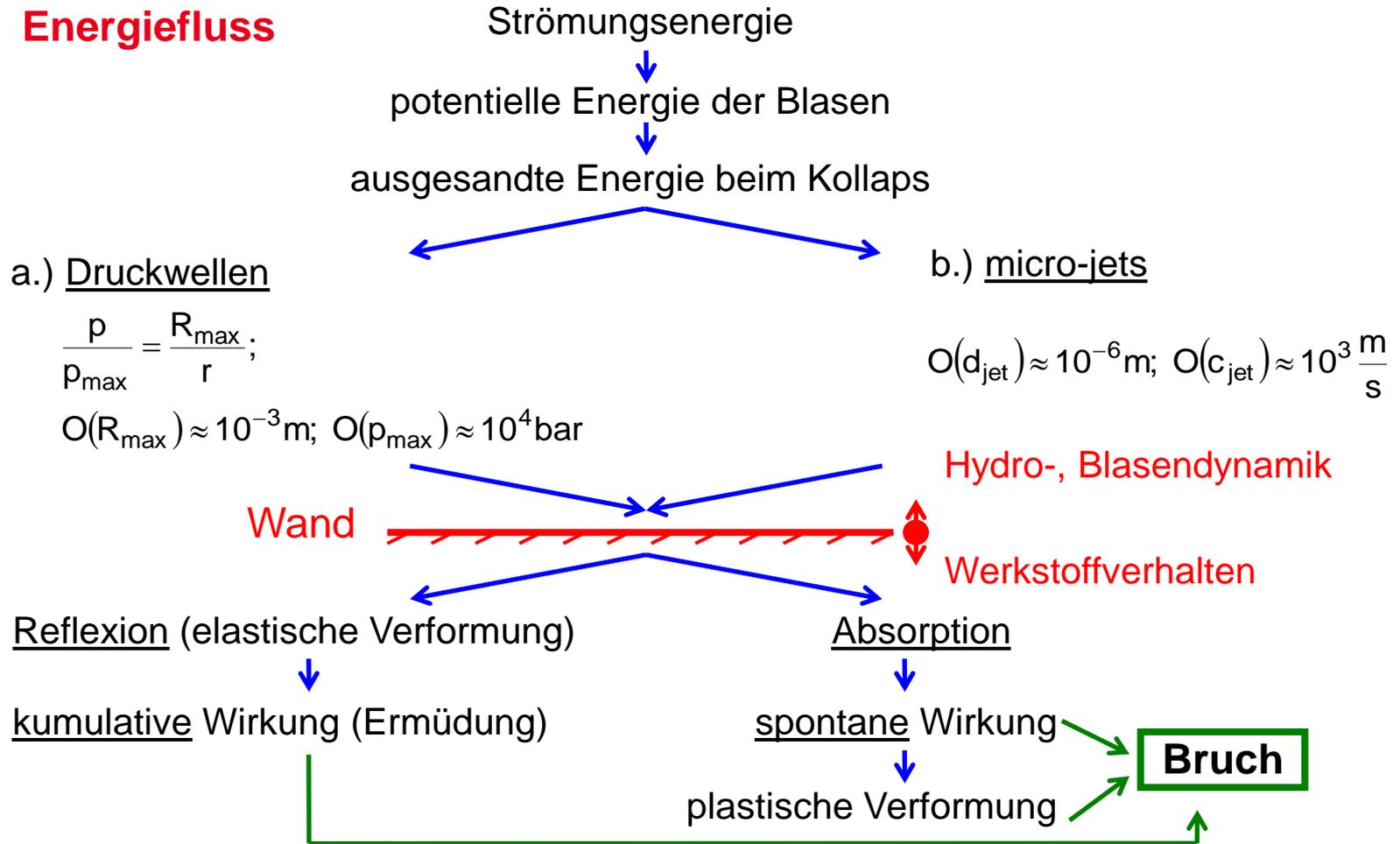


5.3 Kavitations-Erosion



5.3.1 Wirkungsmechanismen der erosiven Aggressivität von Kavitation (1/7)

Energiefluss



5.3.1 Wirkungsmechanismen der erosiven Aggressivität von Kavitation

(2/7)



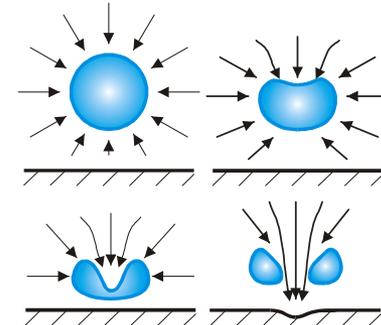
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Grundvoraussetzung für die Formation eines „pits“

1.) mehrere Blasen bilden ein „Blasen-Cluster“
in Form einer Wolke



2.) Ein Blasenkollaps findet in direkter Wandnähe
statt und bildet einen „micro-jet“ aus



3.) Zwei Druckschwankungen überlagern sich:

- ein „hydrodynamischer“ Druckanteil aus der Kavitationstaschenumströmung;
- ein „blasendynamischer“ Druckanteil, der als Flüssigkeitsschall transportiert wird.

Überlagern sich diese beiden Druckanteile an einem Maximum, entsteht ein besonders hoher Druck, der die Voraussetzung für die Ausbildung eines „pits“ bilden kann.

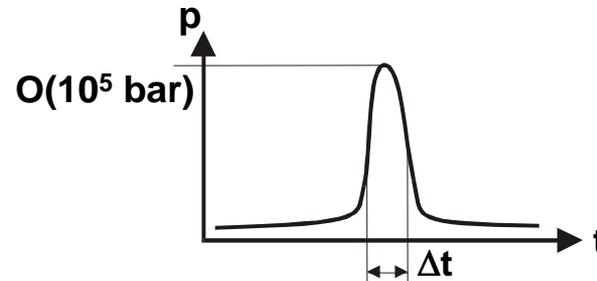
5.3.1 Wirkungsmechanismen der erosiven Aggressivität von Kavitation

(3/7)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Druckspitze infolge eines Blasenkolllaps



Potentielle Energie einer Dampfblase

$$E_{\text{pot}} = V_{\text{Dampf}} (p_{\infty} - p_{\text{Gr}})$$

Aufteilung der potentielle Energie in

- Flüssigkeitsschall
 - Körperschall
 - Wärme
 - bleibende Veränderungen (plastische Verformungen, Bruchvorgänge)
- Daraus auch: „Verformungswirkungsgrad“

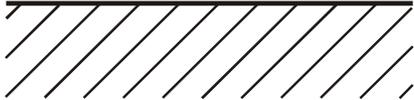
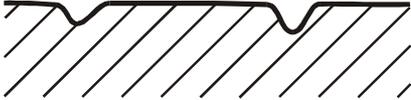
5.3.1 Wirkungsmechanismen der erosiven Aggressivität von Kavitation

(4/7)



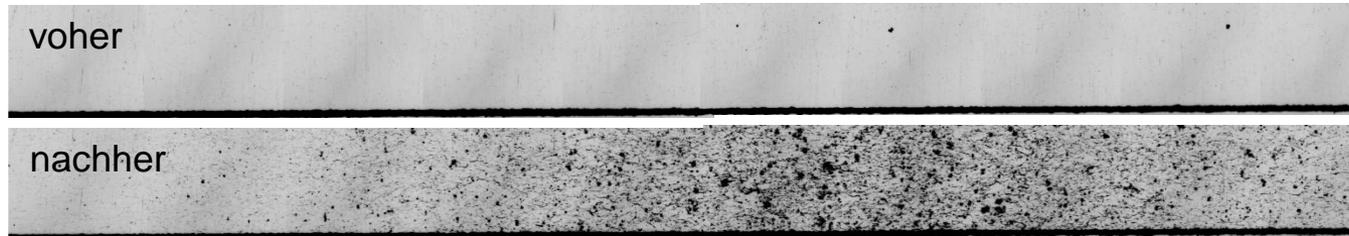
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Veränderung der Werkstoff-Oberfläche durch Einwirken von Kavitation

