

# Prozedurale Generierung von Wirbeltierskeletten

Masterarbeit von

**Nina Zimbel**

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

20. Februar 2020

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Bisherige Arbeiten</b>	<b>1</b>
1.1. Ziva . . . . .	1
1.2. ZSpheres in Zbrush . . . . .	1
1.3. 3DS MAX Biped . . . . .	1
1.4. Forensik und Archäologie . . . . .	1
1.5. No Man's Sky . . . . .	2
<b>2. Biologie</b>	<b>3</b>
<b>3. Idee</b>	<b>4</b>
3.1. Skelett . . . . .	4
3.1.1. Extremitäten . . . . .	5
3.2. Muskeln . . . . .	5
3.3. Haut . . . . .	5
3.4. Interaktivität . . . . .	6
3.5. Datenstrukturen . . . . .	6
3.5.1. Terminale . . . . .	6
3.5.2. „Wachstum“ . . . . .	6
3.5.3. Balance . . . . .	7
<b>4. PCA</b>	<b>8</b>
4.1. Funktionsweise . . . . .	8
4.2. Datenerhebung . . . . .	9
4.2.1. Schwierigkeiten . . . . .	11
4.3. Analyse der Eingabedaten . . . . .	11
4.4. Analyse der PCA-Ergebnisse . . . . .	14
<b>5. Implementierungsdetails</b>	<b>18</b>
5.1. Programmiersprache . . . . .	18
5.2. Dateiformate . . . . .	18
5.2.1. OpenSim . . . . .	18
5.2.2. OBJ . . . . .	19
5.2.3. FBX . . . . .	19
5.2.4. Alembic . . . . .	19
5.3. Interaktivität . . . . .	20
5.4. Technische Umsetzung . . . . .	20
5.5. Transformationsmatrizen . . . . .	20
5.6. PCA . . . . .	20
5.6.1. Annotation der Bilder . . . . .	20
5.6.2. Anpassung der PCA-Ergebnisse zur Weiterverarbeitung . . . . .	22
<b>Literatur</b>	<b>23</b>

<b>Anhang A. Vergleichende Anatomie</b>	<b>24</b>
<b>Anhang B. D'Arcy Thompson</b>	<b>27</b>
<b>Anhang C. Erhobene Daten für PCA</b>	<b>28</b>
C.1. Skelettbilder . . . . .	28
C.2. Gewicht der Tiere . . . . .	32



# 1. Bisherige Arbeiten

## 1.1. Ziva

- Ziva VFX Maya Plugin zur Erstellung von Charakteren und Simulation von biomechanischen Bewegungen <https://zivadynamics.com/>
- Charaktererstellung in Ziva beginnt mit der Modellierung des Skeletts. Knochen mit Animationen werden als Alembic-Datei gespeichert und dann in „Ziva-Knochen“ konvertiert. <https://discover.therookies.co/2019/06/01/vfx-in-9-steps/>

## 1.2. ZSpheres in Zbrush

- <http://docs.pixologic.com/user-guide/3d-modeling/modeling-basics/creating-meshes/zspheres/>,  
Beispielvideo: <https://www.youtube.com/watch?v=Wl0XK6ggU0A>
- Möglichkeit ein „Skelett“ aus Kugeln zu erstellen. Definiert aber eher die grobe Außenhaut mit Zusatzinformationen dazu wo die Gelenke sind.

## 1.3. 3DS MAX Biped

- <https://knowledge.autodesk.com/support/3ds-max/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2019/ENU/3DSMax-Character-Animation/files/GUID-2F6BC5D1-DD45-4C2E-AC3A-D8C.html>
- Möglichkeit Skelett in einen fertig modellierten Körper einzupassen.
- Skelette sind schon vorgefertigt.
- v.a. für menschliche Skelette, aber auch (limitiert) anpassbar auf Tiere

## 1.4. Forensik und Archäologie

- forensische Gesichtsrekonstruktion ist spezialisiert auf Menschen und verwendet Zusatzinformationen wie Stockfotos von Gesichtsmerkmalen ([https://en.wikipedia.org/wiki/Forensic\\_facial\\_reconstruction](https://en.wikipedia.org/wiki/Forensic_facial_reconstruction))
- Rekonstruktion von Tieren in der Archäologie anhand des Skeletts v.a. durch Künstler (?)

## 1.5. No Man's Sky

- Webseite [3]
- „For creatures, basic templates of creatures that exist on the Earth were created and then manipulated by the system, changing everything from height, weight, bone density, voice pitch, what it eats, and its behaviors, even creating variation within the species.“ (<https://nomanssky.fandom.com/wiki/Biology>)
- „Creatures were often generated by mixing and matching random parts from a library, and then adjusting the underlying skeleton so that the creature appeared realistic; a creature with a tiny body could not support a giant head, for example.“ ([https://en.wikipedia.org/wiki/Development\\_of\\_No\\_Man%27s\\_Sky](https://en.wikipedia.org/wiki/Development_of_No_Man%27s_Sky))
- Zunächst Generierung von äußerem 3D-Modell, dann Anpassung der Knochen.

## 2. Biologie

- „Wirbeltiere (Vertebrata) [...] Von vielen Zoologen wird heute der Begriff Schädeltiere (Craniota) für dieses Taxon bevorzugt. Diese Auffassung berücksichtigt, dass die Rundmäuler, wie auch einige andere Wirbeltiere, als Achsenknochenkette keine Wirbelsäule, sondern eine Chorda dorsalis haben. Doch allen Wirbeltieren gemein ist ein verknöchelter oder knorpeliger Schädel; sein Vorhandensein gehört somit zu den gemeinsam abgeleiteten Merkmalen (Synapomorphien) dieser Chordaten-Gruppe.“ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Wirbeltiere>) → Beschränkung auf Schädeltiere mit Wirbelsäule
- „Dem Skelett der Wirbeltiere sind viele Gemeinsamkeiten ansehbar, trotzdem unterscheidet es sich, je nach Lebensraum und Anforderungen, teilweise erheblich. Mit diesen Gemeinsamkeiten und Unterschieden beschäftigt sich die Vergleichende Anatomie.“ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Skelett#Wirbeltiere>) Notizen zu [2] siehe Anhang A.
- Das Skelett eines Wirbeltiers ist nicht unbedingt zusammenhängend.
- „Säugetiere haben in der Regel sieben Halswirbel.“ Es kann aber zwischen 6 und 31 variieren. Vögel haben zwischen 10 und 31 und zwei Tiere haben 6 Wirbel. (<https://de.wikipedia.org/wiki/Halswirbel>)
- Form der Wirbelsäule siehe <https://de.wikipedia.org/wiki/Wirbels%C3%A4ule>

### 3. Idee

1. Erzeugung eines Wirbeltierskeletts
2. Erzeugung von Muskeln (future work)
3. Erzeugung von Haut (future work / kurz ausprobieren)
4. Erzeugung von vielen Skelettvarianten bei Eingabe eines Skeletts (nur wenn es relativ leicht möglich ist)

#### 3.1. Skelett

- Iterative Erzeugung eines Skeletts durch eine probabilistische kontextfreie (?) Grammatik, die so erweitert ist, dass sie nicht ein einfaches Wort erzeugt, sondern einen Baum von Zeichen (nötig für Extremitäten). Verwendung von paramterischen L-Systemen [1] könnte sinnvoll sein.
- Regeln sind nicht wirklich eine Grammatik, da fast jedes nichtterminale Literal nur einmal vorkommt, wenn es für jedes Körperteil andere Regeln gibt. Oder ist es möglich so zu abstrahieren, dass z.B. Arme und Beine den gleichen/ähnlichen Regeln unterliegen? Ist das sinnvoll? (**Abstraktionsgrad, Art der Regeln**)  
Außerdem ist das Skelett nicht unbedingt zusammenhängend (siehe Biologie). → Darauf achten, dass das nicht von Algorithmus verlangt wird
- Regeln wichtig, die dafür sorgen, dass das Tier am Ende auch funktional ist.
- Darstellung des Skeletts in „sinnvoller“ Pose.
- Beachte, dass Tier nicht umfällt: berechne Drehmomente um Kontaktpunkte mit Boden. Dafür sind aber Muskeln bzw. Masse wichtig → Schätzung der Masse anhand der Knochengröße bzw. Größe der Bounding Box?
- Der Zufall ist eingeschränkt durch Eingabeparameter oder Benutzereingabe (siehe Interaktivität). Ähnliche Parameter sollten zu ähnlichem Tier führen. Parameter könnten folgendes beschreiben:
  - äußere Einflüsse (Klima, Terrain, Lebensraum, . . . )
  - Proportionen (länge der Extremitäten, Kopfgröße, . . . )
  - Anzahl vorhandener Gliedmaßen / Zehen / . . .

**ToDo**

- Ein Skelett besteht aus Knochen, Gelenken und deren (relativen) Positionen und Orientierungen.
- Ein Knochen ist im einfachsten Fall ein Zylinder (Strecke) mit Länge und Radius, kann aber auch eine konvexe Kurve mit einem Radius sein.
- Ein Gelenk hat keine Ausdehnung (?). Es ist das Verbindungsstück zwischen zwei oder mehr Knochen und legt fest wie die Knochen sich relativ zueinander bewegen können. Werden mehr als zwei Knochen verbunden ist es einfach eine feste Verbindung.
- 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.
- Köpfe sind kompliziert → Auswahl an Köpfen bereitstellen (evtl. leicht skalier-/verformbar oder ineinander überführbar)
- Brustbein sorgt dafür, dass Skelett nicht mehr baumartig → erstmal weglassen, ist wahrscheinlich auch nicht unglaublich relevant

### 3.1.1. Extremitäten

- <https://de.wikipedia.org/wiki/Extremit%C3%A4tenrevolution>
- „Die paarigen Flossen von Fischen und Extremitäten von Tetrapoden sind insofern homologe Skelettelemente, als sie bei beiden an Schulter- und Beckengürtel ansetzen und die Extremitäten aus den paarigen Flossen evolutionär hervorgegangen sind.[4] Sie unterschieden sich jedoch im Knochenaufbau und in der Embryonalentwicklung, so dass ein evolutionärer Übergang aus den Einzelementen schwer erklärbar ist.“  
→ einfach ignorieren und trotzdem (erstmal) so modellieren?

## 3.2. 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

## 3.3. 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.html>
- 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“

### 3.4. 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

### 3.5. Datenstrukturen

#### 3.5.1. Terminale

- Terminale zunächst als Bounding Box. Später werden sie durch Knochenmodelle ersetzt. Für jeden möglichen Knochen wird ein Modell gespeichert. Diese Modelle werden so skaliert, dass sie einen 1x1-Würfel ausfüllen. So kann dann später leicht die Skalierung auf diesen Würfel übertragen werden.
- Knochen: Bounding Box bzw. Skalierung in drei Raumrichtungen, Position, Orientierungen und Name bzw. ID (wird für Ersetzung benötigt).
- Knochen in Hierarchie anordnen und Position und Rotation relativ zu Elternelement angeben, da damit Erzeugung von Kindelementen einfacher → verwende homogene Koordinaten.

Bei der Erzeugung von Elementen auf der Wirbelsäule ist das nicht einfacher. Aber alle Algorithmen, die Tiere animieren brauchen eine Hierarchie, deshalb ist das wichtig. ([Quelle, Beispiele](#))

- ToDo**
- Gelenke: Position, Bewegungseinschränkungen für alle drei Richtungen. In einer Hierarchie verbindet das Gelenk ein Kindelement mit seinem Elternelement. Gelenk ist hier ein Punkt, der im Koordinatensystem des Elternelements angegeben wird, und um den das Koordinatensystem des Kindelements gedreht werden kann/soll.  
Das macht es sinnvoll ein Kindelement erst zu erzeugen, wenn das dazugehörige Elternelement terminal ist. Sonst weiß man noch nicht so genau wie das Gelenk aussehen soll. Mit etwas mehr Aufwand lässt sich das aber auch im Nachhinein noch anpassen...

