

# NiceLAB

new insights from sea ice light and biology profiles

## Sachbericht

Projektleitung:

Prof. Dr. Dirk Notz  
Universität Hamburg  
Institut für Meereskunde  
Bundesstraße 53  
20146 Hamburg  
E-Mail: [dirk.notz@uni-hamburg.de](mailto:dirk.notz@uni-hamburg.de)  
Tel: 040 / 42838 - 5337



Universität Hamburg  
DER FORSCHUNG | DER LEHRE | DER BILDUNG

In-kind contribution:

Dr. Clara Hoppe  
Alfred-Wegener-Institut  
Marine BioGeoScience  
Am Handelshafen 12  
27570 Bremerhaven  
E-Mail: [clara.hoppe@awi.de](mailto:clara.hoppe@awi.de)  
Tel.: 0471 / 4831-2096



ALFRED-WEGENER-INSTITUT  
HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR POLAR-  
UND MEERESFORSCHUNG

### Berichterstellung:

Dr. Niels Fuchs, Universität Hamburg  
Prof. Dr. Dirk Notz, Universität Hamburg

### Förderrichtlinie:

MARE:N – Polarforschung/MOSAiC

### Projektlaufzeit:

01.11.2020 – 31.12.2023

### Förderkennzeichen:

03F0867A



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

# 1 Projektübersicht

## Kurze Darstellung

Sonneneinstrahlung spielt eine zentrale Rolle für den Wärmehaushalt und das Ökosystem des arktischen Meereises. Neue, umfangreiche interdisziplinäre Messungen, die während der einjährigen Messkampagne MOSAiC (*Multidisciplinary drifting Observatory for the Study of Arctic Climate*) vom Forschungseisbrecher *FS Polarstern* 2019-2020 aufgezeichnet wurden, ermöglichten einen einmaligen Blick auf, in und unter das Eis, um Wechselwirkungen von Meereis, Ozean und Ökosystem besser verstehen zu können. Ziel von **NiceLAB**pro war es, den einzigartigen Datensatz und interdisziplinären Projektzusammenschluss zu nutzen, um den derzeitigen vorhandenen Kenntnisstand zu den Wechselwirkungen kritisch zu evaluieren und zu verbessern.

Der beobachtete Meereisrückgang verändert die Lichtbedingungen im arktischen Ozean durch die Zunahme an offenen Wasserflächen signifikant. Aber auch im Bereich der noch vorhandenen Eisbedeckung haben Änderungen in den Eiseigenschaften eine Auswirkung auf das Lichtfeld im Ozean. Dies ist vor allem für den Wärmehaushalt und das mit dem Eis verbundene Ökosystem von großer Bedeutung. So wird vermutet, dass die Lichtdurchlässigkeit von Eis bedingt durch den Klimawandel zunehmen wird. Das bisher vorhandene Verständnis zur Lichtdurchlässigkeit und den Wechselwirkungen beruhte aus Mangel an interdisziplinären Messungen im Eis über hinreichend lange Zeiträume und mit hinreichender vertikaler Auflösung jedoch auf stark vereinfachten Annahmen oder erschien über-komplex gelöst. Neu entwickelte autarke Messgeräte zur zeitlich und vertikal hochaufgelösten, nicht-destruktiven Messung des Lichtfeldes im Eis (*Lightharp* und *Lightchains*), die während der MOSAiC Kampagne parallel zu herkömmlichen Messungen der Lichttransmission eingesetzt wurden, schließen diese vorherige Lücke und ermöglichen damit einen einzigartigen Blick auf kleine Prozesse mit potentiell großer Auswirkung.

Durch die Zusammenführung aller vorhandener Messdaten und Erforschung der zugrundeliegenden Prozesse hat uns **NiceLAB**pro in die Lage versetzt, Lichttransmission durch das Eis in verschiedenen Klimaszenarien besser abschätzen, und somit den zukünftigen Wärmehaushalt und die Auswirkungen auf das Ökosystem besser projizieren zu können. Vorherige Studien hatten bereits gezeigt, dass sich die Wachstumsperioden von Algen unter und

im Eis durch den Klimawandel in der Arktis verschoben. Die enorme Schwachlichtsensitivität der eingesetzten Messgeräte sollte daher genutzt werden, um die Photosensitivität der Algen exakter als jemals zuvor bestimmen zu können, um daraus Schwellwerte für das Einsetzen der Algenblüten festzulegen.

Dafür haben wir im Rahmen des Projektes **NiceLAB**pro in einem Verbund aus Universität Hamburg und Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung Messdaten von neuartigen autarken Lichtmessbojen gemeinsam mit manuellen Probennahmen des Ökosystems im Vergleich zu vielen zur Verfügung stehenden Zeitreihen von physikalischen Randbedingungen während MOSAiC ausgewertet. Somit konnten wir neue, bedeutende Erkenntnisse erlangen für unser Verständnis von (I) der Photosensitivität des arktischen Ökosystems im Übergang von der Polarnacht zum Polartag, (II) dem Einfluss einzelner Schichtstrukturen im Eis auf die Lichttransmissivität und (III) den bedeutsamen Einfluss der Schneedecke auf die zeitliche Entwicklung der Lichttransmissivität des Eises und den Einfluss davon auf großskalige Modellierung.

Während der Projektlaufzeit konnten aufgrund der festen Integration der Projektpartner in der MOSAiC-Community zahlreiche weitere Forschungsprojekte und Datenanalysen unterstützt werden und es wurden neue internationale Kooperationen zur Erforschung der optischen und weiteren physikalischen Eiseigenschaften etabliert. Durch **NiceLAB**pro wurde das Mitwirken in mehreren durch MOSAiC entstandenen internationalen, interdisziplinären Fachgruppen ermöglicht. Roh- und vorprozessierte Messdaten von verschiedenen vertikal auflösenden autarken Messsystemen im Eis auf MOSAiC wurden aufbereitet, vereinheitlicht, in standardisierte Datenformate übertragen und der internationalen Forschungsgemeinschaft frei zur Verfügung gestellt.

## 2 Projektverlauf

### Eingehende Darstellung

**NiceLAB**pro bestand aus drei Arbeitspaketen, in denen die einzigartigen Messungen zur Meereisphysik und Meereisökologie von MOSAiC ausgeschöpft und insbesondere die neuartigen Strahlungsmessungen aus dem Eisinneren untersucht werden sollten. Grundlegende Ziele der einzelnen Pakete war es (I) aufgenommene Messwerte von MOSAiC in ein vereinheitlichtes Datenformat zu übertragen und mit Simulationen eines Meereismodells zu komplementieren, (II) optische Eiseigenschaften aus den Messdaten zu quantifizieren und Parametrisierungen daraus abzuleiten und (III) die Wechselwirkungen mit dem arktischen Ökosystem zu untersuchen und somit Erkenntnisse für die „Neue Arktis“ abzuleiten. Alle dafür notwendigen Arbeiten wurden von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter an der Universität Hamburg durchgeführt, und zeitweise von einer studentischen/ wissenschaftlichen Hilfskraft unterstützt.

Im Fokus der Auswertung lagen die Messsysteme *Lightharp* der Universität Hamburg (Messung der Ein- und Ausstrahlung in verschiedenen Tiefen im Eis), *OptiCALs* der Arctic University of Tromsø und Scottish Association of Marine Science (Messung der Ein- und Ausstrahlung in verschiedenen Tiefen unter dem Eis, ehemals *enviPOPE* genannt) und *Lightchains* des Alfred-Wegener-Instituts (Messung der Lichtintensität in verschiedenen Tiefen im Eis). Die *Lightharp* und *Lightchain* Rohdaten konnten durch die von **NiceLAB**pro zur Verfügung gestellten Ressourcen vollständig aufbereitet werden, während *OptiCAL* Messungen extern zur Verfügung gestellt wurden.

### 2.1 Durchführung der Arbeitspakete

#### 2.1.1 Verarbeitung der Messdaten (AP 1)

Ziel des ersten Arbeitspakets war es, den einzigartigen Bestand an während MOSAiC neu-gewonnenen Messdaten aus dem Eisinneren aufzubereiten und dem MOSAiC Konsortium sowie später der Allgemeinheit zur Verfügung zu stellen. Dafür wurden verarbeitete Messdaten verschiedener vertikal auflösender Messsysteme in das Datenprodukt MOSiP (MOSAiC Sea ice profile data) eingearbeitet, räumlich zusammengefasst und mit abgeleiteten physikalischen Randbedingungen ergänzt.

