



Maximilian Hirsch, BSc

# **BERECHNUNGEN VON ELEKTRISCHEN FISCHSCHEUCHAN- LAGEN FÜR WASSERKRAFTWERKE**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Ingenieur  
Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der  
**Technischen Universität Graz**

### **Betreuer**

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stephan Pack

Institut für  
Hochspannungstechnik und Systemmanagement  
Fakultät für  
Elektrotechnik und Informationstechnik

Graz, September 2022



### **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel nicht benutzt und die, den benutzten Quellen wörtlichen und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.



Salzburg, 26.08.2022

### **STATUTORY DECLARATION**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.



Salzburg, 26.08.2022

## **DANKSAGUNG**

Für die Möglichkeit die vorliegende Arbeit als Masterarbeit durchzuführen, sowie für die Betreuung während dieser Zeit danke ich besonders Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Pack vom Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Oliver Pischler und Herrn Dipl.-Ing. Patrik Ratheiser, die mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen und vor allem mit der Fertigstellung dieser Masterarbeit an diesem Projekt beteiligt waren.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch allen Mitarbeitern des Instituts für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, die mich die gesamte Studienzeit fachlich unterstützten und mit deren Hilfe ich mir auch die ein oder andere soziale Kompetenz aneignen durfte. Auch die Zeit an der ich am Hochspannungsinstitut angestellt und somit ein Teil des Kollegiums war, werde ich in Ehren halten.

An dieser Stelle möchte ich mich auch noch bei meinen Kommilitonen bedanken, mit denen ich die letzten Jahre verbringen durfte und die im Laufe der Zeit zu sehr guten Freunden wurden. Der Zusammenhalt unter den Studenten und eure positive Energie hat meine Motivation zum Abschluss dieses Studiums stets gestärkt.

Mein außerordentlicher Dank gilt vor allem meiner Familie, Freundin und meinen Freunden, im Besonderen meiner Mama Claudia und meiner Freundin Bianca, die mir den nötigen privaten Rückhalt und Unterstützung in allen Lebenslagen während des Studiums und auch zur Erstellung dieser Arbeit geboten haben. Dank euch wird mein Traum, dieses Studium erfolgreich abzuschließen, wahr.

## **KURZFASSUNG**

Der Fischschutz bei Wasserkraftwerken gewinnt immer mehr an Bedeutung. Der Grund dafür ist unter anderem der ökologische Zustand des Gewässers, der bei der Realisierung eines Wasserkraftwerks eine große Rolle spielt. Wird ein Fischschutz in Form einer elektrischen Fischechanlagen verwendet, muss diese genau auf die zu schützenden Fischarten und den Umgebungsbedingungen des Gewässers ausgelegt sein. Für die Ermittlung der optimalen Parameter, helfen Simulationen, die die elektrische Feldstärke unterschiedlicher Anordnungen berechnen. Ziel dieser Masterarbeit ist es, verschiedene wirksame Arten von Fischechanlagen vorzustellen und mit Hilfe der berechneten elektrischen Felder die Grundlage für eine Steigerung der Effektivität an Wasserkraftwerken zu schaffen.

## **Schlüsselworte:**

Elektrische Fischechanlage, ökologischer Zustand, Fischschutz, Wasserkraftwerke, Berechnung

## **ABSTRACT**

Fish conservation in hydropower plants is becoming increasingly important. One of the reasons for this is the ecological potential of the river, which plays a major role in the realisation of a hydropower plant. If fish conservation in the form of an electric fish barrier is used, it must be designed precisely for the fish species to be protected and the environmental conditions of the river. Simulations that calculate the electric field of different arrangements help to determine the optimal parameters. The objective of this Master's thesis is to present different operative types of fish barriers and to use the calculated electric fields to create a basis for increasing the effectiveness at hydropower plants.

## **Keywords:**

Electric fish barrier, ecological potential, fish conservation, hydropower plants, calculation

## INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG.....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>RAHMENBEDINGUNGEN .....</b>	<b>3</b>
2.1	Arten von Fischescheuchanlagen .....	3
2.1.1	Optische Fischescheuchanlage.....	4
2.1.2	Akustische Fischescheuchanlage.....	5
2.1.3	Elektrische Fischescheuchanlage .....	7
2.2	Fischschutz und Fischabstieg .....	9
2.2.1	Fischarten.....	9
2.2.2	Fischabstiegshilfen .....	10
2.3	Kraftwerkseitige Rahmenbedingungen .....	12
<b>3</b>	<b>ELEKTRISCHE FISCHSCHEUCHANLAGEN .....</b>	<b>14</b>
3.1	Seilrechen .....	18
3.2	Bodennahe Elektroden.....	21
3.3	Abgehängte Elektroden.....	24
<b>4</b>	<b>MODELLBILDUNG UND SIMULATION .....</b>	<b>27</b>
4.1	Grundlagen .....	27
4.2	Flussmodell.....	30
4.3	Seilrechen .....	32
4.4	Bodennahe Elektroden.....	37
4.5	Abgehängte Elektroden.....	41
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>AUSBLICK .....</b>	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>51</b>
<b>9</b>	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>52</b>
<b>10</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>FEHLER! TEXTMARKE NICHT DEFINIERT.</b>
10.1	Literaturverzeichnis.....	<b>Fehler! Textmarke nicht definiert.</b>
<b>ANHANG.....</b>		<b>I</b>

## 1 EINLEITUNG

Die zukünftige Entwicklung des Klimawandels und der immer steigende Bedarf an elektrischer Energie drängt zum Ausbau von erneuerbaren Energien. In Österreich wird die elektrische Energie zu einem Großteil durch Wasserkraftwerke gewonnen. Auch wenn Wasserkraftwerke ein umweltschonenderes Verfahren zur Gewinnung von elektrischer Energie ist, wird dabei in die Natur eingegriffen. Nicht nur der Bau eines Wasserkraftwerks, sondern auch der Betrieb, hinterlassen einen ökologischen Fußabdruck im Ökosystem des Gewässers. Um die Realisierbarkeit eines solchen Projekts in den bereits sehr ausgelasteten Gewässern zu ermöglichen, gewinnt der Fischschutz immer mehr an Bedeutung. Wird der ökologische Zustand eines Gewässers durch den Bau eines Wasserkraftwerks mit Begleitmaßnahmen nicht verschlechtert oder sogar verbessert, erhalten diese Projekte einen Zuspruch für die Umsetzung. Es gibt bereits einige Arten, den Fischschutz an Wasserkraftwerken zu verbessern und die Passage der Fische durch die Turbine zu verhindern. In dieser Masterarbeit wird dabei näher auf elektrische Fischeicheanlagen bei Wasserkraftwerken eingegangen. Mit der Hilfe von elektrischen Fischeicheanlagen soll, unter der Berücksichtigung der Wanderverhalten von Fischen, ihr Abstieg vorbei an den Querbauten verbessert werden und somit die Mortalität der Fische verringert werden. Zu diesen Querbauten zählen unter anderem Laufwasserkraftwerke, Ausleitungskraftwerke als auch Pumpspeicherkraftwerke. Nicht nur für Groß- und Mittelwasserkraftwerke, sondern auch für Kleinwasserkraftwerke sollen Fischschutzmaßnahmen ökologisch unproblematisch und durch Subventionen realisierbar sein. Auch die Öko-Effizienz von elektrischen Fischeicheanlagen spielt bei der Realisierung eines Wasserkraftwerks eine Rolle. Bei der Umsetzung eines solchen Projektes wird eine elektrische Fischeicheanlage verwendet, wenn das Verhältnis zwischen der ökologischen Leistung bezogen auf die ökonomische Leistung möglichst hoch ist. Dadurch werden die Kosten für eine derartige Anlage gering gehalten und die Umwelt entlastet. Je nach Einsatzort können elektrische Fischeicheanlagen im Einlaufbauwerk des Wasserkraftwerks behördlich vorgeschrieben werden. Gesetzliche Regelungen zur Wasserkraft, werden in der Europäischen Union in der Wasserrahmenrichtlinie, der Hochwasser-Richtlinie und der Erneuerbare-Energien-Richtlinie festgehalten. Österreichweit wird sowohl im Regierungsprogramm, dem Elektrizitätswirtschafts- und Organisationsgesetz als auch dem nationalen Gewässerbewirtschaftungsplan der Rechtsrahmen für Wasserkraftwerke

vorgegeben. Wobei der Gewässerschutz in der Wasserrahmenrichtlinie bis zum Jahr 2027 einen guten ökologischen Zustand für alle natürlichen Oberflächengewässer in Österreich verfolgt.

Ziel dieser Masterarbeit ist die Ermittlung effektiver Methoden für den Fischschutz an Wasserkraftwerken durch elektrische Fischeicheanlagen, die Verbesserung des ökologischen Zustandes von Gewässern durch die Steigerung der Effektivität von elektrischen Fischeicheanlagen und die Bestimmung der Faktoren, welche für die Umsetzung einer rechnerisch optimierten Fischeicheanlage eine Rolle spielen.

## **2 RAHMENBEDINGUNGEN**

### **2.1 ARTEN VON FISCHSCHEUCHANLAGEN**

Es gibt mehrere verschiedene Arten von Fischescheuchanlagen. Jede dieser Anlagen hat das Ziel Fische zu vertreiben oder geführt in eine gewünschte Richtung zu lenken. Beim Einsatz einer Fischescheuchanlage wird grundsätzlich nach mehreren Faktoren, wie Fischarten und -größen im Einzugsgebiet, der Gewässereigenschaften und weiteren Faktoren, entschieden. Einsatzgebiete für Fischescheuchanlagen sind beispielsweise Pumpspeicherkraftwerke, Laufwasserkraftwerke, Wasserentnahmebauwerke (zum Beispiel, um Kühlwasser für thermische Kraftwerke zu gewinnen) und auch die Fischerei nutzt die Fähigkeit Fische kontrolliert in eine vorgegebene Richtung zu bewegen.

An Wasserkraftwerken stellt der Turbineneinlauf eine Gefahr für die Fische dar, weshalb eine Fischescheuchanlage eine unnötige Kollision verhindern kann. Nicht nur bei neu gebauten Wasserkraftwerken, sondern auch bei Bestandsanlagen können Fischescheuchanlagen installiert werden, um den Fischschutz in den Gewässern zu verbessern. Reicht der mechanische Rechen des Einlaufbauwerkes nicht aus, um die Fische vor der Turbine zu schützen, können flussaufwärts situierte Fischescheuchanlagen zusätzlich zu dem mechanischen Rechen verwendet werden. Dadurch erhöht sich auch die Wahrscheinlichkeit, dass schwächere Fische ein Querbauwerk flussabwärts passieren können. Das Ziel von Fischescheuchanlagen ist das Schützen der Fische vor einem Gefahrenbereich und leiten in Richtung einer sicheren Passage des Querbauwerks. An Wasserkraftwerken wird beispielsweise ein Bypass parallel zur Turbine angelegt, durch den die Fische gefahrlos ins Unterwasser gelangen. Doch nicht immer können mechanische Rechen oder Fischescheuchanlagen errichtet werden, weil die kraftwerksseitigen Rahmenbedingungen es nicht zulassen. In einem solchen Fall muss trotzdem der nötige Fischschutz eingehalten werden. Durch gezielte Betriebspausen zu Zeiten großer Fischansammlungen kann der Fischbestand gehalten werden.

In den folgenden drei Unterkapiteln werden Fischescheuchanlagen beschrieben, die unterschiedliche Reize der Fische stimulieren. Je nach Einsatzgebiet ist zu entscheiden, welche Art von Fischescheuchanlage am effizientesten Fische vom

Gefahrenbereich fernhält. Natürlich können auch Kombinationen der unterschiedlichen Arten von Fiskscheuchanlagen die Effizienz der Scheuchwirkung erhöhen.

### **2.1.1 Optische Fiskscheuchanlage**

Wie bereits beschrieben, stellen optischen Fiskscheuchanlagen eine Art von Verhaltensbarriere für Fische dar, die sie in eine gewünschte Richtung leitet (scheucht bzw. lockt). Beispiele für optische Fiskscheuchanlagen sind der Luftblasenvorhang oder das Stroboskoplicht. In beiden Fällen nehmen die Fische die Barriere optisch wahr, entweder als einen Fremdkörper (Luftblasen) oder als einen optischen Reiz (Stroboskoplicht).

Bei einem Luftblasenvorhang wird ein Rohr am Grund des Gewässers, dessen Passage den Fischen verwehrt werden soll, verlegt. In diesem Rohr sind in regelmäßigen Abständen Löcher, durch die Druckluft entweicht. Auf diese Weise entstehen Luftblasen, die an die Wasseroberfläche aufsteigen. Somit entsteht eine Art Luftblasenvorhang, den die Fische als optische Verhaltensbarriere, wie vergleichsweise einen mechanischen Rechen in Einlaufbauwerken, wahrnehmen und meiden. Das Entweichen der Druckluft hat noch weitere Effekte, die auf den Fisch wirken. Einerseits nehmen Fische in der Nähe des Luftblasenvorhangs die Druckschwankungen wahr, andererseits löst das Entweichen der Luft durch die kleinen Öffnungen im Rohr einen akustischen Reiz im Fisch aus. Beide Effekte sind weitere Gründe für die Fische die Passage des Gewässers zu meiden. Jede Fiskscheuchanlage muss an die Gegebenheiten des jeweiligen Einsatzortes angepasst werden können. Der Luftblasenvorhang kann durch die Größe der Öffnungen im Rohr, deren Abstände und dem Druck im Rohr angepasst werden. Vor dem Turbineneinlauf von Wasserkraftwerken eignet sich ein reiner Luftblasenvorhang jedoch nicht. Die Gründe dafür sind die unterschiedlichen Wirkungen auf verschiedene Fischarten, die starke Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit und das Auftreten von Gewöhnungseffekten. (Mayr) Zusätzlich dazu konnten Untersuchungen zeigen, dass die Wirksamkeit des Luftblasenvorhangs in der Nacht bei Dunkelheit geringer ist als bei Tageslicht. (Patrick et al.) Jedoch in Kombination mit anderen Verhaltensbarrieren kann der Luftblasenvorhang durchaus bei dem ein oder anderen Wasserkraftwerk bzw. Entnahmbauwerk eingesetzt werden. Die Voraussetzung für einen effektiven Einsatz ist eine korrekt abgestimmte

Verhaltensbarriere, die sowohl an die zu scheuchenden Fischarten und -größen als auch an die Umgebungsbedingungen angepasst ist.

Licht als optischer Reiz, beeinflusst den Orientierungssinn gewisser Fischarten. Es wird dabei unterschieden, ob der Fisch positiv auf das Licht reagiert und darauf zu schwimmt, ob er das Licht scheucht, oder keine Reaktion zeigt. Für Fischarten, die auf das Licht zuschwimmen, werden beispielsweise bei Wasserkraftwerken die Bypass-Korridore ausgeleuchtet. Dadurch wird den Fischen der Abstieg erleichtert. Auch in der Fischerei können Lichtimpulse eingesetzt werden, um Fische anzulocken. Zumeist kommt Stroboskoplicht zum Einsatz. Ein Vorteil dabei ist, dass Gewöhnungseffekte durch Änderung der Frequenz verhindert werden können. Trotzdem ist der Einsatz von Licht als Verhaltensbarriere abhängig von der jeweiligen Fischart, der Strömungsgeschwindigkeit und der Trübung des Gewässers. Bei der Verwendung von Stroboskoplicht, können Parameter wie Die Position und Ausrichtung, die Wellenlänge des emittierenden Lichts, dessen Frequenz und die Strahlungsleistung bzw. Lichtstärke eingestellt werden, um die Anlage auf die unterschiedlichen Fischarten abzustimmen und die Effizienz zu steigern. Untersuchungen des Pacific Northwest National Laboratory zeigten, dass Fische in der Nacht eher auf Licht reagieren als tagsüber. In dieser Hinsicht ergänzt sich der Luftblasenvorhang gut mit einem Stroboskoplicht und erreicht in Kombination einen guten scheuchenden Effekt auf die Fische. (Egloff et al. 2012) (Simmons et al. 2004)

### **2.1.2 Akustische Fischechanlage**

Fischarten reagieren unterschiedlich stark auf akustische Reize. Es kommt darauf an, ob die Fische eine Schwimmblase und/oder einen sogenannten Weber'schen Apparat besitzen. Der Weber'sche Apparat verbindet das Innenohr der Fische mit der Schwimmblase und sorgt so für eine größere Empfindlichkeit auf Geräusche und somit für ein besseres Gehör. Ein Fisch verwendet die Schwimmblase um seine vertikale Ausrichtung im Gewässer zu stabilisieren. Wird die Schwimmblase mit Gas (im Blut gelöst) befüllt, steigt der Fisch auf, wird das Gas abgelassen, sinkt der Fisch ab. Dieser gasgefüllte Hohlraum hilft dem Fisch bei der Wahrnehmung von Schallwellen und in Kombination mit seinem Sinnessystem auch Druckänderungen unter Wasser.

Akustische Fische scheuchanlagen können effektiv gegen Fischarten mit Schwimmblase und Weber'schen Apparat eingesetzt werden. Dazu werden Lautsprecher unter Wasser installiert, die Schallwellen erzeugt, deren Amplitude und Frequenz eingestellt werden kann. Versuche zeigten, dass Infraschall die beste Scheuchwirkung bei verschiedenen Fischarten erzielt, auch für Salmoniden (zum Beispiel Regenbogenforelle, Bachforelle, Äsche, usw.), die im Allgemeinen über kein gutes Hörvermögen verfügen. (Wessel 2013)

Für Wasserkraftwerke werden akustische Fische scheuchanlagen eingesetzt, deren Schallwellen einen Frequenzbereich unter 200 Hz erzeugt. Um die Scheuchwirkung zu steigern, wird mit den Lautsprechern ein Schallfeld erzeugt, welches aus mehreren verschiedenen Frequenzen besteht. Auch wenn die Wirksamkeit von akustischen Fische scheuchanlagen abhängig von der scheuchenden Fischart ist, spielen Faktoren wie die Temperatur und die Trübung des Gewässers keine Rollen. Wie die folgende Abbildung schematisch darstellt, können die Fische noch besser an einer Passage gehindert werden, wenn sich für eine Kombination mit einer optischen Fische scheuchanlage in Form einer Wand aus Luftblasen entschieden wird.

