

# Schule für Astroteilchenphysik

Obertrubach - Bärnfels  
6. – 15. Oktober 2004

## Thermoakustische Detektion ultrahochenergetischer Neutrinos

Prinzip und Ergebnisse von Testmessungen in Wasser



Kay Graf  
Universität  
Erlangen-Nürnberg  
Physikalisches Institut I



bmb+f - Förderschwerpunkt  
**ANTARES**  
Großgeräte der physikalischen  
Grundlagenforschung

# Warum akustische Neutrinodetektion?

Fluss kosmischer Neutrinos nimmt mit etwa  $E^{-2} - E^{-3}$  ab

⇒ **größere Detektorvolumina für höhere Energien**

optische Detektion:

$$I(r) \propto e^{-r/\lambda},$$

Abschwächlänge  $\lambda = \mathcal{O}[10 \text{ m}]$



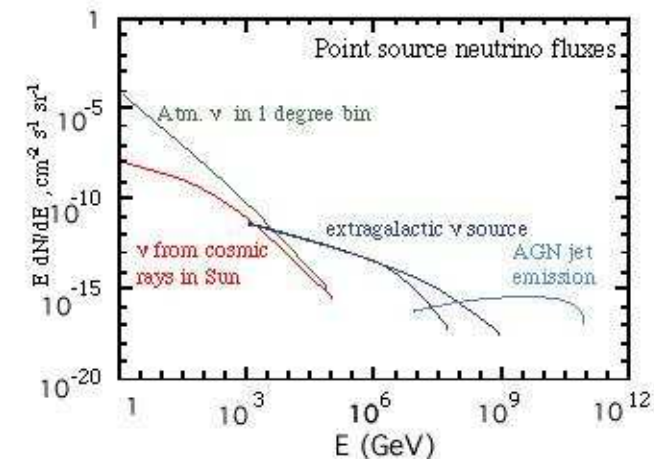
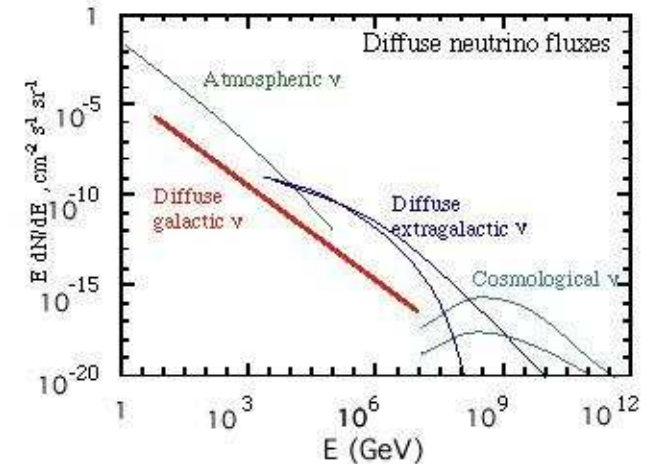
Abstand optischer Module

z.B. AMANDA, ANTARES	$\lesssim 0.01 \text{ km}^3$
	$\approx 1\,000 \text{ OM}$
z.B. ICECUBE, KM3NeT	$\approx 1 \text{ km}^3$
	$\approx 5\,000 \text{ OM}$
eher nicht	$\gtrsim 10 \text{ km}^3$
	$\approx 50\,000 \text{ OM}$

⇒ **andere Strategien nötig:  
Radiowellen, Schallwellen**

## Fluss kosmischer Neutrinos

von: <http://aether.lbl.gov/www/projects/neutrino/>



# Thermoakustisches Modell

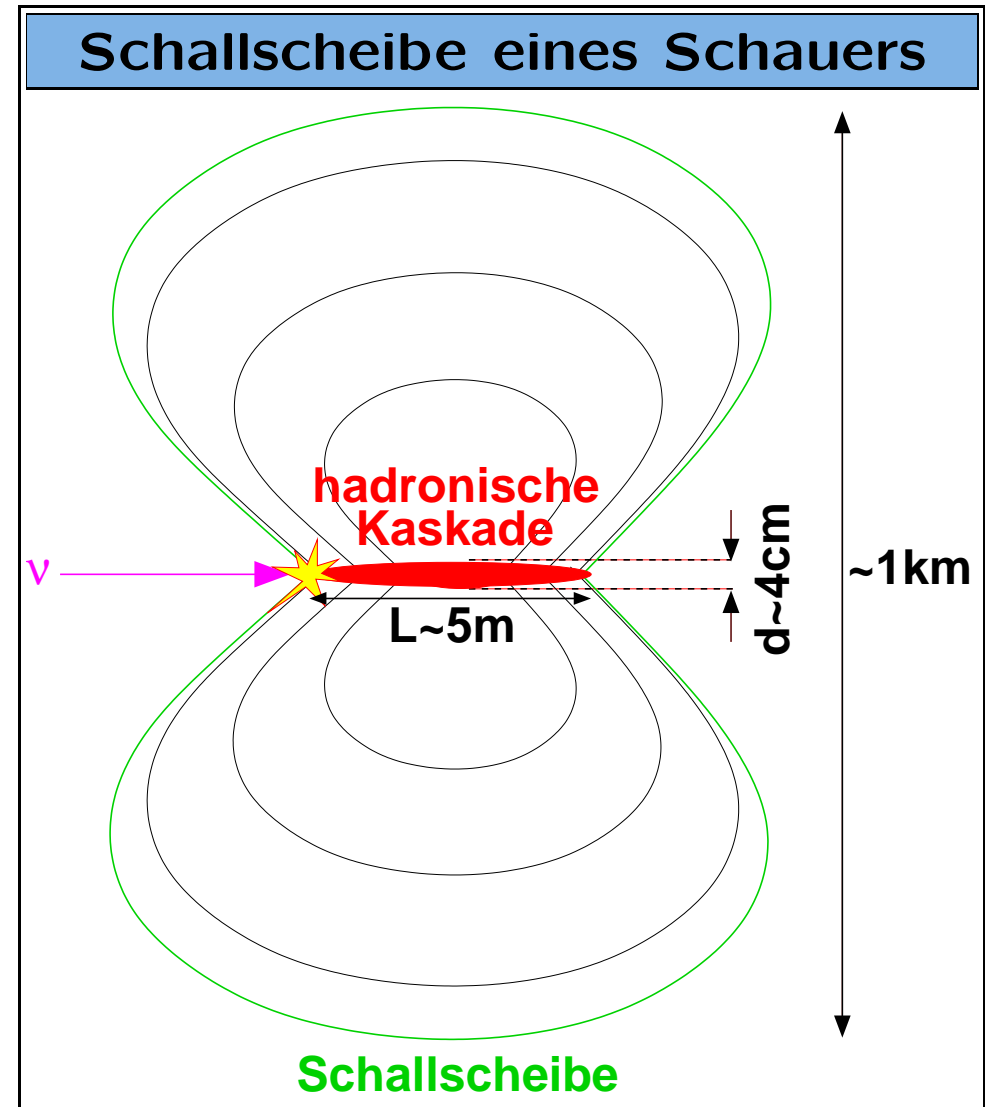
nach G. A. Askariyan et al., 1979

## Erzeugung von Schallsignalen durch geladene Teilchen

- WW des  $\nu$  mit Wassermolekül
- hadronischer/em Schauer
- Energiedeposition entlang des Schauers (instantan)
- Wasser erwärmt sich und dehnt sich aus
- Energiedissipation hydrodynamisch (nicht thermisch)

⇒ **akustisches Signal mit bipolarer Form**

- Ausbreitung scheibenförmig
- $A(r) \propto \frac{1}{\sqrt{r}}, \frac{1}{r}$  ( $\lambda = \mathcal{O}[100 \text{ m}]$ )