Während MOSAiC driftete *FS Polarstern* von Oktober 2019 bis Juli 2020 mit einer bestimmten Eisfläche entlang der Transpolaren Drift von nördlich der Laptewsee bis in den Bereich der Framstraße. Während dieser Zeit verformte sich diese Fläche aufgrund eisdynamischer Prozesse regelmäßig, was ein mehrmaliges Neu-lokalisieren des *Central Observatory* auf der Eisfläche nötig machte. Neben diesem Bereich der höchsten Messintensität aller manuellen interdisziplinären Messungen wurden zu Beginn der Kampagne einige Knotenpunkte für autonome Messsysteme auf einjährigem und mehrjährigem Meereis definiert, in denen zahlreiche Messbojen für eisphysikalische, atmosphärische, ozeanographische und biologische Messungen komplementär ausgebracht wurden. Diese Punkte lagen sowohl im Bereich der *Central Observatories*, als auch weiter entfernt im sogenannten *Distributed Network* (Rabe et al. 2024). Von besonderer Relevanz für **NiceLABpro** waren die Messgebiete *LM-site*, *L3-site* und mehrere im *Central Observatory* gelegene Bereiche aufgrund dort ausgebrachter optischer Messsysteme. Die Messsysteme der Universität Hamburg (*Saltharp* und *Lightharp*) waren in der *LM-site* ausgebracht, die gleichzeitig die sogenannte *SYI dark coring site* war. Ein Bereich zur manuellen Probennahme von Eiskernen aus zweijährigen Eis (SYI) ohne Lichtbeeinflussung im Winter durch *FS Polarstern* oder andere künstliche Lichtquellen. Das Messgebiet *LM-site* und die dort ausgebrachten optischen Messsysteme *Lightharp*, *Lightchain* und *OptiCAL* lagen daher im besonderen Fokus des Projekts **NiceLABpro** (Abbildung 1).

### 2.1.1.1 *Aufbereitung der Messdaten*

Zu Projektbeginn waren alle für das Datenprodukt notwendigen Messdaten nur als Rohdaten verfügbar. Diese Rohmessdaten der verschiedenen Messsysteme und Probennahmen während MOSAiC wurden durch die jeweiligen Daten-PIs bearbeitet, auf Qualität geprüft und anschließend zumeist intern dem MOSAiC Konsortium zur Verfügung gestellt und später zum *Public Release* entsprechend der *MOSAiC Data policy* veröffentlicht. Als Daten-PI haben wir diese initiale Datenverarbeitung für die *Saltharp* und *Lightharp* Messsysteme durchgeführt und umfangreich dokumentiert (Fuchs et al. 2023c&d).

Zu dieser ersten Aufbereitung der Messdaten gehörte für die Lichtmesssysteme auch eine umfangreiche Kalibration, um sowohl Unterschiede zwischen den einzelnen Sensoren zu korrigieren als auch um die gemessenen *digital counts* in Werte absoluter Einstrahlung zu konvertieren, um diese mit anderen Messsystemen vergleichbar zu machen. Für das *Lightharp* Messsystem war eine *post-deployment* Kalibration vorgesehen, die jedoch nicht durchgeführt

werden konnte, da das System zum Kampagnenende nicht geborgen wurde und damit verloren ging. Wir haben daher Verfahren entwickelt, um mit - aus logistischen Gründen beschränkten - Messungen vor dem Start der Kampagne und während der Kampagne eine umfangreiche Kalibration der *Lightharp* zu ermöglichen, die Unterschiede zwischen den Sensoren korrigiert und eine Ableitung absoluter Intensitäten in den drei Farbbändern Rot, Grün und Blau ermöglicht. Auf ähnliche Weise wurden Sensitivitäts-Unterschiede zwischen Sensoren entlang der *Lightchains* korrigiert.

Die Anordnung und Ausrichtung der *Lightharp* Sensoren ermöglicht neben der Messung von auf- und abwärts gerichteter Strahlung im Eis und deren Abschwächungskoeffizienten auch die Ermittlung von optischen Eigenschaften in den Schichten zwischen den Sensoren. Das grundlegende Model dafür war zu Projektbeginn bereits konzipiert, wurde jedoch im Zuge von **NiceLAB**pro weiterentwickelt und optimiert. Es dient zur erstmalig möglichen Ableitung der *apparent optical properties* Reflektivität, Transmissivität und Absorptionsvermögen von sieben horizontalen Schichten im Eis aus kontinuierlich aufgezeichneten Messungen. Vorübergehende Fehlwerte in diesem Budget, die durch ein teilweises negatives Absorptionsvermögen offensichtlich wurden, deuten jedoch auf eine bisher nicht vollständig verstandene tiefenabhängige Richtungsabhängigkeit der transmittierten Sonneneinstrahlung im Eis hin, die weiterhin Bestand aktueller Forschungsprojekte ist (z.B., Larouche et al. 2023).

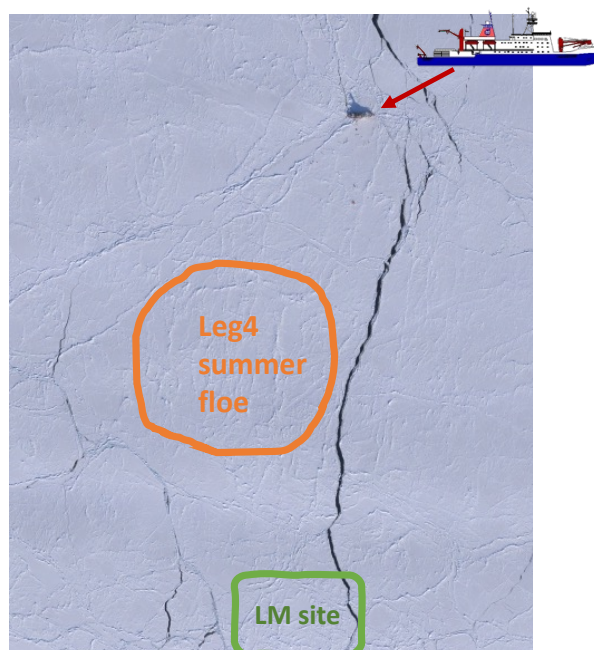


Abbildung 1: Orthomosaic des MOSAic Messgebiets mit FS Polarstern, der späteren Sommerscholle (Leg 4) und der LM-site.

Aufgrund von substantziellen, langandauernden Systemausfällen wurden die Daten der *Saltharps* nicht weitergehend analysiert. Die Rohdaten wurden jedoch zur Verfügung gestellt (Fuchs et al. 2023c) und Routinen zur Ableitung von eisphysikalischen Eigenschaften aus den kurzen, validen Messdaten von Temperatur und elektrischer Leitfähigkeit im Eis vorbereitet (Abbildung 2).

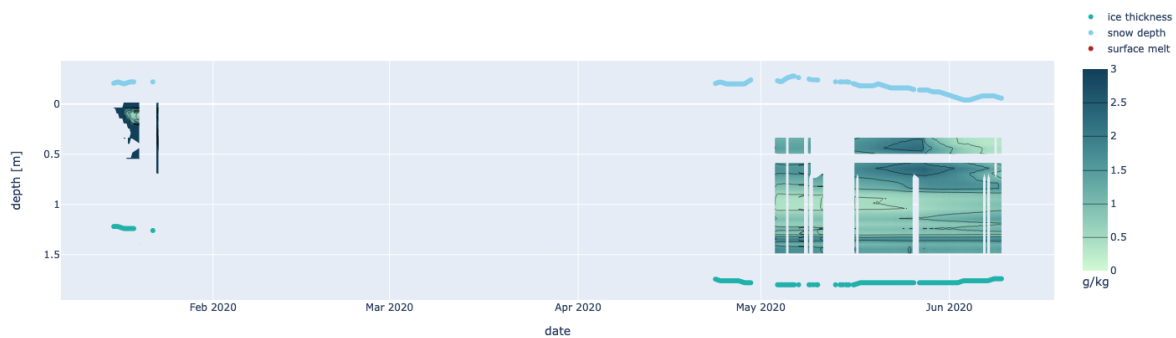


Abbildung 2: Ausgewertete Saltharp-Daten, die große Lücken durch Systemausfälle offensichtlich machen. Der Zeitraum der Abwesenheit von FS Polarstern aus dem Gebiet im Mai/Juni ist jedoch teilweise abgedeckt.

### 2.1.1.2 Zusammenführen der Messdaten

Für eine vereinfachte, vereinheitlichte und vergleichbare Auswertung der Profil Messungen haben wir die qualitätsgeprüften Messdaten anschließend in das neu geschaffene Datenprodukt MOSiP integriert. Die verschiedenen Messbojen wurden dafür nach Messbereich gruppiert und mit für die verschiedenen Bereiche abgeleiteten Randbedingungen ergänzt. Dazu gehörten: Ort, Zeit, Eisdicke, Schneedicke und Temperaturzeitreihen.

Nach dem Ausbringen der Messbojen zu Beginn der Kampagne froren diese im Eis ein. Die vertikale Position der Sensoren wurde zum Zeitpunkt des Ausbringens gemessen und definierte dann bis zum Einsetzen der Oberflächenschmelze des Eises im Sommer die Vertikalkoordinate der Messung (*depth*). Durch das Wegschmelzen der Oberfläche verschieben sich jedoch die Tiefen der Sensoren im Eis, was zu einer Ungültigkeit der ehemaligen Vertikalkoordinate führt, und obendrein die Vergleichbarkeit mit Eiskernen einschränkt, da diese stets relativ zur Eisoberseite referenziert werden. Daher wurde für jeden Messbereich, oder wenn möglich sogar für jedes Messsystem einzeln eine variable Vertikalkoordinate (*ice depth*) berechnet, die das Abschmelzen der Oberfläche korrigiert und stets die momentane Tiefe der Sensoren im Eis widerspiegelt.

Die Messdaten verschiedener Messsysteme wurden von den Daten-PIs zumeist in verschiedenen Text-Datenformaten (z.B. .csv) zur Verfügung gestellt. Zur Vereinfachung der Nutzbarkeit wurden diese in MOSiP in das sehr anwendungsfreundliche, standardisierte Format NetCDF übertragen. Dabei wurden die Vorgaben der *CF-Conventions* befolgt und die Daten als *Profil-Trajektorie* inklusive zahlreicher Meta-Informationen abgelegt (Abbildung 3).

