

Dünn und dünner? – Eisdickenmessungen in den Polarmeeren

Christian Haas

Die Dicke des Meereises ist ein bedeutender Klimaindikator und ein wichtiger Parameter zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Klimamodellen. Allerdings ist die Bestimmung der Eisdicke nicht einfach, da das Eis nur eine dünne Haut von wenigen Dezimetern oder Metern Mächtigkeit auf dem Meer bildet und eine sehr große Variabilität auf Skalen von Millimetern bis hunderten von Kilometern aufweist. Deshalb ist auch heute noch unklar, ob die Eisdicke im Arktischen Ozean ebenso stark abnimmt wie die von Satelliten beobachtete eisbedeckte Fläche, und wie sich die Eisdicke in der Antarktis verhält, wo die mittlere Eisbedeckung nahezu konstant ist. Seit jeher boten Polarstern-Expeditionen einmalige Möglichkeiten, die Eisdicke in den verschiedenen Polarregionen zu bestimmen. Vor Indienststellung der Polarstern kamen die einzigen umfangreichen Eisdickenmessungen in der Arktis von Missionen amerikanischer und englischer militärischer Atom-U-Boote, die in der Zeit des Kalten Krieges am Nordpol mit sowjetischen U-Booten „Katz und Maus“ spielten. In der Antarktis lagen quasi keine Daten vor, da militärische Missionen aufgrund des Antarktisvertrages verboten sind. Aus Sicherheitsgründen führen U-Boote Eisecholote mit sich, um Kollisionen mit besonders dickem Eis zu vermeiden und um dünnes Eis zum Auftauchen aufzuspüren. Diese auf Thermalpapier



Abb. 1: Während zahlreichen Polarstern-Expeditionen wurde das elektromagnetische (EM) Induktionsverfahren zur Eisdickenbestimmung entwickelt. Anfangs diente ein Kajak als amphibischer Schlitten für das EM-Gerät (a; Foto: Jörg Bareiss), später wurden die Messungen während der Eisfahrt vor dem Schiffsbug durchgeführt (b). Heutzutage kann das Eis mit einem EM-Bird aus der Luft vermessen werden (c).

aufgezeichneten Messungen wurden teilweise nachträglich digitalisiert und wissenschaftlich ausgewertet. Obwohl die U-Boot-Fahrten erste Erkenntnisse über typische Eisdicken und ihre Variabilität im Arktischen Ozean lieferten und eine Abnahme der Eisdicke zwischen den 1950er und 1990er Jahren zeigten, ist ihre Verfügbarkeit unbefriedigend. Mit Polarstern konnten erstmalig umfangreiche Daten gewonnen werden, die rein wissenschaftlichen Zwecken dienen. Die Expeditionen boten außerdem die Möglichkeit, neue Messverfahren zu entwickeln, die die Vermessung immer größerer Gebiete entlang der Fahrtrouten ermöglichten. Den bisherigen Höhepunkt der methodischen Entwicklung bot der erstmalige Einsatz einer hubschraubergetragenen Eisdickensonde während Ark 17/2, der **Arctic Mid Ocean Ridge Expedition AMORE**.

6. September 2001. Fast genau auf den Tag zehn Jahre nach dem ersten Nordpolbesuch der Polarstern nähert sich das Schiff zum zweiten Mal diesem magischen Punkt im Arktischen Ozean. 20 Meilen vor dem Pol starten wir trotz des üblichen trüben Wetters mit einem Hubschrauber, um die Dicke des Eises am Nordpol zu messen. Kurz vor dem Nordpol fängt unser GPS-Satellitennavigationsgerät an zu spinnen. Da die geographische Breite nun fast 90 Grad beträgt, kann das Gerät die Richtung und Entfernung nicht mehr richtig berechnen. Der Kosinus von 90 Grad ist Null, und somit kommt es bei den Berechnungen zur Division durch Null, was bekanntlich zu keinem Ergebnis führt (probieren Sie es zu Hause mit Ihrem Taschenrechner!). Dennoch finden wir den Weg zum Nordpol, da wir nur darauf achten müssen, dass das Navigationsgerät weiterhin steigende Breitengrade und konstante Längengrade anzeigt, womit sich sehr gut navigieren lässt. Und tatsächlich, wir schaffen es, soweit nach Norden zu kommen, bis das GPS $89^{\circ}59'59''$ anzeigt, also nur etwa 30 Meter vom Nordpol entfernt. Allerdings können wir genau am Nordpol nicht landen, da sich dort gerade eine etwa 100 Meter breite Rinne offenen Wassers befindet. So fliegen wir ein Stück entgegen der Windrichtung weiter, und landen auf einer großen Eisscholle. Und tatsächlich: Mit einer Geschwindigkeit von circa acht Kilometern pro Tag treibt unsere Scholle wenig später genau über den Pol.