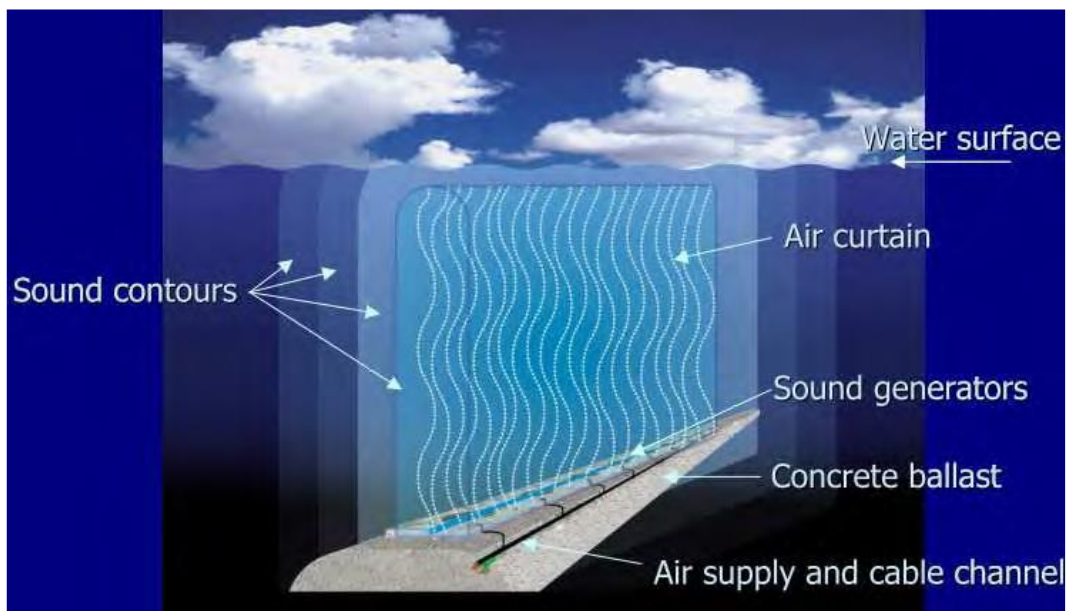


Bild 1: Kombination einer akustischen Verhaltensbarriere mit einem Luftblasenvorhang.  
(Turnpenny und O'Keeffe 2005)

### 2.1.3 Elektrische Fischescheuchanlage

Historisch gesehen wurde das Verhalten von Fischen auf die Elektrizität schon früh entdeckt. Wie es oft der Fall ist, wurde von der Menschheit die Natur beobachtet und daraus gelernt. In diesem Fall wurde festgestellt, dass bestimmte Fische (z. B.: Zitteraale) ihre Beute mit elektrischen Schlägen bewegungsunfähig machen, um sie anschließend zu fressen. Diese Erfahrungen werden bis heute in der Fischerei angewendet. Beim Einbringen von Elektroden (meist Drähte oder Seile im Wasser) werden unterschiedliche Reaktionen der Fische, unter angelegter Spannung festgestellt. Der elektrische Strom, der dabei durch den Fisch fließt, sorgt für eine Lähmung oder den Tod der Fische in näherer Umgebung. Mittlerweile sind solche Anlagen ausgereifter und helfen auch bei der Entnahme von Fischen für die Datenerfassung und Forschungszwecke, weil dabei das Einfangen der Fische für sie mit weniger Stress verbunden ist. (Glechner)

In dieser Arbeit wird jedoch näher auf den Einsatz von elektrischen Fischescheuchanlagen in Wasserkraftwerken eingegangen. Dabei müssen für die Dimensionierung der elektrischen Fischescheuchanlage auch die kraftwerksseitigen Rahmenbedingungen (siehe Kapitel 2.3) miteinbezogen werden. Weil die Wirksamkeit einer solchen Anlage von vielen Faktoren, wie die Fischarten und -größen, einer maximalen Anströmgeschwindigkeit von  $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und der Leitfähigkeit des Gewässers abhängt, muss für eine einwandfreie Funktion, die Fischescheuchanlage genau auf die Bedingungen am Einsatzort abgestimmt sein und darüber hinaus eine dauerhafte Regelung verschiedener Parameter während des Betriebs ermöglichen. Anderenfalls nehmen die Fische die Scheuchanlage nicht als Verhaltensbarriere wahr. Bei Laufwasserkraftwerken ist die Anwendung einer elektrischen Fischescheuchanlage wegen der limitierenden Anströmgeschwindigkeit schwierig. Aber in Kombination mit einem mechanischen Rechen ist die Schutzwirkung für die Fische auch dort realisierbar. Sind die Wasserentnahmestellen seitlich am Gewässer situiert, an denen geringere Fließgeschwindigkeiten herrschen, können die Fische erfolgreich von dem Gefahrenbereich ferngehalten werden. Ökonomische Betrachtungen können nur in Abhängigkeit des jeweiligen Einsatzorts durchgeführt werden. Die Kosten einer Fischescheuchanlage setzen sich aus den Errichtungskosten, den Stromkosten während des Betriebs, den Wartungs- und Instandhaltungskosten und sonstigen Kosten zusammen. Um die Kosten gering zu halten, ist

es in bestimmten Gebieten möglich einen Teilbetrieb zu fahren, ohne dass die Mortalität der Fische leidet. Durch einen Teilbetrieb können die Stromkosten reduziert werden. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch den reduzierten Stromfluss durch die Elektroden, denn dadurch sinken auch die Kosten für Wartung und Instandhaltung, weil beispielsweise die Korrosion an den Elektroden geringer ist. (Adlmannseder)

Wasserkraftwerke mit einer installierten elektrischen Fischeicheanlagen sollten an allen Zugängen, auch über das Wasser mit Warnzeichen zu den, in der Anlage herrschenden elektrischer Felder beschildert sein. Laut dem Österreichischen Verband für Elektrotechnik zählen die elektrischen Fischeicheanlagen von Wasserkraftwerken zu den ortsfesten Elektrofischeicheanlagen und gelten demnach als abgeschlossene elektrische Betriebsräume. Diese müssen den Gefahrenbereich mit geeigneten Maßnahmen absperren (z. B.: Drahtzäune und Gitter) und durch Warnschilder kenntlich machen. Die Wasserflächen können beispielsweise mit einem Seil überspannt werden, an denen die Warnschilder angebracht sind. Für die Aufrechterhaltung des einwandfreien Betriebs wird eine Überprüfung der Anlage alle zwei Jahre durchgeführt. (ÖVE-E 36/1970)

## **2.2 FISCHSCHUTZ UND FISCHABSTIEG**

### **2.2.1 Fischarten**

Ein wesentlicher Faktor für die Dimensionierung einer effektiven elektrischen Fischeicheanlage sind die zu schützenden Fischarten. Diese Arbeit untersucht Fische, deren Wanderrouen flussabwärts gerichtet sind. Es gibt potamodrome und diadrome Fischarten. Die in Österreich relevanten Fischarten sind alle potamodrome Fischarten, welche sich nur im Süßwasser aufhalten. Leider gibt es derzeit noch recht wenig Wissen über diese Arten, im Vergleich zu diadrome Fischarten. Dieser Forschungsbedarf wird in Zukunft bestimmt gedeckt, weil die heimischen flussabwärts schwimmenden Fische immer mehr an Bedeutung erlangen in Bezug auf die Errichtung von Wasserkraftwerken. Fische, die flussabwärts wandern, orientieren sich an der Hauptströmung, weshalb bei einem Wasserkraftwerk die Wanderroue durch die Turbinen führt.

Grundsätzlich wird zwischen Art, Größe und Altersstadium der Fische im Einzugsgebiet, des zu betrachtenden Wasserkraftwerks, unterschieden. Häufig vorkommende potamodrome Fischarten in Österreich sind: Aitel, Äsche, Bachforelle, Barbe, Bitterling, Brachse, Flussbarsch, Gründling, Hasel, Kaulbarsch, Laube, Nase, Regenbogenforelle, Rotaue, Rußnase und Schneider. Die Erhaltung der Fischpopulation und die Befindlichkeit all dieser Fischarten ist ein Maß für den ökologischen Zustand des Gewässers. Deswegen ist es wichtig, die Forderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie hinsichtlich des ökologischen Zustands einzuhalten. Die Durchgängigkeit ist für das Wanderverhalten von Fischen unverzichtbar. Jungfische treten aufgrund der Strömung flussabwärts gerichtete Wanderungen an, aber auch für Laichwanderungen ist die Durchgängigkeit der Gewässer von essenzieller Bedeutung für den Fischschutz. (Seifert 2009)

Das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus hat zum Thema „Fischschutz und Fischabstieg in Österreich“ Untersuchungen angestellt, die sich mit der Problematik von flussabgerichteten Wanderbewegungen von Fischen an Kontinuumsunterbrechungen befassen. Dabei wurde eine Mortalitätsrate von 31% der getesteten Fische (< 16 cm Länge) bei ihrer Passage durch eine Turbine festgestellt. Die Mortalität ist jedoch abhängig von der Art der Turbine und der Fische. Beispielsweise reagieren Bitterling, Hasel und Rotaue viel sensibler auf die mechanischen Belastungen durch die Turbine und den enormen Druckunterschieden bei der Turbinenpassage. (Unfer und Rauch 2019)

Schwerwiegende Verletzungen oder im schlimmsten Fall der Tod der Fische bei der Turbinenpassage zeigt, wie wichtig eine Verhaltensbarriere vor dem Einlaufbauwerk einer Turbine ist. Das allein reicht in den meisten Fällen nicht aus. In Kombination mit einem mechanischen Rechen und einem geeigneten Korridor (Bypass) vom Oberwasser ins Unterwasser können die Fische vor der Turbinenpassage geschützt und die Durchgängigkeit des Gewässers wieder hergestellt werden. Ein mechanischer Rechen ist als reiner Fischschutz nicht effizient, weil dafür der Stababstand als Faustregel ein Zehntel der Länge des zu schützenden Fisches sein sollte. Diese Faustregel gilt für einen Großteil der österreichischen Fische, hängt jedoch trotzdem im Einzelfall von der Fischart und Körperform ab. Sollen beispielsweise Fische, die Länger als 12 cm sind, vor der Turbine geschützt werden, muss ein Stababstand von 12 mm eingehalten werden. Dies kann bei erhöhten Anströmgeschwindigkeiten jedoch dazu führen, dass größere Fische an den mechanischen Rechen gepresst werden, was wiederum zu einer Erhöhung des Stababstands führen würde.

### **2.2.2 Fischabstiegshilfen**

Um die Durchgängigkeit von Gewässern zu gewährleisten, müssen bei Querbauwerken Fischabstiegshilfen eingeplant werden. Leider ist dies bei vielen existierenden Querbauwerken nicht der Fall, weil der Fischaufstieg in der Vergangenheit wesentlich mehr Bedeutung hatte als der Fischabstieg. Demnach ist auch der Forschungsstand von Fischaufstiegshilfen ausgeprägter als von Fischabstiegshilfen. Es fehlen noch umfangreichere und detailliertere Vorschriften und Gesetze zum Thema Fischabstieg und auch Leitfäden zum Bau von Fischabstiegshilfen. Ziel ist es die Fischabstiegshilfen abhängig vom Einsatzort nach dem Stand der Technik an allen relevanten Querbauwerken zu implementieren. Natürlich mit einem Augenmerk auf die technische Machbarkeit und den Kosten, aber genauso wichtig ist die Verbesserung des fischökologischen Zustandes. (Unfer und Rauch 2019; Friedrich 2005) Dieser Zustand kann mit Hilfe von Gesetzen, Vorschriften und beispielsweise Subventionen verbessert werden und damit der Bau von Flussabstiegshilfen zu Gunsten des Fischschutzes gefördert werden.

Abgesehen von der Turbinenpassage stehen den flussabwärts schwimmenden Fischen je nach Wasserkraftwerksanlage die Fischaufstiegshilfe, Restwasserdotierbauwerke oder Fischabstiegshilfen zur Verfügung. Herrscht im Gewässer Hochwasser,

dann stellt auch das Überschwämmen der Wehr eine Möglichkeit für die Fische dar, ins Unterwasser zu gelangen. Aber auch während des Normalbetriebs des Wasserkraftwerks kann, durch prognostizierbare Abwanderungszeiträume gewisser Fischarten, eine Öffnung der Wehranlage eingeplant werden. (Böttcher et al. 2015) Flussaufstiegshilfen eignen sich nur bedingt, da die Fische der Hauptströmung durch die Turbinen folgen und den Ausgang der Flussaufstiegshilfe meist nicht finden. Ist der Ausgang der Fischaufstiegshilfe jedoch in der Nähe des Querbauwerks, nutzen die Fische auch diese zum Fischabstieg, wie das Kraftwerk Lehen in Salzburg durch Beobachtungen zeigt. (Pinter et al. 2019; Petz und Glechner 2014)

Flussabstiegshilfen sind Korridore (Bypass), die an der Turbine vorbei vom Oberwasser (OW) ins Unterwasser (UW) führen. Der Eingang dieses Bypasses ist vor der Turbine, direkt neben der Rechenanlage positioniert. Dabei wird zwischen einem Schräg-rechen, welcher horizontal ausgerichtet ist und einem Flachrechen mit Bypass-Rinne, der vertikal ausgerichtet ist, unterschieden (siehe Bild 2 und Bild 3).

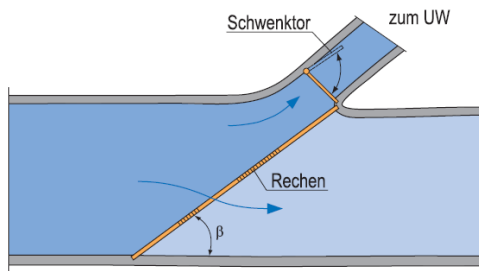


Bild 2: Schematische Darstellung eines Bypasses mit Schwenktor und einem Schräg-rechen (Grundriss). (Friedrich 2005)

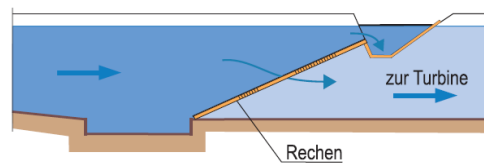


Bild 3: Schematische Darstellung einer Bypass-Rinne und einem Flachrechen (Längsschnitt). (Friedrich 2005)

In beiden Fällen werden die Fische durch die, zur Anströmrichtung geneigten, Rechen in Richtung des Bypasses gelenkt und darüber hinaus in das Unterwasser geleitet. Um, bei der Anordnung mit einem Schräg-rechen, auch bodennahen Fischen eine Abstiegshilfe zu bieten, wird ein sogenannter „vertical-slot“ empfohlen. Dabei reicht der Eingang des Bypasses von der Wasseroberfläche bis hin zur Sohle. Dadurch steigt die Auffindbarkeit des Bypasses für die Fische und schützt sie gleichzeitig vor der Turbine. (Unfer und Rauch 2019)

## 2.3 KRAFTWERKSEITIGE RAHMENBEDINGUNGEN

Kraftwerksseitige Rahmenbedingungen sind standortspezifische Rahmenbedingungen in Abhängigkeit von der momentanen Betriebsart des Wasserkraftwerks. Jedoch reglementieren Gesetze und Vorschriften den Betrieb, beispielsweise zur Mindestwassermenge und Hochwasserschutz.

Abhängig vom Ober- und Unterwasserspiegel muss für die Turbinen eines Wasserkraftwerks ein Mindestdurchfluss während des Betriebs des Kraftwerks gegeben sein. Das heißt, dass eine Fischeicheanlage dementsprechend ausgelegt werden muss, den Durchfluss des Kraftwerks nie unter den vorgegebenen Mindestdurchfluss zu senken. (Kühne und Schwevers 2016; Egloff et al. 2012)

Ein wesentlicher limitierender Faktor ist die maximale Anströmgeschwindigkeit, bei der eine elektrische Fischeicheanlage wirkt. Diese liegt zwischen  $0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und  $0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . (Unfer und Rauch 2019) Die Anströmgeschwindigkeit beim Einlaufbauwerk eines Wasserkraftwerks wird wesentlich durch die Rechenanlage beeinflusst. Je kleiner der Stababstand und je größer der Anströmwinkel ist (Neigung des Rechens), desto größer sind die hydraulischen Verluste. (Berger 2018)

Der mechanische Rechen vor dem Turbineneingang sorgt dafür, dass keine Fremdkörper in die Turbine gelangen, welche größer als die Gitteröffnung sind. In Österreich gibt es keinen vorgeschriebenen maximalen Stababstand, sondern wird in wasserrechtlichen Verfahren im Einzelfall entschieden. Kann der Stababstand jedoch für den Fischechutz nicht ausreichend verringert werden, wird der Einsatz von elektrischen Fischeicheanlagen empfohlen. Gründe, warum Stababstände nicht beliebig verringert werden können, sind die dabei steigenden hydraulischen Verluste des Wasserkraftwerks und in bestimmten Fällen ist die technische Realisierbarkeit nicht möglich. Für Kleinwasserkraftwerke sind kleinere Stababstände durchaus realisierbar und haben in Verbindung mit geringen Fließgeschwindigkeiten den Vorteil, dass der Rechen als Sandfang fungiert und die Turbine somit vor zusätzlicher Verunreinigung bewahrt. (Unfer und Rauch 2019)

Weitere Rahmenbedingungen von Wasserkraftwerken sind gewässerökologische Rahmenbedingungen. Diese implizieren auch den Fischechutz und dessen Vorgaben, die beim Bau eines Kraftwerks eingehalten werden müssen. Um dies zu ermöglichen können fischechonende Turbinen eingesetzt werden. Diese Art von Turbine ermöglicht

es den Fischen die Turbine zu passieren ohne merkliche Schäden davon zu erleiden. Fischeschonende Turbinen sind im Vergleich zu herkömmlichen Turbinen größer mit geringeren Rotationsgeschwindigkeiten. Weil Spalträume für die Fische bei der Passage eine enorme Gefahr darstellen, werden diese versucht so gering wie möglich zu halten. Beispiele für fischeschonende Turbinen sind die Alden Turbine und die Very Low Head Turbine. Damit könnten die hydrologischen Verluste durch den Entfall von Fischescheuchanlagen vor der Turbine reduziert werden. (Pinter et al. 2019; Böttcher et al. 2015)

### **3 ELEKTRISCHE FISCHSCHEUCHANLAGEN**

In diesem Kapitel werden drei verschiedene Arten von elektrischen Fischescheuchanlagen näher untersucht. Einerseits wird eine Elektrodenanordnung in Form eines Seilrechs betrachtet, andererseits Elektroden, die am Grund des Gewässers positioniert sind und darüber hinaus Elektroden, die ins Wasser herabhängen.

#### **Grundsätzliche Funktionsweise einer elektrischen Fischescheuchanlagen:**

Eine elektrische Fischescheuchanlage setzt sich aus bestimmt angeordneten Elektroden zusammen, die sich im Wasser befinden. Wird zwischen den Elektroden eine elektrische Spannung angelegt, baut sich zwischen den Elektroden und deren Umgebung ein elektrisches Feld auf. Die positiv geladene Elektrode wird als Anode und die negativ geladene Elektrode als Kathode bezeichnet. Befinden sich Fische in der Nähe der Anode, schwimmen sie weiter auf sie hin. In der Nähe der Kathode weisen Fische eine scheuchende Reaktion auf, weshalb die Kathode auch Scheuch- oder Hauptelektrode und die Anode Gegenelektrode bezeichnet wird. Der Strom durch die Elektroden hängt von der angelegten Spannung und dem elektrischen Widerstand des Wassers ab. Dieser Widerstand wird hauptsächlich durch die elektrische Leitfähigkeit und der Tiefe des Gewässers bestimmt. Zur Aufrechterhaltung des elektrischen Scheuchfeldes, benötigen elektrische Fischescheuchanlagen in schlecht leitenden Gewässern weniger elektrische Leistung, als bei gut leitenden Gewässern. Für eine Aufrechterhaltung der Scheuchwirkung muss also eine kontinuierliche Messung der elektrischen Leitfähigkeit des Gewässers durchgeführt werden. Ein Prinzipschema soll den grundsätzlichen Aufbau einer elektrischen Fischescheuchanlage veranschaulichen.

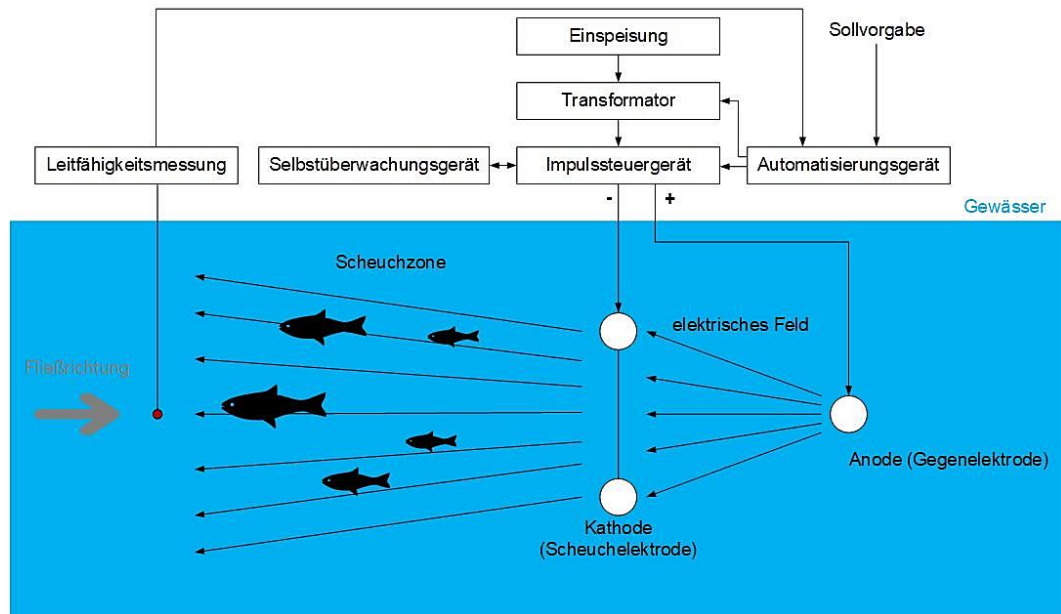


Bild 4: Prinzipieller Aufbau einer elektrischen Fischeicheanlage (Mayr)

### Elektrophysiologische Grundlagen:

Je nach Art, Alter und Größe des Fisches, zeigen sie unterschiedlichen Reaktionen auf elektrischen Strom. Kommt ein Fisch auf die elektrische Fischeicheanlage zu geschwommen, wird er durch die Galvanotaxis Richtung Anode ausgelenkt. Sollte der Fisch der Anode zu nachkommen und eine kritische Stromdichte überschritten worden sein, so kommt es zu einer narkotisierenden Reaktion (Muskelkrampf). Der Gleichstrom durch den Körper des Fisches verhindert die Beweglichkeit des Rückenmarks und sorgt deshalb für eine Bewegungsunfähigkeit. Um Gewöhnungseffekte zu vermeiden, wird der Gleichstrom als Impuls mit unterschiedlichen Frequenzen und Impulsdauern realisiert. Dies hat den Vorteil, dass die Fische sich wieder von der Narkose erholen können, sobald sich gewisse Stoffe im Fischkörper wieder abgebaut haben. Wird statt Gleichstrom Wechselstrom als Spannungsform bei einer elektrischen Fischeicheanlage verwendet, hat dies eine große Erregung des zentralen Nervensystems zur Folge. Dabei kommt es zu Muskelkontraktionen im Fisch, weshalb für einen effektiven Fischechutz Gleichspannungsimpulse verwendet werden. Befindet sich ein Fisch in einem elektrischen Feld, fällt an ihm eine Spannung, die sogenannte Gestaltspannung, ab. Wie bereits erwähnt, hängt die Scheuchwirkung auf die Fische von deren Größe ab. Das heißt, es fällt an kleineren Fischen eine kleinere Spannung ab als an Größeren. Damit es zu keiner Narkose des Fisches kommt, sollte die Gestaltspannung an den Fischen unter 6 V gehalten werden. (Glechner)

Die Einstellparameter einer elektrischen Fischescheuchanlage sind nach den Bedingungen am Einsatzort für flussabwärts schwimmende Fische präzise zu dimensionieren, jedoch sind der Aufbau und die Funktionsweise von Impulsgeneratoren ähnlich. Anhand des Typs FS10-Fischescheuchanlage der Firma Hans Grassl GmbH, lässt sich zeigen, welche Parameter an den Impulsgeneratoren eingestellt werden können. Zuerst ist eine Sollwertvorgabe der Spitzenspannung des Spannungsimpulses nötig. Dabei kann sie stufenweise erhöht und gesenkt werden. Für die Impulsdauer wird die Kapazität des Impulsgenerators verändert. Zusätzlich lassen sich die Zeiten zwischen dem positiven und negativen Spannungsimpuls stufenlos einstellen. Dadurch kann die Impulsfrequenz beeinflusst werden. Somit wird der Spannungsimpuls einer elektrischen Fischescheuchanlage vollständig vorgegeben und kann je nach Betriebszustand angepasst werden. (Grassl 1999) Sollte die elektrische Feldstärke zu hoch sein, verliert die Anlage ihre Scheuchwirkung und führt zur temporären Bewegungsunfähigkeit der Fische. Das wiederum hat zur Folge, dass die Fische mit der Fließrichtung des Gewässers abtransportiert werden. Somit würde die Schutzwirkung der Fische, als auch der Turbinen darunter leiden. Ist die Impulsdauer des Gleichspannungsimpulses zu kurz, werden die Impulse von den Fischen nicht wahrgenommen, sind sie zu lang, kann es zur Narkose der Fische kommen. Auch die Impulsfrequenz muss genau eingestellt werden, damit es zu keinen Muskelkontraktionen, bei zu hoher Frequenz, und einer ausreichenden Wirksamkeit des Scheuchfeldes kommt.