# Thermoakustisches Modell II

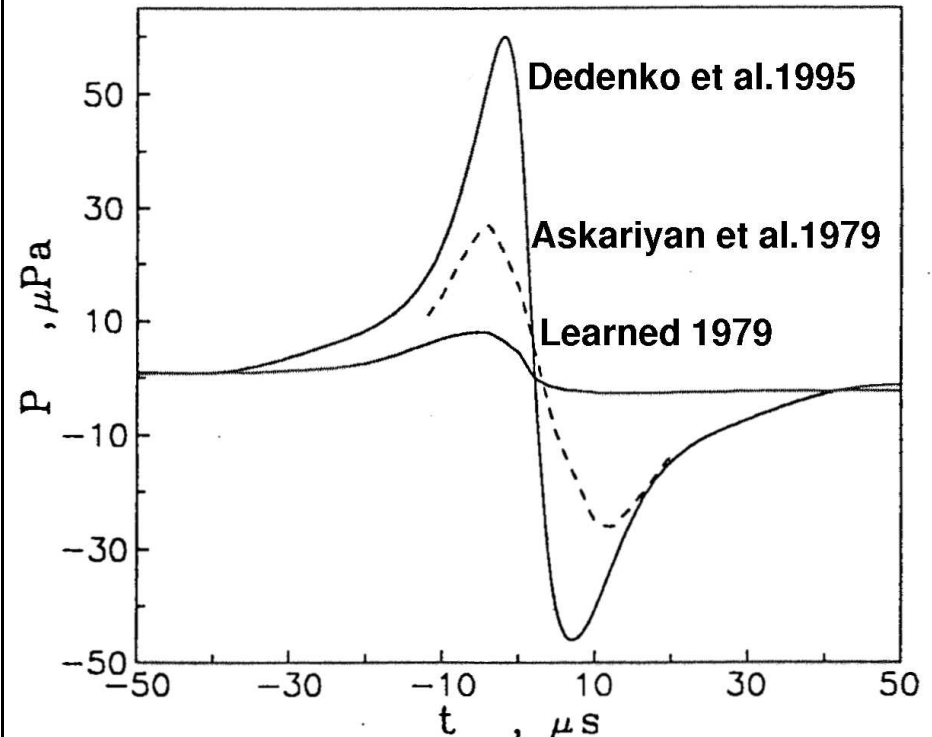
## Wellengleichung:

$$\Delta P(\vec{r}, t) - \frac{1}{c_s^2} \cdot \frac{\partial^2 P(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = \underbrace{-\frac{\alpha}{C_p} \cdot \frac{\partial^2 \epsilon(\vec{r}, t)}{\partial t^2}}_{\text{Inhomogenität:}}$$

Inhomogenität:  
Thermische Ausdehnung  
durch deponierte Energie

- $\epsilon(\vec{r}, t)$ : Energiedepositionsdichte, hängt ab von Schauer-Parametern
- $c_s$ : Schallgeschwindigkeit, hängt ab von Temperatur, etc.
- $\alpha, C_p$ : Wärmeausdehnungskoeffizient und Wärmekapazität, hängt ab von Temperatur, etc.

## Thermoakustisches Schallsignal



- 10 PeV-Schauer,  $\Delta T \approx 1$  nK
- 400 m Entfernung
- Dauer: ca. 100  $\mu$ s, Hauptfrequenz: ca. 20 kHz, Amplitude:  $\mathcal{O}[100 \mu\text{Pa}]$

# Überprüfung des Modells im Labor

## zur Verfügung:

- Wasserbecken ( $150 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$ )
- Hydrophone (Wassermikrophone  
→ C. Salomon, C. Naumann)
- DAQ-System

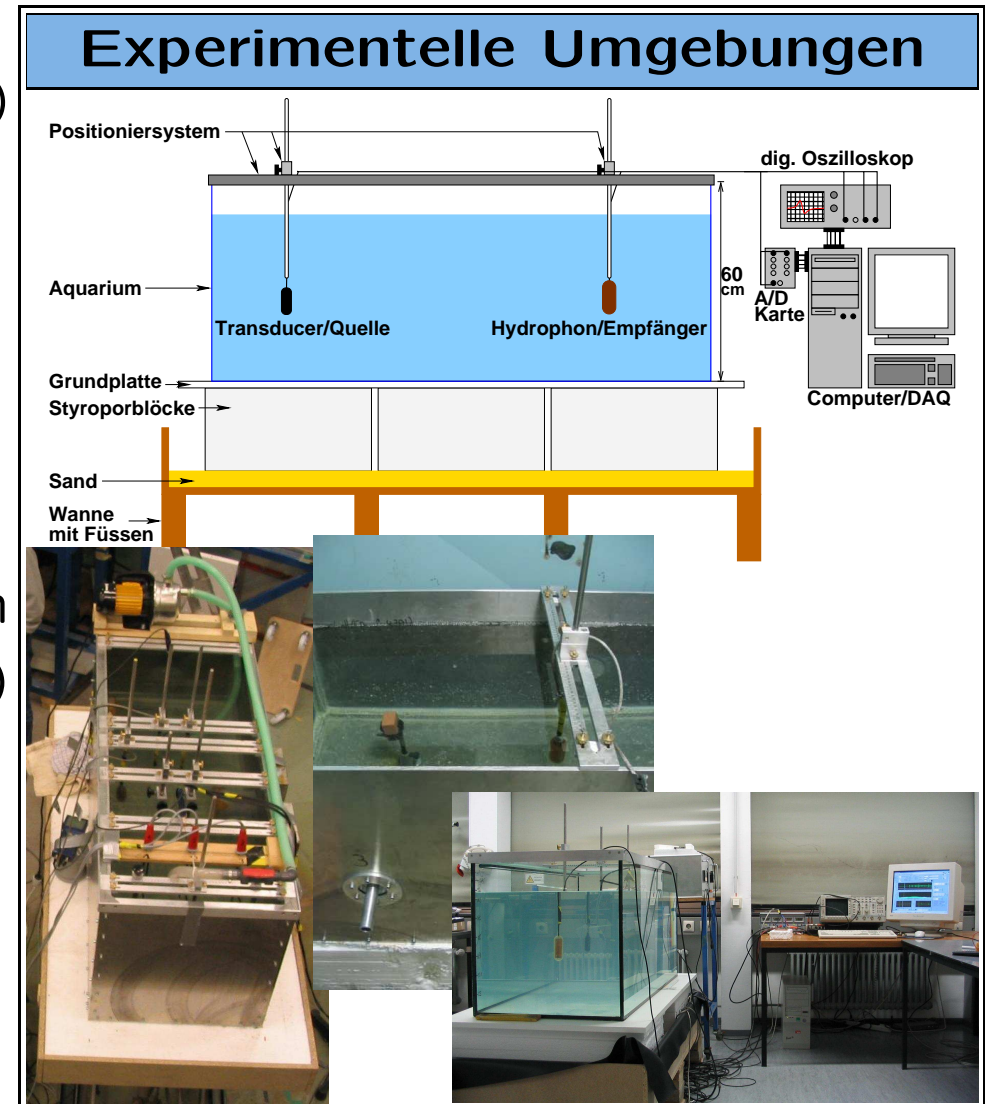
## benötigte Deposition

## von Energie:

- $\mathcal{O}[1 \text{ J bzw. } 10^{19} \text{ eV}]$
- lokal beschränkt, in Zylinderform
- in kurzem Zeitintervall ( $\lesssim 0.1 \text{ ms}$ )
- möglichst nah am Schauer-Mechanismus (em/hadronisch)

## Lösung:

- Protonenstrahl
- gepulster Laser



# Überblick: Protonenstrahlexperiment

am 'Theodor-Svedberg-Laboratory' (Uppsala, S)

16. – 21. Februar 2004

Kooperation mit DESY/Zeuthen

⇒ Analyse noch nicht komplett!

