

# Prozedurale Generierung von Wirbeltierskeletten

Masterarbeit von

Nina Zimbel

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

16. Januar 2020

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Carsten Dachsbacher
Zweitgutachter:	Prof. Dr. Hartmut Prautzsch
Betreuender 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. PCA . . . . .	6
3.5.1. Erhobene Daten für PCA . . . . .	6
3.5.1.1. Skelettbilder . . . . .	6
3.5.1.2. Gewicht . . . . .	7
<b>4. Technische Umsetzung</b>	<b>8</b>
4.1. Programmiersprache . . . . .	8
4.2. Dateiformate . . . . .	8
4.2.1. OpenSim . . . . .	9
4.2.2. OBJ . . . . .	9
4.2.3. FBX . . . . .	9
4.2.4. Alembic . . . . .	9
4.3. Interaktivität . . . . .	10
4.4. Datenstrukturen . . . . .	10
4.4.1. Terminale . . . . .	10
4.4.2. „Wachstum“ . . . . .	11
4.4.3. Balance . . . . .	11
<b>5. Implementierungsdetails</b>	<b>13</b>
5.1. Transformationsmatrizen . . . . .	13
<b>Literatur</b>	<b>15</b>
<b>Anhang A. Vergleichende Anatomie</b>	<b>16</b>
<b>Anhang B. D'Arcy Thompson</b>	<b>19</b>

# 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-D80.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 Gesichtrekonstruktion 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 Schädel-tiere (Craniota) für dieses Taxon bevorzugt. Diese Auffassung berücksichtigt, dass die Rundmäuler, wie auch einige andere Wirbeltiere, als Achsenskelett keine Wirbelsäule, sondern eine Chorda dorsalis haben. Doch allen Wirbeltieren gemein ist ein verknöcherner oder knorpeliger Schädel; sein Vorhandensein gehört somit zu den gemeinsam abgeleiteten Merkmalen (Synapomorphien) dieser Chordaten-Gruppe.“ (<https://de.wikipedia.org/wiki/Wirbeltiere>) → Beschränkung auf Schädel-tiere 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 skalierbar/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%A4tenevolution>
- „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 unterscheiden 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. PCA

*Primary Component Analysis* (PCA) wird mit dem Ziel angewendet herauszufinden was die „Hauptdimensionen“ sind, in denen sich Skelette unterscheiden.

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. Sie bilden 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 größte Streuung aufweisen.

Um dies zu Berechnen wird zunächst der Mittelpunkt des Ellipsoids berechnet. Das ist der Punkt, der in jeder Dimension den Mittelwert aller Datenpunkte enthält. Dann wird der Mittelpunkt von den Eingabedaten abgezogen, also das Ellipsoid in den Ursprung des Koordinatensystems verschoben. Danach kann die Kovarianzmatrix aufgestellt werden, 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 weit ausgedehnt das Ellipsoid in dieser Richtung ist.

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.

#### 3.5.1. Erhobene Daten für PCA

Flossen werden weder als Beine (egal ob mit oder ohne Bodenkontakt) noch als Flügel angesehen. (sinnvoll?)

ToDo

##### 3.5.1.1. Skelettbilder

- die meisten Bilder aus [8]
- Sinornis und Taube aus [2]
- Seekuh aus [7]
- Archaeopteryx, Eusthenopteron, Ichthyosaurus, Ichthyostega, Muraenosaurus, Urpferdchen aus [6]
- Pferd: <https://www.kosmos.de/content/buecher/ratgeber/pferde-reiten/vorwaerts-abwaerts>



### 3.5.1.2. Gewicht

- Gewicht: Durchschnittsgewicht eines ausgewachsenen Tieres in kg. Schwerstes Tier: Blaubwal, Maximum ist also 120 Tonnen <http://tierdoku.com/index.php?title=Blauwal>
- Durchschnittsgewicht (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 wird zu Vögeln gerechnet, Gewicht 1kg <https://de.wikipedia.org/wiki/Archaeopteryx>
- Brachiosaurus (Reptil <http://www.biologie-schule.de/brachiosaurus-steckbrief.php>), 23 - 44 Tonnen <https://de.wikipedia.org/wiki/Brachiosaurus>
- Dimetrodon Reptil, 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>
- Fregattvogel 0,6 - 1,6kg <https://de.wikipedia.org/wiki/Fregattv%C3%B6gel>
- 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 Fisch ca 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>
- Kaninchen je nach Art, grob 1kg
- Klippschliefer 2-5kg <https://de.wikipedia.org/wiki/Klippschliefer>
- Koboldmaki 0,1kg <https://de.wikipedia.org/wiki/Koboldmakis>
- Landschildkröte unterschiedlich grob 50kg
- Ohrenrobbe 25-500kg <https://de.wikipedia.org/wiki/Ohrenrobbe>
- Panzerspitzmaus 100g <https://de.wikipedia.org/wiki/Panzerspitzmaus>
- Parasaurolophus walkeri 4-5 Tonnen [http://tierdoku.com/index.php?title=Parasaurolophus\\_walkeri](http://tierdoku.com/index.php?title=Parasaurolophus_walkeri)
- 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 unterschiedlich 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>

## 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.

### 4.1. 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

### 4.2. 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 rausschreiben. 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).

