

## **Origins and losses of parasitism**

an analysis of the phylogenetic tree of life with a parsimony-like algorithm

# Abstract

Anmerkung: Alle Figures richtig beschriften. Generell: Alle Figure captions sollten selbsterklärend sein. Sprich, ich sollte nur die Caption (normalerweise auch unter dem Bild) lesen und nicht den Rest des Papers und dann trotzdem verstehen können, was eigentlich passiert ist und - hilfreich - auch warum das relevant ist. (Bernhard)

# Contents

1	Introduction	5
2	Methods	8
2.1	Get data . . . . .	9
2.1.1	OTL . . . . .	10
2.1.2	GloBI . . . . .	10
2.2	Metadata analysis . . . . .	11
2.2.1	Countings . . . . .	12
2.2.2	Transition probabilities . . . . .	14
2.2.3	Multifurcation . . . . .	14
2.3	Simulation . . . . .	15
2.3.1	random binary tree . . . . .	17
2.3.2	tag tree . . . . .	17
2.3.3	multifurcate tree . . . . .	19
2.3.4	maximum parsimony algorithms . . . . .	20
2.4	real data analysis . . . . .	23
2.5	Implementation . . . . .	23
3	Results	24
3.1	Influence of different parameters . . . . .	24
4	Discussion	26
	Bibliography	27

5	Appendices	28
5.1	Distribution of data in the taxa . . . . .	28
5.2	Taxa table . . . . .	29

# 1 Introduction

This paper is about the further development of parsimony algorithms for non-binary trees, applied to the currently largest phylogeny synthesis tree of Open Tree Of Life, with the application to the ancestral state reconstruction of parasitism.

Anmerkung: Der erste Satz muss nochmal überarbeitet werden. Das Ziel / Ergebnis der Arbeit hat

Anmerkung: Wir haben mehr einen Algorithmus getestet und an unserem spezifischen Problem angewendet, als viel selbst zu entwickeln. Allerdings haben wir den Fitch Algorithmus von binär auf multinär umgeschrieben.

Anmerkung: Mein Vorschlag einer Gliederung (jeweils ca. ein Absatz) (Bernhard)

i) Motivation:

- Was ist das große Ziel?

Das Ziel dieser Arbeit ist die Anwendung von maximum parsimony algorithmen auf nicht binäre Bäume und auf sehr große Datensätze. Insbesondere auf das Beispiel 'Entstehung des Parasitismus' im ganzen Eukaryotischen Tree of Life.

- Was soll erreicht werden?

Wir wollen vorhandene Algorithm (Sankoff/castor) auf diese Aufgabenstellung hin testen und ihre Vorhersagekraft abschätzen. Außerdem wollen wir den Fitch algorithmus für binäre Bäume auf unser Problem erweitern und mit dem Sankoff Algorithmus vergleichen.

- Warum ist das relevant? Was könnte man dann tun?

TODO: !!!

ii) Hintergrund:

- Was gab es in dieser Richtung bereits als ganze Ansätze oder wenn nicht, warum nicht? Woran ist es bisher gescheitert?

Bisher wurden vor allem Algorithmen für das binäre Problem entwickelt, da man wesentlich kleinere Teilbäume betrachtet hat, von welchen man auch alle Aufspaltungen kennt. Durch die Entwicklung von OTL, eines gesamten Baums des Lebens, ergibt sich das Problem, dass dieser bei weitem nicht binär ist.

Researchers of the phylogenies have been dealt with the ancestral state reconstruction in the 60s. The first methods were only brute force

TODO: Quelle, siehe Fitch

. Next came a set of parsimony algorithms such as: Fitch-parsimony [Fit71], Wagner-parsimony [SM87] ...

TODO: weitere?

With more and more data, there is now the possibility to use more information to calculate the probabilities of the ancestral states. In addition to the states of the leafs, algorithms could also use branch lengths. The likelihood based algorithms came more in interest.

Our focus came with another 'data extension'. We wanted to work with the biggest phylogenetic tree that exists at this moment, which goes over all observed species. For most

TODO: most?

species there is no phylogeny,

but only a taxonomic classification.

- Welche Grundlagen sind notwendig:
  - open tree of life: Was ist das, warum relevant und überlegen als reine Ansätze?

TODO: !!!

So the biggest 'phylogenetic tree' is a synthesis of phylogenetic trees filled with a taxonomic tree given by Open Tree of Life [HSA<sup>+</sup>15]. This tree is not binary and therefore the developed algorithms are not directly applicable.

- Algorithmen: Was gibt es? Ruhig ausführlicher als hier bereits und vor allem auch nach einer Darstellung am Ende ableiten, was für uns relevant ist. Also beschreiben, wie Methode a, b, c funktionieren und dann abwägen, was daher für Dich am relevantesten ist.

**TODO: !!!**

Anmerkung: GloBI und OTL in der Einleitung vorstellen. (Emanuel)

### iii) Outlook/Structure of this work

In this work, we have looked at the algorithms that are generally suited to our data, to develop them further for the not binary case, and finally to compare their usability with our sythesis tree.

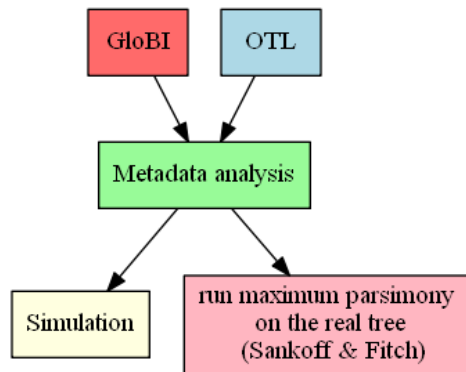
We have decided to consider only parsimony algorithms since we have no information on branch lengths and no other additional information like different transition probabilities of our states.

