

Projekt:  
Das Potenzial der Bäume

von

Lucy Fischer

Betreuungslehrer: Herr Mertens, Herr Nebe

**Städt. St. Michael Gymnasium, Bad Münstereifel**

## Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung .....	3
1.1.	Kurzfassung .....	3
1.2.	Ansatz .....	3
1.3.	Grundlegendes Prinzip .....	3
1.3.1.	Erste Hypothese .....	4
1.3.2.	Zweite Hypothese .....	6
2.	Umsetzung .....	7
2.1.	Vorgehensweise .....	7
2.2.	Medium für die Datenreihe .....	7
2.3.	Parameter .....	8
2.3.1.	Umgebung .....	8
2.3.2.	Baumart .....	8
2.3.3.	Größe des Baumes .....	9
2.3.4.	Wetter .....	9
2.3.5.	Bodenfeuchtigkeit .....	10
2.3.6.	Tiefe der Elektrode im Baum .....	10
2.3.7.	Entfernung der Elektrode im Boden (zum Baum) .....	11
2.3.8.	Höhe der Elektrode im Baum .....	11
2.3.9.	Spannung .....	12
2.4.	Materialien .....	12
3.	Ergebnisse .....	13
4.	Auswertung .....	13
5.	Zukünftige Ziele .....	15
6.	Literaturverzeichnis .....	16

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Auszug aus den Messergebnissen .....	13
--------------	--------------------------------------	----

# 1. Einleitung

## 1.1. Kurzfassung

In dieser Forschungsarbeit wird die Gewinnung von elektrischer Energie aus Bäumen untersucht. Dazu werden mit Hilfe von zwei Messelektroden zunächst verschiedene Potenziale unterschiedlicher Baumarten mit variablen Referenzparametern abgeleitet. Und nein, es ist nicht wie mit der Zitrone, wo durch die unterschiedlichen Metalle kurzfristig Strom gewonnen werden kann. Der Strom aus den Bäumen ist nichts, was sich aufbraucht, denn er wird durch den unterschiedlichen Ionengehalt von Baum und Erde produziert. Das Ziel ist es die entscheidenden Parameter für die optimale Stromgewinnung von Bäumen herauszufinden und es somit um ein Vielfaches effizienter zu machen. Auch wenn es nicht möglich ist diese Art von Stromgewinnung großflächig anzuwenden, wäre es durch die zukünftigen Ergebnisse dieser Forschungsreihe möglich autonome Feuermelder oder andere kleinere Helfer im Wald durch die Bäume zu versorgen.

## 1.2. Ansatz

Das Gewinnen von Strom aus Bäumen ist ein hochaktuelles Thema, an dem momentan auch das MIT forscht. Sie haben überhaupt erst herausgefunden, dass über die Potentialdifferenz von Boden und Baum Stromgewinnung möglich ist. Jedoch sind die relevanten Parameter immer noch weitgehend unerforscht.

In dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Erforschen der wichtigsten Faktoren und der Optimierung der Stromgewinnung. Zudem ist es Ziel dieser Forschung ein tiefgründigeres Verständnis über das Potenzial der Bäume zu schaffen. Weiter ermöglicht diese Arbeit, durch das Bestimmen von zuvor unbekanntem Parametern, das Erzielen verlässlicherer und besserer Ergebnisse, welche für viele technische Helfer in der Natur genutzt werden können.<sup>1</sup>

## 1.3. Grundlegendes Prinzip

Die Stromgewinnung beruht darauf, dass eine Potentialdifferenz zwischen Boden und Baum vorliegt. Da Potentialdifferenz dasselbe wie Spannung ist, kann daraus Strom gewonnen werden.

Weshalb führt Potentialdifferenz zu Strom?

Da alle Teilchen kinetische Energie besitzen bewegen sie sich oberhalb des absoluten Nullpunktes, permanent. Aufgrund dieser Bewegung stoßen Teilchen aneinander und verteilen sich somit zunehmend im verfügbaren Raum. Das heißt, dass wenn an einem Ort viel von einer Ladung bzw. einem Teilchen vorhanden ist, dann führt dies dazu, dass sie mehr aneinander

---

<sup>1</sup> (<https://www.deutschlandfunk.de/strom-aus-baeumen-melken-100.html> )

Stößen. Daraufhin bewegen sie sich von alleine zu dem Ort mit einer niedrigeren Konzentration. Wichtig dabei ist, dass für diese Bewegung keine zusätzliche Energie aufgewendet werden muss. Dieses lang bekannte Prinzip heißt Diffusion.

Dies kann insofern genutzt werden, dass durch die Bewegung eines Teilchens bzw. einer Ladung von der einen Stelle zur anderen Kinetische Energie gewonnen werden kann. Normalerweise wäre diese gewonnene Energie dem Verlust an potenzieller Energie gleich. Dies ist bei den Bäumen nicht anders, jedoch können sie diesen sofort wieder ausgleichen.