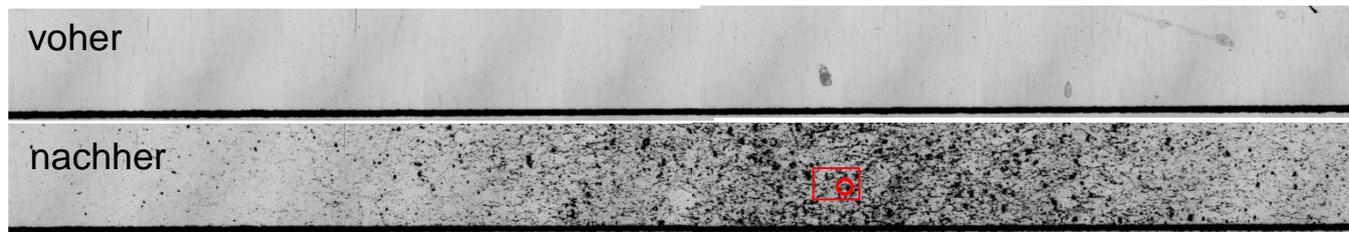
| Phase | Profil | Vorgang | Meßmethode |
|-------|---|--|---|
| 1 |  | Lockerung von Gefüge und Schutzschichten, Ermüdung | Messung und Analyse von Druckimpulsen |
| 2 |  | Bildung von „pits“ (= plast. Verformung) | Auswertung von „pits“ pro Zeit und Fläche |
| 3 |  | Überlappung von „pits“ (auch Verstärkungseffekt) | - Vermessung des Oberflächenprofils - REM |
| 4 |  | Bruchvorgänge, Volumenverlust | Bestimmung des Gewichtsverlustes durch Wägung |

5.3.1 Wirkungsmechanismen der erosiven Aggressivität von Kavitation

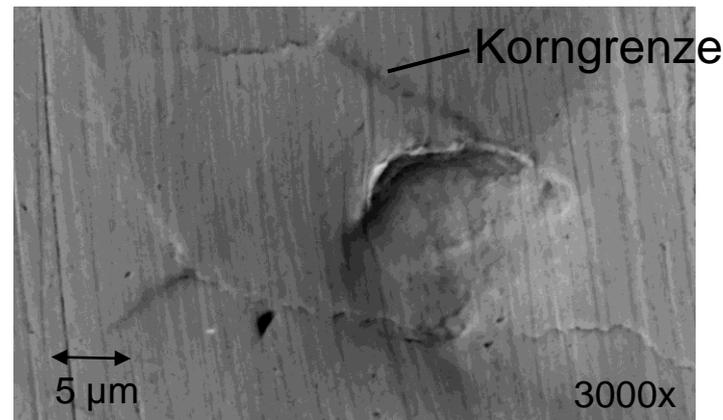
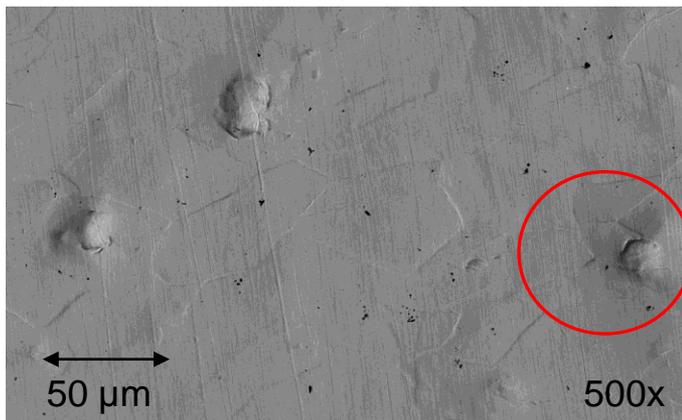
(5/7)