## 2 Methods

As initiated, we would like to apply a maximum parsimony algorithm to the entire tree of life to obtain an ancestral state reconstruction of free-living versus parasite states. So far, these reconstructions have been made mainly on binary trees with better data availability. Therefore, we decided to use a simulation to decide how to evaluate the existing algorithms and possibly adapt them to our given problem.

Accordingly, in addition to the necessary data sets (GloBI, OTL), the chosen algorithm and the evaluation of its results, this chapter also deals with the previously performed simulation and the evaluation of the various algorithms and their parameters.

Figure 2.1 briefly outlines these relationships.



**Figure 2.1:** Workflow

The coming sections are thus subdivided into the following topics:

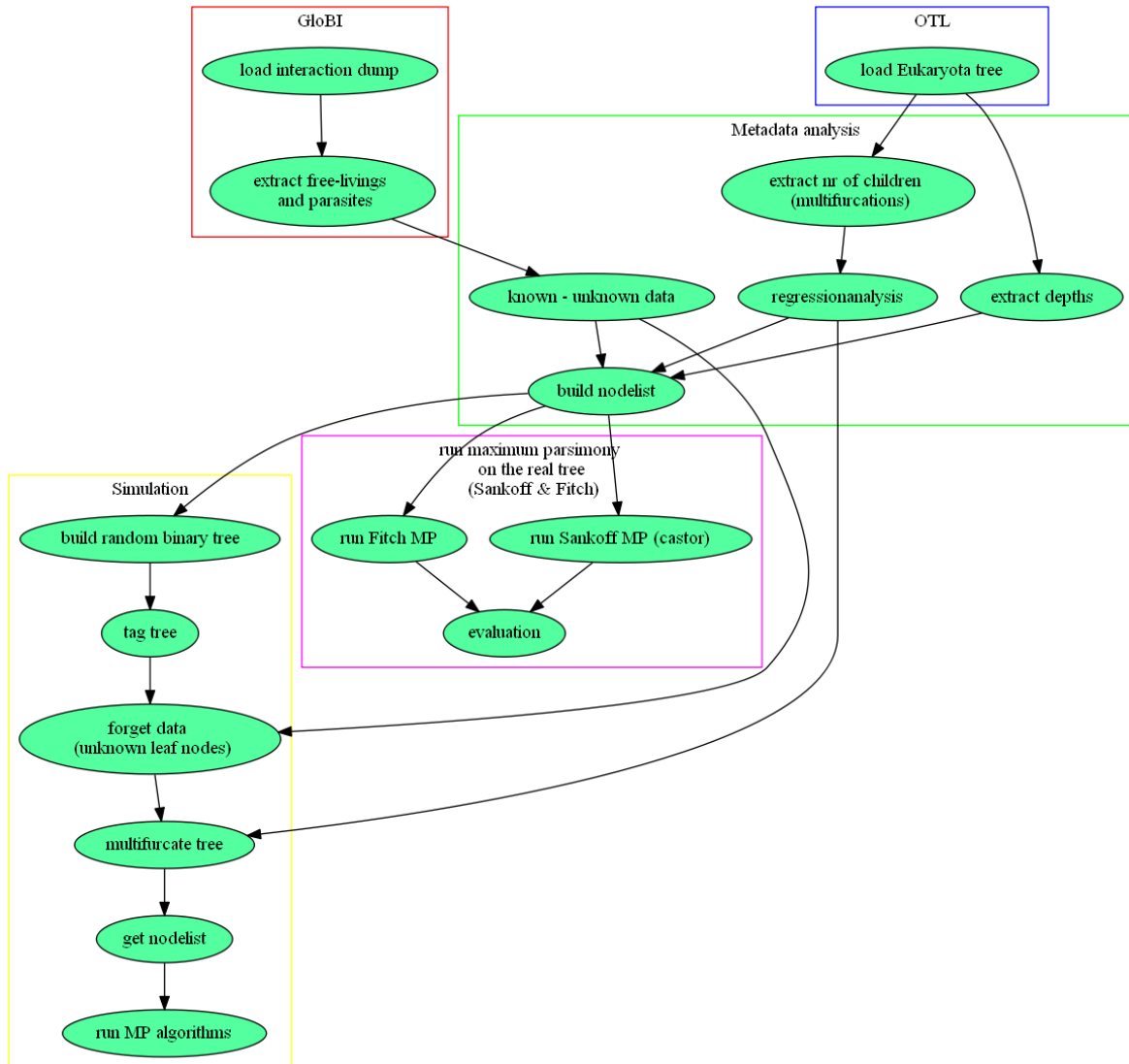
**TODO; or:** The resulting procedure is as follows:

- (1) Get the real tree and real data for the leaf nodes → OTL, GloBI databases.
- (2) Get metadata of these for a realistic simulation. (3) Build and run the simulation. (4) Evaluation of parameters for the simulation and the real problem.
- (5) Run the resulted algorithm on the original data. (6) Evaluate and interpret results. → Origins etc...



TODO: Metadata analysis nötig für run maximum parsimony?

Figure 2.2: Workflow



## 2.1 Get data

For our research we need two types of data: a tree and information about the states. For the tree we decided to use Open Tree of Life (OTL), because it's the biggest available

synthesis tree.

TODO: hier referenzen zu nem paper das das bestätigt o.ä.

