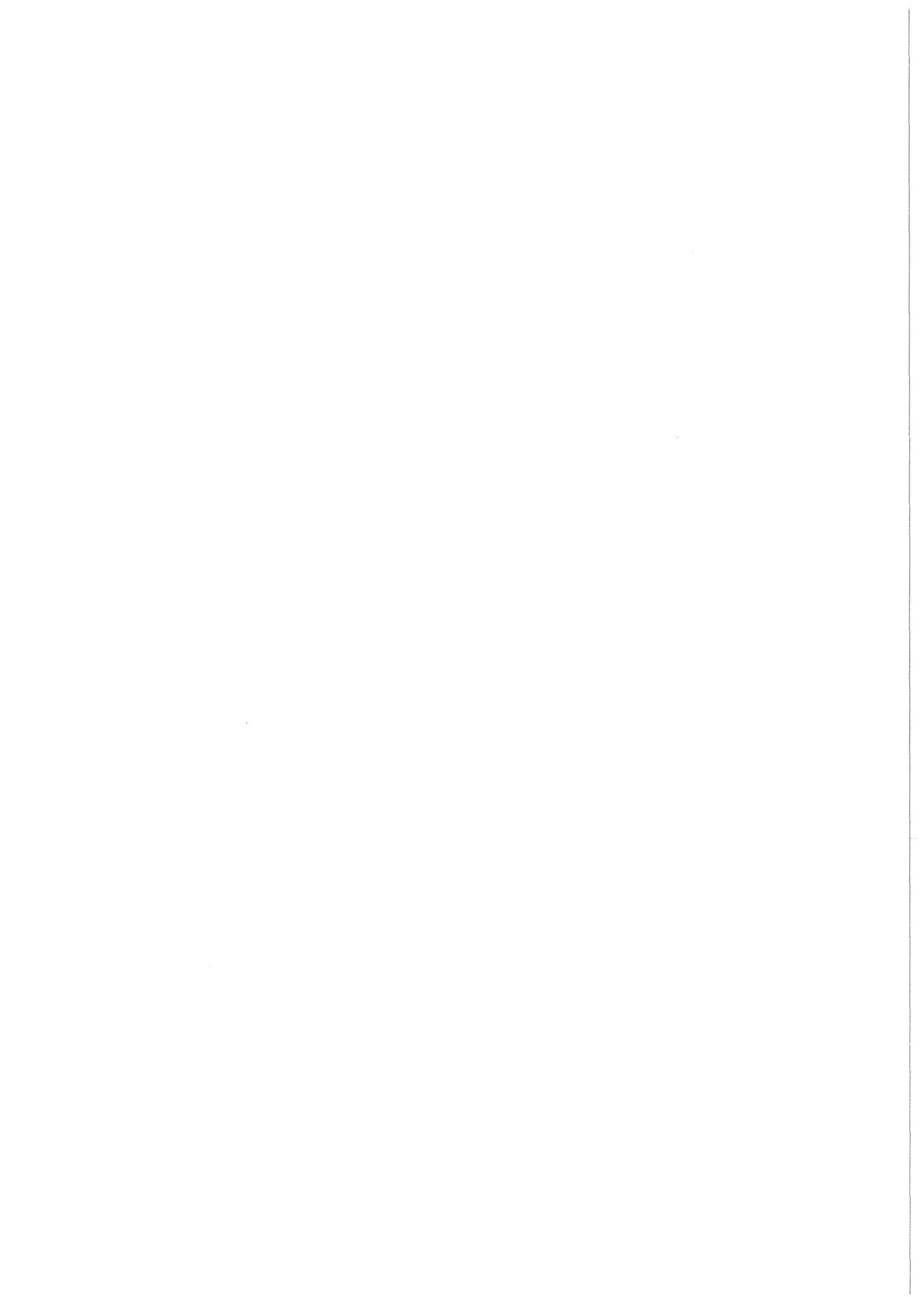


**KfK 4580**  
**Juni 1989**

# **Akustische Messungen zur Siededetektion in der KNK II**

**J. Aberle**  
**Institut für Reaktorentwicklung**  
**Projekt Schneller Brüter**

**Kernforschungszentrum Karlsruhe**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE  
Institut für Reaktorentwicklung  
Projekt Schneller Brüter

KfK 4580

**Akustische Messungen zur Siededetektion in der KNK II**

J. Aberle

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

Als Manuskript vervielfältigt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Kernforschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 7500 Karlsruhe 1

ISSN 0303-4003

## **Zusammenfassung**

Bezüglich einer integralen Kernüberwachung in natriumgekühlten Brutreaktoren befinden sich Schallmeßverfahren in der Entwicklung. Zur experimentellen Bestimmung des akustischen Transferverhaltens eines Reaktorkernes sowie zur Demonstration der Detektierbarkeit von lokalem Kühlmittelsieden in einer Reaktoranlage wurden in der KNK II Siedeversuche mit einem sogenannten Siedegenerator durchgeführt. Dieser hatte ein elektrisch beheiztes Stabbündel, welches zur Erzielung von Kühlungsstörungen mit einer Blockade versehen war.

In dem vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse der mit dem Siedegenerator durchgeführten akustischen Messungen vorgestellt. Der Schwerpunkt der Auswertung liegt dabei auf der Ermittlung der akustischen Transferfunktion vom Reaktorkern zum oberen Natriumplenum. Die dazu notwendige Signalkonditionierung wird ebenfalls beschrieben. Große Beachtung erfordern hierbei elektrische Störungen, welche bei den Siedeversuchen auftraten und hardwaremäßig nicht zu eliminieren waren. Die gemessenen Siedegeräusche werden mit in einer Reaktoranlage zu erwartenden stationären und transienten Nebengeräuschen verglichen. Der Bericht enthält abschließend eine Betrachtung der Detektierbarkeit von lokalem Natriumsieden mittels akustischer Messungen sowie der dazu nötigen Randbedingungen. Die Chancen einer Lokalisierung des Siedeortes im Reaktorkern werden auf der Basis der in der KNK II gemessenen Siedesignale diskutiert.

## **Acoustic Measurements for boiling detection in the KNK II Reactor**

### **Abstract**

With regard to an integral core surveillance in sodium-cooled breeder reactors acoustic measurement techniques are under development. To determine experimentally the acoustic transfer function of a reactor core and to demonstrate the detectability of local sodium boiling, experiments with a so-called Boiling Generator were carried out in the KNK II reactor. The main part of this Boiling Generator was an electrically heated pin bundle which was equipped with a local blockage to obtain cooling disturbances.

In this report the results of the acoustic measurements carried out with the Boiling Generator are presented. Main topic of the evaluation is the determination of the acoustic transfer function between the core and the upper sodium plenum. The signal conditioning necessary prior to this investigation is also explained. Great effort was required to suppress electrical disturbances that superimposed the acoustic signals and which could not be eliminated by the hardware during the experiments. The boiling noise is compared to static and transient parasitical noise which is to be expected in a reactor. Finally the detectability of local boiling using acoustic measurements is considered. Furthermore the chance to localize the boiling region within the reactor core is discussed on the base of the acoustic boiling signals measured in KNK II.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Beschreibung der Versuchseinrichtungen	2
2.1	Siedegenerator	2
2.2	Instrumentierte Stopfen	2
2.3	Signalelektronik und Datenerfassungseinrichtung	3
3	Elektrische Störsignale	3
4	Signalverarbeitung	4
4.1	Signalaufbereitung und Störungsunterdrückung	4
4.2	Signalanalyse- Verfahren	4
5	Siedegeräusche bei unterschiedlichen Kühlmitteldurchsätzen	6
5.1	Siedegeräusche bei 49% Durchsatz	6
5.2	Siedegeräusche bei 29% Durchsatz	7
5.3	Signalдарstellung als S/N- Verhältnis	8
5.4	Siedegeräusche bei 12% Durchsatz	9
5.5	Ähnlichkeit der Siedesignale benachbarter Sensoren	9
6	Akustische Übertragungsfunktion	10
6.1	Übertragungsfunktion zum Oberplenum	11
6.2	Übertragungsfunktion zum Kernrand	12
7	Untergrundgeräusche	12
7.1	Durchsatzabhängige Strömungsgeräusche	13
7.2	Transiente Nebengeräusche	13
7.2.1	Unterschiede zwischen Siedegeräuschen und Körperschall	14
7.2.2	Akustische Kopplung der Instrumentationsstopfen	15
8	Siededetektion	16
8.1	Siedesignale bei vollem Kerndurchsatz	16
8.2	Eindeutige Merkmale von Siedegeräuschen	17
8.3	Lokalisierung von Geräuschen	17
9	Schlußfolgerungen	18
	Acknowledgement	19
	Referenzen	19

## Liste der Abbildungen

- Abb. 1: Siedegenerator und instrumentierte Stopfen in der KNK II
- Abb. 2: Stabbündel des Siedegenerators mit Schallsensor
- Abb. 3: Experimentierstopfen mit akustischen Sensoren
- Abb. 4: Akustisches Siedesignal mit typischem Störsignalmuster
- Abb. 5: Akustische Siedesignale mit typischem Störsignalmuster (Spektren)
- Abb. 6: Siedegeräusche bei Siedebeginn (RMS);  $V = 49\%$
- Abb. 7: Burstsignale bei Siedebeginn;  $V = 49\%$
- Abb. 8: Spektrale Leistungsdichte des Quellsignals;  $V = 49\%$
- Abb. 9: Spektrale Leistungsdichte von Signalen in den Stopfen;  $V = 49\%$
- Abb. 10: Siedesignal an der Quelle und am Kernrand;  $V = 49\%$
- Abb. 11: Siedesignal im Oberplenum;  $V = 49\%$
- Abb. 12: Spektrum des Quellsignals;  $V = 49\%$
- Abb. 13: Spektren der Siedesignale am Kernrand;  $V = 49\%$
- Abb. 14: Spektren der Siedesignale im Oberplenum;  $V = 49\%$
- Abb. 15: Spektren von Quellsignalen unterschiedlicher Intensität
- Abb. 16: Spektren der Geräusche am Kernrand;  $V = 29\%$
- Abb. 17: Spektren der Geräusche im Oberplenum;  $V = 29\%$
- Abb. 18: Einfluß der Hochpaßfilterung an Geräuschen im Oberplenum
- Abb. 19: Leistungsdichte und S/N- Spektrum eines Schallsignals im Oberplenum
- Abb. 20: Siedegeräusche bei  $V = 12\%$  (RMS)
- Abb. 21: Einzelner Blasenkollaps bei  $V = 12\%$
- Abb. 22: Spektren von Siedegeräuschen an der Siedezone bei  $V = 12\%$
- Abb. 23: Spektren von Siedegeräuschen in den Stopfen bei  $V = 12\%$
- Abb. 24: Siedesignale von verschiedenen Sensoren im Siedegenerator
- Abb. 25: Siedesignale von verschiedenen Sensoren im Oberplenum

- Abb. 26: Unterdrückung der elektrischen Störung im Quellgeräusch
- Abb. 27: Unterdrückung der elektrischen Störung im Siedegeräusch am Kernrand
- Abb. 28: Empfindlichkeit eines Piezo- Schallsensors
- Abb. 29: Transferfunktion zum Oberplenum (dB);  $V = 49\%$
- Abb. 30: Transferfunktion zum Oberplenum (dB);  $V = 29\%$
- Abb. 31: Transferfunktion zum Kernrand (dB);  $V = 49\%$
- Abb. 32: Untergrundgeräusche im Oberplenum der KNK II
- Abb. 33: Spektren von mechanisch angeregten Geräuschen im Oberplenum
- Abb. 34: Vergleich Siedegeräusche - mechanische Geräusche (S/N)
- Abb. 35: S/N- Spektrum eines ungestörten Siedebursts
- Abb. 36: Vergleich unterschiedlicher im SG angeregter Geräusche
- Abb. 37: Siede- und Backgroundgeräusche im Oberplenum der KNK II
- Abb. 38: Laufzeitdifferenzen zwischen einzelnen Sensoren im Oberplenum

#### **Liste der Tabellen**

- Tab. 1: Art und Einsatzpositionen der Schallsensoren
- Tab. 2: Thermohydraulische Parameter der Siedeversuche in der KNK II

## 1 Einleitung

Akustische Messungen an Kernreaktoren bieten eine Reihe von zusätzlichen redundanten Meß- und Überwachungsmöglichkeiten. Sie eignen sich beispielsweise zur Anzeige von Unregelmäßigkeiten an rotierenden Maschinen wie Pumpen oder Motoren, zur Lokalisierung von losen Teilen in Rohrsystemen und zur Erkennung von Kühlmittelsieden. Bezüglich der Detektion lokaler Kühlungsstörungen in natriumgekühlten Reaktoren wird akustischen Meßverfahren international starke Bedeutung beigemessen, da sie eine schnell ansprechende integrale Überwachung des Reaktorkernes ermöglichen /1/.../3/.

Ein mit einer begrenzten Anzahl von Sensoren arbeitendes akustisches Überwachungssystem sollte in der Lage sein, lokales Kühlmittelsieden sicher und prompt anzuzeigen. Die Einsatzmöglichkeiten bzw. die Qualität solcher akustischer Meßsysteme wird im Wesentlichen von folgenden Kriterien bestimmt:

- Verfügbarkeit von Schallsensoren mit Eigenschaften, die einen Einsatz unter Reaktorbedingungen ermöglichen
- Kenntnis der Art und Intensität der Siedegeräusche und der im Normalzustand vorliegenden Untergrundgeräusche, d. h. die Kenntnis von Merkmalen, die Siedegeräusche von normalen Betriebsgeräuschen trennen
- Kenntnis der akustischen Übertragungsfunktion des Reaktorkernes einschließlich des am Schallenergie-transport beteiligten Natriums
- Verfügbarkeit von Signalanalyse-Verfahren (Hard- und Software) zur Reduktion der Daten und zur Diskriminierung der Signalmuster

Bezüglich der beiden erstgenannten Kriterien liegen reichhaltige Erfahrungen sowohl aus out-of-pile- wie aus in-pile- Experimenten vor. Der Kenntnisstand über die akustische Transferfunktion von Reaktoren hingegen ist erheblich kleiner /1/. Zur experimentellen Ermittlung der akustischen Übertragungsfunktion eines natriumgekühlten Reaktorkernes wurden an der KNK II Siederversuche mit einem elektrisch beheizten Siedegenerator durchgeführt. Ein weiteres Ziel dieser Experimente war die Messung von typischen Siedegeräuschen mit Sensoren in Positionen, die bezüglich einer echten Anwendung in Leistungsreaktoren realistisch sind. Als Ort zur Anbringung von akustischen Sensoren in kommerziellen Brutreaktoren kommt das Natriumplenum oberhalb des Reaktorkernes in Frage.

Als Ergänzung zu den eigentlichen Siederversuchen wurden die akustischen Untergrundgeräusche in Abhängigkeit vom Kühlmitteldurchsatz gemessen. Um eventuell auftretende Nebengeräusche analysieren zu können, sowie zur Prüfung der Funktionstüchtigkeit der Schallsensoren wurden auch durch Klopfen auf den Drehdeckel des Reaktors erzeugte Geräusche aufgezeichnet.

Die Versuche fanden bei nicht nuklearem Betrieb des Reaktors statt.

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit der konventionellen Auswertung der Schallsignale, d. h. ohne Anwendung von Analyseverfahren, welche unter dem Schlagwort "Mustererkennung" Eingang in die Schallmeßtechnik gefunden haben. Schwerpunkt der Auswertung ist die Abschätzung der akustischen Transferfunktion in Abhängigkeit vom Kühlmitteldurchsatz.

## 2 Beschreibung der Versuchseinrichtungen

Die gesamte Versuchseinrichtung besteht aus vier Teilsystemen:

- Siedegenerator
- Instrumentierte Reaktorstopfen
- Stromversorgung für den Siedegenerator
- Signalelektronik und Datenerfassung

Die Abb. 1 zeigt schematisch die Anordnung des Siedegenerators und der Stopfen im Kern bzw. im Oberplenum des KNK II- Reaktors. Da zum Verständnis der Ergebnisse eine gewisse Kenntnis der Versuchsanordnung nötig ist, werden nachfolgend die Teilsysteme (ausgenommen die Stromversorgung) kurz beschrieben.

### 2.1 Siedegenerator

Der lokales Sieden erzeugende Siedegenerator - kurz SG genannt - war in der Zentralposition des Kerns anstelle eines Brennelementes eingesetzt. Er besteht im wesentlichen aus dem Stabbündel, den Stromzuführungen, dem die Konstruktion tragenden Mantelrohr, der aus 50 Thermoelementen bestehenden Betriebs- und Sicherheits- Instrumentierung sowie einem Verlängerungseinsatz, der das Absenken bis in Coremitte ermöglicht. Das Stabbündel als wichtigste Komponente des SG besteht aus 18 elektrisch beheizten Stäben, umgeben von vier Reihen mit 108 Dummystäben sowie einem zentralen Dummystab. Abb. 2 zeigt das Bündel während der Montage. Die zentral angeordneten Heizstäbe sind hier noch nicht eingesetzt.

Zur direkten Messung der erzeugten Geräusche war der SG selbst mit drei Schallsensoren ausgerüstet. Einer dieser Aufnehmer ist in der Abb. 2 zu erkennen. Die mit diesen Sensoren gemessenen Geräusche wurden bei der Auswertung als Referenzsignale herangezogen.

### 2.2 Instrumentierte Stopfen

Die Schallsensoren (mit Ausnahme der oben erwähnten Referenzsensoren) waren in drei sogenannten Stopfen untergebracht. Dies sind instrumentierte Einsätze, welche in einer Kernrandposition bzw. in Positionen oberhalb von Reflektorelementen im Oberplenum des Reaktors eingesetzt waren. Der Stopfen YE 704-511/1 (nachfolgend Stopfen 511 genannt) reichte in der fünften Reihe stehend bis in die axiale Mitte des Kerns. Die beiden Stopfen YE 702-621 und YE 703-626 (nachfolgend Stopfen 621 bzw. 626 genannt) endeten jeweils in Eckpositionen der sechsten Reihe stehend unmittelbar oberhalb der Kernoberkante. Die Schallaufnehmer dieser beiden Stopfen befanden sich somit im oberen Natriumplenum des Reaktors (Abb. 1).

Aus der Abb. 3 geht die Anordnung der akustischen Sensoren in den Experimentierstopfen hervor. Zu erkennen sind die Öffnungen im Mantelrohr, durch welche die Schallwellen zu den dahinter angebrachten Mikrofonen gelangen können. Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über Art und Anzahl der in den einzelnen Stopfen eingesetzten akustischen Sensoren. Der Stopfen 626 war vor dem Siedegerator- Experiment bereits mehrere Monate in verschiedenen Corepositionen eingesetzt. Die darin installierten Sensoren waren zum Zeitpunkt der Experimente mit dem Siedegenerator aufgrund von

Alterungserscheinungen nur noch bedingt einsatzfähig. Die damit aufgezeichneten Daten werden in dem vorliegenden Bericht nicht berücksichtigt.

### **2.3 Signalelektronik und Datenerfassungseinrichtung**

Die Schallsignale sowie auch eine große Anzahl anderer Signale (z. B. Temperaturen im Siedegenerator, Kerndurchsätze, Heizleistungen) wurden vor Ort verstärkt, zum Teil gefiltert und auf Analogbänder aufgezeichnet.

Die Verstärker für die Schallsignale bestanden aus je einem Vorverstärker zur Pegelanhhebung und einem Hauptverstärker zur galvanischen Trennung, Bandpaß-Filterung und weiteren Signalverstärkung. Die Vorverstärker mit fest eingestelltem Gain wurden so nahe wie möglich am Sensor installiert, um die von hochohmigen Quellen stammenden Signale im mV- Bereich so gut wie möglich vor elektrischen Störungen zu schützen.

Zur Minderung von Störsignalen, welche bei allen Versuchen mit eingeschaltetem Siedegenerator auftraten, wurden aktive Hochpaßfilter mit variabler Grenzfrequenz eingesetzt. Die Steilheit der Filterkennlinie im Übergangsbereich ist 48 dB/Oktave. Die Geräte besitzen an ihrem Ausgang einen abschaltbaren Verstärker mit festem Verstärkungsfaktor 10.

Die Schallsignale wurden unter Benutzung mehrerer Analogbandgeräte aufgezeichnet. Ein Großteil der Schallsignale wurde sowohl im FM- als auch im Direkt- Aufzeichnungsverfahren erfaßt. Diese beiden Aufzeichnungsarten unterscheiden sich in der möglichen Frequenzbandbreite und im Dynamikbereich. Aufgrund endlich genauer und endlich stabiler Bandgeschwindigkeiten ist die Berechnung exakter Kreuzkorrelationsfunktionen nur an Signalen sinnvoll, die auf parallele Spuren ein und desselben Bandes aufgezeichnet wurden. Die Belegung der Kanäle der Bandgeräte wurde deshalb dahingehend optimiert, daß bei der Auswertung möglichst umfassende Korrelationsmöglichkeiten zwischen den Signalen aus unterschiedlichen Positionen bzw. von unterschiedlichen Sensortypen gegeben sind.

### **3 Elektrische Störsignale**

Die akustischen Signale aller Siedeversuche mit dem Siedegenerator waren trotz des Einsatzes galvanisch trennender Verstärker von periodischen, aber nicht sinusförmigen Störungen überlagert. Die Störungen traten in Form von Nadeln mit einer Wiederholungsgrundfrequenz von 50 Hz auf. Abb. 4 zeigt ein im Oberplenum gemessenes Siedesignal, dem ein typisches Störsignal- Muster überlagert ist. Das Störsignal in der zweiten Hälfte eines 20 ms- Intervalles entspricht weitgehend dem der ersten Hälfte, jedoch mit an der Zeitachse gespiegelter Amplitude.

Als Verursacher dieser Störungen wurden durch gezieltes Abschalten einzelner Großkomponenten der Reaktoranlage die Anschmittsteuerungen der vier Hauptkühlmittelpumpen erkannt. Infolge von Rückwirkungen auf das Versorgungsnetz waren die Störungen bereits bei leistungslosem SG vorhanden, die Amplitude der Störung war jedoch unerheblich. Da die Stromversorgung des Siedegenerator aus dem selben Netz wie die Kühlmittelpumpen erfolgte, wurden die Störungen beim Betrieb des SG in das Natriumsystem eingekoppelt. Die Störungsamplitude stieg dabei proportional mit dem eingespeisten Heizstrom an.

Mit bewährten Entstörungsmaßnahmen wie Erdung der Signalkabel an definierten Stellen konnte der Störabstand zwar deutlich verbessert werden, ein nicht zu vernachlässigender Rest der Störung beeinträchtigte jedoch weiterhin die Schallsignale.

Die einzige Möglichkeit einer weiteren Unterdrückung der elektrischen Störungen war der Einsatz von Hochpaßfiltern. Die in den nadelförmigen Störspitzen enthaltenen Frequenzanteile reichten jedoch bis nahe 100 kHz. Als Kompromiß für eine ausreichende Störungs- Unterdrückung wurden Filter- Grenzfrequenzen von 20 bzw. 30 kHz gewählt. Da Anteile der Siedegeräusche jedoch auch - bei einem Teil der in verschiedenen Positionen gemessenen Signale sogar hauptsächlich - in diesem Frequenzbereich liegen, wurden bei einem Teil der Siedeversuche die Grenzfrequenzen um Faktor 100 zurückgeschaltet. Unbefriedigend blieb die Tatsache, daß die Verstärkungsfaktoren infolge Übersteuerung durch die hohen Störampplituden auf relativ niedrige Werte eingestellt werden mußten, was entsprechend niedrige Signal- zu Rauschabstände zur Folge hatte.

An dieser Stelle soll ausdrücklich darauf hingewiesen werden, daß die bei den Versuchen aufgetretenen elektrischen Störungen zumindest was ihre Amplitude betrifft spezifisch für die Experimente mit dem elektrischen Siedegenerator sind und nicht als allgemein typisch für natriumgekühlte Reaktoren angesehen werden können.

## **4 Signalverarbeitung**

### **4.1 Signalaufbereitung und Störungsunterdrückung**

Die Auswertung der gemessenen Daten erfolgte ausschließlich off-line. Um umfassende Möglichkeiten der Datenmanipulation zur Verfügung zu haben, wurden die Meßsignale nach einer Vorselektion digitalisiert, auf Digitalbändern abgelegt und an der Großrechenanlage ausgewertet.

Den die Schallsignale überlagernden Störspitzen muß bei der Auswertung erhebliche Aufmerksamkeit gewidmet werden. Eine detaillierte Spektralanalyse der in den Stopfen gemessenen Siedesignale zeigt, daß die Siedegeräusche hauptsächlich im Frequenzbereich von etwa 3 bis 30 kHz auftreten (s. Abb. 5). Dieser Bereich liegt unterhalb der Grenzfrequenz der bei einem Teil der Versuche zur Störungsunterdrückung eingesetzten Hochpaßfilter. Das bedeutet, daß bevorzugt die Signale ausgewertet werden müssen, bei denen die Grenzfrequenzen herabgesetzt waren.

Eine erste Maßnahme, die Störungsamplitude abzuschwächen, ist eine den spektralen Verteilungen der Siedegeräusche bzw. der Störungen angepaßte Hochpaßfilterung. Für die im Oberplenum des Reaktors gemessenen Signale führt eine Grenzfrequenz von 10 kHz zu einer Verbesserung des Signal- zu Störabstandes. Bei den Signalen aus der Core-Randzone muß wegen des höheren Anteiles tiefer Frequenzen die Grenzfrequenz mit 3 kHz festgesetzt werden.

### **4.2 Signalanalyse- Verfahren**

Die hohen Signalfrequenzen der Geräusche erfordern bei deren Analyse sehr hohe Abstraten. Daher ist die Reduktion der Datenmenge bzw. eine Komprimierung des Informationsinhaltes als eine der wichtigsten Aufgaben aller Signalanalyse- Verfahren anzusehen. Die Signalinformation ist im wesentlichen in den Größen Amplitude, Frequenz und Generierungsrate einzelner Siedeereignisse enthalten.

Für einen ersten Überblick über den Signalverlauf während einiger Sekunden ist die Darstellung des RMS- Wertes (root mean square) ein effizientes Werkzeug, da damit eine erhebliche Reduzierung der Datenmenge verbunden ist. Das Maß dieser Reduzierung ist eine Funktion der Zeitkonstanten, d.h. der Integrationszeit für jeweils einen RMS- Wert. Diese Zeitkonstante ist der Dauer transienter Schallereignisse angepaßt einzustellen. Als Erfahrungswert für die Dauer eines von einem einzelnen Blaskollaps erzeugten Schallimpulses können etwa 2 bis 10 ms angesehen werden.

Stellt man ein mit den - für die Experimente mit dem Siedegenerator typischen - nadel-förmigen Störungen überlagertes Signal als RMS- Wert dar, so erhält man nur dann ein befriedigendes Ergebnis, wenn die Integrationszeit ein ganzzahlig Vielfaches der Periodendauer des Störmusters beträgt. In diesem Fall ist das Störsignal in jedem einzelnen RMS- Wert in gleicher Weise enthalten. Da bei der Bildung des RMS- Wertes die Phaseninformation verloren geht, kann aufgrund der Spiegelsymmetrie des Störmusters als dessen Periodendauer 10 ms angesetzt werden.

Eine aussagekräftigere, allerdings auch aufwendigere Form der Signaldarstellung bietet die Frequenzanalyse. Um frequenzabhängige Veränderungen eines Schallsignales als Funktion der Zeit sichtbar zu machen, ist es zweckmäßig, das Signal in einzelne gleich-lange Abschnitte aufzuteilen, von jedem Abschnitt die spektrale Leistungsdichte zu be-rechnen und die Spektren dreidimensional darzustellen. Bei dieser Analysetechnik be-kommt die Wahl der Länge der einzelnen Signalabschnitte eine entscheidende Bedeu-tung. Die Phasenlage der Signalabschnitte bezogen auf die Phasenlage des Störsignals muß in allen Abschnitten exakt gleich sein. Da die Störungskomponente des Signales nach Betrag und Phase in das Spektrum eingeht, muß hier als Periodendauer des Stör-signales eine volle 50 Hz- Welle, also 20 ms angesetzt werden. Die Startpunkte der Si-gnalabschnitte bezogen auf das Störmuster müssen sehr präzise festgelegt werden. Be-reits eine Abweichung der Phasenlage um etwa 10 Bogenminuten - entsprechend einer Zeitdifferenz von ca. 10  $\mu$ s - von Abschnitt zu Abschnitt bewirkt eine signifikante Ände-rung der spektralen Verteilung. Anhand eines stationären Signals läßt sich zeigen, daß diese Änderung ausschließlich auf den von Abschnitt zu Abschnitt unterschiedlichen Beitrag der Störungskomponente des Signals zurückzuführen ist.

Zur Bestimmung der genauen Periodendauer der Störung wird das Signal einer Auto-korrelation im Zeitbereich unterzogen. Die Autokorrelation trennt periodische von stati-stischen Signalanteilen. Als eine Funktion der Zeit besitzt die Autokorrelation eines Si-gnales mit periodischem Anteil relative Maxima zum Zeitpunkt Null sowie bei allen ganzzahlig Vielfachen der Periodendauer.

Da das Störsignal wie oben erwähnt netzsynchron ist, erscheint die Bestimmung ihrer Periodendauer zunächst trivial. Bei der Auswertung zeigte sich jedoch, daß eine feste Länge der Signalabschnitte von 20 ms kein befriedigendes Ergebnis liefert. Die mittels der Autokorrelation bestimmte Periodendauer liegt meist bei ca. 19.98 ms, also 20  $\mu$ s unter dem Nominalwert. Die Ursache dafür dürfte einerseits die nie absolut konstante Netzfrequenz selbst sein, andererseits entstehen bei der Digitalisierung der Meßdaten infolge geringfügiger Ungenauigkeiten der Bandgeschwindigkeit weitere Frequenzab-weichungen. Die sich daraus ergebende Konsequenz ist eine genaue Bestimmung der Periodendauer des Störsignales zur Festlegung der Länge der Signalabschnitte bei der Frequenzanalyse.

Zur direkten Eliminierung der Störung ist die Autokorrelation in diesem Anwendungsfall nicht geeignet. Sie unterdrückt statistische Signalanteile und hebt dadurch periodische Anteile hervor. Im vorliegenden Fall wäre jedoch genau die umgekehrte Wirkung erforder-lich.

## 5 Siedegeräusche bei unterschiedlichen Kühlmitteldurchsätzen

Die Siedeeperimente in der KNK II wurden bei Kühlmitteldurchsätzen zwischen 12 und 49% des Nenndurchsatzes durchgeführt. Die Tab. 2 gibt einen Überblick über die Versuchsparameter aller durchgeführten Siedeversuche. Die dabei gemessenen Geräusche sollen innerhalb des vorliegenden Berichtes anhand von drei Einzelversuchen mit Kühlmitteldurchsätzen von 12, 29 bzw. 49% vorgestellt werden. Der Versuch SG12 bei 12% Durchsatz nimmt dabei eine Sonderstellung ein, da die hier gemessenen Siedegeräusche mit erheblich größerer Intensität als bei allen anderen Versuchen auftraten.

Bei allen Versuchen wurde lokales Sieden durch schrittweise Erhöhung der Heizleistung bei konstantem Kühlmitteldurchsatz eingeleitet. Durch weitere Steigerungen der Heizleistung wurde das Sieden intensiviert.

Charakteristisch für alle Versuche mit dem Siedegenerator ist die Form, in der lokales Sieden auftrat. Im gesamten durch die Experimente abgedeckten Durchsatzbereich wurden einzelne Dampfblasen generiert, deren Rekondensation einzelne Schallimpulse - sogenannte Bursts - erzeugte.

### 5.1 Siedegeräusche bei 49% Durchsatz

Abb. 6 zeigt den Verlauf dreier Schallsignale in verschiedenen Meßpositionen während einiger Sekunden um den Zeitpunkt des Siedebeginns. Die Geräusche sind als RMS-Wert dargestellt. Bei Beginn des lokalen Siedens liegt die Blasengenerierungsrate bei etwa fünf pro Sekunde, was aus dem im Siedegenerator gemessenen Schallsignal S1/SG zu entnehmen ist. Dieser Vorgang wird von dem im Stopfen 511 befindlichen Sensor M1 mit sehr guter Übereinstimmung wiedergegeben. Mit den Sensoren im Oberplenum hingegen sind lediglich die intensiveren Blaskollapse wahrzunehmen. Die Generierungsrate dieser auch außerhalb des Kerns detektierbaren Siedeereignisse liegt bei etwa 0.5 pro Sekunde.

In der Abb. 7 ist ein in drei unterschiedlichen Positionen gemessener einzelner Siedeburst als Funktion der Zeit dargestellt. Die Länge der durch einzelne Blaskollapse erzeugten Burstsignale ist etwa 5 ms. Die intensivsten Siedeereignisse bewirken an den Sensoren im Oberplenum Signalamplituden von etwa dem doppelten Untergrundpegel.

Die Laufzeit der Schallimpulse von der Siedezone zum Stopfen 511 in der Kernrandposition ist ca. 270  $\mu$ s, was einer Schallgeschwindigkeit von ca. 1580 m/s entspricht. Die Laufzeit zum Sensor S3/621 im Oberplenum beträgt etwa 870  $\mu$ s, entsprechend einer Schallgeschwindigkeit von rund 2040 m/s. Die Schallgeschwindigkeit von gasfreiem Natrium liegt bei 2300 m/s. Für Longitudinal- bzw. Transversalwellen in Stahl gelten Werte von 5800 bzw. 3350 m/s. Aus den gemessenen Laufzeiten ist deshalb zu schließen, daß die Schalleitung vom Siedeort zu den Sensorpositionen in den Stopfen hauptsächlich durch das Kühlmittel erfolgt. Desweiteren kann daraus abgeleitet werden, daß die Schallwellen nicht unbedingt dem kürzesten Weg folgen, sondern Reflexionen und Streuungen an den Kästen und Bündeln der Kernelemente unterworfen sind.

Die in unmittelbarer Nähe der Siedezone gemessenen Siedegeräusche sind wie erwartet breitbandig, die höchsten darin enthaltenen Frequenzen liegen oberhalb 100 kHz (s. Abb. 8). Im Spektrum des - zu diesem Zeitpunkt gefilterten - Signales S3/511 (Abb. 9 unten) ist als Antwort auf den Blaskollaps lediglich eine geringfügige Signaländerung zu beobachten. Sie ist jedoch im Spektrum besser zu erkennen als im Verlauf des entsprechenden Zeitsignals. Die durch den Blaskollaps verursachte Signaländerung beschränkt

sich auf den Frequenzbereich unterhalb 30 kHz. Im Spektrum des im Oberplenum gemessenen Signales S3/621 schlägt sich das Ereignis im Frequenzbereich 20 bis 40 kHz nieder (Abb. 9, mittleres bzw. oberes Diagramm enthält das selbe Spektrum aus zwei verschiedenen Richtungen betrachtet).

Eine höhere Stabileistung bewirkt etwas größere Amplituden der Siedesignale sowie eine höhere Burstrate. Da die Grenzfrequenzen der Hochpaßfilter zu diesem Zeitpunkt zurückgeschaltet waren, führen die Siedegeräusche auch an den Sensoren am Kernrand zu etwas höheren Signalpegeln (s. Abb. 10 u. 11). Die Amplituden der dem Nutzsignal überlagerten Störspitzen sind höher als die der Siedebursts, eine Unterscheidung ist jedoch aufgrund der Form der Nadeln sowie ihrer Periodizität möglich. Daraus ist zu erkennen, daß bei einem akustischen Kernüberwachungssystem der alleinige Vergleich des Momentanwerts der Geräuschamplitude mit einem Schwellwert zur Erkennung auftretenden Siedens nicht ausreichend wäre.

