

Spektrale Varianzanalyse europäischer Klimazeitreihen

Diplomarbeit von
Felix Fundel

*vorgelegt beim Fachbereich Geowissenschaften
der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität
in Frankfurt am Main*

Dezember 2001

1 Zusammenfassung

Die Variabilität des Klimas wird durch diverse Faktoren beeinflusst. Dies führt, je nach Charakteristik dieser Einflüsse, zu bestimmten Mustern in den beobachteten Klimazeitreihen. Mittels statistischer Verfahren kann man diese Muster in den Zeitreihen aufdecken. Ist die Wirkungsweise der Einflußgrößen bekannt, lassen sich diesen Mustern auch Ursachen zuordnen.

Ziel dieser Arbeit ist es, die in den Klimazeitreihen verborgenen quasi-periodischen, zyklischen Komponenten zu finden, und diese mit quasi-periodisch auftretenden klimawirksamen Phänomenen zu vergleichen. Solche Phänomene sind z.B. die solare Aktivität, El Niño-Southern Oscillation, die Quasi-Biennial-Oszillation oder besonders im Bereich Europa die Nord-Atlantik-Oszillation.

Zur Aufdeckung der zyklischen Komponente in den behandelten Klimazeitreihen wurden drei Methoden verwendet. Zum einen, das auf der Fourier-Transformation beruhende Periodogramm und dessen Modifikation, die Autokorrelationspektralanalyse, sowie die Maximum-Entropie-Spektralanalyse.

Die zu analysierenden europäischen Zeitreihen standen für die Klimaparameter Temperatur, Luftdruck und Niederschlag zur Verfügung. Es wurden sowohl Zeitreihen einzelner Stationen (Abb. 2) als auch über bestimmte Flächen gemittelte Gitterpunktsdaten (Abb. 3) bearbeitet. Mit Hilfe der Gitterpunktsdaten wurde versucht, eventuell vorhandene Veränderungen der zyklischen Komponente mit der geographischen Lage zu finden. Besonders für die Nord-Atlantik-Oszillation, die bei Grieser et al. [9] eine von Nord-Osten nach Süd-Westen verlaufende Struktur zeigte, wurden hier entsprechende Ergebnisse erwartet.

Die Analyse charakteristischer oder definierender Zeitreihen der Einflußgrößen brachte eine Reihe von Periodizitäten hervor. So hat eine 11-jährige Schwingung den größten Varianzanteil in den beschreibenden Zeitreihen der solaren Aktivität. Für die NAO ist ein 7 bis 8-jähriger Zyklus charakteristisch und die QBO erzeugt in den sie beschreibenden Zeitreihen eine Schwingung von 2 bis 3 Jahren Länge. Die Varianzen des für ENSO charakteristischen SOI verteilen sich auf diverse Perioden im Bereich von 3 bis 10 Jahren. Einen Sonderfall nimmt der Vulkanismus ein. Obwohl vulkanische Ereignisse eher stochastischer Natur sind, ist eine quasi-periodische Wirkung auf die Klimazeitreihen nicht auszuschließen. Die Spektren des Strahlungsantriebs durch Vulkanismus zeigen jedoch die stochastische Natur dieser Ereignisse. Eine signifikante Unterscheidung vom Rauschen ist dort nicht möglich.

Ein wichtiges Ergebnis ist, betrachtet man die Spektren der Stationsdaten und der Gitterpunktsdaten, ein in vielen Fällen ähnliches Verhalten, d.h. Auftreten von Peaks des

gleichen Frequenzbereichs. Besonders hervorzuheben ist hier die Periode von ca. 8 Jahren, welche vor allem in den Zeitreihen der Temperatur regelmäßig auftritt. Aber auch im QBO Periodenbereich von 2-3 Jahren, sowie im Bereich der Sonnenfleckenzyklen (ca. 11 Jahre), sind in den Spektren aller Klimaparameter regelmäßig Peaks zu erkennen. Dies wird als Beleg für die Zuverlässigkeit der benutzten Verfahren gewertet. Tritt ein bestimmter Zyklus in mehreren Spektren auf, sinkt die Wahrscheinlichkeit, daß es sich dabei lediglich um einen zufälligen „Ausreißer“ im Spektrum handeln könnte. Die Spektren der Temperaturzeitreihen zeigen im Gegensatz zu denen des Niederschlags ein besonders einheitliches Verhalten. In den Temperaturzeitreihen übt besonders die NAO einen großen Einfluß aus. Dies ist ein auch mit Blick auf andere Veröffentlichungen [9],[33] vergleichbares Ergebnis. Die Spektren der Druckzeitreihen sind stärker geprägt von Zyklen in einem Periodenbereich, der auch für ENSO typisch ist. Für die Niederschlagspektren läßt sich solch ein bevorzugtes Frequenzband nicht nennen.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung und Motivation	5
3	Grundlagen	7
3.1	Quasi-periodische Einfluß Phänomene	7
3.1.1	QBO	7
3.1.2	ENSO	8
3.1.3	NAO	10
3.1.4	Solare Aktivität	11
3.1.5	Sonstige Einflüsse	14
3.2	Statistische Grundlagen	15
4	Verwendete Klimadaten	20
4.1	Stationsdaten	20
4.2	Gitterpunktsdaten	22
5	Statistische Analysemethoden	24
5.1	Diskrete Fourier-Transformation	24
5.2	Periodogramm	25
5.2.1	Problembehandlung	26
5.3	Autokorrelationsspektralanalyse ASA	31
5.3.1	Problembehandlung	32
5.4	Maximum-Entropie-Spektralanalyse MESA	32
5.4.1	Problembehandlung	34
6	Auswertung und Ergebnisse	35
6.1	Spektren natürlicher Phänomene	35
6.2	Spektren der Klimazeitreihen	41
6.2.1	Temperatur	41
6.2.2	Luftdruck	46
6.2.3	Niederschlag	48
6.3	Die NAO im Winter	52
7	Wertung und Ausblick	54
	Literaturverzeichnis	56
	Anhang	59

A	Ergänzende Abbildungen	59
A.1	Spektren der Zeitreihen natürlicher Einfluß-Phänomene	60
A.2	Spektren der Zeitreihen der Stationsdaten	67
A.3	Spektren der Zeitreihen der Gitterpunktsdaten	104

2 Einleitung und Motivation

Die Aufzeichnung statistischer Daten durch die Menschheit reicht viele Jahrhunderte zurück. Dies gilt insbesondere für Daten zur Beschreibung des Klimas oder anderer natürlicher Phänomene. In diesem Bereich begann die Erfassung sogenannter „neoklimatologischer“ Daten mit Hilfe physikalischer Meßtechniken bereits im 17. Jahrhundert [26]. Doch erst gegen Ende des 19. Jahrhunderts begann die statistische Analyse mittels mathematischer und wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden [1]. So ist es heute möglich, eine Vielzahl von Informationen aus jeder Zeitreihe zu erhalten. Durch zu sorglosen Umgang mit den existierenden Verfahren kann es jedoch vorkommen, daß die Interpretation der Ergebnisse weit von der Realität entfernt ist. Es ist deshalb sowohl bei der Interpretation als auch bei der Auswahl der Methoden Vorsicht geboten.

Ein wichtiger Ansatz der Zeitreihenanalyse, auch mit Blick auf den Klimawandel, ist mit Sicherheit die Bestimmung des Trends in seinen unterschiedlichen Formen. Nicht weniger interessant ist die Suche nach quasi-periodischen Anteilen in einer Zeitreihe und deren Ursachen. Genau dies ist das Ziel dieser Arbeit.

Für einen quasi-periodischen Einfluß auf das Klima sind viele Ursachen denkbar. Am bekanntesten sind hier wohl, abgesehen vom Jahres- und Tagesgang, Schwankungen verursacht durch solare Aktivität oder etwa durch das El-Niño Phänomen. Ob diese Phänomene auch in Europa detektierbar sind und, wenn ja, mit welcher Stärke wird in dieser Arbeit untersucht.

Neben den global wirkenden Ursachen für Periodizitäten kommen auch regionale Phänomene in Betracht. Für die europäische Region ist dies insbesondere die Nord-Atlantik-Oszillation. Da deren Wirkung auf ein kleineres Gebiet beschränkt ist, ist im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen auch die Bestimmung der Wirkungsbereiche der Einflüsse von Interesse.

Zum Auffinden von Periodizitäten wurden hier sowohl Stations- als auch Gitterpunktdaten der Lufttemperatur in Bodennähe, des auf Meeresspiegelhöhe reduzierten Luftdrucks und des Niederschlags verwendet. Zur Analyse dieser Zeitreihen wurden drei verschiedene Methoden benutzt und miteinander verglichen. Dabei wurde darauf geachtet, Fehlerquellen der Analysemethoden anzugeben oder soweit möglich zu mindern, um mögliche Fehlinterpretationen von Beginn an zu vermeiden. Dazu wurden die verschiedenen Methoden auch auf synthetische Zeitreihen angewandt. Hierdurch läßt sich die unterschiedliche Wirkung der einzelnen Methoden vergleichen, da die zu erwartenden Resultate schon vorher bekannt sind.

Um die in den Klimazeitreihen gefundene zyklische Variabilität mit natürlichen Phänomenen in Verbindung zu bringen, wurden zusätzlich die Zeitreihen entsprechender po-

tentieller Einflußgrößen analysiert. Dort gefundene Perioden wurden dann mit Periodizitäten der Klimazeitreihen verglichen. Dabei besteht immer die Schwierigkeit, daß auch andere, nicht zyklische Einflüsse, wie z.B. Vulkanismus, Periodizitäten verursachen, obwohl ihnen kein periodischer Prozeß zugrunde liegt. Deshalb wurde auch die spektrale Struktur einer Zeitreihe untersucht, die den klimawirksamen Vulkanismus beschreibt.

Was im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht geliefert werden kann, ist ein Beweis für einen eventuell vorhandenen Zusammenhang von klimawirksamen Phänomenen und detektierten Periodizitäten im mathematischen Sinn. Es wird lediglich versucht, strukturelle Ähnlichkeiten aufzudecken.

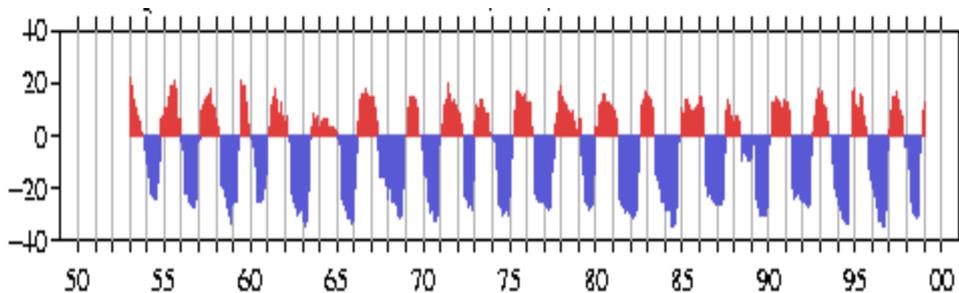


Abbildung 1: Zonaler Wind in 30 hPa [m/s], zusammengesetzt aus Daten der Stationen Canton Island (3° S, 172° W) für Jan. 1953 - Aug. 1967; Gan/Malediven (1° S, 73° O) für Sep. 1967 - Dez. 1975; und Singapur (1° N, 104° O) für Jan. 1976 - Feb. 1999. Quelle [6].

3 Grundlagen

3.1 Quasi-periodische Einfluß Phänomene

In diesem Kapitel werden die für das Klimasystem wichtigen zyklischen Einflußgrößen behandelt. Diese Phänomene sind in Ursache und Wirkung unterschiedlich. Ihr Wirkungsbereich reicht vom Ozean bis in die Stratosphäre, sowie vom regionalen bis hin zum globalen Scale. Dabei können auslösende Faktoren sowohl terrestrischer als auch extraterrestrischer Natur sein. Auch ist die Periode klimawirksamer Ereignisse, mit Ausnahme astronomischer Einflüsse, nicht konstant, man spricht deshalb von Quasi-Periodizität. Desweiteren kann die Amplitude der Zyklen schwanken und auch Phasensprünge sind vorstellbar. Dazu kommen stochastische Ereignisse, deren Zyklen nur scheinbar existieren. Der Einfluß all dieser Phänomene findet sich in den zu behandelnden europäischen Zeitreihen wieder. Um deren Verhalten im Frequenzbereich interpretieren zu können ist es deshalb nötig, genauere Kenntnisse über die Zyklen der Naturphänomene zu erlangen. In diesem Kapitel werden nun die wichtigsten zyklischen Phänomene genannt und zugehörige beschreibende oder definierende Zeitreihen aufgeführt.

3.1.1 QBO

Als **Quasi-Biennial-Oscillation (QBO)** wird ein in der tropischen Stratosphäre auftretendes Phänomen bezeichnet [15]. Gemeint ist der Wechsel von einer west- zu einer ostwärts gerichteten Strömung, der sich mit einer Periode von ca. 2-3 Jahren vollzieht, im Mittel sind es 28 Monate [10], [31], [27]. Dieser Wechsel setzt sich, beginnend in der mittleren Stratosphäre, in einer Höhe von 30 km, bis in die obere Troposphäre mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 km/Monat fort. Während in höheren Lagen die Ostwindphase länger vorherrscht, ist es in tieferen Lagen die Westwindphase, wobei die

Ostwinde die höheren Absolutgeschwindigkeiten aufweisen. (s. Abb. 1). Die maximalen Amplituden befinden sich in einer Höhe von 20 hPa mit mittleren Windgeschwindigkeiten von 30m/s für Ostwinde und 15m/s für Westwinde [15], unterhalb 70 hPa nehmen sie rasch ab. Die heute allgemein anerkannte Theorie zur Entstehung der QBO ist 1968 von Holton und Lindzen entwickelt, und 1972 modifiziert worden. Als Ursache wird dort die Ausbreitung tropischer Schwerewellen in die Stratosphäre genannt.

Die Auswirkungen der QBO erstrecken sich über die gesamte Atmosphäre bis in hohe Breiten. Eine entsprechende Theorie wurde 1980 von Holton und Tan aufgestellt [15]. Diese Theorie sagt für von Äquator bis zu den Polen durchgängige Westwinde einen kalten und stabilen Polarwirbel voraus. Im Falle von Äquatorialen Ostwinden werden ein starkes Aleutenhoch und höher Temperaturen im polaren Bereich begünstigt [15]. Auch in höheren Breiten ist der Zyklus der QBO deshalb in vielen Zeitreihen verschiedener Klimaelemente vorhanden.

3.1.2 ENSO

Der Begriff ENSO entsteht durch die Zusammenführung der Phänomene **El-Niño** und **Southern-Oscillation**. Bei ENSO handelt es sich um ein gekoppeltes Atmosphären-Ozean Phänomen im Bereich der pazifischen Innertropischen Konvergenzzone (ITC). Dabei steht El Niño für den Ozeanischen und Southern Oszillation für den atmosphärischen Teil des Phänomens. Zur Beschreibung wird hier zunächst auf den „Normalzustand“ der Zirkulation in diesen Breiten eingegangen (Abb. 2 oben). Die Hadley-Zirkulation bewirkt das Anströmen bodennaher Luft aus Norden bzw. Süden gegen den Äquator. Dabei kommt es durch den Einfluß der Coriolis-Kraft zu einer Drehung des Windes nach Westen, dem sogenannten Nordost- bzw. Südost-Passat. Diese Passate bewirken eine westwärts gerichtete Meeresströmung. Somit kommt es vor der Westküste Südamerikas zum Aufsteigen tiefen und somit kalten, nährstoffreichen Wassers, was mit einem Anstieg der Thermoklinen verbunden ist. Die Temperatur des Oberflächenwassers im Südostpazifik kann dabei bis zu 10°C unter der Wassertemperatur im indonesischen Raum betragen [5]. Durch die hohen Wassertemperaturen in Indonesien herrscht dort eine ebenfalls erhöhte Verdunstung von Meerwasser, was zusammen mit aufsteigender Warmluft Niederschläge zur Folge hat. Im Gegensatz dazu bewirkt das im Ostpazifik kältere Wasser ein Absinken der Luft und damit ein trockenes Klima. Die zonale, entlang des Äquators liegende atmosphärische Zirkulation in der ITC wird Walker-Zirkulation genannt. Sie hat ihren Antrieb in den angesprochenen unterschiedlichen Oberflächenwassertemperaturen.

In Falle eines El Niño-Ereignisses (Abb. 2 unten) kommt es nun durch eine Abnahme der Passatwinde zu einer Abschwächung der westlichen Meeresströmung. Der Auftrieb des kalten Meerwassers wird dabei abgeschwächt, verbunden mit einem Absinken der Thermoklinen, und die Oberflächenwassertemperatur erhöht sich in den ansonst kälteren Regionen. Dies hat eine Abschwächung oder Verschiebung der Walker-Zirkulation zur Folge. Es kommt dabei zu einem Aufsteigen von Luftmassen an der Westküste

Südamerikas, und somit zu Niederschlägen in dieser sonst trockenen Region. Eine Verschiebung der Walker-Zirkulation bewirkt besonders im Nordosten Brasiliens und im asiatischen Raum anhaltende Trockenheit durch Absinkvorgänge, sowie insgesamt eine Umverteilung der trockenen bzw. feuchten Regionen [5].

Um die Abschwächung der Passatwinde als Auslöser für eine El Niño-Ereignis erklären zu können, muß man die Luftdruckverteilung im pazifischen Raum näher betrachten. Dort herrscht im äquatorialen Ostpazifik ein Gebiet hohen Druckes, während im indonesischen Raum eine Region tiefen Druckes zu finden ist. Die Größe des Druckunterschiedes zwischen diesen Gebieten ist verantwortlich für die Stärke der Walker-Zirkulation. Zur Beschreibung dieses Luftdruckunterschiedes wird die Differenz zweier stellvertretender Stationen (Tahiti und Djakarta) verwendet der sogenannte Southern Oscillation Index (SOI). Dieser Index ist El Niño-Ereignissen gegenüber negativ korreliert. Im Falle eines El Niño-Ereignisses weist der SOI also eine negative Abweichung vom Mittelwert auf [5]. Abbildung 3 zeigt den Verlauf des SOI in den letzten 400 Jahren.

Der Name El Niño (Christkind) verdankt das Phänomen seinem gehäuftem Auftreten um die Weihnachtszeit. Normalerweise überdauert dieser Zustand nur wenige Wochen, in Extremfällen, wie z.B. 1982/83 oder 1997/98, kann er jedoch über Monate hinweg anhalten. Die Zykluslänge variiert dabei von ca. 3 bis 10 Jahren. Mit dem heutigen Stand der Kenntnis ist es möglich ein El Niño-Ereignis, unter der Verwendung gekoppelter Atmosphäre-Ozean-Modelle, ca. 1 Jahr im Voraus zu prognostizieren [5]. Die mit El-Niño-Ereignissen einhergehenden Folgen betreffen nicht nur die Fischerei Südamerikas, mit der angesprochenen Zufuhr warmen, nährstoffarmen Wassers. Die Wirkung auf das Wetter im Tropischen Bereich erstreckt sich rund um den Globus mit teilweise erheblichen wirtschaftlichen sowie gesellschaftlichen Folgen [5]. So leiden besonders das nordöstliche Brasilien und Indonesien verstärkt unter Dürre und daraus resultierenden Ernteeinbrüchen oder Waldbränden [5]. Gleichzeitig kommt es in sonst eher trockenen Gebieten, wie z.B der Westküste Südamerikas, zu teilweise sintflutartigen Niederschlägen und damit verbundenen Überschwemmungen und Erosionsschäden [5]. Da im Rahmen dieser Arbeit die Analyse europäischer Klimazeitreihen im Vordergrund steht, sind besonders die Fernwirkungen („Teleconnections“) des ENSO-Phänomens von Interesse. Nach Jones erklärt der Einfluß von ENSO im Periodenbereich von 2 bis 7 Jahren 20 – 30% der Varianz der Temperaturvariabilität [30],[13]. Es ist jedoch anzunehmen, daß dieser Einfluß in Europa wesentlich geringer ist, da dort ein anderes Zirkulationsregime vorherrscht. So kommt es durch ein auftretendes El-Niño Ereignis zu einer ausgeprägteren Hadley-Zirkulation im pazifischen Bereich, was wiederum Auswirkungen auf die Zirkulation in mittleren Breiten hat (Rossby-Wellen). Erwartungsgemäß geht die Fortsetzung dieser Störungen in europäische Regionen mit der Überlagerung anderer Signale einher, sodaß eine Unterscheidung vom Rauschen nicht immer möglich sein wird.

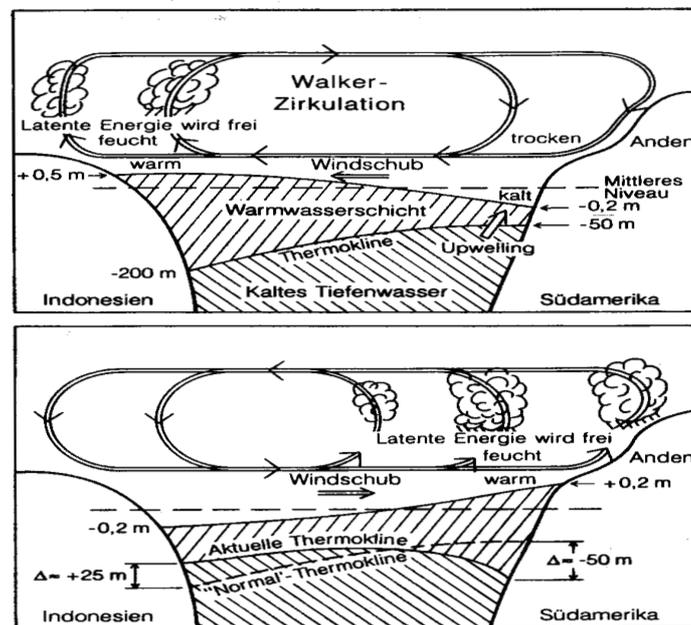


Abbildung 2: Qualitative Darstellung der atmosphärischen und ozeanischen Zirkulation im äquatorialen Pazifik. **Oben:** Normalzustand, **Unten:** Höhepunkt eines El-Niño Ereignisses. Quelle: [19]

3.1.3 NAO

Die Nord-Atlantik-Oszillation (NAO) ist als schwankende Differenz des Luftdrucks zwischen Islandtief und Azorenhoch definiert. Diese Druckverteilung beeinflusst die Zonalität der Strömung in der europäischen Region. Zur Beschreibung der NAO sind verschiedene Indizes entwickelt worden. Sie beruhen auf der Druckdifferenz zweier repräsentativer Stationen. Für das Islandtief werden dabei die Druckdaten der Station Stykkisholmur auf Island verwendet, im Bereich des Azorenhochs sind es die Stationen Ponta Delgada, Lissabon oder Gibraltar [22],[12],[14]. Die Schwankungen des NAO-Index sind in Abbildung 4 zu sehen. Eine große Differenz (positiver NAO-Index) steht für erhöhte Zonalität, was zu verstärkter Zufuhr feuchterer Luft nach Europa führt. Ein negativer NAO-Index steht für eine eher blockierte Lage, und damit für eine Phase geringer Westwinde. Es sind daher weniger Zyklonen und weniger Niederschlag zu erwarten. Besonders deutlich ist der Einfluß der NAO auf Europa in den Wintermonaten. Dies liegt an den in dieser Jahreszeit strahlungsbedingt höheren Temperaturgegensätzen zwischen Norden und Süden. Dadurch kommt es schon bei vergleichsweise niedrigem (hohem) Index zu einem relativ kalten (milden) Winter [33],[16].

In Untersuchungen europäischer Temperaturzeitreihen wurde eine Periodizität im Be-

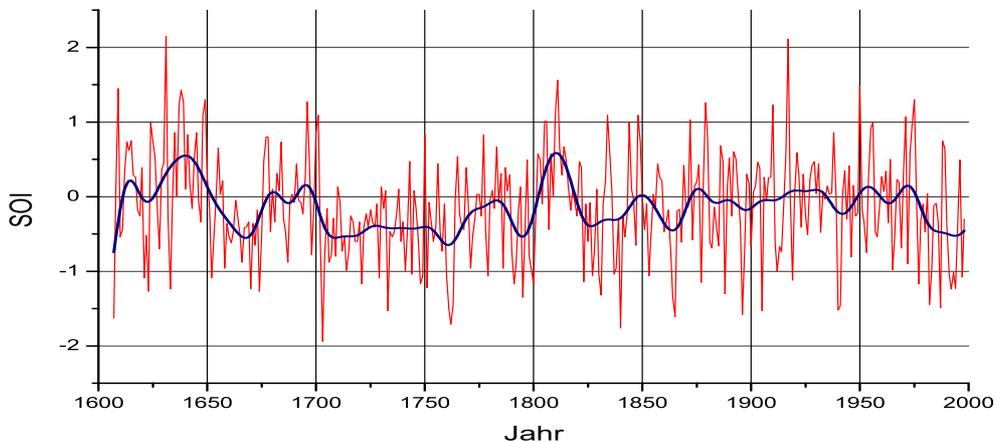


Abbildung 3: *Southern-Oscillation-Index in den Jahren 1607 - 1998. Die Werte ergeben sich als Druckdifferenz der Stationen Tahiti und Darwin, abzüglich des Langzeitmittels dieser Differenz, normiert mit deren Standardabweichung, multipliziert mit 10. Die blaue Linie entspricht einem 10-Jahres Mittel. Quelle: [30].*

reich von 8 Jahren gefunden, die der NAO zugeschrieben wird [33]. Ob diese Periode neben den Temperaturdaten auch in den Niederschlags- und Druckdaten Europas zu finden ist, wird in dieser Arbeit untersucht.

3.1.4 Solare Aktivität

Es liegt auf der Hand, daß Schwankungen der solaren Einstrahlung Änderungen der Lufttemperatur zur Folge haben. So bewirkt eine erhöhte Einstrahlung durch Absorption eine höhere Stratosphärentemperatur bzw. einen Anstieg der entsprechenden Druckflächen. Daraus ergeben sich auch Änderungen in anderen klimarelevanten Größen der Troposphäre, wie z.B. im Luftdrucks und Niederschlag. Durch langjährige Messungen der Strahlungsstärke der Sonne und auch aus deren Rekonstruktion mittels paläoklimatologischer Daten wurden diverse periodische Schwankungen entdeckt. Diese unterscheiden sich sowohl in der Länge als auch in der Amplitude der Periode. Hier eine Zusammenstellung bekannter Zyklen [29] und deren Ursachen:

- 5- bis 6-jähriger „halber“ Sonnenfleckenzyklus.
- Quasi-11-jähriger „Schwabe-Zyklus“. Zykluslänge schwankt zwischen 9 und 14 Jahren. Im Mittel meist mit 11,1 Jahren angegeben, im Zusammenspiel mit der schwankenden Anzahl der Sonnenflecken.

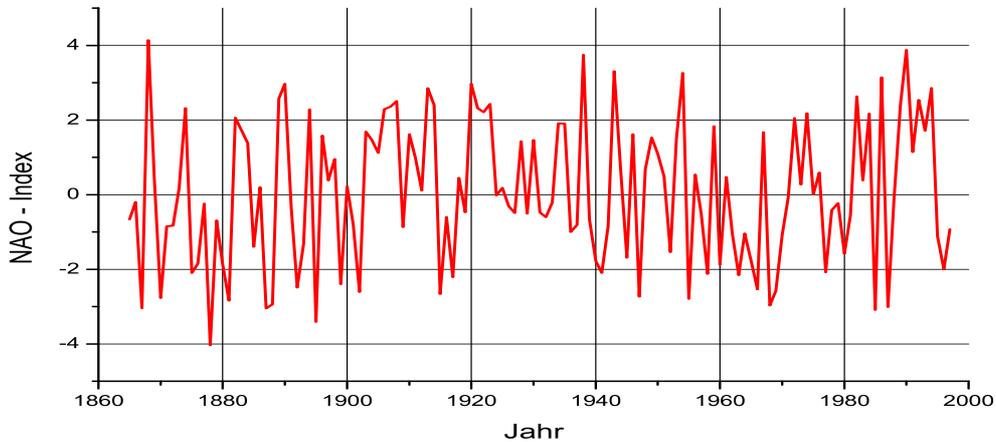


Abbildung 4: *NAO-Index der Jahre 1865-1997. Basierend auf der Differenz der normalisierten Drücke (NN) der Stationen Ponta Delgada (Azoren) und Stykkisholmur/Reykjavik (Island). Normalisierung durch Division mit der Standardabweichung der Zeitreihe aus den Jahren 1865-1984 der jeweiligen Station. Quelle: [12], [14].*

- Quasi-22-jähriger „Hale-Zyklus“ (ca. 20-23 Jahre). Innerhalb dieser Zeit erfolgt eine Umpolung des Magnetfeldes der Sonne.
- Quasi-42- und quasi-50-jährige „Schöve-Zyklen“.
- Quasi-78-jähriger (oder auch quasi 80-90 Jahre) „Gleißberg-Zyklus“, der die Amplitude des Schwabe-Zyklus modulieren soll [23].
- Quasi-179-jähriger „José-Zyklus“, der aus einem kompletten Umlauf der Sonne um das Massenzentrum des Sonnensystems resultiert.

Eine geeignete physikalische Größe zur Beschreibung sämtlicher Änderungen solarer Aktivität ist die Solarkonstante (SK). Sie gibt die Energiedichte auf eine senkrecht zur Verbindungslinie Sonne-Erde stehende Fläche an der fiktiven Obergrenze der Atmosphäre wieder und beträgt im Jahresmittel ca. 1368 W/m^2 . Die durch die verschiedenen Zyklen hervorgerufenen Schwankungen lassen die SK kurzfristig von 1360 bis 1370 W/m^2 variieren [19], interannuär liegt die Schwankungsbreite aber nur im Promillebereich (ca. $\pm 1 \text{ Wm}^{-2}$).

Als Indikator der Variationen der SK dienen die periodisch verstärkt auftretenden Sonnenflecken. Diese Flecken sind Gebiete geringerer Ausstrahlung und somit kälter und dunkler. Gleichzeitig jedoch werden sie von sogenannten Sonnenfackeln (Flares oder

Protuberanzen) begleitet, welche die durch die Sonnenflecken verminderte Ausstrahlung überkompensieren. Die Ausstrahlung ist also im Vergleich zu einer ruhigen Sonne, ohne Sonnenflecken, erhöht.

Als Maßzahl für die solare Aktivität dient deshalb auch die Sonnenfleckenrelativzahl (SRZ). Diese beschreibt jedoch nicht die vollständige Variabilität der solaren Ausstrahlung. Sie ist lediglich eine gewichtete Zusammenstetzung der Anzahl einzelner Sonnenflecken und der Zahl der Sonnenfleckengruppen. Eine Messreihe der Sonnenfleckenrelativzahl ist in Abbildung 5 zu sehen. Dort erkennt man die periodisch auftretenden Maxima, deren Amplitude ebenfalls Schwankungen unterworfen ist.

Als weitere Ursache für die Schwankungen der SK müssen die Variationen des Durchmessers der Sonne genannt werden. Der Sonnendurchmesser verändert sich periodisch, mit ihm verändert sich die Helligkeit der Sonne und somit die SK [29].

Ein anderer beobachteter Zusammenhang besteht zwischen den Positionen der Planeten zur Sonne und der SK. Aus den ständigen Veränderung dieser Positionen folgt eine Drehmomentänderung der Sonne. Diese Änderung des Drehmoments hat ebenfalls Auswirkungen auf die Aktivität der Sonne [29].

Ob die verschiedenen Perioden der Sonnenaktivität in den für diese Arbeit betrachteten Zeitreihen wiederzufinden sind, wird sich im Folgenden zeigen.

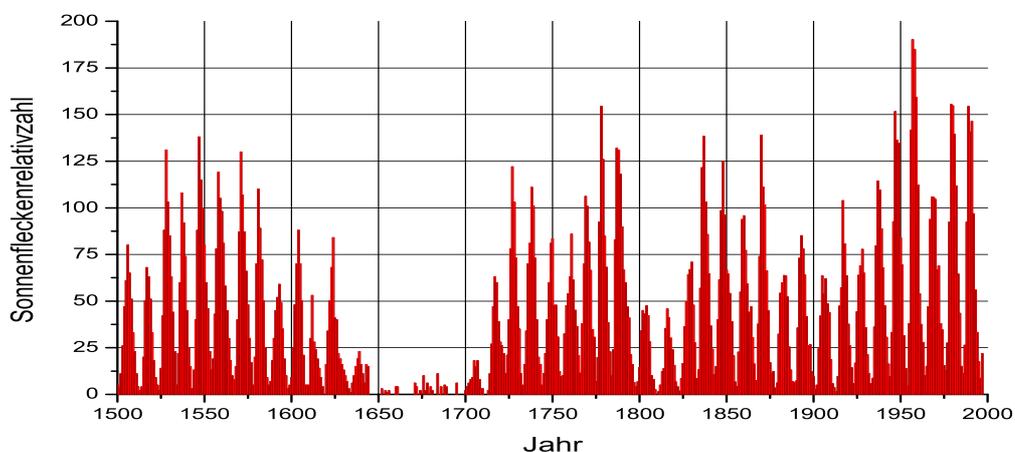


Abbildung 5: Sonnenfleckenrelativzahlen der Jahre 1500 - 1997. $SRZ = k(10G + E)$. G = Zahl der Sonnenfleckengruppe, E = Anzahl einzelner Sonnenflecken, k = Korrekturfaktor. Zusammensetzung der Zeitreihe: 1500-1609 (unsicher) nach Schove (1983), 1610-1709 nach Eddy, 1710-1874 nach Waldmeyer, 1875-1981 nach NCAR, ab 1982 nach „Wetter und Leben“, 1994: Mittel Jan.-Jun..

3.1.5 Sonstige Einflüsse

Starken Einfluß auf das Klima hat auch der eruptive Vulkanismus. Dabei kommt es durch den Eintrag der emittierten Gase in die Stratosphäre zur Bildung klimawirksamen Aerosols, welches eine Änderung der solaren Einstrahlung bewirkt. Diese atmosphärische Aerosolteilchen beeinflussen durch ihr Streu- und Absorptionsvermögen direkt und durch ihr Fungieren als Kondensationskern auch indirekt den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und damit das globale Klima. Wichtig ist, daß das vom Vulkan ausgestoßenen Aerosol bis in die Stratosphäre getragen wird, da nur dort die Verweilzeit lang genug ist (je nach Höhe zwischen 1 und 4 Jahren [9]), um längerfristige klimatische Veränderungen hervorzurufen. Ein Maß für die Wirkung des Vulkanismus auf die solare Einstrahlung ist der Strahlungsantrieb. Seine Abschwächung durch Vulkanaktivität ist in Abbildung 6 zu sehen. Eine direkte Wirkung des durch vulkanische Aktivität entstandenen stratosphärischen Aerosols ist somit ein Rückgang der Temperatur in der Troposphäre. Als Beispiel sei hier der Ausbruch des Pinatubo auf den Philippinen 1991 genannt, der für zwei Jahre eine globale Abkühlung von bis zu $0,5^{\circ}\text{C}$ zur Folge hatte [3]. Durch Änderungen der atmosphärischen Zirkulation als Folge eines Vulkanausbruchs kann es jedoch auch zu regionalen Erwärmungen kommen [3]. Es ist einleuchtend, daß es sich beim Vulkanismus eher um ein stochastisches als um ein wirklich periodisches Phänomen handelt. Betrachtet man jedoch das Varianzspektrum des durch Vulkanismus verminderten solaren Antriebs, erkennt man dennoch Periodizitäten. Aus diesem Grund wird auch in dieser Arbeit das Varianzspektrum des vulkanischen Strahlungsantriebs untersucht, jedoch nur für einen den Beobachtungszeitraum der verwendeten Klimazeitreihen.

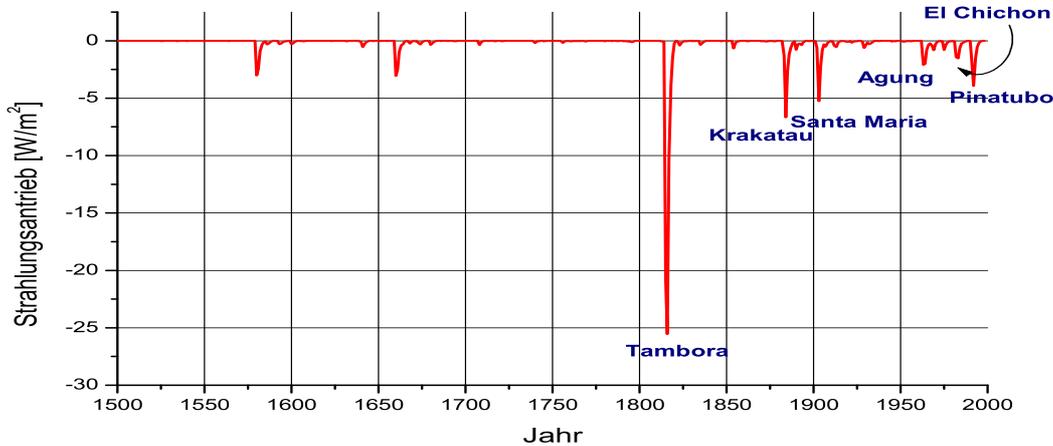


Abbildung 6: Abweichungen vom mittleren Strahlungsantrieb, verursacht durch Vulkanausbrüche der Jahre 1500 - 1998 mit Eintrag von Spurengasen in die Stratosphäre. Quelle [8].

3.2 Statistische Grundlagen

Dieses Kapitel befaßt sich mit den zum weiteren Verständnis grundlegenden statistischen Begriffen und Verfahren.

Aufbau einer Zeitreihe Meßreihen, wie sie im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, sind Funktionen der Zeit und setzen sich aus einer Folge von Meßwerten äquidistanter Zeitabstände zusammen. Für die hier folgenden weiteren Analysemethoden, bietet es sich an, die Zeitreihe $(x_t)_{t=1, \dots, N}$ durch drei Komponenten zu beschreiben. Eine Trendkomponente Tr_t , eine zyklische Komponente z_t und das Rauschen r_t . Für diesen Ansatz gilt demnach

$$x_t = g_t + z_t + r_t. \quad (1)$$

Mit der Trendkomponente der Zeitreihe ist hier der lineare Trend, soweit vorhanden, gemeint. Enthält die Zeitreihe keinen Trend, ergibt sich Tr_t als Mittelwert. Entfernt man nach diesem Modell die Trendkomponente und die zyklische Komponente aus der Zeitreihe, bleibt übrig.

Es wird ausdrücklich betont, daß es sich bei dem hier verwendeten Ansatz nur um ein, vergleichsweise einfaches, Modell handelt, eine Zeitreihe zu zerlegen. Es existieren auch Ansätze den Rauschanteil zur Analyse von Extremwerten weiter zu unterteilen, genauso wie es Modelle gibt die Mischterme aus glatter und zyklischer Komponente verwenden [24]. Im Rahmen der hier getätigten Zeitreihenanalysen soll obiger Ansatz jedoch genügen.