For the state information, we decided to use the Global biotic interaction database (GloBI). Also in this case, this is one of the largest databases and both OTL and GloBI support the OTT identification. OTT (open tree taxonomy) is a taxonomy that assigns to each species a unique id, both ancestor and now living species (internal and leaf nodes).

### 2.1.1 OTL

TODO: Open Tree of Life

### 2.1.2 GloBI

For tagging our leave nodes, we use the GloBI (Global Biotic Interactions) database. This database consists of entries of the form: species A (source) interacts with B (target). We appointed some interactions, where we know from the biological perspective that the species source or target has to be a parasite or a free-living species. These are the following:

- free-living source: preysOn, eats, flowersVisitedBy, hasPathogen, pollinatedBy, hasParasite, hostOf
- free-living target: preyedUponBy, parasiteOf, visitsFlowersOf, pathogenOf, hasHost
- parasite source: parasiteOf, pathogenOf
- parasite target: hasParasite, hasPathogen

TODO: Interactions nochmal prüfen! Darauf basieren unsere Ergebnisse!

We build two lists: parasites and free-livings, and add the source or targets of an interaction to these.

TODO: klar? Oder Beispiel bringen? (Katze isst Maus → Katze ist Freilebend)

TODO: einige spezies nicht mit einbezogen, da sie keine OTT id haben, hier könnte man noch verbe

TODO: You can find all interaction types here: <https://github.com/jhpoelen/eol-globi-data/blob/main>

## 2.2 Metadata analysis

Properties of real Data - Metadata analysis

Um eine möglichst realistische Simulation zu erzeugen haben wir auf der einen Seite einige Daten gesammelt (Kaptiel Countings), und außerdem beeinflussende Parameter untersucht.

Wir haben zwei große Arten von Parametern:

- i) Biological parameters (A result of the evolutionary process):
  - transition probabilities
- ii) Distribution of the loss of information:
  - Loss of topology ( $\rightarrow$  mutlifurcations).
  - Unknown information about the states of some leaf nodes.

TODO: Hier darauf hinweisen, dass wir für multifurcations und unknown data den einfluss auf die A

### 2.2.1 Countings

Name	Number of
Eukaryota	241 974 internal nodes, 2 293 463 leaf nodes
interactions	5 346 414
freeliving species	51 337 (distinct)
parasite species	47 332 (distinct)
→ unknown nodes	???
unused possible species	57 352 (source), 809 993 (target)
Nr of Children == 1	55 700 51 744 (height = 2) 3 956 (height > 2)

**TODO: tree, subtrees? figure dazu?**  $\frac{100}{2293463 * (51337 + 47332)} \approx 4.3 \rightarrow$  only 4.3% of leaf nodes are filled with information

#interactions zu #Parasiten und #Freilebend → Wieviel gibt GloBI her? (dazu noch #unused possible species, wieviele Parasiten ohne ott haben wir gefunden?) #Parasiten und #Freilebend und #Blattknoten → Wieviele unbekannte Knoten haben wir? #Interne Knoten und #Blattknoten → Wie stark ist die Multifurkation?

### Data artifacts

Zu der Frage, warum gibt es *nrChildren* == 1. Es gibt tatsächlich 55700 Knoten mit nur einem Kind. Davon ist der größte Teil direkt vor einem Blatt (51744), aber 3956 (*height* > 2) sind irgendwo im Baum. Ein paar Beispiele:

Nephroselmidophyceae: (class)

<https://tree.opentreeoflife.org/opentree/argus/ottol@1038762>

Phrynocrinidae: (family)

<https://tree.opentreeoflife.org/opentree/argus/ottol@3647979>

Elaeocarpus sylvestris:

<https://tree.opentreeoflife.org/opentree/argus/opentree9.1@ott166969>

Was bedeutet das für unsere Analyse? Ignorieren wir die ~ 4000 internen und Zählen sie zu den Blättern, oder zählen wir alle zu den Internen oder puzzlen wir sie einzeln raus. D.h. nur die mit der Zusatzeigenschaft (*height* == 2) sind auch Blätter. Es könnte aber auch Fälle geben wie: ...-O-O-O-O-O, dann könnte man auch einen Knoten mit höherer Höhe als Blatt zählen. Das müsste dann gelten *minheight* = *maxheight*.

---

```
leaf.taxa <- all.taxa[all.taxa$nr_children==0, ]
extendedLeaf.taxa <- all.taxa[all.taxa$nr_children<2 & min.height
inner.taxa <- all.taxa[all.taxa$nr_children>1 | (all.taxa$nr_ch
```

---

TODO: macht extendedLeaf wirklich einen Sinn?

## Distribution of data in the taxa

Mithilfe des taxonomischen Baums von OTL haben wir die Knoten ihren Kingdoms, Phyla und Classes zugeteilt.

Please see the appendix on page 28 for a complete table 5.1 of these data.

TODO: gibt es einen Zusammenhang zwischen Anzahl

TODO: max max height zu anzahl nodes in phylum plotten? oder mean max height oder ... (mean,

TODO: depth...

## Distribution of Taxa

- In our tree we can distinguish 28 different Taxa with the OTL taxonomic tree.
- The most of them are hardly represented. The major taxonomic groups are: ...
- Here you can see some characteristics of the Multifurcation of the tree.

In a phylogeny, the taxonomic division of the tree is far too coarse, meaning that there should be more subtaxa or 'unranked' nodes. But the closer we get to the root, the more the pure taxonomic tree is reflected. If the tree were binary, the taxa would have

to double. But the multipliers for some are much bigger and for others much smaller. Please see the appendix on page 29 for a complete table 5.2 of these data.

