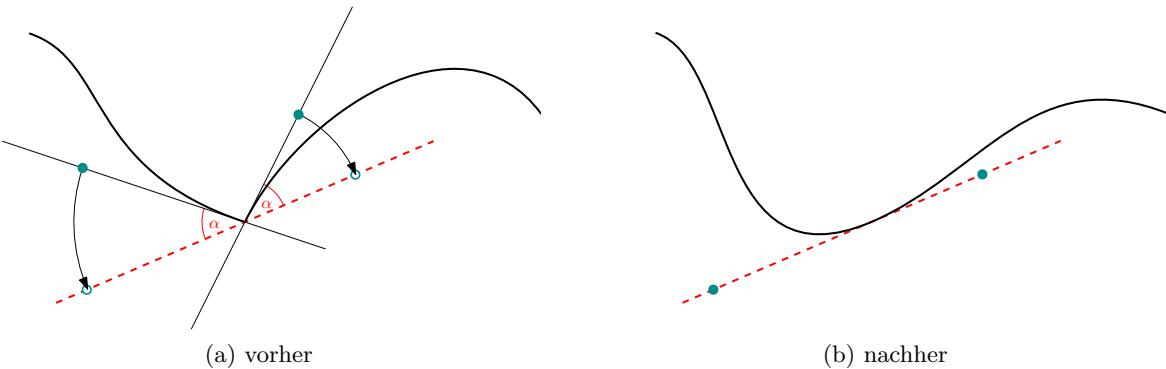


Abbildung 7.3.: Anpassung der Kontrollpunkte der Wirbelsäulenteile, wenn die Steigung an den Kontaktstellen ungleich ist. Die beiden Teile der Wirbelsäule und die Steigung am Kontaktstellen sind hier in schwarz dargestellt. Die zu drehenden Kontrollpunkte in cyan. In rot ist die resultierende Steigung und der Winkel, der für die Drehung verwendet wird, zu sehen.

wurde hier so gemacht, dass die zu verschiebenden Kontrollpunkte um den Kontakt-  
punkt in gegensätzliche Richtungen rotiert wurden. Beide werden um den gleichen  
Winkel rotiert (siehe Abbildung 7.3). Grundsätzlich könnten die Kontrollpunkte be-  
liebig auf der Tangente des Kontaktspunkts platziert werden (rot im Bild) um eine  
übereinstimmende Steigung zu bekommen. Um den Verlauf der Wirbelsäulenteile  
möglichst wenig zu verändern ist es von Vorteil auch die Kontrollpunkte möglichst  
wenig zu verschieben. Man könnte die Punkte z. B. auch senkrecht auf die Tangente  
projizieren. Welches Verfahren angewendet wird, ist jedoch nicht von großer Bedeu-  
tung.

## 7.7. Gelenke

(Für jede Art von Extremität und jede Position ein anderes Gelenk mit anderen Einschränkungen (nicht alle Möglichkeiten in einem))

## 7.8. Probleme der Beinpositionierung bei kurzen Beinen

Wie in Absatz 5.4.2 zur Ausrichtung der Beine bereits beschrieben, treten bei sehr kurzen Beinen ein paar Probleme auf. Diese werden im Folgenden kurz umrissen.

- Bei Berechnung der Bodenhöhe wird die Beinlänge von den entsprechenden Kontrollpunkten der Bézierkurve aus gemessen, da die Position der Hüfte/Schulter in diesem Stadium noch nicht klar ist. Deshalb kann es bei sehr kurzen Beinen sein, dass der Abstand zwischen Boden und Gelenk zu groß ist und der Boden nicht erreichbar ist.

In diesem Fall wird das Bein einfach komplett ausgestreckt senkrecht nach unten positioniert. Da der Abstand zwischen dem Hüft- / Schultergelenk und dem Kontrollpunkt der Bézierkurve nicht sehr groß ist, ist auch der Abstand zu Bodenhöhe nicht enorm und fällt nicht allzusehr auf.

2. Bei sehr kurzen Knochen ändert sich der Abstand zum Boden durch Drehung der Gelenke nicht so stark wie bei langen Knochen. Wenn der Winkel sich zu wenig ändert, wird aber davon ausgegangen, dass die Winkeländerung zu klein ist und alle Änderungen sofort wieder zurückgesetzt wurden. Deshalb wird die Winkeländerung

dann für die nächste Iteration stärker verkleinert. Das ist aber in diesem Fall kontraproduktiv. Der Algorithmus schafft es dann nämlich nicht mehr die Knochen in die richtige Lage zu bringen, da der Bewegungsspielraum dadurch zu stark eingeschränkt wird.

Dem könnte man natürlich entgegenwirken, indem man, statt die Änderung des Abstandes zum Boden zu messen, abfragt wie oft die Drehungen in der jeweiligen Iteration zurückgesetzt wurden.

3. Bei wirklich sehr kurzen Beinen (hier eine Gesamtlänge unter 5) macht es gar keinen Sinn sie anzuzuordnen, da man sie kaum sieht. Außerdem tritt hier der Effekt auf, der in Punkt 2 schon beschrieben wurde.
4. Die Beinstartposition kann schon vor der ersten Iteration unterhalb der Bodenhöhe liegen. Das tritt auf, wenn mindestens ein Paar Beine sehr kurz ist und die Wirbelsäule an den Ansatzpunkten auf sehr unterschiedlicher Höhe liegt (siehe auch Absatz 5.4.1 zur Berechnung der Bodenhöhe). (**Beispiel: Dimetrodon**)

In diesem Fall ist der Algorithmus natürlich nicht anwendbar. Das Bein wird dann einfach senkrecht nach unten ausgerichtet und mit einem Fuß versehen, der mit der Sohle auf dem Boden steht.

5. Bei kurzen Beinknochen kann es dazu kommen, dass der Oberschenkel nicht näher zum Boden kann, weil er schon aufliegt, aber Schienbein und Hand durch das Gelenkoffset (siehe Abschnitt 5.6 zur Positionierung der Knochenmodelle) über dem Boden schweben und nicht näher zum Boden bewegt werden können. (**Beispiel Krokodil (siehe auch Screenshot)**)

**ToDo**

**ToDo**

## 8. Erweiterungs- und Verbesserungsmöglichkeiten

- Muskeln, Haut etc. anbauen
- austauschbare 3D-Modelle
- mehr verschiedene 3D-Modelle
- Beinalgo verbessern / IK
- mehr Daten für PCA sammeln
- Gewicht in Algo verwenden
- Erweiterung auf Mensch? Mensch auch als PCA Datenpunkt?

### 8.1. Muskeln

- Die „Hauptmuskeln“ verlaufen bei Wirbeltieren wahrscheinlich ähnlich, relativ zu den Knochen. Trotzdem unterscheiden sie sich recht stark.
- Knochen/Gelenke bekommen Zusatzattribute für Start- und Zielpunkte der Muskeln.
- Muskeln haben eine „Dicke“ und aus Start- und Zielpunkt muss Kurve des Muskels generiert werden.
- Wie wird die genaue Form festgelegt? Muskeln irgendwie auf ihre „Dicke“ aufblähen + Interaktion mit vorhandenen Elementen (andere Muskeln und Knochen) → future work

### 8.2. Haut

- Was für Algorithmen gibt es, die zu einem vorhandenen 3D-Modell eine Hülle mit gewissen Eigenschaften generieren?  
es gibt eine solche Funktion z.B. in AutoCAD <https://knowledge.autodesk.com/de/support/autocad/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/DEU/AutoCAD-Core/files/GUID-B7F99810-765E-4E7E-ABDD-275C64147CCC.htm>
- Einfach nur eine Hülle mit gewissem Abstand sieht wahrscheinlich sehr unrealistisch aus. „Bony Landmarks“ (Stellen an denen das Gewebe über den Knochen sehr dünn ist) könnten helfen (siehe <https://www.proko.com/landmarks-of-the-human-body/>) oder „bone weights“

