

Erzeugen Infraschallquellen den Brummtton?

L. Ceranna, M. Henger und U. Hunfeld
Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
Stilleweg 2, 30655 Hannover

Zusammenfassung

In der Zeit vom 13.-16. Mai 2002 wurde anhand von Messungen nordwestlich von Blaubeuren (Baden-Württemberg) mit vier mobilen Infraschall-Registriersystemen versucht festzustellen, ob der vorwiegend von Betroffenen in Süddeutschland wahrgenommene Brummtton durch Infraschall erklärt werden kann. Die Auswertung der Messdaten legt jedoch die Vermutung nahe, dass der Brummtton nicht durch Infraschallquellen erzeugt wird, sondern auf andere Ursachen zurückgeführt werden muss. Diese Schlussfolgerung ergibt sich aus mehreren Gründen: Die aufgenommenen Infraschallsignale zeigen eine Variabilität, die von den Betroffenen nicht wahrgenommen wird. Die Amplituden verschiedener monochromatischer Signale unterschiedlicher Frequenz, deren Ankunftsrichtung eindeutig bestimmt werden konnte, liegen deutlich unterhalb der nachgewiesenen Wahrnehmungsschwelle. Zudem haben diese Signale, die mit hoher Wahrscheinlichkeit durch künstliche Quellen erzeugt werden, eine vom Brummtton völlig verschiedene Signatur. Eine mögliche selektive Wahrnehmung bestimmter monochromatischer Signale erscheint sehr unwahrscheinlich, da die Betroffenen am Standort der fest installierten Infraschall-Messanlage I26DE im Bayerischen Wald bei Bischofsreut den Brummtton besonders stark wahrnahmen, ohne dass derartige monochromatische Signalanteile im Spektrum enthalten waren. Auch wenn sich die Erwartungen der vom Brummtton Betroffenen an die Infraschallmessungen damit nicht erfüllt haben, so lässt sich aufgrund der Ergebnisse die Ursachenforschung des Brummttons weiter eingrenzen. Hinsichtlich der weiteren Zielvorgaben, wie die Charakterisierung der räumlichen Filter zur Unterdrückung des Hintergrundrauschens und die Einsatzmöglichkeiten verschiedener Verfahren zur Richtungsbestimmung monochromatischer und kohärenter transienter Infraschallsignale, sind die Messungen und deren Ergebnisse als Erfolg zu bewerten.

Vorwort

Die Autoren möchten an dieser Stelle darauf hinweisen, dass sich der nachfolgende Beitrag primär an interessierte Leser sowie an vom Brummtton betroffene Personen richtet. Daher wurde versucht, das Messverfahren und die Analyse der Daten möglichst anschaulich darzustellen. Bewusst wurde darauf verzichtet, näher auf die mathematischen Grundlagen der verwendeten Analyseverfahren einzugehen und die Messergebnisse in der für wissenschaftliche Veröffentlichungen gewohnten Ausführlichkeit zu diskutieren. Die hier gewählte vereinfachte und hoffentlich auch verständliche Form der Darstellung eines wissenschaftlichen Berichts gleichen Titels hat jedoch keinen Einfluss auf die Ergebnisse und Aussagen dieser Untersuchung.

Einführung

Seit etwa zwei Jahren wird in Medien immer wieder über das Phänomen des Brummtons berichtet. Nach Aussagen betroffener Personen handelt es sich dabei um ein niederfrequentes Geräusch mit Schwebungscharakter im Bereich von etwa 70 Hz. Dieses Geräusch wird von den Betroffenen abhängig von den Umgebungsgeräuschen mehr oder weniger stark wahrgenommen und verfolgt sie ständig. Alle Versuche, diesem Phänomen auf die Spur zu kommen und den Brummtton durch physikalische Vorgänge zu erklären oder einer definierten natürlichen oder künstlichen Quelle zuzuordnen, sind bisher gescheitert. Dies hat dazu geführt, dass über die Ursache des Brummtons die verschiedensten Spekulationen angestellt wurden, die von realistisch bis utopisch reichen.

Eine Vermutung, die in jüngster Vergangenheit immer wieder diskutiert wird, betrifft den Zusammenhang zwischen dem Brummtton und Infraschallsignalen, nachdem Untersuchungen mit Mikrofonen im hörbaren Bereich nicht zum Erfolg geführt haben. Als Infraschall werden Signale bezeichnet deren Frequenzen unterhalb des hörbaren Bereichs liegen (< 20 Hz). Obwohl die Frequenz des Brummtons nicht im Infraschallbereich liegt, ist nicht auszuschließen, dass niederfrequente Schallsignale von den Betroffenen als Brummgeräusch wahrgenommen werden. Auf welche Weise ein Hörempfinden dieses störenden Tons dabei erfolgt, soll und kann nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sein. Vielmehr interessiert, ob mit Hilfe von Infraschallmessungen an einem Ort, an dem der Brummtton von mehreren Betroffenen gehört wird, Hinweise auf mögliche Infraschallquellen gefunden werden können. Das Hauptaugenmerk gilt daher dem Auffinden von Signalen mit nahezu konstanten Frequenzen, sogenannter monochromatischer Signale, die Merkmale aufweisen, die auch für den Brummtton charakteristisch sind und deren Quelle örtlich stationär ist.

Am leichtesten wäre ein derartiger Nachweis zu führen, wenn während der Messungen Veränderungen der Intensität oder der Frequenz des Brummtons von den Betroffenen wahrgenommen würden. In diesem Fall ließe sich, sofern Infraschallquellen für den Brummtton verantwortlich sind, durch Änderungen des zeitlichen Verhaltens der gemessenen Infraschalldaten ein direkter Zusammenhang feststellen. Ausgehend von diesen Vorstellungen wurde ein Messeinsatz mit vier mobilen Infraschall-Messsystemen mit der Interessengemeinschaft zur **Aufklärung des Brummtons (IGZAB)** im Raum Blaubeuren vereinbart.

Ziele

Neben der Erkundung des Phänomens Brummtton sollten mit den Messungen, für die ein Zeitraum von insgesamt einer Woche angesetzt wurde, noch weitere Ziele verfolgt werden:

- Sammlung von Erfahrungen mit den Mobilstationen im Feldeinsatz, die bei diesen Messungen erstmalig über mehrere Tage erprobt werden sollten.

- Eignungstests unterschiedlich geformter räumlicher Filter hinsichtlich ihrer Fähigkeit das Hintergrundrauschen, welches primär durch Wind oder künstliche Lärmquellen (Verkehr, Maschinen) erzeugt wird, zu reduzieren.
- Lokalisierung von Infraschallquellen durch Kreuzpeilung von gleichzeitig an der fest installierten und von der BGR betriebenen Infraschall-Messanlage I26DE bei Bischofsreut im Bayerischen Wald und den mobilen Infraschallstationen aufgezeichneten Signalen.
- Bewertung der durch die räumlichen Filter erreichten Absenkung des Hintergrundrauschens anhand einer anschließend durchgeführten Vergleichsmessung am I26DE-Standort. Eine Beschreibung dieser Station findet sich unter http://www.seismologie.bgr.de/web/gndc/sta_deu/station.html.

Um die Frage der Erzeugung des Brummtons durch Infraschallquellen klären zu können, war bei den Messungen auf die Einhaltung folgender Voraussetzungen zu achten:

- Der Standort sollte so gewählt sein, dass rundum freie Sicht zum Horizont oberhalb eines Winkels von 20° besteht, um Abschirmungseffekte und Reflexionen der empfangenen Infraschallsignale an Hindernissen wie Gebäuden oder Bergen auszuschließen.
- Die Messungen sollten möglichst bei geringen Windgeschwindigkeiten durchgeführt werden, um den Pegel des durch Wind erzeugten Hintergrundrauschens gering zu halten.
- Am Standort sollte das Brummgeräusch von den Betroffenen wahrgenommen und während der Messungen Änderungen angezeigt und protokolliert werden.

Diesen Anforderungen entsprechend wurde ein Standort nordwestlich von Blaubeuren ausgesucht, der auf dem Ausschnitt der topographischen Karte in Abbildung 1 durch einen Kreis gekennzeichnet ist. Da zum Zeitpunkt der Messungen zwischen dem 13. und 16. Mai Hochdruckwetter herrschte, waren günstige Windverhältnisse mit geringen Windgeschwindigkeiten und entsprechend niedrigem Hintergrundrauschen zu erwarten. Insofern lagen ideale Voraussetzungen vor, um zu klären, ob eine oder mehrere stationäre Infraschallquellen Signale erzeugen, die mit dem von den Betroffenen wahrgenommenen Brummtton korreliert werden können.