TODO: Was hierzu ist richtig und wichtig?

## 2.2.2 Transition probabilities

Anmerkung: Wir hätten aber maximal 2 beta-Verteilungen mit jeweils 2 Parametern und je einem eigenen Schwellenwert bei dem in die andere Verteilung gewechselt wird. Also 6 Parameter. Ich finde den Parameterraum den du bisher betrachtetest zum einen nicht systematisch erfasst, zum anderen wahrscheinlich auch zu klein. Du kannst -Parameter sparen- indem zu z.B die beiden Verteilungen und cut-offs symmetrisch (gespiegelt an 0.5) machst. Solltest aber meines Erachtens die Schwellenwerte freier variieren. Das können wir bis zu unserem nächsten Treffen zurückstellen und dann gemeinsam diskutieren. (Emanuel)

Das mit dem symmetrisch spiegeln geht halt nur bei maximal 40-60 Verteilungen richtig gut, danach haben brauchen eventuell eine lange Austestphase, bis ein Baum dieser Verteilung entspricht. Wenn wir allerdings dafür zwei verschiedene Schwellenwerte einführen könnte das dieses Problem eventuell ausgleichen. Das müsste ich austesten.

TODO: Kapitel tag tree hier einbinden

## 2.2.3 Multifurcation

Hier Beschreibung von 2.3...

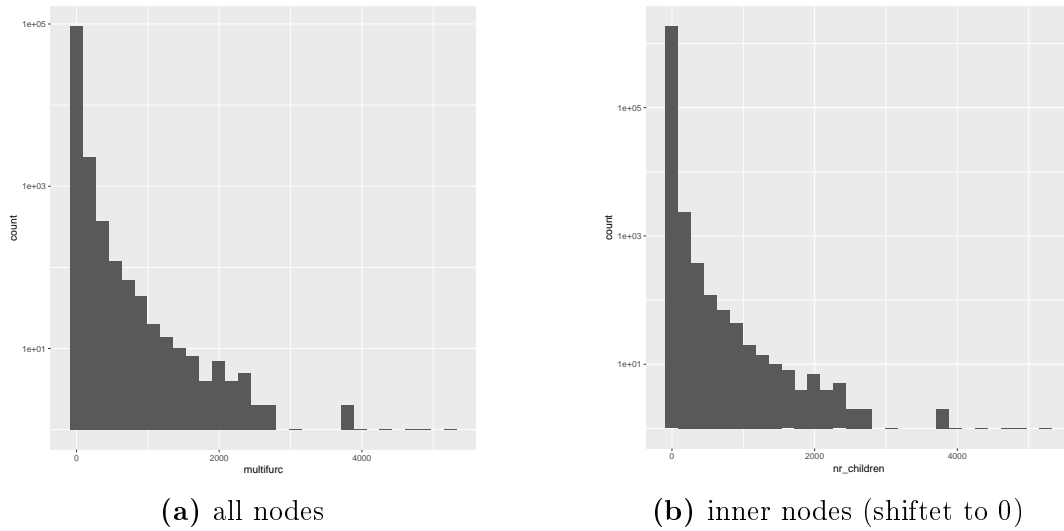
Anmerkung: Description/Definition of Multifurcation → to the Intro (Bernhard)

Anmerkung: Regressionsanalyse (Bernhard)

Anmerkung: poisson glm: #children ~ I phylum → R fitdist p (Emanuel)

Anmerkung: different parameters for different taxa? (Emanuel)

One property of the tree is its ridge of multifurcation. For this we collected for every node its number of children (degree  $-1$ ), and plottet this in an histogram, how



**Figure 2.3:** plots of children of nodes

much nodes we have for every degree. Then we tried to find a function which best describes this behavior. In figure 2.4 is this plot shown with three functions, which came TODO: close(st) to this goal:  $\frac{1000000000000000}{x^4}$  (magenta),  $\frac{3000000000000}{x^3}$  (red) and  $\frac{80000000}{x^2}$  (black).

From the biology we know, that this multifurcation is very clouded. Some parts of the tree are well known and others have not been very interesting for the research so far. So we also wanted to know how the multifurcations behave in some interesting subtrees.

Anmerkung: do we? Is that really universal knowledge or could it be supported by data or a citation

TODO: subtrees... there is some old stuff...

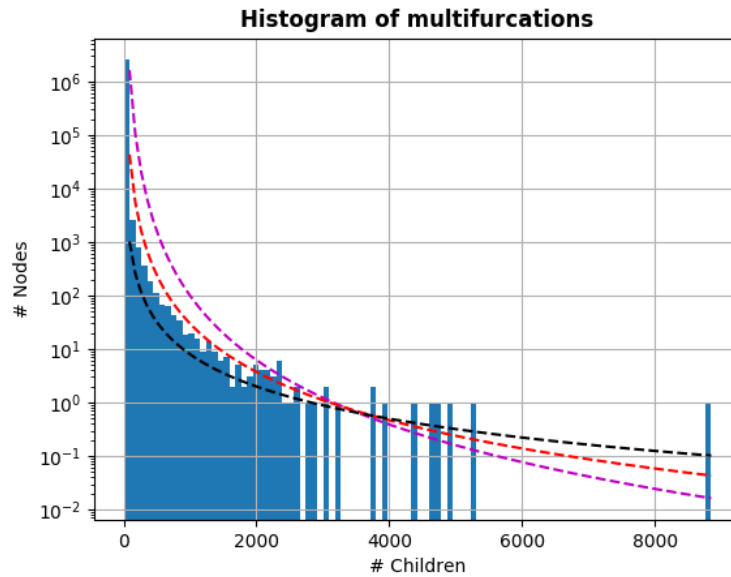
TODO: other subsections here...