# Literatur

- [1] *3ds Max*. URL: <https://www.autodesk.de/products/3ds-max/overview> (besucht am 21.05.2020).
- [2] *3ds Max. Understanding Biped*. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/3ds-max/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2017/ENU/3DSMax/files/GUID-C828940D-A40E-4A4C-96C5-D936DC3951E1-htm.html> (besucht am 21.05.2020).
- [3] A. Aristidou u. a. “Inverse Kinematics Techniques in Computer Graphics: A Survey”. In: *Computer Graphics Forum* 37.6 (2018), S. 35–58. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/cgf.13310>.
- [4] *Avatar Schreckenspferd*. URL: <https://james-camerons-avatar.fandom.com/de/wiki/Schreckenspferd> (besucht am 21.05.2020).
- [5] Esben Bach und Andreas Madsen. “Building and Generating Facial Textures using Eigen Faces”. Masterarbeit. Harbin Institute of Technology und Linköping University, 2016.
- [6] Nuno Barreto und Licinio Roque. “A Survey of Procedural Content Generation tools in Video Game Creature Design”. In: *Second Conference on Computation Communication Aesthetics and X*. Juni 2014. URL: [https://www.researchgate.net/publication/298307183\\_A\\_Survey\\_of\\_Procedural\\_Content\\_Generation\\_tools\\_in\\_Video\\_Game\\_Creature\\_Design](https://www.researchgate.net/publication/298307183_A_Survey_of_Procedural_Content_Generation_tools_in_Video_Game_Creature_Design).
- [7] Volker Blanz und Thomas Vetter. “A Morphable Model for the Synthesis of 3D Faces”. In: *SIGGRAPH'99 Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (Sep. 2002). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/311535.311556>.
- [8] *Demoszene*. URL: <https://www.demoscene.info/> (besucht am 06.05.2020).
- [9] *Development of No Man's Sky*. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Development\\_of\\_No\\_Man%27s\\_Sky](https://en.wikipedia.org/wiki/Development_of_No_Man%27s_Sky) (besucht am 21.05.2020).
- [10] Morris L. Eaton. *Multivariate Statistics. A Vector Space Approach*. Lecture Notes-Monograph Series. Beachwood, Ohio: Institute of Mathematical Statistics, 1983. ISBN: 9780940600690. URL: <https://epdf.pub/multivariate-statistics-a-vector-space-approacheed2a525dca43e48f58a88b289ff519f66368.html>.

- [11] Wilhelm Ellenberger. *Handbuch der Anatomie der Tiere für Künstler*. Bd. 1. Leipzig: Dietrichsche Verlagsbuchhandlung, 1900. URL: [https://archive.org/details/bub\\_gb\\_4JFmAAAAMAAJ/page/n19/mode/2up](https://archive.org/details/bub_gb_4JFmAAAAMAAJ/page/n19/mode/2up).
- [12] Jonas Freiknecht und Wolfgang Effelsberg. “A Survey on the Procedural Generation of Virtual Worlds”. In: *Multimodal Technologies and Interaction*. Bd. 1. 4. Artikel 27. 2017. URL: <https://doi.org/10.3390/mti1040027>.
- [13] Michael Girard und Anthony Maciejewski. “Computational Modeling for the Computer Animation of Legged Figures”. In: *ACM Siggraph Computer Graphics*. Bd. 19. Juli 1985, S. 263–270. DOI: 10.1145/325334.325244. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/325334.325244>.
- [14] Ernst Hadorn und Rüdiger Wehner. *Allgemeine Zoologie*. 21. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1986. ISBN: 3-423-04061-0.
- [15] Michael A. Harrison. *Introduction to Formal Language Theory*. Addison-Wesley series in computer science. Addison-Wesley Publishing Company, 1978. ISBN: 0-201-02955-3.
- [16] *HDRI Haven. 360°-Bild einer kleinen Höhle*. URL: [https://hdrihaven.com/hdri/?c=nature&h=small\\_cave](https://hdrihaven.com/hdri/?c=nature&h=small_cave) (besucht am 20.05.2020).
- [17] Chris Hecker u. a. “Real-time motion retargeting to highly varied user-created morphologies”. In: *ACM Trans. Graph. Article 27* (Sep. 2008). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1360612.1360626>.
- [18] Milton Hildebrand und George E. Goslow. *Vergleichende und funktionelle Anatomie der Wirbeltiere*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.
- [19] Jon Hudson. “Creature Generation using Genetic Algorithms and Auto-Rigging”. Masterarbeit. Bournemouth University, National Centre for Computer Animation, 2013.
- [20] I.T. Jolliffe. *Principal Component Analysis*. 2. Aufl. New York: Springer-Verlag, 2002. ISBN: 0-387-95442-2.
- [21] Robert Krogh. “Procedural Character Generation. Implementing Reference Fitting and Principal Components Analysis”. Masterarbeit. Aalborg University, 2007. URL: [https://projekter.aau.dk/projekter/en/studentthesis/procedural-character-generation-implementing-reference-fitting-and-principal-components-analysis\(8a268f9e-a382-496b-8a94-a94fe6606d2e\).html](https://projekter.aau.dk/projekter/en/studentthesis/procedural-character-generation-implementing-reference-fitting-and-principal-components-analysis(8a268f9e-a382-496b-8a94-a94fe6606d2e).html).
- [22] Holger Langkabel. “QQ-Plots als Instrument zum Vergleich von Verteilungen”. In: *Konferenz der SAS-Anwender in Forschung und Entwicklung*. Bd. 20. März 2016, S. 105–117. URL: [http://de.saswiki.org/wiki/KSFE\\_2016#Datenvizualisierung](http://de.saswiki.org/wiki/KSFE_2016#Datenvizualisierung).
- [23] *Maya*. URL: <https://www.autodesk.com/products/maya/overview> (besucht am 21.05.2020).
- [24] *Maya User Guide. Skeleton Hierarchy*. URL: <https://knowledge.autodesk.com/support/maya/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2016/ENU/Maya/files/GUID-DC88B9A7-593B-427E-9BED-4D7822B0E0B6-htm.html> (besucht am 21.05.2020).
- [25] *No Man’s Sky*. URL: <https://www.nomanssky.com/> (besucht am 08.10.2019).
- [26] *Our Centaurs Are Different aka: Centauroid Form*. URL: <https://tvtropes.org/pmwiki/pmwiki.php/Main/CentauroidForm> (besucht am 07.05.2020).
- [27] *Pegasus*. URL: <https://tvtropes.org/pmwiki/pmwiki.php/Main/Pegasus> (besucht am 07.05.2020).

