

---

## Abschlussbericht zum Forschungsprojekt

# Entwicklung eines Verfahrens zur Brunnen-Regenerierung mittels einer Ultraschall-Einheit

Dr. Wolfgang Bott  
Dipl.-Geol. Hella Wiacek  
Prof. Dr. Rolf-Dieter Wilken

Dezember 2003

DBU Förder-Nr. 18276

Laufzeit: Mai 2001 bis Oktober 2003

Berichtszeitraum: Mai 2001 bis Oktober 2003

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	2
Vorwort .....	3
1 Einleitung .....	4
1.1 Anlass .....	4
1.2 Zielsetzung .....	4
2 Grundlagen .....	6
2.1 Brunnenalterung .....	6
2.2 Regenerierungstechniken .....	7
2.3 Ultraschall .....	8
3 Methoden und Material .....	11
3.1 Konzept der Laborversuche .....	11
3.1.1 Versuchsanlage URSEL .....	11
3.1.2 Schallfeldmessungen .....	14
3.1.3 Temperaturmessung .....	15
3.1.4 Trübungsmessungen .....	15
3.1.5 Messung der Partikelgrößenverteilung .....	16
3.1.6 Versuche zur biologischen Verockerung .....	16
3.2 Konzeption der praktischen Feldversuche .....	17
4 Ergebnisse .....	22
4.1 Aufbau URSEL (Ultraschall Regenerierungs System im ESWE-Instituts Labor) .....	22
4.2 Die Laborversuche im halbtechnischen Maßstab .....	22
4.2.1 Untersuchungen zum Temperaturverhalten .....	22
4.2.2 Ultraschallmessung .....	23
4.2.3 Messung der Trübung .....	27
4.2.4 Partikelgrößenverteilung .....	30
4.2.5 Versuche zur biologischen Verockerung .....	31
4.3 Zusammenfassung .....	32
4.4 Einsatz der Ultraschallmethode an drei ausgewählten Brunnen .....	33
4.4.1 Eigenschaften der ausgewählten Brunnen .....	33
4.4.2 Ergebnisse .....	35
4.5 Auswertung gesammelter Daten und Aussagen zur Nachhaltigkeit .....	40
5 Projektverlauf .....	42
6 Fazit .....	44
7 Ausblick .....	47
8 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation .....	48
9 Literaturverzeichnis .....	50
10 Unterschrift .....	53
11 Anhang .....	54

## Vorwort

Die Grundwassergewinnung in Deutschland erfolgt zu einem großen Teil über Vertikalfilterbrunnen. Wasserinhaltsstoffe im Grundwasser wie beispielsweise Eisen und Mangan sowie Mikroorganismen verursachen während der Wasserförderung einen natürlichen Alterungsprozess der Brunnenrohre und des Filterkieses. Die Folge ist eine sinkende Förderleistung und die Notwendigkeit, die Brunnen zu regenerieren, um das ursprüngliche Fördervermögen wieder herzustellen. Konventionelle Regenerierungsverfahren arbeiten mit mechanischen und chemischen Methoden. Die Nachteile dieser Verfahren sind lange Ausfallzeiten (mehrere Tage) der zu reinigenden Brunnen und der Einsatz von umweltschädlichen chemischen Reinigungssubstanzen im sensiblen Grundwasserbereich.

Der Einsatz von Ultraschall in der Brunnenregenerierung in den letzten Jahren hat gezeigt, dass dieses neue Verfahren mit den zuvor genannten Anwendungen konkurrieren kann. Das Verfahren selbst ist als umweltfreundliche Methode einzustufen, da keine chemischen Lösungsmittel eingesetzt werden, die wieder aus dem Grundwasser entfernt werden müssen. Zudem wird die Ausfallzeit der Brunnen durch die kurze Behandlungsdauer von wenigen Stunden erheblich reduziert. Trotz all dieser Vorteile der Ultraschallmethode besteht jedoch das Problem, dass nicht alle Reinigungen den erwarteten Erfolg brachten.

Vor diesem Hintergrund haben die Fa. BRM Brunnensanierung Rhein-Main-Bodensee GmbH aus Biebergemünd und das ESWE-Institut für Wasserforschung und Wassertechnologie in Wiesbaden das Forschungsvorhaben „Entwicklung eines Verfahrens zur Brunnen-Regenerierung mittels einer Ultraschall-Einheit“ geplant. Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt hat das Forschungsprojekt genehmigt und förderte es unter dem Aktenzeichen 18276 mit einer Laufzeit von 2,5 Jahren. Das Gesamtvorhaben umfasste zwei wesentliche Projektteile.

- Im ersten Teil wurden im Labor des ESWE-Instituts Versuche an einem Modellbrunnen durchgeführt. Die hieraus gewonnenen Ergebnisse wurden
- in der zweiten Projektphase auf Praxisanwendungen der Ultraschallmethode übertragen. Dieser Part wurde von der Fa. BRM bearbeitet und vom ESWE-Institut wissenschaftlich betreut.

Der vorliegende Abschlussbericht des ESWE-Instituts für Wasserforschung und Wassertechnologie in Wiesbaden liefert eine Darstellung der wesentlichen Ergebnisse der Modell- und Geländeversuche und des gesamten Projektverlaufs. Über die Auswertung bereits durchgeführter Brunnenregenerierungen mit Ultraschall wurden zudem Aussagen zur Nachhaltigkeit der Methode abgeleitet. Am Ende des Berichts wird ein Fazit gezogen und die eingeschlagene Vorgehensweise und Methodik kritisch bewertet. Im Ausblick finden sich ergänzende Lösungsansätze zur weiteren Bearbeitung des Themas.

# 1 Einleitung

## 1.1 Anlass

Die Leistungsfähigkeit von Trinkwasserbrunnen, die durch natürliche Alterungsprozesse vermindert wurde, kann mittels verschiedener Reinigungs- bzw. Regenerierungsmethoden in einem solchen Maße gesteigert werden, dass der Brunnen wieder über einen längeren Zeitraum in seinem ursprünglichen Zustand bzw. annäherndem Neubauzustand betrieben werden kann. Hierfür wird in den letzten Jahren auch die vergleichsweise neue Methode der Ultraschallregenerierung eingesetzt. Zahlreiche Anwendungen lieferten gute bis sehr gute Resultate. Allerdings konnte das Verfahren nicht bei allen Einsätzen den gewünschten Erfolg bringen. Aus diesem Grund wird die umweltfreundliche Technik von vielen Brunnenbetreibern kritisch betrachtet und herkömmliche mechanische und chemische Methoden werden dem Ultraschallverfahren vorgezogen.

Die genauen Gründe sowohl für die erfolgreichen als auch die erfolglosen Anwendungen der Ultraschallmethode sind noch nicht zufriedenstellend beantwortet. Es wurden bisher nur wenige Untersuchungen zum Einsatz von Ultraschall in der Brunnenregenerierung durchgeführt. Aus diesem Forschungsbedarf heraus haben die Antragsteller dieses Projekt initiiert und bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt zur Förderung eingereicht.

## 1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung zum oben genannten Projekt umfasst die Beantwortung mehrerer Fragen:

- Unter welchen Bedingungen ist hoch energetischer Ultraschall am wirksamsten für die Brunnenreinigung?
- Wie weit reicht die Wirkung des Ultraschalls in den Ringraum eines Brunnens bzw. in den angrenzenden Aquifer?
- Kann die Ultraschallmethode erfolgreich zur Brunnenreinigung eingesetzt werden?
- Wie nachhaltig können Brunnen mit dem Ultraschallverfahren regeneriert werden?
- Welche Qualitätskriterien sind notwendig, um eine verlässliche Bewertung des Erfolges einer Brunnenregenerierung vorzunehmen?

Die Beantwortung dieser Fragen trägt dazu bei, die Wirksamkeit der fortschrittlichen, umweltfreundlichen Ultraschalltechnologie bei der Brunnenregenerierung zu bestimmen und Erfolgsprognosen für den Einsatz dieser Methode zu treffen bzw. abzuschätzen, ob in einem bestimmten Fall diese Methode erfolgreich eingesetzt werden kann oder nicht.

Zu diesem Zweck wurde die genaue Wirkung der Schallenergie bei einer Frequenz von 20 kHz in Abhängigkeit von verschiedenen Filtermaterialien und Kiesschüttungen im Ringraum bei unterschiedlichen Drücken in Laborversuchen im halbtechnischen Maßstab bestimmt. In exemplarischen Feldversuchen wurden die Laborergebnisse überprüft und erste Erkenntnisse zur Nachhaltigkeit der Ultraschallmethode gewonnen. Letztere wurden zusätzlich durch die

Auswertung bisheriger Regenerierungen mit Ultraschall, deren Ergebnisse zugänglich waren, ergänzt.

Während die Regenerierung von Brunnen mit Ultraschall unter den Bedingungen des freien Marktes mit Hinblick auf die bestmögliche Leistungssteigerung bei einer möglichst kurzen Ausfallzeit durchgeführt wird, wurden die Praxisversuche im Rahmen dieses Projektes zusätzlich zu den üblichen Kontrollmessungen in Form von Kamerabefahrungen und Kurzpumpversuchen mit bohrlochgeophysikalischen Verfahren überwacht. Diese Messungen erfolgten dreistufig

1. vor Beginn sämtlicher Arbeiten
2. nach Abschluß der mechanischen Vorreinigung
3. nach der Regenerierung mit Ultraschall

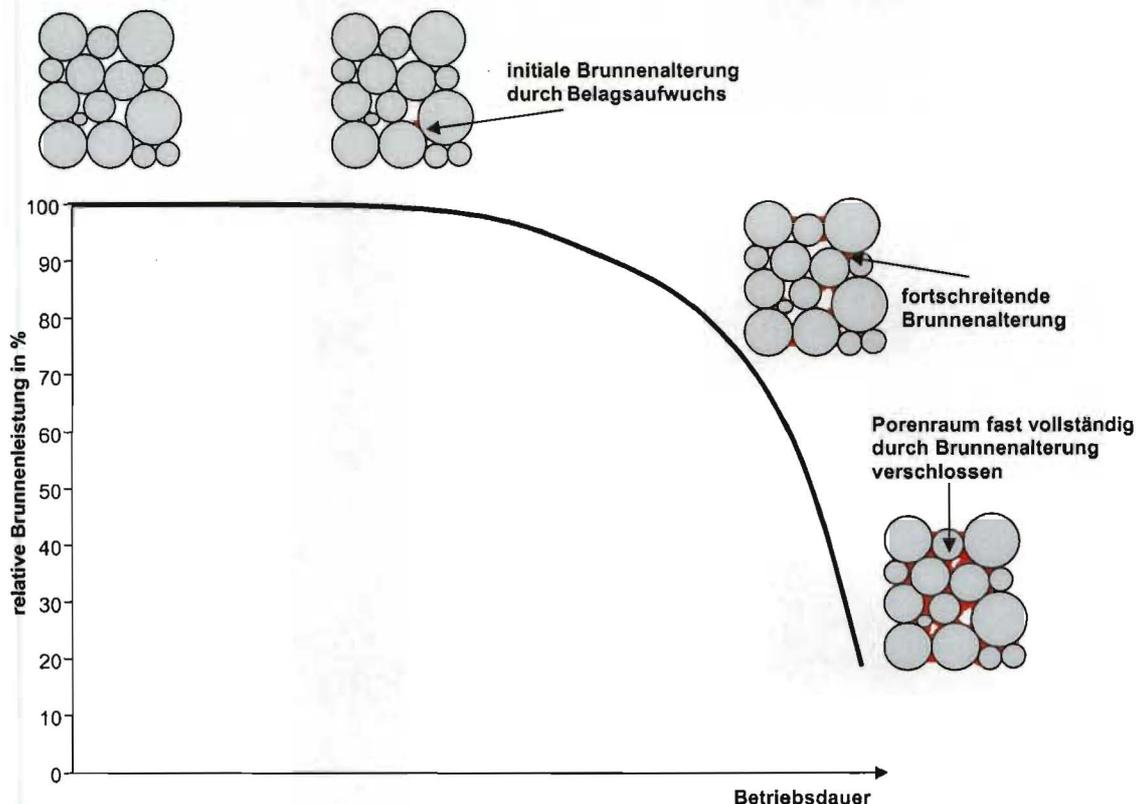
um die Wirkung des Ultraschalls isoliert erfassen zu können.

Der Einsatz geophysikalischer Messverfahren bietet ein unabhängiges, belastbares Kontrollinstrument und erlaubt die Beurteilung des Regeneriererfolges bis in den Ringraum hinein.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Brunnenalterung

BIESKE et al. (1998) geben als mittlere Lebensdauer eines Brunnens einen Zeitraum von etwa 25 Jahren an. Im Laufe dieser Betriebszeit kommt es zu einer allmählichen Abnahme der Brunnenförderleistung (Abb. 2-1), die sich während des Pumpbetriebs in einer zunehmenden Absenkung des Betriebswasserspiegels bei gleichem Ruhewasserspiegel und gleicher Entnahmemenge bemerkbar macht. Diese Abnahme der Förderleistung geht auf eine Zunahme des Durchflusswiderstandes zurück und wird allgemein als Brunnenalterung bezeichnet. Weitere Indizien für eine Brunnenalterung sind eine Zunahme der Stromaufnahme der Unterwasserpumpe, eine Veränderung der hydrochemischen und/oder biologischen Wasserbeschaffenheit sowie das Mitführen von Trübstoffen und Sand im geförderten Wasser.



**Abb. 2-1:** Ablagerungsdynamik der Verockerungsprodukte im Filterkies und resultierende Verlauf der relativen Brunnenleistung (vereinfacht nach WIACEK, 2003).

Durch die Prozesse der Brunnenalterung wird das Hohlraumvolumen im Bereich des Brunnens – Porenräume und Porenkanäle der Kiesschüttung und Filterschlitze – durch Ablagerungen zunehmend verringert. Werden keine Maßnahmen zur Brunnenreinigung ergriffen, führt dies im Endstadium zum vollständigen „Zufahren“ des Brunnens.

Man unterscheidet verschiedene Alterungsarten, die oft in Kombination auftreten (DVGW 2001; HOUBEN & TRESKATIS 2003; PAUL 1994a):

- Versandung (Ablagerung von Sand und Schluff in den Hohlräumen)
- Korrosion der Brunnenrohre und anderer metallischer Brunnenteile
- Verschleimung (Verringerung des Hohlraumvolumens durch die Aktivität von schleimbildenden Bakterien und Pilzen)
- Ablagerung von Aluminiumverbindungen nach deren chemischer Fällung
- Versinterung (Ablagerung bzw. Inkrustation von Karbonaten)
- Verockerung (Ausfällung und Ablagerung von Eisen- und Manganverbindungen)

Brunnenalterung durch Verockerung zusammen mit bakterieller Schleimbildung tritt nach KREMS (1979), ROGALSKY (1992) und PAUL (1994a) am häufigsten auf. HOUBEN et al. (1999) geben in ihrem Aufsatz die Zusammensetzungen der häufigsten Brunnenbeläge an. Die große Bedeutung von biologisch induzierter Verockerung wird von HÄSSELBARTH & LÜDEMANN (1967) und KREMS (1979) dargestellt.

## 2.2 Regenerierungstechniken

Da es wasserrechtlich schwierig ist, neue Standorte für Brunnenbauwerke zu finden und der finanzielle Aufwand eines Brunnenneubaus nicht unerheblich ist (WALTER, 2001), kommt dem Erhalt der Brunnenleistung durch Regenerierungsmaßnahmen besondere Bedeutung zu. Eingesetzt werden zur Zeit überwiegend mechanische und chemische sowie kombinierte Reinigungsverfahren [BERGER ET AL. (1992, 1995), DVGW (2001), ETSCHER ET AL. (2001), HOUBEN & TRESKATIS (2003), PAUL (1994), STADTWERKE WIESBADEN (1992), TRESKATIS (1998)]:

- Bürsten (als Vorreinigung)
- Auspumpen (als Vorreinigung)
- Intensiventnahme (z.B. abschnittsw. Intensiv-Entsanden, DVGW-Merkblatt W 117)
- Kolben
- Injektion mit CO<sub>2</sub> (gasförmig und flüssig)
- Wasserniederdruckspülung
- Wasserhochdruckspülung
- Druckwellen-/Impulsverfahren, Erzeugung durch
  - Wasserhochdruck
  - Impulse (z.B. Knallgas, Wasser- oder Luftkomprimierung, Sprengladungen)
  - Ultraschall

Die mechanische Reinigung basiert auf der Wirkung hoher Scherkräfte im Medium. Durch Bürsten- und Hochdruckreinigungssysteme werden abgelagerte Stoffe, die nicht vollständig ausgehärtet sind, gelöst und anschließend mit dem Grundwasser abgepumpt (DVGW 2001). In einer anschließenden Separationsstufe erfolgt die Trennung des mit Feststoff beladenen Grundwassers. Die Dauer der mechanischen Regenerierung kann je nach Brunnentiefe und

Grad der Brunnenbeläge auf den Filterrohren mehrere Tage dauern. Als Nachteile dieses Verfahrens werden häufig Beschädigung der Brunnenrohre, die Umlagerung des Filterkorns und die Verdichtungen der Schmutzpartikel in den Porenhohlräumen der Kiespackung genannt (BÄCHLE & MELZER, 1992).

Nach einer erfolgten mechanischen Reinigung schließt sich in den meisten Fällen eine chemische Reinigung an. Hierbei werden nach DVGW (2001) überwiegend folgende Regeneriermittel eingesetzt:

Anorganische (Säure)-Gemische

Organische (Säure)-Gemische

Kombination anorganischer und organischer Gemische

Diese chemischen Verfahren (Anteil 50%) unterliegen einer besonderen wasserrechtlichen Genehmigung. Die Säuren werden dem Brunnen zugeführt bis sich ein pH-Wert von ca. 1 einstellt (NORMANN-SCHMIDT, 1992). Nach einer Einwirkzeit von bis zu 48 Stunden wird das säurehaltige Grundwasser mit den darin gelösten Ablagerungen abgepumpt und muss dann umweltgerecht entsorgt bzw. aufbereitet werden.

Beide Verfahrenstypen sind durch eine lange Ausfallzeit des Brunnens und eine hohe Menge an Grundwasser, welches abgepumpt werden muss, gekennzeichnet.

Die Ultraschallmethode, die laut DVGW (2001) zu den mechanischen Verfahren gezählt wird, stellt ein alternatives Verfahren der Brunnenreinigung dar. Zahlreiche praktische Anwendungen an mehreren hundert Brunnen haben gezeigt, dass mit dieser Behandlung gute Reinigungserfolge erzielt werden konnten. Wesentlicher Vorteil der Ultraschallregenerierung ist der Verzicht auf schädliche Chemikalien im Grundwasser und die Schonung des Brunnenrohres sowie des Filterkieses. Daneben besteht eine mögliche Zeitersparnis und damit eine verkürzte Ausfallzeit der Brunnen durch den Wegfall von Einwirkzeiten chemischer Reinigungsmittel und die Reduzierung manueller Reinigungsarbeiten (ALLEN & FISHELL, 1995). Insgesamt kann man von einem besonders umweltfreundlichen Verfahren sprechen (BERLITZ & KÖGLER, 1997).

## 2.3 Ultraschall

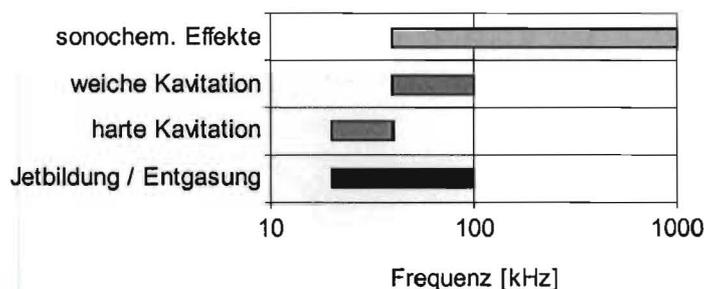
Unter Ultraschall versteht man Schall mit Frequenzen oberhalb der menschlichen Hörgrenze. Diese liegt individuell verschieden, weshalb man Ultraschall nicht scharf vom hörbaren Schall abgrenzen kann. Im allgemeinen spricht man ab einer Schallfrequenz von 18 kHz bis 20 kHz von Ultraschall (BERLITZ & KÖGLER, 1997), bei Frequenzen oberhalb 10 GHz beginnt der Bereich des Hyperschalls (KUTTRUFF, 1988).

Physikalisch unterscheidet sich Ultraschall nicht grundlegend vom hörbaren Schall, da die physikalischen Gesetze der Schallentstehung und Schallausbreitung nicht von der Frequenz abhängen. Allerdings ergeben sich aufgrund der höheren Frequenzen und der entsprechend kleineren Wellenlängen beim Ultraschall Unterschiede in der technischen Handhabung. Zudem treten im Ultraschallbereich Effekte auf, die im Hörschallbereich nicht oder nur sehr schwach beobachtet werden können. Zu diesen Effekten gehören beispielsweise die Materialerosion durch Kavitation (HEINRICH 1974, KURTZE 1958, KUTTRUFF 1988, SUSLICK,

1989) und die Materialzerstörung bzw. Strukturveränderung fester Stoffe, die durch Ultraschall infolge überelastischer Beanspruchung des Materials hervorgerufen werden kann (POHLMAN, 1960).

Auf die generellen Grundlagen der Akustik sowie zur speziellen Physik des Ultraschalls kann an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Sie finden sich in Standardwerken der Physik (u.a. GERTHSEN et al., 1986) bzw. in Lehrbüchern zur Physik des Ultraschalls von MEYER & NEUMANN (1979), KUTTRUFF (1988), MILLNER (1987) oder KUTZNER (1983).

Grundlagenforschung im Bereich des Ultraschalls wird bereits seit etwa 50 Jahren betrieben. Die Anwendung von Ultraschall im Bereich der diagnostischen und kurativen Medizin, Pharmazie, der Materialprüfung oder der Gebrauch von Ultraschallreinigungsbädern in Industrie, im Labor, beim Optiker oder Juwelier ist vielen bekannt. Die Anwendung des Ultraschalls in der Umwelttechnik ist dagegen noch relativ neu und erfolgt unter anderen Randbedingungen (NEIS 2002, THIEM & NEIS 1999). Es werden je nach Anwendung größere und leistungsstärkere Reaktoren benötigt. In Abb. 2-2 sind die bisher bekannten Wirkungsweisen für ihre spezifischen Frequenzen aufgezeigt. Es gilt hier generell, dass je niedriger die Frequenz der eingesetzten Schaller liegt, die Leistung der Generatoren am höchsten ist.



**Abb. 2-2:**  
Ultraschallfrequenzbereiche  
und ihre korrespondierenden  
Effekte. Die Frequenz ist  
logarithmisch aufgetragen.

Die grundsätzliche Anwendung von Ultraschall zur Oberflächenreinigung beruht hauptsächlich auf der mechanischen Krafteinwirkung durch das Auftreten von harter Kavitation. Neben der harten oder auch echten Kavitation gibt es noch die sogenannte weiche Kavitation oder auch Gaskavitation. In welcher Form Kavitation auftritt, ist abhängig von der Art und vom Reinheitsgrad der Flüssigkeit und von der Stärke, Frequenz, und Geometrie des Schallfeldes. Allgemein versteht man unter Kavitation die Bildung von Hohlräumen in Flüssigkeiten an entsprechenden Kavitationskeimen. Dies geschieht entweder durch Energieeintrag (z.B. Laserstrahlung) oder durch Druckabfall in hydrodynamischen Strömungen (Schiffsschrauben) oder Schallwellen (Ultraschall). Die so gebildeten Gas- oder auch Flüssigkeitsblasen schwingen eine gewisse Zeit mit, wachsen und schrumpfen bis sie schließlich bei genügend hohem Druck kollabieren (implodieren). Dabei treten Temperaturen von ca. 5000 °C und Drücke von etwa 500 bar auf. (HEINRICH 1974).

Wie aus Abb. 2-2 ersichtlich wird, liegt die Wirkung des energiereichen Ultraschalls bei einer Frequenz von 20 kHz, welcher bei der Brunnenregenerierung eingesetzt wird, in der mechanischen Zerstörung von Stoffen, die in erster Linie durch harte Kavitation bedingt wird.

Allerdings beruhen die getroffenen Aussagen hinsichtlich der Kavitation als Wirkgröße auf der Annahme, dass bei Atmosphärendruck gearbeitet wird. Der in Brunnen herrschende

hydrostatische Druck (Überdruckbedingungen) wirkt grundsätzlich kavitationshemmend, da er die Bildung von Kavitationsblasen erschwert. Auch die Kavitationsschwelle steigt linear mit zunehmendem Druck, d.h. es ist ein immer höherer Schallwechseldruck mit höheren Schallintensitäten erforderlich. Bei gleichbleibender Schallintensität und steigendem hydrostatischem Druck nimmt die Kavitation ab und kann irgendwann gar nicht mehr nachgewiesen werden (Arbeit der Fa. Allied Signal ELAC Nautic, in HUG, 1997).

Bereits in früheren Arbeiten am ESWE-Institut konnte diese Aussage belegt werden (HUG, 1997, WILKEN 2000). Kavitation ist bei der Brunnenreinigung hinter dem Filterrohr quasi zu vernachlässigen und tritt in Brunnen aufgrund des hydrostatischen Drucks nur bis zu einer bestimmten Maximaltiefe (~ 20 m) auf (BOTT & WILKEN, 2002 und WILKEN & BOTT 2002). Dieses Phänomen wurde ebenfalls in diesem Projekt durch die Messung der Schallsignale mittels Hydrophonen bestätigt (vgl. Kap. 4). Reinigungseffekte bei der Ultraschallanwendung sind aber auch bei wesentlich tieferen Brunnen (> 100 m) mit höheren Wassersäulen nachgewiesen worden.

Eine zusammengefasste Darstellung zur Kavitation (Unterschied von weicher zu harter Kavitation, Wirkungsweise, etc.) findet sich in der Arbeit von HUG (1997). Ausführlicher ist dieses Thema bei KUTTRUFF (1988), LAUTERBORN (1974), PUTTERMAN (1995), SUSLICK (1989) oder ŠUTILOV (1984) dargestellt.

### 3 Methoden und Material

Im folgenden Kapitel werden die konzeptionellen Ansätze, Arbeitsmethoden und –materialien beschrieben, die bei der Bearbeitung der Fragestellung verwendet und in den jeweiligen Projektstufen eingesetzt wurden. Dabei wird gesondert auf die beiden Hauptphasen des Projektes - die Modellversuche und der Praxiseinsatz des Ultraschalls - eingegangen.

#### 3.1 Konzept der Laborversuche

##### 3.1.1 Versuchsanlage URSEL

Zu Beginn der Projektbearbeitung wurde die Modellanlage URSEL (Ultraschall Regenerierungs-System im ESWE-Instituts Labor) entwickelt, konstruiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Die Modellversuche, die am ESWE-Institut in Wiesbaden an dieser Anlage durchgeführt wurden, bildeten den Kern der ersten Hauptphase. Sie dienten dem Ziel, die Einflussgrößen, die bei der Brunnenregenerierung mit hochenergetischem Ultraschall auftreten, zu bestimmen. In Abb. 3-1 ist eine Übersichtsskizze des Aufbaus und in Abb. 3-2 ist ein Foto der Anlage zu sehen. Bei der Konzeption lag ein Hauptaugenmerk darauf, eine Anlage zu konstruieren, in welcher nahezu die gleichen Bedingungen herrschen wie in einem realen Brunnen. D.h., im Modellbrunnen sollten sowohl ein Brunnenrohr als auch ein entsprechender kiesbefüllter Ringraum integriert sein. Zudem sollte der Versuchsstand eine gewisse Druckstabilität aufweisen, um unterschiedliche hydrostatische Druckverhältnisse nachbilden zu können.