## Ziele:

- Test/Verifikation des thermoakustischen Modells
- Test des experimentellen Setups bei 'realen' Bedingungen
- Untersuchung der Abhängigkeit des Signals von Parametern

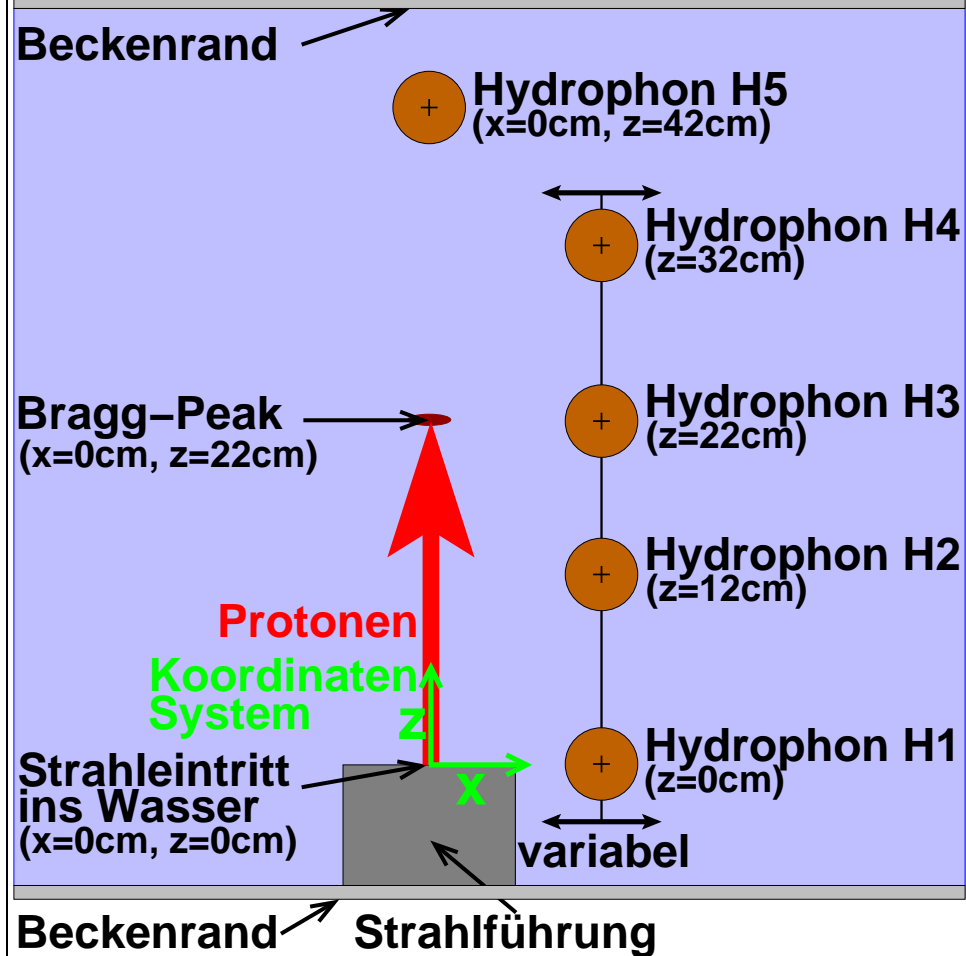
## Parameter der Messungen:

- **Protonenenergie:** 177 MeV
- **Pulsdauer:**  $\approx 30 \mu\text{s}$
- **Pulsenergie:**  $10^{15} - 10^{18} \text{ eV}$
- **Strahldurchmesser:** 0.6 – 2 cm
- **Hydrophon-Positionen:** 48 verschiedene (10 – 110 cm Abstand)
- **Temperatur:** 30 Schritte (1.7 – 15.0 °C)