Das Spektrum des ungefilterten Signals an der Siedezone zeigt, daß auch unterhalb 20 kHz erhebliche Signalanteile vorhanden sind (s. Abb. 12). Bevorzugt in diesem Frequenzbereich erfolgt der Schalltransport in radialer Richtung zum Stopfen 511. Dies wird aus den in der Abb. 13 dargestellten Spektren der am Kernrand gemessenen Siedegeräusche sichtbar. Damit wird auch verständlich, daß aufgrund der zu diesem Zeitpunkt nicht wirksamen Hochpaßfilterung das Signal- zu Rauschverhältnis besser als bei aktivierter Filterung ist. An den im Oberplenum gemessenen Signalen hingegen wird durch den Wegfall der Filterung das S/N- Verhältnis verschlechtert. Ein Vergleich der Leistungsdichtespektren eines gefilterten und eines ungefilterten Signales - beide im Oberplenum gemessen - geht aus Abb. 14 hervor. Die dargestellten Spektren repräsentieren das gleiche Siedeereignis, aufgenommen mit benachbarten Sensoren, wobei die Aufnehmer S2/621 und S3/621 von gleicher Bauart sind. In der Signalkette S2 war das Hochpaßfilter ausgeschaltet, das Signal S3 ist gefiltert.

Deutliche, auf Frequenzen unterhalb 30 kHz beschränkte Siedesignale sind mit je einem magnetostriktiven Sensor am Kernrand bzw. im Oberplenum zu messen. Da diese Signale von den elektrischen Störungen nicht beeinträchtigt waren, konnte hier auf eine Filterung verzichtet werden.

## **5.2 Siedegeräusche bei 29% Durchsatz**

Ein Vergleich der Spektren des Quellsignals bei unterschiedlicher Siedeintensität zeigt, daß die Frequenzverteilung nicht signifikant unterschiedlich ist (s. Abb. 15). Größere zusammenhängende Frequenzbereiche, in denen die Siedegeräusche bevorzugt auftreten, verschieben sich nicht. Die Frequenzen einzelner schmaler Leistungsdichtespitzen sind zwar unterschiedlich, diese Variationen treten jedoch von Burst zu Burst auf und sind nicht nur typisch für eine Änderung der Siedeintensität. Die höhere Siedeintensität bei 29% Durchsatz beruht auf einem größeren Verhältnis von Stabileistung zu Durchsatz.

Von der Intensität der Siedegeräusche noch weniger beeinflusst werden die Leistungsdichteverteilungen der am Kernrand bzw. im Oberplenum gemessenen Signale (s. Abb. 16 u. 17). Diese werden mehr von der Übertragungsfunktion der Schalleitungsstrecke als vom Quellsignal selbst geprägt.

Da das im Oberplenum gemessene Siedegeräusch vorwiegend im Frequenzbereich 10 bis 50 kHz liegt und die Störung seine größte Leistungsdichte unterhalb ca. 15 kHz hat, wird durch eine Hochpaßfilterung - in diesem Falle bei der Auswertung numerisch durchgeführt - das Siedesignal im Spektrum deutlich besser sichtbar. Als Grenzfrequenz

wurde hier angepaßt an die Leistungsdichteverteilung des Siede- bzw. Störsignals 10 kHz gewählt. In Abb. 18 sind die Spektren eines zunächst ungefilterten und dann gefilterten Siedebursts einander gegenübergestellt. Durch diese Maßnahme werden auch schwache Signaländerungen sichtbar, die im ungefilterten Signal aufgrund des hohen Störpegels nicht wahrnehmbar sind.

### 5.3 Signaldarstellung als S/N- Verhältnis

Eine Betrachtung der Spektren der ungefiltert aufgezeichneten Geräusche zeigt, daß der Betrag der Signaländerung aufgrund lokalen Siedens klein gegenüber dem Untergrundsignal ist. Die Darstellung der relativen Signaländerung, d. h. des S/N- Verhältnisses unterdrückt die konstanten Leistungsdichteanteile, vornehmlich die der Störungen. Diese Bezugnahme auf den Untergrund wird im Frequenzbereich vorgenommen, d. h. die Leistungsdichtewerte jedes einzelnen Spektrums einer fortlaufenden Serie werden durch die entsprechenden Leistungsdichtewerte des Backgroundspektrums dividiert. Als Background könnte ein Spektrum benutzt werden, das manuell ausgewählt wurde und in dem mit Sicherheit kein Siedeereignis enthalten ist. Über einen kurzen Zeitraum hinweg betrachtet wäre dies zulässig, wenn die Bedingung der identischen Phasenlage bezüglich des Störsignals für das Backgroundsignal einerseits sowie die fortlaufenden Signalabschnitte andererseits erfüllt ist. Im Falle einer längeren kontinuierlichen Observierung eines Signales wäre eine Anpassung des Referenzspektrums an den sich eventuell langsam ändernden Background nötig. Ursache einer Änderung des Untergrundsignals könnte z.B. eine Änderung der Drehzahl der Hauptkühlmittelpumpen, von welchen die elektrischen Störungen beim Siedeexperiment ausgingen, oder aber eine - wenn auch geringfügige - Änderung der Netzfrequenz und damit der Phasenlage der Störspitzen sein. Eine Möglichkeit, das Referenzspektrum an langsame Veränderungen anzupassen, wäre die Führung eines gleitenden Mittelwertspektrums:

$$M_i(f) = (1-k) * M_{i-1}(f) + k * A_i(f)$$

mit

- $M_i(f)$  : Gleitendes Mittelwert- Leistungsdichtespektrum
- $A_i(f)$  : Aktuelles Leistungsdichtespektrum
- $k$  : Wichtungsfaktor
- $i$  : Laufende Nummer der einzelnen Spektren
- $f$  : Frequenz

Stellt man das S/N- Verhältnis als den Quotienten:

$$S/N = A_i(f) / M_i(f)$$

dar, so erzielt man eine deutliche Steigerung der Empfindlichkeit des Meßsystems. Der Erfolg einer derartigen Signalbehandlung ist in der Abb. 19 anhand eines im Oberplenum gemessenen Schallsignals dargestellt. Eine Filterung der Signale vor der Berechnung des S/N- Verhältnisses erübrigt sich, da der - konstante - Störungsanteil bei diesem Verfahren eliminiert wird.

#### 5.4 Siedegeräusche bei 12% Durchsatz

Bei einem der ersten Siedeveruche, durchgeführt bei 12% Kühlmitteldurchsatz, hatten die in den Stopfen gemessenen Schallsignale ein wesentlich besseres S/N- Verhältnis als in allen anderen Versuchen davor und danach. Abb. 20 zeigt den Verlauf einiger Schallsignale an verschiedenen Meßpositionen, dargestellt als RMS- Werte. Die Siedegeräusche treten dabei so deutlich hervor, daß zu ihrer Detektion eben diese RMS- Darstellung genügen würde. Bei fünf weiteren Versuchen mit gleichem Durchsatz wurden die Signalqualitäten dieses Versuchs SG12 nicht mehr erreicht.

Bezüglich der Burstlänge und Burstform unterscheiden sich die hier beobachteten Signale nicht von den in anderen Versuchen gemessenen (s. Abb. 21). Auch die spektralen Verteilungen der an der Quelle bzw. in den Stopfen gemessenen Siedegeräusche sind mit denen aus anderen Versuchen weitgehend identisch (s. Abb. 22 u. 23). Zu beachten ist, daß hier alle Signale bei der Aufzeichnung mit Hochpaßfiltern behandelt wurden.

Eine denkbare Erklärung dieses vom Normalfall abweichenden S/N- Verhältnisses ist der Gasgehalt des Natriums. Dieser ist in der KNK II weder meß- noch beeinflussbar. Bekannt ist jedoch die Tatsache, daß in den Plena der Primärpumpen Schutzgas in das Natrium eingetragen wird.

Da bei diesem Versuch SG12 die zu erwartenden Signalamplituden noch nicht genau bekannt waren, sind die im SG gemessenen Siedebursts aufgrund zu hoch eingestellter Verstärkungsfaktoren übersteuert. Dadurch kommt es zu Verfälschungen des Frequenzspektrums. Die Leistungsdichtespitze im niederfrequenten Bereich des Spektrums von S1/SG (Abb. 22 unten) ist auf eine derartige Verfälschung zurückzuführen. Abb. 22 oben zeigt das Spektrum des selben Siedebursts nach einer (numerischen) Hochpaßfilterung des Signals.

Wegen der Verfälschung der Referenzspektren infolge Übersteuerung wurde auf die Ermittlung der akustischen Transferfunktion für diesen Versuch verzichtet.

#### 5.5 Ähnlichkeit der Siedesignale benachbarter Sensoren

Oben wurde bereits erwähnt, daß die spektrale Verteilung der Quellsignale von Ereignis zu Ereignis variiert. Eine noch stärkere Abweichung ist zwischen den Spektren der Signalantwort auf ein und dasselbe Ereignis, aber von zwei verschiedenen am SG- Bündel installierten Sensoren zu beobachten (s. Abb. 24). Beide Sensoren sind von gleichem Type und gleicher Bauform. Die Ankopplung ist bezüglich des Abstandes von der Bündelmitte, der axialen Lage sowie der Art der Befestigung vollkommen gleich.

Berücksichtigt man die Tatsache, daß die Siedezone nicht in der Mitte des Bündels lag, da wegen des Defektes an Heizstäben nur mit einer asymmetrisch angeordneten Gruppe von Stäben geheizt wurde, dann wird verständlich, daß die Entfernungen der beiden Sensoren im SG zur Siedezone unterschiedlich gewesen sein dürfte. Bei einem Abstand von nur wenigen Zentimetern kann der prozentuale Entfernungsunterschied beträchtlich sein. Von Bedeutung sind diese spektralen Verteilungsunterschiede der beiden Quellsignale bei der Bestimmung der akustischen Transferfunktion des Reaktorkerns, da hierbei das Quellgeräusch als Referenz benutzt wird.

Die Ähnlichkeit der am Kernrand und im Oberplenum (s. Abb. 25) gemessenen Spektren ist hingegen größer. Jeweils einige Leistungsdichtespitzen sind in mehreren aus den jeweiligen peripheren Positionen stammenden Signalen enthalten. Dieser Effekt bestätigt die Bedeutung der Übertragungsfunktion entlang des Schalleitungsweges.

## 6 Akustische Übertragungsfunktion

Wie eingangs schon erwähnt, war das wesentliche Ziel der Siedeexperimente mit dem Siedegenerator die meßtechnische Bestimmung der Transferfunktion der Schallübertragungstrecke vom Reaktorkern zu Positionen, die auch in Leistungsreaktoren mit Schallsensoren ausgerüstet werden können. Die Transferfunktion als frequenzabhängige Größe soll Auskunft darüber liefern, welcher Dämpfung ein durch lokales Sieden generiertes Schallsignal auf dem Weg von der Siedezone zum Sensor unterworfen ist. Obwohl bezüglich einer Anwendung in kommerziellen Brutreaktoren als Einsatzort von Schallsensoren nur das Austrittsplenum realistisch ist, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auch die Transferfunktion zu den Meßpositionen am Kernrand, also quer zu den Kernelementen ermittelt.

Die Transferfunktion ist definiert als Quotient der Fouriertransformierten des in einer Stopfenposition gemessenen Siedesignales und der des entsprechenden an der Geräuschquelle gemessenen Referenzsignales:

$$G(f) = \text{FFT}(S_x) / \text{FFT}(S_q)$$

Um den Einfluß des Untergrundgeräusches, das sich an den peripheren Meßpositionen von demjenigen im Stabbündel erheblich unterscheidet zu eliminieren, ist als Eingangssignal für die Fouriertransformation zur Berechnung der Transferfunktion jeweils ein diskreter Siedeburst zu wählen. Die in den vorhergehenden Kapiteln ausführlich beschriebenen nadelförmigen Störungen dürfen dem Eingangssignal dabei nicht überlagert sein. Da jedoch praktisch keine Siedebursts in ihrer ganzen Länge unbeeinflusst von Störspitzen zu finden waren, mußte ein Verfahren gefunden werden um diese zu eliminieren.

Die Störungen treten wie oben gezeigt wurde synchron zum Netz und damit periodisch auf. Außerdem ist die Form der Störsignale von Periode zu Periode sehr ähnlich. Das bedeutet, daß die Fourierspektren einzelner Signalabschnitte des Backgroundsignals gleich sind, wenn diese Abschnitte eine identische Phasenlage bezüglich der Störung - d. h. bezüglich der Netzfrequenz - haben. Die Länge der verwendeten Signalabschnitte spielt hierbei keine Rolle, wohl aber der zeitliche Abstand zwischen zwei zu analysierenden Abschnitten.

Zur Kompensation der Störung wird nun folgendermaßen vorgegangen: Zunächst wird ein Signalabschnitt ausgewählt, in dem mit allen Sensoren, für die die Transferfunktion berechnet werden soll ein deutlicher Siedeburst gemessen wurde. Die Länge des Abschnittes wird der Burstlänge angepaßt, sie beträgt typisch etwa 5 ms. Dann wird ein Signalabschnitt ausgewählt, in dem mit Sicherheit kein Siedeereignis liegt. Der Abstand der beiden Abschnitte - Siedeburst bzw. Background - muß exakt ein ganzzahlig Vielfaches der Periodendauer des Störsignales sein. Die Länge des Backgroundabschnittes ist gleich der des Burstabschnittes zu setzen. Sodann wird von beiden Signalabschnitten die Fouriertransformierte berechnet. Das Resultat der Subtraktion des Backgroundspektrums vom Burstspektrum stellt das von der elektrischen Störung isolierte Siedesignal dar. Da die Fouriertransformierte eine komplexe Größe ist, muß auch die Störungskompensation als komplexe Subtraktion durchgeführt werden. Zur Kontrolle des Erfolges dieser Kompensation kann das Spektrum des entstörten Signales wieder in den Zeitbereich zurücktransformiert werden. In den Abb. 26 und 27 sind Beispiele von ursprünglichen bzw. kompensierten Signalen einander gegenübergestellt.

Die genaue Periodendauer des Störsignals wird - wie in Kapitel 4 schon beschrieben - mittels der Autokorrelation bestimmt. Bei der Kompensation der Störungen ist die Seg-

mentierung des Eingangssignales unter Benutzung der exakten Periodendauer von größter Bedeutung. Beim Test des Kompensationsverfahrens hat sich gezeigt, daß bei der Festlegung der Signalabschnitte eine Abweichung von nur einem Punkt - entsprechend  $t = 5 \mu s$  - gegenüber dem tatsächlichen Wert der Periodendauer das Ergebnis der Kompensation erheblich verschlechtert.

Zur Bestimmung der Transferfunktion vom Core zu den verschiedenen Sensorpositionen werden nun die entstörten Spektren der in den Stopfen gemessenen Signale durch das zugehörige Referenzspektrum dividiert. Da die Spektren komplexe Größen sind, ist eine komplexe Division durchzuführen. Auch das Ergebnis, die Transferfunktion ist komplex. Sie wird zweckmäßigerweise getrennt nach Betrag und Phase dargestellt. Der Betrag gibt die Dämpfung an, in der Phase sind Informationen über die frequenzabhängige Phasendrehung, oder anders ausgedrückt über die Laufzeit der Schallwellen enthalten. Aufgrund frequenzabhängiger Streuungen und Reflexionen der Schallwellen im Kern ist die Kohärenz der im Siedegenerator bzw. in den Stopfen gemessenen Signale sehr gering. Dies hat zur Folge, daß die Phase der Transferfunktion zu einer nicht signifikanten und damit nicht interpretierbaren Größe wird. Die vorliegenden Phasenverläufe weisen denn auch im gesamten analysierten Frequenzbereich keinerlei Stetigkeit auf. Da jedoch die Übertragungsfunktion lediglich Auskunft über die Schalldämpfung im Kern geben soll und nicht etwa zur Rekonstruktion des Quellsignals aus dem an der Peripherie gemessenen Signal dienen soll, ist die fehlende Benutzbarkeit der Phase von untergeordneter Bedeutung.

Die spektrale Leistungsdichteverteilung der beiden an der Geräuschquelle gemessenen Siedesignale ist - wie oben bereits erwähnt - etwas unterschiedlich. Aus diesem Grund wurde zur Bestimmung der Übertragungsfunktion als Referenz das durch Überlagerung beider Einzelspektren gewonnene Mittelwert-Spektrum benutzt.

Bei der Berechnung der Transferfunktion wurde unterstellt, daß die Empfindlichkeiten und Frequenzgänge der Sensoren in den Stopfen bzw. im Siedegenerator gleich sind. Alle im IRE gefertigten  $\text{LiNbO}_3$ - Sensoren wurden vor dem Einbau einer Eichung unterzogen. Die einzelnen Sensoren einer Fertigungscharge weisen erfahrungsgemäß gleiche Absolut- Empfindlichkeiten auf. Aus dieser Menge wurden Exemplare mit sehr ähnlichen Frequenzgängen für den Einsatz in den Stopfen bzw. im Siedegenerator ausgesucht. Somit ist die Forderung nach identischen Empfindlichkeiten erfüllt. Die Abb. 28 zeigt den typischen Verlauf der Empfindlichkeit eines Schallsensors als Funktion der Frequenz.

Die berechneten Transferfunktionen sind innerhalb des Frequenzbereiches signifikant, in welchem mit den entsprechenden Sensoren an der Peripherie ein aus dem Backgroundgeräusch herausragendes Siedesignal zu beobachten ist. Dieser Gültigkeitsbereich reicht für das Oberplenum bis etwa 40 kHz, für den radialen Weg zum Kernrand bis ca. 30 kHz. Außerhalb dieses Bereiches gibt der Quotient aus den Geräuschen in den Stopfen und dem Quellgeräusch lediglich die Relation zwischen den Untergrundsignalen außerhalb bzw. innerhalb des Kerns an. Bei der Betrachtung der spektralen Verteilung der Übertragungsfunktion ist zu berücksichtigen, daß deren untere Grenzfrequenz durch die Grenzfrequenz der Verstärker erzwungen wird, welche fest eingestellt 2 kHz beträgt.

## 6.1 Übertragungsfunktion zum Oberplenum

Anhand der Spektren der Siedegeräusche kann erwartet werden, daß der Übertragungsfrequenzbereich der Strecke vom Kern zum Oberplenum zwischen etwa 2 und 40 kHz liegt. Diese Annahme wird von den in Abb. 29 dargestellten Transferfunktionen bestätigt. Sie wurden aus Siedesignalen berechnet, welche mit zwei im Stopfen 621 im Oberple-

num befindlichen Sensoren bei einem Kühlmitteldurchsatz von 49% gemessen wurden. Die Hochpaßcharakteristik der Transferfunktion für den Sensor S3/621 ist lediglich auf das bei diesem Versuch nicht ausgeschaltete Filter zurückzuführen.

Die Schalldämpfung des Reaktorkerns wird wie in der Akustik allgemein üblich in Dezibel (dB), einer logarithmischen Darstellung angegeben. Jeweils -20 dB entsprechen einer Dämpfung um den Faktor 0.1.

Die Dämpfung der Siedegeräusche von der Siedezone zu den Meßpositionen im Oberplenum beträgt im Übertragungsbereich im Mittel etwa -35 dB mit leicht fallender Tendenz zu höheren Frequenzen hin. Diese Dämpfung von -35 dB entspricht einem linearen Faktor von etwa 1/55.

In der Abb. 30 sind die für einen Kühlmitteldurchsatz von 29% ermittelten Transferfunktionen dargestellt. Abgesehen von der auf die Benutzung eines Filters bei der Messung zurückzuführenden Hochpaßcharakteristik der Kurve für S3/621 bei 49% sind die Übertragungsfunktionen bei verschiedenen Durchsätzen nicht signifikant unterschiedlich (vergl. Abb. 29 u. 30). Die dennoch bestehenden, kleinen Unterschiede sind mehr auf die von Ereignis zu Ereignis variierenden Referenzspektren als auf die Transferfunktion selbst zurückzuführen. Die akustische Transferfunktion zwischen Core und Oberplenum kann also - zumindest im Durchsatzbereich bis 49% - als durchsatzunabhängig angesehen werden.

## 6.2 Übertragungsfunktion zum Kernrand

Wie aus den Leistungsdichteverteilungen der am Kernrand gemessenen Siedegeräusche zu erwarten ist, liegt der Übertragungs- Frequenzbereich des Kerns für die radiale Schallausbreitung zwischen 2 und 30 kHz. Die Abb. 31 zeigt die für zwei Meßpositionen im Stopfen am Kernrand ermittelten Transferfunktionen, gültig für einen Kühlmitteldurchsatz von 49%. Die mittlere Dämpfung im Übertragungsbereich beträgt etwa -35 dB. Verglichen mit der Transferfunktion zum Oberplenum weist diejenige in radialer Richtung eine größere Frequenzabhängigkeit innerhalb des Übertragungsbereiches auf. Ein Vergleich der Dämpfungsverläufe für beide Sensoren am Kernrand läßt auch eine stärkere Ortsabhängigkeit der Transferfunktion erkennen, als dies bezüglich der Meßpositionen im Oberplenum der Fall ist. Die Streckendämpfung, also die auf die Länge der entsprechenden Schallstrecke bezogene Dämpfung ist hier erheblich größer als entlang des Weges zum Oberplenum. Die Ursache dafür dürfte die wesentlich stärkere Streuung sein, die beim Durchlaufen der Schallwellen durch die Stabbündel der Kernelemente quer zu deren Richtung zustande kommt.

Die Transferfunktion zum Kernrand ist wie diejenige zum Oberplenum nicht signifikant vom Kühlmitteldurchsatz abhängig.

## 7 Untergrundgeräusche

Bezüglich eines akustischen Kernüberwachungssystemes ist die Kenntnis der Untergrundgeräusche von sehr großer Bedeutung. Der Hauptanteil der Backgroundsignale resultiert aus den Strömungsgeräuschen des Kühlmittels sowie den Laufgeräuschen der Kühlmittelpumpen. Einen weiteren Beitrag zum Background stellen in jeder technischen Anlage vorkommende Störsignale dar. Der Pegel und die spektrale Zusammensetzung dieser stationären Untergrundsignale beeinflusst die Detektierbarkeit von Kühlmittelsieden. Daneben sind aber auch transiente Nebengeräusche zu berücksichtigen, die z.B. bei

Handhabungsarbeiten durch auf gut schalleitende Strukturteile des Reaktors fallende Gegenstände verursacht werden können. Diese Art von Nebengeräuschen könnten eine ähnliche Signalantwort an den Sensoren im Plenum hervorrufen wie die ebenfalls pulsartigen Siedegeräusche. Damit wäre die Sicherheit eines akustischen Überwachungssystems gegenüber Fehlalarmen beeinträchtigt.

Aus diesem Grund wurden neben den eigentlichen Siedeversuchen auch Messungen von Untergrundgeräuschen sowohl stationärer wie transienter Natur durchgeführt. Die Backgroundgeräusche wurden mit allen verwendeten Sensoren gemessen, hier soll die Diskussion jedoch auf die im Oberplenum registrierten Signale beschränkt bleiben.

Da diese Messungen ohne elektrische Heizung mit dem Siedegenerator erfolgten, entsprechen die dabei gemessenen Untergrundsignale prinzipiell in etwa denen, die in jeder Reaktoranlage zu erwarten sind. Dies gilt sowohl für die akustischen Anteile als auch für die elektrischen Störungen.

### **7.1 Durchsatzabhängige Strömungsgeräusche**

Die Analyse der Backgroundgeräusche zeigt, daß diese im Durchsatzbereich bis 60% praktisch identisch sind. Erst oberhalb dieser Marke steigt der Backgroundpegel im Oberplenum an (s. Abb. 32). Dieser Anstieg der Signalamplitude ist beschränkt auf Frequenzen unterhalb etwa 10 kHz. Diese Tatsache wirkt sich auf die Detektierbarkeit von Kühlmittelsieden günstig aus, da der Frequenzbereich, in welchem im Oberplenum Siedegeräusche meßbar sind bis ca. 40 kHz reicht. Der optimale Frequenzbereich, in dem ein akustisches Überwachungssystem arbeiten müßte, liegt somit bei 10 bis 40 kHz. Diese Angabe ist allerdings typisch für die KNK II und kann nicht ohne weiteres auf andere Reaktoren angewandt werden.

### **7.2 Transiente Nebengeräusche**

Transiente Nebengeräusche wurden durch Klopfen auf die Flansche der Stopfen und des SG sowie auf den Drehdeckel des Reaktors erzeugt. Das Frequenzspektrum der mit den Piezo-Sensoren gemessenen Klopfgeräusche ist beschränkt auf den Bereich von etwa 2 bis 10 kHz (Abb. 33). Das Spektrum des mit dem magnetostriktiven Aufnehmer gemessenen Klopfsignals reicht hingegen bis rund 20 kHz. Hier - bei der Aufnahme von Körperschall, im Gegensatz zum vorwiegend flüssigkeitsgeleiteten Schall der Siedegeräusche - macht sich der unterschiedliche konstruktive Aufbau der beiden Sensortypen sowie hauptsächlich deren unterschiedliche Ankopplung an die Stopfen deutlich bemerkbar.

Die Spitzen in den Frequenzspektren der Klopfgeräusche sind mit dem Untergrundgeräusch zwischen den einzelnen Impulsen nur sehr schwach korreliert. Die Untergrundspektren weisen einen eher ebenen Verlauf auf. Eine Erklärung dafür ist die Tatsache, daß die Klopfgeräusche bei 60% Kühlmitteldurchsatz durchgeführt wurden, ausgeprägte durchsatzinduzierte Untergrundsignale jedoch erst oberhalb 60% auftreten (s. 7.1, Abb. 32). Ein Vergleich der Klopfsignale mit den Untergrundgeräuschen bei 100% Kühlmitteldurchsatz zeigt indes eine recht gute Übereinstimmung der Hauptfrequenzen. Dies gilt besonders für den Fall der Anregung des Drehdeckels. Es kann daher davon ausgegangen werden, daß die Klopfsignale die Eigenschwingungen der Experimentierstopfen wiedergeben.

Klopfen auf den Drehdeckel des Reaktors bewirkt an allen Sensoren ein Signal. Die Anregung der Stopfen selbst wird von einigen Sensoren in anderen Stopfen nicht wahrgenommen. Dies deutet darauf hin, daß die Verbindungen der Stopfen mit dem Reaktordeckel eine erhebliche akustische Dämpfung beinhalten. Eine quantitative Analyse der Signalamplituden in Abhängigkeit vom Ort der Anregung ist jedoch nicht möglich, da die Anregungsintensitäten nicht reproduzierbar und damit auch nicht untereinander vergleichbar sind.

Ein Vergleich der mit verschiedenen Sensoren im gleichen Stopfen gemessenen Klopfsignale zeigt, daß die Frequenzverteilungen etwas unterschiedlich sind. Die Unterschiede sind am größten bei Anregung des eigenen Stopfens und am geringsten bei der Anregung des Drehdeckels. Die Ursache dafür dürfte in der Kompliziertheit der Eigenschwingung des Stopfens mit mehreren Schwingungsformen und vielen orts- und frequenzabhängigen Amplitudenmaxima und Minima liegen. Dies unterstreicht die Forderung nach einer guten Kenntnis der stationären wie transienten Untergrundsignale für jede einzelne Meßposition in einem akustischen Überwachungssystem.

### **7.2.1 Unterschiede zwischen Siedegeräuschen und Körperschall**

Ein akustisches Überwachungssystem in einem Reaktor müßte in der Lage sein, Siedegeräusche von anderen, während des Anlagenbetriebs nicht ausschließbaren transienten Geräuschen zu unterscheiden. Dazu müssen dem System jedoch Merkmale mitgeteilt werden, anhand derer die Diskriminierung durchgeführt werden kann.

Ein solches Merkmal ist der Frequenzbereich, innerhalb dessen Siede- bzw. Klopfgeräusche auftreten. Da die mit den  $\text{LiNbO}_3$ - Sensoren gemessenen Siedegeräusche von Störungen im unteren Frequenzbereich überlagert sind, die Klopfgeräusche aber weitgehend störungsfrei sind, werden zu einem direkten Vergleich nicht die absoluten Leistungsdichtespektren herangezogen, sondern die S/N- Spektren. Das S/N- Verhältnis wird mittels Division des Siedespektrums durch das Backgroundspektrum gewonnen. Als Background wird ein Signalabschnitt benutzt, der keinen Siedeburst enthält und exakt eine bzw. ein ganzzahlig Vielfaches einer 50 Hz- Periode vor oder hinter dem Abschnitt mit dem Siedeburst liegt. Um Schwankungen von Ereignis zu Ereignis auszugleichen und somit die Aussagekraft der Signale zu erhöhen, wurden jeweils acht einzelne Siede- bzw. Klopfspektren pro Sensor überlagert, d. h. zu einem gemittelten Spektrum zusammengefaßt. Aus diesen Mittelwertspektren wurden dann die S/N- Spektren berechnet.

In der Abb. 34 sind die S/N- Spektren der Siede- bzw. Klopfgeräusche einander gegenübergestellt. Bei den Signalen der Piezo- Aufnehmer sind die Frequenzbereiche, innerhalb derer die unterschiedlich angeregten Geräusche auftreten klar getrennt. Diese Tatsache würde einem akustischen Diagnosesystem gestatten, die gemessenen und fouriertransformierten Burstsignale einfach einer von zwei Frequenzklassen zuzuordnen. Die mit dem magnetostriktiven Aufnehmer gemessenen Geräusche überlappen sich teilweise, da verglichen mit den Piezo- Signalen die Bandbreite der Siedesignale kleiner, die der Klopfsignale jedoch größer ist. Eine einfache Einteilung der gemessenen Signale in zwei separate Frequenzklassen ist hier also nicht ohne weiteres möglich.

Die Hochpaßcharakteristik der S/N- Spektren mit einer Grenzfrequenz von etwa 15 kHz beruht auf dem hohen Störungsanteil in den mit den  $\text{LiNbO}_3$ - Aufnehmern gemessenen Siedesignalen bzw. dem zugehörigen Schalluntergrund. Die Abb. 35 zeigt das Spektrum eines - zufällig - ungestörten Siedebursts. Verglichen mit dem gemittelten Spektrum liegt sowohl der Frequenzbereich mit dem maximalen S/N- Verhältnis als auch die untere Grenzfrequenz des Netto- Siedesignales tiefer. Da die elektrischen Störungen jedoch

nicht allgemein reaktorspezifisch sind, ist also auch mit signifikanten niederfrequenten Anteilen in den Siedesignalen zu rechnen. Diese würden in einem Diagnosesystem die Diskriminierung von transienten Nebengeräuschen erschweren oder müßten mittels eines Hochpaßfilters eliminiert werden. Diese Filterung würde zwar die Nebengeräusche - durchsatzinduzierten Background und transienten Körperschall - mehr oder weniger unterdrücken, hätte aber andererseits auch negative Konsequenzen auf die Empfindlichkeit des Meßkanals. Eine eventuelle Filterung der Signale müßte daher auf den nachfolgenden Verarbeitungsalgorithmus sowie auf die generellen Anforderungen des Systems bezüglich Empfindlichkeit und Störanfälligkeit gegenüber transienten Nebengeräuschen abgestimmt werden.

### **7.2.2 Akustische Kopplung der Instrumentationsstopfen**

Da die instrumentierten Stopfen gleichermaßen im Drehdeckel des Reaktors gelagert sind wie der die Siedegeräusche erzeugende Siedegenerator, stellt sich die Frage, inwieweit die Siedegeräusche mittels Körperschalleitung direkt vom SG auf die Stopfen und damit auf die darin installierten Sensoren übertragen werden. Da der im Drehdeckel gelagerte Siedegenerator nicht mit einem Brennelement zu vergleichen ist, diese Art der Schallübertragung in einem normalen Reaktor also auszuschließen ist, sollte die Frage nach dem Ausbreitungspfad der Siedegeräusche geklärt werden. Anhand einer Plausibilitätsbetrachtung der im Oberplenum gemessenen Siede- bzw. Klopfgeräusche soll untersucht werden, ob Körperschalleitung als wesentlicher Beitrag am Zustandekommen der im Oberplenum gemessenen Siedesignale anzusehen ist oder ausgeschlossen werden kann.

In der Abb. 36 werden die Leistungsdichtespektren von im Oberplenum gemessenem Siedegeräusch bzw. Klopfsignal verglichen. Letzteres wurde durch Anregung der SG-Struktur, d. h. mittels Klopfen auf dessen Befestigungsflansch erzeugt. In den Spektren sind alle Verstärkungen, die bei der Aufzeichnung wie auch der Verarbeitung der Signale wirksam waren berücksichtigt. Das bedeutet, daß die Signalintensitäten aus beiden Messungen miteinander vergleichbar sind. Oberhalb 10 kHz, also in dem Frequenzbereich, in welchem das Siedegeräusch mit deutlichem Abstand zum Untergrund auftritt, ist dessen Intensität größer als die des Klopfgeräusches. Aus der oberhalb 10 kHz vergleichsweise geringen Leistungsdichte des Klopfsignals kann geschlossen werden, daß zumindest der höherfrequente Anteil des im Oberplenum gemessenen Siedegeräusches nicht strukturgeleitet ist.

Diese Betrachtung wurde unter der Annahme gemacht, daß am Ort der Strukturanregung - d. h. am Flansch des Siedegenerators - die Intensität des Klopfgeräusches mindestens so groß wie die des an dieser Stelle herrschenden Siedesignales war. Diese Annahme wird durch die Tatsache gestützt, daß für die Experimentatoren die Siedegeräusche nicht direkt hörbar waren, die Klopfgeräusche hingegen laut und deutlich wahrgenommen werden konnten. Daß in den Siedegeräuschen auch Anteile im für das menschliche Ohr hörbaren Frequenzbereich liegen, geht aus der Abb. 35 hervor. Aufgrund der scharfen transienten Anregung kann desweiteren angenommen werden, daß diese Geräusche am Ort ihrer Entstehung auch im Frequenzbereich oberhalb 10 kHz deutliche Anteile aufweisen, die jedoch auf dem Weg zu den Sensoren im SG bzw. den Stopfen stärker gedämpft werden als niedrige Frequenzen.

Die Tiefpaßcharakteristik der strukturgeleiteten Geräusche ist nicht beschränkt auf die Meßpositionen, zu denen die Schallwellen die Ankopplungsstelle eines Stopfens oder des Siedegenerators zu passieren hatten. Auch die mit den Sensoren im jeweils angelegten Stopfen gemessenen mechanischen Geräusche weisen die typische Begrenzung

auf den Frequenzbereich unterhalb 10 kHz auf. Signalanteile oberhalb dieser Grenze können daher unabhängig von der Meßposition flüssigkeitsgeleitetem Schall und nicht strukturgebundenem Körperschall zugeordnet werden.

Einen weiteren Hinweis auf die mechanische Entkopplung der Instrumentationsstopfen einerseits und des Siedegenerators andererseits stellen die Signallaufzeiten vom Ort des Siedens zu den peripheren Sensoren dar (s. Kap. 5.1). Aufgrund der unterschiedlichen Schallgeschwindigkeiten in Natrium bzw. im Strukturmaterial kann ein wesentlicher Anteil einer eventuellen Strukturkopplung am Siedesignal ausgeschlossen werden.

Aus dem Ergebnis dieser Betrachtungen läßt sich ableiten, daß die Übertragung der im Reaktorkern entstandenen Siedesignale zu den Sensoren außerhalb des Kerns nicht auf SG-spezifische konstruktive Gegebenheiten beschränkt ist. Im Oberplenum erfaßbare Schallsignale, welche für eine Siededetektion ausreichen würden, sind also auch bei deren Entstehen in einem normalen Brennelement zu erwarten.

## **8 Siededetektion**

Auf der Basis der bei den Experimenten mit dem Siedegenerator in der KNK II gemessenen Geräusche soll nun das Potential eines akustischen Überwachungssystems zur Siededetektion in natriumgekühlten Reaktoren diskutiert werden. Bezüglich einer Anwendung in kommerziellen Reaktoren sind lediglich im Oberplenum installierte Sensoren von Bedeutung. Daher wird die Diskussion nur unter Benutzung der damit gewonnenen Daten geführt.