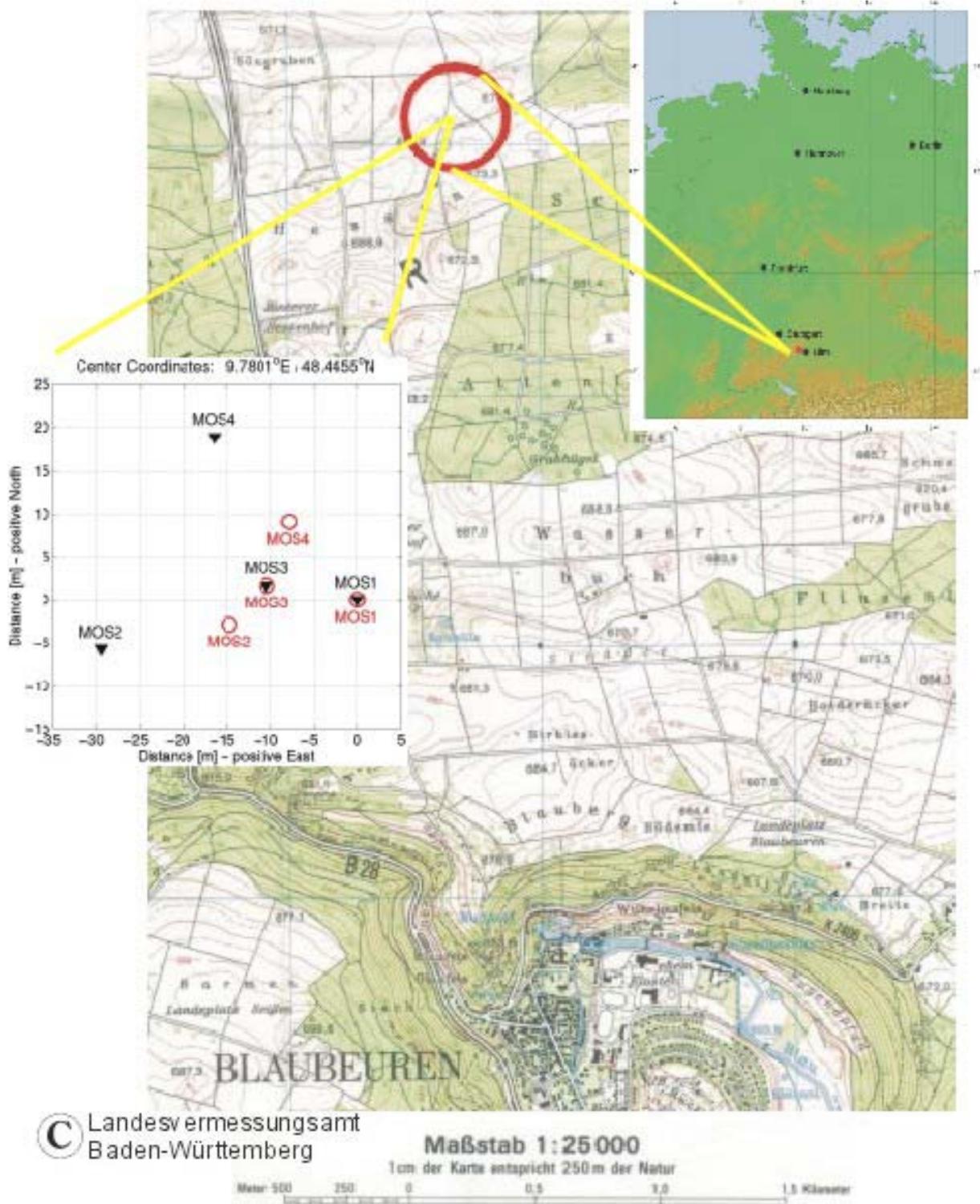


Abbildung 1: Kartenübersicht der Messregion: Der rote Punkt in der topographischen Karte Deutschlands unten rechts markiert die links vergrößerte Region nördlich von Blaubeuren. Der rote Kreis zeigt den ausgewählten Standort für die Messung. Die beiden Dreieckskonfigurationen der Mobilstationen (MOS1-4) sind oben rechts dargestellt.

Mobile Infraschall-Messstationen

Die Messungen wurden mit vier mobilen Registriersystemen durchgeführt. Der Aufbau jeder einzelnen Station ist schematisch in Abbildung 2 dargestellt. Allerdings wurde auf die Datenübertragung mittels Mobiltelefon verzichtet, ebenso wie auf die seismische Parallelregistrierung mit dem GEOTECH SJ13 Seismometer. Aufgrund der räumlich eng begrenzten Messanordnung der vier Mobilstationen (vgl. auch Abb. 1 rechts oben) wurde nur eine Wetterstation (MET-Station) verwendet.

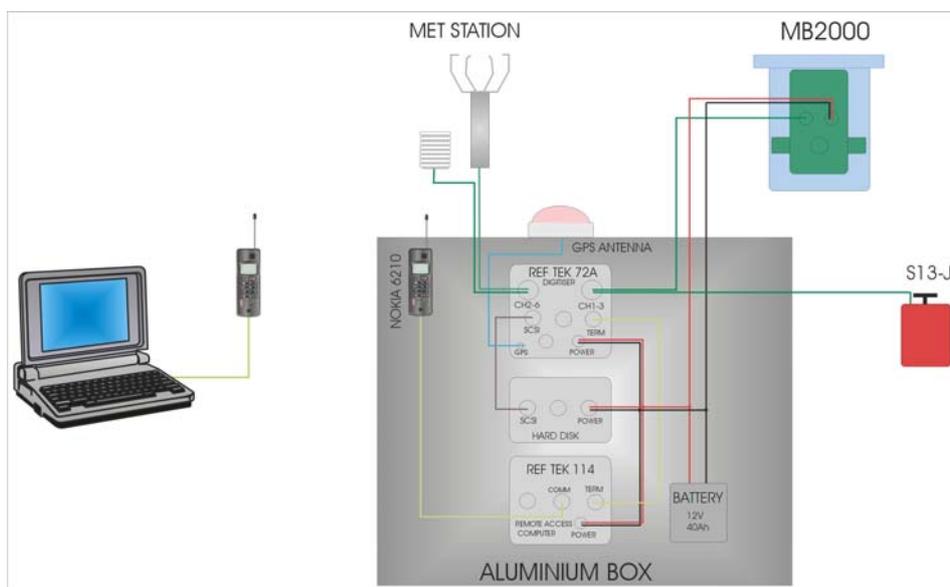


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer mobilen seismo-akustischen Messstation mit einem Mikrobarographen (MB2000) und einem Vertikalseismometer (S13-J) sowie dem Datenerfassungssystem mit einem 24 bit Analog/Digital-Wandler.

Der verwendete Mikrobarograph (Modell MB2000) operiert in einem Frequenzbereich zwischen 0.02 und 27 Hz, wie die Übertragungsfunktion in Abbildung 3 zeigt. Die Empfindlichkeit des Sensors ist sehr hoch, bzw. der kleinste noch auflösbare (Luft)-Druckunterschied ist sehr gering; er liegt bei etwa 0.1 mPa (10^{-4} Pa oder 10^{-9} bar – ein Milliardstel der Luftdrucks!). Dies entspricht nach der barometrischen Höhenformel – sie besagt, dass der Luftdruck mit zunehmender Höhe abnimmt – einer Höhendifferenz von einem Fünzigstel der Dicke eines Blattes Papier. Alle von den Mikrobarographen gelieferten Messdaten wurden mit einer Frequenz von 100 Hz abgetastet, d.h., es wurden 100 Werte pro Sekunde in Form einer kontinuierlichen Zeitreihe aufgezeichnet und auf Festplatte gespeichert. Damit lassen sich Frequenzen bis etwa 40 Hz eindeutig auflösen. Oberhalb 27 Hz nimmt jedoch die

Empfindlichkeit wegen der Frequenzcharakteristik des Mikrobarographen stark ab (vgl. Abbildung 3).