Der Österreichische Verband für Elektrotechnik (ÖVE) schreibt in der ÖVE-E 36/1970 die Errichtung und den Betrieb von Elektrofischereianlagen vor. Darunter zählen auch elektrische Fischescheuchanlagen, die mindestens aus einer Stromquelle, einer Schalteinrichtung, Elektrodenzuleitungen und den Elektroden bestehen. Maximale Berührungsspannungen von 24 V müssen eingehalten werden, das betrifft jedoch nicht die Spannungen zwischen den Elektroden. Die Anlagenteile, deren Spannung über 24 V beträgt, müssen mit Schutzisolierung nach ÖVE-E 40 ausgeführt werden, um die nötigen Schutzmaßnahmen zu erfüllen (mit Ausnahme der Elektroden). Der Scheitelwert der Impulsspannung zwischen den Elektroden, darf maximal 1000 V betragen. Grundsätzlich haben sich alle Elektrofischereianlagen einer zweijährlichen Überprüfung vom Bundesministerium für Bauten und Technik zu unterziehen, jedoch kann die

Genehmigungsbehörde eine andere Regelung für ortsfeste Fischescheuchanlagen, wie sie in dieser Arbeit behandelt werden, treffen. (ÖVE-E 36/1970; ÖVE-E 40)

### 3.1 SEILRECHEN

Diese Art von elektrischer Fischeicheanlage kombiniert einen mechanischen Rechen mit einer elektrischen Verhaltensbarriere für Fische. Diese Hybridanlage wurde an der Universität Innsbruck entwickelt. Bei einem elektrischen Seilrechen handelt es sich um horizontal gespannte Stahlseile, die sich im Wasser befinden und einen mechanischen Rechen darstellen. Die Stahlseile fungieren als Elektroden und können mit Potentialen unabhängig voneinander beaufschlagt werden. Das hat den Vorteil, dass größere Seilabstände bei selber Schutzwirkung der Fische erzielt werden. Durch die größeren Seilabstände sinken gleichzeitig die hydraulischen Verluste der Anlage. Elektrische Seilrechen werden im Einlaufbauwerk eines Wasserkraftwerks eingesetzt, um die flussabwärts schwimmenden Fische vor dem Turbineneinlauf zu schützen und sie zu einem Bypass zu leiten, durch den die Fische das Unterwasser erreichen. Anwendung finden Fischeicheanlagen sowohl bei Neubauten als auch zur Verbesserung des ökologischen Zustandes bei Bestandsanlagen im Zuge von Sanierungsmaßnahmen. Ein Beispiel für den Einsatz eines Seilrechens ist die Pilotanlage am Wasserkraftwerk Leinau an der Wertach in Kaufbeuren (Bayern). Bild 5 zeigt den Grundriss des Einlaufbauwerks mit integriertem Seilrechen, der die Fische zum Schutz in den Bypass an den Turbinen vorbei leitet.

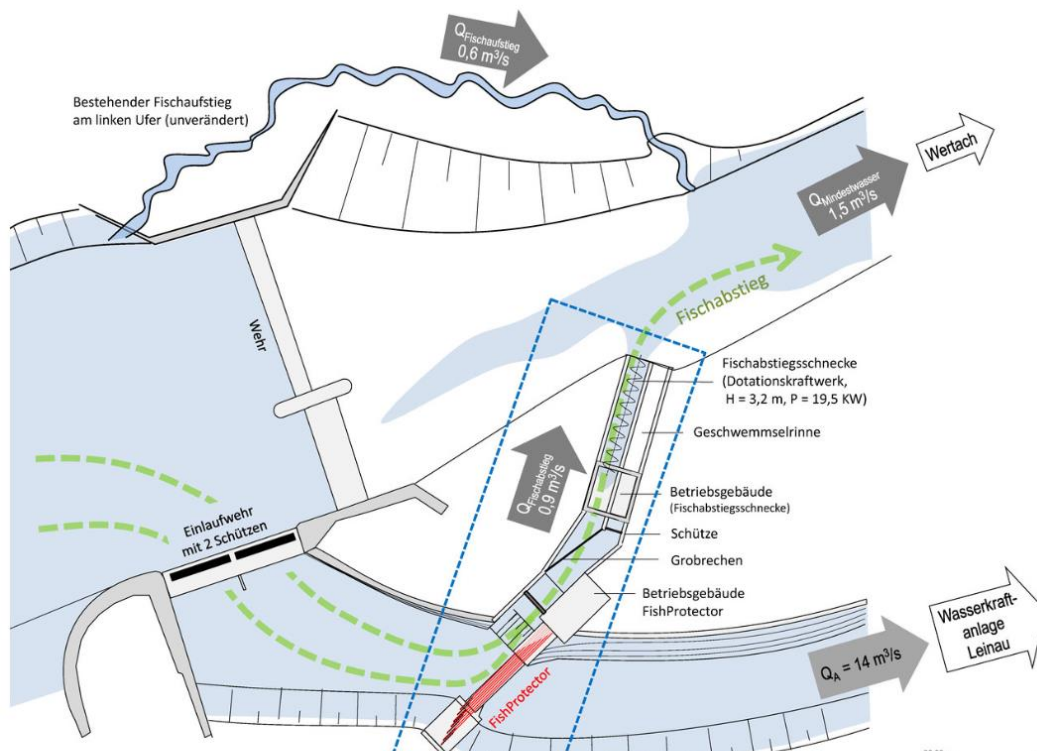


Bild 5: Grundriss eines Einlaufbauwerks mit elektrischer Fischeicheanlage und Bypass für einen schonenden Fischabstieg. (Hyfish GmbH)

Abgesehen von dem Vorteil auf einfache Weise ein Kraftwerk nachträglich mit einer solchen elektrischen Fischechanlage auszustatten, kann die Zugkraft der Stahlseile reduziert werden, sodass die Elektroden zur Reinigung und Wartung herabgesenkt werden können. Das Projekt HYFISH wurde von der Universität Innsbruck als Technologie Spin-off initiiert. In Bild 6 ist ein Versuchsaufbau mit einem unter Spannung stehender Seilrechen dargestellt. Gut darauf zu erkennen sind einerseits die Fische, die vom elektrischen Feld verschreckt werden und andererseits die Korrosion der positiv geladenen Seile (Anode) und die Plattierung der negativ geladenen Seile (Kathode). Aufgrund dieser Effekte, wird ein regelmäßiger Polaritätswechsel für eine gleichmäßige Abnutzung der Elektroden empfohlen. (Darmann 2019)

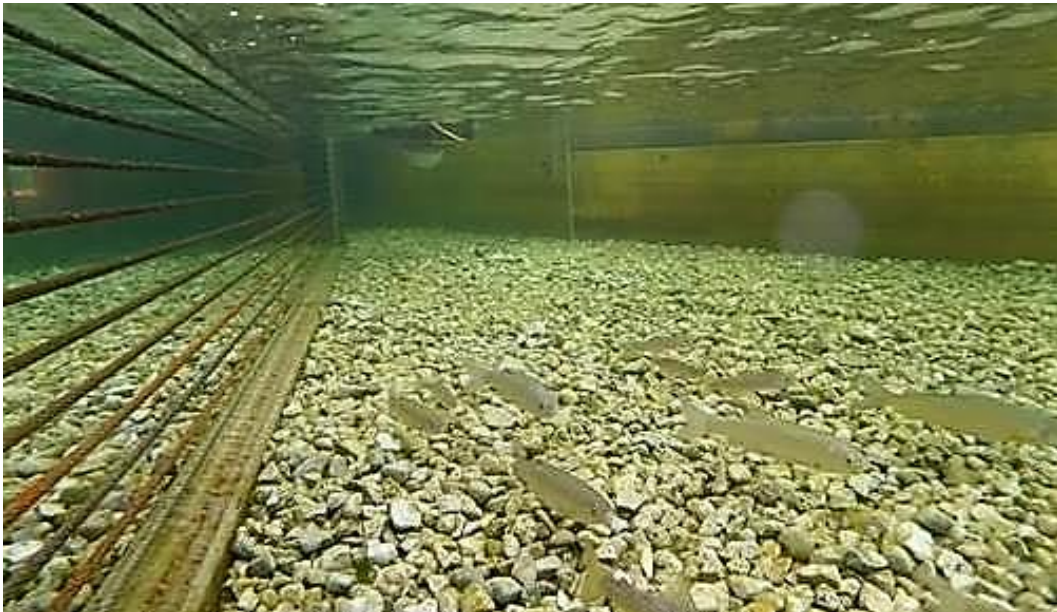


Bild 6: Versuchsaufbau eines elektrischen Seilrechen als Verhaltensbarriere für Fische.  
(Quelle: <https://www.neptun-wasserpreis.at/projekte/universitaet-innsbruck-hyfish-elektro-seilrechen/>)

Nähern sich Fische einem elektrischen Seilrechen, schwimmen sie durch das generierte elektrische Feld. Abhängig vom Abstand zum Seilrechen und der Fischgröße greifen die Fische eine Spannung ab. Diese Spannung sorgt für einen Stromfluss durch den Fisch, welcher die scheuchenden Reaktionen im Fisch hervorruft.

Auch wenn der Seilrechen als mechanische Barriere wirkt, reicht er alleine nicht aus, den Turbineneinlauf vor kleinerem Treibgut zu schützen. Seine Funktion ist der Fischschutz. Um den Seilrechen von Treibgut zu befreien, lassen sich die Seile, wie bereits

beschrieben, lösen und somit absenken. Dabei ist zu beachten, dass dies nie während des Betriebs geschieht. Die Elektroden müssen, bevor der Mindestabstand der Seile erreicht ist, von der Spannung getrennt und geerdet werden.

Der Einsatz von elektrischen Seilrechenanlagen reicht von Laufwasserkraftwerken über Pumpspeicherkraftwerken bis hin zu Kanälen. Auch in Gewässern mit Schiffsverkehr, lässt sich der Seilrechen, durch seine absenkbaren Elektroden in der Praxis gut integrieren.

### 3.2 BODENNAHE ELEKTRODEN

Bodennahe Elektroden wurden im Detail von O'KEEFFE & TURNPENNY untersucht. International spricht man von der Graduated Field Fish Barrier (GFFB).

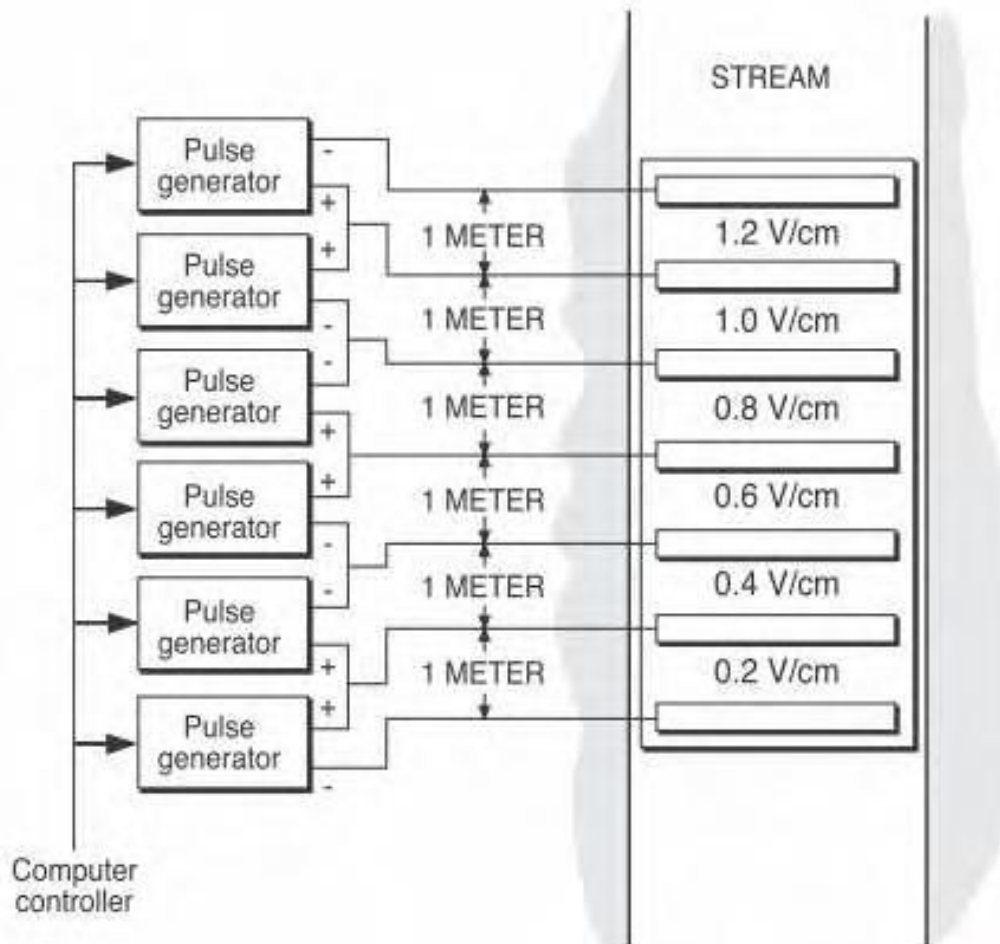


Bild 7: Prinzipieller Aufbau einer Graduated Field Fish Barrier (GFFB). (Little 2015)

Die auf der Gewässersohle, senkrecht zur Fließrichtung, ausgelegten Elektroden werden über Impulsgeneratoren mit Gleichstrom beaufschlagt. Die Impulsgeneratoren können so eingestellt werden, dass entlang der elektrischen Barriere eine steigende elektrische Feldstärke erreicht wird. Die Feldlinien verlaufen bei dieser Anordnung parallel zur Fließrichtung des Gewässers. Dadurch wird der größtmögliche Scheuch-Effekt bei den Fischen erzielt, da sie in der Regel ihren Körper zur Hauptströmung ausrichten. Der Einsatz von Gleichstrom verringert zudem die Gefahr für den Menschen sowie Stress für den Fisch. Da die Wirkung auch von der Fischlänge abhängt, bewirken die steigenden elektrischen Feldstärken, dass große Fische früher zur Umkehr

gezwungen werden. Kleinere Fische kehren aufgrund der darauffolgenden ansteigenden elektrischen Feldstärke um (siehe Bild 8).

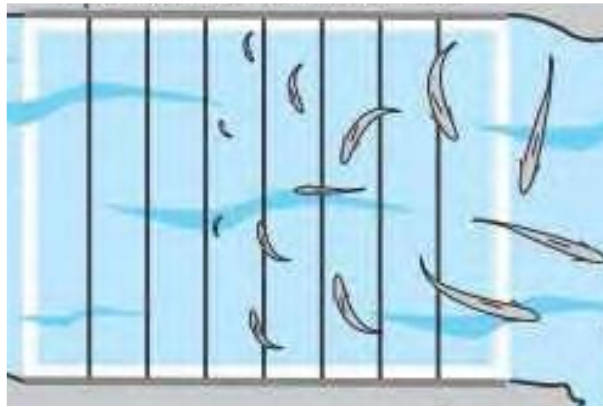


Bild 8: Grundsätzliches Verhalten der Fische an einer Graduated Field Fish Barrier (GFFB). (Talat Yalçınkaya, Abdülkadir Çakır, Yıldız Bolat, Rahmi Uysal, Ali Aslantas 2017)

Dieses Verfahren ermöglicht eine sehr schonende Scheuchwirkung für die Fische. Grundsätzlich werden die Elektroden in elektrisch isolierendem Material an der Gewässersohle angebracht, beispielsweise Beton mit einem hohen Anteil an Siliciumdioxid in Form von Silikastaub. Der Anteil an Hohlräumen (Poren) wird durch das Zugabe von Silikastaub verringert, wodurch der Beton fester und auch einen höheren spezifischen elektrischen Widerstand aufweist. (Clarkson 2003) Der Abstand zwischen den Elektroden einer GFFB-Anlage wird in der Literatur mit 1 m angegeben. Als Elektroden werden meist Stahlrohre oder Eisenbahnschienen verwendet. Diese werden über Verbindungskabel mit dem Impulsgenerator verbunden. Um eine steigende elektrische Feldstärke zu erzielen, werden die Ausgänge der Impulsgeneratoren in Serie geschaltet und können somit separat die elektrische Spannung zwischen dem jeweiligen Elektrodenpaaren einstellen. Der grundsätzliche Aufbau derartiger Impulsgeneratoren bestehen aus einer Spannungsversorgung und Leistungselektronik, die durch eine Steuereinheit dafür sorgt, dass die Spannungen mittels Vorgabe der Ein- und Ausschaltzeiten an den Elektroden anliegen.

Soll eine Fischeicheanlage in einem Gewässer mit Schiffen installiert werden, bieten sich vor allem bodennahe Elektroden an, weil sie den Schiffsverkehr nicht stören. Ein wichtiger Aspekt, der bei dieser Anlage beachtet werden sollte, ist, dass die Stahlbetonbauwerke in der näheren Umgebung der bodennahen Elektroden zusätzlich

durch das elektrische Feld belastet werden. Regelmäßige Kontrollen des Stahlbetons und eventuelle Schutzmaßnahmen gegen Korrosion werden deswegen empfohlen.

Die Einsatzgebiete sind ebenfalls umfangreich, jedoch kommen Sie meist in Kanälen vor, die zwei Gewässer verbinden, deren Fischarten eine Grenze nicht überschreiten dürfen. Dies liegt meist daran, dass gewisse Fischarten die natürlichen Feinde anderer Fischarten sind und sie mit einer elektrischen Fischechanlage mit bodennahen Elektroden davon abgehalten werden, die Population anderer Fischarten zu reduzieren. (Clarkson 2003)

### **3.3 ABGEHÄNGTE ELEKTRODEN**

Wird zwischen den beiden Ufern ein Trageil gespannt, an dem Elektroden in einem definierten Abstand zueinander befestigt sind, spricht man von einer abgehängten Elektrodenanordnung. Die Elektroden hängen dabei isoliert an dem Trageil und tauchen ins Wasser bis zu einer bestimmten Tiefe ein. Bei einer einreihigen Anordnung hängen die Anoden vom Trageil ins Wasser und darunter am Gewässergrund befindet sich die Kathode. Natürlich ist auch ein Polaritätswechsel möglich und empfehlenswert (betrieblich bedingte Abnutzung). Alternativ können die Hängeelektroden hintereinander versetzt angeordnet werden, sodass die Kathoden flussaufwärts im Wasser hängen und die Anoden in einem bestimmten Abstand flussabwärts. (Adlmannseder) In den Simulationen soll anhand unterschiedlicher Abstände und Durchmesser ermittelt werden, welche Parameter optimal sind. Denn sollte der Abstand zwischen den Elektroden zu groß sein, reduziert sich aufgrund der größeren Streuung des elektrischen Feldes, die Stromdichte an dieser Stelle. Zur Vermeidung einer reduzierten Scheuchwirkung und damit einer Passage der Fische durch die Anlage, werden die Elektroden so angeordnet, dass die Feldlinien annähernd parallel ausgerichtet sind. (Glechner) Zusätzlich dazu werden in dieser Arbeit auch versetzt angeordnete Elektroden simuliert, um die Auswirkungen auf das elektrische Feld zu untersuchen.

Ein Beispiel, in dem eine elektrische Fischeleuchtanlage mit abgehängten Elektroden eingesetzt wurde, ist das Kraftwerk Nussdorf in Wien (siehe Bild 9).



Bild 9: Abgehängte Elektroden vor der Schleuße des Wasserkraftwerks Nussdorf in Wien.