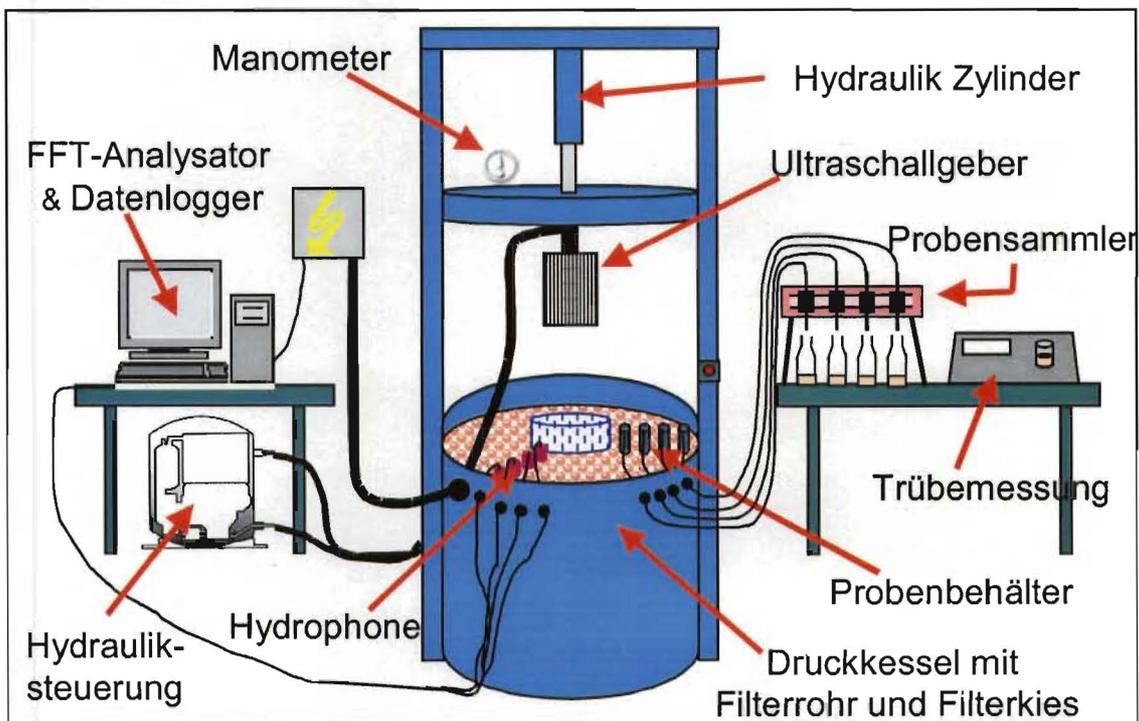


Abb. 3-1: Skizze Pilotanlage zur Brunnenregenerierung mit Ultraschall (URSEL)

Wie in Abb. 3-1 dargestellt ist, besteht URSEL aus einem bis 20 bar druckstabilen Stahlkessel in dem sich ein Brunnenrohr mitsamt Kiesringraum befinden. Das Brunnenrohr ist zweigeteilt und besteht aus einem PVC-Schlitzfilter und einem Stahl-Schlitzbrücken-Filter. Diese können bei Bedarf durch andere Filtertypen ersetzt werden. So wurde durch einfachen Umbau im Verlauf des Projektes auch ein OBO-Pressholzfilter in die Anlage eingebaut. Insgesamt wurden ausschließlich genormte Filtermaterialien eingesetzt. Die wichtigsten Eigenschaften und Größen sind in Tab. 3-1 übersichtlich zusammengestellt. In den gekammerten Ringraum können mehrere unterschiedliche Kiesschüttungen eingebracht werden. Für die durchgeführten Versuchsreihen wurde die Anlage mit Quarzkies der Körnungen 3,15/5,6 mm und 5,6/8 mm nach DIN 4924 (1972) befüllt. Das Porenvolumen liegt bei etwa 40 %. Somit konnten gleichzeitig bis zu vier verschiedene Kombinationen von Filterrohr- und Kiestypen im Versuchsbrunnen realisiert werden. Die Ultraschalleinheit ist am Deckel des Kessels befestigt, der hydraulisch verschlossen und geöffnet wird. Wenn die Anlage unter Druck betrieben wird, erfolgt eine zusätzliche Sicherung mittels 20 Schrauben am Deckelrand. Der Druck wird über eine Handknickpumpe aufgebaut und an einem Manometer abgelesen. Ein Sicherheitsventil am Deckel öffnet sich, sobald mehr als 20 bar Druck angelegt werden und garantiert so eine betriebssichere Versuchsdurchführung. Der Versuchskessel verfügt über zwei Zuläufe: ein direkter Zulauf in mittlerer Höhe und ein Kühlkreis, welcher dem Brunnen Wasser über ein am Kesselboden angeordnetes poröses Rohr zuführt. Letzterer ist so ausgelegt, dass die Anlage im Bedarfsfall über diese Leitung gekühlt werden kann, um die Temperatur stabil zu halten. Es existieren zwei Abläufe am Kessel. Einer befindet sich am Deckel und dient der luftfreien Befüllung. Der zweite ist am Kesselboden angebracht und stellt den eigentlichen Ablauf dar.



**Abb. 3-2:** Foto der Pilotanlage URSEL im Technikum des ESWE-Instituts in Wiesbaden.

**Tab. 3-1:** Zusammenstellung der wichtigsten Abmessungen und Eigenschaften der verwendeten Filtermaterialien; Durchlässigkeit und Widerstandskoeffizient nach KLOTZ, Abmessungen, freier Durchlass und Werte nach KLOTZ nach DIN 4922 sowie DIN 4925, Young'scher Elastizitätsmodul und Dichte nach KUTTRUFF (1988) [aus HUG 1997]

		PVC	Stahl	OBO
Innendurchmesser	[mm]	DN 300	DN 300	DN 300
Wanddicke	[mm]	8,2	4,5	16,0
Schlitzlänge	[mm]	66,2	20,8	58,6
Schlitzweite	[mm]	1,5	5,0	2,0
Steglänge	[mm]	52,5	6,0	76,5
Stegbreite	[mm]	9,5	2,5	15,6
Freier Durchlass	%	7,6	21,0	4,9
Durchlässigkeit	[cm/ s]	0,38	3,83	0,27
Widerstandskoeffizient		27,67	28,03	44,49
YOUNG'scher Elastizitätsmodul	[GN/ m <sup>2</sup> ]	3	200	9
Dichte	[kg/ m <sup>3</sup> ]	1380	7900	760
Longitudinalwellengeschwindigkeit	[m/ s]	1474	5030	3440

Die verwendete Ultraschall-Einheit, gebaut von der Fa. Sonic GmbH aus Bad Mergentheim, besteht aus einem Nickel - Blockschwinger. Im Praxiseinsatz im Gelände bilden sechs solcher baugleichen Schallgeber, untereinander und zueinander versetzt angeordnet, die Ultraschallsonde der Fa. BRM aus Biebergemünd. Jeder Schaller verfügt über einen separaten Hochfrequenzgenerator mit regelbarer Spannungsversorgung, so dass sie mit der gleichen Leistung arbeiten können. Die magnetostriktiven Blockschwinger arbeiten bei einer Frequenz von 20 kHz bei einer maximalen Nennleistung von 2000 Watt. Nachfolgende Tab. 3-2 gibt die charakteristischen Größen für eine Generatorleistung von 1420 Watt bei einer Wassertemperatur von 10 °C an.

**Tab. 3-2:** Charakteristische Größen der Schallgeber bei einer Generatorleistung von 1420 W und einer Wassertemperatur von 10 °C.

Schallfrequenz $f$	20 kHz = 20 000 s <sup>-1</sup>
Kreisfrequenz $\omega$	125 664 s <sup>-1</sup>
Wellenlänge $\lambda$ in Wasser, 10 °C	7,4 cm
Schalleistung des Schwingers (Wirkungsgrad 70 %)	1000 W
Schallintensität $J$	68 kW/m <sup>2</sup>
Energiedichte $w$	46 J/m <sup>3</sup>
Schalldruckamplitude $\hat{p}$	4,5 10 <sup>5</sup> Pa = 4,5 bar

Im Anhang befinden sich zur Illustration weitere Abbildungen des Versuchsstandes URSEL und des messtechnischen Aufbaus.

### 3.1.2 Schallfeldmessungen

Die durchgeführten Schallfelduntersuchungen dienten dem Ziel, Informationen über die Schallfeldverteilung und Schallintensitäten im Modellbrunnen zu erlangen. Die Messung des Schallfeldes im Versuchsbrunnen erfolgte mittels piezoelektrischer Hydrophone (Abb. 3-3), deren Messsignale von einem PC aufgezeichnet wurden und anschließend mit einem FFT-Analysator und zugehöriger Signalanalysesoftware (Musycs 3.2 und FAMOS 4.0) ausgewertet werden konnten. Die Messsignale wurden vom System in Form von Frequenzspektren ausgegeben. Anhand der Messergebnisse war es möglich, die Verteilung der Schallintensitäten sowohl im Brunnenrohr selbst als auch im Ringraum hinter dem Filterrohr zu ermitteln.

Zur genauen Positionierung der Hydrophone diente eine halbkreisförmige Platte mit je 20 Löchern pro Quadrant (vgl. Abb. 3-4 und Abb. 3-5). In diese wurden die Hydrophone mittels eines starren Kunststoffröhrchens eingelassen. Damit wurde sicher gestellt, dass die Signalaufnehmer bei jeder Versuchsreihe an der gleichen Stelle eingebaut werden konnten, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.



Abb. 3-3: Nahaufnahme eines piezoelektrischen Hydrophons.

Die ersten Messungen der Schallfeldverteilung im gesamten Ringraum erfolgten im Bereich zwischen 0 und 20 bar Überdruck jeweils in Druckstufen von 5 bar. Diese Messungen sind innerhalb des ersten Projektjahres im Rahmen der Diplomarbeit von SMOLIANSKIS (2002) durchgeführt und ausgewertet worden. Darauf aufbauend erfolgten Ergänzungsmessungen in direkter Linie vor dem Ultraschaller (Abb. 3-5). Dabei wurde von 0 bis 2 bar der hydrostatische Druck in 0,5 bar Schritten variiert und ab 2 bar bis 6 bar in 1 bar Schritten gemessen. Diese Messreihen wurden im zweiten Projektjahr von KLEIN (2002) und WIACEK (2003) durchgeführt. Die Entfernungen der Hydrophone zum Ultraschallgeber betragen in den Messreihen jeweils 11,5 cm, 19,5 cm, 27,5 cm und 35,5 cm.



Abb. 3-4: Blick in die Versuchsanlage mit Brett zur Positionierung der Hydrophone.

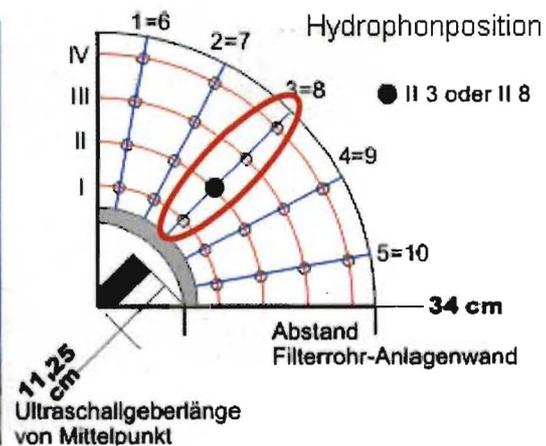


Abb. 3-5: Hydrophonpositionen je Messfeld im Versuchsbrunnen, markierte Punkte in direkter Linie vor dem Schaller.

Alle Daten wurden nach Druckstufen getrennt in Diagrammen zusammengestellt (vgl. Kap. 4). Abgetragen sind jeweils die Amplituden in Volt gegen die Frequenz in kHz für die einzelnen Hydrophonpositionen. Es wurde also für jede betrachtete Druckstufe ein Frequenzspektrum mit vier Diagrammen für vier Abstände mit je drei Kurven für die eingesetzten Filterrohrmaterialien aufgenommen. Dies erlaubt einen direkten Vergleich der Wirtktiefen in den Ringraum. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4 zusammengefasst und die Diagramme im Anhang dargestellt.

### 3.1.3 Temperaturmessung

Begleitend wurde bei den ersten Versuchsreihen die Temperaturänderung in der Anlage gemessen. Damit sollte sichergestellt werden, dass es durch die eingebrachte Schallenergie nicht zu einer Temperaturerhöhung im Brunnen und damit zu einer Verfälschung der Reinigungsergebnisse kommen kann. Im Bedarfsfall wäre es dann möglich gewesen, über den Kühlkreis der Versuchsanlage die Temperatur zu regulieren. Wie in den Ergebnissen in Kapitel 4 belegt ist, trat dieser Fall jedoch nicht auf.

### 3.1.4 Trübungsmessungen

Neben den Schallfeldmessungen wurden Trübungsmessungen an Wasserproben von mit unterschiedlichen Belägen verschmutztem Kies durchgeführt. Das Verfahren basiert auf dem Gehalt an ungelösten Partikeln in einer Flüssigkeit. Trifft ein Lichtstrahl auf ein Schwebeteilchen, so findet eine Streuung dieses Strahls statt. Unter einem Winkel von  $90^\circ$  wird dieses Streulicht messtechnisch erfasst. Die Trübungsmessungen erfolgten mit dem Nephla LPG 239, einem Labor-Trübungsphotometer der Fa. Dr. Lange aus Düsseldorf. Die Durchführung erforderte für die Einhaltung einer akzeptablen Messgenauigkeit besondere Probenvorbereitung. Neben der Einschränkung bei der messtechnischen Erfassung bezüglich der Partikelgrößen dürfen die Proben nicht mit Papierfiltern vorbehandelt werden. Des weiteren ist auf eine ausreichende Verdünnung der Proben vor der nephelometrischen Erfassung zu achten, da sonst das Auftreten eines Abschattungseffekts und eines damit einhergehenden, meist zu niedrigen Messwertes einen nicht abschätzbar großen Fehler einbringt. Der Messwert wurde in der Einheit FNU angegeben (Formazine Nephelometric Unit). Die Wasserproben wurden über eine Probennahmeverrichtung am Kessel entnommen.

Als am ehesten geeignetes Belagsmaterial für die Laborversuche erwies sich Filtermaterial aus der Enteisung bzw. Entmanganung aus der Wasseraufbereitung (EWG Alzey und Wasserwerk Petersaue, Mainz), wie auch HOUBEN (mündliche Mitteilung, 2002) bestätigte. Hierbei handelt es sich um Eisen- bzw. Manganoxide, die fest auf einem Akdolit als Trägermaterial aufgewachsen sind. Vorversuche wurden von KLEIN (2002) mit pulverisiertem Belagsmaterial eines Brunnens des Wasserwerks Schierstein sowie mit nach SCHWERTMANN & CORNELL(1996) chemisch hergestellten Eisenoxiden durchgeführt. Diese Materialien erwies sich allerdings als ungeeignet, da die Eisenoxide zwar hergestellt, aber nicht fest auf den Kies als Trägermaterial aufgebracht werden konnten. Auch der verockerte Filterkies aus einem überbohrten Brunnen, freundlicherweise zur Verfügung gestellt von der Fa. Vormann aus Nottuln, wurde wegen der fehlenden festen Strukturen nicht eingesetzt.

Insgesamt wurden mit dem als geeignet gewählten Material im Rahmen der Diplomarbeiten von KLEIN (2002) und WIACEK (2003) 42 Hauptversuchsreihen durchgeführt. Dabei wurden die Proben hinter den drei vorhandenen Filtermaterialien, kombiniert mit den zwei Kieskörnungen, bei unterschiedlichen Drücken und an unterschiedlichen Positionen im Ringraum beschallt.

Die Messungen dienten der Bestimmung von Zonen innerhalb des Modellbrunnens, in denen der Ultraschall seine beste Wirkung zeigt und die höchste Reinigungsleistung erbringt. Die Variation des Drucks ermöglichte die Feststellung der effektivsten Szenarienkombination für den Einsatz der Ultraschallmethode bei der Brunnenreinigung.

Die Ergebnisse werden in Kapitel 4 dargestellt und erläutert.

### **3.1.5 Messung der Partikelgrößenverteilung**

Der Nachweis der Wirksamkeit der Ultraschallbehandlung wurde außerdem anhand der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung des ausgetragenen Belagmaterials bestimmt. Dazu wurden ausgewählte Proben aus der Trübungsmessung zusätzlich mit einem Partikel-Laser-Sizer der Fa. Galai (CIS-1) untersucht. Die Analyse erfolgt dabei mittels eines Lasers, der durch ein rotierendes Prisma in einer Messzone fokussiert wird. In die kreisförmige Messzone wird eine Küvette mit der Probe eingebracht. Hinter der Probe zeichnet eine Fotodiode Intensitätsänderungen im Laserlicht auf.

Überstreicht der Laser einen Partikel, kommt es zur Beugung des Laserlichtes am und zu einem Interferenzfeld aus der Überlagerung des normalen und des gebeugten Lichtstrahls hinter dem Partikel. Dabei ist die Intensitätsverteilung im entstandenen Interferenzfeld abhängig von der Partikelgröße. Die Dauer der Abschattung ist somit ein Maß für die Partikelgröße, die Anzahl der Signale ein Maß für die Partikelkonzentration.

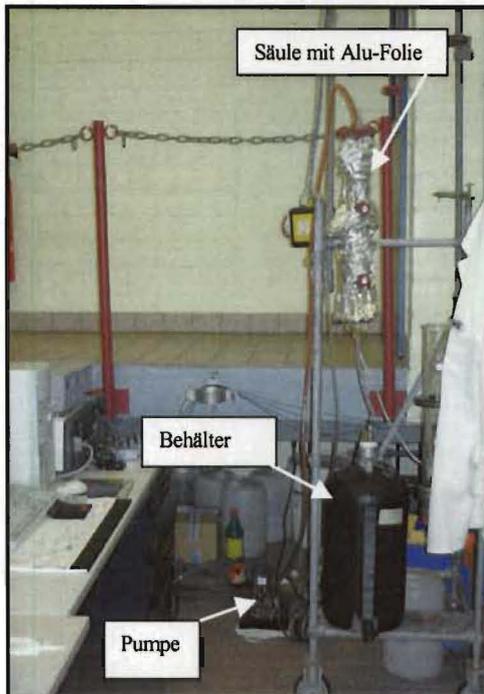
Eine nähere Beschreibung des Verfahrens sowie des Aufbaus und der Funktionsweise des CIS-1 Gerätes findet sich u.a. bei SCHÄFER (1998) und LOB (2000).

Die Messwerte wurden über ein spezielles Excel-Spreadsheet aufgearbeitet und sind ebenfalls in Kapitel 4 dargestellt.

### **3.1.6 Versuche zur biologischen Verockerung**

In einer weiteren Diplomarbeit im Rahmen des Projektes wurden von BRAUER (2003) im zweiten Projektjahr ergänzende Laborversuche zur Wirkung des Ultraschalls auf simulierte biologische Beläge durchgeführt. Zur Modellierung wurde Agar verwendet, da seine Struktur gut den extrazellulären polymeren Substanzen (EPS) realer Biofilme entspricht. Untersucht wurden die rheologischen Eigenschaften und das strukturviskose Verhalten der Modellsubstanz durch Rheometer-Messungen sowie die Änderung dieser Eigenschaften durch die Beschallung mit Ultraschall. Die Messung der rheologischen Eigenschaften erfolgten mittels eines Rheometers. Sie bestätigten die Eignung der Modellsubstanz. Zur Ermittlung der Strukturänderungen durch eine Beschallung dienten Durchfluss- und Fallzeitmessungen. Variiert wurden der Druck, die Kieskörnung und das Ausbaumaterial im Versuchsbrunnen.

Anschließend wurde in einem Säulenversuch die biologische Brunnenalterung simuliert. Dazu wurde Rohwasser des Wasserwerkes Schierstein unter regelmäßiger Zugabe einer, mit Leitungswasser verdünnten eisenhaltigen Lösung, durch ein geschlossenes System gepumpt. Abb. 3-6 zeigt den Versuchsaufbau.



**Abb. 3-6:** Foto des Versuchsaufbaus zur Simulation biologischer Brunnenalterung (BRAUER, 2003)

Während des einmonatigen Versuches wurde der pH-Wert, die Temperatur, das Redoxpotential und der Eisengehalt überwacht und ermittelt, wie durch biologische Brunnenverockerung das zweiwertige Eisen abgebaut und im System abgelagert wurde.

### 3.2 Konzeption der praktischen Feldversuche

In der zweiten Hauptphase des Projektablaufs sollten die gewonnenen Erkenntnisse aus den Laboruntersuchungen an der Modellanlage auf praktische Regenerierungen mit der Ultraschallmethode an realen Brunnen übertragen werden.

Hierzu wurde zuerst mithilfe weiterer Schallfeldmessungen untersucht, ob sich der eingesetzte Labor-Ultraschaller in seinen Betriebs- und Leistungsdaten wesentlich von den im Gelände eingesetzten Schallern unterscheidet. Da dies nicht der Fall war, konnte ohne Einschränkung mit den Praxisversuchen fortgefahren werden. Umfang und Ablauf der Versuche sind dargestellt in WIACEK (2003).

Wichtige Parameter bei der Auswahl der zu regenerierenden Brunnen waren:

- die Art des Brunnenausbaus (Verrohrung und Kiesschüttung)
- der Chemismus des Grundwassers
- die Zusammensetzung der Beläge

- die Höhe der Wassersäule (Hydrostatischer Druck)
- die Notwendigkeit einer Regenerierungsmaßnahme
- die Hinreichende Dokumentation der Brunnendaten
- die Bereitschaft der Brunnenbetreiber zur Kooperation

Um den Zusammenhang zu den Laboruntersuchungen zu gewährleisten, wurde die Brunnenauswahl auf die in der Modellanlage verwendeten Ausbaumaterialien Stahl, PVC und OBO eingeschränkt.

Die endgültige Auswahl der zu regenerierenden Trinkwasserbrunnen erfolgte in enger Absprache aller Projektpartner und der zuständigen Brunnenbetreiber.

Die Regenerierungsmaßnahmen selbst wurden von der Fa. BRM GmbH aus Biebergemünd durchgeführt und durch das ESWE-Institut, Wiesbaden wissenschaftlich begleitet. Der Versuchs- und Arbeitsablauf ist im Anhang unter 10.2 dargestellt. Jede Reinigung umfasste eine mechanische Vorreinigung mit Bürsten und den anschließenden Einsatz der Ultraschallsonde, bestehend aus sechs Schallern, Abb. 3-7 zeigt die beiden Ausführungen der Ultraschallsonde, die bei den Praxisversuchen zum Einsatz kamen:

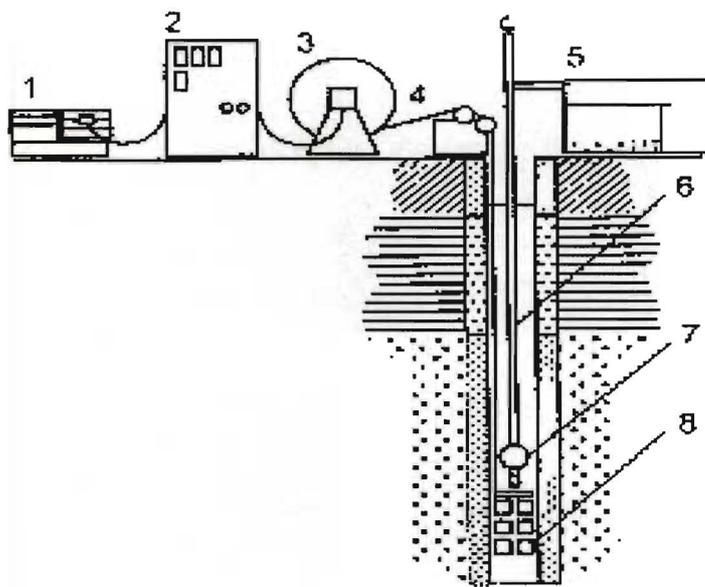


**Abb. 3-7:** Ultraschallsonden der Firma BRM: a) sechs Schallgeber jeweils paarweise in drei Ebenen untereinander, um  $60^\circ$  versetzt angeordnet



b) sechs Schallgeber untereinander, um jeweils  $30^\circ$  versetzt angeordnet

Entwickelt und gebaut wurde die Anlage zur Brunnenregenerierung mit Ultraschall von der Fa. Sonic Umwelttechnik GmbH aus Bad Mergentheim. Die gesamte Anlage umfasst die Ultraschallsonde mit sechs Schallgebern, eine Kabeltrommel mit 250 m Kabel und einen Schaltschrank, der u.a. einen Hochfrequenzgenerator pro Schallgeber enthält. Eine Prinzipskizze ist dargestellt in Abb. 3-8, weitere Fotos finden sich im Anhang.



1. Stromaggregat
2. Steuerschrank
3. Kabeltrommel
4. Kabel
5. Absetzbehälter
6. Rohrgestänge
7. Schmutzwasserpumpe
8. Ultraschall-Sonde

Abb. 3-8: Prinzipskizze zur Brunnenregenerierung mit Ultraschall [SONIC]

Anhand der o.g. Schallfeldmessungen zu den Gelände-Ultraschallgebern konnte ausgeschlossen werden, dass die unterschiedliche Anordnung der Schallgeber (Abb. 3-7) und z.B. der daraus resultierende verschiedene Abstand der Schallflächen zum Filterrohr einen Einfluß auf die Gesamtleistung hat. Die grundsätzlichen technischen Spezifikationen der gesamten Anlage blieben sonst unverändert. Die nachfolgende Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die Daten:

Tab. 3-3: Technische Daten der Ultraschallsonde mit sechs Schallgebern [SONIC]

Typ	B20/6
Anzahl Ultraschalleinheiten	6
Gesamtleistung (Watt)	12.000
Gewicht (kg)	120
Länge (cm)	160
Außendurchmesser (mm)	140
einsetzbar für Brunnendurchmesser (mm)	150-1000
maximale Teufe (techn. Begrenzung)* (m)	250

Die Brunnen wurden zur Bearbeitung in jeweils 1 m tiefe Abschnitte unterteilt. Bearbeitet wurden nur die Filterstrecken, die dazwischen liegenden Vollrohrabschnitte wurden nicht beschallt. Über der Ultraschalleinheit wurde eine Unterwasserpumpe montiert. Die Abschnitte wurden sequenziell von oben nach unten gereinigt. Gleichzeitig mit der Beschallung eines Abschnittes, wurde jeweils der darüberliegende Abschnitt klargepumpt. Die gewählten Betriebsparameter orientierten sich dabei an den experimentellen Laborbefunden und an den

Brunnendaten. Beschallt wurde jeder Abschnitt etwa 10 Minuten. Aus dem abgepumpten Schmutzwasser wurden pro beschalltem Abschnitt in einem vorher festgelegten Zeitintervall mehrere Proben zur Trübungsmessung sowie zur Bestimmung der Partikelkonzentration und Partikelbeschaffenheit entnommen.

Das dreistufige Messprogramm zum Nachweis der Ultraschallwirkung beinhaltet neben den üblichen Verfahren der Kamerabefahrung und des Kurzpumpversuches zusätzlich bohrlochgeophysikalische Messungen, durchgeführt von der Fa. BLM, NL München. Ausführungen zu den bohrlochgeophysikalischen Methoden für den Bereich Brunnenbau und -regenerierung machen u.a. HOUBEN & TRESKATIS (2003). Die während der Feldversuche eingesetzten Methoden sind ausführlich beschrieben bei WIACEK (2003). Einen generellen Überblick zur Bohrlochgeophysik geben FRICKE & SCHÖN (1999).

Vor Beginn der Reinigung wurde der aktuelle Zustand des Brunnens aufgenommen und dokumentiert. Um die Effekte des Bürstens von der eigentlichen Ultraschallregenerierung trenn zu können, wurde das komplette Messprogramm nach der Vorreinigung wiederholt und erst dann der Brunnen mit Ultraschall regeneriert. Die sich anschließenden Messungen sollten den Regneriererfolg ermitteln und dokumentieren.

Die nachfolgende Tabelle 3.4 liefert eine Übersicht zu den eingesetzten Messverfahren und ihren Aussagemöglichkeiten.