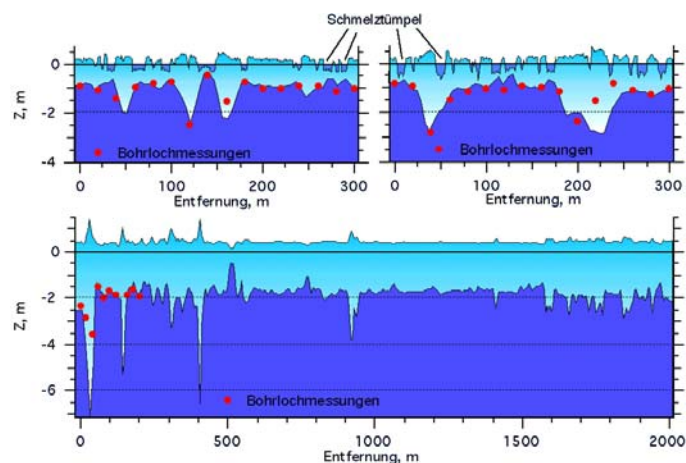


Abb. 2: Typische Eisdickenprofile im Sommer (oben, mit Schmelztümpeln) und im Winter (unten), die ebenes Eis und Presseisrücken zeigen. Die Daten wurden mit dem EM-Verfahren gewonnen und zeigen eine gute Übereinstimmung mit Bohrlochmessungen (rote Punkte).

Wasserrinnen und Eisdrift sind normale Erscheinungen im Arktischen Ozean, da das Eis ja nur wenige Meter dick ist, und, von Wind und Strömungen angetrieben, über das oft mehr als 4000 Meter tiefe Wasser treibt. Dabei zerbricht die dünne Eisschicht regelmäßig in zahlreiche einzelne Eisschollen, die ein breites Größenspektrum von wenigen Metern bis einigen Kilometern Durchmesser besitzen und meistens mehr als 90 Prozent der Meeresoberfläche bedecken. Aufgrund der ständigen Bewegungen stoßen einzelne Eisschollen oft zusammen oder werden gegeneinander gedrückt. Dabei zerbricht das Eis, und einzelne Eisblöcke türmen sich zu großen Haufen auf und unter dem Eis auf. Diese sogenannten Presseisrücken können bis zu 50 Meter dick werden, wobei wie bei Eisbergen nur circa zehn Prozent der Gesamtdicke aus dem Wasser herausragen. Bei divergenter Eisdrift bewegen sich die Eisschollen auseinander. Auf dem zutage tretenden Wasser bildet sich neues, dünnes Eis, das beim Zusammentreiben der dickeren Schollen wieder zu Presseisrücken deformiert wird. Durch diese Prozesse variiert die Eisdicke selbst innerhalb kurzer Entfernungen stark, wodurch repräsentative Eisdickenmessungen wesentlich erschwert werden.

Aber auch regional variiert die Eisdicke aufgrund der Eisdrift und der eben beschriebenen Deformationsprozesse stark. Im Arktischen Ozean treibt das Eis im sogenannten Transpolarstrom innerhalb von zwei bis drei Jahren von der sibirischen Küste über den Nordpol in die Framstraße zwischen Spitzbergen und Grönland, um weiter südlich in der Grönlandsee zu schmelzen. Im Beaufortwirbel bewegt sich das Eis im Uhrzeigersinn teilweise mehrere Jahre im Kreis, bevor es in die Transpolardrift eingespeist wird. Beide Driftsysteme bewegen das Eis gegen die Küsten Grönlands und Kanadas, wo es zusammenpresst wird. Aus diesem Grund befindet sich dort das dickste Eis der Arktis, und nicht etwa vor der sibirischen Küste, wo es normalerweise am kältesten ist. Ähnliche Driftsysteme gibt es im Südpolarmeer, wodurch auch dort die regionale Eisdickenverteilung stark durch die Gegenwart von Küsten beeinflusst wird.