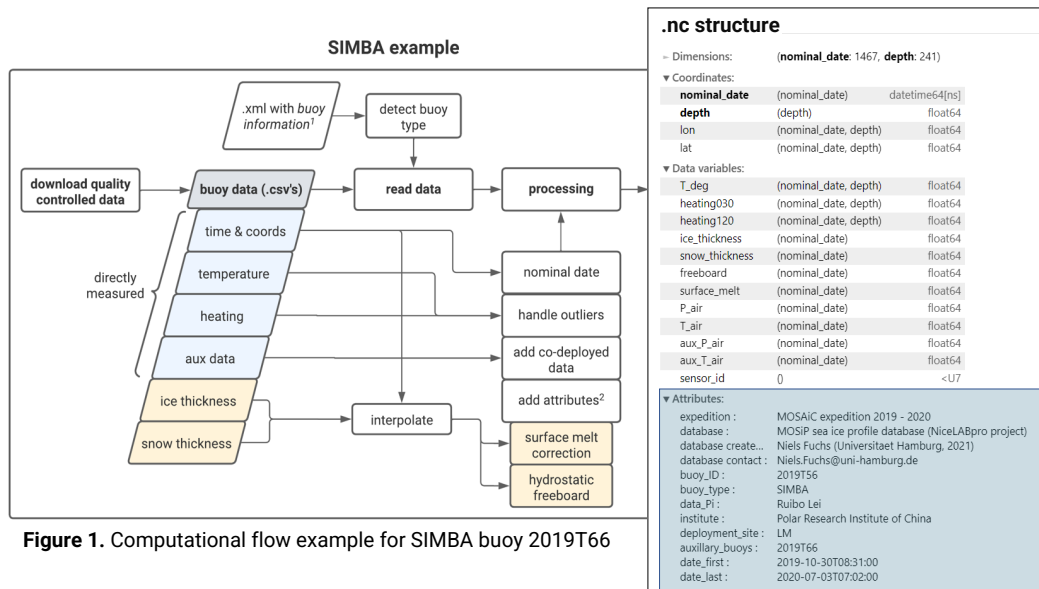


Figure 1. Computational flow example for SIMBA buoy 2019T66

Abbildung 3: Workflow-Diagramm und Beispiel Meta-Daten Information der SIMBA Boje 2019T66 im zusammengestellten MOSiP Datensatz (Kagel et al. 2023).

Zur schnellen und einfachen Visualisierung der Daten wurde ein Dashboard erstellt, das bis zum *Public Release* der MOSAiC Daten unter <http://mosip-dashboard.mosaic-data.org/> für das MOSAiC Konsortium zur Verfügung stand. Aufgrund der zwischenzeitlichen Fortschritte zur Datenvisualisierung im BMBF MARE:N Partnerprojekt *M-VRE* des Alfred-Wegener-Instituts wurde das Dashboard nicht mehr fortgeführt.

Alle MOSiP Datenprodukte zu Lichtmessungen direkt aus dem Eis, aufgenommen mit der *Lightharp* und den *Lightchains* (Alfred-Wegener-Institut) wurden auf PANGAEA zur freien Verwendung zur Verfügung gestellt (Fuchs et al. 2023e) und die Methoden in *Nature Scientific Data* publiziert (Fuchs et al. *accepted*). Die dafür verwendeten Konvertierungsprogramme wurden frei zugänglich als Python-Codes auf GitHub abgelegt ([https://github.com/nielsfuchs/MOSAiC\\_inicelight/](https://github.com/nielsfuchs/MOSAiC_inicelight/)), um eine Reproduzierbarkeit der Datenverarbeitung zu gewährleisten.

### 2.1.1.3 Meereismodellierung

Das eindimensionale, hochauflösende Meereismodell SAMSIM ist in der Lage, thermodynamische Prozessen im Eis mit hoher physikalischer Konsistenz zu simulieren. Mittels dieses Modells konnten im Rahmen von **NiceLABpro** sowohl die Plausibilität der Beobachtungsdaten geprüft als auch Lücken in den Beobachtungszeitreihen gefüllt werden. Außerdem konnten Beträge und Auswirkungen von kleinskaligen Prozessen im Eis und deren Wechselwirkung mit noch wenig verstandenen Prozessen wie Lichttransmission näher untersucht werden.

Um die Bedingungen des Eises im Bereich der MOSAiC Messkampagne simulieren zu können, mussten entsprechend Zeitreihen von atmosphärischen und ozeanographischen Randbedingungen und Initialisierungen des Eises für die Modellläufe vorbereitet werden. Es wurden dabei drei verschiedene Szenarien berücksichtigt (Abbildung 5): (I) Initialisierung des Modells mit einem Spinup-Run, in dem das Model im Januar 2019 in offenen Wasser beginnt Eis zu bilden und dann ab Beginn von MOSAiC mit diesem dann zweijährigen Eis weiterrechnet, (II) Initialisierung mit Temperatur und Salzgehalt Daten aus Eiskernen die zu Kampagnenbeginn gemessen wurden und (III) Initialisierung mit Eiskern Daten im Mai 2020 zur unmittelbaren Vergleichbarkeit der Schmelz-Periode mit Beobachtungsdaten. Über den gesamten Zeitraum der MOSAiC Messkampagne wurden Randbedingungen aus Messdaten kompiliert und Datenlücken, z.B. während der Abwesenheit von *FS Polarstern* im Mai/Juni 2020 mit ERA-5 Re-Analyse-Daten ergänzt (Abbildung 4).

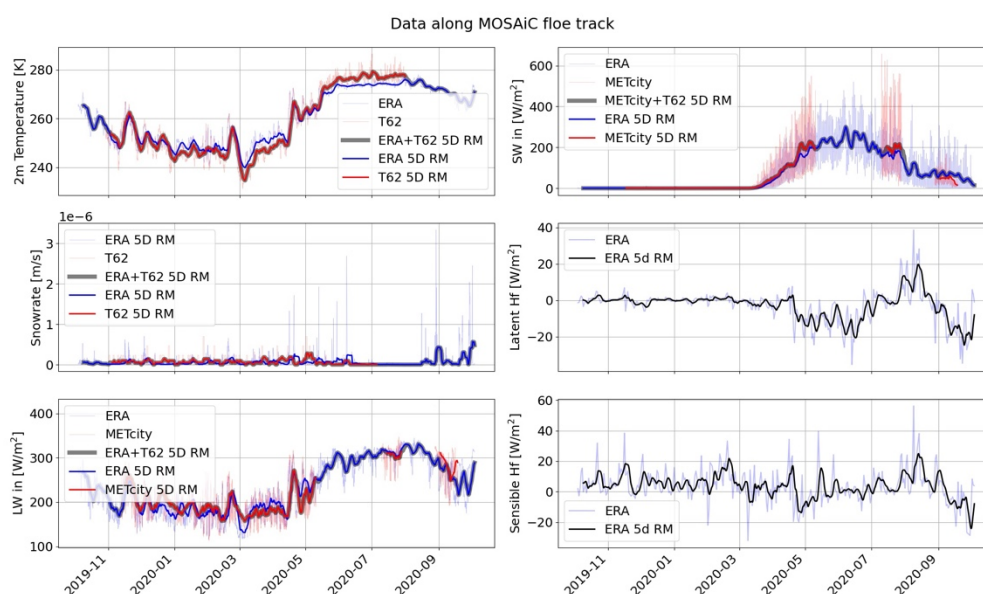


Abbildung 4: Zusammengestellte Meteorologische Messungen (Pirazzini et al. 2022) und ERA-5 Daten (Hersbach et al. 2017) als Antrieb für SAMSIM Eismodell-Simulationen (Fuchs et al. 2022b).

Für das Spinup-Szenario wurden die Randbedingungen von Januar bis September 2019 entlang der zurückverfolgten, vermuteten Drifttrajektorie des Eises (Krumpen et al. 2020) aus Reanalyse Daten extrahiert. Leichte Variationen in der Schneebedeckung und dem ozeanographischen Wärmefluss wurden entsprechend der Modellphysik zur Angleichung der Simulation an die beobachteten Eisdicken verwendet. Es wurden darüber hinaus Simulationen für einjähriges und zweijähriges Eis erstellt. Zur langfristigen Vereinheitlichung der verwendeten Randbedingungen innerhalb der MOSAiC Community wurde die Single-Column-Model Arbeitsgruppe mitbegründet.

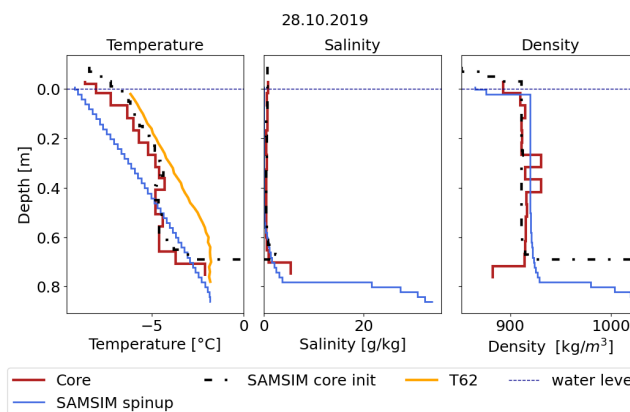


Abbildung 5: Vergleich von Modellsimulationen mit Eiskern- und SIMBA Bojendaten (Lei et al. 2022). SAMSIM Modellsimulationen wurden mit Reanalyse Daten entlang des zurückverfolgten Driftwegs des MOSAiC Eisgebiets ab 01 Jan 2019 berechnet (Spinup) oder mit Eiskerndaten zu Beginn der Kampagne initialisiert (core init).

