

# Ozeandüngung

## Eisen gegen den Treibhauseffekt?

S1/ Herr Finck, Herr Süß

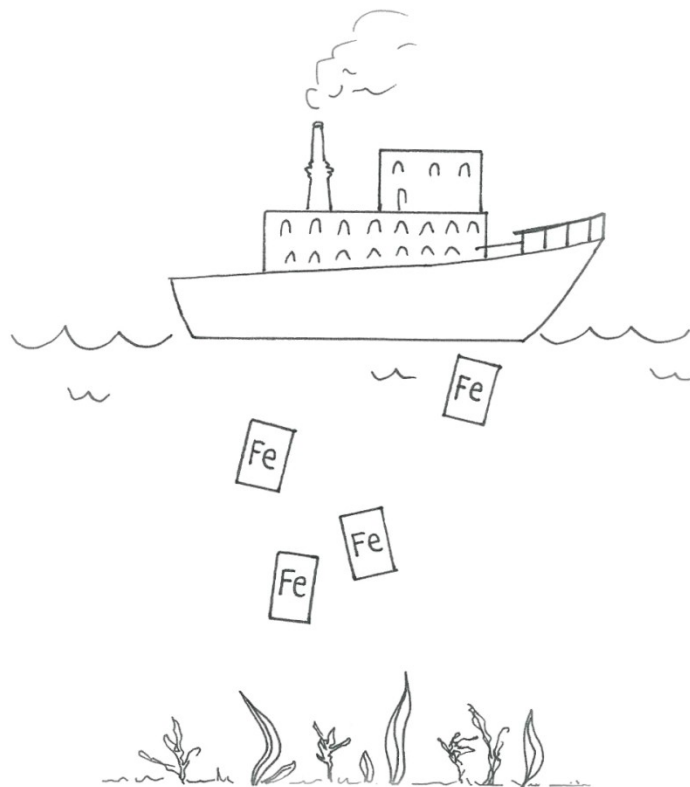


Illustration v. Nasife T.

Seminararbeit - Hamburg, 16.12.2014

MAKE LOOSE, MELINA AHMADI, NASIFE TEFITI

?!

„IST DIE OZEANDÜNGUNG DIE  
RETTENDE LÖSUNG, DIE  
DEN ANTHROPOGENEN KLIMAWANDEL  
STOPPEN KÖNNTE?“



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	4
<b>2. Einführung in die Ozeandüngung</b>	5-6
2.1. CO <sub>2</sub> Ozeanspeicherung	5 6
2.2. Natürliche Ozeandüngung	7-8 7 7, 8
<b>3. Funktion</b>	
3.1. Definition	
3.2. Prozess	8-13 8, 9, 10 10, 11 12, 13
<b>4. Experimente</b>	
4.1. EisenEX	
4.2. EIFEX	
4.3. LOHAFEX	13
<b>5. Kritik an der Ozeandüngung</b>	
<b>6. Rechtsbestimmung der Geo-Engineering-Maßnahmen</b>	14, 15
<b>7. Eigene Meinungen</b>	16
<b>8. Quellennachweise</b>	17-18
8.1. Literaturverzeichnis	17, 18 18
8.2. Abbildungsverzeichnis	

## 1. Einleitung

Der Klimawandel ist ein stetig laufender Prozess. Durch die Erderwärmung entstehen Folgen, die irreversibel (=nicht umkehrbar) sind. Die Klimapolitik ist ein Thema, das ständig aktuell bleibt und immer noch ohne Lösung vorliegt. In unserer Seminararbeit beschäftigen wir uns mit einer Idee, die noch erforscht wird, d.h. noch nicht großräumig angewendet wurde.

Das "Geo-Engineering" ist eine Möglichkeit, durch die versucht wird, dem Klimawandel entgegenzuwirken. Hier wird durch Eingriffe in das Klimasystem versucht, es zu stabilisieren. Dabei werden die Teilelemente (Atmosphäre, Lithosphäre, Hydrosphäre und die Biosphäre) stark beeinflusst und durch den Menschen verändert. Wir haben uns die Frage gestellt, ob diese relativ neuen Ideen eine Lösung darstellen oder nur ein weiteres Problem. Dabei sind wir auf eine bestimmte Maßnahme des Geo-Engineerings eingegangen: die **Ozeandüngung**.

Der Ozean ist ein großer natürlicher Speicher von Kohlenstoffdioxid. Die Idee ist es, die Fähigkeit des Ozeans, Kohlenstoffdioxid zu speichern, zu nutzen und zu fördern. Das klingt sehr simpel, doch es stellt sich die Frage, ob es auch so einfach umzusetzen ist und wie der Ozean auf die zusätzliche Düngung reagiert.

Wir wählten die Ozeandüngung als Thema unserer Seminararbeit, da wir gerne eine Maßnahme näher untersuchen wollten, die dem Klimawandel als Lösung dienen könnte. Diese Idee des Geo-Engineerings wurde schon oft mit Experimenten erforscht. Bei der Einarbeitung in unser Thema stellten sich immer mehr Fragen: Wie effektiv ist die Ozeandüngung? Bieten sich alle Ozeane für die Düngung an? Was sind die negativen Auswirkungen bei der Ozeandüngung? Wie verliefen die bereits durchgeführten Experimente? Wie reagiert das Ökosystem auf die zusätzliche Düngung? Gibt es ein Gesetz, das die Ozeandüngung kontrolliert? Inwieweit kann die Ozeandüngung den Klimawandel noch beeinflussen? Mithilfe dieser Fragen entwickelten wir schließlich unsere Leitfrage: **Ist die Ozeandüngung die rettende Lösung, die den Klimawandel stoppen könnte?**

Bei der Ozeandüngung ist es zuerst wichtig zu wissen, wie die Speicherung von Kohlenstoffdioxid in den Ozeanen überhaupt funktioniert. Danach kann man erst verstehen, wie die Forscher beabsichtigen, den Ozean zu unserem Vorteil zu verändern. Anschließend haben wir uns mit den Experimenten EisenEX, EIFEX und LOHAFEX beschäftigt. Durch die Ergebnisse dieser Experimente konnten wir die Nachteile der Ozeandüngung feststellen. Die Ozeandüngung ist durch die internationale Rechtsprechung streng geregelt: Die

Ozeandüngung wirklich zu nutzen, um den Klimawandel zu stoppen bzw. zu verringern wird dadurch vor eine Herausforderung gestellt. Zum Schluss kommen wir dann zu einem Fazit.

## **2. Einführung in die Ozeandüngung**

### **2.1. CO<sub>2</sub> Ozeanspeicherung**

Die Ozeandüngung ist eine Methode des Geo-Engineerings, bei der die Umwelt in einem großen Maßstab bewusst manipuliert wird (*Leujak, Ginzky, Arle, Claussen, 2012, S. 2*). Geo-Engineering umfasst zielgerichtete Eingriffe in das Klimasystem. Das verfolgte Ziel ist, dass die anthropogene Klimaerwärmung abgemildert wird. Grundsätzlich versteht man unter Geo-Engineering technologische Maßnahmen, die das Klimasystem stabilisieren, indem sie direkt in die Energiebilanz der Erde eingreifen.