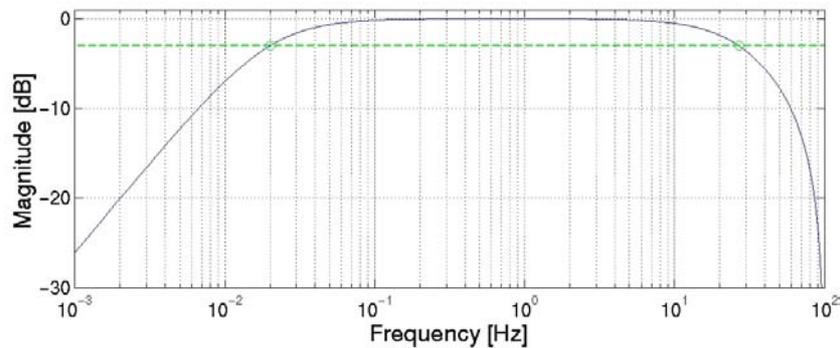


Abbildung 3: Übertragungsfunktion des Mikrobarographen MB2000. Die grüne Linie kennzeichnet den -3 dB Punkt.

Jeder Mikrobarograph verfügt über vier Einlässe zur Messung des Luftdrucks, auf die beispielsweise poröse Gartenschläuche unterschiedlicher Länge gesteckt werden, die auf dem Boden ausgelegt ein räumliches Filter bilden. Durch die flächenhafte Aufnahme des Luftdrucks bzw. der relativen Druckschwankung werden hochfrequente Störsignale vermindert, wie sie z.B. durch Wind oder Verkehr erzeugt werden.

Durchführung der Messungen

Die Messungen fanden in der Zeit vom 13. bis 16. Mai 2002 an dem nordwestlich von Blaubeuren gelegenen Standort statt (siehe Abb. 1). Die Stationen wurden in Form eines unregelmäßigen Dreiecks aufgestellt, wobei die vierte Station innerhalb der Dreiecksanordnung so platziert wurde, dass unterschiedliche Abstände zwischen den einzelnen Stationspaaren bestanden. Durch diese Art der Aufstellung verbessert sich die Richtungs- und Geschwindigkeitsbestimmung von Infraschallsignalen kurzer Wellenlänge. Um Richtungsbestimmungen für Signale mit Frequenzen bis zu 20 Hz (Wellenlänge ca. 15 m) auswerten zu können, wurde nach einem Tag die Apertur der Dreiecksanordnung von 30 m auf 15 m verkleinert. Die Standorte der einzelnen Stationen, die geodätisch eingemessen wurden, sind in Abbildung 1 (rechts oben) dargestellt. Neben der Variation der Auslage wurden unterschiedliche räumliche Filtertypen verwendet, um die Wirkungsweise hinsichtlich der Reduzierung des Hintergrundrauschens bewerten zu können. Die Fotos der Abbildung 4 vermitteln einen Eindruck von dem Messplatz sowie von Aufbau und Anordnung der Mobilstationen (oben links und rechts).

Zunächst wurde eine sternförmige Konfiguration mit vier Schläuchen von jeweils 10 m Länge gewählt. Danach wurde, nach Verkleinerung des Dreiecks auf 15 m Seitenlänge (siehe Abb. 1) mit einem porösen Schlauch ein ringförmiges räumliches Filter mit einem Durchmesser von 1 m gebildet (die übrigen drei Einlässe an dem Mikrobarographen wurden verschlossen). Die Unterschiede der gewählten

räumlichen Filter veranschaulichen die beiden unteren Fotos der Abbildung 4. Die Verkleinerung der Stationsanordnung auf ein Dreieck mit 15 m Seitenlänge erforderte kleinere räumliche Filter, um eine Überlappung der zuerst gewählten sternförmigen, aus 10 m langen porösen Schläuchen bestehenden Filterkonfiguration zu vermeiden.



Abbildung 4: Überblick über das Messgebiet und die eingesetzten mobilen Messgeräte. Oben links: Vorbereitung der in Aluminiumkontainern untergebrachten Datenerfassungssysteme für die Messung. Oben rechts: Blick auf das Messgebiet in Richtung Westen. Unten links: Referenzstation mit Wetterstation und sternförmig angeordneten porösen Schläuchen zur Reduzierung des Windrauschens. Rechts unten: Kleine Dreiecksanordnung der Mobilstationen mit ringförmigen Schläuchen. In den grünen Plastikkeimern befinden sich jeweils die Mikrobarographen.

Tabelle 1: Auflistung der Messdauer mit den verschiedenen großen dreieckigen Stationskonfigurationen.

Messung	von	bis	Auslage
1	14.05.2002 13:30 UT	15.05.2002 14:00 UT	sternförmig (10 m) 4 Einlässe
2	15.05.2002 17:00 UT	16.05.2002 07:30 UT	ringförmig (1 m) 1 Einlass

Auswertung der Messdaten

Grundlegende Annahme bei der Auswertung der Messdaten war, dass, sofern ein Zusammenhang zwischen Brummtton und Infraschallsignalen besteht, der als quasi monoton wahrgenommene Brummtton von stationären Infraschallquellen stammen muss, d.h. von Quellen, die über längere Zeit (mehrere Minuten bis zu einigen Stunden oder Tagen) weitgehend ortsfest sind und Infraschallsignale in einem oder mehreren Frequenzbändern erzeugen. Daher wurde in den kontinuierlichen Aufzeichnungen vorrangig nach Signalen gesucht, die mit nahezu konstanter Frequenz während der Messungen auftraten. Da solche Signale in der Zeitreihendarstellung kaum zu erkennen sind, erfolgt eine Transformation in den Frequenzbereich (Fourier-Transformation). Die sich ergebende spektrale Darstellung gibt Aufschluss über die Stärke der einzelnen Frequenzen zwischen 0 Hz und der halben Abtastrate (hier 50 Hz). Wird diese Frequenztransformation fortlaufend für kürzere Segmente der Zeitreihe durchgeführt und die Stärke bei den einzelnen Frequenzwerten farbcodiert dargestellt, also eine sogenannte Frequenz-Zeit-Analyse (Sonogramm) durchführt, so lassen sich die gesuchten Signale als waagerechte Linien in den Sonogrammen erkennen.

Neben der Frequenz-Zeit-Analyse wird für die Analyse der Messdaten das sogenannte Leistungsdichtespektrum („power spectral density“ PSD) verwendet. Ein derartiges Spektrum gibt an, welche Leistung (proportional zum Quadrat des Schalldrucks) abhängig von der Frequenz in den Daten enthalten ist. Sofern monochromatische Signale in den Aufzeichnungen enthalten sind, werden diese durch deutliche Spitzen in den Kurven sichtbar. Man beachte dabei, dass im Zeitbereich die Amplituden dieser monochromatischen Signale deutlich kleiner sein können als das durchschnittliche Amplitudeniveau des Hintergrundrauschens.

Am 14. Mai zwischen 20:00 und 22:00 (UT) fanden sich mehrere Betroffene am Standort der Messungen ein und nahmen den Brummtton als gleichförmiges Geräusch ohne signifikante Schwankungen wahr. Im Vergleich zum Brummtton in der Stadt Blaubeuren wurde die Lautstärke übereinstimmend als geringer bezeichnet. Die Infraschall-Messdaten in diesem Zeitbereich sind in Abbildung 5 dargestellt. Um einen Überblick über die aufgezeichneten Signale zu gewinnen, wird eine Betrachtung der Summenspur aller vier Registrierungen vorgenommen, wobei lediglich Frequenzen größer als 0.5 Hz berücksichtigt sind. Unterhalb 0.5 Hz, d.h. bei Wellenlängen über 600 m, beginnt der Bereich der sogenannten „microbaroms“. Bei diesen Infraschallsignalen handelt es sich um Wellen, die von Tiefdruckgebieten

erzeugt werden und ein Maximum zwischen 0.15 Hz und 0.25 Hz aufweisen. Die Richtung dieser Wellen verändert sich nur langsam entsprechend der Wanderungsgeschwindigkeit der Tiefdruckgebiete. Ohne Eliminierung dieser tiefen Frequenzen mit einem Hochpassfilter würden die Spektren von den „microbaroms“ dominiert und die uns interessierenden Signale wären in den Sonogrammen nicht mehr oder kaum noch zu erkennen. Da ausgeschlossen werden kann, dass diese sehr langen Infraschallwellen natürlichen Ursprungs mit dem Brummtönen im Zusammenhang stehen, wird das Hauptaugenmerk auf den Frequenzbereich zwischen 0.5 Hz und 27 Hz gelegt.