## 2.1.2 Lichttransmission im Eis (AP 2)

Die optischen Eigenschaften der Meereisbedeckung bestimmen, wieviel der einfallenden Sonneneinstrahlung reflektiert, wieviel absorbiert und wieviel in den darunter liegenden Ozean transmittiert wird. Damit haben die optischen Eigenschaften einen entscheidenden Einfluss auf die Oberflächenenergiebilanz und das Ökosystem unterm Eis. Die damit verknüpften Prozesse werden in derzeitigen Klimamodellen unterschiedlich komplex aufgelöst, entweder durch unmittelbare Parametrisierung der Oberflächenreflektivität (Albedo) und einer exponentiell angenommenen Lichtabschwächung im Eis ohne dabei die optischen Eigenschaften und deren Wechselwirkungen mit physikalischen Eiseigenschaften aufzulösen oder deutlich komplexer anhand des zum Beispiel im Meereis-Model CICE implementierten delta-Eddington Strahlungstransfermodells. Beide Verfahren wurden entwickelt mit stark vereinfachten Vergleichsmessungen oder Messungen an entnommenen Meereisproben, aufgrund fehlender, vertikal auflösender Messwerte direkt aus dem Eis. *Lightchain* und *Lightharp* wurden gezielt

dafür entwickelt, solche bisher weitestgehend fehlenden Messwerte aufzuzeichnen. Die erhobenen Messdaten aus MOSAiC, in Kombination mit weiteren Strahlungsstationen über und unter dem Eis erlauben einzigartige Einblicke in das Lichtfeld im Eis, strahlungsrelevante Strukturen im Eis und den quantitativen Einfluss der verschiedenen Meereissystem-Komponenten Schnee und Eis auf den Strahlungstransfer. Um diese Punkte besser beleuchten zu können, und damit Grundlagen für optische Parametrisierungen in Modellen zu legen, wurde der ursprünglich geplante Schwerpunkt dieses Arbeitspakets von der Formulierung einer neuen, semi-komplexen Parametrisierung hin zu einem besseren Verständnis und Evaluation der beobachteten Prozesse gelegt. Im Folgenden sind die bisherigen Erkenntnisse in Unterkapiteln zusammengefasst.

### 2.1.2.1 *Reflektivität, Transmissivität und Absorption im Eis*

Herkömmliche nicht invasive Messmethoden der Lichtdurchlässigkeit des Eises beruhen auf dem Vergleich der gemessenen absoluten Bestrahlungsstärke über und unter dem Eis. Aus der Information über die totale Eisdicke dazwischen (Schnee und Eis) wird ein exponentieller Abschwächungskoeffizient abgeleitet. Dieser lässt keinerlei Rückschlüsse auf die individuelle Durchlässigkeit der einzelnen Komponenten oder auf vertikale Unterschiede im Eis zu. Die *Lightchain* wurde entwickelt, um diesen Abschwächungskoeffizienten vertikal in 5 cm Schritten über einen großen vertikalen Bereich aufzulösen, der sich von oberhalb des Schnees bis ins Wasser erstreckt. Da der Abschwächungskoeffizient jedoch nicht ausreicht, um die optischen Prozesse Reflektion, Transmission und Absorption zu unterscheiden, wurde die *Lightharp* mit auf- und abwärtsgerichteten Sensoren entwickelt, die mithilfe eines neu entwickelten Strahlungs-Modells unter der Annahme horizontaler Homogenität in der Lage sind, für sieben Schichten im Eis zusätzlich zum Abschwächungskoeffizient genau diese Prozesse zu unterteilen (Abbildung 6).

Die Profilmessungen des Abschwächungskoeffizienten auf MOSAiC von *Lightchain* und *Lightharp* ergaben ein für Meereis grundlegend übliches Verhalten: eine starke Lichtabnahme in den oberen 10-30 cm, darunter eine log-lineare Abschwächung entsprechend dem Bouguer-Lambert-Beerschen Gesetz und an der Eisunterseite eine weitere verstärkte Abschwächung durch einen Photonenfluss in den wenig reflektierenden Ozean. Diese von Katlein et al. (2021) formulierte grundsätzliche Beschreibung konnte auf MOSAiC durch die Messungen der untersten Sensoren der *Lightharp* bestätigt werden. Vorherige Messungen mit beiden Geräten wurden nur in erstjährigem Eis durchgeführt. Die auf MOSAiC an der *LM-site* in zweijährigem Eis

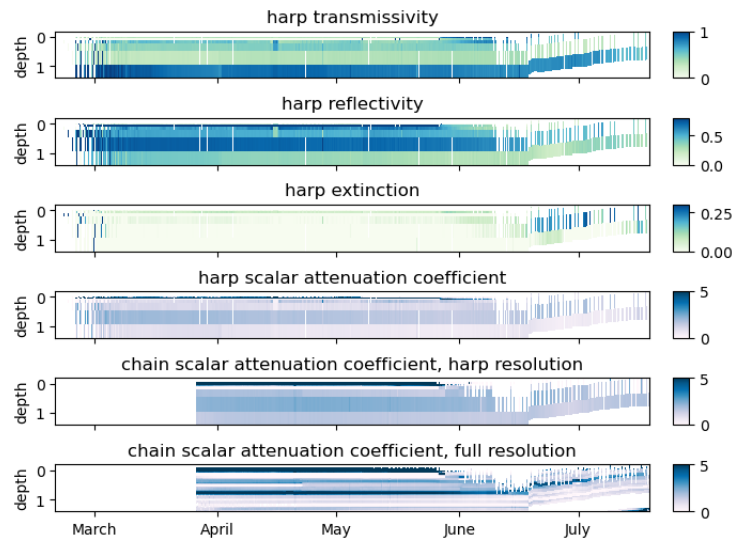


Abbildung 6: Apparent optical properties des Meereises an der MOSAiC LM-site gemessen und abgeleitet aus Lightharp und Lightchain Daten.

eingesetzten Geräte ermöglichten daher erstmalig auch einen deutlich erweiterten Blick in die optischen Eigenschaften dieses neben einjährigem Eis vorherrschenden Eistyps in der Arktis. Es entsteht, wenn das im Winter gewachsene Eis die Schmelzperiode im Sommer überdauert und sich dann im nächsten Winter an der Unterseite neues Eis bildet. Der Einfluss dieser neuen Eisbildung auf die optischen Eigenschaften war bisher unerforscht. Die gemessenen Intensitätsprofile zeigen eine deutliche Lichtabschwächung in der entsprechenden Übergangstiefe von ca. 80 cm. Mithilfe der neuen *Lightharp* Messverfahren kann diese Abschwächung vollständig einer stark erhöhten Reflektivität des Eises an der Grenzfläche zugeordnet werden. Zur Überprüfung dieser Messungen im Eis wurden Bilder von an der *LM-site* genommenen Eiskernsegmenten zusammengefügt und mit Eiskernen aus einjährigem Eis verglichen. Die Messungen spiegeln sich in den *LM-site* Kernen optisch deutlich wider (Abbildung 7). Zum besseren Verständnis der Eisstruktur und der dahinter liegenden Prozesse wurde eine Kooperation mit Dr. M. Oggier (University of Alaska, Fairbanks), Dr. B. Light (University of Washington) und Dr. M. Smith (Woods Hole Oceanographic Institution) initiiert, die sowohl *Dick- und Dünnschnitte* der Eiskerne erstellen, um die Kristallstruktur aufzulösen, als auch hochauflösende optische Labormessungen an den Eiskernproben durchführen. Diese Arbeiten mit Beteiligten aus dem MOSAiC Konsortium wurden durch **NiceLAB**pro unterstützt. Zum Projektende befand sich die Auswertung der erhobenen Daten durch die Kooperationspartner noch in Arbeit, die vielversprechende Synthese der Datenprodukte wird daher in Nachfolgeprojekten durchgeführt.