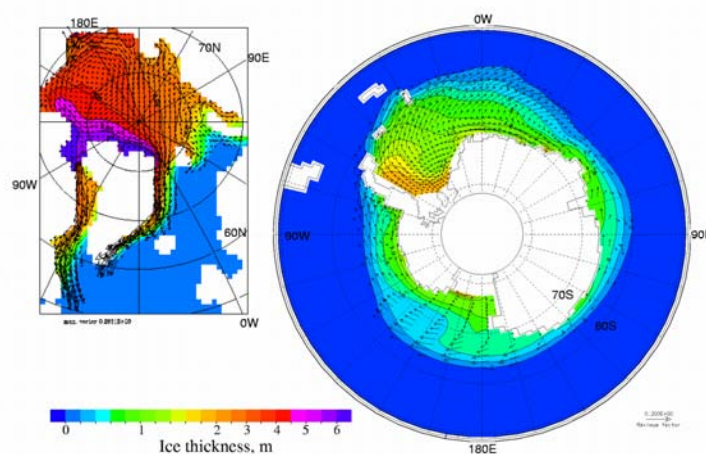


Abb. 3: Karten der mittleren Meereisdicke und Driftgeschwindigkeit und -richtung im Arktischen Ozean und im Südpolarmeer zwischen 1985 und 1993, die mit einem Computermodell berechnet wurden (von C. Koeberle & R. Gerdes sowie R. Timmermann).

Unser kurzer Nordpolausflug ist nur ein kleines Beispiel für den riesigen technologischen Fortschritt seit Indienstellung der Polarstern, und zeigt die enormen Erleichterungen gerade für Polarexpeditionen. Bei unserer Arktisexpedition 1991, dem ersten Nordpol-Besuch der Polarstern, waren GPS-Navigationsgeräte brandneu, und niemand wusste so recht, wie man sie benutzte und wie weit man ihnen trauen konnte. Außerdem war es ein militärisches System, und während des Golfkrieges schalteten die Amerikaner es regelmäßig ab. Deshalb waren Hubschrauberflüge nur in Sichtweite des Schiffes möglich, was gerade bei der üblichen nebligen Witterung in der sommerlichen Arktis keine weiten Flüge zuließ. So eigneten sich auch die bordeigenen Hubschrauber nur bedingt für geophysikalische Messflüge und zur Meereisvermessung, weil dabei normalerweise weite Gebiete befliegen werden müssen, um angesichts der großen räumlichen Variabilität repräsentative Ergebnisse erzielen zu können. Heutzutage sind Flüge bis zu einer Entfernung von 100 Meilen vom Schiff keine Seltenheit.

Neben den hervorragenden Navigationsmöglichkeiten stellen die Flüge der Expedition 2001 noch einen weiteren technologischen Meilenstein dar: erstmalig ist es uns möglich, vom Hubschrauber aus die Dicke des Meereises zu vermessen. Dazu schleppen wir eine speziell entwickelte Messsonde an einem 20 Meter langen Kabel unter uns her, die 15 bis 20 Meter über der Eisoberfläche hängt. Die Sonde ist ein sogenannter EM-Bird, der die Eisdicke mit Hilfe des elektromagnetischen (EM) Induktionsverfahrens misst. Dieses klassische geophysikalische Messverfahren erlaubt die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeitsverteilung im Untergrund. Im Falle von Meereis-Dickenmessungen wird die Tatsache ausgenutzt, dass das Eis einen sehr großen elektrischen Widerstand besitzt, während Meerwasser aufgrund seines hohen Salzgehaltes ein guter elektrischer Leiter ist. Mit dem EM-Bird ist deshalb die Bestimmung der Höhe der Sonde über dem Wasserspiegel möglich, der ja die Grenze zur Eisunterseite darstellt. Mit einem Laser-Altimeter wird gleichzeitig die Höhe über der Eis- bzw. Schneeoberfläche gemessen. Die Differenz aus beiden Höhenmessungen ergibt die Gesamt-Eisdicke, also die Summe aus Eis- und Schneedicke. Vergleiche mit Bohrungen zeigten, dass die Dicke des Eises mit dem EM-Verfahren bis auf zehn Zentimeter genau bestimmt werden kann.