Nun gibt es im Geo-Engineering mehrere Teilbereiche, welche sich in „Solar Radiation Management“ und „Carbon Dioxide Removal“ einteilen lassen (*Umweltbundesamt, 2011, S. 11*). In unserem Fall liegt der Bereich „Carbon Dioxide Removal“ im Fokus. „Carbon Dioxide Removal“ umfasst Technologien, die darauf basieren, dem atmosphärischen Kohlenstoffkreislauf Kohlenstoffdioxid zu entziehen und dauerhaft zu speichern. Diese Methoden unterteilen sich in terrestrisch und marin. Im Bereich marin wird der Atmosphäre Kohlenstoffdioxid entnommen und in der Hydrosphäre gespeichert, was unter anderem die Ozeandüngung beabsichtigt.

Ziel ist es, dass Kohlenstoffdioxid im Meer versinkt. Vage erklärt funktioniert die Ozeandüngung folgendermaßen: Der Ozean wird zunächst gedüngt. So lässt man Algen anwachsen, die, ebenso wie die Biomassen in der Atmosphäre, Kohlenstoffdioxid einfangen. Anschließend sterben die Algen ab und sinken mit dem gespeicherten Kohlenstoffdioxid auf den Meeresboden.

## 2.2 Natürliche Ozeandüngung

Zu den Kohlenstoffspeichern gehören die Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre und die Lithosphäre. Jedoch sind die Ozeane die größten und bedeutsamsten Kohlenstoffdioxidspeicher unseres Planeten. Die Ozeane speichern ungefähr 50 Mal so viel Kohlenstoffdioxid wie die Atmosphäre (Leujak, Ginzky, Arle, Claussen, 2012, S. 11). Daher rückt diese Kohlenstoffdioxidsenke immer mehr in den Vordergrund des Geo-Engineerings.

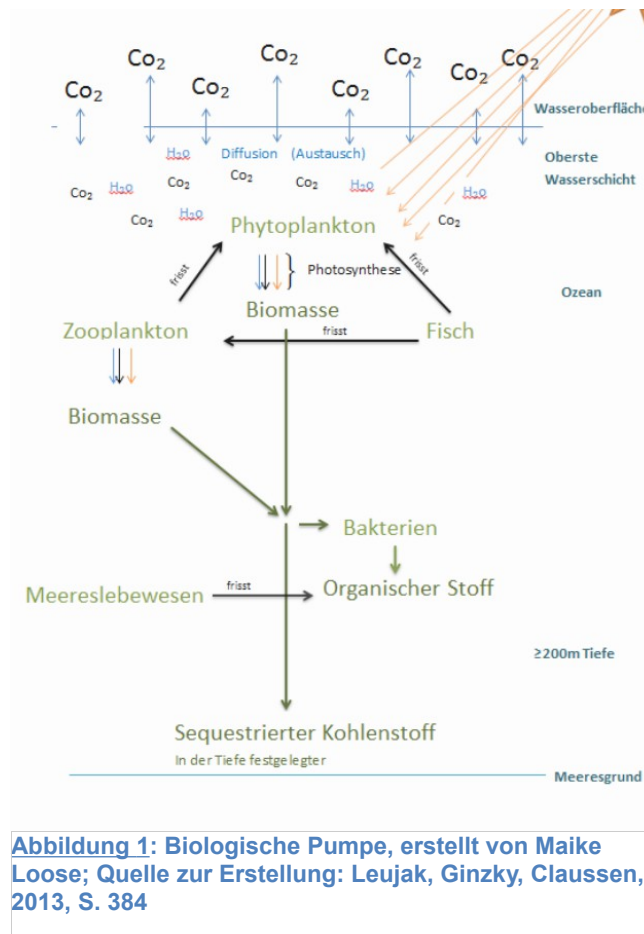


Abbildung 1: Biologische Pumpe, erstellt von Maike Loose; Quelle zur Erstellung: Leujak, Ginzky, Claussen, 2013, S. 384

Um die Ozeandüngung verstehen zu können, muss man sich erst einmal einen Überblick verschaffen, wie die natürliche  $\text{CO}_2$ -Aufnahme im Meer, auch Biologische Pumpe genannt, funktioniert (Siehe Abb. 1). Dies läuft wie folgt ab: Zunächst findet ein  $\text{CO}_2$ -Austausch zwischen Atmosphäre und Ozean statt, bei dem sich das Kohlenstoffdioxid der Atmosphäre im Ozeanwasser löst. Hierbei wird  $\text{CO}_2$  in eine andere Kohlenstoffverbindung, wie z.B. in Hydrogenkarbonat (Teckentrup, 2014), umgewandelt. In der obersten Wasserschicht nehmen Algen (Phytoplankton) gelöstes  $\text{CO}_2$  auf. Diese Algen wandeln daraufhin das gelöste  $\text{CO}_2$  mit Hilfe des Sonnenlichts in Biomasse um. Dieser Prozess ist auch als Photosynthese (Leujak, Ginzky, Claussen, 2012, S. 384) bekannt. Da das

Phytoplankton am Anfang der Nahrungskette im Meer steht, fressen kleine schwebende Tiere (Zooplankton) diese Algen. Fische wiederum ernähren sich von dem Zooplankton. Ein Anteil der Phytoplankton- und Zooplanktonbiomasse stirbt ab und sinkt als Partikelregen auf den Meeresboden. Dieser Prozess, Abwärtstransport genannt, treibt die biologische Pumpe an, die 10 bis 11 Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr in die Tiefen der Ozeane transportiert. Dieser Kohlenstoff sinkt in Tiefen von mehr als 200 m ab, wo er für 500 bis zu 1.000 Jahren in den Meerestiefen als Meeressediment abgelagert wird (*Leujak, Ginzky, 2013, S. 348*). Da die Strömungen im Meer den Abwärtstransport beeinflussen, sinkt nicht der gesamte Kohlenstoff: Der andere Teil des abwärts transportierten organischen Kohlenstoffs wird wieder für Meereslebewesen in den oberen Meeresschichten verfügbar gemacht. Diese sind sogenannte Zwischenprodukte. Durch die Respiration von Meerestieren wird wieder CO<sub>2</sub> freigesetzt.

### **3. Funktion**

#### **3.1. Definition**

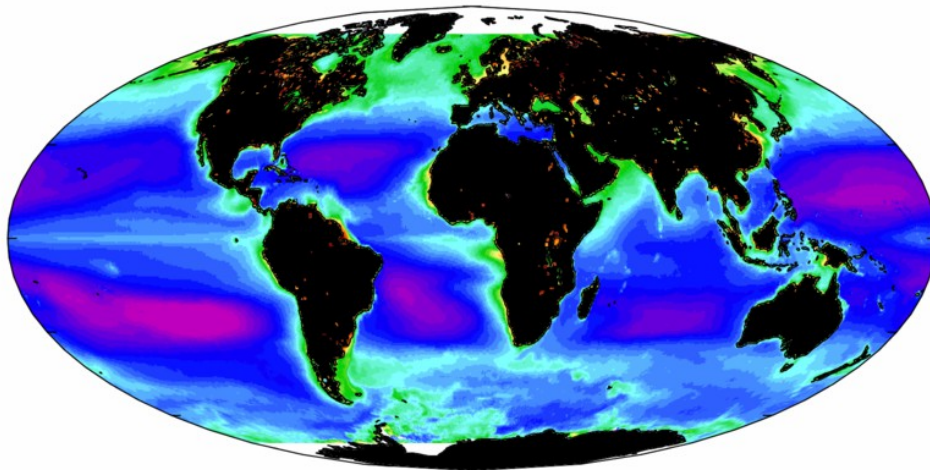
Die Ozeandüngung ist eine Geo-Engineering-Methode, die zur Kategorie „Carbon Dioxide Removal“ (CDR) gehört. Man will den durch den Menschen erhöhten CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Atmosphäre verringern, indem man CO<sub>2</sub> in Form von Biomasse im Ozean speichert.