In den vorhandenen Daten wird nun mit verschiedenen statistischen Methoden nach vorhandenen zyklischen Schwankungen gesucht. Dabei bietet es sich an, den linearen Trend zu entfernen, da er das Spektrum der Zeitreihe zu langen Perioden hin verändert. Die Schwankungen der Zeitreihe werden durch die Begriffe Periode oder Frequenz beschrieben. Die Periode P gibt an, welche Zeit eine Schwankung benötigt um einen vollständigen Zyklus zu durchlaufen. Die Frequenz f steht für die Anzahl vollständiger Zyklen in einer Zeiteinheit. Alternativ kann auch die Wellenzahl k verwendet werden. Sie steht für die Anzahl vollständiger Schwingungen im Beobachtungszeitraum. Es gilt der Zusammenhang

$$f = \frac{1}{P} = \frac{k}{N}. \quad (2)$$

Ziel der Spektralanalyse ist es, die in der Zeitreihe verborgenen oder manifesten Perioden oder Frequenzen, mittels verschiedener Verfahren, aufzuspüren.

Mittelwert Der arithmetische Mittelwert gibt das mittlere Niveau einer Zeitreihe an. Er ist definiert als [32]

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x(t). \quad (3)$$

Trend Die glatte Komponente g_t des Zeitreihenmodells wird durch das Polynom

$$g_t = \sum_{i=0}^r a_i t^i \quad (4)$$

beschrieben. Dabei sind $r \in \mathbb{N}_0$ der Polynomgrad und $a_i \in \mathfrak{R}$ die Trendparameter. Für $r = 0$ ergibt sich a_0 als Mittelwert der Zeitreihe

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N x_t. \quad (5)$$

Für $r = 1$ erhält man den linearen Trend als glatte Komponente. Es gilt die Trendgleichung

$$g_t = a_0 + a_1 t, \quad (6)$$

mit den Trendparametern

$$a_1 = \frac{\sum_n t_n x_n - \bar{x} \sum_n t_n}{\sum_n t_n^2 - \bar{t} \sum_n t_n} \quad (7)$$

und

$$a_0 = \bar{x} - a_1 \bar{t} \quad (8)$$

für eine Zeitreihe mit $n = 1, \dots, N$ Elementen. Polynome bis zur Ordnung 4 zur Beschreibung des Trends sind in Abb. 7 dargestellt. Im Rahmen dieser Arbeit soll der lineare Trend ($O(1)$) als Ausdruck der glatten Komponente von Zeitreihen genügen. Höhere Polynome werden nicht in Betracht gezogen.

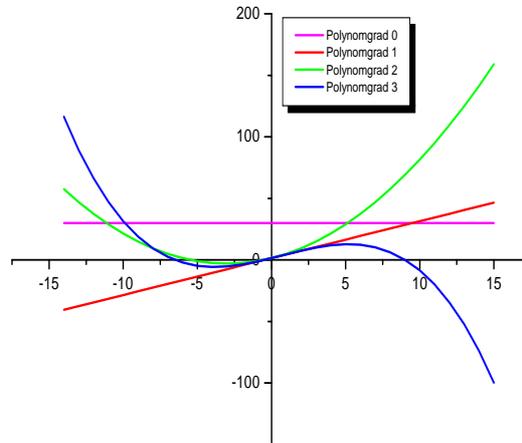


Abbildung 7: Polynomverläufe für Trendpolynome bis zur Ordnung 3.

Varianz Die Varianz σ^2 ist ein Maß für die Stärke der Schwankung einer Zeitreihe. Sie ist gegeben durch:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x(t) - \bar{x})^2. \quad (9)$$

Genauso kann die Schwankung aber auch durch die Standardabweichung $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$ ausgedrückt werden.

Kovarianz Für zwei Zeitreihen, x_t und y_t gleichen Umfangs, stellt sich die Frage nach der Stärke ihres linearen Zusammenhangs. Ein Maß dafür ist die empirische Kovarianz

$$c = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x(t) - \bar{x})(y(t) - \bar{y}). \quad (10)$$

Aus der Kovarianz erhält man durch Dividieren mit dem Produkt der zu den Zeitreihen gehörenden Standardabweichungen (Normierung) den sogenannte **Korrelationskoeffizienten** nach Pearson

$$r = \frac{c}{\sigma_x \cdot \sigma_y}. \quad (11)$$

Der Korrelationskoeffizient ist eine dimensionslose Größe, die je nach Stärke der linearen Beziehung Werte von -1 bis +1 annehmen kann. Negative Werte drücken eine Antikorrelation aus, für $r = 0$ existierte keine Korrelation, positive Werte stehen entsprechend für eine positive Korrelation.

Durch eine einfache Modifikation läßt sich die Kovarianz auch für verschiedene Intervalle einer Zeitreihe angeben. Man erhält so die **Autokovarianzfunktion**

$$c_\tau = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-\tau} (x(t) - \bar{x})(x(t+\tau) - \bar{x}) \quad (12)$$

mit „lag“ (Zeitverschiebung) $\tau = 0, 1, \dots, N-1$. τ steht für die Anzahl der Verschiebungen der Zeitreihen, die bei der Berechnung von c_τ berücksichtigt werden. Für große τ verringert sich die Zahl der verwendeten Wertepaare zunehmend. Den so berechneten Autokovarianzen sollte dann nicht mehr ohne Vorbehalt vertraut werden. Ein in der Literatur oft angegebener empirischer Maximalwert für τ liegt bei $N/3$.

Auf gleiche Weise läßt sich der Korrelationskoeffizient auf Wertepaare innerhalb einer Zeitreihe beziehen. Er wird dann **Autokorrelationskoeffizient** genannt und hat die Form

$$r_\tau = \frac{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-\tau} (x(t) - \bar{x})(x(t+\tau) - \bar{x})}{\sum_{t=1}^N (x(t) - \bar{x})^2} = \frac{c_\tau}{c_0}. \quad (13)$$

Nun können c_τ und r_τ auch für negative Verschiebungen (auch Lags genannt) berechnet werden. Es gilt jedoch

$$c_\tau = c_{-\tau} \quad (14)$$

und

$$r_\tau = r_{-\tau}. \quad (15)$$

Rauschen Eine Zeitreihe ist sowohl von deterministischen als auch von zufälligen Faktoren bestimmt. Das Residuum einer Zeitreihe der Form (1), nach Entfernen des glatten und des zyklischen Anteils, wird Rauschen genannt. Es ist eine Folge von Zufallsvariablen. Man unterscheidet verschiedene Formen des Rauschens.

Besteht die bereinigte Zeitreihe aus identisch verteilten und voneinander unabhängigen Variablen, spricht man von weißem Rauschen. Ein solches Rauschen beinhaltet alle Frequenzen des Spektrums mit gleichen Varianzanteilen. Die Werte des Residuums sind voneinander unabhängig.

Sind die das Rauschen bestimmenden Werte unabhängig und normalverteilt, spricht man von Gaußischem weißem Rauschen.

Nimmt der Varianzanteil mit zunehmender Frequenz ab, so handelt es sich um rotes Rauschen. Besteht das Spektrum des Rauschens hauptsächlich aus hohen Frequenzen, wird es blau genannt.

Weitere Formen des Rauschens sind hier nicht von Interesse.

Test auf Homogenität Bei der Aufzeichnung von Klimavariablen kann es zu methodischen Fehlern im Meßverfahren kommen. Diese ungewollten Veränderungen in den Werten der Zeitreihen können verschiedene Ursachen haben. So kann es im Laufe der

Tabelle 1: Kriterien für die Einteilung in Homogenitätsklassen

Alle Test „homogen“	Sehr wahrscheinlich homogen	Klasse 1
Nur ein Test „inhomogen“	Wahrscheinlich homogen	Klasse 2
Gemischte Ergebnisse	Unklare Entscheidung	Klasse 3
Nur eine Test „homogen“	Wahrscheinlich inhomogen	Klasse 4
Alle Test „inhomogen“	Sehr wahrscheinlich inhomogen	Klasse 5

Zeit zu einem Wechsel des Meßgerätes oder Meßverfahrens kommen. Ebenso können Veränderungen in der Umgebung des Meßgerätes zu systematischen Fehlern führen. Je nach Ursache ist die Wirkung auf die Zeitreihe unterschiedlich. Die Veränderungen können sprunghaft, ebenso wie langsam fortschreitend sein. Fehler dieser Art werden Inhomogenitäten genannt und sind für die weitergehenden Analysen in der Regel unerwünscht, da sie als klimatische Veränderungen fehl interpretiert werden könnten. Ein objektives Testkriterium wird durch das uneinheitliche Verhalten der Zeitreihen erschwert, weshalb diverse Tests zur Aufdeckung von Inhomogenitäten entwickelt wurden, so z.B. das Abbesche Homogenitätskriterium [28], welches die Zeitreihe durch Betrachtung der Abweichungen vom Mittelwert bewertet. Ein anderer Test ist das Helmertsche Homogenitätskriterium [28], das ausgehend vom Mittelwert, die Vorzeichenwechsel zur Bewertung verwendet. Neben diesen beiden sogenannten absoluten Testverfahren, existieren auch noch relative Homogenitätstests. Dabei wird die zu testende Zeitreihe mit einer anderen Zeitreihe verglichen, deren Homogenität man sich sicher ist. Die beiden zu vergleichenden Zeitreihen sollten jedoch eine hinreichend gute Korrelation aufweisen [28]. Stellvertretend für die Klasse der relativen Homogenitätstests sei hier der von Craddock [4] entwickelte „Test der kumulativen Abweichung“ genannt. Ein gängiges Verfahren ist es nun, eine Zeitreihe mit mehrerer Tests auf ihre Homogenität hin zu überprüfen. Je nach Übereinstimmung der Aussagen der Tests, wird die Zeitreihe dann in verschiedene Homogenitätsklassen eingeteilt, s. Tabelle 1. Eine genauere Beschreibung der verwendeten Tests findet sich in [25]. Trotz der Verwendung dieser Methode kann jedoch nicht immer ausgeschlossen werden, daß tatsächlich stattfindende Klimaänderungen als Inhomogenitäten interpretiert werden und umgekehrt.

4 Verwendete Klimadaten

Je nach Ziel der Untersuchung ist es angebracht, einen entsprechenden Zeitreihentyp zu verwenden. Die beiden hier verwendeten Datensätze stammen sowohl von einzelnen Stationen als auch von über größere Gebiete gemittelten Gitterpunkten. Ist es das Ziel, räumliche Strukturen aufzudecken, bietet es sich an auf Gitterpunktsdaten zurückzugreifen. Stationsdaten sind dafür nicht immer geeignet, da die räumliche Repräsentanz, auch abhängig von der Variablen, unter Umständen nur sehr gering ist. Das bedeutet, daß die durch die Analyse der entsprechenden Reihe gewonnenen Erkenntnisse nur bedingt auf entfernte Orte übertragbar sind. Gutmütig in diesem Sinn verhält sich die Temperatur und auch Druck, wohingegen die Repräsentanz von Niederschlagsmessungen sehr schlecht ist.

Wie dem Titel der Arbeit zu entnehmen ist, werden hier ausschließlich europäische Zeitreihen behandelt. Dabei handelt es sich um Zeitreihen der Temperatur, des Niederschlages und des Druckes. Zur Verfügung standen Zeitreihen einzelner europäischer Stationen sowie Gitterpunktsdatensätze für jede behandelte Klimavariablen. Ein Auswahlkriterium, die Stationszeitreihen betreffend, war dabei deren Homogenität. Reihen die für die Temperatur wahrscheinlich oder sehr wahrscheinlich inhomogen getestet wurden (s. Tabelle 1), also Homogenitätsklasse > 3 , sind für weitere Analysen nicht verwendet worden. Die Zeitreihen setzten sich in ihrer ursprünglichen Form aus Monatsmittelwerten zusammen. Um jahreszeitlich bedingte Schwankungen zu entfernen, wurden die Monatsmittel zu Jahresmitteln zusammengefaßt. Des weiteren wurde vor der Varianzanalyse der lineare Trend aus den Zeitreihen entfernt. Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die benutzten Zeitreihen und deren Homogenitätsklasse, soweit sie bestimmt und somit bekannt ist.

4.1 Stationsdaten

Temperaturdaten Für die Temperatur standen 41 Zeitreihen aus 120 Jahreswerten zur Verfügung. Um die Ergebnisse der Analyse miteinander vergleichen zu können, wurden nur Zeitreihen des gleichen Beobachtungsintervalls verwendet. Beschränkt durch die kürzeste Reihe, ergibt sich der Zeitraum 1871 - 1990 und somit eine Zeitreihenlänge von 120 Jahren.

Druckdaten Insgesamt wurden für 22 europäische Stationen die Zeitreihen des Bodenluftdrucks auf zyklische Varianzanteile hin untersucht. Für alle Stationen lagen Meßwerte aus den Jahren 1891 - 1990 vor, was einer Zeitreihenlänge von 100 Jahren entspricht.

Niederschlagsdaten Die Varianzanalyse europäischer Niederschlagszeitreihen basiert auf 33 Stationen. Das Beobachtungsintervall umfaßt die Jahre 1883 - 1990, woraus sich eine Zeitreihenlänge von 108 Jahren ergibt.

Tabelle 2: Verwendete Zeitreihen mit Ergebnissen des Homogenitätstests, soweit bekannt. Tx=Temperatur, Px=Druck, R=Niederschlag, x=Homogenitätsklasse (nur für T und P vorhanden). Quelle [20]

Stationsname	Koordinaten [°]		Höhe [m]	Homogenitätsklassen
Arhangelsk	64.6N	40.5E	13	T2, P4 , R
Athinai	38.0N	13.7E	107	T3, P2 , R
Astrahan	46.4N	48.0E	18	T2, P5 , R
Belfast	54.4N	6.1W	81	T3, R
Bergen	60.4N	5.3E	44	T1, P4
Basel	47.6N	7.6E	318	T3, P5 , R
Budapest	47.5N	19.0E	129	T2, P1 , R
Central-England	52.8N	2.5W	10	T3
De Bilt	52.1N	5.2E	4	T3, P1
Dresden	51.2N	13.8E	226	T1
Edinburgh	55.9N	3.2W	41	T3, P2 , R
Geneve	46.3N	6.2E	416	T3, P5 , R
Haparanda	65.8N	24.2E	6	T3, P2 , R
Helsinki	60.4N	24.9E	56	T2, P, R
Heidelberg	49.2N	8.4E	110	T2
Hohenpeißenberg	47.8N	11.0E	977	T1, R
Innsbruck	47.3N	11.4E	577	T1, R
Kiev	50.4N	30.5E	179	T3, P2 , R
Klagenfurt	46.6N	14.4E	452	T3, R
Kremsmünster	48.1N	14.1E	388	T3, R
Linz	48.3N	14.3E	263	T2
Lyon	45.6N	4.9E	201	T3, P3 , R
Luqa	35.8N	14.5E	91	T3, R
Maarianhamina	60.1N	19.9E	4	T3
München	48.1N	11.7E	527	T3, R
Nantes	47.2N	1.6E	27	T1, P2 , R
Oslo	59.9N	10.7E	96	T2, P2 , R
Oulu	64.9N	25.4E	15	T2, R
Oxford	51.7N	1.2W	63	T1, R
Salzburg	47.8N	13.0E	450	T1
Strasbourg	48.5N	7.7E	154	T3, R
Stensele	65.0N	17.1E	326	T3, R
Säntis	47.3N	9.4E	2500	T2, R
Trier	49.8N	6.7E	273	Tx, R
Triest	45.6N	13.7E	20	T3, P3 , R
Tbilisi	41.7N	44.9E	490	T3, P3 , R
Uccle	50.8N	4.4E	104	T3, P3 , R
Vardoe	70.4N	31.1E	10	T3, P4
Wien	48.3N	16.4E	209	T3, P3 , R
Zürich	47.4N	8.6E	569	T3, P5 , R

Tabelle 3: Verwendete Gitterpunktdatensätze

Klimavariablen	Zeitraum	Auflösung	Gitterpunkte	Quelle
		Breite × Länge		
Temperatur	1899 - 1998	5° × 5°	52	[18]
Niederschlag	1900 - 1998	2.5° × 3.75°	99	[11]
Druck	1896 - 1995	5° × 10°	44	[2]

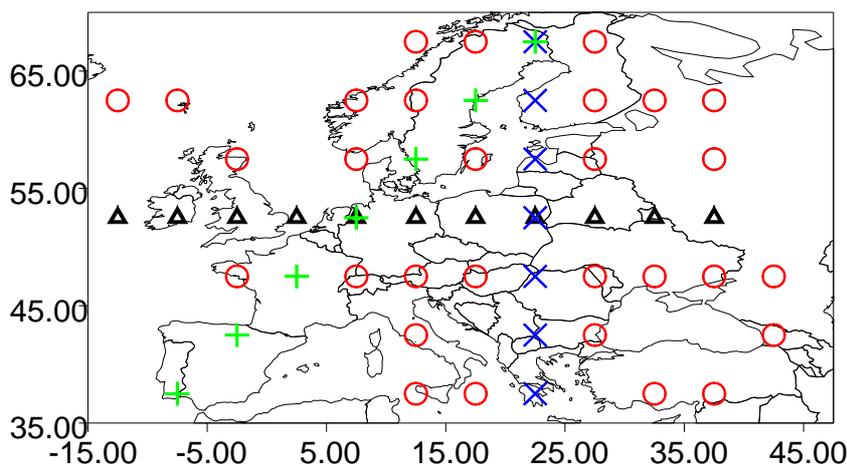


Abbildung 8: 5° × 5° Temperatur Gitterpunktdatensatz mit 52 Gitterpunkten. NO-SW Schnitt +, N-S Schnitt × und W-O Schnitt Δ.

4.2 Gitterpunktdaten

Der Vorteil von Gitterpunktdatensätzen liegt eindeutig in der geordneten, flächendeckenden Struktur. So können nicht nur zyklische Phänomene in den Zeitreihen wiedergefunden werden, sondern auch deren geographischer Wandel wird ersichtlich. Besonders bei Ereignissen, die keinen globalen Auswirkungen zeigen, wie z.B. die NAO, ist hier ein Profil in den Perioden zu erwarten. Unerwünschte Einflüsse, wie z.B. geographische Effekte, werden durch die Mittelung weitgehend unterdrückt. Die Eigenschaften der verwendeten Gitterpunktdatensätze sind in Tabelle 3 aufgelistet. In den Abbildungen 8 - 10 ist die Lage der Gitterpunkte dargestellt. Um den räumlichen Wandel der Periodizitäten aufzudecken, wurden die Gitterpunktdaten in verschiedenen Anordnungen untersucht (s. Anhang Abb. 23 - 28). Diese Schnitte sind in den Abbildungen durch die unterschiedlichen Symbole gekennzeichnet.

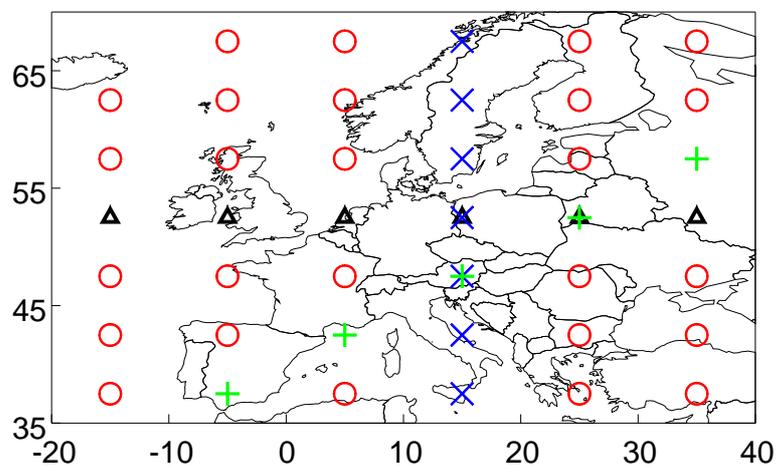


Abbildung 9: $5^\circ \times 10^\circ$ Druck Gitterpunktdatensatz mit 44 Gitterpunkten. NO-SW Schnitt +, N-S Schnitt \times und W-O Schnitt Δ .

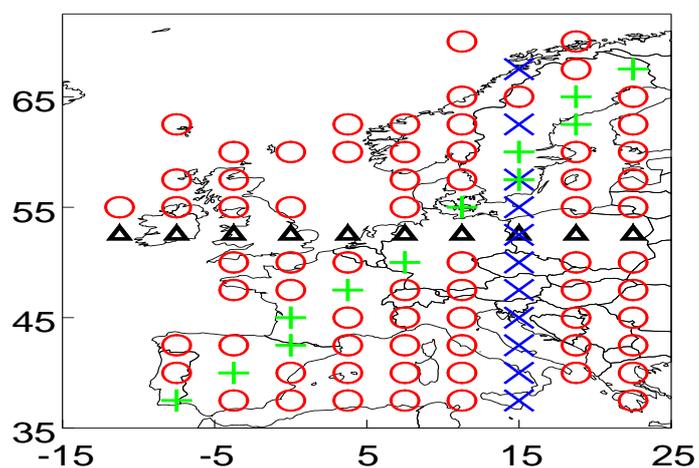


Abbildung 10: $2.5^\circ \times 3.75^\circ$ Niederschlag Gitterpunktdatensatz mit 99 Gitterpunkten. NO-SW Schnitt +, N-S Schnitt \times und W-O Schnitt Δ .

5 Statistische Analysemethoden

Als Quellen, sowie zur weiteren Erläuterung der in diesem Kapitel beschriebenen Methoden dienen insbesondere die Werke von Schlittgen und Streitberg [24], Olberg [17], Anděl [1] sowie Stöcker [32].

5.1 Diskrete Fourier-Transformation

Die grundlegende Idee der diskreten Fourier-Transformation ist es, eine Reihe von Variablen durch die Überlagerung von harmonischen, d.h. cosinus- und sinusförmigen Schwingungen verschiedener Frequenzen darzustellen. Man versucht somit eine vorhandene Reihe nicht mehr im Zeitbereich, also als Funktion von t , sondern im Frequenzbereich als Funktion von f zu betrachten. Definiert ist die Fouriertransformierte einer Zeitreihe $x(t)$ der Länge N als

$$F(f) = \sum_{t=0}^{N-1} \frac{x(t)}{N} \exp(-i2\pi t f). \quad (16)$$

Mit der Eulerschen Formel

$$e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x) \quad (17)$$

ist der Aufbau aus harmonischen Schwingungen direkt ersichtlich. Die Transformation der Zeitreihe in den Frequenzbereich ist ohne Verlust von Information umkehrbar, also bijektiv. Dies legt nahe, daß eine Darstellung der Fouriertransformierten nur einer bestimmten Anzahl von Frequenzen sinnvoll ist. Eine dannach folgende höhere Auflösung hätte keinen Informationsgewinn mehr zur Folge. Wegen des mathematisch einfacheren Umgangs, wählt man für die Betrachtung der Fouriertransformierten die Fourierfrequenzen $f_k = k/N$.

Weitere Eigenschaften der Fouriertransformierten sind Periodizität,

$$F(f) = F(f + 1) \quad (18)$$

und Symmetrie

$$F(f) = F(-f). \quad (19)$$

Voraussetzung für die Fourier-Transformation ist die absolute Integrierbarkeit d.h. $\lim_{t \rightarrow \infty} |x(t)| = 0$ der zu behandelnden Reihe $x(t)$. Dieses Kriterium wird von in der Meteorologie auftretenden Zeitreihen nie eingehalten. Man behilft sich hier, indem man die Zeitreihe $x(t)$ durch Überlagerung einer Funktion begrenzt, sodass ihre Meßwerte ausserhalb eines bestimmten Zeitintervalls den Wert Null annehmen. Im einfachsten Fall ist dies die sogenannte Rechteckfunktion, welche alle Werte außerhalb der Zeitreihe gleich Null setzt und sie ansonsten unbehandelt läßt.

5.2 Periodogramm

Unter einem Periodogramm oder Stichprobenspektrum versteht man die Funktion $I(f)$, die für jedes $f \in \mathfrak{R}$ angibt, mit welcher Intensität eine harmonische Welle der Frequenz f in eine Zeitreihe eingeht. Für eine Zeitreihe $(x_t)_{t=1, \dots, N}$ ist das Periodogramm wie folgt definiert [24]:

$$I(f) = N[C(f)^2 + S(f)^2] \quad (20)$$

mit

$$C(f) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x}) \cos 2\pi ft \quad (21)$$

und

$$S(f) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x_t - \bar{x}) \sin 2\pi ft. \quad (22)$$

Die Parameter $C(f)$ und $S(f)$ bezeichnen die Kovarianzen der Zeitreihe $(x_t)_{t=1, \dots, N}$ mit $(\cos 2\pi ft)_{t=1, \dots, N}$ und $(\sin 2\pi ft)_{t=1, \dots, N}$. Dieser Form der Darstellung liegt die Idee zugrunde, daß eine Zeitreihe auch durch die Überlagerung von Cosinus- und Sinusschwingungen verschiedener Frequenzen dargestellt werden kann. Dabei ist die Betrachtung einer Zeitreihe im Zeitbereich gleichwertig zur Betrachtung im Frequenzbereich. Es ist mit Blick auf die Definition leicht einzusehen, daß folgende Eigenschaften für das Periodogramm gelten:

- $I(0) = 0$
- $I(f) = I(-f)$
- $I(f) = I(f + 1)$
- $I(f) \geq 0$

Es läßt sich zeigen [24], daß die Definition des Periodogramms $I(f)$ gleichwertig ist zur Fouriertransformation der Autokovarianzkoeffizienten. Es folgt dann

$$I(f) = \sum_{\tau=-(N-1)}^{N-1} c_\tau e^{i2\pi f\tau}. \quad (23)$$

Neben der Darstellung des Periodogramms über die Fouriertransformation der Autokovarianzkoeffizienten gibt es auch noch die Möglichkeit der Herleitung über die Varianz. Ausgehend von der Beschreibung einer Zeitreihe durch eine Fourierreihe

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} F(k) \exp\left(\frac{i2\pi tk}{N}\right) \quad (24)$$

mit der Fouriertransformierten

$$F(k) = \sum_{t=0}^{N-1} \frac{x(t)}{N} \exp\left(\frac{-i2\pi tk}{N}\right) \quad (25)$$

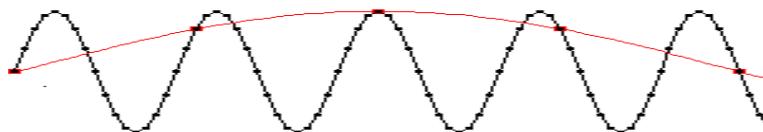


Abbildung 11: *Schematische Darstellung der Fehlinterpretation von Schwingungen. Die roten Punkte stellen die äquidistanten Messwerte der Zeitreihe dar. Die tatsächlich existierende Schwingung ist schwarz gezeichnet, sie wird jedoch falsch interpretiert (hier als rote Schwingung), da ihre Frequenz zu hoch und deshalb nicht mehr auflösbar ist.*

läßt sich die Varianz wie folgt ausdrücken:

$$\sigma^2(k) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^{N-1} (x(t) - \bar{x})^2 = \sum_{k=1}^{N-1} F^2(k) = \sum_{k=1}^{N-1} \sigma^2(k). \quad (26)$$

Auftragen der Varianz $\sigma^2(k)$ gegen k auf, ergibt dann ebenfalls das Periodogramm. Zur Berechnung des Periodogramms gibt es also zwei verschiedene Möglichkeiten. Entweder die Fouriertransformation der Autokovarianzfunktion, oder die Quadratur der Fouriertransformierten. Es stellt sich dabei natürlich die Frage, warum man die spektrale Betrachtungsweise einer Zeitreihe über das Periodogramm wählt und nicht über die einfache Fourier-Transformation. Die Antwort steckt in der Herleitung des Periodogramms über die Autokorrelationsfunktion. Enthält eine Zeitreihe z.B. eine harmonische Schwingung mit einem Phasensprung von 180° , wäre ein entsprechender Peak durch Fourier-Transformation nicht sichtbar. Die Verwendung der Autokovarianzfunktion macht das Periodogramm jedoch gegen solche Phasensprünge immun.

5.2.1 Problembehandlung

Es sollen nun 3 Phänomene diskutiert werden, die die Interpretation des Periodogramms erschweren. Es handelt sich dabei um Aliasing, Oberschwingungen sowie Leakage. Alle diese Probleme entstehen, weil die zur Analyse vorliegenden Zeitreihen diskret und endlich sind. Das bedeutet, der zu messende Parameter liegt nur zu bestimmten Zeiten vor und die Meßreihe selbst stammt aus einem begrenzten Zeitintervall. Dies hat zur Folge, daß die Prozesse, die der Zeitreihe zugrunde liegen in der Regel nicht vollständig erfaßt sind.

Aliasing Aliasing (Ununterscheidbarkeit von Frequenzen) tritt auf, da die Messung der Zeitreihe nur an bestimmten, diskreten Werten der Zeit t erfolgt. Je größer das zeitliche Intervall zwischen den einzelnen Punkten ist, desto weniger Information über die vorhandenen Prozesse ist in der Zeitreihe enthalten. Da die Intervalle zwischen den

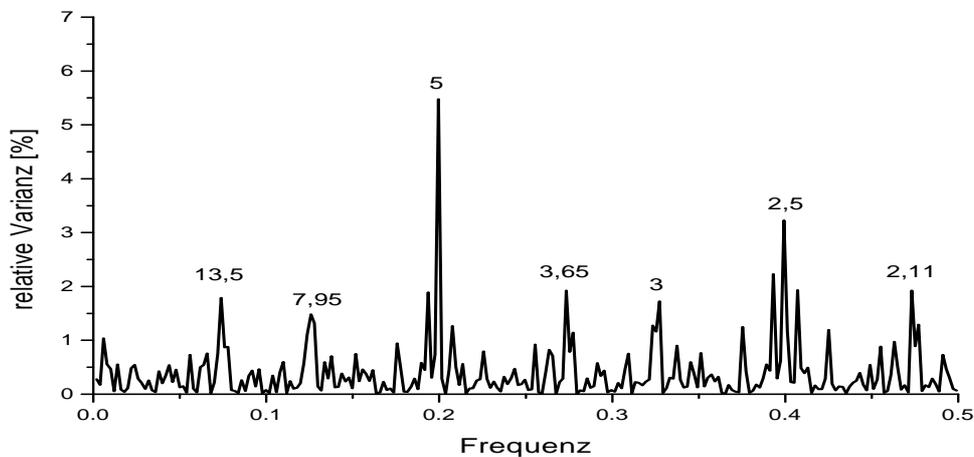


Abbildung 12: **Aliasing** am Beispiel einer synthetischen Schwingung mit $k=400$, $f=0.8$. Daraus ergibt sich durch Faltung ein Peak bei $f=0.2$, was einer Periode von $P=5$ entspricht. Die reine Sinusschwingung ist hier überlagert mit weißem Rauschen.

Messpunkten der behandelten Zeitreihen die selbe bestimmte Länge aufweisen, werden Schwingungen, deren Frequenz f_a außerhalb des Intervalles $[0, 0.5]$ liegen als niederfrequenter, f_n , interpretiert ($f_n = 1 - f_a$). Sie sind mit der gegebenen Auflösung der Zeitreihe nicht mehr auflösbar, was die Abbildungen 11 und 12 zeigen soll. Periodogramme werden deshalb stets nur in diesem Intervall abgebildet. Die Frequenz $f = 0, 5$ wird, als größte noch auflösbare, Nyquist-Frequenz genannt. Besteht die Zeitreihe z.B. aus Stundenwerten, sind nur Schwingungen, deren Periode größer zwei Stunden ist auflösbar. Höherfrequente Schwingungen werden fehlinterpretiert und auf eine Frequenz aus dem Intervall $[0, 0.5]$ gefaltet. Zur Behebung dieser Erscheinung bietet es sich an die höheren Frequenzen aus der Zeitreihe zu entfernen, indem man Mittelwerte bildet, also z.B. Monatswerte zu Jahreswerten konvertiert. Diese Vorgehensweise hat jedoch mitunter unerwünschte Nebeneffekte. Durch die Bildung von Mittelwerten kommt es sowohl zur Dämpfung als auch zu einer Phasenverschiebung der in der Zeitreihe enthaltenen Wellen. Beide Effekte verlieren ihre Wirkung für große Perioden. Bei der Periode $P = 1/N$ werden Schwingungen vollständig weggefiltert. Eine quantitative Beschreibung der Wirkungsweise der Mittelwertbildung findet sich unter [7]

Oberschwingungen In Periodogrammen spricht man von Oberschwingungen, wenn nicht nur bei einer bestimmte Frequenz f , sondern auch bei deren ganzzahligen vielfachen Peaks zu beobachten sind. Dieser Effekt tritt ein, da eine in der Zeitreihe enthal-

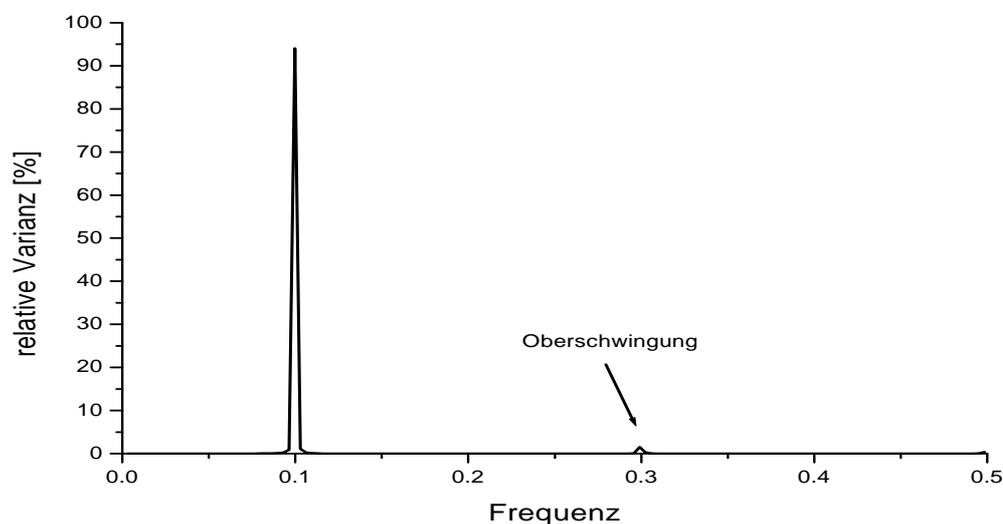


Abbildung 13: *Oberschwingungen am Beispiel einer Dreiecksfunktion der Periode $P = 10$. Dies entspricht der Frequenz $f = 0.1$. Eine Oberschwingung ist bei $3f$ zu sehen.*

tene Welle der Periode P in der Regel nicht sinusförmig ist. Diese Welle kann nur als Überlagerung sinusförmiger Wellen dargestellt werden, die ebenfalls die Periode P besitzen. Dies sind Wellen mit Frequenzen $f, 2f, 3f, \dots$, wobei $f = 1/P$ gilt. Es entstehen also Oberschwingungen, die zu einer Fehlinterpretation des Periodogramms beitragen können. Am Beispiel einer Dreiecksschwingung ist das Auftreten von Oberschwingungen in Abbildung 13 zu sehen.

Leakage Mit Leakage wird das Auftreten von sogenannten Nebenmaxima (Sidelobes) in der Umgebung des Peaks einer tatsächlich vorhandenen Schwingung bezeichnet. Der Grund für ein solches „Verschmieren“ liegt wiederum in der Begrenztheit der Zeitreihe. Da diese endlich ist, wird sie in der Regel nicht die vollständige Information über das zugrunde liegende Signal enthalten. Im Periodogramm wirkt sich das durch das Auftreten kleinerer Peaks neben der tatsächlichen Schwingung aus. Um solche Effekte zu mindern, wird die ursprüngliche Zeitreihe mit einem Datenfenster, auch Taper oder Fader genannt, transformiert. Ziel dabei ist es, die Zeitreihe an ihren Rändern sanft auf Null abklingen zu lassen. Die Elemente des Fensters werden dazu mit denen der Zeitreihe multipliziert. Man erhält so eine taper-modifizierte Reihe. In Abbildung 14 sind vier unterschiedliche Typen von Fensterfunktionen für eine Zeitreihe der Länge N

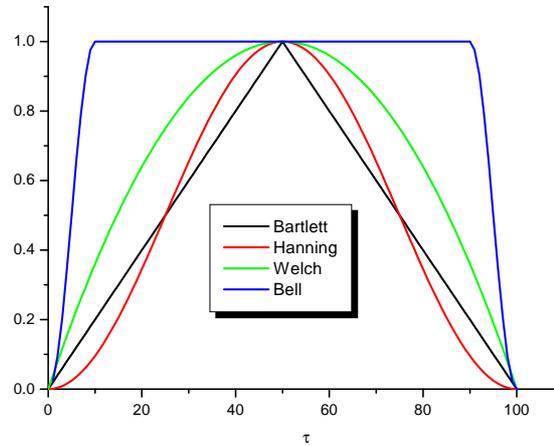


Abbildung 14: Verschiedene Fensterfunktionen (Lagfenster) für eine maximale Verschiebung von $\tau = 100$ bei einer Zeitreihe mit 100 Elementen.

abgebildet. Es handelt sich dabei um das Bartlett-Fenster

$$k(n) = 1 - \left| \frac{n - 0.5N}{0.5N} \right| \quad \text{mit } n = 1, 2, \dots, N, \quad (27)$$

das Hanning-Fenster

$$k(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad \text{mit } n = 1, 2, \dots, N, \quad (28)$$

das Welch-Fenster

$$k(n) = 1 - \left(\left| \frac{n - 0.5N}{0.5N} \right| \right)^2 \quad \text{mit } n = 1, 2, \dots, N, \quad (29)$$

und das Bell-Fenster [7]

$$k(n) = \begin{cases} \sin^2\left(5\pi \frac{n}{N}\right) & , \quad \text{mit } n < \frac{N}{10} \\ 1 & , \quad \text{sonst} \\ \sin^2\left(5\pi \frac{n}{N}\right) & , \quad \text{mit } n > \frac{9N}{10}. \end{cases} \quad (30)$$

Die Wirkung der Fenster wurde anhand verschiedener synthetischer Zeitreihen getestet. Dabei bewährte sich das Verhalten des Hanning-Fensters am besten: Hier gelang subjektiv die Reduzierung der Nebenmaxima am effektivsten.

Test auf Rauschen Dem Varianzspektrum an sich sind nur schwer Aussagen zu entnehmen. Es fehlt eine objektive Entscheidungshilfe, die dem Betrachter Rückschlüsse auf die Signifikanz der auftretenden Peaks ermöglicht. Um dem Periodogramm mehr Aussagekraft zu verleihen, versucht man dessen Signifikanzniveau zu berechnen. Als Bezugsniveau muß man deshalb zunächst ein theoretisches Hintergrundspektrum ermitteln. Dabei testet man das Periodogramm gegen die Nullhypothese „weißes Rauschen“. Der dazu benutzte Kolmogoroff-Smirnoff Test greift auf das kumulierte Periodogramm zurück. Es ist definiert als

$$S_r(f_k) = \frac{\sum_{f=1}^r I(f_k)}{\sum_{f=1}^{N/2} I(f_k)} \quad (31)$$

mit $r = 1, \dots, N/2$. Würde man das kumulierte Spektrum nahezu weißen Rauschens anstelle von f_k gegen $x = 2r/N$ auftragen, ergäbe das eine schwach um die Winkelhalbierende des Einheitsquadrates schwankende Kurve. Der maximale Abstand C von der Winkelhalbierenden wird dann als Testkriterium für die Nullhypothese auf verschiedenen Signifikanzniveaus $P = 1 - \alpha$ herangezogen werden. Für den Fall daß

$$C \leq \frac{\sqrt{-\frac{1}{2} \ln \frac{\alpha}{2}}}{\sqrt{\frac{M}{2} - 1} + 0.2 + \frac{0.68}{\sqrt{\frac{N}{2} - 1}}} - \frac{0.4}{M - 1}, \quad (32)$$

wird die Nullhypothese angenommen [24]. Dabei steht M für die Anzahl der Stützstellen des Periodogramms. Testet man auf z.B. 95% Wahrscheinlichkeit für die Annahme der Nullhypothese, gilt $\alpha = 0.05$. Ist mit diesem Test die Vermutung auf weißes Rauschen bestätigt worden, wählt man als Hintergrundspektrum den Erwartungswert (Mittelwert) des Periodogramms. Da es sich um weißes Rauschen handelt, hängt das Hintergrundspektrum natürlich nicht mehr von der Frequenz ab.