### **8.1 Siedesignale bei vollem Kerndurchsatz**

Da die Versuche bei Durchsätzen bis maximal 49% durchgeführt wurden, muß auf die Signalverhältnisse bei Nominaldurchsatz extrapoliert werden. Diese Extrapolation wird anhand der bei 49% Durchsatz gemessenen Siedegeräusche sowie der Untergrundgeräusche bei Nominaldurchsatz vollzogen. Entsprechend der Transferfunktion zum Oberplenum, die Siedesignale im Frequenzbereich bis 40 kHz erwarten läßt, bleibt die Betrachtung auf diesen Bereich beschränkt.

Beim Vergleich der Siedesignale mit den Untergrundgeräuschen sind die speziell für die Siedeveruche typischen Störungen zu berücksichtigen. Diese sind im Untergrundgeräusch bei 100% Durchsatz nicht enthalten und könnten so eine Signaländerung vortäuschen.

Zum Nachweis der Detektierbarkeit bei Nominaldurchsatz wird nun das Spektrum des Siedegeräusches bei 49% Durchsatz mit dem des Untergrundgeräusches bei Nenndurchsatz verglichen (s. Abb. 37). Als Referenzsignal zur Verdeutlichung des Anteils der elektrischen Störung dient das ebenfalls gestörte Untergrundgeräusch bei 49% Durchsatz. Dieses Referenzspektrum wurde aus einem Zeitabschnitt zwischen zwei einzelnen Siedebursts gewonnen, entspricht also dem gleichen akustischen und elektrischen Untergrund, der dem Spektrum des Siedesignals zugrunde liegt.

Die in den bei 49% Durchsatz gemessenen Signalen des Sensors S2 mit abnehmender Frequenz unterhalb 30 kHz steigende Leistungsdichte repräsentiert die Störung. Dieser Anteil ist im Signal S3 nicht vorhanden, da dieses mit einer Hochpaßfilterung ( $f_u = 30$  kHz) versehen war. Diese Filterung dämpft jedoch auch einen Teil des Siedesignales. Das die elektrischen Störungen beinhaltende Untergrundgeräusch liegt deutlich über dem rein akustischen Untergrund bei Nenndurchsatz. Siedegeräusche sind auch aus dem

störungsbedingt erhöhten Untergrundpegel heraus deutlich wahrzunehmen. Daraus kann geschlossen werden, daß auch bei Nenndurchsatz auftretendes lokales Kühlmittelsieden zu einem im Oberplenum detektierbaren Signal geführt hätte. Anhand des Signales M1 des magnetostriktiven Sensors werden die Signalverhältnisse am deutlichsten, da hier keine Störungseinflüsse zu berücksichtigen sind.

## 8.2 Eindeutige Merkmale von Siedegeräuschen

Basierend auf den Ergebnissen der Siedeexperimente in der KNK II können Siedegeräuschen bestimmte Merkmale zugeordnet werden, die eine Diskriminierung von Geräuschen anderer Herkunft ermöglichen. Ein Merkmal ist ihr Auftreten in Form einzelner Bursts mit einer vom Grad der Siedeintensität abhängigen Generierungsrate. Die Länge der Siedebursts ist von ihrer Intensität weitgehend unabhängig etwa 5 ms. Hierzu muß einschränkend erwähnt werden, daß in anderen Experimenten auch Siedeformen mit mehr homogener Blasengenerierung, also ohne transiente Einzelblasenkollapse beobachtet wurden. Als Beispiel ist Sieden in porösen Blockaden zu nennen. Als Konsequenz der spektralen Verteilungen des Quellsignals und des Untergrundgeräusches sowie der Transferfunktion vom Core zum Oberplenum sind Siedesignale im Frequenzbereich zwischen 10 und 50 kHz zu detektieren.

Von transient auftretenden Nebengeräuschen, die in einer komplexen Anlage durchaus auftreten können, und die zur Vermeidung von Fehlalarmen als nicht zu einer Kühlungsstörung gehörend erkannt werden müssen, unterscheiden sich Siedegeräusche durch unterschiedliche spektrale Verteilungen.

## 8.3 Lokalisierung von Geräuschen

Eine weitere Möglichkeit, akustische Siedesignale von Nebengeräuschen zu unterscheiden, wäre die Lokalisierung der Geräuschquelle. Außerhalb des Reaktorkernes erzeugte Signale könnten dann von einer weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden. Gleichzeitig würde diese Technik die Möglichkeit einer Ortung der Kühlungsstörung bieten.

Die Lokalisierung wird mittels Triangulation durchgeführt, d.h. durch Auswertung der Laufzeitdifferenzen eines transienten Schallereignisses zu drei an unterschiedlichen Orten befindlichen Sensoren. Dabei wird unterstellt, daß die Ausbreitung der Schallwellen vom Entstehungsort zu den einzelnen Sensoren auf dem kürzesten Weg und überall im gleichen Medium erfolgt, die Schallgeschwindigkeit auf den drei Ausbreitungspfaden also gleich ist. Anhand der vorliegenden Siede- bzw. Klopfergeräusche soll nun die Machbarkeit solch einer Schallortung untersucht werden.

Ein zur Ermittlung von zeitlichen Verschiebungen zweier statistischer Signale häufig benutztes Verfahren ist deren Kreuzkorrelation. Die Genauigkeit der damit bestimmten Differenzen der Signallaufzeiten ist abhängig von der Kohärenz der beiden zu analysierenden Signale. Die Kohärenz der an der Peripherie des Reaktorkernes gemessenen Siedegeräusche ist jedoch sehr klein (s.a. Kapitel 6). Dieser Analysetechnik kann also von vorn herein keine große Chance eingeräumt werden. Eine versuchsweise Anwendung der Kreuzkorrelation auf die im Oberplenum gemessenen Siedegeräusche führte erwartungsgemäß nicht zu einer Laufzeitdifferenz, welche dem Abstand der Sensoren entsprechen würde. Der Korrelationsfunktion ist vielmehr nur die Periodendauer der Signale, d.h. der Reziprokwert der Hauptfrequenz der Siedegeräusche zu entnehmen. Außerdem sind die Maxima der Korrelationsfunktion abhängig von der Länge des analy-

sierten Zeitabschnittes, oder anders ausgedrückt, von der Anzahl der korrelierten Wellenzüge.

Da die Laufzeitunterschiede der Siedegeräusche mittels Kreuzkorrelation infolge zu geringer Kohärenz nicht bestimmbar sind, wurde versucht, die Verzögerungen direkt den Zeitverläufen der Signale ohne Berücksichtigung deren Phasenlage zueinander zu entnehmen. Eine bessere visuelle Sichtbarkeit der Geräuschpegelanstiege erreicht man durch die zusätzliche Darstellung der sogenannten Hüllkurve, d.h. der Verbindungslinien der positiven bzw. negativen Spitzenwerte der Signale. Diese Signaldarstellung hat gegenüber dem RMS- Wert den Vorteil, daß keine Integration über der Zeit notwendig ist, was mit einer Reduzierung der zeitlichen Auflösung von Signaländerungen verbunden wäre.

Aus der Abb. 38 wird deutlich, welche Schwierigkeiten sich bei der Bestimmung der Laufzeitdifferenz ergeben: abgesehen von der geringen Amplitudendifferenz zwischen Background und Siedesignal sind die Anstiegszeiten der Signale bezogen auf deren Wellenlänge kurz, liegen andererseits jedoch bereits in der Größenordnung der zu ermittelnden Laufzeitdifferenzen. Daraus resultiert für die Bestimmung des Laufzeitunterschiedes eine erhebliche Unsicherheit.

Die Analyse einer größeren Anzahl einzelner Siedebursts ergab Laufzeitunterschiede, die prinzipiell in der Größenordnung des Wertes liegen, der aufgrund des Sensorabstandes und der Schallgeschwindigkeit in Natrium zu erwarten wäre. Die Streuung der Zeitdifferenzen ist jedoch nicht unerheblich, so daß eine sichere Lokalisierung nicht ohne weiteres möglich wäre.

Unter den gegebenen Umständen - Wellenlänge sowie Amplitude der Siedegeräusche - besteht für eine zuverlässige Lokalisierung nur dann eine Chance, wenn die Abstände zwischen den einzelnen Sensoren im Oberplenum größer sind als bei den Experimenten mit dem Siedegenerator. Diese Möglichkeit bestünde durchaus, denn die dieser Untersuchung zugrundeliegenden Mikrofone waren im selben Stopfen in einem axialen Abstand von 300 mm eingebaut. Die Signale der in einem anderen Stopfen im Oberplenum befindlichen Sensoren können - wie in 2.2 erwähnt - zu dieser Untersuchung nicht herangezogen werden.

Eine Erklärung für die Ungenauigkeit der Laufzeitdifferenzen sowie deren Streuung ist die in Kapitel 5 angedeutete Wahrscheinlichkeit, daß die Schallwellen nicht auf dem kürzesten Weg von der Siedezone zu den Sensoren an der Peripherie des Reaktorkerns gelangen. Die geringe Kohärenz der Siedegeräusche ist ein weiteres Indiz für die Annahme, daß die Schallwellen Reflexionen und Streuungen unterliegen. Diese Tatsache stellt jedoch die Einsatzmöglichkeit eines Ortungsverfahrens prinzipiell in Frage, da hierbei ein ungebrochener Ausbreitungsweg der Schallwellen unterstellt werden muß.

## **9 Schlußfolgerungen**

Die Siedeversuche in der KNK II haben gezeigt, daß lokales Sieden im Kern des Reaktors durch Messung der Geräusche im Oberplenum bzw. am Kernrand detektiert werden kann. Die dabei beobachteten Signalamplituden bzw. Signal- zu Untergrund- Verhältnisse liegen in einer Größenordnung, die Analysetechniken erforderlich machen, die über die einfache Registrierung etwa des RMS- Wertes der Signale oder einen Vergleich der Momentan- Amplitude mit einem Schwellenwert hinausgehen. Die in Form einzelner Bursts auftretenden Siedegeräusche erfordern eine durch die Bursts selbst getriggerte Analyse.

Nur mit Hilfe dieser Datenselektion ist ein ausreichend gutes Signal- zu Untergrundverhältnis zu erreichen.

Aufgrund der Erfahrungen mit Sensoren unterschiedlichen Wandlertyps und unterschiedlicher akustischer Ankopplung ist bezüglich eines Überwachungssystemes zu empfehlen, auch dort die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Aufnehmer zu kombinieren.

Der Frequenzbereich, in dem ein akustisches Überwachungssystem arbeiten müßte, liegt bei etwa 10 bis 50 kHz. Diese Feststellung muß als Ergebnis der Ermittlung der Transferfunktion des Reaktorkerns gemacht werden, obwohl die Siedegeräusche mit mehr als der doppelten Bandbreite generiert werden. Eine der besseren Abgrenzung gegenüber niedrigfrequenten Anlagengeräuschen dienende Verlagerung des Arbeitsbereiches zu höheren Frequenzen hin ist also nicht möglich. Innerhalb des Übertragungsbereichs weist die Transferfunktion keine signifikante Frequenzabhängigkeit auf.

Die experimentell ermittelte Schalldämpfung vom Kern zum Oberplenum der KNK II beträgt im Übertragungsbereich ca. -35 dB entsprechend einem linearen Faktor von 1/55. Die Abhängigkeit der Transferfunktion vom Kühlmitteldurchsatz ist gering. Bei der Übertragung der für die KNK II ermittelten Transferfunktion auf andere Anlagen ist zu berücksichtigen, daß bei einem kommerziellen Brutreaktor die Entfernung der Sensoren eines akustischen Überwachungssystemes vom Kern größer als in der KNK II sein kann.

Die Möglichkeit einer Lokalisierung der Schallquelle mit dem Ziel einer Ortung der Kühlungsstörung bzw. zur Verbesserung der Aussagekraft von transienten Geräuschen ist aufgrund der bei den Experimenten gemessenen Siedesignale als gering anzusehen.

### **Acknowledgement**

Der Autor bedankt sich bei allen Mitarbeitern, die an der Vorbereitung und Durchführung der Experimente mit wesentlichen Beiträgen beteiligt waren:

G. Reimann, IMF III  
R. Bartholomay, IRE  
H. Kruse, IRE  
H. Rohrbacher, IRE  
K. Schleisiek, IRE

sowie viele andere Mitarbeiter der Hauptwerkstatt, von KBG, PSB/PL und IRE.

### **Referenzen**

- /1/ J. Aberle, R. Bartholomay, H. Rohrbacher, K. Schleisiek  
Potential and Problems of Acoustic Boiling Detection  
10th Meeting of the Liquid Metal Boiling Working Group  
Karlsruhe, 27 - 29 October 1982
- /2/ H.A. Rohrbacher, J. Aberle, R. Bartholomay, H. Kruse, G. Reimann  
Demonstration experiment on acoustic boiling detection in KNK II  
International Conference on the Science and Technology of Fast Reactor Safety  
Guernsey, 12 - 16 May 1986

/3/ I.D. MacLeod, M.J. Beesley, D. Firth, R. Rowley, C.G. Taylor, C. Waites  
Acoustic surveillance systems for for LMFBRs  
International Conference on the Science and Technology of Fast Reactor Safety  
Guernsey, 12 - 16 May 1986

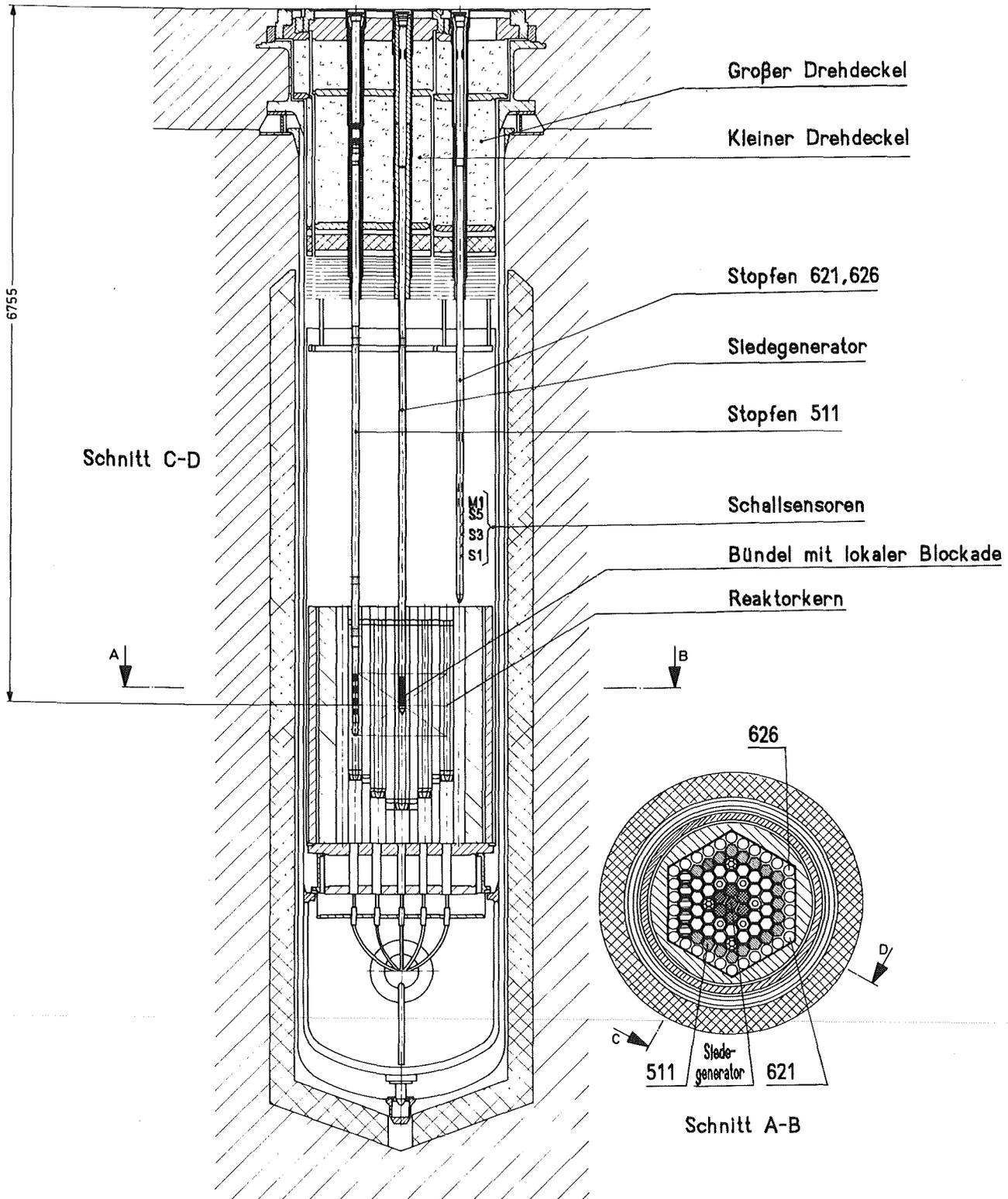
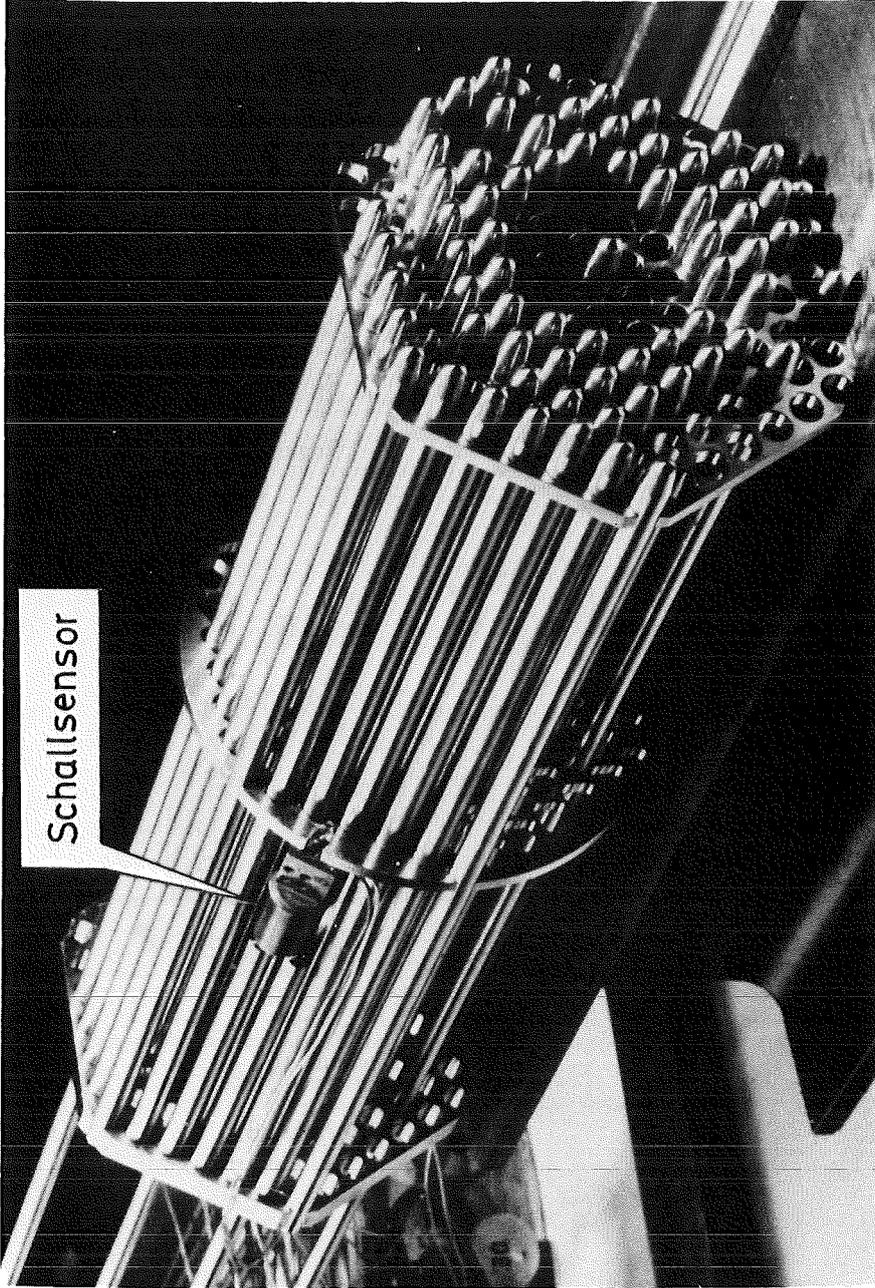


Abb. 1: Siedegenerator und instrumentierte Stopfen in der KNK II



**Abb. 2: Stabbündel des Siedegenerators mit Schallsensor**



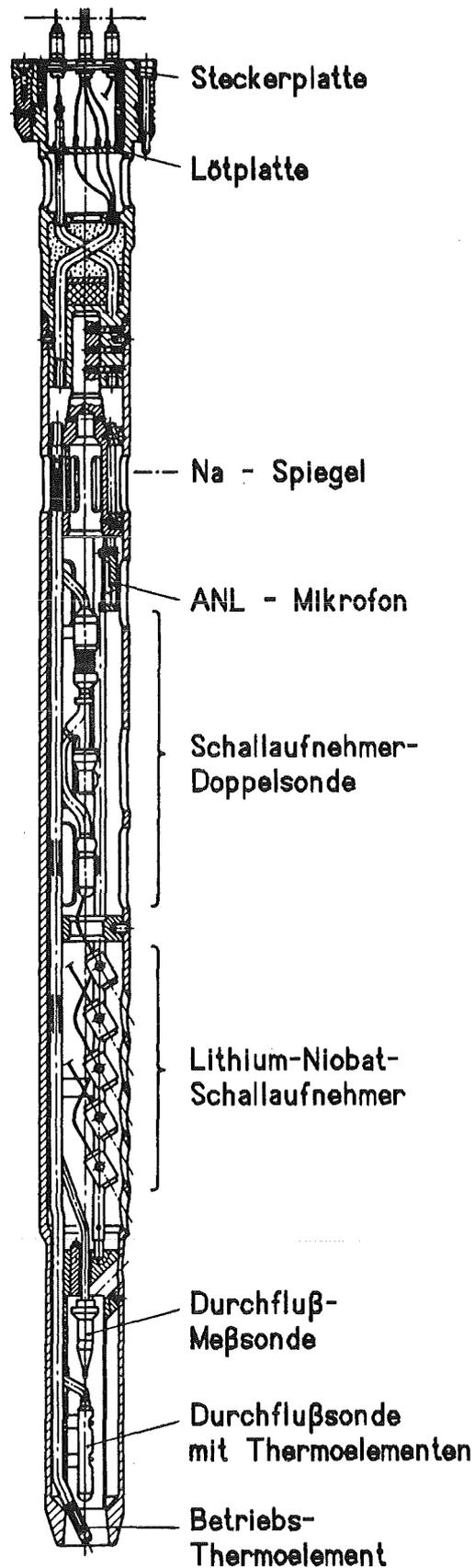
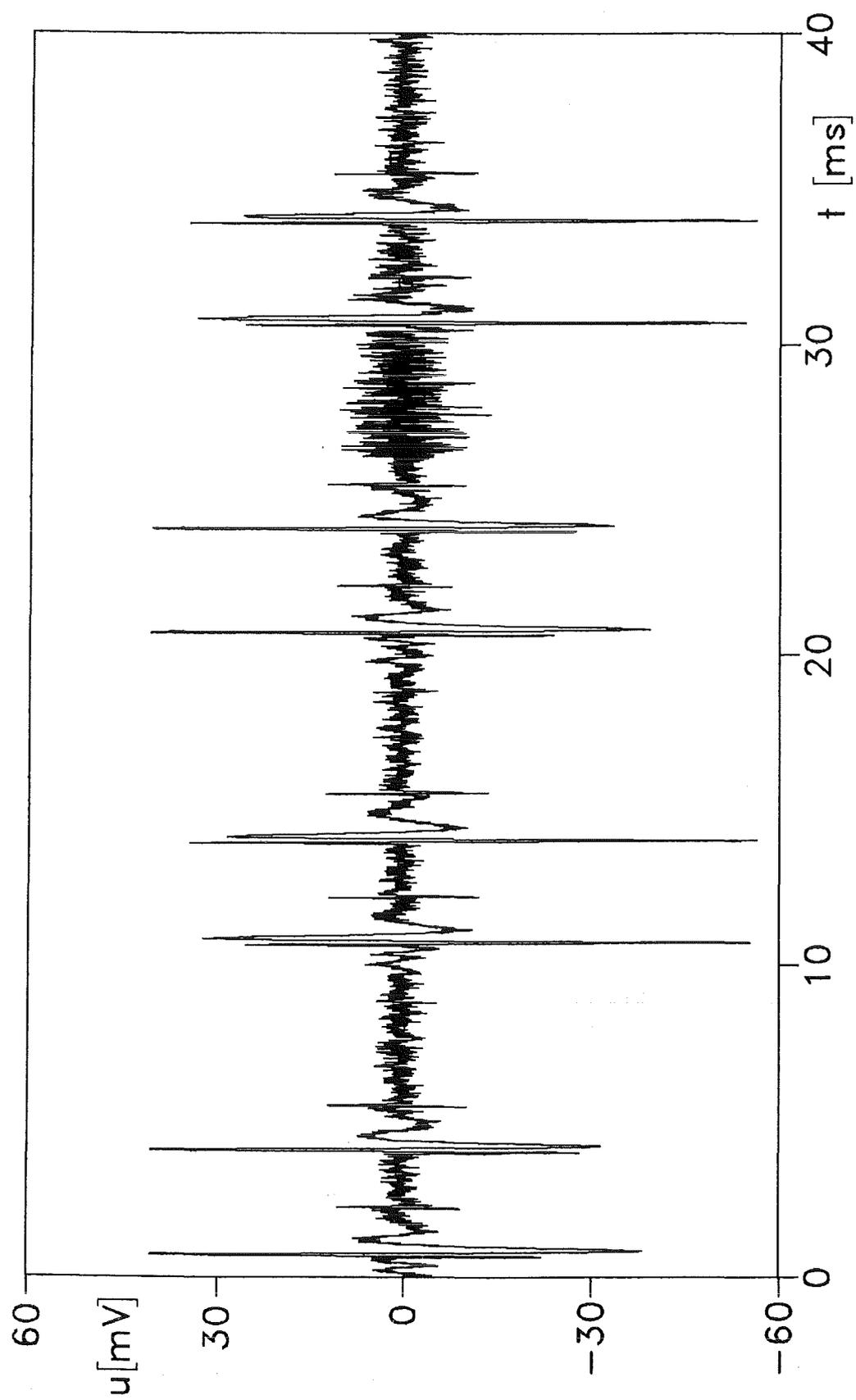


Abb. 3: Experimentierstopfen mit akustischen Sensoren

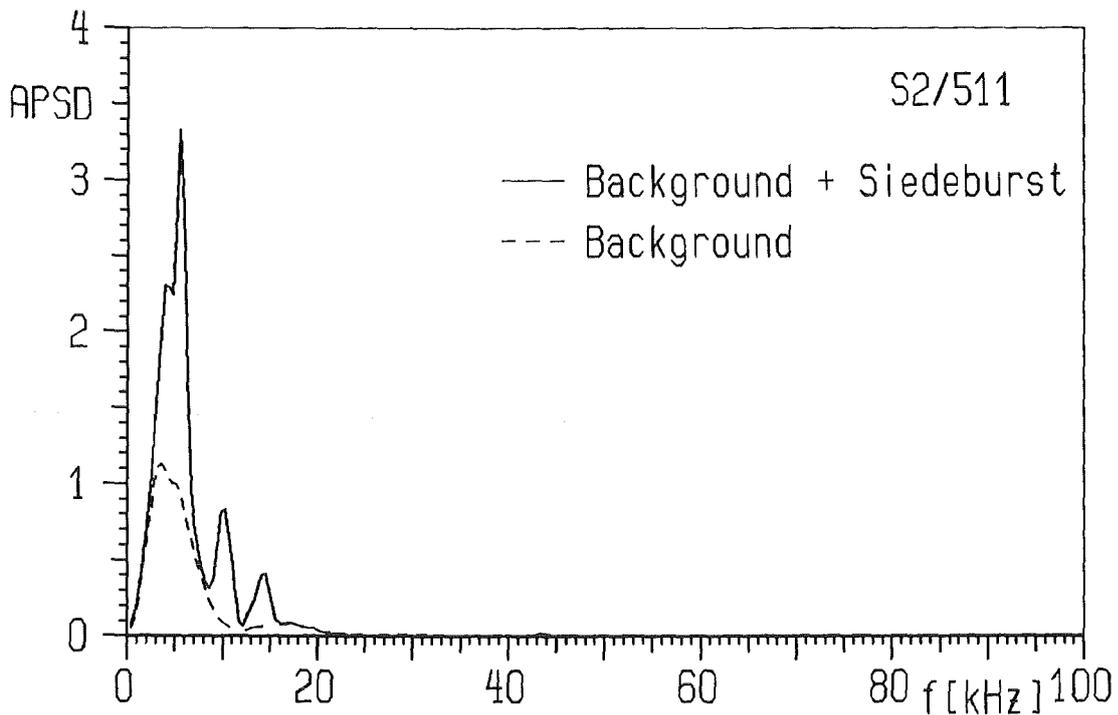
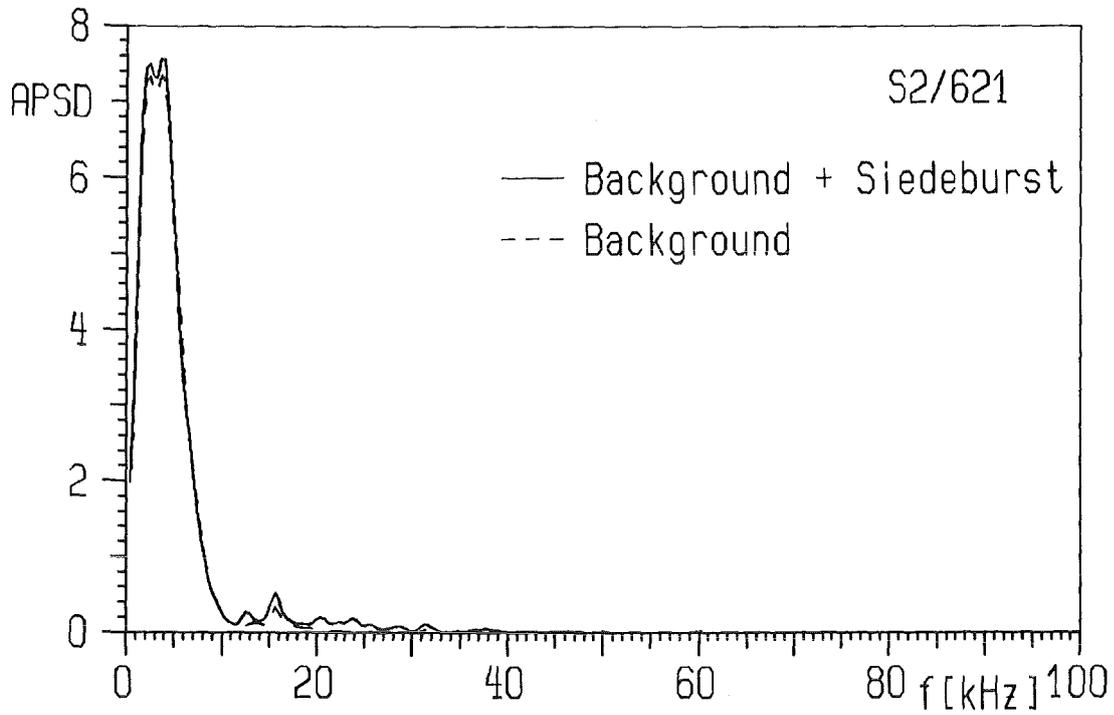


---

---

KfK

**Abb. 4: Akustisches Siedesignal mit typischem Störsignalmuster**



KJK

**Abb. 5: Akustische Siedesignale mit  
 typischem Störsignalmuster  
 (Spektren)**

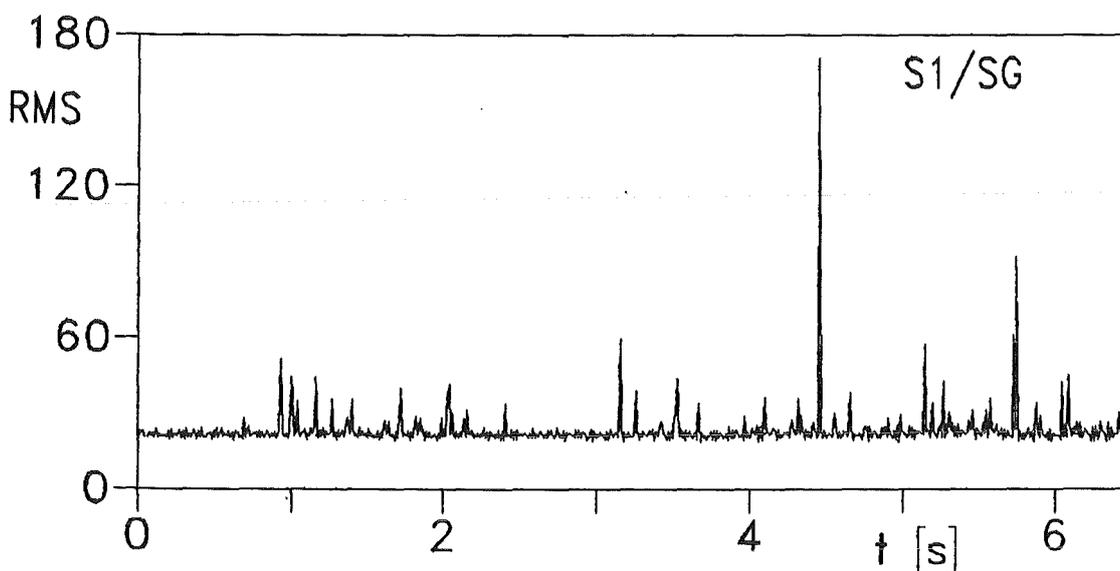
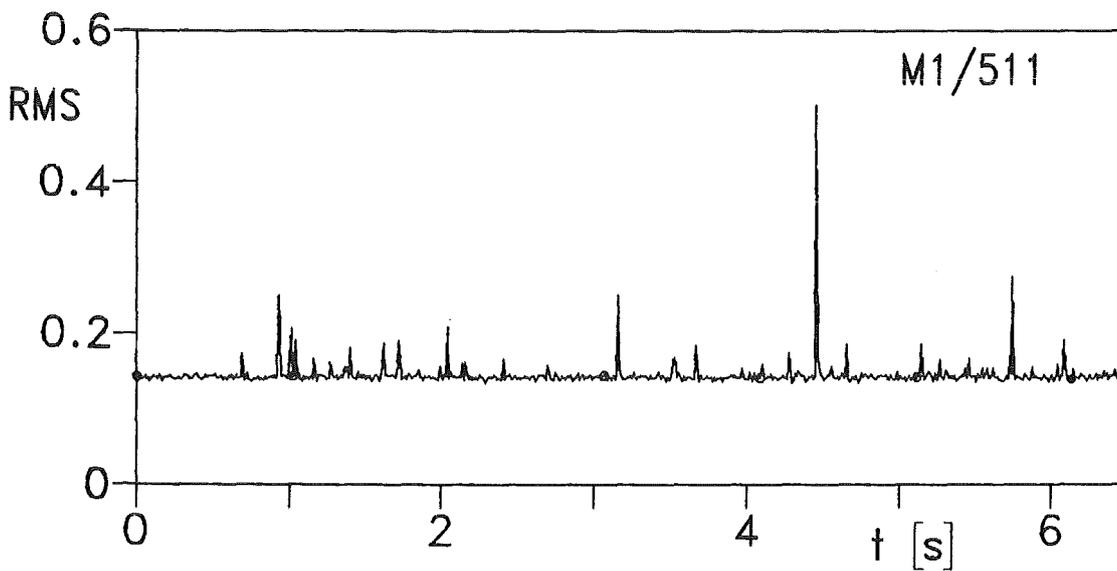
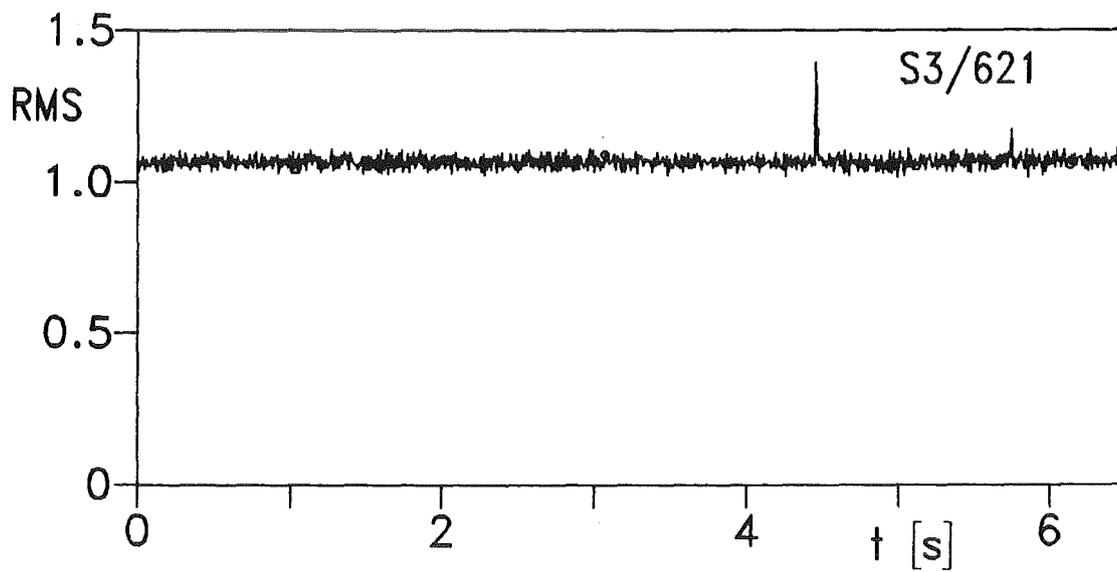