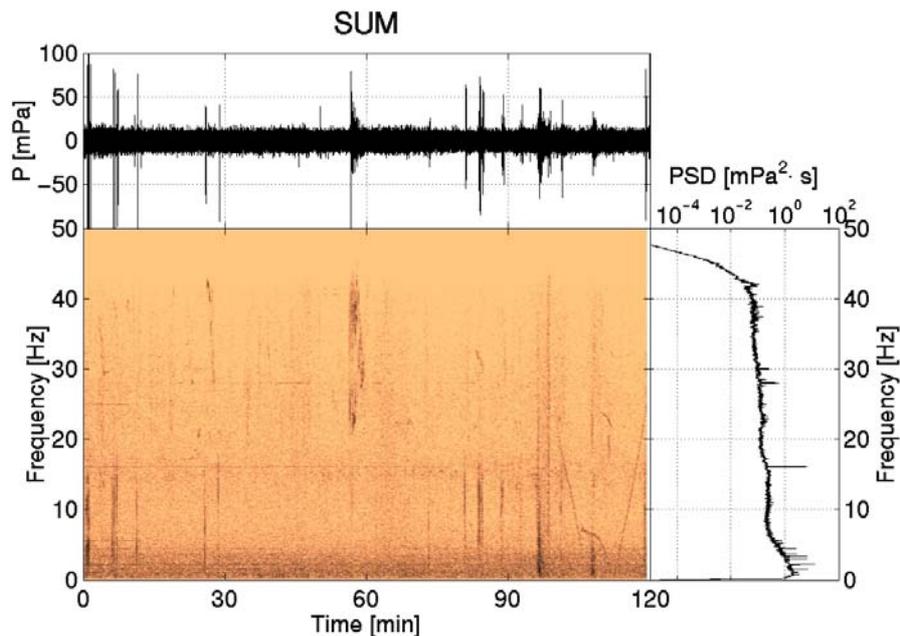


Abbildung 5: Darstellung der direkten Summe aller vier Messstationen für den Zeitraum zwischen 20:00 und 22:00 UT am 14. Mai 2002 im Amplitudenbereich von -0.1 bis 0.1 Pa sowie des zugehörigen Sonogramms und des Leistungsdichtespektrums.

Abbildung 5 zeigt in dem Frequenzband 0.5 Hz – 50 Hz mehrere monochromatische Signale, die anhand der waagerechten Linien in der Frequenz-Zeit-Analyse bzw. einer Spitze in der PSD-Kurve (rechts) zu erkennen sind. Neben verschiedenen, eng beieinander liegenden Bändern im Frequenzbereich zwischen 1 und 6 Hz ist die Linie bei 16.7 Hz besonders signifikant, zumal sie nach circa 75 Minuten abrupt endet. Es dürfte sich hierbei um die Netzfrequenz des deutschen Bahnnetzes (16 2/3 Hz) handeln. Die Quellen der übrigen Frequenzen lassen sich jedoch nicht so einfach erklären.

Die größeren Amplituden in der Zeitreihendarstellung in Abbildung 5 (oben), die durch kurzzeitige (transiente) Druckschwankungen hervorgerufen werden, spiegeln sich im Sonogramm als senkrechte Linien wider. In diesem Fall erstreckt sich das Signal nur über einen kurzen Zeitraum, verfügt aber über eine große Bandbreite.

Einen Höreindruck der in Abbildung 5 dargestellten Summationsspur vermittelt die Datei IS_SUM_020514_20.wav. Die aufgezeichneten Daten wurden entsprechend umformatiert und um den Faktor 64 in den hörbaren Bereich hochtransformiert. Aus der unteren Grenzfrequenz von 0.5 Hz werden damit 32 Hz. Entsprechend wird die durch die Abtastrate vorgegebene obere Grenzfrequenz von 50 Hz auf 3200 Hz transformiert. Aus der Hörprobe wird deutlich, dass es sich bei Infraschall weniger um ein monotones, dem Brummtton ähnliches Geräusch handelt, als vielmehr um ein polyphones Geräusch, das am ehesten mit dem Wort Kakophonie charakterisiert werden kann. Hier sei darauf hingewiesen, dass mit dem Programm **GoldWave Digital Audio Editor** (eine Demonstrationsversion ist unter der Internetadresse <http://www.goldwave.com> erhältlich) die Signale verschieden schnell abgespielt und mit verschiedenen Filtern bearbeitet werden können.

Wie sich die Daten einer einzelnen Station vom Klang der summierten Tonspur unterscheiden, wird durch Anhörung der Datei IS_MOS1_020514_20.wav deutlich. Auch in diesem Fall stimmen die Schilderungen der Betroffenen über den Brummtton mit dem Höreindruck nicht überein. Die deutlichen Frequenzänderungen, die zweifellos in dem Sonogramm der Infraschallaufzeichnung sichtbar und in den WAV-Dateien hörbar sind, wurden von keinem der Betroffenen während der Messungen wahrgenommen.

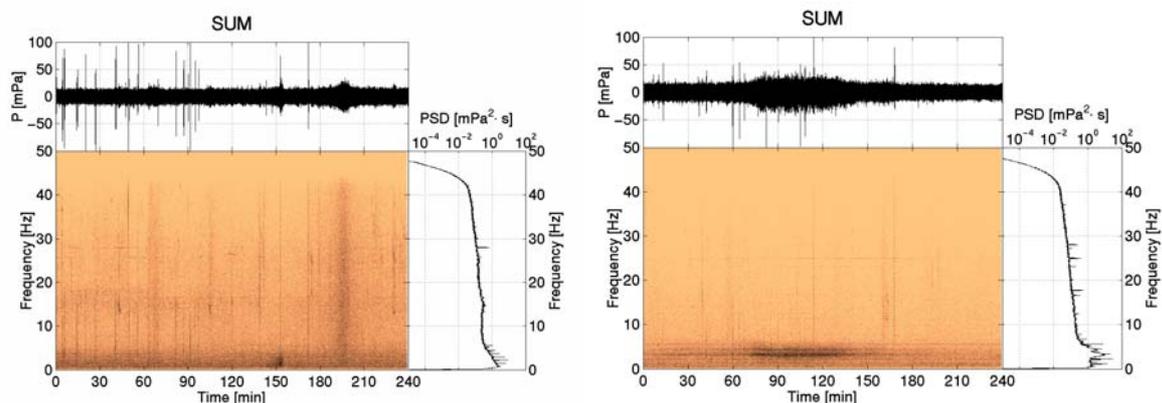


Abbildung 6: Darstellung analog zu Abb. 5 für den Zeitraum zwischen 22:00 und 02:00 UT. Links: 14./15. Mai 2002; rechts: 15./16. Mai 2002.

Allein dieses Ergebnis schließt einen Zusammenhang zwischen Infraschallsignalen und Brummtton nicht aus, da die Möglichkeit der selektiven Wahrnehmung von bestimmten Infraschallfrequenzen durch die Brummtton-Betroffenen in Betracht gezogen werden muss. Um dies zu überprüfen, wurden die im Sonogramm der Abbildung 5 vorkommenden waagrecht verlaufenden Frequenzbänder einzeln untersucht. Diese Signale repräsentieren bekanntermaßen monochromatische Signale von vermutlich örtlich stationären Quellen. In den Messdaten treten diese Frequenzbänder nicht nur während der Anwesenheit der Betroffenen sondern auch danach auf. Der günstigste Zeitraum für die Untersuchung dieser Signale an den beiden Messtagen am 14. und 15. Mai lag jeweils nachts zwischen 22:00 Uhr und 2:00 Uhr (UT) (00:00 – 4:00 Uhr MESZ), da während dieser Zeit die geringsten

Windgeschwindigkeiten und damit das niedrigste Niveau des Hintergrundrauschens vorherrschte.