- [28] Martin Petratsch. "Prozedurale Städtegenerierung mit Hilfe von L-Systemen". Großer Beleg. Technische Universität Dresden, 2008. URL: [http://www.inf.tu-dresden.de/index.php?node\\_id=2234&ln=de](http://www.inf.tu-dresden.de/index.php?node_id=2234&ln=de).
- [29] Hartmut Prautzsch, Wolfgang Boehm und Marco Paluszny. *Bezier and B-Spline Techniques*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2002. ISBN: 3540437614.
- [30] Przemyslaw Prusinkiewicz und Aristid Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1990. ISBN: 0-387-97297-8. URL: <http://algorithmicbotany.org/papers/#abop>.
- [31] Eric N. Rittmeyer u. a. "Ecological Guild Evolution and the Discovery of the World's Smallest Vertebrate". In: *PLoS ONE* 7 (Jan. 2012). URL: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0029797>.
- [32] Hyewon Seo und Nadia Thalmann. "An Automatic modeling of human bodies from sizing parameters". In: *Proceedings of the Symposium on Interactive 3D Graphics*. Jan. 2003, S. 19–26. URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/641480.641487>.
- [33] Harumichi SHINOHARA. "The Mouse Vertebrae: Changes in the Morphology of Mouse Vertebrae Exhibit Specific Patterns Over Limited Numbers of Vertebral Levels". In: *Okajimas folia anatomica Japonica* 76 (Juni 1999), S. 17–31. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/ofaj1936/76/1/76\\_17/\\_pdf%EF%BB%BF](https://www.jstage.jst.go.jp/article/ofaj1936/76/1/76_17/_pdf%EF%BB%BF).
- [34] SpeedTree. URL: <https://store.speedtree.com/> (besucht am 05.05.2020).
- [35] Spore. URL: [www.spore.com](http://www.spore.com) (besucht am 21.05.2020).
- [36] Vertebrate with Extra Limbs. URL: <https://tvtropes.org/pmwiki/pmwiki.php>Main/VertebrateWithExtraLimbs> (besucht am 07.05.2020).
- [37] Günter Vogel und Hartmut Angermann. *dtv-Atlas zur Biologie*. 6. Aufl. Band II. München: Deutscher Taschenbuch Verlag GmbH & Co. KG, 1968. ISBN: 3-423-03012-7.
- [38] Vogelskelett. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Vogelskelett> (besucht am 06.05.2020).
- [39] Hongling Wang, Joseph Kearney und Kendall Atkinson. "Arc-length parameterized spline curves for real-time simulation". In: (Jan. 2002). URL: [https://www.researchgate.net/publication/228718576\\_Arc-length\\_parameterized\\_spline\\_curves\\_for\\_real-time\\_simulation](https://www.researchgate.net/publication/228718576_Arc-length_parameterized_spline_curves_for_real-time_simulation).
- [40] Rüdiger Wehner und Walter Gehring. *Zoologie*. 24. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2007. ISBN: 978-3-13-367424-9.
- [41] Rüdiger Wehner und Walter Gehring. *Zoologie*. 25. Aufl. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2013. ISBN: 978-3-13-367425-6.
- [42] Wilfried Westheide und Reinhard Rieger. *Spezielle Zoologie. Teil 2: Wirbel- oder Schädeltiere*. München: Spektrum Akademischer Verlag, 2004. ISBN: 3-8274-0307-3.
- [43] Ziva. URL: <https://zivadynamics.com/> (besucht am 21.05.2020).
- [44] Ziva. *General Character Setup*. URL: <https://zivadynamics.com/character-docs/general-setup> (besucht am 21.05.2020).

# A. PCA Daten

## A.1. Eingabedaten für PCA

### A.1.1. Bilder

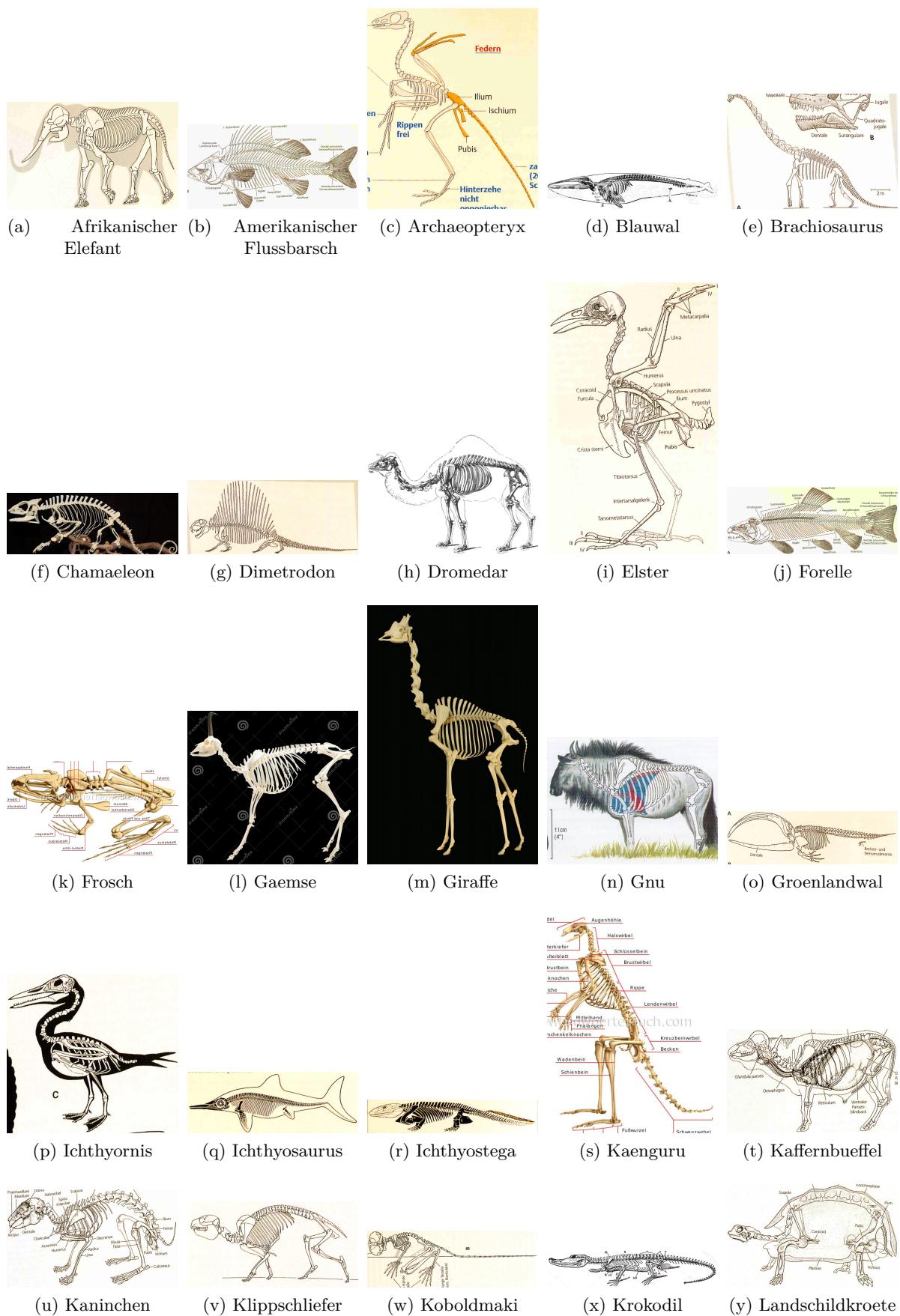
Alle Bilder, die als Eingabe für die PCA verwendet wurden, sind in Abbildung A.1 zu finden. Im Folgenden sind die Bildquellen aufgezählt. Alle Tiere, die nicht aufgezählt sind, sind aus [42] entnommen.

- Archaeopteryx, Eusthenopteron, Ichthyosaurus, Ichthyostega, Muraenosaurus, Ur-pferdchen aus [40]
- Blauwal <https://www.quagga-illustrations.de/wp-content/uploads/2014/05/h0001705.jpg>
- Chamäleon <https://www.madcham.de/de/anatomie/>
- Dormedar [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ac/Camel\\_Skeleton\\_-\\_Richard\\_Owen\\_-\\_On\\_the\\_Anatomy\\_of\\_Vertebrates\\_%281866%29.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ac/Camel_Skeleton_-_Richard_Owen_-_On_the_Anatomy_of_Vertebrates_%281866%29.jpg)
- Giraffe  
[https://de.wikipedia.org/wiki/Giraffen#/media/Datei:Giraffe\\_skeleton.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Giraffen#/media/Datei:Giraffe_skeleton.jpg)
- Gnu <https://lutzmoeller.net/Afrika/2007/Lutz-Juli/8-Gnu.php>
- Känguru <http://www.bildwoerterbuch.com/tierreich/beuteltiere/kaenguru/skelett-eines-kaengurus.php>
- Krokodil <https://de.depositphotos.com/210906852/stock-illustration-skeleton-crocodile-vintage-line-drawing.html>
- Pferd <https://www.kosmos.de/content/buecher/ratgeber/pferde-reiten/vorwaerts-abwaerts-eine-frage-der-haltung/>
- Schlange: zu Schlangen gibt es keine Bilder, die deren Skelett in ausgestrecktem Zustand von der Seite darstellen. Deshalb wurde ein leeres Bild genommen und der Verlauf des Rückens durch eine Gerade angenähert (Extremitäten besitzt eine Schlange nicht. Außerdem ist nicht erkennbar ob bzw. wo Hals in Rücken und Rücken in Schwanz übergeht. Deshalb wurde die komplette Wirbelsäule als Rücken markiert.)