**Tab. 3-4:** Bohrlochmessmethoden zur Überprüfung von Regeneriermaßnahmen

Maßnahmen	Aussage
Gamma-Ray (GR)	Messung der natürlichen $\gamma$ -Strahlung von Ausbau und Gebirge; Anzeige von Feinkornanteilen im Filterkies, Widerspiegelung der durchteuften Schichtenfolge, wenn die durch den Ausbau hervorgerufene „Dämpfung“ vernachlässigbar ist (abhängig von dem Verhältnis Bohrdurchmesser/Verrohrungsdurchmesser, Art der Hinterfüllung, Art des Verrohrungsmaterials)
Neutron-Neutron (NN)	Messung des Wassergehaltes (eigentlich Wasserstoffgehaltes) durch Neutronenstreuung im Ringraum des Brunnens, der Messwert ist dem Wassergehalt und damit der Porosität der Kiesschüttung im Ringraum umgekehrt proportional
Gamma-Gamma-Ringraumscanner (GG.RI)	rotierendes GG-Messsystem zur Untersuchung der Verteilung der Materialien im Ringraum über den Umfang des Brunnens, Feststellung lokaler Dichteinhomogenitäten - in nichtmagnetischen Ausbauten richtungsorientiert
Scheiben-Flowmeter (System BLM) (FLWP)	Messung des Fluiddurchsatzes im Messquerschnitt des Flowmeters infolge der Messsondenbewegung mit konstanter Fahrgeschwindigkeit (zumeist je eine Auf- und Abfahrt) ohne zusätzliche Anregung der Strömung; Ausnutzung der Scheibenumströmungen in Defektbereichen der Vollrohre und in Filterbereichen; tiefreichende Wasserverdrängung und damit Erfassung des gesamten Filterkörpers, qualitative Anzeige der Filterdurchlässigkeit

Temperatur (TMP)	Messung der Temperatur des Brunnenfluids; empfindlichstes Bohrlochmessverfahren zur Erkennung von Wasserbewegungen senkrecht und parallel zur Bohrlochachse sowohl innerhalb durchlässiger Installationselemente als auch hinter vollwandig verrohrten Bereichen
Salinität (SAL)	Messung der spezifischen elektr. Leitfähigkeit des Brunnenfluids; Erkennung von Wasserzutritten, soweit damit ein Leitfähigkeitsunterschied hervorgerufen wird
Salinitäts-Wiederholungsmessungen nach vorheriger Eingabe einer Indikator-substanz (Tracer) (SAL-K)	Nachweis von Wasserbewegungen auch geringster Größenordnung im „Ruhezustand“ und/oder bei Anregung des Brunnens durch Beobachtung der Ortsveränderung zuvor durch Tracereingabe erzeugter (künstlicher) Messindikationen im Leitfähigkeitsverlauf (→ Fluidlogging); Ermittlung von Strömungsprofilen für den „Ruhezustand“ und einen oder mehrere Anregungszustände (u.a. auch Identifizierung undichter Rohrverbindungen)
Flowmeter (FLW)	Zufussermittlung unter Anregungszuständen (nach vorheriger Nullfahrt) durch Relativmessung des vertikalen Volumenstroms im Brunnen

Diese Messmethoden stellen insgesamt ein objektives und von der Art der Brunnenregenerierung unabhängiges Mittel zur Überwachung und Erfolgskontrolle einer Regenerierung dar. Der Direktvergleich der Messungen vor und nach dem Ultraschalleinsatz ergibt horizonttreue Aussagen über die Wirksamkeit des Ultraschalls im Ringraum des Brunnens. Die Auswertung der Ergebnisse folgte in Form eines Kurzberichtes der Fa. Dr. Lux Geophysikalische Fachberatung. Eine Zusammenfassung wird in Kapitel 4 gegeben..

Parallel zur Durchführung der Praxisversuche wurden außerdem Daten bereits abgeschlossener Ultraschall-Regenerierungen der letzten Jahre gesammelt und ausgewertet, um daraus weitere Hinweise auf die optimalen Bedingungen für den Ultraschalleinsatz sowie dessen Nachhaltigkeit abzuleiten.

## **4 Ergebnisse**

Das Projekt gliederte sich in zwei Projektphasen. Das Hauptanliegen der ersten Phase stellte die Konstruktion der Versuchsanlage URSEL (Ultraschall Regenerierungs-System im ESWE-Instituts Labor) dar. Nach Inbetriebnahme des Versuchsbrunnens wurden hier Messungen des Schallfeldes und der Reinigungsleistung an verschmutztem Kies in Abhängigkeit von unterschiedlichen Druckstufen und verschiedenen Ausbaumaterialien des Brunnens durchgeführt. Die zweite Projektphase beinhaltete den Einsatz der Ultraschallmethode in Feldversuchen an drei ausgewählten Brunnen. Die Ergebnisse der einzelnen Schritte sollen im Folgenden dargestellt und diskutiert werden.

### **4.1 Aufbau URSEL (Ultraschall Regenerierungs System im ESWE-Instituts Labor)**

Gemäß den Ausführungen im vorherigen Kapitel gehörte die Planung, Entwicklung und Realisierung eines Versuchsbrunnens zu einem wesentlichen Punkt bei der gesamten Projektabwicklung. Wie bereits ausgeführt, wurde dieses Vorhaben erfolgreich abgeschlossen und URSEL (Abb. 3.2) in Betrieb genommen. Damit steht eine Anlage zur Verfügung, die es ermöglicht, Trinkwasserbrunnen mit mehreren verschiedenen Ausbau-, Filter- und Ringraummaterialien nachzubilden. Darüber hinaus ist sie in der einzigartigen Lage, selbst Wassersäulen von 200 m zu simulieren, da sie bis zu einem Druck von 20 bar betrieben werden kann. Es können somit alle gängigen Rahmen- und Randbedingungen die in einem realen Trinkwasserbrunnen herrschen, im Laborversuch dargestellt werden. Die vorhandene Messtechnik erlaubt neben der Erfassung der Wassertemperatur über einen Temperaturfühler umfangreiche Schallfeldmessungen mittels vier piezoelektrischer Hydrophone. Probennahmeverrichtungen dienen der Untersuchung von Wasserproben aus dem Druckkessel und erlauben die Entnahme im laufenden Betrieb. Die Ergebnisse der im Laufe des Projektes durchgeführten Versuche und Messungen werden in den folgenden Kapiteln dargestellt.

### **4.2 Die Laborversuche im halbtechnischen Maßstab**

#### **4.2.1 Untersuchungen zum Temperaturverhalten**

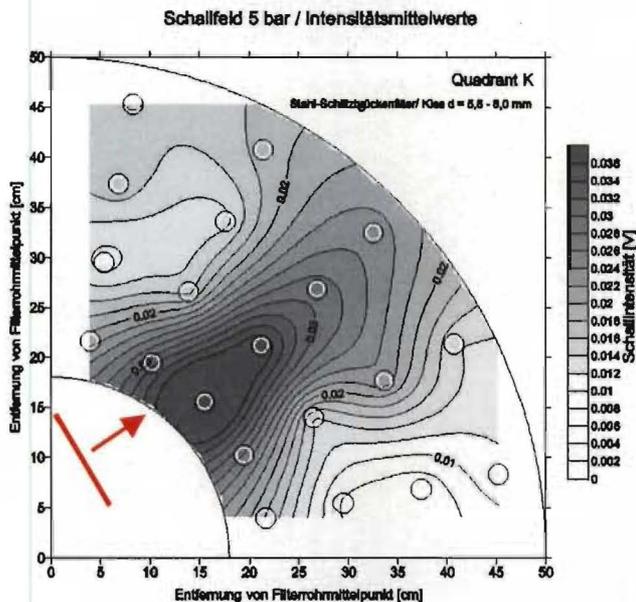
Gemessen wurde die Änderung der Wassertemperatur in Abhängigkeit vom Druck und der Dauer der Beschallung. Unabhängig vom jeweiligen Druck stieg die Temperatur bei Beschallung jeweils annähernd linear. Der Temperaturanstieg selbst ist abhängig von der Schallintensität (KUTTRUFF, 1988) und damit auch vom hydrostatischen Druck, da ein höherer Druck höhere Schallintensität und damit mehr Erwärmung zur Folge hat. Bei 0 bar Überdruck und zwei Stunden durchgängiger Beschallung betrug die Temperaturdifferenz 0,8 °C. Bei 5 bar Überdruck und gleicher Beschalldauer stieg die Temperatur um 1,2 °C. Eine Temperaturänderung in Einfluss nehmender Größe lag damit nicht vor. Des weiteren betrug die Dauer der Beschallung bei allen nachfolgenden Versuchen im Labor nur noch 15 bis 30

Minuten. Für die weiteren Versuche konnte somit auf die Erfassung der Temperatur verzichtet werden.

In den Praxisversuchen kann eine Erwärmung praktisch ausgeschlossen werden, da durch das Abpumpen des gelösten Materials ein ständiger Wasseraustausch erfolgt.

#### 4.2.2 Ultraschallmessung

Die Messungen des Schallfeldes erfolgten im Ringraum des Versuchsbrunnens zuerst hinter Stahl- und PVC-Filter ohne Kiesbefüllung, anschließend im kiesgefüllten Ringraum. Die Ergebnisse der Messungen der Schallfeldintensitäten in den einzelnen Quadranten im Versuchsbrunnen wurden in Surfer-Isolinien-Diagrammen zusammengestellt. Anhand Abb. 4-1 sollen sie hier kurz erläutert werden. Die weiteren Darstellungen der Verteilung der Schallintensitäten finden sich im Anhang unter 11.3.1.



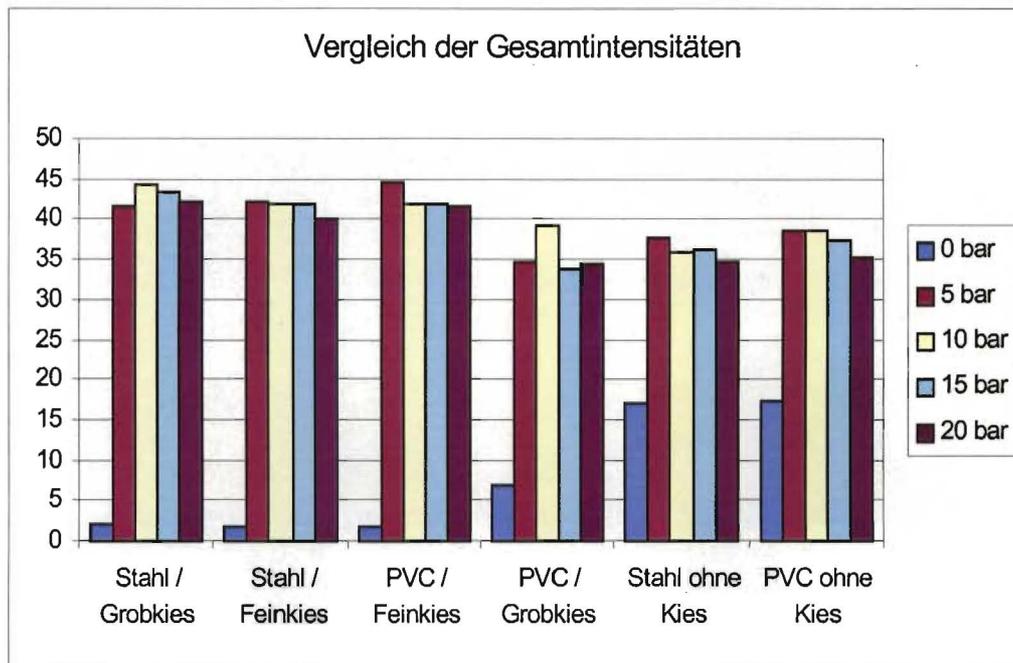
**Abb. 4-1:** Verteilung der Mittelwerte der Schallintensität (SMOLIANSKIS, 2002)

Abb. 4-1 zeigt die Verteilung der Schallintensitäten hinter dem Stahlschlitzbrückenfilter in Grobkies bei einem Überdruck von 5 bar. Abgetragen ist die Schallintensität als Schalldruckamplitude in Volt für alle Punkte des Quadranten, gegen die Entfernung zum Filterrohrmittelpunkt. Die dunklen Bereiche kennzeichnen die höchsten Schallintensitäten. Sie befinden sich erwartungsgemäß in direkter Linie vor der schallabstrahlenden Fläche (markiert). Insgesamt zeigen die Isoliniendarstellungen alle ein Maximum direkt vor der Schallfläche. Z.T. finden sich weitere lokale Maxima mit geringerer Schallintensität an den Randbereichen des Quadranten bzw. an der Kesselwand. Hier kann davon ausgegangen werden, dass es sich um Reflexions- und Beugungserscheinungen handelt. Bei den Versuchen ohne Kiesbefüllung wurde bereits die Druckabhängigkeit sowie der Einfluß der Geometrie der Filterschlitz heraus gearbeitet. Die offenen Filterschlitz des PVC-Filters bewirken neben Reflexions- und Absorptionseffekten außerdem noch eine Beugung der Schallwellen. Bei den Schlitzbrücken des Stahlfilters tritt diese vermutlich nicht auf. Bei den

Versuchen mit Kiesbefüllung waren i.d.R. die Ergebnisse im Feinkies etwas höher als im Grobkies. Beeinflusst wird dies zum einen durch Beugungseffekte am Kieskorn, zum anderen durch die hydraulischen Eigenschaften des Systems, d.h. im Speziellen durch die Porengröße und die Durchlässigkeit des Kieskörpers, wobei bei größeren Poren auch eine höhere Schalldämpfung zu erwarten ist.

Zur Darstellung im Gesamtüberblick wurden die punktuell gemessenen Schallintensitäten pro Quadrant summiert (SMOLIANSKIS, 2002). Verglichen werden konnte dann der Schalldruck bei den verschiedenen Ausbaumaterialien und Druckstufen.

Abb 4-2 zeigt den Schalldruck hinter den verschiedenen Ausbaumaterialien:



**Abb. 4-2:** Darstellung der Gesamtintensitäten bei unterschiedlichem hydrostatischen Druck und verschiedenem Ausbaumaterial (SMOLIANSKIS, 2002)

Deutlich zu erkennen ist hier nochmals die starke Zunahme der Schalldruckwerte zwischen 0 und 5 bar Überdruck. Bei weiterer Erhöhung des hydrostatischen Druckes änderten sich die Werte nur noch geringfügig.

Der schnelle Anstieg der Schalldruckintensität zwischen 0 und 5 bar Überdruck gab Anlass für weitere Schallfeldmessungen in kleineren Schritten speziell in diesem Druckbereich. Die Darstellung erfolgte in Frequenzspektren.

Einen Überblick über das Ergebnis und den Verlauf des Anstieges zeigt außerdem Abb. 4-3:

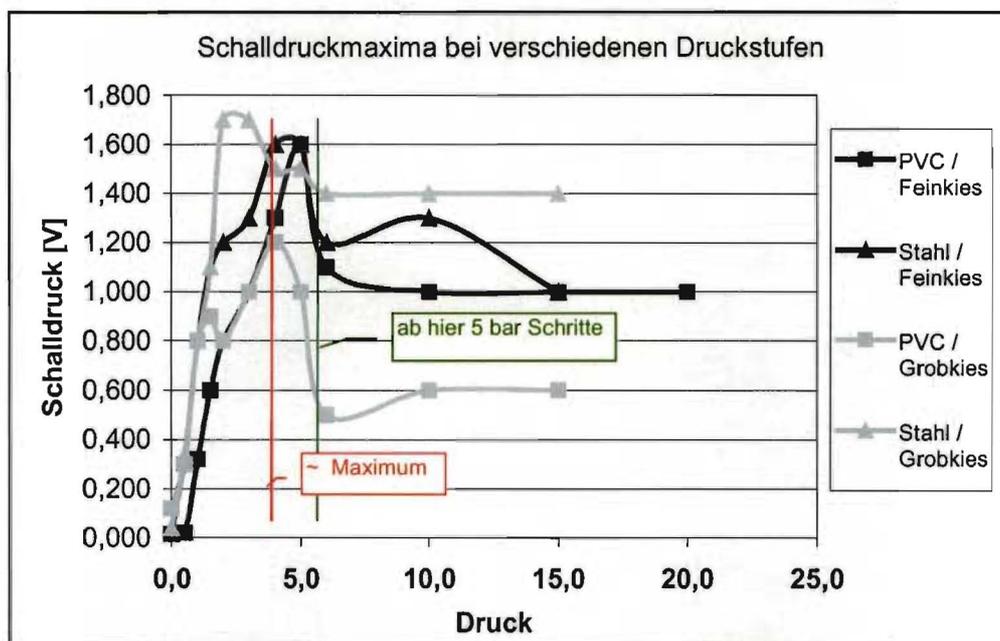


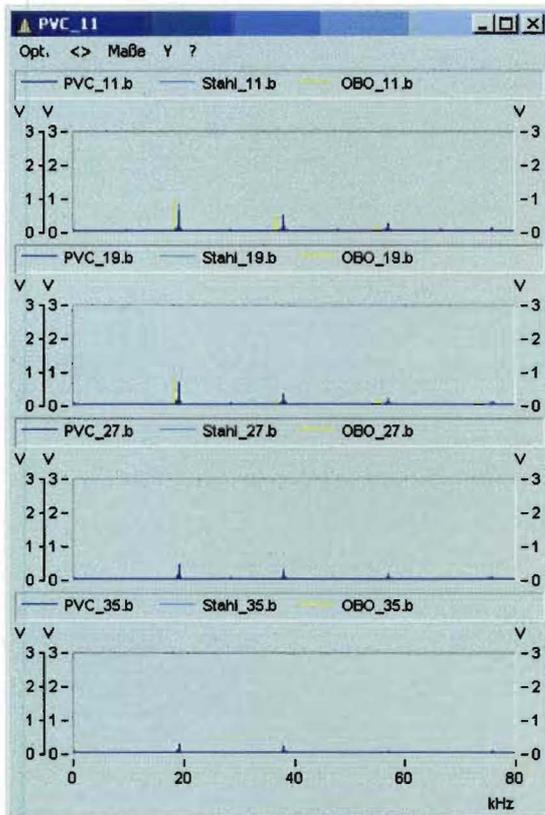
Abb. 4-3: Untersuchung der Abhängigkeit der Schalldruckmaxima vom Überdruck

Dargestellt sind die maximal erreichten Amplituden des Schalldruckes gegen den Druck. Im Bereich von 0 bis 2 bar Überdruck wurde der Druck um jeweils 0,5 bar gesteigert, zwischen 2 und 5 bar um jeweils 1 bar. Deutlich zu erkennen ist der kontinuierliche und steile Verlauf der Zunahme der Schallintensität mit steigendem Druck.

Für die komplette Darstellung aller möglichen Brunnenausbau-Kombinationen aus den drei Ausbaumaterialien und den zwei Kiesgemischen in Form von Frequenzspektren wurden ergänzende Messungen auch bei 10, 15 und 20 bar Überdruck durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde der Schalldruck nur in direkter Linie vor der schallabstrahlenden Fläche gemessen.

Abb. 4-4 zeigt exemplarisch das Frequenzspektrum für die Messung bei 2 bar Überdruck.

Die weiteren Abbildungen für die Druckstufen 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5 und 6 bar Überdruck, sowie ergänzend für 10, 15 und 20 bar Überdruck, jeweils für den Fein- und den Grobkies und die drei verschiedenen untersuchten Ausbaumaterialien finden sich im Anhang in 11.3.2 und werden hier nur ausgewertet und diskutiert.



**Abb. 4-4:** Frequenzspektrum  
Feinkies, 1,5 bar Überdruck

Abgetragen ist die Schallintensität in [V] gegen die Frequenz in [kHz]. Die Schallfeldmaxima bei ca. 20 kHz spiegeln die Betriebsfrequenz des Ultraschallers wider. Die sogenannten Höherharmonischen bei  $x \cdot 20$  kHz sind das Ergebnis von nichtlinearen Effekten und Reflexions- und Beugungserscheinungen.

Die vier Einzeldiagramme entsprechen vier Hydrophonpositionen, von oben nach unten in zunehmender Entfernung zum Ultraschallgeber, gekennzeichnet durch die Zahlen in den Legenden. Jedes Einzeldiagramm enthält drei Messreihen für die verschiedenen untersuchten Ausbaumaterialien PVC, Stahl und OBO.

Die Ergebnisse der Versuche in der Hauptgeraden der Schallausbreitung korrelieren sehr gut mit den oben erörterten Isolinien Darstellungen.

Festgestellt wurde die insgesamt gute Schallausbreitung bis tief in den Ringraum hinein.

Eine Tendenz zur Abnahme des Schalldrucks mit zunehmender Entfernung zum Ultraschallgeber konnte nicht gefunden werden. Insgesamt lagen die Messwerte dicht beieinander, d.h. das Filtermaterial und die Kieskörnung hatten nur einen geringen Einfluß auf die Schallausbreitung. Die Tendenzen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Im Feinkies wurden leicht höhere Schalldruckamplituden und bessere Schallausbreitung als im Grobkies gemessen.
- Die höchste Schalldurchlässigkeit wies der Stahlschlitzbrückenfilter auf.
- Der OBO-Filter zeigte ein vergleichsweise uneinheitliches Verhalten.

Die Ergebnisse entsprechen den physikalischen Eigenschaften des Schalls und der Filtermaterialien (vgl. Tab. 3-1, S.13) und sind wie folgt zu bewerten:

Die unterschiedliche Verteilung des Schalles in Fein- und Grobkies beruht vermutlich auf Absorptions-, Reflexions- und Beugungserscheinungen. Der Grobkies streut den Schall stärker. Die Messungen im Grobkies zeigen ein insgesamt uneinheitlicheres Verhalten, größere Unterschiede für die verschiedenen untersuchten Filtermaterialien, geringfügig niedrigere Schallfeldstärken und schlechtere Ausbreitung des Schalls im Ringraum.

Die durchschnittlich besten Ergebnisse für den Stahlschlitzbrückenfilter entsprechen den hohen Werten für den freien Durchlass und die Durchlässigkeit nach KLOTZ (1975). Der Stahlschlitzbrückenfilter liegt hier mit 21 % freiem Durchlass und 3,83 cm/s Durchlässigkeit weit vor dem PVC – Filter mit 7,6 % und 0,38 cm/s und dem OBO – Filter mit 4,9 % und

0,27 cm/s. Er ist also am besten schalldurchlässig. Entsprechend wurden hinter dem Stahlschlitzbrückenfilter die höchsten Schallfeldstärken gemessen.

Das schlechteste Verhalten beim Auftreffen des Schalls kann aus dem Young'schen Elastizitätsmodul und der Longitudinalwellengeschwindigkeit für den PVC-Filter vorausgesagt werden. Dieser wird von Schallwellen am wenigsten in Schwingung versetzt, gibt dementsprechend vermutlich dann auch weniger Schwingungsenergie in den Kiesraum ab. Auch dies wird von den gemessenen Ergebnissen bestätigt.

Der OBO-Filter weist mit  $760 \text{ kg/m}^3$  die geringste Dichte auf. Seine Longitudinalwellengeschwindigkeit ist deutlich höher als die des PVC-Filters. D.h. er schwingt selbst stärker und gibt dadurch mehr Schwingungsenergie in den Ringraum ab. Er zeigt jedoch dadurch auch das uneinheitlichste Verhalten.

Aufgrund der Fehleranfälligkeit des Systems sind genauere Angaben zu den Unterschieden der einzelnen Filtermaterialien jedoch nicht möglich. Heraus gearbeitet wurde klar und deutlich die Reichweite der Schallwellen bis tief in den Ringraum und die Druckabhängigkeit der Schallintensität.

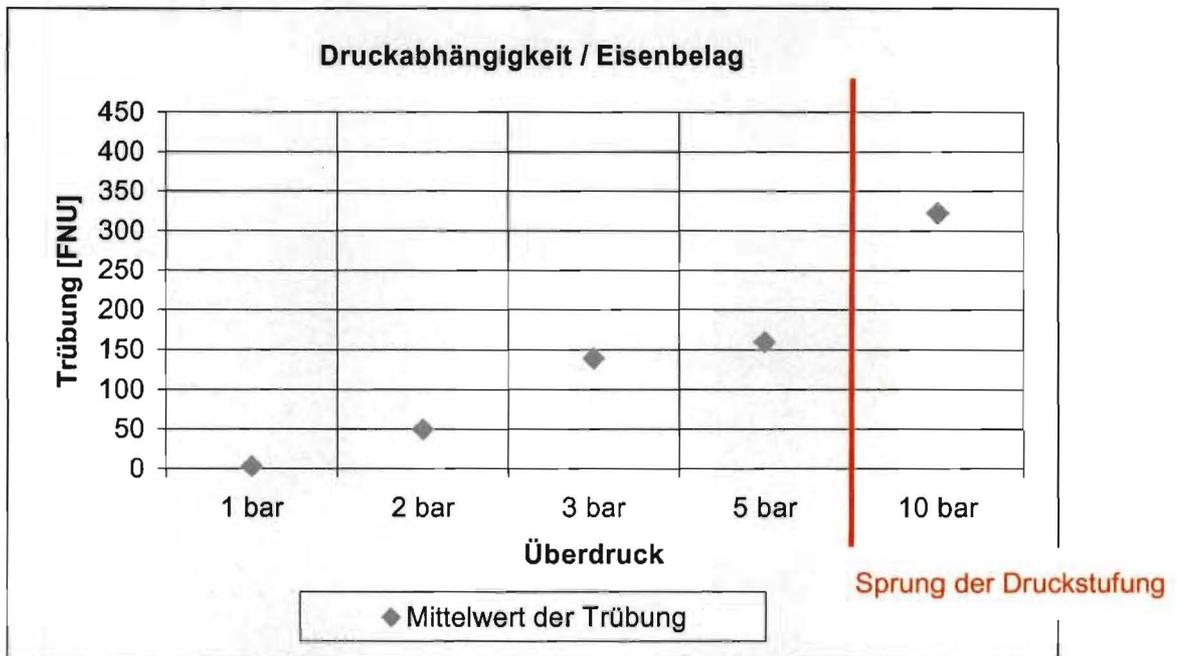
Die Ergebnisse der Schallfeldmessungen bildeten die Grundlage für die anschließenden Trübungsmessungen an Wasserproben aus der Beschallung von Kies mit Belagsmaterial.

#### 4.2.3 Messung der Trübung

Grundsätzlich unterschieden werden mussten zur Auswertung die beiden Belagsmaterialien, im folgenden als Eisen- und Manganmaterial bezeichnet, da sie bei der Beschallung verschiedenes Verhalten zeigten. Das Eisenmaterial wies grundsätzlich besser reproduzierbare Ergebnisse auf als das Manganmaterial. Das Manganmaterial ergab i.d.R. zehnmal höhere Trübungswerte. Die Unterschiede zeigten sich in erster Linie in den Materialeigenschaften. Bei dem Manganmaterial war der Belag auf dem Trägermaterial wesentlich dicker, aber auch leichter zu lösen. Insgesamt liegen die Werte des Eisenbelages dichter beieinander und korrelieren besser mit den Ergebnissen aus den Vorversuchen, während der Manganbelag eine größere Schwankungsbreite aufwies.

Verglichen werden konnte mit den durchgeführten Versuchen die Wirksamkeit des Ultraschalls hinter den drei verschiedenen Filtermaterialien und an zwei Positionen im Ringraum.

In den Vorversuchen konnte die schon bei den Schallfeldmessungen gefundene Druckabhängigkeit klar bestätigt werden. Abb. 4-4 zeigt die Mittelwerte nach 4 Minuten Beschallung der Versuche mit dem Eisenbelag bei verschiedenen Druckstufen zwischen 1 und 10 bar Überdruck. Bei einer Probenentnahme alle zwei Minuten über eine sechszehnminütige Beschallung stellt diese Meßreihe die Ergebnisse am besten dar.



**Abb. 4-5:** Druckabhängigkeit der Reinigungswirkung nach vier Minuten Beschallung, Stahlschlitzbrückenfilter/ Feinkies (nach KLEIN, 2002)

Die nachfolgenden Versuche zum Einfluß des Brunnenausbaus und zur Reichweite des Schalls wurden dann alle bei 5 bar Überdruck durchgeführt.

Für eine ausführliche Darstellung aller Ergebnisse wird verwiesen auf WIACEK (2003). Hier sollen die wesentlichen Tendenzen dargestellt werden.

Hinsichtlich des Einflusses der Ausbaumaterialien konnte kein einheitliches Ergebnis gefunden werden. Im Vergleich zu dem Stahl- und dem PVC-Filter fiel lediglich der OBO-Filter dahingehend auf, dass bei seiner Verwendung z.T. keine brauchbaren Messungen durchführbar waren, da die Probennahmeschläuche bereits bei der ersten Entnahme verstopften und die Messungen wiederholt abgebrochen werden mussten. Eine Interpretation wäre, dass hinter dem OBO-Filter die beste Reinigungsleistung auftrat und soviel Material gelöst wurde, dass die Probennahmeschläuche verstopften. Dies ist nur eine Vermutung, entspricht allerdings den Ergebnissen der Schallfeldmessungen für 5 bar Überdruck.