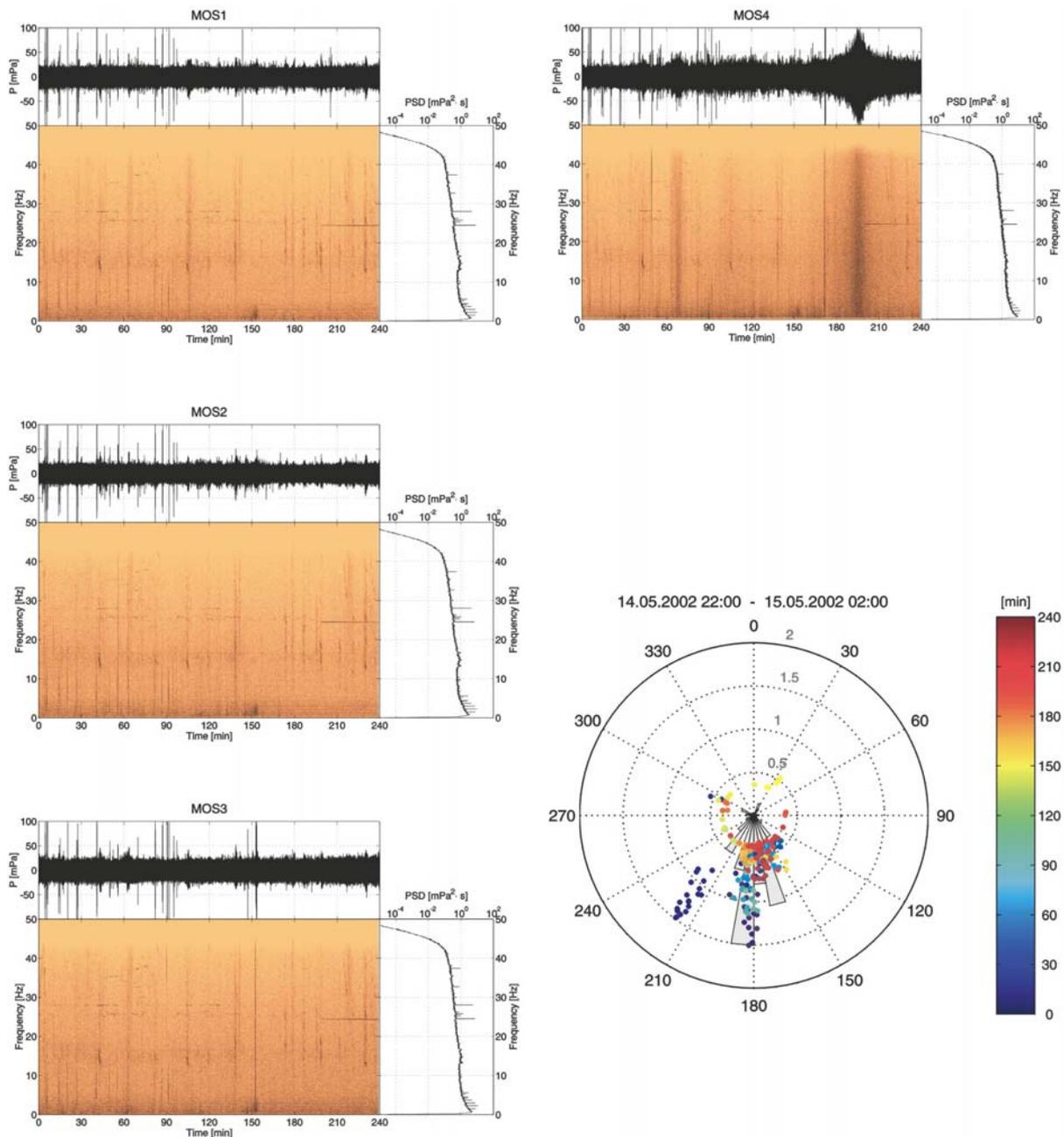


Abbildung 7: Zeitreihen der vier mobilen Messstationen (MOS1 – MOS4), ihre Leistungsdichtespektren (PSD) mit den zugehörigen Sonogrammen für den Zeitraum vom 14.05.2002 22:00 bis 15.05.2002 02:00 (UT) sowie der Windrichtung [°] und -geschwindigkeit [m/s] in Polardarstellung (0° entspricht Nord und 90° Ost). Der Zeitpunkt der jeweiligen Windmessung ist farbkodiert.

Für die beiden genannten Zeiträume von jeweils vier Stunden Dauer wurden wiederum die Messdaten der einzelnen Stationen mit Frequenzen größer 0.5 Hz summiert und die Sonogramme sowie die mittleren Leistungsdichtespektren gebildet

(siehe Abb. 6). Wiederum weisen die Spektren die charakteristischen Spitzen und entsprechende waagrechte Linien in den Sonogrammen auf. Auch in den Daten der individuellen Stationen sind in den entsprechenden Zeitintervallen diese Strukturen zu erkennen, wie die Abbildungen 7 und 8 zeigen. Während sich die Zeitreihen der einzelnen mobilen Messstationen auf Grund lokal eng begrenzter Effekte unterscheiden – wahrscheinlich bedingt durch nachaktive Tiere (s. Zeitreihe der Station MOS4 in Abbildung 7) –, weisen die Leistungsdichtespektren aller Stationen in Abbildung 6 die gleichen Spitzen auf. Daraus folgt, dass die Quellen dieser monochromatischen Signale außerhalb der Messanordnung liegen.

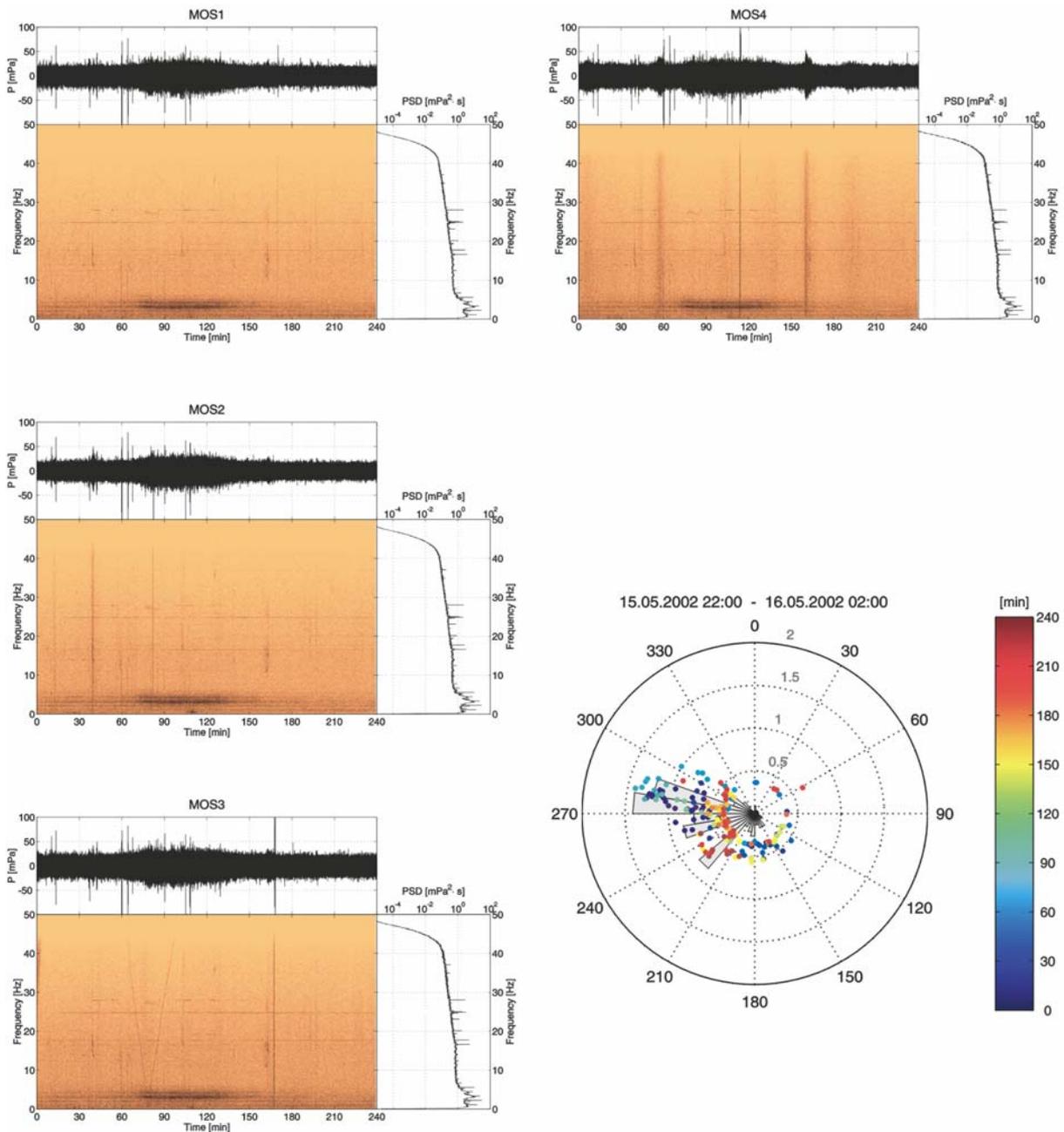


Abbildung 8: Analog zu Abbildung 7 – für den Zeitraum vom 15.05.2002 22:00 bis 16.05.2002 02:00 (UT).