„Gebt mir einen halben Tanker voll Eisen und ich gebe euch eine Eiszeit.“

Diese Äußerung des Ozeanographen John Martin am Ende der 1980er Jahre wird als Geburt der Eisenhypothese bezeichnet (*Leujak, 2013, S. 348*).

John Martin bezieht sich darauf, dass durch Zugabe von Eisen in bestimmten Regionen des Ozeans das Algenwachstum zunimmt. Die Algen nehmen das CO<sub>2</sub> auf und wandeln es durch Photosynthese in Biomasse um. Durch das verstärkte Algenwachstum kann mehr CO<sub>2</sub> von mehr Algen in Biomasse gebunden und im Ozean gespeichert werden. Durch die Verringerung des CO<sub>2</sub>-Gehalts der Atmosphäre wird der anthropogene Treibhauseffekt geschwächt.





Average sea-surface chlorophyll, 1998 to 2006 [ $\text{mg chl m}^{-3}$ ]

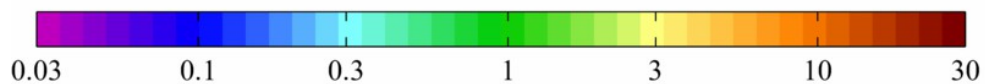


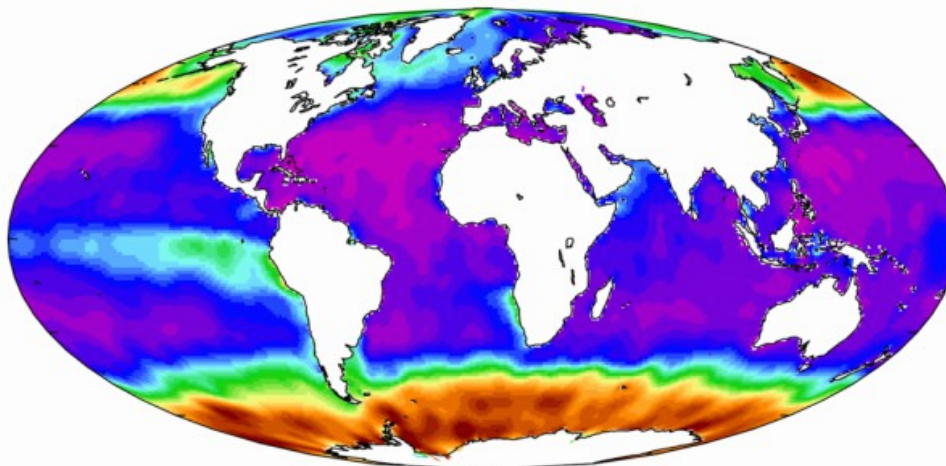
Abbildung 2: Globale Verteilung der marinen Chlorophyllkonzentration für den Zeitraum Januar 1998 bis Dezember 2006. Rote Gebiete entsprechen hohen, violette Gebiete niedrigen Konzentrationen.

Quelle:

[http://de.wikipedia.org/wiki/HNLC#mediaviewer/File:AYool\\_SEAWIFS\\_annual.png](http://de.wikipedia.org/wiki/HNLC#mediaviewer/File:AYool_SEAWIFS_annual.png),  
 Letzter Zugriff: 09.12.14

Autor: Plumbago (2006)

### 3.2. Methode



Sea-surface phosphate [ $\text{mmol P m}^{-3}$ ]

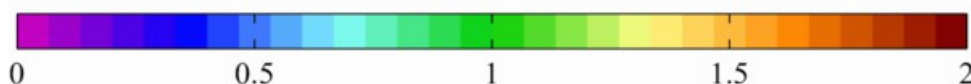


Abbildung 3: Gebiete mit hohen Nährstoffkonzentrationen, hier beispielhaft die Phosphatkonzentration. Rot eingefärbte Gebiete stehen für hohe, violett eingefärbte Gebiete stehen für niedrige Nährstoffkonzentrationen. Angabe in Millimol Phosphat pro Kubikmeter.

Quelle:

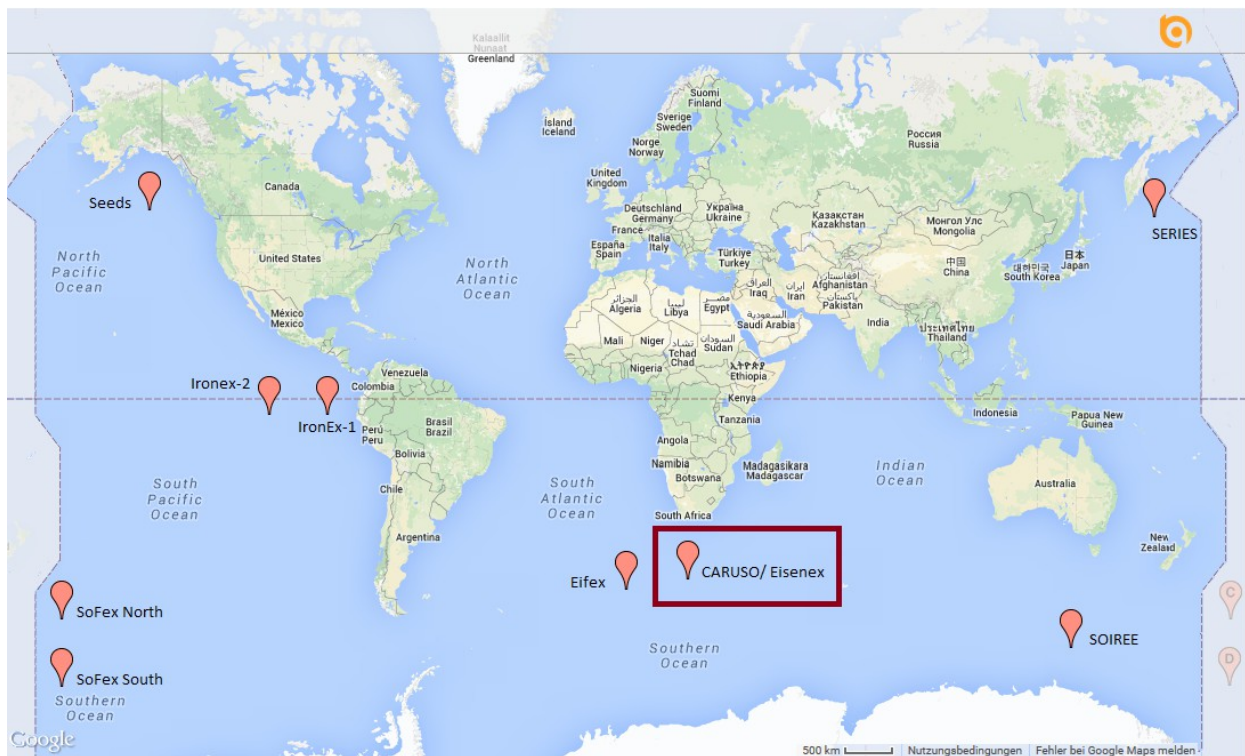
[http://de.wikipedia.org/wiki/HNLC#mediaviewer/File:AYool\\_WOA\\_surf\\_PO4.png](http://de.wikipedia.org/wiki/HNLC#mediaviewer/File:AYool_WOA_surf_PO4.png),  
 Letzter Zugriff: 09.12.14