Hier wurden Kathoden und Anoden als abgehängte Elektroden hintereinander ausgeführt. Wie im Bild 9 erkennbar ist, sind die Elektroden nicht starr befestigt, sondern hängen an dem Tragseil hinab. Dadurch bewegen sich die Elektroden durch die Fließgeschwindigkeit des Gewässers und hängen nicht senkrecht nach unten. Das hat zu Folge, dass die wirksame Oberfläche der Elektroden im Wasser reduziert wird. Abhängig davon muss auch die Regelung dieser elektrischen Fischeicheanlage die Spannung zwischen den Elektroden einstellen, um keine reduzierte Scheuchwirkung zu erhalten. Der Abstand zwischen den Anoden und den Kathoden ist groß genug zu wählen, damit keine Fremdkörper (zum Beispiel Treibgut) zu einer leitfähigen Verbindung zwischen den Elektrodenpaaren führt, um Feldverzerrungen zu vermeiden. Der Abstand der Anoden und Kathoden der Fischeicheanlage des Wasserkraftwerks Nußdorf in Wien beträgt ca. 8 m. Der maximale Abstand zwischen Anoden und Kathoden ist, durch die maximal mögliche Leistung der Anlage begrenzt. Der Abstand zwischen den Elektroden und auch zwischen den Elektroden und dem Ufer ist so zu wählen, dass ein gleichmäßiges elektrisches Feld aufgebaut wird. Der Aufwand und auch die

Kosten für eine solche Fischeicheanlage sind gering, wodurch auch ein temporärer Einsatz einfach umgesetzt werden kann. Damit können zu Testzwecken sämtliche Parameter verbessert und auf den Einsatzort und den zu schützenden Fischen angepasst werden. Nach näheren Untersuchungen über einen bestimmten Zeitraum kann die Fischeicheanlage für den dauerhaften Betrieb und maximalen Fischechutz eingestellt werden.

Nicht nur für Wasserkraftwerke, sondern auch für Kühlwasserentnahmen von thermischen Kraftwerken eignet sich der Einsatz von elektrischen Fischeicheanlagen mittels vertikaler Stahlstäben (starre Bauweise). Dabei wird die elektrische Verhaltensbarriere für die Fische, genauso wie bei den Entnahmehauwerken von Wasserkraftwerken, vor der Rechenanlage (Grob- und Feinrechen) flussaufwärts installiert.

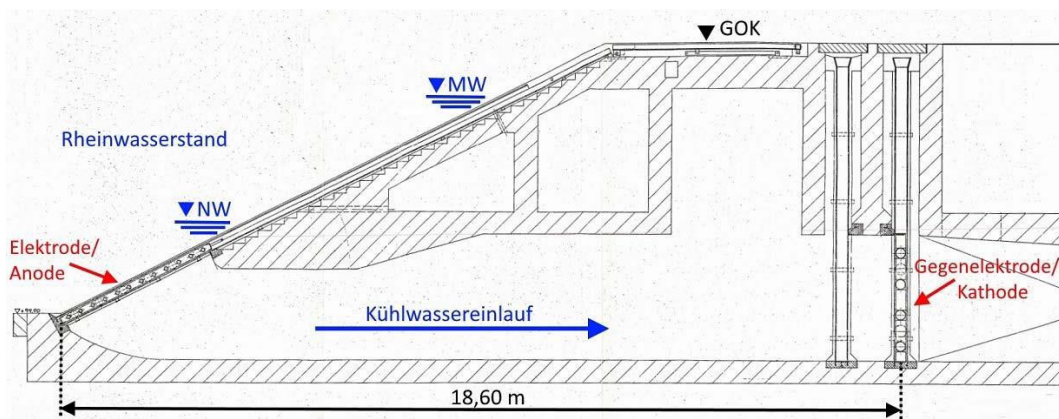


Bild 10: Installierte elektrische Fischeicheanlage im Kühlwassereinlauf des Kernkraftwerks Philippsburg (Schnittbild) (Berger 2018)

Der Unterschied zu Wasserkraftwerken ist die Richtung der Hauptströmung. Im Kühlwassereinlauf wird nur ein kleiner Teil des Wassers des Gewässers entnommen und für das thermische Kraftwerk verwendet. Die Hauptströmung bleibt im Flussverlauf bestehen, wodurch nur eine reduzierte Anzahl der Fische den Weg über den Kühlwassereinlauf wählt und mit Hilfe der elektrischen Fischeicheanlage geschützt werden muss. Weil dadurch die Normalkomponente der Anströmgeschwindigkeit, der meist geneigten Verhaltensbarrieren, kleiner ist als die Tangentialkomponente, steigt die Scheuchwirkung und somit die Effektivität der Fischeicheanlage. Aus diesem Grund wurden bereits in der Vergangenheit häufiger Kühlwasserentnahmestellen mit elektrischen Fischeicheanlagen ausgerüstet als Entnahmestellen für Wasserkraftwerke. (Berger 2018)

## **4 MODELLBILDUNG UND SIMULATION**

### **4.1 GRUNDLAGEN**

Für die Modellierung der drei Arten von elektrischen Fischelektroanagen wurde das Programm Solid Edge ST8 (Lizenz: Solid Edge Academic) von Siemens verwendet. Die Konstruktion der Modelle wurde zweidimensional durchgeführt und als eine DXF-Datei exportiert, damit sie im Simulationsprogramm als Grundlage der Berechnungen importiert werden kann. Die 2D-Zeichnungen wurden nach der Vorgabe der unterschiedlichen geometrischen Anordnungen angefertigt. Nach der Fertigstellung sämtlicher Modelle konnte mit den Simulationen begonnen werden.

Sämtliche Simulationen in dieser Arbeit wurden mit dem Programm ElecNet (Version 7.8.3.5) durchgeführt. Mithilfe der Simulation kann ElecNet das elektrostatische Feld an jeder Stelle im vorgegebenen Raster (Mesh) berechnen und daraus eine Heatmap erstellen, in der die große Menge an Daten anschaulich dargestellt wird. Zusätzlich dazu können die elektrische Feldstärke und die Spannung als Funktion in Abhängigkeit der Position, entlang eines vorgegebenen Weges und Zeitpunkt, berechnet und dargestellt werden.

Das elektrische Feld zwischen zwei Elektroden wird durch dessen Potentialdifferenz (Spannung) aufgebaut. Dabei wird die positiv geladene Elektrode „Anode“ und die negativ geladene Elektrode „Kathode“ bezeichnet. Die elektrischen Feldlinien verlaufen von der Anode, welche eine Quelle der Ladungsträger darstellt, zur Kathode, die eine Senke darstellt. Dabei stehen sie senkrecht auf der Elektrodenoberfläche. Senkrecht auf den elektrischen Feldlinien verlaufen die Äquipotentiallinien. Das heißt, dass entlang dieser Linien dasselbe Potential auftritt. In Bild 11 wird eine Elektrodenanordnung, bestehend aus zwei Elektroden mit unterschiedlichen Potentialen, dargestellt. Aus dem elektrischen Feld ergeben sich die elektrischen Feldlinien und Äquipotentiallinien.

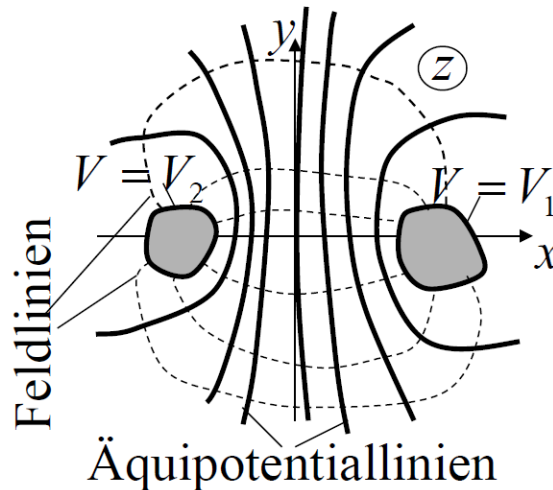


Bild 11: Elektrische Feldlinien und Äquipotentiallinien zwischen zwei Elektroden. (Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Oszkár Bíró 2017)

Die Amplitude und Richtung der elektrischen Feldstärke kann durch geometrische Addition der elektrischen Felder, die von den einzelnen Elektroden ausgehen, an jeder Position im Raum berechnet werden. Um dabei Berechnungen durchführen zu können, werden Methoden mit vereinfachten Problemstellungen angewandt. Durch die zylindrische Form der Elektroden von Fischeuchanlagen, können für die Berechnungen der elektrischen Feldstärke unendlich ausgedehnte Linienladungen zur Vereinfachung angenommen werden. Folgende Formel kann zur Berechnung der elektrischen Feldstärke, ausgehend von der Linienladungsdichte  $\tau$ , der Permittivität  $\varepsilon$  und dem Abstand  $r$  zur Linienladung, angewendet werden:

$$|\vec{E}| = \frac{\tau}{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot r}$$

Das elektrische Feld ist dabei orthogonal auf die Linienladung ausgerichtet. Zusätzlich dazu ist für die Berechnung der elektrischen Feldstärke die Bedingung des konstanten Potentials entlang der Oberfläche der Elektroden zu berücksichtigen. (Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Oszkár Bíró 2016) Somit ergibt sich die Notwendigkeit auch die elektrischen Feldstärken bei unterschiedlichen Durchmessern der Elektroden zu berechnen.

Verändert sich das umgebende Medium der Elektrodenanordnung, entsteht eine Grenzschicht. Wird beispielsweise eine elektrische Fischeuchanlage in einem Fluss betrachtet, kommt es an der Wasseroberfläche zu einer solchen Grenzschicht. Da die beiden Medien Luft und Wasser unterschiedliche relative Permittivitäten haben,

kommt es zu einem Sprung der elektrischen Feldstärke. Die Höhe dieses Sprungs ist durch folgende Bedingung festgelegt:

$$\frac{E_{Wasser}}{E_{Luft}} = \frac{\varepsilon_{Luft}}{\varepsilon_{Wasser}}$$

Diese Bedingung ergibt sich daraus, dass die elektrische Flussdichte  $D$  entlang der Wasseroberfläche konstant ist und für sie gilt:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \vec{E} \quad \text{mit} \quad \varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$$

Im Programm ElecNet wird eine numerische Methode angewendet, um die elektrische Feldstärke zu berechnen. Die sogenannte Finite-Elemente berechnet die Potentiale in einem vorgegebenen Raster (Mesh) und über den Gradienten der Potentiale kann anschließend die elektrische Feldstärke berechnet werden. (Edwards 2014)

## 4.2 FLUSSMODELL

Die Festlegung eines Flussmodells hilft ein solides Grundkonstrukt zu schaffen, auf dem die Simulationen aufbauen können. Dabei wurden unterschiedlichste Faktoren berücksichtigt, um sowohl grundlegende als auch praxisbezogene Ergebnisse aus den Simulationen zu ermitteln.

Ein wichtiger Aspekt für eine optimale Schutzwirkung und zugleich Scheuchwirkung einer elektrischen Fischeicheanlage ist die elektrische Leitfähigkeit des Gewässers. In der Praxis wird die elektrische Leitfähigkeit flussaufwärts der Fischeicheanlage gemessen und in die Spannungsregelung eingebunden. (Grassl 1999) Aufgrund von beispielsweise Treibgut oder Schlamm kann die Leitfähigkeit des Flusswassers stark variieren. Je nachdem wie viele leitfähige (freibewegliche) Ionen im Wasser gelöst sind, kann sich die elektrische Leitfähigkeit theoretisch von  $0,05 \frac{S}{m}$  (Trinkwasser) bis  $5 \frac{S}{m}$  (Meerwasser) ändern. (Quelle: <https://www.lenntech.de/anwendungen/reinstwasser/leitfaehigkeitsmessung/leitfahigkeit.htm>) Auch äußere Einflüsse, wie zum Beispiel die Temperatur, haben Auswirkungen auf die elektrische Leitfähigkeit des Flusswassers. Grundsätzlich gilt, je höher die Temperatur ist, desto höher ist auch die elektrische Leitfähigkeit, weil die Beweglichkeit der Ladungsträger ansteigt.

Eine weitere elektrische Eigenschaft des Wassers ist für elektrische Fischeicheanlagen von Bedeutung. Die relative Permittivität  $\epsilon_r$  des Flusswassers wirkt sich bei konstanter elektrischer Flussdichte  $D$  indirekt proportional auf das elektrische Feld  $E$  aus. Auch die relative Permittivität ist von der Temperatur abhängig, wie folgende Tabelle zeigt:

Tabelle 1: Relative Permittivität von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur.

	θ	ε <sub>r</sub>
	°C	
Wasser	40	73,4
	18	81,1
	0	88
Eis	-20	16

Mit Hilfe der veröffentlichten Daten der Messstellen Österreichs Hydrographie konnten die Monatsmittel der Temperaturen von 2010 bis 2018 ermittelt werden. Ausgewählt wurden dafür die Flüsse Donau, Enns, Mur, Salzach und Traun. (Quelle: <https://e-hyd.gv.at/>) Für die Bestimmung der Temperatur wurde auch der Klimawandel berücksichtigt.

Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, werden bodennahe Elektroden in Beton am Grund des Flusses eingelassen. Für die Simulation muss dafür auch der Beton und dessen Einfluss auf das elektrische Feld berücksichtigt werden. Der Beton muss im Einsatzgebiet einer elektrischen Fischelektrode elektrischen Strom bestmöglich isolieren, deswegen wird dem Beton Silikastaub beigemischt, um ihn einerseits dessen Festigkeit zu erhöhen und andererseits die Elektroden isolieren. (Clarkson 2003)

Als Übersicht werden die Parameter des zu untersuchenden Musterflusses in Tabelle 2 gezeigt.

Tabelle 2: Parameter des Flussmodells für die Simulationen in ElecNet.

	Flusswasser		Beton	
$\vartheta$	$\epsilon_r$	$\gamma$	$\epsilon_r$	$\gamma$
°C	1	S/m	1	S/m
12	83	0,1	4,5	0

Die Dimensionen des Flussmodells sind an Durchschnittswerte angelehnt und wurden unter Berücksichtigung von bestehenden Einlaufbauwerken bestimmt. In den Simulationen, die in dieser Arbeit durchgeführt wurden, ist das Flussmodell 2,5 m tief und 15 m breit.

### 4.3 SEILRECHEN

Ein Seilrechen in vertikaler Ausführung kann mit unterschiedlichen Durchmessern und Seilabständen realisiert werden. Darum wurden praxisnahe Werte für unterschiedliche Durchmesser und Seilabstände bei den Simulationen verwendet. Für den Elektrodendurchmesser fiel die Entscheidung auf die Werte 8 mm, 10 mm und 12 mm. Diese Elektroden wurden in konstanten Abständen zueinander von 30 mm, 60 mm und 100 mm in SolidEdge modelliert, um vorerst den homogenen Bereich des Seilrechens zu simulieren.

#### **Homogener Bereich des Seilrechens:**

Unter dem homogenen Bereich des Seilrechens versteht man rein den Teil des Seilrechens, der sich vollständig im Wasser befindet, ohne die Auswirkungen der Wasseroberfläche und der darüber liegenden Luft zu berücksichtigen.

Nach der Modellbildung der verschiedenen Anordnungen, mussten die Parameter des Flussmodells aus Kapitel 4.2 übernommen werden und die Form und Höhe des Spannungsimpulses festgelegt werden. Grundsätzlich wurden alle Simulationen transient durchgeführt und für die Simulationen unterschiedlicher Durchmesser und Abstände folgender Spannungsimpuls angewandt:

Tabelle 3: Parameter des Spannungsimpulses für die Simulationen in ElecNet.

Impulshöhe:	80 V
Impulsdauer:	5 ms
Anstiegszeit:	0,1 ms
Abfallzeit:	0,1 ms
Periodendauer:	500 ms

Sowohl die Impulshöhe, als auch die Impulsdauer wurden aus Erfahrungswerten der Literatur entnommen. Dabei sollen bestmögliche Ergebnisse in österreichischen Gewässern erzielt worden sein. Für das Bezugspotential von 0 V wurde Gewässergrund, also die Sohle des Einlaufbauwerks definiert. Anschließend konnten die transienten Simulationen der unterschiedlichen Durchmesser und Abstände der Elektroden simuliert werden. Dabei wurden sowohl die elektrische Stromstärke durch die Elektroden, als auch das elektrische Feld und deren Verläufe entlang unterschiedlicher Wege berechnet. Der elektrische Strom durch die Elektroden verursacht im Wasser Korrosion an den Elektroden, weshalb die Stromstärke ein Maß für die Abnutzung der Elektroden

und deren Wartungsintervall ist. Anhand des elektrischen Feldes, kann die Scheuchwirkung, die auf die Fische wirkt beurteilt werden. Bild 12 zeigt das elektrische Feld in Form einer Heatmap, die die umfangreichen berechneten Daten übersichtlich darstellt. Dabei werden geringe elektrische Feldstärken blau und große elektrische Feldstärken orange bzw. rot markiert. Zusätzlich dazu sind die Äquipotentiallinien als schwarze Linien dargestellt.

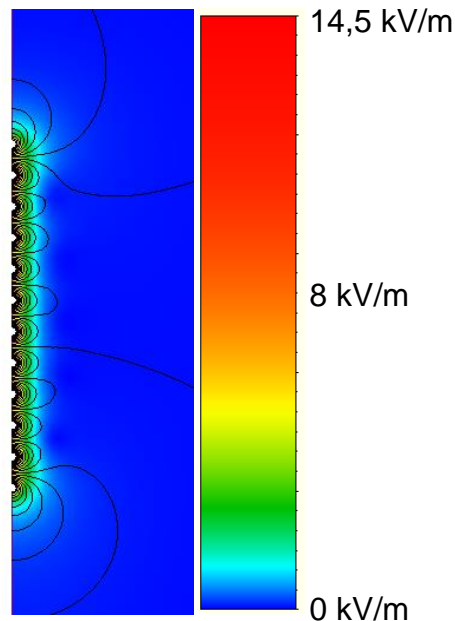


Bild 12: Elektrisches Feld eines Seilrechens mit einem Elektrodendurchmesser von 8 mm und einem Abstand von 30 mm (homogener Bereich).

Die Feldverläufe vor dem Seilrechen wurden im Abstand von 2 cm und 10 cm ermittelt, sowie den Feldverlauf in der Rechenmitte. Damit können die elektrischen Feldstärken, die auf die Fische wirken ermittelt und je nach Anordnung optimiert werden.

Abgesehen von der geometrischen Anordnung der Elektroden, ist es auch möglich die Elektroden zu gruppieren und ihnen gemeinsame Potentiale zuzuordnen. Bisher wurden die Elektroden immer abwechselnd ein positives und negatives Potential zugewiesen (Kurzform: 1+1-). Um auch diesbezüglich Untersuchungen anzustellen, wurden die weiteren Elektrodengruppen 2+2- und 3+3- simuliert. Zum Vergleich werden in den folgenden Bildern die drei unterschiedlichen elektrischen Felder dargestellt.

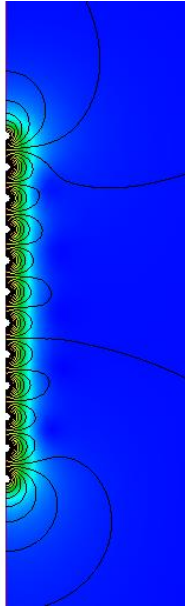


Bild 13: Seilrechen 1+1-

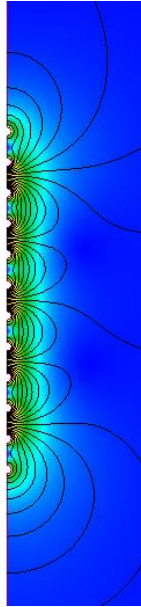


Bild 14: Seilrechen 2+2-

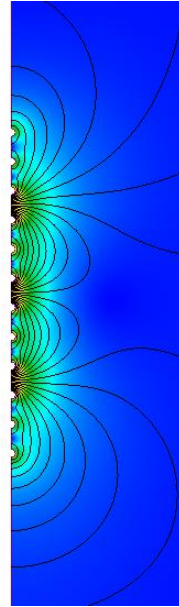


Bild 15: Seilrechen 3+3-

Abschließend wurde noch die Höhe des Spannungsimpulses variiert. Es wurden Spannungen zwischen Anode und Kathode von 160 V, 80 V, 40 V, 20 V und 10 V simuliert. Die einzelnen Simulationsergebnisse werden im Anhang angeführt und im Kapitel 5 diskutiert.

### **Inhomogener Bereich des Seilrechens:**

Der inhomogene Bereich des Seilrechens berücksichtigt auch den Luftraum über der Wasseroberfläche. Diese Simulationen sollen einen Aufschluss über das elektrische Feld sowohl im Wasser als auch über dem Wasser geben.

Auch diese Simulationen wurden zum Vergleich mit denselben Elektrodurchmessern, -abständen und Spannungsimpulsen erstellt. Der Luftraum über dem Wasser wurde mit einer elektrischen Leitfähigkeit  $\gamma = 0 \frac{\text{S}}{\text{m}}$  und einer relativen Permittivität  $\epsilon_r = 1$  definiert. Die Elektroden sind zur Gänze im Wasser, weil das den optimalen Betrieb für die Scheuchwirkung eines Seilrechens darstellt. Bild 16 zeigt das elektrische Feld des inhomogenen Bereichs

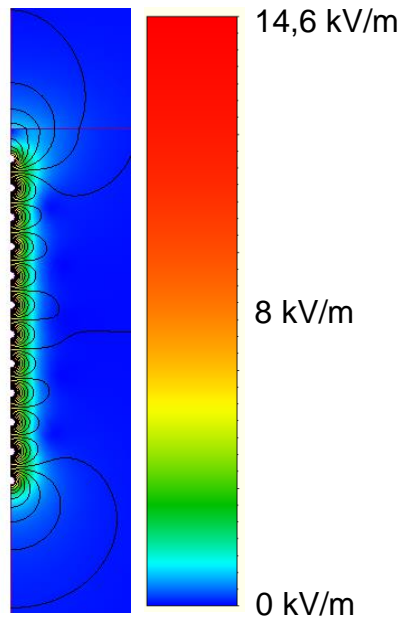


Bild 16: Elektrisches Feld eines Seilrechen mit einem Elektrodendurchmesser von 8 mm und einem Abstand von 30 mm (inhomogener Bereich)

Anhand der Äquipotentiallinien erkennt man die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft. Vor allem aber wird die Grenzfläche im Verlauf des elektrischen Feldes durch einen Sprung der elektrischen Feldstärke sichtbar. Dieser Sprung wird durch die unterschiedlichen relativen Permittivitäten von Luft und Wasser verursacht und in folgendem Diagramm (Bild 17) dargestellt:



Bild 17: Diagramm der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Flusshöhe 2 cm vor dem Seilrechen mit einem Seildurchmesser von 8 mm und einem Seilabstand von 30 mm.