Für den Fall, daß die Nullhypothese abgelehnt wird, kann für das Spektrum rotes Rauschen angenommen werden. Ein Modellansatz dafür wurde von Markov entwickelt. Das Spektrum wird dabei einem autoregressiven Prozeß 1. Ordnung angepaßt. Bei diesem Prozeß fließt die Information eines Wertes einer Reihe in den darauffolgenden Wert mit ein. Man erhält eine Zeitreihe der Form

$$x(t) = x(t - 1) + \varepsilon(t), \quad (33)$$

wobei $\varepsilon(t)$ weißes Rauschen repräsentiert. In das Hintergrundspektrum des Markov-Rauschens tritt mit r_1 der Autokorrelationskoeffizient der ersten Verschiebung auf. Es hat die Form

$$I_{Markov}(\tau) = \frac{2}{N} \frac{1 - r_1^2}{1 + r_1^2 - 2r_1 \cos\left(\frac{2\pi}{\tau}\right)}. \quad (34)$$

Nach der Wahl eines der beiden Hintergrundspektren können mittels χ^2 -Tests die dazu gehörigen Vertrauensbereiche berechnet werden. Ist nun M gleich der Anzahl der

Fourierfrequenzen und N der Zeitreihenlänge, so ergibt

$$\phi = \frac{2N - \frac{M}{2}}{M} \quad (35)$$

die Anzahl der Freiheitsgrade und es folgt dann für ein Signifikanzniveau von $1 - \alpha$ der entsprechende Vertrauensbereich als

$$I_\alpha = I_{weiss/Markov} \frac{\chi_{\phi, \alpha}^2}{\phi}. \quad (36)$$

5.3 Autokorrelationspektralanalyse ASA

Zunächst muß gesagt werden, daß ein mittels Autokorrelationspektralanalyse berechnetes Spektrum ebenfalls Periodogramm genannt wird. In der Tat ist, wie sich zeigen wird, der Unterschied zum bereits beschriebenen Verfahren nur gering. Zur besseren Unterscheidung der beiden Verfahren wird im Folgenden das mit ASA erstellte Spektrum auch so genannt, ein Spektrum wie in Kapitel 5.2 berechnet, wird weiterhin Periodogramm genannt.

Die Autokorrelationspektralanalyse beruht auf der Fouriertransformation der Autokorrelationsfunktion. Da die Autokorrelationsfunktion nur um einen konstanten Faktor von der Autokovarianzfunktion zu unterscheiden ist, zeigt die Ähnlichkeit von ASA und Periodogramm. Die Autokorrelationsfunktion ist definiert als

$$akf(\tau) = \frac{\sum_{i=1}^{n-\tau} x'_i x'_{i+\tau}}{\sqrt{\sum_{i=1+\tau}^n x_i'^2 \sum_{i=1}^{n-\tau} x_i'^2}}. \quad (37)$$

Dabei steht x'_i für die Abweichung des i -ten Wertes der Zeitreihe von deren Mittelwert. Mit dieser Funktion wird eine Zeitreihe mit sich selbst korreliert. Die Werte von $akf(\tau)$ können dabei zwischen 1 und -1 schwanken. Ein Wert nahe bei 1 (-1) weist auf einen positiven (negativen) linearen Zusammenhang hin. Nur wenn die Korrelationswerte einen exakten linearen Zusammenhang aufweisen, erreicht $akf(\tau)$ 1 oder -1. τ , die Anzahl der Verschiebungen, ist für die Autokorrelationspektralanalyse frei wählbar.

Für das aus der Autokorrelationsfunktion hergeleitete Periodogramm gilt folgende Gleichung

$$\sigma^2(f) = \frac{1}{N} \sum_{l=-(N-1)}^{N-1} d(l) akf(l), \exp(i2\pi lf) \quad (38)$$

mit der optional verwendbaren Fensterfunktion $d(l)$. Es ist ratsam, die Zahl der Verschiebungen τ nicht zu groß zu wählen, da ansonsten Instabilitätseffekte durch unzuverlässige Autokorrelationskoeffizienten auftreten können. Ein in der Literatur angegebener empirischer Wert für τ liegt bei $N/3$ ([17],[28]).

Das mittels ASA erstellte Varianzspektrum führt bei Nutzung aller Verschiebungen τ auf dasselbe Periodogramm wie in Kapitel 5.2 beschrieben. Erst die Begrenzung der Verschiebungen und die damit verbundenen Ausblendung instabiler Autokorrelationskoeffizienten führt zu einem Unterschied im Spektrum. Die Ausblendung der Autokorrelationskoeffizienten hoher Verschiebungen macht die ASA im Vergleich zu Periodogramm zu einem robusteren Verfahren, was sich im glatteren Spektrum zeigt. Es kommt dabei aber auch häufig zu einer Verbreiterung einzelner Peaks. Dicht beieinander liegende Schwingungen sind dabei unter Umständen nicht mehr unterscheidbar und Fehlinterpretationen sind die Folge.

Beim Berechnen des Spektrums durch ASA ist es ebenfalls angebracht, eine Fensterfunktion zu verwenden, welche die Autokorrelationen zu hohen Lags hin abklingen läßt. Allerdings werden entsprechende Fensterfunktionen dann nicht mehr mit der ursprünglichen Zeitreihe $x(t)$ multipliziert, sondern mit der Autokorrelationsfunktion $akf(\tau)$. In Gleichung (38) ist das Fenster durch $d(l)$ symbolisiert.

5.3.1 Problembehandlung

Da die Autokorrelationsspektralanalyse vom Verfahren her dem Erstellen des Periodogramms mittels Fouriertransformation der Zeitreihe ähnelt, sind die oben angesprochenen Probleme von gleicher Natur. Auch hier treten Aliasing, Leakage und Oberschwingungen auf. Die Behandlung der Probleme ist ebenfalls die gleiche. Als Taper zur Leakagereduzierung wurde hier ebenfalls das Hanning-Fenster verwendet.

5.4 Maximum-Entropie-Spektralanalyse MESA

Eine weitere Methode zum Aufspüren zyklischer Anteile einer Zeitreihe ist die Maximum Entropie Spektralanalyse, auch Maximum-Entropie-Methode (MEM) genannt. Sie bietet wesentliche Vorteile gegenüber der ASA. So kommt es nicht zu Instabilitätseffekten in Form von negativen Varianzen, und die Auflösung erhöht sich über das gesamte Frequenzband [17]. Das bringt besonders Vorteile bei der Analyse kurzer Zeitreihen. Im Gegensatz zur ASA, bei der die Autokorrelationskoeffizienten mit Hinblick auf die Stabilität des Verfahrens ausserhalb der größten Verschiebung τ gleich Null gesetzt werden, schätzt man hier die unbekanntenen Autokorellationskoeffizienten so, daß die Entropiedichte ihr Maximum annimmt [17]. Zur Erläuterung der Methode ist zunächst festzustellen, daß es sich bei der hier gemeinten Entropie um die sogenannte Informationsentropie handelt. Diese ist ein Ausdruck für die Unkenntnis, mit der ein bestimmtes Ereignis aus einer Reihe von Ereignissen mit der zugehörigen Wahrscheinlichkeit eintritt. Diesen Wahrscheinlichkeiten p_i wird ein Unbestimmtheitswert der Form

$$H(p_1, p_2, \dots, p_n) = - \sum_{i=1}^n p_i \log p_i \quad (39)$$

zugewiesen, auch Informationsentropie genannt. Dabei ist die Basis des Logarithmus frei wählbar. So hat z.B. die häufig angewandte Basis 2 die Einheit *bit* zur Folge [17]. Definitionsgemäß erreicht die Informationsentropie ihren maximalen Wert für ein System gleicher Ereigniswahrscheinlichkeiten (z.B. Würfel). Für $p_i = 0$ erhält $p_i \log p_i$ den Wert 0.

Für eine eindimensionale, stetige Wahrscheinlichkeitsverteilung mit der kontinuierlichen Variablen X und deren Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $f(x)$ ist die differentielle Entropie [17] definiert als

$$H(X) = E(-\log f(X)) = - \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log f(x) dx. \quad (40)$$

Damit ergibt sich die Entropiedichte als

$$h(X) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H(X)}{n}. \quad (41)$$

Diese läßt sich, mit Kenntnis der Autokovarianzmatrix \mathbf{M}_n , auch wie folgt darstellen:

$$h(X) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{2} \ln |\mathbf{M}_n|^{1/n} + \ln \sqrt{2\pi e} \quad (42)$$

wobei

$$\mathbf{M}_n = \begin{pmatrix} s_0 & s_1 & \dots & s_M \\ s_1 & s_0 & \dots & s_{M-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_M & s_{M-1} & \dots & s_0 \end{pmatrix} \quad (43)$$

und s_k die Autokovarianzfunktion einer Zeitreihe mit $k = 0, 1, \dots, M$ Verschiebungen repräsentiert. Man hat somit eine Verknüpfung von differentieller Entropie und den Autokovarianzkoeffizienten.

Es existiert nun ein weiterer Zusammenhang zwischen Entropiedichte und Spektraldichte $S(f)$ [17] in der Form

$$h = \frac{1}{4f_{Ny}} \int_{-f_{Ny}}^{f_{Ny}} \ln S(f) df + \frac{1}{2} \ln 2f_{Ny}. \quad (44)$$

Das geschätzte Spektrum hat schließlich die Form

$$I(f) = \frac{\Delta t P_{M+1}}{1 + \sum (c_{MK} \exp(-i2\pi f k \Delta t))}. \quad (45)$$

Δt gibt den zeitliche Abstand zwischen den Zeitreihenwerten an. Die Konstante P_{MK} und die Parameter c_{MK} lassen sich über das lineare Gleichungssystem

$$T_M(1, c_{M+1}, \dots, c_{MM}) = (P_{M+1}, 0, \dots, 0) \quad (46)$$

berechnen [28]. Zu diesem Zweck existiert unter anderem ein von Burg entwickelter und auch nach ihm benannter Algorithmus [21]. Dieser wurde zur Schätzung der hier gezeigten Spektren verwendet.

5.4.1 Problembehandlung

Die Hauptproblematik der Maximum Entropie Spektralanalyse ist das mit großem Aufwand verbundene Finden der Signifikanzniveaus [17][28]. Mit relativ einfachen Mitteln ist dagegen das Bestimmen des Hintergrundspektrums möglich. Da hier ein autoregressiver Prozeß 1. Ordnung unterstellt wird, genügt es, das MESA Verfahren mit Ordnung 1 auf die Zeitreihe anzuwenden [28]. Der Aufwand zur Bestimmung der Vertrauensbereiche ist ungleich größer. Einen Einblick in die verschiedenen Möglichkeiten bietet z.B. [17].

6 Auswertung und Ergebnisse

6.1 Spektren natürlicher Phänomene

Um in den Spektren der Klimazeitreihen gefundenen Quasi-Periodizitäten erklären zu können, ist die Kenntnis der Spektren natürlicher Phänomene unerlässlich. Schließlich sind diese Phänomene maßgeblich für die Variabilität der Klimazeitreihen.

Das Beobachtungsintervall der natürlichen Phänomene wurde dazu auf einen in der Größenordnung der verwendeten Klimazeitreihen liegenden Zeitraum angepaßt. Diese Kürzung ist vor allem für Zeitreihen der Phänomene einleuchtend, die ihre größte Varianz im niederfrequenten Bereich aufweisen. So sind Schwingungen größerer Perioden als die Länge der analysierten Klimazeitreihen in diesen auch nicht mehr auflösbar.

Analog zur Analyse der Klimazeitreihen wurde hier ebenfalls die lineare Trendkomponente entfernt um eine Verfälschung des Spektrums zu hohen Perioden hin zu vermeiden. Die so vorbehandelten Zeitreihen der potentiellen Einflußgrößen sind dann mit den drei im methodischen Teil beschriebenen Verfahren behandelt worden.

Die Charakteristika und Ergebnisse der Analyse der potentiellen Einflußgrößen sind im Folgenden zusammengefaßt.

QBO Um die Periodizitäten der QBO aufzudecken, wurde die in Kapitel 3.1.1, Abb. 1 gezeigte Zeitreihe verwendet. Diese Reihe setzt sich aus Monatswerten zusammen und war nur für die Jahre 1953-1999 verfügbar. Hier wird, dem Namen entsprechend, der größte Varianzanteil im Bereich einer Periode von zwei Jahren erwartet, was einer Frequenz von $f \approx 0,042$ entsprechen würde. Tatsächlich findet sich im MESA Spektrum der höchste Peak bei einer Periode von exakt 2 Jahren ($f = 0,0421/mon$). Die gleiche Zeitreihe, analysiert mit ASA, weist der Periode von 2,36 Jahren ($f = 0,351/mon$) die größte Varianz mit über 26% zu. Dort tritt auch eine Schwingung der Periode 1 Jahr signifikant auf, die jedoch in den Klimazeitreihen nicht gefunden werden kann, da sie zu hochfrequent ist. Zudem kann bei dieser Frequenz nicht ausgeschlossen werden, daß es sich um eine Oberschwingung handelt. ASA und Periodogramm (Abb. 15) zeigen im Falle der QBO keinen auffälligen Unterschied.

ENSO Hier wurde eine Zeitreihe des SOI aus den Jahren 1870-1990 verwendet. Für dieses Phänomen kann keine feste Periode genannt werden. So kommt es z.B. zum Auftreten von El Niño Ereignissen in Folge eines niedrigen SOI in Abständen von 3 bis 8 Jahren. In diesem Bereich werden deshalb auch die größten Varianzen im Spektrum erwartet. Im mit MESA erstellten Spektrum des SOI (Abb. 16) finden sich besonders im Bereich von ca. 3-10 Jahren Peaks großer Amplituden. Der höchste Peak, mit über 4% relativer Varianz liegt bei einer Periode von 9,3 Jahren ($f = 0,11$). Insgesamt entspricht das Spektrum den Erwartungen auf der Basis des Auftretens von El-Niño Ereignissen. Der Peak in Abb. 16 bei 2,1 Jahren ($f = 0,48$) könnte auf den Einfluß der QBO zurückzuführen sein. Es existiert eine weitere Schwingung mit einer Periode von

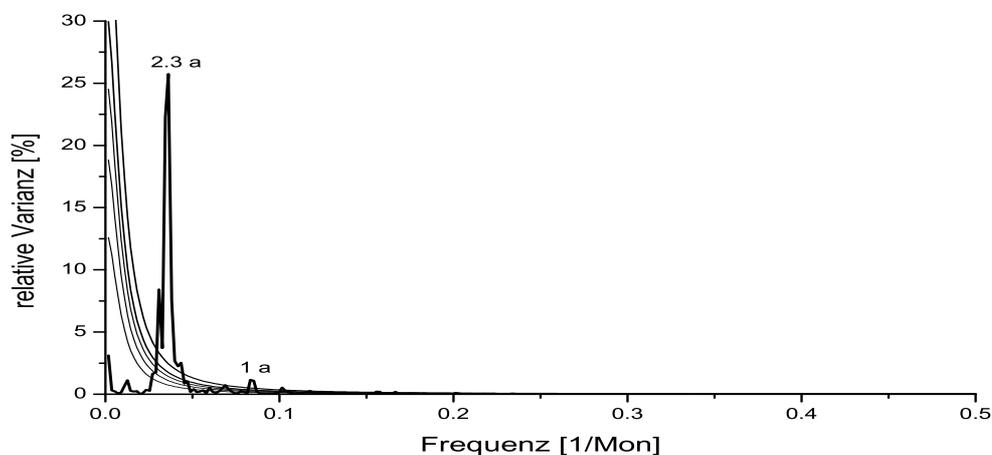


Abbildung 15: *Periodogramm der QBO in den Jahren 1953-1999 mit Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% und rotem Rauschen.*

20,2 Jahren ($f = 0,05$), die jedoch auch aufgrund solarer Aktivität entstanden seien könnte. Ein entsprechender Peak ist im Periodogramm der Solarkonstanten (Abb. 39) sichtbar.

NAO Wie in Kapitel 3.1.3 erwähnt, wurde in bereits durchgeführten Analysen [33] europäischer Temperaturzeitreihen für die NAO eine Periode von etwa 7,8 Jahren gefunden. In diesem Abschnitt wird jedoch eine Zeitreihe des NAO-Index mit dem Beobachtungszeitraum 1865-1997 untersucht. Eine genauere Beschreibung dieser Reihe ist in Abbildung 4 zu finden. Die MESA dieser Zeitreihe, Abb. 17, zeigt ebenfalls für die Periode 7,8 Jahre ($f = 0,128$) den höchsten Peak mit 5,5% relativer Varianz. Die gleiche Periode ist auch in den mit ASA und Periodogramm erstellten Spektren zu sehen, im Spektrum der ASA als 8-jährige Periode. Im Periodogramm ist bei einer Periode von ca. 2,6 Jahren ($f = 0,39$) eine weitere signifikante Schwingung vorhanden. Hier stellt sich jedoch die Frage, ob diese Periode der NAO zuzuschreiben ist oder vielleicht durch den Einfluß der QBO zustande gekommen ist. Interessant ist auch der im Periodogramm auftretende Peak bei $f = 0,075$. Dieser entspricht einer Periode von ca. 13,3 Jahren welche auch in den Spektren diverser Klimazeitreihen zu finden ist. Es kann hier jedoch nicht gesagt werden, ob es sich bei dieser Periode um eine Eigenheit der NAO handelt oder ob möglicherweise ein anderes Phänomen die NAO Zeitreihe beeinflusst.

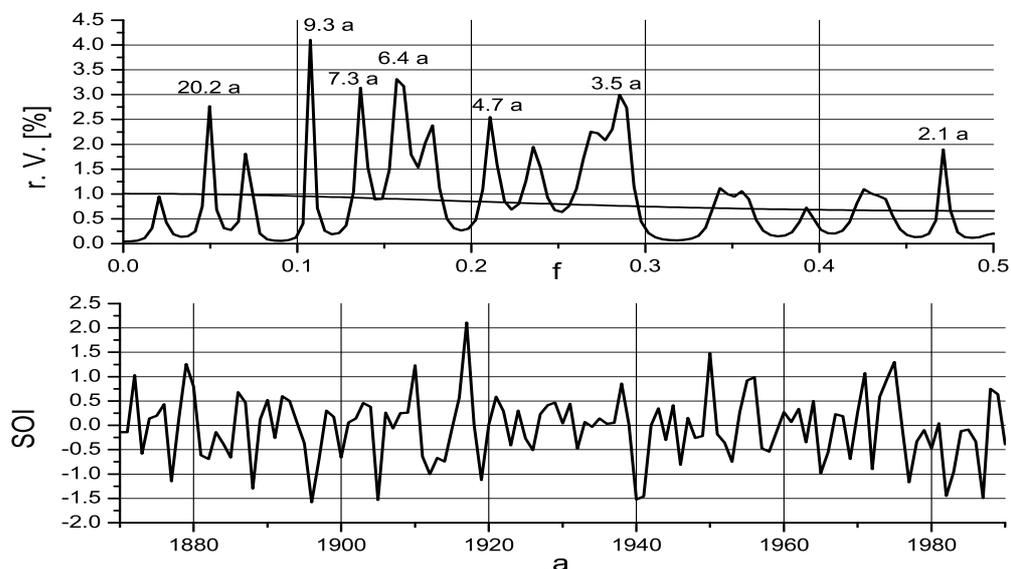


Abbildung 16: *Oben: MESA des Southern Oscillation Index den Jahren 1870-1990 mit rotem Hintergrundspektrum. Unten: Verwendete Zeitreihe*

Solare Aktivität Zur Beschreibung solarer Aktivität wurden hier die Zeitreihen der Sonnenfleckenrelativzahl und der Solarkonstanten der Jahre 1870-1990 verwendet. Dabei ist in beiden Zeitreihen der Einfluß des 11-jährigen Schwabe-Zyklus zu erwarten. Diese Vermutung wird auch bestätigt. In beiden Zeitreihen, Abb. 18 und 19, ist der Einfluß der Sonnenfleckenrelativzahlen als 10,5-jährige Schwankung ($f = 0,095$) zu sehen. Dieser Zyklus macht dabei über 22% der Varianz der trendbereinigten Zeitreihen aus. Des weiteren ist eine ca 5,5-jährige Periode ($f = 0,18$) vorhanden. Hier ist vermutlich der Einfluß des halben Sonnenfleckenzyklus sichtbar. Der 22-jährige Hale-Zyklus ist nicht in den Spektren vorhanden. Die Umpolung des Magnetfeldes der Sonne scheint also keine große Auswirkung auf deren Aktivität zu haben. Aufgrund der Zeitreihenlänge treten Schwingungen größerer Perioden nicht signifikant auf. Dies ist nicht weiter störend, da derart lange Zyklen auch in den Klimazeitreihen nicht detektierbar sind.

Vulkanismus Um durch vulkanische Aktivitäten verursachte Periodizitäten im Zeitbereich der analysierten Klimazeitreihen aufzudecken, wurde eine die Änderungen des Strahlungsantriebs beschreibende Zeitreihe der Jahre 1870-1990 verwendet. Diese Reihe beschreibt den Rückgang der solaren Einstrahlung, verursacht durch entsprechend starke Eruptionen (Kap. 3.1.5) und ist für einen längeren Zeitraum in Abb. 6 zu sehen. Eine Interpretation der MESA (Abb. 20) fällt hier schwer. Das Spektrum weist

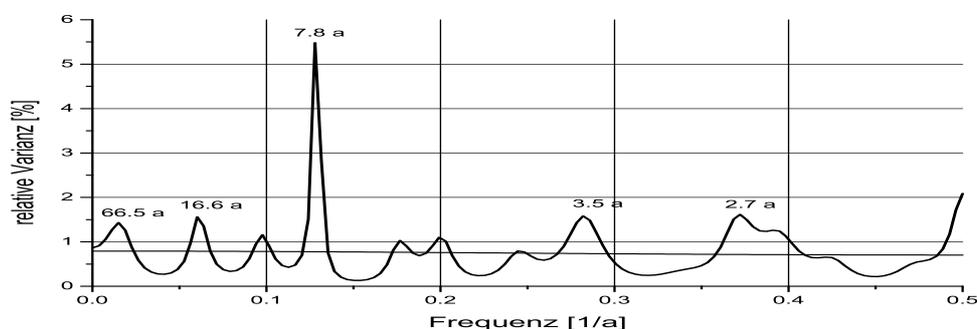


Abbildung 17: *MESA des Nord-Atlantik-Oszillation Index der Jahre 1865-1997 mit rotem Hintergrundspektrum.*

in regelmäßigen Abständen Peaks auf. Dieses Verhalten läßt das Auftreten von Oberschwingungen vermuten. Es ist jedoch nicht klar, welcher Peak dabei eine tatsächlich vorhandene Schwingung repräsentiert. Betrachtet man die Zeitreihe in Abb. 20 unten, erkennt man zwei Paare von starkem Rückgang der Heizrate mit einem Abstand der Peaks von jeweils ca. 20 Jahren. Die eigentlich existierende Schwingung in der MESA müßte somit in diesem Bereich ($f=0,05$) liegen. Zum Vergleich werden zusätzlich das Periodogramm und die ASA herangezogen (Abb. 36, 42). Dort wird deutlich, daß die Zeitreihe des vulkanischen Strahlungsantriebs aus rotem Rauschen hervorgeht. Periodizitäten, die in den europäischen Klimazeitreihen auftauchen könnten, sind deshalb nicht zu nennen.

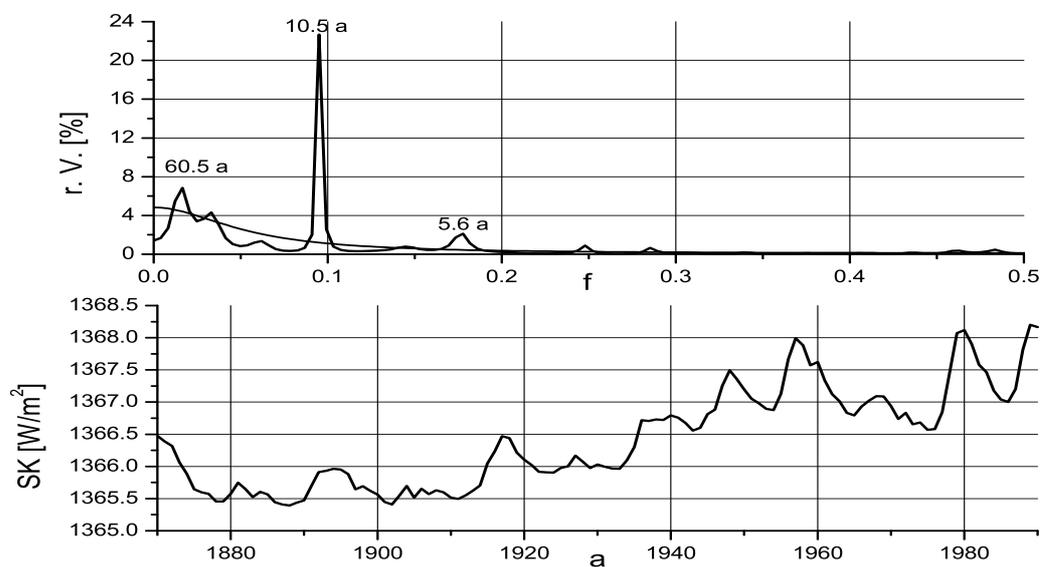


Abbildung 18: Oben: MESA der Solarkonstanten aus den Jahren 1870-1990 mit rotem Hintergrundsspektrum. Unten: Verwendete Zeitreihe

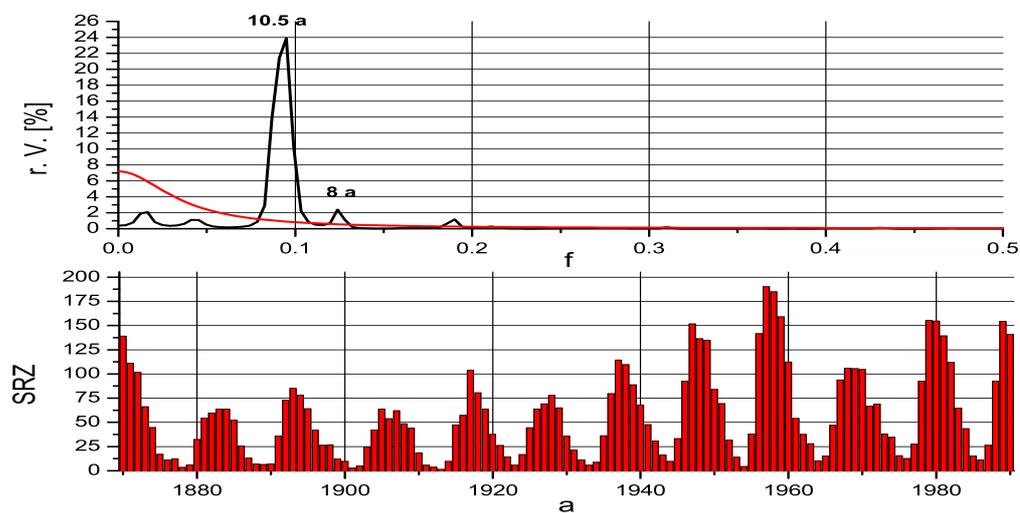


Abbildung 19: Oben: MESA der Sonnenfleckenrelativzahl aus den Jahren 1870-1990 mit rotem Hintergrundsspektrum. Unten: Verwendete Zeitreihe.

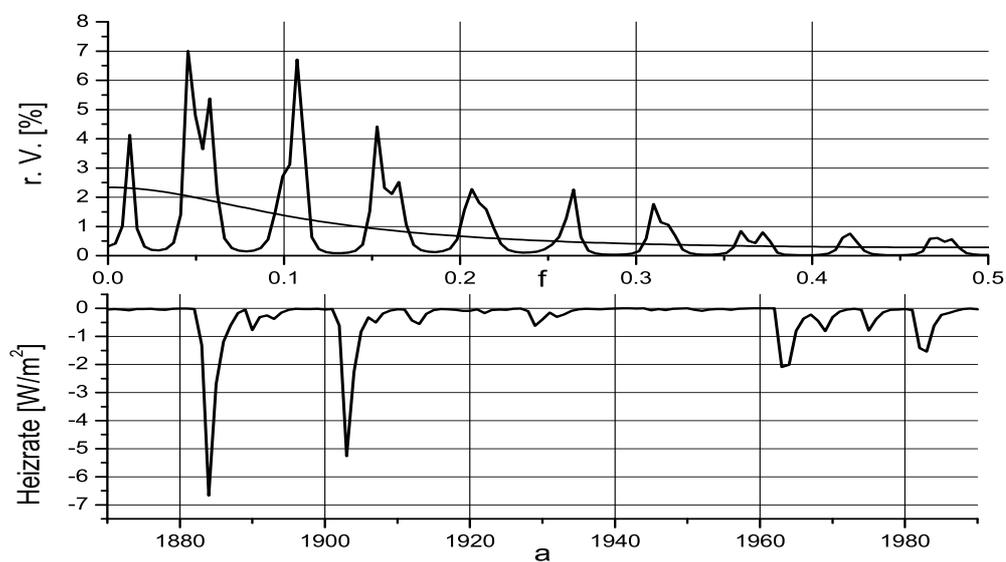


Abbildung 20: Oben: MESA der Änderung des Strahlungsantriebs durch Vulkanismus der Jahre 1870-1990 mit rotem Hintergrundspektrum. Unten: Verwendete Zeitreihe, Quelle [8].

6.2 Spektren der Klimazeitreihen

Die Analyse der Klimazeitreihen mit den beschriebenen Methoden hat eine Vielzahl von Varianzspektren zur Folge. In der Auswertung wird deshalb versucht, diesen Spektren durch eine möglichst sinnvolle Betrachtungsweise allgemeingültige Aussagen zu entnehmen.

Für die aus Stationsdaten gewonnenen Spektren bietet es sich an, die Häufigkeit des Auftretens von Peaks bestimmter Frequenzintervalle und Vertrauensbereiche zu ermitteln. Diese Intervalle richten sich hier nach den Frequenzbereichen der Einflußgrößen. Für die Frequenz $f < 0,1$ kommen hauptsächlich solare Einflüsse in Frage, im Bereich von 3 bis 8 Jahren liegt der Einflußbereich von ENSO und NAO. Peaks mit Frequenzen $f \geq 0,4$ werden der QBO zugeordnet. Einen Sonderfall nimmt die NOA ein, deren stärkste Periodizität bei ca. 7,8 Jahren liegt. Dies entspricht einer Frequenz von ca. 0,128 die bei der Zusammenstellung extra aufgeführt wird. Die Häufigkeit von Peaks in den einzelnen Frequenzintervallen sollte Aufschluß geben über die Wirksamkeit der einzelnen Phänomene in den europäischen Klimazeitreihen.

Zur Auswertung der Gitterpunktsdaten wird eine andere Form der Darstellung gewählt. Da es bei der Analyse dieser Zeitreihen um das Aufdecken von räumlichen Strukturen geht, betrachtet man die vorhandenen Varianzspektren in einer Zusammenstellung. Dazu wurden die einzelnen Gitterpunktsdatensätze von Nord-Ost nach Süd-West, von Nord nach Süd und von West nach Ost geordnet, wie in den Abbildungen 8, 9 und 10 zu sehen ist. Durch die Anordnung der Spektren von Nord-Ost nach Süd-West wird versucht, die Struktur des NAO Signals wie es in [9] gefunden wurde zu verifizieren. Ob andere periodisch wirkende Einflüsse ebenfalls geographische Abhängigkeiten aufweisen wird sich im Folgenden herausstellen.

6.2.1 Temperatur

Stationsdaten In Tabelle 4 sind die nach Frequenzbereichen sortierten signifikanten Peaks der Temperatur aufgelistet. In den Spektren der ASA treten hier besonders Peaks im Frequenzbereich der NAO hervor. Wegen der schlechteren spektralen Auflösung der ASA verläuft das Spektrum glatter als das Periodogramm. Hoch signifikante ($S_i \geq 99\%$) Peaks sind deshalb weniger häufig vorhanden. In lediglich 3 Spektren der behandelten Stationen sind hoch signifikante Peaks zu finden, welche alle der NAO zugeordnet werden können. Dieses Ergebnis läßt schon vermuten, daß die periodische Komponente europäischer Temperaturzeitreihen zum größten Teil von der NAO beeinflusst wird. An diesem Bild ändert sich auch auf sehr signifikantem Niveau ($S_i \geq 95\%$) nichts. Die NAO bleibt hier mit nun 20 vertretenen Stationen die dominante Einflußgröße. Neben der NAO haben auch noch solare Schwankungen und die QBO Auswirkungen auf die europäischen Temperaturzeitreihen. Deren relative Varianz ist jedoch bei den meisten Stationen geringer als die der NAO. Erst bei Betrachtung der signifikanten Peaks ($S_i \geq 90\%$) treten hier gehäuft Schwingungen dieser Frequenzbereiche auf.

Etwas anders gestaltet sich das Bild, betrachtet man die Periodogramme der Tempera-

Tabelle 4: Häufigkeit von Peaks in den Periodogrammen der Temperatur, geordnet nach Signifikanzniveaus und Frequenzbereichen.

Typ	$f < 0,1$ $P > 10$	$f \approx 0,13$ $P \approx 7,8$	$0,14 < f < 0,4$ $7,4 > P > 2,5$	$f \geq 0,4$ $P \leq 2,5$
ASA T $Si \geq 99\%$	0	3	0	0
ASA T $Si \geq 95\%$	7	20	2	4
ASA T $Si \geq 90\%$	16	24	6	15
Per. T $Si \geq 99\%$	13	11	7	19
Per. T $Si \geq 95\%$	55	21	26	40
Per. T $Si \geq 90\%$	70	27	57	74

turzeitreihen. Durch das mit der höheren Auflösung verbundenen unruhigere Verhalten der Spektren kommt es zu einer größeren Anzahl signifikanter Peaks. Dennoch hat auch hier die NAO einen starken Einfluß auf die Zeitreihen. Von den 41 behandelten Stationen kommen in über der Hälfte signifikante oder sehr signifikante Peaks vor. Noch höher ist die Zahl der Peaks für Perioden $P \geq 10a$ und $P \leq 2.5a$. Bei den in Tabelle 4 angegebenen Zahlen wurden bei einigen Stationen auch mehrere Peaks innerhalb eines Frequenzintervalls gezählt. Auf diese Weise kommt es zu einer größeren Anzahl von Peaks, als Stationen behandelt wurden.

In Tabelle 4 ist ebenfalls zu sehen, daß das Periodogramm den Peaks im Frequenzbereich der NAO eine im Vergleich zur ASA geringere Bedeutung beimißt. Ein Grund dafür liegt vermutlich im unruhigeren Verhalten des Periodogramms, was auch das Auftreten zufälliger Peaks ohne realen Hintergrund zur Folge haben kann. Dies wäre eine Erklärung für die Anhäufung signifikanter Peaks in größeren Frequenzintervallen. Um sich auf eine weitere Art einen Überblick der gesamten Spektren zu verschaffen, wurden von diese, separat für jedes Analyseverfahren, die Mittelwerte der Varianzen der einzelnen Frequenzen gebildet. Dabei ist im Falle der Temperatur (Abb. 21) zunächst das für die verschiedenen Methoden gut übereinstimmende Verhalten der gemittelten Spektren festzustellen. Besonders der der NAO zugeordnete Peak bei ca. 8 Jahren wird mit allen drei Methoden deutlich sichtbar. Sowohl MESA als auch ASA weisen ihm die höchste Varianz zu. Im gemittelten Periodogramm wird dieser Peak von einem 12-jährigen Zyklus knapp übertroffen. Dieser vermutlich durch solare Aktivität hervorgerufene Peak erreicht auch in den anderen beiden Spektren hohe relative Varianzen. Ebenfalls in allen mittleren Spektren zu erkennen sind Peaks bei ca. 2,25 und ca. 2,06 Jahren, die in den Bereich des QBO Zyklus fallen, sowie bei ca. 5,5 Jahren.

Gitterpunktsdaten Um die Veränderungen der zyklischen Komponente der Zeitreihen mit dem Ort aufzudecken wurden unterschiedlich angeordnete MESA Spektren der Gitterpunktsdaten verwendet. Für die Temperatur ist besonders hervorzuheben, daß sich die Spektren eines Schnittes sehr ähnlich sind bzw. die dominanten Peaks gut

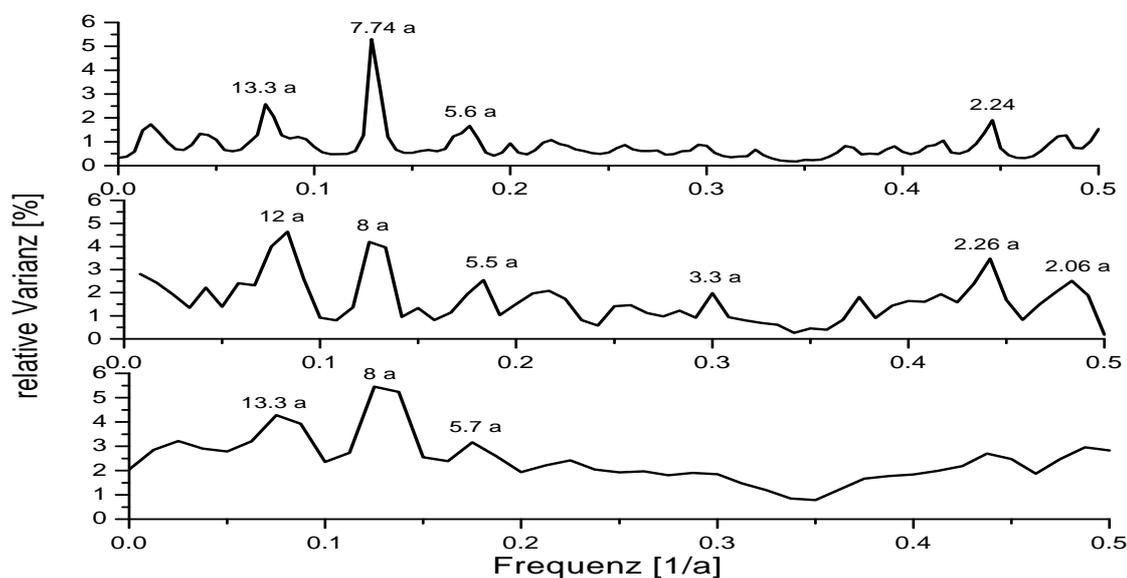


Abbildung 21: Mittel aller Spektren europäischer Temperaturzeitreihen. Oben: MESA, Mitte: Periodogramm, Unten: ASA.

übereinstimmen. Daran ist zu erkennen, daß es sich bei den gefundenen Zyklen nicht um zufällig Produkte der Analyseverfahren handelt.