Autor: Plumbago (2006)

Große Teile des Ozeans sind so arm an Nährstoffen, dass das Wachstum von einzelligen Algen (Phytoplankton) begrenzt ist (s. Abb.2). Diese Regionen nennt man HNLC-Regionen. HNLC steht für High Nutrient, Low Chlorophyll. Chlorophyll ist ein Indikator für den Algenanteil in Gewässern (*Wikipedia, HNLC, 2013*). Rund 20% der Weltmeere sind HNLC-Regionen (*Wikipedia, HNLC, englische Version, 2013*) wie z.B. der tropische Ostpazifik, Teile des Nordpazifiks und der gesamte Südliche Ozean (Siehe Abb.3). Obwohl die Regionen reich an Hauptnährstoffen wie Phosphat und Nitrat sind, kommt es nicht zum Wachstum der Algen. Das liegt daran, dass Mikronährstoffe wie z.B. Eisen fehlen. Die Algen benötigen nur einen geringen Anteil von Eisen und es kommt zum Wachstum (*Wikipedia, HNLC, 2013*).

Hier setzt die Ozeandüngung an: Sie versucht, durch Zugabe von Eisen in HNLC-Regionen, das Wachstum von Algen zu verstärken. Dadurch gibt es mehr Algen, die mehr gelöstes CO<sub>2</sub> in Biomasse durch Photosynthese binden. Dadurch sinkt der Partialdruck von CO<sub>2</sub> in den Ozeanen gegenüber dem Partialdruck von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre. Da Atmosphäre und Ozean jedoch immer im Gleichgewicht stehen, wird sich mehr atmosphärisches Kohlenstoffdioxid in den Meeren lösen. So wird Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre entfernt und der anthropogene Treibhauseffekt geschwächt.

Zur der dauerhaften Speicherung des CO<sub>2</sub> müssen die Algen sterben und auf den Meeresboden regnen. Dort werden sie im Idealfall für 10-100 Jahre gespeichert. Kurz gesagt soll so die biologische Pumpe verstärkt werden (*Teckentrup, 2014*).



**Abbildung 4:** Regionen, an denen Eisendüngungsexperimente bisher durchgeführt wurden. EisenEX ist rot umrandet. Die Abbildung wurde mit BatchGeo nach Baar et. al (2005) erstellt.

## **4. Experimente**

### **4.1. EisenEX**

Wie alle Befürworter der Ozeandüngung, erhofften sich die Forscher des Experiments "EisenEX" die Vermehrung und eine rapide Ausbreitung der Algen sowie das Entziehen des Kohlenstoffdioxids aus der Atmosphäre, um so dem Treibhauseffekt entgegenzuwirken (*Frick, 2001, S. 62*).

Die ersten erfolgreichen Versuche fanden in den tropischen Gewässern statt, jedoch nicht im klimatisch bedeutsameren antarktischen Ozean (Siehe Abb.4). Dadurch, dass der antarktische Ozean kälter als der tropische Ozean ist, wird CO<sub>2</sub> besser in den antarktischen Gewässern aufgenommen, da CO<sub>2</sub> in kaltem Wasser löslicher ist. Besonders effektiv ist die Ozeandüngung in der Nähe des Zirkumpolarstroms. Hier nimmt der Ozean viel CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre auf und transportiert ihn durch den Zirkumpolarstrom in die Tiefe.

Noch bevor das EisenEX durchstartete, gab es bereits einen Ozeandüngungsversuch im antarktischen Ozean („Soiree“). Dort hatten Neuseeländische Wissenschaftler (von der University of Otago) 1999 mit Eisensulfat den Ozean gedüngt, jedoch erfolglos.

Das Experiment EisenEX wurde länger als drei Wochen lang im Frühling 2000, unter der Leitung Victor Smetaceks, durchgeführt (*Assmy, Henjes, Klaas, Smetacek, 2003*). Die Expedition fand auf dem Forschungsschiff Polarstern statt und an ihr nahmen 56 Forscher aus 15 Ländern teil.

Die Expedition begann damit, dass das Polarstern-Team im antarktischen Zirkumpolarstrom, 1500 Kilometer südlich von Afrika, einen dauerhaften und ortsfesten Meereswirbel aufgespürt hatte. Zunächst fuhren die Wissenschaftler den strömungsarmen Kern des Wirbels spiralförmig ab und pumpten dabei insgesamt zehn Tonnen gelöstes Eisensulfat ins Wasser. Das Forschungsteam markierte den entstandenen Experimentierfleck (Durchmesser: sieben Kilometer) mit 50 Gramm Schwefelhexafluorid (mit sehr schwacher Konzentration), um diesen in der rauen See wiederfinden zu können. Die chemischen und biologischen Prozesse ließen sich trotz vieler Stürme, die sich im Auge des Wirbels drehten und sich durch Vermischen mit dem Umgebungswasser 500 Quadratkilometer weit ausdehnten, verfolgen (*Frick, 2001, S. 62*).

Die Ergebnisse: Durch die Eisendüngung wuchsen die Planktonalgen doppelt so schnell wie außerhalb des Experimentierareals. Es baute sich ein Vielfaches an Biomasse auf, was ein Anzeichen dafür ist, dass die Nährstoffe im antarktischen Zirkumpolarstrom nicht knapp sind und nur Eisenmangel die Vermehrung des Planktons beschränkt (*Frick, 2001,*

S. 62).

Das verstärkte Algenwachstum haben auch die Neuseeländer beobachtet. Der Versuch "Soiree" fand im Februar - also im antarktischen Spätsommer - statt. Deshalb konnten sie nicht ausschließen, dass der Eisenvorrat erst durch die Algenblüte im Sommer erschöpft war. Das EisenEX beweist hingegen, dass der antarktische Ozean mit genügend Eisen schon im dortigen Frühjahr die Algenblüte gesteigert werden könnte (Frick, 2001, S. 62).