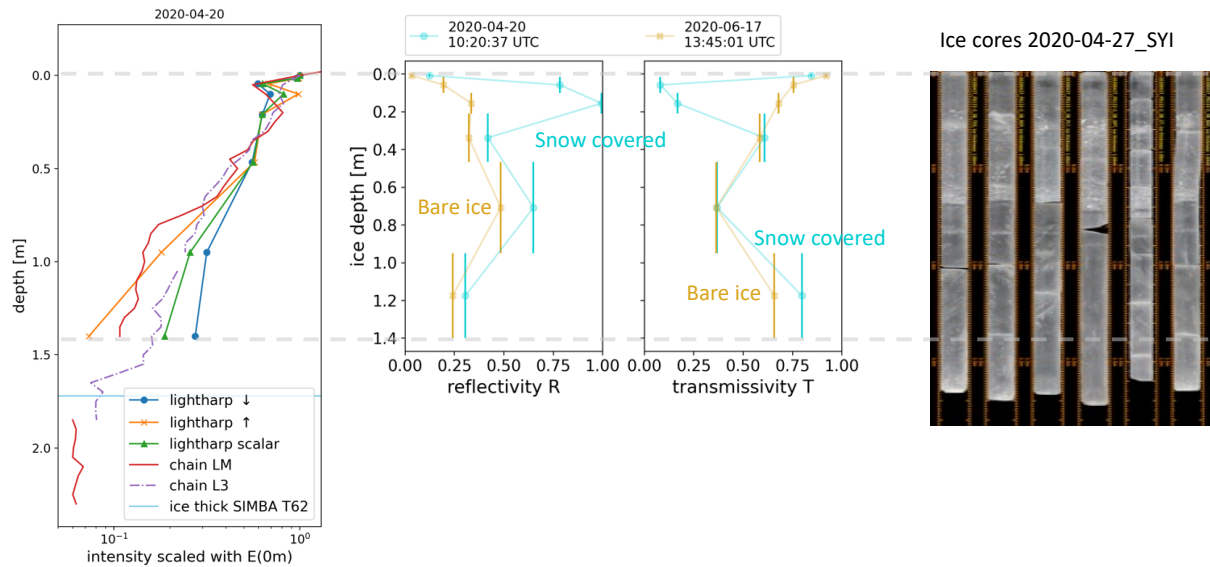


Abbildung 7: Beobachtungsdaten der stark reflektierenden Schichten im zweijährigen Eis an der MOSAiC LM-site. Vergleich von Messdaten aus dem Eis gesammelt und abgeleitet aus Lightharp und Lightchain im Vergleich zu zusammengesetzten Bildern von Eiskernen (Fuchs et al. 2023b).

### 2.1.2.2 Einfluss des Schnees

Schnee reflektiert Licht stärker als Meereis. Zuvor ermittelte Abschwächungskoeffizienten beider Schichten zwischen Atmosphäre und Ozean lagen für Eis meist im Bereich von  $1\text{-}2\text{ m}^{-1}$  und für Schnee bei  $10\text{-}35\text{ m}^{-1}$ . Diese wurden jedoch meist destruktiv bestimmt, zum Beispiel durch das Freiräumen der Eisoberfläche von Schnee. Eine unmittelbare in situ Messung von dauerhaft installierten Sensoren und damit über eine lange Zeitdauer ist uns nicht bekannt. An der LM-site auf MOSAiC wurde die solare Bestrahlungsstärke über dem Schnee von der Strahlungsmessstation 2020R11 des Alfred-Wegener-Institut gemessen (Nicolaus et al. 2024). An der Eisoberseite (am Übergang von Schnee zu Eis), als auch nah an der Unterseite hat die Lightharp die Bestrahlungsstärke erfasst. Die Verknüpfung dieser Messzeitreihen ermöglicht somit erstmals, die realen Anteile an der Lichtabschwächung beider Schichten zu bestimmen. Wir konnten ermitteln, dass bis zum Einsetzen der Schneeschmelze Ende Mai die Schneeschicht auf dem Eis zu 99% zur gesamten vertikalen Lichtabschwächung beigetragen hat (Abbildung 8). Dies ist ein extrem relevantes, überraschendes Ergebnis, da die Schneeschicht lediglich 20 cm bis 25 cm dick war und das Eis darunter bis zu 1,8 m. Die starke Abschwächung des Lichtfeldes im Schnee wird sowohl bedingt durch die hohe Reflektivität des Schnees als auch durch die Position über dem Eis und der exponentiellen Abschwächungskurve. Die Messung verdeutlicht den Einfluss des Schnees auf die Lichtdurchlässigkeit der Meereisbedeckung, auch in Parametrisierungsverfahren für

Klimamodelle, da bis zum Einsetzen der Schneeschmelze je nach Gebiet im Mai/Juni bereits fast die Hälfte der gesamten jährlichen Sonneneinstrahlung erreicht sein können.

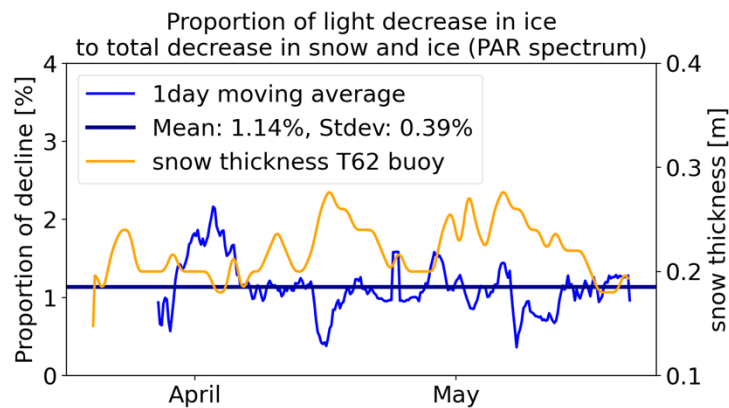


Abbildung 8: Beitrag des Meereises zur gesamten Lichtabschwächung in Schnee und Eis im Frühjahr 2020 auf MOSAiC und die beobachtete Schneedicke (Fuchs et al. 2022b).

### 2.1.2.3 Aufteilung der Strahlungsflusses im Eis

Die Kombination mehrerer Strahlungsstationen an der *LM-site* ermöglichte auch eine noch genauere Abschätzung, wie sich die einfallende Solar-Strahlung im Transfer durch die Schnee- und Eisschicht aufteilt und wie die aus den Messungen abgeleiteten *apparent optical properties* der Komponenten dazu beitragen. Am Beispiel des 20. Aprils zeigt sich, dass im Bereich grünen Licht die Oberfläche eine Albedo von 89% hatte (Abbildung 9). Die 24cm dicke Schneeschicht hat 14% des in die Schicht eingedrungenen Lichts absorbiert, 88% reflektiert und weniger als 2% transmittiert. Davon wurden im Eis  $\frac{3}{4}$  reflektiert und  $\frac{1}{4}$  transmittiert (die negative Absorption wurde zuvor in Arbeitspaket 1 beschrieben). Rund 0.6% der Solarstrahlung wurden durch die gesamte Schnee- und Eisschicht transmittiert und haben den darunter liegenden Ozean erreicht.

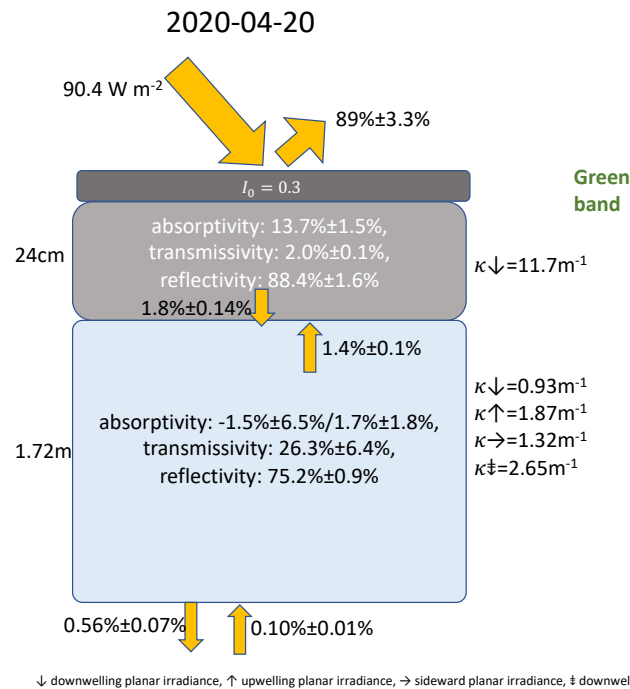


Abbildung 9: Aufteilung der einfallenden Solarstrahlung im Schnee und Eis abgeleitet aus Messdaten an der MOSAiC LM-site von Lightharp und Strahlungsstation 2020R11 (Nicolaus et al. 2024) und daraus bestimmte optische Eigenschaften der Schnee und Eisschicht (Fuchs et al. 2023a).

### 2.1.3 Wechselwirkungen mit dem Ökosystem (AP 3)

Das arktische Meereis bildet einen einzigartigen Lebensraum für hochspezialisierte Arten. Dabei sind deren Lebensweise und Anpassungsstrategien und damit auch der Fortbestand unter den raschen klimatischen Änderungen bisher wenig verstanden. Dies betrifft insbesondere Arten, die zur Primärproduktion im Eis und Ozean darunter beitragen, und damit die Basis der Nahrungskette bilden (Hoppe et al., 2022, Fuchs et al., 2022a). Ihr Wachstum wird grundlegend von zwei Einflussfaktoren gesteuert: der Verfügbarkeit von Nährstoffen und der Stärke der Sonneneinstrahlung. Beide Faktoren sollten durch MOSAiC besser verstanden werden und wurden daher anschließend in zwei parallelen Projekten bearbeitet: die Nährstoffverfügbarkeit durch das BMBF MARE:N Partnerprojekt *NuArctic* und die Lichtverfügbarkeit in **NiceLAB**pro im dritten Arbeitspaket.