- Schwan <https://www.alamy.de/skelett-eines-schwans-osteographia-oder-die-anatomie-der-knochen-london-1733-quelle-47-ich-12-kapitel-v-saitenhalter-autor-cheselden-william-image226921369.html>
- Seekuh aus [41]
- Sinornis und Taube aus [18]
- Strauß <https://www.alamy.de/stockfoto-skelett-von-strauss-24658845.html>
- Tyrannosaurus Rex [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Tyrannosaurus\\_skeleton.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Tyrannosaurus_skeleton.jpg)

### A.1.2. Gewichte

- Afrikanischer Elefant 4000kg, <https://de.upali.ch/gewicht-und-grosse/>
- Afrikanischer Strauß bis 135kg, [https://de.wikipedia.org/wiki/Afrikanischer\\_Stra%C3%9F](https://de.wikipedia.org/wiki/Afrikanischer_Stra%C3%9F)
- Amerikanischer Flussbarsch 2kg, [http://tierdoku.com/index.php?title=Amerikanischer\\_Flussbarsch](http://tierdoku.com/index.php?title=Amerikanischer_Flussbarsch)
- Archaeopteryx 1kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Archaeopteryx>
- Blauwal 120 Tonnen, <http://tierdoku.com/index.php?title=Blauwal>, „das schwerste bekannte Tier der Erdgeschichte“ <https://de.wikipedia.org/wiki/Blauwal>
- Brachiosaurus 23-44 Tonnen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Brachiosaurus>
- Chamäleon 0,1-2kg, <https://www.tierchenwelt.de/echsen/128-chamaeleon.html>
- Dimetrodon 250kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Dimetrodon>
- Dromedär 300-700kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Dromedär>
- Durchschnittsgewicht (Warmblut-)Pferd 600 kg, <https://www.reitarena.com/de/blog/blog-post/2015/03/03/das-pferd-grundlegende-fakten.html>
- Elster 0,2kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Elster>
- Forelle 10-50kg (je nach Art), <https://de.wikipedia.org/wiki/Forelle>
- Frosch 10g, <http://www.biologie-schule.de/frosch-steckbrief.php>
- Gämsse 25-50kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/G%C3%A4mse>
- Giraffe bis 2 Tonnen, <https://www.tierchenwelt.de/huftiere/73-giraffe.html>
- Gnu 140-250kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Gnus>
- Grönlandwal 50-100 Tonnen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Gr%C3%B6nlandwal>
- Ichthyornis 0.3kg, [http://dinodata.de/animals/birds/pages\\_i/ichthyornis.php](http://dinodata.de/animals/birds/pages_i/ichthyornis.php)
- Ichthyosaurus 90kg, <https://www.tiere-online.de/sonstige-tiere/dinosaurier/ichthyosaurus/>
- Ichthyostega 80kg, <https://dinosaurierwelt.com/ichthyostega/>
- Kaffernbüffel 350-900kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Kaffernb%C3%BCffel>
- Känguru 2-90kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%A4ngurus>
- Kaninchen je nach Art, ganz grob 1kg



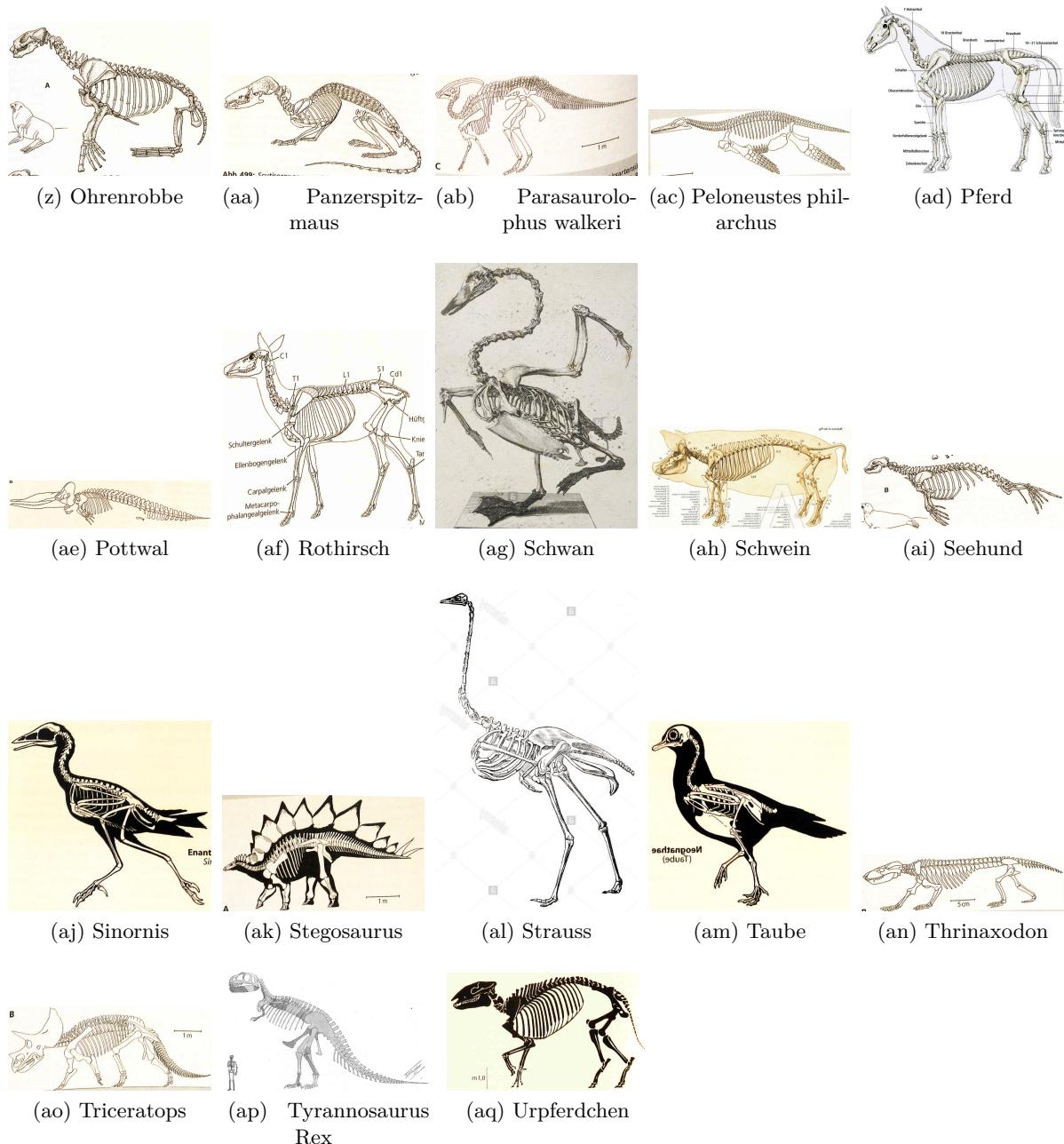
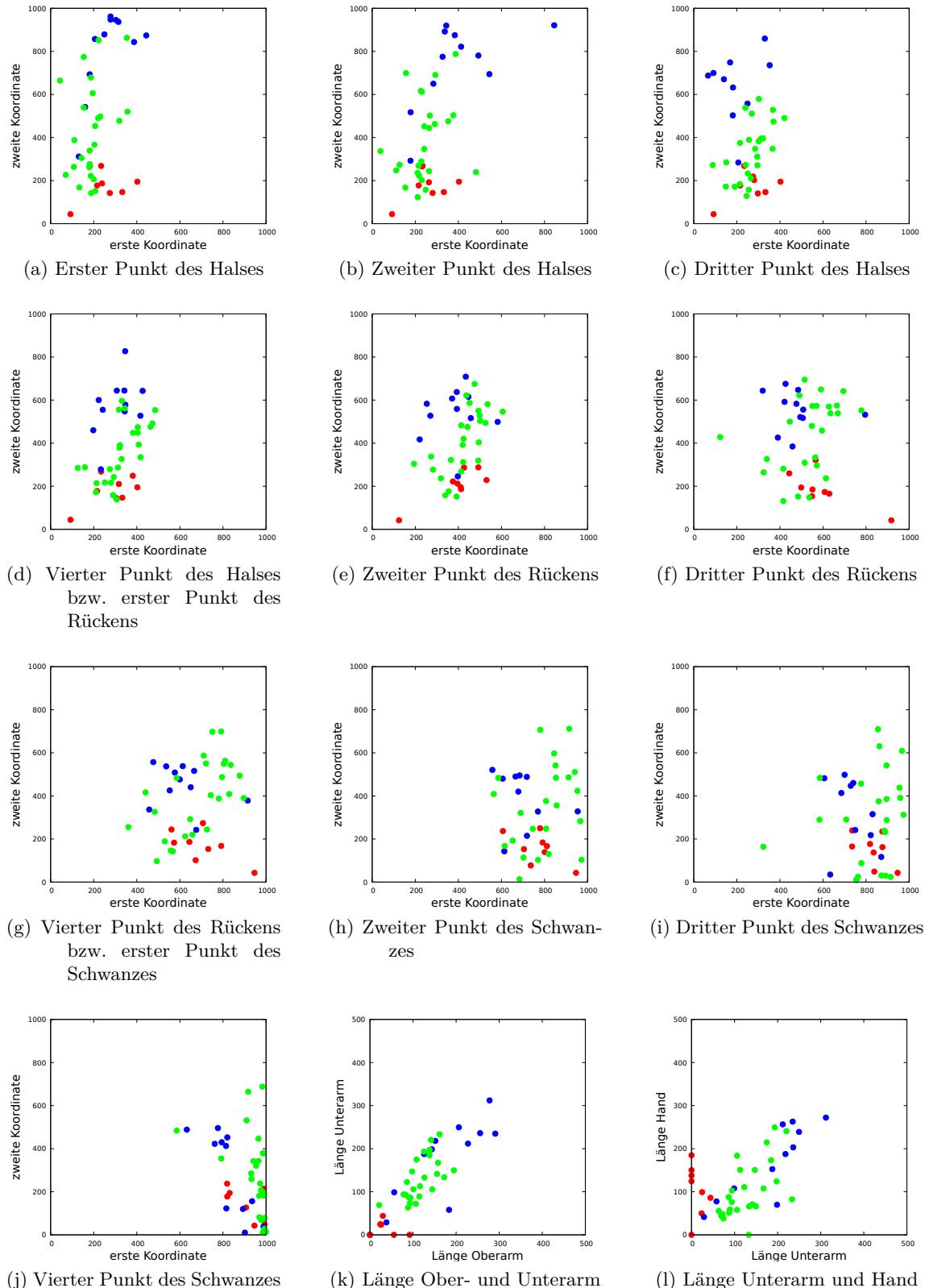