Nun stellt sich aber die Frage, ob die Ozeandüngung die globale Erwärmung stoppen könnte. Der wichtigste Schritt der Ozeandüngung ist, dass die Algen mitsamt ihrem aus der Atmosphäre gebundenen Kohlenstoff nach dem Absterben zum Meeresboden sinken müssen. Erst dann könnte dieses Experiment den Treibhauseffekt beeinflussen. Wenn diese aber hingegen an der Meeresoberfläche bleiben, werden sie von höheren Lebewesen gefressen. Über kurze oder lange Prozesse wird der organisch gebundene Kohlenstoff wieder als Kohlenstoffdioxid freigesetzt. Zusätzlich stellt sich die ebenfalls wichtige Frage, ob die Algen langfristig in der Tiefe verschwinden. Diese Frage konnte weder vom Polarstern-Team noch von den Neuseeländern geklärt werden, da beide Experimente zu kurz dafür waren und das Budget für längere Untersuchungen aufgebraucht war (Frick, 2001, S. 62)

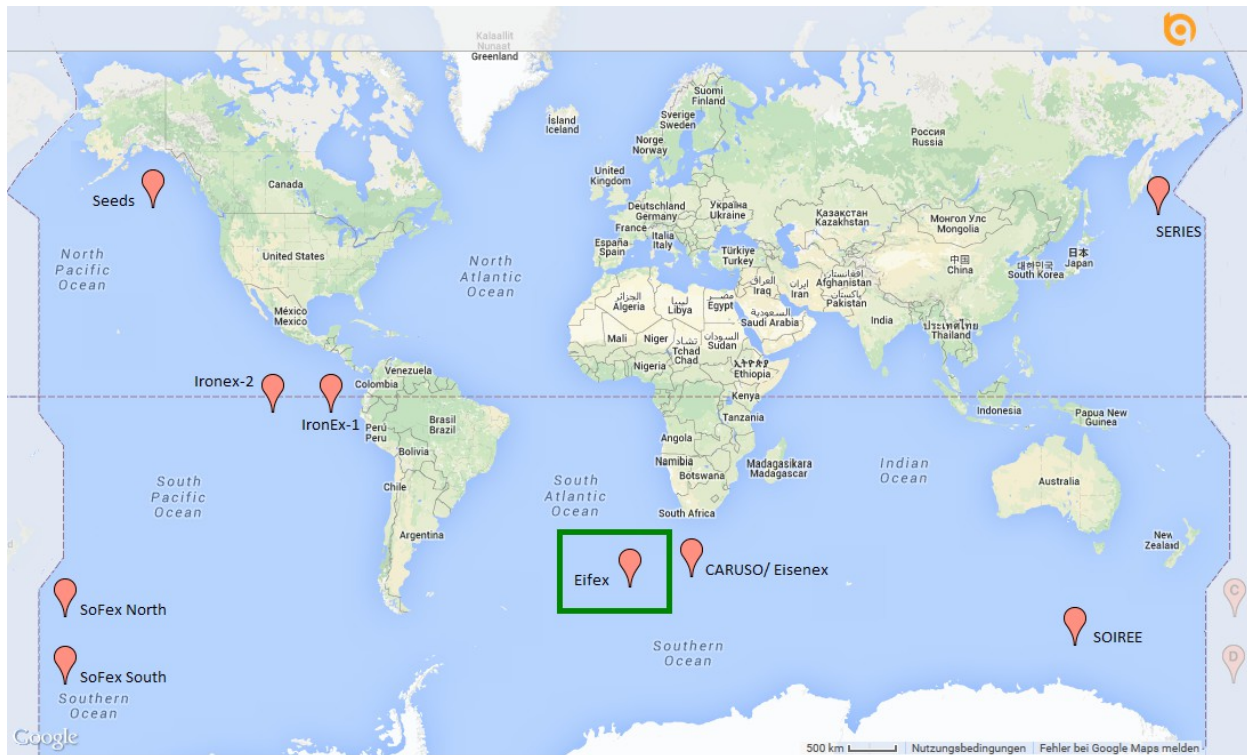
Die Sinktauglichkeit der EisenEX-Algen mussten allerdings nicht unter Beweis gestellt werden, da das Experiment in einem Gebiet - der sogenannten Polarfrontzone -, wo das Meerwasser ohnehin großräumig in die Tiefe der benachbarten Subantarktischen Zone strömt, stattfand. Dementsprechend bleibt den Algen dort nichts anderes übrig als unterzugehen (Frick, 2001, S. 62).

Obwohl die Ergebnisse vom EisenEX und Soiree unterschiedlich ausgefallen sind, lässt sich ein gemeinsames Resultat ziehen. Sie weisen auf, dass die Ozeane im Laufe der Erdgeschichte dann aufblühen, wenn es an Land wegen einer Eiszeit besonders viele unfruchtbare Gebiete gab und umgekehrt. Im offenen Meer ist nur der Staub der Natur, der aus Halbwüsten stammt, die einzige Quelle für Eisen. Die Eiszeiten veränderten das Festland in eine wasserlose Wüste. Dadurch gab es einen deutlich höheren Staubeintrag als in den Warmzeiten, was Bohrkerne aus Tiefseesedimenten und antarktisches Eis aufzeigen (Frick, 2001, S. 62).

#### **4.2. EIFEX**

EIFEX (European Iron Fertilization Experiment) ist das zweite der drei großen Experimente. Es wurde vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung mit der Kooperation von vielen verschiedenen nationalen und internationalen Instituten

durchgeführt und diente zur Erforschung der Ozeandüngung. Da das Südpolarmeer als nährstoffarm gilt, starteten sie ihr Experiment 2004, indem sie sieben Tonnen Eisensulfat in den Südlichen Ozean eintrugen (siehe Abb. 5) (Becker, 2012).



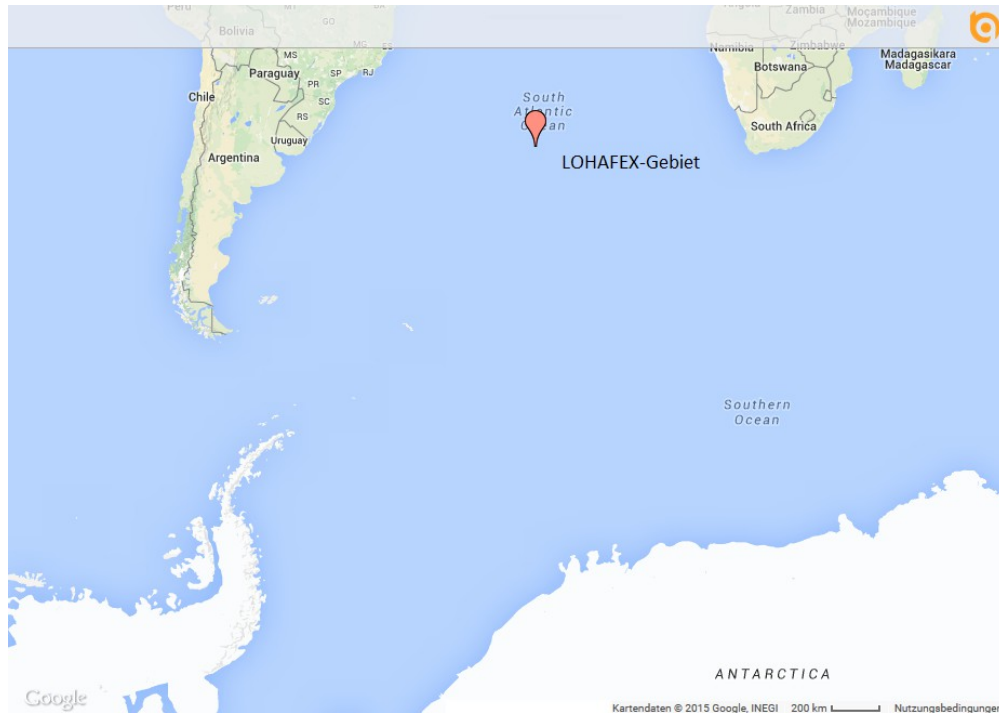
**Abbildung 5:** Abbildung 5: Regionen, an denen Eisendüngungsexperimente bisher durchgeführt wurden. Eifex ist grün umrandet. Die Abbildung wurde mit BatchGeo nach Baar et. al (2005) erstellt.