Abb. 6: Siedegeräusche bei Siedebeginn  
(RMS);  $\dot{V}=49\%$

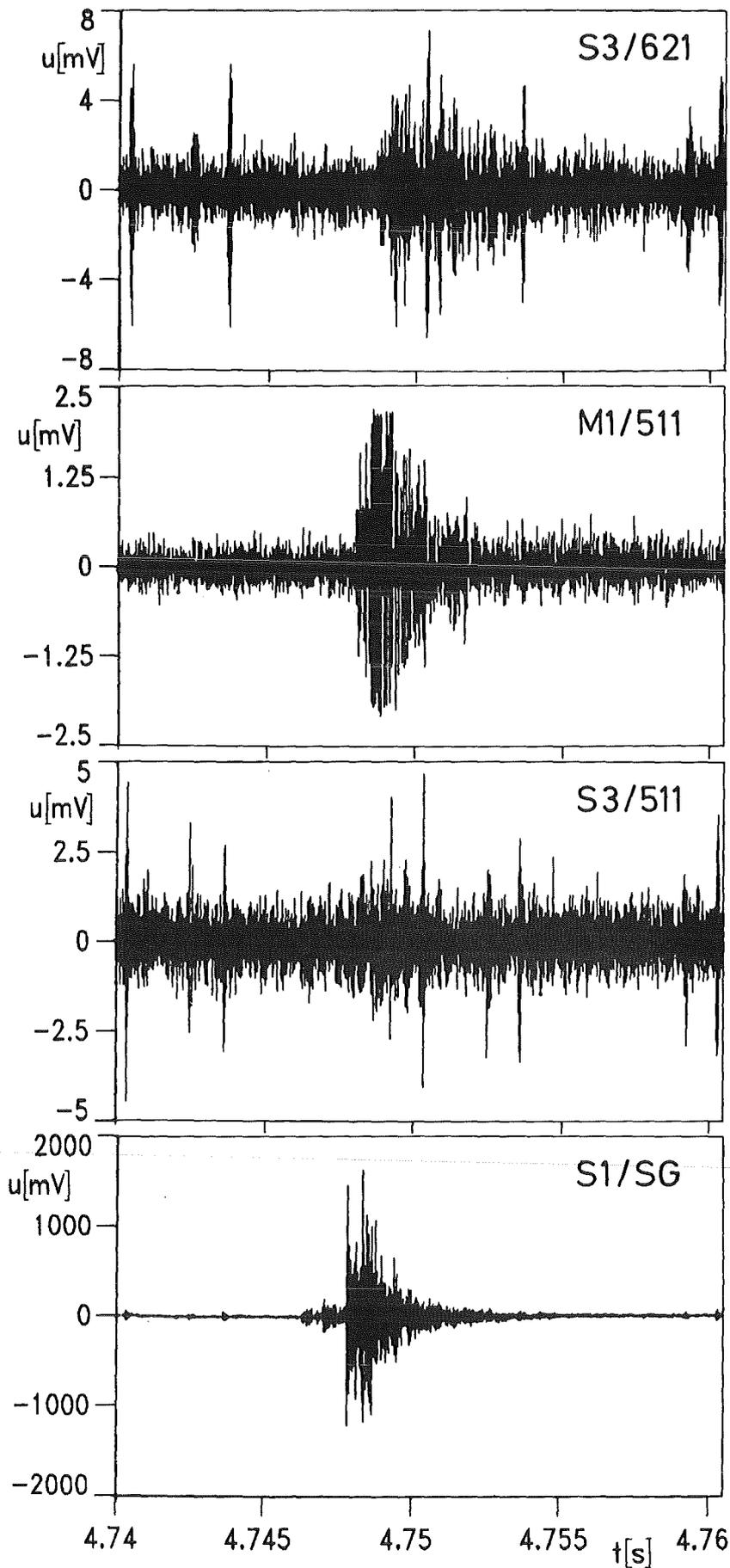


Abb. 7: Burstsignale bei Siedebeginn;  $\dot{V}=49\%$

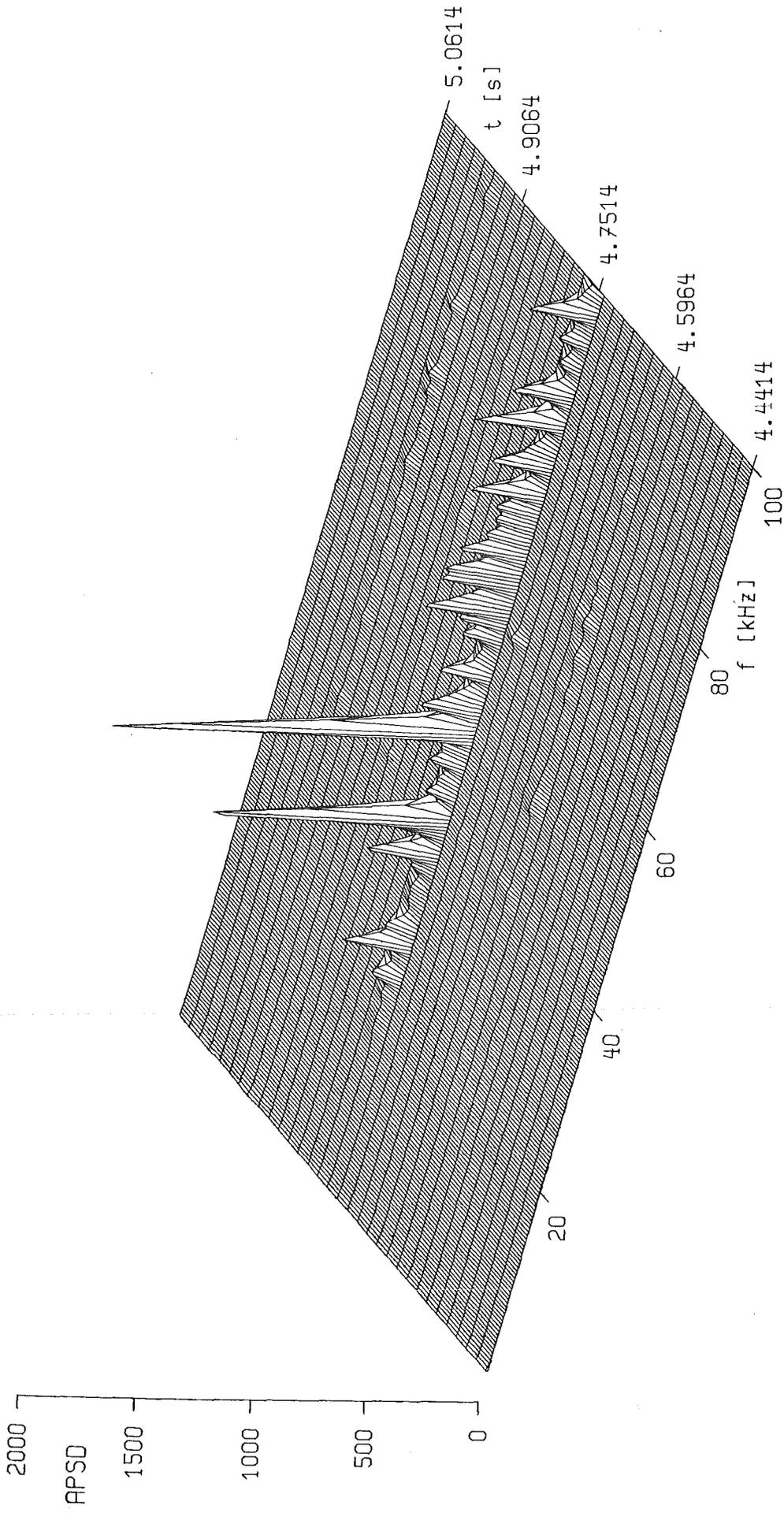


Abb. 8: Spektrale Leistungsdichte des Quellsignals;  $\dot{V}=49\%$

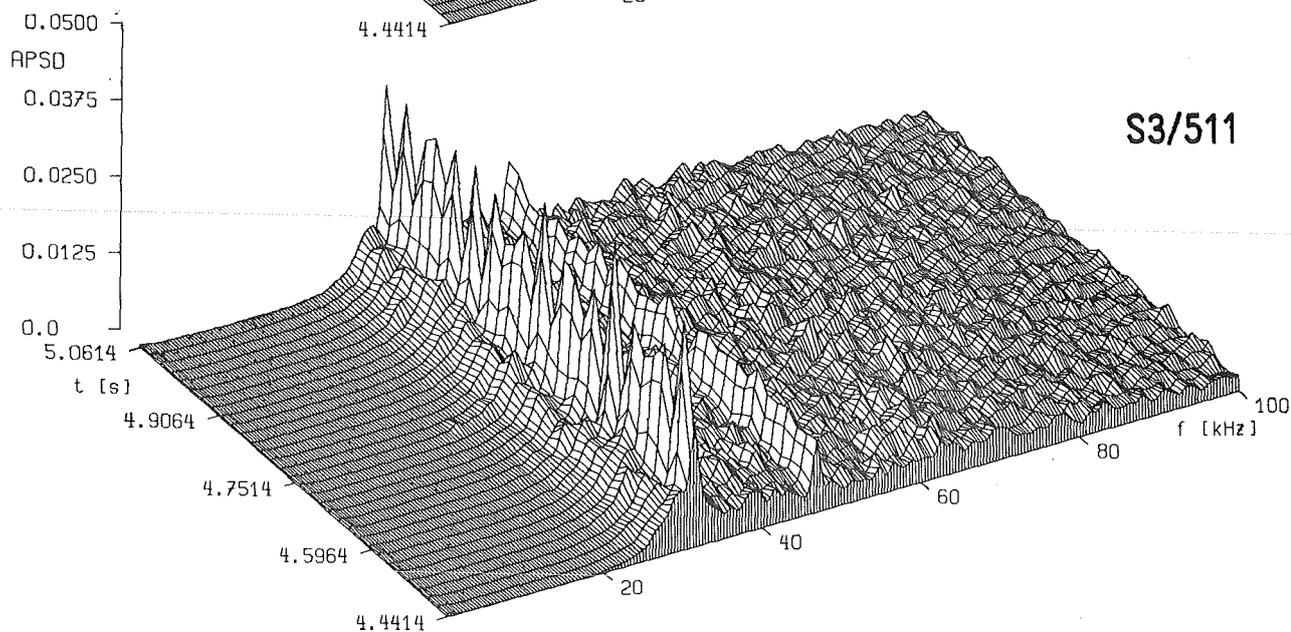
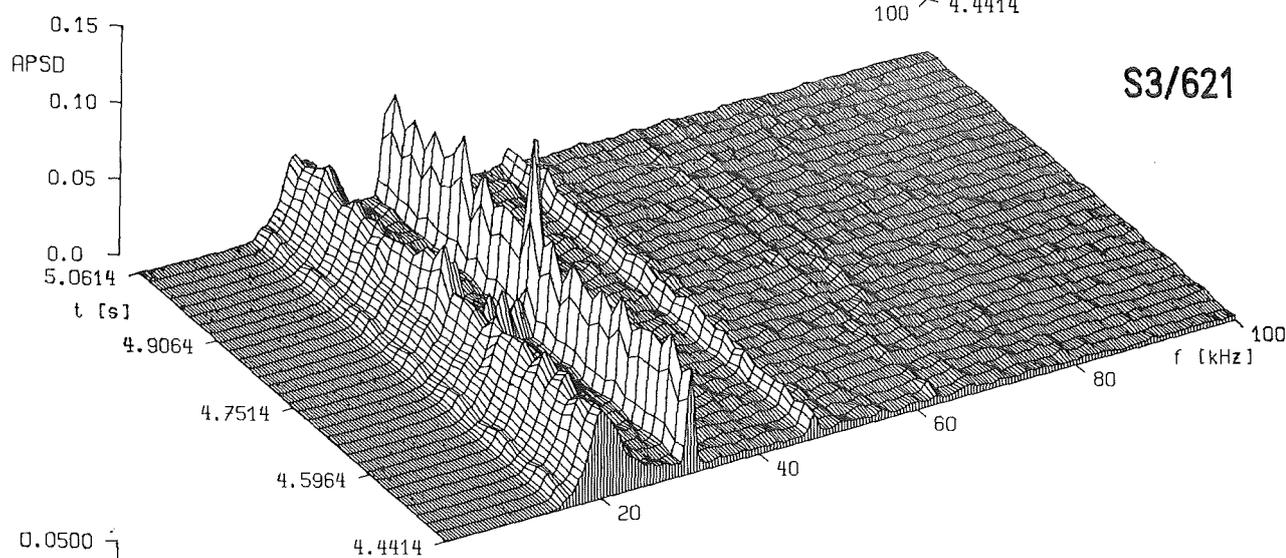
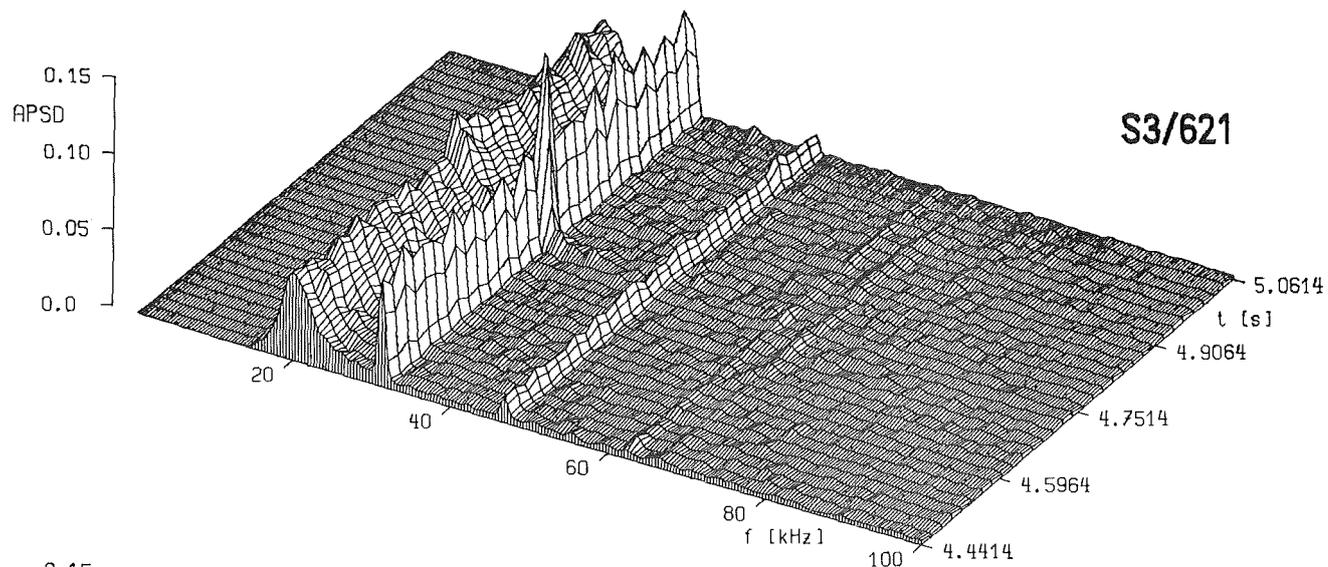


Abb. 9: Spektrale Leistungsdichte von Signalen in den Stopfen;  $\dot{V}=49\%$

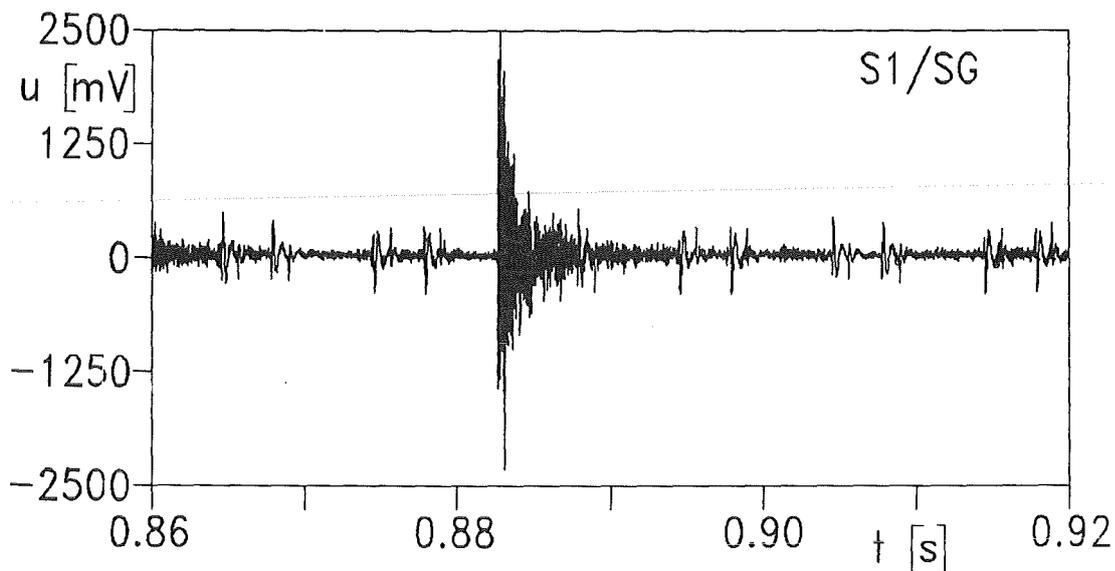
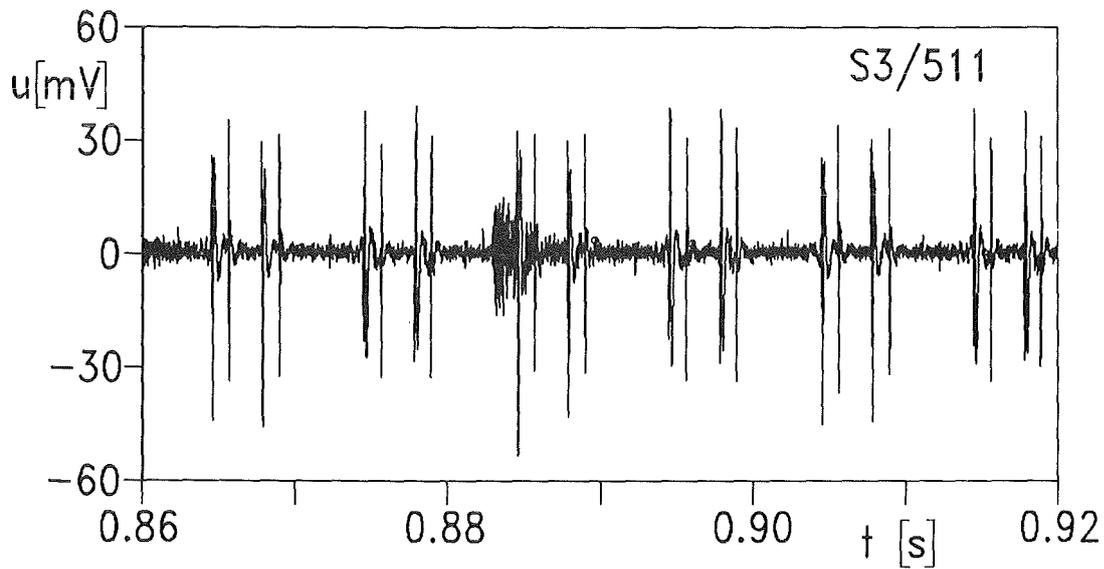
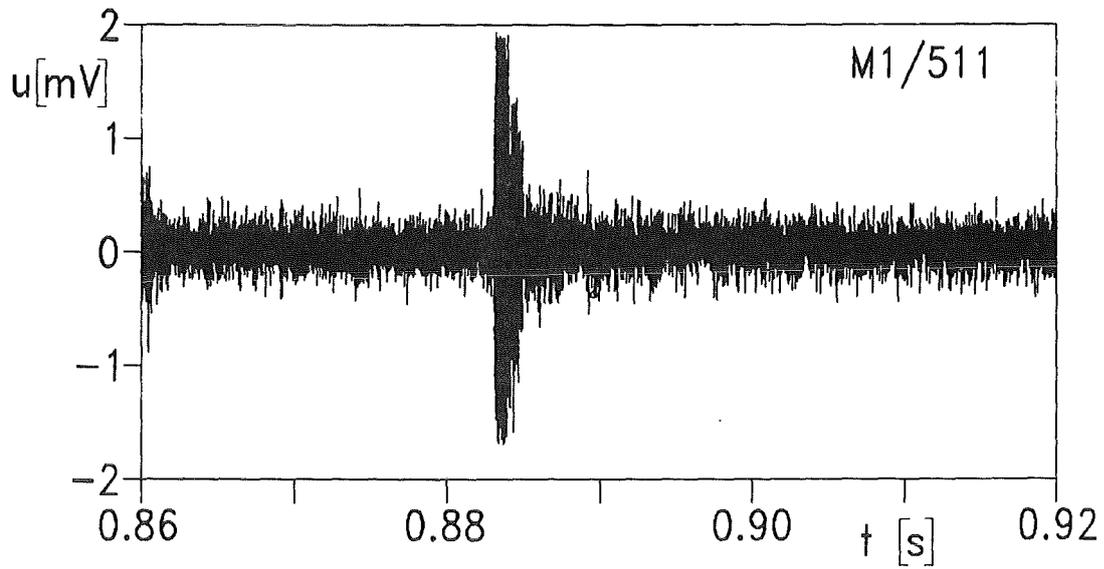
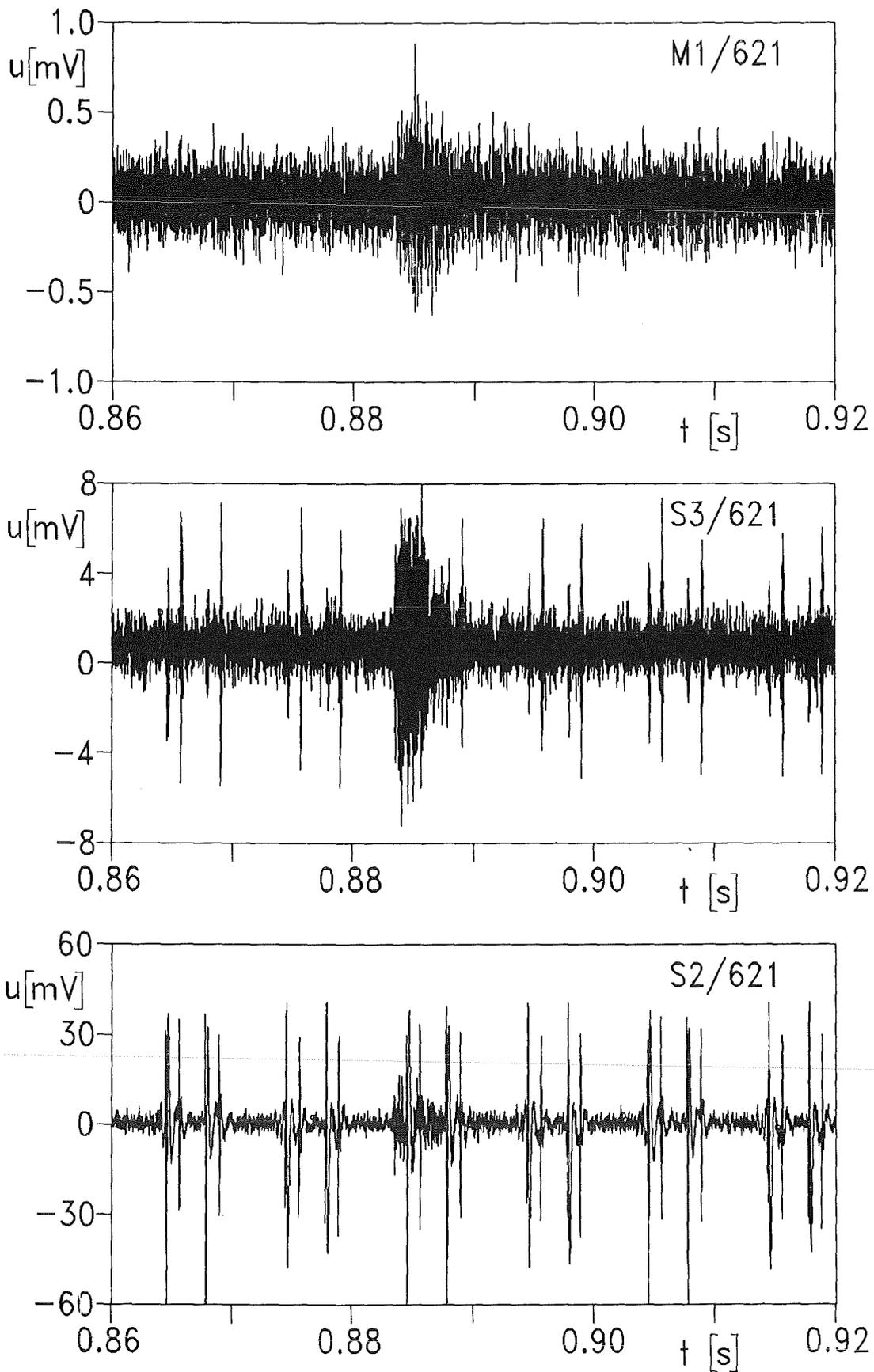


Abb. 10: Siedesignal an der Quelle und am Kernrand;  $\dot{V}=49\%$



---

---

KfK

Abb. 11: Siedesignal im Oberplenum;  $\dot{V}=49\%$

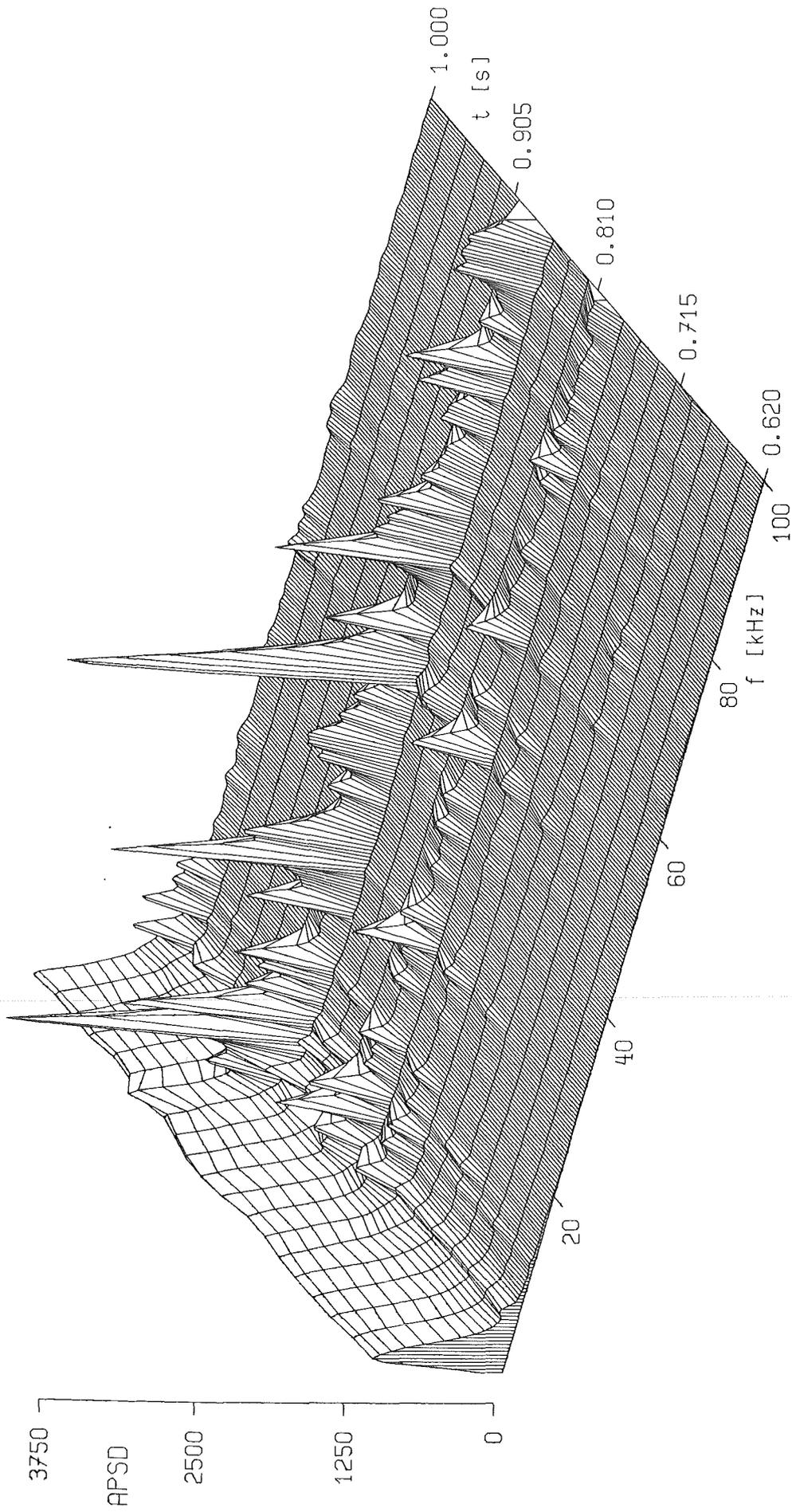


Abb. 12: Spektrum des Quellsignals;  $\dot{V}=49\%$

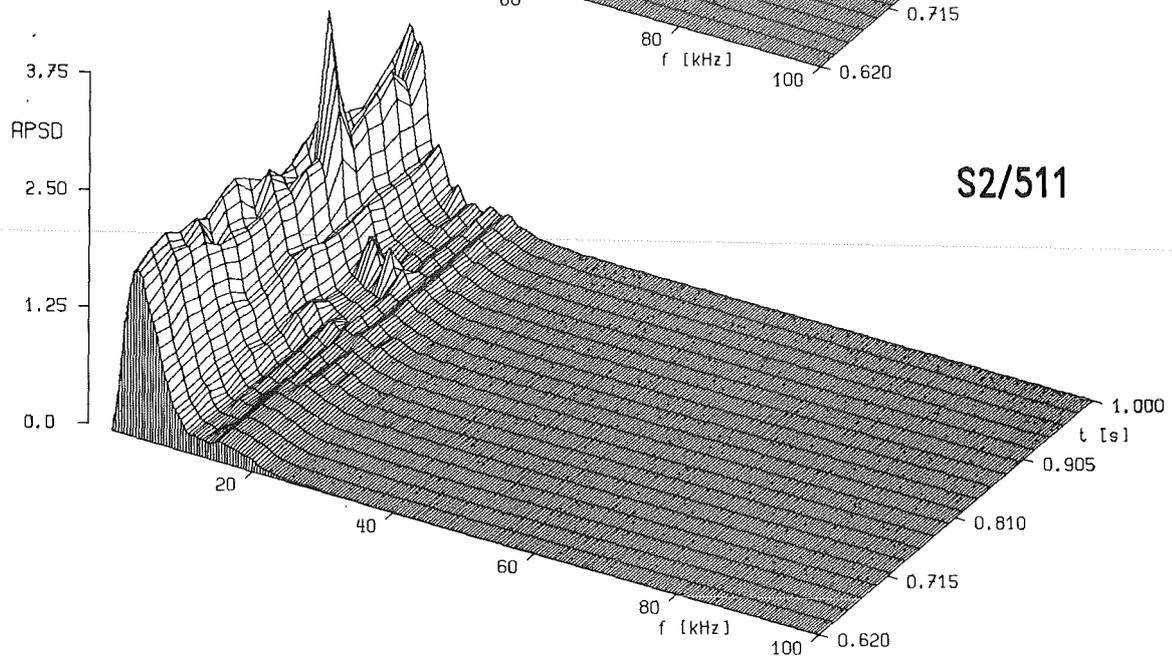
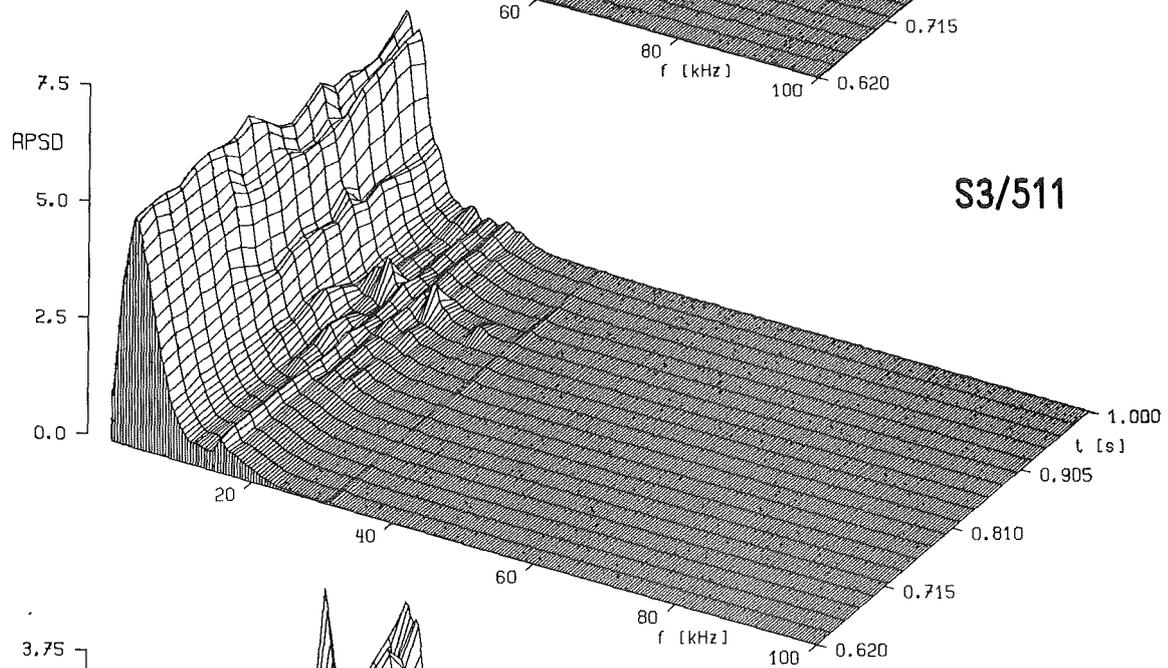
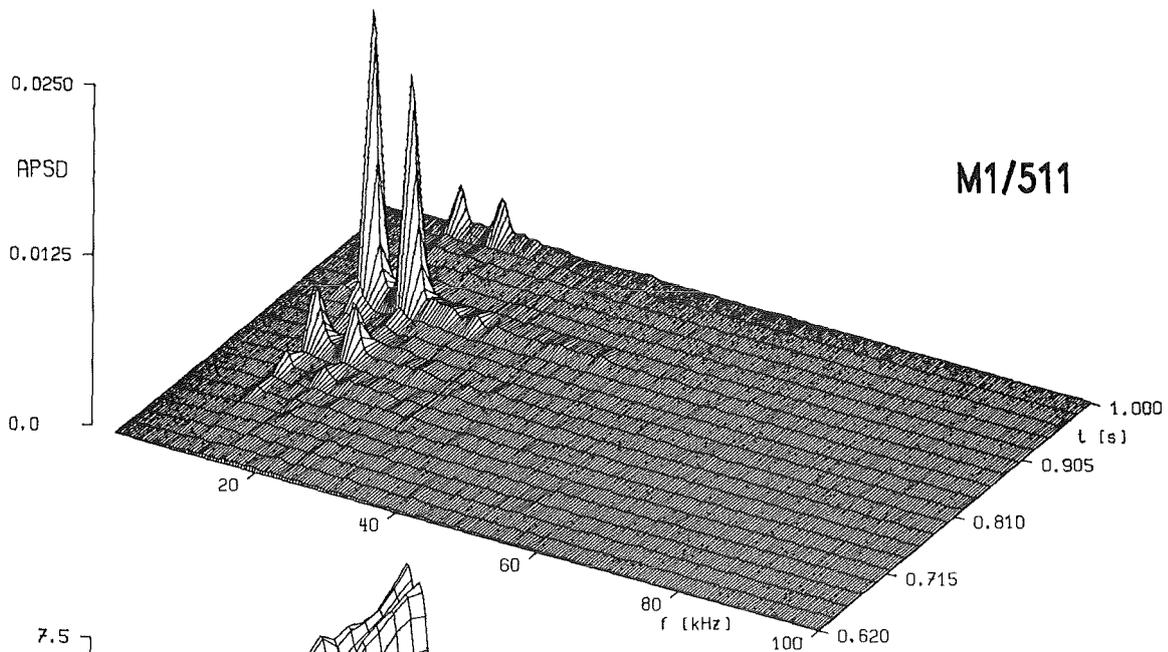