300 min



600 min

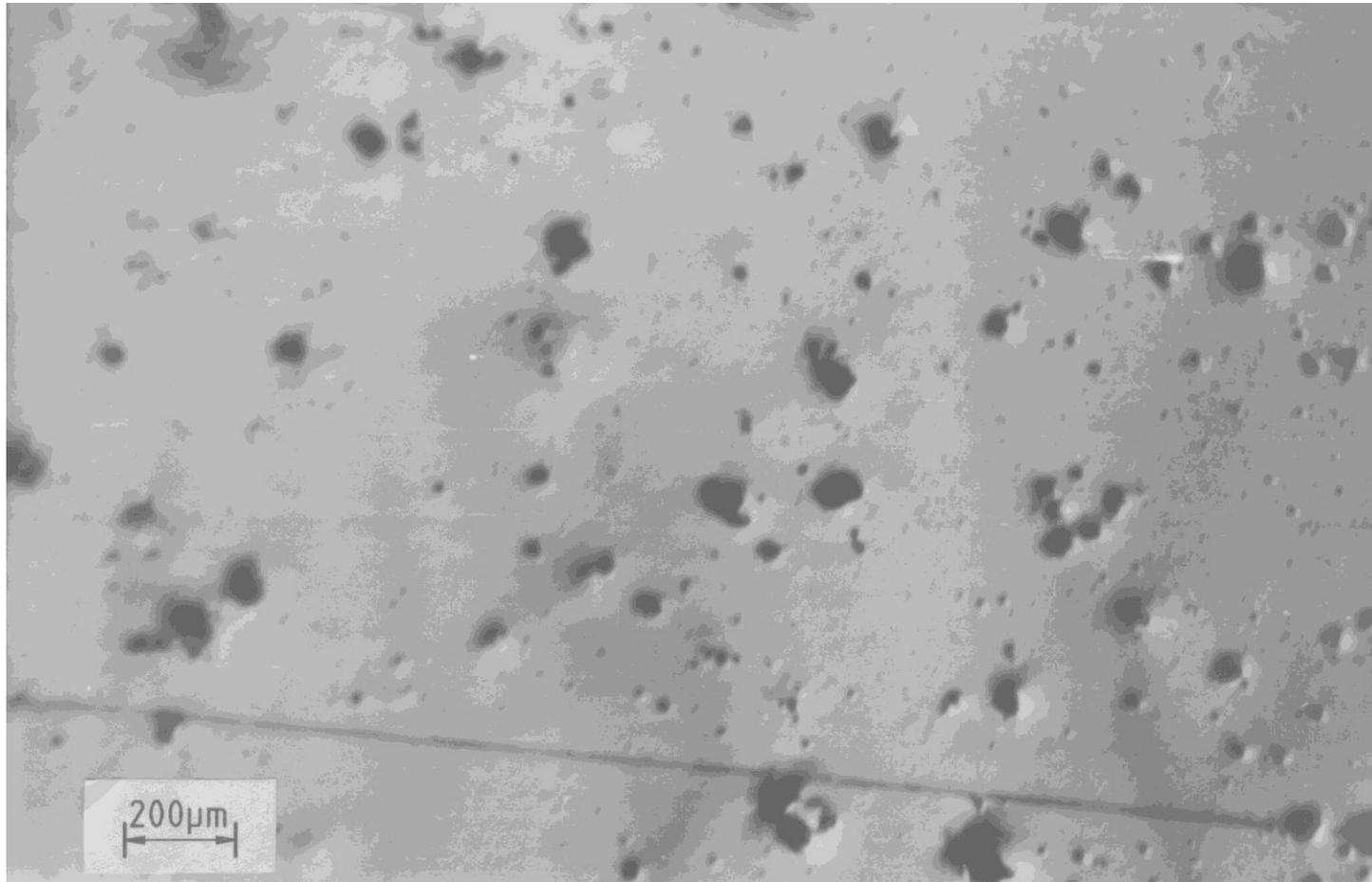


5.3.1 Wirkungsmechanismen der erosiven Aggressivität von Kavitation

(6/7)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

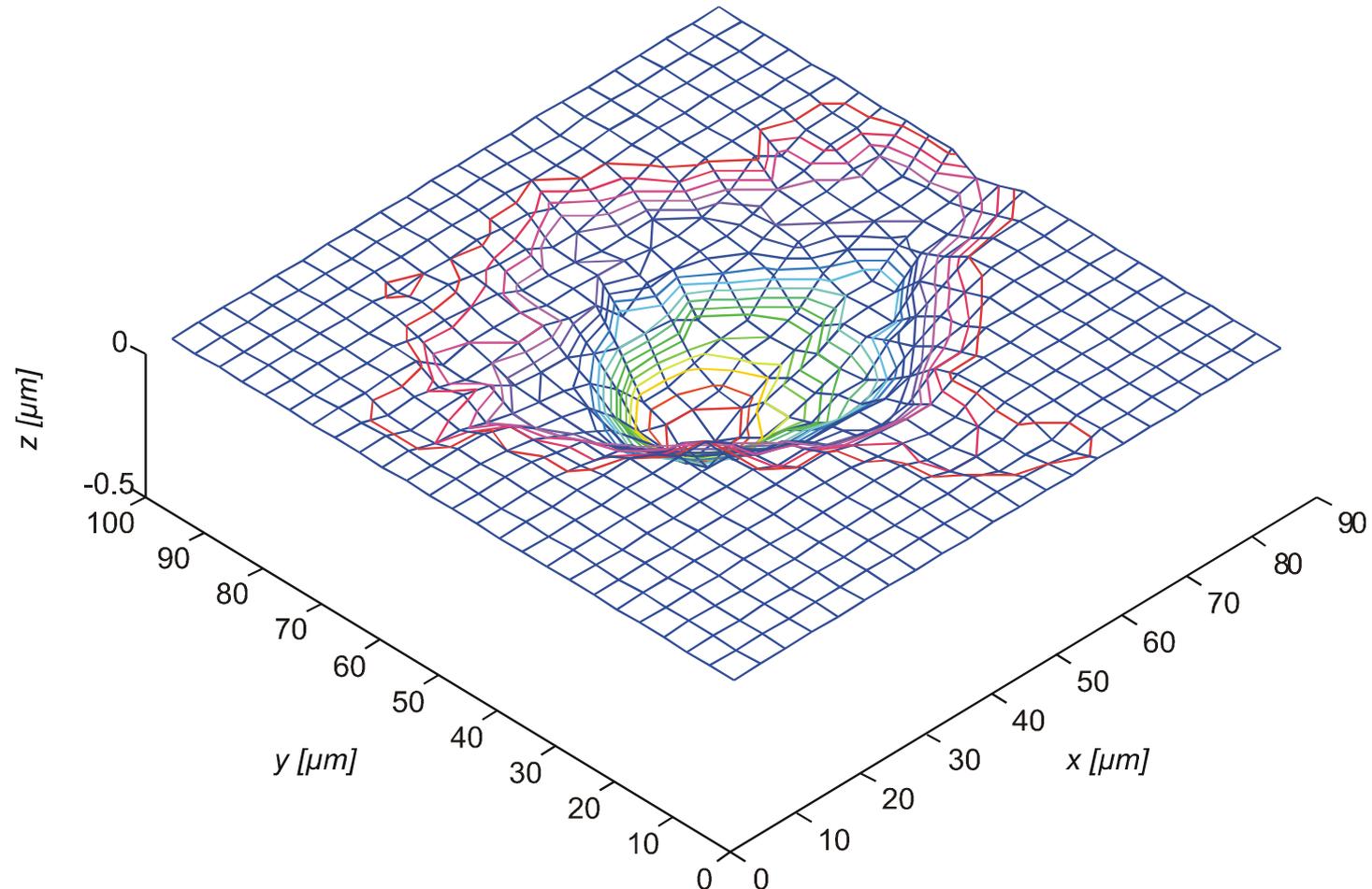


5.3.1 Wirkungsmechanismen der erosiven Aggressivität von Kavitation

(7/7)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT





Methoden zur Messung der erosiven Aggressivität von Kavitation

- Werkstoff als Sensor:
 - Analyse der plastischen Verformungen (3D / 2D)
 - Bestimmung des Materialabtrags
- Druckstöße infolge von Blasenimplosionen
- Schallmessung
 - am Gehäuse,
 - in der Flüssigkeit,
 - an der exponierten Struktur
- Druckschwankungen infolge der makroskopischen Druckstöße

5.3.2 Messmethoden - Analyse der plastischen Verformung

(2/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

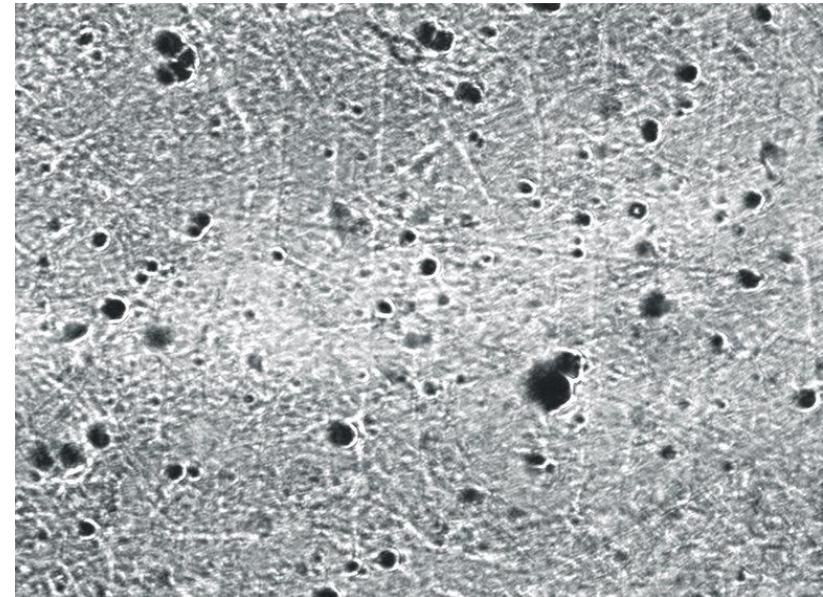
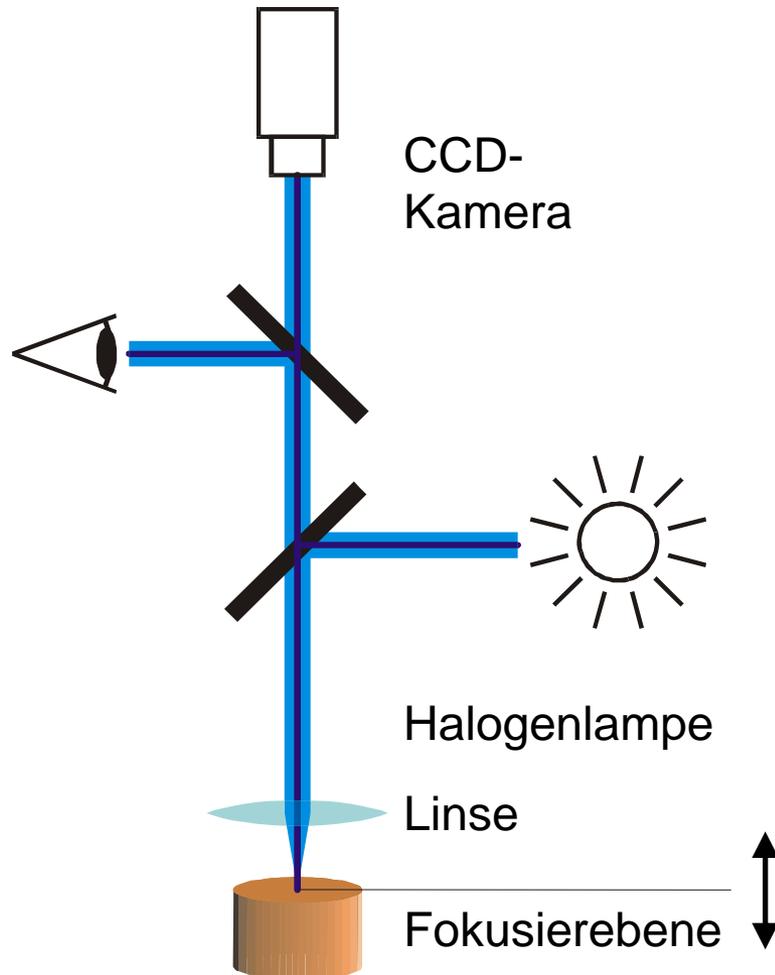