Am auffälligsten ist diese Struktur in Abbildung 22 zu sehen. Dort treten besonders die Zyklen der NAO bei $f \approx 0,13$, der solaren Aktivität bei $f = 0,09$, eine Schwankung im Frequenzbereich der ENSO mit $f = 0,175$ und Zyklen im QBO Intervall mit unterschiedlichen Frequenzen von $f = 0,45$ und $f = 0,485$ auf. Am deutlichsten sind geographische Unterschiede in den Peaks der NAO zu sehen. Diese erreichen ein Maximum mit einer relativen Varianz von 16,45% in mittleren Längengraden ($12,5^\circ$). Westlich und östlich davon ist die relative Varianz dieser Frequenz abfallend. Östlich von $27,5^\circ$ ist diese Periode nicht mehr die signifikanteste. Dort erreicht die Schwingung bei $f = 0,175$ die höchste relative Varianz. Die ca. 11-jährige und die ca. 5,7-jährige Schwingung sind in dieser Anordnung weniger auffällig verteilt. Sie erreichen beide die maximale relative Varianz bei $2,5^\circ$ und sind weniger stark in $12,5^\circ$ und $17,5^\circ$ vertreten. In den anderen Längen sind die Unterschiede nur gering. Im Periodenbereich von 2 bis 2,5 Jahren ($0,5 > f > 0,4$) streuen die auftretenden Peaks stärker. Von $2,5^\circ$ bis $12,5^\circ$ ist eine Periode von 2,06 Jahren ($f = 0,485$) vorherrschend, östlich davon ist es die Periode von 2,22 Jahren ($f = 0,45$), westlich von $2,5^\circ$ tritt in diesem Frequenzintervall eine Periode von 2,5 Jahren am stärksten hervor.

Ein ähnliches Bild liefert Abbildung 23 in der die Gitterpunktsspektren von Nord-Ost nach Süd-West geordnet sind. Auch dort ist die NAO in den mittleren Regionen am

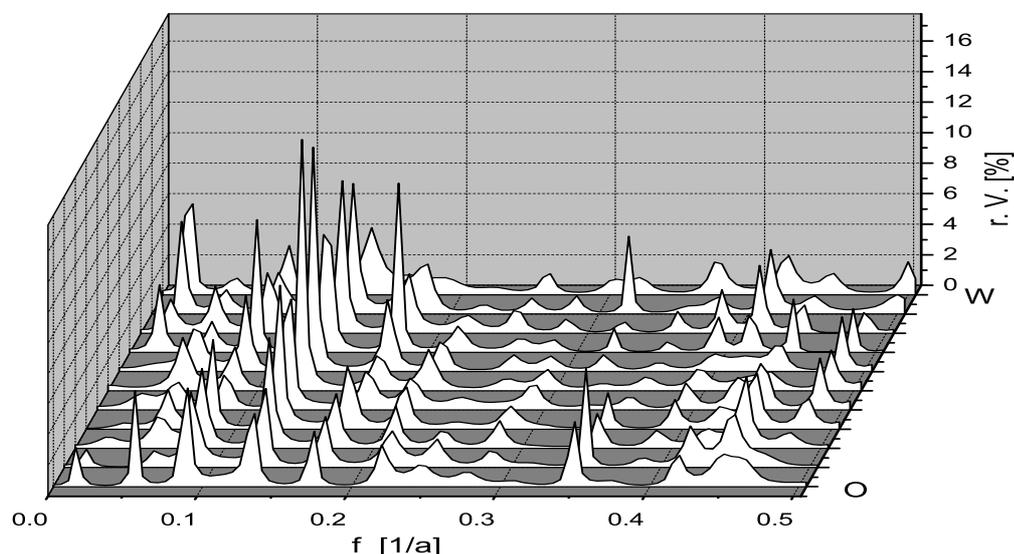


Abbildung 22: MESA europäischer Gitterpunktsdaten der Temperatur geordnet von O nach W.

stärksten vertreten, zu den Seiten hin abfallend. Mit Ausnahme der süd-westlichen Gitterpunkte, bei denen sich die QBO in einer 2,4-jährigen Periode zeigt, tritt die Schwingung bei 2.06 Jahren regelmäßig auf. Der ca. 11-jährige Sonnenfleckenzyklus ist nur im Süd-Westen nicht vertreten. In dieser Anordnung der Spektren ist außerdem eine Zunahme der Amplitude der 5,7-jährigen Schwingung nach Süd-Westen hin zu erkennen. Des weiteren enthalten diese Spektren auch sehr langperiodische Schwingungen bei den drei süd-westlichen sowie dem nord-östlichsten Spektrum. Wegen der geringen Auflösung in diesem Frequenzbereich wäre eine Angabe der Frequenzen auch nur sehr ungenau.

In der Anordnung der Spektren von Norden nach Süden (Abbildung 79) zeigen sich die gleichen Merkmale. In mittleren Breiten ist die NAO am signifikantesten. In den nördlichen Gitterpunktsdatensätzen ist auch die 11-jährige Schwingung konstant vertreten. Die der QBO zugeordneten Frequenzen sind mit $f \approx 0.48$ und $f \approx 0.45$ in fast allen Spektren vertreten. Ebenfalls vorhanden sind die Schwingungen mit langen Perioden im Norden und Süden sowie ca. 20-jährige Schwingungen in mittleren Breiten.

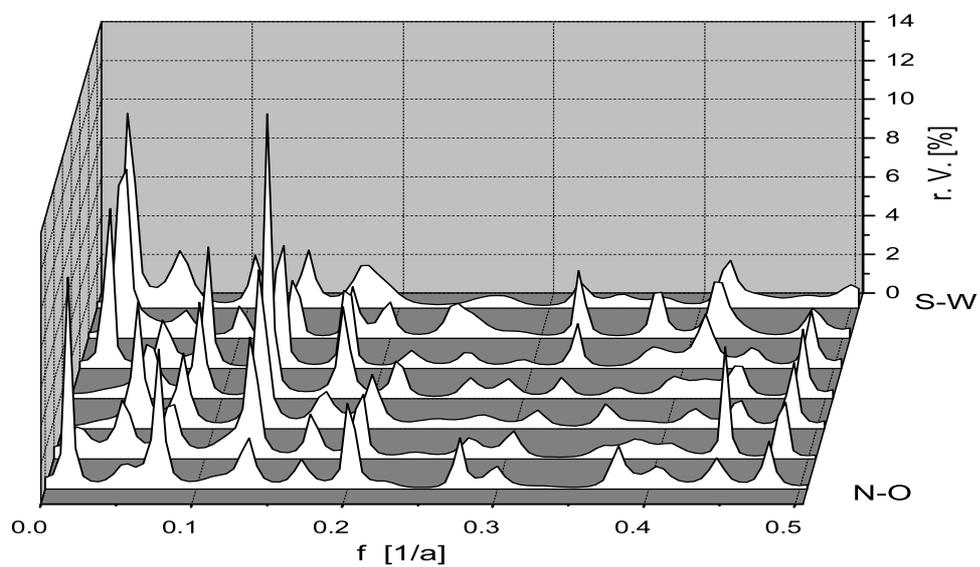


Abbildung 23: MESA europäischer Gitterpunktsdaten der Temperatur geordnet von NO nach SW.

Tabelle 5: Häufigkeit von Peaks in den Periodogrammen des Luftdrucks, geordnet nach Signifikanzniveaus und Frequenzbereichen.

Typ	$f < 0,1$ $P > 10$	$f \approx 0,13$ $P \approx 7,8$	$0,14 < f < 0,4$ $7,4 > P > 2,5$	$f \geq 0,4$ $P \leq 2,5$
ASA P $Si \geq 99\%$	1	0	0	1
ASA P $Si \geq 95\%$	2	0	3	1
ASA P $Si \geq 90\%$	6	0	17	4
Per. P $Si \geq 99\%$	4	0	22	1
Per. P $Si \geq 95\%$	8	1	50	4
Per. P $Si \geq 90\%$	12	6	64	8

6.2.2 Luftdruck

Stationsdaten In den Spektren der Stationsdaten des Luftdrucks zeigt sich zunächst etwas unerwartetes. Die NAO ist in den Spektren der ASA nicht signifikant vorhanden, in den Periodogrammen sind erst bei einem Signifikanzniveau von 90% einige Peaks zu sehen. Mit diesem Ergebnis konnte nicht gerechnet werden, da es sich bei der NAO ihrer Definition nach um ein auf Luftdruckschwankungen basierendes Phänomen handelt. Diese Schwankungen setzen sich aber offensichtlich nicht bis nach Europa fort. Ein Grund hierfür könnten die verwendeten Zeitreihen sein. Da es sich bei diesen um Jahresmittelwerte handelt, die NAO jedoch am ausgeprägtesten in den Wintermonaten ist, ist es möglich, daß eventuell vorhandene Periodizitäten verloren gehen.

Viel größeren Einfluß haben hier zyklische Phänomene im Frequenzbereich $0,14 < f < 0,4$ die in den Frequenzbereich der ENSO fallen. Denkbar wäre auch eine Verschiebung der durch die NAO verursachten Schwankungen, in Richtung kürzerer Perioden. Besonders bei $f = 0,2$, was einer Periode von 5 Jahren entspricht, ist in vielen Spektren ein signifikanter Peak erkennbar. Da diese Periode aber nahe einer im ENSO Spektrum gefundenen Periode von 4,7 Jahren liegt, wird eine Verlagerung der NAO Schwankung in den Druckspektren nicht in Betracht gezogen.

Auch für den Luftdruck wurden die Spektren der Stationszeitreihen gemittelt (Abb. 24). In allen mittleren Spektren ist dort ein relativ viel Varianz erklärender Peak von ca. 2,7-jähriger Periode zu sehen, welcher noch im Bereich der QBO-Periode (2-3 Jahre) liegen würde. Weiter tritt mit allen Methoden eine Periode von ca 3,6 Jahren auf. Dort, und bei einem weiter vorhandenen 5-jährigen Zyklus könnte ENSO verantwortlich sein. Die NAO ist in den mittleren Druckspektren nicht deutlich erkennbar. Im Bereich der solaren Aktivität ist im Periodogramm und MESA Spektrum ein ca. 12,5-jähriger Peak zu sehen.

Gitterpunktsspektren Die Gitterpunktsspektren des Luftdrucks sind weniger geordnet als die der Temperatur und die Peaks erscheinen mit unterschiedlichen Varianzen in an-

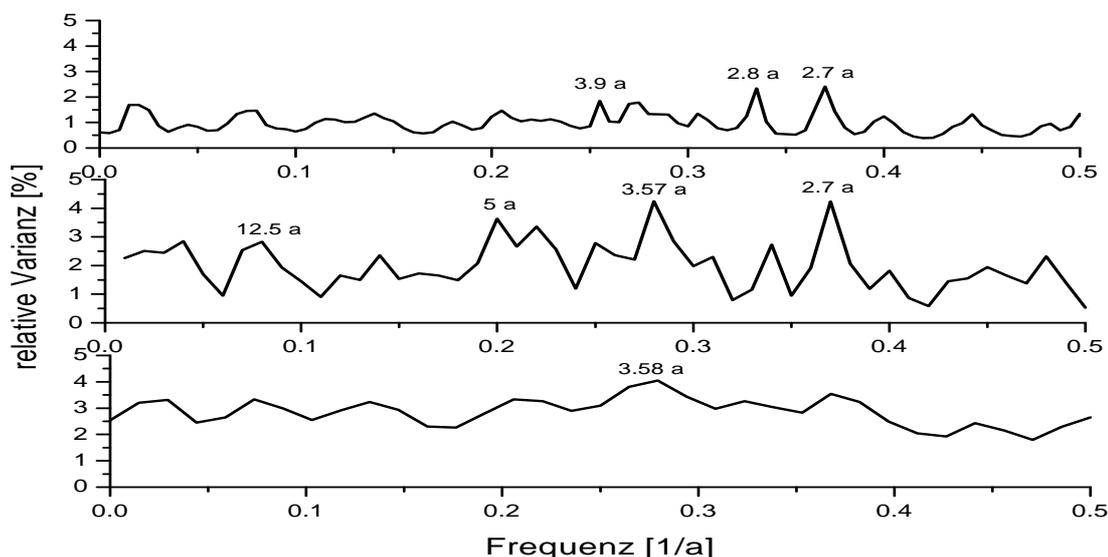


Abbildung 24: Mittel aller Spektren europäischer Druckzeitreihen. Oben: MESA, Mitte: Periodogramm, Unten: ASA.

deren Frequenzbereichen. Dabei ist vor allem der Frequenzbereich $0,14 < f < 0,4$ von Bedeutung, in welchem besonders die Perioden bei $2,7a$, $3,3a$ und $5a$ ($f = 0,37, 0,3, 0,2$) auffallen.

In der Anordnung der Spektren von Westen nach Osten (Abb. 25) ist zu sehen, daß sich einige Peaks nach Westen hin zu kürzeren Perioden verlagern. Dies gilt für die Schwingung bei $f = 0,315$ im Osten, die sich auf $f = 0,335$ verschiebt. Ebenso geschieht es mit dem Zyklus bei $f = 0,275$ welcher nach Westen bis auf $f = 0,295$ wandert. Auch die im Osten bei $f = 0,2$ liegende Schwingung scheint eine Verschiebung nach Westen auf $f = 0,225$ zu erfahren. Die NAO, in den Stationsdaten nur bei wenigen Stationen signifikant vorhanden, ist hier nur in den östlichen Stationen zu sehen. Die solare Aktivität ist mit Perioden von 11,5 bis 12,5 Jahren vertreten. Ihre Varianz ist nach Westen hin zunehmend, wobei jedoch der westlichste Gitterpunkt eine Ausnahme darstellt.

In der Nord-Süd Anordnung der Spektren (Abb. 26) ist das Phänomen der Frequenzverschiebung nicht zu beobachten. Hier ist zunächst eine Schwingung der Periode 2,2 Jahre zu erkennen, deren relative Varianz in den nördlichen Stationen am größten ist. Des weiteren existiert eine von Norden nach Süden zunehmende Schwingung bei 2,7 Jahren. Peaks im Bereich der NAO sind nur schwach ausgeprägt. Die solare Aktivität ist in zwei Frequenzbereiche gespalten, wobei einmal die Schwankungen der Sonnenflecken zu erkennen sind und der langwelligere Zyklus vermutlich auf den quasi-78-jährigen Zy-

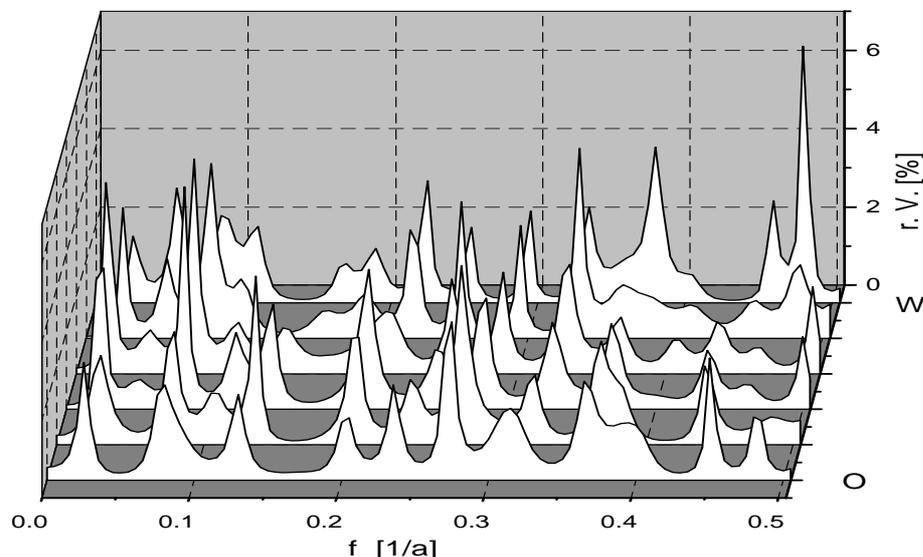


Abbildung 25: *MESA europäischer Gitterpunktsdaten des Drucks geordnet von O nach W.*

klus zurückzuführen ist. Für diesen langwelligen Zyklus ist eine Zunahme der Varianz in Richtung Süden erkennbar. Der Sonnenfleckenzyklus erreicht die maximale Amplitude in den mittleren Breiten.

In der Anordnung der Spektren von Nord-Ost nach Süd-West (Abb. 80) ist ähnlich wie in Abb. 26 wieder ein nach Süden zunehmender Peak bei 2,7 Jahren ($f = 0,37$) zu sehen. Die langwellige solare Aktivität ist besonders gut im Süd-Westen zu erkennen, der Sonnenfleckenzyklus ist im Nord-Osten ausgeprägter ebenso wie die NAO. Ansonsten sind die Spektren eher uneinheitlich.

6.2.3 Niederschlag

Stationsdaten In den Zeitreihen des Niederschlages ist der Einfluß der NAO, ähnlich wie beim Luftdruck und im Gegensatz zur Temperatur, nur schwach wiederzufinden (s. Tab. 6). Die Spektren der ASA enthalten insgesamt nur 2 signifikante Peaks im Frequenzbereich der NAO. Wesentlich häufiger kommen Peaks in den Intervallen $f \leq 0,1$ und $f \geq 0,4$ vor und die meisten Peaks wurden im Bereich $0,14 < f < 0,4$ gezählt. Dabei ist das Ergebnis der ASA in ähnlicher Form in den Periodogrammen wiederzufinden. Die Spektren der Stationszeitreihen sind besonders für die Variable Niederschlag stark von der Lage der Station abhängig. Hier machen sich die Einflüsse der Umgebung besonders stark bemerkbar, sodaß die in den Zeitreihen vorhandenen Signale stark mit stochastischem Rauschen überlagert seien dürften. Dies mag auch der Grund dafür sein, daß im nach den Fourierfrequenzen gemessenen größten Intervall

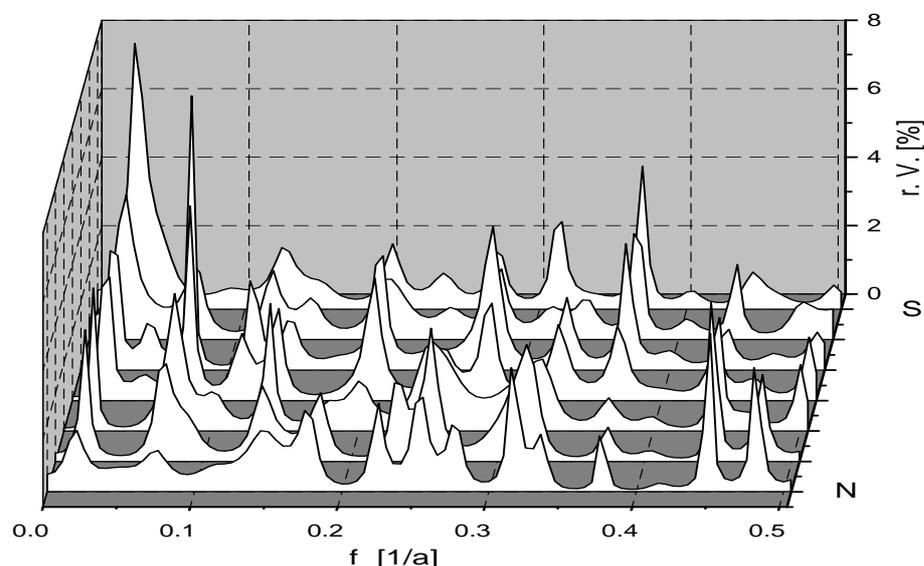


Abbildung 26: MESA europäischer Gitterpunktsdaten des Drucks geordnet von N nach S.

die meisten signifikanten Peaks zu finden sind.

Das insgesamt uneinheitliche Verhalten der Spektren des Niederschlags wirkt sich auch auf die gemittelten Spektren aus (Abb. 27). Hier ist, im Vergleich zu Temperatur und Druck, weniger Struktur zu erkennen. In allen mittleren Spektren ist ein Zyklus von ca. 4,2 Jahren vorhanden, der jedoch nur wenig Varianz erklärt. Im QBO Bereich ist, am deutlichsten im Periodogramm, eine ca. 2,1-jährige Periodizität zu sehen. Viel Varianz liegt bei allen mittleren Spektren im langwelligen Bereich. Die MESA unterscheidet dabei eine ca. 13,5- sowie eine ca. 21- und ca. 55-jährige Schwingung. Ähnlich wie bei den mittleren Druckspektren ist eine auf die NAO weisende Periodizität nicht besonders ausgeprägt.

Gitterpunktsdaten In der Anordnung der Gitterpunktsspektren des Niederschlags ist vergleichsweise wenig Struktur zu erkennen. Dies mag an den lokal stark unterschiedlichen Eigenschaften des Niederschlags liegen, die, wie es scheint, auch durch die Verwendung von Flächenmittelwerten nicht eliminiert werden.

Tabelle 6: Häufigkeit von Peaks in den Periodogrammen des Niederschlags, geordnet nach Signifikanzniveaus und Frequenzbereichen.

Typ	$f < 0,1$	$f \approx 0,13$	$0,14 < f < 0,4$	$f \geq 0,4$
	$P > 10$	$P \approx 7,8$	$7,4 > P > 2,5$	$P \leq 2,5$
ASA RR $Si \geq 99\%$	0	0	0	2
ASA RR $Si \geq 95\%$	4	0	11	4
ASA RR $Si \geq 90\%$	18	2	24	10
Per. RR $Si \geq 99\%$	12	5	27	4
Per. RR $Si \geq 95\%$	35	9	47	20
Per. RR $Si \geq 90\%$	42	11	61	34

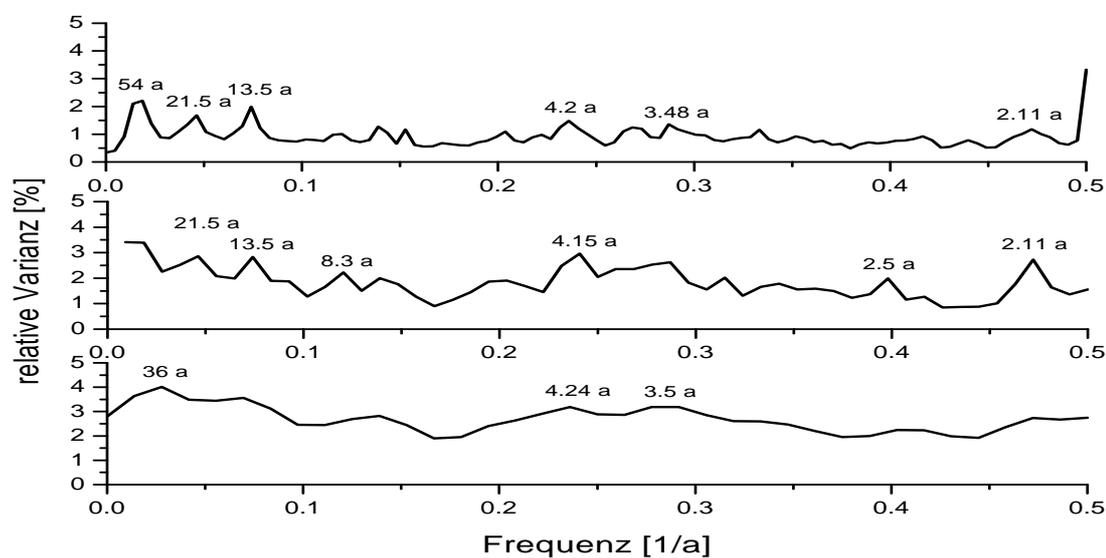


Abbildung 27: Mittel aller Spektren europäischer Niederschlagszeitreihen. Oben: MESA, Mitte: Periodogramm, Unten: ASA.

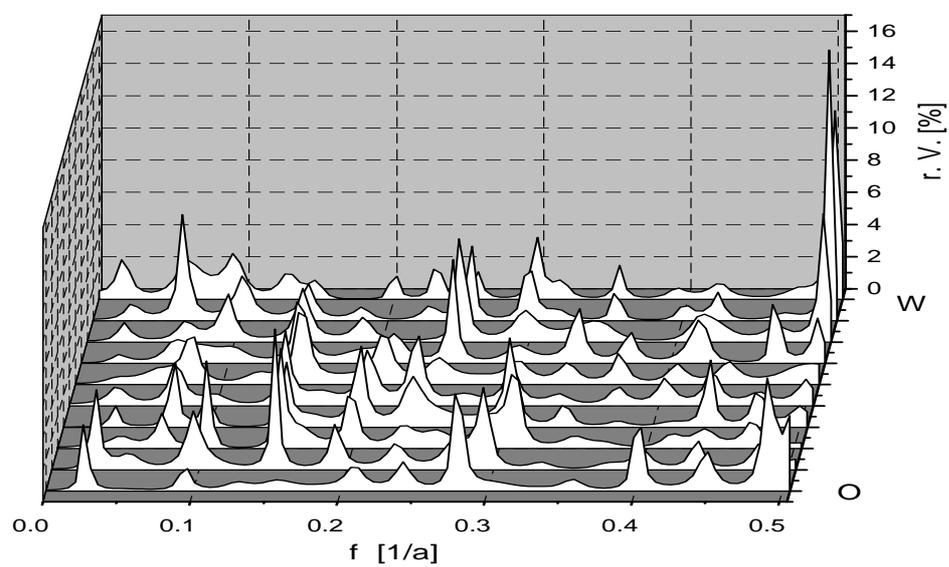


Abbildung 28: *MESA* europäischer Gitterpunktsdaten des Niederschlags geordnet von O nach W .

Am geordnetsten wirkt hier noch die Aneinanderreihung der Spektren von Westen nach Osten (Abb. 28). In fast allen Spektren ist dort ein Peak bei $f \approx 1,5$ zu sehen, was einer Periode von ca. 6,6 Jahren entspricht. Diese Schwingung ist in Richtung Osten zunehmend, jedoch in der östlichsten Station nicht vorhanden. Des weiteren hat eine ca. 2-jährige Schwingung überwiegend in den westlichen Stationen starken Einfluß. Die Gitterpunkte im Osten enthalten einen weiteren zyklischen Anteil bei $f \approx 0,2$, in den westlichen Stationen ist eine Komponente bei $f \approx 0,25$ ausgeprägter. Auswirkungen der NAO sind nicht erkennbar.

Die Spektren in den Nord-Süd sowie Nordost-Südwest Schnitten wirken eher chaotisch (Abb. 81, 82). Es scheint eine Häufung von Peaks größerer Amplitude in der Gegend um $f = 0,3$ zu geben.

6.3 Die NAO im Winter

In diesem Kapitel soll zusätzlich auf die in Temperaturzeitreihen stark einfließende NAO eingegangen werden. Wie bereits im Kapitel Nr. 3.1 erwähnt wurde, ist die Nord-Atlantik-Oszillation in den Wintermonaten am stärksten ausgeprägt. In Grieser et al. [9] wurde im europäischen Temperaturfeld eine durch die NAO erklärte Varianz von 20,0% im Januar gefunden, im Jahresmittel jedoch nur 8,9%. Desweiteren zeigte sich dort eine Zunahme des NAO-Signals in Richtung Nordosten. Dieses Verhalten wird nun ausgenutzt um die NAO in den behandelten Klimazeitreihen Europas zu detektieren. Dazu wurden die Gitterpunktsdaten der Temperatur und des Druckes jeweils nur für die Januarmonate analysiert. Die Anordnung dieser Spektren ist für die Temperatur in Abb. 29 zu sehen, wobei hier noch weitere nahe der Nordost-Südwest Linie liegende Gitterpunkte in das Spektrum mit aufgenommen wurden. Wie zu erwarten dominiert die Periode der NAO bei 7,8 Jahren die Spektren der Temperaturzeitreihen. Es ist auch eine deutliche Zunahme der Varianz dieser Frequenz nach Nordosten hin zu erkennen. Dabei werden relative Varianzen von bis zu 12,7% erreicht. Dies ist eine weitere Bestätigung der bei Grieser et al. [9] gefundenen Ergebnisse bezüglich des NAO-Signals in Temperaturzeitreihen.

Betrachtet man die Spektren der Druckzeitreihen in der Nord-Süd Darstellung (Abb. 30), erkennt man ebenfalls im Frequenzbereich der NAO das regelmäßige Auftreten eines Peaks bei allen Stationen. Dabei ist dessen relative Varianz zunehmend nach Norden, wobei er bei den beiden nördlichsten Stationen wieder abfällt, und sich insgesamt über ein breiteres Frequenzband erstreckt. Im Gegensatz zu den in [9] durchgeführten Untersuchungen des NAO-Signals in Druckzeitreihen, wird hier jedoch nicht der vermutete stärkere Einfluß der NAO gegenüber den anderen zyklischen Phänomenen deutlich. So erreicht besonders eine ca. 2,2-jährige Periodizität ($f \approx 0,45$) nach Süden hin zunehmend gleiche, bis höhere Varianzen. Hier wäre ein Vergleich mit anderen Untersuchungen über das QBO-Signal in europäischen Druckzeitreihen wünschenswert.

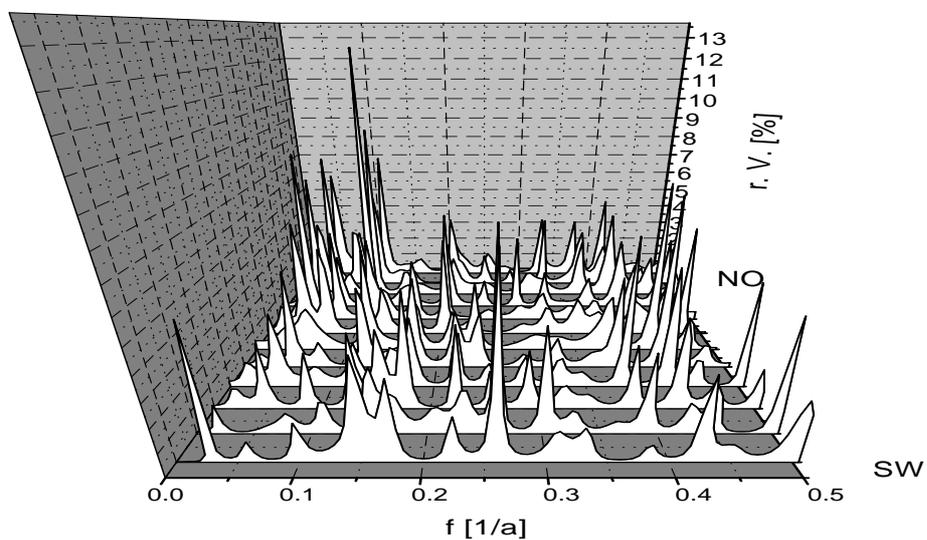


Abbildung 29: MESA europäischer Gitterpunktsdaten der Temperatur in den Januarmonaten, geordnet von NO nach SW.

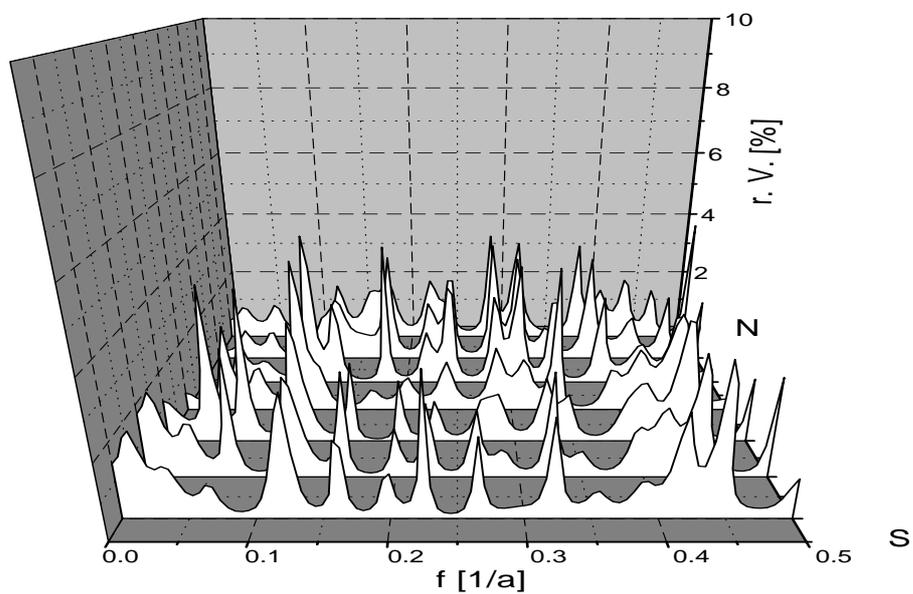


Abbildung 30: MESA europäischer Gitterpunktsdaten des Druckes in den Januarmonaten, geordnet von N nach S.

7 Wertung und Ausblick

Bei der Spektralanalyse der Klimazeitreihen mit den hier verwendeten Methoden wurden größtenteils Peaks gefunden, wie sie auch die Analyse der Zeitreihen der hier betrachteten Einflüsse aufweisen. Es muß dabei aber immer beachtet werden, daß eine eindeutige Zuordnung von gefundener Periodizität zu einem bestimmten Phänomen, im Sinne eines mathematischen Beweises mit statistischen Methoden, nicht geleistet werden kann.

Aufgrund der Charakteristik von Zeitreihen kann es beim Erstellen der Spektren mit den hier verwendeten Methoden zu Fehlinterpretationen kommen. Es wurde versucht, diese Effekte, auch unter Zuhilfenahme synthetischer Zeitreihen, zu minimieren, sie können aber nicht ausgeschlossen werden. Die Peaks der Spektren müssen deshalb stets kritisch betrachtet werden.

Besonders gut gelingt die Interpretation der Spektren für die bodennahe Lufttemperatur. Der Grund dafür dürfte die hohe Repräsentanz dieses Klimaparameters sein, im Gegensatz zum Niederschlag, welcher stark durch lokale Gegebenheiten beeinflußt ist. Dies führt dann auch zu uneinheitlichen, stochastisch geprägten Spektren, denen nur schwer Aussagen zu entnehmen sind.

Mit Blick auf bereits vorhandene Untersuchungen [9] zur Aufdeckung von natürlichen Signalen in europäischen Zeitreihen der Klimaparameter, wurden die Spektren der Gitterpunktsdaten entlang geographischer Schnitte angeordnet. Dies brachte besonders ein für die Nord-Atlantik-Oszillation typisches und deshalb erwartetes Nord-Süd Muster hervor, am deutlichsten zu sehen in den Zeitreihen der Temperatur und des Luftdrucks. In den Spektren der Druckzeitreihen ist sowohl bei den Stations- als auch bei den Gitterpunktsdaten zu erkennen, daß Periodizitäten im Frequenzbereich von ENSO eine größere Rolle spielen als bei der Temperatur. Da es sich hier jedoch um den (an den Stützstellen der Spektren gemessenen) größten Frequenzbereich handelt, und der Einfluß von ENSO in Europa in dieser Stärke durchaus zweifelhaft ist, läßt das Auftreten zufälliger Peaks vermuten. Dieses Verhalten zeigt sich noch stärker in den Spektren der Niederschlagszeitreihen.

In Europa ist die NAO ein besonders einflußreiches Phänomen. Dies gilt besonders in den Wintermonaten. Aus diesem Grund wurde die Gitterpunktsdatensätze der Temperatur und des Druckes gesondert für den Monat Januar betrachtet, was im Falle der Temperatur auch die Erwartungen erfüllte, mit Abstrichen bei der Signalstärke auch für den Druck. Zu einem Vergleich der Ergebnisse mit [9] ist jedoch zu sagen, daß dort, im Gegensatz zu dieser Arbeit, Zeitreihen einzelner, ausgewählter Jahre untersucht wurden.

Weitergehend wäre, um sich Gewißheit über die in den Zeitreihen gefundenen Periodizitäten zu verschaffen ein „Herausfiltern“ der entsprechenden Frequenzen (Bandpaßfilterung) denkbar. Durch die damit verbundene Eliminierung unerwünschter Frequenzen, würden sich Frequenz und Varianz eines im Spektrum auftretenden Peaks exakter bestimmen lassen. Interessant wäre dann auch eine gleitende Spektralanalyse, wobei sich das Beobachtungsintervall zeitlich verschiebt. Dies würde eventuell vorhandenen Verschiebungen, sowie Veränderungen in der Amplitude von Periodizitäten aufdecken. Bei der Anwendung der Analyseverfahren auf die gesamte Zeitreihe kann es aufgrund solcher Veränderungen zur Unterbewertung einer Periode kommen. Besonders die MESA ist hier ein geeignetes Verfahren.

Literatur

- [1] **Anděl J.**, Statistische Analyse von Zeitreihen, Akademie-Verlag Berlin, 1984.
- [2] **Basnett T. A.** and Parker D. E.. Development of the Global Mean Sea Level Pressure Data Set GMSLP2. Climatic Research Technical Note 79, Hadley Center, Meteorological Office, Bracknell, 1997.
- [3] **Bissolli P.**, Vulkanismus und Klima, DWD, 2001.
- [4] **Craddock J.M.**, Methods of Comparing Annual Rainfall, *Weather* 34, 332-346, 1979.
- [5] **Cubasch U.**, Kasang D., Anthropogener Klimawandel, Klett-Perthes, 2000.
- [6] http://tao.atmos.washington.edu/data_sets/qbo
- [7] **Grieser J.**, unveröffentlichtes Skriptum zur Spektralanalyse, 1997. Einzusehen unter: <http://www.rz.uni-frankfurt.de/~grieser/spek/index.html>
- [8] **Grieser J.**, Schönwiese C.-D., Parametrization of Spatio-temporal Patterns of Volcanic Aerosol Induced Stratospheric Optical Depth and its Climate Radiative Forcing, *Atmosphäre*, 1998.
- [9] **Grieser J.**, Staeger T., Schönwiese C.-D., Statistische Analyse zur Früherkennung globaler und regionaler Klimaänderungen aufgrund des anthropogenen Treibhauseffektes, Bericht des Institutes Nr. 103, Eigenverlag des Institutes Ffm. , 2000.
- [10] **Holton J. R.**, An Introduction to Dynamic Meteorology, Academic Press Inc., 1992, 424-429.
- [11] **Hulme M.**, Osborn T. J., and Johns T. C.. Precipitation sensitivity to global warming: Comparison of observations with HadCM2 simulations. *Geophys. Res. Letts.*, 25:3379-3382, 1998.
- [12] **Hurrell J.W.**, Decadal trends in the North Atlantic Oscillation and relationships to regional temperature and precipitation. *Science* 269, 676-679, 1995.
- [13] **Jones P.D.**, The influence of ENSO on global temperatures, *Climate Monitor* 17(3), 80-89, 1982.
- [14] **Jones P.D.**, Jónsson T. and Wheeler D. Extension to the North Atlantic Oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and South-West Iceland, *Int. J. Climatol.* 17, 1433-1450, 1997.
- [15] **Labitzke K. G.**, Die Stratosphäre (Phänomene Geschichte Relevanz), Springer-Verlag, 1999.