Woher kommt der stromliefernde Potenzialunterschied?

Hierbei gibt es zwei Hypothesen, die beide auf dem Nährstoffaufnahme- und Transportsystem des Baumes beruhen. Es ist davon auszugehen, dass beide eine Potenzialdifferenz erzeugen, die sich jedoch in der durch sie zu erreichenden Spannung drastisch unterscheiden. Dies liegt daran, dass für beide jeweils komplett andere Parameter zutreffend sind. Beide Theorien werden in diesem Teil der Arbeit ausgeführt und bei dem praktischen Teil überprüft und ausgewertet. Zudem werden bei den Unterpunkten der Parameter auch erklärt, welche Hypothese, welche Parameter voraussetzt.

Der erste Ansatz beruht auf dem von dem Baum zur Nährstoffaufnahme erschaffenen Gradienten und geht davon aus, dass dem Baum das Null Potenzial zugeordnet wird.

In einem elektrischen Feld kann einem bestimmten Punkt das Null Potential zugeordnet werden, wobei es sich meistens um die negativere oder geerdete Platte handelt.

Der zweite Ansatz beruht darauf, dass der Boden sehr nährstoffreich ist und der Baum mit steigender Höhe weniger Ionen aufweist, diese jedoch genug sind, um eine möglichst große Potenzialdifferenz zu erzeugen. Auch bei dieser Hypothese wird dem Baum das Null Potenzial zugeordnet. Das liegt daran, dass der Boden generell eindeutig nährstoff- und ionenreicher ist als der Baum.<sup>2</sup>

### 1.3.1. Erste Hypothese

Bei der ersten Hypothese liegt der Hauptfokus auf den biochemischen Prozessen in den Baumzellen. Hier wird davon ausgegangen, dass die größte Spannung durch den Gradienten zur Aufnahme von Nährstoffen erfolgt. Eine zentrale Rolle nimmt dabei die Ionenkonzentration in den Wurzeln und im Boden ein. Bäume nehmen über die Wurzeln Nährstoffe in Form von Ionen, z.B.  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $NO_3^-$ , aus dem Boden auf.

---

<sup>2</sup> (<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/ladungen-elektrisches-feld/grundwissen/potential-und-elektrische-spannung> )

Doch nach der Aufnahme ist im Boden kurzfristig eine geringere Menge an Ionen. Das heißt, dass die Nährstoffe eigentlich wieder zurück gehen müssten und die Aufnahme gestoppt werden würde, wenn diese nur über Diffusion abläuft. Jedoch passiert dies in den Bäumen nicht, denn die Nährstoffaufnahme und der Transport werden nicht immer wieder gestoppt. Das bedeutet, dass es sich hierbei nicht um Diffusion, sondern um ein anderes Prinzip handeln muss. Es handelt sich hierbei um aktive Prozesse, die größtenteils über Carrier-Proteine unter der Verwendung von ATP verlaufen. Hierbei ist vor allem die Art wie Nährstoffe von den Wurzelzellen aufgenommen werden das, was für diese Hypothese relevant ist.

Hierbei ist die Protonenpumpe bzw.  $H^+$ -ATPase eines der wichtigsten Bestandteile. Dieses integrale Membranprotein ist selbst primär aktiv. Seine Energie gewinnt es aus der Hydrolyse von ATP. Es hat viele wichtige Funktionen, doch die Betrachtung wird in dieser Arbeit auf die, die direkt oder indirekt relevant für den Stromgewinn sind, reduziert.

Durch den Transport von Protonen aus der Zelle baut sie einen Protonengradienten zwischen dem Inneren der Zelle und dem Außenraum auf, welcher für viele enzymatische Prozesse und die Kontrolle des pH-Wertes relevant ist. Doch es erschafft nicht nur einen Protonengradienten innerhalb des Baumes, sondern auch außerhalb.

Dabei pumpt die Protonenpumpe Wasserstoffionen aus den Wurzelzellen in den Boden. Grundsätzlich ist die Konzentration von Protonen in den Zellen höher als im Boden und somit erfolgt dieser Prozess gegen das Konzentrationsgefälle und benötigt Energie. Jedoch ist danach die  $H^+$  Konzentration im Boden erhöht, während sie in der Zelle abgenommen hat. Dies führt zu einer Ansäuerung des Bodens, wodurch viele Stoffe im Boden besser löslich sind und leichter aufgenommen werden können. Zudem sorgt es auch für einen Protonengradienten.

Dieser ist nicht nur wichtig für viele sekundäre Prozesse zur Aufnahme von Nährstoffen, sondern auch für die Stromgewinnung. Weiter sorgt es auch für das Membranpotenzial, welches in beiden Theorien essenziell für die Stromgewinnung ist.