Abbildung A.1.: Alle Bilder, die als Eingabe für die PCA verwendet wurden.

- Klippschliefer 2-5kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Klippschliefer>
- Koboldmaki 0,1kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Koboldmakis>
- Krokodil 100-1000kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Krokodile>
- Landschildkröte je nach Art, grob 50kg
- Ohrenrobbe 25-500kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Ohrenrobben>
- Panzerspitzmaus 100g ,<https://de.wikipedia.org/wiki/Panzerspitzmaus>
- Parasaurolophus walkeri 4-5 Tonnen, [http://tierdoku.com/index.php?title=Parasaurolophus\\_walker](http://tierdoku.com/index.php?title=Parasaurolophus_walker)
- Peloneustes philarchus 100kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Peloneustes>
- Pottwal bis 50 Tonnen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Pottwal>
- Rothirsch 80-350kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Rothirsch>
- Schlange bis 100kg bei Riesenschlangen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Schlangen>
- Schwan 14kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Schw%C3%A4ne>
- Schwein 100kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Hausschwein>
- Seehund 100-150kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Seehund>
- Sinornis 20g, [http://dinodata.de/animals/birds/pages\\_s/sinornis.php](http://dinodata.de/animals/birds/pages_s/sinornis.php)
- Stegosaurus 4,5 Tonnen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Stegosaurus>
- Taube je nach Art, grob 1-2kg
- Thrinaxodon Reptil „ein paar Pfund“, <https://www.thoughtco.com/thrinaxodon-1091887>
- Triceratops 6-12 Tonnen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Triceratops>
- Tyrannosaurus 9 Tonnen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Tyrannosaurus>
- Urpferdchen (*Propalaeotherium*) 30kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Propalaeotherium>



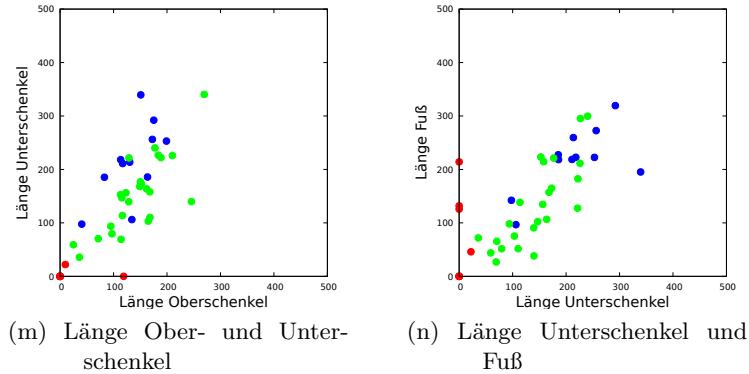


Abbildung A.2.: Erhobene Daten: Punkte der Bézierkurven der Wirbelsäule und Längen der Extremitäten. Bei den Extremitäten ist jeweils gegeneinander abgetragen Ober- und Unterarm, Ober- und Unterschenkel, Unterarm und Hand, Unterschenkel und Fuß. Markiert ist jeweils ob die Datenpunkte 0 (rot), 2 (blau) oder 4 (grün) Beine haben.

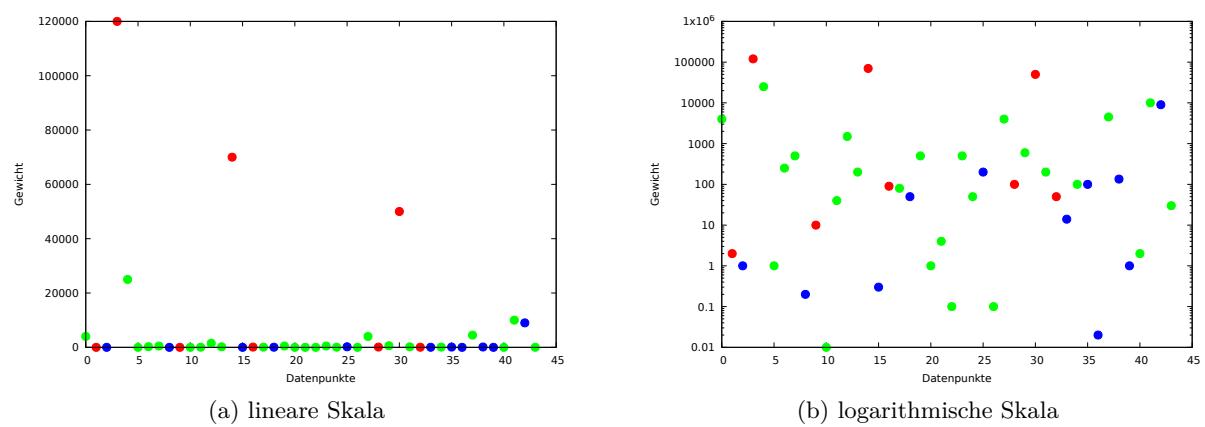
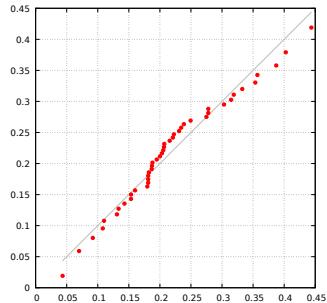
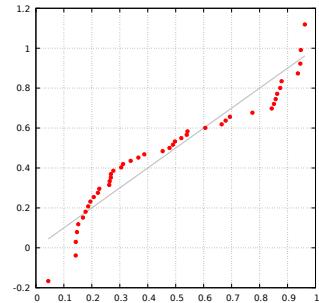