Die interdisziplinär erhobenen Daten von MOSAiC erlauben einen einzigartigen Blick auf die Wechselwirkung von Sonneneinstrahlung und Primärproduktion, wobei der Schwerpunkt der durchgeführten Analyse vor allem darin bestand, die Photophysiologie der Algen besser zu verstehen um damit die minimale Sonneneinstrahlung unter dem Eis, die für Photosynthese notwendig ist, genauer festzulegen. Da sich die Eisbedeckung der Arktis bereits jetzt und auch in der Zukunft weiter sowohl in Ausdehnung, Dicke und Saisonalität stark ändern wird, ist dies

einer der essenziellen Variablen um Primärproduktion im zukünftigen Arktischen Ozean besser abschätzen und simulieren zu können. Die optischen Messdaten mussten wie im Folgenden beschrieben vorbereitet und prozessiert werden, um sie mit den von Dr. Clara Hoppe vom Alfred-Wegener-Institut bearbeiteten biologischen Daten zu Produktivitätsraten, Chl-a Konzentration und Zell-Anzahl vergleichen zu können.

### 2.1.3.1 Ableitung von PAR

Elektromagnetische Strahlung innerhalb des Wellenlängenbereich von sichtbarem Licht kann von Organismen besonders effizient für Photosynthese genutzt werden. Strahlung im Bereich zwischen 400 nm und 700 nm wird daher als *photosynthetically active radiation* (PAR) bezeichnet. Die auf der *Lightharp* eingesetzten und absolut kalibrierten (Bestrahlungsstärke  $W m^{-2}$ ) Sensoren in den Farbkanälen Rot, Grün und Blau decken einen Großteil des PAR Spektrums ab (Abbildung 10).

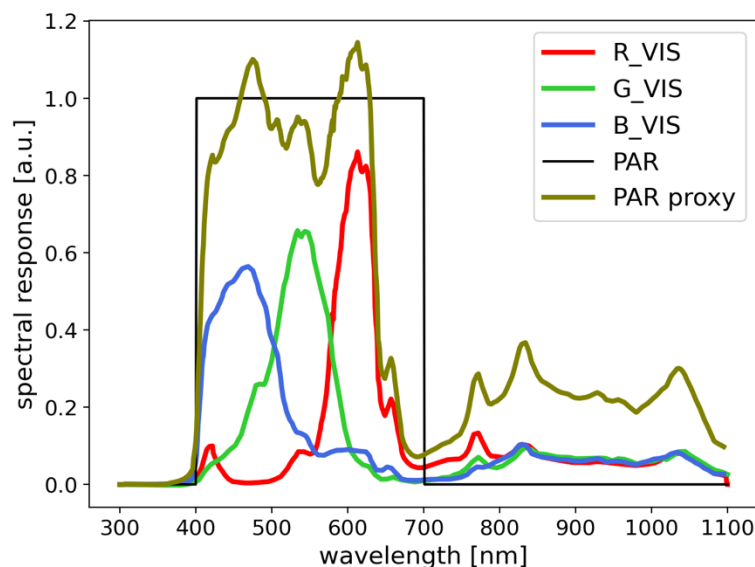


Abbildung 10: Relative spectral response - Funktionen der absolute kalibrierten *Lightharp* Farbkanäle Rot, Grün und Blau, das PAR Spektrum und die angenäherte linearkombination als PAR Proxy.

Wir haben daher eine Linearkombination der Messwerte zur Ableitung der PAR-Bestrahlungsstärke entwickelt, um PAR im Eis und mit dem unteren *Lightharp* Sensor im Frühjahr auch an der Eisunterseite bestimmen zu können (durch das Eiswachstum lag dieser Sensor später im Eis). Desweiteren haben wir eine Umwandlung der Daten zum in der Biologie häufiger verwendeten PAR-Photonen Fluss entwickelt. Die mittlere Abweichung der erhaltenen PAR-Messwerte lag im Vergleich zu einem als Referenzsensor verwendeten RAMSES VIS-ACC Spektroradiometer des Alfred-Wegener-Instituts (Strahlungsmessboje 2020R11) bei etwa 12 %

(Abbildung 11), wobei ein Großteil davon durch die nicht vollständige Abdeckung des PAR Spektrums im langwelligen Bereich erklärt werden kann.

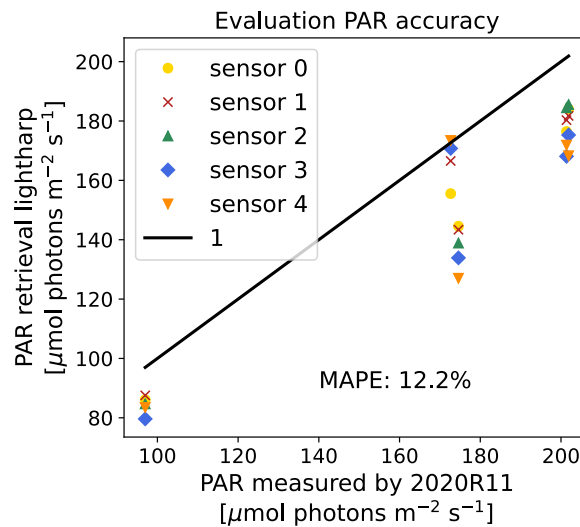


Abbildung 11: Genauigkeitsmessung der abgeleiteten PAR Werte aus Lightharp Messungen mit Referenzmessungen mit der Strahlungsboje 2020R11 (aus Fuchs et al., 2024a).

Wir gehen davon aus, dass sich dieser Fehler durch die Absorption langwelliger Strahlung unter Wasser verringert. Schartmüller et al. (2023) haben ihre unterm Eis eingesetzten *OptiCAL* Messsensoren in einem von unserem komplett unabhängigen Verfahren kalibriert. Der Vergleich beider nebeneinander ausgebrachten Systeme zeigt keinerlei Unterschiede (Abbildung 12).

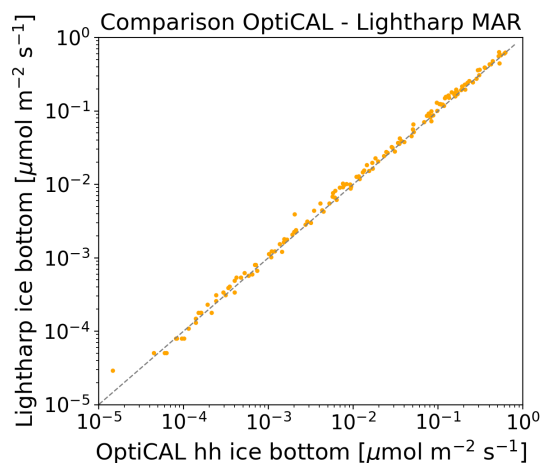


Abbildung 12: Vergleich der abgeleiteten PAR Bestrahlungsstärken aus Lightharp und OptiCAL Messungen an der Eisunterseite der LM-site im März 2020 (Fuchs et al, 2024b).

### 2.1.3.2 Messung von Schwachlichtbedingungen

Besonders aus dem Winter und frühen Frühjahr sind Messdaten aus der zentralen Arktis aufgrund der Abgeschlossenheit rar und somit die Lichtbedingungen und ökologischen Prozesse unter dem Eis wenig erforscht. Sowohl die Lichtsensoren der *Lightharp* als auch die unter dem Eis im Ozean messenden *OptiCALs* (1m-50m Tiefe) waren besonders für Schwachlichtbedingungen optimiert, damit zusammen mit den durch MOSAiC möglichen biologischen Messungen neue Erkenntnisse zur Photosensitivität und Akklimation des Phytoplanktons gesammelt werden können. Die *Lightharp* der Universität Hamburg (und Max-Planck-Instituts für Meteorologie, Hamburg) hat dabei besondere Stärken erwiesen. So konnte bereits am 24. Februar PAR Strahlung an der Schnee-Eis Grenzfläche detektiert werden ( $3 \cdot 10^{-5} \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) und vier Tage später, während die Sonne zur Mittagszeit noch tief unterm Horizont stand (Abbildung 13), bereits die erste PAR Strahlung an der Eisunterseite ( $1 \cdot 10^{-4} \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (Abbildung 14).

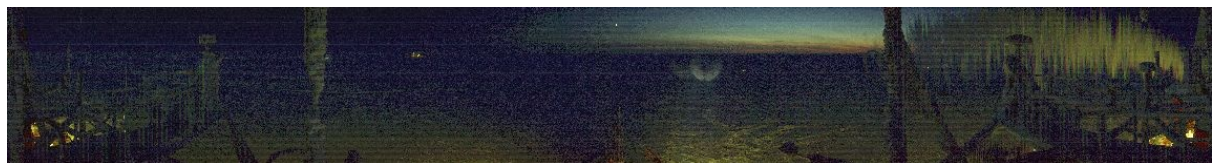


Abbildung 13: Panorama Foto aus dem FS Polarstern Mast aufgenommen von der PANOMAX Kamera am 28 Feb 2020 zum Sonnenhöchststand (Nicolaus et al. 2021).