Die Abbildungen 4-5 und 4-6 zeigen zusammengefasst die Ergebnisse für alle Ausbau-Kombinationen. Auch hier wurden die Werte der Messreihen nach vier Minuten Beschallung gewählt, da sie die Ultraschallwirkung am besten wiedergeben. Die erste Messreihe nach zwei Minuten Beschallung ist möglicherweise von noch vor Beginn der Beschallung gelösten Trübstoffen beeinflusst, die bei der ersten Probennahme mit ausgetragen werden. Die nachfolgenden Messreihen werden durch die zunehmende Beschalldauer und sich absetzende Trübstoffe beeinflusst. Nach etwa zehn Minuten Beschallung ändern sich die Trübungswerte insgesamt nicht mehr wesentlich sondern bleiben dann auf einem annähernd konstanten Niveau.

Abb.4-5 zeigt die durchschnittlichen Trübewerte für das Eisenmaterial, Abb. 4-6 für das Manganmaterial.

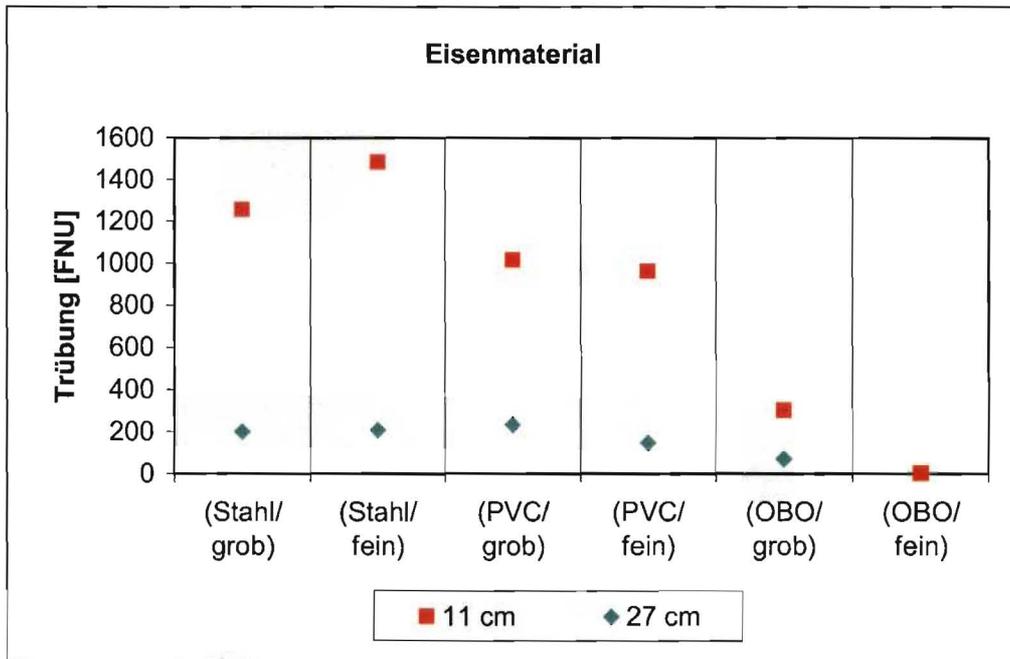


Abb. 4-6: Zusammenfassende Darstellung der Mittelwerte des Trübungsverlaufes nach vier Minuten Beschallung für die Versuche mit dem Eisenmaterial

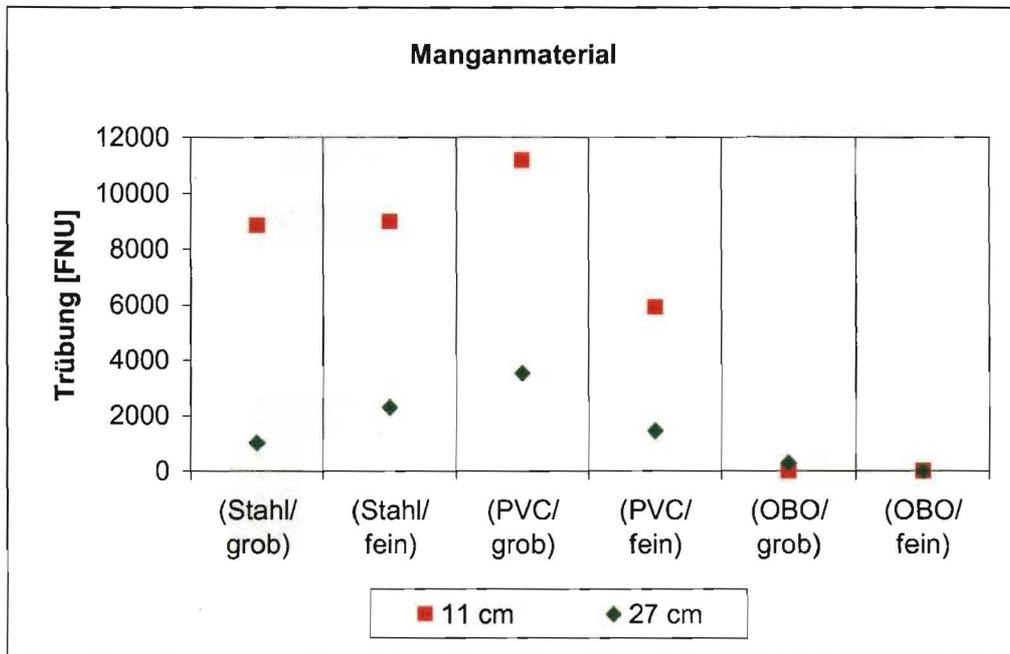


Abb. 4-7: Zusammenfassende Darstellung der Mittelwerte des Trübungsverlaufes nach vier Minuten Beschallung für die Versuche mit dem Manganmaterial

Erwartungsgemäß ist die Reinigungswirkung des Ultraschalls direkt hinter dem Filterrohr in 11 cm Entfernung zum Schallgeber deutlich höher als in 27 cm Entfernung im Ringraum. Dies gilt für alle durchgeführten Versuche. Eindeutig belegt ist damit jedoch auch, dass der Ultraschall auch tief im Ringraum noch Beläge löst.

Insgesamt bestätigten die Trübungsmessungen die Ergebnisse der Schallfeldmessungen. Die Reinigungswirkung des Ultraschalls und die Reichweite bis tief in den Ringraum des Brunnenausbaus konnte eindeutig belegt werden. Hinsichtlich eines möglichen Einflusses der Ausbaumaterialien konnten keine allgemeinen Tendenzen festgestellt werden.

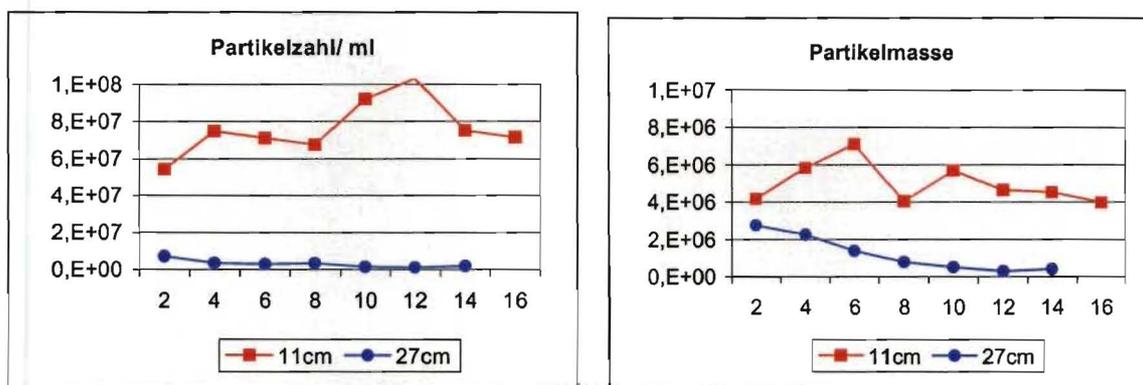
#### 4.2.4 Partikelgrößenverteilung

Ergänzend zu den Trübungsmessungen wurde an ausgewählten Proben aus den Trübungsversuchen die Partikelgröße und -verteilung gemessen. Verglichen wurden

- der Einfluß der Filtermaterialien anhand von Messungen hinter Stahl und OBO
- die Schallwirkung in Fein- bzw. Grobkies
- der Einfluß des Abstandes zum Schallgeber
- die beiden Belagsmaterialien.

Für die detaillierte Auswertung aller Ergebnisse wird verwiesen auf WIACEK (2003). Exemplarisch soll hier der Versuch zum Einfluß des Abstandes dargestellt und die Tendenzen erläutert werden:

Abb. 4-7- zeigt den Verlauf der Partikelzahl pro ml und der Partikelmasse an den Proben aus der sechzehnminütigen Beschallung in Grobkies hinter dem OBO-Filter. Die Probennahme erfolgte, wie bei allen Messungen, alle zwei Minuten. Abgetragen ist links die Partikelzahl/ml gegen die Beschallungsdauer und rechts die Partikelmasse in  $\mu\text{g/l}$ .



**Abb. 4-8:** Ergebnisse der CIS1-Messungen der Trübungsproben der Versuche mit Manganmaterial hinter OBO in Grobkies in 11 cm und 27 cm Abstand zum Ultraschallgeber bei 5 bar Überdruck (WIACEK, 2003)

Die Partikelzahl ist bei den Proben in 11 cm Entfernung zum Schallgeber durchschnittlich 26 mal höher, die Partikelmasse viermal. Es wurden somit direkt hinter dem Filterrohr deutlich mehr, aber keine wesentlich größeren Partikel gelöst.

Die aufgefundenen Tendenzen bestätigen die Ergebnisse aus den vorangegangenen Messungen der Schallfeldverteilung und der Trübungswerte. Der Ultraschall zeigte hinter dem OBO-Filter die deutlich uneinheitlichste Wirkung, die Wirkung war direkt hinter dem Filtermaterial am größten und der Schall verteilte sich offenbar in Feinkies geringfügig besser als in Grobkies. Innerhalb der einzelnen Messreihen ließen sich keine einheitlichen Trends der Entwicklung der Partikelverteilung über die Gesamtdauer der Beschallung ablesen. Bei einigen Versuchen waren sowohl Partikelzahl als auch Partikelmasse mit fortschreitender Dauer der Beschallung abnehmend, d.h. es wurden weniger Partikel durch den Ultraschall gelöst und ausgelesen. Bei anderen Versuchsreihen war die Partikelzahl mit der Zeit zunehmend und die Partikelmasse stark schwankend, im Mittel aber gleichbleibend, d.h. es wurden mit der Zeit mehr, aber kleinere Partikel gelöst. Dieses Verhalten scheint sowohl vom Filtertyp als auch vom Abstand zum Ultraschallgeber abzuhängen, wobei die genauen Mechanismen anhand der wenigen untersuchten Proben nicht ausreichend beurteilt werden können. Das mit fortschreitender Beschallung weniger oder kleinere Partikel gelöst werden, korreliert sehr gut mit den Trübungswerten, die mit fortschreitender Beschallung abnahmen und sich ab einer Beschalldauer von etwa 10 Minuten auf annähernd konstantem Niveau einpegelten.

Insgesamt waren die Ergebnisse der einzelnen Versuche nur eingeschränkt miteinander vergleichbar. Viele Unstetigkeiten ergaben sich auch aus der z.T. relativ hohen Fehleranfälligkeit der Messungen, die sich jedoch nicht vermeiden ließ.

#### 4.2.5 Versuche zur biologischen Verockerung

Mithilfe von Messungen mit dem Rheometer wurde zunächst die Fließgrenze und das strukturviskose Verhalten der Agar-Modellsubstanz bei verschiedenen Konzentrationen bestimmt. Sie ergaben eine insgesamt sehr gute Eignung des Agar bei 1,5 %-iger Konzentration. Dieser repräsentiert am besten einen realen Biofilm und wurde dann als Modellsubstanz für die Beschallungsversuche beibehalten. Durchflussmessungen vor und nach der Beschallung belegen eine Strukturänderung durch die Beschallung mit Ultraschall. Die physikalischen Eigenschaften und der Zusammenhalt scheinen sich hingegen nicht wesentlich zu ändern. Die besten Ergebnisse für die Durchflussmessungen konnten bei einer Beschallung hinter dem OBO-Filter gemessen werden. Auch hier wurde die Druckabhängigkeit der Ultraschallwirkung bestätigt. Die Fallzeitmessungen lagen alle dicht beieinander und unterschieden sich nach der Beschallung nicht von den Werten vor der Beschallung. Hier zeigt sich auch eine wesentliche Beschränkung der Modellsubstanz. Im Gegensatz zu natürlichen Biofilmen weist der Agar eine flächige, kompakte Matrix auf. Reale Biofilme hingegen sind heterogen, mit kleinen und größeren Poren oder Porenkanälen.

Im Säulenversuch zur Simulation biologischer Verockerung konnte ein Anfangsstadium der Verockerungsbildung erreicht werden. Sowohl in der Säule als auch im Zuleitungsschlauch bildeten sich rostrote Eisenablagerungen, die von einem dünnen Biofilm überzogen waren. Unter dem Mikroskop konnten Gallionella, eines der wichtigsten Eisenbakterien und Anzeiger für gelöstes und reduziertes Eisen im Wasser, und Metallogenium, ein Eisen und Mangan oxidierendes, chemoautotrophes Bakterium, identifiziert werden. Aufgrund des

relativ einfachen Versuchsaufbaus konnte eine begleitende chemische Eisenausfällung nicht vermieden werden. Eine Beschallung der biologischen Verockerungen mit Ultraschall hätte erst bei fortgeschrittener Brunnenalterung messbare Ergebnisse erzielt und wurde an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt.

### 4.3 Zusammenfassung

In den Laborversuchen konnten somit folgende Grundlagen erarbeitet werden:

- Die Wirksamkeit von hochenergetischem Ultraschall zur Brunnenreinigung konnte anhand aller durchgeführten Versuche eindeutig nachgewiesen werden.
- Der Schall breitet sich bis tief in den Ringraum eines Brunnens aus und konnte im Modellbrunnen bis an die „Brunnenwand“, d.h. 30 cm hinter dem Filterrohr, mit hohen Werten gemessen werden.
- Die Schallintensität und die Reinigungswirkung sind druckabhängig. Ein Wirkmaximum wird bei ca. 5 bar Überdruck erreicht, danach bleibt die Leistung ohne weitere wesentliche Zu- oder Abnahme auf diesem Niveau.
- Das Ausbaumaterial hat nur einen geringen Einfluß auf die Schallintensität und Reinigungswirkung des Ultraschalls. Einheitliche Trends zeichneten sich in den Laborversuchen im halbtechnischen Maßstab nicht ab.

Die Beantwortung der Fragen zur Nachhaltigkeit und den Qualitätskriterien für erfolgreiche Brunnenregenerierungen mit der Ultraschallmethode sollte dann anhand von Praxisversuchen und der Auswertung von Daten bisher durchgeführter Regenerierungen erarbeitet werden.

#### 4.4 Einsatz der Ultraschallmethode an drei ausgewählten Brunnen

Regeneriert wurden drei Brunnen verschiedener Wasserwerke in Deutschland. Die Daten werden im Folgenden anonym zusammengestellt und ausgewertet.

##### 4.4.1 Eigenschaften der ausgewählten Brunnen

Tab. 4-1: Brunnendaten der drei bearbeiteten Brunnen der exemplarischen Praxisversuche

	Brunnen 1	Brunnen 2	Brunnen 3
<b>Ausbau</b>	Hagusta, DN 400 PVC-Einschub, DN 300	Stahl – Rilsan, DN 300	Stahl – Poly, DN 400
<b>Geologie</b>	Sand-Ton- Wechsellagerung	Basalt	Fein- bis Grobsand - Wechsellagerung
<b>Tiefe [m uGOK]</b>	41 m	43 m	104,5 m
<b>Filterstrecke</b>	3 Abschnitte, 18 m Gesamtlänge	2 Abschnitte, 16 m Gesamtlänge	2 Abschnitte, 40 m Gesamtlänge
<b>Bemerkungen</b>	wird regelmäßig regeneriert (bis 1994 mit HCl) 1998 zum ersten Mal mit Ultraschall  Einschubverrohrung: PVC, DN 300	keine Angaben über bisherige Regenerierungen  Nachbarbrunnen <60 m ent- fernt	erste Regenerierung des Brunnens im Frühjahr '03 ohne nennenswerte Lei- stungssteigerung  z.T. sichtbare Schluffab- lagerungen in den Schlitz- brücken im unteren Bereich des Brunnens
<b>Wasserspiegel [m uOK Flansch]</b>	RW i.d.R. 1,90 – 2,10 BW ~ 6,60	<i>RW schwankend</i> BW ~ 20 m u Flansch	RW ~ 3,60 BW ~ 14 m

##### Brunnen 1

Die Fördermenge des Brunnens bei Neubau betrug 30 bis 40 m<sup>3</sup>/h. Nach Einbau der Einschubverrohrung und der daraus resultierenden Durchmesser verringering lag die Fördermenge bei 15 bis 18 m<sup>3</sup>/h. Bei zu starker Förderung und entsprechend tiefer Absenkung des Wasserspiegels wurde Sand gefördert.

Wasseranalysen zeigen einen relativ hohen Gehalt des Wassers an Eisen und Calciumcarbonat. Ein entsprechendes Ergebnis lieferten die Analysen des Belages und des abgepumpten Wassers nach mechanischer Vorreinigung.

Die TV-Untersuchung und die geophysikalischen Messungen im Ringraum bestätigten die Lage der Filterstrecken der Ausbauezeichnung. Vor Beginn der Regenerierarbeiten wiesen alle Filterabschnitte starke rotbraune, flockige Aufwüchse auf. Vor allem im unteren Filterbereich waren alle Filterschlitzte vollständig geschlossen.

## **Brunnen 2**

Im laufenden Betrieb sank die Förderleistung von ursprünglichen 12 m<sup>3</sup>/h nach Neubau immer weiter ab. Zuletzt lag sie bei 6 m<sup>3</sup>/h.

Auffällig war die Schwankung des Ruhewasserspiegels bei den verschiedenen Untersuchungen. Der geringe Abstand zum Nachbarbrunnen bewirkt eine Beeinflussung beim Zu- oder Abschalten desselben, die in Form der Wasserspiegelschwankungen beobachtet werden konnte. Somit mussten bei der Auswertung des ersten Pumpversuches die Betriebszeiten des Nachbarbrunnens unbedingt beachtet werden. Für den zweiten und dritten Pumpversuch wurde der Nachbarbrunnen eingeschaltet und lief konstant mit, um den Störeinfluss zu minimieren.

Wasseranalysen zeigen einen hohen Gehalt an Calciumcarbonat und an Mangan. Eine Entnahme von Belagsproben war nicht möglich, da nur sechs Wochen zuvor eine neue Pumpe eingebaut worden war. Der Brunnenbetreiber bestätigte jedoch das Vorhandensein schwarzbrauner Beläge auf der alten Pumpe und der Steigleitung.

Die Kamerabefahrung und die geophysikalischen Messungen bestätigten die in der Ausbauzeichnung angegebene Lage der Filterstrecken. Vor Beginn der Regenerierarbeiten wies die gesamte Rohrtour des Brunnens unterhalb des Ruhewasserspiegels flockige, rot- bis schwarzbraune Aufwüchse mit nach unten zunehmender Dicke auf. Alle Schlitzbrücken der Filterstrecken waren geschlossen.

## **Brunnen 3**

Der Brunnen wird vom Betreiber derzeit mit einer annähernd konstanten Förderleistung von 200 m<sup>3</sup>/h betrieben. Im laufenden Betrieb nahm dabei der Absenkungsbetrag zwischen Ruhe- und Betriebswasserspiegel stetig zu und lag unmittelbar vor Beginn der Regenerierarbeiten bei 14,44 m.

Der Brunnen wurde im Frühjahr 2003 mittels Wasserstrahl - Hochdruck und dem AquaRen-Verfahren (Anwendung von Knallgas zur Impulserzeugung) regeneriert, wobei keine nennenswerte Leistungssteigerung erzielt werden konnte.

Die Wasseranalyse zeigt einen sehr hohen Gehalt an Eisen im Wasser.

Die Filterrohre wiesen keinerlei Bewuchs auf. Eine Belagsanalyse konnte daher nicht durchgeführt werden.

Der Brunnen ist durch TV- und GEO-Vermessungen im Rahmen der Regenerierung im Frühjahr 2003 durch ein Ingenieurbüro gut dokumentiert. Die TV-Untersuchungen und die geophysikalischen Messungen, die im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführt wurden, bestätigten die Angaben des Brunnenbetreibers und des Ingenieurbüros zum Ausbau.

Auffällig waren z.T. weißlich graue Feinkornablagerungen (Schluff) in den Schlitzbrücken des unteren Filterbereiches. Diese waren sowohl vor Beginn der Arbeiten als auch nach der Ultraschallbehandlung vorhanden.

#### 4.4.2 Ergebnisse

Betrachtet werden sollen hier die Ergebnisse der Pumpversuche und der geophysikalischen Untersuchungen.

Die Pumpversuche fanden jeweils im Anschluß an die geophysikalischen Untersuchungen als zwölfstündige, einstufige Kurzpumpversuche über Nacht statt. Die Pumpe wurde immer in der gleichen Tiefe eingebaut und mit konstanter Förderrate betrieben. Gemessen wurde die Absenkung und der Wiederanstieg. Solche Kurzpumpversuche werden i.d.R. mit der gewöhnlichen Förderleistung des Brunnens bis zum Erreichen eines quasistationären Zustandes gefahren. Aus der Förderleistung und dem Absenkungsbetrag errechnet sich dann die spezifische Ergiebigkeit des Brunnens  $Q_s$  [ $m^3/h \cdot m$ ]. Bei den Praxiseinsätzen des Ultraschallverfahrens ergaben sich dabei bei Einhaltung der Bedingungen folgende Werte (Tab. 4-2):

**Tab. 4-2:** Ergebnisse der Pumpversuche

	Brunnen 1		Brunnen 2		Brunnen 3	
	Absenkung	spez. Ergiebigkeit	Absenkung	spez. Ergiebigkeit	Absenkung	spez. Ergiebigkeit
vor	5,72	3,48	9,88	0,43	3,07	16,74
nach mech. Vorreinigung	5,68	3,50	9,73	0,44	3,04	16,91
nach Ultraschall	5,47	3,64	9,10	0,47	2,93	18,61
Ergebnis	0,25 m weniger Absenkung	Steigerung um 4,6 % 0 (vor / nach)	0,78 m weniger Absenkung	Steigerung um 9,3 %	0,14 m weniger Absenkung	Steigerung um 11,2 %

Für alle drei Brunnen ergaben die Pumpversuche somit eine leichte Leistungssteigerung nach der mechanischen Vorreinigung und eine deutliche Zunahme der Leistung nach der Ultraschallbehandlung.

Die geophysikalischen Messungen erlaubten die Beurteilung des Zustandes des Ringraumes und der hydrodynamischen Verhältnisse im direkten Vergleich der einzelnen Bearbeitungsschritte. Die Auswertung erfolgte in Form eines Kurzberichtes seitens der durchführenden Firma BLM GmbH, Gotha und Dr. Lux Geophysikalische Fachberatung GbR, Friedrichroda. Die wesentlichen Erkenntnisse sollen an dieser Stelle zusammengefasst werden.

##### Brunnen 1

Als problematisch erwies sich die Tatsache, dass die Einschubverrohrung bei der Sanierung des Brunnens offensichtlich nicht mit Kies hinterfüllt wurde, so dass der Raum zwischen Einschub- und Altverrohrung wassererfüllt war. So konnte vor allem mit den Neutron-Neutron-Messungen zur Erfassung des Wassergehaltes im Ringraum und damit der Porosität kein Regeneriereffekt, sondern nur der sogenannte Wasserwert gemessen werden. Auch die Gamma-Gamma-Dichtemessungen erfassten nur die „scheinbare“ Dichte der beiden Ausbaumaterialien und des dazwischen befindlichen Wassers und zeigten keinen

Regeneriereffekt. Lediglich die Messungen der natürlichen Radioaktivität weisen für den unteren Filterabschnitt Unterschiede in Abhängigkeit von den Regenerierschritten auf. Hier zeigte sich ein verstärkter Feinkornanteil im Filterkies mit fortschreitender Regenerierung und damit verbundenem Abpumpen, d.h. dass sich sowohl durch die mechanische Vorreinigung als auch durch den Ultraschall Feinkornanteile im unteren Bereich des Ringraumes des Brunnens gesammelt haben, die durch Abpumpen nicht entfernt wurden. Letzteres ist darauf zurückzuführen, dass beim Abpumpen hauptsächlich die beiden oberen Filterabschnitte angeregt wurden.

Deutliche Veränderungen der Filterdurchlässigkeit ergaben die Messungen mit dem Packerflowmeter. Alle Filterabschnitte wiesen nach der mechanischen Vorreinigung durchweg höhere Durchlässigkeiten auf als vor der Reinigung. Dies ergibt sich allein aus der Entfernung der Beläge im Brunnenrohr.

Durch die Behandlung mit Ultraschall konnte nur im mittleren Filterabschnitt eine weitere Steigerung der Durchlässigkeit bewirkt werden.

Die Hydrodynamik im Brunnen konnte durch die Regenerierung nur geringfügig beeinflusst werden. Der Vergleich der Messungen für den Ruhezustand zeigt eine etwa gleichbleibende Verteilung der Zu- und Abflüsse. Im Brunnen herrschte dabei eine abwärts weisende vertikale Kurzschlussströmung, d.h. Zuflüsse traten nur im oberen der drei Filterabschnitte auf. Diese flossen im mittleren und unteren Filterabschnitt ab. Hierbei bewirkte die mechanische Vorreinigung die Öffnung eines zusätzlichen effektiven Horizontes im unteren Filterbereich, welcher durch die Ultraschallanwendung noch einmal vergrößert wurde. Ausgedrückt ist dies im Anteil an der Wasserströmung für den unteren Filterabschnitt, welcher von Regenerierschritt zu Regenerierschritt zunimmt.

Die Verhältnisse bei Förderung sind ähnlich. Auch hier zeigte sich, dass der obere Filterabschnitt mit 93% des Gesamtzuflussvolumens als Hauptzufluss wirkte. Die Zuflussverteilung wurde durch die Regenerierung nicht verändert. In den beiden unteren Filterbereichen konnte jedoch die effektive Filterlänge, d.h. die Summenmächtigkeit der Zuflüsse, gesteigert werden. Dies bedeutet, dass nach der Regenerierung mehr Filterabschnitte in den unteren beiden Filterbereichen am Zuflussgeschehen beteiligt waren. Eine Berechnung der Transmissivität des gesamten Ausbaus ergab ebenfalls eine geringe Steigerung der Ausbaudurchlässigkeit nach der Ultraschallbehandlung. Diese wird mit der gesteigerten Filterdurchlässigkeit des mittleren Filterabschnittes in Zusammenhang gebracht.

Auffällig ist die Korrelation des Bereiches, in dem der Ultraschall eine Verbesserung der Durchlässigkeit bewirkte, mit dem Tiefenabschnitt des Brunnens, für den bei der Kamerabefahrung aus dem Jahre 1990 die mechanischen Beschädigungen des Hagusta-Ausbaurohres festgestellt wurden. Es kann davon ausgegangen werden, dass dort Teile des Altausbaus (gebrochene und eingedrückte Altverrohrung und durchdrückender Filterkies) an der Einschubverrohrung anlagen. Wo dies der Fall war, konnte der Ultraschall seine Wirkung entfalten, überall sonst wurde hauptsächlich das Wasser zwischen Einschub- und Altverrohrung beschallt und es ergaben sich dadurch keine Regeneriereffekte.

## **Brunnen 2**

Die Messungen zeigten insgesamt eine deutliche Verbesserung der hydrodynamischen Verhältnisse durch die Ultraschallanwendung. Belegt werden konnte vor allem die große Eindringtiefe des Ultraschalls in den Ringraum.

Die Neutron-Neutron-Messung erfasste den Wassergehalt und die Porosität im Ringraum. Hier ergaben sich im Laufe der einzelnen Regenerierschritte keine Unterschiede. Zu bemerken ist allerdings, dass der Messwert bereits bei der ersten Messung ein niedriges Niveau hatte, was bedeutet, dass Wassergehalt und Porosität schon zu Beginn der Arbeiten als sehr gut einzustufen und kaum zu verbessern waren.