Dieses entsteht aus dem chemischen Gradienten, welcher durch den Unterschied in der Protonenkonzentration im Boden und im Zellinneren resultiert, sowie dem elektrischen Gradienten, der durch den Unterschied der vorliegenden Ladung entsteht.

Der von der Protonenpumpe aufgebaute Gradient würde sich jedoch ohne Einwirkung aufgrund von Diffusion immer wieder ausgleichen. Denn wie das Prinzip der Diffusion besagt, verteilen sich Teilchen immer vom Ort mit hoher Konzentration zum Ort mit niedriger Konzentration, da sie an einem Ort mit höherer Konzentration öfter aneinanderstoßen.

Das heißt, dass nur wegen dem aktiven Transport in Bäumen der Gradient aufrechterhalten werden kann. Daher ist der Potenzialunterschied permanent und nur deswegen ist es überhaupt möglich Strom aus den Bäumen zu gewinnen.<sup>345</sup>

### 1.3.2. Zweite Hypothese

Die zweite Hypothese ist, dass sich die Potentialdifferenz und somit auch die Stromgewinnung erhöht, wenn eine Elektrode im Baumstamm und die zweite Elektrode weiter entfernt vom Baum platziert wird. Hier wird davon ausgegangen, dass mehr Nährstoffe bzw. Ionen im Boden sind, wenn er nicht direkt an den Baum angrenzt. Denn durch die ständige Aufnahme über die Wurzeln könnte die Menge jener geringer sein. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass in den Wurzeln aufgrund des ständigen Austausches an Nährstoffen eine höhere Konzentration herrscht wie weiter oben im Baum. Dies bedeutet, dass die Potentialdifferenz zwischen Wurzeln und Erde geringer ist wie die zwischen Stamm und Erde.

Weiter sind in dieser Theorie die Schichten des Baumes relevant. Denn trotz dem Erfordernis einer relativ geringen Anzahl an Ionen im Baum für einen möglichst großen Gradienten, muss eine gewisse Menge vorhanden sein, um den Stromgewinn zu maximieren. Dies liegt daran, dass durch das Vorhanden sein von Ionen an beiden Elektroden, die unterschiedlichen Ladungen für einen verstärkten elektrochemischen Gradienten sorgen. Zudem ermöglicht dies überhaupt erst den Stromfluss und sorgt für eine erhöhte Leitfähigkeit, welches zu mehr Strom führt. Deswegen ist es von Vorteil mit der Elektrode die aktive Xylem Schicht zu treffen, denn dort werden die Nährstoffe in Form von Ionen transportiert. Das Befördern der Nährstoffe entgegengesetzt der Gravitation funktioniert dank dem Transpiration-Kohäsions-Saugspannungs-Mechanismus. Durch die Transpiration über die Stomata entsteht ein Unterdruck, da die Wasseraufnahme in den Mesophyllzellen in den Blättern durch den Verlust von Wasser sinkt, was zu einem negativen Druck führt. Zudem schrumpfen die Zellen im Mesophyll bei Wassermangel, wodurch es zu einer leichten Verformung der Zelle kommt, welches den Unterdruck verstärkt. Durch die Kohäsion von Wasser, dank der Wasserstoffbrückenbindungen, verläuft der Transpirationssog durch das gesamte Xylemsystem bis hin zu den Wurzeln. Dieses Prinzip hat, abgesehen davon, dass es entscheidend für den Nährstofftransport und damit auch für die Energiegewinnung ist, mehrere positive Effekte auf die Ergebnisse. Zum einen führt ein erhöhter Sog zu einem schnelleren Fluss der Ionen, was den elektrochemischen Gradienten verstärkt. Zudem kann dieser beschleunigte Fluss die ionische Aktivität erhöhen, da wenn der Transport von Wasser und Nährstoffen gut

---

<sup>3</sup> (<https://www.chemie.de/lexikon/Protonenpumpe.html>)

<sup>4</sup> (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0005273600001280> )

<sup>5</sup> (I. Urry, 01.08.2019)

funktioniert, die Prozesse im Baum effizienter laufen können. Ein höherer Ionentransport führt letztlich auch zu einer Steigerung des elektrochemischen Gradienten, welches die Grundlage für eine stärkere elektrische Spannung ist.<sup>6</sup>

## 2. Umsetzung

### 2.1. Vorgehensweise

Die im weiteren kurz beschriebene Vorgehensweise gibt einen Überblick über den folgenden Ablauf. Zuerst wurde ein Medium bestimmt über welches die Forschungen dokumentiert und ausgewertet werden sollten.

Danach ging es an die Erstellung der Tabelle. Hierbei lag der Hauptfokus auf dem Herausfiltern der wahrscheinlich relevantesten Parameter und dem Aufstellen von zu überprüfenden Hypothesen.