Abb. 13: Spektren der Siedesignale am Kernrand;  $\dot{V}=49\%$

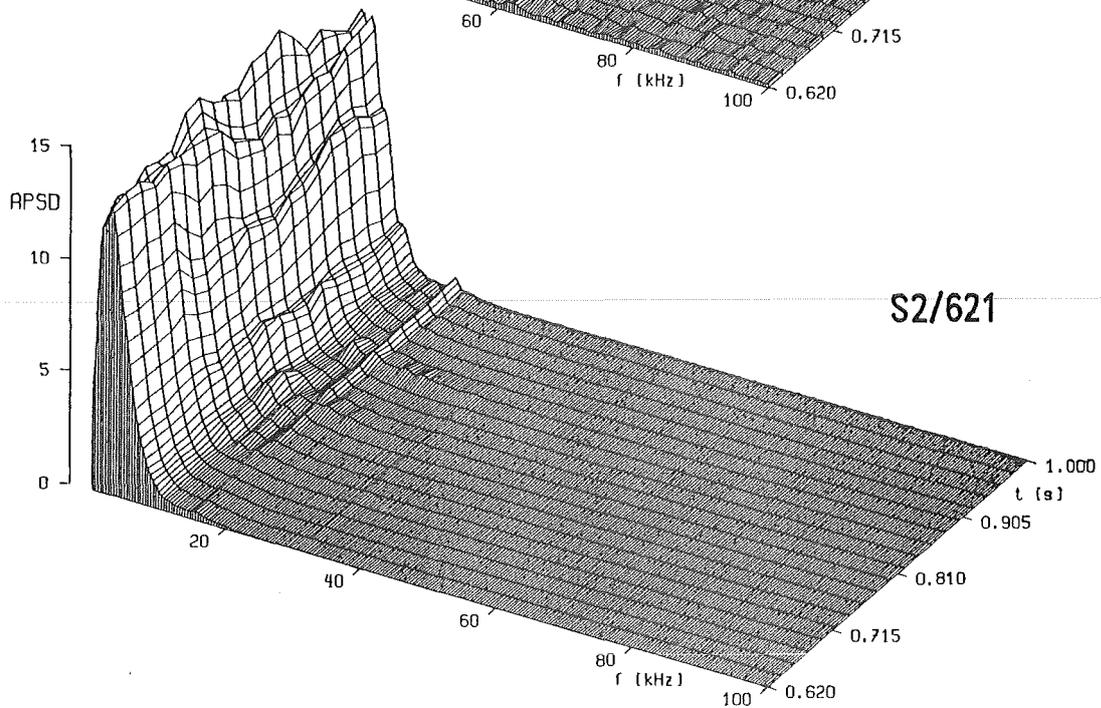
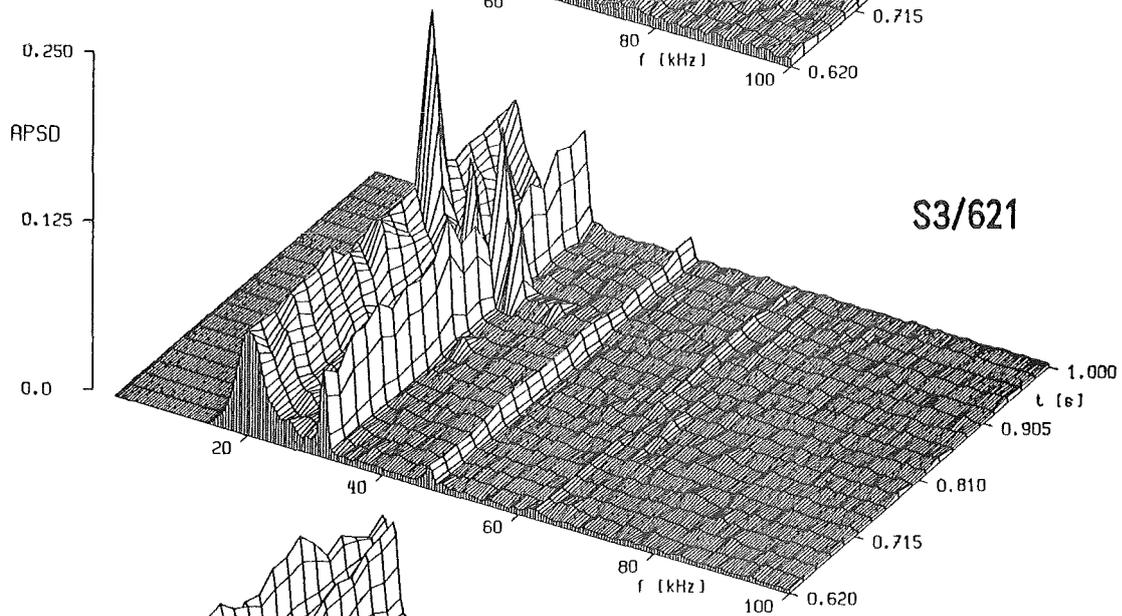
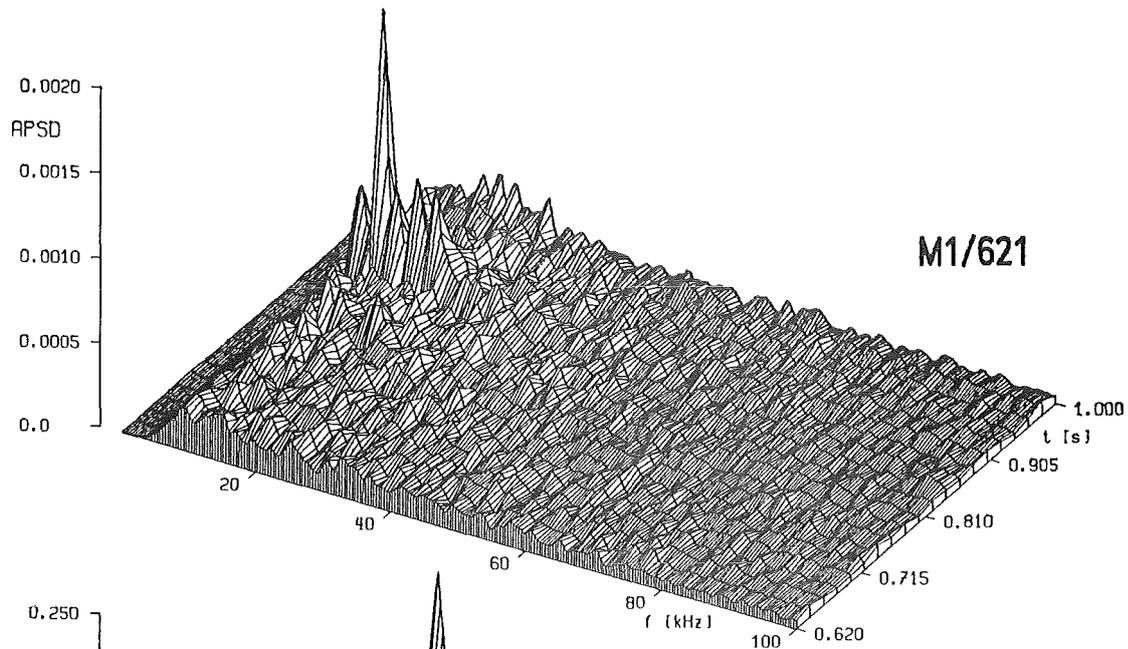


Abb. 14: Spektren der Siedesignale im Oberplenum;  $\dot{V}=49\%$

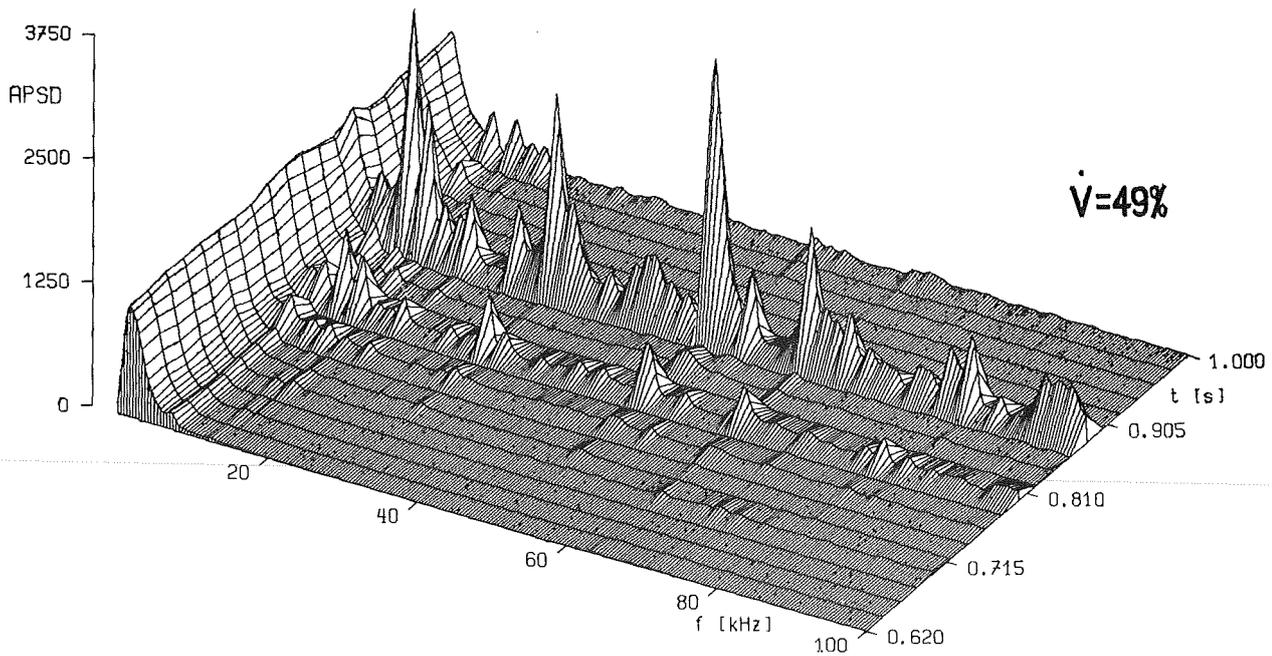
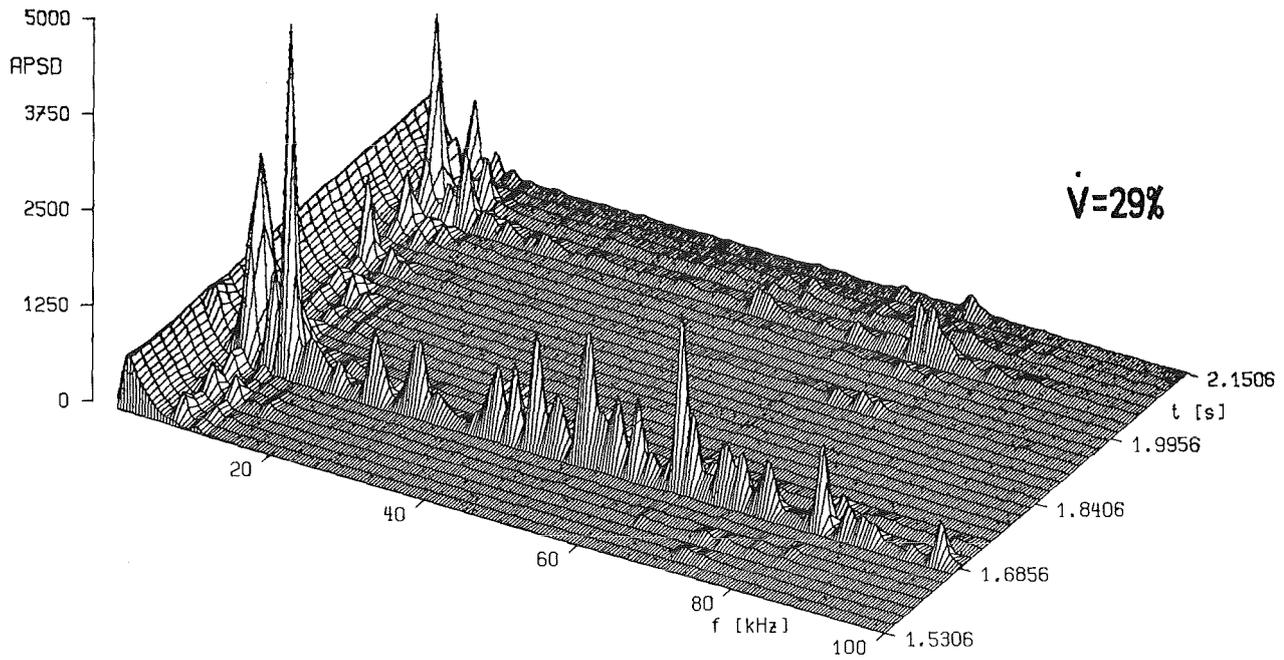
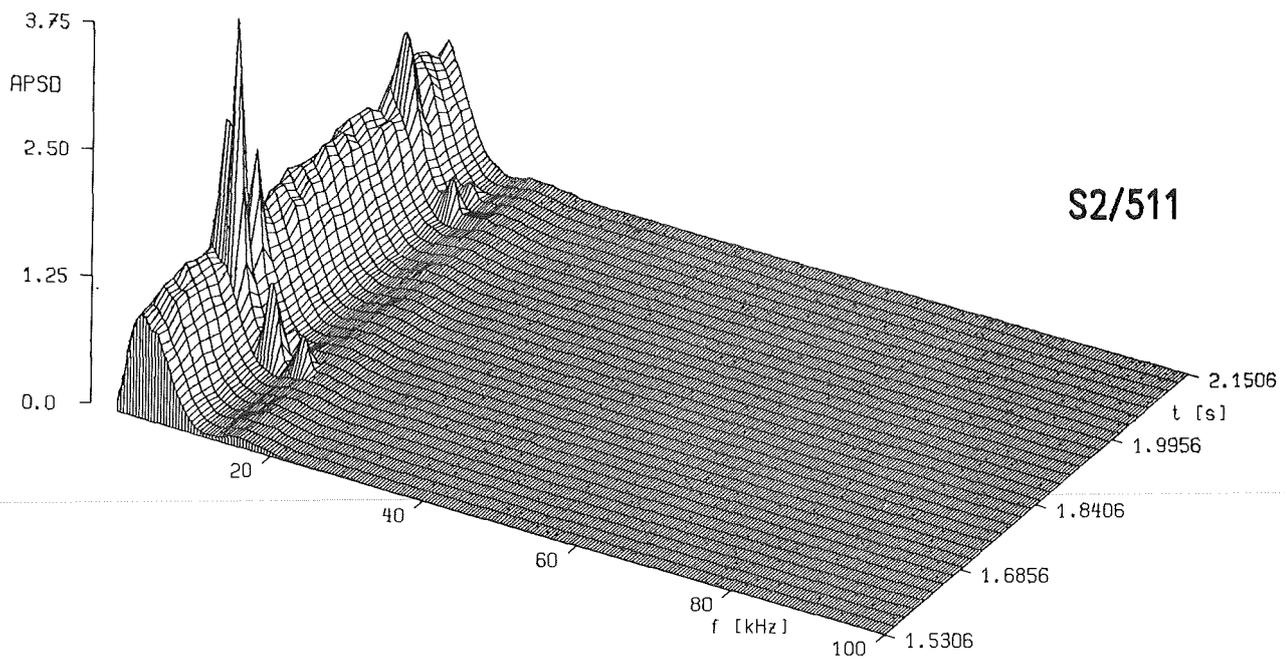
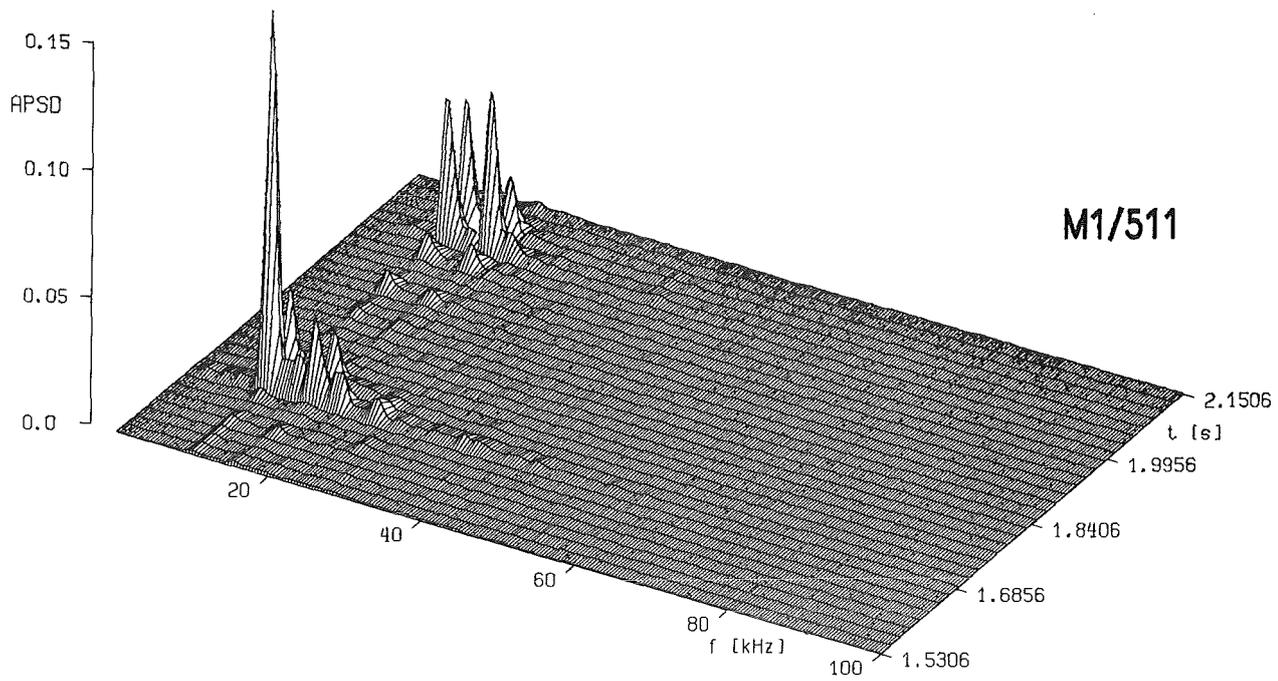


Abb. 15: Spektren von Quellsignalen unterschiedlicher Intensität



KIK

Abb. 16: Spektren der Geräusche am Kernrand;  $\dot{V}=29\%$

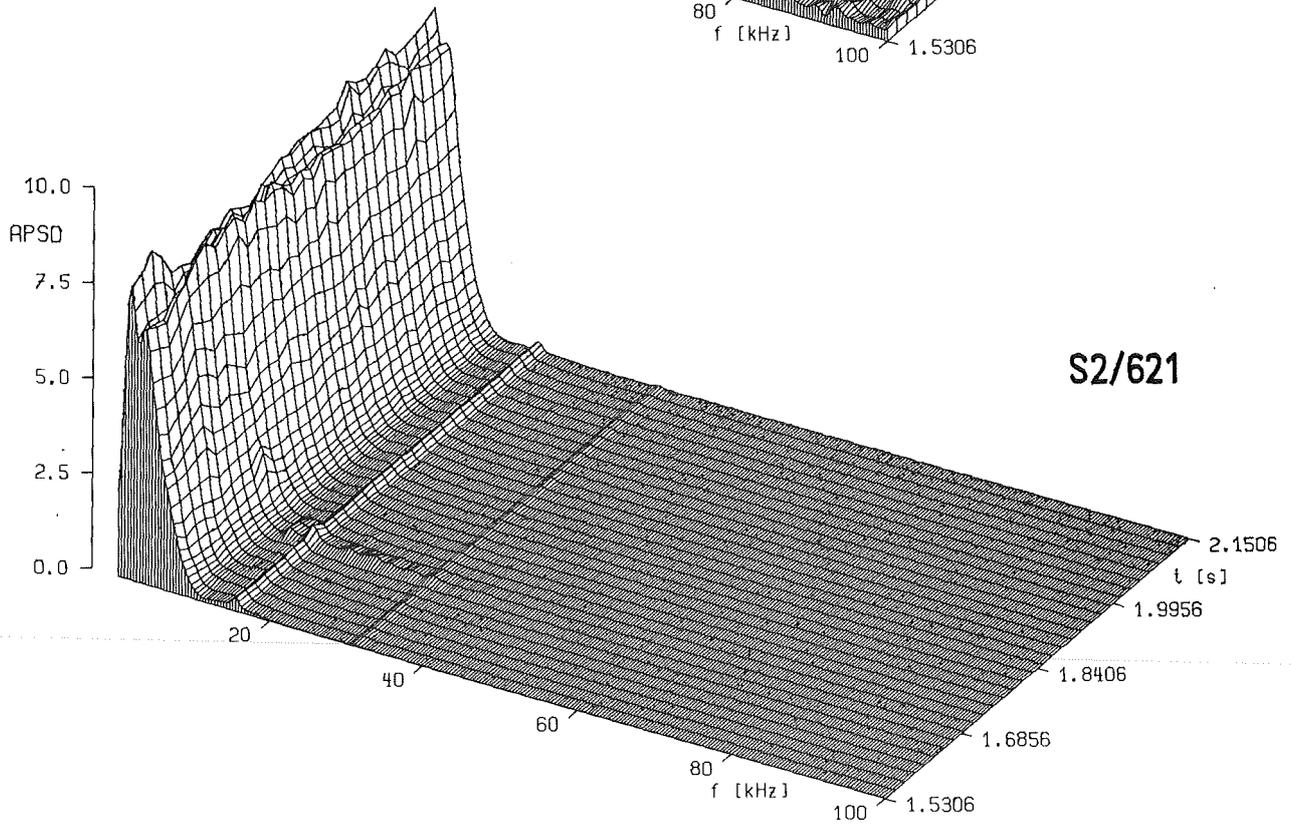
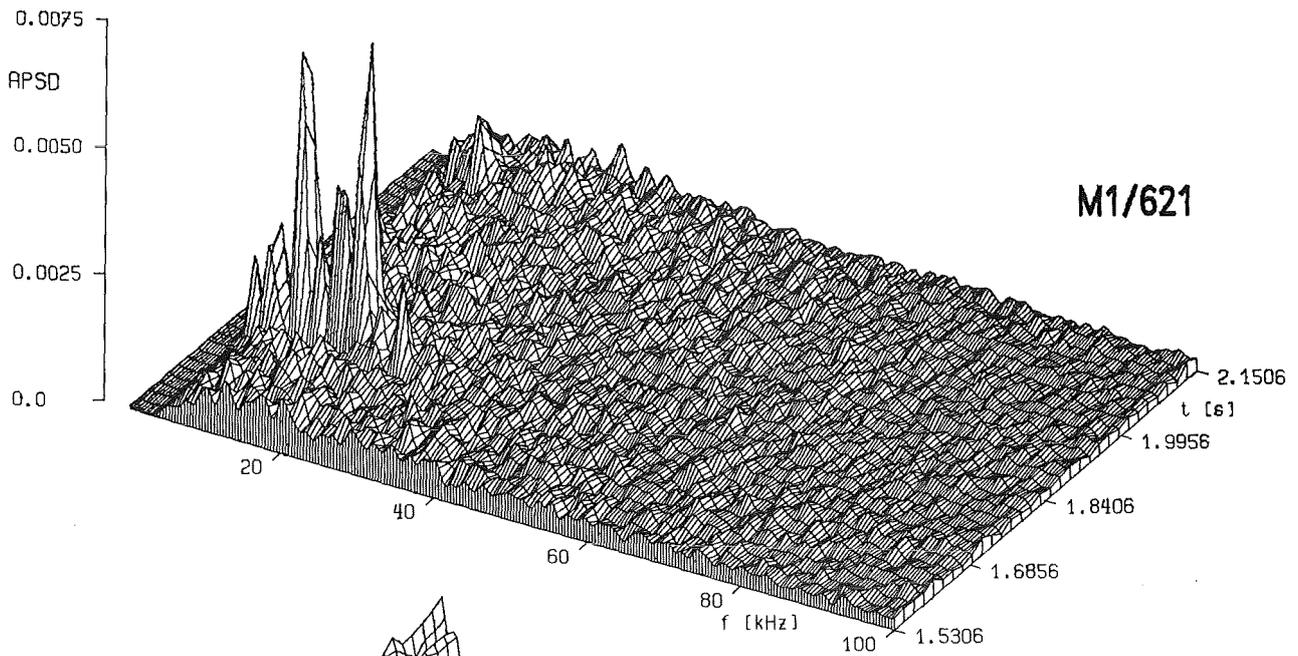


Abb. 17: Spektren der Geräusche im Oberplenum;  $\dot{V}=29\%$

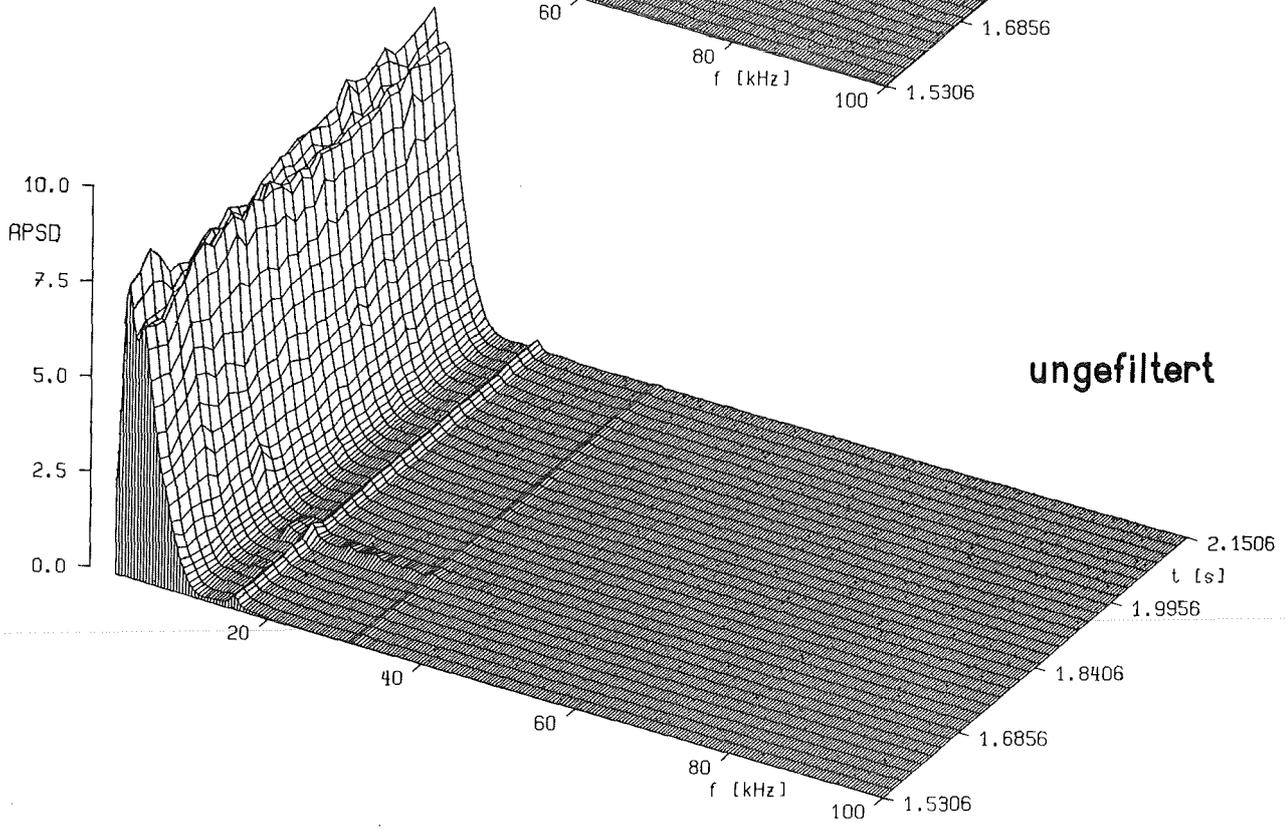
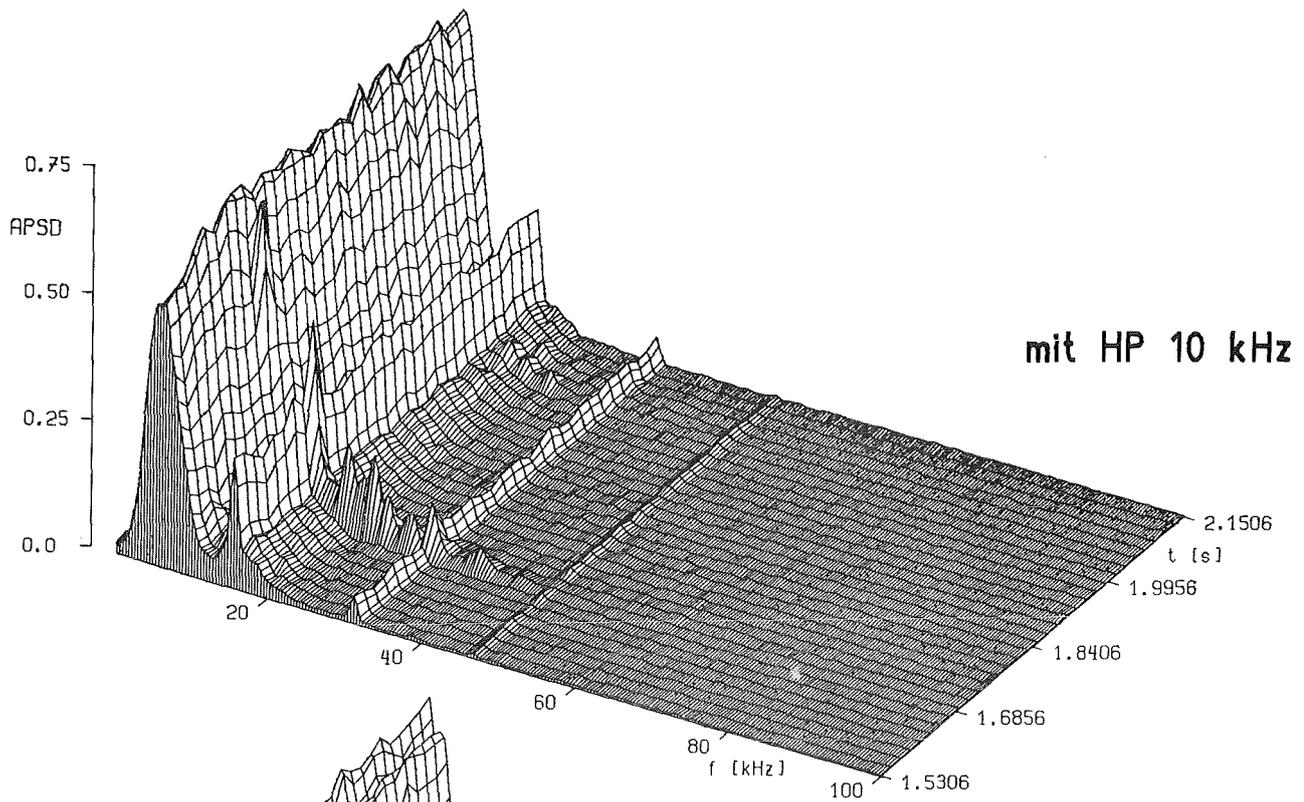