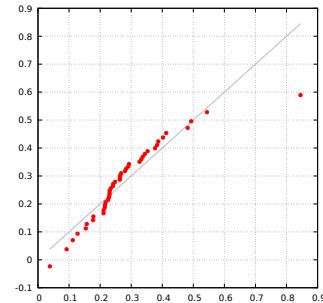
Abbildung A.3.: Erhobene Daten: Gewicht. Markiert ist jeweils ob die Datenpunkte 0 (rot), 2 (blau) oder 4 (grün) Beine haben.



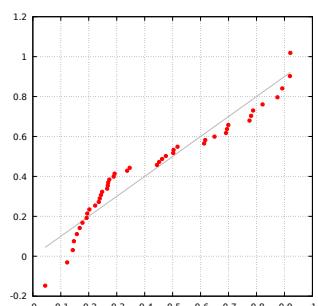
(a) Erster Punkt des Halses, x-Koordinate



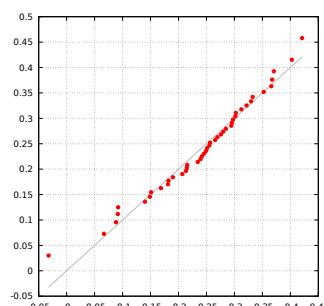
(b) Erster Punkt des Halses, y-Koordinate



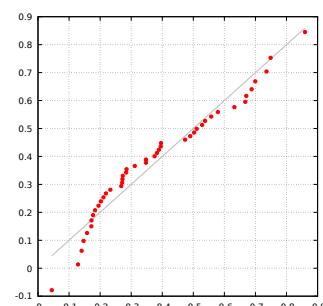
(c) Zweiter Punkt des Halses, x-Koordinate



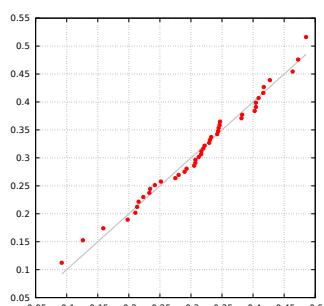
(d) Zweiter Punkt des Halses, y-Koordinate



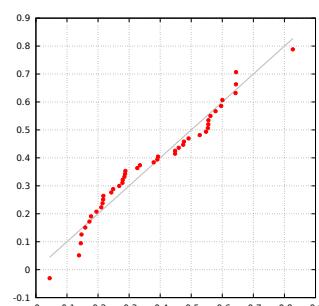
(e) Dritter Punkt des Halses, x-Koordinate



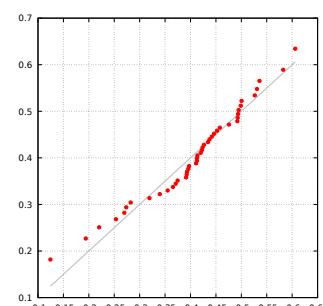
(f) Dritter Punkt des Halses, y-Koordinate



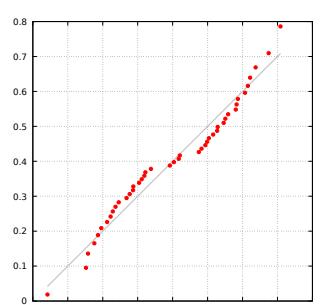
(g) Erster Punkt des Rückens, x-Koordinate



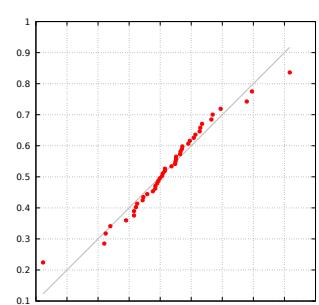
(h) Erster Punkt des Rückens, y-Koordinate



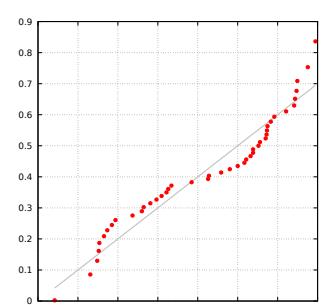
(i) Zweiter Punkt des Rückens, x-Koordinate