Anschließend musste das benötigte Material herausgesucht und besorgt werden. Der nächste Schritt waren die Tests, Überprüfungen und die Dokumentation der Ergebnisse. Daraus wurden dann Trends abgelesen und ausgewertet. Schließlich folgten die ersten Überlegungen zu den praktischen Anwendungen der Ergebnisse.

### 2.2. Medium für die Datenreihe

Um die Daten zu sammeln und zu dokumentieren war ein Medium erforderlich, welches mehrere Anforderungen erfüllt. Erstens sollte es digital sein. Dadurch ist die Sortierung und Dokumentation übersichtlicher. Zudem ermöglicht ein digitales Medium die Nutzung von Auswertungs- und Datenanalysen Funktionen. Auch die Speicherung und Verbreitung der Daten wird durch ein online Medium erleichtert. Es wäre Zeitverschwendung nicht die neuen uns verfügbaren Mittel zu nutzen und dazu noch sinnlos und vor allem nicht nachhaltig.

Deswegen konzentrierte sich meine Suche auf ein Programm bzw. eine App. Diese sollte in der Lage sein Berechnungen, Auswertungen, Darstellungen und Analysen anhand von Daten zu erstellen.

Jedoch sollte es gleichzeitig benutzerfreundlich und überschaubar sein. Dadurch lag der Fokus auf minimalistischeren Programmen, die trotzdem die benötigten Funktionen besaßen.

---

<sup>6</sup> (I. Urry, 01.08.2019)

## 2.3. Parameter

Der folgende Teil der schriftlichen Ausarbeitung skizziert den Prozess der Ermittlung von relevanten Variablen anhand von den oben erklärten Prinzipien, so wie die Aufstellung von Hypothesen, die dann bei den praktischen Forschungen überprüft werden.

### 2.3.1. Umgebung

Der Hauptfaktor bei der Umgebung und ihren Einfluss auf die Stromgewinnung liegt bei der Beeinflussung der Bodenbeschaffenheit. Dabei sind zum Beispiel durch Agrarland und Düngung, Nährstoffe in einer höheren Konzentration vorhanden. Der Überfluss an Ionen in Form von Dünger kann dazu führen, dass der Gradient sich verstärkt. Dies wiederum hätte Auswirkungen auf den Baum und die Stromgewinnung vor allem in Anbetracht der zweiten Hypothese. Weiter kann davon ausgegangen werden, dass die Menge von Bäumen in direkter Nähe, die Ergebnisse beeinflussen. Denn dadurch gibt es weniger Nährstoffe, die auf noch mehr Empfänger verteilt werden müssen. Dasselbe gilt auch für Wasser, welches auch eine umkämpfte Ressource ist. Dies wiederum beeinflusst die Osmose und somit indirekt auch die Stromgewinnung.

Auch weitere Umgebungsmerkmale könnten die Ergebnisse beeinflussen, deswegen sollte die Umgebung möglichst detailliert beschrieben werden. Wie anhand dieser Beispiele erkennbar wird könnten der Ort und die entsprechende Umgebung eine wichtige Variable zur optimalen Stromgewinnung sein.

### 2.3.2. Baumart

Verschiedene Baumarten haben unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf ihre biologischen Prozesse, Ionentransportmechanismen und ihre physiologischen Eigenschaften, die sich direkt auf die Stromproduktion auswirken könnten. Da es Unterschiede zwischen Baumarten gibt können einige Bäume über aktivere Ionentransportmechanismen verfügen. Dadurch kann in der ersten Theorie mehr Strom gewonnen werden, da die Protonenpumpe effizienter ist und in der zweiten, weil der Transport der Ionen durch den Baum schneller verläuft. Auch die Menge an Nährstoffen, die ein Baum aufnehmen kann, ist von der Art abhängig. Entsprechend kann mehr Strom generiert werden mit Bäumen, die eine höhere Nährstoffaufnahme haben. Zudem können manche Bäume über eine höhere Photosyntheseleistung verfügen, was wiederum zu einer besseren Nährstoffaufnahme und effizienteren Mechanismen führt. Zusätzlich hat die Art des Baumes auch Einfluss auf seine Größe.<sup>7</sup>

---

<sup>7</sup> (Paul Kramer)

### 2.3.3. Größe des Baumes

Größere Bäume haben tendenziell größere Wurzelsysteme entsprechend also auch eine höhere Nährstoffaufnahme und einen vermehrten Transport. Zudem haben sie oft aktivere Zellen. Dies ist vor allem für die erste Hypothese relevant, da dadurch die Protonenpumpe besser bzw. effizienter arbeiten kann. Weiter führt die größere Wurzeloberfläche dazu, dass an mehr Stellen Protonenpumpen  $H^+$  Ionen aus den Zellen in den Boden pumpen und somit der Boden geladener ist. Dies führt zu einem größeren chemischen und elektrischen Gradienten und entsprechend, laut der ersten Theorie, auch zu einer höheren Stromproduktion. Doch auch für die zweite Hypothese wäre ein höherer Baum von Vorteil. Erstens kann dadurch die Elektrode im Baum höher platziert werden und somit an einem Ort sein, an dem die Ionen mehr verteilt sind. Zudem ist ein reger Transport hilfreich, um einen höheren elektrochemischen Gradienten aufzubauen. Denn dadurch werden mehr Ionen über die Zellmembranen transportiert und somit kann ein größerer Stromfluss entstehen. Es ist zu vermuten, dass je höher der Baum ist, desto mehr Strom produziert werden kann.