Abb. 18: Einfluß der Hochpaßfilterung an Geräuschen im Oberplenium

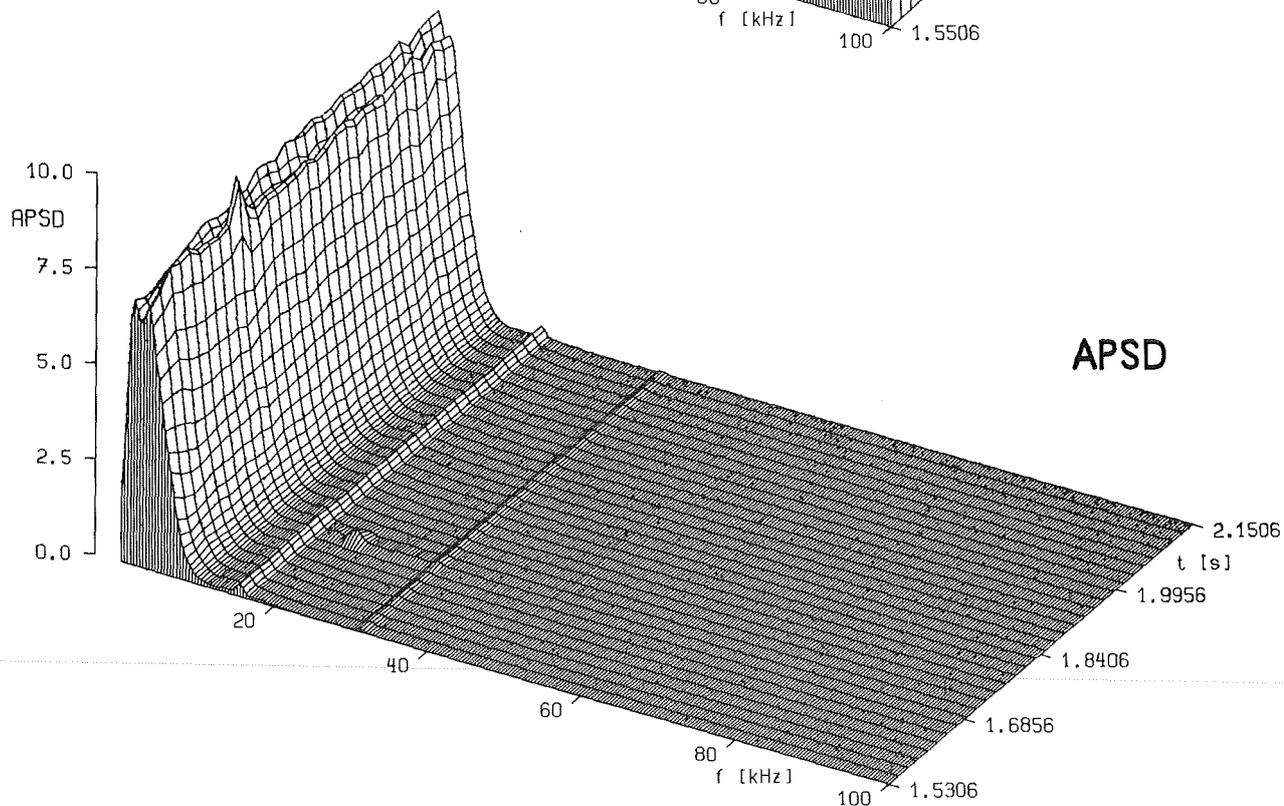
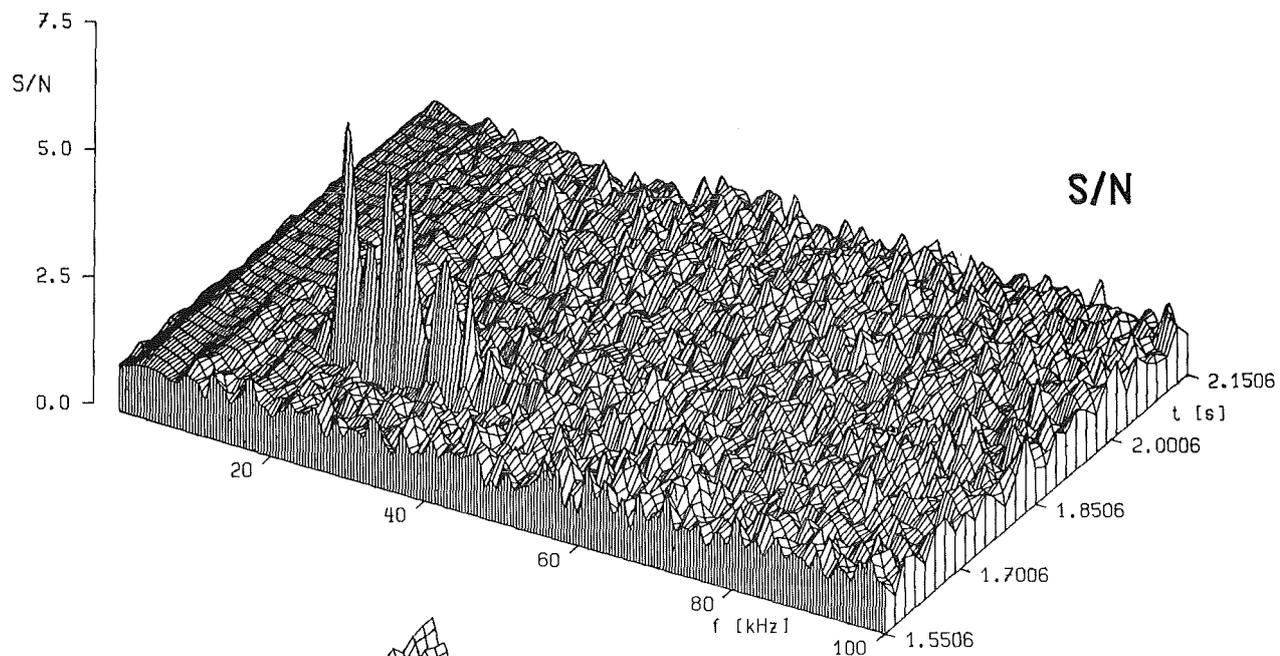


Abb. 19: Leistungsdichte und S/N- Spektrum eines Schallsignals im Oberplenium

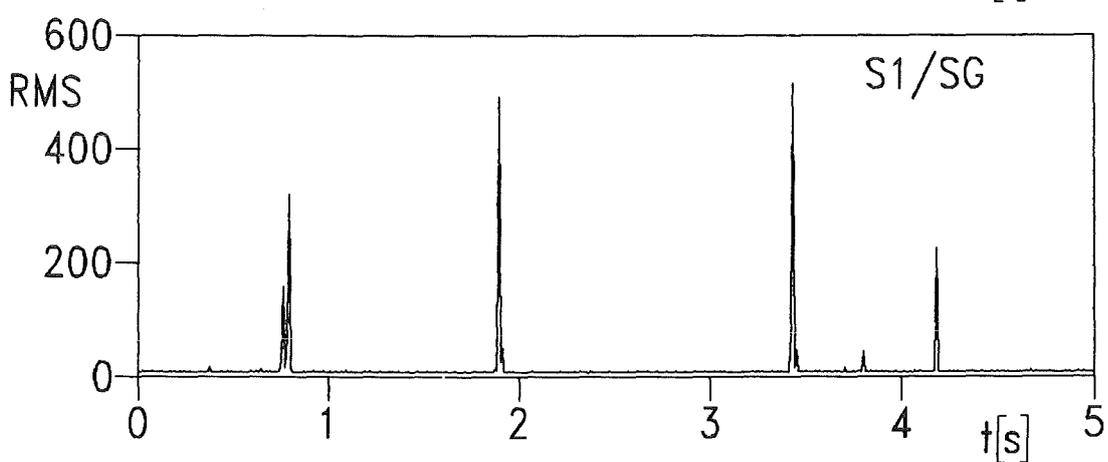
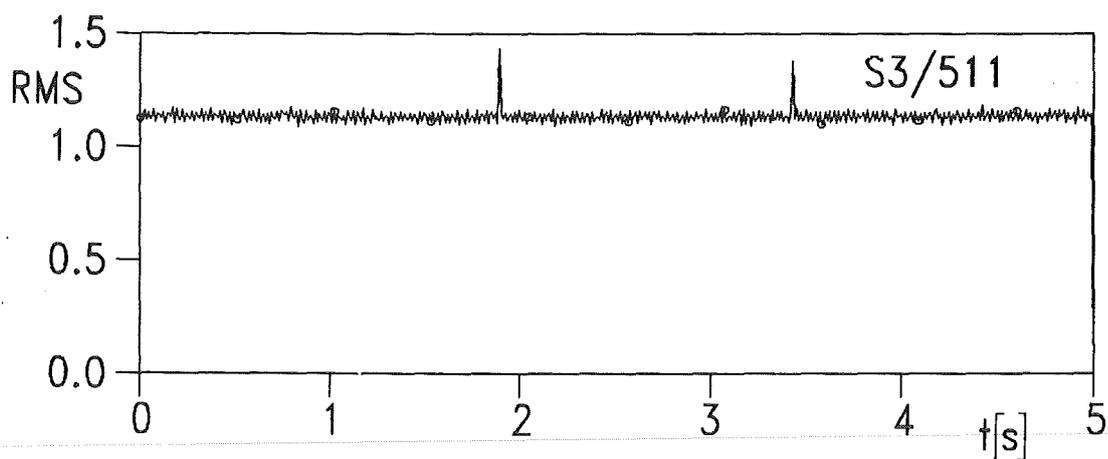
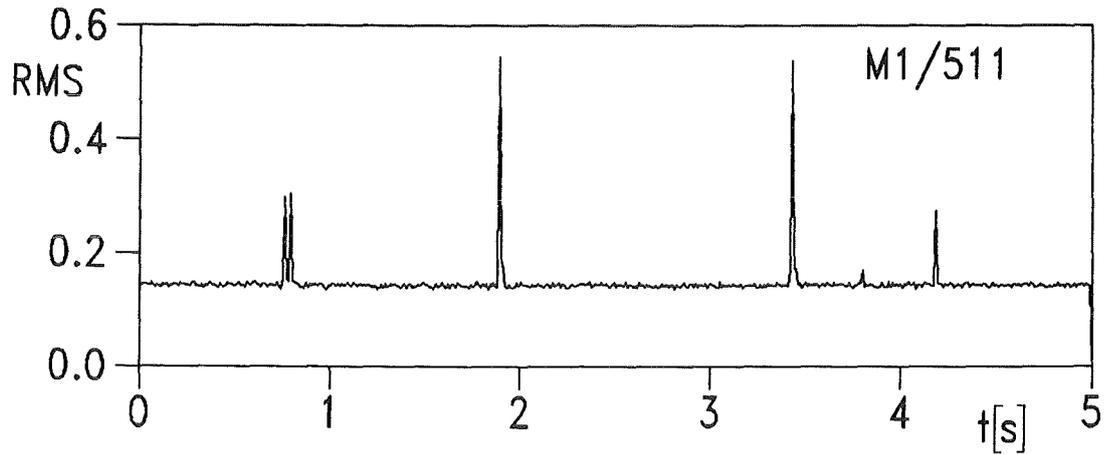
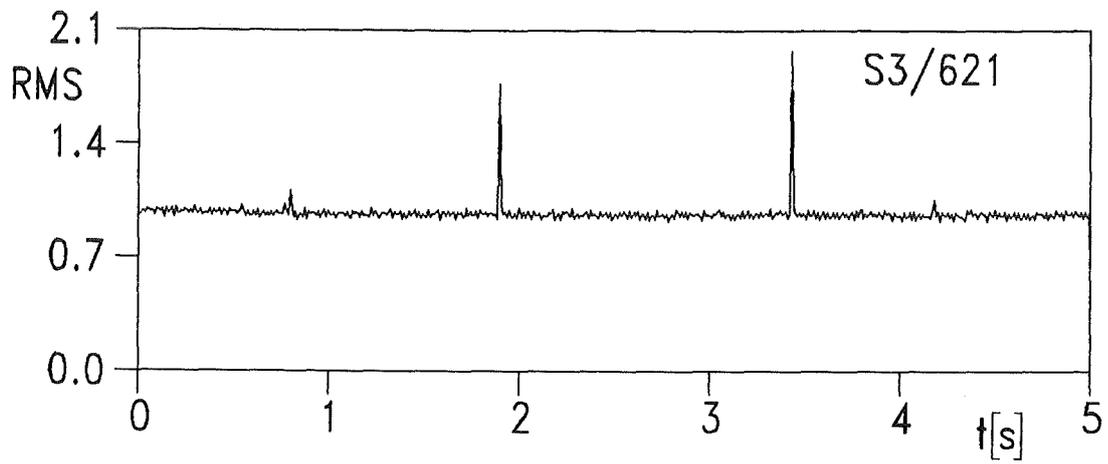
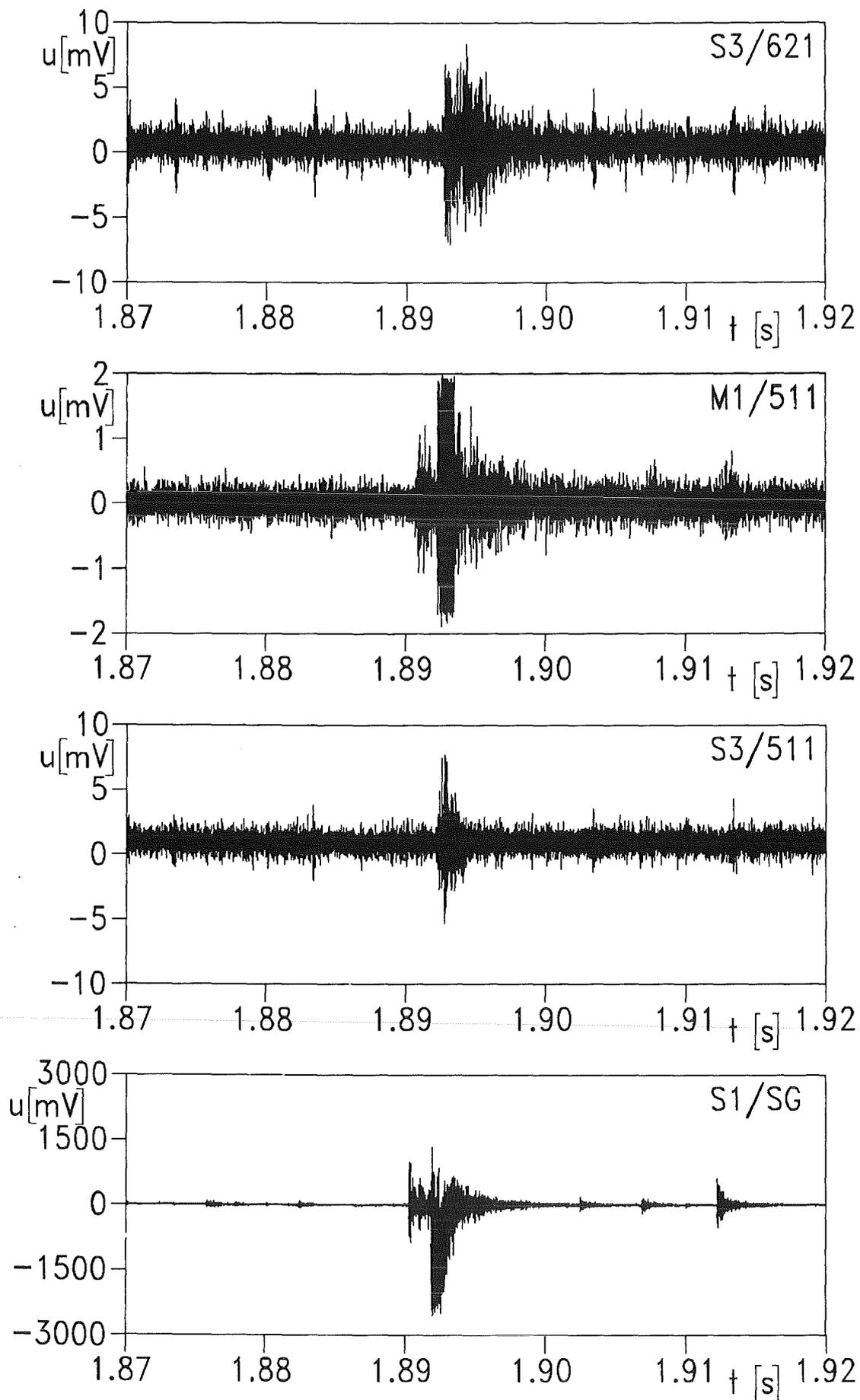


Abb. 20: Siedegeräusche bei  $\dot{V}=12\%$  (RMS)



KfK

Abb. 21: Einzelner Blasenkolllaps bei  $\dot{V}=12\%$

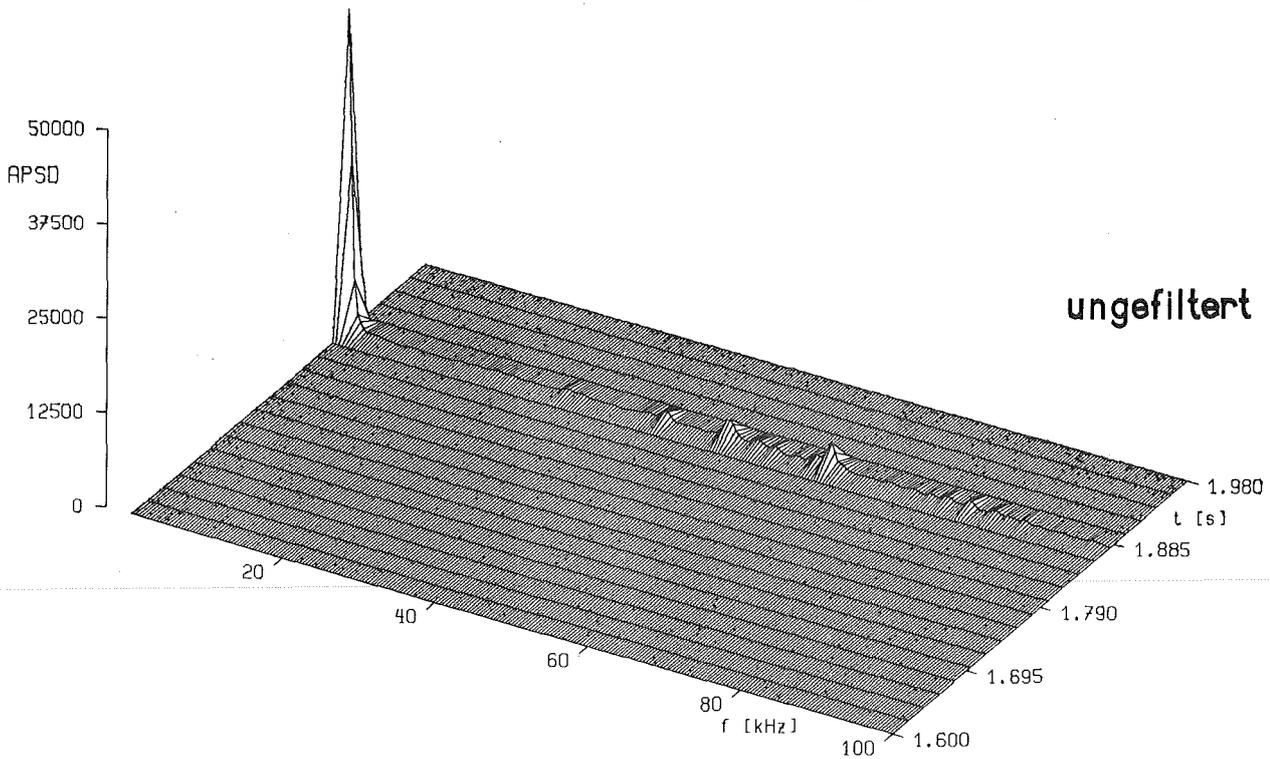
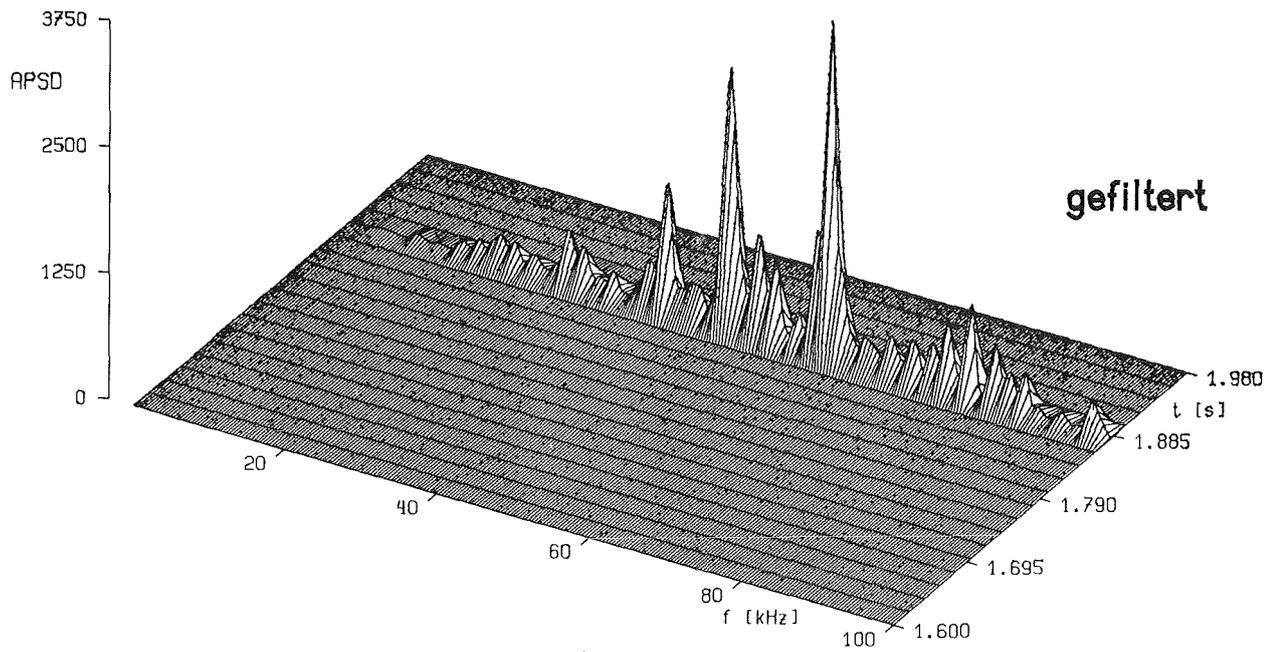


Abb. 22: Spektren von Siedegeräuschen an der Siedezone bei  $\dot{V}=12\%$

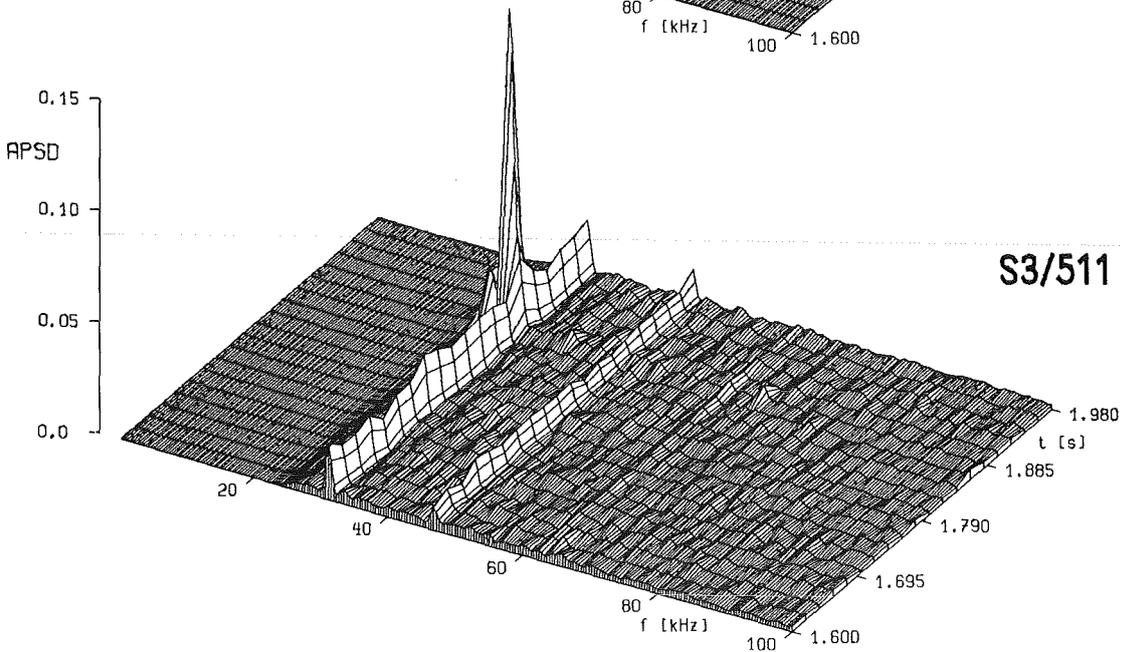
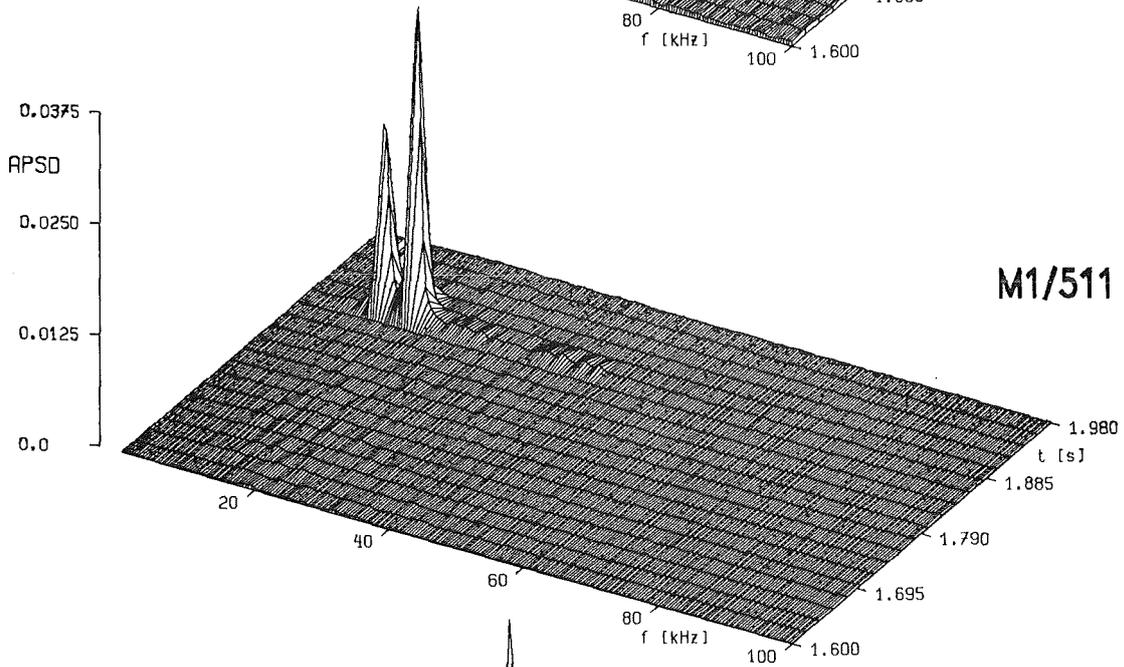
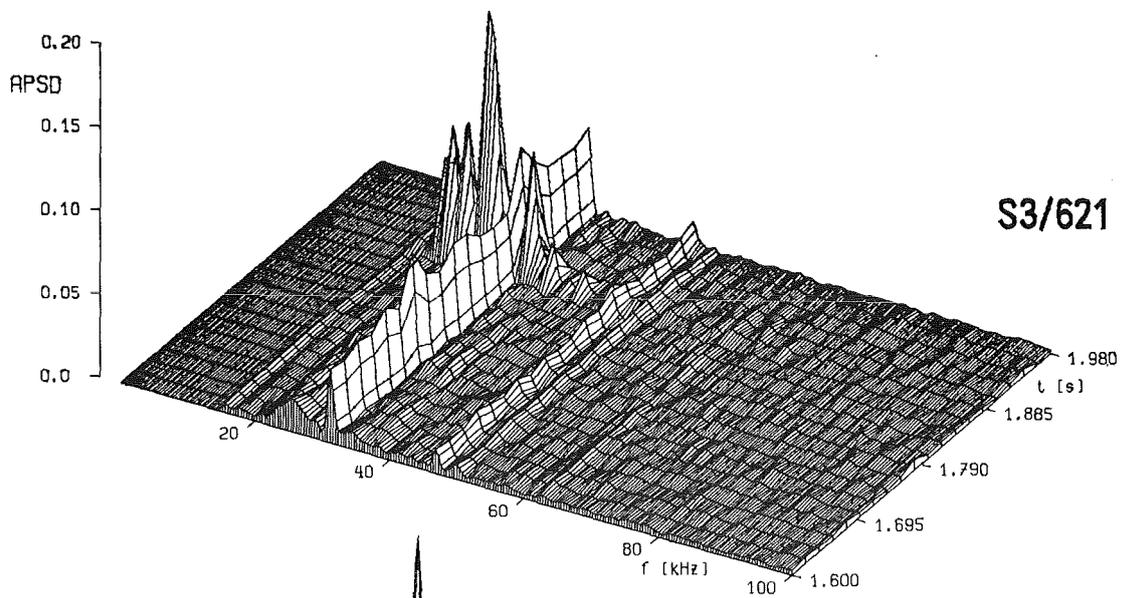
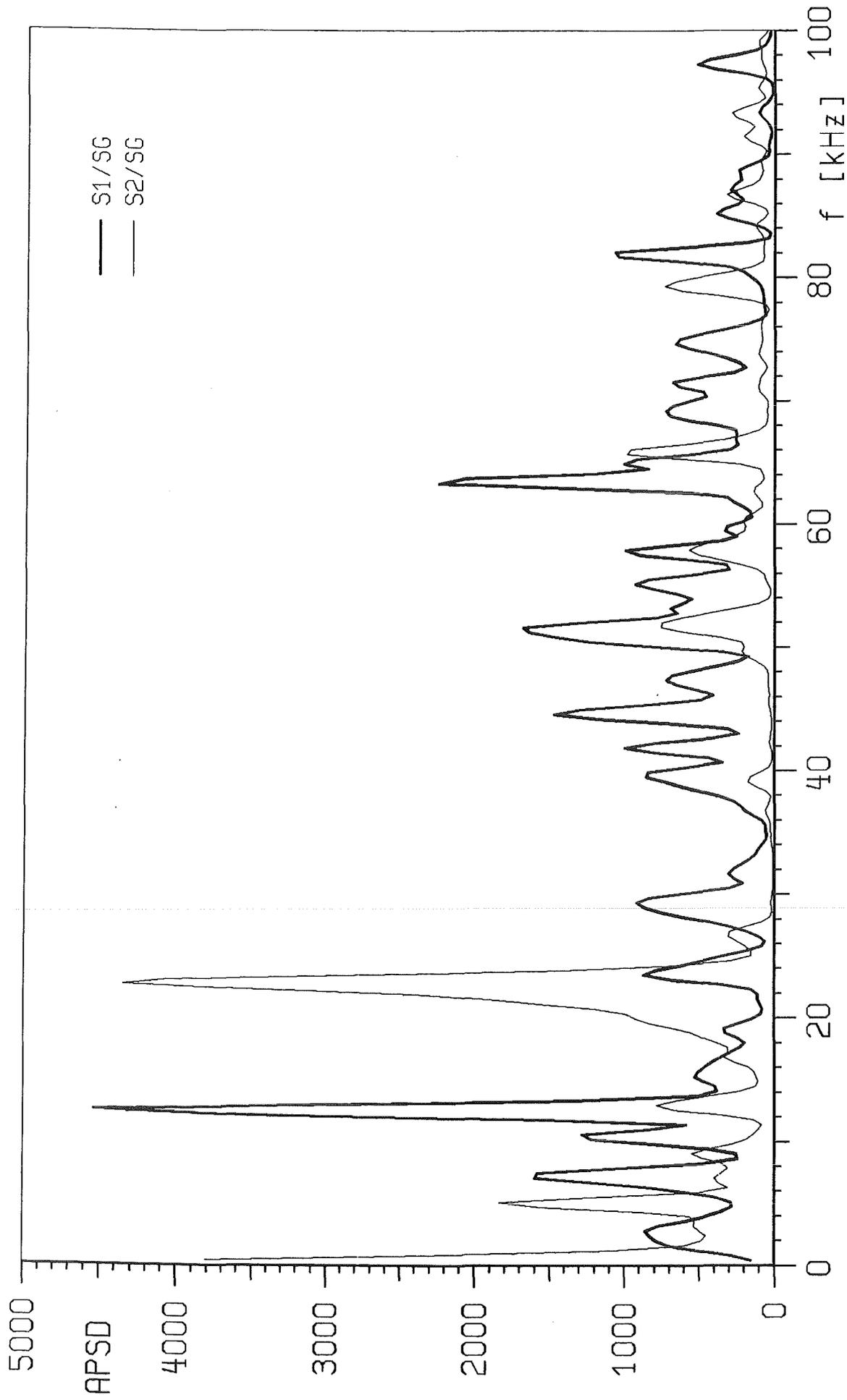


Abb. 23: Spektren von Siedegeräuschen in den Stopfen bei  $\dot{V}=12\%$



**Abb. 24: Siedesignale von verschiedenen Sensoren  
im Siedegenerator**

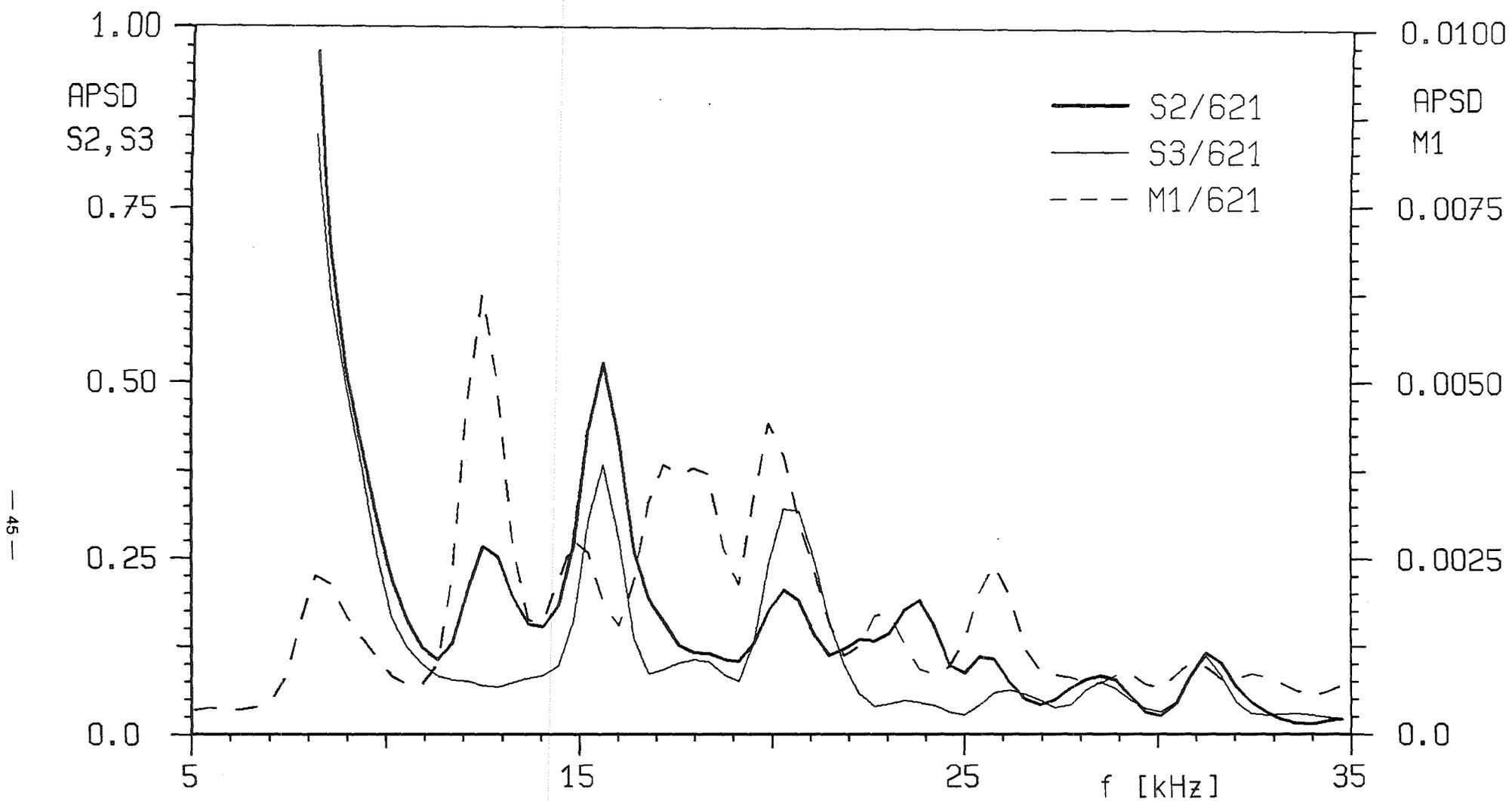


Abb. 25: Siedesignale von verschiedenen Sensoren im Oberplenum

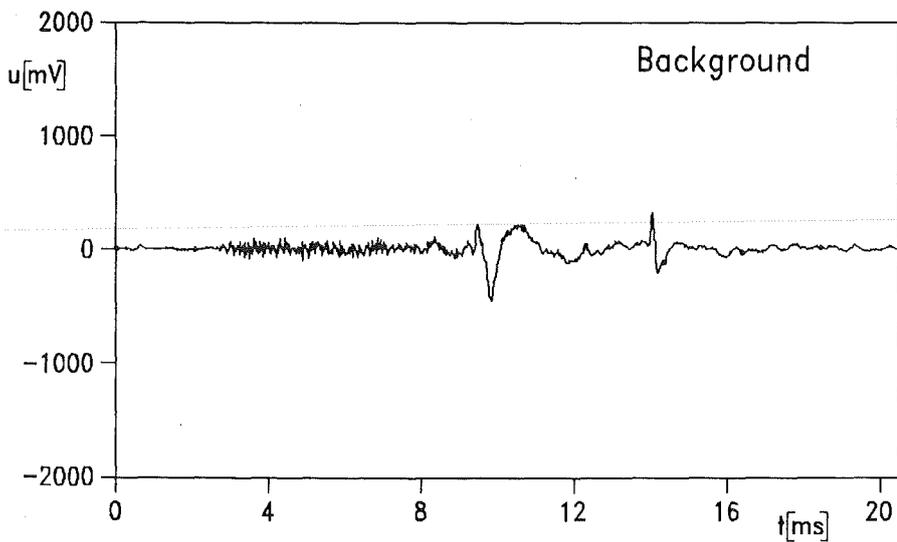
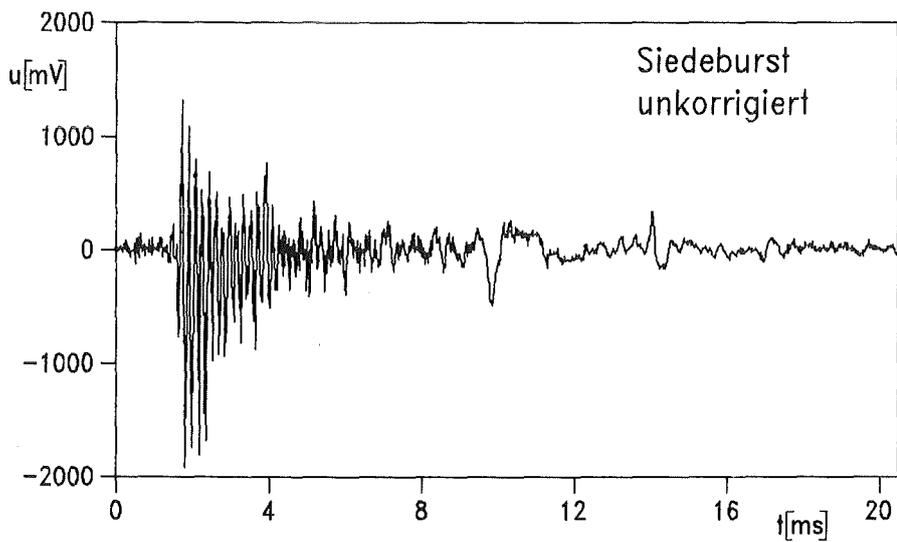
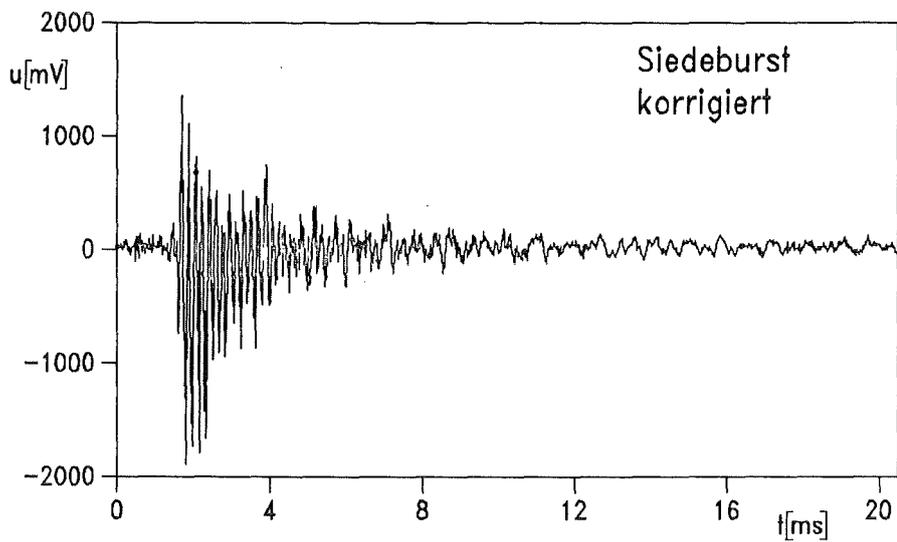