## 2.3 Simulation

Anmerkung: Motivate the goal of the simulation (Bernhard)

- build random binary trees, tag these (parameters: parasites vs free-living, beta-distribution)

**Figure 2.4:** Histogram of multifurcations and fitting functions



- run fitch-parsimony, wagner-parsimony, our parsimony like algorithm
  - build not binary tree (poisson distribution?)
  - run new algorithms
  - compare trees (distances)
- i) build random binary trees
  - ii) tag tree
  - iii) multifurcate tree
  - iv) run maximum parsimony algorithms
    - Fitch
    - Sankoff (Castor package)
    - my algorithm
  - v) Evaluation



### 2.3.1 random binary tree

Anmerkung: Again, motivate first, why this is required and why you choose this solution (Bernhard)

To get a random binary tree, I used the Phylo package from biopython. They offer a randomized function which returns a BaseTree <sup>1</sup>:

---

```
from Bio import Phylo
Phylo.BaseTree.Tree.randomized(number_leaf nodes)
```

---

From the BaseTree class:

Anmerkung: trivial, does not give real info (Emanuel)

---

```
def randomized(cls, taxa, branch_length=1.0,
              branch_stdev=None):
    """Create a randomized bifurcating tree given a list
       of taxa.
       :param taxa: Either an integer specifying the number
                   of taxa to create (automatically named taxon#),
                   or an iterable of taxon names, as strings.
       :returns: a tree of the same type as this class.
    """
```

---

TODO: Zitat von BaseTree und buildTree.py

### 2.3.2 tag tree

Anmerkung: instead of 'tag tee' simulating stages and transitions between them (Emanuel)

At this point we want one fully tagged tree, and one less tagged tree which looks like our real data.

Let's say the first specie (the root node) was free-living (start with a parasite without a host makes no sence). For every transition from a node to his child, we take

---

<sup>1</sup><https://github.com/biopython/biopython/blob/master/Bio/Phylo/BaseTree.py>

a random number from the father distribution. We decided that from the biological perspective a beta distribution reflects our transition probabilities best (see Figure 2.1 **TODO: ref einfügen** ).

Anmerkung: why is that the case and why is that from a biological perspective? (Bernhard)

Anmerkung: I'd rather say that to ensure that the parameter of the binomial distribution is restricted to the  $[0,1]$  interval, we model it... (Bernhard)

For example when our father node was free-living, then we take from the free-living beta distribution. Is the number under the threshold for being parasite, we get a change and tag the current node as parasite. Otherwise we tag it as free-living.

With this procedure we traverse through the tree from the root to every leaf node. A part of this code you see here:

---

```
from numpy import random
if father_tag == 0:
    # freelifving_distribution:
    new_random = random.beta(a=A_FL, b=B_FL)
else:
    # parasite_distribution:
    new_random = random.beta(a=A_P, b=B_P)
tag = 0 #  $\rightarrow$  FL
if new_random < percentage_parasites:
    tag = 1 #  $\rightarrow$  P
```

---

**TODO: Bessere Beschriftung, Plot neu erstellen! U.a. mit threshold**

We save each tag with the associated node ID in a nodelist.

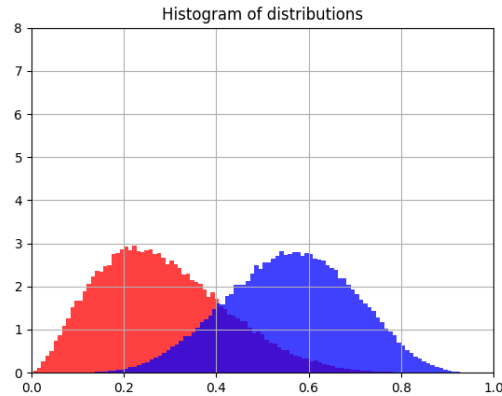
Anmerkung: simulationg loss of information (1) states (2) topology/multifurcation (Emanuel)

The real tree has much less information, we have only information from some current species (leaf nodes) and **TODO: and probably negligible internal nodes** .

To simulate our real tree we save for every node an empty placeholde except for some leaf nodes. There we save the tags again. The amount of these unknown information is one parameter, which we got from our real tree. Or which we can change to **TODO: ...**

**TODO: Was hiervon gehört ind Methoden, was schon in Implementierung oder ganz woanders hin?**

**Figure 2.5:** 60% Free-living - 40% Parasites  
red: parasites, blue: free-living



### 2.3.3 multifurcate tree

Anmerkung: simulating loss of information (Emanuel)

Another parameter is the nature and strength of the multifunction of the tree, since we do not have a binary tree in the real case. After several measurements and analyzes, which we explain in **TODO: section/chapter x**, **Anmerkung: fit, justification (Emanuel)** we decided to use a  $\frac{1}{x}$  distribution, where  $x$  is the depth of a node. This means, how deeper we are, how less information we have.

We traverse through the tree and pick a random number between 0 and 1. If random number is smaller as our limit ( $\frac{1}{x}$ ), than we forget the node and hang every child to the father node of the current node.