(j) Zweiter Punkt des Rückens, y-Koordinate



(k) Dritter Punkt des Rückens, x-Koordinate



(l) Dritter Punkt des Rückens, y-Koordinate

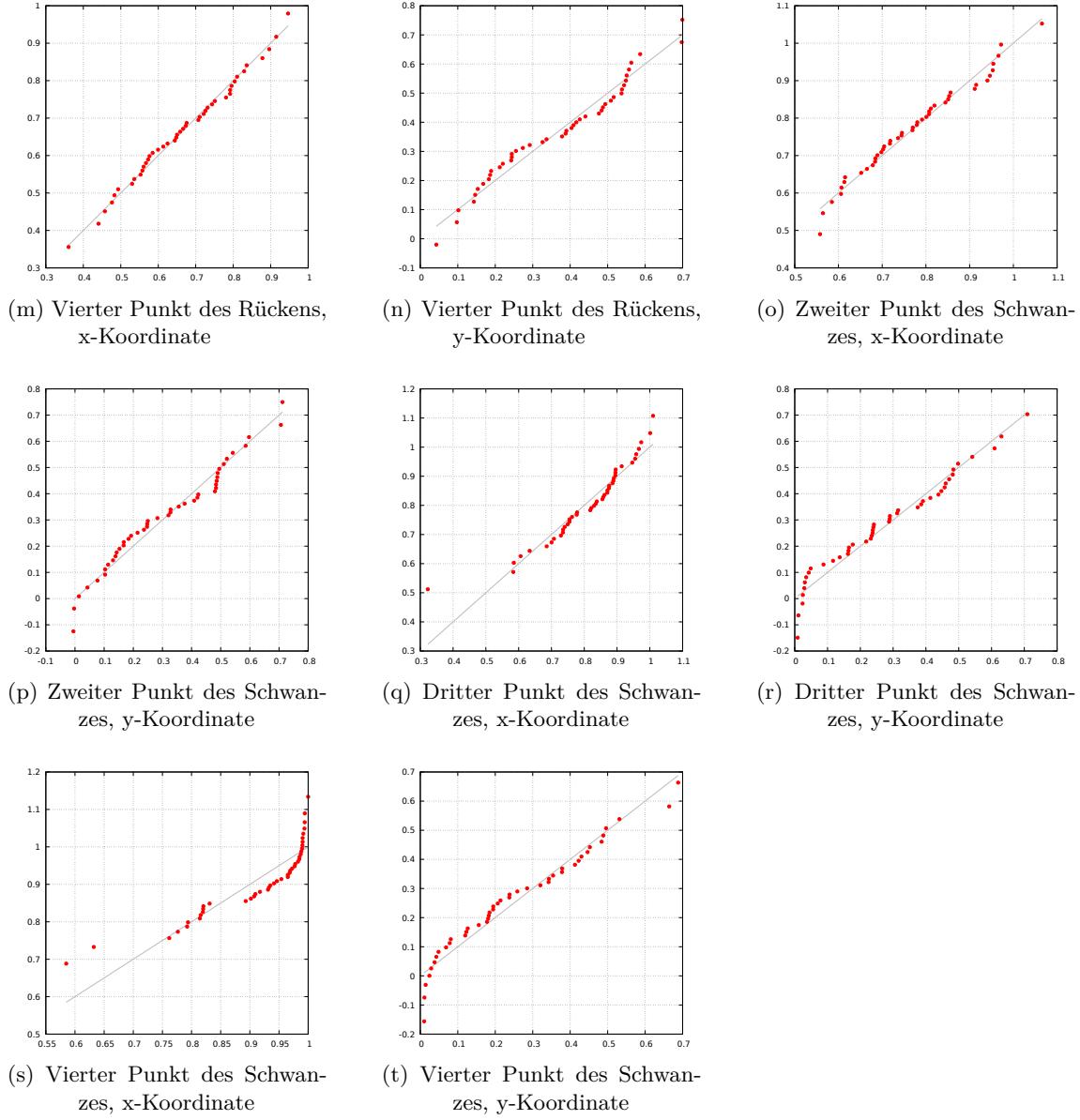


Abbildung A.4.: Quantil-Quantil-Diagramme für alle Dimensionen der Wirbelsäule

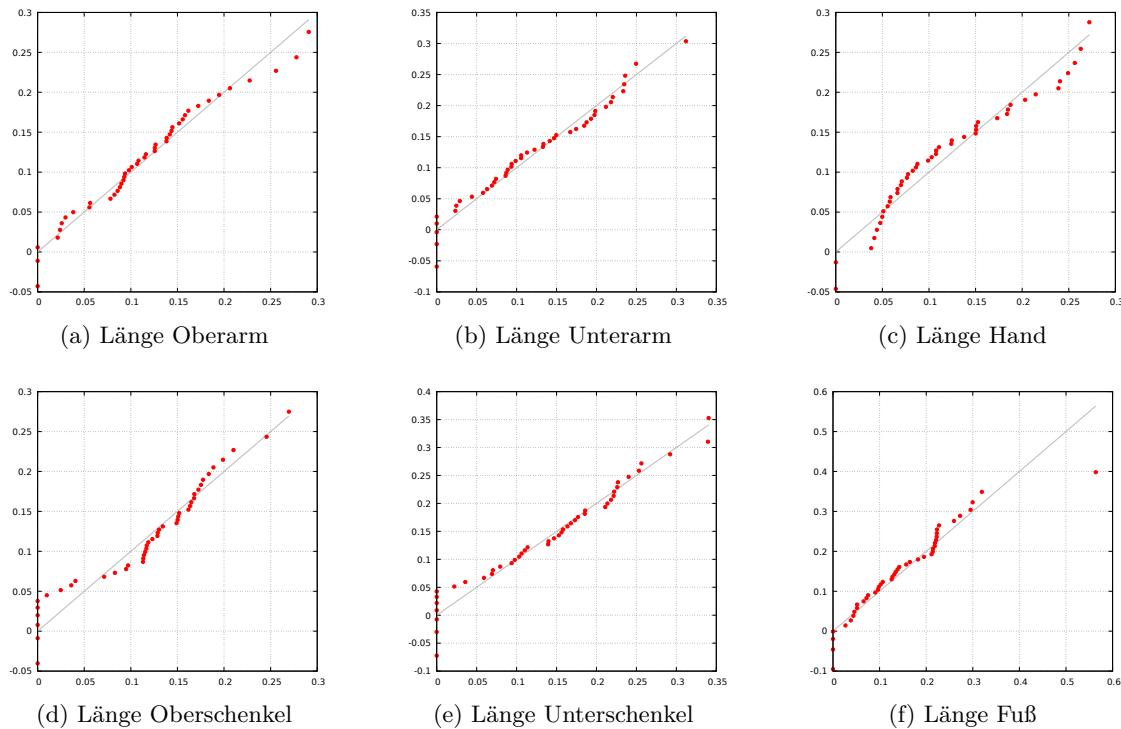
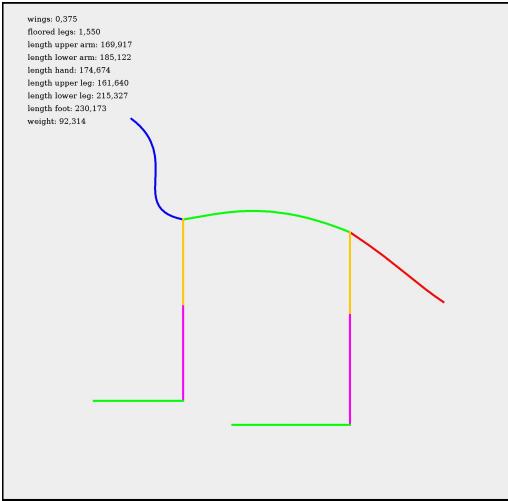
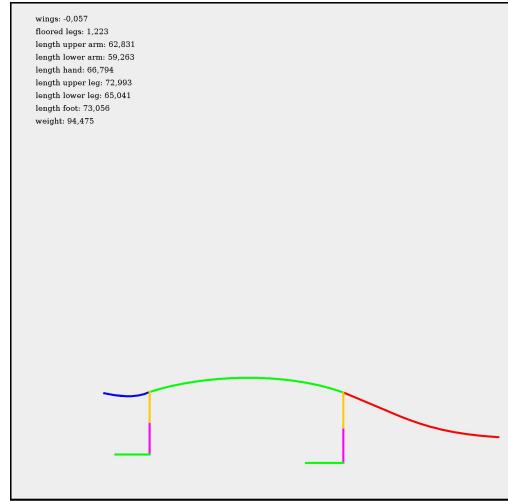


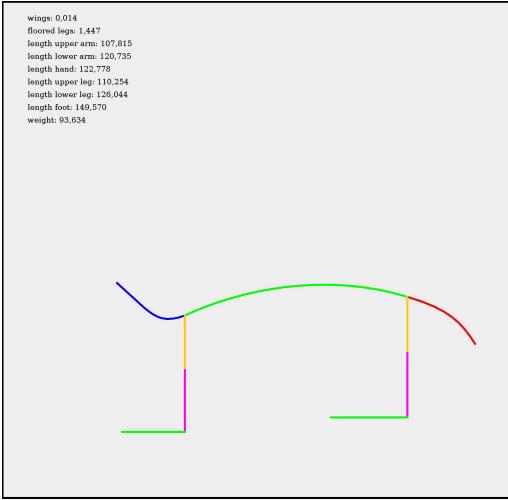
Abbildung A.5.: Quantil-Quantil-Diagramme für die Dimensionen der Eingabedaten, die zusätzlich zur Wirbelsäule erhoben wurden. Nicht dargestellt ist das binäre Attribut *Flügel* und die Anzahl der Beine mit Bodenkontakt.