Alle anderen Verfahren ergaben deutliche Veränderungen in Abhängigkeit vom Regenerierfortschritt. So zeigte die Gamma-Messung mittels der Bestimmung des Ton- und Sandgehaltes und die Gamma-Gamma-Dichtemessung eine Materialumlagerung durch die Ultraschallwirkung. Dabei wurden im Filterkies Feinkornbestandteile von den Kieskörnern abgelöst und an Stellen mit zuvor geringerer Lagerungsdichte akkumuliert. Ebenso wie bei der ersten Regenerierung konnten diese Feinkornanteile beim Abpumpen jedoch nicht genügend entfernt werden. Sie fanden sich nach der Ultraschallbehandlung in den Tiefenbereichen 9,5 bis 13 m und 24 bis 25 m u OK Brunnenkopf.

Eine Verbesserung der Filterdurchlässigkeit wurde mit den Packerflowmetermessungen sowohl nach der mechanischen Vorreinigung als auch nochmals nach der Ultraschallbehandlung nachgewiesen. Dies gilt vor allem für den unteren Bereich der oberen Filterstrecke, unterhalb von 25 m u OK Brunnenkopf, sowie für die komplette untere Filterstrecke. Der darüber liegende Bereich hatte vor Beginn der Arbeiten schon eine durchweg gute Durchlässigkeit.

In den Messkurven bedeutet ein niedrigerer Messwert eine höhere Filterdurchlässigkeit, da dann durch die Sonde mehr Wasser in den Filter verdrängt wird und somit weniger Wasser am Messflügel entlang strömt. Die Fahrtgeschwindigkeit bestimmt die Wirtiefe dieser Kolbenverdrängung. Mit geringerer Fahrtgeschwindigkeit kann der filterrohnahe Bereich der Kiesschüttung aufgelöst werden, bei höherer Fahrtgeschwindigkeit reicht das Verfahren tiefer in den Ringraum hinein.

Besonders deutliche Unterschiede ergaben sich für die Packerflowmetermessungen mit der höheren Sondenfahrtschwindigkeit. Die Messungen mit einer Fahrgeschwindigkeit von 8 m/min drangen tiefer in den Ringraum ein als die Messungen mit 4 m/min. Dabei zeigte sich, dass der Ultraschall bis tief in die Kiesschüttung hinein wirkte. Hier konnte sogar im oberen Bereich der ersten Filterstrecke die Filterdurchlässigkeit noch geringfügig verbessert werden. Dies lässt unter Umständen sogar darauf schließen, dass der Ultraschall tiefer im Ringraum teilweise besser wirkte als im filternahen Bereich.

Die Messungen zur Hydrodynamik im Brunnen ergaben eine Angleichung der Zuflussanteile, eine Erhöhung der Anzahl der effektiven Horizonte in beiden Filterstrecken und eine Zunahme der Transmissivität von Regenerierschritt zu Regenerierschritt.

Im Ruhezustand herrschte im Brunnen eine abwärts weisende, vertikale Kurzschlussströmung. Zuflüsse im oberen Bereich der oberen Filterstrecke flossen in deren unteren Bereich und in der unteren Filterstrecke ab.

Im Verlauf der Regenerierung wurde sowohl die Zufluss- als auch die Abflussrate erhöht.

Die Messungen bei Förderung ergaben ebenfalls, dass der Hauptanteil der Zuflüsse im oberen Filterabschnitt erfolgte. Hier zeigten die effektive Filterlänge und die Werte für die Transmissivität eine deutliche Zunahme der Ausbaudurchlässigkeit von Regenerierschritt zu Regenerierschritt.

### **Brunnen 3**

Die Neutron-Neutron-Messung und das Gamma-Gamma-Dichte-Log zur Bestimmung der Materialdichte bzw. der Porosität und des Wassergehaltes im Ringraum des Brunnens ließen keine Unterschiede in Abhängigkeit der einzelnen Regenerierschritte erkennen. Dies begründet sich in erster Linie darauf, dass die Werte bereits bei der Erfassung des Ist-Zustandes auf einem niedrigen Niveau waren und der Brunnen somit hinsichtlich dieser Parameter nicht mehr verbesserungsfähig war. Materialumlagerungen als Folge der einzelnen Regenerierschritte traten demnach ebenfalls nicht auf. Die Messung der natürlichen Gammastrahlung (GR) zur Bestimmung des Feinkornanteils im Ringraum wies nach der mechanischen Regenerierung erwartungsgemäß die gleichen Werte auf wie vor Beginn der Arbeiten. Erst nach der Ultraschallbehandlung zeigten insgesamt höhere Werte eine Zunahme der Feinkornanteile im Filterkies an. Dies bedeutet, dass Feinkornanteile durch den Ultraschall gelöst, aber nicht ausgetragen werden konnten.

Die Packerflowmetermessungen belegen auch bei diesem Versuch, dass der Ultraschall in die Kiesschüttung eindringen konnte und dort eine Reinigung bewirkte. Die mechanische Vorreinigung bewirkte, da sie nur das Innere der Brunnenrohre erfasst und dort keine Beläge vorhanden waren, kaum eine Veränderung der Filterdurchlässigkeit. Nach der Ultraschallanwendung waren die Messwerte dann jedoch insgesamt etwas niedriger. Das bedeutet, dass mehr Wasser in den Filterbereich verdrängt wurde, dieser somit durchlässiger war. Dass der Regeneriereffekt bei diesem Versuch insgesamt nur gering ausfällt, wird auch auf die nur ein halbes Jahr zurückliegende, erste Regenerierung des Brunnens zurückgeführt. Dessen ungeachtet konnte vor allem im unteren Filterabschnitt noch ein leichter Reinigungseffekt erzielt werden.

Die Hydrodynamik im Brunnen zeigte im Ruhezustand eine abwärts weisende, vertikale Kurzschlussströmung. Zuflüsse im Bereich der oberen Filterstrecke flossen in der unteren Filterstrecke ab. Im Verlauf der Regenerierung wurde sowohl die Zufluss- als auch die Abflussrate erhöht. Die Kurzschlußströmung war nach der Ultraschallbehandlung stärker ausgeprägt.

Die Verhältnisse bei Förderung zeigte eine Umverteilung von Einzelzuflussanteilen und damit einhergehend eine insgesamt gleichmäßigere Brunnenanströmung. Darüber hinaus konnten keine wesentlichen Veränderungen gemessen werden.

Zusammengefasst zeigten die geophysikalischen Messungen für alle drei Versuche eine Reinigungswirkung des Ultraschalls im Filterkies, wenn auch in unterschiedlichem Ausmaß. Tab. 4-3 zeigt die Werte für die effektiven Filterlängen und die Durchlässigkeit des Ausbaus (Transmissivität). Diese konnten für die ersten beiden Brunnen im Verlauf der Regenerierung deutlich gesteigert werden. Für die Regenerierung des dritten Brunnens wirkte es sich nachteilig aus, dass zwischen den geogen effektiven Zonen des Gebirges und denen des Brunnenausbaus Differenzen bestehen, die besonders im zweiten Messeinsatz zu einer

Ergebnisverzerrung führten. Hierbei bewirkte ein stark erhöhter Volumenzufluss einen temporären, rein technisch hervorgerufenen Effekt (Kurzbericht der Fa. GFL, S. 8, Hydrodynamik im Brunnen). Vermutet wird, dass sich der Brunnen bei Durchführung der geophysikalischen Messungen direkt im Anschluß an die mechanische Vorreinigung noch nicht wieder im Ruhezustand befand.

Grundsätzlich konnte auch bei der dritten Regenerierung die natürliche Zuflussrate von 2,9 l/min auf 5 l/min gesteigert werden.

**Tab. 4-3:** Hydrodynamische Verhältnisse bei Förderung  
(Auszug aus den Kurzberichten der Fa. GFL)

	Brunnen 1		Brunnen 2		Brunnen 3	
	effektive Filterlänge 18m=100% m (%)	Transmissivität m <sup>2</sup> /s	effektive Filterlänge 16m=100% m (%)	Transmissivität m <sup>2</sup> /s	effektive Filterlänge 40m=100% m (%)	Transmissivität m <sup>2</sup> /s
<b>vor</b>	5,7 (31,7)	1,00 x 10 <sup>-3</sup>	6,4 (40)	1,21 x 10 <sup>-4</sup>	13 (33)	4,43 x 10 <sup>-3</sup>
<b>nach mech. Reinigung</b>	7,7 (42,8)	1,00 x 10 <sup>-3</sup>	7,4 (46)	1,25 x 10 <sup>-4</sup>	18,7 (47)	4,32 x 10 <sup>-3</sup>
<b>nach Ultraschall</b>	10,0 (55,5)	1,04 x 10 <sup>-3</sup>	10,8 (68)	1,35 x 10 <sup>-4</sup>	15,9 (40)	4,20 x 10 <sup>-3</sup>
<b>Ergebnis</b>	Steigerung um 4,3 m (23,8 %)	Steigerung um 4 % Vorher/Nachher	Steigerung um 4,4 m (27,5 %)	Steigerung um 11,6 % Vorher/Nachher	Steigerung um 2,9 m (7,25 %)	Verminderung um 15,2 % Vorher/Nachher

Zur Überprüfung des Regeneriererfolges wurden die Betreiber jeweils mehrere Wochen nach Abschluss der Regenerierung gebeten, Angaben zur Leistung des Brunnens im Normalbetrieb zu machen. Die Ergebnisse zeigt Tab. 4-3:

**Tab. 4-4:** Angaben der Betreiber zur Brunnenleistung

	Brunnen 1		Brunnen 2		Brunnen 3	
	Fördermenge [m <sup>3</sup> /h]	Absenkung [m]	Fördermenge [m <sup>3</sup> /h]	Absenkung [m]	Fördermenge [m <sup>3</sup> /h]	Absenkung [m]
<b>vorher</b>	16 – 18	~ 4,50	6	20	200	14,44
<b>nachher</b>	16 – 18	~ 4,50	7 9	14 20	200	14,04
<b>Ergebnis</b>	keine Veränderung		50 % mehr Fördermenge bei gleicher Absenkung		0,40 m weniger Absenkung bei gleichbleibender Fördermenge	

Demnach konnte bei Brunnen 1 keine ausreichende Veränderung bewirkt werden. Brunnen 2 hingegen weist bei gleicher Absenkung nach der Regenerierung eine um 50 % höhere Fördermenge auf bzw. bei gleicher Fördermenge senkt der Brunnen deutlich weniger ab. An Brunnen 3 führte der Versuch der Regenerierung mit Ultraschall zu keiner wesentlichen Verbesserung. Im Vergleich zum ersten Regenerierungsversuch im Frühjahr 2003 mit dem AquaRen-Verfahren erwies sich der Ultraschalleinsatz jedoch als effektiver.

## 4.5 Auswertung gesammelter Daten und Aussagen zur Nachhaltigkeit

Zur Ergänzung der im Rahmen des Projektes durchgeführten Praxisversuche wurden die Daten von seit 1995 von verschiedenen Firmen mit der Ultraschallmethode bearbeiteten Brunnen gesammelt und ausgewertet. Hierbei interessierte zum einen, ob sich schon anhand grundlegender Brunnendaten Aussagen zu Wirksamkeit und Erfolgsaussichten ableiten lassen und zum anderen sollte die Nachhaltigkeit der Ultraschallmethode beurteilt werden können.

Als problematisch erwies sich, dass die von Regenerierfirmen bereitgestellten Daten zum größten Teil sehr unvollständig waren, insbesondere hinsichtlich vorher durchgeführter Regenerierungen, der Art der Verockerung und der Ergebnisse begleitender Untersuchungen. Ein weiteres Problem war die oftmals generelle Verweigerung der Bereitstellung von Daten sowohl seitens der Brunnenbetreiber als auch z.T. bei regenerierenden Firmen, die den Umfang der Datenerhebung stark einschränkte.

Die Datenauswertung ließ keine eindeutigen Abhängigkeiten des Regeneriererfolges vom Brunnenausbau erkennen. Daraus lässt sich ableiten, dass offensichtlich eine Vielzahl von Faktoren und deren Zusammenwirken den Erfolg einer Brunnenregenerierung bestimmen. Erschwerend kam hinzu, dass sich die Angaben zur Leistungssteigerung zum Teil auf Pumpversuche im Vorfeld, teilweise aber auf den Neubauwert bezogen. Alle Angaben sind somit mit größter Vorsicht zu bewerten. Hinsichtlich des Brunnenausbaus zeigten sich anhand der wenigen Daten folgende Tendenzen: Für Brunnen mit Steinzeug, PVC oder Hagusta lag die erzielte Leistungssteigerung immer über 50 %, für OBO und Stahl trat die größte Schwankungsbreite (0 bis 200 %) auf. Eine Tiefenabhängigkeit konnte nicht gefunden werden. Das heißt, mit Ultraschall konnten flache Brunnen genauso gut oder schlecht regeneriert werden wie tiefere Brunnen. Den größten Einfluss scheinen die Art, die Zusammensetzung und das Alter der Beläge zu haben.

Ersichtlich wurde vor allem, wie unterschiedlich die Datendokumentation bei den einzelnen Wasserbetreibern gehandhabt wird und auf welcher dünner Basis daher die anschließende Beurteilung des Erfolges beruht. Ein großes Problem stellt hier auch das Fehlen einer einheitlichen Bezugsgröße dar. Des Weiteren sagt, unseres Erachtens nach, allein die Angabe einer Leistungssteigerung in Prozent wenig über den eigentlichen Erfolg einer Regeneriermaßnahme aus. Hier müssen immer der Hintergrund des Brunnens, die Brunnengeschichte und auch seine Regenerierfähigkeit anhand des Vergleiches mit Ergebnissen früherer Regenerierungen und anderen Verfahren einbezogen werden.

Bezüglich der Nachhaltigkeit der Ultraschallmethode wurden Brunnenbetreiber kontaktiert, bei denen im Zeitraum 1995 bis 2000 ein oder mehrere Brunnen mit Ultraschall regeneriert wurden. In einem Fragebogen sollten Angaben zum Verlauf der Brunnenleistung gemacht werden. Auch hier stellte wieder die generelle Bereitschaft von Brunnenbetreibern und Regenerierfirmen, überhaupt Daten zur Verfügung zu stellen, ein großes Problem dar. Insgesamt konnten ca. 25 Brunnenbetreiber zu mehr als 70 Brunnen und deren Regenerierung mit Ultraschall befragt werden. Das relativ einheitliche Bild zeigt die allgemeine Zufriedenheit der Brunnenbetreiber. Viele Brunnen wurden inzwischen wiederholt mit dem Verfahren regeneriert. Als Beweggründe für den Einsatz des Ultraschalls wurden vor allem genannt:

- Verzicht auf den Einsatz chemischer Stoffe
- schonendes Verfahren
- kürzere Ausfallzeiten des Brunnens
- allgemeine Neugier, Verfahren auszuprobieren, die ohne Chemie arbeiten
- auf Empfehlung anderer Betreiber oder von Ingenieurbüros

Nur zwei Brunnenbetreiber gaben an, mit der Ultraschallmethode weniger Leistungssteigerung erzielt zu haben, als mit anderen Verfahren und regenerieren derzeit mit einem der Hochdruck-Verfahren.

Bezüglich der Nachhaltigkeit einer Regenerierung hebt sich Ultraschall nicht wesentlich von anderen Verfahren ab. Auch mit dieser Methode kann nicht erreicht werden, dass Brunnen quasi wartungsfrei werden. Mehrere Betreiber erläuterten allerdings eine, ihrer Erfahrung nach bessere Nachhaltigkeit des Ultraschallverfahrens im Vergleich zu chemischen Regenerierungen, da es nicht zu einer Aufrauung der Oberfläche und damit schnellerer Wiederverockerung führt.

Mit den exemplarischen Feldversuchen im Rahmen des Projektes und der Auswertung der vorhandenen Daten konnten somit die verbleibenden Fragen aus der Zielsetzung beantwortet werden. Die Ultraschallmethode wurde und wird erfolgreich zur Brunnenreinigung eingesetzt.

## 5 Projektverlauf

Das Projekt gliederte sich in zwei wesentliche Teile, die Laborversuche und die Praxisanwendungen der Methode an ausgewählten Brunnen. Wie schon im Zwischenbericht im April letzten Jahres dargelegt wurde, ergaben sich im Projektverlauf immer wieder Verzögerungen. Dennoch wurde konsequent versucht, das Projekt termingerecht und ergebnisorientiert abzuschließen.

Das Projekt begann im Mai 2001 mit der Konzeption und Planung des Versuchsbrunnens. Nach anfänglichen organisatorischen Schwierigkeiten bei der Bereitstellung der Finanzmittel und dadurch entstandenen zeitlichen Verzögerungen wurde die Anlage im Oktober 2001 in Betrieb genommen. Die ersten Messungen des Schallfeldes ohne Kiesbefüllung konnten dann bereits im Januar 2002 erfolgreich abgeschlossen werden. Bis März 2002 erfolgten die Messungen der Schallverteilung im kiesbefüllten Ringraum hinter PVC- und Stahlfilter. Anschließend wurde mit der Bestimmung der Reinigungsleistung fortgesetzt. Ein Problem stellte hierbei die Beschaffung geeigneten Belagsmaterials dar. Mehrere Varianten, mit verockertem Kies aus überbohrten Brunnen, Belagsproben aus Brunnen der Wasserwerke Schierstein oder simulierten künstlichen Belägen mussten als ungeeignet verworfen werden. Als am besten geeignetes Material wurde schließlich Filterkies aus der Wasseraufbereitung gewählt. Die Versuche zur Bestimmung der Reinigungsleistung liefen bis Juli 2002 und beinhalteten vor allem die Variation der Beschalldauer, des Druckes und des Abstandes zum Schallgeber zur Ermittlung der optimalen Parameter für den Ultraschalleinsatz in Brunnen.

Ab Mai 2002 sollte parallel zu den letzten Laborversuchen die zweite Hauptphase mit der Durchführung der Praxisversuche beginnen. Als unerwartet schwierig erwies sich jedoch die Suche und Auswahl geeigneter Brunnen. Die Suche scheiterte oft an der mangelnden Dokumentation des Brunnenbetriebes oder der Bereitschaft auf Seite der Brunnenbetreiber, Daten zur Verfügung zu stellen. Hinzu kamen weitere Verzögerungen, als die Gutachter der DBU den im April vorgelegten Zwischenbericht zurückhaltend bewerteten, da zum einen offensichtlich die Trennung zwischen Projektjahr und Projektphase nicht deutlich genug gemacht worden war und andererseits die verwendeten Beläge in Frage gestellt wurden. Nach der Vorlage einer Ergänzung zum Zwischenbericht im August 2002 mit detaillierten Angaben zum Projektablaufplan und der geplanten Überleitung bzw. der parallelen Bearbeitung der Fragestellungen im Labor und in der Praxis und Ausführungen zur Auswahl der Brunnenbeläge konnte das Projekt in die zweite Hauptphase übergeleitet werden. Dadurch gerieten die geplanten Praxisversuche in die Zeit der Sommerpause. Zur Überbrückung der entstandenen Verzögerung wurden die Laborergebnisse um Messungen und Versuche hinter einem OBO-Filter ergänzt. Die ersten Praxisversuche wurden dann, nachdem die Projektfortführung von den Gutachtern genehmigt worden war, im November und Dezember 2002 erfolgreich durchgeführt. Anschließend fand im Januar 2003 ein Gutachtertreffen im ESWE-Institut mit Besichtigung der Projektanlage und Diskussion der Schwierigkeiten statt. Dieses Treffen lieferte wertvolle Anregungen und eine Änderung der Planungen hinsichtlich der Durchführung weiterer Feldversuche. Die Anzahl der Feldversuche wurde von insgesamt fünf auf drei herabgesetzt und die Maßgaben zur Auswahl des letzten Brunnens definiert. Die Durchführung dieses Gespräches wird von uns als sehr positiv und empfehlenswert beurteilt.

Auch für die letzte Regenerierung gestaltete sich die Auswahl eines geeigneten Brunnens wieder langwieriger als erwartet. Die Schwierigkeiten lagen, wie bereits bei den ersten

Praxisanwendungen, vor allem in der mangelnden Dokumentation des laufenden Brunnenbetriebes auf Seiten der Brunnenbetreiber oder betreuender Ingenieurbüros. So wurden mehrfach Brunnen vorgeschlagen, bei denen durch einen Pumpversuch keine Regenerierbedürftigkeit festgestellt werden konnte. Auch die Datenbereitstellung erforderte immer deutlich mehr Zeit als erwartet. Vor allem diese wiederholten Verzögerungen führten dazu, dass eine Projektverlängerung um ein halbes Jahr beantragt werden musste. Bei einer Durchführung unter Einhaltung des genehmigten Projektbudgets wurde die Projektlaufzeit bis Oktober 2003 verlängert.

Parallel zur Planung und Durchführung der Feldversuche wurden im Labor von November 2002 bis April 2003 Versuche zu biologischer Verockerung und der Wirksamkeit von Ultraschall auf simulierte biologische Brunnenbeläge durchgeführt.

Die letzte Praxisanwendung fand schließlich Ende September 2003 statt.

Die verbleibende Zeit während der Brunnensuche und bis zum Abschluss des Projektes wurde zur Auswertung, zum Verfassen des Berichtes und zur Vorbereitung der Abschlussveranstaltung verwendet.

## 6 Fazit

Der vorliegende Bericht schließt das Projekt zur Entwicklung eines Verfahrens zur Brunnenregenerierung mittels hochenergetischem Ultraschall ab, welches von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt mit einer Laufzeit von 2,5 Jahren gefördert wurde.

Inhalt waren Labor- und Feldversuche zur Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Wirksamkeit der Ultraschallreinigung in Brunnen.

Im Labor wurden dazu

1. die Schallverteilung und Schallintensität sowie
2. die Reinigungsleistung anhand von Trübungsmessungen und der Bestimmung der Partikelgrößenverteilung in Abhängigkeit
  - des Druckes
  - des Ausbaumaterials (Filter und Kiesschüttung)
  - des Abstandes zum Ultraschallgeber
  - der Art der Verockerung

bestimmt.

Anschließende Feldversuche wurden mit einem wissenschaftlichen Untersuchungsprogramm begleitet und ausgewertet, um weitere Erkenntnisse über die Vorgänge bei der Ultraschallbehandlung, die Reichweite des Ultraschalls im Ringraum, die Wirkmechanismen und die Abhängigkeit des Regeneriererfolges von den Eigenschaften des Brunnens zu gewinnen.

Insgesamt kann das Projekt erfolgreich abgeschlossen werden. Alle durchgeführten Versuche bestätigten die Wirksamkeit von Ultraschall zur Brunnenregenerierung. Die Fragestellungen aus der Zielsetzung konnten, wie im folgenden noch einmal zusammengefasst wird, beantwortet werden.

- Unter welchen Bedingungen ist hoch energetischer Ultraschall am wirksamsten für die Brunnenreinigung?

Die Laborversuche zeigten eine klare Druckabhängigkeit der Ultraschallwirkung. Die Kavitation als verantwortlicher Wirkmechanismus konnte somit als alleiniger Reinigungsvorgang ausgeschlossen werden. In der Auswertung der Daten von bisher weit über 300 Praxiseinsätzen der Methode zeigte sich hingegen keine Abhängigkeit von der Brunnentiefe und dem hydrostatischen Druck. Zehn Meter tiefe Brunnen konnten genauso erfolgreich regeneriert werden wie Tiefbrunnen mit mehr als einhundert Metern Tiefe. Vermutlich wirken hier verschiedene Mechanismen, d.h. in flachen Brunnen könnte die Kavitation eine Rolle spielen, in tieferen Brunnen schallinduzierte Materialspannungen. Ebenso wirkten sich die verschiedenen Ausbaumaterialien nicht erkennbar auf den Regeneriererfolg aus. Im Labor erwies sich der untersuchte PVC-Filter im Vergleich zum Stahlschlitzbrückenfilter und OBO als am besten schalldurchlässig und der OBO-Filter zeigte das uneinheitlichste Verhalten. Aus der Auswertung der Praxiseinsätze konnte ganz klar

abgeleitet werden, dass der Erfolg einer Regenerierung mit Ultraschall nicht von Einzelfaktoren, wie dem Ausbaumaterial oder der Brunnentiefe abhängt, sondern vielmehr von einem komplizierten Zusammenspiel aller Faktoren. Entscheidende Bedeutung muss sicher der Art und dem Alter der Brunnenalterung und Verockerung beigemessen werden. Wie für alle anderen am Markt befindlichen Verfahren gilt auch für die Ultraschallmethode, dass nur die rechtzeitige Regenerierung bei noch nicht gealterten und ausgehärteten Belägen den meisten Erfolg bringen wird.

- Wie weit reicht die Wirkung des Ultraschalls in den Ringraum eines Brunnens bzw. in den angrenzenden Aquifer?

In allen durchgeführten Versuchen im Labor und an realen Brunnen konnte der Ultraschall bzw. seine Wirkung bis mindestens 35 cm Abstand zum Schallgeber nachgewiesen werden. Die Wirkung im Ringraum eines Brunnens ist damit zweifelsfrei gegeben. Die Schallfeldmessungen im Versuchsbrunnen URSEL wiesen dabei i.d.R. in maximaler Entfernung zum Ultraschallgeber, 30 cm hinter dem Filterrohr, noch mehr als 50 % der maximal erreichten Schallfeldintensität des jeweiligen Versuches auf. Inwieweit sich der Ultraschall in Brunnen in den angrenzenden Aquifer ausbreiten kann, konnte mithilfe der geophysikalischen Untersuchungen nicht bestimmt werden. Für den Bereich der Filterkiesschüttung belegten besonders die Packerflowmetermessungen an Brunnen 2 die Wirktiefe. Hier zeigte sich, dass mit dem Ultraschall tiefer im Ringraum sogar deutlichere Verbesserungen erzielt werden konnten als im filternahen Bereich .

- Kann die Ultraschallmethode erfolgreich zur Brunnenreinigung eingesetzt werden?

Wie alle bisherigen Ausführungen zeigen, ist die Ultraschallmethode ein modernes, leistungs- und konkurrenzfähiges Verfahren zur erfolgreichen Brunnenregenerierung. Die Eindringtiefe und die Reinigungswirkung des Verfahrens konnte in allen Versuchen belegt werden. Im Rahmen des Projektes wurden drei wissenschaftlich überwachte Brunnenregenerierungen durchgeführt, bei denen insbesondere die bohrlochgeophysikalischen Messungen einen guten Einblick in die Wirkmechanismen der Ultraschallregenerierung erlaubten. Hinzu kommen weit über 300 bisher erfolgreiche Regenerierungen seit Beginn der Anwendung. Im Vergleich zu anderen mechanischen Verfahren fällt die Ultraschallmethode durch die bauwerk-schonende Bearbeitung und den zügigen Arbeitsfortschritt positiv auf. Trotz des völligen Verzichtes auf den Einsatz chemischer Stoffe im Grundwasser wird eine hohe Reinigungsleistung erzielt. Durch das positive Kosten-Leistungs-Verhältnis, die kurzen Ausfallzeiten und die Chemiefreiheit der Methode ist sie insgesamt als ökologisch und ökonomisch sinnvolles Verfahren einzustufen.

- Wie nachhaltig können Brunnen mit dem Ultraschallverfahren regeneriert werden?

Bezüglich der Nachhaltigkeit unterscheidet sich das Ultraschallverfahren nicht wesentlich von anderen Methoden. Positiv zu vermerken sind zwei Effekte. Zum einen bewirkt die Reinigung mit Ultraschall keine Oberflächenaufrauung, was einer anschließenden Wiederverockerung entgegenwirken kann, zum anderen werden Mikroorganismen, die eine biologische Verockerung bewirken können, zum Teil abgetötet. In Brunnen mit starker

Verockerungsneigung und hauptsächlich biologisch induzierten Belägen kann die Ultraschallmethode somit vermutlich nachhaltigere Reinigungserfolge bewirken als andere mechanische und auch chemische Verfahren. Das Festlegen von Regenerierintervallen muss jedoch für jeden Brunnen auf die individuellen Gegebenheiten abgestimmt erfolgen. Generelle Aussagen oder Vorgaben sind, unabhängig vom eingesetzten Verfahren, nicht möglich sondern von Brunnen zu Brunnen verschieden.

- Welche Qualitätskriterien sind notwendig, um eine verlässliche Bewertung des Erfolges einer Brunnenregenerierung vorzunehmen?