### 2.3.4. Wetter

Das Wetter umfasst mehrere Faktoren wie die Temperatur, Feuchtigkeit, Lichtverhältnisse und den Wind. All diese beeinflussen die Stromproduktion direkt oder indirekt. Die Temperatur hat einen Einfluss auf die Bewegung der Ionen. Denn laut der RGT-Regel (Reaktions-Geschwindigkeits-Temperatur-Regel) gilt, je wärmer, desto mehr Bewegung. Schon bei einer Temperaturerhöhung von 10 Grad laufen Reaktionen 2–3-mal so schnell ab. Das heißt, dass eine hohe Temperatur vor allem bei dem Gradienten der ersten Theorie einen Gewinnmaximierenden Effekt hat, da dadurch die Aufnahme von Nährstoffen deutlich erleichtert wird.<sup>8</sup>

Jedoch ist es auch für die zweite Theorie hilfreich, da der Transport in den Bäumen erhöht wird und somit die mindestens erforderlichen Ionen leichter erreicht werden. Dasselbe gilt für die Lichtverhältnisse, denn umso mehr Licht da ist, desto besser arbeitet die Protonenpumpe und umso besser ist der Transport von Ionen im Baum. Dies liegt an der Photosynthese und der Energie, die dadurch erzeugt wird. Diese wird nämlich für die Protonenpumpe und andere Ionentransportmechanismen verwendet.

Der Wind hat indirekt Einfluss auf den Stromgewinn, denn bei starkem Wind kann die Verdunstung erhöht sein. Dies wiederum hat Einfluss auf die Bodenfeuchtigkeit.

---

<sup>8</sup> (www.leifichemie.de)

Das Wetter bestimmt natürlich auch die Bodenfeuchtigkeit, welche wie im nächsten Punkt weiter ausgeführt, relevant für die Stromgewinnung ist.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass der Stromgewinn bei höheren Temperaturen, mit genügend Sonne und ausreichend Feuchtigkeit am optimalsten ist. Deswegen kann angenommen werden, dass im Sommer mit etwas besseren Ergebnissen zu rechnen ist wie im Winter.<sup>9</sup>

### 2.3.5. Bodenfeuchtigkeit

Die Bodenfeuchtigkeit spielt generell eine wichtige Rolle bei der Stromerzeugung. In einem feuchten Boden ist die Ionenkonzentration höher. Das liegt daran, dass Wasser als Lösungsmittel für viele Mineralien, wie z.B. Kalium und Natrium dient. Dadurch können diese besser aufgenommen werden, was zu einem erhöhten Transport führt, welches wiederum zu einem höheren elektrochemischen Gradienten führt und somit die Stromerzeugung fördert. Es ist anzunehmen, dass bei einem Boden, der so trocken ist, dass es die Nährstoffaufnahme behindert auch der Stromgewinn nicht kontinuierlich sein kann. Denn ohne den Transport von Nährstoffen ist sowohl in der Wurzel, als auch im Stamm eine zu geringe Menge an Ionen um Strom zugewinnen.

Zudem führt ein feuchter Boden vor allem laut der zweiten Theorie zu einem erhöhten Stromgewinn. Denn wie bereits erwähnt liegen durch die Feuchtigkeit mehr gelöste Ionen im Boden vor. Dadurch ist die Differenz zwischen Boden und Baum nochmals stärker.

Jedoch wäre ein feuchter Boden auch bei der ersten Theorie förderlich, da durch die Feuchtigkeit die Protonenpumpe unterstützt werden kann.

### 2.3.6. Tiefe der Elektrode im Baum

Die Tiefe der Elektrode im Baum ist vermutlich für den Stromgewinn der zweiten Theorie von größter Wichtigkeit. Denn der Baum hat viele unterschiedliche Schichten, welche von Transportkanälen durchlaufen sind. Entsprechend der Tiefe, die die Elektrode hat, könnten diese getroffen oder eben verfehlt werden.