Bild einer beschädigten Oberfläche

5.3.2 Messmethoden - Analyse der plastischen Verformung

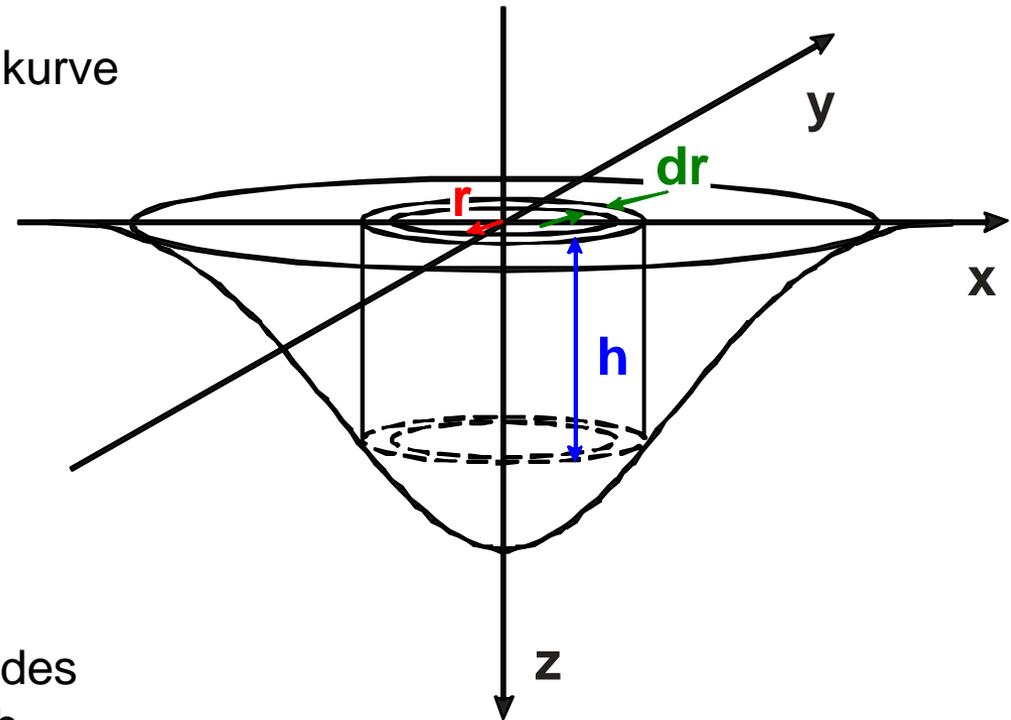
(3/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Annahme

- geometrische Ähnlichkeit von pits
- 3D-rotationssymmetrische Glockenkurve



⇒ Tiefenbestimmung über Kenntnis des charakteristischen Radius möglich

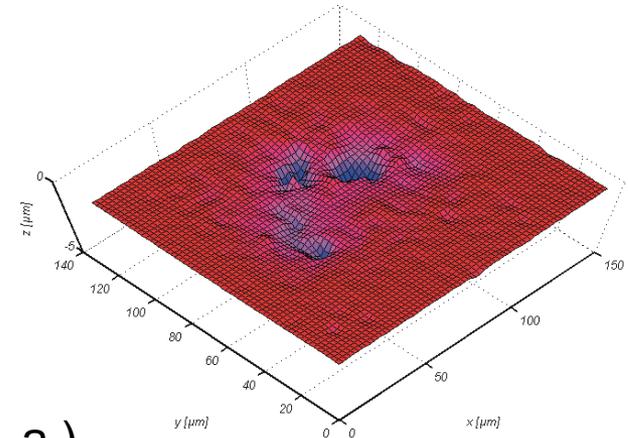
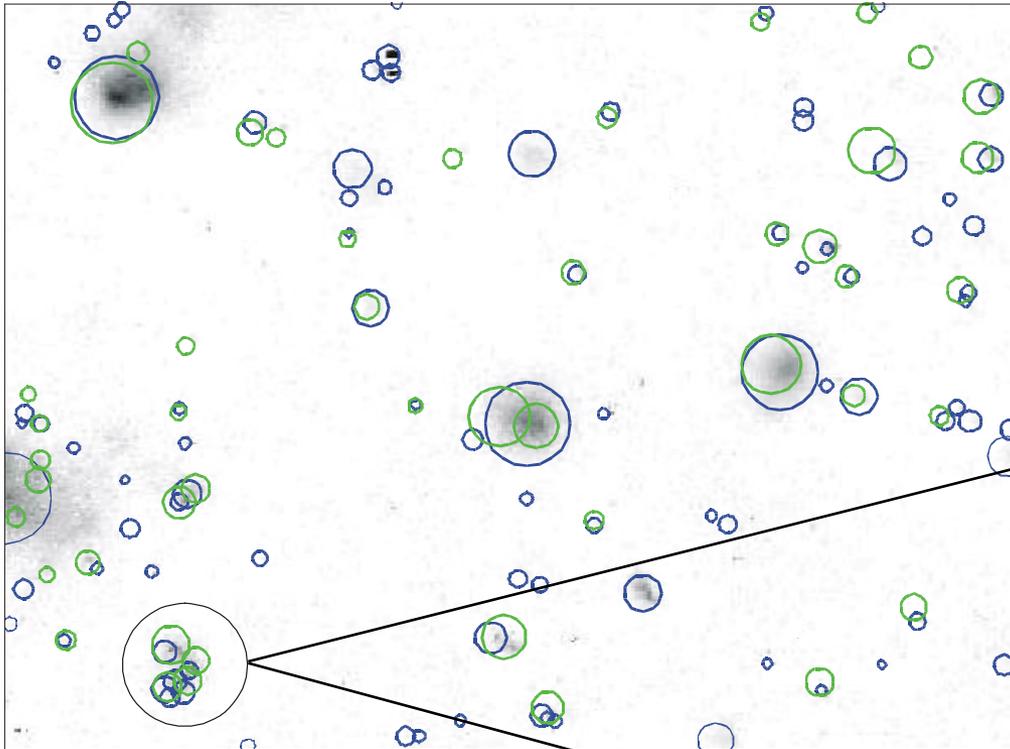
(Dissertation Retailleau 1995)

5.3.2 Messmethoden - Analyse der plastischen Verformung

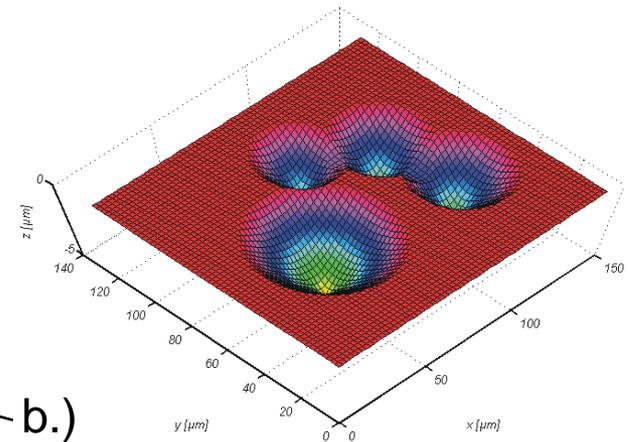
(4/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



a.)



b.)