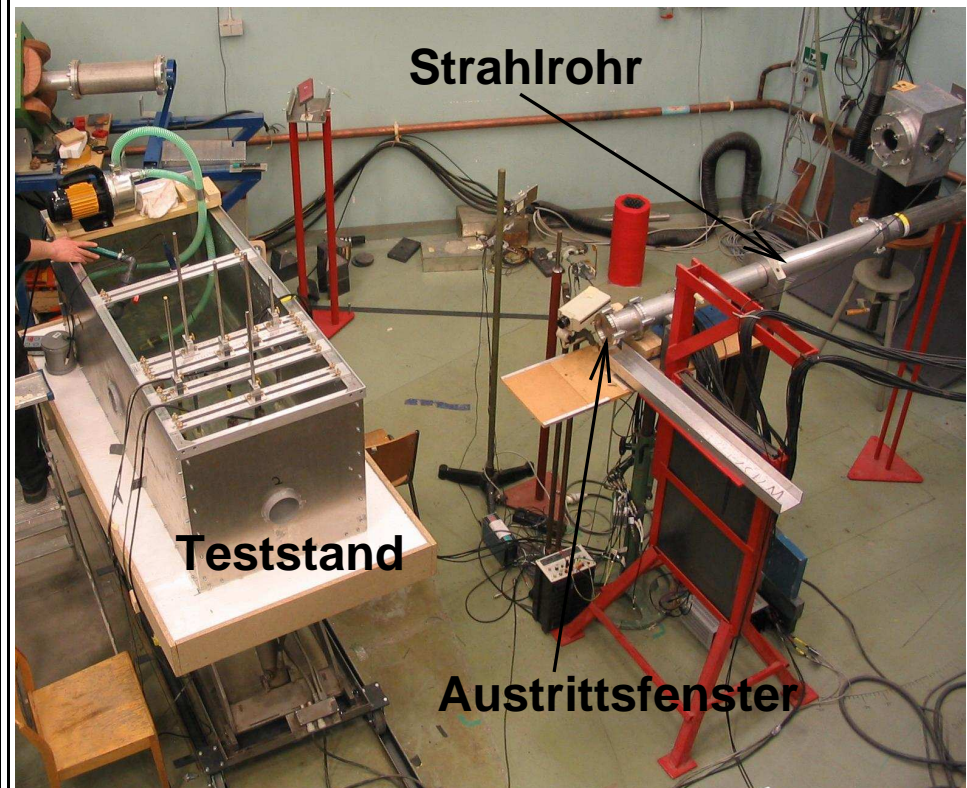


# Experimentelles Setup

## Geometrie



## Aufbau am Beschleuniger

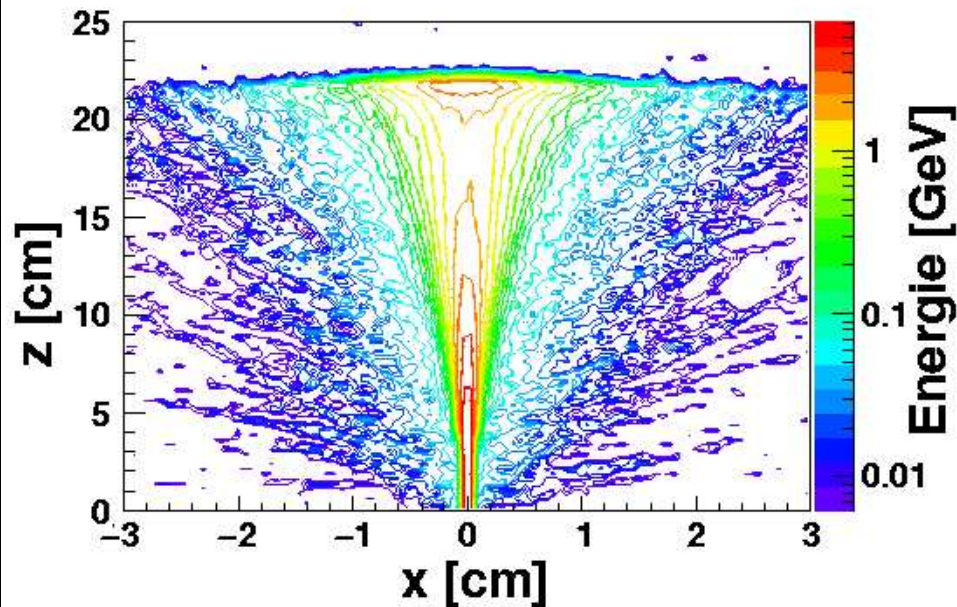


### Teststand:

- Wasserbecken
- Positionierungssystem für Sensoren
- Temperaturregelungssystem

# Simulation des Schallsignals

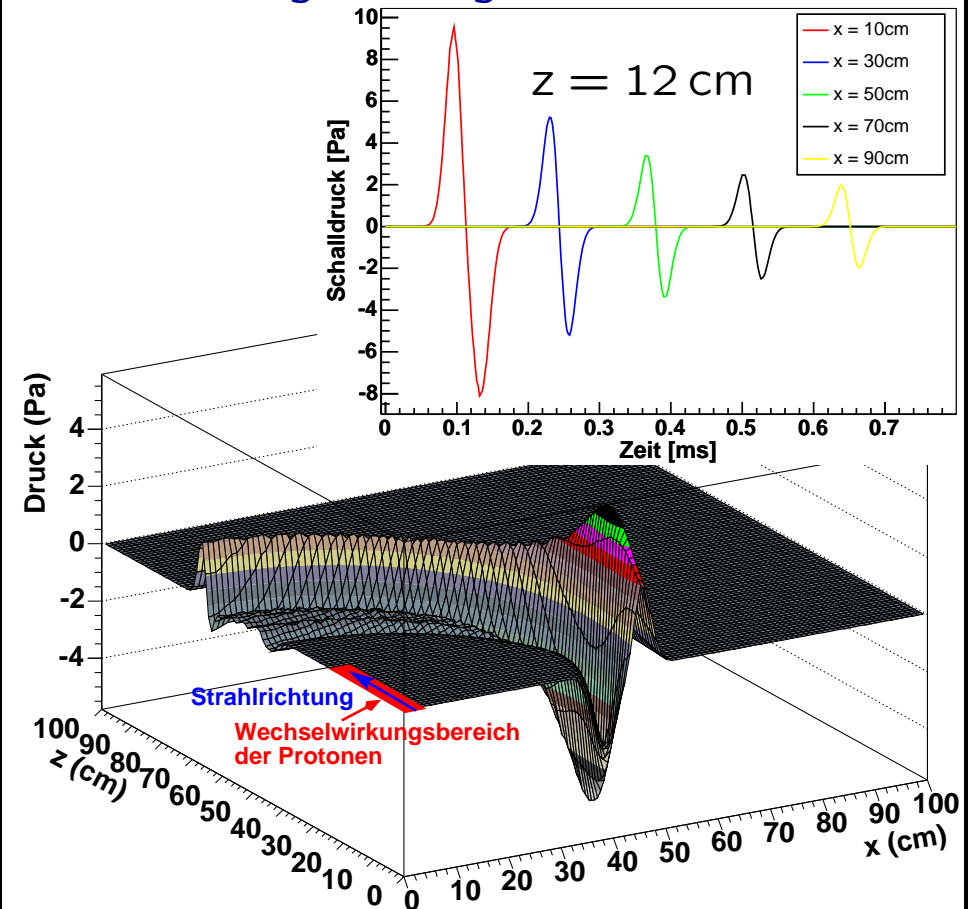
## Energie Deposition



- Simuliert mit GEANT4 (von T. Karg)
- Superposition von einzelnen Protonen  $\Rightarrow$  Puls
- Zeitstruktur des Pulses:
  - 30  $\mu$ s Gauss (Sim 1)
  - 20  $\mu$ s gaussähnlich (Sim 2)

## Schallfeld und Signal

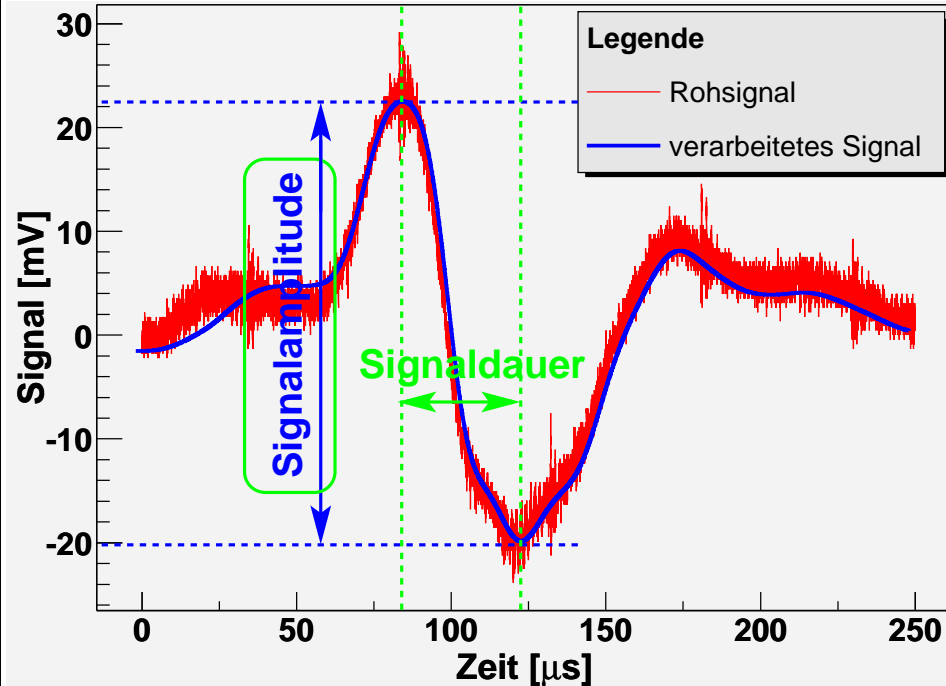
durch numerische Lösung der Wellengleichung für einen Puls





# Das Schallsignal

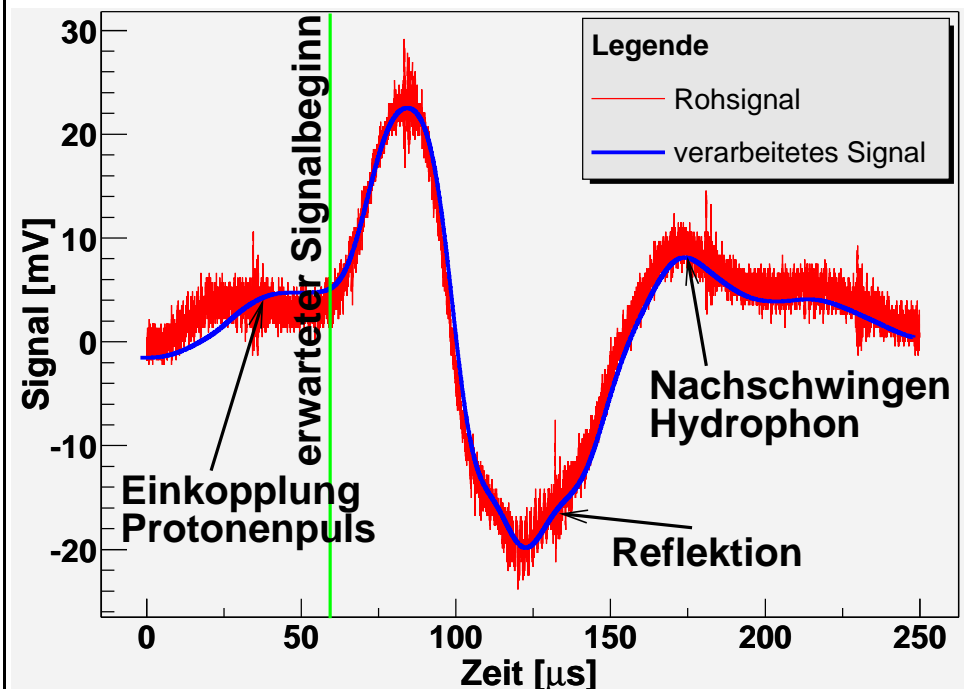
## Typisches Signal



### Signalaufbereitung:

- Mittelung über 1000 Pulse für jeden Parametersatz
- Bestimmung der Extrema durch Fit
- statistische Ermittlung der Fehler