Der größte Transportkanal ist, wie oben bereits erklärt, das Xylem. Dort findet dank mehreren Prinzipien ein weitestgehend passiver Transport von Wasser und Ionen aus den Zellen bis hin zu den Blättern statt. Dieser Prozess kann durch Transpiration schneller oder langsamer verlaufen. Bei einem schnelleren Verlauf verstärkt es den biochemischen Gradienten auf mehrere bereits erklärte Weisen. Deswegen sollte möglichst versucht werden das Xylem zu

---

<sup>9</sup> (<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/windfaktor/12865>)

treffen. Dieser liegt immer sehr nah an der Baumoberfläche, denn jedes Jahr wächst mit einer neuen Baumschicht auch ein neues Xylem. Hierbei wird immer das neuste Xylem als Transportweg verwendet. Deswegen kann davon ausgegangen werden, dass der Stromgewinn umso höher ist, desto weniger tief die Elektrode im Baum ist.

Auch für die erste Hypothese gilt vermutlich diese Regel, da die elektrochemischen Prozesse an der Wurzeloberfläche erhöht sind, da dort der Austausch an Nährstoffen passiert.<sup>10</sup>

### 2.3.7. Entfernung der Elektrode im Boden (zum Baum)

Welche Entfernung die Elektrode im Boden zum Baum haben sollte, ist abhängig von der Theorie.

Für die erste Theorie muss die Elektrode möglichst nah am Baum bzw. der Wurzel sein. Da dort, wie bereits erklärt, dann der von der Protonenpumpe erschaffene Gradient für eine möglichst große Potenzialdifferenz sorgt. Das heißt wenn es zutrifft, dass durch die erste Theorie, die größte Menge an Strom generiert werden kann, müssten die Messergebnisse höher werden, je näher die Elektrode im Boden am Baum ist. Zudem profitiert in dieser Theorie die Stromproduktion, vor allem dann, wenn der Boden relativ nährreich ist.

Die zweite Theorie erfordert genau das Gegenteil. Sie geht wie bereits erwähnt davon aus, dass die Ionenanzahl größer ist desto weiter weg man vom Baum ist, da dort umso weniger Nährstoffe verbraucht werden. Das heißt, dass wenn die zweite Theorie für den größtmöglichen Potenzialunterschied und entsprechend auch Strom sorgen kann, dann müssten die Ergebnisse besser werden, desto weiter die Elektrode vom Baum entfernt ist. Zudem sollten bei dieser Theorie die Messwerte besser sein, umso näher der Messort an einem Feld ist bzw., umso nährreicher der Boden ist.

In beiden Theorien ist die richtige Entfernung essenziell nicht nur um zu beweisen welche Theorie mehr Strom erzielen kann, sondern auch zur seiner Maximierung.

### 2.3.8. Höhe der Elektrode im Baum

Auch die optimale Höhe der Elektrode im Baum ist in Abhängigkeit der Hypothese zu betrachten.

Laut der ersten Theorie ist der Gradient am höchsten in den Wurzeln. Dort nimmt die Protonenpumpe die  $H^+$  Ionen aus den Wurzelzellen und pumpt sie in die Erde. Dadurch ist in den Wurzelzellen ein Defizit an positiver Ladung in Form von Protonen, während in der Erde ein Überschuss ist.<sup>11</sup>

---

<sup>10</sup> (l. Urry, 01.08.2019)

<sup>11</sup> (l. Urry, 01.08.2019)

Das heißt, dass der Stromgewinn, wenn diese Theorie zutrifft, höher ist, umso näher die Elektrode an den Wurzeln ist bzw. umso tiefer sie im Baum ist.

Für den optimalen Stromgewinn der zweiten Theorie trifft genau das Gegenteil zu. Hier wird davon ausgegangen, dass umso höher die Elektrode im Baum ist, umso besser die Ergebnisse sind. Das liegt daran, dass die Konzentration an Nährstoffen in den Wurzeln am höchsten ist. Entsprechend gibt es weniger Ansammlungen von Ionen höher im Baum. Dort sind Ionen fast nur im aktiven Transport zu finden. Dies führt dazu, dass dort weniger Ionen, aber trotzdem genug für das Erzeugen eines Gradienten sind. Zudem bewegen sich die Ionen dort gegen das Konzentrationsgefälle im Baum, welches zu zusätzlicher Spannung führen kann.

### 2.3.9. Spannung

Der letzte und wichtigste Parameter ist offensichtlich die Spannung. Daran kann überhaupt erst gesehen werden, welche Parameter relevant sind und welcher Ansatz besser ist.

Die Art von Strom, die bei diesen Messungen entsteht, ist Gleichstrom. Das liegt daran, dass die Potenzialdifferenz konstant bleibt und die Richtung des Stroms nicht wechselt.<sup>12</sup>

## 2.4. Materialien

Nach dem Festlegen der zu erforschenden Parameter begann die praktische Arbeit. Hierfür waren mehrere Materialien essenziell.