Oberflächendetail

(a) mit Laser-Profilometer vermessen

(b) modelliert

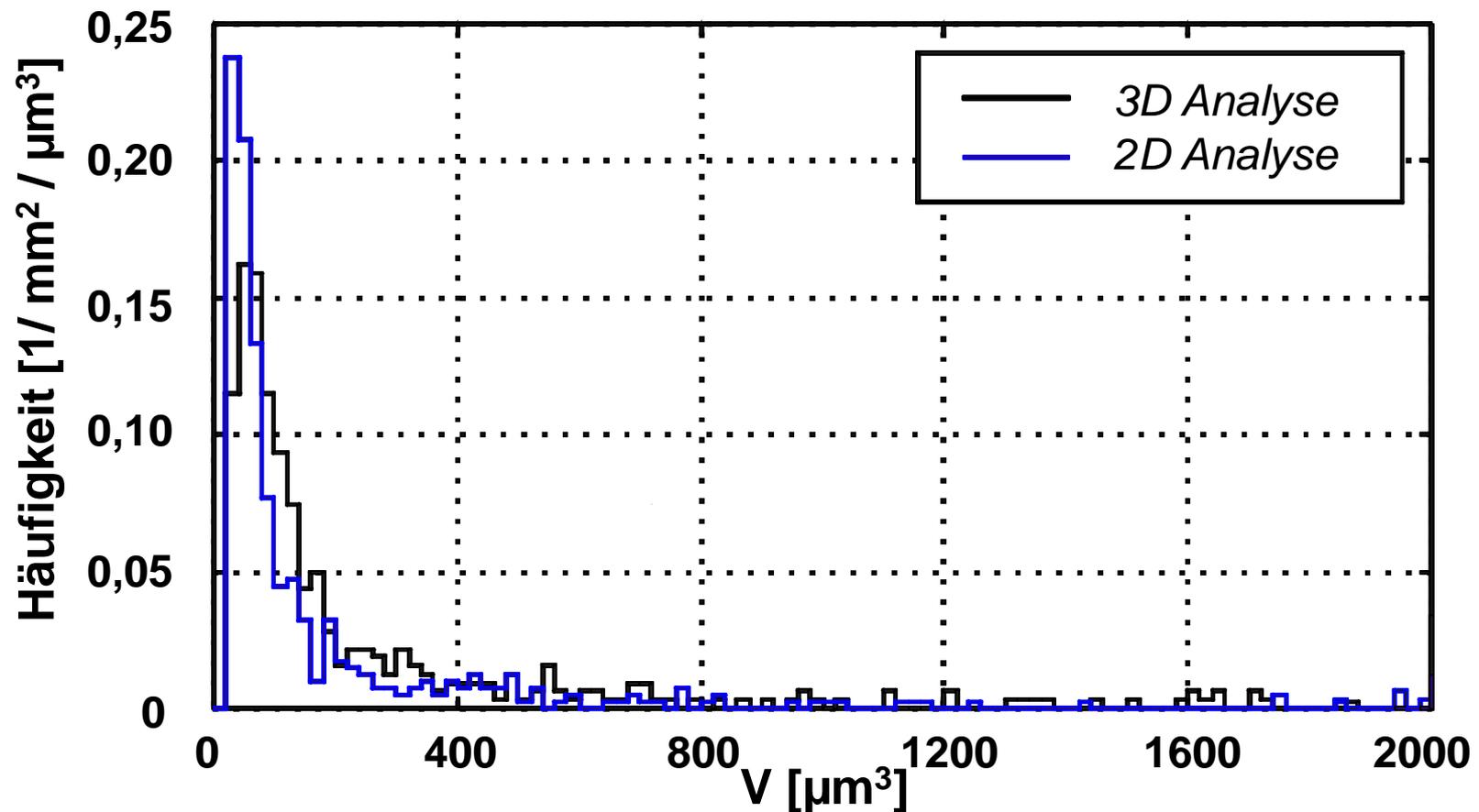
5.3.2 Messmethoden - Analyse der plastischen Verformung

(5/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Pitvolumina - Vergleich einer Laser-Profilometermessung und Modellierung