Generell muss die Kontrolle des Erfolges einer Regenerierung unabhängig vom eingesetzten Verfahren erfolgen. Notwendig ist dafür eine gute Brunnendokumentation einschließlich aller früheren Regenerierungen. Da das Ziel einer jeden Regenerierung eine Erhöhung der Brunnenleistung ist, drückt sich der Erfolg in den Ergebnissen von Brunnenleistungstests aus. Kurzpumpversuche ermitteln hierfür die jeweilige spezifische Ergiebigkeit des Brunnens. Sinnvollerweise müssen die Ergebnisse immer in die gesamte Brunnendokumentation eingebunden werden. Maßgeblich sind hierbei die Entwicklung der Förderleistung im Laufe der Betriebszeit, das Alter des Brunnens, der Zeitpunkt früherer Regenerierungen und deren Ergebnisse, die Entwicklung der Grundwasserstände im Gebiet, die sich in einer Veränderung der Ruhewasserspiegel niederschlägt und sonstige Veränderungen oder Auffälligkeiten im Brunnenbetrieb. Nur auf dieser Grundlage können Aussagen zum tatsächlichen Regeneriererfolg getroffen werden.

Insgesamt brachten die durchgeführten Versuche umfassende Erkenntnisse über die Vorgänge bei der Ultraschallbehandlung in Brunnen, die Wirkmechanismen und die Abhängigkeit des Regeneriererfolges von den Eigenschaften des Brunnens.

## 7 Ausblick

Für zukünftige Arbeiten ergaben sich im Laufe des Projektes neue Anregungen und Fragestellungen. Hierzu zählen besonders:

1. der Einfluss der Art und der Zusammensetzung sowie des Alters typischer Verockerungserscheinungen in verschiedenen Brunnen auf den Erfolg der Regenerierung
2. die Abhängigkeit der Reinigungswirkung vom Leistungseintrag und Möglichkeiten zur Optimierung der Ultraschallgeber bzw. der Schallerzeugung im Brunnen.
3. die Untersuchung eines möglichen Einflusses einer Wasserströmung auf die Schallfeldverteilung bei gleichzeitiger Beschallung und Pumpbetrieb zum Abpumpen der gelösten Partikel
4. die mögliche Optimierung des Abpumpvorganges, um die gelösten Partikel vollständig aus dem Ringraum zu entfernen
5. die Ausweitung der Laborversuch auf neuartige, heute eingesetzte und verbreitete Filtermaterialien, wie Steinzeug- oder Wickeldrahtfilter

Die Konstruktion und Inbetriebnahme des Versuchsstandes URSEL an sich ist als ein Meilenstein zur Untersuchung des Einsatzes von Ultraschall zur Brunnenregenerierung zu werten. Die Möglichkeit der Simulation eines kompletten Brunnenbauwerkes inklusive des hydrostatischen Druckes kann als einmalig angesehen werden und bietet vielfältige Nutzungsmöglichkeiten.

Bei kritischer Betrachtung der Methodik des vorliegenden Projektes ergeben sich weitere Anhaltspunkte für sinnvolle Verbesserungsmöglichkeiten. Ein wichtiger Aspekt der Laborversuche war u.a. die Untersuchung verschiedener Arten von Brunnenbelägen. Gearbeitet wurde mit den drei wesentlichen Brunnenbelagserscheinungen – einer eisenhaltigen, einer manganhaltigen und einer biologisch induzierten Verockerung. Die Auswahl geeigneter Materialien stellte jedoch vor unerwartete Schwierigkeiten, da keines der angedachten Systeme die Brunnenbedingungen nachbilden konnte. Hier ergibt sich ein weites Betätigungsfeld zur Ermittlung geeigneter Verfahren, eine reale Brunnenverockerung im Versuchsstand URSEL zu simulieren.

Auch die Wahl geeigneter Messmethoden bietet Möglichkeiten der Versuchsoptimierung. Das Verfahren der Trübungsmessung zur Bestimmung der Reinigungswirkung ist aufgrund der hohen Fehleranfälligkeit durch das Probennahmesystem über Schläuche mit nur 2 mm Durchmesser und eine notwendige Verdünnung der Proben als nicht optimal anzusehen.

Ein besonders wichtiger Aspekt ist die Frage nach dem Einfluß der Belagsart und dem Aushärtungsgrad der Verockerung in realen Brunnen.

Wünschenswert ist generell eine engere Zusammenarbeit zwischen Brunnenbetreibern und den Regenerierfirmen sowie unbedingt eine bessere Aufbereitung der vorhandenen Brunnendaten zur Durchführung umfangreicher, wissenschaftlich begleiteter und gut dokumentierter Versuche zur Brunnenregenerierung mit Ultraschall.

## 8 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt und seine Inhalte wurden über die gesamte Projektlaufzeit der Öffentlichkeit und den Fachpublikum über diverse Medien und bei unterschiedlichen Gelegenheiten gemäß den Vorgaben der DBU präsentiert.

Bereits zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde eine Kurzdarstellung des Projektes, die immer wieder aktualisiert wurde, auf den Internetseiten des ESWE-Instituts und der Universität Mainz präsentiert. Daneben wurde das Forschungsprojekt bei einer Präsentation den Mitarbeitern des ESWE-Instituts, den interessierten Mitarbeitern der ESWE Versorgungs AG und Gästen des DVGW Fachausschusses Brunnenregenerierung und Wasserversorgung vorgestellt. Im November 2002 fand am ESWE-Institut in Wiesbaden ein Treffen von Anwendern der Ultraschallmethode statt, bei dem den Beteiligten das Vorhaben vorgestellt und die Inhalte konstruktiv diskutiert wurden. In der Fachzeitschrift bbr des Wasser- und Brunnenbaus wurde in der Ausgabe vom Januar 2003 darüber berichtet.

In der Gelnhausener Neuen Zeitung vom 20.02.01 und in der Zeitung der IHK-Hanau-Kinzigal, Heft 04/2001 ist jeweils ein kurzer Artikel erschienen, der das Projekt zum Inhalt hatte. Am 06. Dezember 2002 erschien im Anschluss an den zweiten Geländeeinsatz mit der Ultraschallmethode am Brunnen Mittelbuchen ein Artikel im Hanauer Anzeiger. Über den dritten Praxiseinsatz wurde im Ried-Teil des Groß-Gerauer Echos am 06.10.2003 berichtet.

Darüber hinaus wurde das Projekt auf mehreren nationalen und internationalen Fachtagungen präsentiert und ist als Kurzfassung im jeweiligen Tagungsband enthalten. Zu nennen sind hier:

- XXXI IAH Congress „New approaches characterizing groundwater flow“ vom 10.09. - 14.09.2001 in München
- Wasserfachliche Aussprache Tagung (WAT) am 19. und 20.02.2002 in Wiesbaden
- 2nd Symposium on „Ultrasound in Environmental Engineering“ am 21. und 22.03.2002 in Hamburg
- EGS XXVII General Assembly vom 21.04 – 26.04.2002 in Nizza
- Jahrestagung der Wasserchemischen Gesellschaft vom 06.05 – 08.05.2002 in Eichstätt
- Fachtagung der Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft (FH-DGG) „Grundwasserressourcen im Spannungsfeld zwischen Erschließung und Naturschutz“ vom 09-05 – 12.05.2002 in Greifswald
- 3. Brunnenbautage im Rahmen der „Wasser Berlin“ am 8. und 9. April 2003 in Berlin
- Jahrestagung des DVGW – TK „Wassergewinnung“ am 04. und 05. November 2003 in Cottbus

Eine Publikation erschien in der bbr, der Fachzeitschrift des Wasser- und Brunnenbaus im November 2002. Dieser Aufsatz enthält die Darstellung der Laboruntersuchungen und deren wesentliche Ergebnisse. Mit der Redaktion ist verabredet, dass nach Abschluss der Geländearbeiten ein Artikel zu den Praxisversuchen erscheinen soll. Dieser wird im Frühjahr 2004 publiziert.

Ergänzend wurde aus den Erfahrungen im Projektverlauf ein Artikel über die Qualitätssicherung und die Notwendigkeit einer sicheren Datengrundlage verfasst. Dieser erscheint in der bbr im Januar 2004.

Ein, im April 2003 erschienenes Fachbuch mit dem Titel „Regenerierung und Sanierung von Bohrbrunnen“ von HOUBEN & TRESKATIS enthält wesentliche Ergebnisse der Arbeiten des ESWE-Institutes zur Brunnenregenerierung mit Ultraschall (vgl. Houben & Treskatis (2003), Kap. 8.5, S. 196ff).

Der Projektabschluß erfolgt am 04.12.2003 in Form einer Fachveranstaltung mit der Präsentation der Ergebnisse und richtet sich an Brunnenbetreiber, Regenerierfirmen, Ingenieurbüros und die zuständigen Fachleute des DVGW.

## 9 Literaturverzeichnis

- ALLEN, G.J., FISHELL, K. A (1995): Aqueous cleaning and verification processes for precision cleaning of small parts.- Aerospace Environmental Technology Conference Proceedings, NASA Conference Publication 3298.
- BÄCHLE, A., MELZER, P. (1992): Mechanische Verfahren der Brunnenregenerierung.- 27. Wasserchemisches Seminar, Optimierung der Grundwassergewinnung über Filterbrunnen, Schriftenreihe des Instituts für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der TU Darmstadt, Band 65, Darmstadt.
- BERGER, H., DREWS, M., LUX, K.-N. (1995): Nachweis von Regeneriereffekten bei Brunnen der Stadtwerke Wiesbaden AG.- bbr- 1/1995; 8 S., 5 Abb., 4 Tab.; (R. Müller).
- BERGER, H., FRANK, H., NORMANN-SCHMIDT, S., PAUL, K. F. (1992): Brunnenregenerierung in Wiesbaden - Grundsätzliche Aspekte und neue Entwicklungen.- In: Stadtwerke Wiesbaden AG (Hrsg.): Brunnenregenerierung. Grundsätzliche Aspekte und neue Entwicklungen. - ESWE-Schriftenreihe, Bd. 4; 300 S.; Wiesbaden (ESWE): 79 - 300.
- BERLITZ, B., KÖGLER, H. (1997): Brunnenregenerierung mit Ultraschall.- bbr Wasser und Rohrbau 48, 2/1997: 19-23.
- BOTT, W., Wilken, R.-D. (2002): Erfahrungen zur Regenerierung von Brunnen mittels Ultraschall im halbtechnischen Maßstab. bbr 11/2002, S. 22 - 28.
- BRAUER, S. (2003): Modellversuche zur biologischen Brunnenalterung und Brunnenregenerierung mittels Ultraschall. 66S.Diplomarbeit an der Fachhochschule Wiesbaden (unveröffentlicht)
- DVGW (2001): Brunnenregenerierung.- DVGW-Merkblatt W 130; 28 S.; Bonn (Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH).
- ETSCHEL, C., SCHMIDT, M., (2001): Das Druckwellen-Impulsverfahren für die Regenerierung und Entwicklung von Brunnen.
- GERTHSEN, KNESER, VOGEL (1986): Physik.- 920 S., 1108 Abb., Berlin (Springer).
- HÄSSELBARTH, U., LÜDEMANN, D. (1967): Die biologische Verockerung von Brunnen durch Massenentwicklung von Eisen- und Manganbakterien. Bericht aus dem DVGW-Fachausschuss "Wasserfassung und Wasseranreicherung".- bbr Wasser und Rohrbau 18, H.10 und H.11.
- HEINRICH, G. (1974): Akustische und optische Messung der Kavitationsschwelle in Wasser.- Dissertation, 71 S., Göttingen (Universität, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät).
- HOUBEN, G., MERTEN, S., TRESKATIS, C (1999): Entstehung, Aufbau und Alterung von Brunneninkrustationen.- bbr Wasser und Rohrbau 50, 10/1999:29-35.
- HOUBEN, G., TRESKATIS, C (2003): Regenerierung und Sanierung von Bohrbrunnen. - 250 S., München (Oldenbourg Industrieverlag). S. 196ff.
- HUG, N. (1997): Brunnenregenerierung durch Ultraschall. Experimentelle Untersuchungen zu Wirkungsweise und Einflussfaktoren. Diplomarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz. 155 S. (unveröffentlicht)
- KLEIN, P. (2002): Experimentelle Untersuchung von Einflussfaktoren bei der Brunnenregenerierung mittels Ultraschall. 69 S. Diplomarbeit an der Fachhochschule Wiesbaden (unveröffentlicht)
- KREMS, G. (1979): Brunnenalterung und Brunnenregenerierung.- In: DVGW: Fortbildungskurse Wasserversorgungstechnik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Kurs 1: Wassergewinnung.- DVGW-Schriftenreihe Wasser, Bd. 201, 563 S., Eschborn (Eigenverlag).
- KURTZE, G. (1958): Über die Bedingungen für das Auftreten von Kavitation in Flüssigkeiten.- 47 S.; Nachr. Ak. d. Wiss. Göttingen 19, 1 (Vandenhoeck & Ruprecht).

- KUTTRUFF, H. (1988): Physik und Technik des Ultraschalls.- 415 S., 216 Abb., 14 Tab., Stuttgart (Hirzel).
- KUTZNER, J. (1983): Grundlagen der Ultraschallphysik.- 111 S., 50 Abb., Stuttgart (Teubner).
- LAUTERBORN, W. et al. (1974): DFG – Deutsche Forschungsgemeinschaft – Kavitation: Ein Abschlussbericht über Ergebnisse des Schwerpunktprogramms von 1966 –1972, H. Boldt Verlag.
- LOB, T. (2002): Partikulärer Schadstofftransport in der ungesättigten Bodenzone. Diplomarbeit an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz (unveröffentlicht)
- MEYER, E., NEUMANN, E.-G. (1979): Physikalische und technische Akustik: Eine Einführung mit zahlr. Versuchsbeschreibungen.- Braunschweig, Wiesbaden.
- PUTTERMAN, S. J (1995).: Sonoluminescence: sound into light. – Scientific American, S.32-37.
- NEIS, U. (2002): Ultrasound in environmental engineering II, TUHH Reports on sanitary engineering, 35, Hamburg.
- NORMANN-SCHMIDT, S. (1992): Brunnenregenerierung – Chemische Verfahren.- 27. Wasserchemisches Seminar, Optimierung der Grundwassergewinnung über Filterbrunnen, Schriftenreihe des Instituts für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der TU Darmstadt, Band 65, Darmstadt.
- PAUL, K. F. (1994a): Zusammenhänge zwischen Brunnenbau und den verschiedenen Arten der Brunnenalterung Teil 1.- bbr Wasser und Rohrbau 45, 6/1994; Köln (Müller); 26-37.
- PAUL, K. F. (1994b): Zusammenhänge zwischen Brunnenbau und den verschiedenen Arten der Brunnenalterung Teil 2.- bbr Wasser und Rohrbau 48, 7/1994; Köln (Müller); 18-25.
- POHLMANN, R (1960): Probleme der Ultraschallübertragung an Grenzflächen.-Acustica 10, 217-229.
- ROGALSKY, E. (1992): Untersuchungen zur Brunnenalterung - Analyse von Brunnenbelägen.- In: Stadtwerke Wiesbaden AG (Hrsg.): Brunnenregenerierung. Grundsätzliche Aspekte und neue Entwicklungen. - ESWE-Schriftenreihe, Bd. 4; 300 S.; Wiesbaden (ESWE): 7-21.
- SATA, N., WATANABE, S. (1935): Über den Einfluß von Ultraschallwellen auf die Kolloidlöslichkeit von Metallhydroxyden I.- Kolloid. Z. Bd. 73: 50-57.
- SATA, N., WATANABE, S. (1937): Über den Einfluß von Ultraschallwellen auf die Kolloidlöslichkeit von Metallhydroxyden II.- Kolloid. Z. Bd. 78: 277-284.
- SCHÄFER, T. (1998): Mobiler Feststofftransport bei der Uferfiltration und der künstlichen Grundwasseranreicherung – Laborversuche und Feldstudien. Dissertation an der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz. 143 S. Göttingen (Cuvillier).
- SCHWERTMANN, U., CORNELL, R.M. (1996): The Iron Oxides. Structure, Properties, Reactions, Occurrence and Use. Weinheim (VHC).
- SMOLIANSKIS, N. (2002): Brunnenreinigung durch Ultraschall: Experimentelle Untersuchungen des Ultraschallfeldes in einem Modell-Trinkwasserbrunnen.- Diplomarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (unveröffentlicht)
- STADTWERKE WIESBADEN AG (Hrsg.) (1992):Brunnenregenerierung. Grundsätzliche Aspekte und neue Entwicklungen. - ESWE-Schriftenreihe, Bd. 4; 300 S., Wiesbaden.
- SUSLICK, K. (1989): The chemical effects of ultrasound.- Scientific American 2/89, S. 62-68.
- ŠUTILOV, V.A. (1984): Physik des Ultraschalls: Grundlagen.- Wien, New York (Springer).
- THIEM, A., NEIS, U. (1999): Ultrasound in environmental engineering, TUHH Reports on sanitary engineering, 25, Hamburg.
- TRESKATIS, C., LEDA, HD (1998): Brunnenregenerierung – Anwendung mechanischer und chemischer Verfahren am Beispiel von Flach- und Tiefbrunnen am linken Niederrhein. bbr 9, 33 - 39.

WALTER, P. (2001): Kostenbetrachtungen und Kostenanalysen beim Brunnen.-bbr 5/2001, 20-27.

WIACEK, H. (2003): Brunnenregenerierung mittels Ultraschall – Validierung von Laborergebnissen im Praxiseinsatz.- Diplomarbeit an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz (unveröffentlicht)

WILKEN, R.-D. (2000): Zur Reinigung von Brunnen mit Ultraschall unter Druck.- bbr 1/2000, 32-36.

WILKEN, R.-D. & HUG, N. (1998): Lassen sich Brunnen mit Ultraschall regenerieren?- ESWE-Schriftenreihe, Bd.10: 62-65; Wiesbaden.

WILKEN, R.-D., BOTT, W. (2002):Well regeneration by powerful ultrasound.- In: Neis (ed.): Ultrasound in environmental engineering II, TUHH Reports on sanitary engineering, 35, 159-172, Hamburg.

## 10 Unterschrift

ESWE-Institut für Wasserforschung und Wassertechnologie

Kurfürstenstr. 6

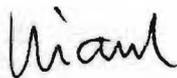
65203 Wiesbaden, den 14.11.2003



Prof. Dr. R.-D. Wilken  
(Geschäftsführer ESWE-Institut)



Dr. W. Bott  
(Projektleiter Ultraschall 05/01 – 07/03)



Dipl.-Geol. H. Wiacek  
(Projektleiterin Ultraschall seit 07/03)

## **11 Anhang**

- 11.1 Fotos der Versuchsanlage und der Messtechnik
- 11.2 Versuchs- bzw. Arbeitsablaufplan der Laborversuche
- 11.3 Darstellungen der Schalldruckwerte im Versuchsbrunnen
  - 11.3.1 Isoliniendiagramme (SMOLIANSKIS, 2002)
  - 11.3.2 Frequenzspektren (WIACEK, 2003)
- 11.4 Versuchs- bzw. Arbeitsablaufplan für den Praxiseinsatz
- 11.5 Fotos der Praxiseinsätze

Fotos der Versuchsanlage und der Messtechnik



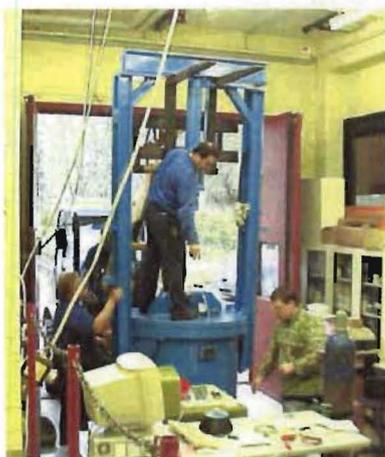
Anlieferung 1



Anlieferung 2



Anlieferung 3



Zusammenbau 1



Zusammenbau 2



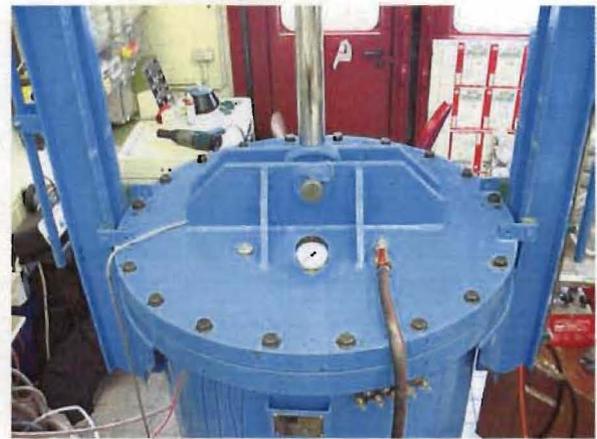
Kühlkreis am Kesselboden



Innenansicht URSEL: 4 Quadranten, Brunnenfilterrohr zweigeteilt (PVC-Schlitzfilter & Stahl-Schlitzbrückenfilter)



Ultraschallgeber (hinten Öffnungen für Probenahme Trübungsmessung)



fertige Anlage geschlossen mit Sicherheitsschrauben, Manometer und Ablaufschlauch oben



Innenleben URSEL mit Kiesfüllung, Hydrophonen und Probennahmeschläuchen



fertige Anlage URSEL bei geöffnetem Deckel, in der Mitte der Ultraschallgeber  
außen sind Durchführungen für Hydrophone, Thermometer und Probennahmeschläuche zu  
erkennen



Generatoren für Ultraschalleinheiten



Generatoren für Ultraschalleinheiten und Hydrauliksteuerung



FFT-Analysator zur Aufzeichnung und Auswertung der Schallfelduntersuchungen



Trübungsmessgerät mit Küvette und Probenbehältern

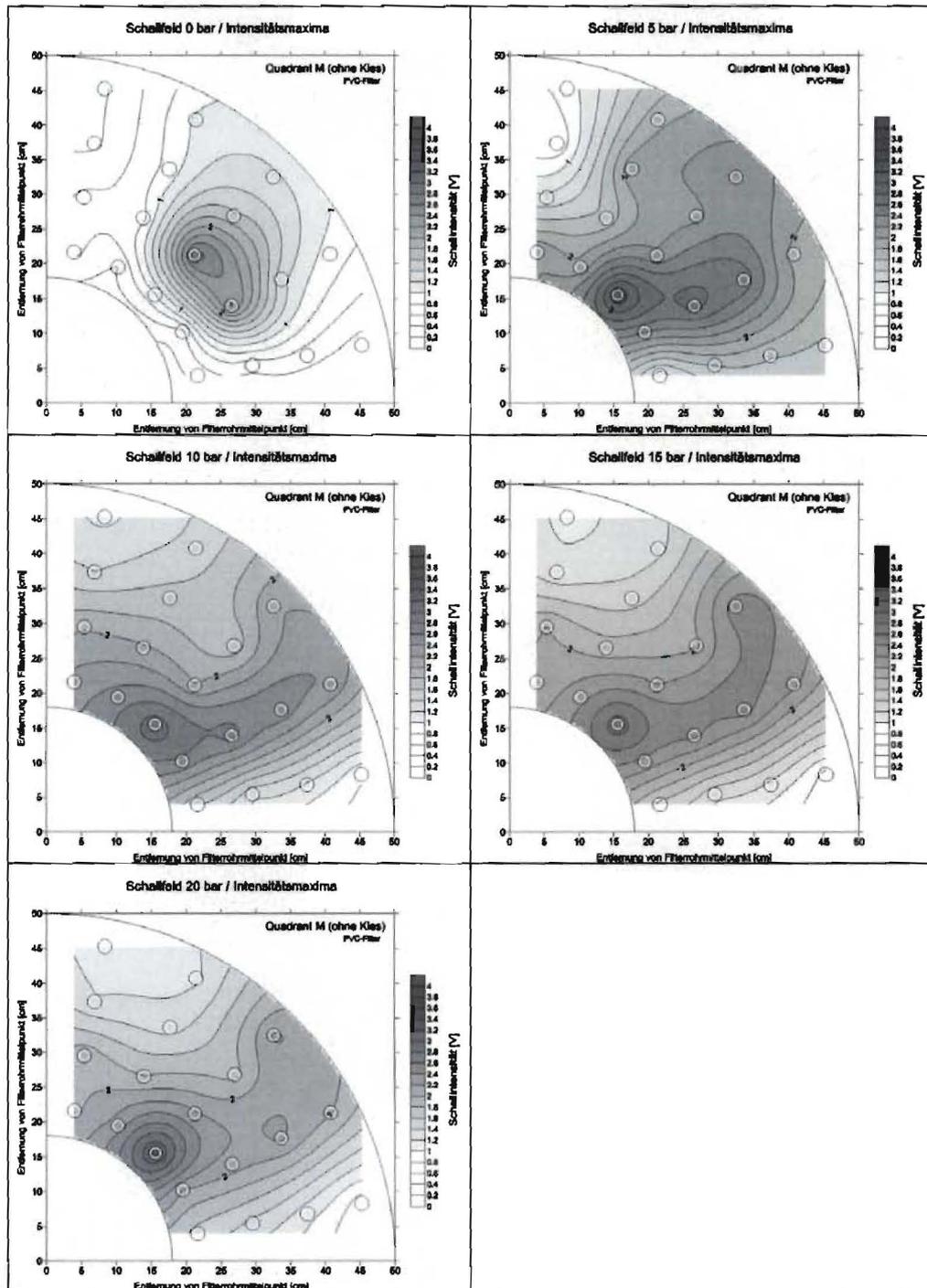
## Versuchsplan der Laborversuche

Art des Versuches	Ausbau	Druck [bar] (Schritte)	Bemerkungen
Schallfeldmessungen im gesamten Ringraum	PVC, Stahl ohne Kies	0 - 20 (5 bar)	
Schallfeldmessungen im gesamten Ringraum	PVC, Stahl Feinkies, Grobkies	0 - 20 (5 bar)	
Schallfeldmessungen Hauptgerade	PVC, Stahl, OBO Feinkies, Grobkies	0 - 2 (0,5 bar) 2 - 6 (1 bar) 5 - 20 (5 bar)	
Trübmessungen Hauptgerade	Stahl Feinkies	5, 10	Vorversuche zur Ermittlung geeigneter Modellsubstanzen
Trübmessungen Hauptgerade	PVC, Stahl, OBO	5	Eisen- und Manganmaterial
Bestimmung von Fließgrenzen simulierter Biofilme			Ermittlung der plastischen und strukturviskosen Eigenschaften der Modellsubstanz Agar
Durchflußmessungen mit der Modellsubstanz	PVC, Stahl, OBO	1, 5	
Säulenversuch zur biologischen Verockerung			erreicht wurde nur ein Anfangsstadium biol. Verockerung