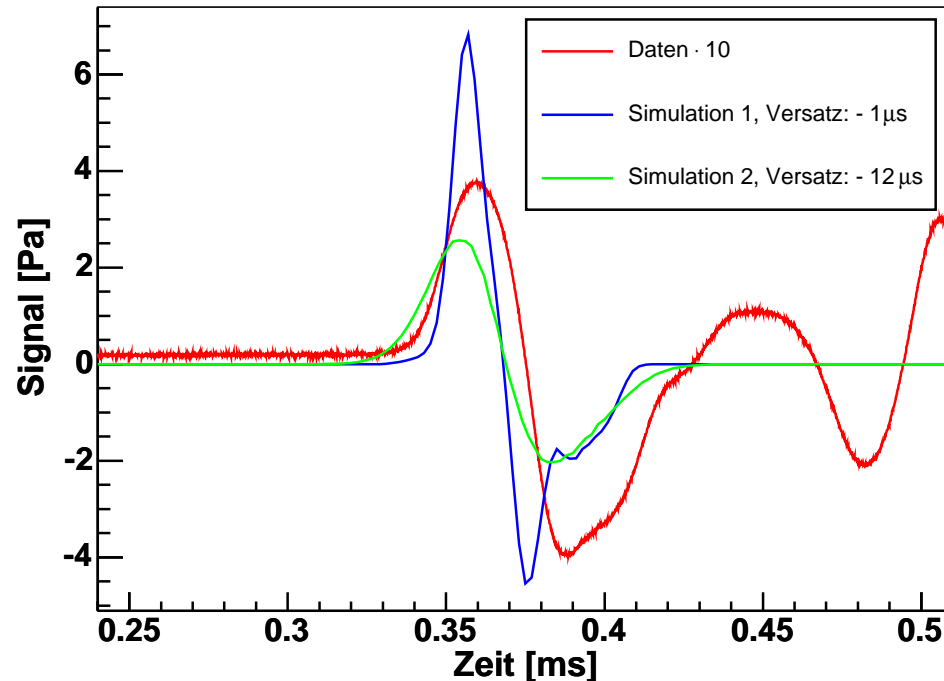
## Signaleigenschaften



- Signal in allen Feinheiten reproduzierbar
  - Einkopplung nicht akustisch
  - Feinheiten zum Großteil verstanden
- ⇒ erwartete bipolare Signalform

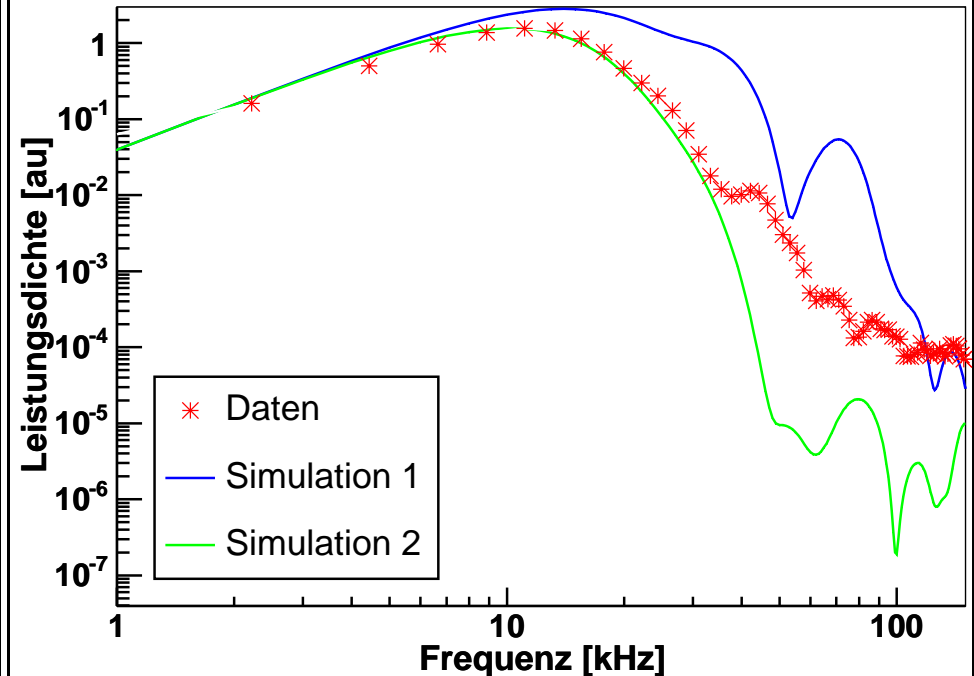
# Vergleich Signal – Simulation

## Signal - exemplarisch



- gute Übereinstimmung in der Form
- Simulation ohne detaillierte Zeitstruktur des Pulses  
⇒ bestimmt Signaldauer
- Normierung beliebig

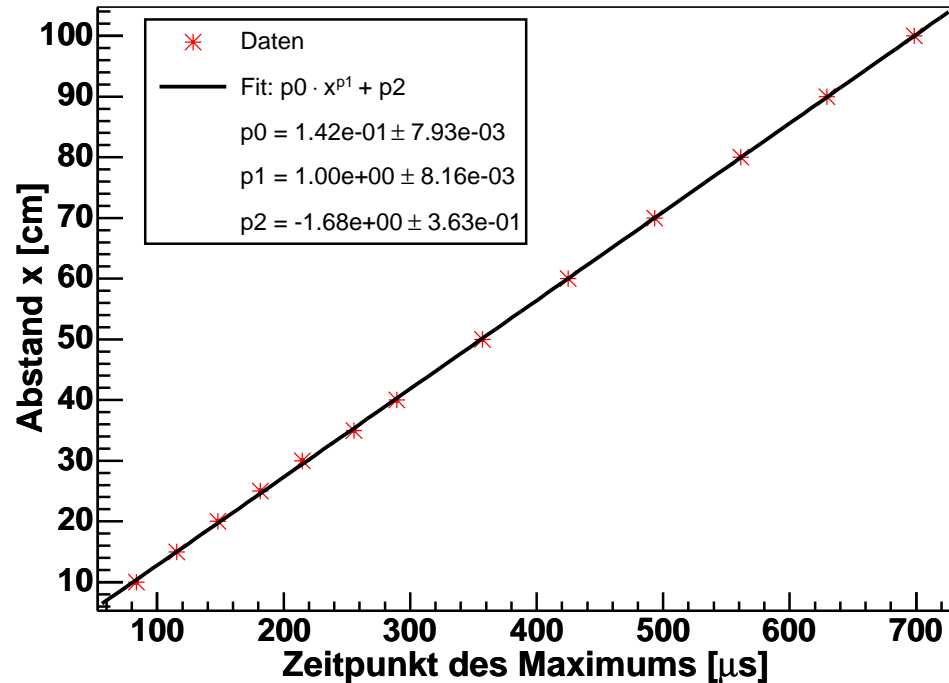
## Frequenzbereich



- Maximum entspricht Signaldauer
- Resonanz des Hydrophons bei 50 kHz sichtbar
- bei höheren Frequenzen: bestimmt durch Hydrophoneigenschaften

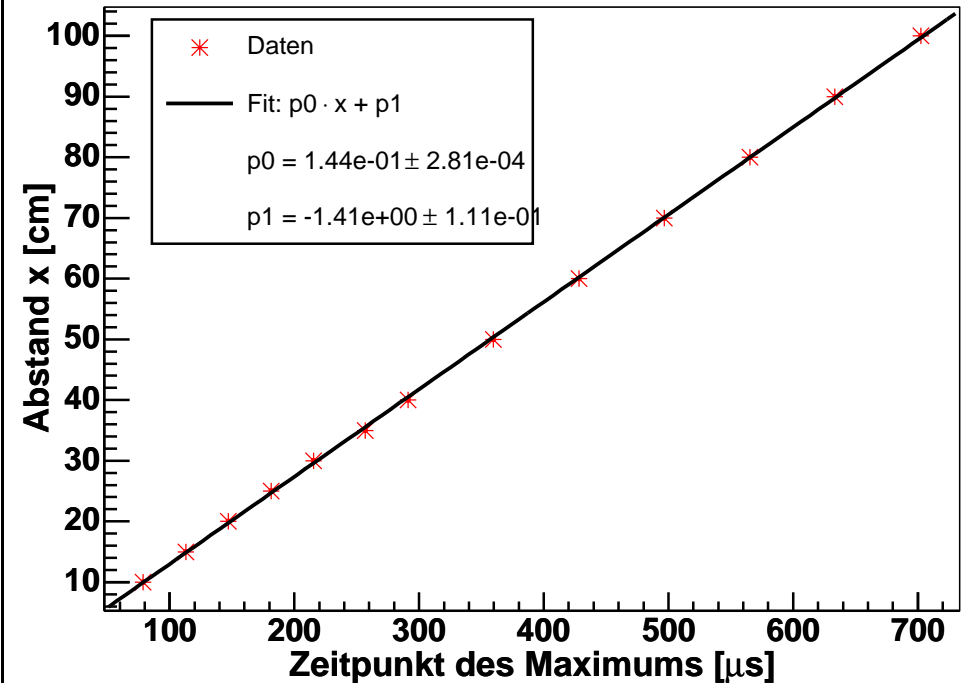
# Signal ist akustisch!