Schon seit den ersten Polarstern-Fahrten gehören Meereisuntersuchungen zum festen Bestandteil des Forschungsprogramms, vorausgesetzt die geplante Route führt weit genug in eisbedeckte Gebiete hinein, und die anderen Messprogramme lassen ein regelmäßiges Aufstoppen des Schiffes zu. Dann werden zahlreiche Eisforscher mit dem Mummy Chair oder über die Gangway aufs Eis gelassen. Dort erbohren sie mehrere Eiskerne, um die Eigenschaften des Eises von seiner Oberfläche bis zu seiner Unterseite zu untersuchen. Zumeist wurden sowohl biologische, chemische als auch physikalische Eigenschaften bestimmt, insbesondere Chlorophyllgehalt, Planktonzusammensetzung, PH-Wert, organische Kohlenstoffe, Temperatur und Salzgehalt (siehe Beiträge von Gerhard Dieckmann, Michael Spindler und Sigrid Schiel). Einen besonderen Platz nehmen außerdem Schneeuntersuchungen sowie die Bestimmung der Kristallstruktur des Eises ein. Diese lassen Aufschlüsse über die Entstehungsgeschichte des Eises zu. Da Polarstern immer neue Gebiete besuchte, die vorher weitgehend unzugänglich waren, wurden dabei wichtige Erkenntnisse gewonnen, die unter anderem auch fundamentale Unterschiede des Eises der Arktis und der Antarktis zeigten. Im Südpolarmeer herrscht körniges Eis vor, das sich unter turbulenten Bedingungen bildet, wenn das Wasser wie in der Antarktis durch Wind und Wellen stark durchwühlt ist. Dabei bilden sich

normalerweise große Gebiete aus Pfannkucheneis, kreisförmige Platten oder kleine Schollen mit hochgestellten Rändern. Im arktischen Ozean bestehen die Eisschollen zumeist aus säuligem Eis, das durch Gefrieren an der Eisunterseite entsteht.

Während in der Arktis der Schnee im Sommer meistens komplett schmilzt und charakteristische Schmelztümpel auf der Eisoberfläche zurücklässt, überlebt auf mehrjährigem antarktischem Meereis jeden Sommer eine intakte Schneedecke. Sowohl im Winter als auch im Sommer trägt der Schnee in der Antarktis wesentlich zur Massenbilanz des Meereises bei. Im Sommer, wenn die Temperatur der Schneesicht den Schmelzpunkt erreichen kann, gefriert geringfügig auftretendes Schnee-Schmelzwasser über der kälteren Eisoberfläche und bildet sogenanntes Aufeis. In den kalten Jahreszeiten kann der Schnee so mächtig werden, dass er durch sein Gewicht das Eis unter den Wasserspiegel drückt. Dann wird die Eisoberfläche überflutet und die unteren Schneeschichten durchtränken mit Meerwasser. Dieses gefriert allmählich wieder, wodurch sich sogenanntes Schnee-Eis bildet.

Neben diesen punktuellen Messungen wurden auf den meisten Eisschollen immer auch umfangreiche Eisdickenbohrungen durchgeführt. Insbesondere im Weddellmeer haben die Messungen von Manfred Lange, Hajo Eicken und Christian Haas während der Winter-Expeditionen WWSP (Winter Weddell Study Project Ant 5/2), EPOS (European Polarstern Study Ant 7/2, 1988), WWGS89 und 92 (Winter Weddell Gyre Study Ant 8/2 und Ant 10/4, 1989 und 1992) bahnbrechende Erkenntnisse geliefert. Obwohl auf jeder Eisscholle die Eisdicke nur entlang von 100 bis 200 Meter langen Profilen mit einem Messpunktabstand von einem oder zwei Metern gemessen wurden, konnten die besonderen Charakteristiken der verschiedenen Gebiete beschrieben werden. Insbesondere wurde die Koexistenz von 80 Zentimeter dickem einjährigen und mehr als zwei Meter dickem zweijährigen Eis im nordwestlichen Weddellmeer quantitativ beschrieben. Während der ersten Polarstern-Nordpolexpedition Ark 8/3 im August und September 1991 wurden die ersten umfangreichen Eisdickenbohrungen in der Transpolar drift durchgeführt. Diese bilden heute eine wichtige Referenz für alle weiteren Messungen, die im Laufe späterer und zukünftiger Polarstern-Expeditionen durchgeführt wurden und werden. Sie zeigten, dass die häufigste gemessene Dicke zweieinhalb Meter betrug, was die Dicke des ebenen Eises zwischen den Presseisrücken repräsentiert.

Bohrlochmessungen sind anstrengend und zeitaufwändig, und deshalb haben wir nach alternativen Messverfahren gesucht. Während der ersten Polarstern-Winterexpedition Ark 9/1 im März/April 1993 in der Framstraße testeten wir mit Sebastian Gerland erstmalig das EM-Verfahren mit einer tragbaren Sonde, die auf das Eis gelegt wurde und schnelle und einfache Messungen erlaubte. Vergleiche mit Bohrungen ergaben sehr gute Ergebnisse. In den folgenden Jahren wurden diese EM-Messungen operationalisiert, und lieferten erste Ergebnisse über regionale Eisdickenverteilungen und ihre interannuale Variabilität. Bei den Laptewsee-Expeditionen Ark 9/4 (1993), Ark 11/1 (1995) und Ark 12/1 (1996) konnte das selbe Gebiet vermessen werden und gezeigt werden, wie die Eisdicke in der Laptewsee von der Luftdruckverteilung und damit von den im jeweiligen Sommer vorherrschenden Winden abhängt. Bei Ark 12/1 (1996), Ark 14/3 (1998) und Ark 17/1 (2001) wurden außerdem dieselben Gebiete im Transpolarstrom rund um den Nordpol besucht. Diese Messungen zeigten, dass die Dicke des ebenen Eises zwischen 1991 und 2001 um 20 Prozent abgenommen hat.

Schon während Ant 11/3 wurde im Februar 1994 in der Bellingshausen- und Amundsensee erste EM-Messungen vom fahrenden Schiff aus gemacht, um die Eisdicke entlang der Fahrtroute zu bestimmen. Dabei wurde das EM-System mit dem Bugkran vier Meter hoch über dem Eis vor den Bug gehängt, und seine Höhe über der Eisoberfläche wie beim EM-Bird mit einem Laser-Altimeter gemessen. Die guten Erfahrungen mit diesen Messungen, und ihre Relevanz für schiffstechnische Untersuchungen zum Eisbrechverhalten bei verschiedenen Eisdicken und zur Beurteilung von Unterbodenschäden am Schiff führten zur Entwicklung des permanent betreibbaren SIMS. Dieses Sea Ice Monitoring System, das insbesondere auch von Eberhard Wagner, dem damaligen Polarstern-Projektleiter der Reederei Laeisz, mit entwickelt wurde, ist direkt mit dem Schiffsinformationssystem PODAS verbunden und liefert Echtzeit-Eisdickendaten an die Brücke und an jedes Computerterminal an Bord. Leider ist die Eisdicke vor dem Bug aufgrund der Schiffsroutenwahl durch offenes Wasser und entlang von Schollenrändern selten repräsentativ für ein größeres Gebiet, weshalb sich die Messungen meistens nicht für klimabezogene Untersuchungen eignen.

Aufgrund der guten Erfahrung mit der Durchführbarkeit und Genauigkeit von EM-Eisdickenmessungen haben wir uns 1998 entschieden, den oben erwähnten EM-Bird zu entwickeln, der erstmals 2001 bei Ark 17/1 eingesetzt wurde. Mit Hilfe von Klaus-Peter Sengpiel von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Ingenieuren von Aerodata in Braunschweig, sowie einer Firma aus Kanada ist uns eine technologische Neuentwicklung gelungen, die mit ihrer geringen Baugröße und Digitaltechnologie auch heute noch neue Maßstäbe setzt. Die Neuentwicklung war erforderlich, um den besonderen Anforderungen von Polarexpeditionen mit dem Einsatz kleiner Hubschrauber, Landungen auf Schiffen, und geringem Transport- und Laborplatz zu genügen.

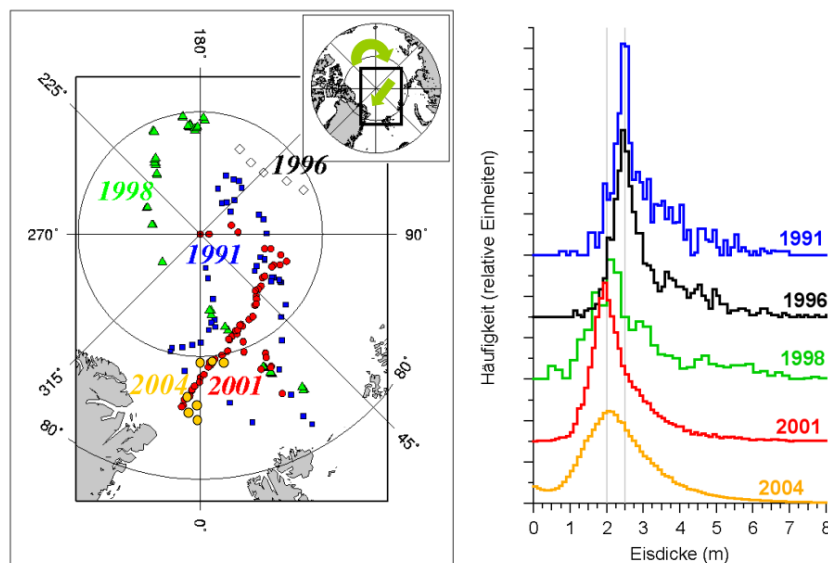


Abb. 4: Abnahme der Dicke des Eises zwischen Spitzbergen und dem Nordpol. Die Messungen wurden bei fünf Polarstern-Expeditionen an den farbig markierten Positionen zwischen 1991 und 2004 durchgeführt (links). Die Histogramme zeigen die Abnahme der häufigsten Eisdicke von zweieinhalb Meter in 1991 auf zwei Meter in 2001 und 2004 (rechts).

Seit dem ersten Einsatz 2001, der die Ausdünnung des Eises am Nordpol zeigte, wurde der EM-Bird regelmäßig eingesetzt und hat aufgrund seiner einmaligen Messungen spektakuläre Ergebnisse geliefert. Bei Ark 19/1 im April 2003 wurde das Eis im Storfjord bei Spitzbergen und in der Barentssee vermessen. Dabei fanden wir sehr dickes Eis, das aus dem Arktischen Ozean in das Gebiet getrieben ist. Ark 20/2 führte im Sommer 2004 erstmalig wieder in die südlichen Gebiete des Transpolarstromes. Im Vergleich zu 2001 hatte die Eisdicke nicht weiter abgenommen. Bei den Weddellmeerreisen ISPOL (Ice Station Polarstern, Ant 22/2) und WWOS (Winter Weddell Gyre Study, Ant 23/7) wurden erstmals große Gebiete des Weddellmeeres vermessen. Dabei wurden verschiedene Eisregime im westlichen Weddellmeer identifiziert, die sich auch durch ihre Dicke deutlich unterschieden. Es wurden verschiedene Regime zweijährigen Eises bestimmt, die sehr große Dicken zwischen zweieinhalb und sechs Metern besitzen. Im Gebiet des ehemaligen Larsen-B Schelfeises wurde erstmalig ein Dickenprofil über dem Eis einer wiederkehrenden Polynya gewonnen, das die Dickenzunahme mit steigendem Eisalter zeigte. Aufgrund der großen überflogenen Gebiete eignen sich die Hubschrauber-Eisdickenmessungen auch hervorragend zur Validierung von Satellitendaten, und konnten maßgeblich zur Interpretation von Satellitenbildern beitragen.

Zur Beobachtung von Klimaveränderungen sind regelmäßige Messungen innerhalb derselben Gebiete erforderlich. Leider zeigt es sich jedoch, dass die multidisziplinäre Fahrtplanung der Polarstern solche Messungen im Innern der Packeisgebiete der Arktis und Antarktis aber nur bedingt erlauben. Deshalb verfolgen wir weitere Entwicklungen, beispielsweise den Einsatz von EM-Systemen von den Polarflugzeugen des Alfred-Wegener-Institutes, oder die Durchführung von landgestützten Hubschraubere Expeditionen insbesondere in Kanada, Alaska, und in der Lapteewsee. Unsere EM-Birds wurden aber auch bereits von anderen Schiffen, z.B. von der norwegischen Lance und der australischen Aurora Australis eingesetzt. Besondere Hoffnungen ruhen auch auf dem Bau des europäischen eistauglichen Bohrschiffes Aurora Borealis, das eine wichtige Ergänzung zur Polarstern darstellt. Mit beiden Schiffen zusammen sind zukünftig hoffentlich regelmäßiger Besuche des Eises am Nordpol möglich.

Der Erfolg unserer Eisdickenmessungen und technologischen Entwicklungen wurde sehr durch die einmaligen Möglichkeiten begünstigt, die die Polarstern und ihre Hubschrauber immer wieder boten. Deshalb gratulieren wir herzlich zu ihrem Geburtstag und freuen uns schon auf die Reisen der kommenden 25 Jahre. Aber das Schiff wäre nichts ohne seine Besatzung und ihre Hubschrauber- und Wissenschaftlercrews, denen an dieser Stelle unser herzlichster Dank gilt.