Anmerkung: poisson process → fit that distribution, include depth as a predictor, see if significant (

---

```
from numpy import random
from utilities import Helpers

def get_non_binary_tree(subtree, nodelist):
    i = 0
    while i != len(subtree.clades):
```

```

if subtree.clades[i].is_terminal():                                # is leaf node
    i += 1
else:
    element = Helpers.find_element_in_nodelist(subtree.clades[i])
    limit = get_limit(element[1])
    new_random = random.uniform()                                # choose if v
    if new_random < limit:                                         # or new_rand
        subtree.clades += subtree.clades[i].clades             # add children
        del subtree.clades[i]                                    # delete inte
    else:                                                         # if we don't
        get_non_binary_tree(subtree.clades[i], nodelist)
# otherwise the children are in the current clade array
    i += 1
return

def get_limit(depth):
    limit = 1 - 1 / ((depth + 3) / 4)
    if limit < 0.1:
        limit = 0.1
    return limit

```

---

Wir lassen das Limit nicht beliebig klein werden, sondern beschränken es auf 0.1.

## 2.3.4 maximum parsimony algorithms

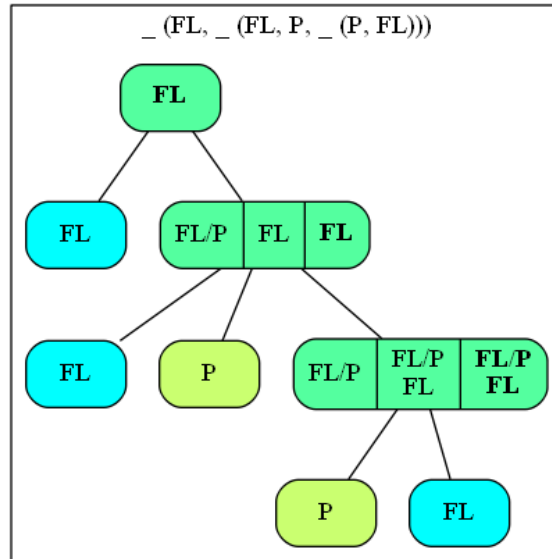
### Fitch maximum parsimony

Described from [COO98] + others ... - implemented for multifurcating trees

Fitch algorithm for binary trees:

Der Baum hat die folgende Struktur: Alle inneren Knoten sind leer. In den Blattknoten befindet sich entweder das Tag FL oder P, oder deren Vereinigung, wenn es sich um einen unknown node handelt.

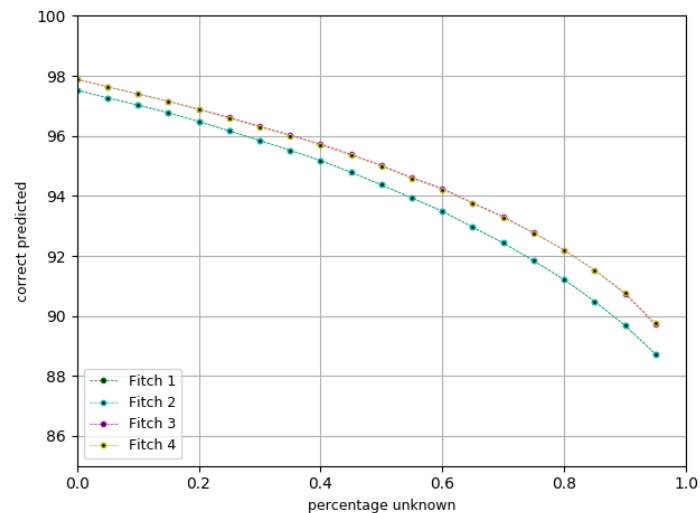
Figure 2.6: bla



Der Fitch Algorithmus ist aufgeteilt in drei Schritte, in welchen man jeweils durch den Baum traversiert. Schritt 1 beginnt von de Blättern aus, da sich dort zu Beginn die einzige Information befindet. Für jeden Knoten gilt, wenn seine Kinder schon Information enthalten, dann bilde die Schnittmenge der Tags und schreibe diese als Information in den aktuellen Knoten. Ist die Schnittmenge leer, dann schreibe die Vereinigung aller möglichen Tags in den Knoten. Für alle Kinder, die noch keine Information haben, führe diesen Schritt erst für diese aus. Schritt zwei geht von den Kindern der Wurzel bis zu den Vätern der Blätter. Jeder Knoten bekommt einen zweiten Tag, der sich aus der Vereinigung des Tags des Vaterknoten und der Geschwisterknoten zusammensetzt. Ist diese leer, bekommt der Knoten wieder die Vereinigung aller Tags, also  $\{FL, P\}$  als Tag.

Hier gibt es einige Möglichkeiten, wie dieser Schritt genau aussieht. 1. Version: Es wird nur der erste Tag vom Vaterknoten genutzt. Außerdem wird von den Geschwisterknoten zuerst der Schnitt gebildet, und danach vom Ergebnis nochmal mit dem Vaterknoten zusammen. (Immer wenn der Schnitt leer ist, ist das Ergebnis die Vereinigung aller Tags, also  $\{FL, P\}$ . Auch im folgenden...) 2. Version: Es wird nur der erste Tag vom Vaterknoten genutzt. Er wird zusammen mit den Geschwistertags genommen und direkt ein Schnitt aller Mengen gebildet. 3. Version: Es werden alle vorherigen

**Figure 2.7:** bla



Tags vom Vater genutzt und von diesen ein Schnitt gebildet. Das selbe gilt für die Geschwistertags. Und dann wird ein dritter Schnitt zwischen den Ergebnissen gebildet. 4. Version: Es werden alle Tags genutzt und direkt in einem Schnitt zusammengekommen.

Der Finale Schritt traversiert nochmal über den Baum und bildet aus den zwei Tags pro Knoten einen finalen Tag, indem wieder der Schnitt der beiden Tags das Ergebnis ist.