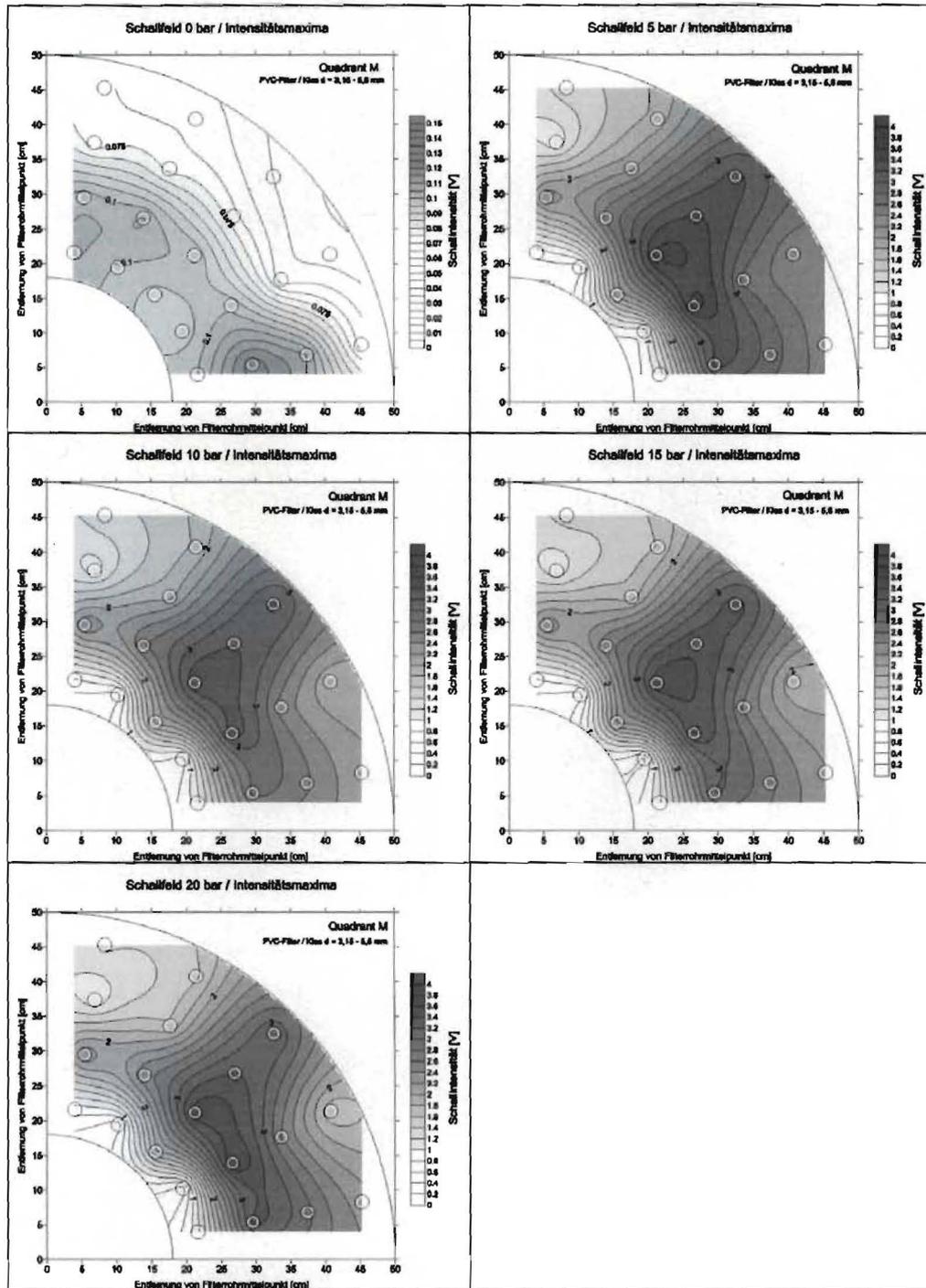
## Ergebnisse der Schallfeldmessungen

Isoliniendarstellungen

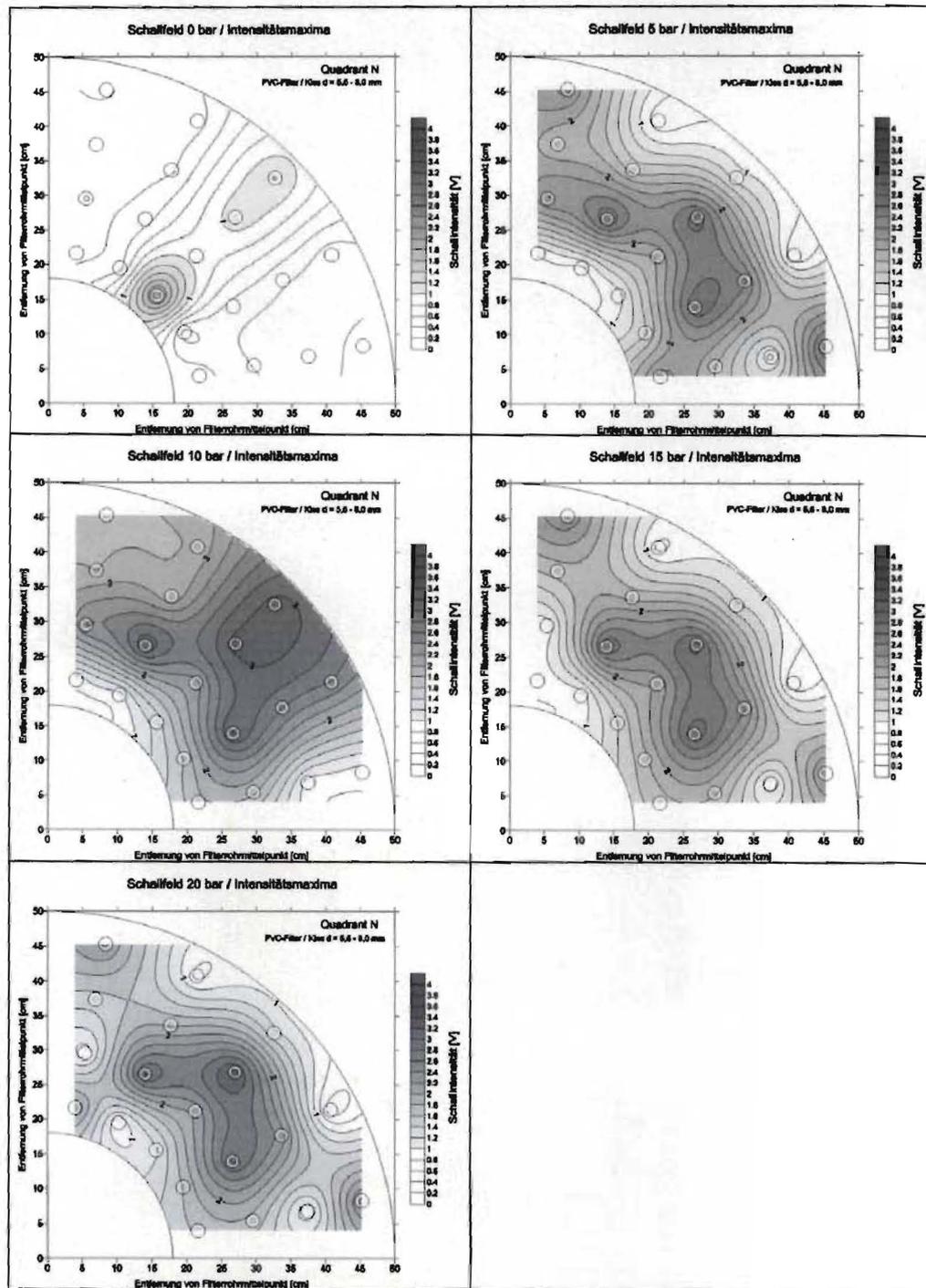
PVC-Filter, ohne Kies



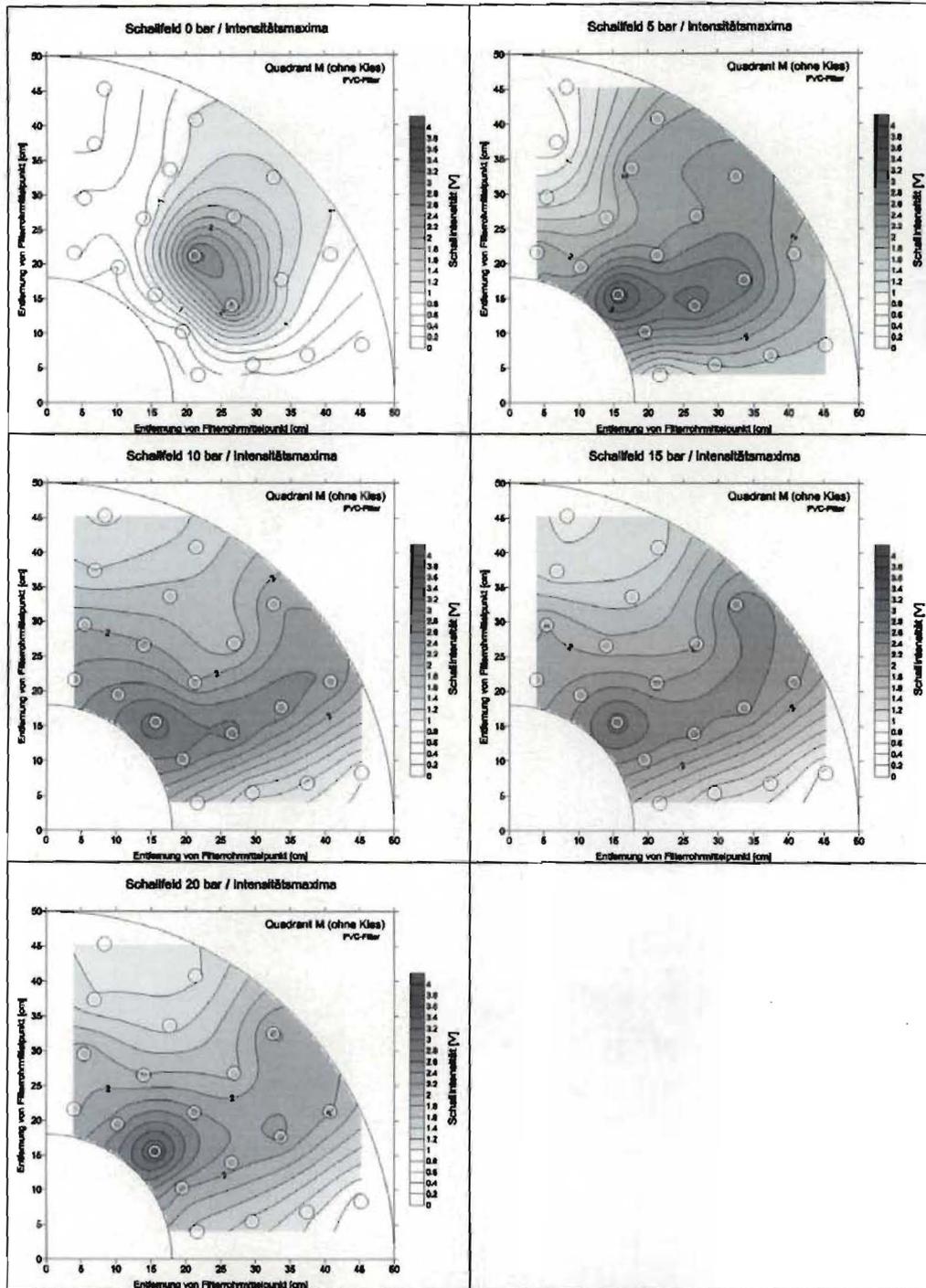
PVC-Filter, Feinkies (3,15 – 5,6 mm)



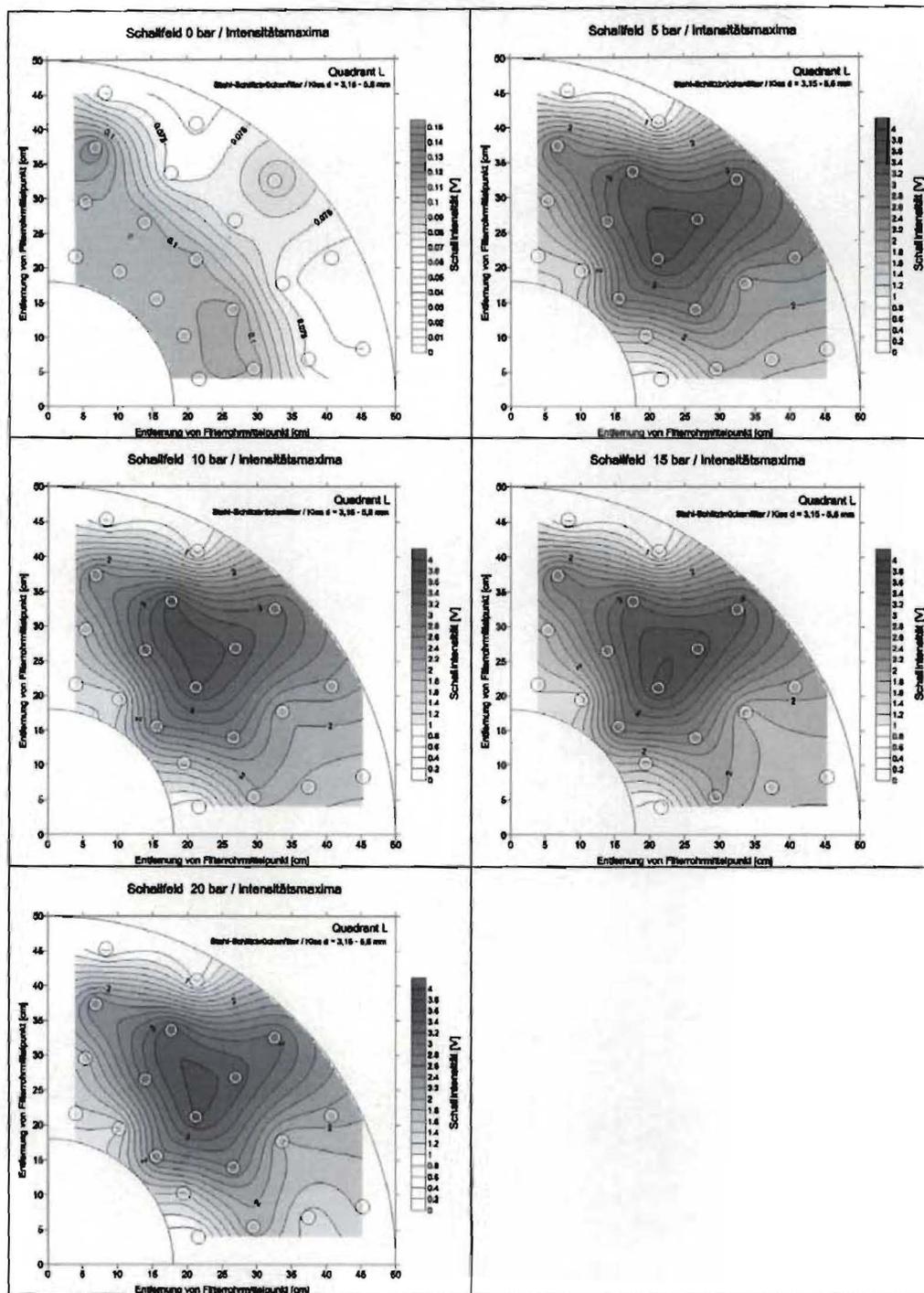
PVC-Filter, Grobkies (5,6 – 8,0 mm)



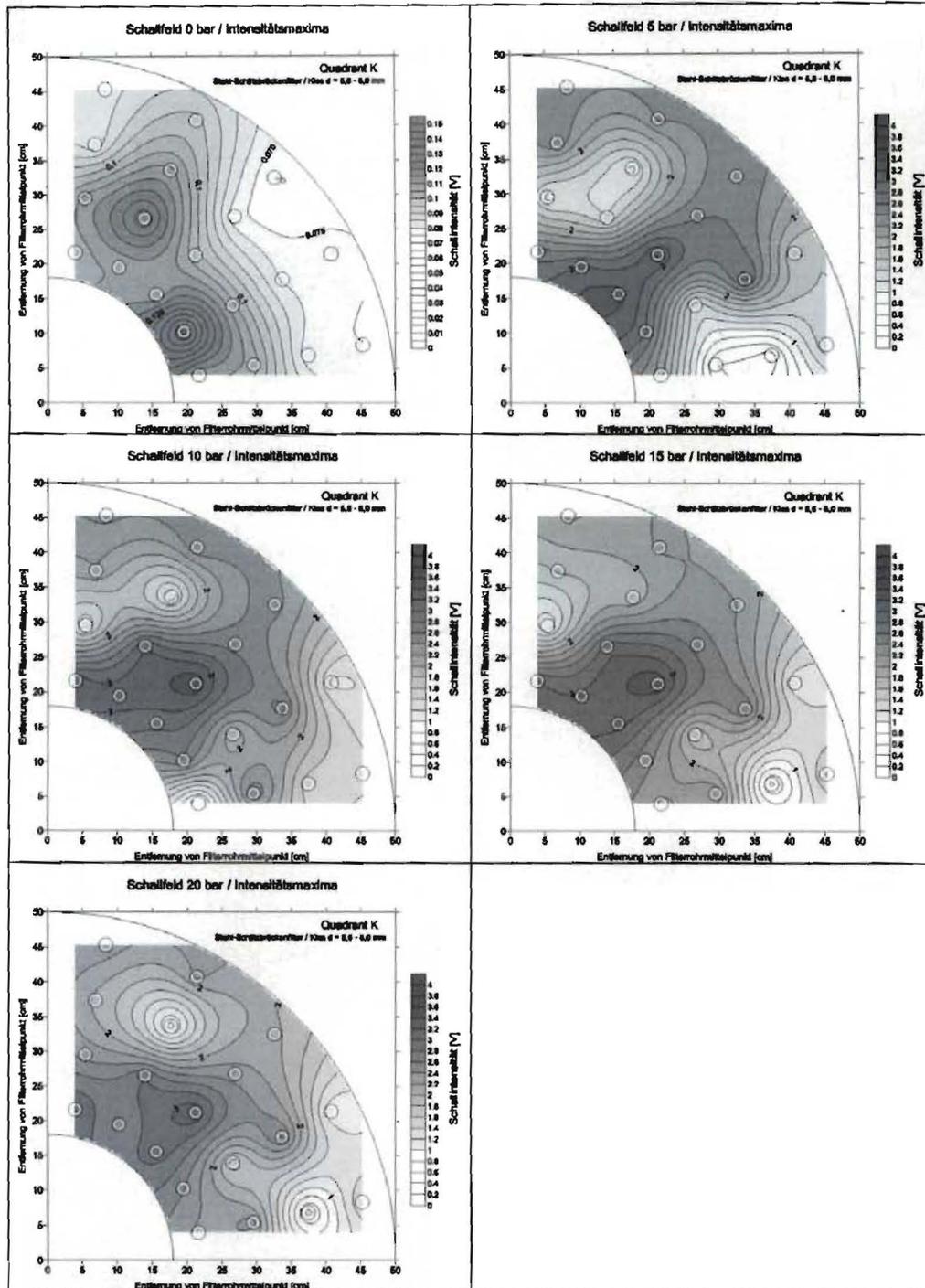
Stahlschlitzbrückenfilter, ohne Kies



Stahlschlitzbrückenfilter, Feinkies

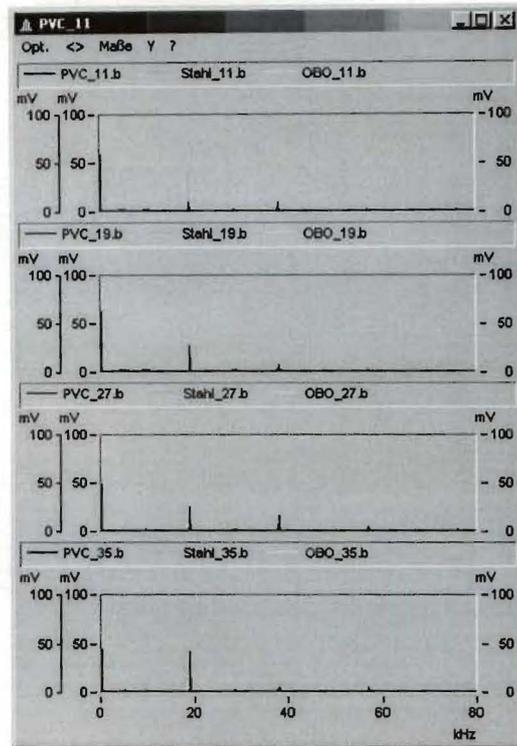
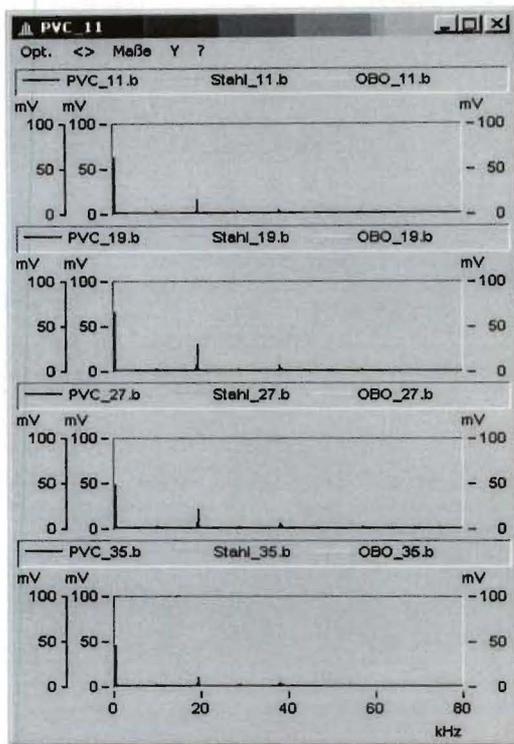


Stahlschlitzbrückenfilter, Grobkies



Frequenzspektren

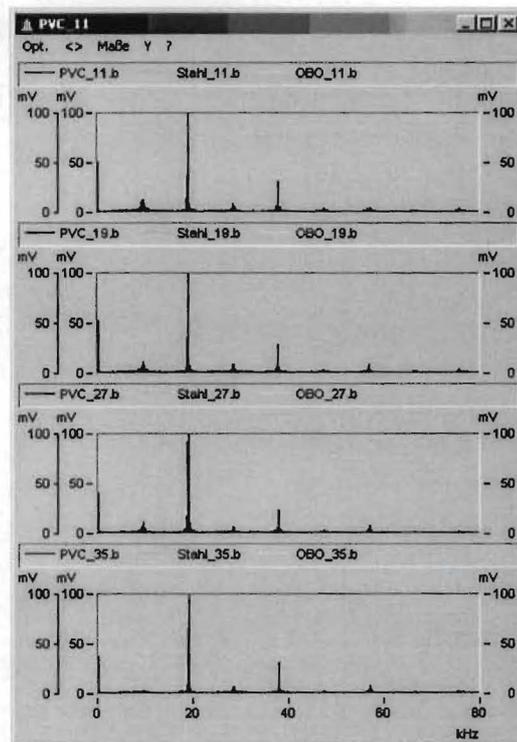
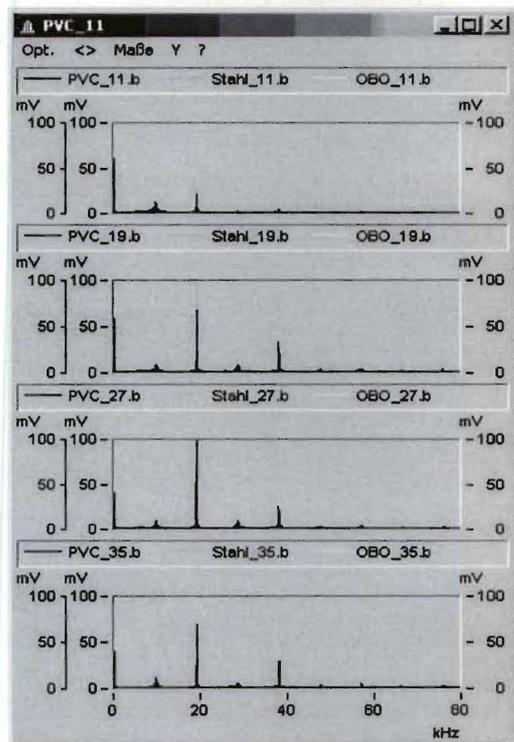
0 bar



Feinkies

Grobkies

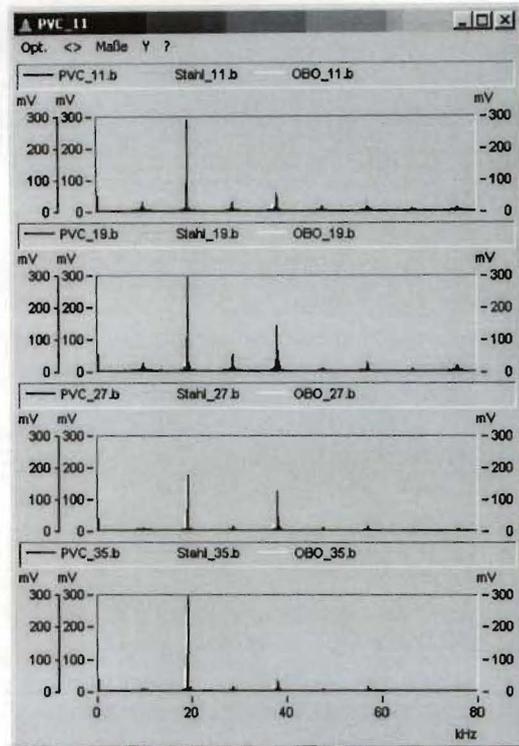
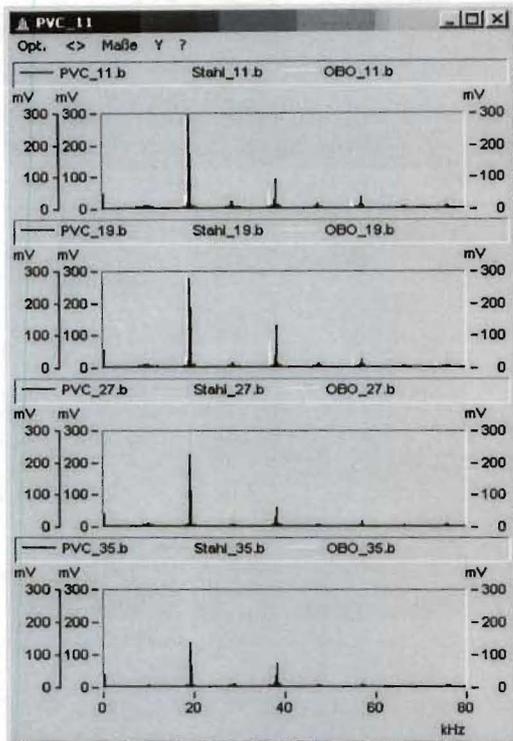
0,5 bar



Feinkies

Grobkies

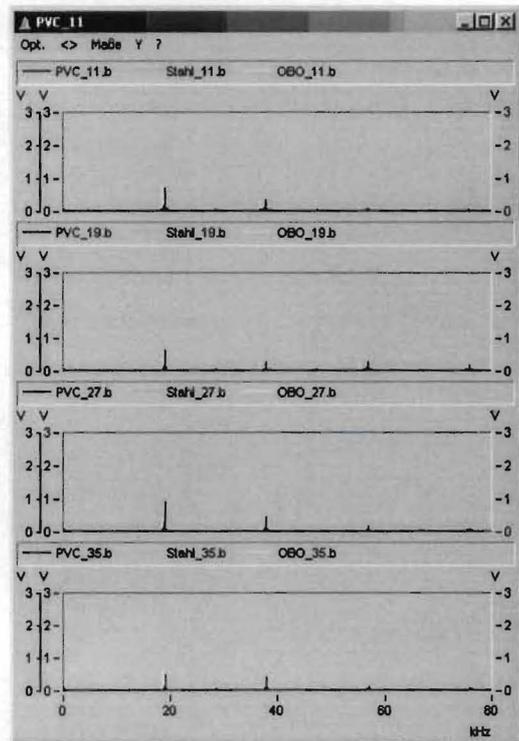
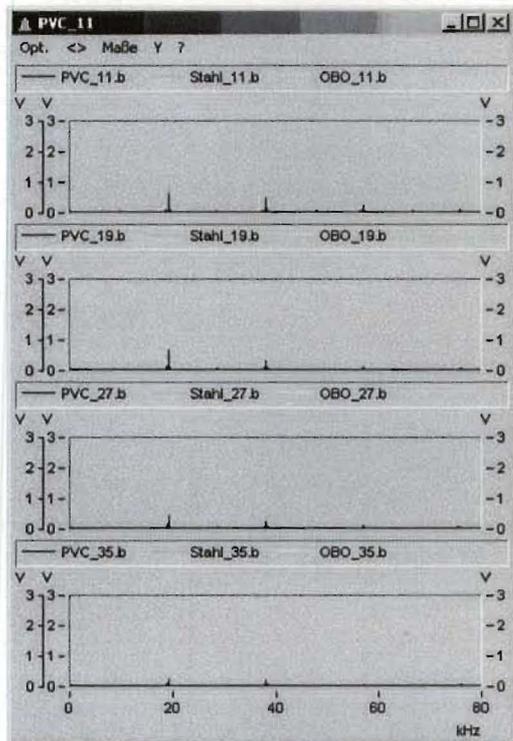
1 bar