Wie für den homogenen Bereich wurden auch die Gruppierungen der Anoden und Kathoden für den inhomogenen Bereich bei den Simulationen berücksichtigt. Werden die Simulationsergebnisse der Elektrodenanordnung 1+1- mit den Anordnungen 2+2- und 3+3- verglichen, weist die Anordnung mit abwechselnden Potentialen eine gleichmäßige elektrische Feldstärke entlang des Seilrechs auf. Bei den Elektrodenanordnungen 2+2- und 3+3- ist eine wesentliche Erhöhung der elektrischen Feldstärke und eine Ungleichmäßigkeit des elektrischen Feldes sichtbar (siehe Bild 18).

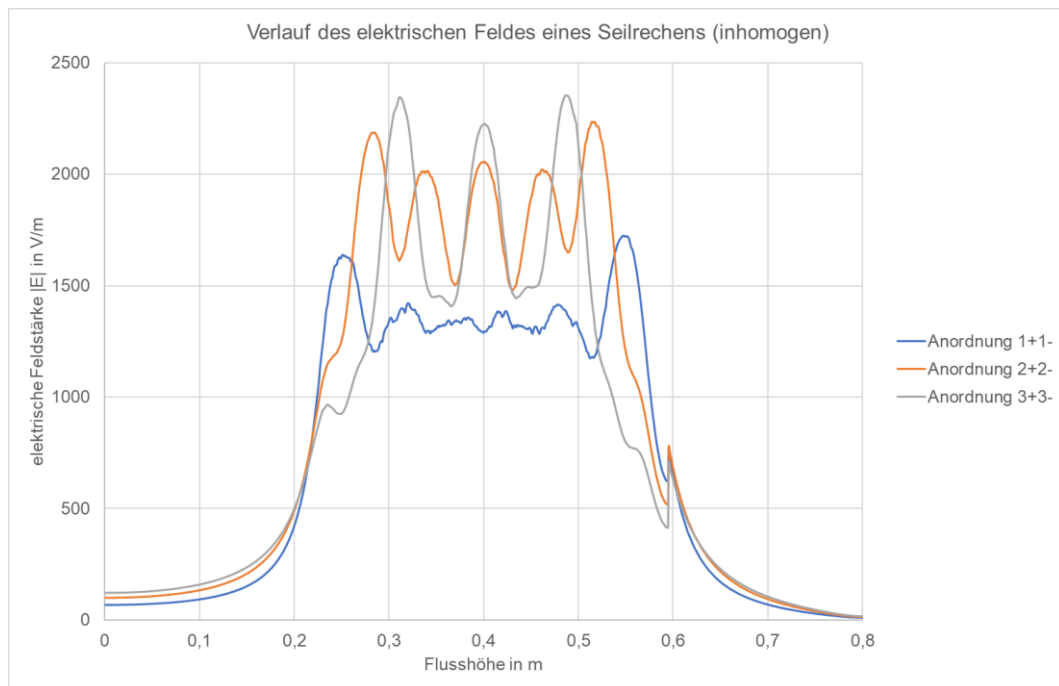


Bild 18: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Flusshöhe 2 cm vor dem Seilrechen mit unterschiedlichen Elektrodengruppen.

#### 4.4 BODENNAHE ELEKTRODEN

Bodennahe Elektroden befinden sich am Grund des Gewässers auf einem speziell angefertigten Beton. Dieser Beton enthält Zusätze, die ihm eine hohe Festigkeit und geringe elektrische Leitfähigkeit verleiht. Deswegen wurde in den Simulationen diese besondere Eigenschaft (siehe Tabelle 2) berücksichtigt. In den Simulationen wurden die Abstände der Elektroden variiert und auch die Feldstärke zwischen den Elektroden.

Um die Berechnungen der elektrischen Feldstärkeverteilung bei unterschiedlichen Abständen der Elektroden durchzuführen, wurden Anordnungen mit 80 cm, 100 cm und 120 cm modelliert. Die Potentiale der Elektroden wurde anfangs aufsteigend von 20 V (1. Elektrode) bis 120 V (6. Elektrode) gewählt.

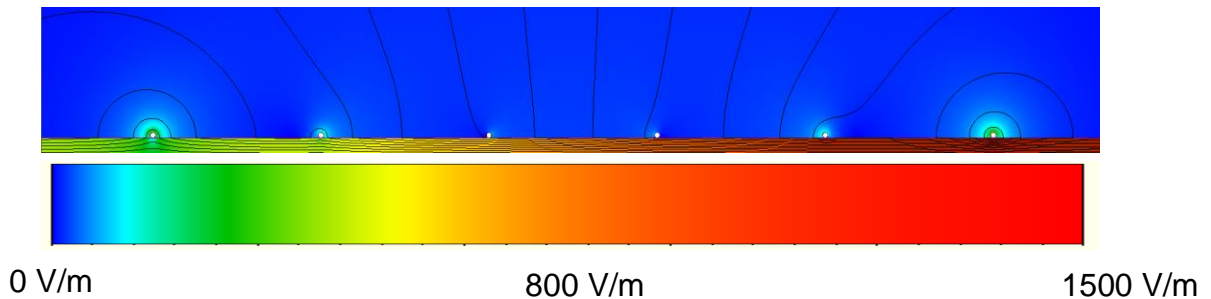


Bild 19: Elektrisches Feld bodennaher Elektroden mit einem Elektrodendurchmesser von 25 mm und einem Abstand von 80 cm

Aus Bild 19 ist ersichtlich, dass es an den äußeren Elektroden mit 20 V und 120 V eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke kommt. In der 10 cm dicken Betonschicht baut sich ein elektrostatisches Feld mit steigender elektrischer Feldstärke entlang der steigenden Potentiale der Elektroden auf. Unter der Betonschicht wurde das Bezugspotential von 0 V definiert. Die Abstände wurden variiert und dabei folgendes Diagramm zum Vergleich angefertigt (Bild 20):

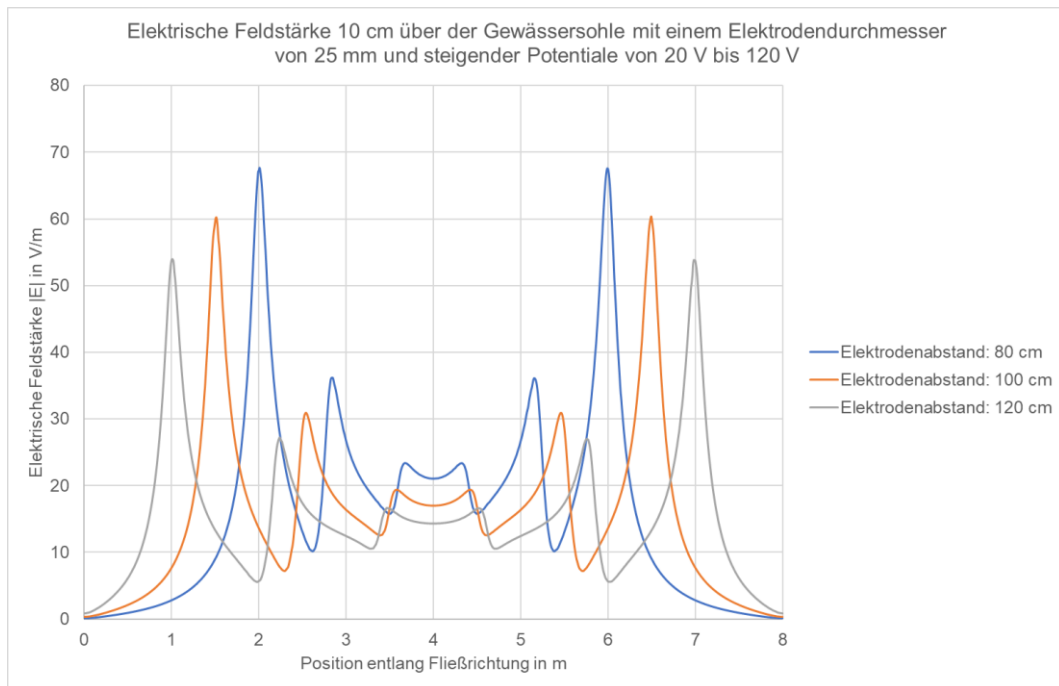


Bild 20: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position entlang der Fließrichtung 10 cm über der Gewässersohle mit unterschiedlichen Elektrodenabständen.

Deutlich erkennbar ist, dass bei einer Erhöhung des Abstandes, sich das elektrische Feld aufweitet und die Amplitude der elektrischen Feldstärke sinkt.

Die elektrischen Feldverläufe unterschiedlicher Positionen entlang der Fließrichtung sind in folgendem Diagramm von Gewässersohle bis zur Wasseroberfläche dargestellt:

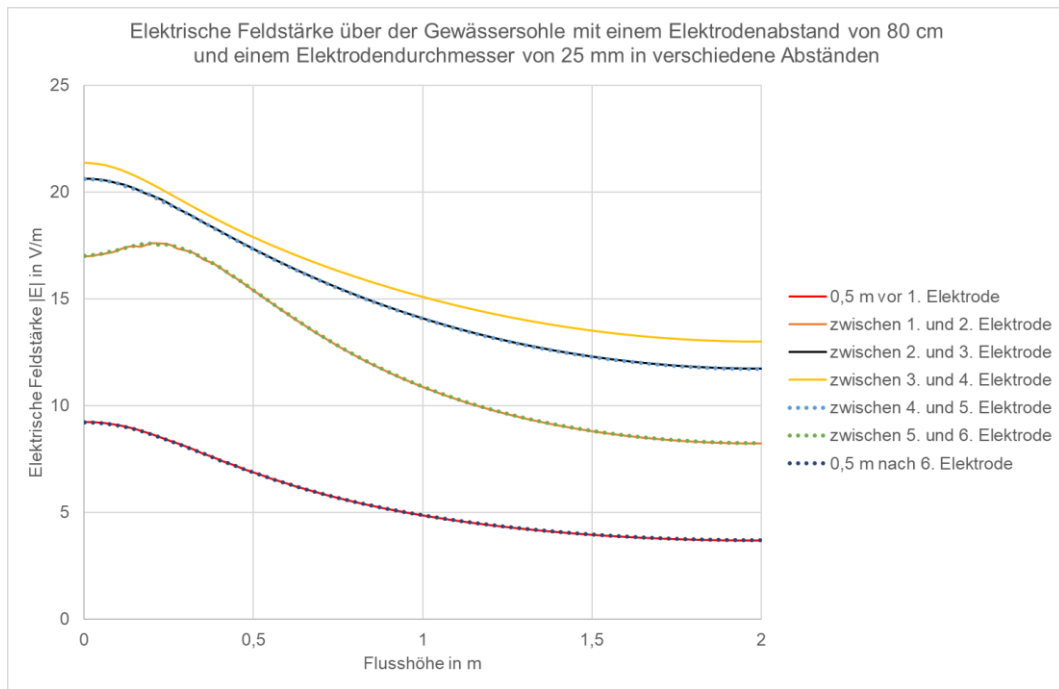


Bild 21: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Flusshöhe in unterschiedlichen horizontalen Abständen.

Bislang wurden die Potentiale an den Elektroden gleichmäßig flussabwärts von 20 V auf 120 V erhöht. Darüber hinaus wurden Simulationen mit anderen Potentialen durchgeführt. Eine Übersicht ist in Tabelle 4 und Bild 22 ersichtlich.

Tabelle 4: Übersicht der Elektrodenpotentiale unterschiedlicher simulierter Varianten.

Potentiale in V	1. Elektrode	2. Elektrode	3. Elektrode	4. Elektrode	5. Elektrode	6. Elektrode
Variante 1	20	40	60	80	100	120
Variante 2	10	50	110	190	290	410
Variante 3	-140	-100	-40	40	140	260
Variante 4	-200	-160	-100	-20	80	200

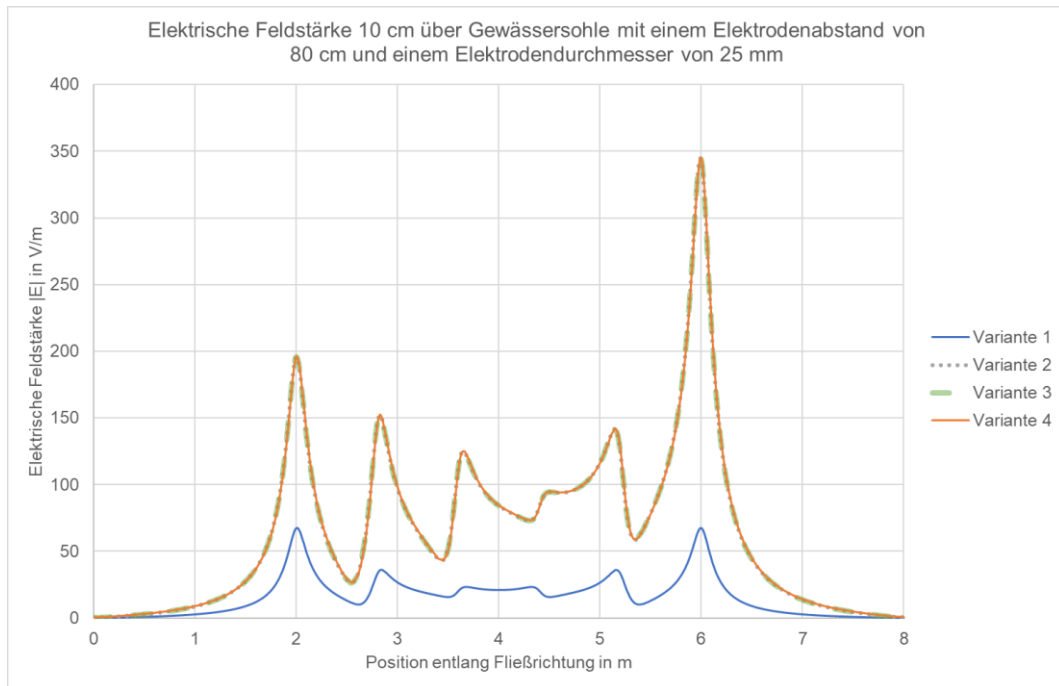


Bild 22: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position entlang der Fließrichtung 10 cm über der Gewässersohle mit unterschiedlichen Potentialen.

In Variante 2 bis 4 wurden die Potentiale der Spannungen so gewählt, dass sich zwischen den Elektroden eine Steigerung der elektrischen Feldstärke (Vergleich GFFB) entlang des Flusses ergibt. Im Vergleich zu einer konstanten Feldstärke zwischen den Elektroden (Variante 1) steigt nicht nur die elektrische Feldstärke entlang der Fließrichtung an, sondern kommt es in den Varianten 2 bis 4 zu einer generellen Anhebung der elektrischen Feldstärke.

## 4.5 ABGEHÄNGTE ELEKTRODEN

Fischscheuchanlagen, die mit Hilfe von abgehängten Elektroden realisiert werden, bestehen aus Zylinderelektroden, die in das Gewässer eintauchen. Für die Simulationen wurden die Durchmesser, die Elektrodenabstände und der Abstand zwischen den Anoden und Kathoden variiert. Zusätzlich dazu wurde einerseits eine gleichmäßige Anordnung mit gleich vielen Anoden und Kathoden untersucht, sowie eine versetzte Anordnung, das heißt, dass die Anzahl der Anoden ungleich der Anzahl der Kathoden ist.

In folgendem Bild ist der elektrische Feldverlauf einer gleichmäßigen Anordnung mit einem Elektrodendurchmesser von 8 mm, einem Elektrodenabstand von 30 cm und einem Abstand zwischen Anode und Kathode von 1 m simuliert.

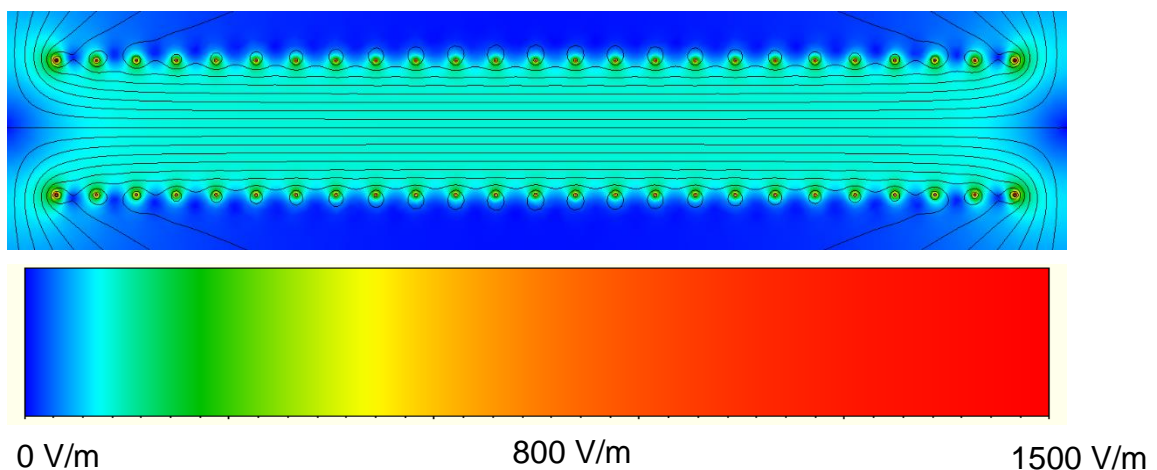


Bild 23: Elektrisches Feld abgehängter Elektroden mit einem Elektrodendurchmesser von 8 mm und einem Elektrodenabstand von 30 cm (gleichmäßige Anordnung)

In Bild 23 stellt die erste Reihe der Elektroden die Anoden dar und die zweite Reihe die Kathoden (Scheuchelektroden). Somit wird die Fließrichtung des Gewässers und der Fische in den Simulationen von unten nach oben angenommen. Im folgenden Diagramm ist die elektrische Feldstärke, 0,5 m vor den Scheuchelektroden, mit unterschiedlichen Elektrodendurchmessern dargestellt:

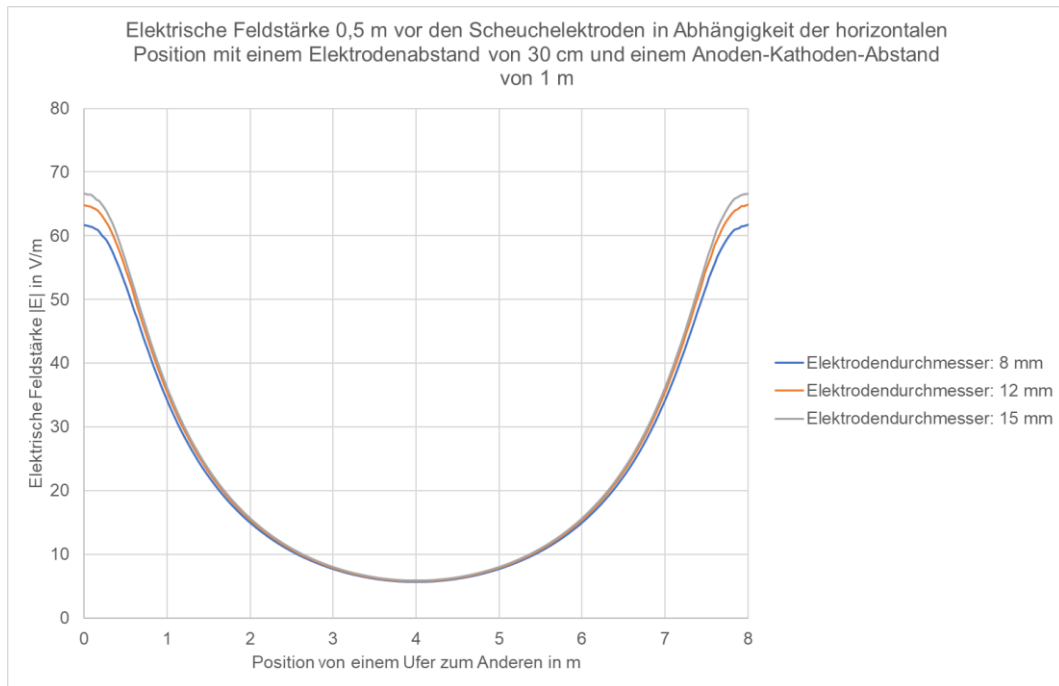


Bild 24: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position quer zur Fließrichtung 0,5 m vor den Scheuchelektroden mit unterschiedlichen Elektroden durchmessern.