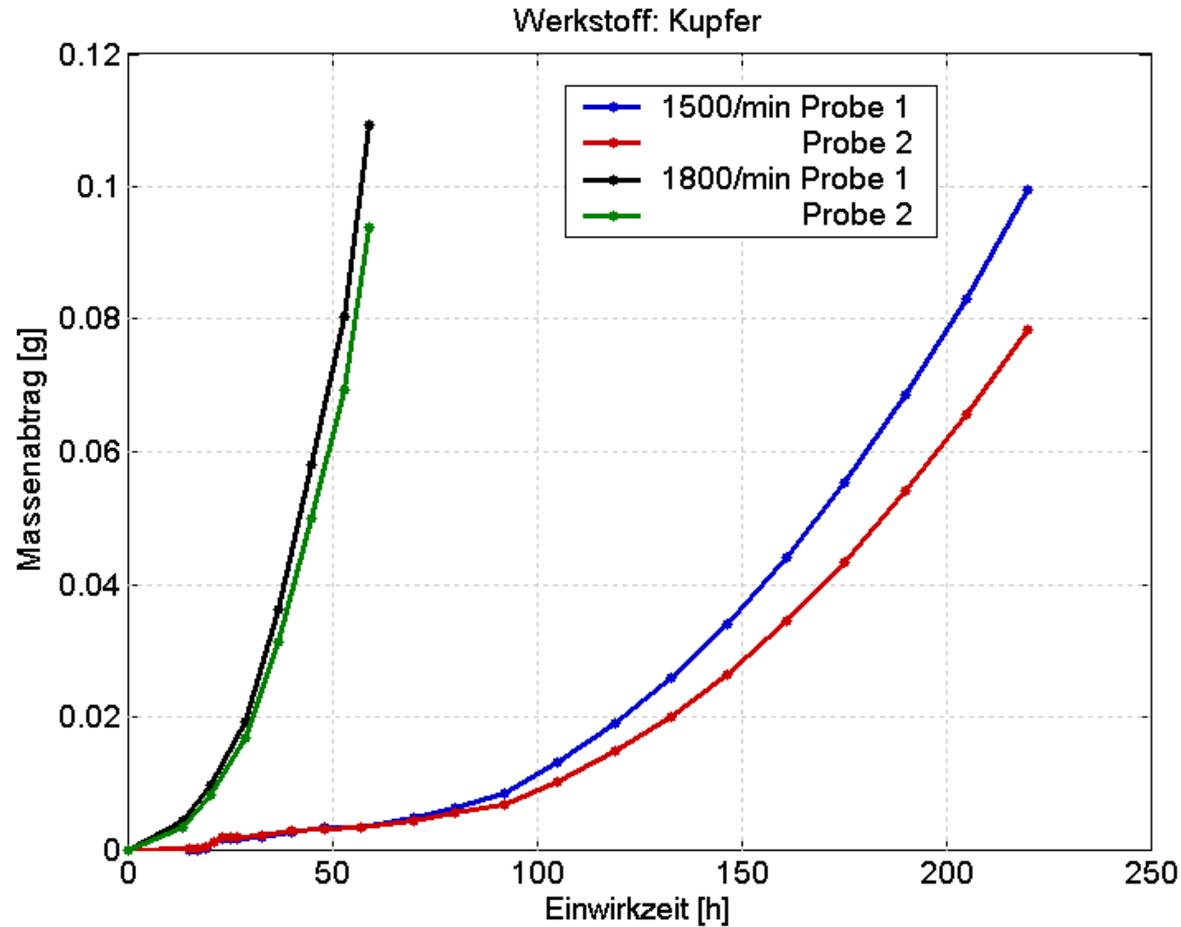


5.3.2 Messmethoden

(6/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

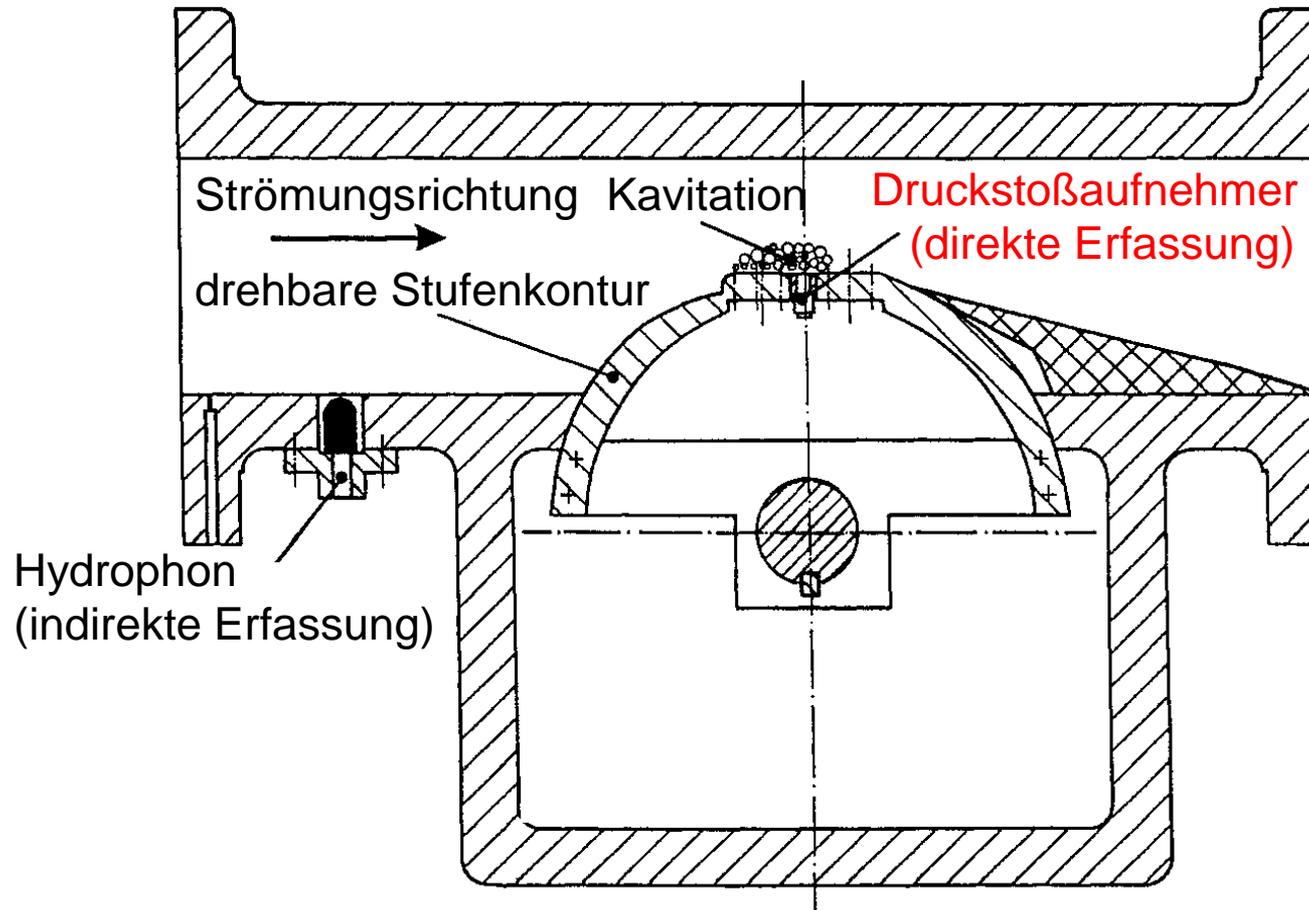


5.3.2 Messmethoden

(7/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

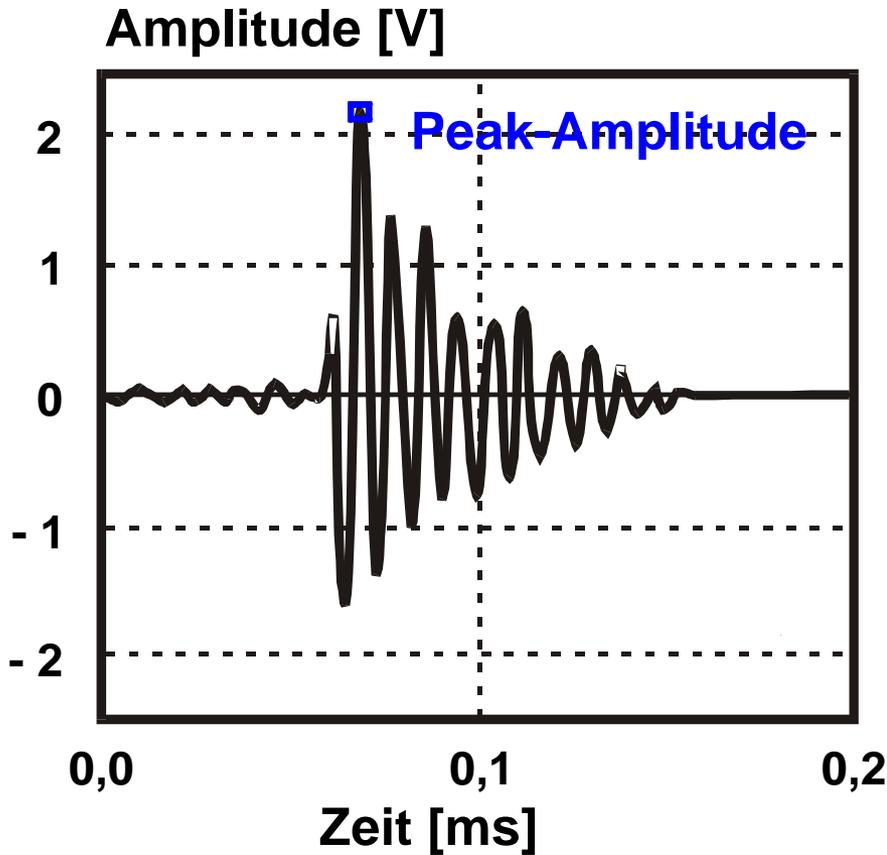


5.3.2 Messmethoden - Druckstöße infolge Blasenimplosionen

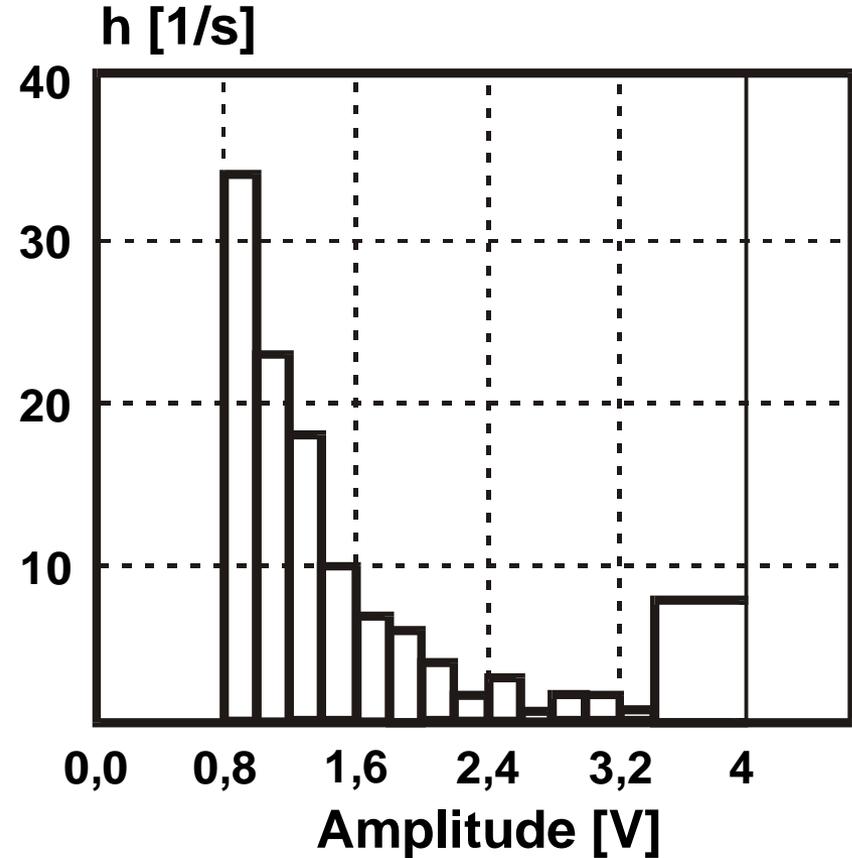
(8/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Typischer Signalverlauf