Abb. 26: Unterdrückung der elektrischen Störung im Quellgeräusch

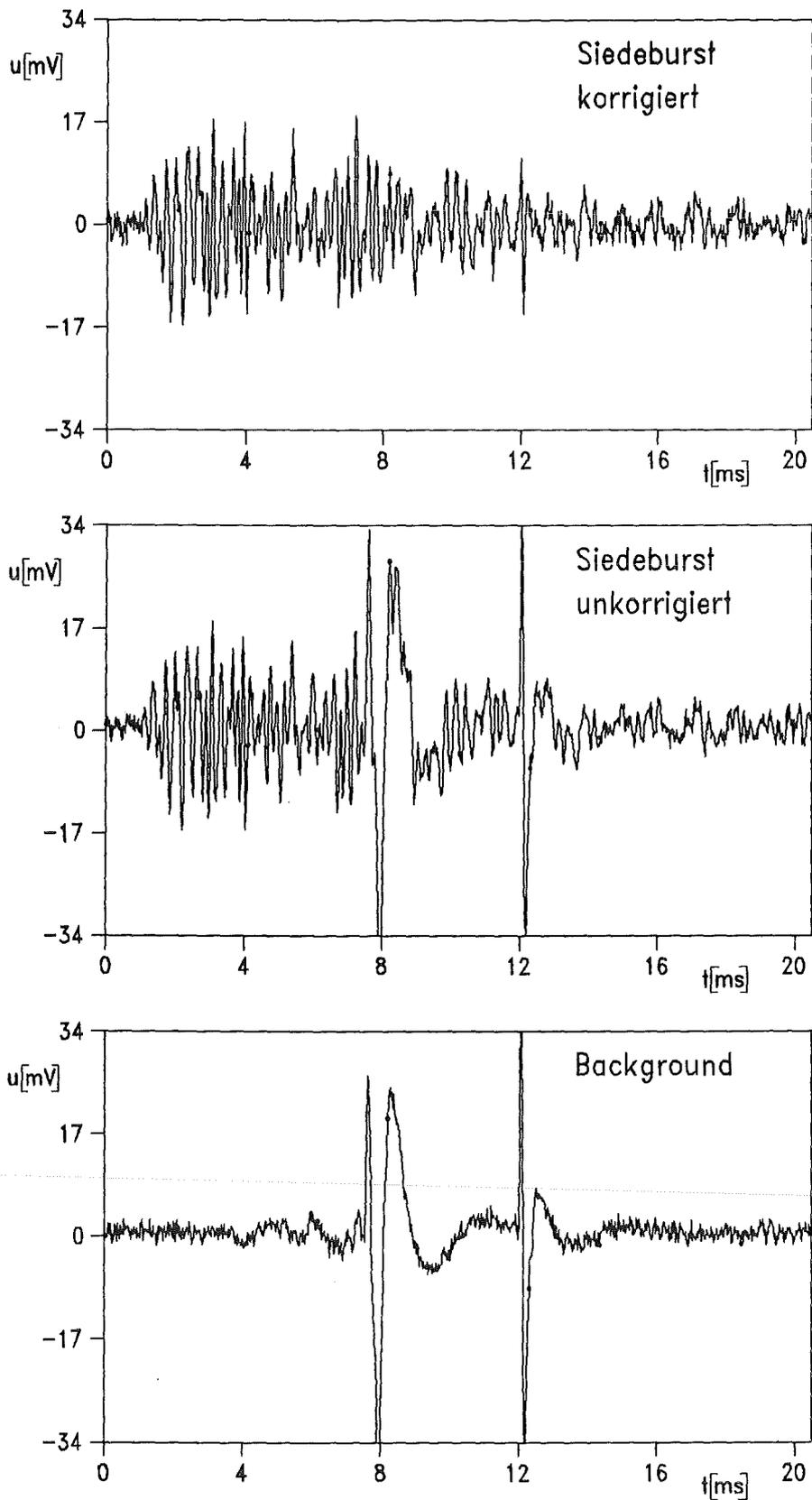
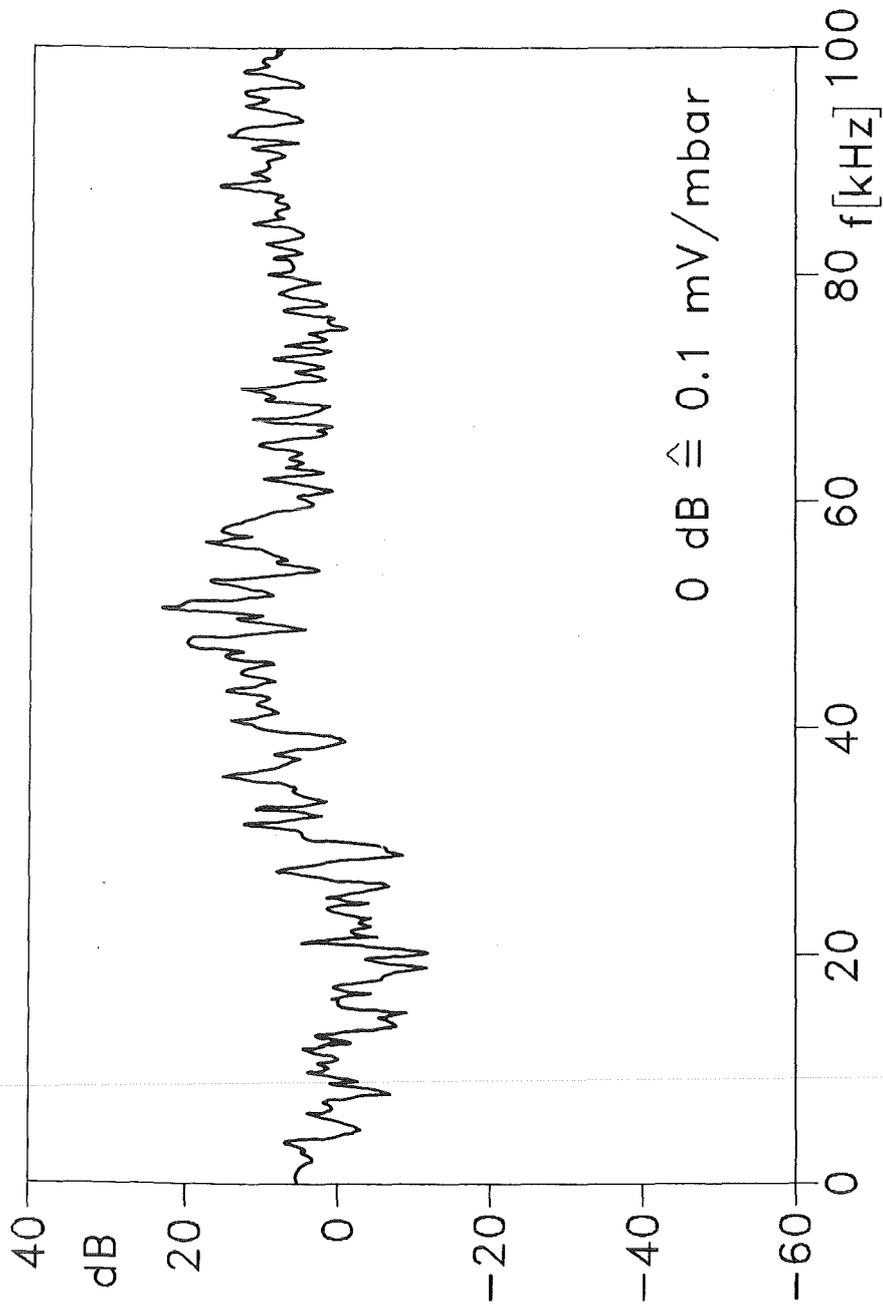


Abb. 27: Unterdrückung der elektrischen Störung im Siedegeräusch am Kernrand



---

---

KJK

Abb. 28: Empfindlichkeit eines Piezo - Schallsensors

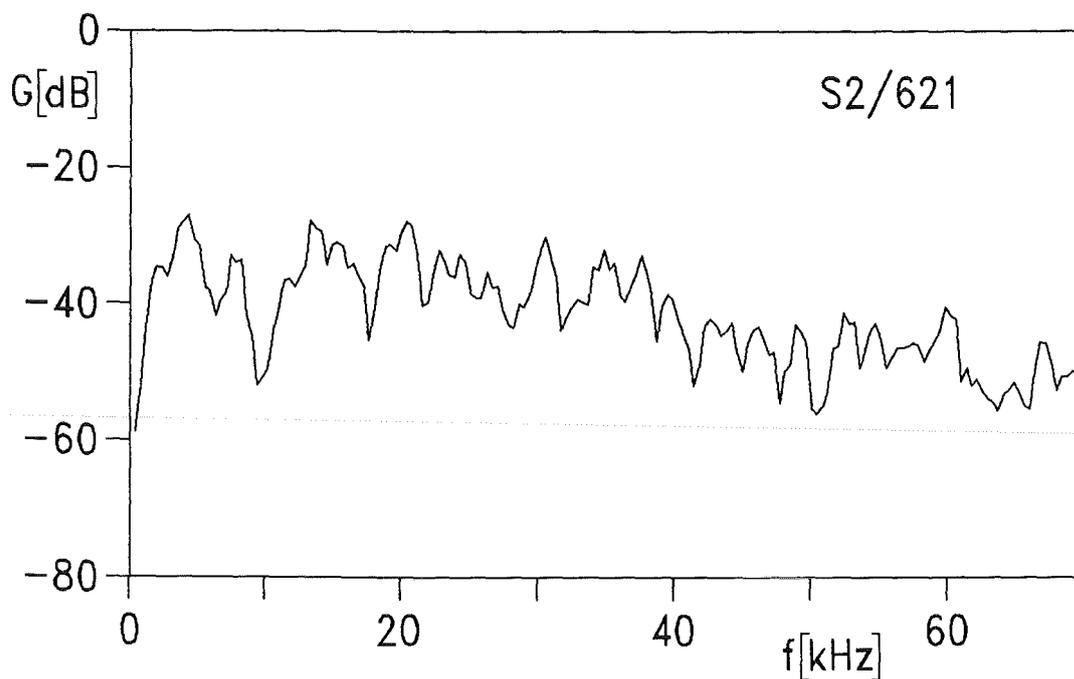
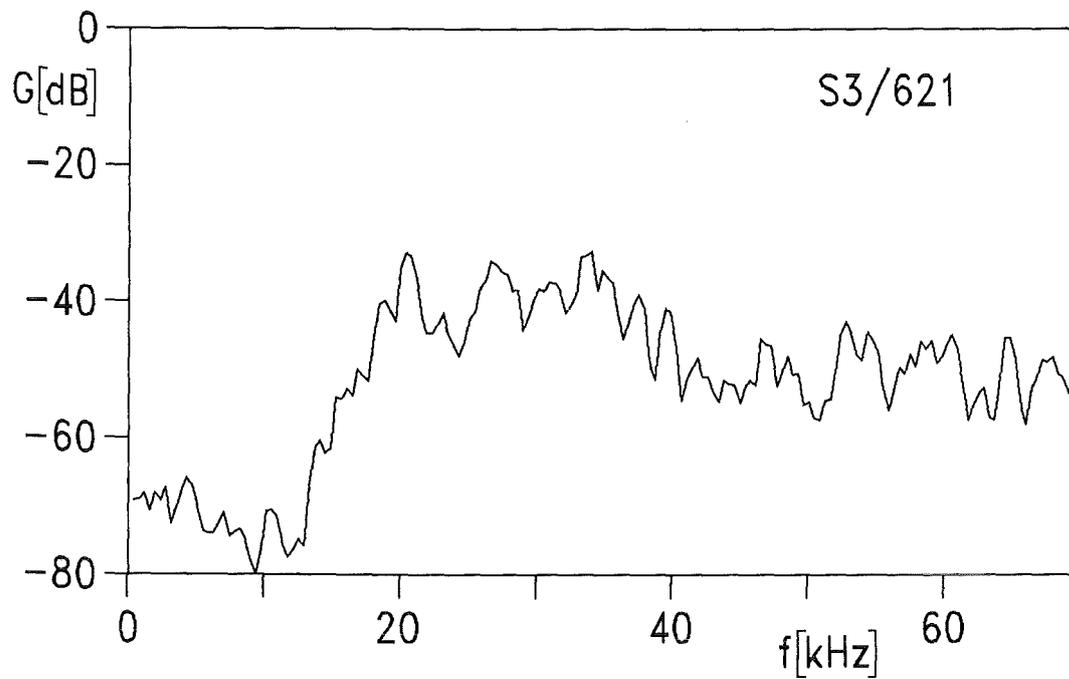


Abb. 29: Transferfunktion zum Oberplenium (dB);  $\dot{V}=49\%$

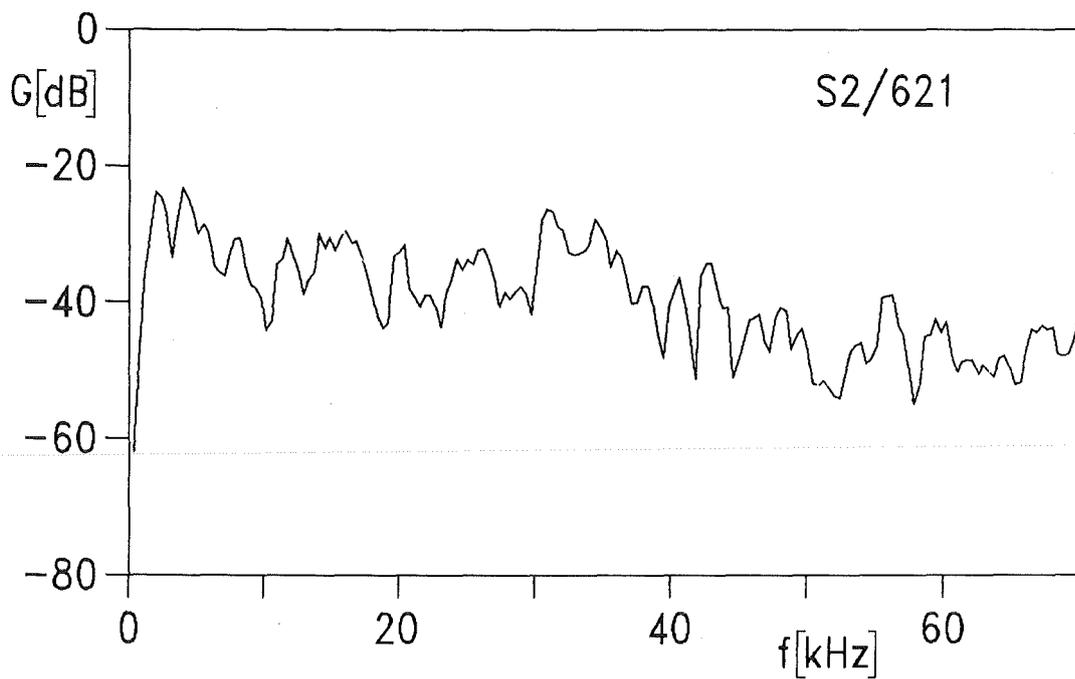
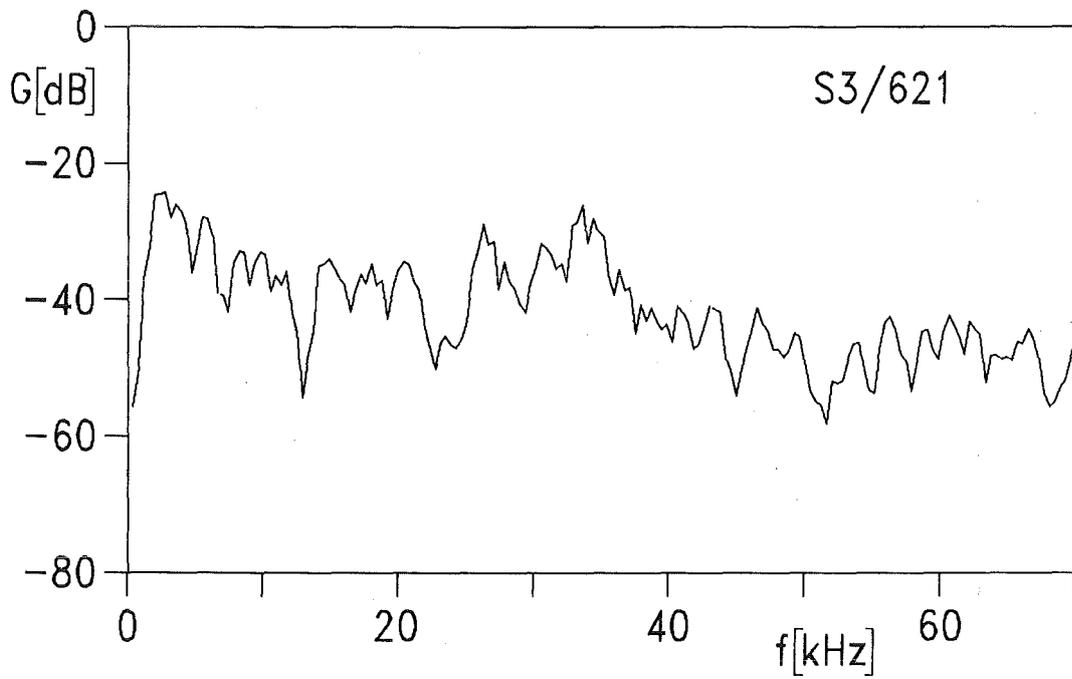


Abb. 30: Transferfunktion zum Oberplenum (dB);  $\dot{V}=29\%$

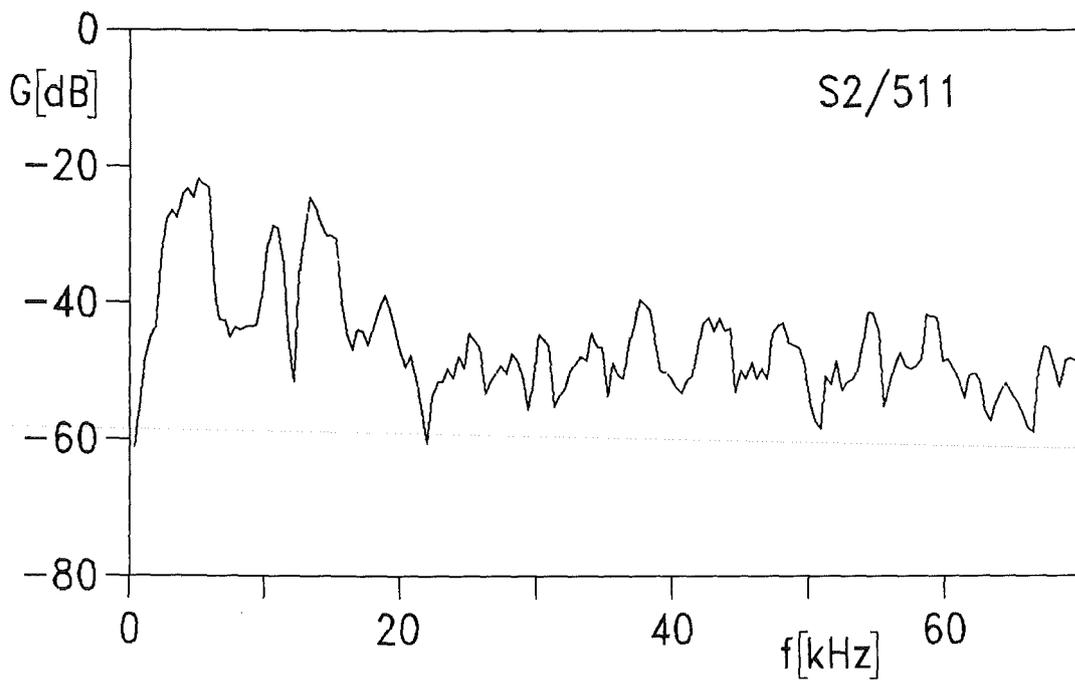
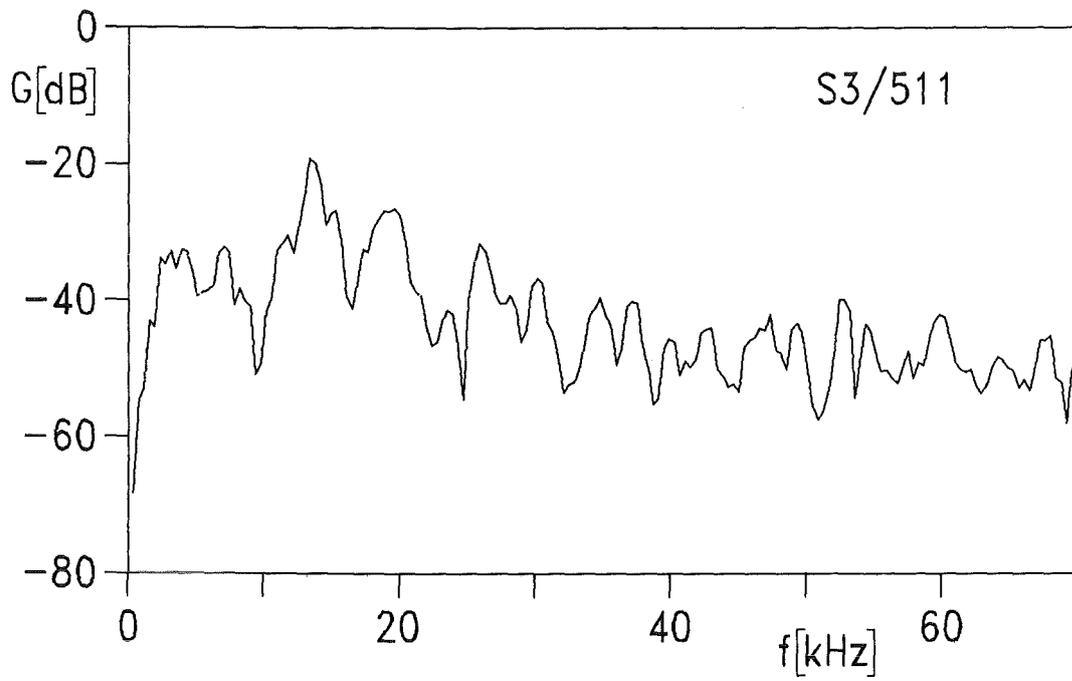