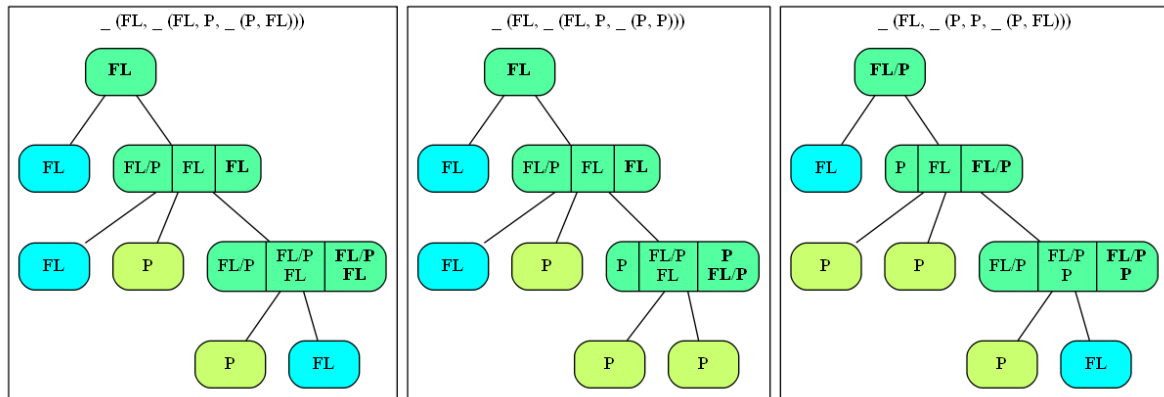
Ich habe diese Versionen mit 100 Bäumen mit 10000 Blattknoten und der Verteilung 60% FL zu 40% P simuliert. Bei 90 % unbekannten Knoten lag Version 1 zu 89.67 %, Version 2 zu 89.67 %, Version 3 zu 90.72 % und Version 4 zu 90.74 % richtig.

How to extend Fitch for multifunction?:

## Sankoff

Maximum parsimony algorithm from Sankoff implemented in the R package castor.

**Figure 2.8:** bla



my Algorithm

## 2.4 real data analysis

- Import tree
- Import interactions
- run castor algorithm / and others?
- interpret results (leave one out)

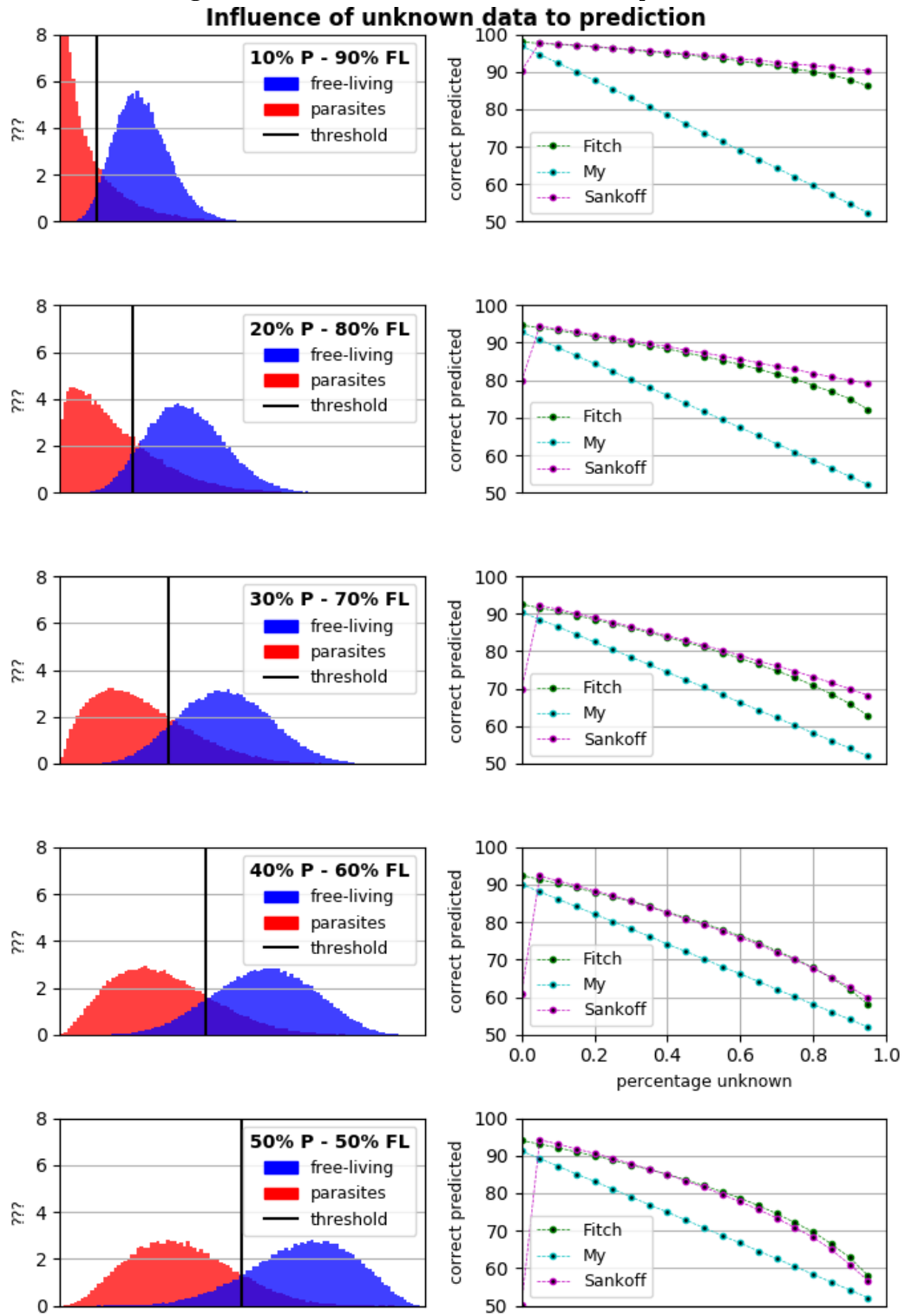
## 2.5 Implementation

## 3 Results

### 3.1 Influence of different parameters



Figure 3.1: Influence of unknown data to prediction



## 4 Discussion

Wie gut ist der randomisiert erstellte Baum?