Die Forscher, die EIFEX starteten, stellten nach ein paar Wochen ein erhöhtes Wachstum der pflanzlichen Algen fest. Die Hälfte des Phytoplanktons sank mehr als 1000 m tief (Becker, 2012). Die Algenblüte war nicht nur größer, sie bestand außerdem aus Kieselalgen. Diese Algenart ist dafür bekannt, dass sie schleimige Klumpen am Ende ihrer Blüte formt. Damit ist die Blüte schwerer und sinkt viel schneller auf den Meeresgrund (Becker, 2012).

Im Vergleich zu anderen Ozeandüngungsexperimenten waren die Forscher relativ zufrieden mit dem Ergebnis des EIFEX Experiments. Sie führten die unterschiedlichen Ergebnisse der anderen Ozeandüngungsversuche auf die Nährstoffverhältnisse der Ozeane zurück. Die Organismen reagieren deswegen unterschiedlich auf die Düngung. Jedoch hat auch EIFEX seine Nachteile; die Kieselalgen sind einerseits positiv, da sie den Kohlenstoffkreislauf im Ozean beschleunigen. Andererseits gehören zu den marinen (zum Meer gehörenden) Kieselalgen auch bestimmte Gattungen, die die giftige "Domainsäure" produzieren. Wenn Fische diese Säure fressen und später vom Menschen verzehrt

werden, könnte es zu einer Vergiftung kommen, die zu Gedächtnisverlust, Übelkeit, Krämpfen, Durchfall, Kopfschmerzen und Atembeschwerden führen kann (*Wikipedia, Kieselalgen, 2014*).

### 4.3. LOHAFEX



**Abbildung 6: Ein Teil der Südhalbkugel und das LOHAFEX-Gebiet.**  
Die Abbildung wurde mit BatchGeo nach Smetacek und Naqvi (2010) erstellt.

LOHAFEX (Zusammensetzung aus dem Hindi-Wort für Eisen „loha“ und der Abkürzung für Fertilization Experiment „FEX“) ist das jüngste und größte Eisendüngungsexperiment überhaupt (*Wikipedia, LOHAFEX, 2014*). Es wurde vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung in Kooperation mit dem National Institute of Oceanography, India, durchgeführt. Es ist ein Teil der wissenschaftlichen Zusammenarbeit zwischen Indien und Deutschland. Das Experiment war im Interesse des Bundesforschungsministeriums und wurde von ihr initiiert. LOHAFEX fand im Südpolarmeer nördlich von der Insel Südgeorgien statt (Siehe Abb. 6) (*AWI, 2009, S.1*).

#### Vorbereitungen

Die Vorbereitungen für das Projekt begannen schon im Jahr 2005. Am 07.01.2009 lief das Forschungsschiff Polarstern aus und führte im Untersuchungsgebiet Vermessungen von

Ozeanwirbeln durch, die sich für das Experiment eignen. Voraussetzungen für die Wirbel sind, dass sie 2 Monate stabil und in einer HNLC-Region sein sollten. Geplant war die Region 200-500 Seemeilen nördlich oder nordwestlich von der Insel Südgeorgien. Das Ziel der Forscher war, die Rolle von Eisen im globalen Klimasystem besser zu verstehen (AWI, 2009, S.1).

### **Prozess**

Der eigentliche Prozess der Ozeandüngung besteht daraus, dass im Zentrum eines stabilen Ozeanwirbels eine Treibboje ausgebracht wird, die Eisensulfat verteilt um somit eine Algenblüte anzuregen. Der Grund weshalb man einen Wirbel benötigt ist, dass das Eisensulfat im Wirbel zusammengehalten wird und dadurch das Ausbreiten und das Vermischen des Eisensulfats verhindert wird. Dies soll die angrenzenden Gebiete von möglicher Beeinträchtigung schützen. Außerdem ist der Unterschied besser messbar, wenn man ihn einer genau bestimmten Fläche zuordnen kann. Die gedüngte Fläche hatte einen Durchmesser von 20km und eine Fläche von 300km<sup>2</sup>. Dabei wurden 20t Eisensulfat in 15m Tiefe eingebracht. Diese verteilte sich in der Oberflächenschicht von 100m. Die dadurch entstandene Steigerung der Eisenkonzentration beträgt 2,4 Nanomol/Liter. Diese Werte hören sich riesig an, sind aber relativ klein, da die Verbreitung der natürlichen Algenblüte in diesem Gebiet ca. 50 Mio. km<sup>2</sup> beträgt.

Auch die Steigerung der Eisenkonzentration ist nicht so gravierend, weil an Küstengebieten der Eisenkonzentrationswert bei 60 Nanomol/Liter liegt (AWI, 2009, S.7).

### **Ergebnis**

Es kam wie erwartet zum Wachstum der Algen. Es bildete sich ebenfalls eine Algenblüte, die Kohlenstoffdioxid aufnahm. Jedoch kam es nicht wie gewünscht zur Speicherung des CO<sub>2</sub> in Form von Biomasse auf dem Meeresboden. Dafür verantwortlich waren Ruderfußkrebse, welche die Kleinalgen gefressen hatten. Damit hatten die Forscher nicht gerechnet: Letztendlich blieb kaum etwas von den Algen und vom Eisen. Die Ruderfußkrebse selber wurden dann von Flohkrebsen aufgeessen.

Alles in allem kann man sagen, dass das Experiment weniger erfolgreich war, aber man um eine Erkenntnis reicher war. Außerdem hatte das Experiment keine negative Auswirkungen auf die Meere, welches viele Umweltschützer befürchtet hatten (Stockrahm, 2009).

## **5. Kritik an der Ozeandüngung**

Die Ozeandüngung ist, wie alle Geo-Engineering-Maßnahmen, ein künstlicher Eingriff in die Natur und deren Ökosysteme. Bei den eintretenden Folgen ist jedoch zu unterscheiden, wie hoch die tatsächliche Veränderung ist und wie gravierend sie das Ökosystem beeinflusst.

Mögliche negative Folgen auf die Ozeane könnten z.B. Effekte, die der Eutrophierung (Überdüngung) ähneln, sowie die zusätzliche Versauerung der Tiefsee sein (*Leujak, 2013, S. 351*): Durch die erhöhte Zufuhr von Nährstoffen kann sich die Zusammensetzung des Phytoplanktons verändern und zu einer toxischen Algenblüte führen. Konkret wird von Kritikern die Förderung des Wachstums der Kieselalgen (*Leujak, 2013, S.351*) genannt. Es gibt bestimmte Arten dieser Alge, die Domoinsäure produzieren, wie z.B. die Pseudonitzschia-Kieselalge: Diese Algen sind giftig. Das kann auch Auswirkungen auf den Menschen haben, wenn dieser einen vergifteten Fisch isst. Als Folge könnte z.B. die Krankheit "Amnesie Shellfish Poisoning" hervorgerufen werden (*Wikipedia, Kieselalgen, 2014*).