## Mittlere Position (H2)



- Fit mit freiem Exponenten  
⇒ lineare Abhängigkeit
- Schallgeschwindigkeit:  $1420 \pm 80 \frac{m}{s}$
- Literaturwert:  $1450 \pm 10 \frac{m}{s}$   
⇒ akustisches Signal

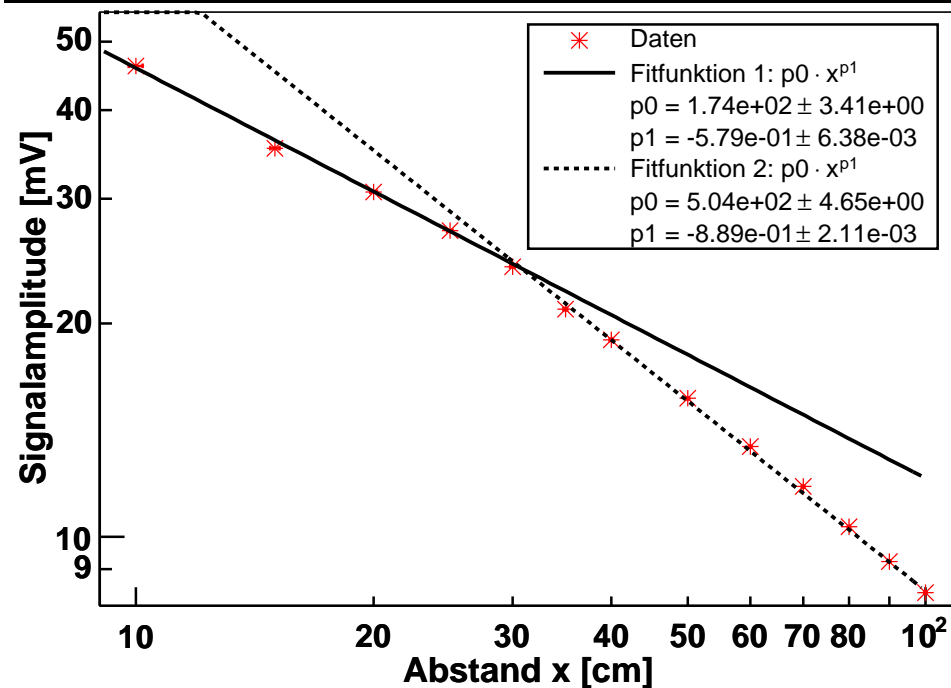
## Position am Bragg-Peak (H3)



- linearer Fit
- Schallgeschwindigkeit:  $1440 \pm 10 \frac{m}{s}$
- Konstante: Zeitpunkt und Position des Strahleintritts ins Wasser

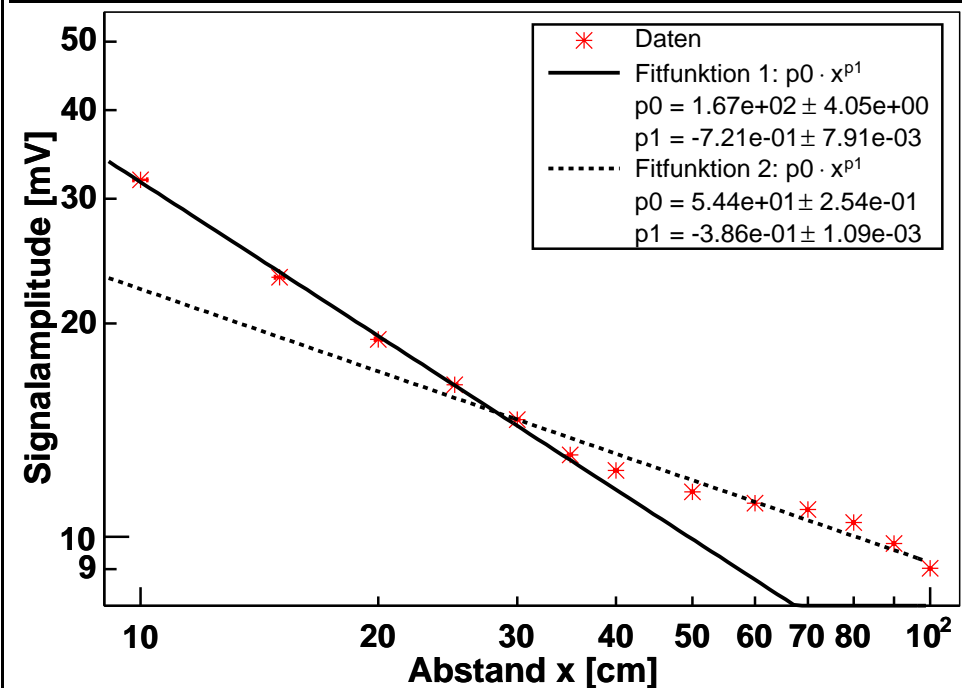
# Hydrophonabstand

## Mittlere Position (H2)



- $x^{-0.58}$  (Nahfeld),  $x^{-0.89}$  (Fernfeld)  
⇒ erwartetes Potenzverhalten
- Übergang Nahfeld/Fernfeld bei  $\approx 30$  cm klar ersichtlich
- gute Übereinstimmung mit Simulation

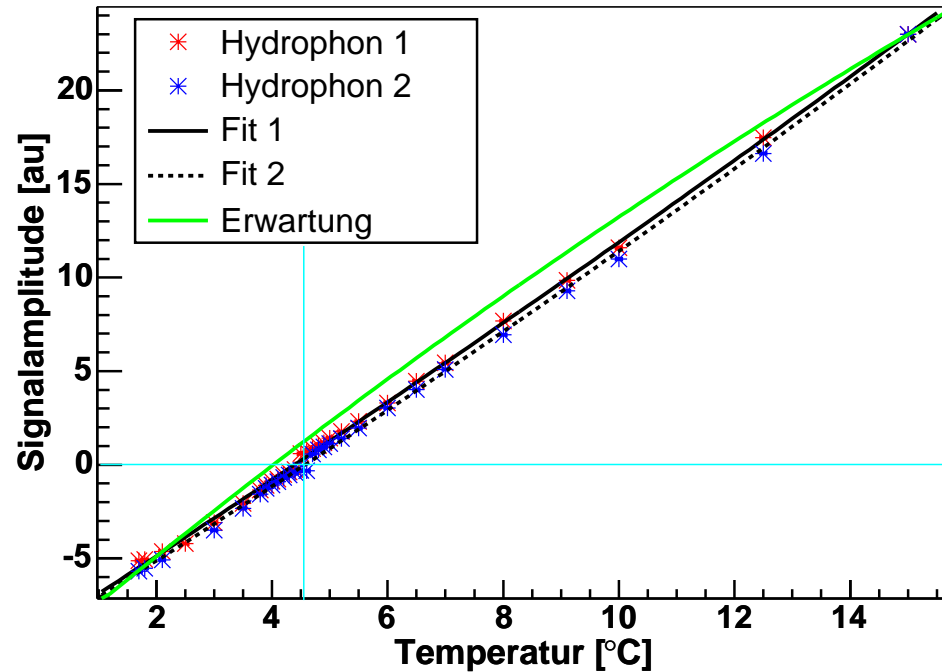
## Position am Bragg-Peak (H3)



- $x^{-0.72}$  (Nahfeld),  $x^{-0.39}$  (Fernfeld)
- verändertes Abstandsverhalten wegen Bragg-Peak
- wiederum gute Übereinstimmung mit Simulation