Wie gut kommt unsere Simulation an die echte Datenlage heran.

Fehlerquote der Daten an sich?

Wie gut ist unsere Datenlage? 3 mio Knoten, 1.8 named species (leaf nodes), 200.000 leaf nodes mit Information.

Simulation von subtrees

Welche Teile des Baumes sind gut, an welchen muss noch viel geforscht werden.

Wieviele Origins haben wir gefunden, was bedeutet diese Zahl?

Parameter der Simulation:

- Wie ist die Verteilung der vergessenen internen Knoten? Zum Wurzelknoten hin mehr vergessen?
- Wie sehen die Übergangswahrscheinlichkeiten aus von  $P \rightarrow FL$  und andersherum?
- Verteilung Parasiten zu Freilebend zu keine Information

Selecting of the 'right' / best Distribution

# Bibliography

- [Fit71] FITCH, Walter M.: Toward Defining the Course of Evolution: Minimum Change for a Specific Tree Topology. In: *Systematic Biology* 20 (1971), Nr. 4, 406-416. <http://dx.doi.org/10.1093/sysbio/20.4.406>. – DOI 10.1093/sysbio/20.4.406
- [HSA<sup>+</sup>15] HINCHLIFF, Cody E. ; SMITH, Stephen A. ; ALLMAN, James F. ; BURLEIGH, J. G. ; CHAUDHARY, Ruchi ; COGHILL, Lyndon M. ; CRANDALL, Keith A. ; DENG, Jiabin ; DREW, Bryan T. ; GAZIS, Romina ; GUDE, Karl ; HIBBETT, David S. ; KATZ, Laura A. ; LAUGHINGHOUSE, H. D. ; MCTAVISH, Emily J. ; MIDFORD, Peter E. ; OWEN, Christopher L. ; REE, Richard H. ; REES, Jonathan A. ; SOLTIS, Douglas E. ; WILLIAMS, Tiffani ; CRANSTON, Karen A.: Synthesis of phylogeny and taxonomy into a comprehensive tree of life. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112 (2015), Nr. 41, 12764-12769. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1423041112>. – DOI 10.1073/pnas.1423041112
- [SM87] SWOFFORD, David L. ; MADDISON, Wayne P.: Reconstructing ancestral character states under Wagner parsimony. In: *Mathematical Biosciences* 87 (1987), Nr. 2, 199 - 229. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-5564\(87\)90074-5](http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/0025-5564(87)90074-5). – DOI [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(87\)90074-5](https://doi.org/10.1016/0025-5564(87)90074-5). – ISSN 0025-5564

## 5 Appendices

### 5.1 Distribution of data in the taxa

Kingdom (3)	Number of Nodes	Phylum (25)	Number of Nodes	max max height
Metazoa	1 465 207	Arthropoda	1 170 539	54
		Chordata	106 650	74
		Mollusca	80 022	22
		Platyhelminthes	27 141	9
		Nematoda	24 564	23
		Cnidaria	14 878	36
		Porifera	11 737	26
		Echinodermata	10 654	14
		Bryozoa	8 631	11
		Rotifera	3 093	7
		Nemertea	1 793	7
		Tardigrada	1 654	7
		Acanthocephala	1 596	6
		Brachiopoda	1 055	9
		Nematomorpha	633	7
		Chaetognatha	360	7
		Hemichordata	196	5
		Cycliophora	11	5
Fungi	254 871	Ascomycota	157 045	19
		Basidiomycota	92 931	18
		Microsporidia	1 949	6
		Glomeromycota	1 490	6
		Chytridiomycota	1 456	6
Chloroplastida	121 239	Streptophyta	120 731	49
		Chlorophyta	508	6

## 5.2 Taxa table

Taxa	Number of Nodes	Internal Nodes	Leaf Nodes
<b>kingdom</b>	?	-	-
<b>phylum</b>	?	-	-
superclass	1	1	0
<b>class</b>	139	111	28
subclass	82	72	10
infraclass	8	7	1
superorder	33	31	2
<b>order</b>	614	483	131
suborder	231	178	53
infraorder	89	73	16
parvorder	14	12	2
superfamily	628	489	139
<b>family</b>	5740	4202	1538
subfamily	2617	1915	702
supertribe	1	0	1
tribe	1262	868	394
subtribe	267	221	46
<b>genus</b>	127006	81494	45512
subgenus	1176	801	375
section	3	2	1
subsection	1	1	0
species group + species subgroup	181 + 93	129 + 74	52 + 19
<b>species</b>	1649679	4424	1645255 (1639247)
subspecies	16486	16	16470 (16449)
variety + varietas	226 + 1529	0 + 4	226 (224) + 1525 (1515)
forma	182	0	182 (182)
no rank	519	403	116 (7)
no rank - terminal	32510	0	32510 (32510)

extended leaf nodes (real leaf nodes)