Daraus lässt sich auf eine geringe Anhebung der elektrischen Feldstärke durch die Erhöhung des Elektroden durchmessers schließen. Grundsätzlich ist der Verlauf der elektrischen Feldstärke dieser Anordnung nicht Ideal, weil die elektrische Feldstärke in der Flussmitte sehr kleine Werte aufweist.

Die elektrischen Feldverteilungen vor der Scheuchelektrode, durch Variation der Elektrodenabstände und der Anoden-Kathodenabstände, werden in den folgenden beiden Bildern gezeigt.

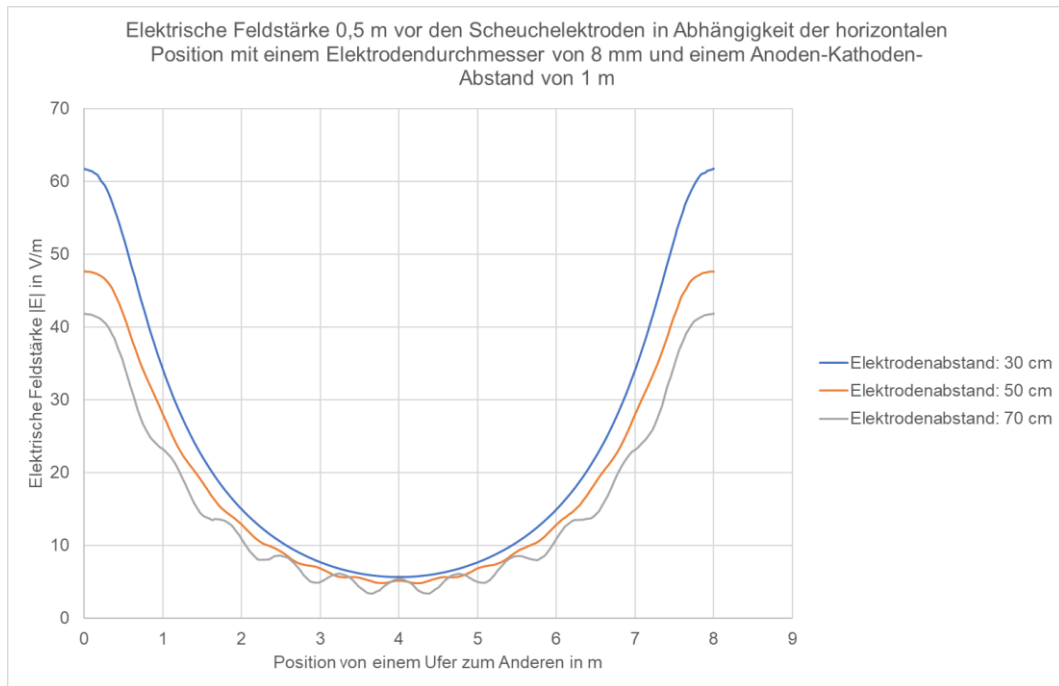


Bild 25: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position quer zur Fließrichtung 0,5 m vor den Scheuchelektroden mit unterschiedlichen Elektrodenabständen.

Mit steigendem Abstand zwischen den Elektroden, sinkt die elektrische Feldstärke vor der Fischelektrode. Ab einem Elektrodenabstand von 50 cm ist bereits keine gleichmäßige Feldverteilung mehr erkennbar und es kommt zu Feldschwankungen durch den großen Abstand zwischen den Elektroden.

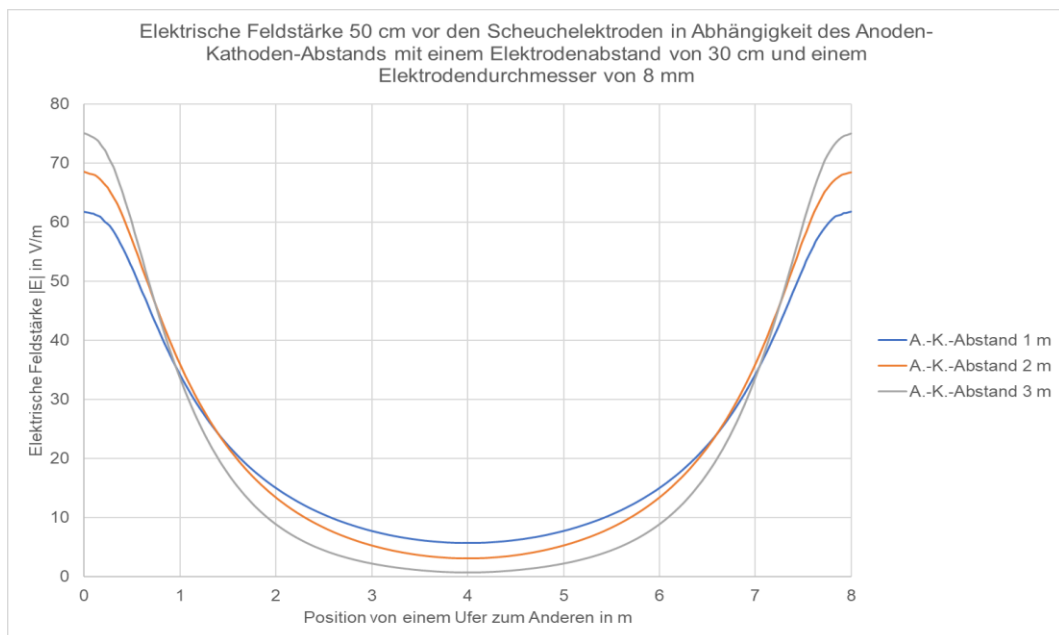


Bild 26: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position quer zur Fließrichtung 50 cm vor den Scheuchelektroden mit unterschiedlichen Anoden-Kathoden-Abständen.

Wird der Abstand zwischen den Anoden und Kathoden erhöht, so sinkt das elektrische Feld in der Flussmitte ab und steigt an den Ufern an. Somit ist es ratsam einen geringen Abstand zwischen Anoden und Kathoden zu planen, um das elektrische Feld entlang der Fischelektrode eher homogen zu halten.

Weil nicht nur die gleichmäßige Anordnung der Anoden und Kathoden, sondern auch eine versetzte Anordnung simuliert wurde, zeigt das Bild 27 den Feldverlauf einer versetzten Anordnung, wobei die Anoden wieder die erste Reihe der Elektroden darstellt und die Kathoden die zweite Reihe.

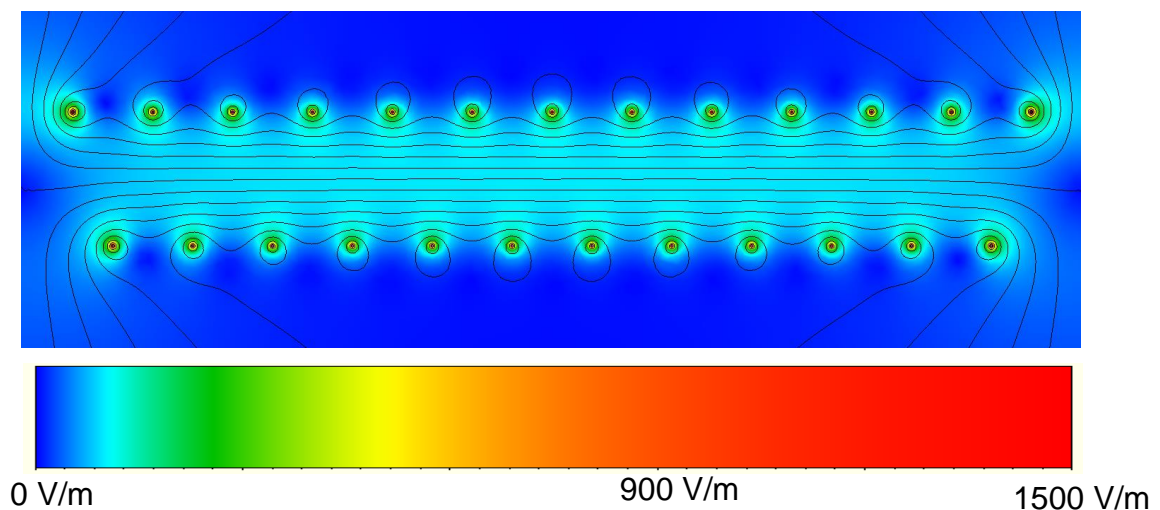


Bild 27: Elektrisches Feld abgehangter Elektroden mit einem Elektroden Durchmesser von 8 mm und einem Elektrodenabstand von 30 cm (versetzte Anordnung)

Der zugehörige Vergleich unterschiedlicher Elektroden Durchmesser bei einer versetzten Elektrodenanordnung wird in folgender Abbildung gezeigt. Dabei ist ersichtlich, dass bei Erhöhung des Elektroden Durchmessers auch das elektrische Feld ansteigt. Jedoch hauptsächlich in Ufernähe und nicht in der Flussmitte. Dieser Zusammenhang wurde bereits bei der gleichmäßigen Anordnung beobachtet. Die versetzte Anordnung zeigt zusätzlich dazu bereits 0,5 m vor den Scheuchelektroden eine Welligkeit des Verlaufs der elektrischen Feldstärke und generell geringere Amplituden im Vergleich zur gleichmäßigen Anordnung (siehe Bild 28). Diese ist charakteristisch für die geänderte Anordnung.

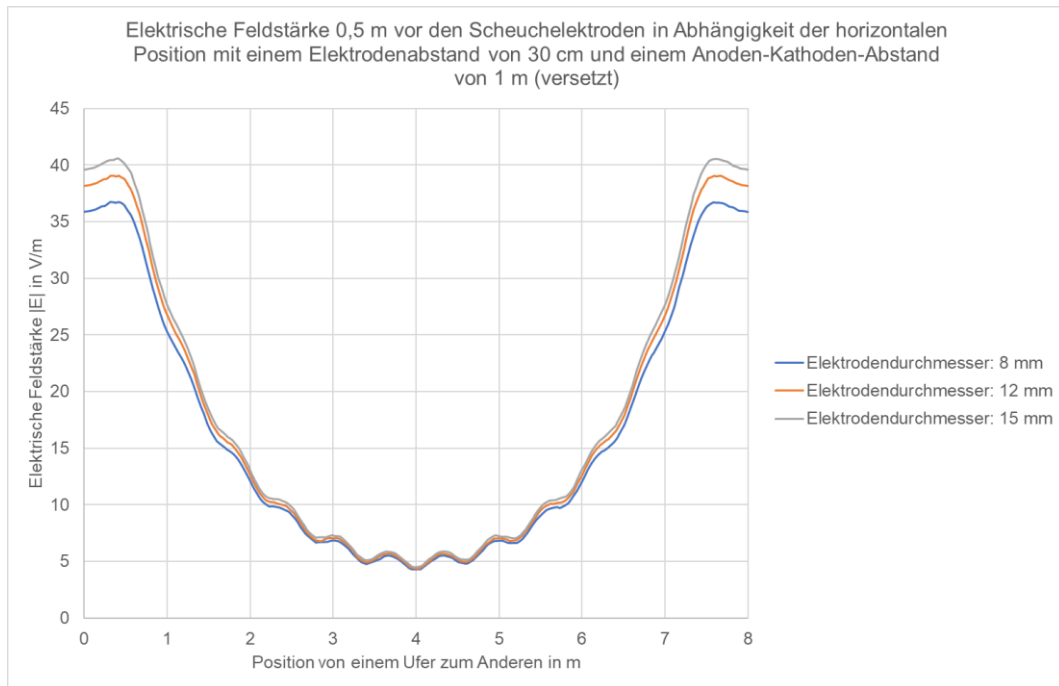


Bild 28: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position quer zur Fließrichtung 0,5 m vor den Scheuchelektroden mit unterschiedlichen Elektrodendurchmessern. (versetzte Anordnung)

## 5 ERGEBNISSE

In diesem Kapitel wird näher auf die Simulationsergebnisse der drei untersuchten Arten von elektrischen Fischechanlagen eingegangen. Diese dienen der Grundlage zur Verbesserung der Wirksamkeit von elektrischen Fischechanlagen.

### **Seilrechen:**

Der Seilrechen stellt eine gute Fischechanlage vor der Rechenanlage eines Wasserkraftwerks dar. Werden die Seildurchmesser erhöht, kommt es zu einer Erhöhung der elektrischen Feldstärke. Die Vergrößerung des Elektroden Abstandes führt zu einer Reduktion der elektrischen Feldstärke und einer ansteigenden Welligkeit des Feldverlaufs. Werden die Leiterseile zu Elektrodenpaaren mit gleichen Potentialen gebündelt, kommt es lokal zu Felderhöhungen und auch die Felddichte steigt dadurch an.

Wird der inhomogene Bereich zwischen Wasser und Luft betrachtet, erkennt man einen deutlichen Sprung der elektrischen Feldstärke an der Grenzschicht. Abgesehen davon Verhält sich das elektrische Feld, durch Änderung der Seildurchmesser, Seilabstände und Elektrodengruppierungen gleich wie im homogenen Bereich.

### **Bodennahe Elektroden:**

Die Simulation der bodennahen Elektroden liefert einerseits reduzierte elektrische Feldstärken bei einer Erhöhung der Elektrodenabstände, andererseits kommt es je nach Wahl der Potentiale der Elektroden zu einem konstanten elektrischen Feld entlang der Flussrichtung oder zu einer steigenden elektrischen Feldstärke, die zu einer erhöhten Scheuchwirkung führt. Steigt die elektrische Feldstärke, wie in Variante 4, zwischen den Elektroden an, so können unterschiedliche Fischgrößen zu bestimmten Positionen in der Fischechanlage selektiert werden.

### **Abgehängte Elektroden:**

Wird eine gleichmäßige Verteilung der Anoden und Kathoden betrachtet, sinkt die elektrische Feldstärke in der Flussmitte ab. Dadurch besteht die Gefahr, dass dort Fische durch die Barriere dringen und in Richtung Turbine schwimmen. Um eine

ausreichende Schutzwirkung zu gewährleisten, müssen die Potentiale der einzelnen Elektroden angepasst werden, was einen sehr hohen Aufwand darstellt, weil dadurch jede Elektrode, bzw. Gruppen von Elektroden, eine eigene Zuleitung und Impulsgenerator benötigen. Durch generelle Anhebung des elektrischen Potentials der Elektroden kann zwar der Verlauf nicht geändert werden, jedoch die minimale elektrische Feldstärke soweit erhöht werden, dass es zu einer ausreichenden Schutzwirkung in der Flussmitte kommt. Auch durch die Vergrößerung der Elektrodendurchmesser kann die elektrische Feldstärke, wenn auch nur in einem geringen Maß, angehoben werden.

## 6 AUSBLICK

Diese Masterarbeit liefert Berechnungen von elektrischen Fischescheuchanlagen, um mit deren Hilfe eine Verbesserung der Effektivität dieser Anlagen zu erreichen. Jedoch fehlten, für den Einsatz an Bestandsanlagen oder sogar neuen Projekten von Wasserkraftwerken, die Zeit und die Mittel. Deswegen verbleiben folgende Punkte zur Anwendung und Erweiterung dieser Arbeit:

- Die Durchführung von praxisnahen Untersuchungen an bereits installierten elektrischen Fischescheuchanlagen zur Überprüfung und zum Vergleich der, in dieser Arbeit ermittelten Simulationsergebnissen.
- Untersuchungen zur Abhängigkeit des elektrischen Feldes und der Stromdichte vor einer elektrischen Fischescheuchanlage mit unterschiedlichen Anstiegs- und Abfallzeiten der Gleichspannungsimpulse.
- Die Erstellung elektrischer Modelle von Fischen unterschiedlicher Art und Größe für die Einbindung in das Simulationsprogramm ElecNet, um auch direkte Auswirkungen, durch die Berechnung der elektrischen Stromdichte, die auf den Fisch an unterschiedlichen Positionen der elektrischen Fischescheuchanlage wirken, zu ermitteln.
- Abschließend könnten Feldversuche die Abhängigkeit der Frequenz der Spannungsimpulse auf die Scheuchwirkung unterschiedlichen Fischarten untersucht werden.

## 7 ZUSAMMENFASSUNG

Zum Wohle der Fische und der Umwelt sollten elektrische Fische scheuchanlagen in den Gefahrenbereichen der Gewässer installiert werden. Eine Berücksichtigung bei neuen Projekten ist genauso wichtig, wie die Sanierung bestehender Querbauwerke und Wasserentnahmestellen. Werden die Fische scheuchanlagen optimal für das Einsatzgebiet, an die Fische und das Gewässer angepasst, kann eine effektive Scheuchwirkung erzielt werden, mit welcher die Mortalität von Fischen durch den Eingriff der Menschheit in die Natur reduziert wird. Bei der Realisierung eines derartigen Projektes können Auflagen des Umweltschutzes gelockert werden, weil durch die Fische scheuchanlage eine Maßnahme getroffen wird, durch die eine Umweltverschlechterung vermieden wird.

Die aus dieser Arbeit resultierenden Ergebnisse helfen eine elektrische Fische scheuchanlage hinsichtlich Ihrer Art, des Einsatzortes, den optimalen Elektroden durchmesser und deren Anordnung zu bestimmen. Zusätzlich dazu zeigten die Simulationen, dass eine Reduktion der Elektrodenpotentiale eine Reduktion der elektrischen Stromstärke durch die Elektroden hat, ohne die Schutzwirkung der Fische zu verlieren. Natürlich unter Einhaltung der Grenzen zur Aufrechterhaltung eines durchgängigen elektrischen Feldes. Durch die reduzierte elektrische Stromstärke sinkt die Abnutzung (Korrosion) der Elektroden. Wird im Betrieb die Polarität der Elektroden regelmäßig gewechselt, kommt es zu einer gleichmäßigeren Abnutzung und es ist folglich ein größeres Wartungsintervall möglich. Durch diese Maßnahmen lassen sich die betrieblichen Kosten der Fische scheuchanlage reduzieren.

Durch die Vorgabe der EU-Wasserrahmenrichtlinie, bis 2027 einen guten ökologischen Zustand für alle Oberflächengewässer zu erreichen, ist es wichtig den Eingriff in die Natur durch den Bau eines Wasserkraftwerks zu berücksichtigen. Ein Wasserkraftwerk hat einen negativen Einfluss auf den ökologischen Zustand des Gewässers. Ein Teil, aus dem sich der ökologische Zustand des Gewässers zusammensetzt, ist der fischökologische Zustand des Gewässers. Dieser Zustand wird durch den Einsatz von elektrischen Fische scheuchanlagen verbessert. Werden die Berechnungsergebnisse dieser Arbeit beim Bau einer Fische scheuchanlage berücksichtigt, wird die Schutzwirkung auf die Fische verbessert und somit auch der fischökologische Zustand. Aus diesem Grund kann auch der ökologische Zustand des Gewässers mit Hilfe der Ergebnisse verbessert werden.

Abschließen möchte ich die Masterarbeit mit einem Zitat, dessen Meinung ich auch zum Schutz der Fische durch elektrische Fischescheuchanlagen vertrete und mir die Ergebnisse dieser Masterarbeit bestätigten.