Weiterhin kann es durch die Zersetzung großer Mengen abgestorbener Biomasse zu negativen Auswirkungen kommen: Beim Zersetzen benötigen die Organismen den Sauerstoff, der normalerweise von Fischen benötigt wird (*SWR, 2014*). Im Südlichen Ozean würde das zwar kaum zu Problemen führen, jedoch könnte durch Fernwirkungen die Situation in bereits bestehenden Sauerstoffminimumzonen verschärft werden. Außerdem kann es zur Freisetzung von Faulgasen und von Treibhausgasen wie Lachgas kommen.

Die Skeptiker der Ozeandüngung sind ebenfalls der Meinung, dass die dazugehörigen Experimente in den Ozeanen keine richtige Aussagekraft über den Erfolg der Maßnahme haben, da sie einerseits zu kleinskalig (bis zu 300 km<sup>2</sup>) sind und andererseits in einem zu geringen Zeitraum (weniger als 40 Tage) abliefen (*Leujak, 2013, S.351*).

## **6. Rechtsbestimmung der Geo-Engineering-Maßnahmen**

Geo-Engineering-Maßnahmen sollen den Klimawandel verringern, jedoch ist dazu ein großer Eingriff in die Natur notwendig, der ebenfalls Probleme hervorrufen kann, die wir Menschen am Ende nicht mehr kontrollieren können.

Auf der internationalen Ebene gibt es aus diesem Grund viele Verträge. Die



Vertragsstaaten sind hier verpflichtet, diese auch einzuhalten. Ein Problem könnte dann jedoch entstehen, wenn eine Weltmacht die Verträge nicht unterzeichnet (Beispiel: Die Verweigerung der USA, das Kyoto Protokoll zu unterzeichnen).

Ein weiteres Problem bei der Rechtsbestimmung von Geo-Engineering-Maßnahmen ist die Tatsache, dass sich manche Technologien noch in der Entwicklung befinden. Aus diesem Grund gibt es internationale Regelungen, die das Geo-Engineering jedoch nicht mit einbeziehen, da diese Techniken bei Vertragsschluss schlicht noch nicht existierten.

Es gibt aber das internationale Klimaschutzrecht von der UN 1992, dessen Ziel es ist, die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre zu stabilisieren. Diese Regelung bezieht sich somit auf Maßnahmen, die entweder den Ausstoß von Kohlenstoffdioxid senken oder speichern. Da die Geo-Engineering-Maßnahme der Ozeandüngung versucht, Kohlenstoffdioxid zu speichern, ist sie mit diesem Gesetz geregelt.

Es sollte jedoch der Grundsatz vorhanden sein, dass die Technologie weder eine Gefahr für den Menschen noch für die Umwelt darstellen darf. Hierbei ist es nicht wichtig, ob die Gefahr bewiesen ist oder nicht; solange sie bestehen könnte, darf sie nicht weltweit genutzt werden. Die Geo-Engineering-Maßnahmen müssen also vorher mit Experimenten gut erforscht sein, um alle möglichen Gefahren meiden oder vorbeugen zu können (*Umweltbundesamt, 2011, S. 32-33*).

Eine Beurteilung einer Geo-Engineering-Maßnahme verläuft in fünf Schritten:

Im ersten Schritt wird zuerst geprüft, ob die Maßnahme überhaupt ihren **Sinn** erfüllt und ob eine Reduzierung des Klimawandels bemerkbar ist oder nicht. In diesem Teil wird also überlegt, wie sehr sich der Aufwand in der Relation zu der Verminderung lohnt. Wichtig ist auch, dass die Idee großflächig einsetzbar ist.

Im zweiten Schritt wird nach dem **Entwicklungsstand** geguckt. Nun spielt die Frage nach der Realisierung und der Wirksamkeit eine große Rolle. Hierbei werden auch oft Erfahrungen von anderen Experimenten mit einbezogen.

Der dritte Teil ist ökonomisch betrachtet. Die **Kosten** der Maßnahme (z.B. Investitions-, Entwicklungs- und Forschungskosten etc.) werden zusammengerechnet und es wird überlegt, wie der Nutzen im Verhältnis zu den Kosten steht. Wie lange die Kosten noch bestehen, ist ebenfalls von großer Bedeutung.

Im vierten Schritt geht es um die **Risiken**. Die Wirkung der Technologien könnten gravierend und nicht wieder rückgängig zu machen sein, deswegen ist es wichtig, die Tragweite der Geo-Engineering-Maßnahmen auf die Ökosysteme zu beachten.

Der letzte Schritt beinhaltet die **gesellschaftliche Akzeptanz**. Die Menschen, die eventuell mit der Geo-Engineering-Maßnahme in Kontakt geraten, müssen diese

unterstützen, um größere Konflikte zu vermeiden (*Umweltbundesamt, 2011, S. 37-40*).

Letztendlich gibt es noch keine richtige Regelung, die die Geo-Engineering-Maßnahmen regeln, da sie relativ neu sind. Jedoch kann man sie indirekt in manche bestehenden Gesetz oder Protokolle einschließen, wie z.B. im Internationalen Klimaschutzrecht.

## **7. Fazit**

Die Ozeandüngung ist auf der einen Seite eine attraktive Möglichkeit, die den anthropogenen Treibhauseffekt verlangsamen könnte. Es gibt bereits ein paar erfolgreiche Experimente (Beispiel: EIFEX, EisenEX), und da der Ozean schon auf natürliche Weise Kohlenstoffdioxid speichert, würde man den Ozean "nur" in seiner Tätigkeit fördern und nicht drastisch verändern.

Auf der anderen Seite gibt es auch hier Experimente, die nicht funktioniert haben (Beispiel: LOHAFEX). Jeder Teil eines Ozeans reagiert unterschiedlich auf diesen Eingriff in das marine Ökosystem. In der gewählten Leitfrage (Ist die Ozeandüngung die rettende Lösung, die den Klimawandel stoppen könnte?) ist es also wichtig, beide Aspekte zu berücksichtigen. Die Nachteile und Risiken sind zu hoch, um die Ozeandüngung wirklich international und dauerhaft anzuwenden. Da aber der Mensch in den letzten Jahren seine Treibhausgasemissionen nicht verringert hat, kann man davon ausgehen, dass die Möglichkeit, den Klimawandel zu verzögern (mithilfe von umweltbewusstem Verhalten) nur noch mit den Geo-Engineering-Maßnahmen möglich wäre. Die einzige Chance wäre noch die Idee der Anpassung (an den Klimawandel). Diese ist jedoch auch nicht eine Ideallösung, da nicht alle Anpassungsmaßnahmen angewendet bzw. erforscht sind. Die Methoden sind ebenfalls teuer und nicht alle Länder können sie sich leisten. Gerade die Entwicklungsländer, die am stärksten durch den Klimawandel betroffen sind, können sich aufgrund ihrer Ökonomie nicht hinreichend anpassen.

Die Geo-Engineering-Maßnahmen - und damit die Ozeandüngung - war die Idee der Forscher, auch ohne Verhaltensänderung der Menschen den Klimawandel zu stoppen. Fakt ist jedoch, dass kein System auf unserer Erde die Massen an Treibhausgasen aufnehmen kann, die der Mensch ausstößt, wenn er seine Einstellung auf umweltbewusstes Verhalten nicht verändert. Die Ozeandüngung ist somit auch keine vollständig erforschte und fehlerfreie Idee, den Klimawandel zu stoppen.