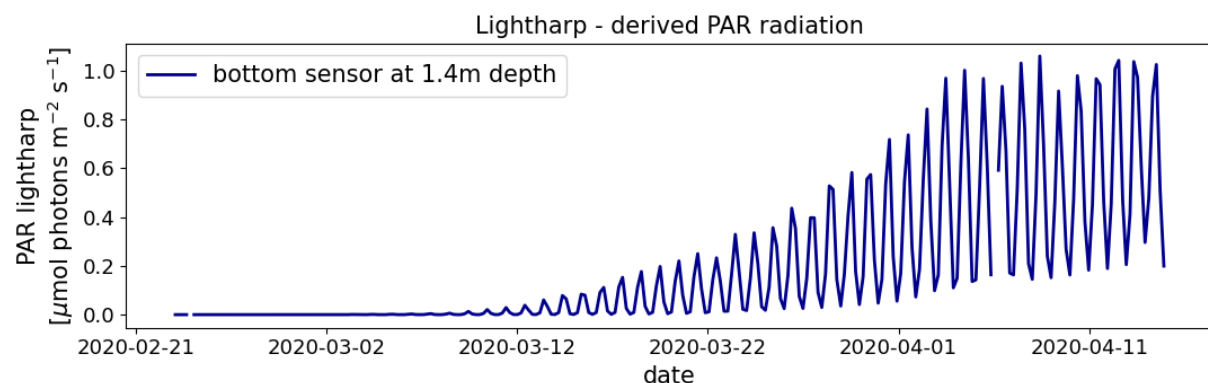


Abbildung 14: PAR Bestrahlungsstärke an der Eisunterseite gemessen von der *Lightharp*. Die erste Messung  $>0$  wurde am 28 Feb 2020 aufgezeichnet.

Ein hervorzuhebendes Ergebnis ist dabei auch die Detektion der Vollmondphase Anfang Februar bis in 50cm Eistiefe unter einer Schneedecke von 20-30cm im breitbandig Farbkanal  $\text{NIR}_C$  der *Lightharp* (Abbildung 15). Die Größenordnung der detektierten Bestrahlungsstärke lag bei etwa  $10 \mu\text{W m}^{-2}$ .

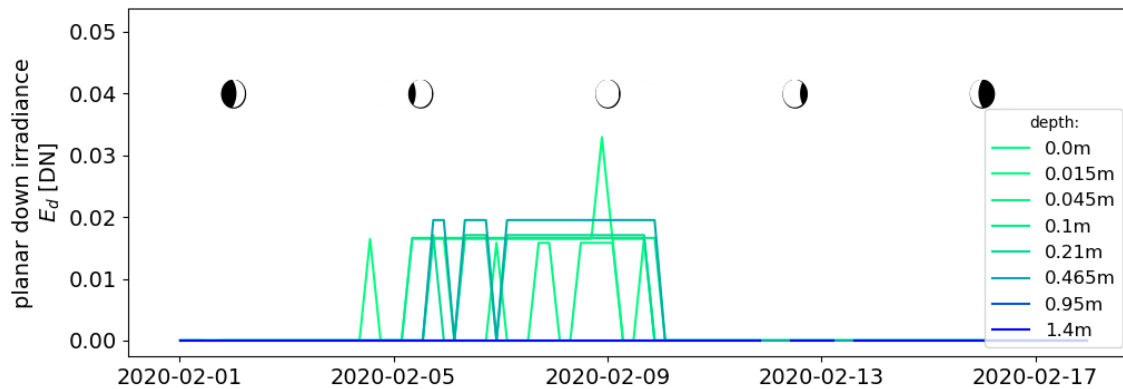


Abbildung 15: Mondphase und Lichtmessungen im Eis im breitbandigsten Farbkanal der Lightharp in verschiedenen Eistiefen im Februar 2020 auf MOSAiC (Fuchs et al. 2023a).

Studien, die auf diese wirklich einzigartigen Messungen unter absoluten Schwachlichtbedingungen zurückgreifen, waren zu Projektende von **NiceLABpro** noch nicht weit fortgeschritten, da entsprechende sensitive Auswertungen von biologischen Proben noch nicht abgeschlossen waren.

### 2.1.3.3 PAR Lichtfeld unter dem Eis

Für die Bestimmung der Photosensitivität der Algen im und unter dem Eis lag der Übergang von der Polarnacht zum Polartag im Februar bis April im besonderen Fokus. Während dieser Zeit konnte eine starke Zunahme von Primärproduktion in der durchmischten Schicht im Ozean direkt unter dem Eis (0m bis 50m Tiefe) beobachtet werden. Teil des Projektes **NiceLABpro** war es daher, eine Zeitreihe der maximal-erwartbaren mittleren Bestrahlungsstärke in diesen oberen 50m des Arktischen Ozeans im Bereich des MOSAiC Messgebietes zu ermitteln. Klein- und großskalige Heterogenitäten in der Schnee- und Eisbedeckung können dabei einen beachtlichen Einfluss auf das Lichtfeld unterm Eis haben, sodass eine exakte mittlere Bestrahlungsstärke nicht abgeleitet werden kann. Vielmehr haben wir uns darauf konzentriert, die maximal mögliche mittlere Bestrahlungsstärke abzuleiten, sodass wir als Ergebnis den Wert der PAR Strahlung erhalten, bei der Primärproduktion im Arktischen Ozean spätestens aktiv wird. Wir haben dafür verschiedene Korrekturverfahren entwickelt und auf *Lightharp* und *OptiCAL* Daten angewendet, u.a. basierend auf einer Studie von Laney et al. (2017) und Schnee und Eisdickenmessungen von Itkin et al. (2023).

#### 2.1.3.4 Photosensitivität der Algen

Die aus den Beobachtungen ermittelten Werte von PAR-Bestrahlungsstärke unter dem Eis wurden anschließend mit Messungen von Primärproduktivitätsraten, Chl-a Konzentrationen und Zellenanzahl verglichen. Wir konnten daraus bestimmen, dass das Algenwachstum im Frühjahr bei unter  $0.05 \mu\text{mol photons m}^{-2} \text{s}^{-1}$  angeregt wurde (Hoppe et al. *in review*). Die Ergebnisse dieser Studie sind einzigartig, verschieben sie doch das bisher beobachtete untere PAR-Limit für Primärproduktion in Zellen um mindestens eine Größenordnung nach unten, und damit erstmals in Beobachtungen nahe an den theoretischen Grenzwert für Photosynthese heran. Die Ergebnisse bezeugen, dass die euphotischen Zonen in den Ozeanen vermutlich weiter in dunkle Zonen hinein reichen als bisher angenommen. Der bisher einzige Datensatz von gemittelter PAR-Strahlung unter dem MOSAiC Eis (Fuchs et al. 2024b) soll nach abgeschlossener Prüfung und Bewertung der Studie ebenfalls publiziert werden und damit für weitere Studien zur Verfügung stehen.

## 2.2 Ressourcenverwendung

Die wissenschaftlichen Arbeiten im Projekt wurden von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter an der Universität Hamburg durchgeführt. Zwei studentische/wissenschaftliche Hilfskräfte haben an der Aufbereitung der Daten und Zeitreihen mitgewirkt. Der wissenschaftliche Mitarbeiter hat an drei Fachkonferenzen teilgenommen, um die Projektergebnisse vorzutragen (MOSAiC Conference Potsdam 2022, IGS Symposium Bremerhaven 2023, MOSAiC Conference Boulder 2023). Es wurden, soweit möglich, Early-Career-Researcher Förderungen für die Konferenzen eingeworben. Während der Projektlaufzeit fand ein Projekttreffen in Person am Alfred-Wegener-Institut Bremerhaven statt (11 Januar 2023) und zweimal wurde in Bremerhaven an der Auswertung von MOSAiC Eiskerndaten mit Fokus auf optischen Eigenschaften mitgewirkt (im Januar und Juni 2023). Zum Projektende waren die Review-Prozesse der Erst-Autoren Publikationen noch nicht abgeschlossen, darum konnten die dafür beantragten Mittel nicht abgerufen werden, sind aber vom DEAL-Abkommen für open-access Publikationen in Springer Nature abgedeckt.

## 2.3 Publikationsübersicht

Im Rahmen von **NiceLAB**pro wurden von den Projektpartnern in Erst-Autorenschaft zwei Peer-Reviewed Studien zu den Strahlungsmessungen auf MOSAiC und der Photosensitivität des Arktischen Ökosystems erarbeitet (**NiceLAB**pro Projektbeteiligte sind im Folgenden **fett** markiert):

- **Fuchs, N.**, Anhaus, P., Hoppmann, M., **Kagel, T.**, ..., **Notz, D.** (2024a) In-ice light measurements during the MOSAiC expedition, *Sci Data* 11, 702  
<https://doi.org/10.1038/s41597-024-03472-0>
- **Hoppe, C. J. M.**, **Fuchs, N.**, **Notz, D.**, et al. A new lower limit for photosynthetic light requirements detected in Arctic microalgae, *in review at Nature Communications*

Zudem wurde eine gemeinsame Studie zum Arktischen Meereis und Ökosystem mit Arbeitsblätter für Schülerinnen und Schüler im Fachmagazin Biologie 5-10 des Friedrich Verlags veröffentlicht:

- **Hoppe, C. J. M.**, Kallfelz, M., Lehmann, R., & **Fuchs, N.** (2022) Algen in der Polarnacht: allzeit bereit? *Biologie 5-10* Nr. 40
- **Fuchs, N.**, Kallfelz, M., Lehmann, R., & **Hoppe, C. J. M.** (2022a) Ökosystem Meereis im Klimawandel. *Biologie 5-10* Nr. 40 Materialheft

Projektergebnisse aus **NiceLAB**pro wurden durch die zur Verfügung gestellten Reisemittel von Dr. N. Fuchs auf Fachkonferenzen präsentiert:

- **Fuchs, N.**, **Deutloff, J.**, **Notz, D.**, et al. (2022b) Insights from the compilation of a unified database for sea-ice profile measurements – sea ice conditions at the LM site. *MOSAiC Science Conference, Potsdam*
- **Fuchs, N.**, Riemenschneider, L., **Deutloff, J.**, **Notz, D.**, et al. (2023a) The path of light through the Arctic sea ice cover. *MOSAiC Science Conference, Boulder.*
- **Fuchs, N.**, Riemenschneider, L., **Notz, D.**, **Deutloff, J.**, et al. (2023b) The path of light through the Arctic sea ice cover. *International Symposium on Sea Ice IGS 2023, Bremerhaven.*
- **Kagel, T.**, **Fuchs, N.**, ... & **Notz, D.** (2023) MOSiP - MOSAiC sea ice profile data product. *MOSAiC Science Conference, Boulder.*
- **Fuchs, N.**, Anderson, P., **Hoppe, C. J. M.**, **Notz, D.**, et al. (2024b) Time-series of under-ice PAR on MOSAiC at the transition from polar night to polar day. *MOSAiC Science Conference, Potsdam* (nach Projektende, keine **NiceLAB**pro Reisemittel)

Folgende **NiceLAB**pro Datensätze wurden auf der open-access Datenplattform PANGAEA publiziert:

- **Fuchs, N., Notz, D., et al. (2023c)** In-ice temperature and conductivity profile measurements on MOSAiC with the salt harp sensor - raw data [dataset]. *PANGAEA*
- **Fuchs, N., Notz, D., et al. (2023d)** In-ice light and temperature profile measurements on MOSAiC with the light harp sensor - raw data [dataset]. *PANGAEA*
- **Fuchs, N., Kagel, T., Notz, D., et al. (2023e)** Measurements of in-ice light profiles and optical properties of Arctic sea ice on MOSAiC 2020: Unified NetCDF data from the lightharp and lightchain instruments [dataset]. *PANGAEA*

Durch die von **NiceLAB**pro zur Verfügung gestellten Ressourcen war es darüber hinaus möglich, dass auch nach Kampagnenende an die Arbeit im MOSAiC Konsortium angeknüpft und substantziell zu weiteren Studien als Erst- und Co-Autor beigetragen werden konnte:

- Nicolaus, M., Perovich, D. K., Spreen, G., Granskog, M. A., von Albedyll, L., Angelopoulos, M., ..., **Fuchs, N.**, ... & Wendisch, M. (2022). Overview of the MOSAiC expedition: Snow and sea ice. *Elem Sci Anth*, 10(1), 000046.
- Thielke, L., **Fuchs, N.**, Spreen, G., Tremblay, B., Birnbaum, G., Huntemann, M., ... & Webster, M. A. (2023). Preconditioning of summer melt ponds from winter sea ice surface temperature. *Geophysical Research Letters*, 50(4), e2022GL101493.
- Neckel, N., **Fuchs, N.**, Birnbaum, G., Hutter, N., Jutila, A., Buth, L., ... & Haas, C. (2023). Helicopter-borne RGB orthomosaics and photogrammetric digital elevation models from the MOSAiC Expedition. *Scientific Data*, 10(1), 426.
- Smith, M. M., Angot, H., Chamberlain, E. J., Droste, E. S., Karam, S., Muilwijk, M., ... **Fuchs, N.**, ... & Zhan, L. (2023). Thin and transient meltwater layers and false bottoms in the Arctic sea ice pack—Recent insights on these historically overlooked features. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 11(1).
- Niehaus, H., Spreen, G., Birnbaum, G., Istomina, L., Jäkel, E., Linhardt, F., ... **Fuchs, N.**,... & Wright, N. (2023). Sea Ice Melt Pond Fraction Derived From Sentinel-2 Data: Along the MOSAiC Drift and Arctic-Wide. *Geophysical Research Letters*, 50(5), e2022GL102102.
- Lee, S., Stroeve, J., Webster, M., **Fuchs, N.**, & Perovich, D. K. (2024). Inter-comparison of melt pond products from optical satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 301, 113920.
- **Fuchs, N.**, von Albedyll, L., Birnbaum, G., Linhardt, F., Oppelt, N., & Haas, C. (2024c). Sea ice melt pond bathymetry reconstructed from aerial photographs using photogrammetry: A new method applied to MOSAiC data. *The Cryosphere* 18, 2991–3015  
<https://doi.org/10.5194/tc-18-2991-2024>

Zahlreiche weitere Konferenz- und Workshopbeiträge wurden während der Projektlaufzeit in Co-Autorenschaft unterstützt. Als besonders erwähnenswert empfinden wir ein Wissenschaftskommunikationsprojekt, dessen Teil wir durch die Kooperation zur inneren Eisstruktur geworden sind. Die von Dr. Marc Oggier (University of Alaska, Fairbanks) federführend betriebene und in Kooperation begleitete Analyse der Kristallstrukturen im Eis wurde als Outreach Projekt von der Künstlerin Amy Lauren aufgegriffen und bei der New York Fashion Week 2023 vorgestellt: <https://www.projectseaice.com/nyfw> (letzter Zugriff: 12.06.2024)

## 2.4 Fortführung der Arbeiten

Die im Arbeitspaket 2 erarbeiteten Erkenntnisse zur Lichttransmission in Schnee und Eis gaben Anlass zu einer Studie, die sich vorrangig auf die Abschätzung von Fehlerquellen für Lichttransmission-Parametrisierungen und weniger auf die ursprünglich geplante Schaffung einer neuen Parametrisierung konzentriert. Diese war zu Projektende noch in Bearbeitung. Wir erwarten damit zukünftige Modelentwicklungen und -verbesserungen im Hinblick auf Solarstrahlungs-Flüsse durch Schnee und Eis gezielter informieren zu können.

Darüber hinaus wurden Projekte zur zukünftigen besseren Erfassung der optischen Eigenschaften von Schnee initiiert. Die Auswertung der Lichttransmissionsmessungen von Eiskernproben durch die University of Washington befand sich zu Projektende noch in Bearbeitung und wird nach erfolgreichem Abschluss mit den Daten der *Lightharp* und der Kristallstrukturmessungen der University of Fairbanks zu einer Studie zusammengeführt.

Durch **NiceLAB**pro konnten sowohl nationale Kooperationen der Universität Hamburg mit dem Alfred-Wegener-Institut im Bereich biophysikalischer Wechselwirkungen und in der Meereisphysik verstärkt werden als auch neue internationale im Bereich der physikalischen Eiseigenschaften mit der University of Washington, University of Alaska und dem Woods Hole Institute initiiert werden. Durch die Arbeit an der Fachzeitschrift für den Schulunterricht wurde ein direkter Kontakt zum „Arbeitskreis Polarlehrer“ in der Deutschen Gesellschaft für Polarforschung e.V. hergestellt, durch den der direkte Weg zur Wissensvermittlung optimiert wird. All diese Kooperationen werden auch nach Projektende die wissenschaftliche Arbeit der Meereisgruppe an der Universität Hamburg und deren Wissenschaftskommunikation bereichern.

## 4 Literaturverzeichnis

(für die nicht in Abschnitt 2.3 aufgeführten wissenschaftlichen Publikationen)

- Hersbach, H. et al. (2017): Complete ERA5 from 1940: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Data Store (CDS)*. DOI: 10.24381/cds.143582cf. (Accessed on 28-Jun-2021)
- Itkin, P. et al. (2023): Sea ice and snow characteristics from year-long transects at the MOSAiC Central Observatory. *Elem Sci Anth* 11.1: 00048.
- Krumpen, T. et al. (2020): The MOSAiC ice floe: sediment-laden survivor from the Siberian shelf, *The Cryosphere*, 14, 2173–2187, <https://doi.org/10.5194/tc-14-2173-2020>.
- Laney, S. et al. (2017): The euphotic zone under Arctic Ocean sea ice: Vertical extents and seasonal trends. *Limnology and Oceanography* 62.5: 1910-1934.
- Larouche, R. et al. (2023): In-ice measurements of full spectral angular radiance distribution using a 360-degree camera. Prepr. *EarthArXiv*.
- Lei, R. et al. (2022): Temperature and heating induced temperature difference measurements from SIMBA-type sea ice mass balance buoy 2019T62, deployed during MOSAiC 2019/20 [dataset bundled publication]. *PANGAEA*, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.940231>.
- Nicolaus, M. et al. (2021): Visual panoramic photographs of the surface conditions during the MOSAiC campaign 2019/20 [dataset]. *PANGAEA*, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.938534>.
- Nicolaus, M. et al. (2024): Spectral radiation fluxes, albedo and transmittance from autonomous measurement from Radiation Station 2020R11, deployed during MOSAiC 2019/20 [dataset bundled publication]. Alfred Wegener Institute, Helmholtz Centre for Polar and Marine Research, Bremerhaven, *PANGAEA*, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.948828>.
- Pirazzini, R. et al. (2022): Upward and downward broadband shortwave and longwave irradiance and downward diffuse and direct solar partitioning during the MOSAiC expedition [dataset]. *PANGAEA*, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.952359>.
- Rabe, B. et al. (2024): The MOSAiC Distributed Network: Observing the coupled Arctic system with multidisciplinary, coordinated platforms. *Elem. Sci. Anthropocene* 12, 00103, <https://doi.org/10.1525/elementa.2023.00103>.
- Schartmüller, B. et al. (2023): Development and calibration of a high dynamic range and autonomous ocean-light instrument to measure sub-surface profiles in ice-covered waters. *Applied Optics* 62.31: 8308-8315.