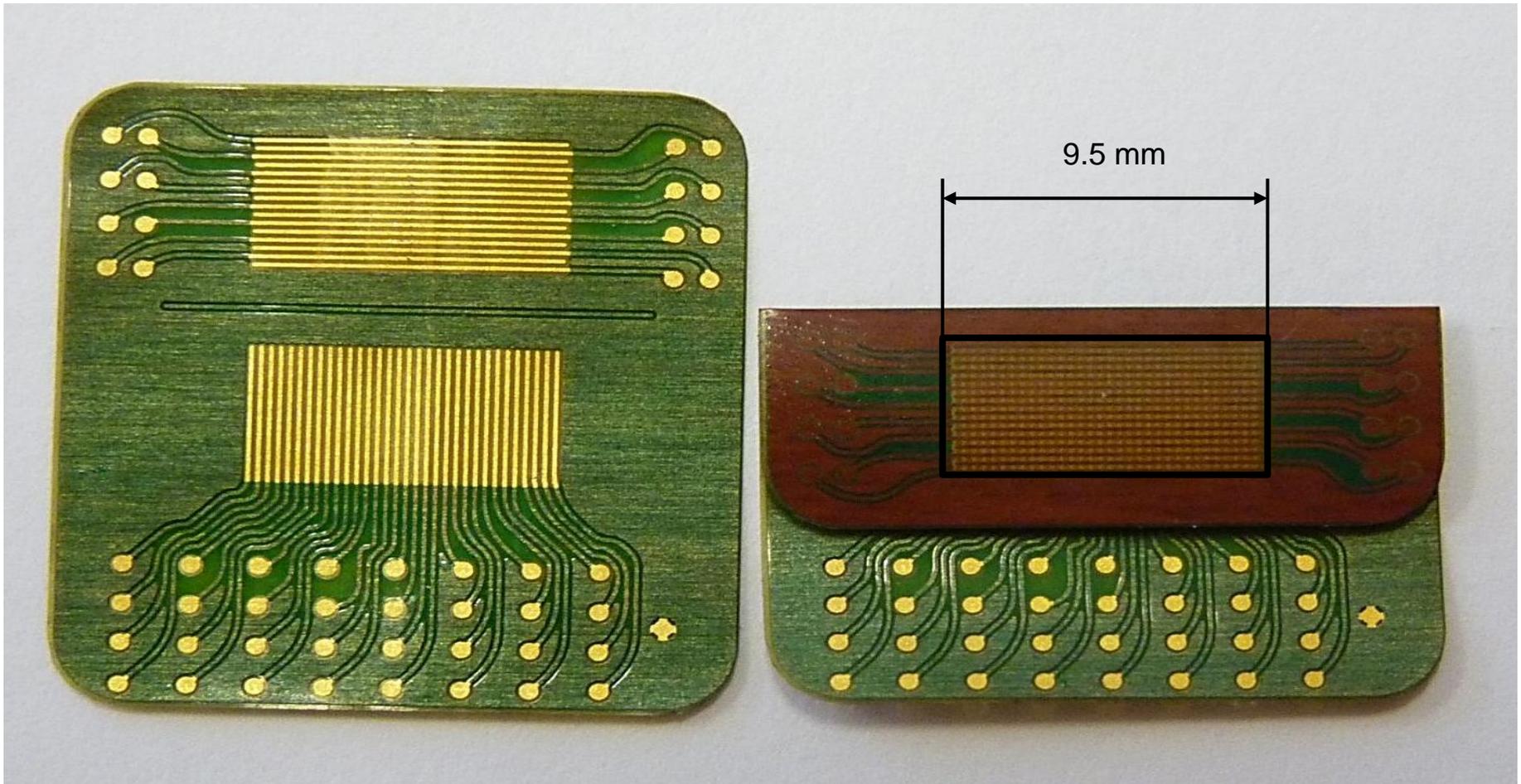
Impulshöhenhistogramm

5.3.2 Messmethoden - örtliche aufgelöste Druckinformationen

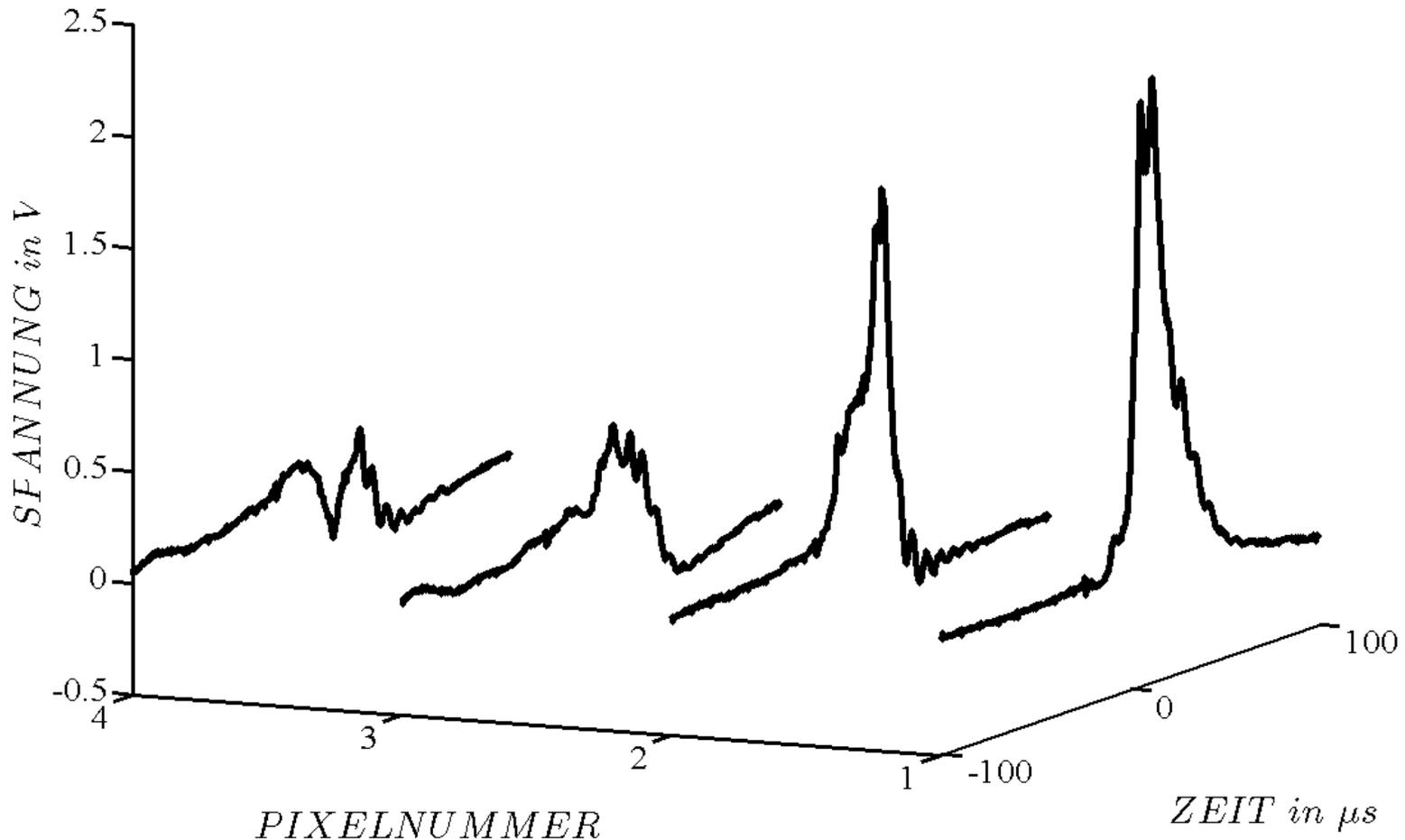
(9/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