### 4.2.1. 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>)

### 4.2.2. 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](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

### 4.2.3. 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 fbxccl, 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)

### 4.2.4. 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 Reference (enthält sehr wenig Infos): <http://docs.alembic.io/reference/index.html>
- Für Rust gibt es keine Bibliothek (?)

### 4.3. Interaktivität

- OpenGL
  - SDL + OpenGL Tutorials  
<http://headerphile.com/sdl2/opengl-part-1-sdl-opengl-awesome/>,  
<http://www.sdltutorials.com/sdl-opengl-tutorial-basics>
  - Daten direkt mit OpenGL erzeugen (laden als vertex und index array)
- Benutzeroberfläche
  - imgui (opengl/vulkan/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>)

### 4.4. Datenstrukturen

#### 4.4.1. 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.

**ToDo** Bei der Erzeugung von Elementen auf der Wirbelsäule ist das nicht einfacher. (**Hierarchie nur von Elementen, die von der Wirbelsäule „abzweigen“? Oder ist gewisse Hierarchie in „Endprodukt“ gewollt?**)

- 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...

**ToDo** (**Bewegungseinschränkungen für bestimmtes Gelenk bei jedem Tier gleich? Wie Einschränkungen erzeugen?**),

- 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)

#### 4.4.2. „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 Tieres 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 es Schwerpunkts (oft wird die Hüfte verwendet). Die Hüfte gibt es aber nicht immer. Verwende ersten Wirbel nach dem Brustkorb (falls existent).

#### 4.4.3. 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 aufaddieren.  
(<https://www.grund-wissen.de/physik/mechanik/drehmoment-und-gleichgewicht>).

<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.

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.

## 5. Implementierungsdetails

### 5.1. 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:

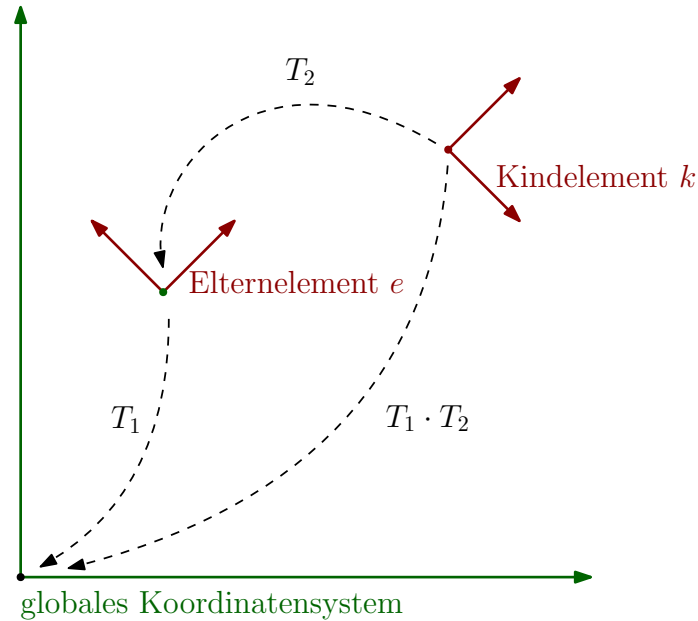


Abbildung 5.1.: Gegeben sei das Element  $e$ . Die Abbildung, die die lokalen Koordinaten von  $e$  in globale Koordinaten umrechnet sei  $T_1$ . Jedes Kindelement  $k$  von  $e$  speichert eine Transformationsmatrix  $T_2$ , die angibt wo der Ursprung des Koordinatensystems von  $k$  relativ zum Koordinatensystem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

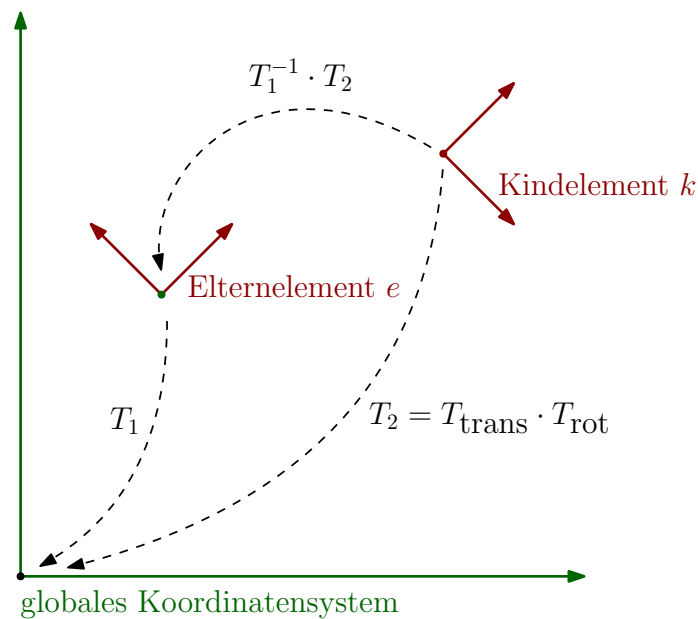


Abbildung 5.2.: Will man ein Element  $k$  erzeugen, das Kindelement von  $e$  ist und dessen globale Koordinaten bekannt sind, muss man die Abbildung berechnen, die die relative Position von  $k$  angibt. Seien  $T_1$  und  $T_2$  jeweils die Transformationen in das globale Koordinatensystem von  $e$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



# 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 allgeime 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 verschiedene 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



# 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 16. Januar 2020

(Nina Zimbel)