Momentan ist sie jedoch die einzige Möglichkeit fair (in Bezug auf Länder, die sich die Anpassung nicht leisten können) und ohne die Hilfe des Menschen irgendetwas zu

verändern. Aus diesem Grund sollte man die Idee nicht verwerfen und für die Zukunft weiter erforschen.

Als Endergebnis unserer Arbeit könnte man deswegen sagen, dass die Ozeandüngung den Klimawandel mit den vom Menschen hinzugefügten Treibhausgasen nicht stoppen kann.

## **8. Quellennachweis**

### **8.1. Literaturverzeichnis**

Umweltbundesamt, Hg. (2011). *Geo-Engineering*. Abgerufen am 18. November 2014 von

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/geo-engineering-wirksamer-klimaschutz-groessenwahn>

Alfred-Wegener-Institut. (2009). *Hintergrundinformationen zum Projekt LOHAFEX*. Abgerufen am 16. Dezember 2014 von

[http://www.awi.de/fileadmin/user\\_upload/News/Selected\\_News/2009/LOHAFEX/LOHAFEX\\_22\\_01\\_09\\_Handout.pdf](http://www.awi.de/fileadmin/user_upload/News/Selected_News/2009/LOHAFEX/LOHAFEX_22_01_09_Handout.pdf)

Assmy, P., Henjes, J., & Klaas, C. S. (2003). *Biological response to iron fertilization in the Polar Frontal Zone of the Southern Ocean (EisenEX)*. Abgerufen am 16. Dezember 2014 von

<http://epic.awi.de/8499/1/Ass2003a.pdf>

de Baar, H. J. W. et al (2005). *Synthesis of iron fertilization experiments: From the Iron Age in the Age of Enlightenment*. Journal of Geophysical Research. Oceans, Volume 110, Issue C9

Becker, M. (2012). *Experiment: Meeresdüngung könnte Klimawandel doch bremsen*. Abgerufen am

14. Dezember 2014 von <http://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/eifex-experiment-meeresduengung-koennte-klimawandel-bremsen-a-845292.html>

Frick, F. (2001). *Blühende Ozeane*. Abgerufen am 16. Dezember 2014 von [http://www.bild-der-](http://www.bild-der-wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/inc/popup_print.php?object_id=10094713)

[wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/inc/popup\\_print.php?object\\_id=10094713](http://www.bild-der-wissenschaft.de/bdw/bdwlive/heftarchiv/inc/popup_print.php?object_id=10094713)

Leujak, W., Ginzky, H., & Claussen, U. (2013). *Eisendüngung-Mehr CO<sub>2</sub> Fixierung durch das Meer?* Abgerufen am 28. Oktober 2014 von [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2013/02/Leujaketel.pdf)

[content/uploads/2013/02/Leujaketel.pdf](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/2013/02/Leujaketel.pdf)

Leujak, W., Ginzky, H., Arle, J., & Claussen, U. (2012). *Ist die Ozeandüngung zur Bekämpfung des Klimawandels geeignet?* Abgerufen am 16. Dezember 2014 von

[http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/positionspapier\\_ozeanduengung.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/pdfs/positionspapier_ozeanduengung.pdf)

Smetacek, V. und Naqvi, S. W. A. (2010). *The Expedition of the Research Vessel „Polarstern“ to the Antarctic in 2009 (ANT-XXV13-LOHAFEX)*. Berichte zur Polar- und Meeresforschung. Reports on Polar and Marine Research, Volume 613. Abgerufen am 07.06.2015 von

<http://epic.awi.de/29569/1/Sme2010a.pdf>

Stockrahm, S. (2009). *Eisendüngung hilft nicht gegen Treibhausgase*. Abgerufen am 12. Dezember 2014 von <http://www.zeit.de/online/2009/13/lohafex-beendet>

SWR. (2014). *Überdüngung eines Gewässers*. Abgerufen am 16. Dezember 2014 von

<http://www.planet-schule.de/sf/multimedia-interaktive-animationen-detail.php?projekt=gewaesser->

## ueberduengung

Teckentrup, L. (2014). *Ozeandüngung*. Abgerufen am 14. Dezember 2014 von

<http://klimawiki.org/klimawandel/index.php/Ozeand%C3%BCngung>

Wikipedia. (2013). *High-Nutrient, low-chlorophyll*. Abgerufen am 12. Dezember 2014 von

[http://en.wikipedia.org/wiki/High-Nutrient,\\_low-chlorophyll](http://en.wikipedia.org/wiki/High-Nutrient,_low-chlorophyll)

Wikipedia. (2013). *HNLC*. Abgerufen am 12. Dezember 2014 von

<http://de.wikipedia.org/wiki/HNLC>

Wikipedia. (2014). *Kieselalgen*. Abgerufen am 30. November 2014 von

<http://de.wikipedia.org/wiki/Kieselalgen>

Wikipedia. (2014). *LOHAFEX*. Abgerufen am 16. Dezember 2014 von

<http://de.wikipedia.org/wiki/LOHAFEX>

Wikipedia. (2014). *Partialdruck*. Abgerufen am 16. Dezember 2014 von

<http://de.wikipedia.org/wiki/Partialdruck>

## **8.2. Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Biologische Pumpe, erstellt von Maïke Loose; Quelle zur Erstellung: Leujak, Ginzky, Claussen, 2013, S. 384.....	7
Abbildung 2: Globale Verteilung der marinen Chlorophyllkonzentration für den Zeitraum Januar 1998 bis Dezember 2006. Rote Gebiete entsprechen hohen, violette Gebiete niedrigen Konzentrationen. Quelle: <a href="http://de.wikipedia.org/wiki/HNLC#mediaviewer/File:AYool_SEAWIFS_annual.png">http://de.wikipedia.org/wiki/HNLC#mediaviewer/File:AYool_SEAWIFS_annual.png</a> , Letzter Zugriff: 09.12.14 Autor: Plumbago (2006) .....	9
Abbildung 3: Gebiete mit hohen Nährstoffkonzentrationen, hier beispielhaft die Phosphatkonzentration. Rot eingefärbte Gebiete stehen für hohe, violett eingefärbte Gebiete stehen für niedrige Nährstoffkonzentrationen. Angabe in Millimol Phosphat pro Kubikmeter. Quelle: <a href="http://de.wikipedia.org/wiki/HNLC#mediaviewer/File:AYool_WOA_surf_PO4.png">http://de.wikipedia.org/wiki/HNLC#mediaviewer/File:AYool_WOA_surf_PO4.png</a> , Letzter Zugriff: 09.12.14 Autor: Plumbago (2006) .....	9
Abbildung 4: Regionen, an denen Eisendüngungsexperimente bisher durchgeführt wurden. EisenEX ist rot umrandet. Die Abbildung wurde mit BatchGeo nach Baar et. al (2005) erstellt.....	10
Abbildung 5: Abbildung 5: Regionen, an denen Eisendüngungsexperimente bisher durchgeführt wurden. Eifex ist grün umrandet. Die Abbildung wurde mit BatchGeo nach Baar et. al (2005) erstellt.....	13
Abbildung 6: Ein Teil der Südhalbkugel und das LOHAFEX-Gebiet. Die Abbildung wurde mit BatchGeo nach Smetacek und Naqvi (2010) erstellt .....	14