Um die Spannungen zu messen war ein Voltmeter und zwei Elektroden nötig. Diese mussten beide aus demselben Material sein, damit die Ergebnisse nicht vom Lösungs- und Abscheidungsdruck beeinflusst werden. Denn der Lösungsdruck entsteht durch das Redoxpotential eines Metalls und beschreibt sein Bestreben Elektronen abzugeben. Der Abscheidungsdruck ist das Bestreben von Metallionen Elektronen aufzunehmen. Diese Redoxreaktion, ist das, was bei der Zitrone für den Strom sorgt. Da es sich bei der Stromgewinnung aus den Bäumen offensichtlich nicht um dieses Prinzip handelt, würden durch unterschiedliche Metalle, nur die Ergebnisse verfälscht werden.

Weiter war ein Tensiometer zum Messen der Bodenfeuchtigkeit notwendig.

Ein weiterer Punkt war das Erkennen der Baumarten. Dabei konnten auch in diesem Projekt die relativ neuen Entwicklungen in der Technik, KIs, hilfreich sein. Jedoch wurden auch andere Materialien wie Bücher, Apps und Foren zur Erkennung der Baumart genutzt.

---

<sup>12</sup> (<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/ladungen-elektrisches-feld/grundwissen/potential-und-elektrische-spannung>)

Zusätzlich waren noch einige Haushaltgegenstände wie Bohrer und Maßband nötig, bevor die Messungen begonnen werden konnten.

### 3. Ergebnisse

Hier ein Auszug aus den Messreihen, zur Veranschaulichung der im nächsten Kapitel folgenden Auswertung. Dieser zeigt einen Teil der Tabelle und die Ergebnisse, die durch einen Baum erzielt wurden.

	Umgebung	Wetter	Feuchtigkeit des Bodens	Baumart	Höhe Baum	Höhe der Elektrode im Baum	Tiefe der Elektrode im Baum	Entfernung Elektrode im Boden zum Baum	Spannung (in Volt)
Ort 3	Mehrere Bäume in der Nähe, neben einem Feldweg, kleiner Hügel von 2 Metern Höhe	-2 Grad	18 %	Wald Kiefer	8m	Wurzeln	1cm	5cm	0,05
							0,5cm		0,04
						25cm	1,5cm	15cm	0,02
								50cm	0,031
							1cm	100cm	0,028
									0,04
						100cm	0,1cm	5cm	0,04
									0,06
							2cm	70cm	0,07
								100cm	0,08
							1cm	50cm	0,07
								100cm	0,06
							0,1cm		0,031
							150cm	150cm	0,033
						150cm	2cm	5cm	0,05
								100cm	0,06
							0,1cm	150cm	0,064
								300cm	0,054
								0,44	
							100cm	0,04	
						200cm	2cm	5cm	0,07
								100cm	0,083
							1cm	300cm	0,085
									0,089
	100cm	0,07							
	5cm	0,06							

Abbildung 1: Auszug aus den Messergebnissen

### 4. Auswertung

Beginnend mit der Umgebung war anhand der Ergebnisse erkennbar, dass die Messwerte an Waldrändern und Feldern in der Regel besser ausgefallen sind.

Zudem führten wie bereits angenommen größere Bäume zu höherem Stromgewinn.

Auch die Annahme, dass die Ergebnisse bei wärmeren Temperaturen besser sind, wird durch die Daten unterstützt.

Entsprechend kann dasselbe über die Lichtverhältnisse gesagt werden.

Weiter kohärierte eine höhere Bodenfeuchtigkeit im Durchschnitt, wie bereits vermutet, mit besseren Ergebnissen.

Die stärksten Trends ließen sich bei den letzten drei Parametern erkennen.

Die Tiefe der Elektrode im Baum hatte einen großen Effekt auf die Ergebnisse. Mit der richtigen Tiefe sind die Ergebnisse um bis zu 50% gestiegen. Hierbei war im Durchschnitt die optimale Tiefe 0,5-1cm. Dies ist vom Alter des Baumes abhängig, denn entsprechend tief liegt das Xylem. Da diese Ergebnisse mit der ungefähren Position des Xylems übereinstimmen, trifft die Vermutung, dass die höhere Aktivität der Ionen im Xylem den elektrochemischen Gradienten verstärkt und zur mehr Strom beiträgt, zu.

Die optimale Entfernung der Elektrode im Boden und die Höhe im Baum waren die wichtigsten Parameter um herauszufinden, welche Theorie besser für die Stromgewinnung geeignet ist.

Wenn die Ergebnisse besser sind desto näher die Elektrode im Boden zum Baum ist, dann spricht dies für die erste Theorie, wenn sie besser sind, wenn die Elektrode weiter entfernt ist, dann spricht dies für die zweite Theorie.