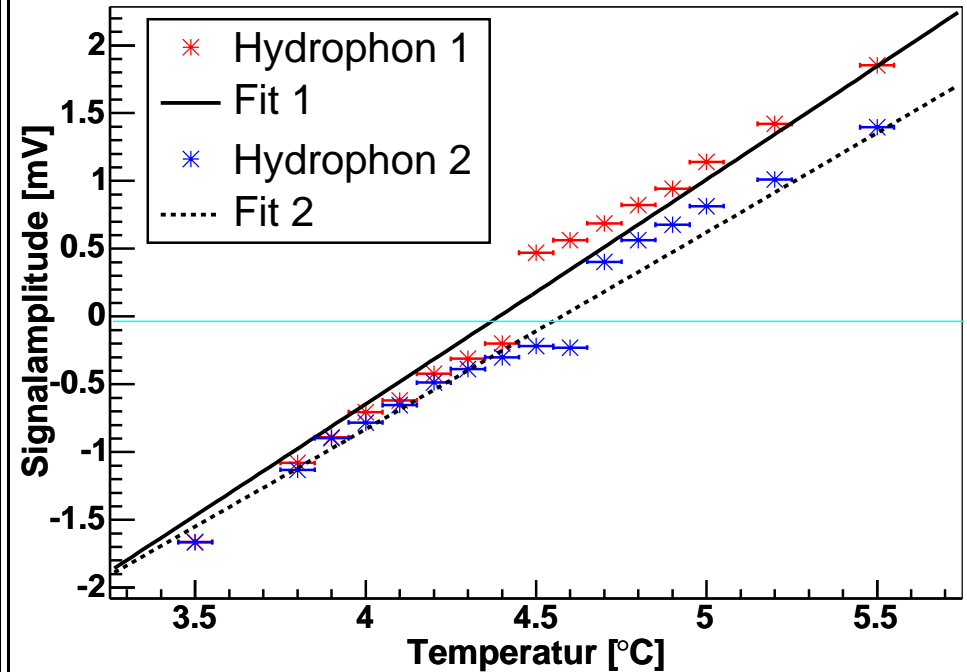
# Wassertemperatur

## Gesamter Bereich



- Signalinversion bei ca. 4 °C (Amplitude negativ)
- annähernd lineare Abhängigkeit
- Abweichung vom theoretischen Verlauf
- konsistent für beide Hydrophone

## Bereich um 4.5 °C

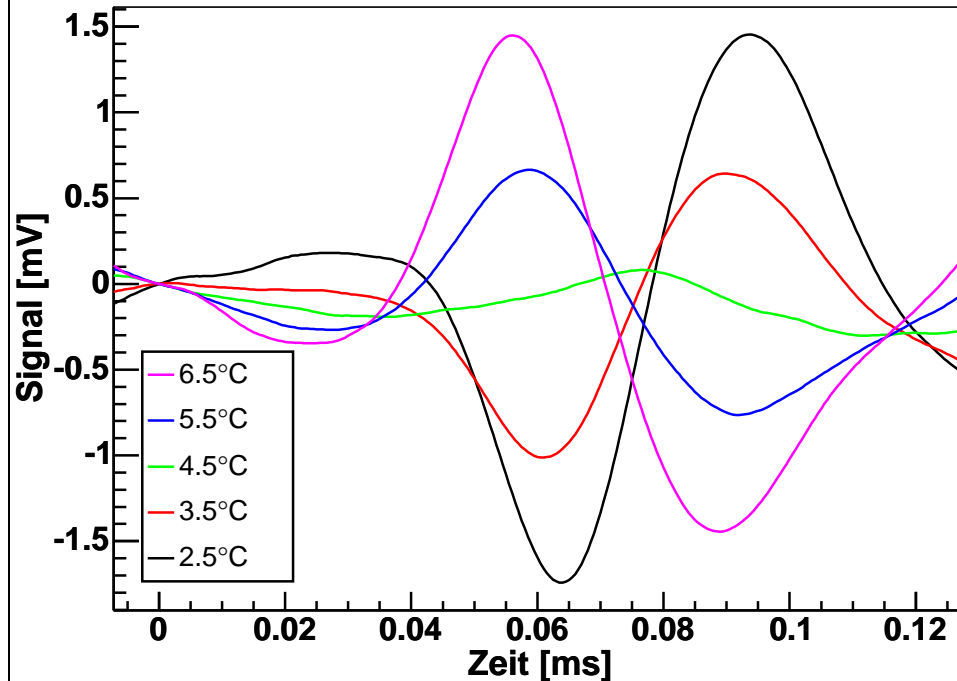


- Nulldurchgang bei ca. 4.5 °C  
⇒ erwartet bei 4.0 °C
- Signal verschwindet nicht
- Werte bei 4.4 – 4.6 °C weichen ab



# Wassertemperatur II

Signale: 4.0 – 5.0 °C



- 1. Reflektion für Analyse verwendet
- Inversion der Signale ersichtlich
- Signal bei 4.5 °C minimal: tripolar? → andere Mechanismen?
- zeitlicher Versatz:  $c_s(T)$

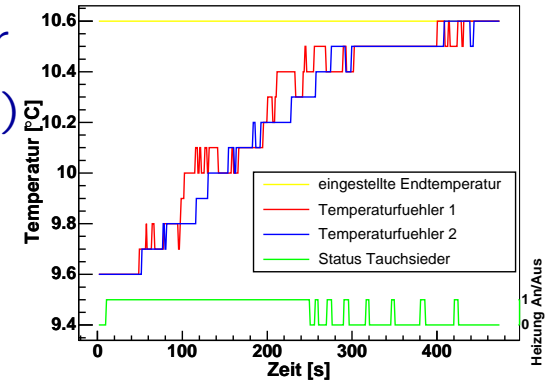
Signal (hauptsächlich) thermoakustisch, aber:

- Inversion/Verschwinden nicht bei 4.0 °C
- lineare (nicht quadratische) Temperaturabhängigkeit

⇒ Analyse im Gange

## Temperatursteuerung

- 2 Thermometer
- Abkühlung (Eis)
- schrittweise Erwärmung



⇒ Genauigkeit 0.1 °C

## Zusammenfassung und Ausblick

Messungen bestätigen:  
thermoakustisches Modell  
ist primärer Effekt

- ca. 250 Messungen bei verschiedenen Parametern
- hochpräzise Daten ( $\approx 100$  GB)
- Simulation stimmt gut mit Messungen überein
- Übereinstimmung Ergebnisse  $\leftrightarrow$  Erwartung in vielen Bereichen
- einige Effekte noch nicht verstanden  
 $\Rightarrow$  präziseres Verständnis nach abgeschlossener Analyse
- unabhängige Analyse durch F. Forster im Gange

# Überblick Laser Experiment

durchgeführt von S. Schwemmer

## gepulster NdYag Laser:

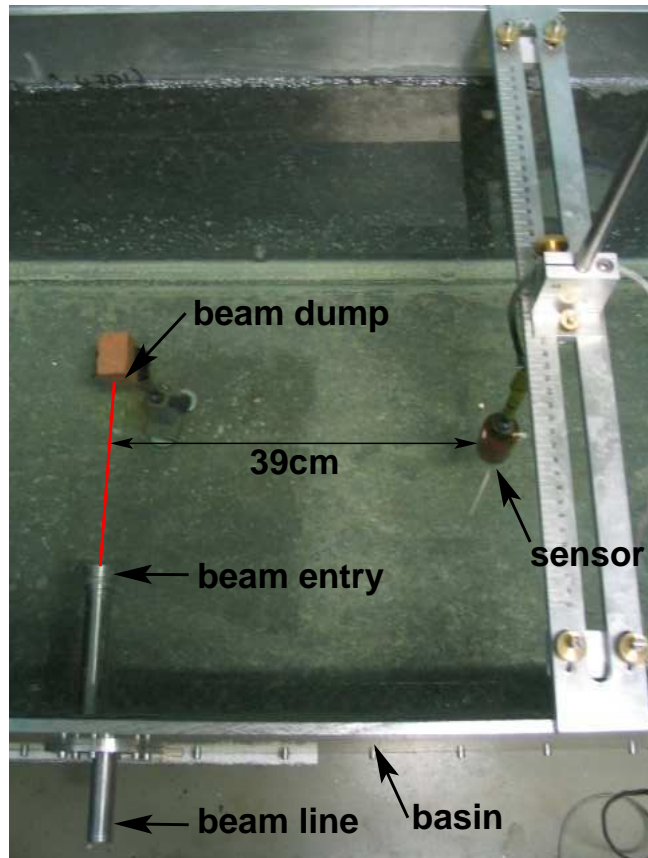
- **Wellenlänge:** 1064 nm
  - **maximale Pulsenergie:** 2.5 J
  - **Pulsdauer:** 9 ns
  - **Abschwächlänge:**  $\varnothing$ [cm]
- 
- voll funktionsfähiger Aufbau fertiggestellt
  - erste Signale gemessen und simuliert
  - Messungen von Schallfeld, Abhängigkeiten von Wassertemperatur, Salinität, u.a. folgen
  - genaue Bestimmung der Strahlparameter folgt