Abb. 31: Transferfunktion zum Kernrand (dB);  $\dot{V}=49\%$

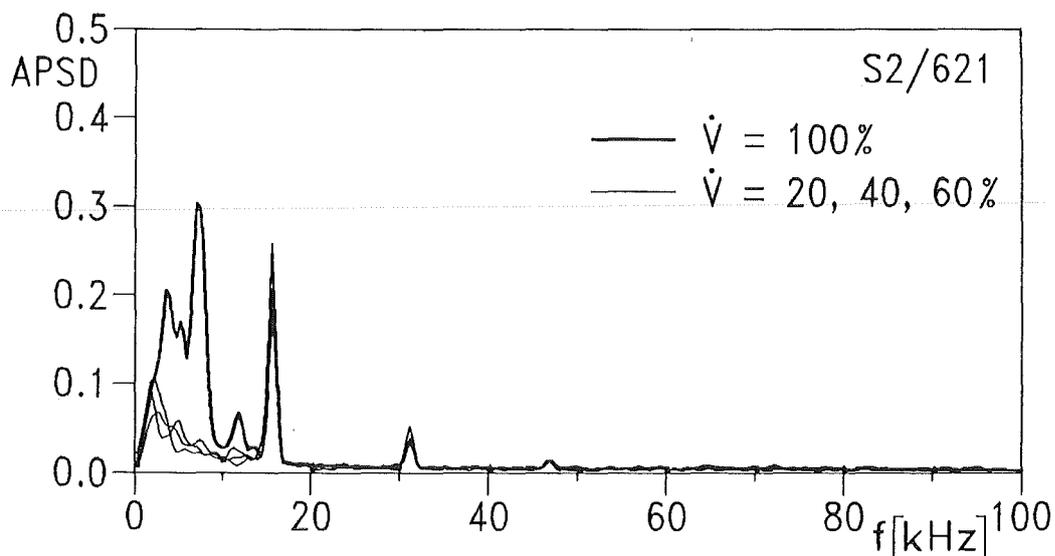
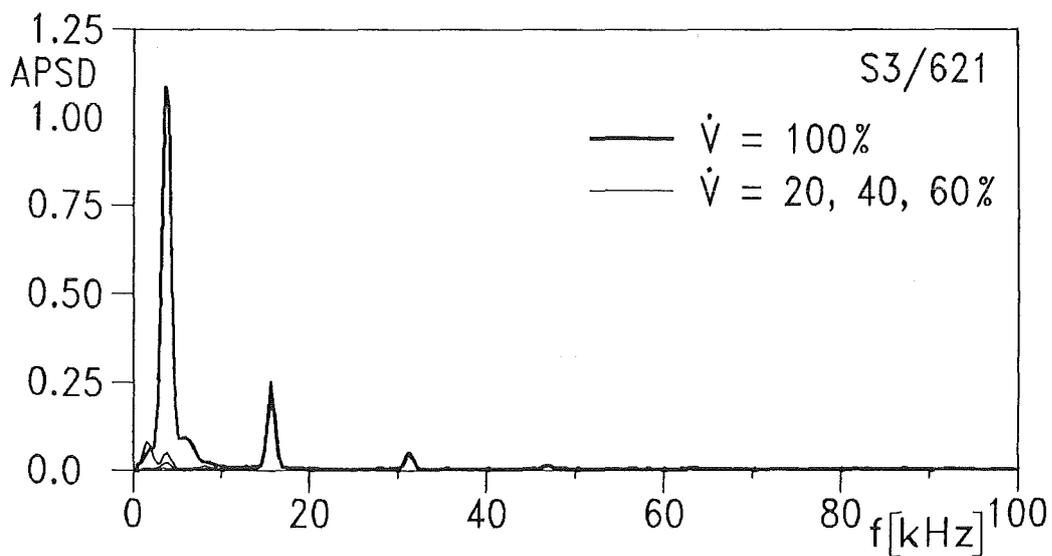
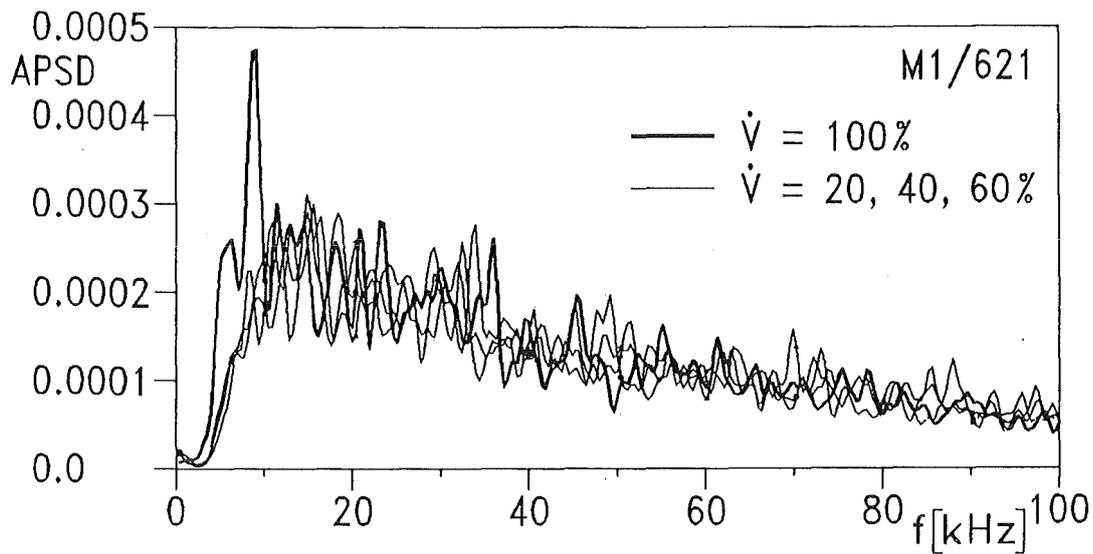
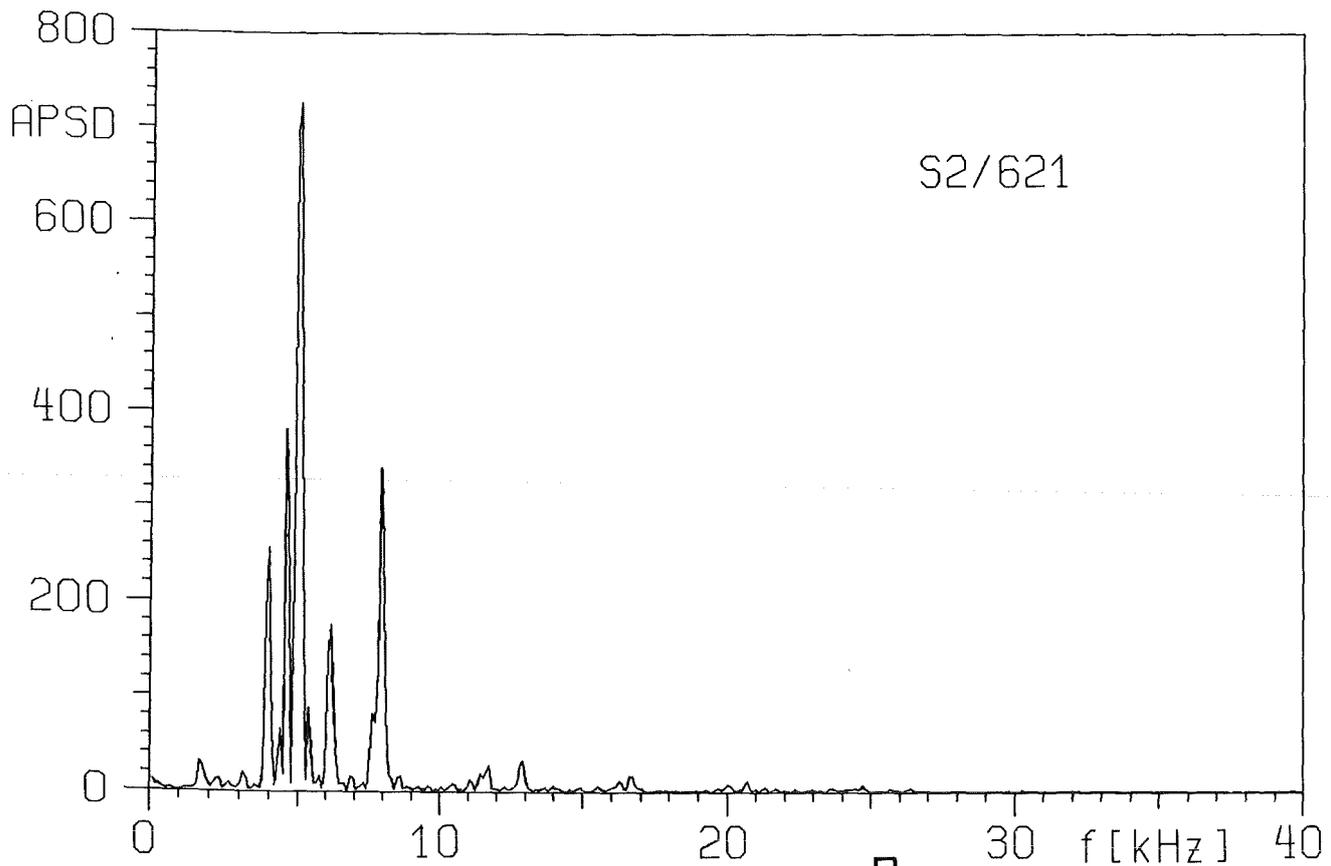
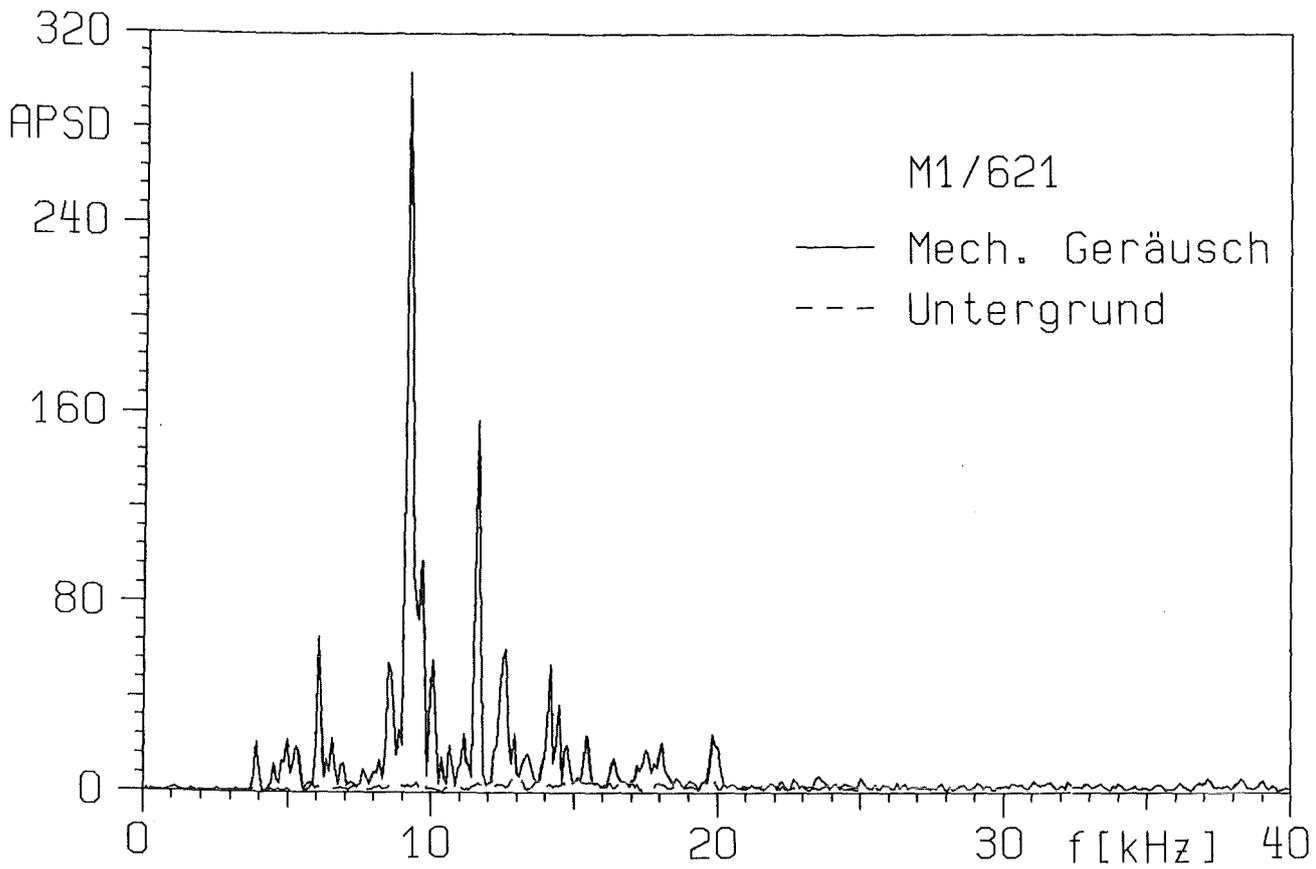
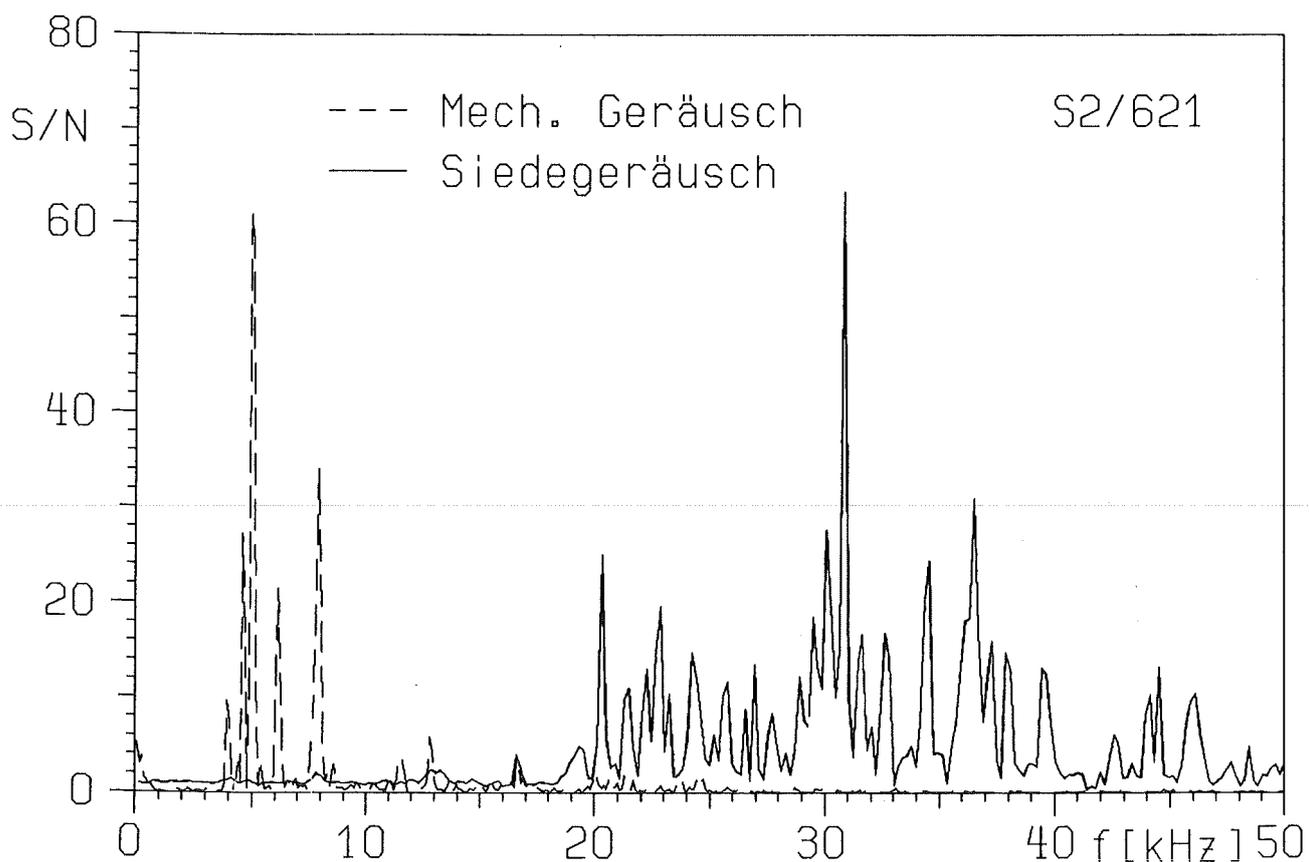
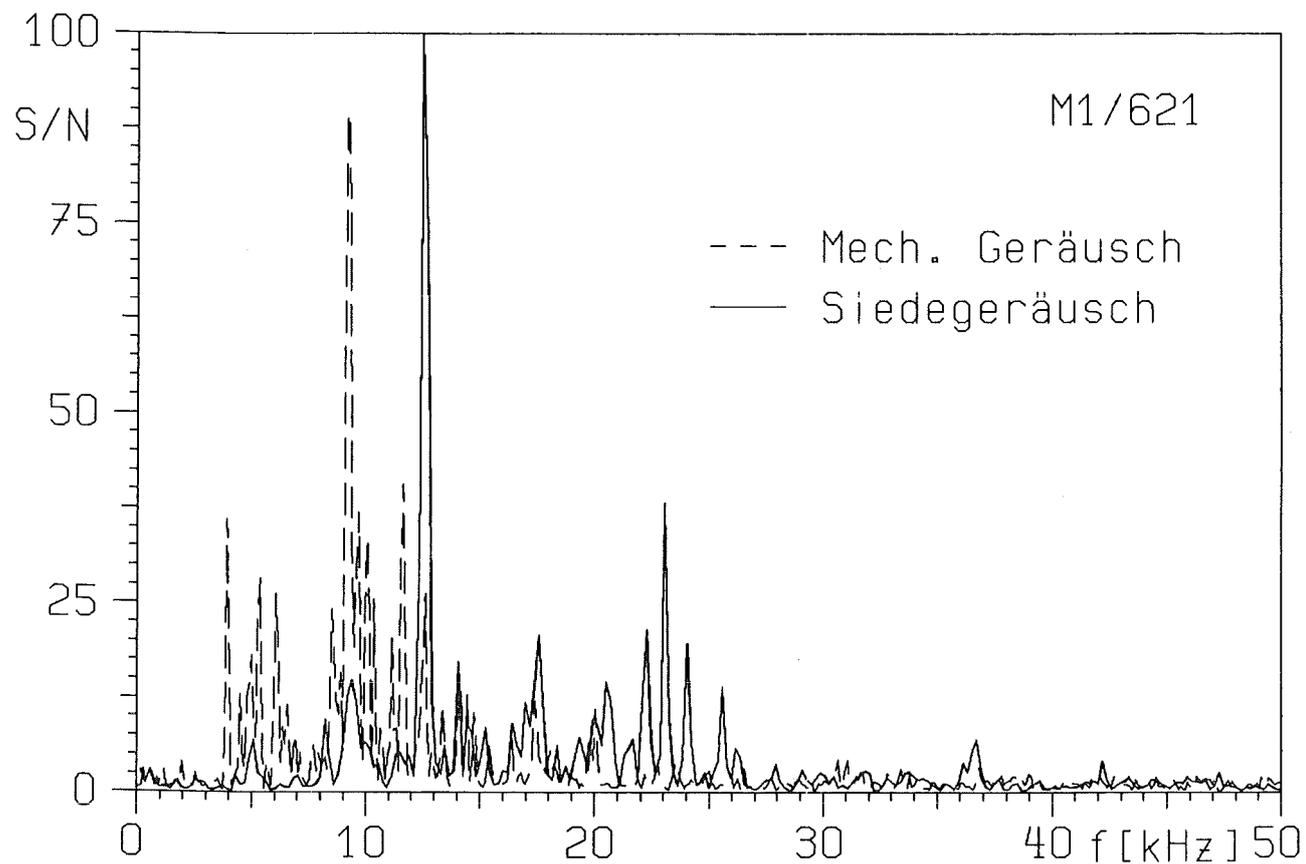


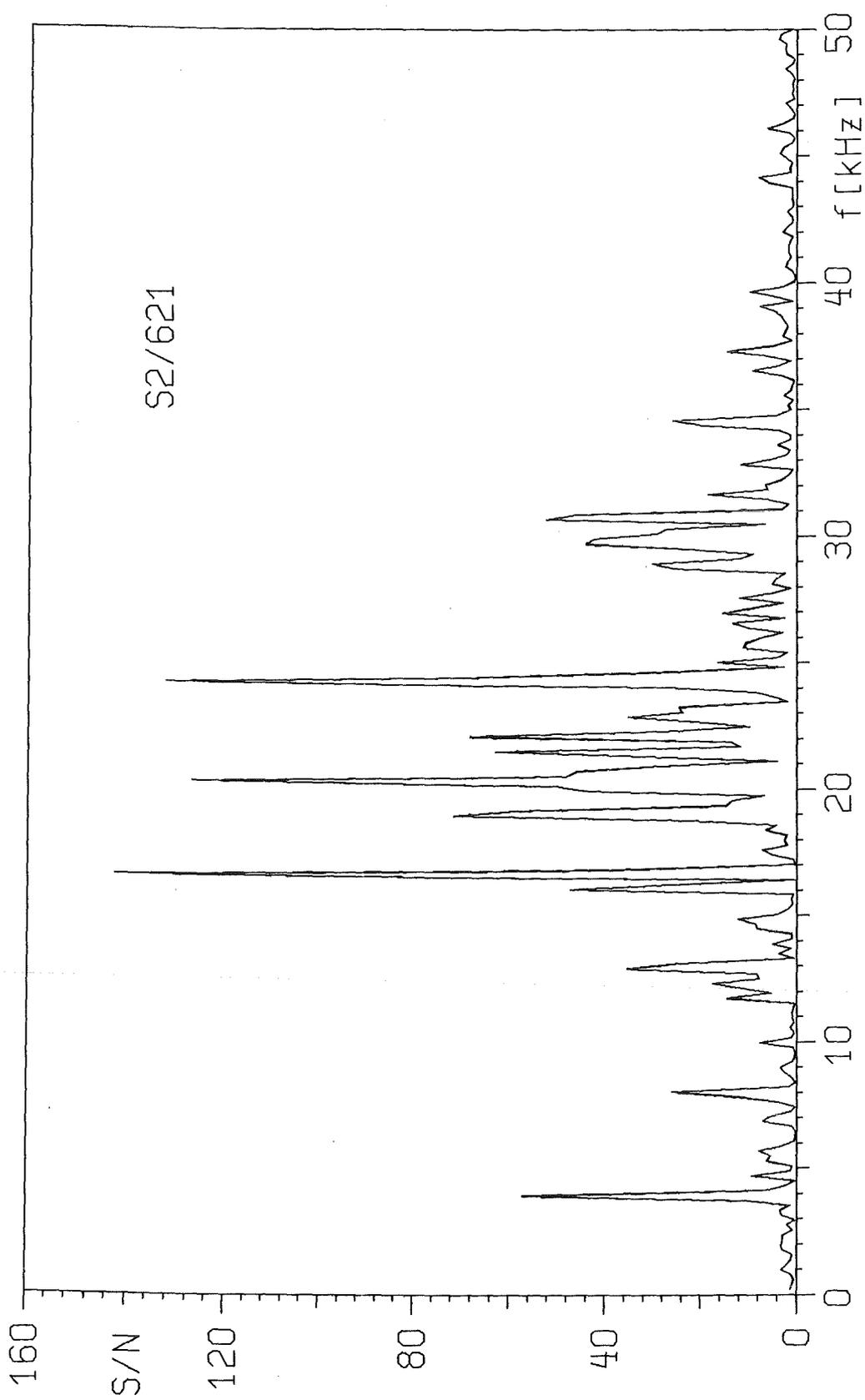
Abb. 32: Untergrundgeräusche im Oberplenium der KNK II



**Abb. 33: Spektren von mechanisch angeregten Geräuschen im Oberplenum**

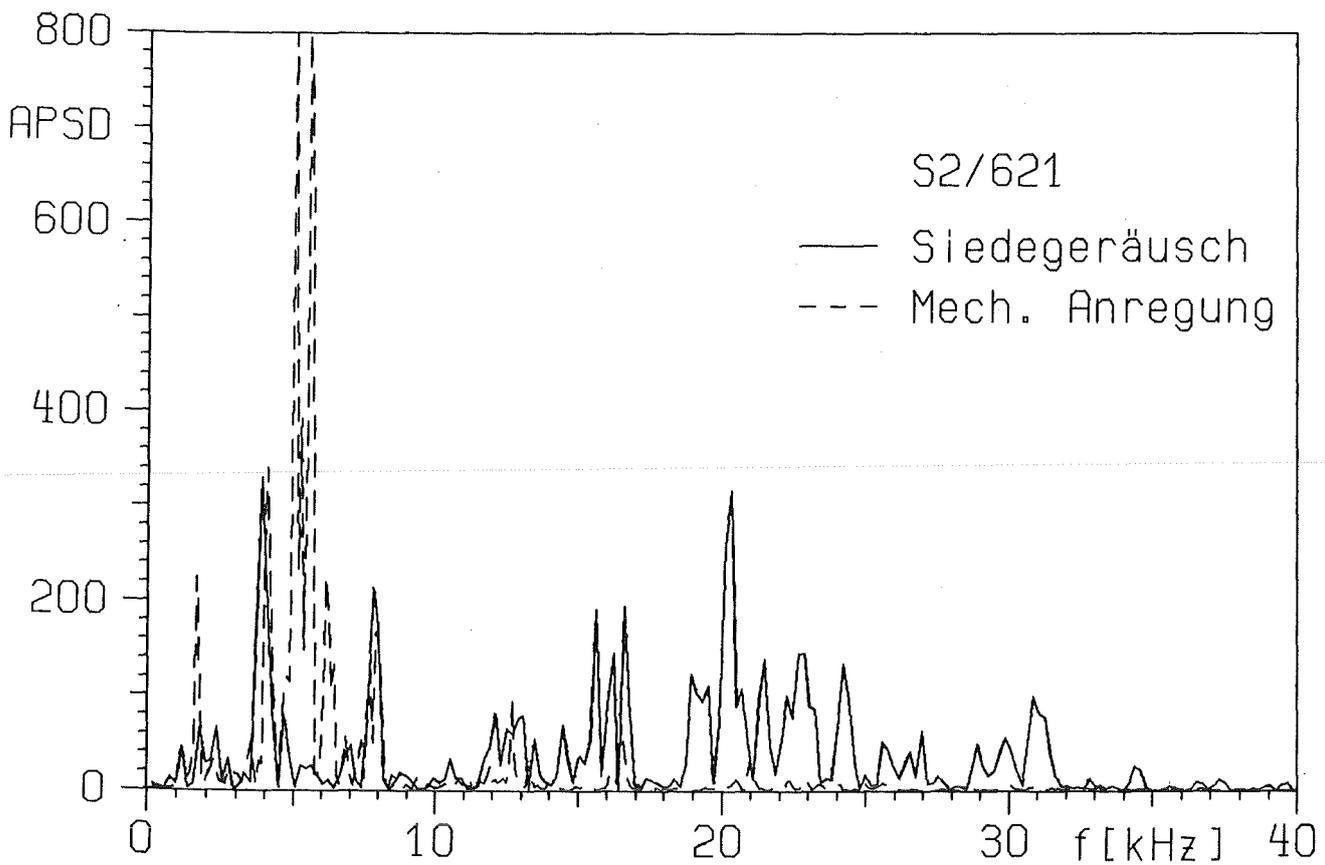
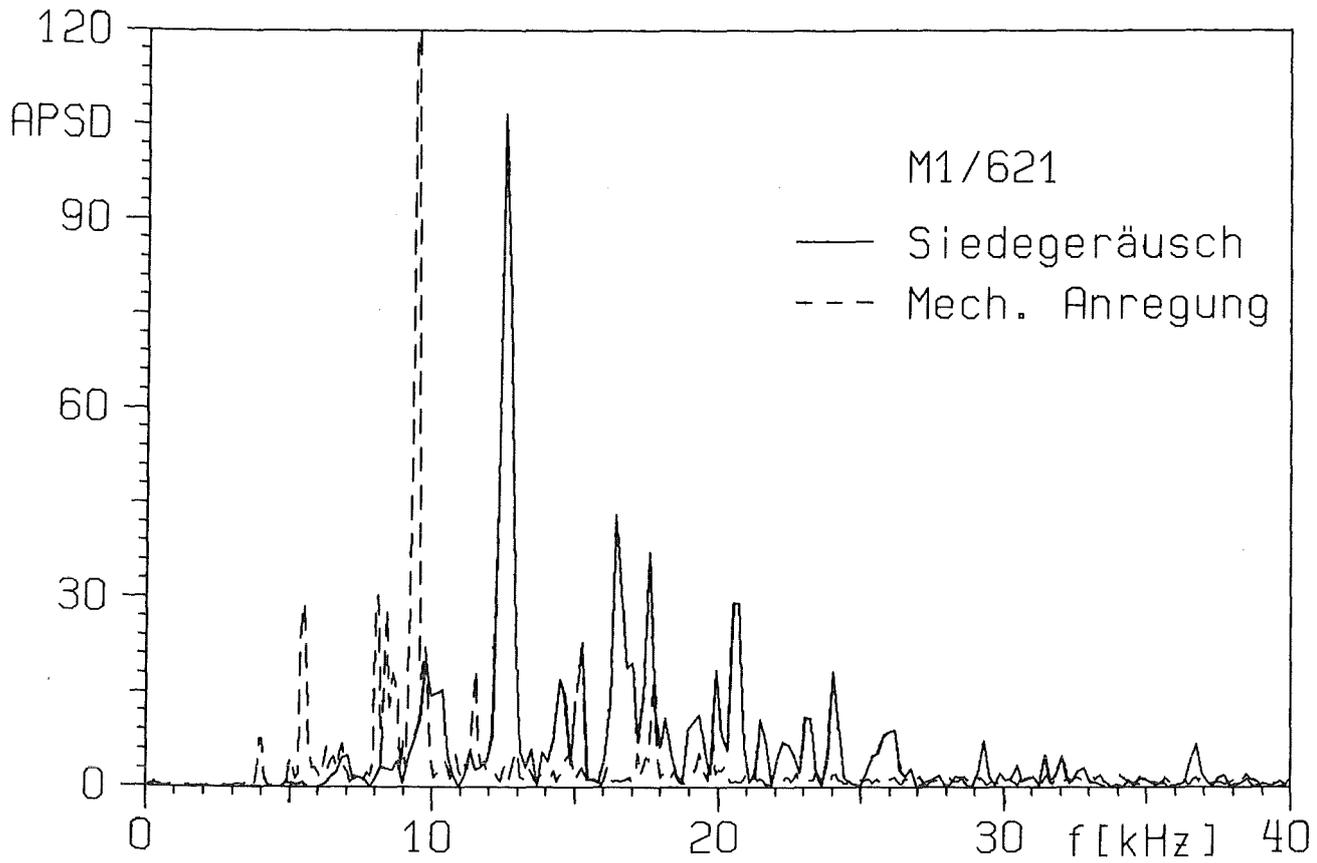


**Abb. 34: Vergleich Siedegeräusche -  
mechanische Geräusche (S/N)**



KJK

Abb. 35: S/N - Spektrum eines ungestörten Siedebursts



**Abb. 36: Vergleich unterschiedlicher im SG angeregter Geräusche**

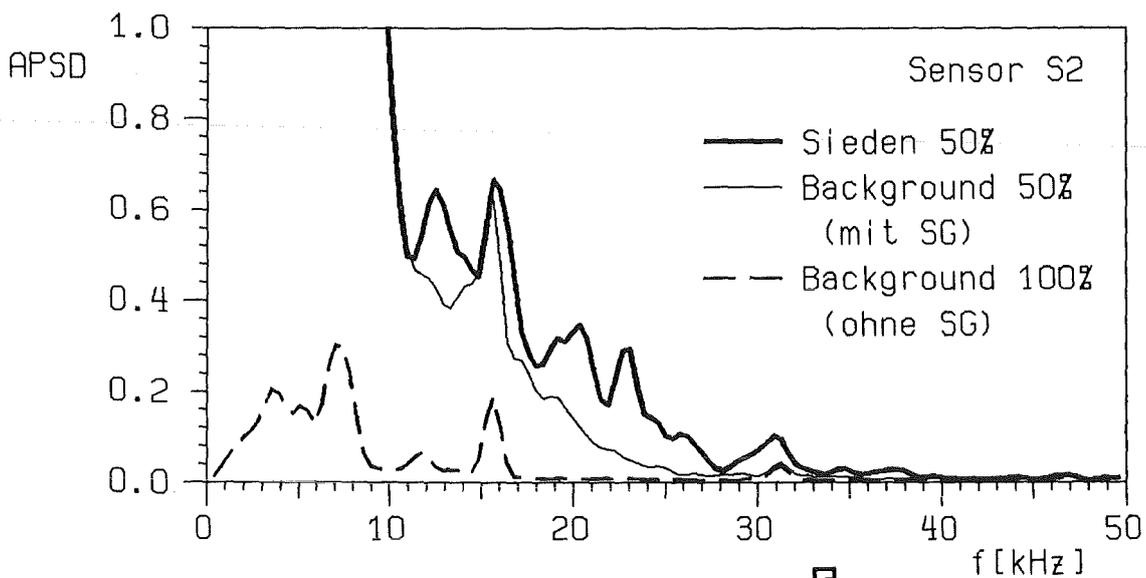
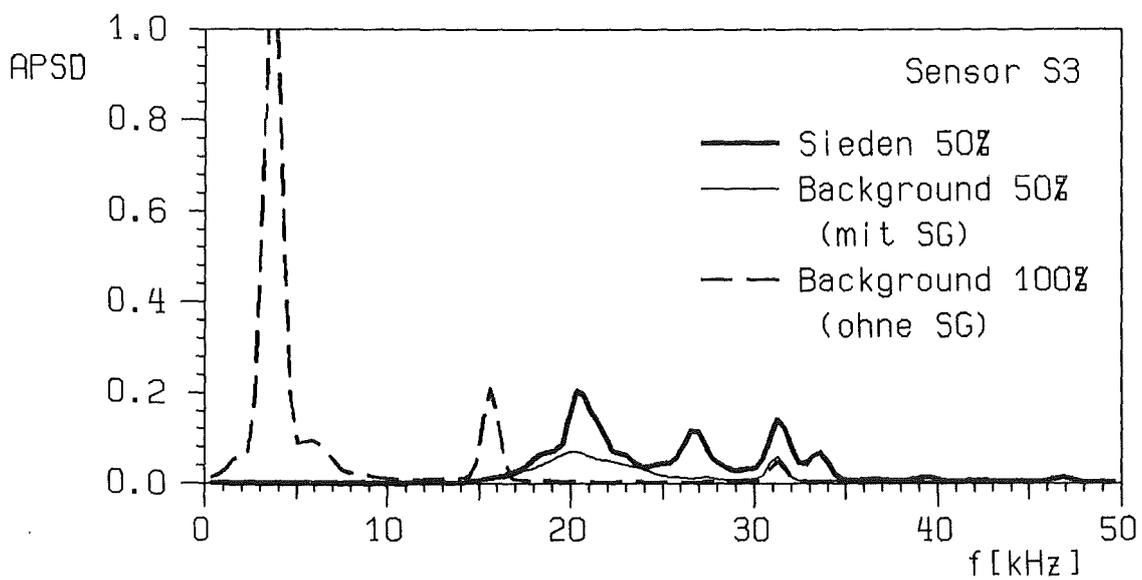
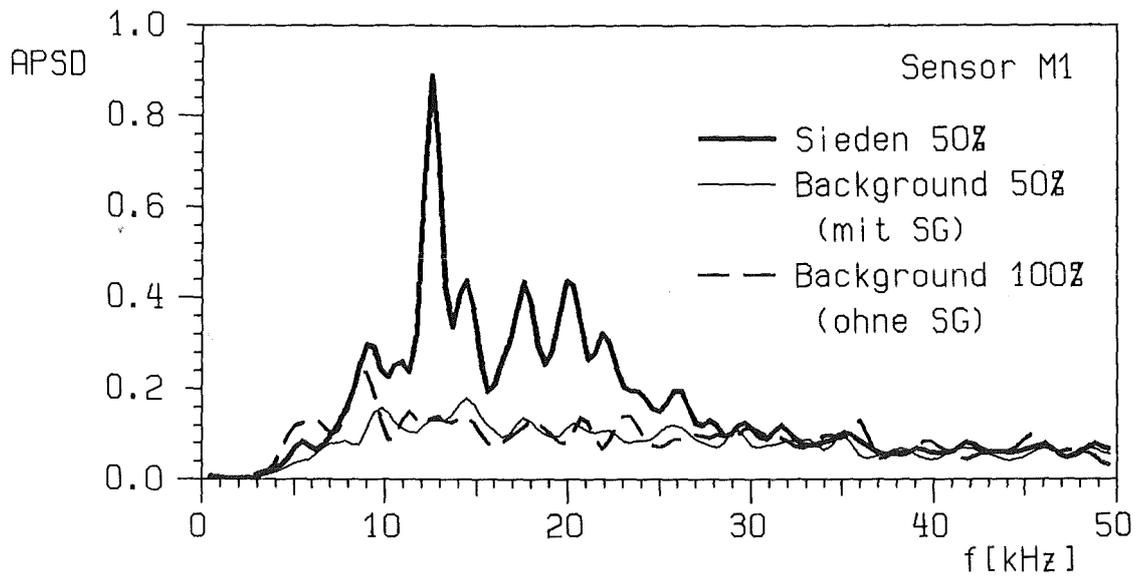
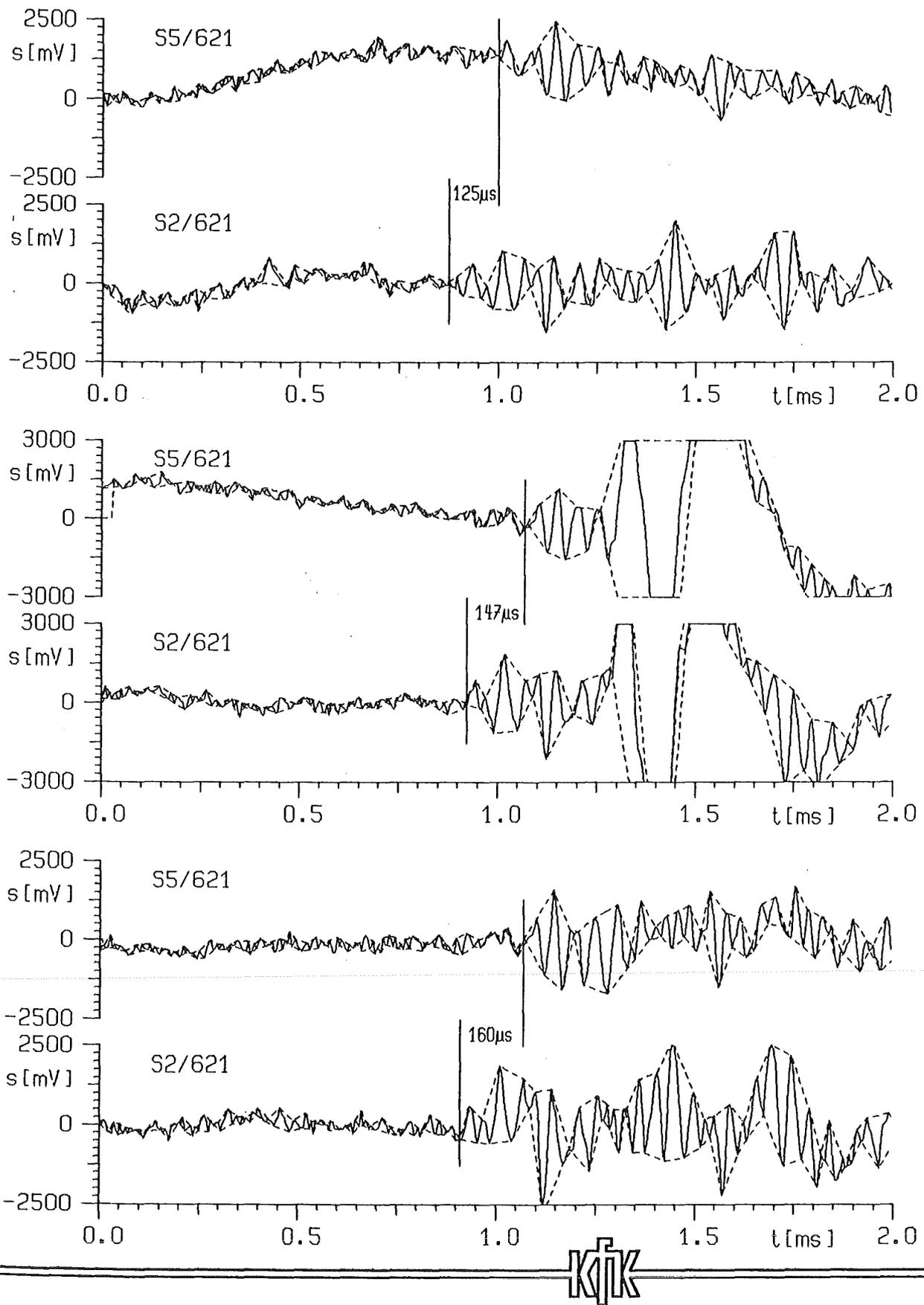


Abb. 37: Siede- und Backgroundgeräusche im Oberplenium der KNK II



**Abb. 38: Laufzeitdifferenzen zwischen einzelnen Sensoren im Oberplenum**

Sensor	Position	Wandlerprinzip	Hersteller
S1 S2 S3	Siedegener. " "	Piezo (LiNbO <sub>3</sub> ) " "	KfK/IRE " "
S1 S2 S3 S4 S5 M1 M2 LI1	Stopfen 511 " " " " " " " "	Piezo (LiNbO <sub>3</sub> ) " " " " Magnetostriktiv " Piezo (LiNbO <sub>3</sub> )	KfK/IRE " " " " Interatom " "
S1 S2 S3 S4 S5 M1 LI1	Stopfen 621 " " " " " " "	Piezo (LiNbO <sub>3</sub> ) " " " " Magnetostriktiv Piezo (LiNbO <sub>3</sub> )	KfK/IRE " " " " Interatom "
S1 S2 S3 S4 S5 M1 LI1 LA1	Stopfen 626 " " " " " " " "	Piezo (LiNbO <sub>3</sub> ) " " " " Magnetostriktiv Piezo (LiNbO <sub>3</sub> ) "	KfK/IRE " " " " Interatom " ANL

Tab. 1: Art und Einsatzpositionen der Schallsensoren

Versuch	Na- Durchsatz	Q (max)	Q (SB)	Na- Temp.
SG8	200 m <sup>3</sup> /h (19%)	69 W/cm <sup>2</sup>	57 W/cm <sup>2</sup>	400 °C
SG9	200 m <sup>3</sup> /h (19%)	69 W/cm <sup>2</sup>	57 W/cm <sup>2</sup>	400 °C
SG10	120 m <sup>3</sup> /h (12%)	65 W/cm <sup>2</sup>	53 W/cm <sup>2</sup>	400 °C
SG11	120 m <sup>3</sup> /h (12%)	65 W/cm <sup>2</sup>	59 W/cm <sup>2</sup>	400 °C
SG12	120 m <sup>3</sup> /h (12%)	69 W/cm <sup>2</sup>	65 W/cm <sup>2</sup>	300 °C
SG13	200 m <sup>3</sup> /h (19%)	92 W/cm <sup>2</sup>	71 W/cm <sup>2</sup>	300 °C
SG14	120 m <sup>3</sup> /h (12%)	123 W/cm <sup>2</sup>	117 W/cm <sup>2</sup>	400 °C
SG15	200 m <sup>3</sup> /h (19%)	123 W/cm <sup>2</sup>	117 W/cm <sup>2</sup>	400 °C
SG16	300 m <sup>3</sup> /h (29%)	123 W/cm <sup>2</sup>	109 W/cm <sup>2</sup>	400 °C
SG17	400 m <sup>3</sup> /h (39%)	129 W/cm <sup>2</sup>	113 W/cm <sup>2</sup>	400 °C
SG18	500 m <sup>3</sup> /h (49%)	153 W/cm <sup>2</sup>	145 W/cm <sup>2</sup>	400 °C
SG19	120 m <sup>3</sup> /h (12%)	147 W/cm <sup>2</sup>	141 W/cm <sup>2</sup>	300 °C
SG20	120 m <sup>3</sup> /h (12%)	153 W/cm <sup>2</sup>	146 W/cm <sup>2</sup>	300 °C
SG21	200 m <sup>3</sup> /h (19%)	165 W/cm <sup>2</sup>	154 W/cm <sup>2</sup>	300 °C
SG22	300 m <sup>3</sup> /h (29%)	165 W/cm <sup>2</sup>	143 W/cm <sup>2</sup>	300 °C
SG23	400 m <sup>3</sup> /h (39%)	185 W/cm <sup>2</sup>	165 W/cm <sup>2</sup>	300 °C
SG24	500 m <sup>3</sup> /h (49%)	199 W/cm <sup>2</sup>	178 W/cm <sup>2</sup>	300 °C
SG25	200 m <sup>3</sup> /h (19%)	207 W/cm <sup>2</sup>	157 W/cm <sup>2</sup>	300 °C

Tab. 2: Thermohydraulische Parameter der Siederversuche in der KNK II