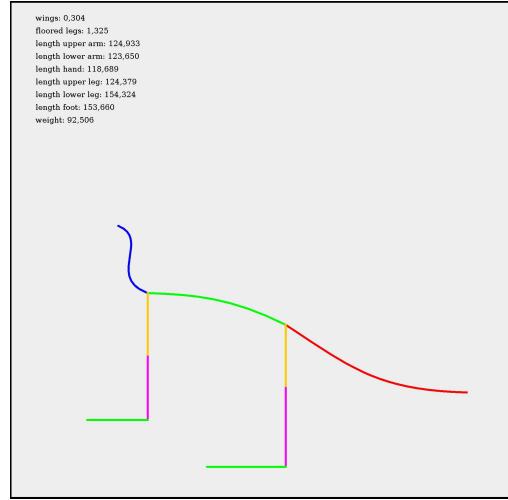
(a) 1-, Flügel 0,38, Beine 1,6, Gewicht 92kg



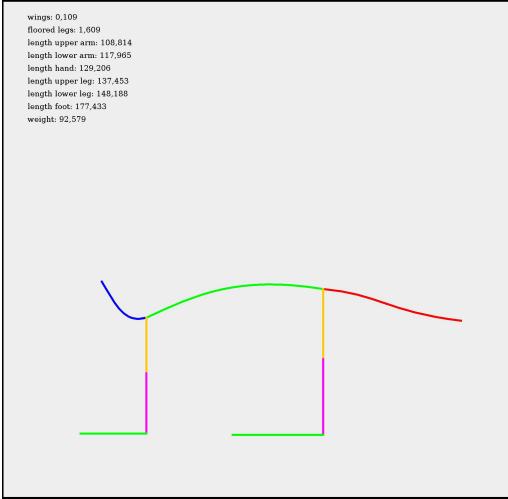
(b) 1+, Flügel -0,057, Beine 1,2, Gewicht 94kg



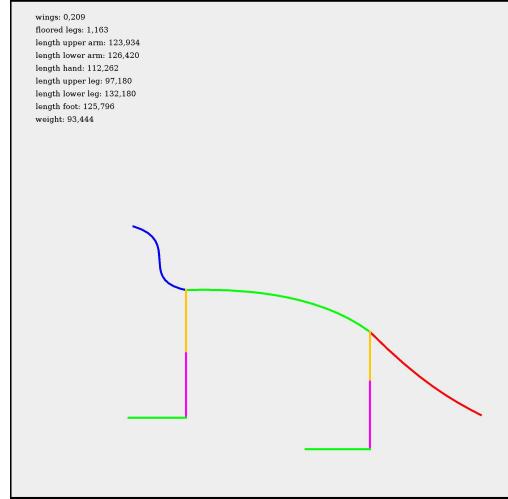
(c) 2-, Flügel 0,014, Beine 1,4, Gewicht 94kg



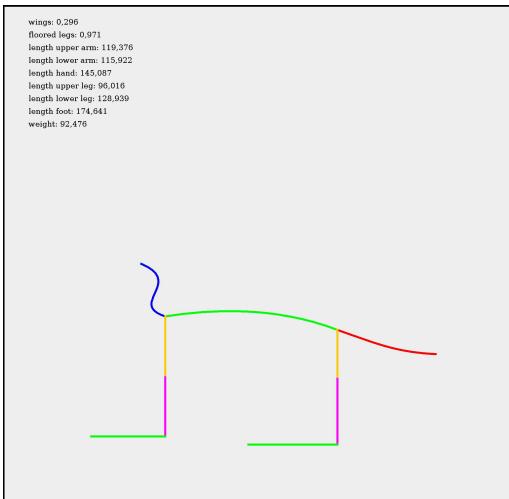
(d) 2+, Flügel 0,3, Beine 1,3, Gewicht 93kg



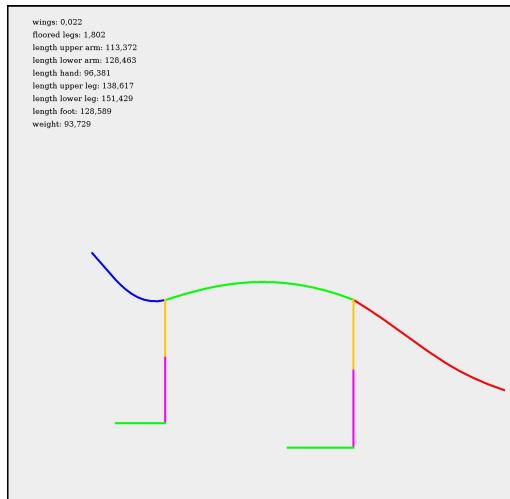
(e) 3-, Flügel 0,11, Beine 1,6, Gewicht 93kg



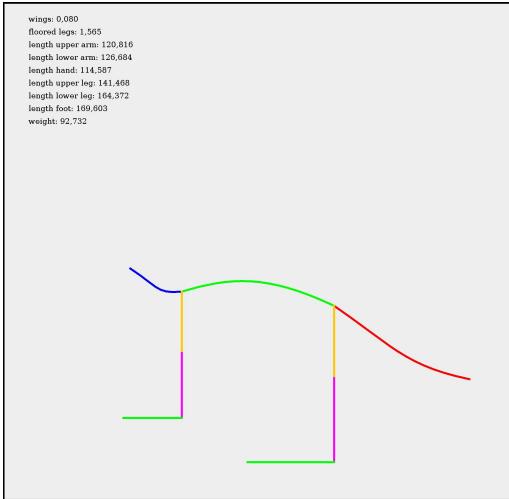
(f) 3+, Flügel 0,21, Beine 1,2, Gewicht 93kg



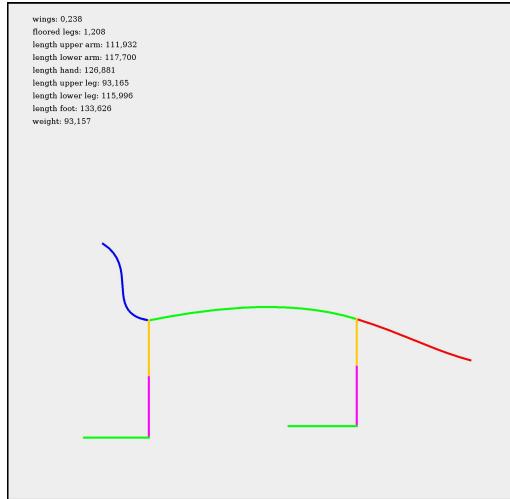
(g) 4-, Flügel 0, 3, Beine 1, Gewicht 92kg



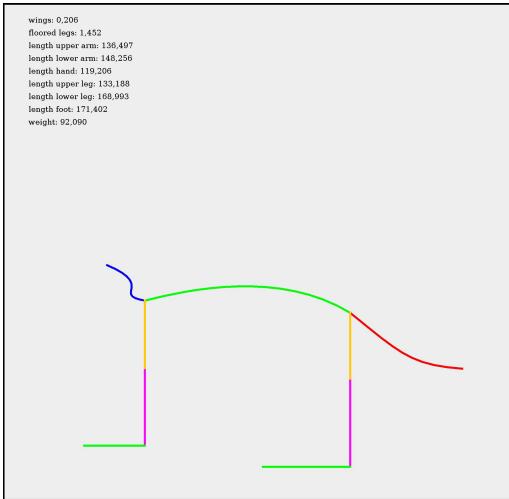
(h) 4+, Flügel 0, 022, Beine 1, 8, Gewicht 94kg



(i) 5-, Flügel 0, 08, Beine 1, 6, Gewicht 93kg



(j) 5+, Flügel 0, 24, Beine 1, 2, Gewicht 93kg



(k) 6-, Flügel 0, 21, Beine 1, 5, Gewicht 92kg



(l) 6+, Flügel 0, 11, Beine 1, 3, Gewicht 98kg

Abbildung A.6.: Datenpunkte im PCA-Koordinatensystem. Eine Koordinate nimmt den Wert der positiven (+) bzw. negativen (-) Standardabweichung in die entsprechende Richtung an, alle anderen sind null. Von oben nach unten sind die Ergebnisse für den größten (1) bis zum sechstgrößten (6) Eigenwert dargestellt. *Beine* steht für *Beine mit Bodenkontakt*.

# **Erklärung**

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der jeweils gültigen Fassung beachtet habe. Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und von dieser als Teil einer Prüfungsleistung angenommen.

Karlsruhe, den 25. Mai 2020

(Nina Zimbel)