([Bewegungseinschränkungen für bestimmtes Gelenk bei jedem Tier gleich? Wie Einschränkungen erzeugen?](#)),

- ToDo**
- Erzeugung von Kindelementen nicht nur von direktem Elternteil abhängig → Abhängigkeiten zwischen entfernten Teilen nötig; auch für Balance nützlich. „Kommunikation“ über Überobjekt, das auch alle Einzelteile speichert. (SkeletonGenerator)

#### 3.5.2. „Wachstum“

- Lage der Wirbelsäule am Anfang festlegen, da sie der zentrale Teil des Körpers ist und die Lage der anderen Körperteile grob festlegt. Form variiert von Gerade (Fisch) bis geschwungener Hals und Schwanz (z.B. Giraffe). Mensch passt hier nicht ganz ins Schema → weglassen?
- Position der Wirbelsäule wird zu Beginn durch ein, oder mehrere, Beziérkurve(n) festgelegt. Außerdem wird gestgelegt wo Elemente ansetzen, die nicht einfach Wirbel sind, z. B. Extremitäten. Von diesen Punkten aus, kann das Skelett dann weiter

„wachsen“. Diese Positionierung der Wirbelsäule legt die Länge und die Höhe des Tiers fest. Außerdem natürlich den Verlauf der Wirbelsäule, also z. B. auch die Länge des Halses.

Regel, die zunächst sinnvoll klingt: Ansatzpunkte der Extremitäten an der Wirbelsäule können nur in Bereichen der Kurve sein, an denen die Steigung nahe null ist.

- Wachstum unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen wie Bodenposition, Anzahl Extremitäten etc. Bounding Box für Nichtterminale ist dafür aber nicht nötig.
- Die Knochen sollen eine Hierarchie (Baum) bilden. Am besten ist ein Knochen in der Nähe des Schwerpunkts (oft wird die Hüfte verwendet). Die Hüfte gibt es aber nicht immer. Verwende ersten Wirbel nach dem Brustkorb (falls existent).

### 3.5.3. Balance

Berechnung der Balance: Drehmomente der Knochen (benötigt Position der Knochen und Gewicht) → zunächst nicht nötig, da Position der Wirbelsäule zu Beginn mit Beziérkurve festgelegt wird

- Drehmoment  $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ , mit Ortsvektor  $\vec{r}$  vom Bezugspunkt des Drehmoments zum Angriffspunkt der Kraft  $\vec{F}$ . Betrag des Drehmoments  $M = r \cdot F \cdot \sin(\alpha)$ , mit dem Winkel  $\alpha$  zwischen  $\vec{F}$  und  $\vec{r}$ .  
(<https://de.wikipedia.org/wiki/Drehmoment>)
  - Kraft, die auf Knochen wirkt: resultierende Kraft der Streckenlast, die durch zugewiesenes Gewicht erzeugt wird. Der Einfachheit halber einfach rechteckige Streckenlast annehmen, dann greift Kraft am Mittelpunkt der Strecke und  $\vec{F} = \frac{1}{2}mg^1$ , mit Masse  $m$  und Erdbeschleunigung  $g$   
(<https://www.der-wirtschaftsingenieur.de/index.php/streckenlast/>, <https://www.youtube.com/watch?v=T1Sf8GPD4dc>)
  - Reduzierung des Problems auf zwei Dimensionen, da Körper so aufgebaut ist, dass er nur nach vorne oder hinten umkippen kann und nicht zur Seite.
  - Damit Körper immer in Balance ist, muss auch nicht terminalen Teilen ein Drehmoment (und damit auch implizit ein Gewicht) zugewiesen werden. Werden aus diesen Nichtterminalen dann neue Teile generiert, so muss das Drehmoment bzw. die Summe der einzelnen Drehmomente gleich bleiben.
  - Der Bezugspunkt für die Berechnung der Drehmomente ist der Schwerpunkt des Körpers, da sich dort alle durch das Eigengewicht wirkenden Drehmomente des Körpers zu null aufzufaddieren.  
(<https://www.grund-wissen.de/physik/mechanik/drehmoment-und-gleichgewicht.html>)
- Das heißt zu Beginn der Generierung muss der Schwerpunkt des Körpers festgelegt werden, damit die Drehmomente berechnet werden können. Das ist am Anfang aber sehr einfach, da das initiale Element die Bounding Box des Gesamten Skeletts ist. Also ist der Schwerpunkt der Mittelpunkt.

---

<sup>1</sup>Die Formel zu rechteckigen Streckenlasten, die man so findet ist  $\vec{F} = \frac{1}{2}Lq_0$ , mit Länge der Strecke  $L$  und den auf der Strecke verteilten Einzellasten  $q_0$ , aber  $Lq_0 = mg$ . Daraus folgt obige Formel.

## 4. PCA

Eine *Principal Component Analysis* (PCA) oder auch Hauptkomponentenanalyse auf einer Menge von Beispielen findet diejenigen Dimensionen, in denen sich die Beispiele am meisten unterscheiden, die „principle components“. Das Ziel dabei ist in den meisten Fällen die Dimensionalität der Daten zu reduzieren. Das wird dadurch erreicht, dass die Eingabedaten nur noch durch die „primary components“ dargestellt werden, da die anderen Dimensionen optimalerweise nur einen marginalen Einfluss auf die Daten haben.

Das Ziel hier, war vor allem die Position und Krümmung der Wirbelsäule bei unterschiedlichen Tieren zu untersuchen, da diese sehr charakteristische Merkmale eines Skeletts sind. Aus dem gleichen Grund soll der Algorithmus zur Generierung der Skelette mit der Generierung der Wirbelsäule starten und daraus dann den Rest der Knochen „wachsen“ lassen. Die Hoffnung hier ist auch, dass dadurch Skelette generiert werden, die ausbalanciert wirken. Es soll nichts generiert werden, das aussieht, als würde es sofort umfallen. (**Hat das funktioniert?**)

**ToDo**

Eine PCA, die als Eingabe viele Beispiele für Wirbelsäulen und ein paar weiteren Daten zum zugehörigen Tier bekommt, ist hier sehr hilfreich, da sie Zusammenhänge für die Positionierung der Wirbelsäule liefert.

### 4.1. Funktionsweise

**ToDo**

(**PCA Quelle**)

Die Eingabe für eine PCA ist eine Menge von Punkten. Diese Punkte repräsentieren einzelne Instanzen dessen, was untersucht werden soll, hier ein Skelett. Für jede Eigenschaft des Skeletts hat der Punkt eine Dimension. Gegeben ist also eine Menge von Punkten  $P$  mit jeweils  $d$  Dimensionen. Es wird angenommen, dass die Punkte in jeder Dimension normal-/gaußverteilt sind. Dann bilden die Punkte im  $d$ -dimensionalen Raum einen Ellipsoid.

Das Ziel der PCA ist herauszufinden wo die Achsen des Ellipsoids liegen, also wie die Eingabedimensionen miteinander korreliert sind. Interessant sind dabei die Achsen in deren Richtung die Daten die große Streuung aufweisen.

Um diese Achsen zu Berechnen wird zunächst die Kovarianzmatrix aufgestellt, deren Einträge die Kovarianz zwischen den verschiedenen Achsen beschreibt. Die Eigenvektoren dieser Kovarianzmatrix sind dann die Achsen des Ellipsoids und die zugehörigen Eigenwerte

geben an wie groß die Varianz in dieser Richtung ist, also weit ausgedehnt das Ellipsoid in dieser Richtung ist. Der Mittelpunkt des Ellipsoids ist der Mittelwert der Daten.

Will man nun herausfinden was die Haupteigenschaften eines Datenpunktes sind, stellt man ihn im neuen Koordinatensystem des Ellipsoids dar, also als gewichtete Summe der Eigenvektoren, und betrachtet dann nur die Dimensionen mit den größten Eigenwerten. Dazu zieht man zunächst den Mittelwert vom Datenpunkt ab und multipliziert ihn dann mit der transponierten Basiswechselmatrix, also der Matrix, in der in den Zeilen die Eigenvektoren stehen.

## 4.2. Datenerhebung

Die konkret erhobenen Beispiele sind vor allem der Datenlage bzw. der zugänglichen Quellen geschuldet. Trotzdem wurde darauf geachtet möglichst viele unterschiedliche Tierarten mit viel Variation in den erhobenen Merkmalen zu finden.

Viele Beispiele stammen Zoologiebüchern, in denen sie als Beispiele für bestimmte Erklärungen angegeben waren (Bildquellen siehe Anhang C.1). Dem ist auch geschuldet, dass recht viele Dinosaurierskelette dabei sind. Denn von anderen Tieren gibt es als alternative Darstellung eine Außenansicht des lebenden Tieres. Das geht bei ausgestorbenen Tieren im Allgemeinen nicht.

Die Merkmale, die zur Datenerhebung ausgesucht wurden, sind charakteristisch für ein Skelett, sie 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. Am einfachsten zu bekommen sind 2D-Bilder mit Seitenansichten von Skeletten. Das schließt Merkmale aus, die Tiefeninformationen benötigen, z. B. den Abstand der Füße oder die Winkel der Gelenke an den Beinen. Auch Informationen zu sehr kleinen Knochen, wie Handwurzelknochen oder die unterschiedlichen Fingerknochen, sind schwierig zu bekommen, da sie teilweise schwierig zu erkennen und zu markieren sind. Deshalb haben wir 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.  
(Die Quellen der Bilder sind in Anhang C.1 zu finden.)
- Die Tierklasse, also ob das Tier ein Fisch, ein Amphib, ein Reptil oder ein Säugetier ist. Diese Daten lassen sich nicht auf einer kontinuierlichen Skala abbilden und sind deshalb nicht als Eingabedimension für die PCA geeignet. Sie wurden trotzdem erhoben, da sie für eine anderweitige Auswertung hilfreich sein könnten.
- Ob Flügel vorhanden sind.
- Die Anzahl der Beine mit Bodenkontakt geteilt durch zwei. (Die Skalierung mit 2 ist nicht relevant für die PCA, soll aber repräsentieren, dass ein Tier immer eine gerade Anzahl an Extremitäten besitzt.)
- Das ungefähre Gewicht eines ausgewachsenen Exemplars in Kilogramm. Hier wurde oft das maximale Gewicht verwendet, da keine Angaben zum Durchschnittsgewicht zu finden waren. Teilweise gibt es auch verschiedene (Unter-)Arten, die unterschiedlich schwer werden können, aber, bei der Auflösung der hier erhobenen Daten, das gleiche Gewicht haben. In diesem Fall wurde ein beliebiger Wert gewählt, der zwischen dem Gewicht der leichtesten und dem der schwersten (Unter-)Art liegt. (Die Quellen hierfür sind im Anhang C.2 zu finden.)

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.

Die Lage der Wirbelsäule wird durch drei kubische Bézierkurven erfasst. Jeweils einer für Hals, Rücken und Schwanz. Hals und Rücken teilen sich einen Punkt und Rücken und Schwanz. Die Punkte an denen sie ineinander übergehen sind der Schultergürtel und der Beckengürtel. Das sind die ersten 20 Eingabedimensionen für die 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.

Zusätzlich wird jeweils durch eine Gerade im Bild die Länge des Ober- und Unterarms, der Hand, des Ober- und Unterschenkels und des Fußes eingetragen, falls vorhanden. Die Bezeichnung der Extremität als Arm oder Bein ist nur zur Unterscheidung zwischen Vorder- und Hinterextremitäten gedacht. Sie hat in keiner Weise etwas mit der Funktion der Gliedmaßen zu tun.

Zusätzlich zum Bild gibt es noch eine Textdatei, in der die restlichen Daten erfasst werden.

Alle erfassten Dimensionen werden vor der Weiterverarbeitung durch die PCA auf das Intervall  $[0, 1]$  skaliert, so dass jede Dimension den gleichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Um das zu erreichen werden alle Daten einer Dimension durch den maximal möglichen Wert geteilt.