Beim genauen Vergleich der Zeitreihen und Sonogramme der Abbildungen 7 und 8 fallen kontinuierliche Signale konstanter Frequenz auf, die sich zum Teil geringfügig unterscheiden. Sofern die Frequenzunterschiede kleiner als einige Prozent sind, können sie durch die verschiedenen räumlichen Filter bedingt sein. Als weitere Ursache kommen unterschiedliche künstliche Quellen in Betracht, die nur temporär aktiv sind (man vergleiche das 16 2/3 Hz-Signal in Abbildung 5 und 6). In Tabelle 2 sind die übereinstimmenden Signalfrequenzen samt Wellenlängen für beide Messabschnitte und Anordnungen zusammengestellt. Mit Wellenlängen von 58 m bis 221 m liegen die Signale alle über der Auflösungsgrenze der beiden Dreiecksanordnungen. Allerdings nimmt die Genauigkeit der Richtungsbestimmung mit zunehmender Wellenlänge ab. Die entsprechenden Genauigkeitswerte der mit den beiden Stationsnetzen erreichbaren Richtungsbestimmungen sind in Tabelle 2 für die verschiedenen Infrasschallsignale aufgeführt. Die räumliche Ausdehnung der beiden Stationsanordnungen wurde speziell darauf abgestimmt, hochfrequente monochromatische Signale mit Frequenzen im Bereich von 10 Hz bzw. 20 Hz, d.h. mit Wellenlängen von 30 m bzw. 15 m, aufzulösen. Diese Anforderung geht bei insgesamt vier zur Verfügung stehenden Stationen zu Lasten der Richtungsgenauigkeit bei Signalen mit größerer Wellenlänge.

Tabelle 2: Übereinstimmende Frequenzen [Hz] monochromatischer Infrasschallsignale für beide Messzeiträume- und Stationsnordnungen innerhalb der 4-Stunden-Blöcke von 22:00 bis 02:00 Uhr am 14. und 15.05.2002 mit Angaben der jeweils erreichbaren Genauigkeit der Richtungsbestimmung.

Frequenz [Hz]	1.49	2.23	4.46	5.57	5.70
Wellenlänge [m]	221	148	74	59	58
Stationsnetz mit 30 m Seitenlänge					
Genauigkeit Richtungsbestimmung [°]	±26.5	±17.8	±8.9	±7.1	±7.0
Stationsnetz mit 15 m Seitenlänge					
Genauigkeit Richtungsbestimmung [°]	±53.0	±35.5	±17.8	±14.2	±14.0

Um Informationen über die Quelle bzw. den Quellort der monochromatischen Infrasschallsignale zu erhalten, werden mit den beiden Stationsanordnungen Richtungsbestimmungen durchgeführt. Die dafür eingesetzten Verfahren werden teilweise auch in der (Array-) Seismologie angewandt:

- Der Fisher-Detektor im Frequenzbereich (z.B. Smart & Flinn, 1971), bei dem ähnlich wie bei einer Radarantenne alle möglichen Richtstrahlen („beams“) getestet und deren relative Energie berechnet wird. Aus dem Richtstrahl mit der maximalen Signalenergie ergeben sich Richtung und Geschwindigkeit des aufgezeichneten Infrasschallsignals.
- Das PMCC-Verfahren („Progressive **M**ulti-**C**hannel **C**orrelation“, z.B. Cansi et al., 1993; Cansi, 1995), bei dem anhand von Laufzeitunterschieden zwischen den einzelnen Stationen die Richtung und Geschwindigkeit eines Signals bestimmt wird.

- Die MUSIC-Methode („**M**ultiple **S**ignal **C**lassification“, z.B. Schmidt, 1981; Bokelmann & Baisch, 1999), die auf einer Eigenwertzerlegung der Kreuzspektralmatrix der (komplexen) Zeitreihe zur Richtungspeilung basiert.

Eine Lokalisierung der Infraschallquellen lässt sich mit einem einzelnen Stationsnetz prinzipiell nicht durchführen, da allein aus Richtung und Geschwindigkeit der eintreffenden Wellen die Entfernung der Signalquelle nicht bestimmbar ist. Nur mit einem zweiten (mobilen) Netz könnte durch Kreuzpeilung der Standort ermittelt werden. Dennoch lassen sich die Ursprungsorte aufgrund verschiedener Überlegungen etwas eingrenzen. So ist davon auszugehen, dass, mit Ausnahme von 0.2 Hz, die monochromatischen Signale mit großer Wahrscheinlichkeit durch künstliche Quellen entstehen, deren Abstand von wenigen bis zu mehreren zehn Kilometern von dem Registrierort entfernt liegen dürfte. Als mögliche Quellen kommen laufende Generatoren, schwere Maschinen, schwingende Brücken, Hochspannungsleitungen, Staustufen oder Pumpspeicherwerke in Betracht. Welche Quellen letztlich die beobachteten monochromatischen Signale generierten, ließ sich nicht ermitteln.

Alle drei Analyseverfahren lieferten übereinstimmende Ergebnisse bzgl. der Ankunftsrichtung und der scheinbaren Geschwindigkeit der beobachteten monochromatischen Signale. In Abbildung 9 sind die Ergebnisse stellvertretend durch den Fisher-Detektor dargestellt, der die größte Flexibilität aller Verfahren in Bezug auf den Signalcharakter (transient oder monochromatisch) besitzt. In Tabelle 3 sind die untersuchten Frequenzen sowie die verwendeten schmalbandigen Bandpassfilter aufgeführt.

Tabelle 3: Zusammenstellung der untersuchten Frequenzen, der zugehörigen schmalbandigen Bandpassfilter, ihres Auftretens in den beiden Messphasen M1 und M2 sowie ihres Ursprungs.

Frequenz [Hz]	Filtergrenzen [Hz]	Vorhanden M1/M2	Ursprung
0.20	[0.10 0.30]	Ja/Ja	Tiefdruckgebiet
1.49	[1.35 1.65]	Ja/Ja	Unbekannt
2.08	[2.00 2.17]	Nein/Ja	Turbine (50/24 Hz)
2.23	[2.15 2.30]	Ja/Ja	Unbekannt
5.57	[5.40 5.75]	Ja/Ja	Unbekannt
2.70 – 4.30	[2.50 4.50]	Nein/Ja	Unbekannt

In zwei Fällen ist der Ursprung der monochromatischen Signale bekannt; dies gilt insbesondere für die bereits erwähnten „microbaroms“ bei etwa 0.2 Hz. Die Richtung dieses Signaltyps lässt sich aufgrund seiner Herkunft anhand von Wetterkarten überprüfen. Ein Vergleich der Rückazimute mit der Lage der Tiefdruckgebiete an den jeweiligen Tagen (<http://imkpc3.physik.uni-karlsruhe.de/wz/>) bestätigt die Wirksamkeit des Verfahrens. Desweiteren sind Signale mit einer Frequenz von 2.08 Hz aus der Seismologie bekannt. Durch mehrere Untersuchungen (z.B. Bokelmann & Baisch, 1999 und Querverweise) konnte belegt werden, dass laufende

Stromgeneratoren diese Frequenz erzeugen. Nach Abbildung 9 kommen diese Wellen vorzugsweise aus süd-südwestlicher Richtung. Da den Autoren nicht bekannt ist, wo sich die nächstgelegenen Stromgeneratoren befinden, können die Ergebnisse nicht auf ihre Richtigkeit bzw. Genauigkeit überprüft werden.