Tatsächlich konnte über beide Entfernungen Strom gewonnen werden, jedoch gab es signifikant bessere Ergebnisse bei einer weiten Entfernung der Elektrode im Boden. Entsprechend ist also die zweite Theorie besser zur Stromgewinnung geeignet, wenn die Ergebnisse bei der Höhe der Elektrode im Baum diese stützen. Auch hierbei konnten über beide Wege Strom gewonnen werden, doch die Ergebnisse waren erneut um einiges besser, desto höher die Elektrode platziert wurde.

Das heißt, dass die zweite Theorie nicht nur zutrifft, sondern auch, dass sie eindeutig bessere Ergebnisse bringt.

Jedoch gab es einige wenige Annahmen, die nicht vollständig bewiesen werden konnten. Zum einen konnten die Ergebnisse nicht immer weiter verbessert werden, desto höher die Elektrode platziert wurde. Es gab eine Höhe ab der die Werte nur minimal bis gar nicht gestiegen sind. Dies war ungefähr ab zwei Metern der Fall. Das ist nachvollziehbar, da ab einem gewissen Punkt die Entfernung zu den vielen Ionen in den Wurzeln nicht mehr spürbar ist und sich die restlichen Nährstoffe relativ gleichmäßig über die Höhe des Xylems bzw. Baumes verteilen.

Dasselbe galt auch für die Elektrode im Boden. Auch hier wurde nur eine gewisse Entfernung zum Baum benötigt. Ab einer Entfernung von im Durchschnitt 2,5 Meter gab es auch hier, wenn überhaupt, nur minimale Verbesserungen.

Zudem kann aus den Ergebnissen von Tests zur Überprüfung der ersten Theorie vermutet werden, dass der ständige Austausch von Nährstoffen in den Wurzeln so häufig passiert, dass

dieser Gradient immer wieder wechselt und deswegen nicht wirklich zur Stromgewinnung geeignet ist.

Zusammenfassend ist aus den Ergebnissen nachweisbar, dass für den optimalen Stromgewinn, der Baum möglichst groß, die Temperatur wärmer, die Feuchtigkeit so wie die Elektrode im Baum höher und die Elektrode im Boden weiter entfernt sein sollten.

## 5. Zukünftige Ziele

Vorerst steht die Sammlung und Auswertung von noch mehr Daten zur Verifizierung und Optimierung der bisherigen Ergebnisse im Hauptfokus.

Jedoch sind die in dieser Arbeit erforschten Parameter die Grundlage für viele weitere Ansätze und Projekte. Ziel ist es die nun erforschten Ergebnisse praktisch anzuwenden. Dafür gibt es viele und vor allem naturschützende Möglichkeiten. Ein Beispiel wären autonome Rauchmelder, die von den Bäumen mit Strom versorgt werden und im Falle eines Feuers dieses melden und sich damit selbst schützen. Weiter könnten auch kleinere Kameras angebracht werden zum Erkennen von Wild und zur Hilfe des Försters. Dies wäre zuvor vielleicht nur schwer umsetzbar gewesen, da die meisten Förster nicht die Zeit haben, um ständig Batterien überall auszutauschen. Doch wenn sie über die Bäume versorgt werden, ist der Strom quasi endlos.

Da es sehr viele Anwendungsbereiche für die erzielten Ergebnisse gibt, wird als nächstes angestrebt, dieses Projekt durch das Konstruieren eines solchen Helfers weiterzuentwickeln. Hierbei wäre es möglich die Erkenntnisse über das „Potenzial der Bäume“, mit meinem letztjährigen Projekt, der „Wild Life Watch“ zu kombinieren.

## 6. Literaturverzeichnis

<https://www.apple.com/de/numbers/>. (kein Datum).

<https://www.chemie.de/lexikon/Protonenpumpe.html>. (kein Datum).

<https://www.deutschlandfunk.de/strom-aus-baeumen-melken-100.html> . (kein Datum).

<https://www.leifichemie.de/gleichgewicht-und-geschwindigkeit/reaktionsgeschwindigkeit/grundwissen/einfluss-der-temperatur-auf-die-reaktionsgeschwindigkeit>. (kein Datum).

<https://www.leifiphysik.de/elektrizitaetslehre/ladungen-elektrisches-feld/grundwissen/potential-und-elektrische-spannung> . (kein Datum).

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000527360001280> . (kein Datum).

<https://www.spektrum.de/lexikon/biologie-kompakt/windfaktor/12865>. (kein Datum).

I. Urry, L. C. (01.08.2019). *Campbell Biologie*.

*Numbers*. (kein Datum). Von <https://www.apple.com/de/numbers/> abgerufen

Paul Kramer, T. K. (kein Datum). *Physiologie of Trees*.

[www.leifichemie.de](https://www.leifichemie.de). (kein Datum). Von <https://www.leifichemie.de/gleichgewicht-und-geschwindigkeit/reaktionsgeschwindigkeit/grundwissen/einfluss-der-temperatur-auf-die-reaktionsgeschwindigkeit> abgerufen