- Koordinaten oder Längen im Bild liegen im Intervall  $[0, 1000]$ , da sie in Pixeln dargestellt werden und das Bild eine Größe von  $1000 \times 1000$  Pixel hat. Deshalb werden sie mit 1000 skaliert. Bei Längen wären theoretisch auch Werte  $> 1000$  möglich. Solche Längen wären aber unrealistisch und werden deshalb ignoriert.
- Die Angabe, ob das Tier Flügel hat oder nicht, wird mit 0 oder 1 dargestellt, muss also nicht skaliert werden.
- Die Anzahl der Extremitäten geteilt durch 2 ist maximal 2, wird also mit 2 skaliert.
- Das Gewichtsdaten sind nicht normalverteilt. Stellt man sie aber mit logarithmischer Skala dar, sind sie das (siehe unten, „Analyse der Eingabedaten“). Deshalb wird das Gewicht  $w$  für die PCA wie folgt umgerechnet:  $\frac{\log(w+1)}{\log(\max+1)}$ . Das schwerste Wirkeltier ist der Blauwal mit bis zu 120 Tonnen (siehe C.2). Deshalb ist hier  $\max = 120.000$ .

Generell bewirkt die Skalierung einer Dimension eine Gewichtung. Denn durch eine Skalierung ändert sich auch die (Co-)Varianz und somit auch die Kovarianzmatrix. Seien beispielsweise  $s, t \in \mathbb{R}$ , dann bewirkt eine Skalierung mit  $s$  in Dimension  $x$  und eine Skalierung mit  $t$  in Dimension  $y$  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  $\mu_i$  in Dimension  $i$ .

Die Daten einer Dimension werden nicht mit dem maximal angenommenen Wert skaliert, sondern mit dem maximal möglichen. Das bedeutet bei Koordinaten und Längen im Bild,

dass sie größeren bzw. kleineren Einfluss haben, je nach dem wieviel Raum sie im Bild einnehmen, also wieviel sie zum Gesamteindruck des Tieres beitragen.

Eine andere Skalierung, die manchen Dimensionen mehr oder weniger Gewicht gibt, wäre sicherlich auch möglich gewesen. Da es aber keine besonderen Gründe für eine andere Skalierung gab, wurde diese gewählt.

#### 4.2.1. Schwierigkeiten

- Bei Fischen ist nicht klar wo Rücken in Schwanz übergeht, da der Beckengürtel sich teilweise beim Kopf befindet oder auch gar nicht vorhanden ist. Bei der Datenerhebung wurde der Übergang ungefähr bei der Rücken- oder der Afterflosse festgelegt, da dies relativ gut zum Algorithmus passt.
- Hals und Schwanz von manchen Tieren ist mit einer kubischen Bézierskurve nicht darstellbar. Das ist unter den verwendeten Beispielen der Hals von Ichthyornis und vom Schwan und der Schwanz vom Ichthyosaurus und vom Koboldmaki. In diesem Fällen wurde versucht die Form möglichst gut anzunähern oder Fortsätze (wie am Schwanz vom Ichthyosaurus) die im Algorithmus wahrscheinlich sowieso nicht abgebildet werden, 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 irgendwie eingerollt ist.

### 4.3. Analyse der Eingabedaten

Insgesamt wurden 44 Datenpunkte erhoben. Das entspricht bei 29 Dimensionen  $44 \cdot 44 = 1276$  Zahlen als Eingabe. Das Ergebnis der PCA ist im wesentlichen die  $29 \times 29$  große Kovarianzmatrix. Das sind 841 bzw.  $\frac{29 \cdot 30}{2} = 435$  Zahlen als Ausgabe. Da  $1276 < 435$ , ist das eine ausreichende Menge an erhobenen Beispielen. (**bessere Begründung?**)

**ToDo**

Der Mittelwert aller Eingabedaten ist in Abbildung 4.1 visualisiert. (**Werte der Mittelwertvisualisierung angeben wenn zuletzt aktualiert, damit Bild nicht so groß sein muss**) Wie die bei der Datenerhebung ist hier die Position der Wirbelsäule auf einem  $1000 \times 1000$  Pixel Bild gezeigt. Da von den Knochen der Beine und Arme nur die Längen erhoben wurden, sind ihre Positionen nicht realistisch. Die Ober- und Unterschenkel und die Ober- und Unterarme, sind von den Übergangspunkten Hals-Rücken und Rücken-Schwanz senkrecht nach unten gezeichnet, Hand und Fuß sind vom jeweiligen Endpunkt von Arm oder Bein horizontal nach links gezeichnet. Die restlichen Daten sind nicht visualisiert, sondern nur in Textform in der oberen linken Ecke angegeben.

**ToDo**

Berachtet man die, in jeder Dimension auf das Intervall  $[0, 1]$  skalierten Eingabedaten, so hat der Seehund den minimalen Abstand zum Mittelwert (siehe Abbildung 4.2a).

Den maximalen Abstand hat die Schlange. Hier muss man aber dazu sagen, dass die Schlange der einzige Datenpunkt ohne Skelettbild ist. 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. Deshalb wurde für die Schlange eine horizontale Gerade knapp über dem unteren Bildrand gewählt, die den Rücken darstellen soll. Extremitäten und ersichtliche Punkte an denen der Rücken in Hals oder Schwanz übergeht gibt es ja keine.

Der Punkt mit dem zweitgrößten Abstand zum Mittelwert ist der Schwan (siehe Abbildung 4.2b).

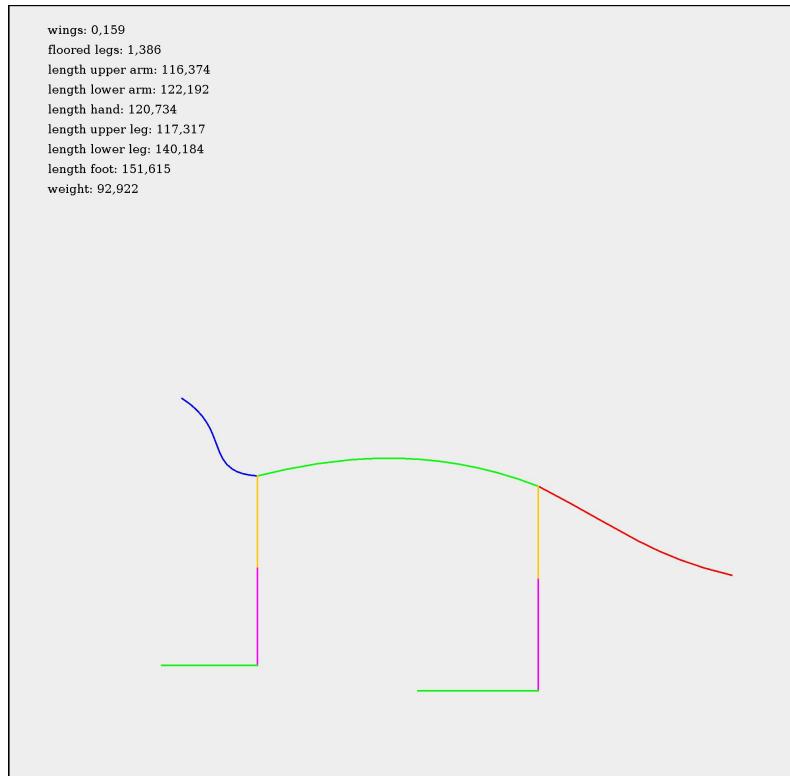


Abbildung 4.1.: Visualisierung des Mittelwerts der Eingabedaten. Die Werte, die nicht visualisiert sind, sind folgende: ...

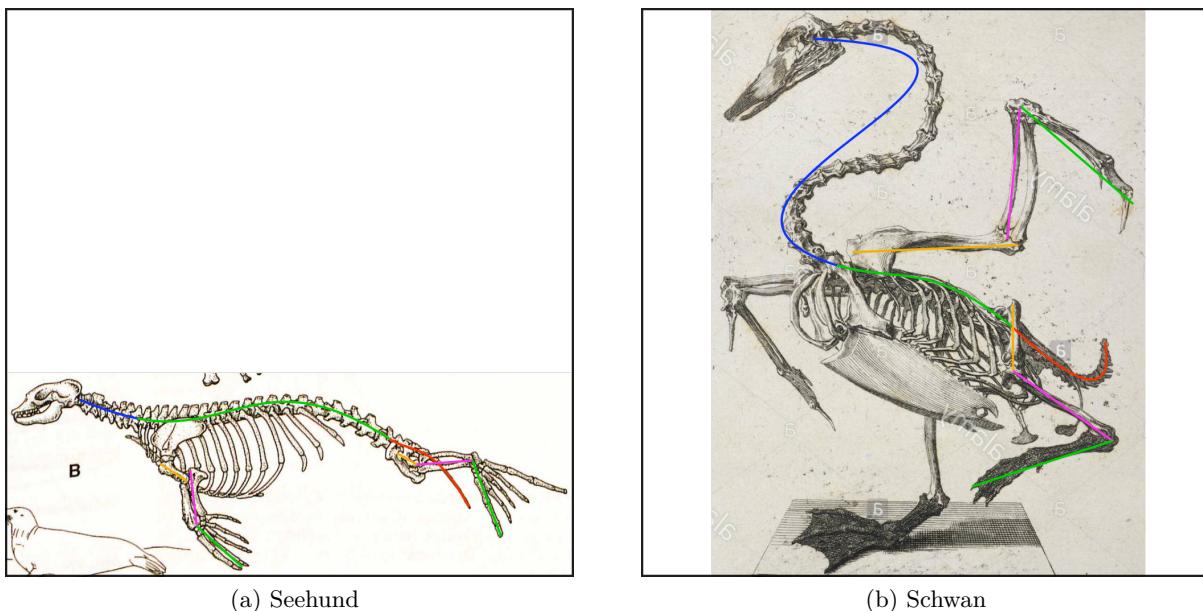


Abbildung 4.2.: Annotierte Bild des Skeletts eines Seehunds(a) und eines Schwans(b). Zusätzlich wurde zum Seehund erhoben: Tierklasse: Säugetier, keine Flügel, Paare von Beinen mit Bodenkontakt: 1, ungefähres Gewicht: 100k; und zum Schwan: Tierklasse: Vogel, Flügel, Paare von Beinen mit Bodenkontakt: 1, ungefähres Gewicht: 14kg.

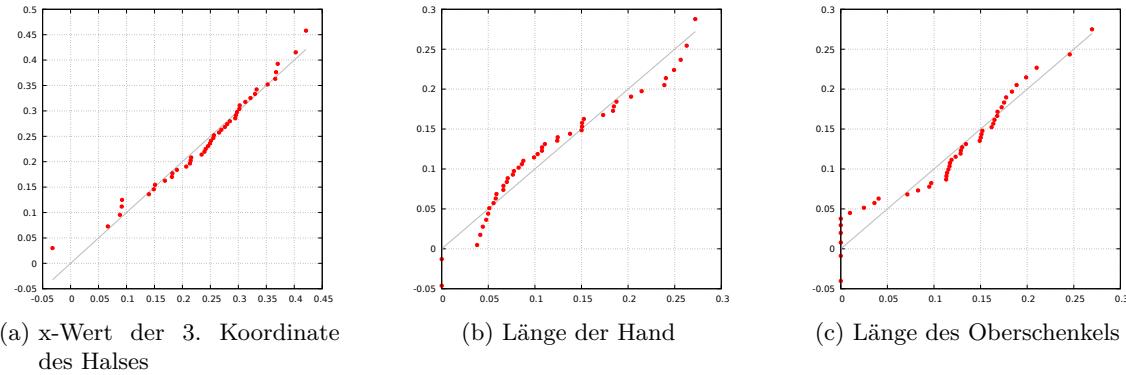


Abbildung 4.3.: Beispielhaft ausgewählte Quantil-Quantil-Diagramme von drei Eingabedimensionen. (a) ist weicht nicht stark von der Normalverteilung ab, (b) und (c) hingegen schon mehr.

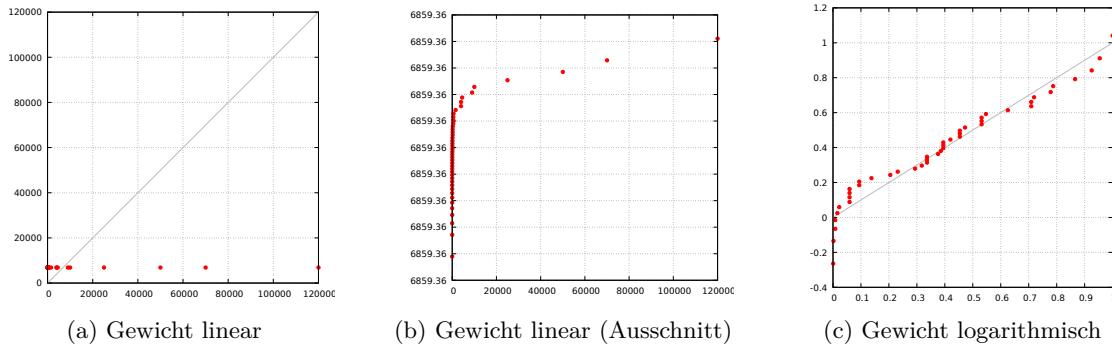


Abbildung 4.4.: Quantil-Quantil-Diagramme des Gewichts, einmal linear (a,b) und einmal mit logarithmischer Skala (b)

Eine Voraussetzung der PCA ist, dass die Eingabedaten in jeder Dimension normalverteilt sind. Es gibt die beiden Merkmale *Flügel* und *Beine mit Bodenkontakt*, die offensichtlich nicht normalverteilt sind, da sie diskret nur ein bzw. zwei Werte annehmen können. Hierzu weiter unten mehr. Die anderen Dimensionen wurden mithilfe eines Quantil-Quantil-Diagramms mit der Normalverteilung verglichen. (**QQ Diagramme erklären**) Die Diagramm zeigen, dass die Dimensionen alle mehr oder weniger normalverteilt sind (siehe Abbildungen 4.3 und im Anhang Abbildungen C.1 und C.2). Für das Merkmal *Gewicht* gilt dies aber nur, da es logarithmisch in die PCA eingeht. Die Verteilung der originalen Gewichte weicht sehr deutlich von einer Normalverteilung ab (siehe Abbildungen 4.4). Verwendet man das lineare Gewicht als Eingabe für die PCA, treten dadurch bei der Kombination von zufälligen Werten für die Eigenvektoren schnell Gewichte kleiner null auf. Dies wird bei einer logarithmischen Skala vermieden. Welcher Logarithmus zur Umrechnung der Daten verwendet wird schlägt sich nur als linearer Faktor nieder. Da hier wiederum nicht ersichtlich ist welche Skalierung am besten wäre, wurde hier der Zehnerlogarithmus verwendet.

**To Do**

Im Folgenden werden die drei diskreten Merkmale *Tierklasse*, *Anzahl Beine mit Bodenkontakt* und *vorhandene Flügel* genauer betrachtet.

In Abbildung 4.5 ist jeweils die Projektion der Daten auf die ersten beiden Eigenvektoren zu sehen. Klar zu erkennen ist, dass die Tiere mit Flügeln ein Cluster bilden. Betrachtet man die Daten annotiert mit der Tierklasse, so ebenfalls ein Cluster zu erkennen, das der Vögel. Das liegt daran, dass in den erhobenen Daten genau diejenigen Beispiele Flügel

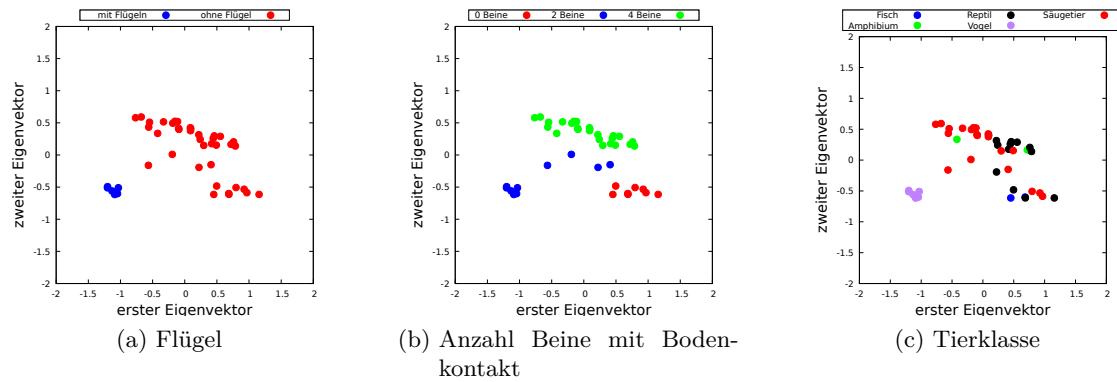


Abbildung 4.5.: Projektion der Eingabedaten auf die Ebene, die durch den ersten und zweiten Eigenvektor aufgespannt wird. Markiert sind jeweils verschiedene Merkmale der Punkte.

haben, die auch Vögel sind. Die restlichen Tierklassen hingegen bilden keine Cluster. Die Anzahl der Beine wiederum scheint ein gutes Unterscheidungsmerkmal zu sein. Hier sieht man wieder das Cluster der Vögel (in blau) mit vier Punkten zusätzlich, nämlich dem Känguru, dem Tyrannosaurus Rex, dem Seehund und der Ohrenrobbe. Und auch die anderen Gruppen bilden Cluster.

Skaliert man Flügel und Beine um Faktor 1000 kleiner, so verschwinden die Cluster (siehe Abbildung ...) (**Skalierung Beschreiben (auch schon in den vorherigen Abschnitten), Veränderung der betragsmäßig größte Einträge in ersten 4 Eigenvektoren erwähnen (beim 4. Eigenvektor ist das Gewicht groß, obwohl runterskaliert, \*1000 ist aber auch nur \*4 wegen log) und Abbildungen einfügen)**)

**ToDo**

#### 4.4. Analyse der PCA-Ergebnisse

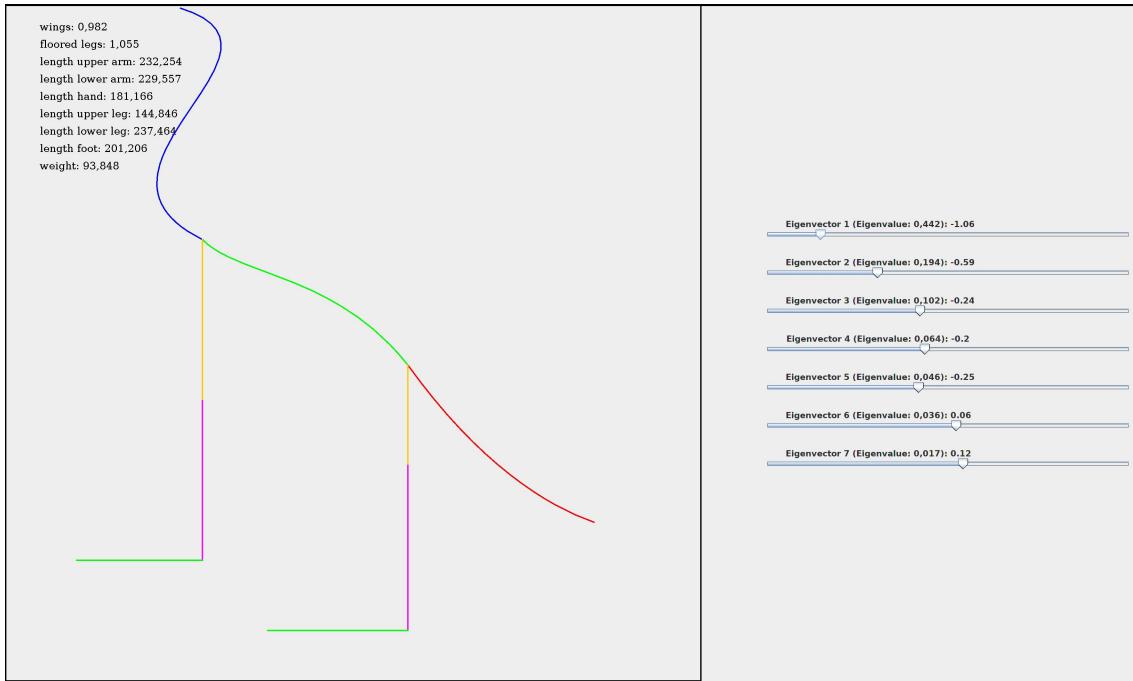
Von 29 Eingabedimensionen gibt es auch 29 Eigenvektoren mit Eigenwerten größer 0. Der kleinste hat einen Wert von 0,000024. Von den Eigenwerten sind 7 größer als 0,01. Leider reichen diese 7 Dimensionen aber noch nicht aus, um die Eingabedaten hinreichend anzunähern. Bei manchen Tieren funktioniert das ganz gut (siehe Archaeopteryx, Abbildung 4.6), bei anderen aber eher schlechter (siehe Frosch, Abbildung 4.7). Die Daten konnten somit von der PCA nicht besonders gut komprimiert werden. Trotzdem sind die berechneten Eigenvektoren hilfreich für die (Weiter-)Entwicklung des Algorithmus. (**wenn Algo weiterentwickelt, beschreiben**)

**ToDo**

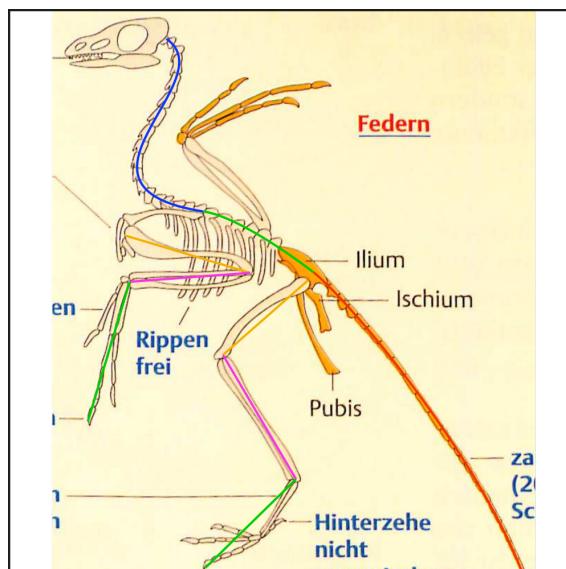
In den Abbildungen, die die Eingabedaten im transformierten Koordinatensystem der PCA darstellen (Abbildung 4.5) ist gut zu erkennen, dass die Koordinatentransformation der PCA die Daten tatsächlich nach den Hauptachsen des mehrdimensionalen Ellipsoids, den die Datenpunkte bilden, ausrichtet.

Bei allen Eingabedimension, außer der Position der Wirbelsäule, kann man sich die Frage stellen, ob sie nötig sind, oder ob sie eher die Ergebnisse der PCA verschlechtern. Es wurde ausprobiert verschiedene (Kombinationen von) Merkmalen wegzulassen. Die Ergebnisse unterscheiden sich nicht extrem 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. Aber das liefert, durch das Fehlen von verschiedenen Dimensionen kein einheitliches Maß.



(a) Rekonstruktion

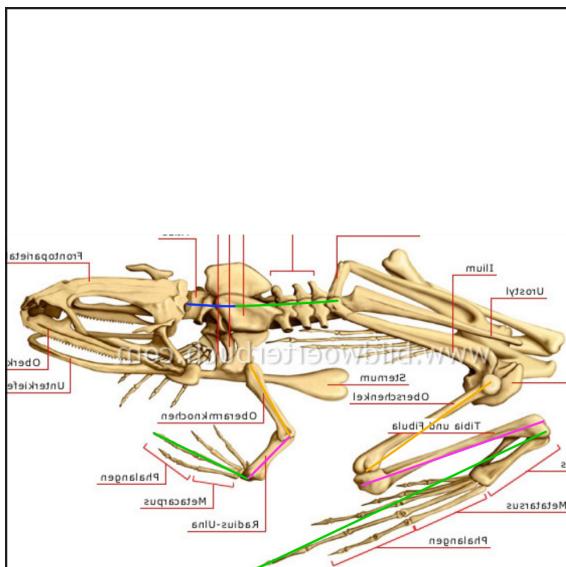


(b) Eingabebild

Abbildung 4.6.: Archaeopteryx (a) Rekonstruktion aus den größten 7 Eigenvektoren, (b) Eingabebild, zusätzlich erhobene Daten sind: Tierklasse: Vogel, Flügel, Paare von Beinen mit Bodenkontakt: 1, ungefähres Gewicht: 1kg



### (a) Rekonstruktion



(b) Eingabebild

Abbildung 4.7.: Frosch (a) Rekonstruktion aus den größten 7 Eigenvektoren, (b) Eingabebild, zusätzlich erhobene Daten sind: Tierklasse: Amphib, keine Flügel, Paare von Beinen mit Bodenkontakt: 2, ungefähres Gewicht: 0,01kg

Da jede Dimension dem Algorithmus, der später Skelette generieren soll, helfen könnte, haben wir uns dafür entschieden alle Merkmale zu behalten.

Außerdem gibt es die Möglichkeit die Eingabedaten in mehrere Mengen aufzuteilen und diese von verschiedenen Instanzen der PCA analysieren zu lassen. Hierbei gibt es zunächst das Problem, dass sich dann die Anzahl der Datenpunkte noch weiter reduziert, was die Ergebnisse nicht mehr repräsentativ macht. Ein Merkmal, das sich zur Unterteilung in Mengen anbieten würde, ist die Angabe ob das Tier Flügel hat oder nicht, da sich dadurch nur zwei Gruppen ergeben. Außerdem ist die Gruppe der Tiere mit Flügeln in den Eingabedaten klar als Cluster zu erkennen (siehe auch Abschnitt 4.3). Tatsächlich liefert eine solche Aufteilung bessere Rekonstruktionen aus der größten Eigenvektoren, aber das liegt natürlich vor allem daran, dass die zu untersuchende Datenmenge, jeweils verkleinert wurde.

Ein Problem dabei ist, dass dann keine Skelette mehr erzeugt werden können, die zwischen den beiden Gruppen liegen. Tatsächlich scheinen die Datenpunkte, die „zwischen“ den Gruppen erzeugt werden, relativ sinnvoll auszusehen. Das wäre ein Argument dafür keine Aufteilung vorzunehmen. Dasselbe gilt für die Cluster, die durch die Aufteilung anhand der Anzahl der Beine mit Bodenkontakt entstehen.

## 5. Implementierungsdetails

### 5.1. 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

### 5.2. 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
- 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 raus schreiben. 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.).

#### 5.2.1. 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>)

### 5.2.2. 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

### 5.2.3. 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)

### 5.2.4. 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 (?)

### 5.3. Interaktivität

- OpenGL
  - SDL + OpenGL Tutorials  
<http://headerphile.com/sdl2/opengl-part-1-sdl-opengl-awesome/>,  
<http://www.sdl tutorials.com/sdl-opengl-tutorial-basics>
  - Daten direkt mit OpenGL erzeugen (laden als vertex und index array)
- Benutzeroberfläche
  - imgui (opengl/vulcan/3D view integriert) mit Rust oder C++: <https://github.com/ocornut/imgui>
    - \* OpenGL und ImGui für Rust: <https://nercury.github.io/rust/opengl/tutorial/2018/02/08/opengl-in-rust-from-scratch-00-setup.html>,  
<https://github.com/michaelfairley/rust-imgui-sdl2>
    - \* es gibt Java Bindings (<https://github.com/ice1000/jimgui>), aber Swing ist wahrscheinlich einfacher
    - \* OpenGL scene → imgui: <https://gamedev.stackexchange.com/questions/140693/how-can-i-render-an-opengl-scene-into-an-imgui-window>
  - Java Swing Bibliothek und JOGL (Java OpenGL Binding) (<http://www.jogl.info>)

### 5.4. Technische Umsetzung

- Repräsentation des Zustands als Hierarchie von einzelnen Komponenten (terminale sowie nichtterminale).
- Übersetzung in ein 3D-Modell: zunächst .obj, später Verwendung von OpenGL mit vertex shadern etc.
- linearer Kongruenzgenerator reich für Zufallszahlen aus, da nur wenige erzeugt werden (erkennbare Muster entstehen erst bei mehr Zufallszahlen) (erwähnen?)
- 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?**)

**ToDo**

### 5.5. Transformationsmatrizen

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:

### 5.6. PCA

#### 5.6.1. 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

---

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

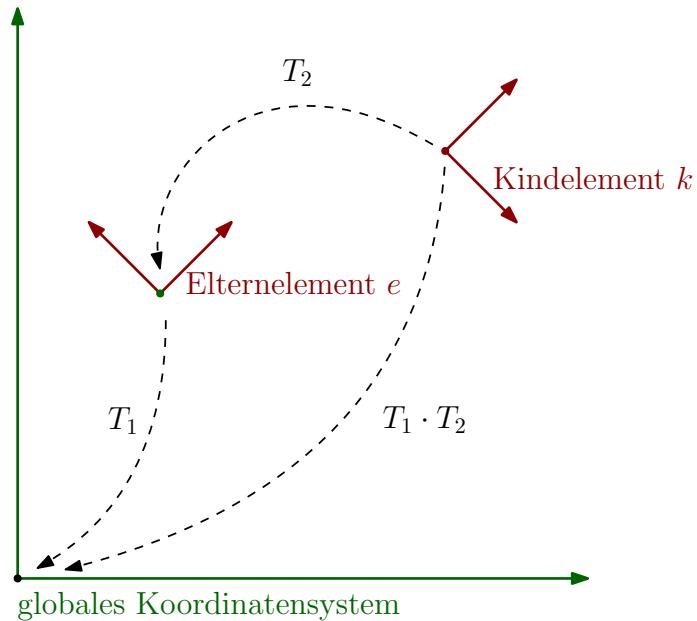


Abbildung 5.1.: Gegeben sei das Element  $e$ . Die Abbildung, die die lokalen Koordinaten von  $e$  in globale Koordinaten umrechnet sei  $T_1$ . Jedes Kindelement  $k$  von  $e$  speichert eine Transformationsmatrix  $T_2$ , die angibt wo der Ursprung des Koordinatensystems von  $k$  relativ zum Koordinatensystem von  $e$  liegt. Will man nun Koordinaten von  $k$  in globale Koordinaten umrechnen, benötigt man die Abbildung  $T_1 \cdot T_2$ .

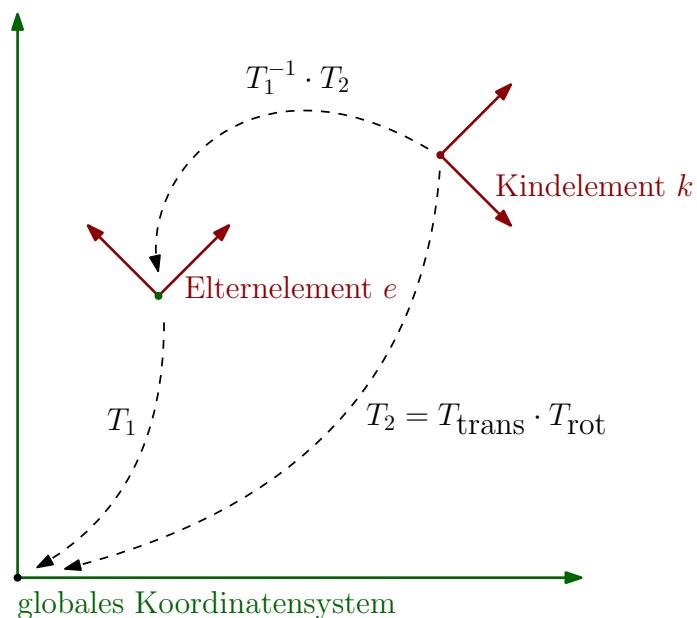


Abbildung 5.2.: Will man ein Element  $k$  erzeugen, das Kindelement von  $e$  ist und dessen globale Koordinaten bekannt sind, muss man die Abbildung berechnen, die die relative Position von  $k$  angibt. Seien  $T_1$  und  $T_2$  jeweils die Transformationen in das globale Koordinatensystem von  $e$  bzw.  $k$ . Dann ist die gesuchte Abbildung  $T_1^{-1} \cdot T_2$ .

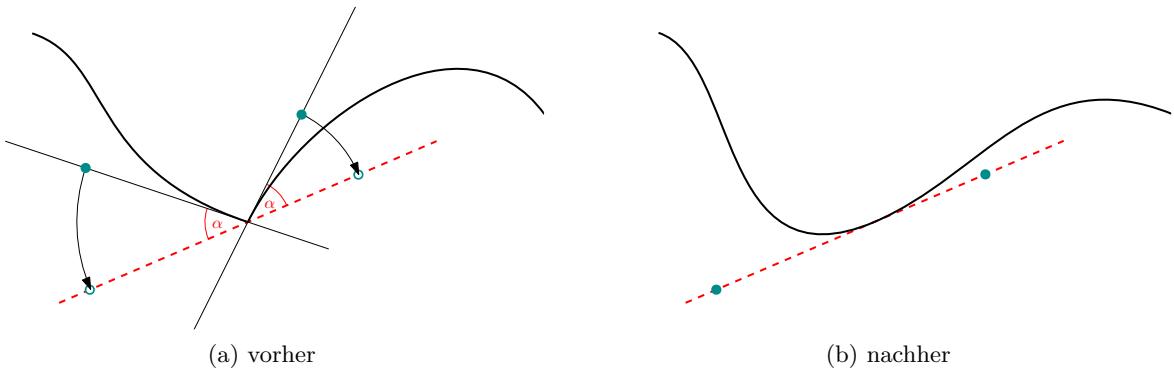


Abbildung 5.3.: Anpassung der Kontrollpunkte der Wirbelsäulenteile, wenn die Steigung an den Kontakt-Punkten ungleich ist. Die beiden Teile der Wirbelsäule und die Steigung am Kontakt-Punkt sind hier in schwarz dargestellt. Die zu drehenden Kontrollpunkte in cyan. In rot ist die resultierende Steigung und der Winkel, der für die Drehung verwendet wird, zu sehen.

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.

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

- An den Kontakt-Punkten 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 Kontakt-Punkt verschoben werden. Das 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 5.3). Grundsätzlich könnten die Kontrollpunkte beliebig auf der Tangente des Kontakt-Punkts 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 Bedeutung.

# Literatur

- [1] James Scott Hanan. "Parametric L-systems and Their Application to the Modelling and Visualization of Plants". AAINN83871. Diss. 1992. ISBN: 0-315-83871-X.
- [2] Milton Hildebrand und George E. Goslow. *Vergleichende und funktionelle Anatomie der Wirbeltiere*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004.
- [3] *No Man's Sky*. URL: <https://www.nomanssky.com/> (besucht am 08.10.2019).
- [4] Lennart Olsson und Uwe Hoßfeld. "Homology, Genes, and Evolutionary Innovation.—Günter P. Wagner." In: *Systematic Biology* 64.2 (Dez. 2014), S. 365–367. ISSN: 1063-5157. DOI: 10.1093/sysbio/syu127. eprint: <http://oup.prod.sis.lan/sysbio/article-pdf/64/2/365/24587311/syu127.pdf>. URL: <https://doi.org/10.1093/sysbio/syu127>.
- [5] D'Arcy Wentworth Thompson [Verfasser]. *Über Wachstum und Form*. Hrsg. von John Tyler Bonner und Adolf Portmann [Verfasser eines Geleitwortes]. In gekürzter Fassung neu hrsg. vom John Tyler Bonner. Wissenschaft und Kultur ; 26. Neu hrsg. und gekürzte Fass. der Ausg. Cambridge 1966. Basel: Birkhäuser, 1973. ISBN: 3764305363.
- [6] Rüdiger Wehner und Walter Gehring. *Zoologie*. 24. Aufl. 2007. ISBN: 978-3-13-367424-9.
- [7] Rüdiger Wehner und Walter Gehring. *Zoologie*. 25. Aufl. 2013. ISBN: 978-3-13-367425-6.
- [8] Wilfried Westheide und Reinhard Rieger. *Spezielle Zoologie. Teil 2: Wirbel- oder Schädeltiere*. 2004. ISBN: 3-8274-0307-3.