„Es sollte generell versucht werden, den Schutz vor Turbinenpassage im Sinne des Tier- und Umweltschutzes zu optimieren, unabhängig davon, ob eine direkte Relevanz für den ökologischen Zustand gegeben ist oder nicht.“ (Unfer und Rauch 2019)

## **8 TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1: Relative Permittivität von Wasser in Abhängigkeit der Temperatur. ....	30
Tabelle 2: Parameter des Flussmodells für die Simulationen in ElecNet.....	31
Tabelle 3: Parameter des Spannungsimpulses für die Simulationen in ElecNet. ....	32
Tabelle 4: Übersicht der Elektrodenpotentiale unterschiedlicher simulierter Varianten. .....	39

## 9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Bild 1: Kombination einer akustischen Verhaltensbarriere mit einem Luftblasenvorhang. (Turnpenny und O'Keeffe 2005) .....	6
Bild 2: Schematische Darstellung eines Bypasses mit Schwenktor und einem Schrägrechen (Grundriss). (Friedrich 2005) .....	11
Bild 3: Schematische Darstellung einer Bypass-Rinne und einem Flachrechen (Längsschnitt). (Friedrich 2005) .....	11
Bild 4: Prinzipieller Aufbau einer elektrischen Fischeischanlage (Mayr) .....	15
Bild 5: Grundriss eines Einlaufbauwerks mit elektrischer Fischeischanlage und Bypass für einen schonenden Fischabstieg. (Hyfish GmbH) .....	18
Bild 6: Versuchsaufbau eines elektrischen Seilrechens als Verhaltensbarriere für Fische. (Quelle: <a href="https://www.neptun-wasserpreis.at/projekte/universitaet-innsbruck-hyfish-elektro-seilrechen/">https://www.neptun-wasserpreis.at/projekte/universitaet-innsbruck-hyfish-elektro-seilrechen/</a> ) .....	19
Bild 7: Prinzipieller Aufbau einer Graduated Field Fish Barrier (GFFB). (Little 2015) .....	21
Bild 8: Grundsätzliches Verhalten der Fische an einer Graduated Field Fish Barrier (GFFB). (Talat Yalçinkaya, Abdülkadir Çakır, Yıldız Bolat, Rahmi Uysal, Ali Aslantas 2017) .....	22
Bild 9: Abgehängte Elektroden vor der Schleuße des Wasserkraftwerks Nussdorf in Wien. ....	25
Bild 10: Installierte elektrische Fischeischanlage im Kühlwassereinlauf des Kernkraftwerks Philippsburg (Schnittbild) (Berger 2018) .....	26
Bild 11: Elektrische Feldlinien und Äquipotentiallinien zwischen zwei Elektroden. (Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Oszkár Bíró 2017) .....	28
Bild 12: Elektrisches Feld eines Seilrechens mit einem Elektroden Durchmesser von 8 mm und einem Abstand von 30 mm (homogener Bereich). ....	33
Bild 13: Seilrechen 1+1- .....	34
Bild 14: Seilrechen 2+2- .....	34
Bild 15: Seilrechen 3+3- .....	34
Bild 16: Elektrisches Feld eines Seilrechens mit einem Elektroden Durchmesser von 8 mm und einem Abstand von 30 mm (inhomogener Bereich) .....	35
Bild 17: Diagramm der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Flusshöhe 2 cm vor dem Seilrechen mit einem Seildurchmesser von 8 mm und einem Seilabstand von 30 mm. ....	35
Bild 18: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Flusshöhe 2 cm vor dem Seilrechen mit unterschiedlichen Elektroden Gruppen. ....	36
Bild 19: Elektrisches Feld bodennaher Elektroden mit einem Elektroden Durchmesser von 25 mm und einem Abstand von 80 cm .....	37
Bild 20: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position entlang der Fließrichtung 10 cm über der Gewässersohle mit unterschiedlichen Elektrodenabständen. ....	38
Bild 21: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Flusshöhe in unterschiedlichen horizontalen Abständen. ....	39
Bild 22: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position entlang der Fließrichtung 10 cm über der Gewässersohle mit unterschiedlichen Potentialen. ....	40
Bild 23: Elektrisches Feld abgehängter Elektroden mit einem Elektroden Durchmesser von 8 mm und einem Elektrodenabstand von 30 cm (gleichmäßige Anordnung) ....	41

Bild 24: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position quer zur Fließrichtung 0,5 m vor den Scheuchelektroden mit unterschiedlichen ElektrodenDurchmessern.....	42
Bild 25: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position quer zur Fließrichtung 0,5 m vor den Scheuchelektroden mit unterschiedlichen Elektrodenabständen.....	43
Bild 26: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position quer zur Fließrichtung 50 cm vor den Scheuchelektroden mit unterschiedlichen Anoden-Kathoden-Abständen.....	43
Bild 27: Elektrisches Feld abgehangter Elektroden mit einem ElektrodenDurchmesser von 8 mm und einem Elektrodenabstand von 30 cm (versetzte Anordnung) .....	44
Bild 28: Diagramme der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit der Position quer zur Fließrichtung 0,5 m vor den Scheuchelektroden mit unterschiedlichen ElektrodenDurchmessern. (versetzte Anordnung) .....	45

## 10 LITERATURVERZEICHNIS

Adlmannseder, Josef: Kleinspannungs-Fischscheuch- und -Leitanlagen. In: *Österreichs Fischerei* 39/1986, S. 240–246.

Berger, Claudia (2018): Rechenverluste und Auslegung von (elektrifizierten) Schrägrechen anhand ethohydraulischer Studien. Dissertation. Technische Universität Darmstadt, Darmstadt. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft.

Böttcher, Heidi; Unfer, Günther; Zeiringer, Bernhard; Schmutz, Stefan; Aufleger, Markus (2015): Fischschutz und Fischabstieg – Kenntnisstand und aktuelle Forschungsprojekte in Österreich. In: *Österr Wasser- und Abfallw* 67, S. 299–306. DOI: 10.1007/s00506-015-0248-5.

Clarkson, Robert W. (2003): EFFECTIVENESS OF ELECTRICAL FISH BARRIERS ASSOCIATED WITH THE CENTRAL ARIZONA PROJECT. Hg. v. U.S. Bureau of Reclamation. Arizona (Electrical Barrier Report).

Darmann, Florian (2019): Experimentelle Untersuchungen zur Fischschutz- und Leitwirkung an einer Hybridbarriere (Elektro-Seilrechen). Masterarbeit. Universität für Bodenkultur Wien, Wien. Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement.

Edwards, J. D. (2014): Introduction to ElecNet Static 2D. Hg. v. Infolytica Corporation. Canada.

Egloff, Nicole; Bös, Tamara; Peter, Armin (2012): Massnahmen zur Gewährleistung eines schonenden Fischabstiegs an grösseren, mitteleuropäischen Flusskraftwerken. Hg. v. Verband Aare-Rheinwerke. Wasserforschungsinstitut des ETH-Bereichs. Kastanienbaum Schweiz.

Friedrich, Harald (Hg.) (2005): Handbuch Querbauwerke. Wasserwirtschaft. Nordrhein-Westfalen. 1. Aufl. Düsseldorf: MUNLV.

Glechner, Regina: Elektrofischerei. Eine Methode zur Fischbestandserhebung. In: *Bufus-Info* 1993, S. 18–21.

Grassl, Hans (1999): Informationsschrift Fischsperren. Gerätebeschreibung einer Fischscheuchanlage vom Typ FS 10. Hg. v. Hans Grassl GmbH. Schönau a. K.

Kühne, René; Schwevers, Ulrich (2016): Zielarten und Maßnahmen des Fischschutzes am Pumpspeicherkraftwerk Geesthacht. In: *Wasserwirtsch* 106 (12), S. 45–49. DOI: 10.1007/s35147-016-0199-1.

ÖVE-E 36/1970, 08.07.2020: ÖVE-E 36/1970.

ÖVE-E 40: ÖVE-E 40.

Petz; Glechner, R. (2014): Funktionsüberprüfung von Fischwanderhilfen an der Salzach und Saalach.

Pinter, Kurt; Seliger, Carina; Unfer, Günther (2019): Fischschutz und Fischabstieg in Österreich – Teilbericht 1. Hg. v. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement). Wien.

Seifert, Kurt Dr. (2009): Gutachten zur Durchgängigkeit und zum Fischschutz an Schöpfwerken und Schöpfstellen. Hg. v. RMD Wasserstraßen GmbH. Büro für Naturschutz, Gewässer und Fischereifragen. München.

Simmons; McKinstry; Cook; Tano; Faber; Francis et al. (2004): Strobe Light Deterrent Efficacy Test and Fish Behavior Determination at Grand Coulee Dam Third Powerplant Forebay. Hg. v. Pacific Northwest National Laboratory.

Unfer, Günther; Rauch, Pablo (2019): Fischschutz und Fischabstieg in Österreich – Endbericht. Hg. v. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. Institut für Hydrobiologie und Gewässermanagement). Wien.

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Oszkár Bíró (2016): Elektrodynamik. Institut für Grundlagen und Theorie der Elektrotechnik. Technische Universität Graz, 2016.

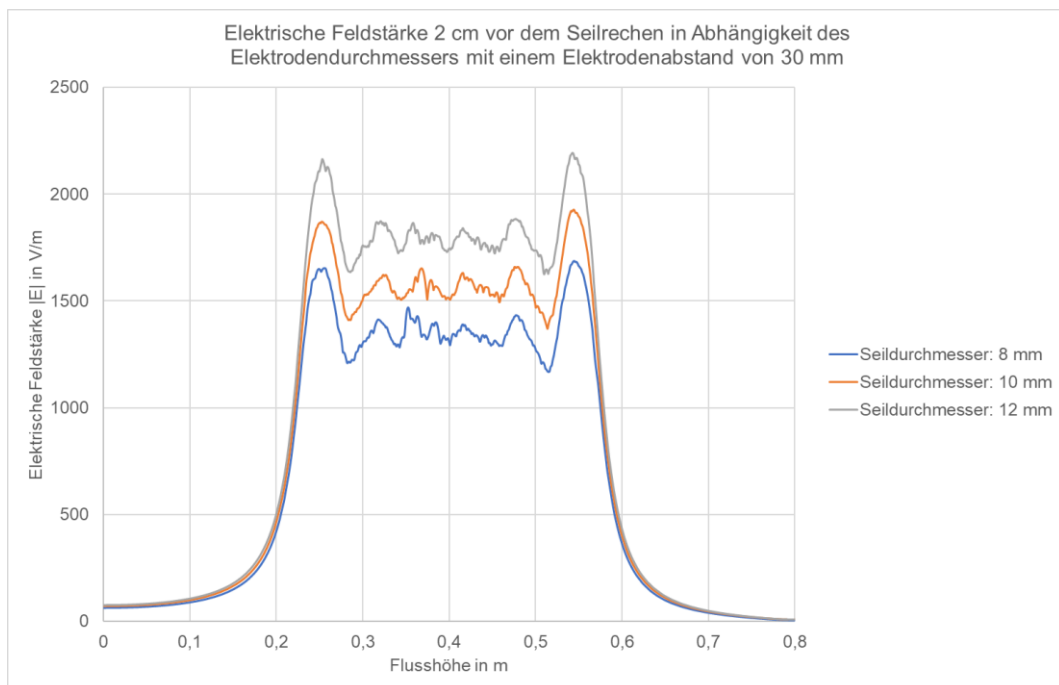
## ANHANG

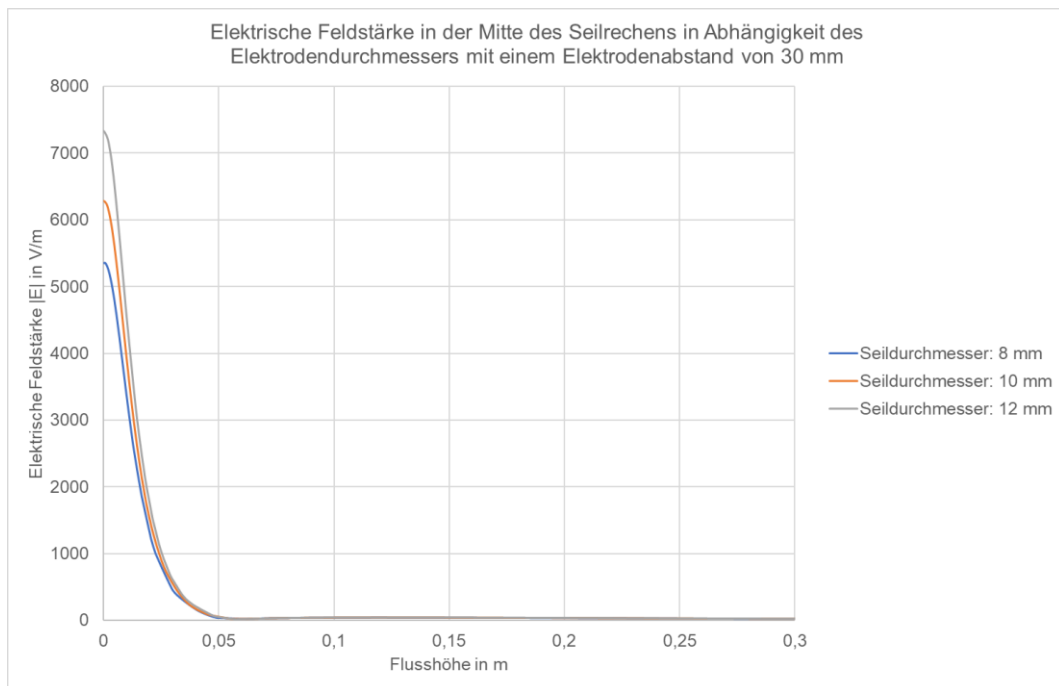
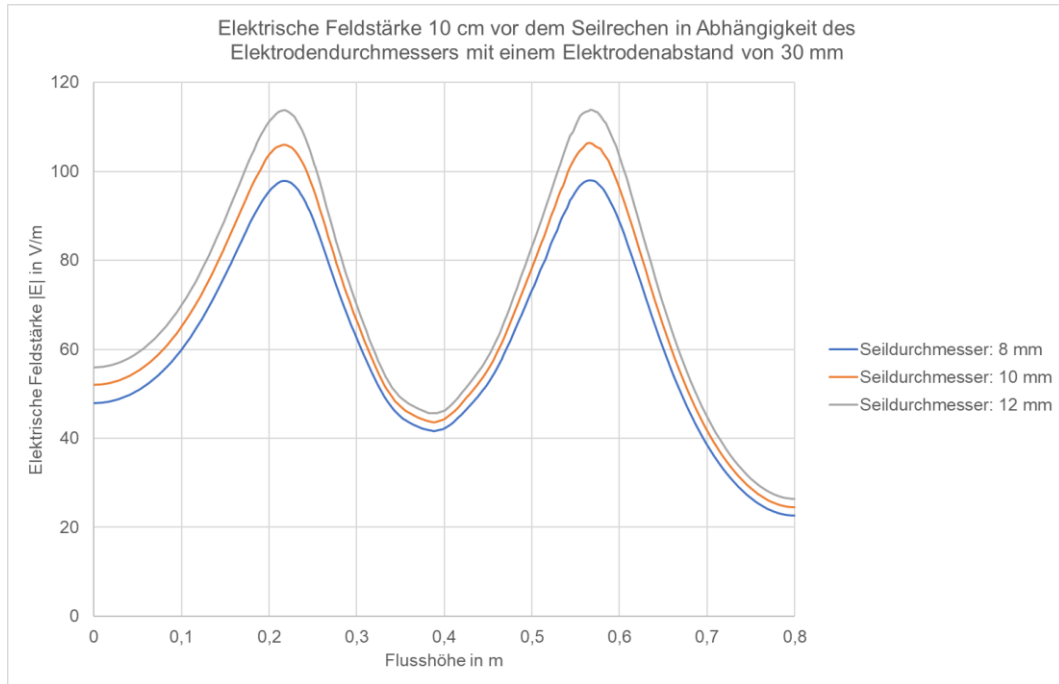
In diesem Kapitel der Masterarbeit wird ein Teil der Simulationsergebnisse in Form von Diagrammen dargestellt, welcher von großer Bedeutung für die Verbesserung einer elektrischen Fischeicheanlage ist. Damit ist es möglich die Ergebnisse dieser Arbeit für die Optimierung einer Fischeicheanlagen hinsichtlich mehrerer Parameter heranzuziehen. Eine ausführliche Einsicht über die Simulationsergebnisse (Wertetabellen und Diagramme) ist nach Anfrage am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität möglich.

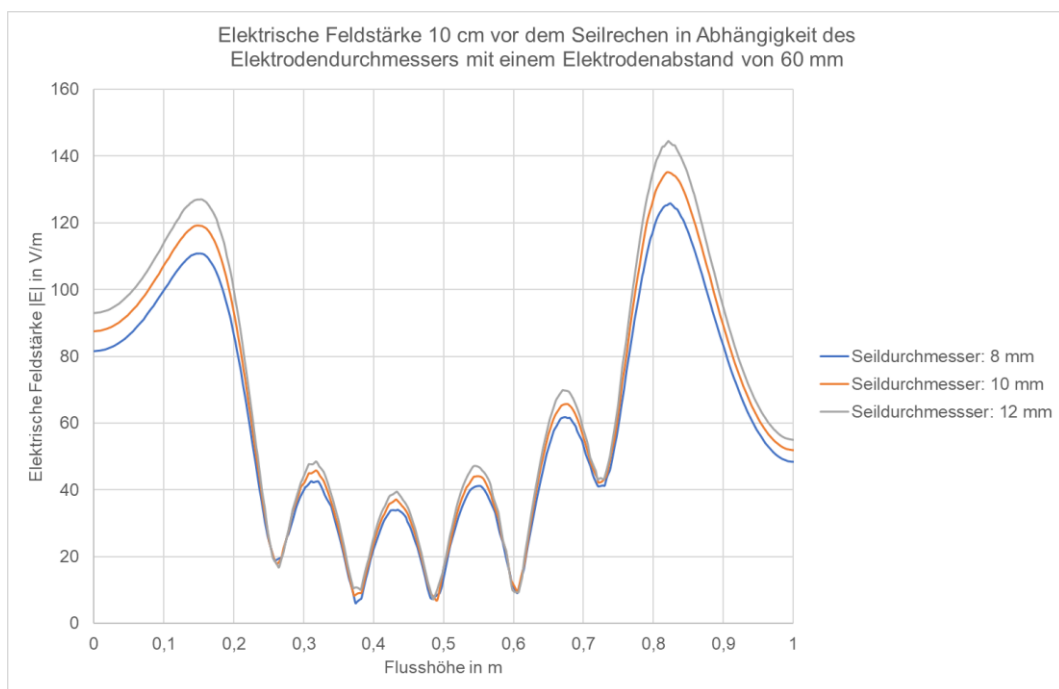
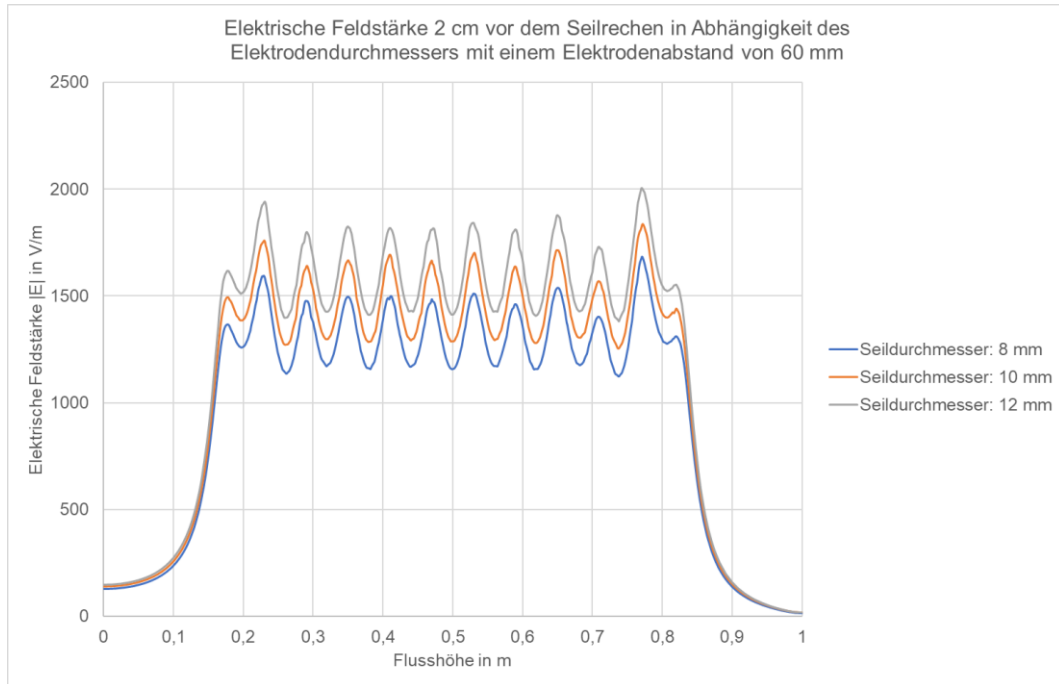
Die, für die Simulationen, notwendigen Modelle wurden im Programm Solide Edge ST8 (Version: 108.00.00.091) 64-Bit mit Hilfe der Solid Edge Academic Lizenz angefertigt. Die Berechnungen der elektrischen Feldstärke und Spannungen, wurden im Programm ElecNet Version 7.8.3.5 64-Bit dank der Lizenz der Technischen Universität Graz durchgeführt.