Feinkies

Grobkies

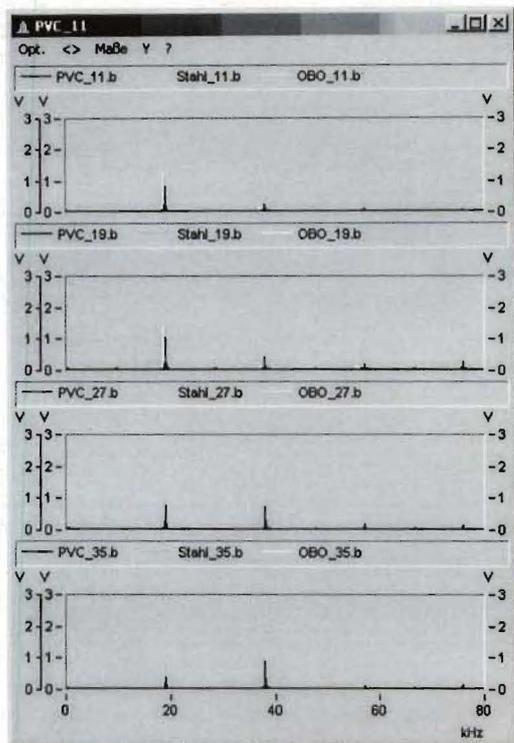
1,5 bar



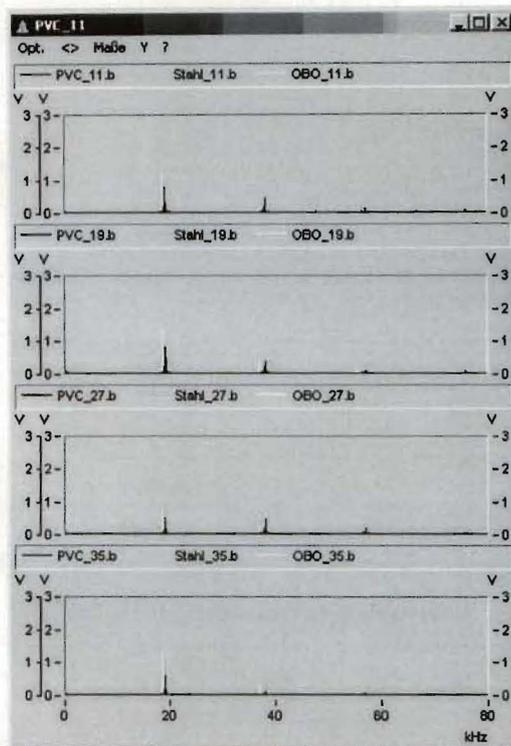
Feinkies

Grobkies

2 bar

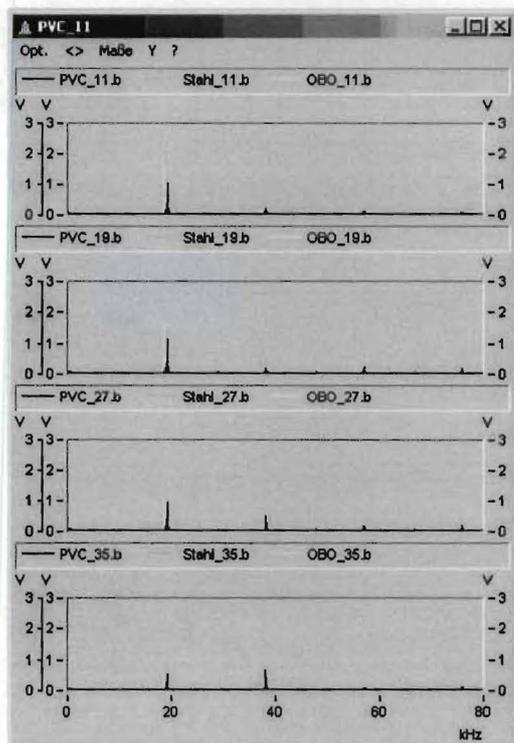


Feinkies

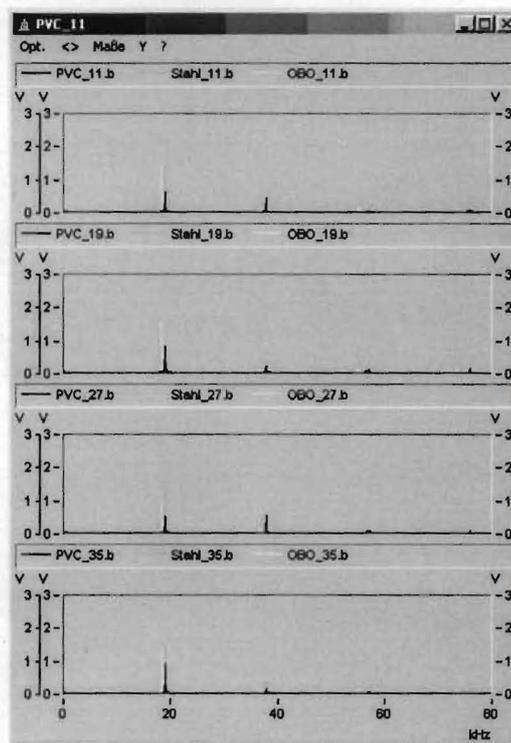


Grobkies

3 bar

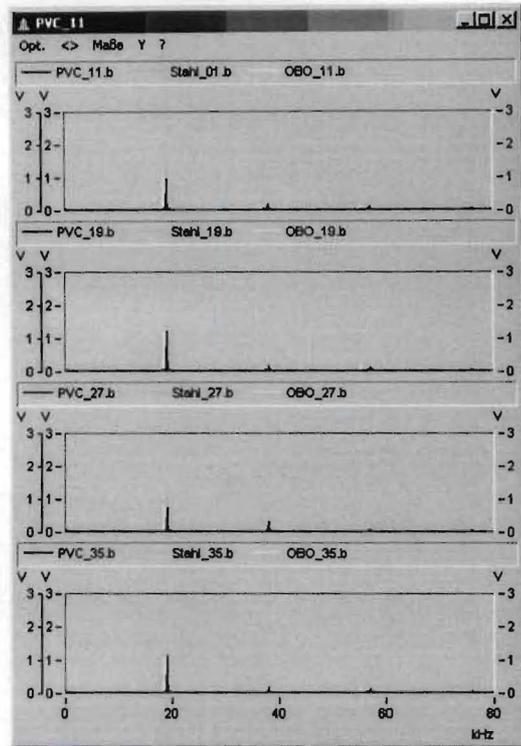
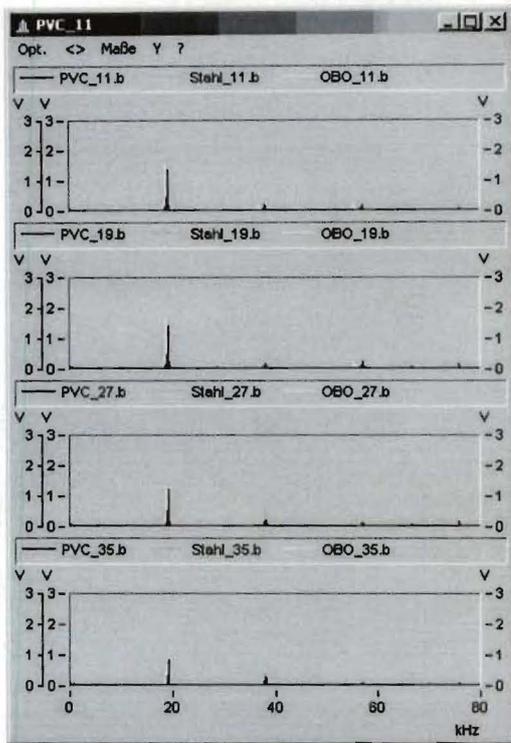


Feinkies



Grobkies

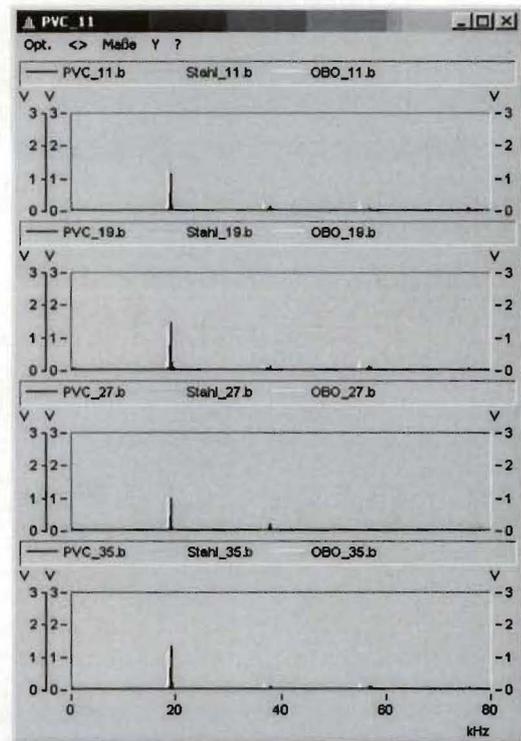
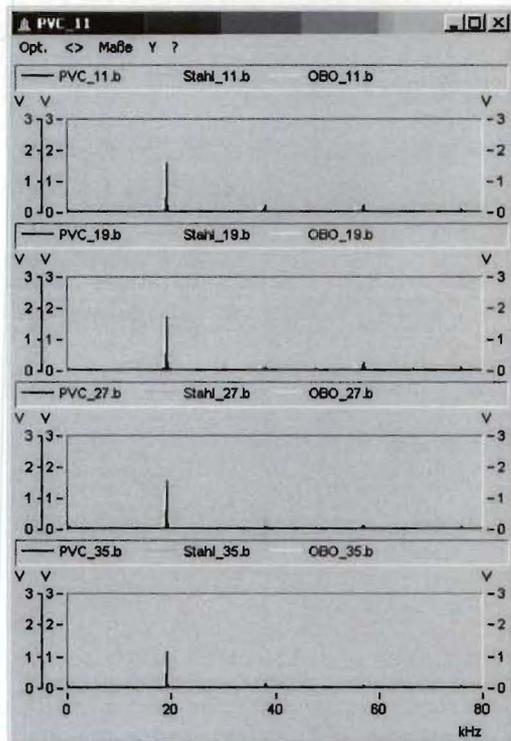
4 bar



Feinkies

Grobkies

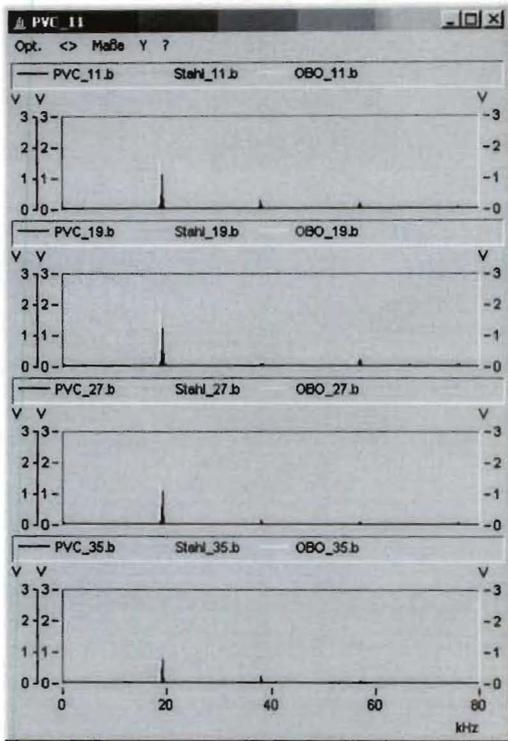
5 bar



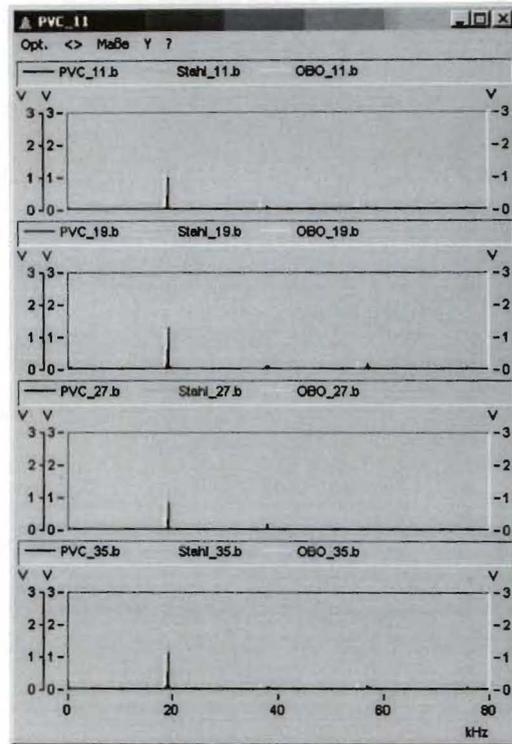
Feinkies

Grobkies

6 bar

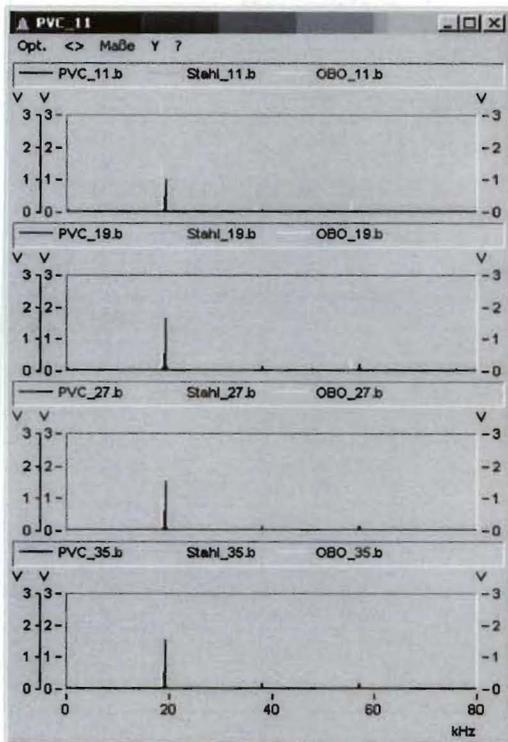


Feinkies

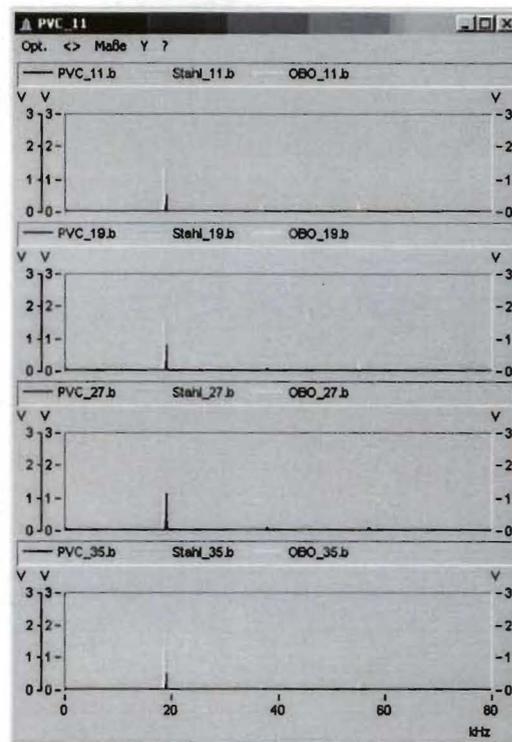


Grobkies

10 bar

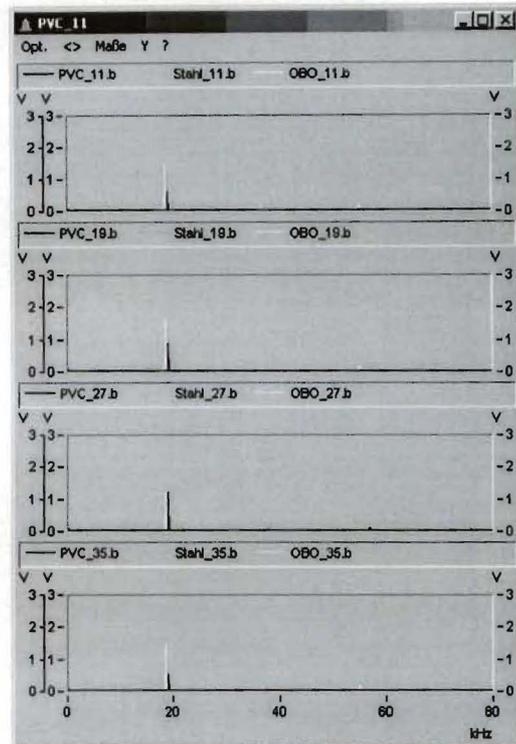
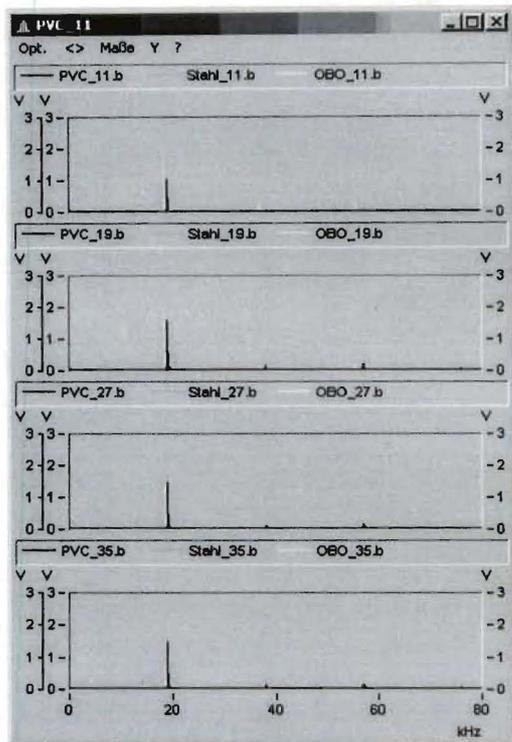


Feinkies



Grobkies

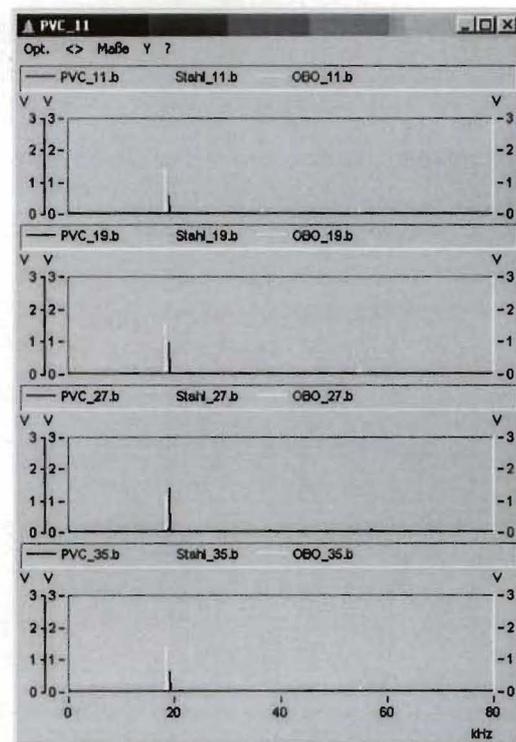
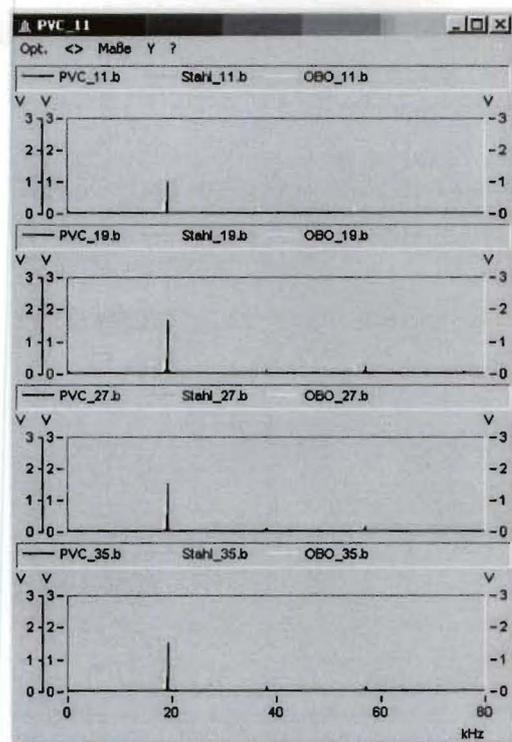
15 bar



Feinkies

Grobkies

20 bar



Feinkies

Grobkies

**Versuchs- / Arbeitsablauf für Praxiseinsatz Ultraschall je Brunnen:****1 Vorarbeiten**

- 1.1 Vorrichten, Antransporte Gerätschaften und Personal
- 1.2 Baustelleneinrichtung, Aufbau der Versuchsanlage
- 1.3 Ausbau der Unterwasserpumpe aus den Brunnen

**2 Messreihe 1**

- 2.1 Leistungstest / Pumpversuch über 12 Std.
- 2.2 TV-Befahrung, optische Feststellung des Ist-Zustandes
- 2.3 Geophysikalische Messungen 1

**3 Mechanische Vorreinigung**

- 3.1 Innenreinigung der Rohrwandung mit Kunststoffrundbürsten
- 3.2 Reinigung des Brunnensumpfes
- 3.3 Abpumpen der gelösten Feststoffe und Messung der Trübung, AFS-Gehalt und elektr. Leitfähigkeit

**4 Messreihe 2**

- 4.1 Leistungstest/Pumpversuch über 12 Std.
- 4.2 TV-Befahrung, optische Feststellung des Zustandes nach der Vorreinigung
- 4.3 Geophysikalische Messungen 2

**5 Regenerierung mit Ultraschall**

- 5.1 Regenerierung der Filterstrecke(n) in m-Abschnitten. Abpumpen der gelösten Feststoffe und Probennahme zur Messung der Trübung, AFS-Gehalt und elektr. Leitfähigkeit

**6 Messreihe 3**

- 6.1 Leistungstest/Pumpversuch über 12 Std.
- 6.2 TV-Befahrung, optische Feststellung des Zustandes nach der Ultraschallregenerierung
- 6.3 Geophysikalische Messungen 3

**7 Abschlussarbeiten**

- 7.1 betriebsfertiger Einbau der Unterwasserpumpe

**8 Auswertung und Vergleich der Messergebnisse**

## Die ausgewählten Brunnen

### Brunnen 1

**Ausbau:** **Bohrendurchmesser DN 1000**  
 Verrohrung: Hagusta DN 400 mit Kiesbelag  
 Einschub PVC DN 300 weitgehend ohne Kieshinterfüllung

Geologie: Sand-Ton-Wechsellagerung über Rotliegend

Tiefe: 41 m uGOK

Filter: 9,00 – 14,00  
 (laut Geophysik) 19,00 – 24,00  
 31,00 – 39,00 m uGOK gesamt: 18 m

Auszug aus der  
 Wasseranalyse:

Calcium	81,4 mg/l
Magnesium	17,8 mg/l
Eisen, gesamt	0,26 mg/l
Mangan	0,08 mg/l

Leistungsangaben  
 des Betreibers:

Ist-Zustand:	15 – 18 m <sup>3</sup> /h bei ca 4,60 m Absenkungsbetrag
nach Ultraschall:	keine nennenswerte Verbesserung

Auszug aus den  
 Ergebnissen:

	<u>Ist-Zustand</u>	<u>nach mech. Vorreinigung</u>	<u>nach Ultraschall</u>
--	--------------------	--------------------------------	-------------------------

Brunnen-TV



Spez. Ergiebigkeit (aus Pumpversuchen)	3,48	3,50	3,64 m <sup>3</sup> /h*h
Filterdurchlässigkeit	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
Effektive Filterlänge	5,7 (31,7 %)	7,7 (42,8 %)	10,0 (55,5 %)

Brunnen 2

**Ausbau:** Bohrenddurchmesser 670 mm (abgestufte Bohrung)  
 Verrohrung: Stahl-Rilsan DN 300  
 Filterkies 3,0 – 6,0 mm

Geologie: Ton, sandig über Basalt, z.T. verwittert, mit einzelnen Tonlagen

Tiefe: 43 m uGOK

Filter: 21,00 – 33,00

(laut Geophysik) 37,00 – 41,00 m uGOK gesamt: 16 m

Auszug aus der  
 Wasseranalyse:

Calcium	108,2 mg/l
Magnesium	43,6 mg/l
Eisen, gesamt	0,11 mg/l
Mangan	0,41 mg/l

## Leistungsangaben

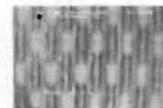
des Betreibers: Ist-Zustand: Rückgang von 12 m<sup>3</sup>/h auf 6 m<sup>3</sup>/h bei Absenkung auf ~20 m uGOK

nach Ultraschall: 6 m<sup>3</sup>/h bei Absenkung auf ~14 m uGOK  
 9 m<sup>3</sup>/h bei Absenkung auf ~ 20 m uGOK

## Auszug aus den

Ergebnissen: Ist-Zustand nach mech. Vorreinigung nach Ultraschall

Brunnen-TV



Spez. Ergiebigkeit (aus Pumpversuchen)	0,43	0,44	0,47 m <sup>3</sup> /h*h
Filterdurchlässigkeit	1,21 x 10 <sup>-4</sup>	1,25 x 10 <sup>-4</sup>	1,35 x 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s
Effektive Filterlänge	56,4 (40 %)	7,4 (46 %)	10,8 (68 %)

Brunnen 3

<b>Ausbau:</b>	<b>Bohrenddurchmesser DN 1000</b>		
	Verrohrung: Stahl-Poly. DN 400		
	Filterkies abgestuft 5,0 – 8,0 / 1,0 – 2,0 mm		
Geologie:	Sande und Kiese (pleistozäne Rheinterrasse)		
Tiefe:	107,00 m uGOK		
Filter:	50,00 – 67,50		
(laut Geophysik)	82,50 – 105,00 m uGOK	gesamt: 40 m	
Auszug aus der Wasseranalyse:	Calcium	137,0 mg/l	
	Magnesium	24,7 mg/l	
	Eisen, gesamt	2,61 mg/l	
	Mangan	0,25 mg/l	
Leistungsangaben des Betreibers:	Ist-Zustand:	bei konstant 200 m <sup>3</sup> /h Absenkung auf 14,44 m	
	nach Ultraschall:	bei konstant 200 m <sup>3</sup> /h Absenkung auf 14,04 m	
Auszug aus den Ergebnissen:	<u>Ist-Zustand</u>	<u>nach mech. Vorreinigung</u>	<u>nach Ultraschall</u>
Brunnen-TV			
Spez. Ergiebigkeit (aus Pumpversuchen)	16,74	16,91	18,61 m <sup>3</sup> /h*h
Filterdurchlässigkeit	4,43 x 10 <sup>-3</sup>	4,32 x 10 <sup>-3</sup>	4,20 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s
Effektive Filterlänge	13 (33 %)	18,7 (47 %)	15,9 (40 %)

### Fotodokumentation der Praxisanwendungen



Ultraschallanlage am 1. Brunnen



Betriebspumpe, 1. Brunnen – stark verockert



Kamerabefahrung, 1. Brunnen



Brunnen-TV, Fahrzeug der Fa. BRM im Einsatz



Geophysikalische Brunnenuntersuchung



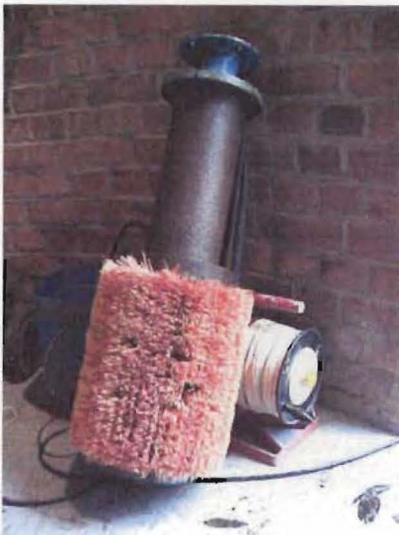
Packer-Flowmeter



Geo-Messwagen der Fa. BLM im Einsatz



Einsatz des Autokranes, 1. Brunnen



mechanische Vorreinigung, 1. Brunnen



abgepumptes Wasser nach mechanischer Vorreinigung



Ultraschallanlage in Betrieb, 1. Brunnen



Ultraschallsonde im Brunnenrohr



Außenansicht 2. Brunnen



Betriebspumpe 2. Brunnen



Geophysik, Bezugswert NULL am Brunnenkopf



Ultraschallsonde fertig zum Einsatz



abgepumptes Wasser mit durch die Beschallung gelösten Trübestoffen



Außenansicht 3. Brunnen



Blick ins Brunnenrohr, 3. Brunnen



Betriebspumpe 3. Brunnen nach Ausbau



Durchführung des Kurzpumpversuches



Ultraschallanlage, Einsatz am 3. Brunnen



abgepumptes Wasser mit Trübstoffen