# A. Vergleichende Anatomie

Notizen aus „Vergleichende und funktionelle Anatomie der Wirbeltiere“ [2]:

## Kapitel 1 - Einleitung

- „Nichts anderes in der Natur hat eine herrlichere Struktur als der Körper der Wirbeltiere.“ (S. 1)
- Anpassung des Körpers an äußere Gegebenheiten (S. 3). → Eingabeparameter?
- (phylogenetische) Homologie von Strukturen: gemeinsame Abstammung (meist auch gleiche Funktion) (S. 4 und 6)
- Analogie von Strukturen: gleiche Funktion aber nicht gleiche phylogenetische Herkunft (S. 6)
- serielle Homologie: homologe Gene an verschiedenen Körperteilen aktiviert (z. B. Wirbel) (S. 7) → gleiche/sehr ähnliche Regeln
- rudimentäre/degenerierte Organe: haben keine Funktion mehr, waren aber bei Vorfahren funktionell (z. B. Beckengürtel des Finnwals) (S. 9/10)
- Veränderungen von Körperproportionen (z. B. Schädelknochen) können durch eine fortschreitende Verzerrung eines Gitters beschrieben werden (S. 18/19), siehe auch Anhang B

## Kapitel 2 - Charakterisierung , Ursprung und Einteilung der Vertebraten

- „[...] ein Tier mit einem Cranium, also einer skelettartigen Schädelkapsel, [ist] ein Vertebrat.“ (S. 27)
- Teil der allgemeine Beschreibung der (meisten) Vertebraten (S. 27):
  - „Der Körper ist bilateralsymmetrisch, d. h. er weist eine rechte und eine linke Seite, ein anteriores und ein posteriores Ende und eine dorsale und eine ventrale Oberfläche auf.“
  - Sie haben ein inneres Skelett.

## Kapitel 3 - Fische

- Agnathen (Kieferlose): erste bekannte Vertebraten und einzige ohne Kiefer. Einzige rezente Arten: Neunauge und Schleimaal (S. 41/42)

- Kiefertragende Fische: 1. Kiemenbogen entwickelte sich zu Kiefer, haben paarige Flossen (S. 45/46)
  - Knorpelfische: Haie, Rochen, Chimären; verkalkte Knorpel aber wenige/keine Knochen (S. 47) (Unterschied Knochen/Knorpel ignorieren oder nur Knochenfischskelette generieren?)
  - Knochenfische: Strahlenflosser (Flossen mit knöchernen Strahlen), Fleischflosser (Flossen mit fleischigen Stielen) (S. 52/53)

#### Kapitel 4 - Tetrapoden

- an Land ist Stromlinienform und sind Flossen kein Vorteil mehr, ein Hals ist nützlich und der Körper muss von Beinen getragen werden → Extremitätengürtel fester mit Axialskelett verbunden (S. 59)
- Amphibien: nicht vollkommen terrestrisch (Haut feucht, Eier im Wasser / feucht). Unterklasse Lissamphibia (dazu gehören alle rezenten Amphibien) haben nur vier Zehen am Vorderfuß. Es gibt drei Ordnungen: Anura (Schwanzlose), Urodela (Schwanzlurche) und Apoda (Beinlose) (S. 61)
- Reptilien: erste Klasse mit allen Strukturen für vollkommen landgebundenes Leben, leben aber auch teilweise wieder im Wasser (S. 62)
- Vögel: alle rezenten Vögel fliegen oder sind Nachkommen von Fliegern. Erste Zehe ist opponiert (siehe Diagramm S. 71). (S. 67)

#### Kapitel 8 - (Kopfskelett)

- „Das innere, gelenkige Skelettsystem der Vertebraten ist einzigartig im Tierreich. Es ist das wichtigste aller Organsysteme für das Studium der Wirbeltiermorphologie.“ (S. 131)
- Muskeln haben Ansatzstellen an Knochen, die Lage und Ausmaße zeigen. (S. 131)

#### Kapitel 9 - Körperskelett

- „Die Wirbelsäule ist älter als jeder andere Teil des postcranialen Skeletts mit Ausnahme der Chorda dorsalis. Dennoch ist sie nicht so alt wie die Hauptmerkmale der weichen Organsysteme, und sie fehlt praktisch bei den ältesten, bekannten Vertebraten.“ (S. 163)
- Wirbel können viele verschiedene Merkmale haben, z. B. Dornfortsatz, Ansatz der Rippe (siehe Bild S. 165) (S. 163)
- Evolution der Wirbelsäule: zunächst Chorda dorsalis mit stützenden Knorpeln (S. 166)
- Rippen
  - ursprünglich über die gesamte Länge der Wirbelsäule vorhanden. Zwei Arten: Dorsalrippen und Ventralrippen (siehe Abb. S. 173) (S. 172)
  - keine Rippen bei kieferlosen Vertebraten und Placodermi
- Mediane Flossen (175 f)
  - Dorsalflosse, Analflosse und Schwanzflosse
  - treten bei fast allen Agnatha und kiefertragenden Fischen auf
  - Wirbelsäule kann unterschiedlich in Schwanzflosse liegen (gerade, nach oben/unten geknickt oder sie hört davor auf), meistens nach oben abgeknickt (heterocerk).

- Schultergürtel der Fische ist mit Kopf verbunden (S. 178) (also kein Hals)
- Beckengürtel der Tetrapoden viel größer als bei Fischen. Bei verschiednene Gruppen unterschiedlich aber speziell (z. B. Vogel, Säugetier,...) (S. 180 f) → diskret repräsentieren?
- S. 183 Abbildung zur Evolution der Vordergliedmaßen
- Amphibien haben meistens kurze Gliedmaßen, die seitlich des Körpers nach außen gestellt sind (S. 187)
- Gliedmaßen der Reptilien oft seitlich aber manche auch unter dem Körper (wie bei Säugetieren) (S. 188 f)

**Kapitel 21** - Strukturelemente des Körpers

- „allgemein nützliche“ Strukturen: Kiefer, zwei Paare von Extremitäten (S. 433)
- Skelett kann nicht einfach „groß skaliert“ werden. Belastung ist sonst möglicherweise zu groß (S. 444, siehe auch S. 478 und S. 481)
- Knochen halten am besten Druckkraft aus → Minimierung anderer Kräfte (S. 444)(schlecht bei Zug oder seitlicher Belastung)

**Kapitel 22** - Mechanik von Stützung und Bewegung

- Balance und Gegenmoment (S. 466)

## B. D'Arcy Thompson

(siehe auch [https://en.wikipedia.org/wiki/On\\_Growth\\_and\\_Form](https://en.wikipedia.org/wiki/On_Growth_and_Form))

Notizen aus „Über Wachstum und Form“ von D'Arcy Wentworth Thompson [5]:

### Kapitel 2 - Über die Größe

- Maximale und minimale Größe eines Tieres sind durch unterschiedliche Faktoren, wie z. B. das Atmungssystem festgelegt. Bei Säugetieren: min. 5g (Maus) (S. 68) und max. sowas wie Elefant

### Kapitel 4 - Über die Theorie der Transformationen oder den Vergleich verwandter Formen

- „Es handelt sich hier um das berühmteste Kapitel des Buches, das in der biologischen Literatur schon vielfach besprochen worden ist.“ (S. 325, Kommentar des Herausgebers (?))
- Kartesische Transformationen (S. 334 ff)
  1. entlang einer Achse ausdehnen
  2. logarithmische Verlängerung
  3. einfache Scherung
  4. radiale Koordinaten
- Beispiele z. B. S. 366 f, Säugetierschädel ab S. 371

## C. Erhobene Daten für PCA

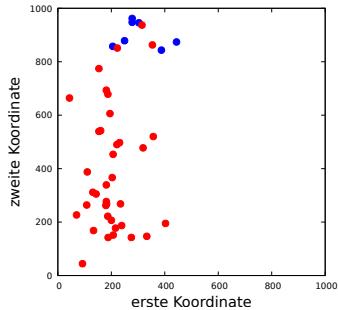
### C.1. Skelettbilder

**ToDo**

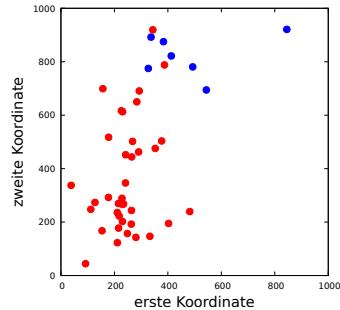
(alphabetisch sortieren)

alle Bilder aus [8] außer:

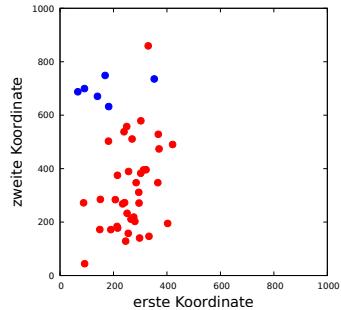
- Sinornis und Taube aus [2]
- Seekuh aus [7]
- Archaeopteryx, Eusthenopteron, Ichthyosaurus, Ichthyostega, Muraenosaurus, Ur-pferdchen aus [6]
- Pferd: <https://www.kosmos.de/content/buecher/ratgeber/pferde-reiten/vorwaerts-abwaerts>
- Känguru <http://www.bildwoerterbuch.com/tierreich/beuteltiere/kaenguru-skelett-eines-kaengurus.php>
- Schwan <https://www.alamy.de/skelett-eines-schwans-osteographia-oder-die-anatomie-der.html>
- Chamäleon <https://www.madcham.de/de/anatomie/>
- Gnu <https://lutzmoeller.net/Afrika/2007/Lutz-Juli/8-Gnu.php>
- Tyrannosaurus Rex [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Tyrannosaurus\\_skeleton.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Tyrannosaurus_skeleton.jpg)
- Dromedär [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)
- Strauß <https://www.alamy.de/stockfoto-skelett-von-strauss-24658845.html>
- Blauwal <https://www.quagga-illustrations.de/wp-content/uploads/2014/05/h0001705.jpg>
- Krokodil <https://de.depositphotos.com/210906852/stock-illustration-skeleton-crocodile.html>
- Giraffe [https://de.wikipedia.org/wiki/Giraffen#/media/File:Giraffe\\_skeleton.jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Giraffen#/media/File:Giraffe_skeleton.jpg)



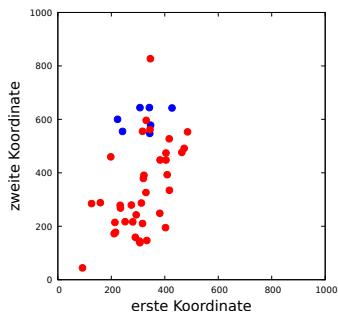
(a) Erster Punkt des Halses



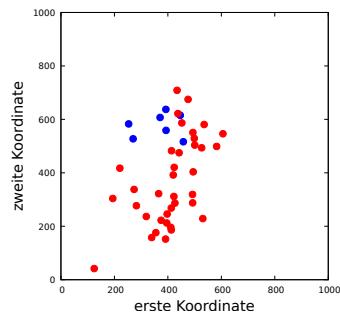
(b) Zweiter Punkt des Halses



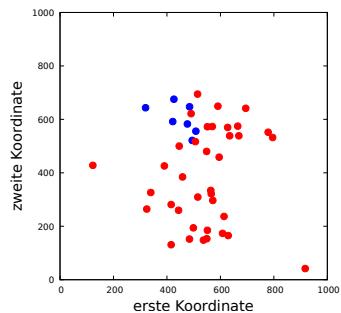
(c) Dritter Punkt des Halses



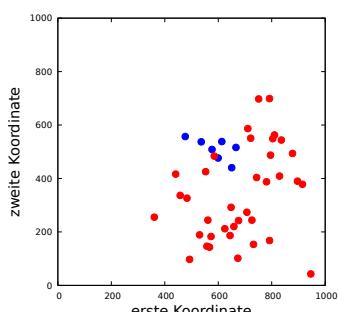
(d) Vierter Punkt des Halses bzw. erster Punkt des Rückens



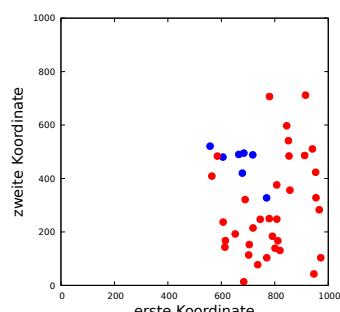
(e) Zweiter Punkt des Rückens



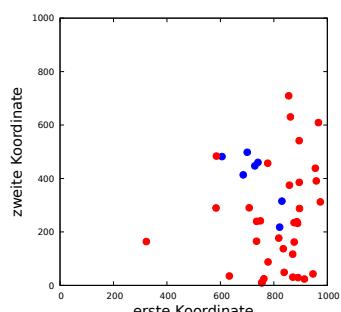
(f) Dritter Punkt des Rückens



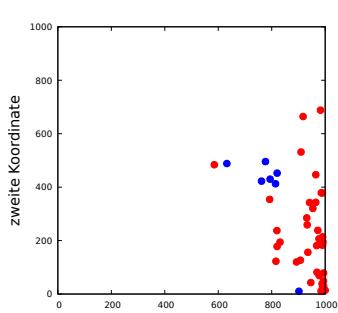
(g) Vierter Punkt des Rückens bzw. erster Punkt des Schwanzes



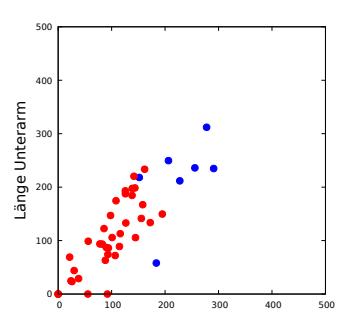
(h) Zweiter Punkt des Schwanzes



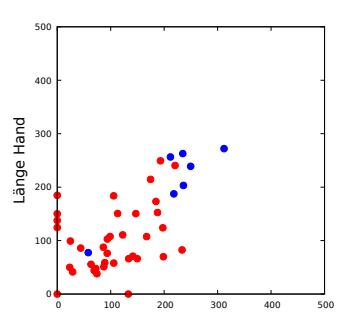
(i) Dritter Punkt des Schwanzes



(j) Vierter Punkt des Schwanzes



(k) Länge Ober- und Unterarm



(l) Länge Unterarm und Hand

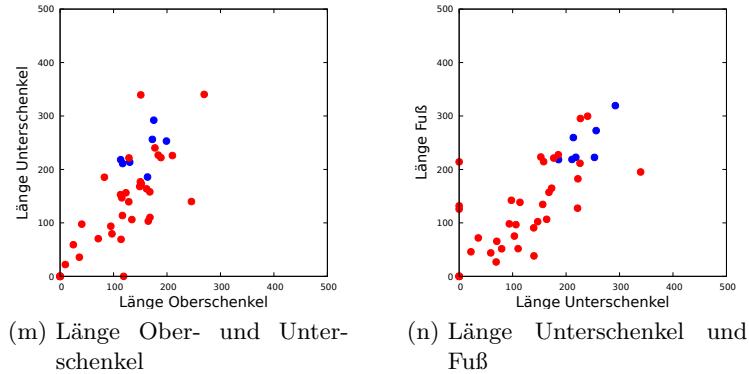


Abbildung C.0.: Erhobene Daten: Punkte der Bézierkurven der Wirbelsäule und Längen der Extremitäten. Bei den Extremitäten ist jeweils gegeneinander abgetragen Ober- und Unterarm, Ober- und Unterschenkel, Unterarm und Hand, Unterschenkel und Fuß. Markiert ist jeweils ob die Datenpunkte Flügel haben (blau)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

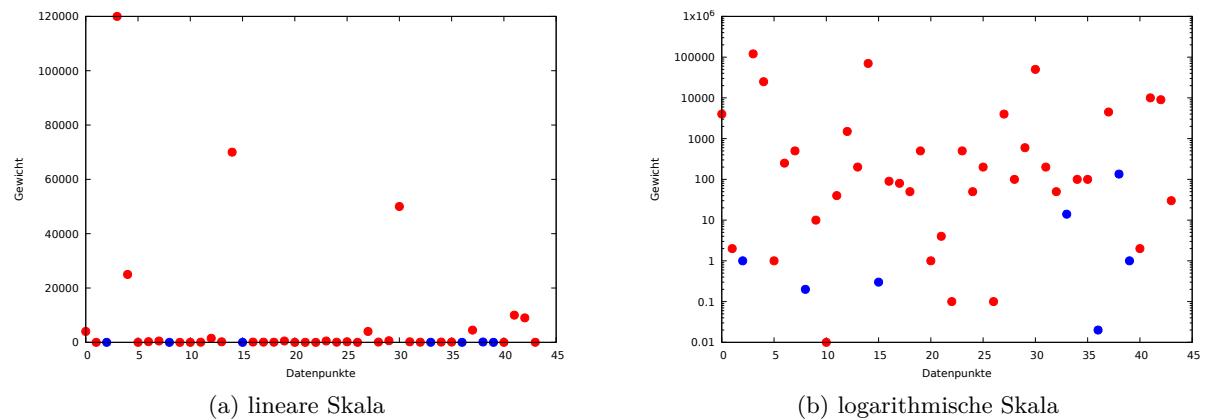
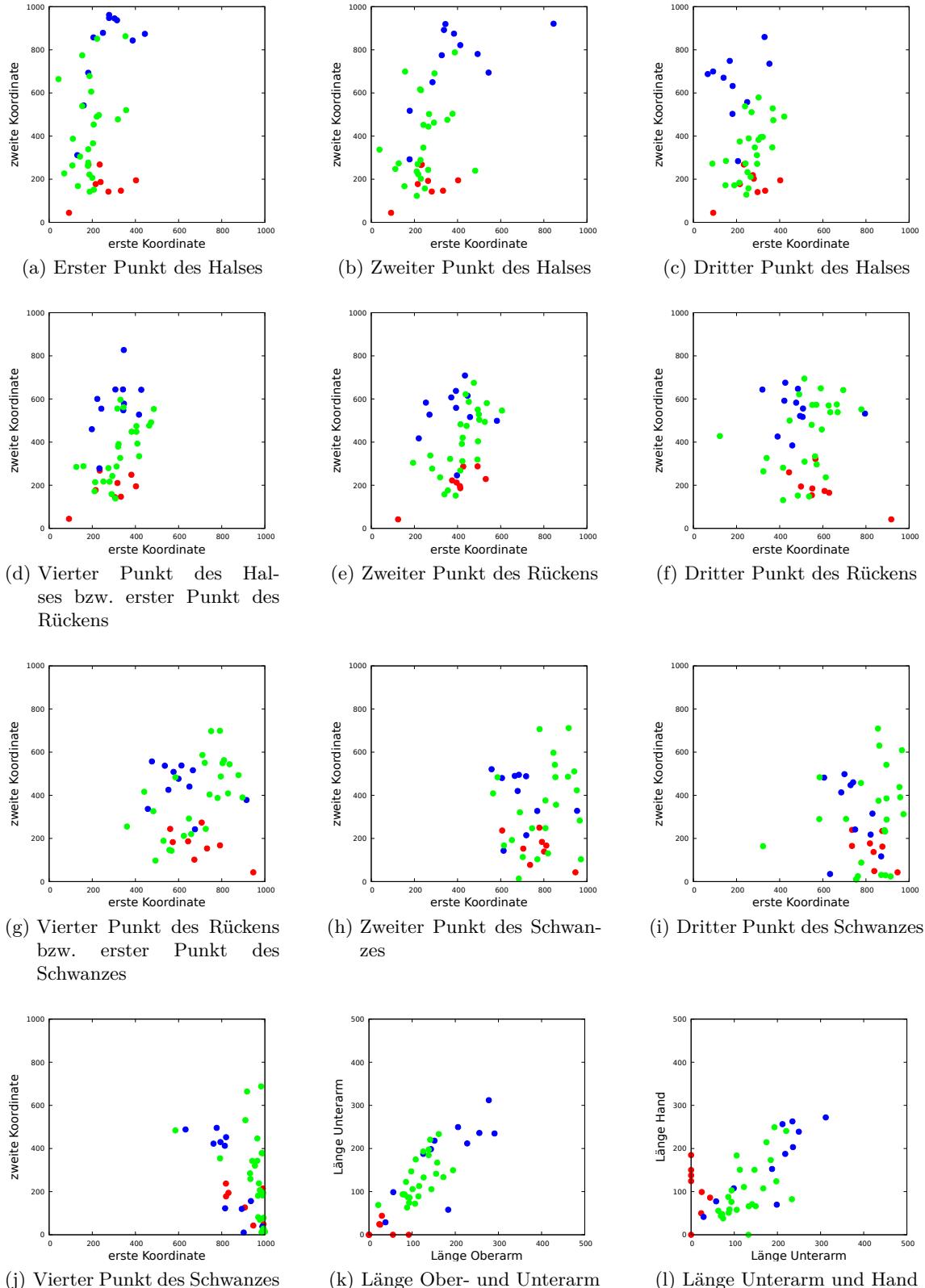


Abbildung C.1.: Erhobene Daten: Gewicht. Markiert ist jeweils ob die Datenpunkte Flügel haben (blau) oder nicht (rot).



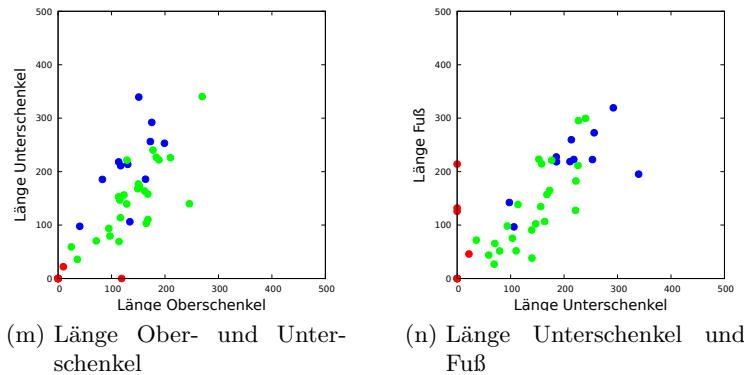


Abbildung C.1.: Erhobene Daten: Punkte der Bézierkurven der Wirbelsäule und Längen der Extremitäten. Bei den Extremitäten ist jeweils gegeneinander abgetragen Ober- und Unterarm, Ober- und Unterschenkel, Unterarm und Hand, Unterschenkel und Fuß. Markiert ist jeweils ob die Datenpunkte 0 (rot), 2 (blau) oder 4 (grün) Beine haben.

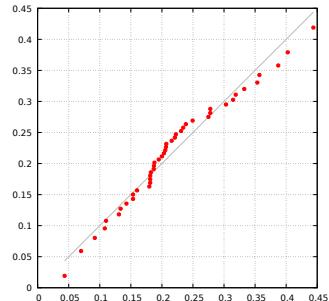
- Schlange: zu Schlangen gibt es keine Bilder, die deren Skelett in ausgestrecktem Zustand von der Seite darstellen. Deshalb wurde ein leeres Bild genommen und der Verlauf des Rückens durch eine Gerade angenähert (Extremitäten besitzt eine Schlange nicht). Außerdem ist nicht erkennbar ob bzw. wo Hals in Rücken und Rücken in Schwanz übergeht. Deshalb wurde die komplette Wirbelsäule als Rücken markiert.)

## C.2. Gewicht der Tiere

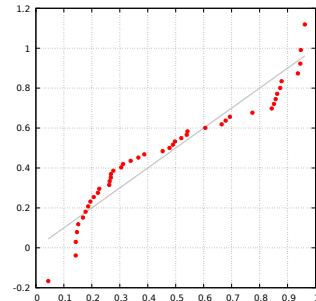
**ToDo**

### (alphabetisch sortieren)

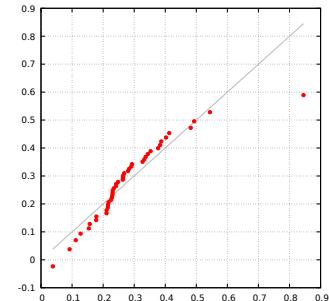
- Blauwal 120 Tonnen, <http://tierdoku.com/index.php?title=Blauwal>, „das schwerste bekannte Tier der Erdgeschichte“ <https://de.wikipedia.org/wiki/Blauwal>
- Durschnittsgewicht (Warmblut-)Pferd 600 kg, <https://www.reitarena.com/de/blog/blog-post/2015/03/03/das-pferd-grundlegende-fakten.html>
- Afrikanischer Elefant 4000kg, <https://de.upali.ch/gewicht-und-grosse/>
- 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>
- Brachiosaurus 23-44 Tonnen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Brachiosaurus>
- Dimetrodon 250kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Dimetrodon>
- Elster 0,2kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Elster>
- Forelle 10-50kg (je nach Art), <https://de.wikipedia.org/wiki/Forelle>
- 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/>



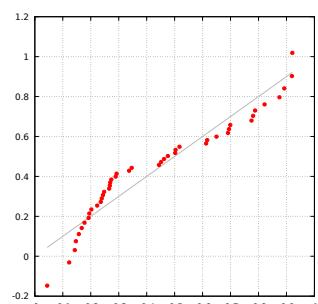
(a) Erster Punkt des Halses, x-Koordinate



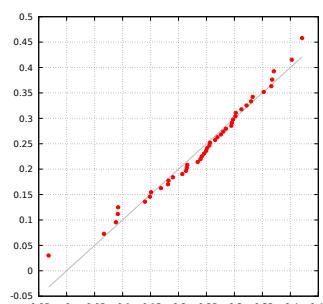
(b) Erster Punkt des Halses, y-Koordinate



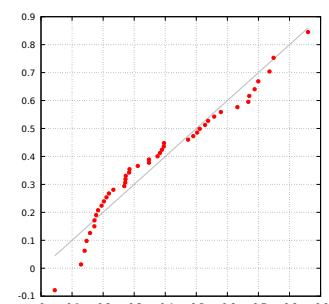
(c) Zweiter Punkt des Halses, x-Koordinate



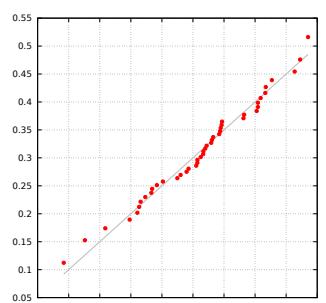
(d) Zweiter Punkt des Halses, y-Koordinate



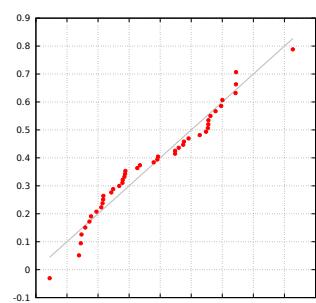
(e) Dritter Punkt des Halses, x-Koordinate



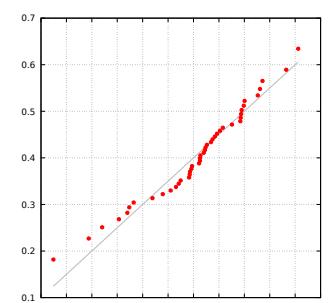
(f) Dritter Punkt des Halses, y-Koordinate



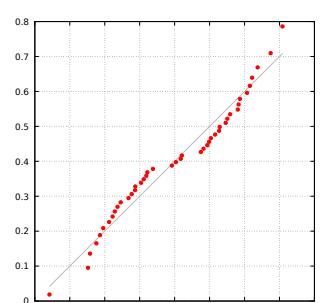
(g) Erster Punkt des Rückens, x-Koordinate



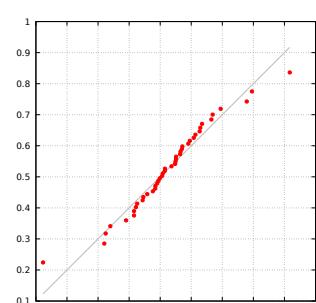
(h) Erster Punkt des Rückens, y-Koordinate



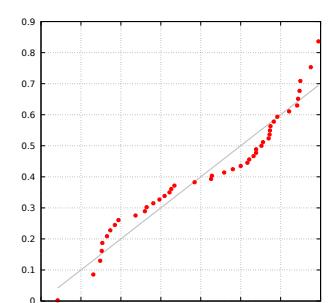
(i) Zweiter Punkt des Rückens, x-Koordinate



(j) Zweiter Punkt des Rückens, y-Koordinate



(k) Dritter Punkt des Rückens, x-Koordinate



(l) Dritter Punkt des Rückens, y-Koordinate

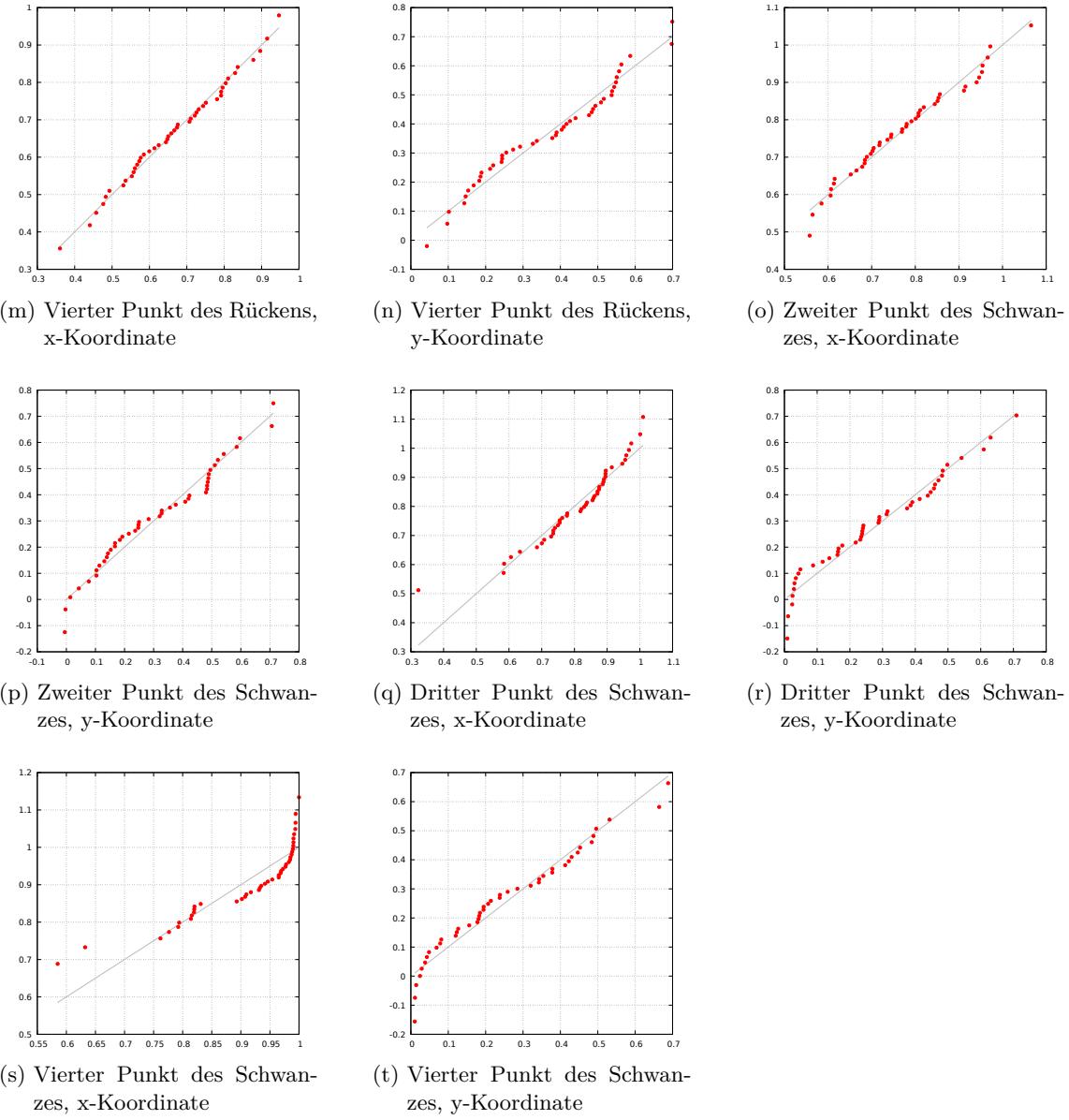


Abbildung C.1.: Quantil-Quantil-Diagramme für alle Dimensionen der Wirbelsäule

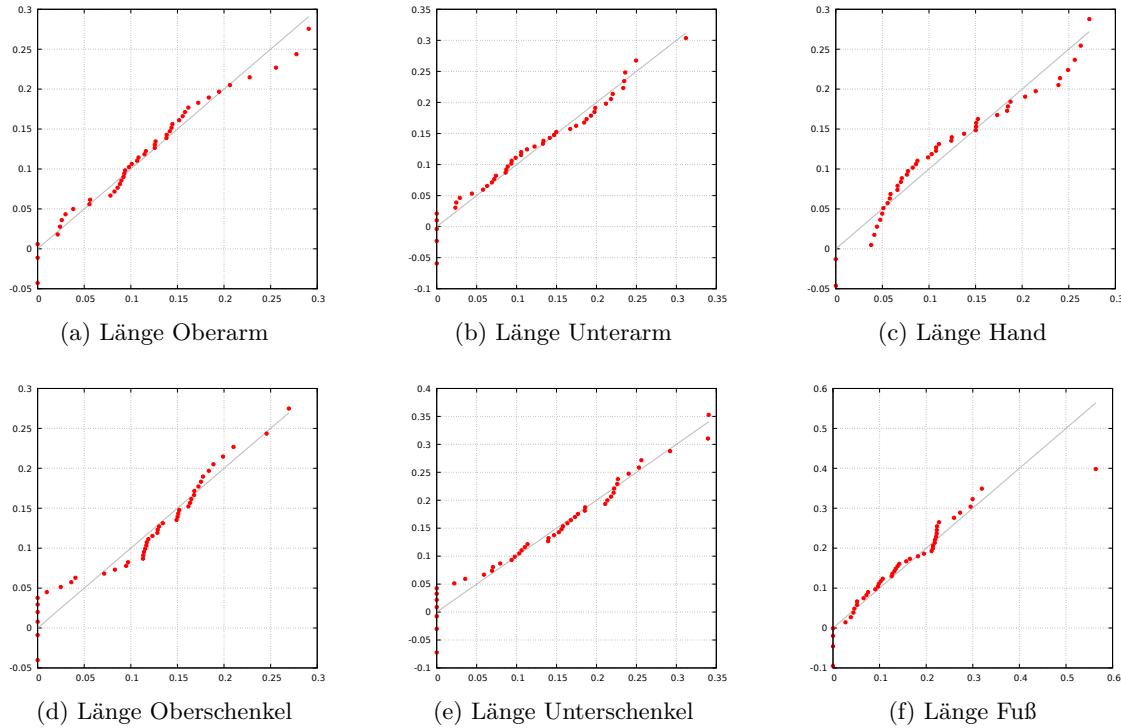


Abbildung C.2.: Quantil-Quantil-Diagramme für die Dimensionen der Eingabedaten, die zusätzlich zur Wirbelsäule erhoben wurden. Nicht dargestellt ist das binäre Attribut *Flügel* und die Anzahl der Beine mit Bodenkontakt.

- Kaffernbüffel 350-900kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Kaffernb%C3%BCffel>
- Kaninchen je nach Art, ganz grob 1kg
- Klippschliefer 2-5kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Klippschliefer>
- Koboldmaki 0,1kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Koboldmakis>
- 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>
- 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>

- Urpferdchen (Propalaeotherium) 30kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Propalaeotherium>
- Schwan 14kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Schw%C3%A4ne>
- Chamäleon 0,1-2kg, <https://www.tierchenwelt.de/echsen/128-chamaeleon.html>
- Gämse 25-50kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/G%C3%A4mse>
- Gnu 140-250kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Gnus>
- Schwein 100kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Hausschwein>
- Känguru 2-90kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/K%C3%A4ngurus>
- Tyrannosaurus 9 Tonnen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Tyrannosaurus>
- Dromedar 300-700kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Dromedar>
- Afrikanischer Strauß bis 135kg, [https://de.wikipedia.org/wiki/Afrikanischer\\_Strau%C3%9F](https://de.wikipedia.org/wiki/Afrikanischer_Strau%C3%9F)
- Frosch 10g, <http://www.biologie-schule.de/frosch-steckbrief.php>
- Krokodil 100-1000kg, <https://de.wikipedia.org/wiki/Krokodile>
- Schlange bis 100kg bei Riesenschlangen, <https://de.wikipedia.org/wiki/Schlangen>
- Giraffe bis 2 Tonnen, <https://www.tierchenwelt.de/huftiere/73-giraffe.html>

# **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 20. Februar 2020

(Nina Zimbel)