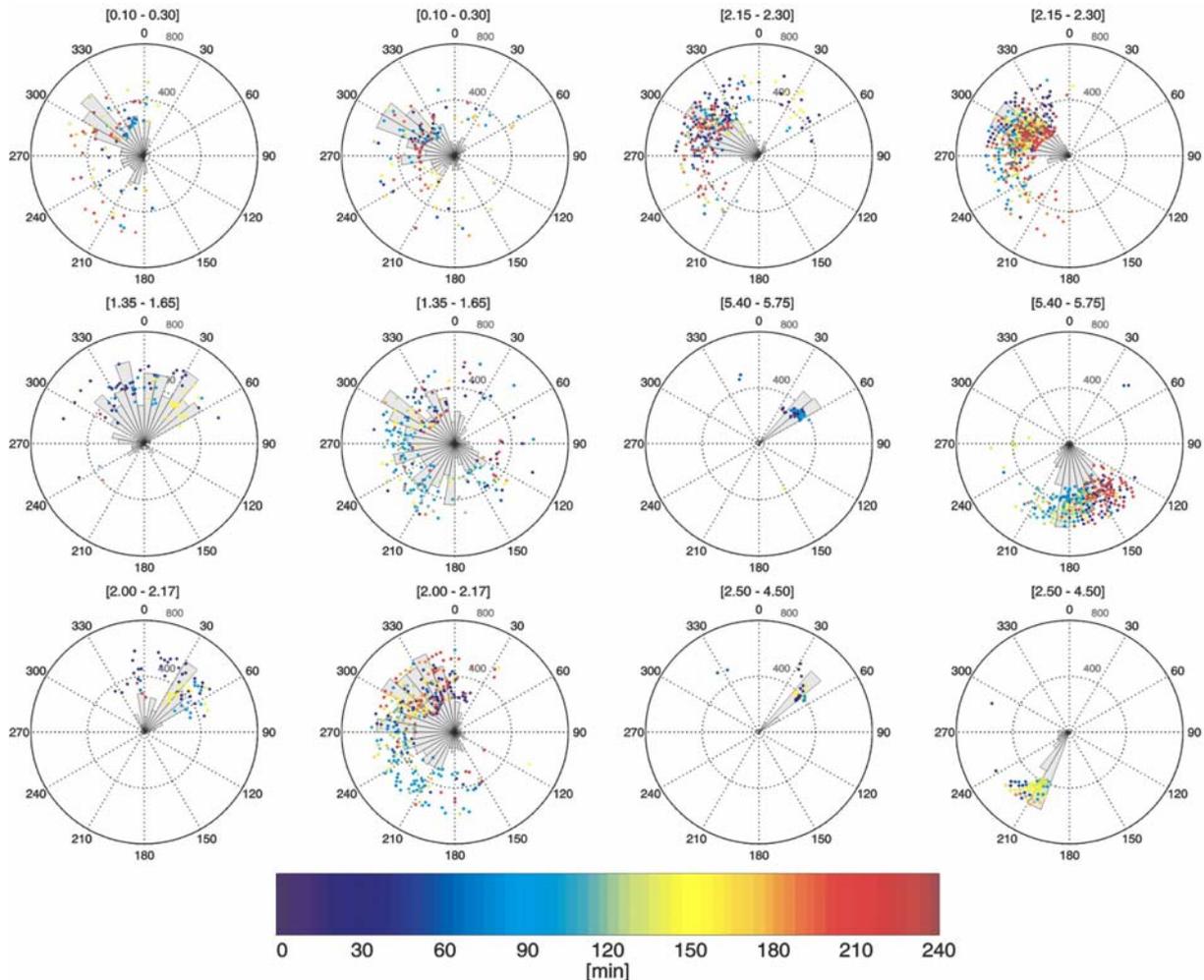


Abbildung 9: Zeitlich farbkodierte Polardarstellung der Richtungs- und (scheinbaren) Geschwindigkeitsbestimmung für die in Tabelle 3 aufgeführten Frequenzen. Links sind jeweils die Ergebnisse des ersten, rechts die des zweiten 4-Stunden-Blocks dargestellt. Die Werte 0° und 90° entsprechen der Nord- bzw. Ostrichtung; der innere gestrichelte Kreis sowie der äußere durchgezogene Kreis kennzeichnen scheinbare Schallgeschwindigkeiten von 400 und 800 m/s.

In den meisten Fällen ergeben sich für die Richtungspeilungen der in Tabelle 3 aufgeführten Signale für beide Zeiträume unterschiedliche Werte, die ihrerseits wiederum stark streuen. Diese Streuung spiegelt sich in den Verteilungsrosen wider und kann durch verschiedene Effekte erklärt werden: Durch räumliche Ausdehnung der Quelle, zeitliche Variation der Signalstärke, durch Reflektionen der abgestrahlten Wellen an Hindernissen im Quellgebiet sowie durch drehende Winde in größeren

Höhen, wo sich die Schallwellen ausbreiten. Einzig für das 2.23-Hz-Signal stimmen beide azimutalen Bestimmungen überein und auch die Streuung liegt im Bereich der Messgenauigkeit, wobei der Fehler für die kleinere Geometrie größer ist, bedingt durch die geringere Ausdehnung des Stationsnetzes.

Für das Frequenzband zwischen 2.7 und 4.3 Hz ist eine deutliche Amplitudenerhöhung während des zweiten Messzeitraums am 15.5. zwischen 70 und 160 min (vgl. Abb. 6 rechts und 8) zu beobachten. Dabei fällt die geringe Streuung der Richtungs- und Geschwindigkeitswerte auf. Sehr wahrscheinlich handelt es sich hier um eine eng begrenzte Infrasschallquelle, die diese Signale erzeugt. Auch im ersten Untersuchungszeitraum liegt eine genaue Peilung vor, die jedoch auf ein starkes, zeitlich begrenztes (transientes) Signal zurückzuführen ist. Ähnlich verhält es sich bei der Richtungsbestimmung des 5.57-Hz-Signal.

Bei allen in Abbildung 9 dargestellten Richtungs- und Geschwindigkeitswerten wurden nur solche verwendet, die bestimmte Kriterien erfüllen. Insofern sind die Ergebnisse als zuverlässig zu betrachten. Auffallend ist, dass Signale einer bestimmten Frequenz notwendigerweise nicht von derselben Quelle stammen müssen. Diese Beobachtung bestätigen in Abbildung 10 besonders deutlich die Signale der Frequenz 5.57 Hz und zwischen 2.7 Hz und 4.4 Hz.

Für die in Tabelle 3 aufgeführten Frequenzbänder wurden die jeweiligen monochromatischen Signale wiederum in den hörbaren Bereich transformiert, um möglicherweise gemeinsamen Merkmale mit dem Brummtönen feststellen zu können. Die entsprechenden Wav-Dateien beziehen sich auf den Zeitraum vom 14.05 von 20:00 bis 22:00 (UT) und sind durch folgende Namen gekennzeichnet: IS_MOS1_149.wav, IS_MOS1_208.wav, IS_MOS1_223.wav, IS_MOS1_557.wav und IS_MOS1_270. Trotz vieler Versuche durch Variation der Abspielgeschwindigkeit und Kombination verschiedener Frequenzbänder gelang es nicht, auch nur entfernt ein dem Brummtönen ähnliches Geräusch mit den Infrasschalldaten zu erzeugen. Der Vollständigkeit halber sind auch die in Abbildungen 6 dargestellten Daten, die jeweils einen Zeitraum von 4 Stunden überdecken, als Wav-Dateien abrufbar (IS_SUM_02051422.wav und IS_SUM_02051522.wav). Vom Klangbild unterscheiden sich diese Aufzeichnungen nicht von der Infrasschall-Kakophonie am Abend des 14. Mai 2002, als sich einige Brummtönen-Betroffenen am Standort der Messungen einfanden.

Schlussfolgerungen

Hinsichtlich der Zielsetzung, umfassende Erfahrungen mit dem Umgang der mobilen Messsysteme im Rahmen eines mehrtägigen Feldeinsatzes zu sammeln, kann ein positives Fazit gezogen werden. Es traten weder Datenverluste noch anderweitige Probleme mit den mobilen Datenerfassungseinheiten sowie der Wetterstation auf. Mit den unterschiedlich konzipierten räumlichen Filtern konnte das Hintergrundrauschen wirkungsvoll reduziert werden. Es wurde sogar eine vergleichbare Rauschunterdrückung wie mit den Filtern erreicht, die an der von der BGR betriebenen, fest installierten Infrasschall-Messanlage I26DE nahe Bischofsreut im Bayerischen Wald eingesetzt werden. Es zeigte sich, dass im Vergleich zu I26DE die Aufnahmesysteme der Mobilstationen im Frequenzbereich über 4 Hz geringeres Eigen-

rauschen aufweisen. An den fest installierten Stationen sind somit Nachbesserungen erforderlich.

Die anvisierte Kreuzpeilung zwischen der Mobilstation und I26DE für gleichzeitig registrierte Signale konnte nicht erprobt werden, da im Messzeitraum keine prominenten transiente Infraschallsignale, beispielsweise durch einen Meteoriten, auftraten. Eine Kreuzpeilung für die durch atlantische Tiefdruckgebiete erzeugten Infraschallwellen wäre zwar möglich, jedoch nicht sinnvoll, da das mobile Stationsnetz nicht für die Richtungsbestimmung derart niederfrequenter Signale ausgelegt worden war und dafür nicht genügend genaue Azimutwerte liefert. Die Fokussierung lag bei diesen Messungen auf Frequenzen oberhalb von 0.5 Hz, die im Zusammenhang mit dem Brummtton untersucht wurden.