- [16] **Lamb** P.J, Pepler R., North Atlantik Oszillation: concept and application, Bulletin American Meteorological Society, Vol. 86, Nr. 10, S. 1218-1224, 1987.
- [17] **Olberg** M., Rákóczy F., Informationstheorie in Meteorologie und Geophysik, Akademie Verlag Berlin, 1984.
- [18] **Parker** D. E., Jones P. D., Folland C. K., and Bevan A.. Interdecadal changes of surface temperature since the late nineteenth century. J. Geophys. Res., 99:14373-14399, 1994.
- [19] **Roedel** W., Physik unserer Umwelt, Die Atmosphäre, Springer Verlag, 1994.
- [20] **Rapp** J., Schönwiese C.-D.. Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891 - 1990, volume 5 of Serie B., Frankfurter Geowissensch. Arbeiten, Frankfurt, 1996. 2. Auflage.
- [21] **Press** W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vettering W. T., Numerical Recipes, Cambridge University Press, 1989.
- [22] **Rogers** J.C., North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe, Journal of Climate 10(7), 1635-1647, 1997.
- [23] **Schaaf** S., Statistische Analyse des Sonnensignals in Klimazeitreihen, Diplomarbeit, Fachbereich Geowissenschaften der Goethe-Universität Frankfurt am Main, 1998.
- [24] **Schlittgen** R., Streitberg B. H. J., Zeitreihenanalyse 8. Auflage, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 1999.
- [25] **Schönwiese** C.-D., Rapp J., Climate Trend Atlas of Europe 1891 - 1990, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [26] **Schönwiese** C.-D., Klimaänderungen, Springer Verlag, 1995.
- [27] **Schönwiese** C.-D., Klimatologie, Ulmer, 1994.
- [28] **Schönwiese** C.-D, Praktische Statistik, Gebrüder Borntraeger, 2000.
- [29] **Schönwiese** C.-D., Ulrich R., Becker F., Solare Einflüsse auf die Lufttemperaturvariationen der Erde in den letzten Jahrhunderten. Projektbericht im Auftrag des Gesamtverbands des Deutschen Steinkohlenbergbaus, Bericht des Institutes Nr. 92, Eigenverlag des Institutes Ffm., 1992.
- [30] **Staeger** T., Statistische Analyse des ENSO- und Vulkanismus-Signals in Klima-Zeitreihen, Diplomarbeit, Fachbereich Geowissenschaften der Goethe-Universität Frankfurt am Main, 1997.

- [31] **Steinbrecht** W., Claude H., Ozonbulletin des DWD, Ausgabe Nr. 60, 1998. Einzusehen unter:
<http://www.dwd.de/research/mohp/hp2/ozo/bulletins/bull160.htm>
- [32] **Stoecker** H., Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren, Harri Deutsch Verlag Ffm., 1998.
- [33] **Werner** A., Die Nord-Atlantik-Oszillation und ihre Auswirkungen auf Europa, Diplomarbeit, Fachbereich Geowissenschaften der Goethe-Universität Frankfurt am Main, 1999.

A **Ergänzende Abbildungen**

A.1 Spektren der Zeitreihen natürlicher Einfluß-Phänomene

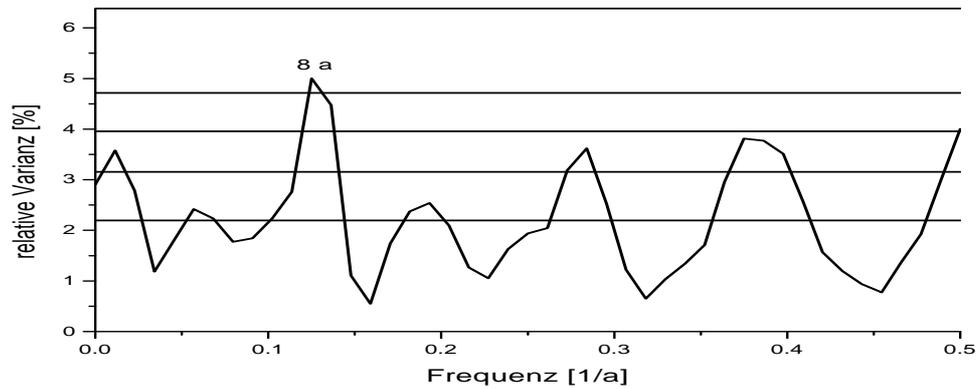


Abbildung 31: ASA der NAO mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

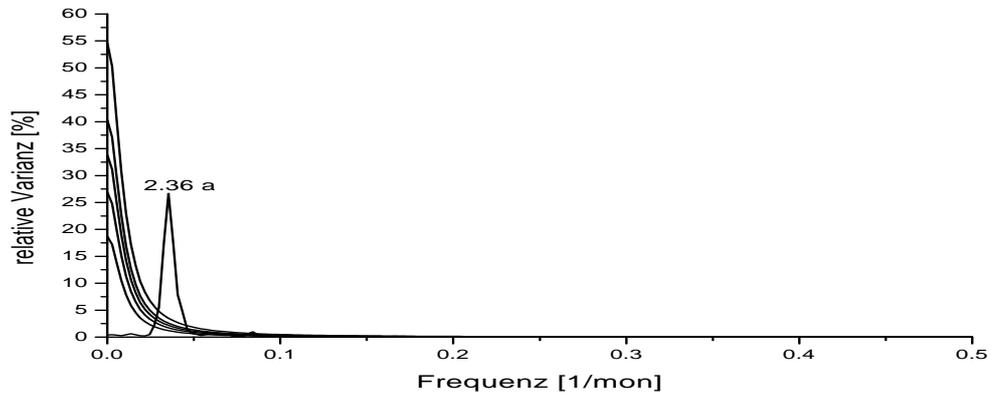


Abbildung 32: ASA der QBO mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

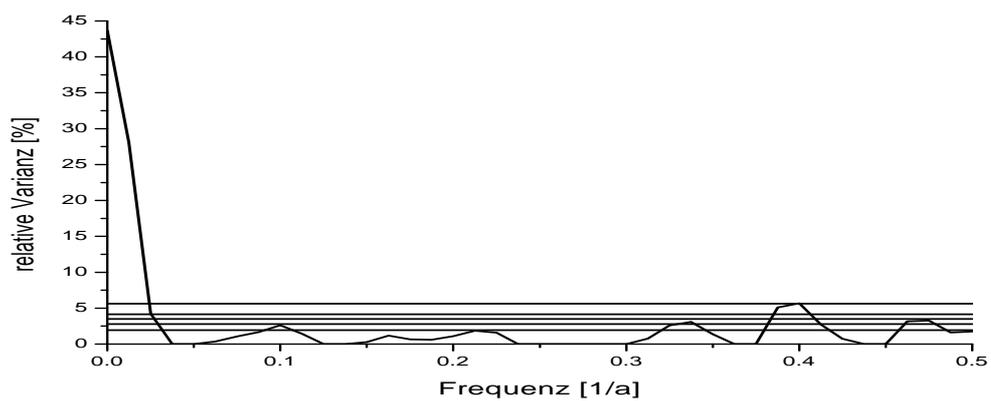


Abbildung 33: ASA der Solarkonstanten mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

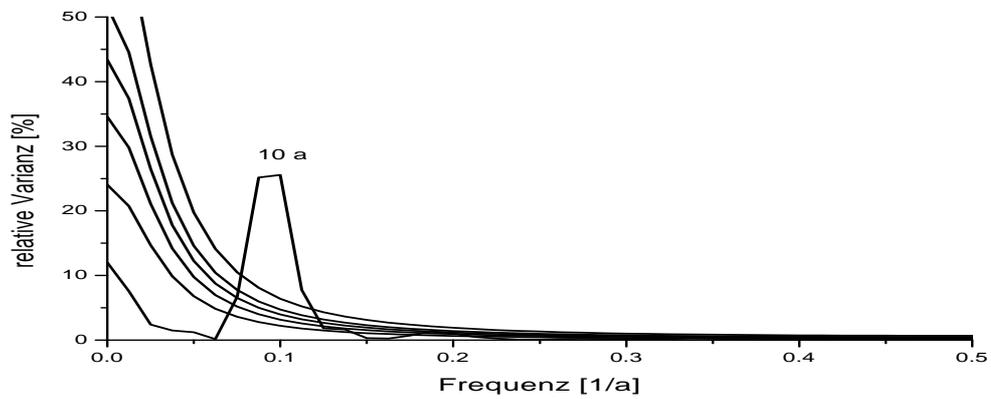


Abbildung 34: ASA der SRZ mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

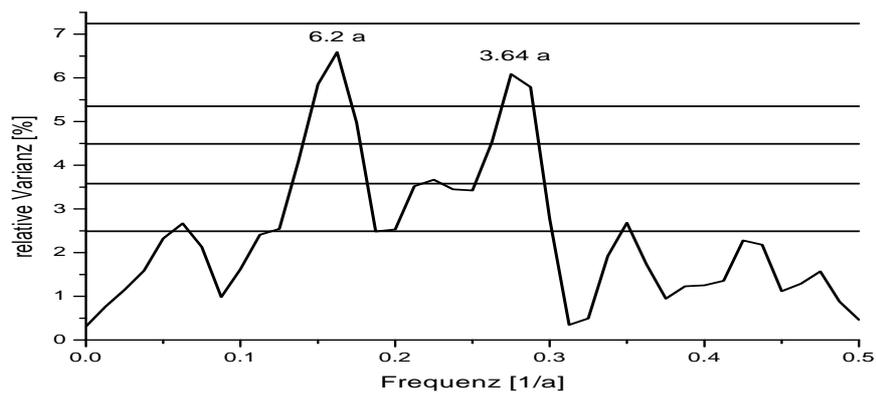


Abbildung 35: ASA des SOI mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

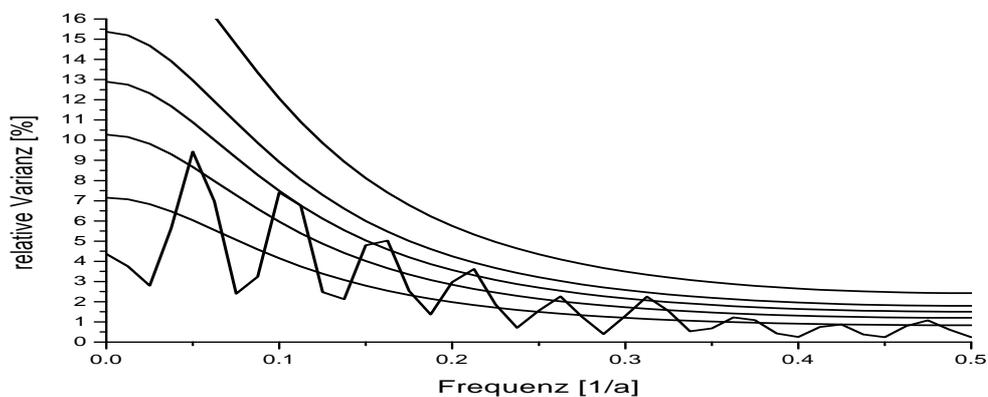


Abbildung 36: ASA des vulkanischen Strahlungsantriebs mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

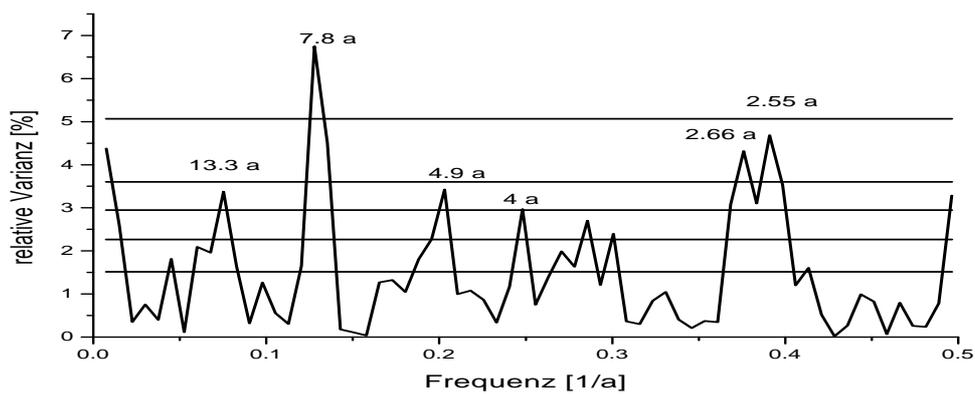


Abbildung 37: Periodogramm der NAO mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

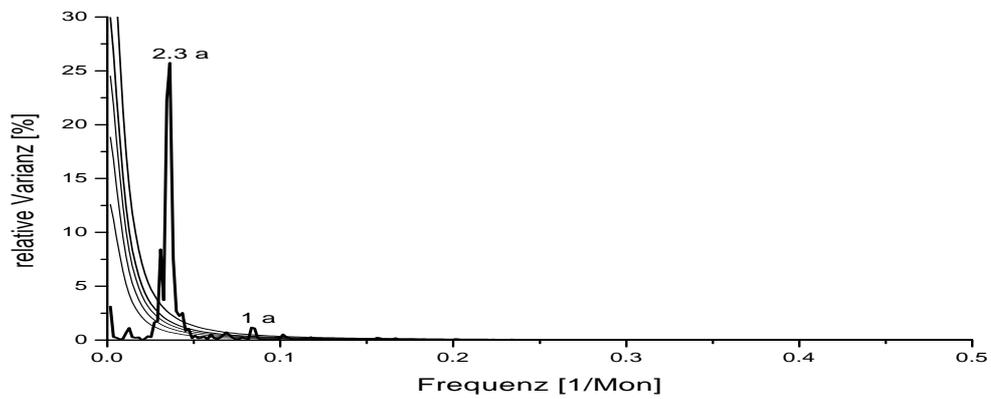


Abbildung 38: Periodogramm der QBO mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

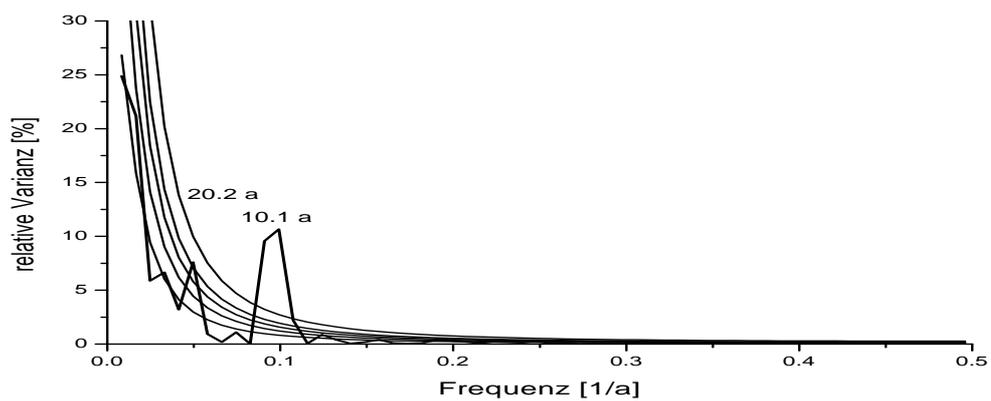


Abbildung 39: Periodogramm der Solarkonstanten mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

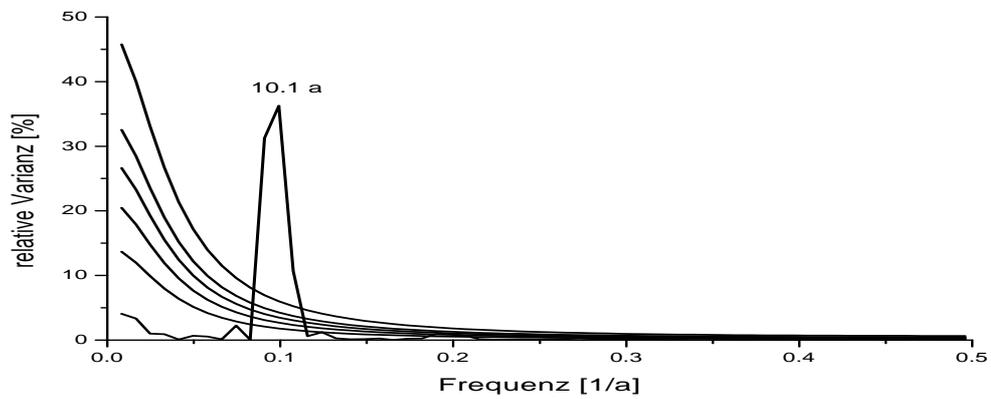


Abbildung 40: Periodogramm der SRZ mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

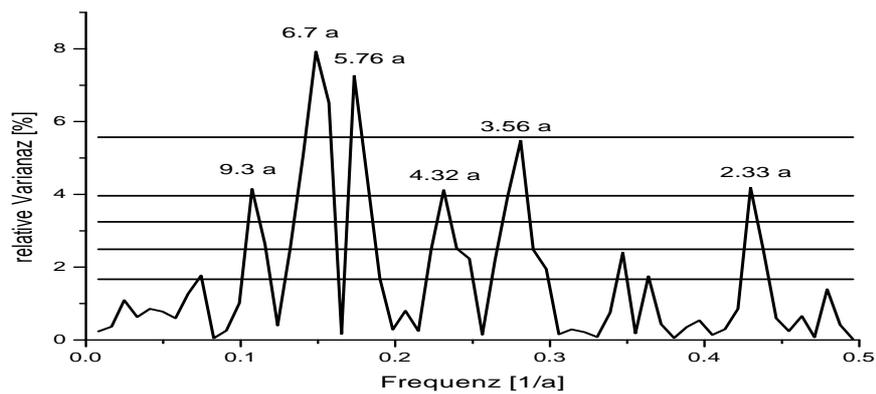


Abbildung 41: Periodogramm des SOI mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

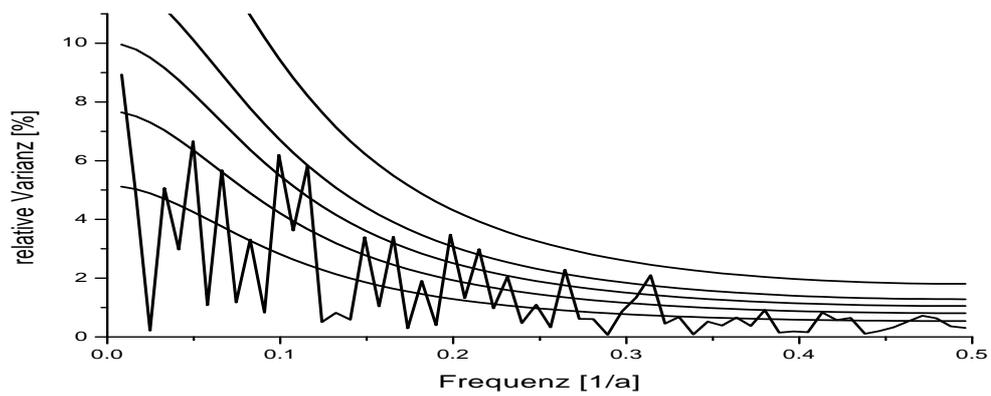


Abbildung 42: *Periodogramm des vulkanischen Strahlungsantriebs mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.*

A.2 Spektren der Zeitreihen der Stationsdaten

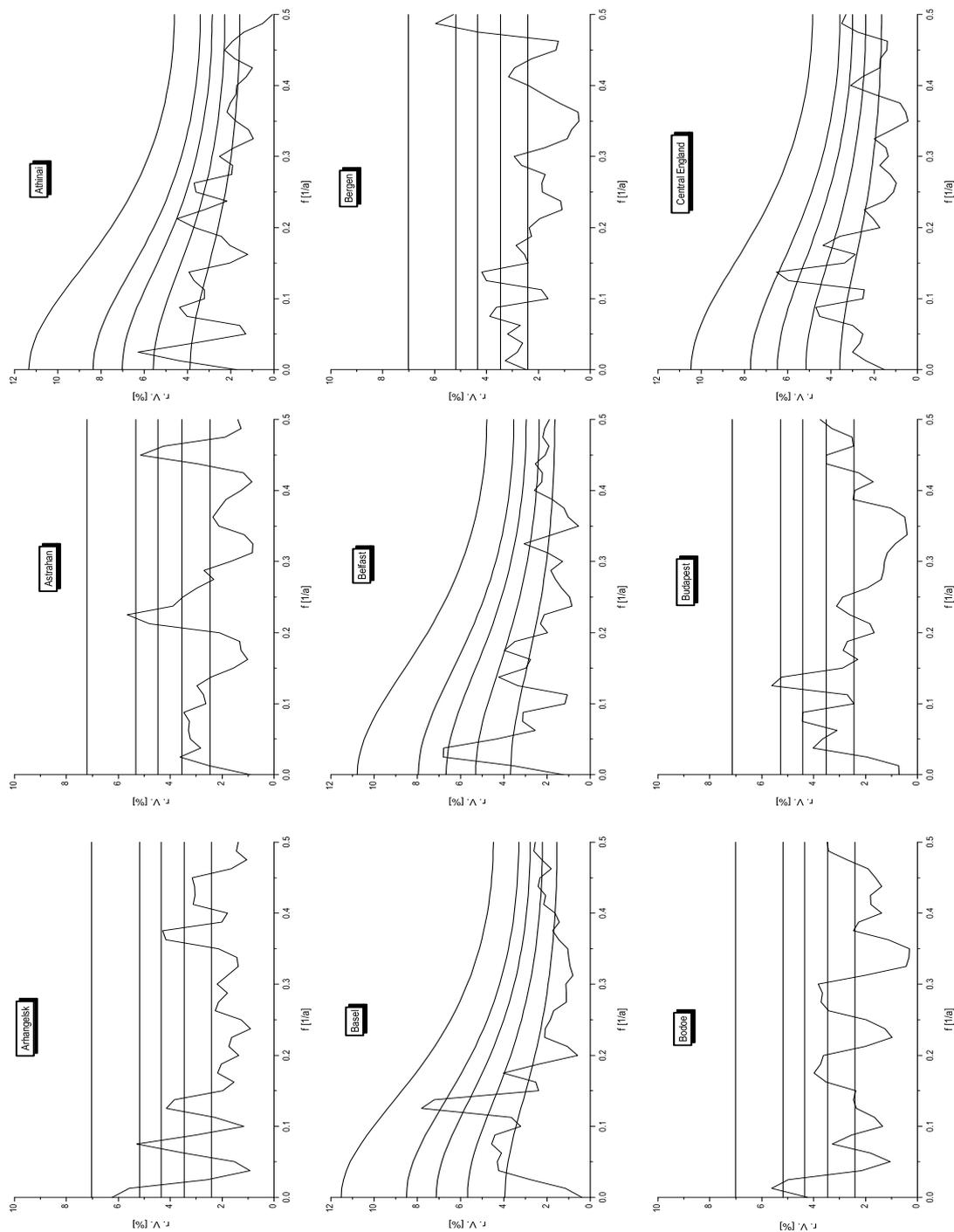


Abbildung 43: ASA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

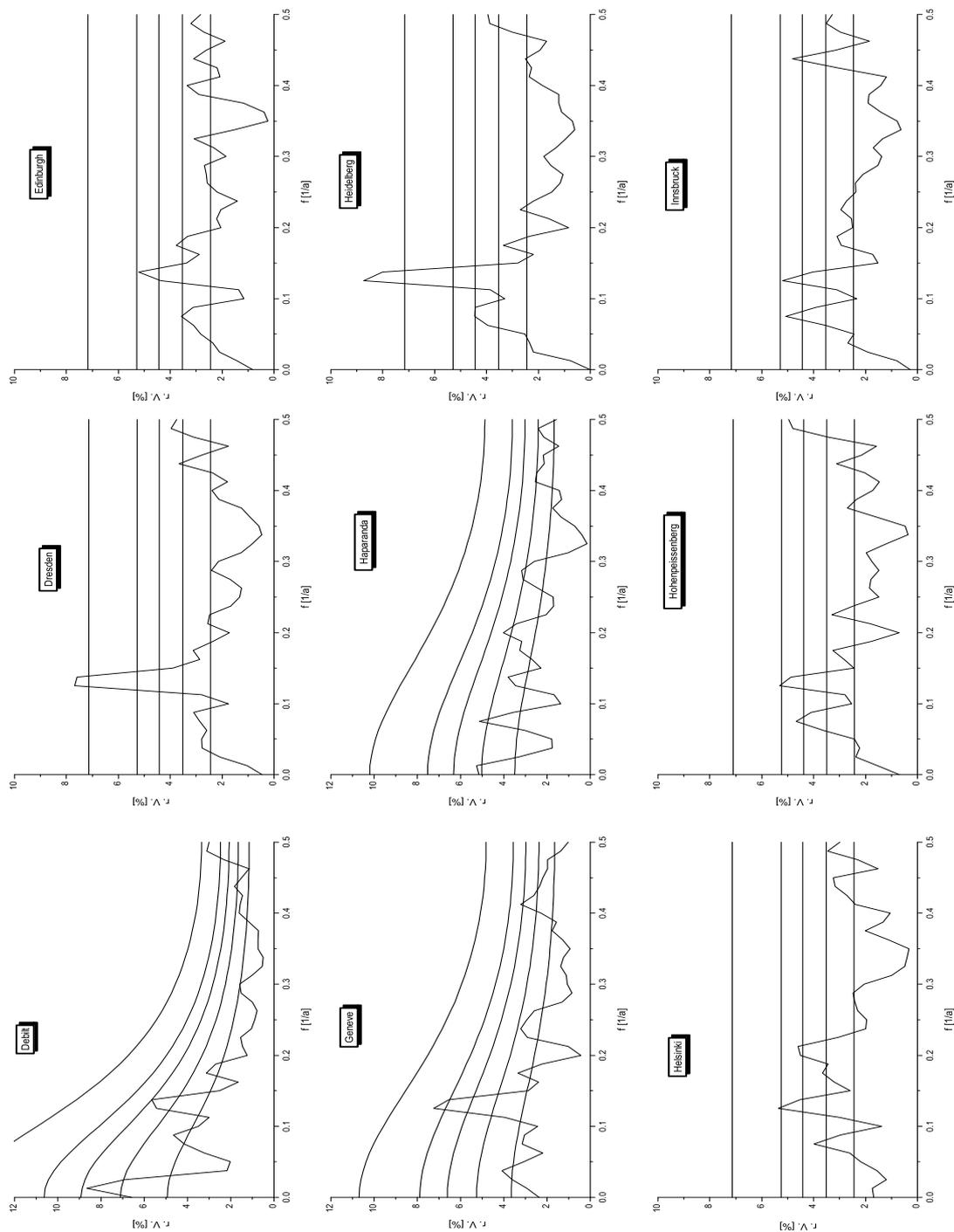


Abbildung 44: ASA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

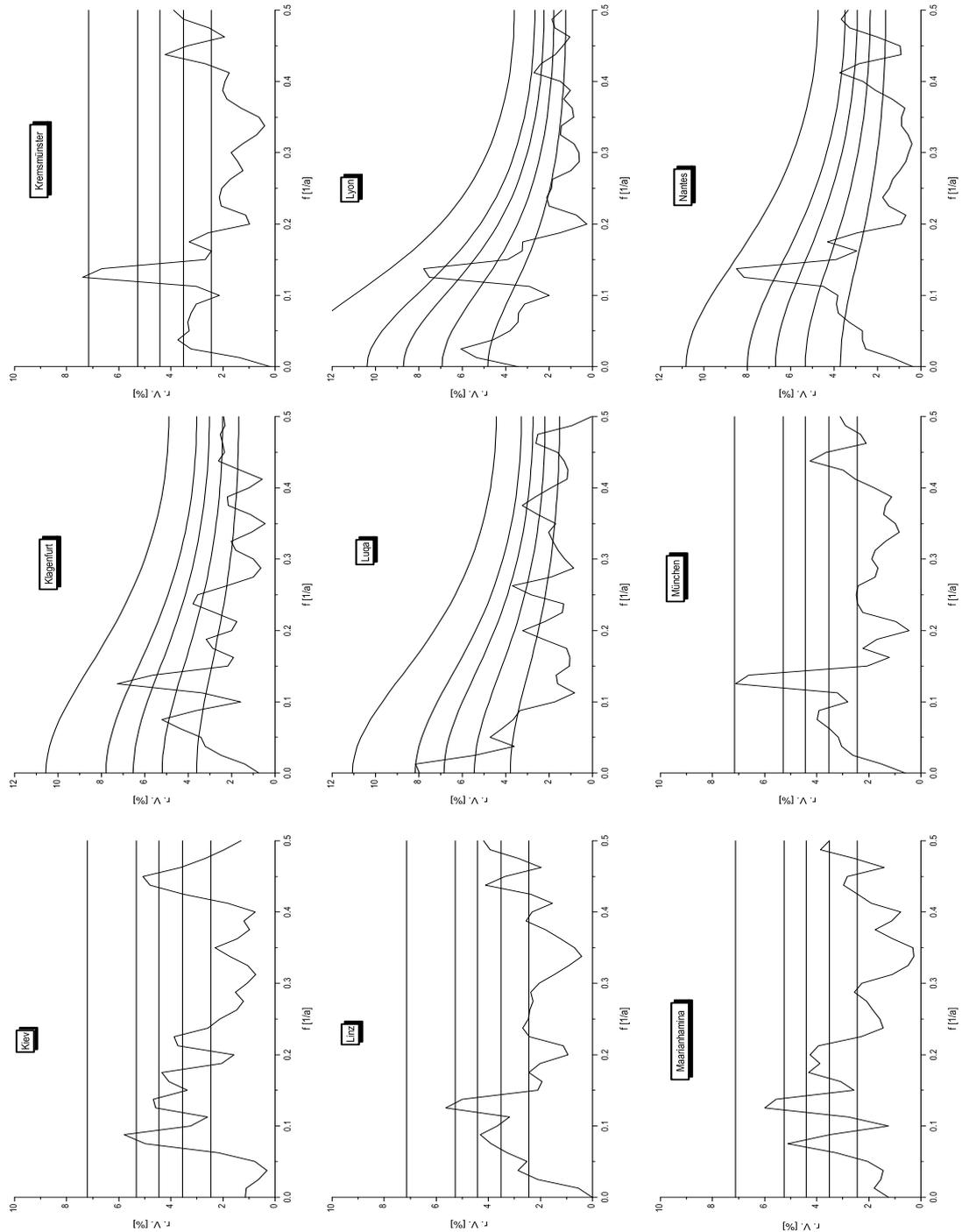


Abbildung 45: ASA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

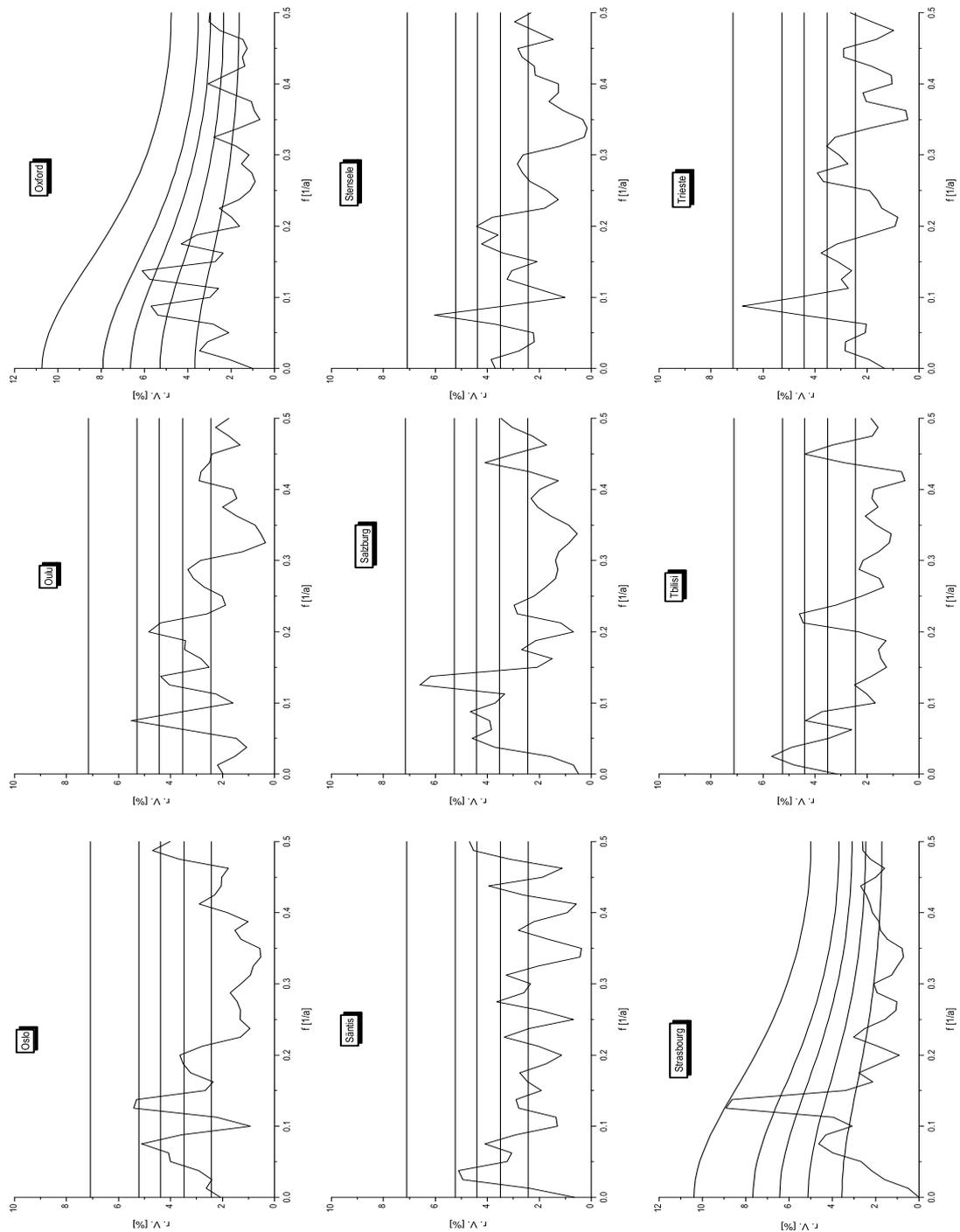


Abbildung 46: ASA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

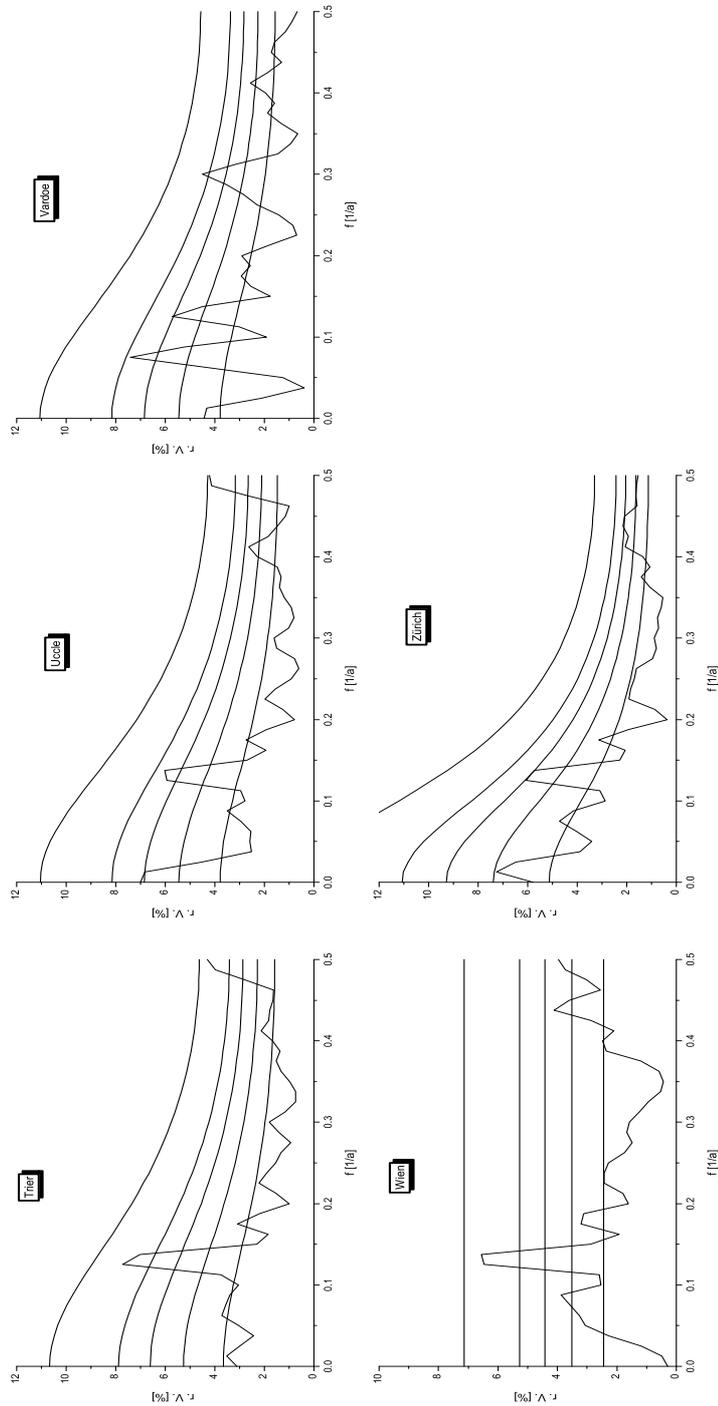


Abbildung 47: ASA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

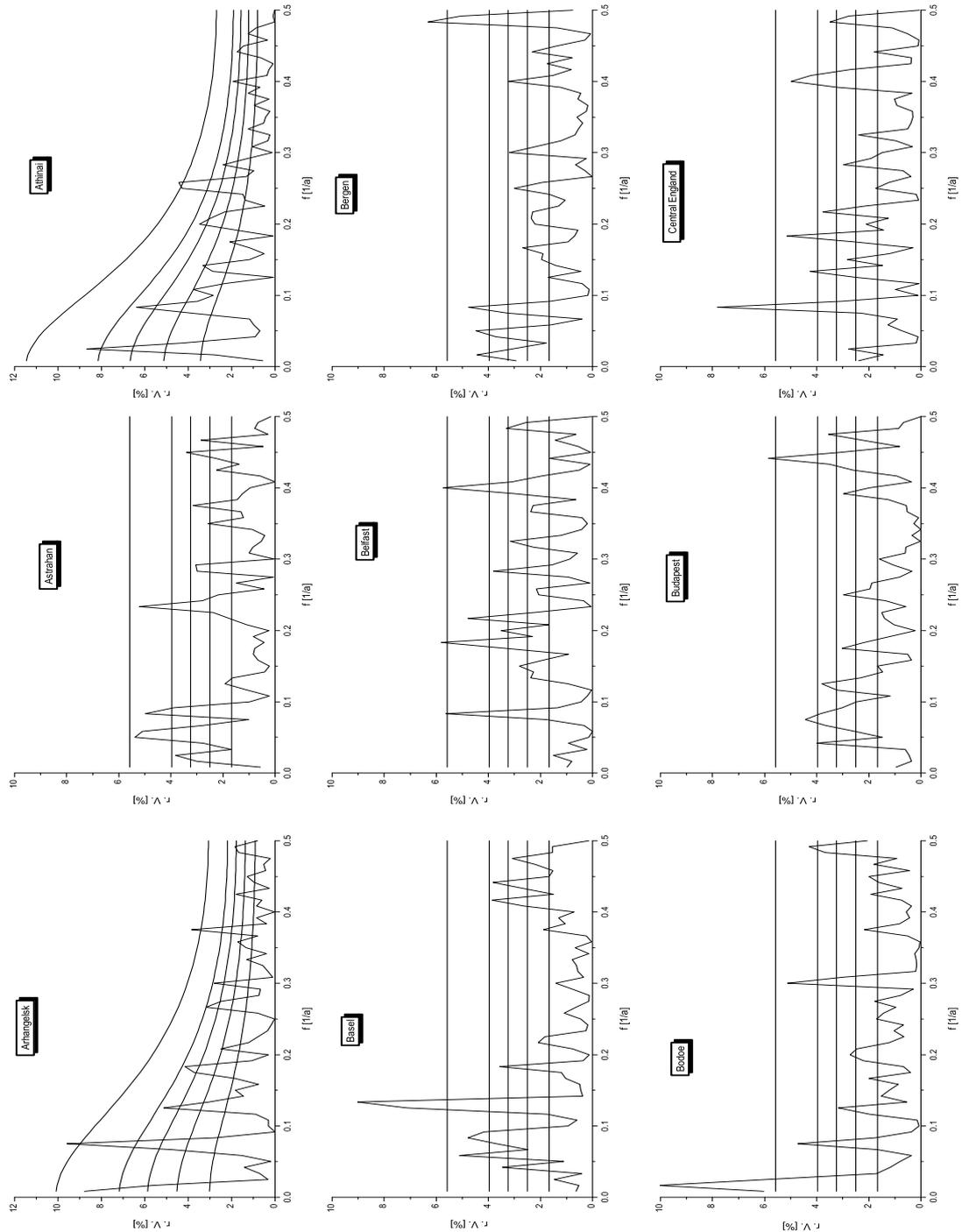


Abbildung 48: *Periodogramm europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.*

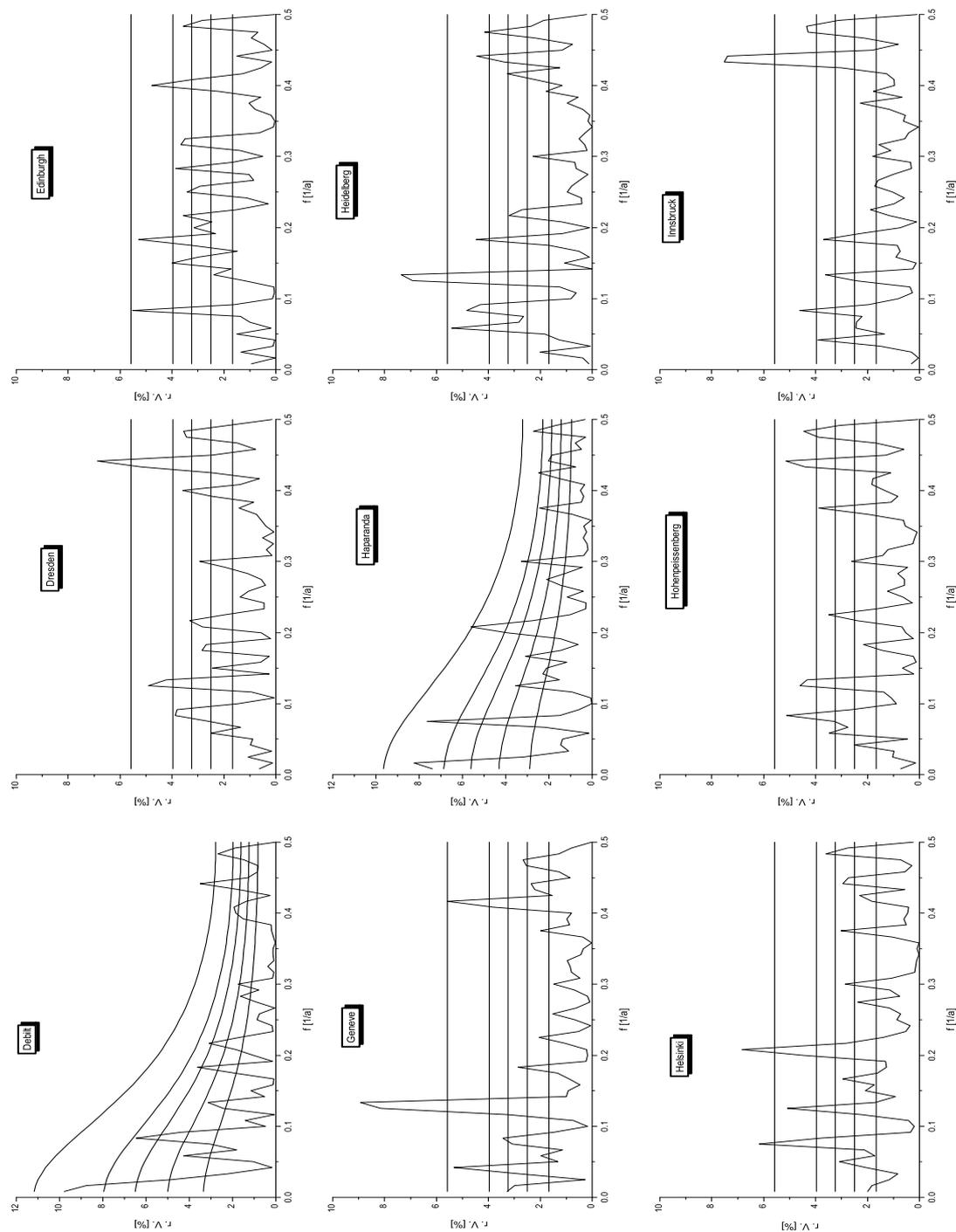


Abbildung 49: *Periodogramm europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.*

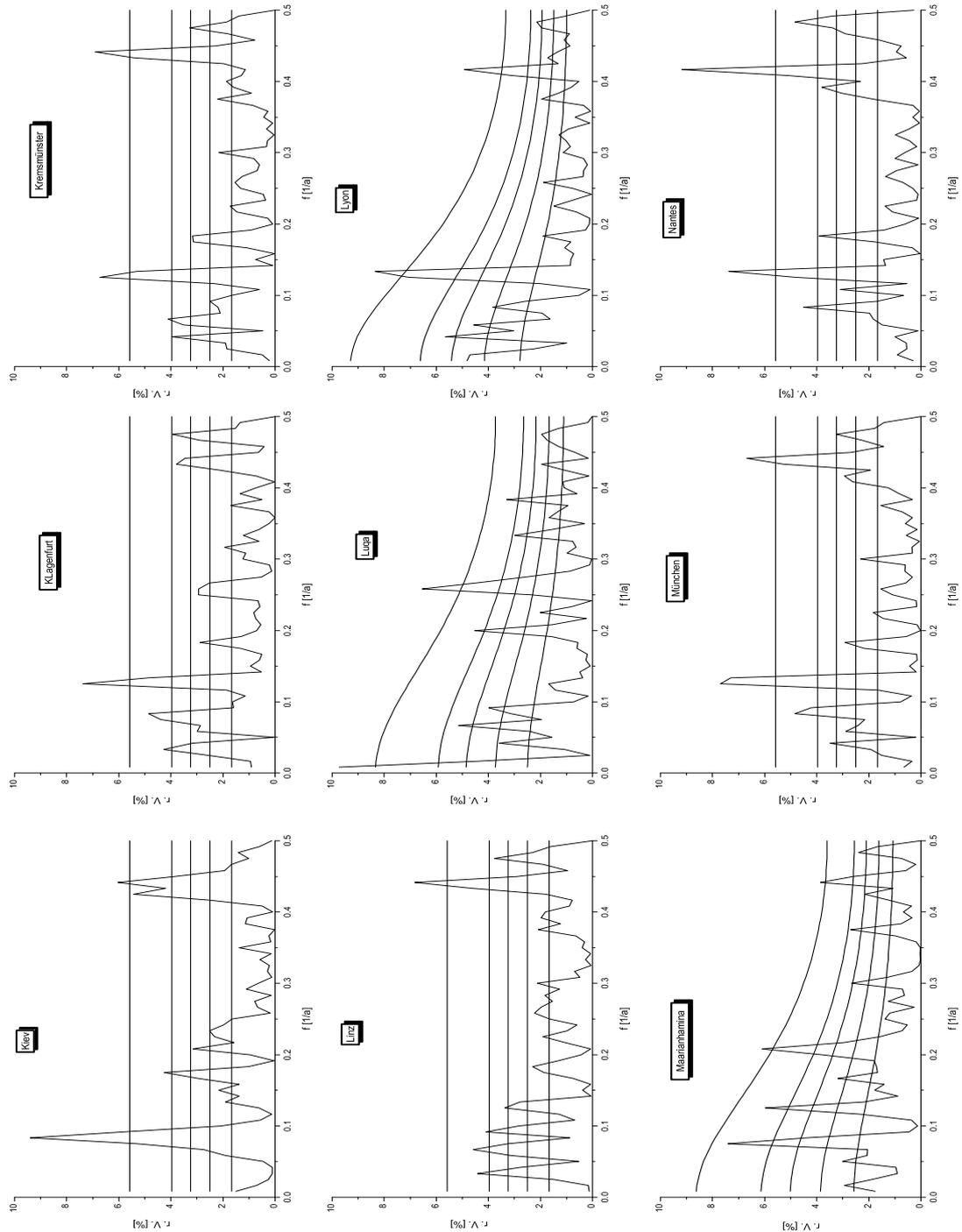


Abbildung 50: *Periodogramm europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.*

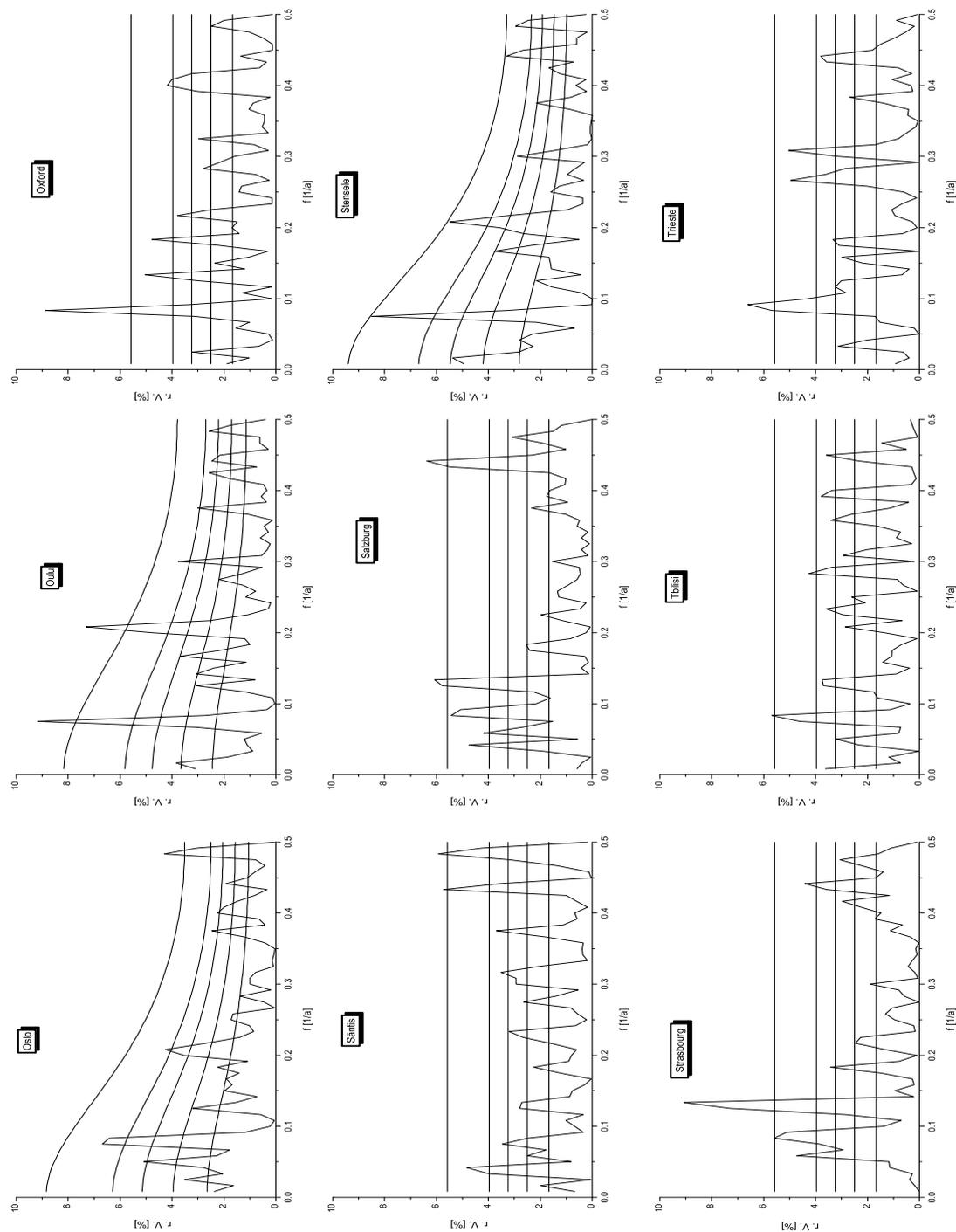


Abbildung 51: *Periodogramm europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.*

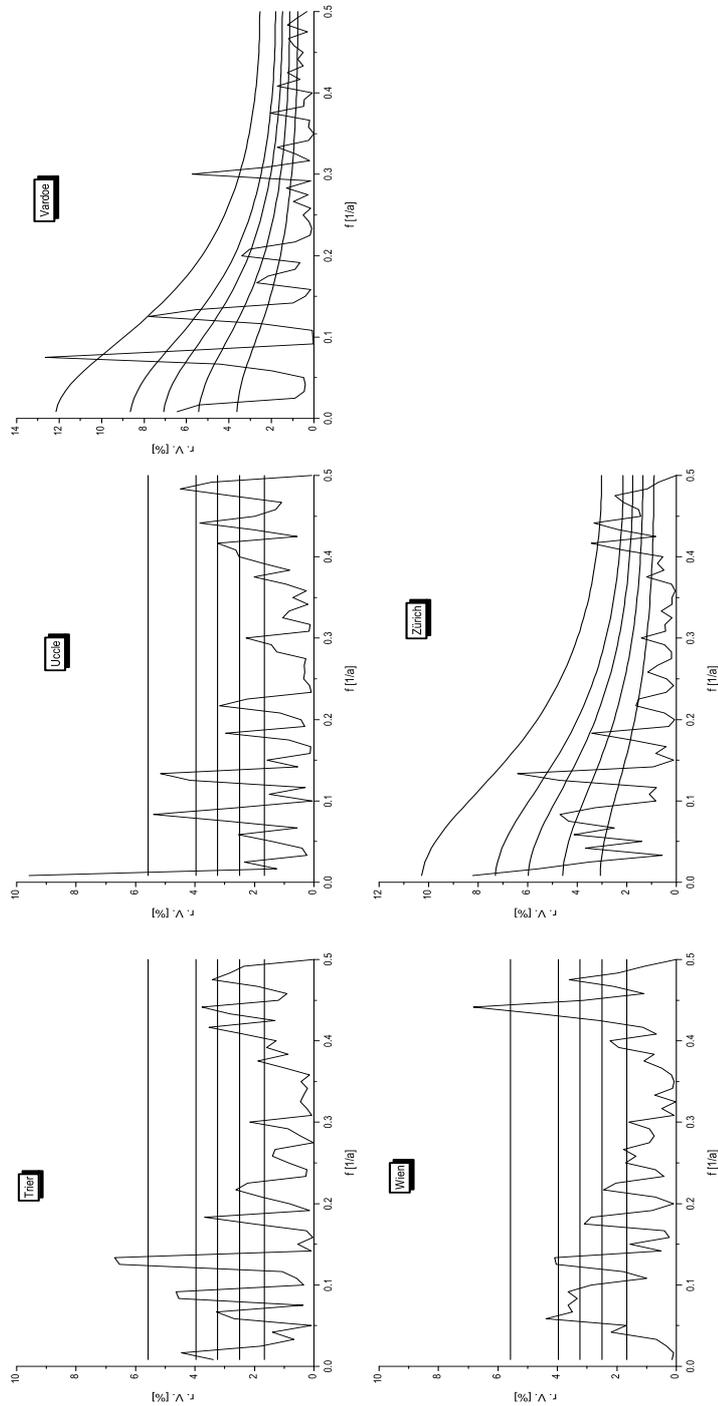


Abbildung 52: *Periodogramm europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.*

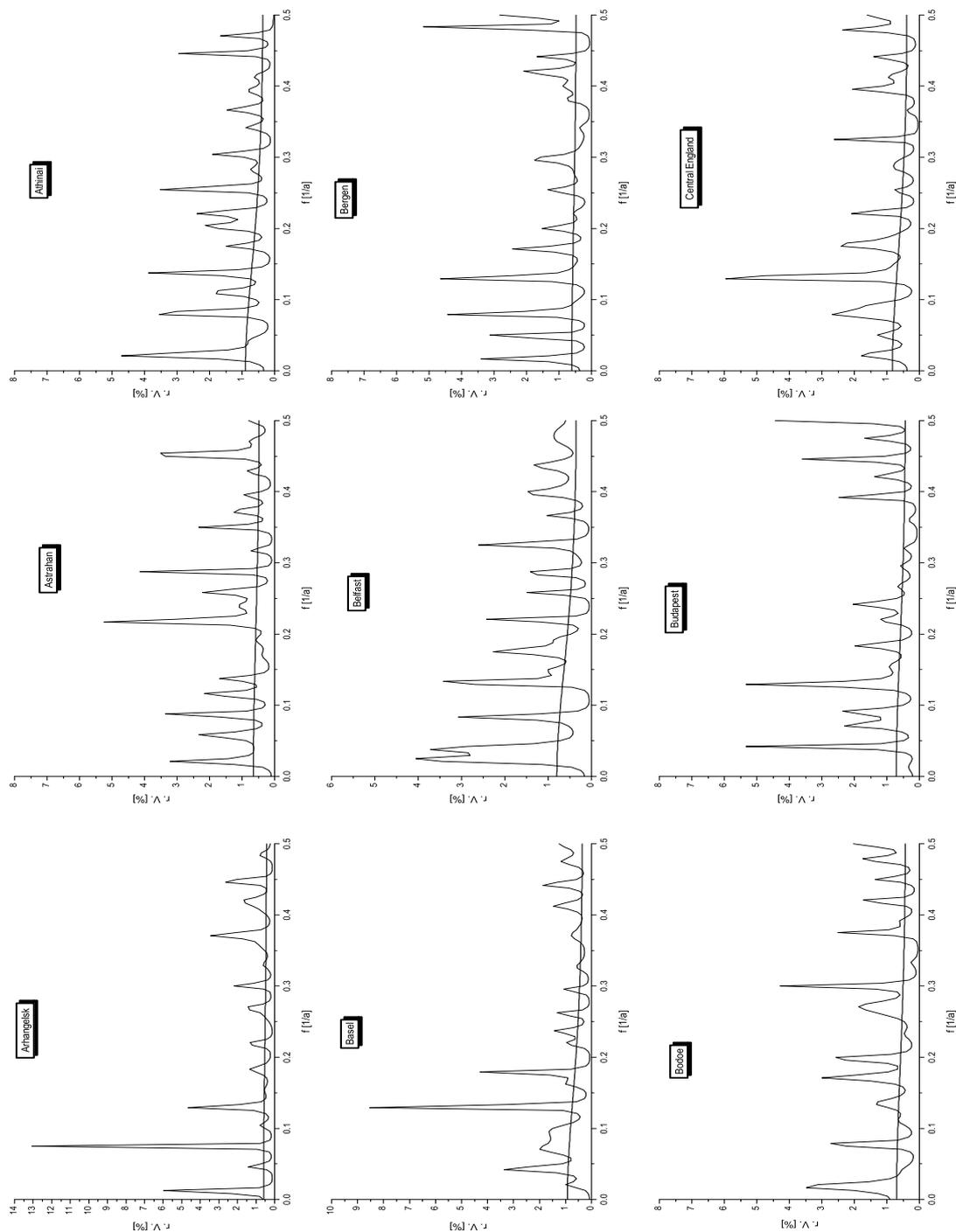


Abbildung 53: MESA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit Hintergrundspektrum.

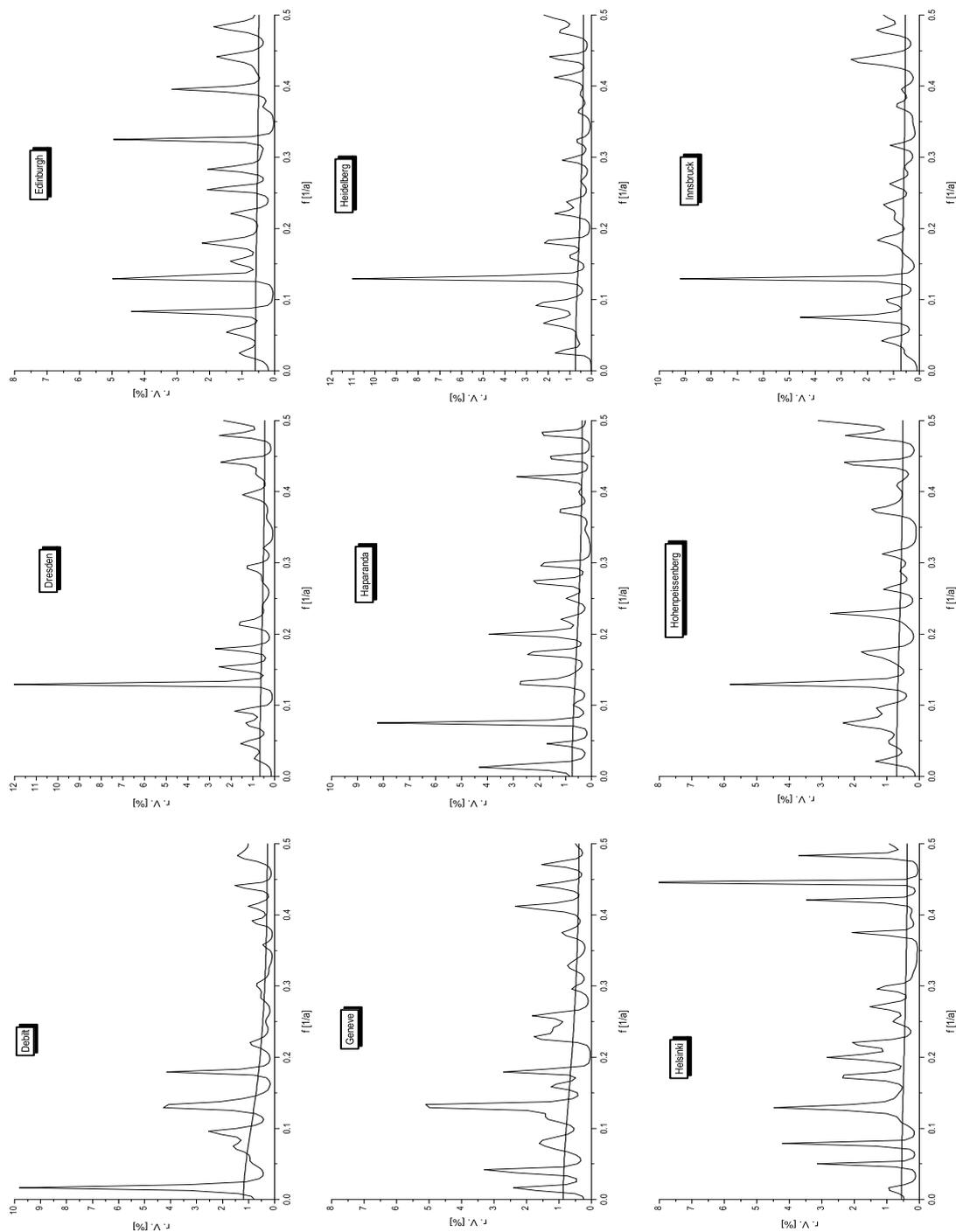


Abbildung 54: MESA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit Hintergrundspektrum.

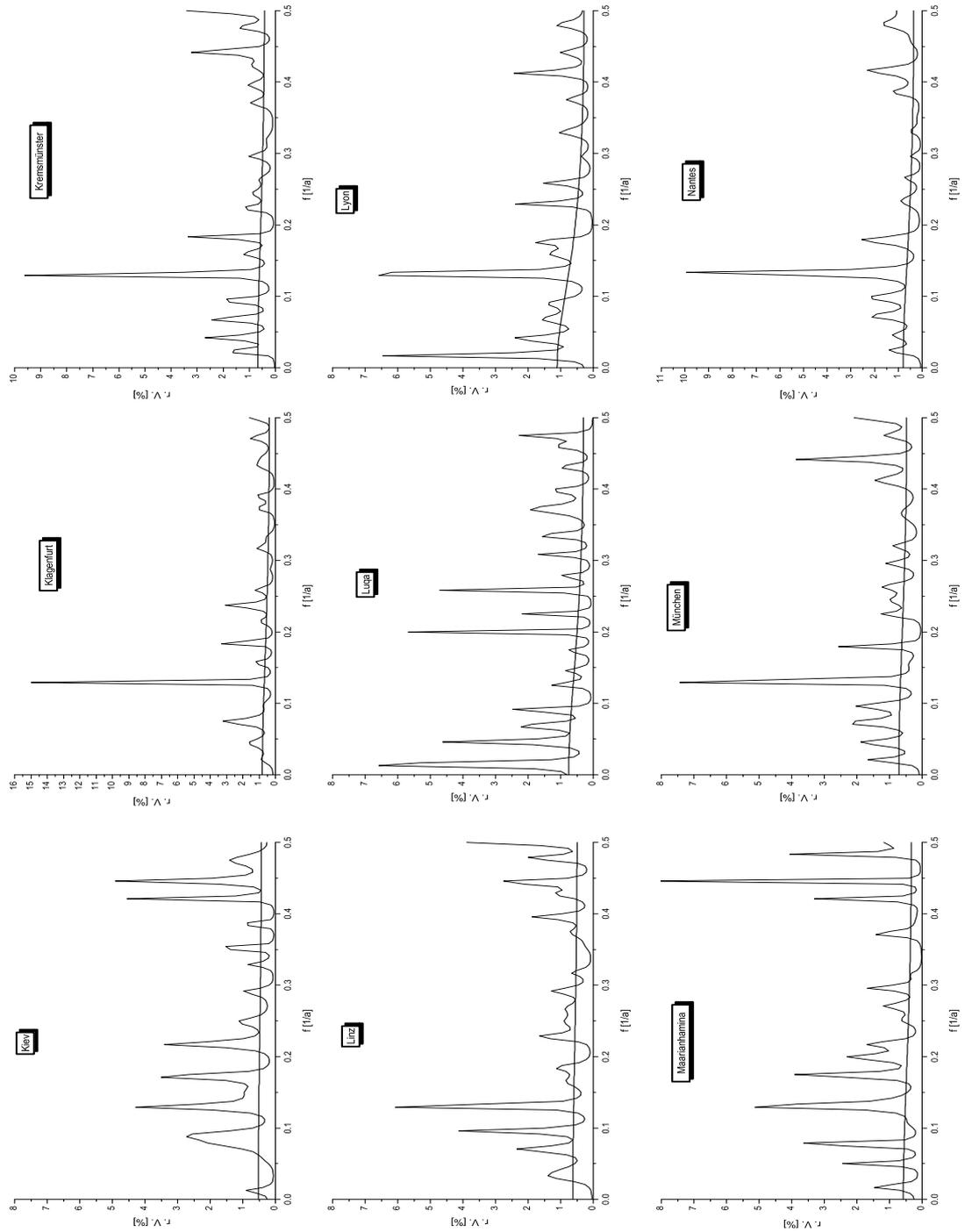


Abbildung 55: MESA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit Hintergrundspektrum.

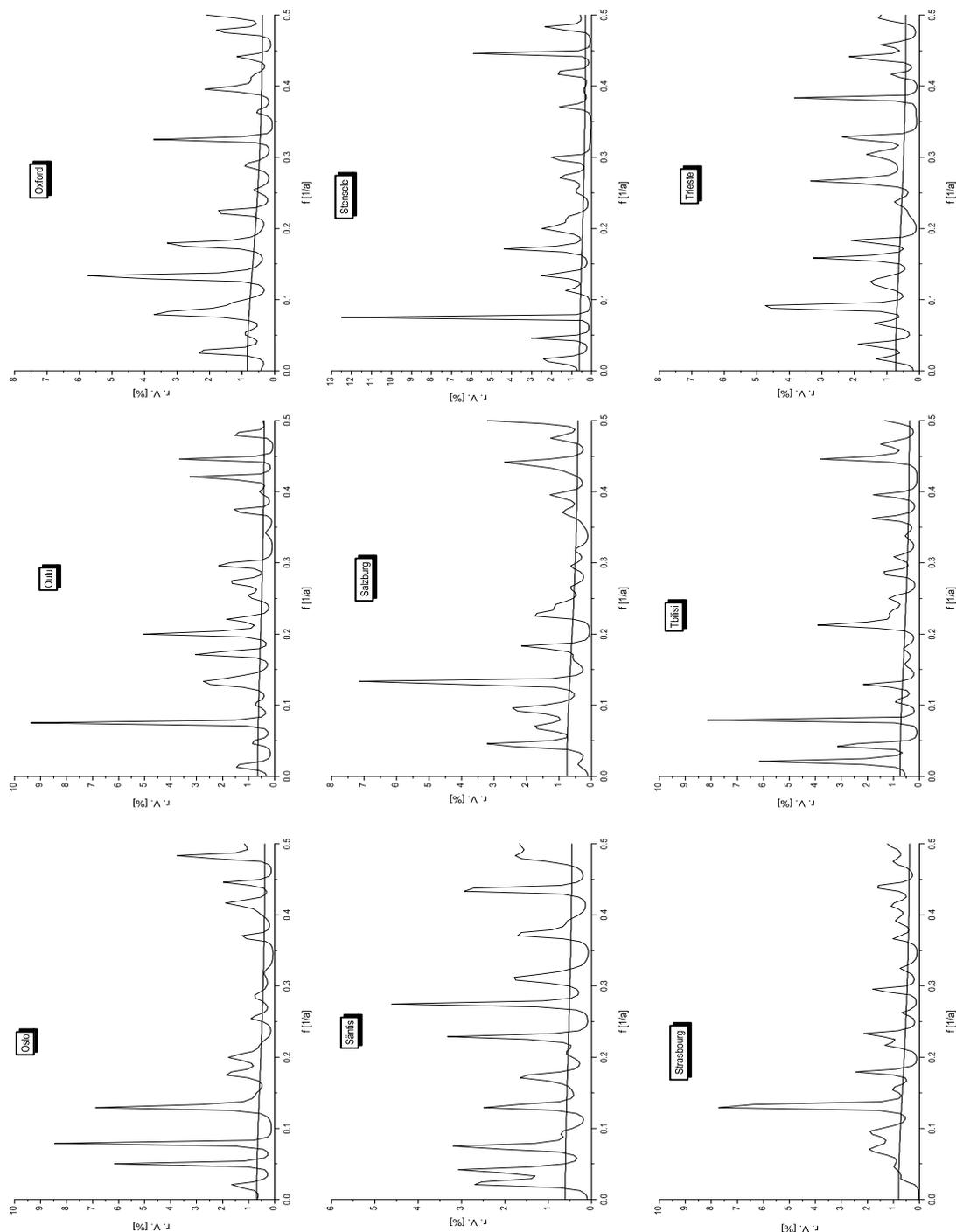


Abbildung 56: MESA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit Hintergrundspektrum.

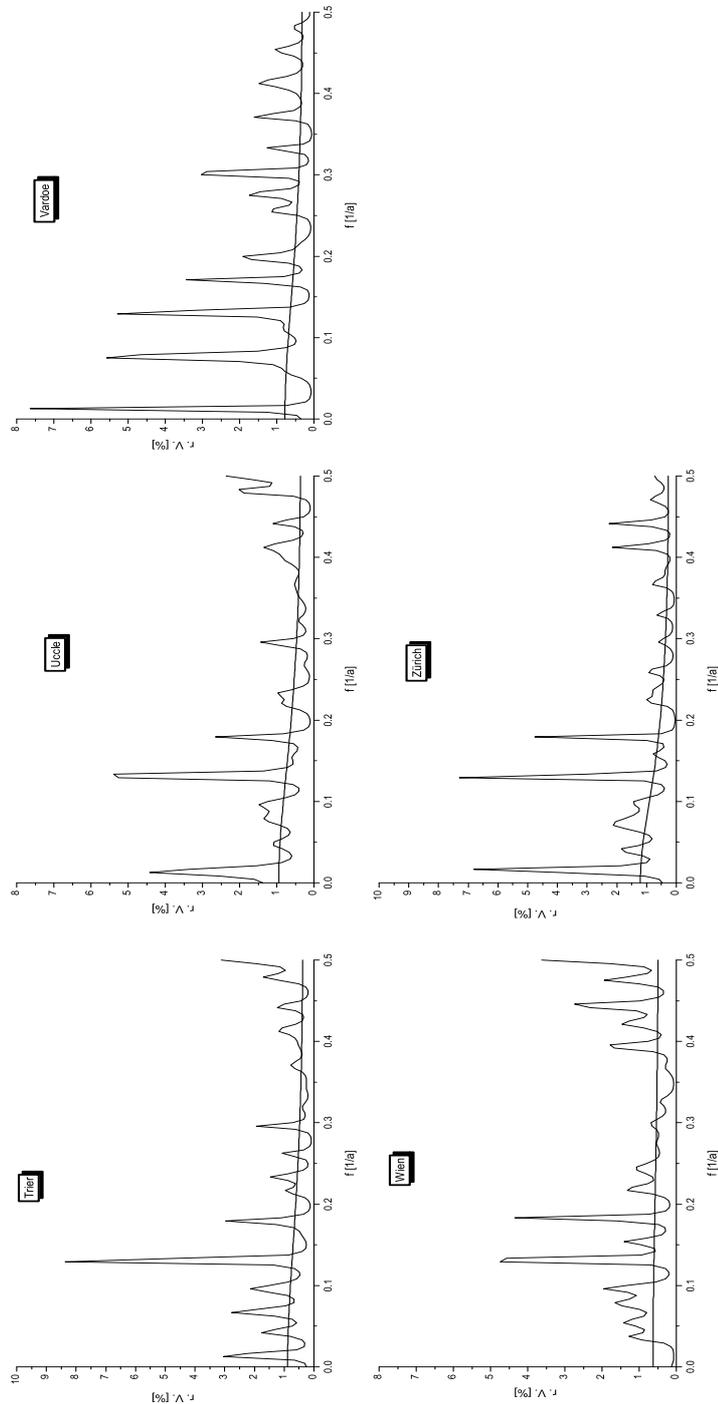


Abbildung 57: MESA europäischer Zeitreihen der Temperatur, mit Hintergrundspektrum.

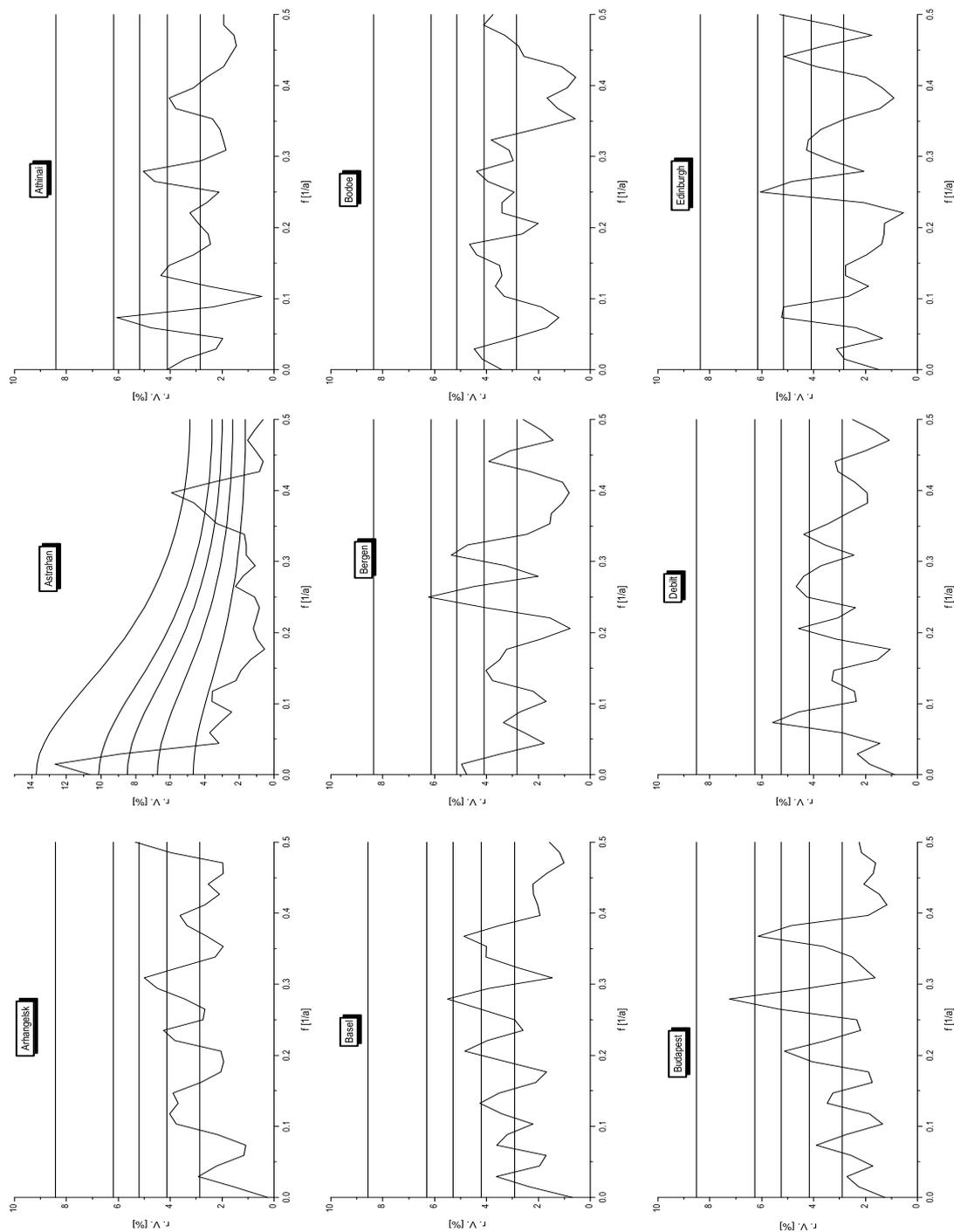


Abbildung 58: ASA europäischer Zeitreihen de Druckes, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

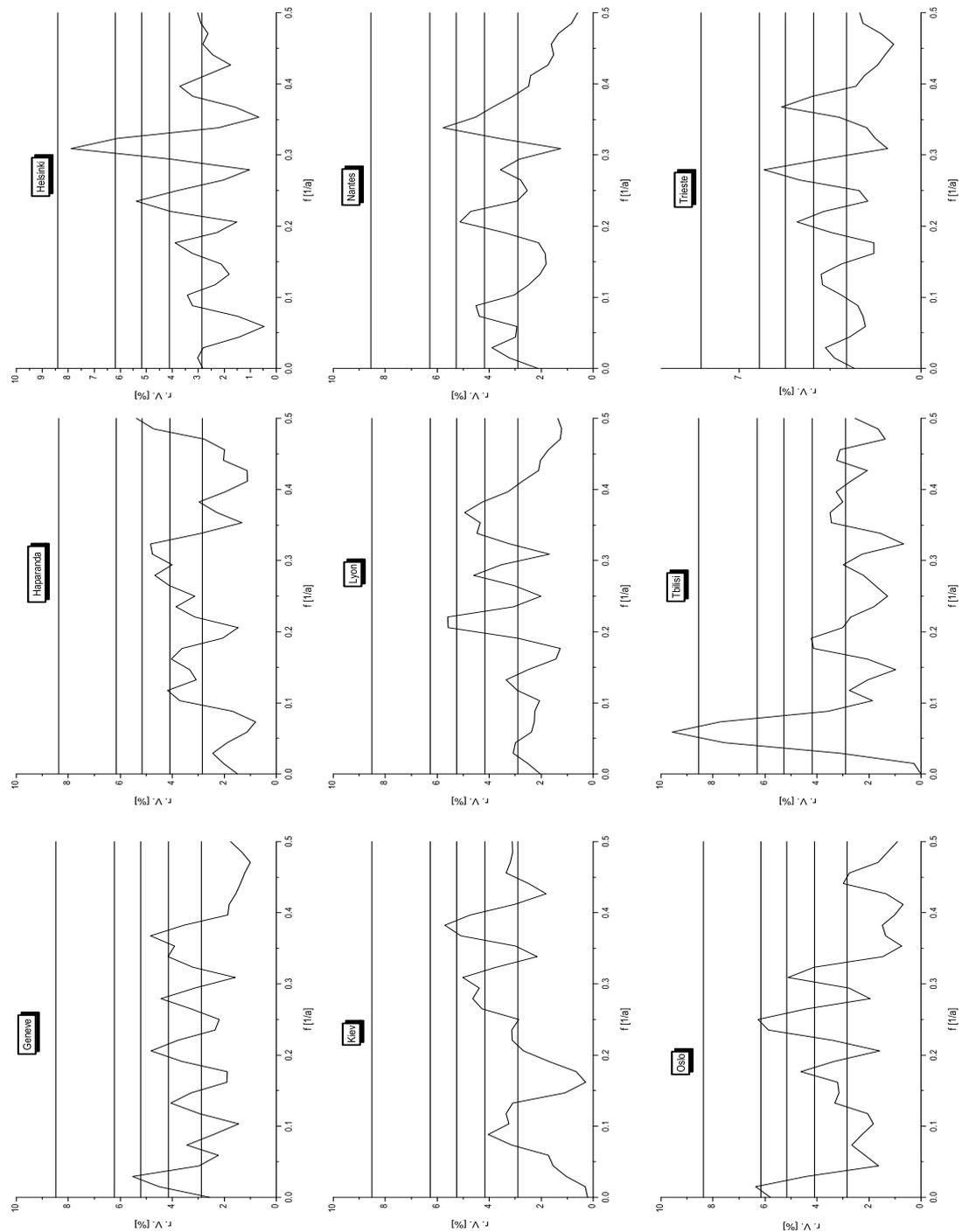


Abbildung 59: ASA europäischer Zeitreihen de Druckes, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

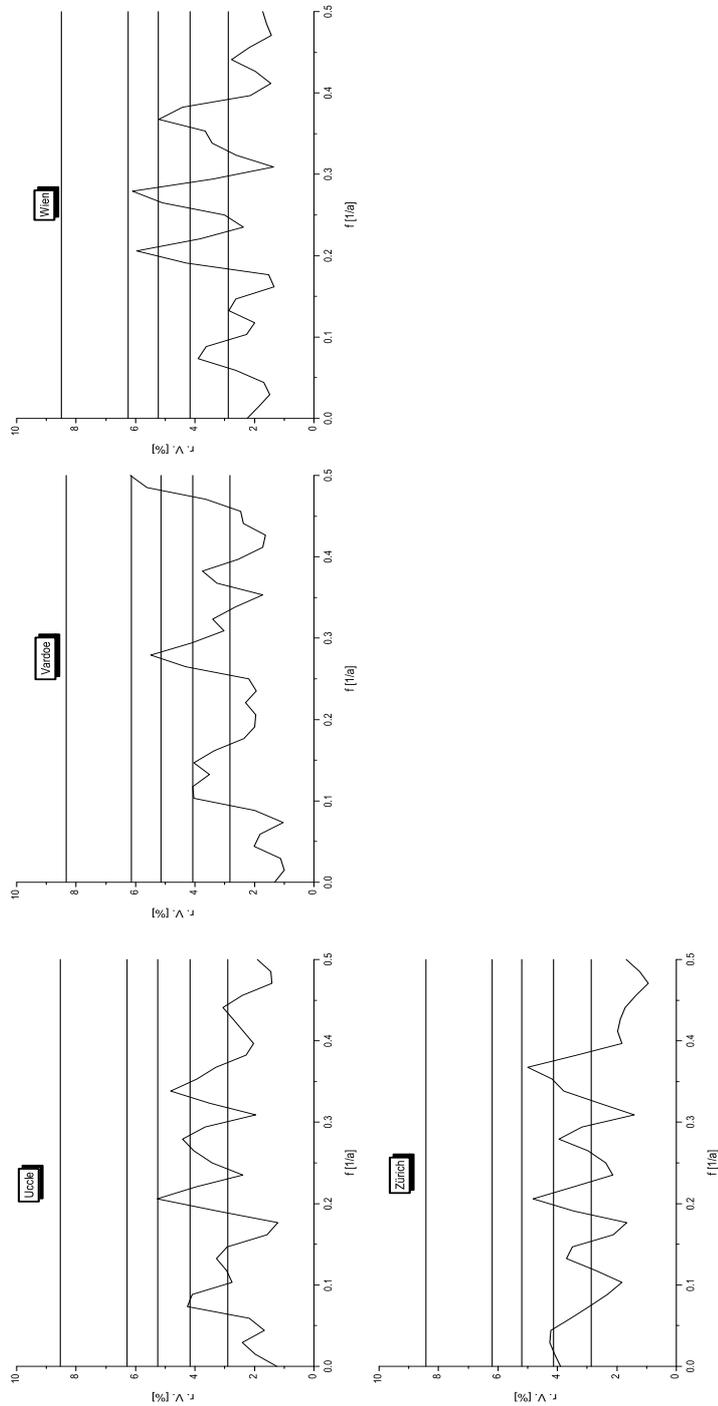


Abbildung 60: ASA europäischer Zeitreihen de Druckes, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.

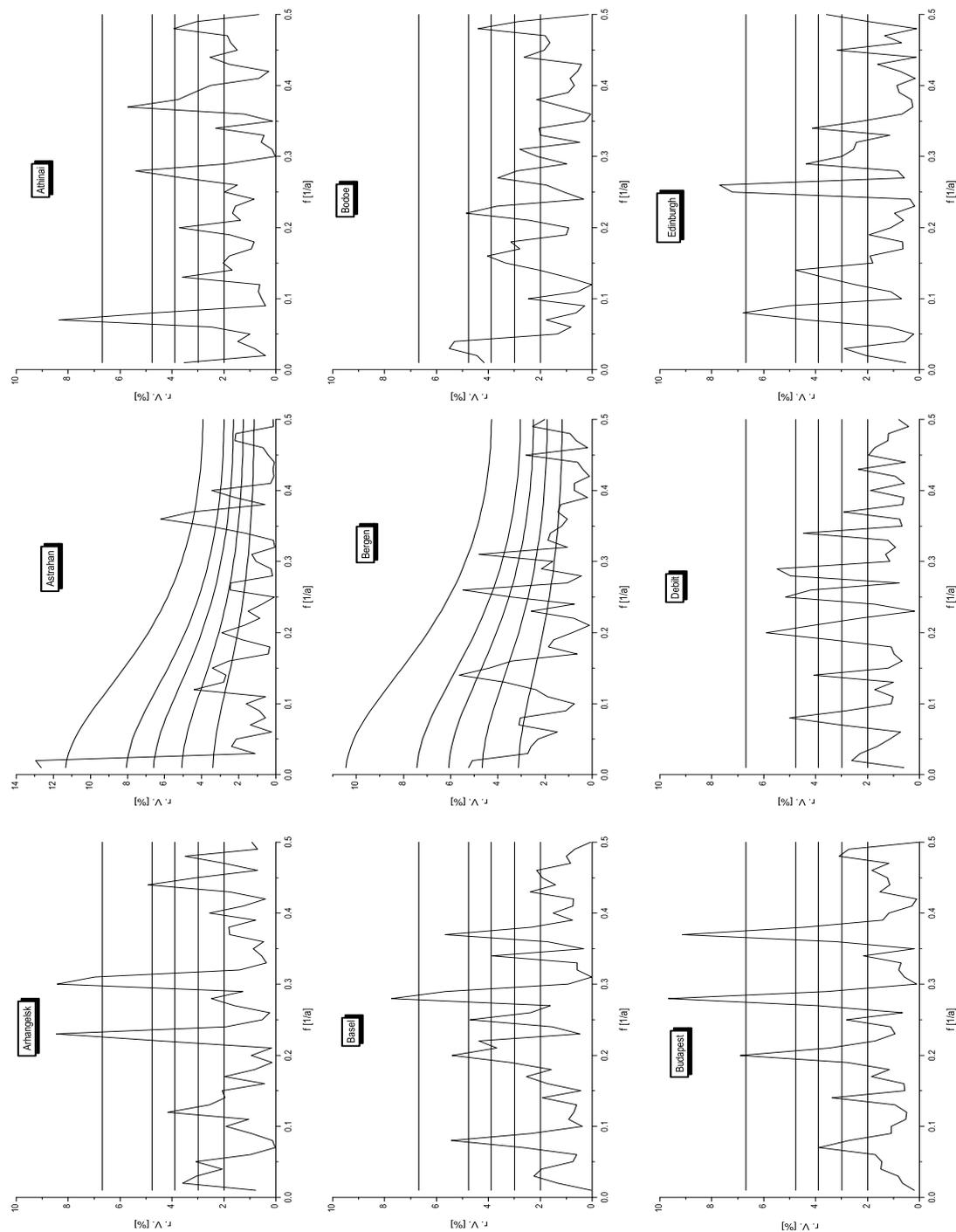


Abbildung 61: *Periodogramm europäischer Zeitreihen des Druckes, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.*

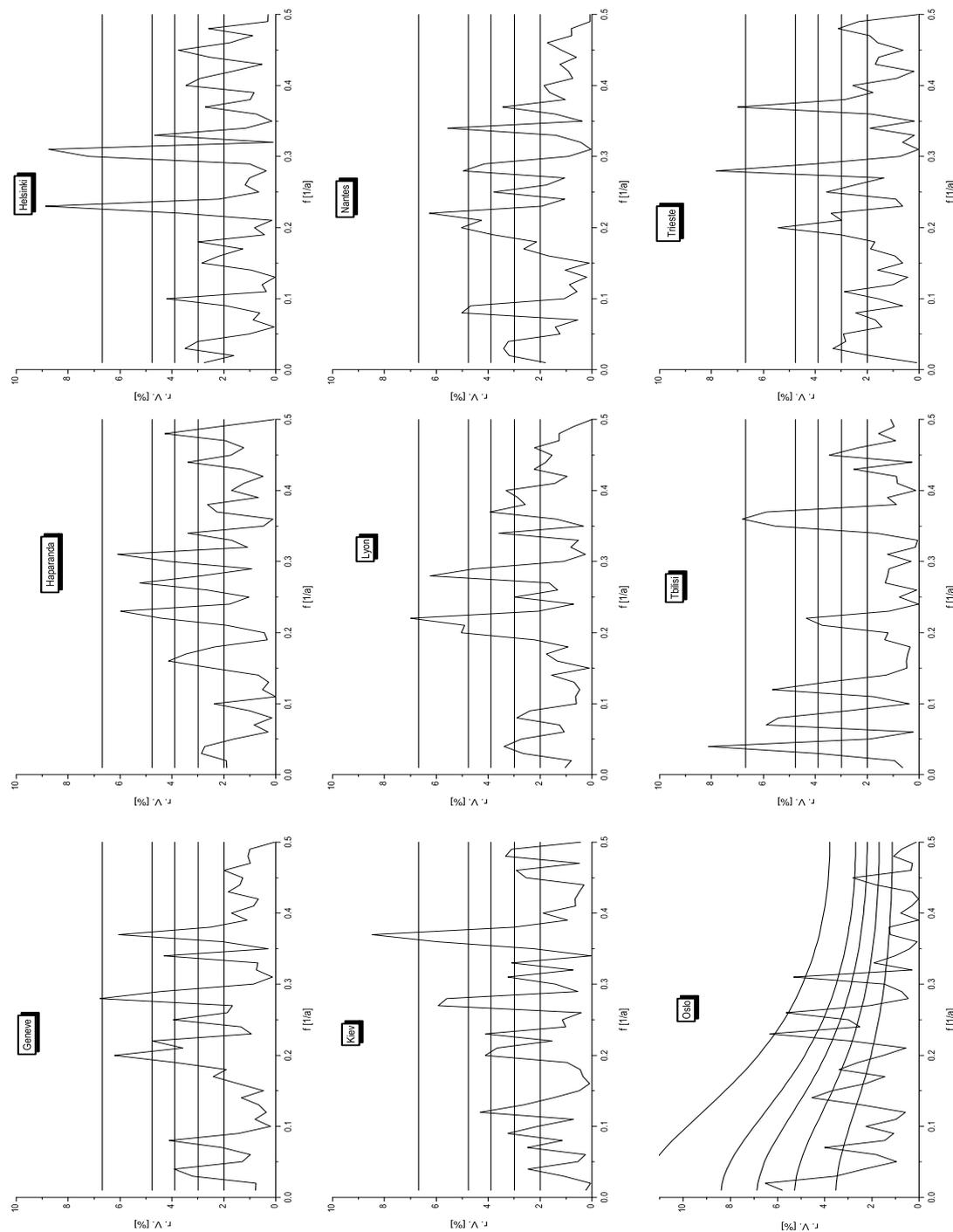


Abbildung 62: *Periodogramm europäischer Zeitreihen des Druckes, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.*

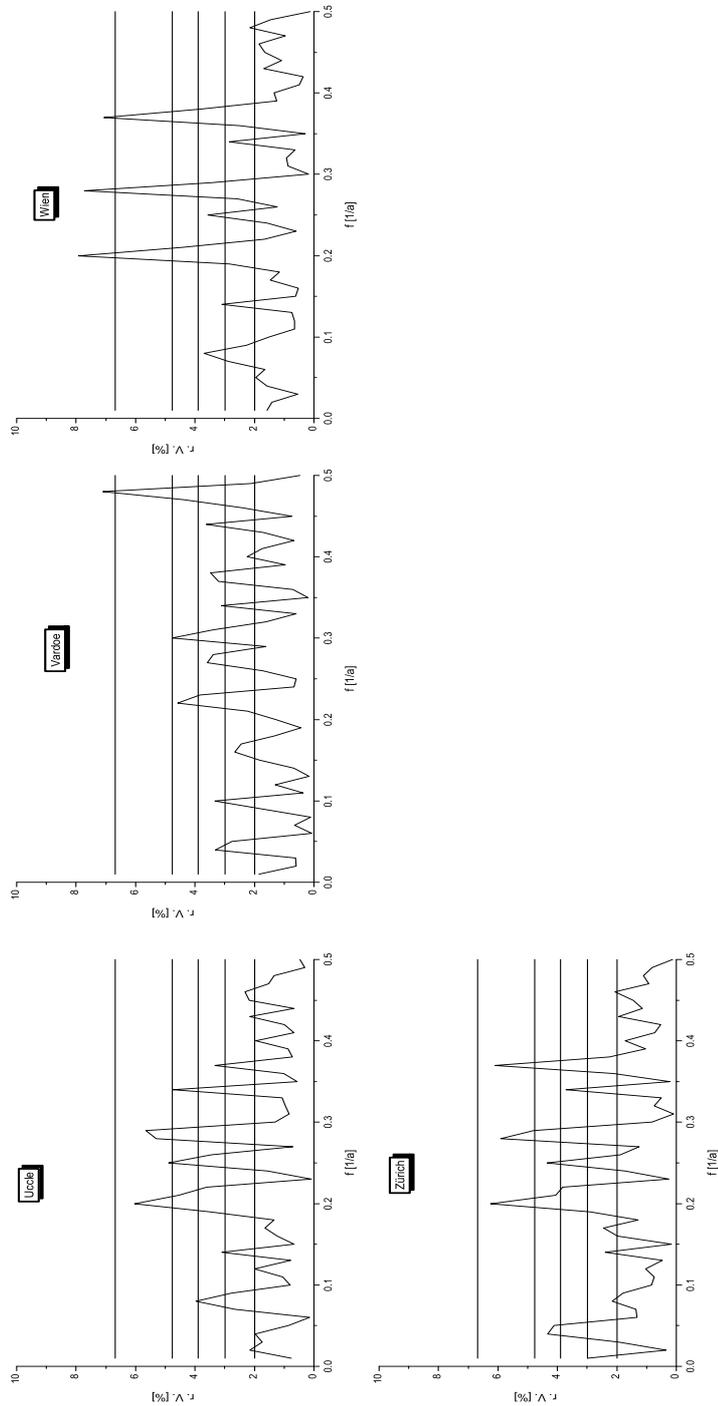


Abbildung 63: *Periodogramm europäischer Zeitreihen des Druckes, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundsspektrum.*

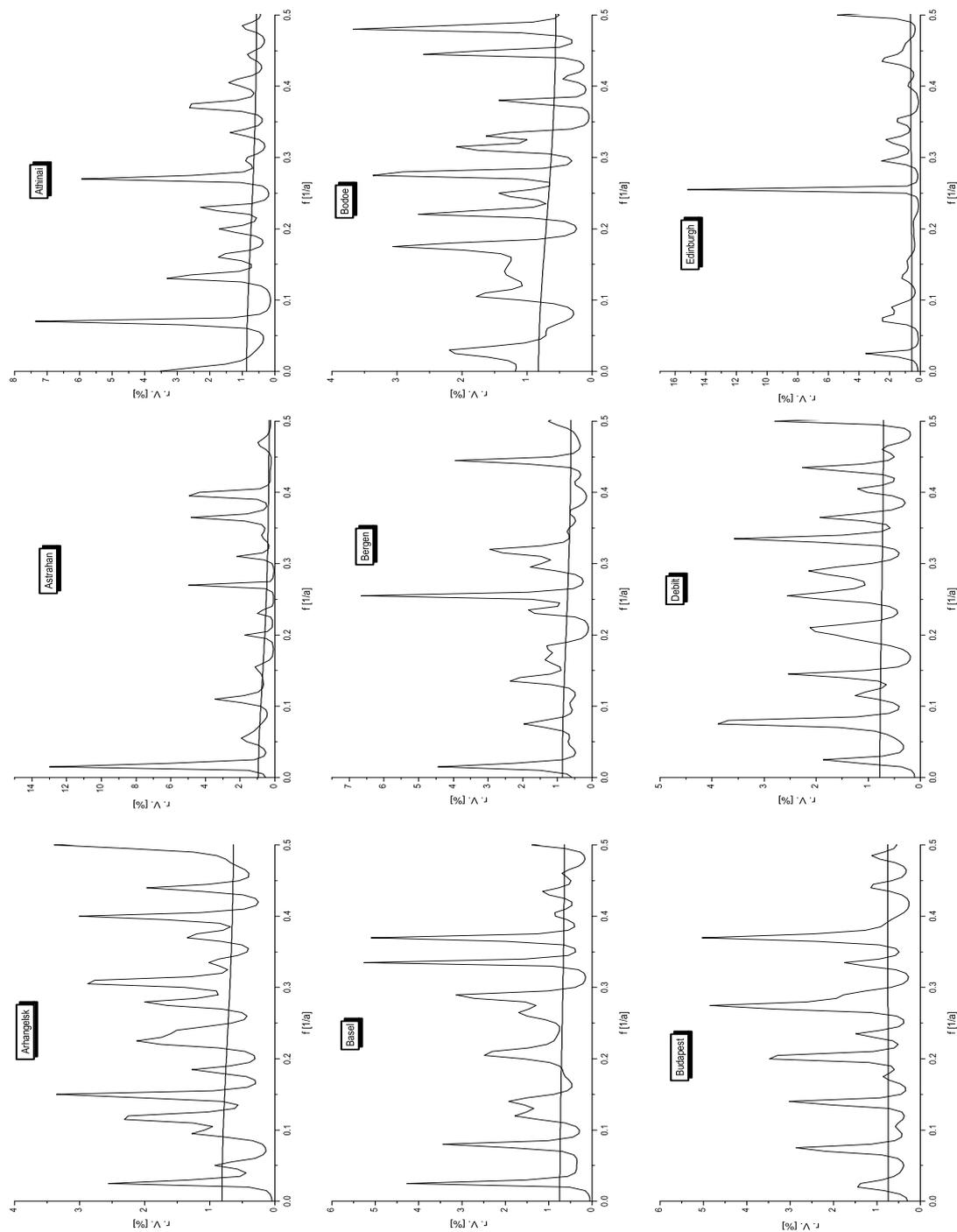


Abbildung 64: MESA europäischer Zeitreihen des Druckes, mit Hintergrundspektrum.

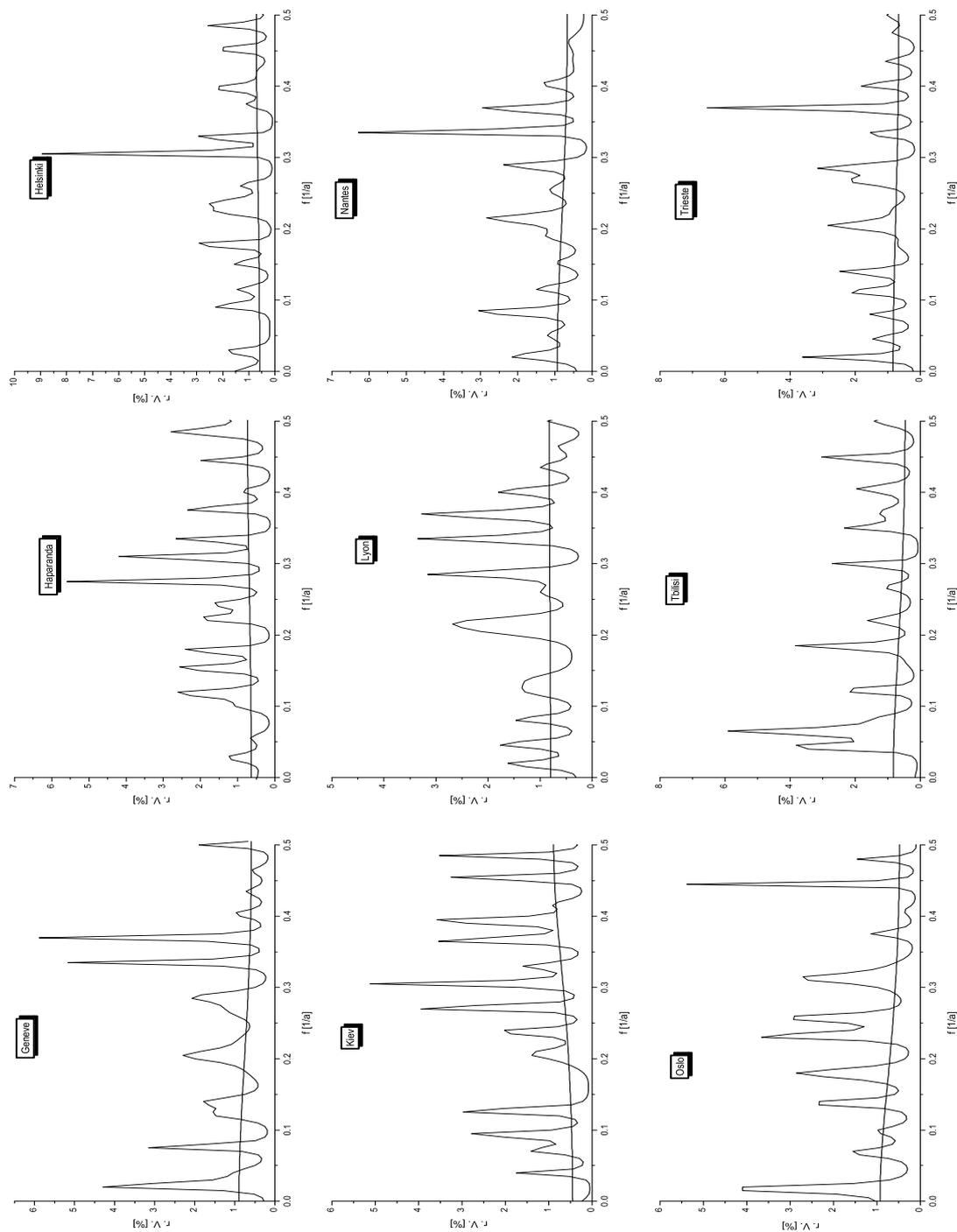


Abbildung 65: MESA europäischer Zeitreihen des Druckes, mit Hintergrundspektrum.

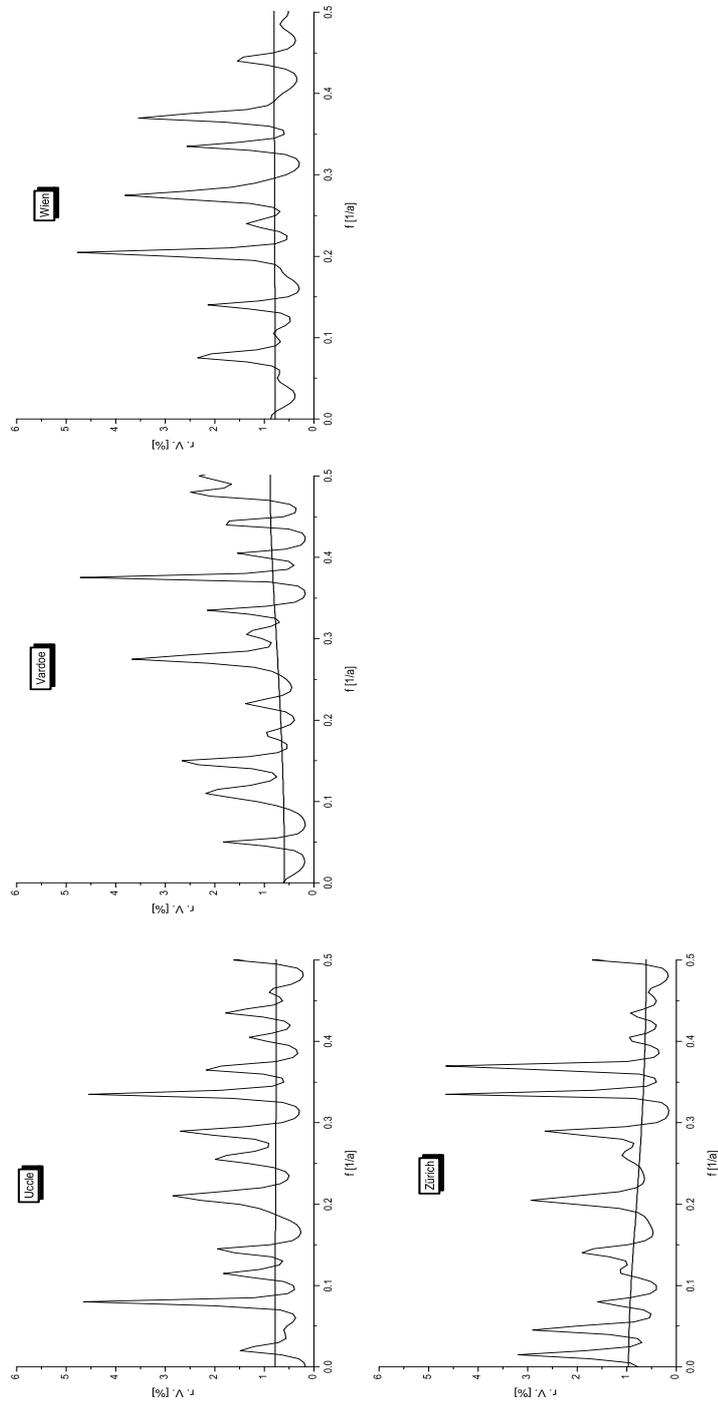


Abbildung 66: MESA europäischer Zeitreihen des Druckes, mit Hintergrundspektrum.

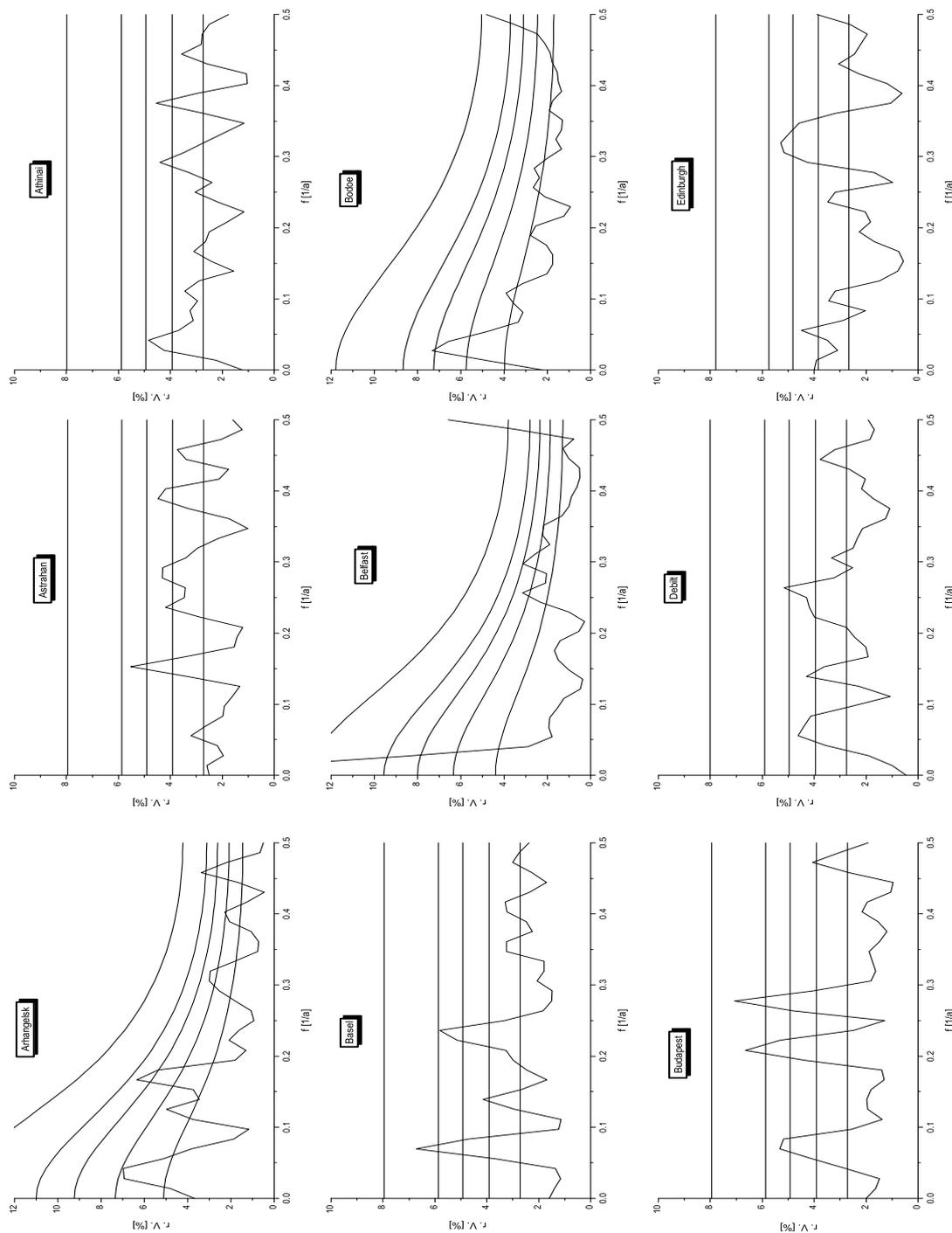


Abbildung 67: ASA europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.

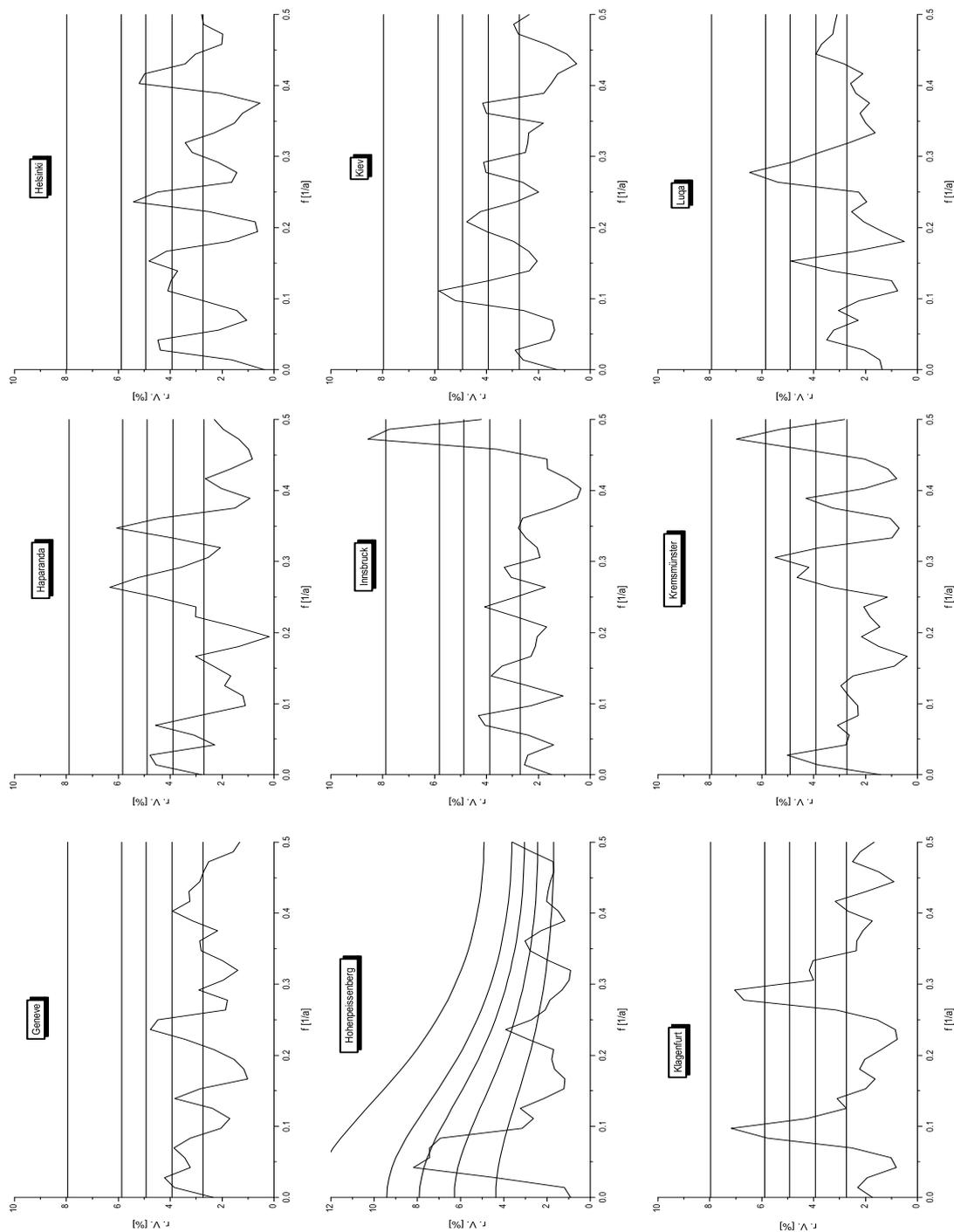


Abbildung 68: ASA europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.

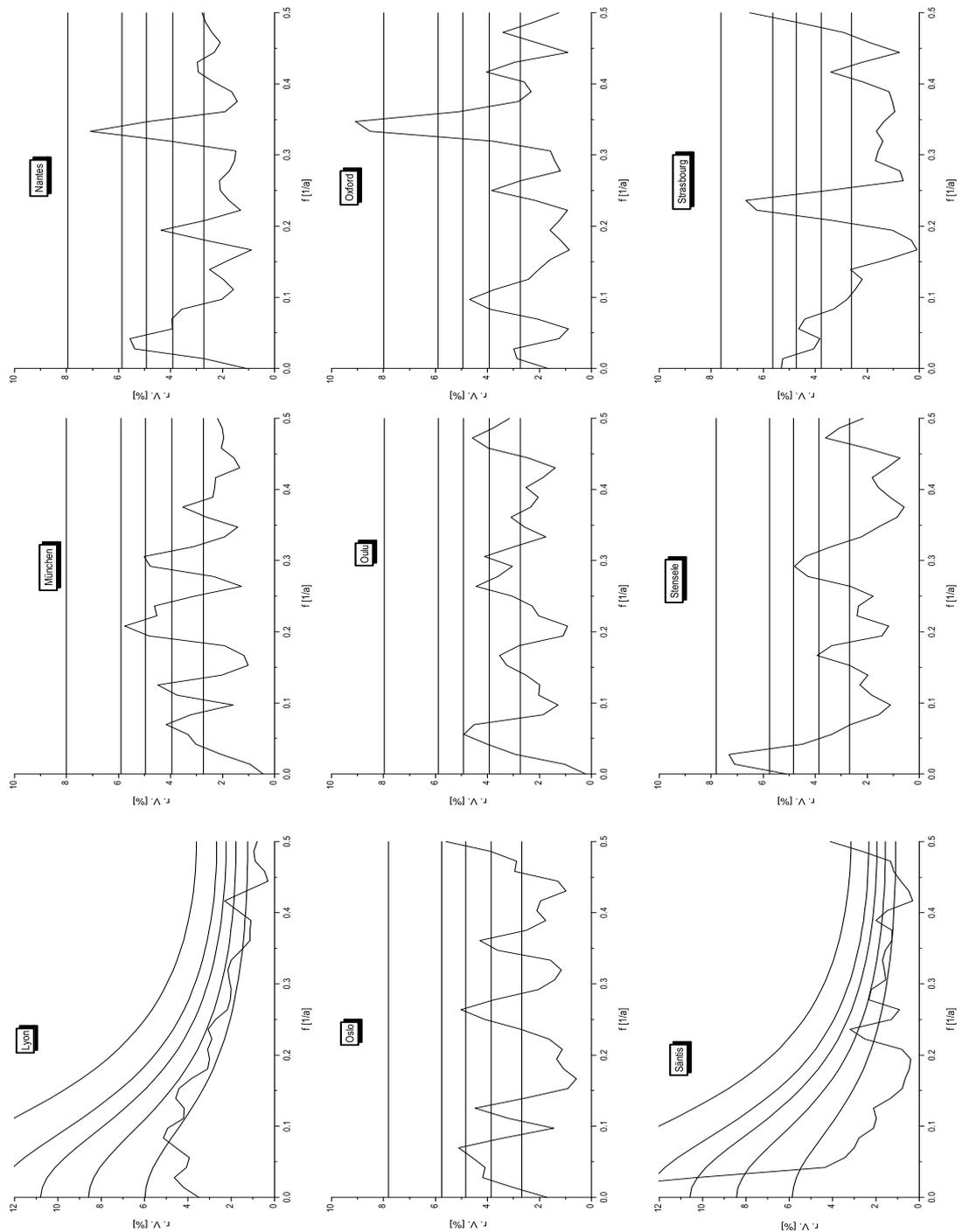


Abbildung 69: ASA europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.

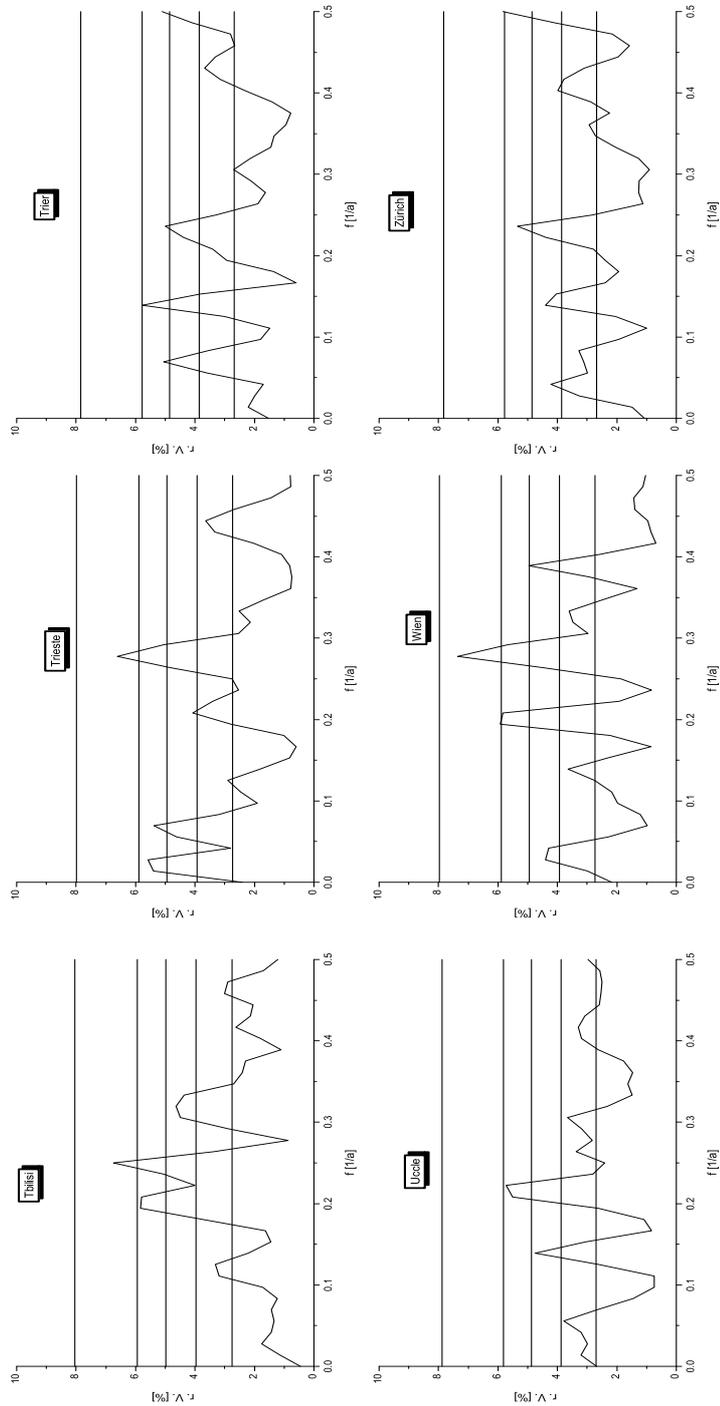


Abbildung 70: ASA europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.

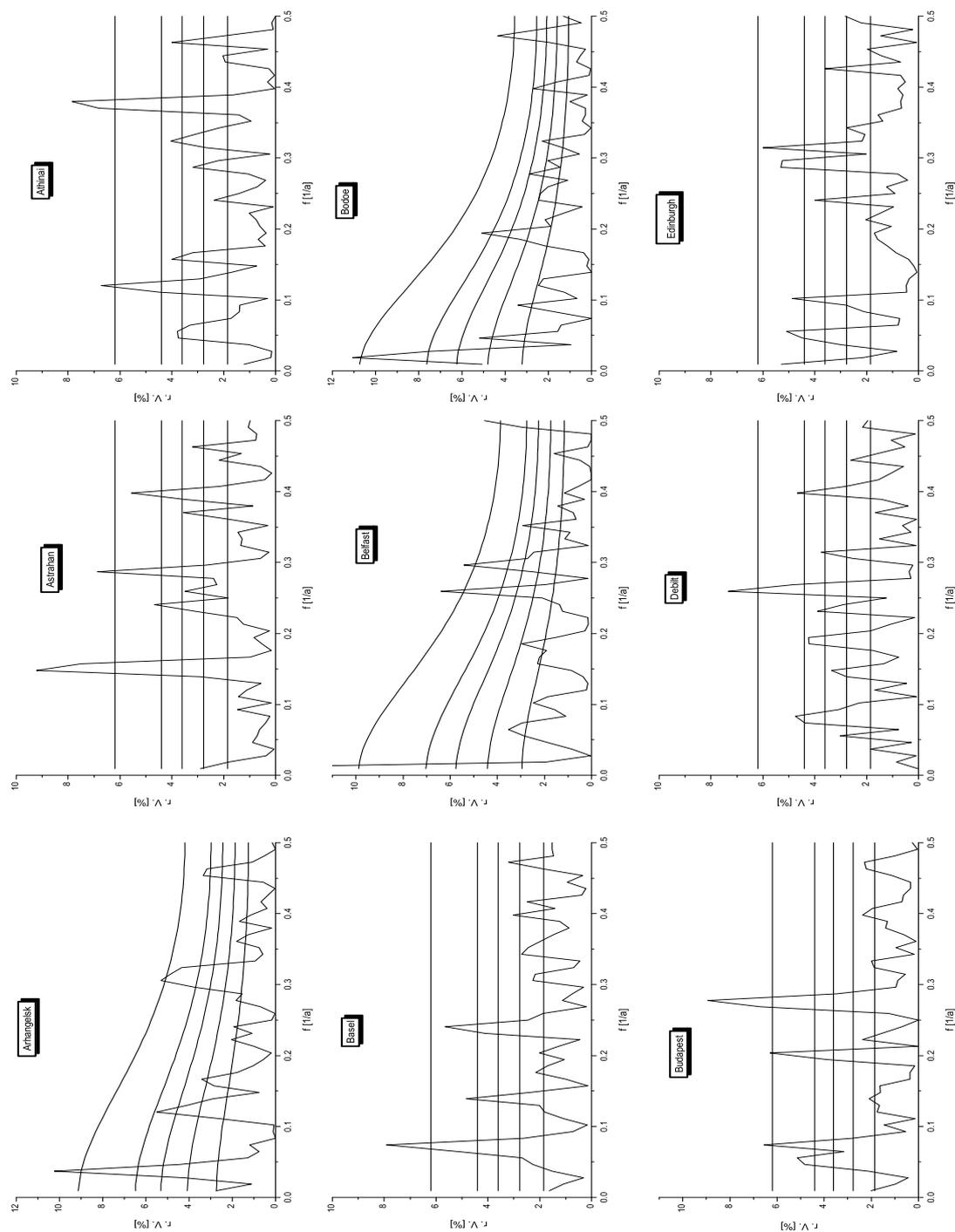


Abbildung 71: *Periodogramm europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.*

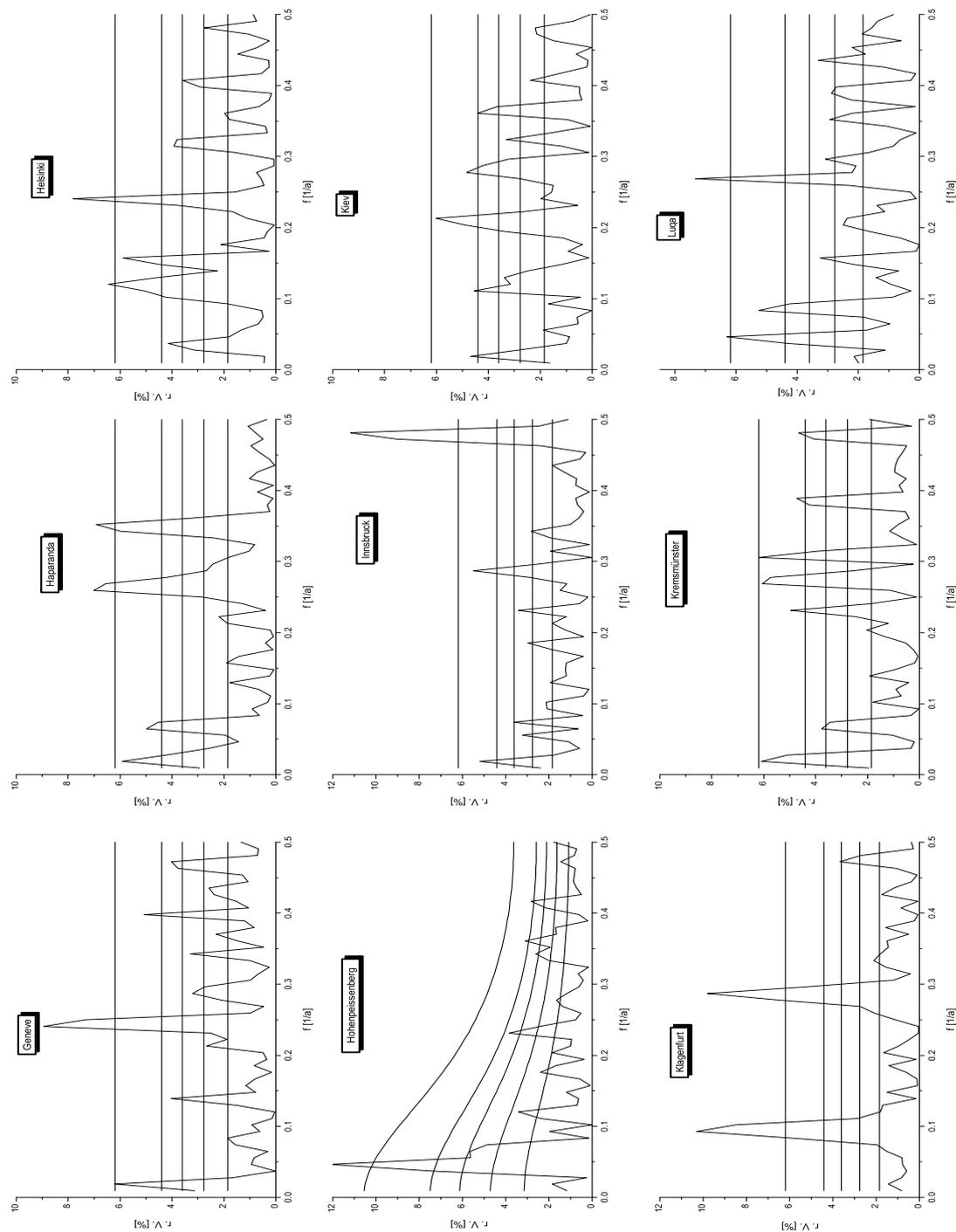


Abbildung 72: Periodogramm europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.

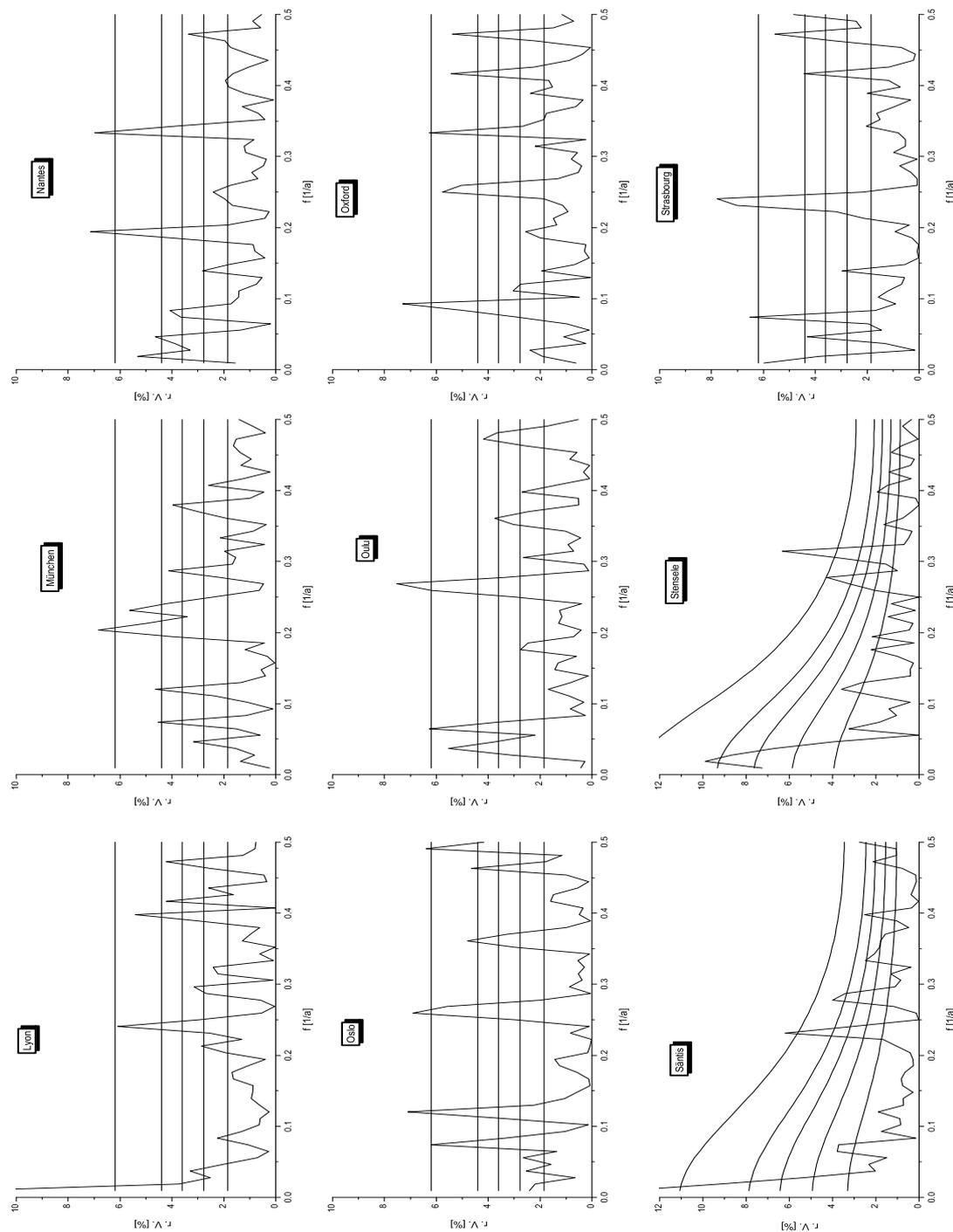


Abbildung 73: Periodogramm europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.

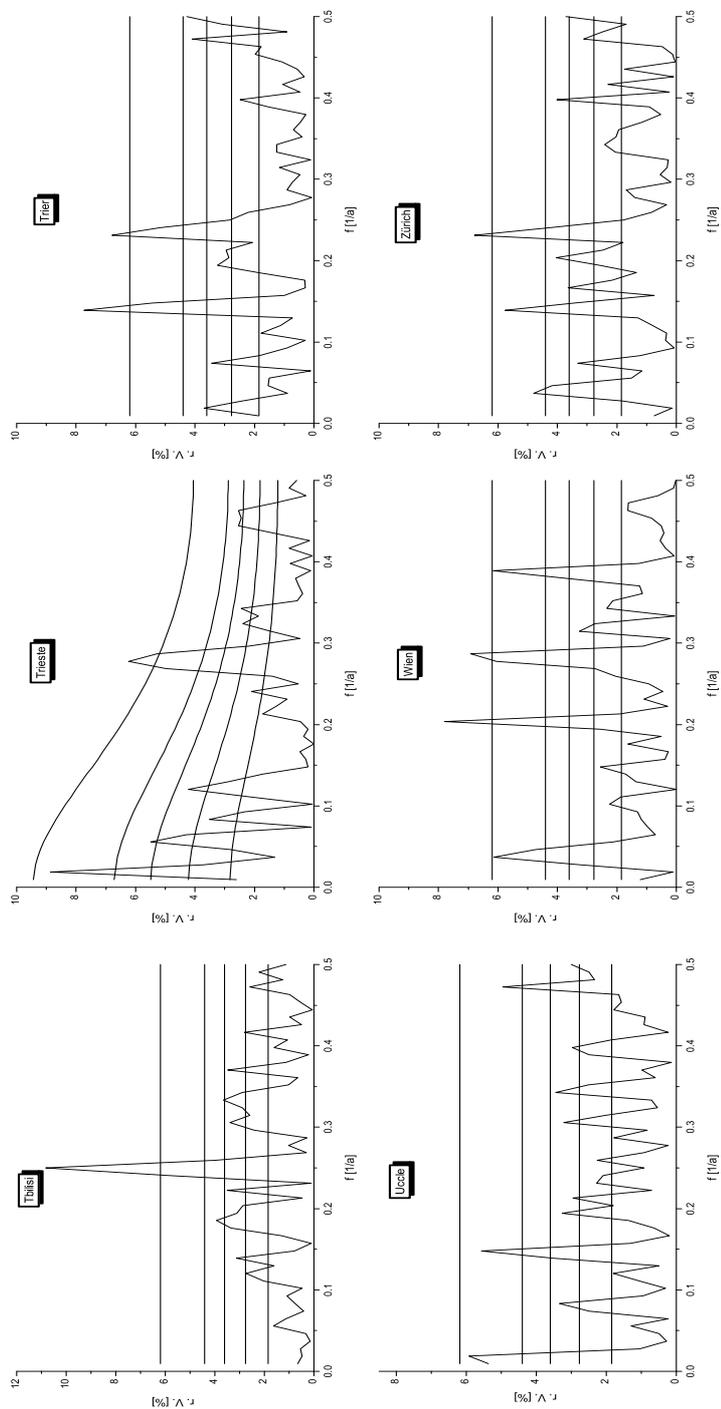


Abbildung 74: *Periodogramm europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit den Vertrauensbereichen 99%, 95%, 90%, 80% sowie rotem oder weißem Hintergrundspektrum.*

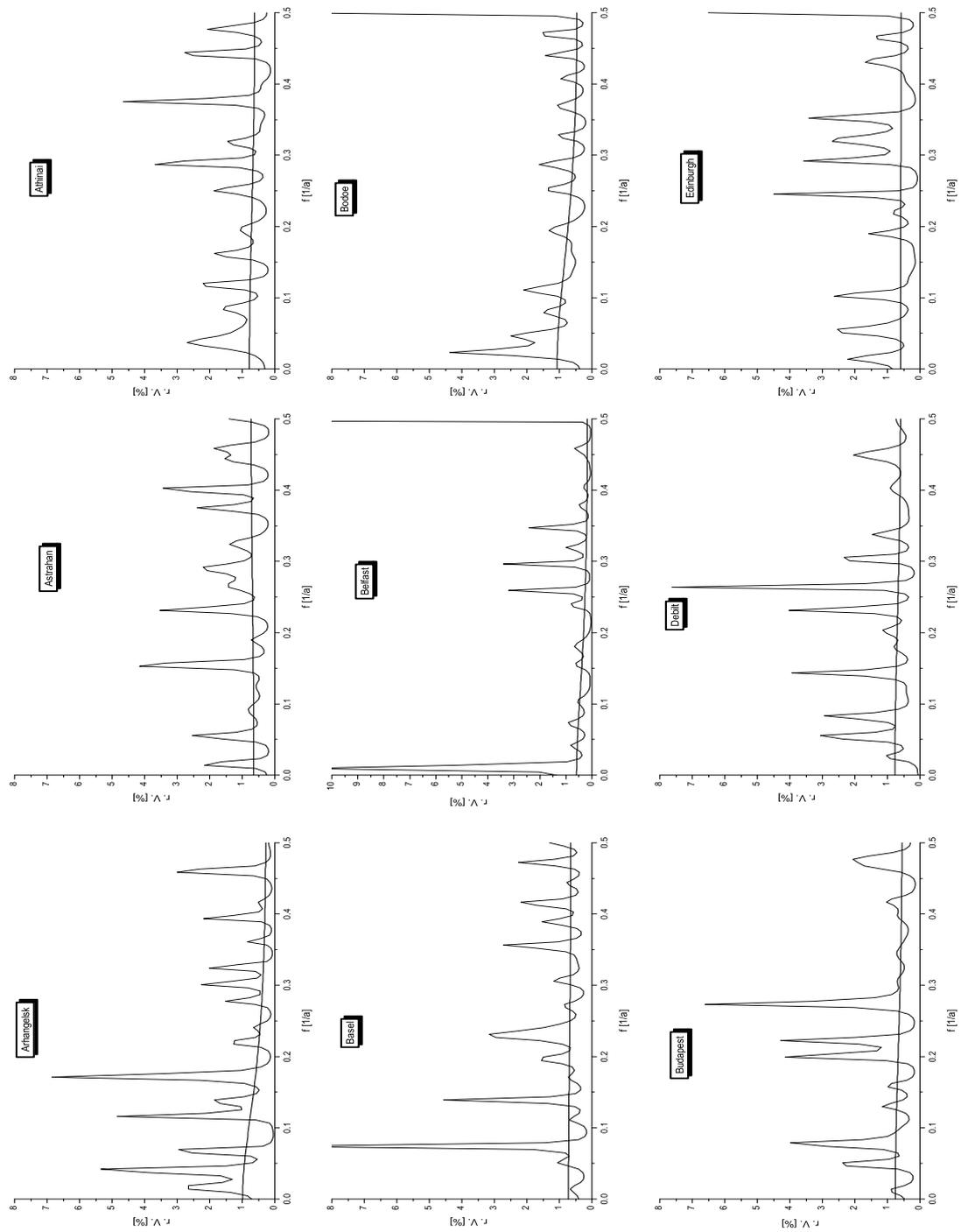


Abbildung 75: MESA europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit Hintergrundspektrum.

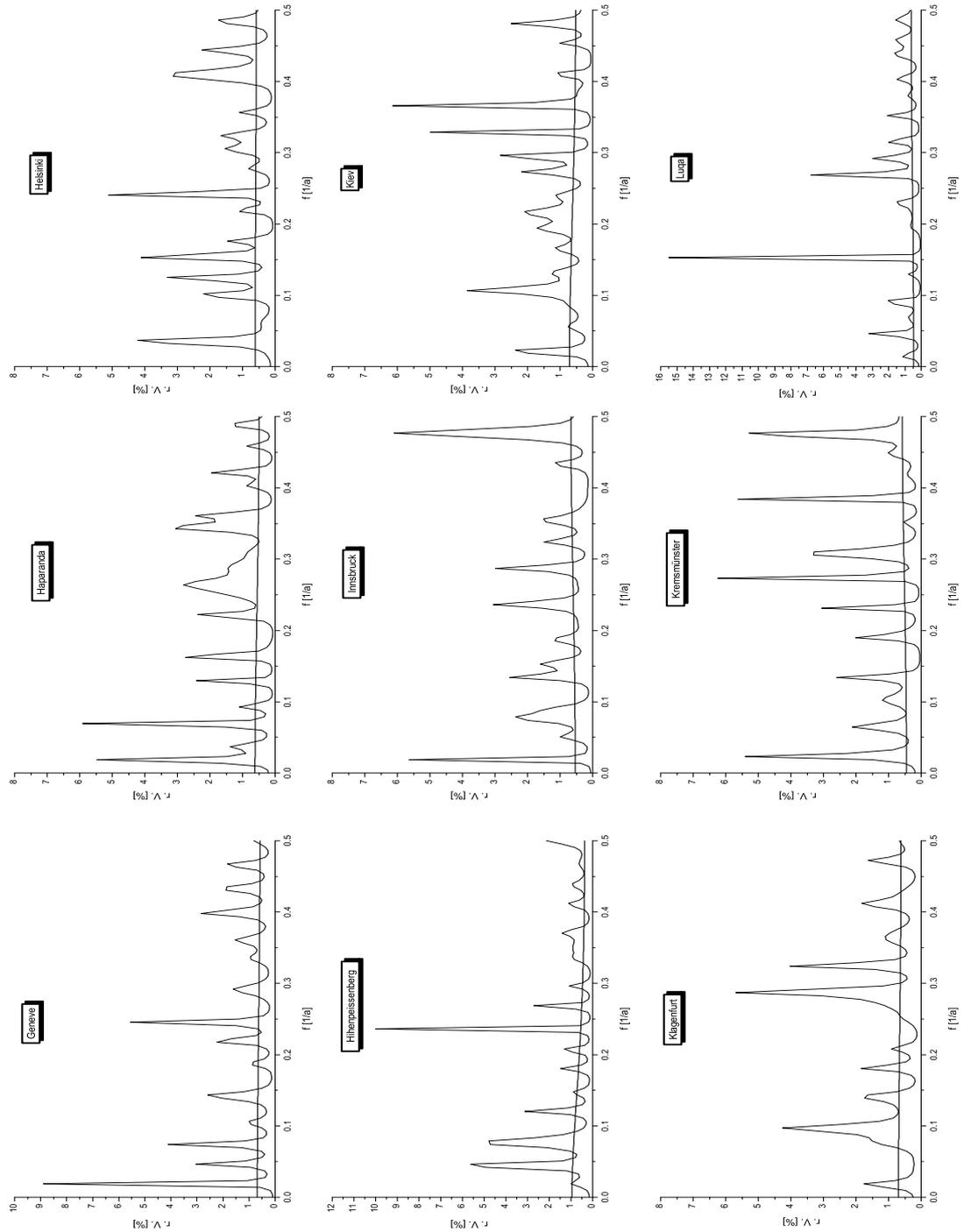


Abbildung 76: MESA europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit Hintergrundspektrum.

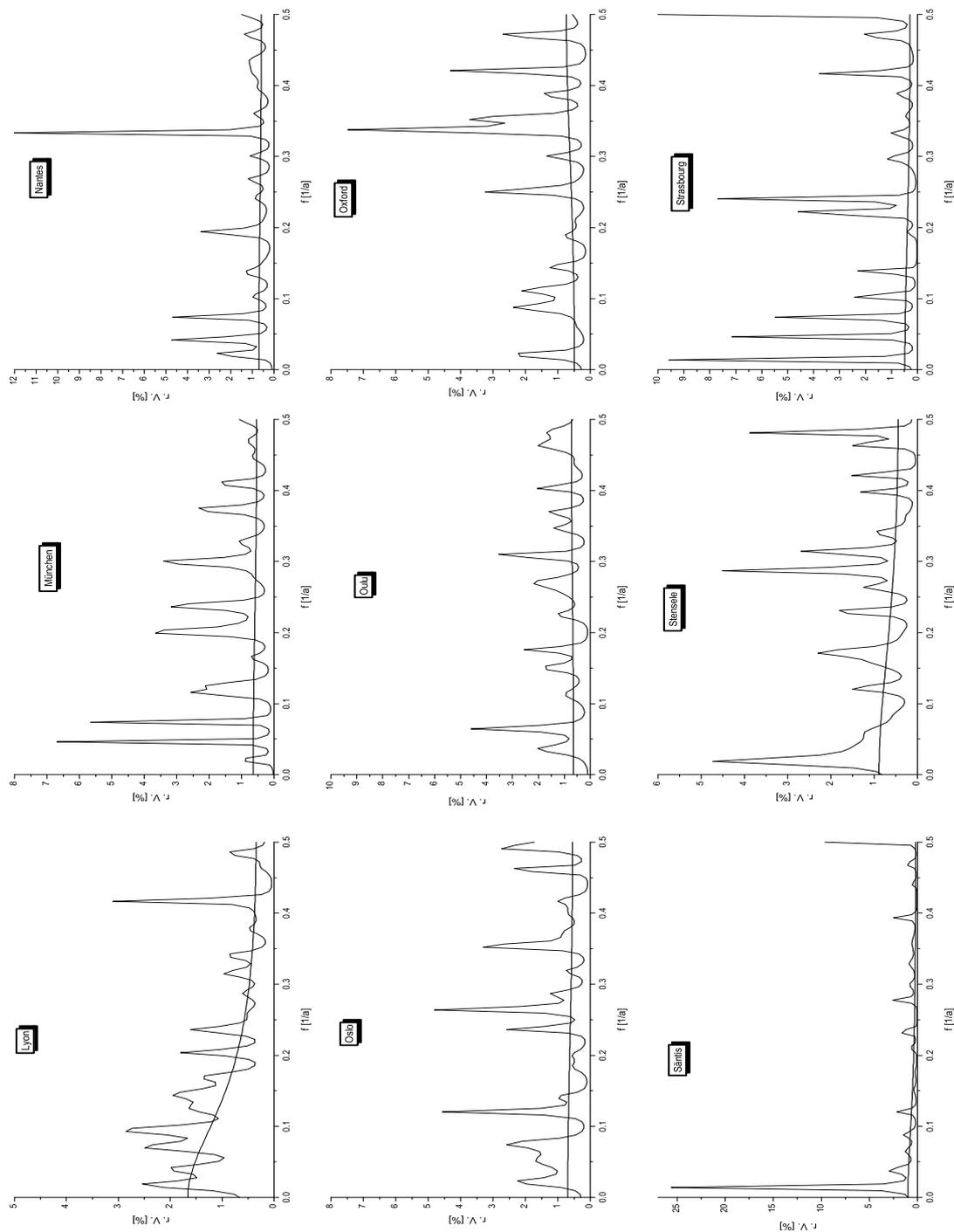


Abbildung 77: MESA europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit Hintergrundspektrum.

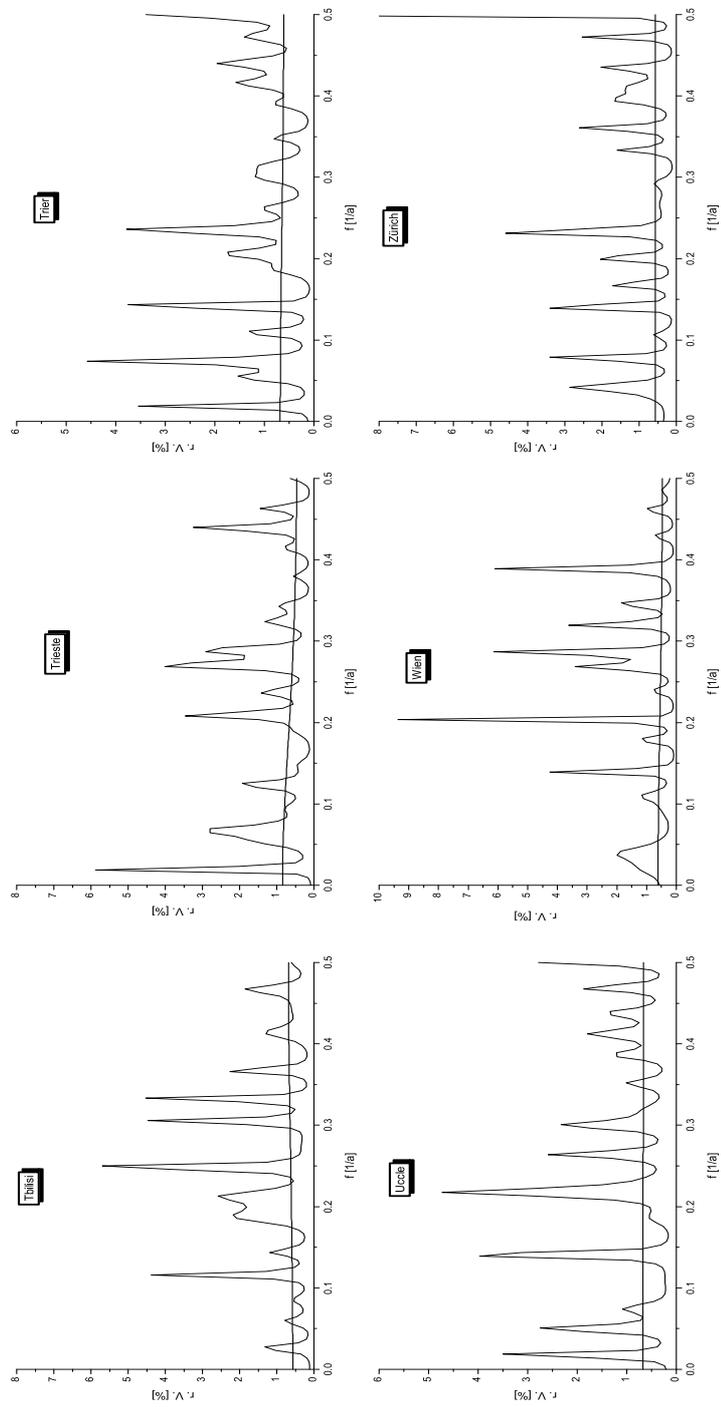


Abbildung 78: MESA europäischer Zeitreihen des Niederschlags, mit Hintergrundspektrum.

A.3 Spektren der Zeitreihen der Gitterpunktsdaten

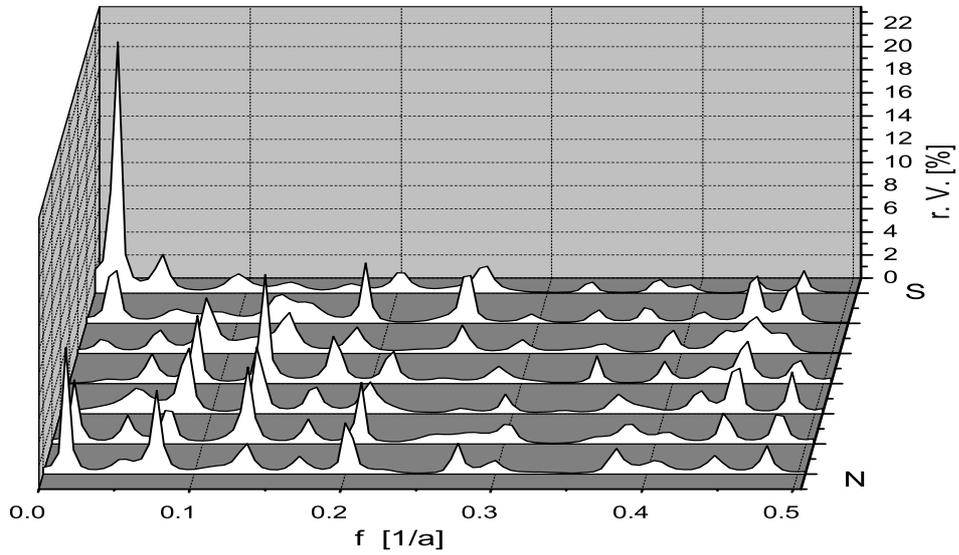


Abbildung 79: MESA europäischer Gitterpunktsdaten der Temperatur geordnet von N nach S.

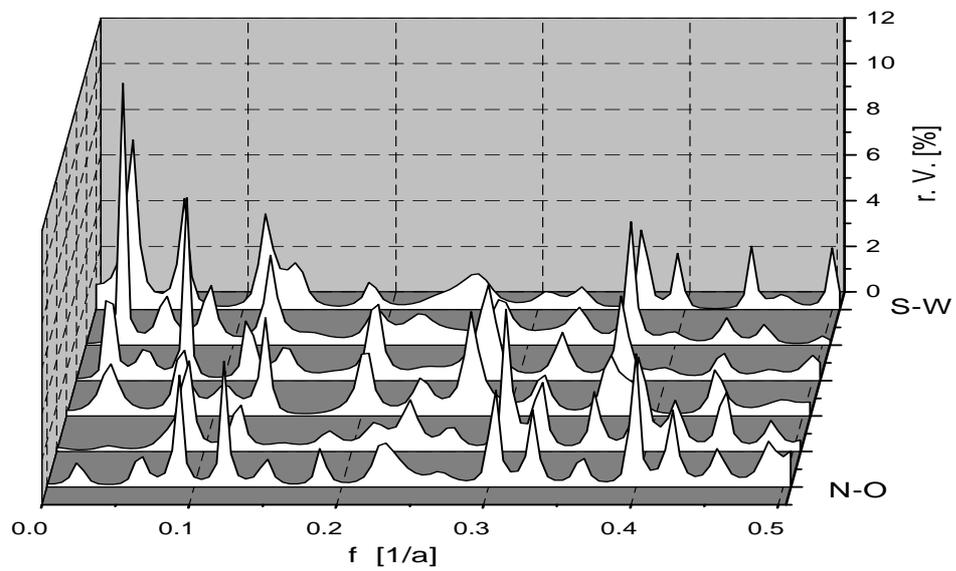


Abbildung 80: MESA europäischer Gitterpunktsdaten des Drucks geordnet von NO nach SW.

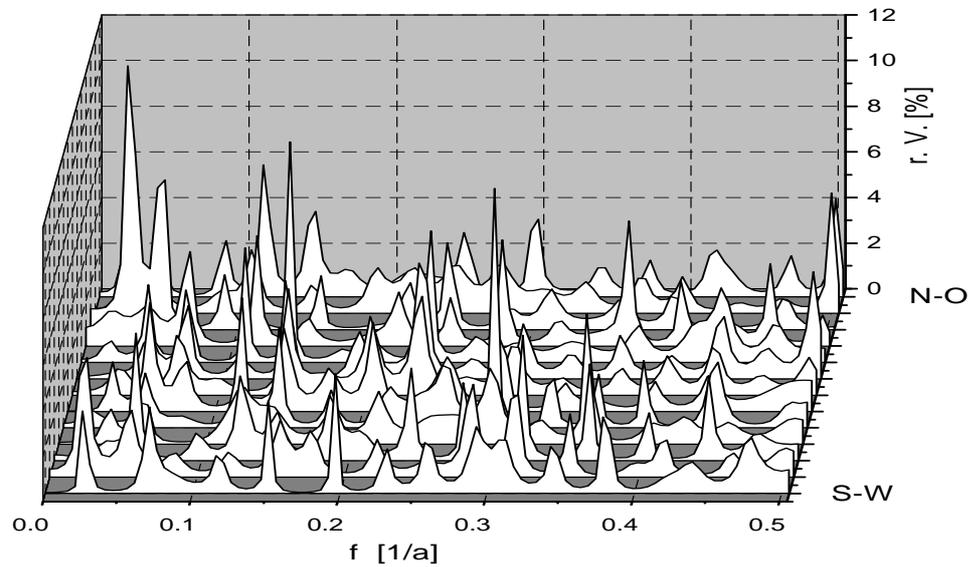


Abbildung 81: *MESA* europäischer Gitterpunktsdaten des Niederschlags geordnet von *NO* nach *SW*.

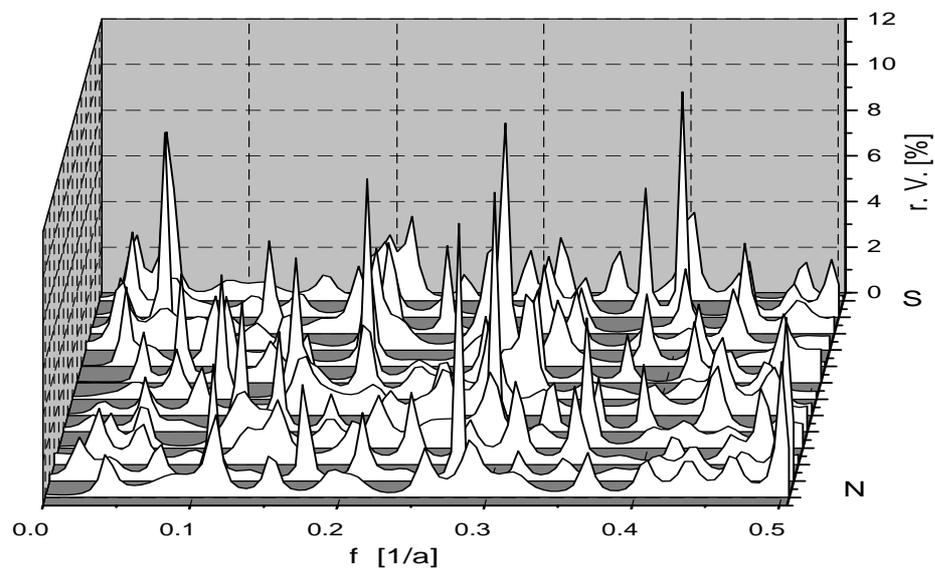


Abbildung 82: *MESA* europäischer Gitterpunktsdaten des Niederschlags geordnet von *N* nach *S*.