## Experimentelle Umgebung



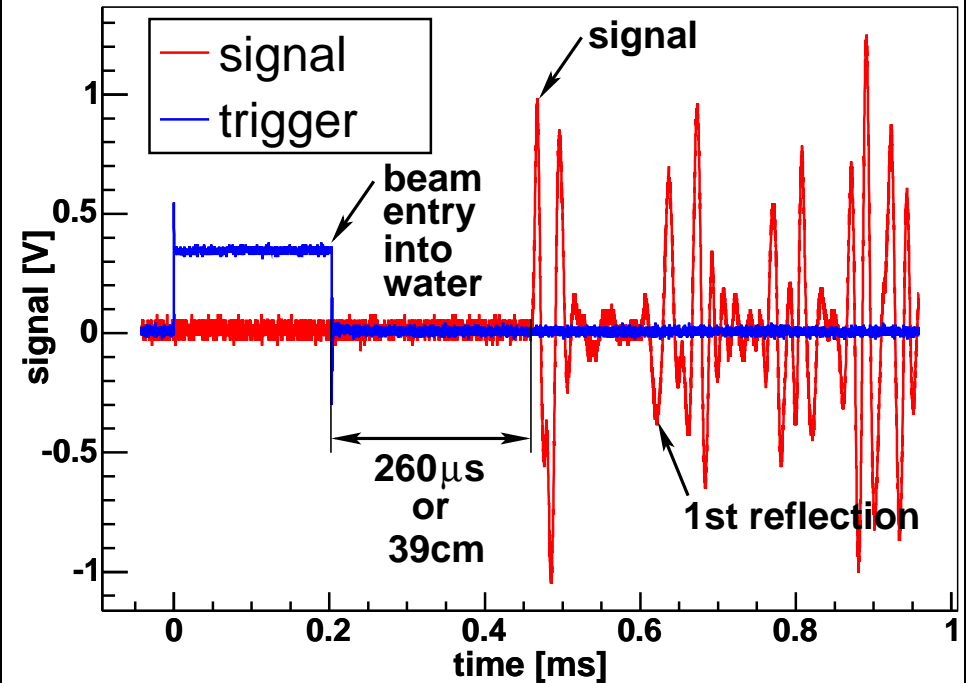
# Erste Signale

## Geometrie



- Strahleintritt und Dämpfung von Wänden entkoppelt → Reflektionen

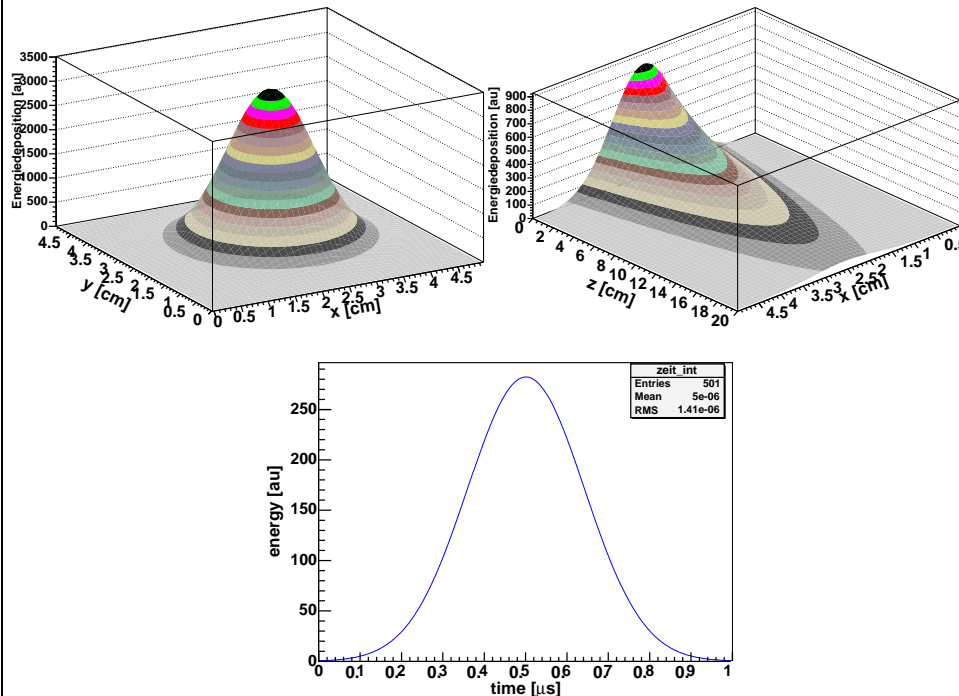
## Signal



- 260  $\mu$ s für 39 cm  $\rightarrow c_s = 1500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$   
 $\Rightarrow$  Signal ist akustisch
- Reflektionen vom Signal klar getrennt

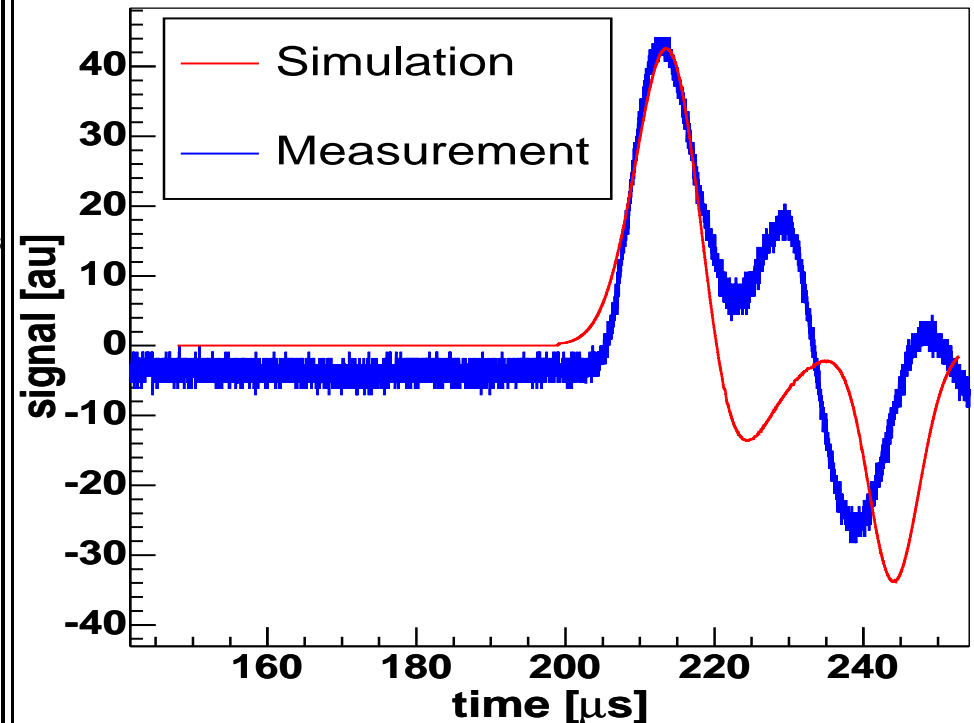
# Vergleich Signal – Simulation

## Simulation



- vereinfachte Annahmen für Strahlprofile
- Signal hängt nicht vom zeitlichen Profil ab  
⇒ **instantane Energiedeposition**

## Vergleich



- 20 cm Abstand zur Strahlachse
- Signale beliebig normiert
- nicht strikt bipolar  
⇒ **keine zylindrische Energiedeposition**
- gute Übereinstimmung (Annahmen)