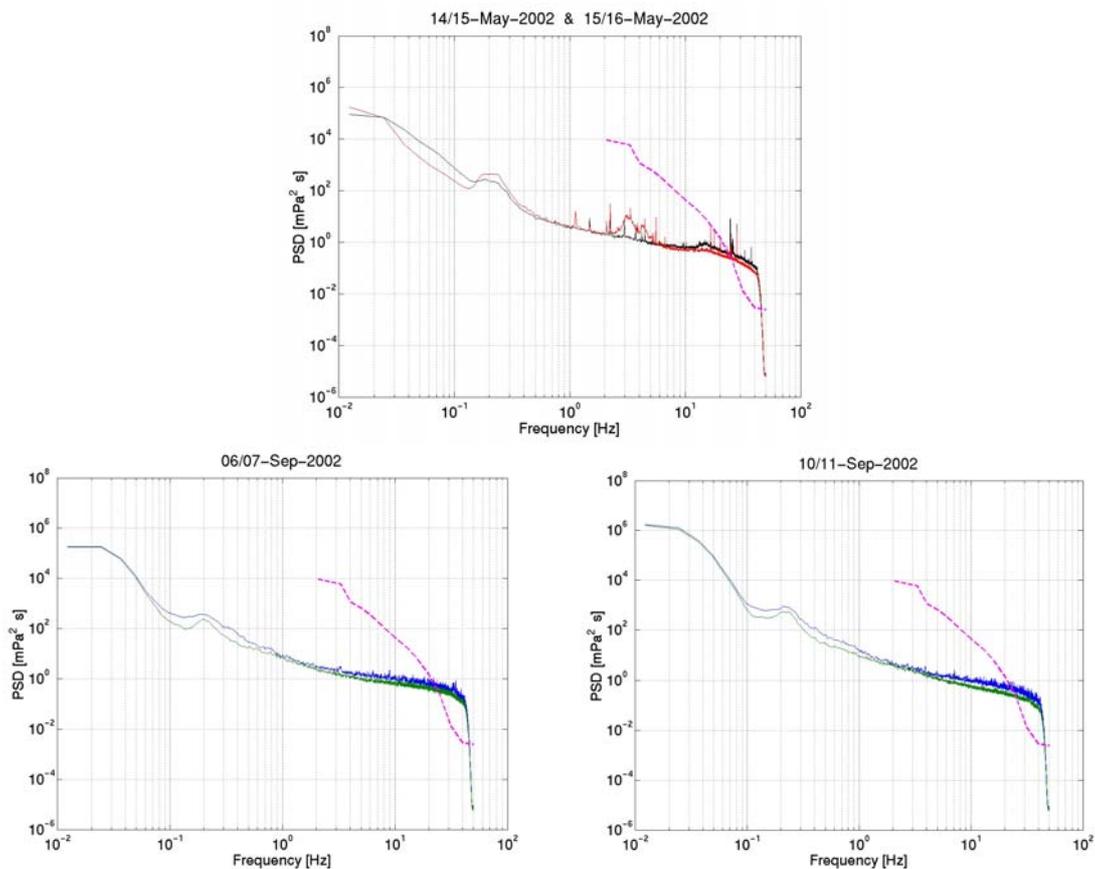


Abbildung 10: *Doppelt-logarithmische Darstellung der Leistungsdichtespektren über das gesamte Frequenzband sowie die „Hörbarkeitsschwelle“ bei niedrigen und Infraschall-Frequenzen von 2 bis 50 Hz in margenta (nach Møller & Andresen, 1984). Oben: Messung in Blaubeuren; unten: Vergleichsmessung im Bayerischen Wald nahe Bischofsreut für eine sternförmige Auslage (blau) und eine ringförmige (grün). Der Zeitraum umfasst jeweils 4 Stunden von 22:00 bis 02:00 UT des folgenden Tages.*

Ausgehend von den direkten Summenspuren wurden die Registrierungen der Mobilstationen nordwestlich von Blaubeuren auf die Existenz monochromatischer Signale mit stationärem Ursprung untersucht. Die Betrachtung der Summe im Zeit- als auch im Frequenzbereich gab einen Überblick über die gemessenen Daten. Ferner entspricht sie wohl am ehesten dem menschlichen Höreindruck, da hier ebenfalls eine Überlagerung mit Phasenunterschieden vorliegt. Aus diesem Grund wurden die gezeigten Summenspuren in den hörbaren Bereich transformiert und stehen als wav-Dateien zur Verfügung. Die zentralen Ergebnisse und Beobachtungen der Analyse der Messdaten hinsichtlich des Brummtons lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Während einige Betroffene der Messung nahe Blaubeuren beiwohnten, wurde von ihnen keine Änderung des Brummtons festgestellt. Hingegen weisen die Infraschallsignale eine Variabilität bzgl. ihrer Amplitude und ihres Auftretens in diesem Zeitraum auf.
- Die Signalamplituden sind sehr gering und liegen im klassischen Infraschallbereich, also bei Frequenzen kleiner 20 Hz, deutlich unterhalb der von Møller & Andresen (1984) beschriebenen Hörbarkeitsgrenze, die in Abbildung 10 durch die margenta-farbene, gestrichelte Linie ab 2 Hz angezeigt wird. So nimmt der Abstand zwischen dieser Kurve und den Infraschall-Messdaten mit abnehmender Frequenz bis zu drei Zehnerpotenzen (Faktor 1000) zu. Aufgrund dieses großen Abstandes ist eine Wahrnehmung des Infraschalls unter 10 Hz nahezu ausgeschlossen.
- Bei weiteren Messungen im Bayrischen Wald nahe Bischofsreut, die im Rahmen einer Langzeituntersuchung der Eigenschaften der in Blaubeuren erstmalig eingesetzten räumlichen Rausch-Unterdrückungsfilter gewonnen wurden, zeigen sich **keinerlei** Spitzen in den Leistungsdichtespektren. Auch ist an diesem Standort das Hintergrundrauschen geringer als in Blaubeuren, wie Abbildung 10 (unten) verdeutlicht. Dennoch nahmen die Betroffenen den Brummtton in Bischofsreut deutlich wahr. Diese Beobachtung steht jedoch im Widerspruch zu einer möglichen selektiven Wahrnehmung bestimmter Infraschallfrequenzen als Brummtton durch die Betroffenen.

Insgesamt legen diese Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung den Schluss nahe, dass der Brummtton nicht durch Infraschallquellen erzeugt wird, da keine Indizien gefunden wurden, die auf einen Zusammenhang von Brummtton und Infraschall schließen lassen. Obwohl diese Untersuchungen damit nicht zur Lösung des Phänomens „Brummtton“ beigetragen haben, sind die Ergebnisse insofern von Nutzen, als die Ursachenforschung weiter eingegrenzt und Infraschall als mögliche Quelle nicht mehr in Betracht gezogen werden muss.

Danksagung

Wir bedanken uns bei Prof. Dr. H. Braun (FH-Karlsruhe) und insbesondere bei Dr. R. Whittaker (Nat. Lab. Los Alamos, U.S.A.) für ihre Diskussionsbereitschaft und die Bereitstellung von Literatur. Ferner gilt unser Dank der IGZAB und einiger ihrer Mitglieder, für die Kooperationsbereitschaft an der Messung teilzunehmen und uns über ihre Wahrnehmungen des Brummtons zu informieren.

Literatur:

Bokelmann, G. & S. Baisch, 1999. Nature of narrow-band signals at 2.083 Hz, Bull. Seism. Soc. Amer., 89, 156-164.

Cansi, Y., Plantet, J.L. & B. Massion, 1993. Earthquake location applied to a min-array : k-spectrum versus correlation method, Geophys. Res. Lett., 20, 1819-1822.

Cansi, Y., 1995. An automatic seismic event processing for detection and location: P.M.C.C. method, Geophys. Res. Lett., 22, 1021-1024.

Møller, H. & J. Andresen, 1984. Loudness of pure tones of low and infrasonic frequencies, Int. J. Low Freq. Noise Vib., 78-85.

Schmidt, R., 1981. A signal subspace approach to multiple emitter location and spectral estimation, Ph.D. thesis, Stanford University, Stanford, CA.

Smart, E. & E.A. Flinn, 1971. Fast frequency-wavenumber analysis and Fisher signal detection in real-time infrasonic data processing, Geophys. J. Roy. Astron. Soc., 26, 279-284.