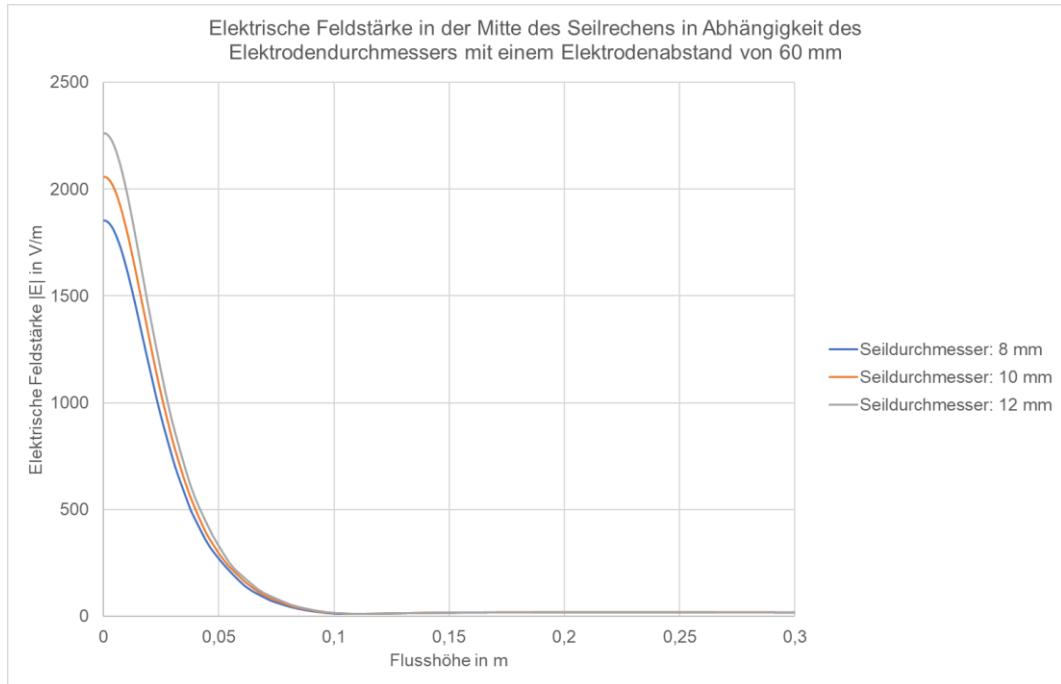
### Seilrechen:

Variation der Durchmesser (homogener Bereich):

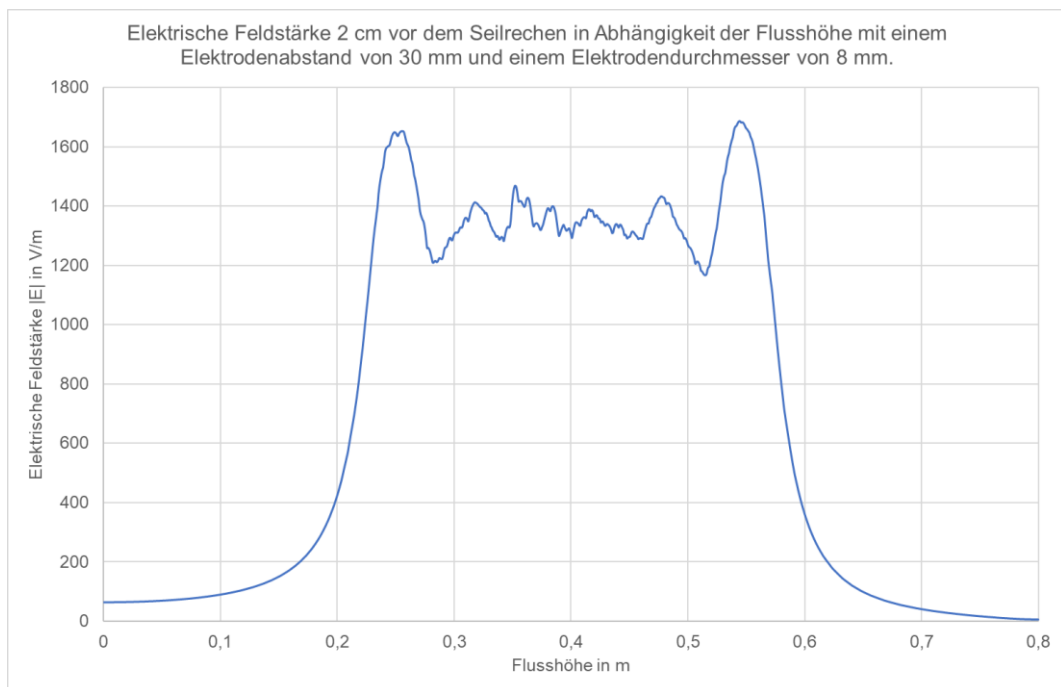


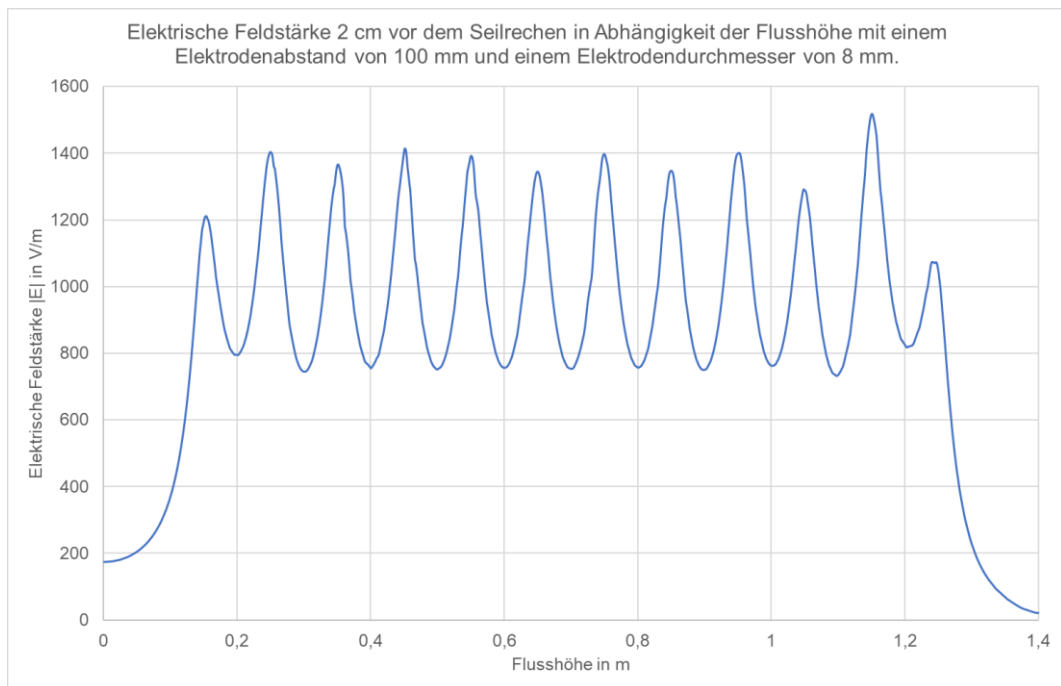
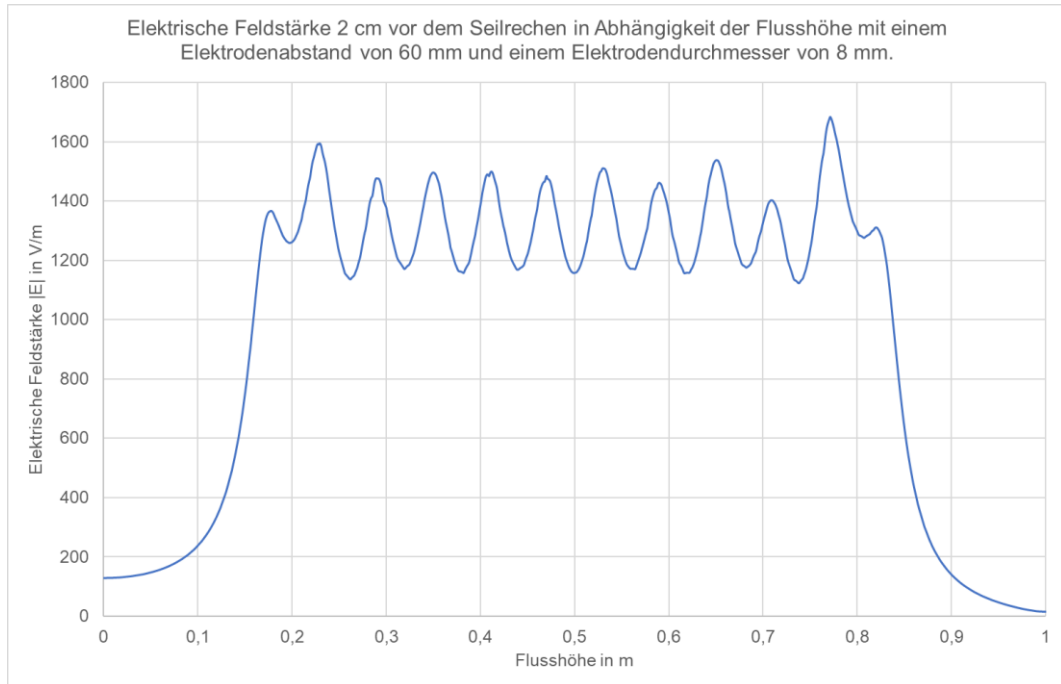






### Variation des Elektroden Abstands:



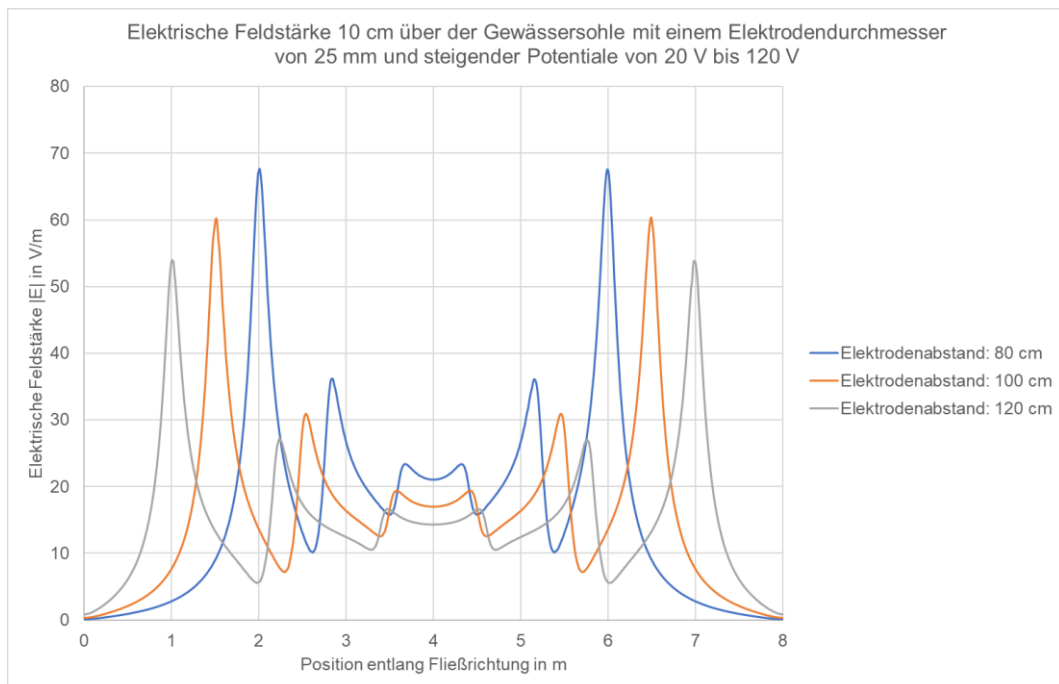


Vergleich der unterschiedlichen Elektrodenanordnungen 1+1-, 2+2- und 3+3- im inhomogenen Bereich (Luft/Wasser) des Seilrechen:

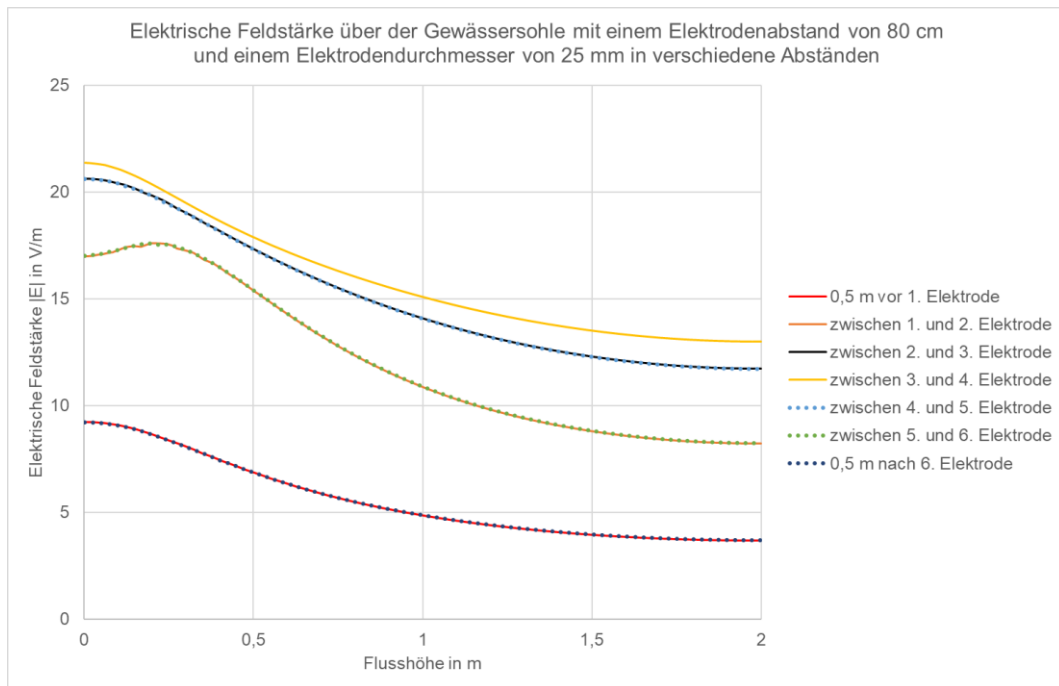


## Bodennahe Elektroden:

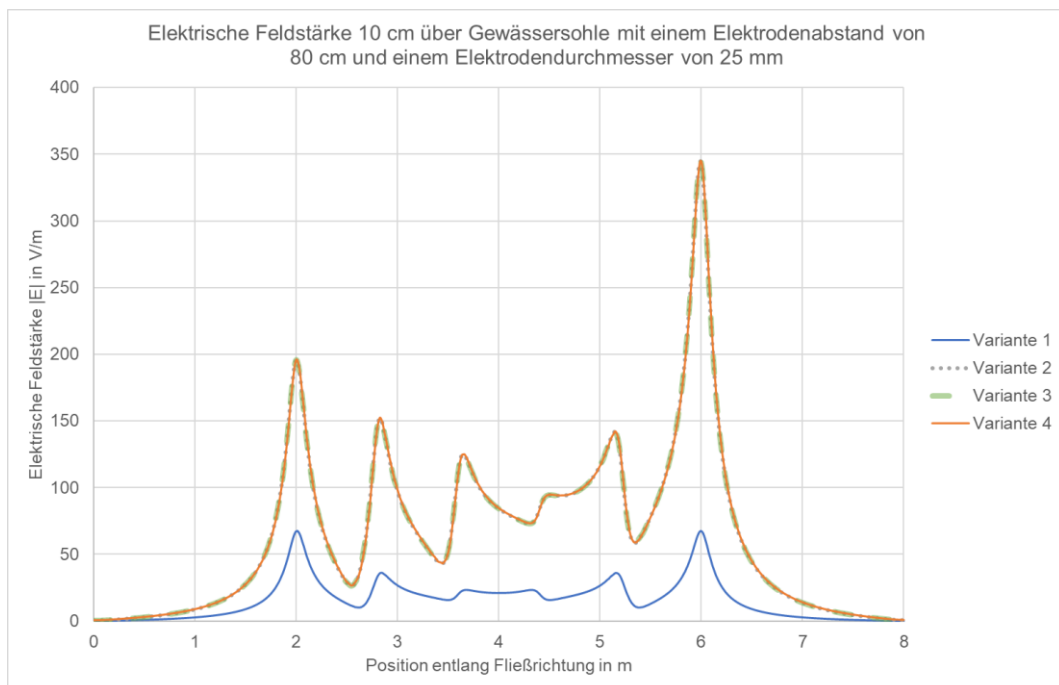
Variation der Elektrodenabstände:



## Verlauf entlang der Fließrichtung:

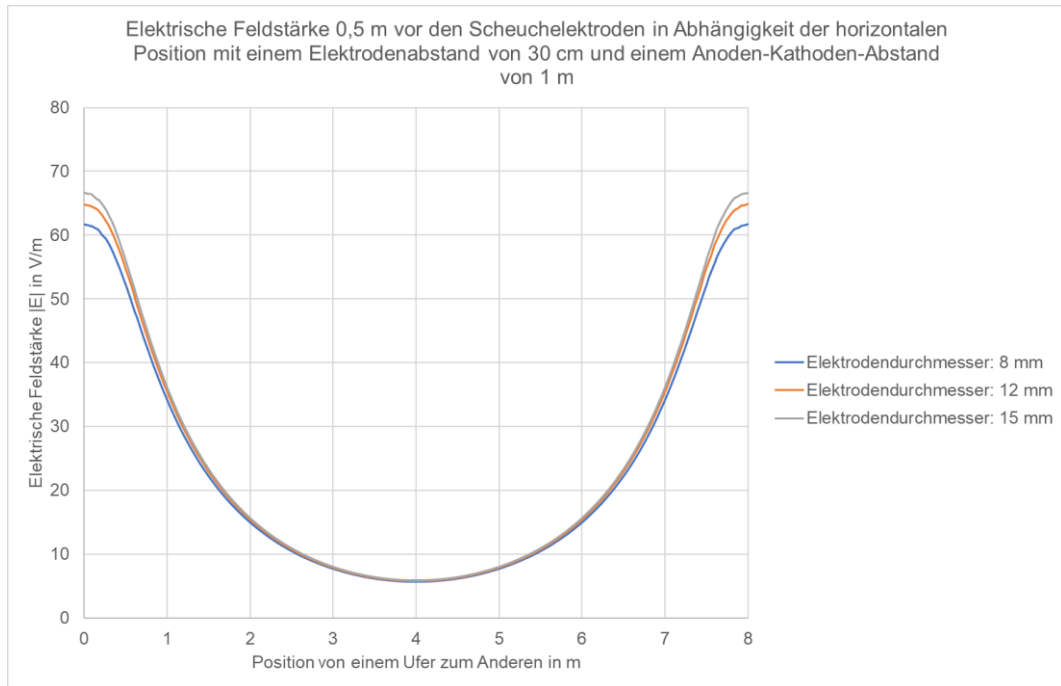


## Vergleich der unterschiedlichen Varianten an Elektrodenpotentialen

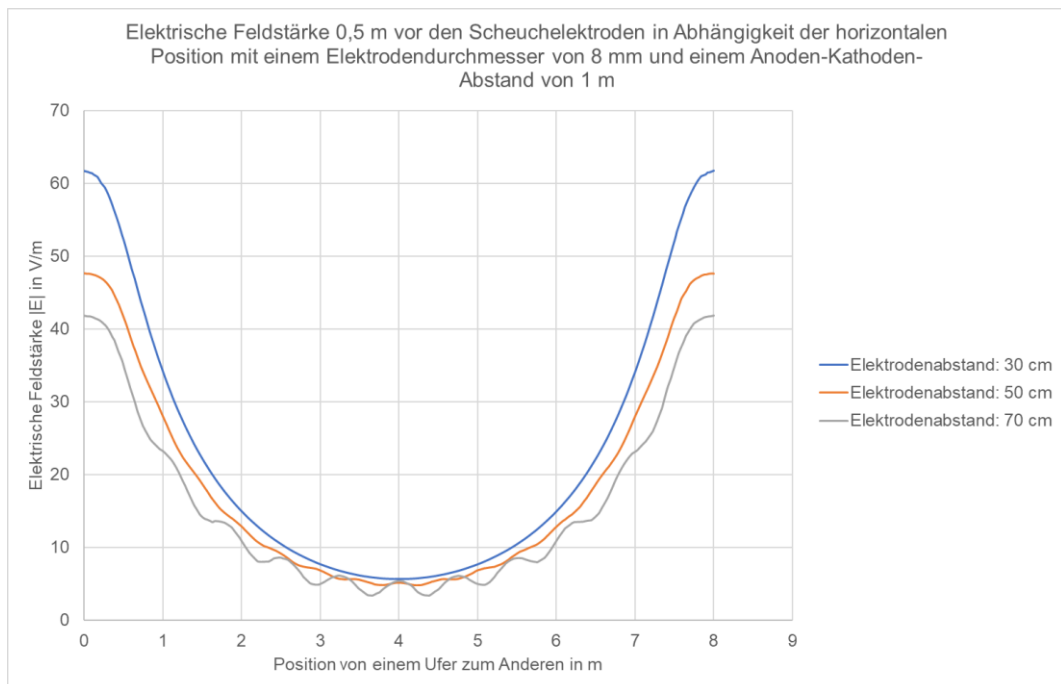


## Abgehängte Elektroden:

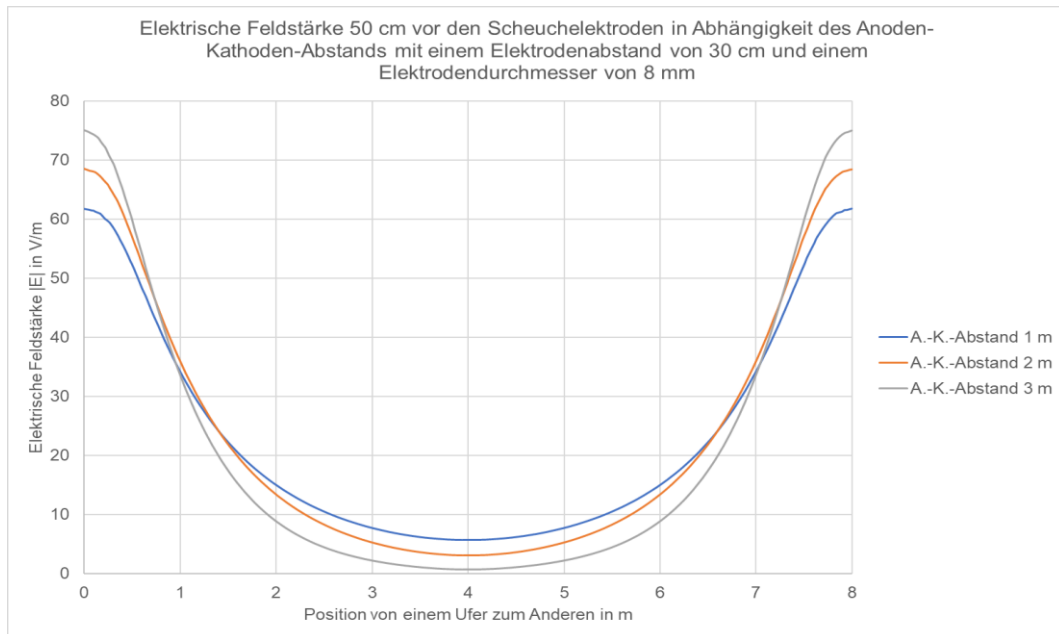
Variation der Elektroden Durchmesser:



Variation des Elektrodenabstandes:



## Variation des Anoden-Kathoden-Abstandes:



## Durchmesservariation der versetzten Anordnung:

