

„Eine Masterchronologie von *Arctica islandica* bei Helgoland“

Bachelorarbeit



vorgelegt dem Fachbereich 2 der



von

Florian Bauer

Erstgutachter: Prof. Dr. Thomas Brey (AWI)

Zweitgutachter: PD Dr. Barbara Niehoff (AWI)

Bremen, September 2011

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Zusammenfassung.....	V
1. Einleitung.....	1
1.1. Wachstumsinkremente – Einblicke in die Vergangenheit.....	3
1.2. Fehler bei der Inkrementmessung	3
1.3. Fragen.....	4
2. Material und Methoden	5
2.1. Forschungsobjekt – <i>Arctica islandica</i>	5
2.1.1. Systematik.....	5
2.1.2. Verbreitung und Vorkommen	6
2.1.3. Wachstum	6
2.2. Untersuchungsgebiet	7
2.3. Probennahme	8
2.4. Präparation der Schalen	9
2.5. Altersbestimmung und Inkrementmessung.....	12
2.6. Entfernung des ontogenetischen Trends	13
2.6.1. Festlegung eines geeigneten Spline.....	14
2.6.2. Berechnung des standardisierten Wachstumsindex.....	15
2.7. Erstellung einer Masterchronologie.....	16
2.8. Manuelle Korrektur der vorhandenen Werte	16
2.9. Überprüfen der korrigierten Messwerte mit Hilfe von TSAP-Win	17
2.10. Frequenzanalyse.....	19

3. Ergebnisse	20
3.1. Altersbestimmung und Wachstum.....	20
3.2. Ergebnisse der Korrekturen.....	21
3.2.1. Manuelle Korrektur.....	21
3.2.2. Korrektur mit TSAP-Win.....	23
3.3. Vergleich der Masterchronologien.....	28
3.3.1. Original vs. manuelle Korrektur.....	28
3.3.2. Original vs. TSAP-Win-Korrektur.....	29
3.3.3. Manuelle Korrektur vs. TSAP-Win-Korrektur.....	30
3.4. Frequenzanalyse.....	31
3.4.1. Spektraldichte und standardisierte Spektraldichte.....	31
3.4.2. Differenz der standardisierten Spektraldichten.....	32
4. Diskussion	34
4.1. Präparation.....	34
4.2. Altersbestimmung und Inkrementmessung.....	34
4.3. Entfernung des ontogenetischen Trends.....	34
4.4. Korrektur.....	35
4.4.1. Manuelle Korrektur.....	35
4.4.2. Korrektur mit Hilfe des Analyseprogramms TSAP-Win.....	37
4.5. Frequenzanalyse.....	38
5. Fazit und Ausblick	40
6. Literaturverzeichnis	41
7. Anhang	47
8. Danksagung	48

Zusammenfassung

In dieser Studie wurde das Wachstum von 25 Muscheln der Art *Arctica islandica*, die aus der Deutschen Bucht nahe Helgoland stammen, untersucht, um mit ihnen eine 238-jährige Masterchronologie zu erstellen.

Die Schalen aller Muscheln wurden bereits in einer vorhergehenden Studie (Scheuer 2008) präpariert, ihr ontogenetisches Alter wurde bestimmt und ihre Inkremente wurden vermessen. Zunächst sollten diese Daten auf mögliche Fehler überprüft werden. Fehler können Inkremente sein, die nicht erkannt wurden, sowie „falsche“ Inkremente, die gesehen wurden. Zudem können Inkremente falsch gemessen worden sein.

Die Überprüfung und Korrektur möglicher Fehler wurde zunächst manuell und anschließend mit Hilfe des Dendrochronologie-Analyseprogrammes TSAP-Win durchgeführt.

Bei der manuellen Korrektur wurden insgesamt 41 Fehler festgestellt. Davon wurden in 9 Fällen Inkremente übersehen und jeweils in 16 Fällen „falsche“ Inkremente gemessen bzw. Fehler bei der Messung gemacht.

Die jährlichen Wachstumsinkremente wurden anschließend linear approximiert und standardisiert, um sie in standardisierte Wachstumsindices (SGI) umzuwandeln. Mit diesen konnte nun im zweiten Korrekturschritt eine Überprüfung mit dem Analyseprogramm durchgeführt werden. Hier wurden von insgesamt 32 Vorschlägen für eine Korrektur, zusätzlich 14 durchgeführt.

Beim Vergleich der originalen Masterchronologie von Scheuer und den beiden Masterchronologien, die sich jeweils durch die Korrekturschritte aus dieser ergeben haben, wurde gezeigt, dass sich die Chronologien stark voneinander unterscheiden. Die Auswirkungen des zweiten Korrekturschrittes mit dem Analyseprogramm sind, gegenüber der manuellen korrigierten Chronologie, jedoch nur geringfügig.

Anschließend wurden die Masterchronologien in einer Frequenzanalyse auf mögliche dekadische Wachstumsmuster untersucht. Dabei konnte auch hier eine sehr große Übereinstimmung zwischen den beiden korrigierten Chronologien beobachtet werden. Alle drei Masterchronologien wiesen übereinstimmend ein Wachstum mit einer Periode von ca. 6 Jahren auf.

Diese Periodizität stimmt mit anderen Studien überein und begründet sich vermutlich in der Variabilität der Nordatlantischen Oszillation, sowie in der hohen regionalen Variabilität der Deutschen Bucht. Beide haben entscheidenden Einfluss auf das Wachstum von *Arctica islandica*. Um dies jedoch zu bekräftigen, wäre es erforderlich weitere Studien ergänzend hinzu zu ziehen.

1. Einleitung

Um aktuelle Entwicklungen der Umwelt besser verstehen und zukünftige besser vorhersagen zu können, ist es wichtig zunächst die Vergangenheit zu kennen und zu verstehen (Begum et al. 2009). Da es jedoch kaum hochauflösende Messreihen von Umweltdaten (Luft- und Wassertemperatur, Salinität, Niederschlag, Sonnenscheindauer etc.) gibt, die mehr als 150 Jahre zurückreichen (Schöne et al. 2004, 2005a), bedarf es einer Vielzahl aufwändiger Re-Modellierungsmethoden, um diese Lücken zu schließen (Müller-Wiegmann 2006).

Um Umweltdaten aus der Zeit vor Beginn der instrumentellen Erfassung zu erlangen, ist es nötig diese zuvor indirekt aus sogenannten Proxy-Archiven zu rekonstruieren (Müller-Wiegmann 2006). Als „Proxies“ (Approximation = Annäherung) werden Parameter bezeichnet, die aus Archiven der Vergangenheit (z.B. Sedimente, Gletschereis, Stalagmiten; Abb. 1) ausgelesen werden können und in einem bekannten Verhältnis zu einem Umweltparameter stehen.

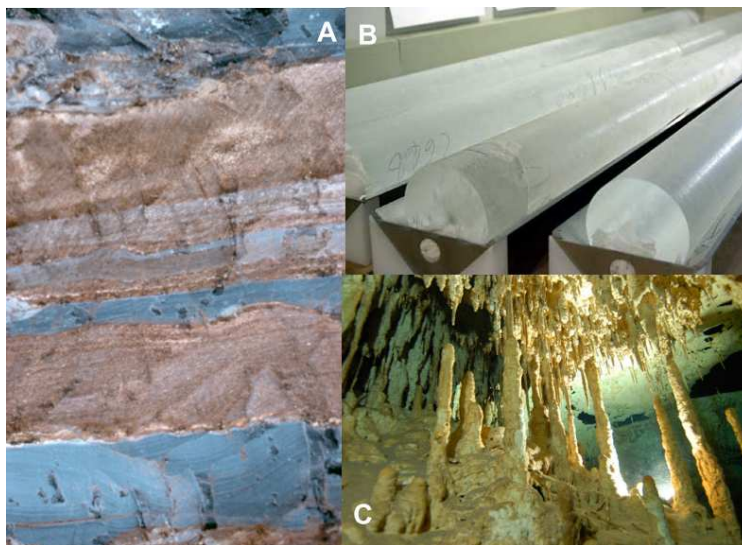


Abb. 1: Beispiele für Proxyarchive: A – Sedimente (Quelle: USGS), B – Eisbohrkerne (Quelle: Sepp Kipfstuhl / AWI), C – Stalagmiten (Quelle: Rene Bader).

Eine besondere Form von Proxy-Archiven sind Bioarchive. Bioarchive sind lebende Organismen (bzw. Teile von ihnen), die dazu in der Lage sind in regelmäßigen zeitlichen Intervallen biogene Hartteile anzulagern, welche über den Tod des Organismus hinaus erhalten bleiben. Diese Hartteile zeichnen die zum Zeitpunkt des Wachstums vorherrschenden Umweltbedingungen auf (Marchitto et al. 2000). Bäume, Muschelschalen, Otolithen und Korallen sind Beispiele für Bioarchive (Schöne 2003).

Lang bekannte und gut erforschte Bioarchive sind Bäume. Die Wissenschaft, die sich mit dem Wachstum von Bäumen beschäftigt, wird auch als Dendrochronologie (griech.: dendron = Baum, chronos = Zeit) bezeichnet.

Das marine Analogon zur Dendrochronologie ist die Sklerochronologie (griech.: skleros = hart, chronos = Zeit) (Buddemeier 1975). Auch in der Sklerochronologie werden biogene Hartteile analysiert, beispielsweise deren Wachstum, um Umweltparameter indirekt zu erfassen und zu rekonstruieren (Wanamaker et al. 2009). Dafür werden unter anderem statistische Methoden aus der Dendrochronologie verwendet (Marchitto et al. 2000). Objekte, die sich besonders dafür eignen, sind zum Beispiel Korallenskelette, Muschelschalen, Otolithen (Gehörsteine bei Fischen) und koralline Algen (Wanamaker et al. 2009) (Abb. 2).

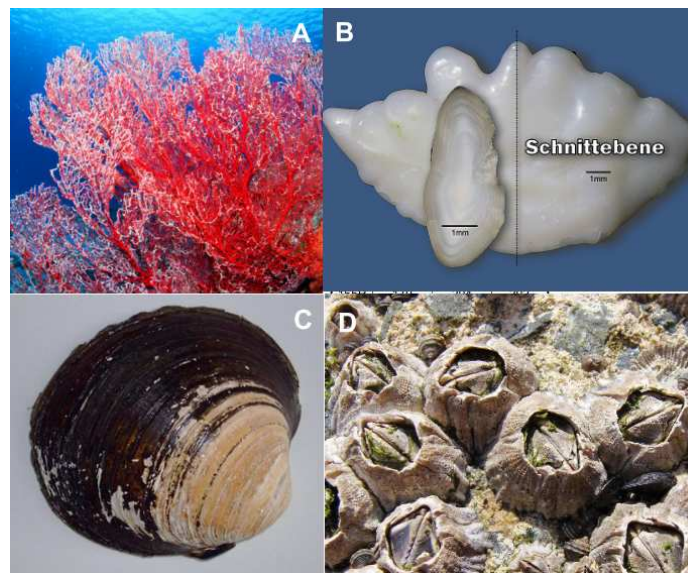


Abb. 2: Beispiele für marine Bioarchive: A – Rote Koralle (*Corallium*; Quelle: Seaweb), B – Otolith eines Seelachs (*Pollachius*; Quelle: B. Uebersch), C – Muschelschale (*Arctica islandica*; Quelle: F. Bauer), D – Seepocken (Balanidae; Quelle: wikipedia).

Aus Muschelschalen wurden beispielsweise Umweltveränderungen (Jones 1980, Lutz & Rhoads 1980, Schöne et al. 2005a), Veränderungen der Wassertemperatur (Henderson 1929, Kennish & Olsson 1975, Jones 1981, Goodwin et al. 2001), der Nahrungsverfügbarkeit (Page & Hubbard 1987, Sato 1997), der Salinität (Davis & Calabrese 1964) und der Wasserverschmutzung (Mutvei et al. 1996) hochauflösend rekonstruiert. Die Schalen einer Muschel sind dabei vergleichbar mit einem Kalender. Umweltparameter werden im variablen jährlichen Zuwachs des biogenen Hartteils in den Schalen gespeichert (Müller-Wiegmann, 2006).

1.1. Wachstumsinkremente – Einblicke in die Vergangenheit

In Abbildung 3 lassen sich dunkle Jahresringe bei einem Baum aus den gemäßigten Breiten erkennen. Sie entstehen durch eine Unterbrechung des Wachstums in den Wintermonaten. Solche Ringe werden auch als Wachstumsringe bezeichnet. Als Inkrement bezeichnet man den Bereich, der zwischen zwei aufeinanderfolgenden Jahresringen entsteht (Jones 1980, Ropes et al. 1984, Marchitto et al. 2000, Schöne et al. 2004, 2005b).



Abb. 3: . Querschnitt durch den Stamm eines Baumes. Jahresringe (dunkel) trennen Wachstumsinkremente (hell) voneinander. (Quelle: Victor Zastolskiy)

Viele Muschelschalen zeigen Wachstumsringe, die mit den Jahresringen der Bäume vergleichbar sind. Sie zeigen winterliche Wachstumsunterbrechungen an, die durch ein Zurückziehen des Mantels vom Schalenrand entstehen (Richardson 2001). Erst wenn sich die äußeren Wachstumsbedingungen wieder verbessern, breiten sich die Mantelränder erneut aus und bilden so ein neues Wachstumsinkrement (Richardson 2001).

Mit Hilfe der Inkrementbreite lassen sich Rückschlüsse auf jahreszeitliche, sowie jährliche Veränderungen von Klimabedingungen, wie der Wassertemperatur, ziehen (Schweingruber et al. 1991).

1.2. Fehler bei der Inkrementmessung

Es gibt bislang noch keine Möglichkeiten den Vorgang der Inkrementerfassung vollständig zu automatisieren. Der gesamte Vorgang beruht somit allein auf der visuellen Wahrnehmung und Einschätzung der zu untersuchenden Person. Die Interpretation von Wachstumsringen kann somit selbst bei mehrmaligem Kontrollzählen stark variieren.

Fehler, die bei der Inkrementmessung auftreten können sind:

- a) Inkremente werden nicht erkannt
- b) „falsche“ Inkremente werden gesehen
- c) die Inkrementbreite wird falsch gemessen

Jeder dieser Fehler pflanzt sich in der weiteren Berechnung – der Trendbereinigung und Synchronisation individueller Inkrementserien – fort.

1.3. Fragen

- a) Wie lassen sich Fehler bei Inkrementmessungen erkennen?
- b) Welche Möglichkeiten gibt es diese Fehler zu korrigieren?
- c) Welche Auswirkungen haben solche Korrekturen auf eine umfangreiche Masterchronologie?

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, eine bereits bestehende Masterchronologie der Muschelart *Arctica islandica* aus der Deutschen Bucht mit Hilfe der Dendrochronologie-Analysesoftware TSAP-Win auf Fehler zu prüfen, zu korrigieren und die Auswirkung der Korrekturen zu untersuchen.

2. Material und Methoden

2.1. Forschungsobjekt – *Arctica islandica*

Arctica islandica zeichnet sich vor allem durch ihre Langlebigkeit und ihr langsames Wachstum aus (Thompson et al. 1980a, 1980b, Schöne et al. 2005a). Mit nachgewiesenen (und radiometrisch bestätigten) 374 Jahren (Schöne et al. 2005a) und einem geschätzten Maximalalter von über 400 Jahren (Wanamaker et al. 2008), ist diese Muschelart das älteste jemals gefundene, nicht-koloniale Tier und wird daher als „bivalved Methuselah“ bezeichnet (Schöne et al. 2005a).

Aufgrund ihres enormen Lebensalters eignet sie sich, im Gegensatz zu anderen Muschelarten, besonders gut als Bioarchiv und somit für Umweltstudien über eine Zeitspanne von mehreren Jahrhunderten (Mutvei et al. 1996, Marchitto et al. 2000, Schöne et al. 2003a).

2.1.1. Systematik

Tabelle 1 fasst die taxonomische Hierarchie der Muschelart *Arctica islandica* zusammen.

Tab. 1: Systematische Einordnung der Art *Arctica islandica* (Quelle: <http://www.itis.gov/> - Stand: 05.08.11).

Reich	Animalia
Stamm	Mollusca
Klasse	Bivalvia (Linnaeus 1758)
Unterklasse	Heterodonta (Neumayr 1884)
Ordnung	Veneroida (Adams & Adams 1856)
Überfamilie	Arcticoidea (Newton 1891)
Familie	Arctidae (Newton 1891)
Gattung	<i>Arctica</i> (Schumacher 1817)
Art	<i>Arctica islandica</i> (Linnaeus 1767)
Synonyme	<i>Cyprina islandica</i>

2.1.2. Verbreitung und Vorkommen

Arctica islandica (Linnaeus, 1767), auch genannt Ocean Quahog oder Islandmuschel, ist eine an der West- und Ostküste des Nordatlantiks häufig vorkommende und weit verbreitete Art der Klasse Bivalvia. Ihr Vorkommen erstreckt sich entlang der Westküste Europas über die Bucht von Cardiz in Spanien bis nach Island und an der Küste Nordamerikas von Cape Hatteras in North Carolina, USA, bis in die kanadische Arktis im Nordwestatlantik (Nicol 1951, Witbaard et al. 1999, Dahlgren et al. 2000). Im europäischen Raum hat sie eine weite Verbreitung um die Britischen Inseln, die Faröer und Shetland-Inseln, über Island bis nach Spitzbergen (Dahlgren et al. 2000). Zudem kommt sie, neben der Nordsee, auch in der Ostsee vor (Brey et al. 1990, Witbaard & Bergmann 2003).

Zu finden ist sie in Tiefen von ca. 10 bis 280 m (Thompson et al. 1980a). Sie lebt nur knapp unterhalb der Sedimentoberfläche und ist vorzugsweise im Sediment vergraben (Merrill et al. 1969, Thompson et al. 1980b, Witbaard & Bergmann 2003).

2.1.3. Wachstum

Die Bildung von Wachstumsringen findet in der Hauptlaichzeit statt, welche etwa von September bis Mitte November andauert (Jones 1980, Schöne et al. 2005a). Sie können sich aber auch während der kalten, nahrungsarmen Winterzeit (Witbaard et al. 1994, 2003, Schöne et al. 2005c) bilden. In dieser stellen die Wassertemperatur und die Nahrungsverfügbarkeit die limitierenden Faktoren dar (Witbaard et al. 1994, Witbaard et al. 2003, Schöne et al. 2005b).

Die Wachstumsringe sind analog zu den Jahresringen (Richardson 2001) bei Bäumen („tree of the North Atlantic shelf“, Thompson & Jones 1977) und lassen sich mit diversen Labor- und Färbemethoden besser sichtbar machen. Es lässt sich ableiten, dass in „guten“ Jahren, sprich bei optimaler Wassertemperatur und Nährstoffverfügbarkeit, ein größerer jährlicher Inkrementzuwachs zu verzeichnen ist, als in „schlechten“ Jahren (Marchitto et al. 2000).

Neben der Bildung von periodischen Wachstumsringen, kann es zur Ausbildung von aperiodischen Wachstumsringen kommen, welche durch Störungen in der Umwelt oder während der Fortpflanzung verursacht werden können (Schöne et al. 2005b) (Abb. 4). Bei periodischen Wachstumsringen handelt es sich um Wachstumsringe, die z.B. im Gezeitenrhythmus, täglich, im Lunarzyklus und jährlich angelegt werden.

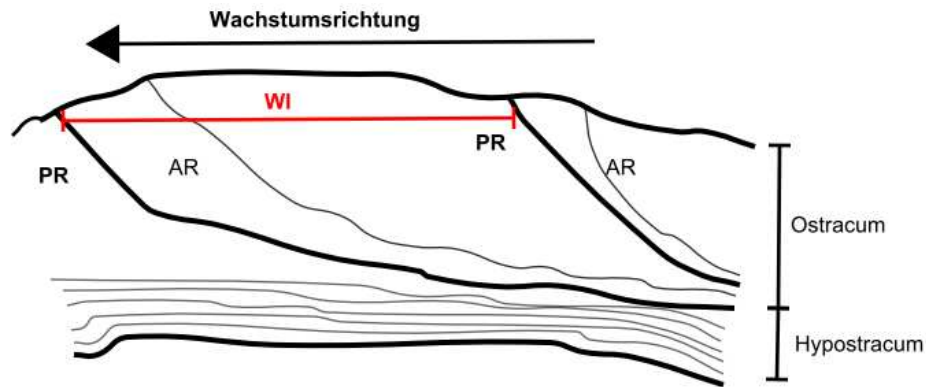


Abb. 4: Schematische Darstellung von Wachstumringen und -inkrementen (PR = periodische Hauptwachstumsringe/Jahresringe, AR = aperiodische Wachstumsringe, WI = Wachstumsinkrement).

Untersuchungen zum Wachstum von *Arctica islandica* ergaben, dass die Wachstumsrate mit zunehmendem Lebensalter exponentiell abnimmt. Während die Tiere in den ersten Lebensjahren ein sehr hohes Wachstum verzeichnen (mehrere Millimeter/Jahr), so wird dieses mit zunehmendem ontogenetischem Alter geringer (wenige $\mu\text{m}/\text{Jahr}$). Diese Veränderung in der Wachstumsrate wird als „ontogenetischer Wachstumstrend“ bezeichnet. Dabei lassen sich ähnliche Muster mit hohen Übereinstimmungen im Wachstum bei Individuen innerhalb einer Population erkennen (Witbaard & Duineveld 1990, Marchitto et al. 2000).

2.2. Untersuchungsgebiet

Helgoland (54°10'54.6" N, 07°52'56.6" E) ist die einzige Hochsee- und Felseninsel Deutschlands. Sie liegt zentral innerhalb der Deutschen Bucht und rund 70 km vom Festland entfernt (Abb. 5). Seit 1720 besteht Helgoland aus der Hauptinsel und der vorgelagerten Düne, welche nach einer Sturmflut von der Hauptinsel getrennt wurde.



Abb. 5: Kartenausschnitt Norddeutschlands mit Helgoland (rote Markierung am linken Bildrand). (Quelle: J. D. Richter)

Die einmalige Flora- und Faunawelt der Insel beruht auf dem milden, vom Golfstrom begünstigten Hochseeklima und bietet ein Siedlungsgebiet für eine Vielzahl von Pflanzen und Tieren, die ansonsten in der gesamten Bundesrepublik nicht anzutreffen sind.

Aus diesem Grund wurde Helgoland bereits vor über 150 Jahren für biologische Forschungszwecke genutzt, sodass es 1892 zur Gründung der „Königliche Biologische Anstalt Helgoland“ kam. Diese gehört seit 1998 dem Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung an.

Die Insel beinhaltet mit den Naturschutzgebieten (NSG) „Helgoländer Felssockel“ (seit 1981), das größte NSG Schleswig-Holsteins und dem „Lummenfelsen der Insel Helgoland“ (seit 1964), das kleinste NSG Deutschlands.

2.3. Probennahme

In dieser Studie wurden 25 bereits präparierte Schalen verwendet, deren Inkrementbreiten bereits in einer vorangegangenen Studie (Scheuer 2008) gemessen wurden. Von den 25 untersuchten Schalen, wurden 17 im August 2005, in 40 m Wassertiefe bei den Koordinaten 54°09'02" N / 07°47'06" E bis 54°09'07" N / 07° 9'06" E, gefangen.

Unmittelbar nach dem Fang wurden die Weichteile entfernt, sowie die beiden Schalenhälften voneinander getrennt. Die Muschelschalen erhielten als Codierung eine fortlaufende Nummerierung und zudem die Einordnung in linke (L) bzw. rechte (R) Schalenhälfte.

Zusätzlich wurden sechs weitere Schalen aus der Sammlung des Aquariums der Biologischen Anstalt Helgoland (BAH) von dessen Leiter Herrn Leusmann zur Verfügung gestellt, welche ebenfalls aus dem Gebiet um Helgoland stammen. Diese erhielten die Codierung „HM“ für Helgoland Museum, sowie eine fortlaufende Nummerierung.

Zwei Schalen mit der Codierung „A10L“ sowie „A11L“ sind eine Leihgabe aus dem Zoologischen Museum Kiel und wurden bereits präpariert von Bernd Schöne zur Verfügung gestellt.

2.4. Präparation der Schalen

Die Präparation, der im August 2005 gesammelten Schalen, wurde im Rahmen der zuvor bereits erwähnten Studie (Scheuer 2008) durchgeführt.

Im ersten Schritt wurde die rechte Schalenhälfte für 15-20 Minuten (je nach Schalendicke) in ein 12%-iges NaOCl-Bad gelegt, um deren Periostracum aufzulösen. Um letzte Reste dessen zu entfernen, wurde die Schale nun mit Alkohol (deionisiert) gespült und anschließend an der Luft getrocknet.

Auf der Innen- und Außenseite der Schale wurden daraufhin mit einem Bleistift sowohl die Linie des stärksten Wachstums (LSG – Line of strongest growth), als auch zwei parallele Schnittlinien beidseitig von dieser im Abstand von ca. 0,5 cm aufgezeichnet. Letztere beschreiben die Schnittlinien, an denen im folgenden Verlauf gesägt werden soll (Abb. 6).

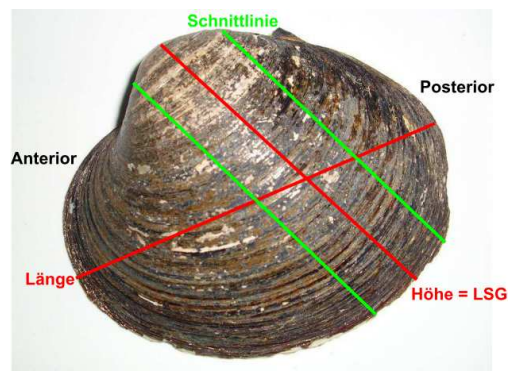


Abb. 6: Darstellung einer linken Schalenhälfte von *Arctica islandica* mit entsprechenden Abmessungen, sowie Schnittlinien für die Präparation.

Zuvor wurde jedoch ein 2-Komponenten-Metallklebstoff (JB-Kwik) auf dieser Fläche aufgetragen, damit es beim Sägen zu keinen Absplitterungen und Beschädigungen der Schale kommt. Dabei wurde zunächst die Innenseite und nach einem Tag zur Aushärtung, auch die Außenseite bestrichen.

Nach einem weiteren Tag zur Trocknung des Klebstoffes, wurde mit Hilfe einer Tischkreissäge (FSK/E von Proxxon, Diamantsägeblatt) die markierte Fläche um die Linie des stärksten Wachstums, an der dorsalen Seite beginnend, herausgetrennt.

Die anteriore Schnittfläche wurde zunächst mit Schleifpapier (BUEHLER-MET® II P1000) abgeschliffen, um sie anschließend erneut mit JB-Kwik auf einem vorbereiteten Objektträger zu fixieren. Um das Präparat später in der Niedertourensäge fixieren zu können, wurde auf der anderen Seite des Objektträgers ebenfalls mit JB-Kwik ein kleiner Holzblock (ca. 2,5 x 2 cm) aufgeklebt.

Nach einem weiteren Tag zur Trocknung des Komponentenklebers wurde nun das präparierte Schalenstück mit der Niedertourensäge (Buehler Isomet™, Isocut-Diamantsägeblätter 102 x 0,3 mm; Abb. 7) entlang der Linie des stärksten Wachstums gesägt.



Abb. 7: Niedertourensäge Buehler Isomet™ Isocut ohne Sägeblatt.

Anschließend wurde die Schnittfläche mit einer Schleifmaschine (Buehler Alpha wheels, 2 speed grinder polisher; Abb. 8) mit drei unterschiedlich feinen Schleifpapieren (P1200, P2500, P4000) vorgeschliffen, um daraufhin mit zwei Diamant-Suspensionen (1 und 0,5 μm Korngröße) feinpoliert zu werden. Zwischendurch wurde die Oberfläche immer wieder unter einem Stereomikroskop kontrolliert, um sicher zu gehen, dass eine ebene Fläche entsteht.



Abb. 8: Schleifmaschine Buehler Alpha wheels, 2 speed grinder polisher.

Nach dem Polieren wurden die noch an dem Objektträger anhaftenden Holzklötzchen in einem mehrstündigen Wasserbad abgelöst. Abschließend wurden die Präparate in einem Ultraschallbad für ca. 15 Min. gereinigt.

Das anschließende Ätzen und Anfärben der präparierten Schnitte erfolgte nach der erstmals 1979 von Harry Mutvei beschriebenen und nach ihm benannten Methode. Dabei wurden die Schnitte für 15-20 Min. (abhängig von Schalendicke) in Mutvei'sche-Lösung gelegt. Die drei wesentlichen Komponenten dieser Lösung sind Alcianblau (5 – 10 g), Glutaraldehyd (500 ml, 25%-ig) und verdünnte Essigsäure (500 ml, 1%-ig). Während die verdünnte Essigsäure die Querschnittsoberfläche anätzt, färbt Alcianblau anschließend die organischen Bestandteile (Mucopolysaccharide) blau an. Glutaraldehyd ist ein schnell einziehendes Fixierungsmittel und fixiert sowohl wasserlösliche, als auch wasserunlösliche organische Bestandteile (Goldberg 2001).

Ein mit Mutvei'scher-Lösung angefarbter Schalenquerschnitt wurde in Abbildung 9 dargestellt.



Abb. 9: Mit Mutvei'scher-Lösung blau angefarbter Schalenquerschnitt fixiert auf einem Objektträger mit Millimeterpapier.

Das Ergebnis dieser Färbemethode ist ein dreidimensionales Relief mit säureresistenten Erhebungen (Jahresringen) und geätzten Einsenkungen (Inkremente) in verschiedenen Blautönen (Schöne et al. 2005c).

2.5. Altersbestimmung und Inkrementmessung

Die dunkleren Linien wurden als jährliche Wachstumsringe interpretiert, der Abstand zwischen zwei aufeinander folgenden Wachstumsringen, als Inkrement.

Die individuelle Altersbestimmung jeder Muschel wurde durch Auszählen der Wachstumslinien unmittelbar am Schalenrand bestimmt. Da bei allen Individuen das Fangjahr bekannt ist und jedes Inkrement für ein Jahr steht, kann jedes von ihnen einem bestimmten Kalenderjahr zugeordnet werden (Abb. 10).

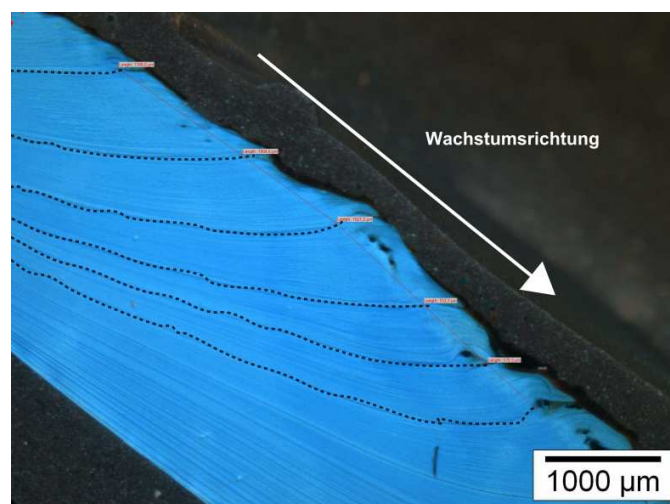


Abb. 10: Detaillierter Ausschnitt aus dem Schalenquerschnitt von *A. islandica* nach Anfärben mit Mutvei'scher-Lösung. Hervorgehobene Linien = Wachstumslinien.

Als Nachweis wurden mit Hilfe eines Auflicht-Stereomikroskops (Research Stereomikroskop System SZX 12 von Olympus, max. Vergrößerung 90x) mit angeschlossener CCD-Farbkamera (Olympus U-CMAD3 Colorview I) digitale Aufnahmen der Teilausschnitte angefertigt. Mit Hilfe der Bildbearbeitungssoftware AnalySIS 5.0 (Copyright © 1986-2004 Soft Imaging System GmbH) konnten die Inkremente in den Schalen zudem gleichzeitig vermessen werden (Abb. 11).

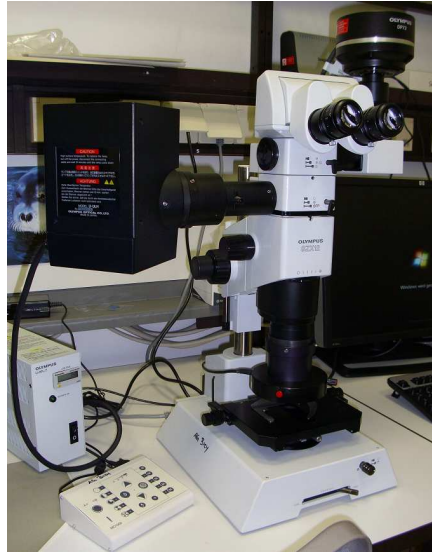


Abb. 11: Auflicht-Stereomikroskops Research Stereomikroskop System SZX 12 von Olympus (max. Vergrößerung 90x) mit angeschlossener CCD-Farbkamera (Olympus U-CMAD3 Colorview I).

Aufgrund der starken Schalenwölbung nahe des Umbo, sind auch die Inkremente in diesem Bereich stärker gebogen, als die Inkremente, die im äußeren Randbereich liegen. Dies würde, bei der hier verwendeten linearen Approximation der Inkrementbreite, zu einem unverhältnismäßig großen Fehler führen. Daher wurden bei allen Schalen sowohl die ersten fünf Inkremente, als auch das letzte Inkrement bei den Berechnungen nicht berücksichtigt, da letzteres dem letzten und unvollendeten Lebensjahr der Muschel entspricht.

2.6. Entfernung des ontogenetischen Trends

Als ontogenetischer Wachstumstrend wird die Veränderung der Wachstumsrate bezeichnet, bei der mit zunehmendem Alter das Wachstum des Individuums abnimmt. Dabei überlagert dieser das Signal der Umweltparameter, die man untersuchen möchte. Deshalb wird dieser Trend bestmöglich modelliert, um ihn anschließend aus den Inkrementdaten zu entfernen. Das Modellieren des Schalenwachstums und Entfernen von nicht-klimatischen Störgrößen bezeichnet man als Standardisierung (Fritts 1971). Dafür lassen sich eine Vielzahl statistische Methoden, unter anderem auch aus der Dendrochronologie, verwenden (Cook & Peters 1981, Cook & Kairiukstis 1990).

2.6.1. Festlegung eines geeigneten Spline

Ein Spline ist eine Funktion, die sich stückweise aus mehreren Polynomen zusammensetzt, die über Knotenpunkte an ihren Enden miteinander verbunden sind. In den meisten Fällen werden hierfür „cubic splines“ benutzt. Das sind Splines, die sich speziell durch eine Aneinanderkettung von Polynomen 3. Grades zusammensetzen. Mit Hilfe dieser Aneinanderkettung mehrerer einzelner Polynome ist es möglich einen Zusammenhang zwischen zwei Parametern (in diesem Fall: ontogenetisches Alter und Inkrementlänge) sehr genau zu beschreiben. Der Spline eignet sich daher, um den Verlauf des Schalenwachstums der Muschel zu modellieren.

Die Methode des „cubic smoothing spline“ zur Standardisierung von Jahresringen wurde erstmals 1981 von Cook & Peters in der Dendrochronologie detailliert beschrieben und angewandt.

Dieses Verfahren macht keine Annahmen über die Form der Wachstumskurve und ist daher flexibler als eine einzelne Funktion, wie z. B. ein Polynom n-ten Grades (Cook & Peters 1981). Trotzdem ist die Methode des „cubic smoothing spline“ keine absolut fehlerfreie Methode, um nicht-klimatische Redundanzen zu entfernen, da ein gewisser Betrag an Informationen verloren geht (Cook & Peters 1981).

Im ersten Schritt wird ein Spline mit Hilfe eines Programmes (z.B. JMP®) erstellt, der sich möglichst genau dem Verlauf der tatsächlichen Inkrementdaten annähert. Bei der Erstellung eines Splines ist der Parameter λ (lambda) entscheidend für die „Steifheit“ des Splines. Je niedriger der Wert für λ , desto geringer ist die Annäherung an den gemessenen Verlauf. Jedoch steigt mit wachsendem λ zeitgleich die Filterfunktion, was ein Entfernen von entscheidenden Informationen zur Folge haben kann. Daher ist es sehr wichtig, ein geeignetes Maß für λ zu finden (Abb. 12).

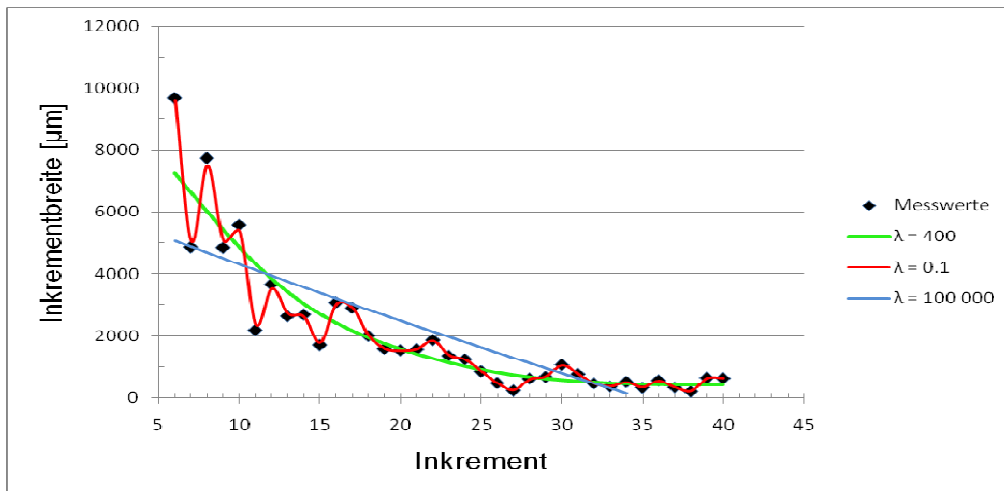


Abb. 12: Darstellung der abnehmenden Inkrementbreite mit zunehmender Inkrementzahl. Messwerte (schwarz) mit unterschiedlichen Splines (grün – $\lambda = 400$; rot – $\lambda = 0.1$; blau – $\lambda = 100\,000$).

2.6.2. Berechnung des standardisierten Wachstumsindex

Im folgenden Schritt wird der Quotient zwischen dem Wert der tatsächlich gemessenen Inkrementlänge („observed“) und dem Wert der vorausgesagten Inkrementlänge („predicted“), der sich aus dem Spline ergibt, berechnet, um den dimensionslosen Index für das Wachstum GI (GI = Growth Index) zu erhalten:

$$GI = \text{„observed“} / \text{„predicted“}$$

Im Anschluss an die Trendbereinigung findet eine Z-Transformation statt. Mit Hilfe der Z-Transformation (= Normalisierung) erhält man die relativen (positiven oder negativen) Abweichungen der einzelnen Inkremente vom standardisierten Mittelwert. Erst durch diesen Schritt ist es möglich, Zeitreihen mit einem standardisierten, normalverteilten (Mittelwert = 0; Standardabweichung = 1) Wachstumsindex zu bilden (SGI = Standardized Growth Index), um somit direkte Vergleiche im Wachstums zwischen allen Schalen ziehen zu können (Müller-Wiegmann, 2006).

$$SGI = (GI - M_{GI}) / SD_{GI}$$

GI	Wachstumsindex
M_{GI}	Mittelwert der GI -Werte aller Inkremente
SD_{GI}	Standardabweichung der GI -Werte aller Inkremente

2.7. Erstellung einer Masterchronologie

Da jedem Wachstumsinkrement ein bestimmtes Kalenderjahr zugeordnet werden kann, ist es nun möglich, mit Hilfe der ermittelten SGI-Werte der einzelnen Inkremente, eine Zeitreihe zu erstellen. Bei „ausreichender“ Synchronität einzelner Zeitreihen, können diese zu einer Masterchronologie zusammengefügt werden. Zusätzlich kann durch das Zusammenfügen von einzelnen Zeitreihen die Masterchronologie verlängert und die Synchronität in sich überlagernden Bereichen verstärkt werden. Da hier mit zunehmendem Probenumfang die Masterchronologie verstärkt wird, wird die Amplitude der Masterchronologie mit beeinflusst. Mit steigendem Probenumfang nimmt diese, zusammen mit der Varianz ab und ermöglicht so exaktere Aussagen.

Anhand der originalen Inkrementdaten von Scheuer (2008) wird eine originale Masterchronologie erstellt (MC_{Orig}).

2.8. Manuelle Korrektur der vorhandenen Werte

Beim Erstellen von Masterchronologien aus einzelnen Zeitreihen gibt es grundlegende Schwierigkeiten.

Durch „falsche“ zusätzliche oder fehlende Inkremente bzw. durch unkorrekt vermessene Werte entstehen Fehler, die sich in der Trendbereinigung (Kap. 2.6.) und Berechnung fortpflanzen. Solche Fehler gilt es zu finden und zu verbessern. Hierfür werden, wie in Abbildung 13, die Messwerte für die Inkrementbreite jeder einzelnen Schale mit einem „geeigneten“ Spline dargestellt, um Abweichungen der Messwerte vom erwarteten Wachstumsverlauf zu erfassen (rot markiert). Diese Abweichungen können sowohl Messfehler sein, als auch eine Folge fehlerhaft eingefügter Inkremente oder durch Inkremente, die nicht als solche erkannt wurden. Sie können jedoch auch statistische Abweichungen, bedingt durch das individuelle Wachstum des Organismus, sein. Diese Stellen werden anschließend durch Überprüfen der jeweiligen Schalenausschnitte kontrolliert und nötigenfalls korrigiert.

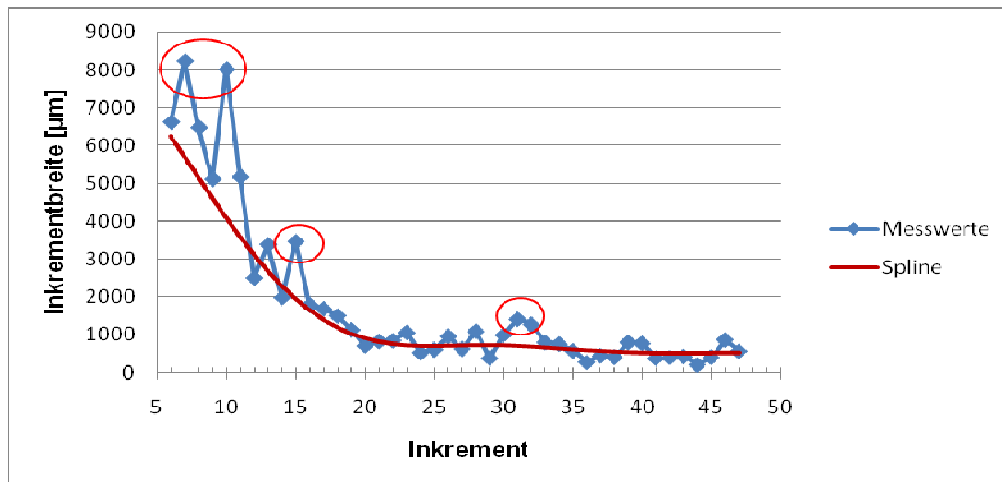


Abb. 13: Messwerte für abnehmende Inkrementbreite mit zunehmendem Inkrement einer einzelnen Schale (blau). Der Spline ($\lambda = 400$; rot) dient als erwarteter Verlauf der Inkrementabnahme. Rote Markierungen kennzeichnen einzelne Inkremente, die von diesem erwarteten Verlauf abweichen und überprüft werden sollten.

Aufgrund der veränderten Messwerte muss nun im Zuge der Trendbereinigung erneut ein passender Spline gefunden werden. Dabei ist es wichtig, dass dieser Spline für alle Schalen gültig und passend ist. Da sich nun der Wert für den Spline ändert, ändern sich ebenso die Werte des standardisierten Wachstumsindex. Mit den aufgrund der manuellen Korrektur veränderten SGI-Werten wird anschließend eine zweite Masterchronologie erstellt (MC_{Man}).

2.9. Überprüfen der korrigierten Messwerte mit Hilfe von TSAP-Win

Messungen, selbst wenn sie mit großer Sorgfalt durchgeführt wurden, können noch immer Fehler enthalten. Mit Hilfe des Dendrochronologie-Analyseprogramms TSAP-Win sollen selbst diese „versteckten“ Fehler gefunden und korrigiert werden können.

TSAP-Win™ (RINNTECH®) wurde seit seiner Einführung 1991 zu einem Standardprogramm für Zeitreihenanalysen und Präsentationen in der Dendrochronologie. Das Programm bietet eine Vielzahl dendrochronologischer Werkzeuge: Messung, Editieren, Synchronisieren, Chronologien-Bildung, mathematische Analyse und graphische Darstellung von Zeitreihen.

Im Gegensatz zur manuellen Korrektur, beruht die Überprüfung mit dem Dendrochronologie-Analyseprogramm TSAP-Win auf dem Vergleich der Synchronität zweier Zeitreihen (einzelne Zeitreihe mit Masterchronologie).

Die zuvor erstellte, manuell-korrigierte Masterchronologie (MC_{Man}) dient als Referenz zur Überprüfung der einzelnen Zeitreihen, die sie beinhaltet. Es ist aber auch möglich, eine „externe“ Referenz-Chronologie zu verwenden.

Mit Hilfe des sogenannten „Cross-Date Check“ lässt sich nun ein partielles wiggle-matching durchführen.

Als „wiggle-matching“ (engl.: wiggle = Gewackel, Schwankung; to match = abgleichen) bezeichnet man das hin- und herschieben von Chronologien entlang einer Zeitskala. Auf diese Weise lassen sich auch Zeitreihen, deren zeitliche Einordnung bislang unbekannt war, mit einer bereits bestehenden (Master-)Chronologie, deren zeitliche Einordnung bekannt ist, synchronisieren. Dabei kommt es sowohl auf die maximale Korrelation beider Zeitreihen, als auch auf die minimale Abweichung beider zueinander an (Monnin et al. 2004).

Das partielle wiggle-matching zeichnet sich im Gegensatz zum generellen dadurch aus, dass hier die einzelne Zeitreihe zeitlich eingeordnet ist und durch mehrfache Segmentierung gegen die Masterchronologie (Referenz) verschoben wird (Abb.14).

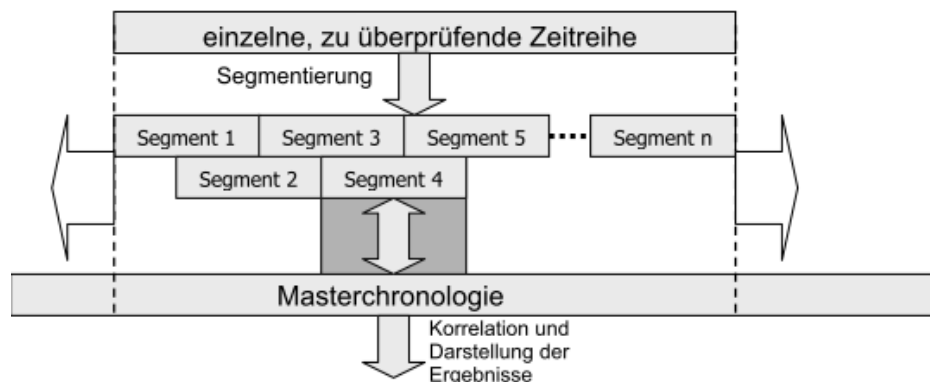


Abb. 14: Schematische Darstellung eines Cross-Date Check. Durch Segmentierung einer einzelnen Zeitreihe wird diese auf Synchronität mit der Masterchronologie überprüft (verändert nach TSAP-Win User Reference).

Dieses Prinzip des partiellen wiggle-matching wurde erstmals von Richard Holmes in einem Programmierprogramm mit dem Namen „COFECHA“ erprobt (Holmes 1983, Holmes et al. 1986).

Die hierfür relevanten statistischen Parameter sind die Gleichläufigkeit (Glk), der Cross-Date Index (CDI) und die Kreuzkorrelation (Cross correlation – CC).

- a) Die Gleichläufigkeit ist eine häufig angewandte Messtechnik, um die Qualität der Übereinstimmung zwischen Zeitreihen zu bestimmen. Die Gleichläufigkeit wurde als spezielles Werkzeug für die Dendrochronologie entwickelt (Eckstein & Bauch 1969).
- b) Der Cross-Date Index ist ein Parameter, der sowohl die Qualität der Übereinstimmung zweier Zeitreihen berücksichtigt, als auch die Übereinstimmungen von Extremwerten in sogenannten „markanten Jahren“.
- c) Die Kreuzkorrelation beschreibt die Korrelation zweier Signale bei unterschiedlicher Zeitverschiebung.

Die dafür verwendeten Gleichungen und deren Herleitungen sind in Tab. A (Anhang) zusammengefasst.

Durch die Korrektur mit dem Analyseprogramm wird nun eine dritte Masterchronologie erstellt, die sowohl die manuelle, als auch die Korrektur mit TSAP-Win beinhaltet (MC_{TSAP}).

2.10. Frequenzanalyse

Die Frequenzanalyse ist eine Methode, um Zeitreihen auf zyklische Muster zu untersuchen und die Frequenz dieser auftretenden Muster zu ermitteln. Die Frequenz f beschreibt die Wellenlänge mit Anzahl der Zyklen pro Zeiteinheit. Die Periode T ist das reziproke der Frequenz ($T = 1/f$) und gibt die Zeit an, die für einen vollständigen Zyklus benötigt wird.

Mit Hilfe des Softwareprogramms JMP® wurden dafür zunächst die Spektraldichten der drei Masterchronologien (MC_{Orig} , MC_{Man} , MC_{TSAP}) für den Frequenzbereich von 0,067 bis 0,5 $Jahr^{-1}$ errechnet. Anschließend wurden die drei Spektren Z-transformiert ($\mu = 0$; $\sigma = 1$), um so die standardisierten Spektraldichten der drei MC zu erhalten.

Um die Auswirkungen der beiden Korrekturen auf die originale Masterchronologie zu verdeutlichen, wurden jeweils die Differenzen der standardisierten Spektraldichten der drei MC erstellt.

3. Ergebnisse

3.1. Altersbestimmung und Wachstum

In Abbildung 15 sind das Alter und die zeitliche Einordnung jeder in dieser Studie verwendeten Schale dargestellt. Während die meisten der untersuchten Muscheln von ca. 1950 – 2004 lebten, existierten nur wenige in den Jahren davor zeitgleich.

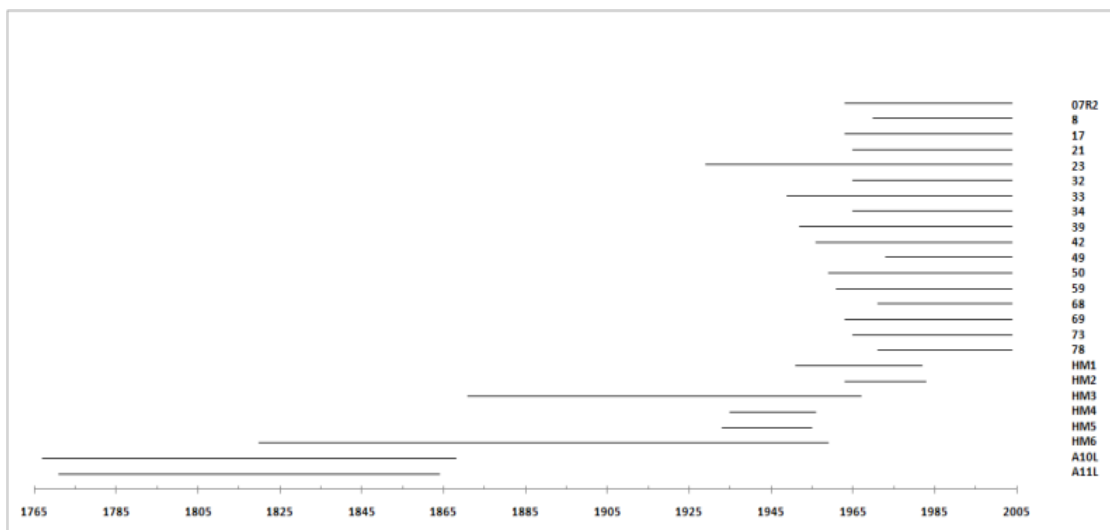


Abb. 15: Alter der verwendeten Schalen und ihre zeitliche Einordnung von 1767 – 2004.

Abbildung 16 zeigt, dass bei allen untersuchten Schalen im Mittel das Wachstum exponentiell mit dem ontogenetischen Alter abnimmt. Die ersten fünf Inkremente wurden bei allen Schalen, aufgrund der starken Krümmung des Umbo, nicht berücksichtigt.

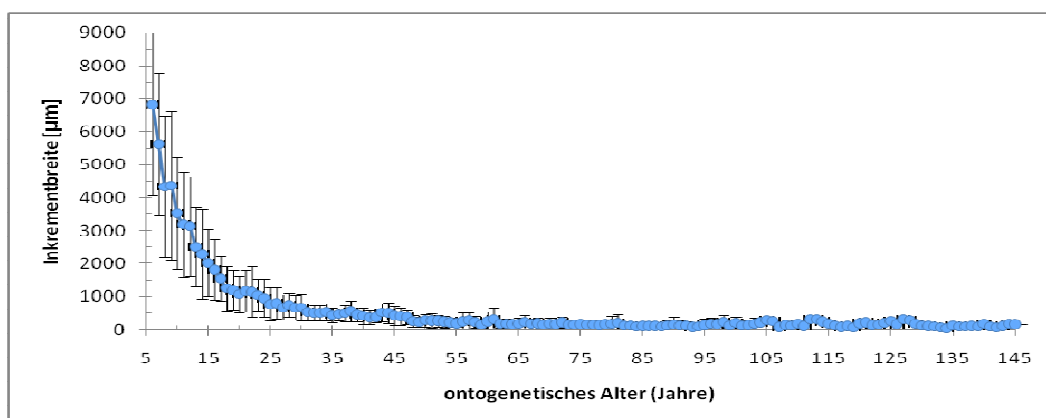


Abb. 16: Mittlere jährliche Inkrementbreite mit jeweiliger Standardabweichung für alle 25 untersuchten Schalen. Die ersten fünf Inkremente wurden nicht berücksichtigt.

3.2. Ergebnisse der Korrekturen

Abbildung 17 zeigt die originale Masterchronologie (MC_{Orig}) von Scheuer (2008).

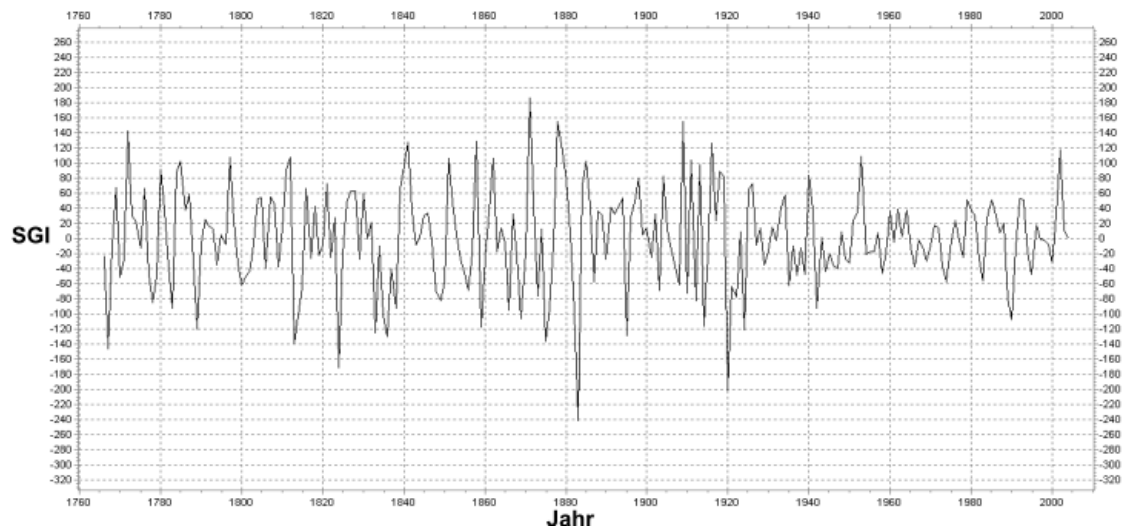


Abb. 17: Originale Masterchronologie aus der Studie von Scheuer (2008).

3.2.1. Manuelle Korrektur

Die Überprüfung „auffälliger“ Inkremente (Kap. 2.7.) führte zu insgesamt 41 Korrekturen. Dabei wurde bei 16 Schalen (64%) das erste Inkrement nicht berücksichtigt. In 16 Fällen wurde ein zusätzlicher Jahresring gefunden und so ein neues Inkrement erzeugt (Abb. 18) und in 9 Fällen wurde ein „falscher“ Wachstumsring entfernt und somit zwei Inkremente vereinigt (Abb. 19).

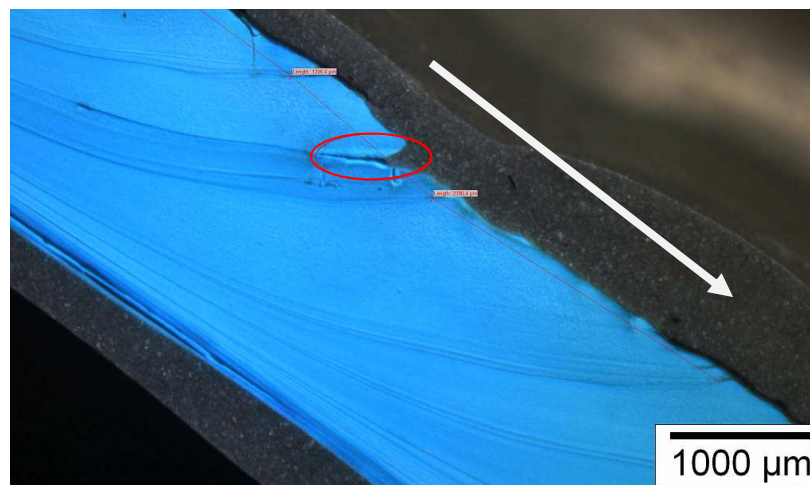


Abb. 18: Beispiel für das Einfügen eines zusätzlichen Ringes. Markierung gibt „auffälliges“ Inkrement an, welches durch Einfügen eines zusätzlichen Ringes aufgeteilt werden soll. Der Pfeil gibt die Wachstumsrichtung an.



Abb. 19: Beispiel für das Entfernen eines „falschen“ Ringes. Markierung gibt „auffälliges“ Inkrement an, welches durch Entfernen des „falschen“ Ringes zwei Inkremente zusammenfügen soll. Der Pfeil gibt die Wachstumsrichtung an.

Tabelle 2 fasst alle vorgenommenen manuellen Korrekturen zusammen.

Tab. 2: Auflistung aller vorgenommenen manuellen Korrekturen.

	Ring eingefügt	Ring weggelassen	1. Inkrement weggelassen
07R2	1	-	X
8	1	-	-
17	-	-	X
21	-	-	X
23	1	-	-
32	1	1	-
33	-	1	X
34	-	-	X
39	2	-	-
42	1	1	-
49	2	1	-
50	3	1	X
59	1	1	-
68	-	-	X
69	-	-	-
73	1	-	X
78	-	1	X
HM1	1	-	X
HM2	-	-	X (1. + 2. Inkr. weggelassen)
HM3	-	-	X
HM4	-	-	X
HM5	-	-	X
HM6	1	2	-
A10L	-	-	X
A11L	-	-	X

Abbildung 20 zeigt die manuell korrigierte Masterchronologie (MC_{Man}).

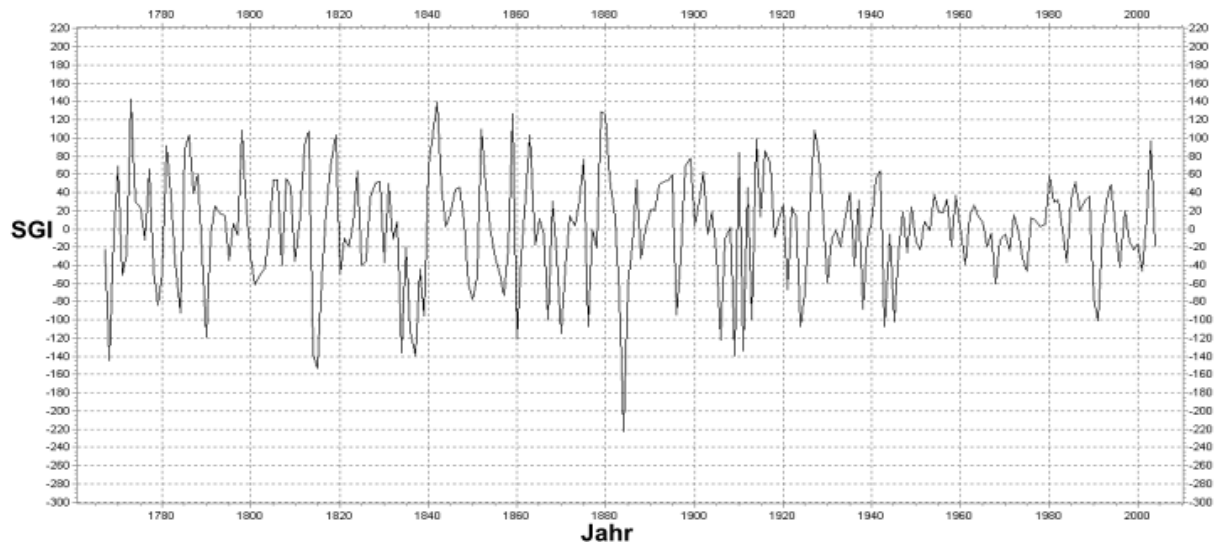


Abb. 20: Masterchronologie nach manueller Korrektur der vorhandenen Daten.

3.2.2. Korrektur mit TSAP-Win

Die Korrektur mit Hilfe des Dendrochronologie-Analyseprogramms TSAP-Win wurde beispielhaft anhand der Schale 78 dargestellt.

Abbildung 21 zeigt mit Hilfe der „Cross-date Check“-Funktion die einzelne Zeitreihe zusammen mit der manuell überarbeiteten Masterchronologie (MC_{Man}). Markante Ausschläge in der MC_{Man} wurden farblich markiert. Grün, wenn Chronologie und Zeitreihe der Schale in diesem Jahr den gleichen Trend – egal, ob positiv oder negativ – aufweisen, rot hingegen, wenn keine Synchronität besteht.

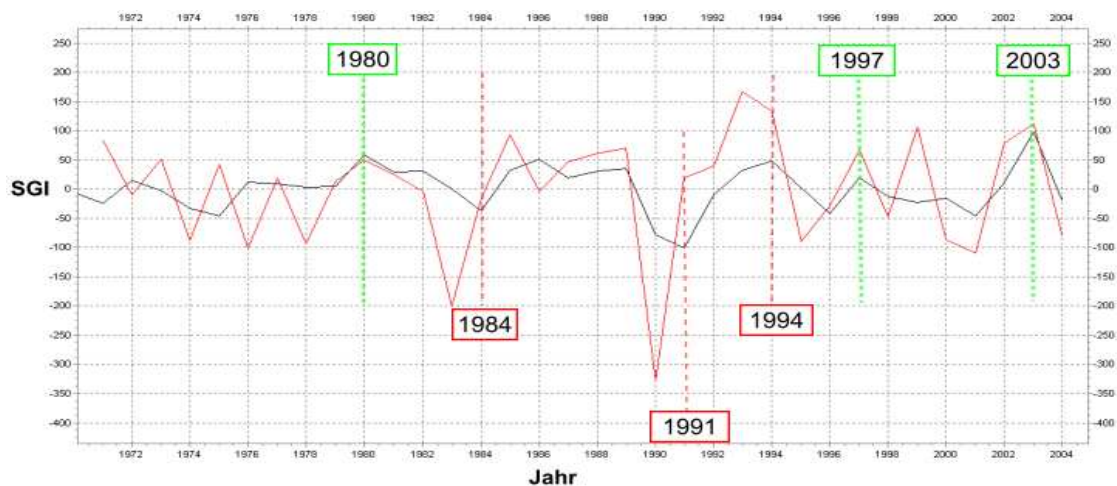


Abb. 21: Vergleich der Zeitreihe von Schale 78 (rot) mit Masterchronologie (schwarz). Grüne Markierungen (1980, 1997, 2003) zeigen markante Jahre, an denen beide Chronologien synchron verlaufen. Rote Markierungen (1984, 1990, 1994) zeigen markante Jahre, an denen beide Chronologien nicht synchron verlaufen. Die Zeitreihe ist jeweils um ein Jahr verschoben.

Im ersten Schritt wird zunächst durch Entfernen eines möglichen „falschen“ Inkrements vor dem Jahr 1997 die Zeitreihe um ein Jahr verschoben, um die nicht-synchronen markanten Jahre an die MC_{Man} anzupassen. Eine mögliche Stelle, um ein solches „falsches“ Inkrement zu entfernen, ist 1996.

Vergleichend wurde nun an entsprechender Stelle in der Schale überprüft, ob ein solcher „falscher“ Ring vorhanden ist (Abb. 22).

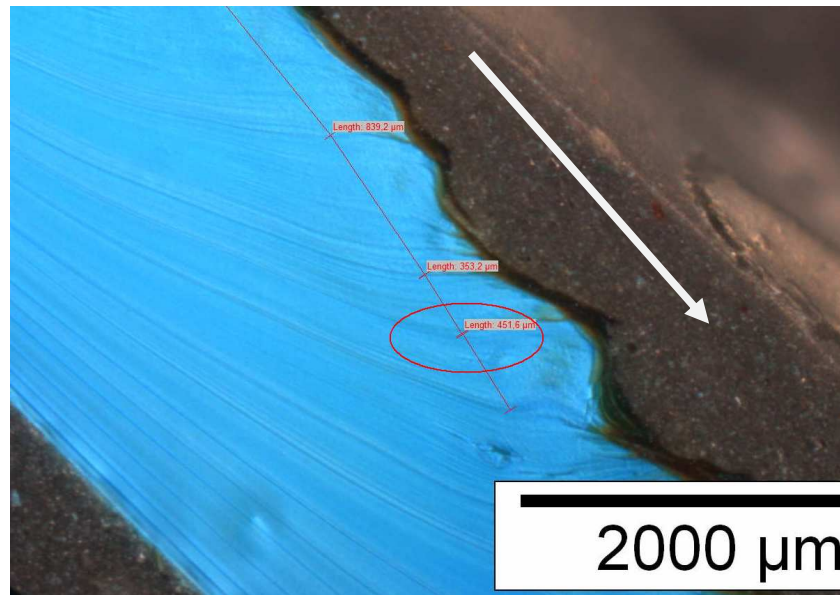


Abb. 22: Detailausschnitt der Schale 78. Rote Markierung zeigt jene Stelle mit „falschem“ Wachstumsring (1996). Der Pfeil gibt die Wachstumsrichtung an.

Nach der Überprüfung und dem Finden eines „falschen“ Wachstumsringes, wurde dieser entfernt. In Abbildung 23 wurde die Auswirkung durch das Entfernen des Ringes dargestellt. Durch das Entfernen des „falschen“ Ringes hat sich die Zeitreihe der Schale 78 verschoben, sodass die drei zuvor nicht synchronen, markanten Jahre (1984, 1991, 1994) nun synchron zur MC_{Man} sind. Durch die Verschiebung hat sich jedoch das zuvor noch markante Jahr 1980 mitverschoben.

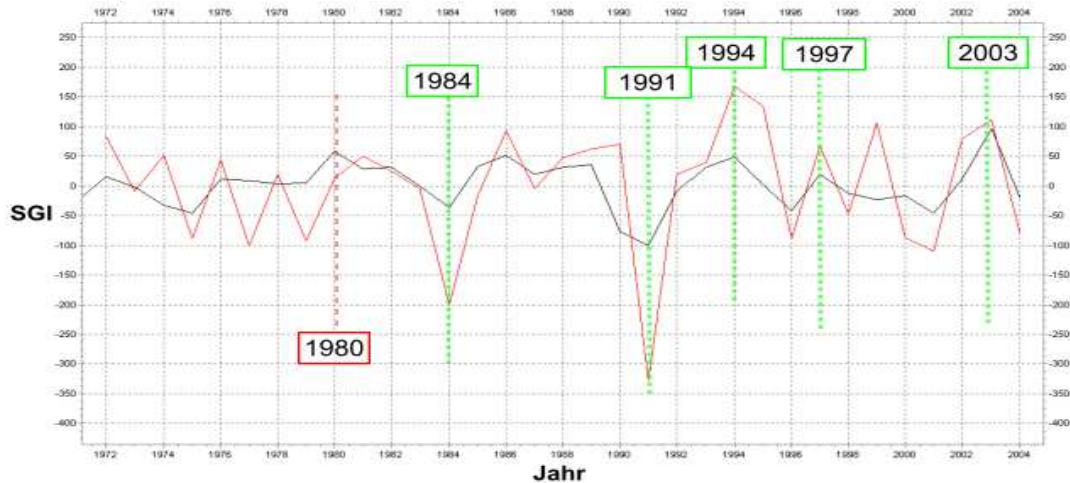


Abb. 23: Vergleich der einzelnen Zeitreihe von Schale 78 (rot) mit Masterchronologie (schwarz) nach Einfügen eines zusätzlichen Wachstumsrings (1980) in die Zeitreihe.

Im nächsten Schritt soll durch das Einfügen eines „übersehenen“ Rings vor dem Jahr 1984 die Zeitreihe um ein Jahr verschoben werden, um das nicht-synchrone markante Jahr 1980 erneut an die MC_{Man} anzupassen. Eine mögliche Stelle, um einen solchen „übersehenen“ Ring einzufügen, ist 1982.

Vergleichend wurde nun an entsprechender Stelle in der Schale überprüft, ob ein solcher „übersehener“ Ring vorhanden ist (Abb. 24).

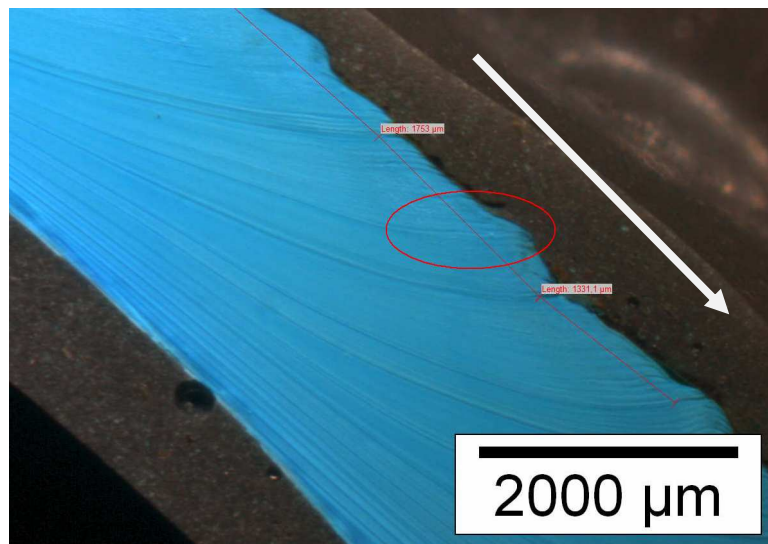


Abb. 24: Detailausschnitt der Schale 78. Rote Markierung zeigt jene Stelle, an der ein zusätzlicher Wachstumsring eingefügt wird (1982). Der Pfeil gibt die Wachstumsrichtung an.

Nach der Überprüfung und dem Finden eines „übersehenen“ Wachstumsringes, wurde dieser eingefügt. In Abbildung 25 wurde die Auswirkung durch das Einfügen des Ringes dargestellt.

Alle markanten Jahre stimmen nun mit der MC_{Man} in ihrer Synchronität überein.

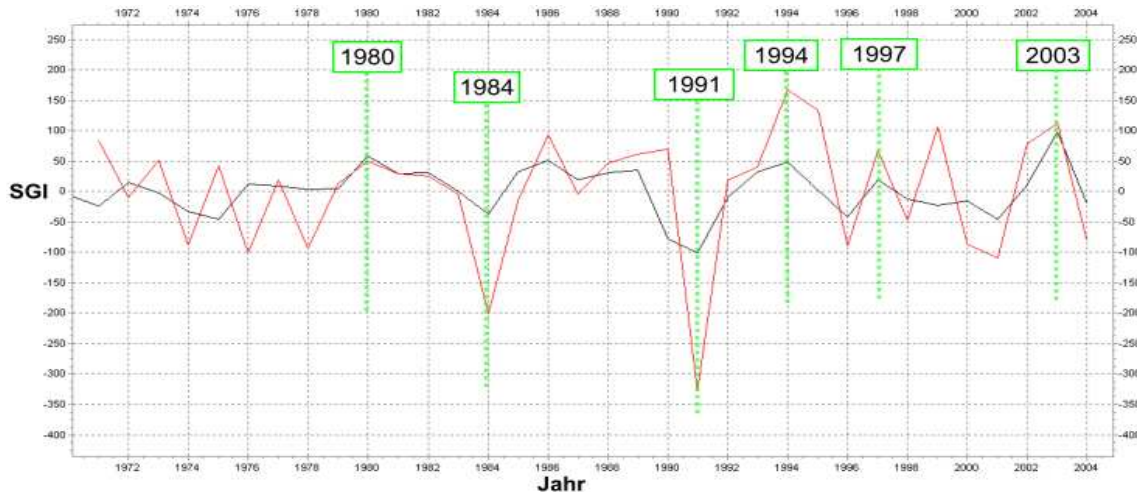


Abb. 25: Vergleich der einzelnen Zeitreihe von Schale 78 (rot) mit Masterchronologie (schwarz). Grüne Markierungen (1980, 1984, 1990, 1994, 1997, 2003) zeigen markante Jahre, an denen beide Chronologien nach der Korrektur synchron verlaufen.

Tabelle 3 fasst die Auswirkung der TSAP-Win-Korrektur an der Schale 78 auf die MC_{Man} zusammen. Alle drei statistischen Parameter, CDI, CC und Glk, verbessern sich deutlich.

Tab. 3: Veränderung der statistischen Parameter (CDI – Cross-date Index; CC – Cross correlation; Glk – Gleichläufigkeit) nach einzelnen Korrekturschritten.

	statistische Parameter		
	CDI	CC [%]	Glk
vorher	5	50	59
nach 1. Korrekturschritt	6	56	67
nach 2. Korrekturschritt	7	59	75

In Tabelle 4 wurden alle vorgenommenen Veränderungen durch TSAP-Win, gegenüber der MC_{Man} , aufgelistet. Die Überprüfung führte zu insgesamt 14 Korrekturen. Dabei wurde von 16 vorgeschlagenen Fällen zum Einfügen eines zusätzlichen Wachstumsringes, in 9 Fällen ein solcher gefunden und so ein neues Inkrement erzeugt. In 16 Fällen, in denen das Entfernen eines „falschem“ Wachstumsringes empfohlen wurde, konnte in 5 Fällen ein solcher entdeckt und entfernt werden, um somit zwei Inkremente zu vereinen.

Tab. 4: Gegenüberstellung der von TSAP-Win empfohlenen Korrekturen (vorgeschlagen) für das Entfernen bzw. Einfügen von Wachstumsringen mit tatsächlich vorgenommenen Korrekturen, bezüglich dieser (vorhanden).

	vorgeschlagen		vorhanden	
	Ring einfügen	Ring weglassen	Ring einfügen	Ring weglassen
07R2	1	1	-	-
8	-	1	-	-
17	2	1	1	-
21	1	-	1	-
23	-	1	-	-
32	1	1	1	-
33	1	-	-	-
34	-	1	-	-
39	1	1	1	1
42	1	1	1	1
49	1	-	1	-
50	2	1	-	1
59	-	1	-	-
68	1	1	-	-
69	-	1	-	1
73	-	-	-	-
78	1	1	1	1
HM1	2	-	2	-
HM2	-	1	-	-
HM3	1	1	-	-
HM4	-	-	-	-
HM5	-	-	-	-
HM6	-	1	-	-
A10L	-	-	-	-
A11L	-	-	-	-

Abbildung 26 zeigt die nach der manuellen, sowie durch TSAP-Win vorgenommenen Korrektur der vorhandenen Messdaten veränderte Masterchronologie (MC_{TSAP}).

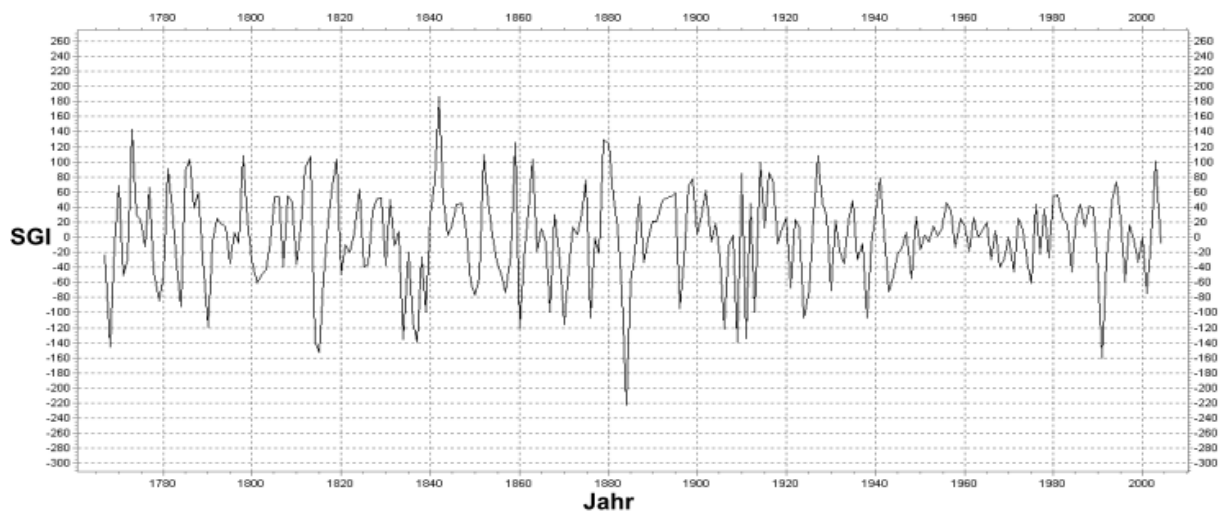


Abb. 26: Masterchronologie nach manueller Korrektur und Überprüfung mit TSAP-Win

3.3. Vergleich der Masterchronologien

3.3.1. Original vs. manuelle Korrektur

In Abbildungen 27 wurde die originale Masterchronologie (MC_{Orig}) mit der manuell-korrigierten Masterchronologie (MC_{Man}) verglichen.

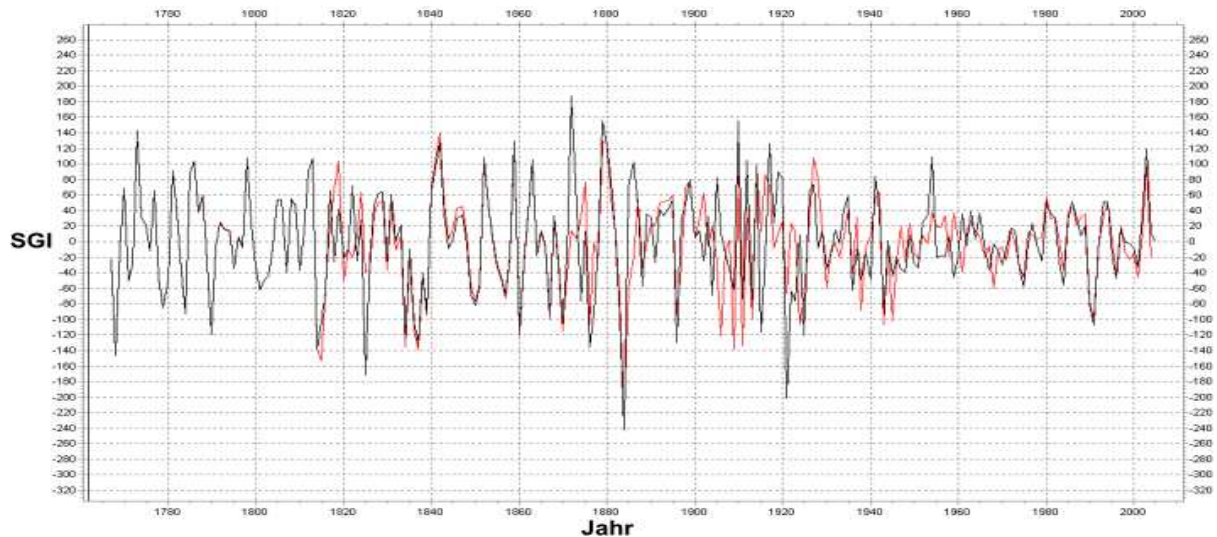


Abb. 27: Vergleich von MC_{Orig} (schwarz) mit MC_{Man} (rot).

Es ist zu erkennen, dass die manuelle Korrektur der Inkrementdaten die MC_{Orig} verändert hat. Vor allem in der Zeit von 1870–1970 werden diese Veränderungen deutlich (Abb. 28).

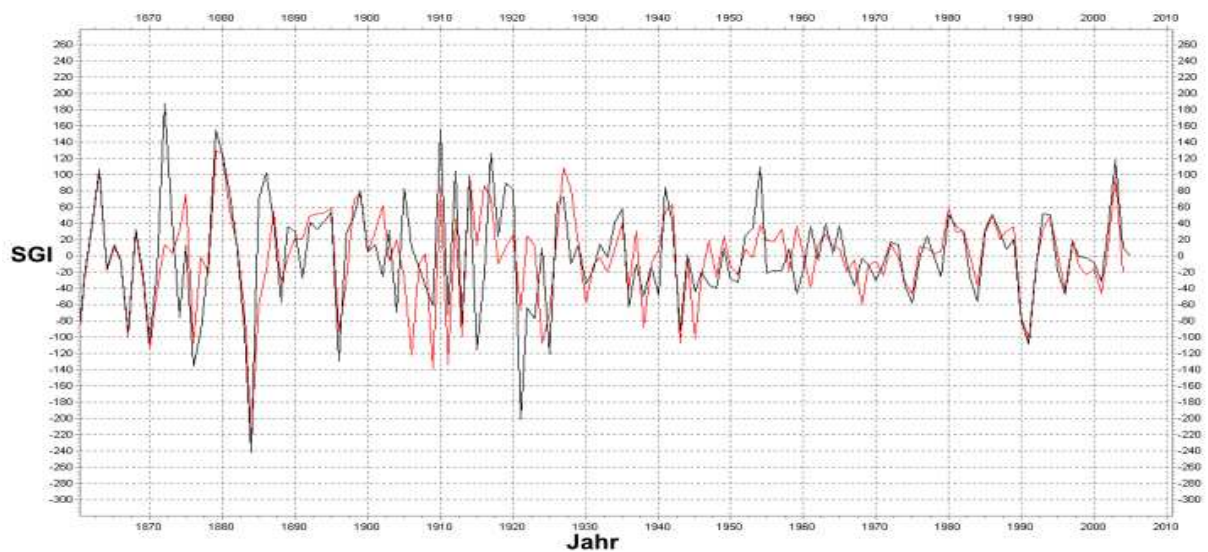


Abb. 28: Detailausschnitt ab 1860 - Vergleich von MC_{Orig} (schwarz) mit MC_{Man} (rot).

3.3.2. Original vs. TSAP-Win-Korrektur

In Abbildungen 29 wurde die originale Masterchronologie (MC_{Orig}) mit der TSAP-Win-korrigierten Masterchronologie (MC_{TSAP}) verglichen. Es ist zu erkennen, dass die Korrekturen zu einer Veränderung der Inkrementdaten von MC_{Orig} geführt haben.

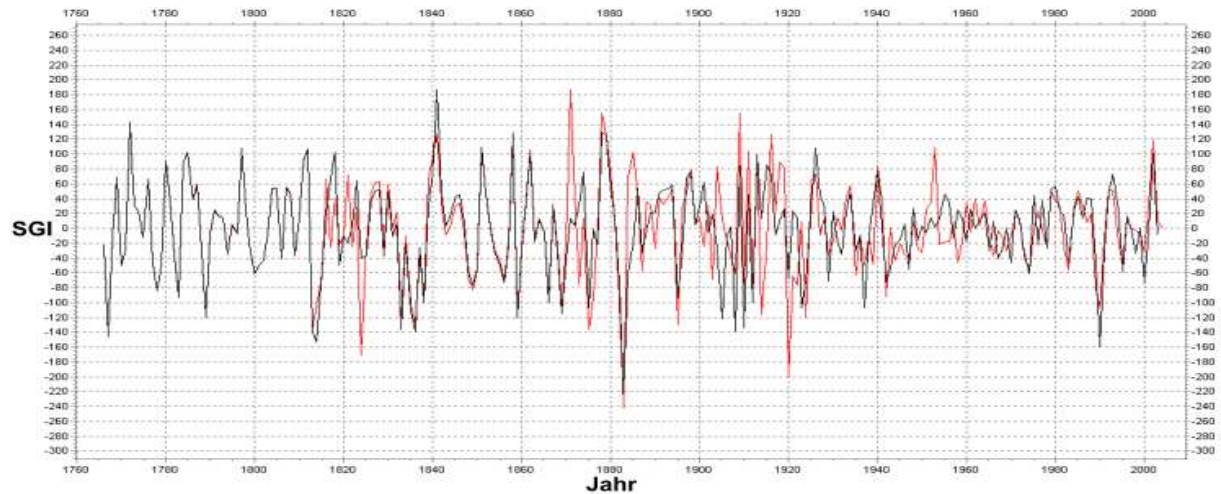


Abb. 29: Vergleich von MC_{Orig} (rot) mit MC_{TSAP} (schwarz).

Vor allem in der Zeitspanne von 1870–1955 werden diese Veränderungen verdeutlicht (Abb. 30).

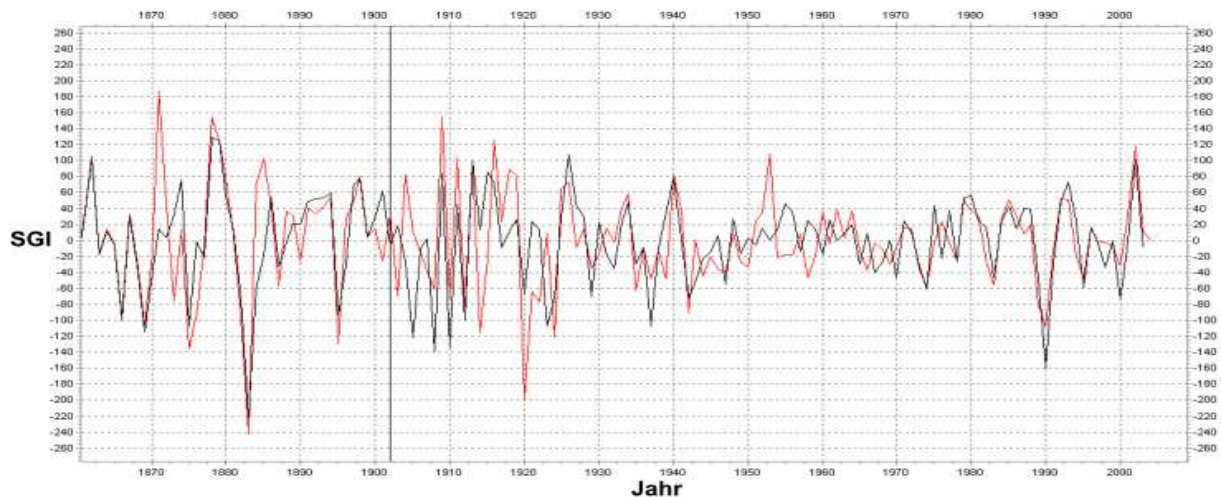


Abb. 30: Detailausschnitt ab 1860 - Vergleich MC_{Orig} (rot) mit MC_{TSAP} (schwarz).

3.3.3. Manuelle Korrektur vs. TSAP-Win-Korrektur

Abbildung 31 zeigt die originale Masterchronologie (MC_{Orig}) mit der TSAP-Win-korrigierten Masterchronologie (MC_{TSAP}).

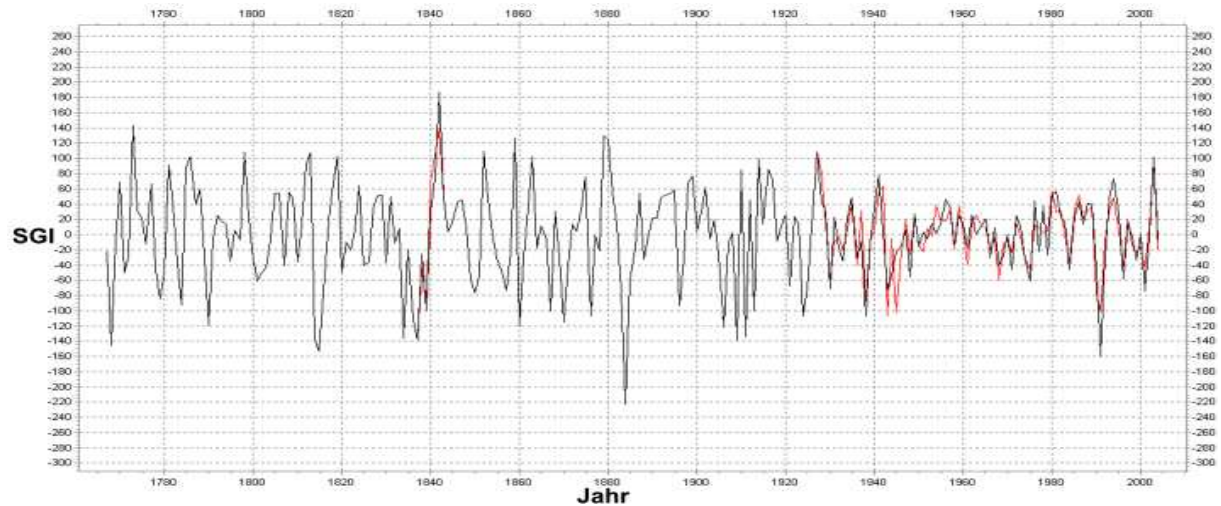


Abb. 31: Vergleich von MC_{Man} (schwarz) mit MC_{TSAP} (rot).

Es ist zu erkennen, dass die zusätzliche Korrektur der Inkrementdaten mit TSAP-Win die MC_{Man} nur geringfügig verändert hat. Abweichungen beider MC zueinander sind vor allem im Bereich von 1925–1965 (Abb. 32).

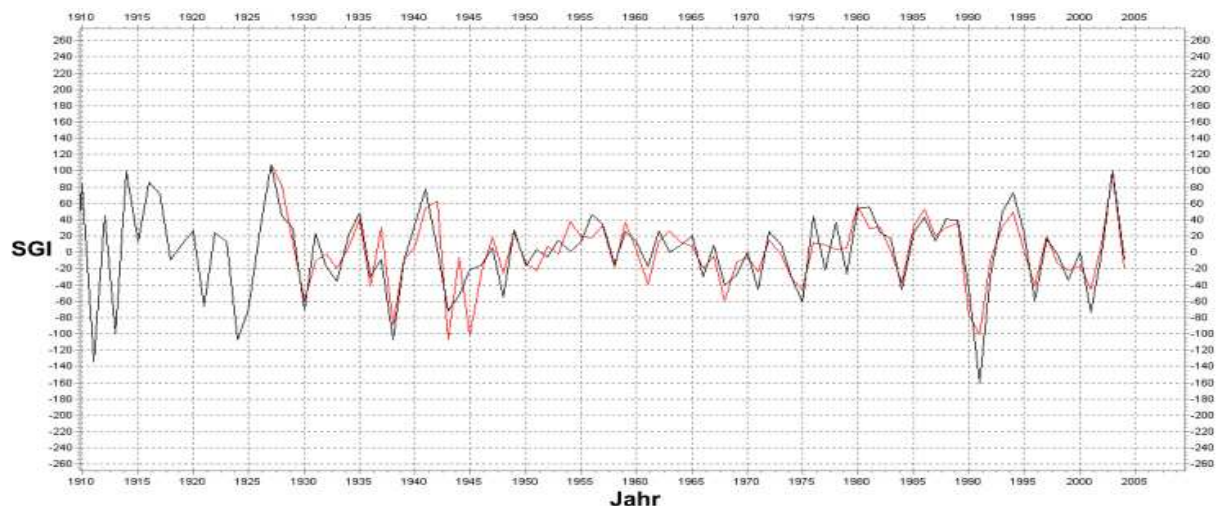


Abb. 32: Detailausschnitt ab 1910 - Vergleich von MC_{Man} (schwarz) mit MC_{TSAP} (rot).

Ein Vergleich der drei Masterchronologien, mittels der statistischen Parameter CDI, CC und Glk zeigt, dass sich MC_{Man} und MC_{TSAP} deutlich gegenüber MC_{Orig} unterscheiden. Im Vergleich miteinander jedoch, sind sie sich sehr ähnlich (Tab. 5).

Tab. 5: Vergleich der Masterchronologien anhand statistischer Parameter (CDI – Cross-date Index; CC – Cross correlation; Glk – Gleichläufigkeit).

	statistische Parameter		
	CDI	CC [%]	Glk
Original vs. manuelle Korrektur	1	80	82
Original vs. TSAP-Win-Korrektur	1	79	80
manuelle Korrektur vs. TSAP-Win-Korrektur	54	97	93

Die größten Übereinstimmungen im Verlauf finden sich bei der manuell-korrigierten und TSAP-Win-korrigierten Zeitreihe. Nahezu identische statistische Werte gibt es beim Vergleich der originalen Chronologie mit der manuellen Korrektur, als auch mit der TSAP-Win-Korrektur.

3.4. Frequenzanalyse

3.4.1. Spektraldichte und standardisierte Spektraldichte

Das Spektrogramm der MC_{Orig} (Abb. 33) hat einen bedeutenden Peak bei einer Frequenz von $0,150 \text{ Jahr}^{-1}$. Dies entspricht einer Periode von 6,7 Jahren.

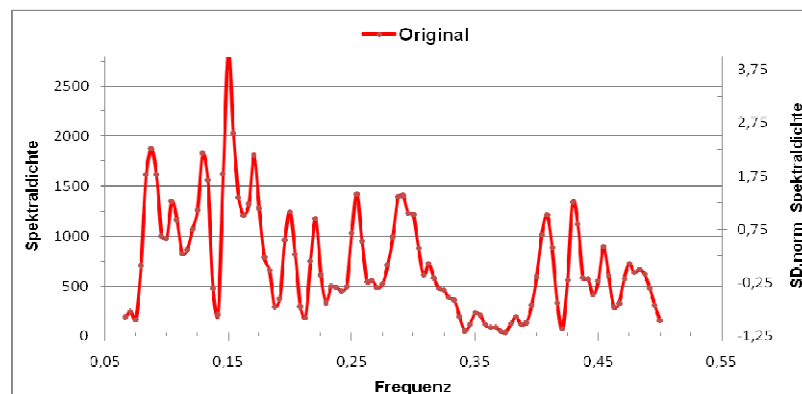


Abb. 33: Spektraldichte (linke Skala) und standardisierte Spektraldichte (rechte Skala) der MC_{Orig} im Frequenzbereich von $0,067 - 0,5 \text{ Jahr}^{-1}$.

Das Spektrogramm der MC_{Man} (Abb. 34) zeigt drei ausgeprägte Maxima bei Frequenz von $0,083$, $0,150$ und $0,171 \text{ Jahr}^{-1}$. Dies entspricht einer Periode von 12, 6,7 und 5,9 Jahren.

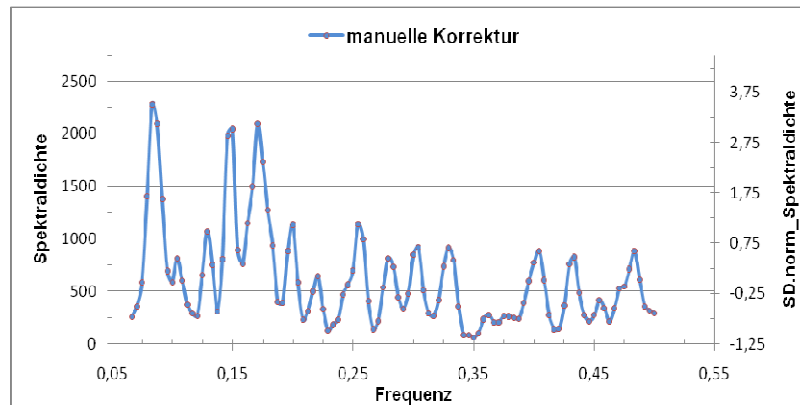


Abb. 34: Spektraldichte (linke Skala) und standardisierte Spektraldichte (rechte Skala) der MC_{Man} im Frequenzbereich von $0,067 - 0,5 \text{ Jahr}^{-1}$.

In Abbildung 35 ist das Spektrogramm der MC_{TSAP} dargestellt. Es hat, abgesehen von einem schwächer ausgeprägten Peak bei einer Frequenz von $0,483 \text{ Jahr}^{-1}$ (= 2,1 Jahren), ein nahezu identisches Spektrum, wie das der MC_{Man} .

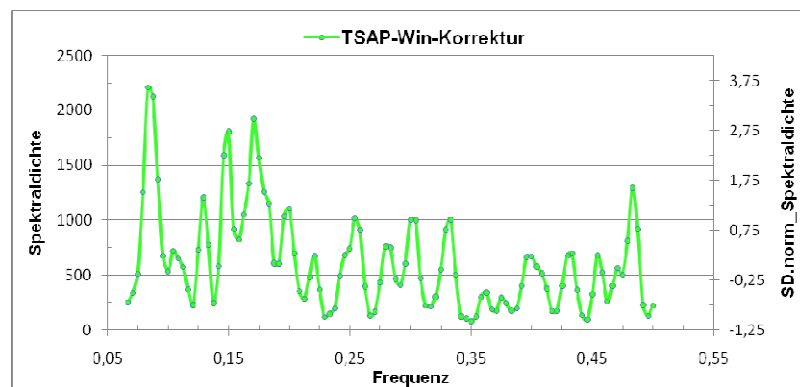


Abb. 35: Spektraldichte (linke Skala) und standardisierte Spektraldichte (rechte Skala) der MC_{TSAP} im Frequenzbereich von $0,067 - 0,5 \text{ Jahr}^{-1}$.

3.4.2. Differenz der standardisierten Spektraldichten

In Abbildung 36 wurden die Unterschiede der MC, anhand der Differenzen ihrer standardisierten Spektraldichten im Frequenzbereich von $0,067 - 0,5 \text{ Jahr}^{-1}$, dargestellt.



Abb. 36: Differenzen der standardisierten Spektraldichten im Frequenzbereich von $0,067 - 0,5 \text{ Jahr}^{-1}$.
(A) $MC_{\text{Man}} - MC_{\text{Orig}}$ **(B)** $MC_{\text{TSAP}} - MC_{\text{Orig}}$ **(C)** $MC_{\text{TSAP}} - MC_{\text{Man}}$

Es ist zu erkennen, dass A und B nahezu identisch sind. In beiden Fällen gibt es Maxima bei den Frequenzen $0,083 (= 12 \text{ Jahre})$, $0,175 (= 5,7 \text{ Jahre})$ und $0,329 (= 3 \text{ Jahre})$. Einen zusätzlichen markanten Peak gibt es bei A bei der Frequenz von $0,142 (= 7,1 \text{ Jahre})$ und bei B bei $0,483 (= 2,1 \text{ Jahre})$.

Vier charakteristische Minima gibt es bei A und B bei den Frequenzen $0,121 (= 8,3 \text{ Jahre})$, $0,133 (= 7,5 \text{ Jahre})$, $0,154 (= 6,5 \text{ Jahre})$ und $0,292 (= 3,4 \text{ Jahre})$.

Abbildung C zeigt keine prominenten Peaks.

4. Diskussion

4.1. Präparation

Die Färbemethode nach Mutvei ist ein universelles und häufig angewandtes Verfahren mit dem Vorteil, die mikroskopischen Wachstumsstrukturen in biologischen Hartteilen (Muscheln, Schnecken, Seepocken, Korallen u.a.) besser sichtbar zu machen (Schöne et al. 2005c). Zudem hat die Methode den großen Vorteil kaum zeitintensiv zu sein, da drei Arbeitsschritte – das Ätzen, das Fixieren und das Anfärben – der Schnittfläche simultan erfolgen.

4.2. Altersbestimmung und Inkrementmessung

Das Zählen der Wachstumsringe, sowie die Messung der Inkrementbreite wurde entlang einer (gedachten) Linie \pm parallel zum äußeren Schalenrand vorgenommen. Ein Wachstumsinkrement wurde definiert als der Abstand von einem Wachstumsring, entlang dieser Linie, zum nächsten Wachstumsring.

Da in Umbo-Nähe die Krümmung der Schale besonders stark ist, sind die sich dort befindenden Wachstumsinkremente relativ kleiner, als Inkremente, die weiter vom Umbo entfernt sind. Dies würde bei der hier verwendeten linearen Approximation der Inkrementbreite zu einem unverhältnismäßig großen Fehler führen. Daher wurden die Inkremente der ersten fünf Lebensjahre bei allen Individuen ausgeschlossen.

4.3. Entfernung des ontogenetischen Trends

Aufgrund der Korrektur der vorhandenen Messdaten war es nötig, im Rahmen der Trendbereinigung, zunächst einen neuen Spline zu bestimmen. Der „geeignete“ Spline sollte den Wachstumstrend für alle Schalen annähernd beschreiben können (Kapitel 2.6.1.). Die Wahl eines „geeigneten“ Splines ist, wie auch die Interpretation der Wachstumsringe, bis zu einem gewissen Grad subjektiv und abhängig vom Beobachter. Empirisch, durch Ausprobieren mehrerer Möglichkeiten (unterschiedliche λ), wurde daraufhin ein Spline mit $\lambda = 400$ für alle Schalen festgelegt.

Der Gebrauch von Spline-Funktionen, als Mittel zur Entfernung des ontogenetischen Trends, wurde bereits erfolgreich in vorhergehenden Studien angewandt (Marchitto et al. 2000, Witbaard et al. 2003, Schöne et al. 2007). Vorteil dieser Methode ist, dass *a priori* keine Annahme über das zugrunde liegende Wachstumsmodell gemacht werden muss (Müller-Wiegmann 2006). Der Nachteil hingegen liegt in der subjektiven Interpretation eines „geeigneten“ Spline.

4.4. Korrektur

Bei der Altersbestimmung und der Vermessung von Inkrementbreiten können drei wesentliche Fehler begangen werden:

- a) Inkremente werden nicht erkannt
- b) „falsche“ Inkremente werden gesehen
- c) die Inkrementbreite wird falsch gemessen.

Es gibt drei Möglichkeiten um diese Fehler zu korrigieren: Durch Einfügen von zusätzlichen Wachstumsringen, um neue Inkrement zu schaffen. Durch Entfernen von „falschen“ Wachstumsringen, um Inkremente zu vereinen. Durch Korrigieren der Messfehler.

Um Fehler überhaupt korrigieren zu können, gibt es zwei Methoden um diese zunächst einmal zu lokalisieren – die manuelle Korrektur und die Korrektur mit Hilfe eines Analyseprogramms.

4.4.1. Manuelle Korrektur

Trotz Anfärben des Schalenquerschnitts, welches das Erkennen von Hauptwachstumslinien erleichtern soll, ist die visuelle Interpretation von aperiodischen und jährlichen Wachstumsringen bei *Arctica islandica* zu einem gewissen Grad subjektiv und abhängig von der Erfahrung der zu untersuchenden Person.

Zudem gibt es eine Reihe von Faktoren, die die Interpretation zusätzlich erschweren. Dazu zählen Schäden an der Schale (Abb. 37), hervorgerufen durch Beschädigungen zu Lebzeiten (z.B. durch Prädatoren, Parasiten etc.), beim Fang der Organismen oder bei der Präparation der Schalen (unvorsichtiges Sägen oder beim Polieren der Oberfläche). Diese können großen Einfluss auf die Bestimmung des ontogenetischen Alters und der Inkrementbreite haben.

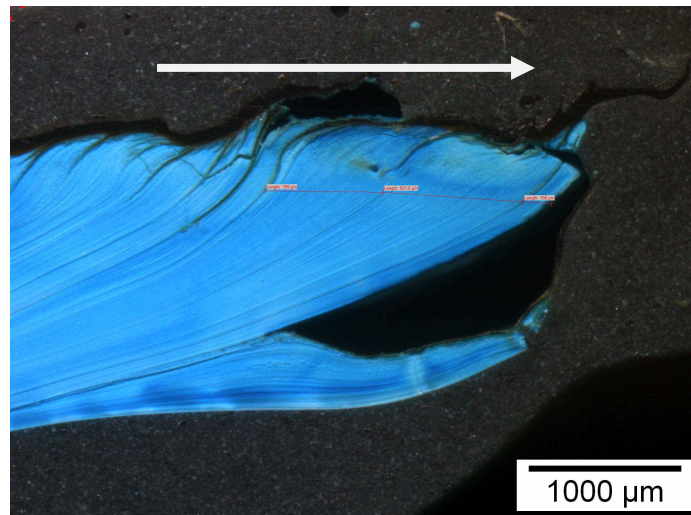


Abb. 37: Beispiel für mögliche Fehler bei Inkrementmessung, verursacht durch Schäden an der Schale. Der Pfeil gibt die Wachstumsrichtung an.

Neben Beschädigungen der Schale durch äußere Faktoren, spielt auch das Alter der Schale eine entscheidende Rolle. Da bei der Färbung der Wachstumsringe die Organik angefärbt wird, kann es speziell bei älteren Individuen dazu kommen, dass diese gänzlich oder zum Teil abgebaut wurde und somit ein Anfärben nicht mehr bzw. nur noch bedingt möglich ist.

Zudem erschwert sich das Ablesen der Wachstumsringe mit zunehmendem Alter, da nach dem „ontogenetischen Trend“ bekanntlich das Wachstum und damit auch die Inkrementbreite mit dem ontogenetischen Alter immer stärker abnimmt (Abb. 38).

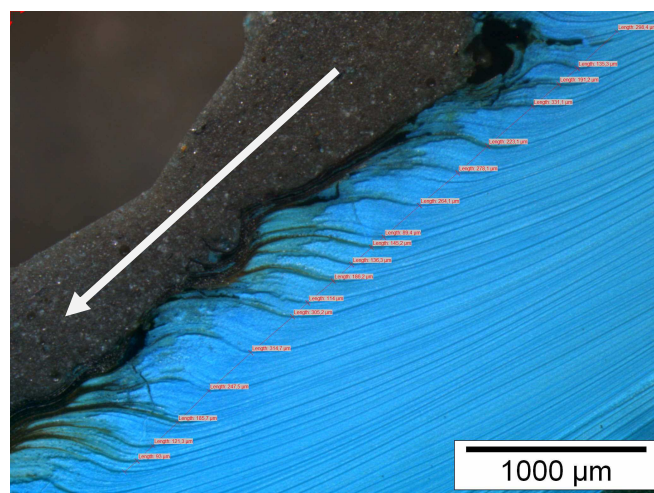


Abb. 38: Beispiel für mögliche Fehler bei Inkrementmessung, verursacht durch sehr kleine Inkremente im hohen ontogenetischen Alter. Der Pfeil gibt die Wachstumsrichtung an.

Das bei 64% aller Schalen mindestens das erste Inkrement entfernt wurde, hängt damit zusammen, dass bei der Vermessung der Inkrementbreiten in der Studie von Scheuer

(2008) ein sich wiederholender Messfehler gemacht wurde. Da jedoch bei der anschließenden Trendbereinigung die ersten fünf Inkremente bei den Berechnungen nicht berücksichtigt wurden, hat dieser Fehler keine Bedeutung.

Trotz der nur geringfügigen Veränderungen gegenüber den originalen Messdaten, sind die Auswirkungen der manuellen Korrekturen gegenüber der MC_{Orig} deutlich zu erkennen (Abb. 27 und 28).

4.4.2. Korrektur mit Hilfe des Analyseprogramms TSAP-Win

Anders als am Beispiel der Schale „78“, stimmten nicht in jedem Fall die vom Analyseprogramm TSAP-Win vorgeschlagenen Korrekturmöglichkeiten mit den tatsächlich vorgenommenen Veränderungen überein, wie in Tabelle 4 dargestellt wurde. In den meisten Fällen konnten durch TSAP-Win vorgeschlagene, mögliche „übersehene“ bzw. „falsche“ Wachstumsringe, bei der anschließenden Überprüfung in den Schalenausschnitten nicht wiedergefunden werden. In diesen Fällen wurden die vorgeschlagenen Korrekturen nicht vorgenommen.

Wie zu erwarten, haben die wenigen vorgenommenen Korrekturen mit Hilfe des Analyseprogramms nur geringfügige Änderungen im Verlauf der MC_{Man} bewirkt (Abb. 31 und 32). Die statistischen Parameter im Vergleich der MC_{Orig} mit der MC_{TSAP} zeigen ähnliche Werte, wie beim Vergleich der MC_{Orig} mit der MC_{Man} . Auch die statistischen Parameter beim Vergleich der beiden korrigierten Chronologien zeigen, dass diese sehr hohe Übereinstimmungen haben (Tab. 5). Das lässt darauf schließen, dass sie sich nur geringfügig voneinander unterscheiden. Das liegt vor allem daran, dass bei der Korrektur mit dem Analyseprogramm, die Zeitreihen der einzelnen Schalen stets mit der MC_{Man} abgeglichen wurden, da sie als Referenz diente.

Zudem ist eine Überprüfung der Chronologie mit TSAP-Win stark von subjektiven Einflüssen geprägt. Die vom Analyseprogramm gemachten Korrekturvorschläge hängen stark von der Interpretation der zu untersuchenden Person ab, sowie von dessen Erfahrung im Umgang mit dem Programm.

Eine besondere Schwierigkeit stellen zudem sehr alte Muschelschalen dar. Da die Zeitreihen hier besonders lang sind und sehr viele Jahre umfassen, haben das Einfügen bzw. Weglassen einzelner Wachstumsringe einen weniger überschaubaren Einfluss, als bei kürzeren Chronologien.

Wie in Abbildung 31 zu sehen, gab es vor allem in den ersten Jahren (1767–1810) nur wenige bis keine Veränderungen, die an der MC_{Man} vorgenommen wurden. Ursache dafür ist die geringe Anzahl an Schalen in diesen Jahren (Abb. 15). Die Masterchronologie ist dort nur sehr „dünn“ und besitzt wenig Aussagekraft, im Gegensatz zu jüngeren Jahren, wo die Chronologie bis zu 19 Schalen umfasst. Nimmt man nun Veränderungen an den Zeitreihen einzelner Schalen aus einem solchen Zeitabschnitt vor, so hätte dies gravierenden Einfluss auf den Verlauf der gesamten Masterchronologie an dieser Stelle. Dies ist der Grund, weshalb die Schalen, die eine Leihgabe des Zoologischen Museums Kiel waren (A10L, A11L), nicht mit TSAP-Win auf mögliche Fehler überprüft wurden.

4.5. Frequenzanalyse

Mit Hilfe der Frequenzanalyse war es möglich, die drei Masterchronologien auf zyklisch auftretende Wachstumsmuster zu untersuchen. Dabei wurden nur die Werte betrachtet, die im Bereich einer Periodendauer von <15 Jahren liegen, da für uns vor allem die dekadische Oszillation von Interesse ist. Zudem sind die MC zu kurz, um Schwankungen mit wesentlich längeren Perioden hochauflösend darzustellen.

Die Spektrogramme der MC_{Man} und der MC_{TSAP} sind nahezu identisch, wie die Abbildungen 34 und 35 zeigen und unterscheiden sich beide sehr deutlich vom Spektrogramm der MC_{Orig} (Abb. 33). Die Frequenzanalyse bestätigt somit, was bereits zuvor beim Vergleich des Verlaufs der Chronologien angenommen wurde (Kap. 3.8.2.): Sowohl die MC_{Man} , als auch die MC_{TSAP} unterscheiden sich deutlich von der MC_{Orig} , was auf einen starken Einfluss der vorgenommenen Korrekturmaßnahmen hindeutet. Die Unterschiede der beiden korrigierten Chronologien zueinander sind jedoch nur geringfügig.

Die Differenz der standardisierten normalverteilten Spektraldichten erlaubt es, Rückschlüsse auf die Auswirkungen der jeweils vorgenommenen Korrekturen zu ziehen.

Sowohl beim Vergleich der MC_{Man} mit der MC_{Orig} (Abb. 36 A), als auch beim Vergleich der MC_{TSAP} mit der MC_{Orig} (Abb. 36 B), wird nochmals deutlich, dass die vorgenommenen Korrekturmaßnahmen erhebliche Auswirkungen auf die ursprüngliche Chronologie genommen haben. Die zusätzlich vorgenommenen Korrekturen an der MC_{Man} mit TSAP-Win hingegen zeigen keine bedeutenden Auswirkungen, da sie sich beide kaum voneinander unterscheiden (Abb. 36 C).

Übereinstimmungen im Wachstumsmuster aller Masterchronologien gibt es im Bereich einer Periodendauer von etwa 6 Jahren. Während die originale Chronologie ein Wachstumsmuster bei einer Periodendauer von 6,7 Jahren beschreibt, stimmen die manuell-korrigierte und die TSAP-Win-korrigierte mit Periodendauern von 6,2 und 5,9 Jahren überein. Bei letzteren lassen sich zudem Wachstumsmuster mit einer Periode von 12 Jahren erkennen. Diese wurden jedoch als Echos des 6-jährigen Wachstumsmusters gedeutet. Das schwächere Maximum der MC_{Man} bei 2,1 Jahren, sowie das gemeinsame Wachstumsmuster mit der MC_{Man} von 3 Jahren, lassen sich bis dato nicht eindeutig erklären.

Welche Erklärung gibt es für das Auftreten eines 6-jährigen Wachstumsmusters?

Wie bereits in vorhergehenden Studien erwiesen, spielt neben der genetisch bedingten Variabilität (Dahlgren et al. 2000), die Wassertemperatur (Lutz et al. 1983) eine entscheidende Rolle für das Wachstum bei *Arctica islandica*. Neben dieser sind Qualität, Quantität und saisonale Verteilung der Nährstoffe (Kraus & Beal 1991, Witbaard 1996, Schöne et al. 2003b) von entscheidender Bedeutung. In küstennahen Bereichen kommt zusätzlich der Einfluss der Salinität hinzu (Davis & Calabrese 1964, Zettler et al. 2001).

Die Veränderungen des Klimas und ihrer Umweltfaktoren hängen auf der nördlichen Hemisphäre stark von der Nordatlantik-Oszillation (NAO – North Atlantic Oscillation) ab (Hurrell et al. 2003). Der NAO-Index gibt Auskunft über die Druckdifferenz zwischen dem Hochdruckgebiet über den Azoren und dem Tiefdruckgebiet über Island an (Hurrell 1995, 1996). Ein positiver NAO-Index entspricht dabei einer großen Druckdifferenz. Dabei ist der Luftdruck bei den Azoren höher und bei Island niedriger als normal, was in starken Westwinden resultiert. Warme, feuchte und somit nasse und milde Winter in Europa sind die Folge. Ein negativer NAO-Index bedeutet hingegen schwächere Westwinde, welche Kaltluftbrüche aus Nordosten und somit kalte und trockene Winter in Europa verursachen (Helama et al. 2007).

Die Westwinde nehmen zudem großen Einfluss auf die Salinität im Bereich der Deutschen Bucht (Becker & Kohnke 1978). Insbesondere die Windstärke und -richtung sind es auch, die – zusammen mit der Oberflächenwassertemperatur – den Beginn und die Dauer von Planktonblüten maßgebend beeinflussen (Drinkwater et al. 2003). Diese Umweltfaktoren steuern das Nahrungsangebot für *Arctica islandica* und beeinflussen somit indirekt das Wachstum.

Ein zyklisches Muster mit einer 6-jährigen Periodizität wurde bereits in vorhergehenden Studien nachgewiesen (Epplé et al. 2006) und deckt sich mit der bekannten Zyklizität der NAO.

5. Fazit und Ausblick

Um genauere Angaben über die Wachstumsperiodizität von *Arctica islandica* bei Helgoland machen zu können und den anthropogenen Fehler bei der Vermessung der Inkrementbreiten möglichst gering zu halten, wäre es nötig in erster Linie den Probenumfang deutlich zu erhöhen, um somit eine Masterchronologie zu erhalten, die zu jedem Zeitpunkt eine Vielzahl von Muscheln umfasst.

Alternativ wäre es sinnvoll weitere Studien in Hinblick auf andere Umwelt- und Klimaparameter (z.B. Salinität, Nährstoffverfügbarkeit, Primärproduktion) ergänzend hinzu zu ziehen. So könnten beispielsweise durch die Messung der Isotopenverhältnisse in den Schalen die Bodentemperatur ($\delta^{18}\text{O}$) und Nährstoffverfügbarkeit ($\delta^{13}\text{C}$) rekonstruiert werden. Auch mit der Messung von Metall-zu-Calcium Konzentrationen (z.B. Mg/Ca, Sr/Ca, Ba/Ca, Li/Ca, Mn/Ca) durch LA-ICP-MS (Laser Ablation–Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry) ist es möglich, Umweltparameter in Hinsicht auf das Schalenwachstum rekonstruieren zu können.

6. Literaturverzeichnis

- BECKER G & KOHNKE D (1978) Long-term variations of temperature and salinity in the inner German Bight. Rapports et proces-verbaux des reunions/Conseil International pour l' Exploration de la Mer 172, 334-344.
- BEGUM S (2009) Environmental constraints on growth, age and lifetime metabolic budgets of the bivalve *Arctica islandica*. Doctoral thesis, Universität Bremen.
- BREY T, ARNTZ WE, PAULY D & RUMOHR H (1990) *Arctica (Cyprina) islandica* in Kiel Bay (western Baltic): growth, production and ecological significance. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 136: 217-235.
- BUDDEMEIER RW (1975) Sclerochronology: a data source for reef systems models. Pacific Science Congress Record of Proceeding 13, 124.
- COOK ER & PETERS K (1981) The smoothing spline: A new approach to standardizing interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. Tree-Ring Bulletin, Vol. 41: 45-54.
- COOK ER & KAIRIUKSTIS LA (1990) Methods of dendrochronology. Applications in the environmental sciences. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht/Boston/London, 394 pp.
- DAHLGREN TG, WEINBERG JR & HALANYCH KM (2000) Phylogeography of the ocean quahog (*Arctica islandica*): influences of paleoclimate on genetic diversity and species range. Marine Biology 137: 487-495.
- DAVIS HC & CALABRESE A (1964) Combined effects of temperature and salinity on development of eggs and growth of larvae of *M. mercenaria* and *C. virginica*. Fish. Bull. Fish. Wildl. Serv. 63, 643-655.
- DRINKWATER KF, BELGRANO A, BORJA A, CONVERSI A, EDWARDS M, GREENE CH, OTTERSEN G, PERSHING AJ & WALKER H (2003) The response of marine ecosystems to climate variability associated with the North Atlantic Oscillation. In: W. HJ, Kushnir Y, Ottersen G, Visbeck M (eds) The North Atlantic Oscillation – climate significance and environmental impact. American Geophysical Union, Washington, D.C., pp 211-234.
- ECKSTEIN D & BAUCH J (1969) Beitrag zur Rationalisierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. Forstwiss. Centralbl. 88, p. 230-250.

- EPPLÉ VM, BREY T, WITBAARD R, KUHNERT H & PAETZOLD J (2006) Sclerochronological records of *Arctica islandica* from the inner German Bight. *The Holocene* 16,5 (2006) pp. 763-769.
- FRITTS HC (1971) Dendroclimatology and dendroecology. *Quaternary Research* 1: 419-449.
- GOLDBERG WM (2001) Acid polysaccharides in the skeletal matrix and calicoblastic epithelium of the stony coral *Mycetophyllia reesi*. *Tissue Cell* 33, 376-387.
- GOODWIN DH, FLESSA KW, SCHÖNE BR & DETTMAN DL (2001) Cross-calibration of daily growth increments, stable isotope variation, and temperature in the Gulf of California bivalve mollusk *Chione cortezi*: implications for paleoenvironmental analysis. *Palaios* 16: 387-398.
- HELAMA S, SCHÖNE BR, KIRCHHEFER AJ, NIELSEN JK, RODLAND DL & JANSSEN R (2007) Compound response of marine and terrestrial ecosystems to varying climate: Pre-anthropogenic perspective from bivalve shell growth increments and tree-rings. *Marine Environmental Research* 63: 185-199.
- HENDERSON JT (1929) Lethal temperatures of Lamellibranchiata. *Contrib. Can. Biol. Fish.* 4, 399-411.
- HOLMES RL (1983) Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, Vol. 43: 69 – 78.
- HOLMES RL, ADAMS RK & FRITTS HC (1986) Tree-ring chronologies of Western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin. *Chronology Series IV*, Tucson, University of Arizona. 40pp.
- HURRELL JW (1995) Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. *Science* 269, 676-679.
- HURRELL JW (1996) Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature. *Geophysical Research Letters* 23, 665-668.
- JONES DS (1980) Annual cycle of shell growth increment formation in two continental shell bivalves and its paleoecologic significance. *Paleobiology* 6(3): 331-340.
- JONES DS (1981) Reproductive cycles of the atlantic surf clam *Spisula solidissima* and the ocean quahog *Arctica islandica* off New Jersey. *Journal of Shellfish Research* 1(1): 23-32.

- KENNISH MJ & OLSSON RK (1975) Effects on thermal discharges on microstructural growth of *Mercenaria mercenaria*. Environ. Geol. (Springer) 1, 41-64
- KRAUS MG & BEAL BF (1991) Growth and survivorship of ocean quahogs, *Arctica islandica* (Linnaeus) in an intertidal mudflat in eastern Maine. National Shellfisheries Association, Abstracts, 1991 Annual Meeting: 290.
- LUTZ RA & RHOADS DC (1980) Growth patterns within the molluscan shell. Skeletal growth in aquatic organisms. Biological records of environmental change. Rhoads D. C. and Lutz R.: 203-254.
- LUTZ RA, GOODSELL JG, CASTAGNA M & STICKNEY AP (1983) Growth of experimentally cultured ocean quahogs (*Arctica islandica*) in north temperate embayments. Journal of World Maricultural Society 14: 185-190.
- MARCHITTO TM, JONES GA, GOODFRIEND GA & WEIDMANN CR (2000) Precise temporal correlation of Holocene mollusk shells using sclerochronology. Quaternary Research 53: 236-246.
- MERRILL AS, CHAMBERLAIN JL & ROPES JW (1969) Ocean quahog fishery. Encyclopedia of marine resources. F. E. Firth. New York, Van Nostrand Reinhold Publ.: 125-129.
- MONNIN E, STEIG EJ, SIEGENTHALER U, KAWAMURA K, SCHWANDER J, STAUFFER B, STOCKER TF, MORSE DL, BARNOLA JM, BELLIER B, RAYNAUD D & FISCHER H (2004) Evidence for substantial accumulation rate variability in Antarctica during Holocene, through synchronization of CO₂ in the Taylor Dome, Dome C and DML ice cores. Earth and Planetary Science Letters 224: 45-54.
- MÜLLER-WIEGMANN C (2006) Wird das Wachstum von *Arctica islandica* bei Island vom Klima beeinflusst? Diplomarbeit. Fachbereich 2, Universität Bremen.
- MUTVEI H (1979) On the internal structures of the nacreous tablets in molluscan shells. Scand. Electron. Microsc. 2, 457-462.
- MUTVEI H, DUNCA E, TIMM H & SLEPUKHINA T (1996) Structure and growth rates of bivalve shells as indicators of environmental changes and pollution. Bull. Mus. Océanogr. Monaco, Num. Spéc, 14, 65-72.

- NICOL D (1951) Malacology – Recent species of the veneroid pelecypod *Arctica*. Journal of the Washington Academy of Science 41: 102-106.
- PAGE HM & HUBBARD DM (1987) Temporal and spatial patterns of growth in mussels *Mytilus edulis* on an offshore platform: relationship to water temperature and food availability. J. exp. Mar. Biol. Ecol. 111, 159-179.
- RICHARDSON CA (2001) Molluscs as archives of environmental change. Oceanography and Marine Biology: an Annual Review 39: 103-164.
- ROPES JW, JONES DS, MURAWSKI SA, SERCHUK FM & JEARLD A (1984) Documentation of annual growth lines in ocean quahogs, *Arctica islandica* Linné. Fishery Bulletin 82(1): 1-19.
- SATO S (1997) Shell microgrowth patterns of bivalves reflecting seasonal change of phytoplankton abundance. Paleotological Research 1: 260-266.
- SCHEUER K (2008) Langzeitvariabilität im Schalenwachstum der Islandmuschel *Arctica islandica* aus der Deutschen Bucht. Projektarbeit im Rahmen des Projektstudiums, Universität Bremen.
- SCHÖNE BR (2003) A „clam-ring“ master-chronology constructed from a short-lived bivalve mollusc from the northern Gulf of California, USA. The Holocene 13: 39.
- SCHÖNE BR, OSCHMANN W, RÖSSLER J, FREYRE CASTRO AD, HOUK SD, KRÖNCKE I, DREYER W, JANSSEN R, RUMOHR H & DUNCA E (2003a) North Atlantic oscillation dynamics recorded in shells of a long-lived bivalve mollusk. Geology 31, 1237-1240.
- SCHÖNE BR, KRÖNCKE I, HOUK D, CASTRO DF & OSCHMANN W (2003b) The cornucopia of chilly winters: ocean quahog (*Arctica islandica* L. Mollusca) master chronology reveals bottom water nutrient enrichment during colder winters (North Sea). Senckenbergiana maritime 32(1/2): 165-175.
- SCHÖNE BR, FREYRE CASTRO AD, FIEBIG J, HOUK SD, OSCHMANN W & KRÖNCKE I (2004) Sea surface water temperatures over the period 1984-1983 reconstructed from oxygen isotope ratios of bivalve mollusk shell (*Arctica islandica*, southern North Sea). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 212: 215-232.
- SCHÖNE BR, FIEBIG J, PFEIFFER M, GLEß R, HICKSON J, JOHNSON ALA, DREYER W & OSCHMANN W (2005a) Climate records from a bivalve Methuselah (*Arctica islandica*, Mollusca; Iceland). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 228(1-2): 130-148.

- SCHÖNE BR, HOUK SD, FREYRE CASTRO AD, FIEBIG J & OSCHMANN W (2005b) Daily growth rates in shells of *Arctica islandica*: assessing sub-seasonal environmental controls on a long-lived bivalve mollusk. *Palaios* 20: 78-92.
- SCHÖNE BR, DUNCA E, FIEBIG J & PFEIFFER M (2005c) Mutvei's solution: An ideal agent for resolving microgrowth structures of biogenic carbonates. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 228: 149-166.
- SCHÖNE BR, PAGE NA, RODLAND DL, FIEBIG J, BAIER S, HELAMA SO & OSCHMANN W (2007) ENSO-coupled precipitation records (1959-2004) based on shells of freshwater bivalve mollusks (*Margaritifera falcata*) from British Columbia. *International Journal of Earth Science (Geologische Rundschau)* 96: 525-540.
- SCHWEINGRUBER FH, BRIFFA KR & JONES PD (1991) Yearly maps of summer temperatures in Western Europe from A.D. 1750 to 1975 and Western North America from 1600 to 1972: *Vegetatio*, v. 92, p. 5-71.
- THOMPSON I & JONES DS (1977) The ocean quahog, *Arctica islandica*, "tree" of the North Atlantic shelf. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 9, 1199.
- THOMPSON I, JONES DS & DREIBELBIS D (1980a) Annual internal growth banding and life history of the ocean quahog *Arctica islandica* (Mollusca: Bivalvia). *Marine Biology* 57: 25-34.
- THOMPSON I, JONES DS & ROPES JW (1980b) Advanced age for sexual maturity in the ocean quahog *Arctica islandica* (Mollusca: Bivalvia). *Marine Biology* 57: 35-39.
- WANAMAKER AD, HEINEMEIER J, SCOURSE JD, RICHARDSON CA, BUTLER PG, EIRIKSSON J & KNUDSEN KL (2008) Very long-lived mollusks confirm 17th century AD tephra-based radiocarbon reservoir ages for North Icelandic shelf waters. *Radiocarbon* 50: 399-412.
- WANAMAKER AD, BAKER A, BUTLER PG, RICHARDSON CA, SCOURSE JD, RIDGWAY I & REYNOLDS DJ (2009) A novel method for imaging internal growth patterns in marine mollusks: A fluorescence case study on the aragonitic shell of the marine bivalve *Arctica islandica* (Linnaeus). *Limnol. Oceanogr.: Methods* 7, 673-681.
- WITBAARD R & DUINEVELD GCA (1990) Shell-growth of the bivalve *Arctica islandica* (L.), and its possible use for evaluating the status of the benthos in the subtidal North Sea. *Basteria* 54: 63-74.

- WITBAARD R, JENNESS MI, VAN DE BORG K & GANSSEN G (1994) Verification of annual growth increments in *Arctica islandica* L. from the North Sea by means of oxygen and carbon isotopes. Netherlands Journal of Sea Research 33: 91-101.
- WITBAARD R (1996) Growth variations in *Arctica islandica* L. (Mollusca): a reflection of hydrography-related food supply. ICES Journal of Marine Science 53: 981-987.
- WITBAARD R, DUINEVELD GCA & DE WILDE PAWJ (1999) Geographical differences in growth rates of *Arctica islandica* L. (Mollusca, Bivalvia) from North Sea and adjacent water. Journal of the Marine Biology Association of the UK, 79: 907-915.
- WITBAARD R & BERGMANN MJN (2003) The distribution and population structure of the bivalve *Arctica islandica* L. in the North Sea: what possible factors are involved? Journal of Sea Research 50: 11-25.
- ZETTLER ML, BÖNSCH R & GOSSELCK F (2001) Distribution, abundance and some population characteristics of the ocean quahog, *Arctica islandica* (Linnaeus, 1758), in the Mecklenburger Bight (Baltic Sea). Journal of Shellfish Research 20, 169-169.

7. Anhang

Parameter	Gleichung	Erklärung
Gleichläufigkeit	$Glk = \sum (y_{ij} = x_{ij}) \text{ in } \%$	Summe der Intervalle gleicher Steigung in %
Signatur-Gleichläufigkeit (SGlk.)	$SGlk = \sum (y_{ij} = x_{ij}) \text{ in } \%$	Summe der Intervalle gleicher Steigung in %, kalkuliert auf Grundlage der Chronologie
Standard Signatur-Gleichläufigkeit (_SGlk)		Sample= Messreihe Reference= Chronologie
Signatur Standard-Gleichläufigkeit (S_Glk)		Sample= Chronologie Reference= Messreihe
Signatur-Signatur Gleichläufigkeit (SSGlk)		Sample= Chronologie Reference= Chronologie
Kreuzkorrelation (CC)	$CC = \frac{\sum (s_i - s) * (r_i - r)}{\sqrt{\sum (s_i - s)^2 * \sum (r_i - r)^2}}$	Standard-Kreuzkorrelation, Bereich: -1...1
t-Wert	$t = \frac{CC * \sqrt{n-2}}{\sqrt{(1-CC)^2}}$	Standard t-Wert
t-Wert Baillie-Pilcher (TV BP)		t-Wert nach Trendbereinigung mit gleitendem Mittel mit Bandbreite = 5 und Logarithmus zur Basis e (BAILLIE and PILCHER 1973), Maximum=100
t-Wert Hollstein (TV H)		t-Wert nach Trendbereinigung mit Wuchswert (HOLLSTEIN 1980), Maximum=100 $w_i = \log \frac{y_i}{y_{i+1}}$
Cross Date Index (CDI)	$CDI = \frac{(G - 50 + 50 * \sqrt{\frac{overlap}{max\ overlap}}) * T}{10}$ $G = \frac{Glk + _SGlk + S_Glk + SSGlk}{n}$ $T = \frac{TVBP + TVH}{2}$ <p><i>(n = number of operators in the numerator)</i></p>	Datierungsindex, kombiniert aus t-Wert and Gleichläufigkeit, max=1.000

Abb. A: Gleichungen und Herleitungen der statistische Parameter (Quelle: TSAP-Win™ Professional Benutzerhandbuch, Rinntech®, Heidelberg, 2007)

8. Danksagung

Ein großer Dank geht an Professor Dr. Thomas Brey vom Alfred-Wegener-Institut. Als mein Erstbetreuer musste er das ein ums andere Mal große Geduld für mich aufbringen, um mich erneut auf den richtigen Weg zu bringen. Er legte die Messlatte stets sehr hoch und forderte viel, was mich oft verzweifeln ließ. Im Nachhinein jedoch bin ich ihm dafür dankbar.

Dank auch an PD Dr. Barbara Niehoff, bei der ich froh war, eine so freundliche, überaus beliebte und verständnisvolle Zweitgutachterin für meine Studie gewinnen zu können.

Vielen Dank sage ich auch zu den beiden Dipl.-Biol. (und sicher demnächst auch Dr.) Jacqueline Krause-Nehring, sowie Lars Beierlein. Euch beiden ist es hauptsächlich zu verdanken, dass ich mir meine „blumige“ Schreibweise abgewöhnt habe! Vielen Dank für die Stunden, die ihr für mich geopfert habt, um euch immer wieder durch den Wirrwarr meiner Gedanken zu arbeiten.

Ein ganz herzlicher Dank geht auch an Kerstin Beyer, die mich vor allem in technischen Angelegenheiten tatkräftig und stets gut gelaunt unterstützt hat und mir mit großem Engagement und Elan zur Seite gestanden hat.

Ich möchte mich auch bei allen meinen Freunden bedanken, sowie bei meiner Freundin Jenny. Sie alle hatten stets ein offenes Ohr für mich und halfen mir, wo sie nur konnten. Auch wenn ich im Rahmen dieser Bachelorarbeit und während des gesamten Studiums den ein oder anderen etwas vernachlässigt haben mag, so wissen diejenigen genau, dass ich sie keinesfalls vergessen habe.

Der größte Dank gilt vor allem meiner Familie – insbesondere meiner Mutter, Heike Bauer – die mich stets in meinem Streben und Schaffen unterstützt hat und mir auch in schwierigsten Zeiten meines Studiums beigestanden und Kraft gegeben hat. Ich danke Dir für alles, du bist die beste Mutter der Welt und ich liebe Dich!

Erklärung über die selbstständige Abfassung einer schriftlichen Arbeit

Hiermit versichere ich, Florian Bauer, Matrikel-Nr. 2301279, die vorgelegte schriftliche Arbeit zum Thema „Eine Masterchronologie von *Arctica islandica* bei Helgoland“ selbstständig verfasst zu haben und ausschließlich die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet, sowie aus diesen entnommene Gedanken und Formulierungen in angemessener Form gekennzeichnet zu haben.

Bremen, 07.September 2011

Florian Bauer