5.3.2 Messmethoden (10/15) - örtliche aufgelöste Druckinformationen

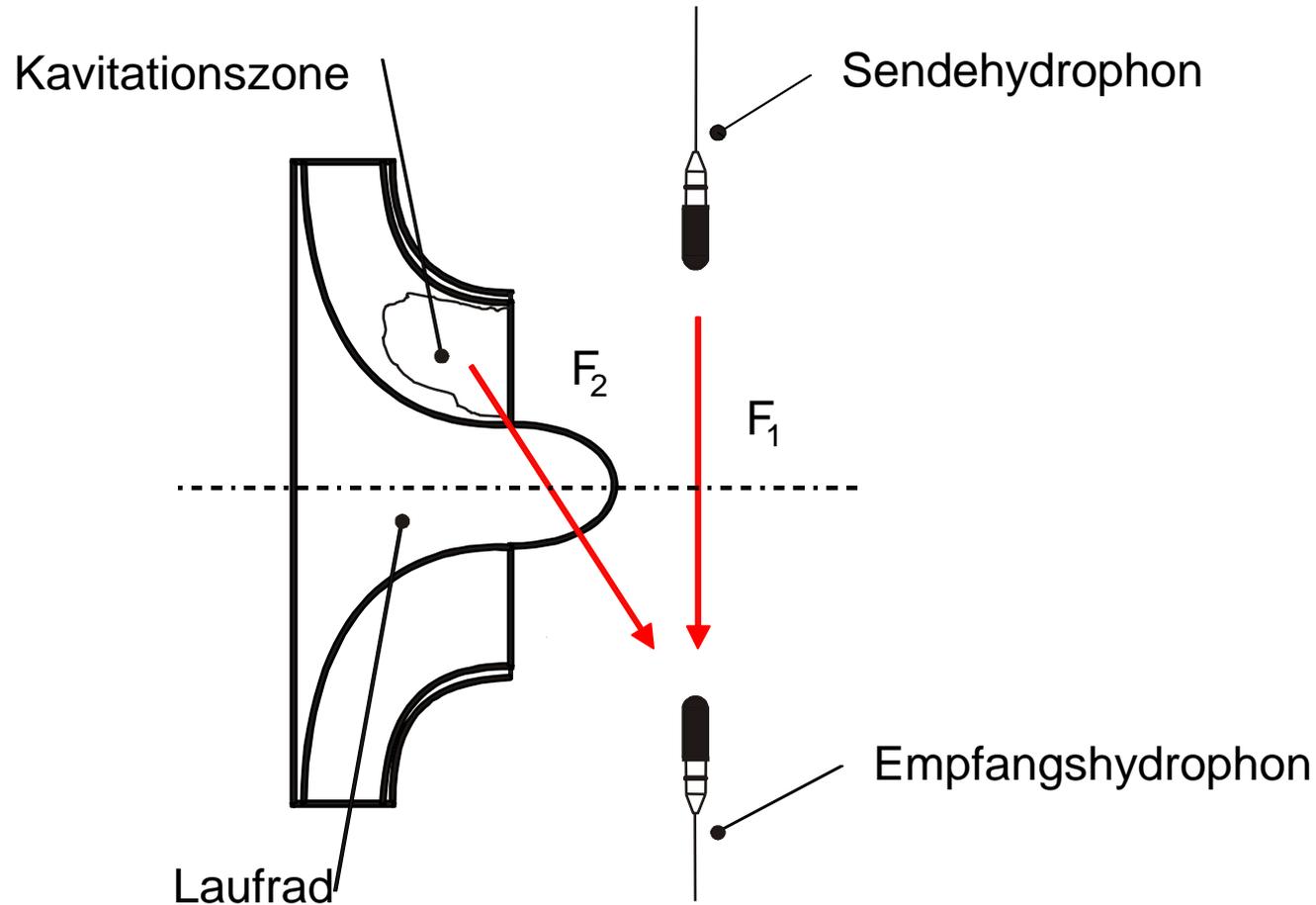


5.3.2 Messmethoden - Schallmessung in der Flüssigkeit

(11/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

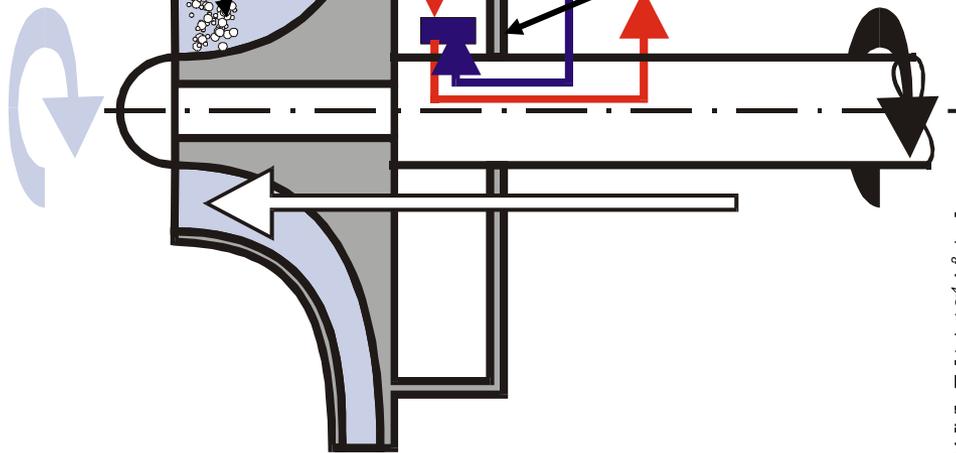
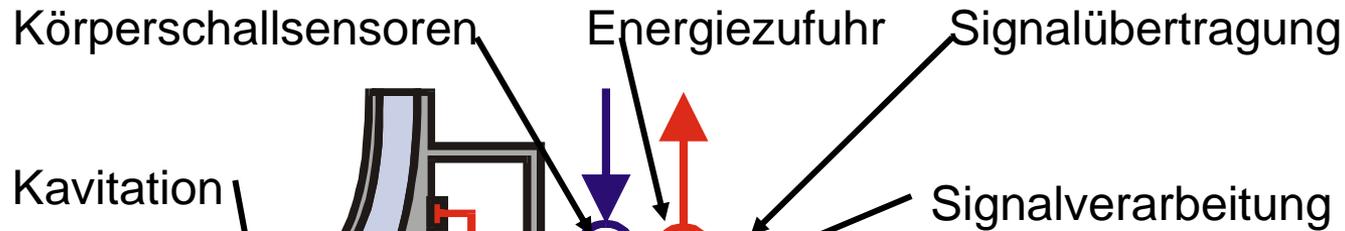


5.3.2 Messmethoden - Schallmessung an der Struktur

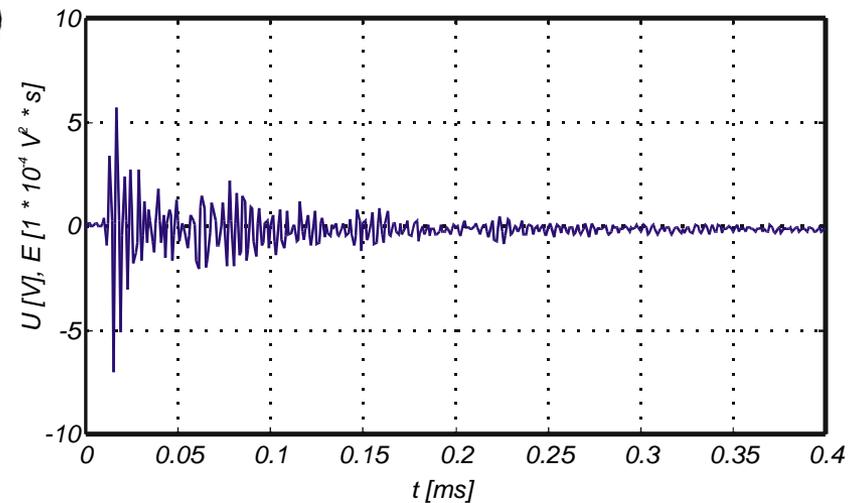
(12/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Rohsignal

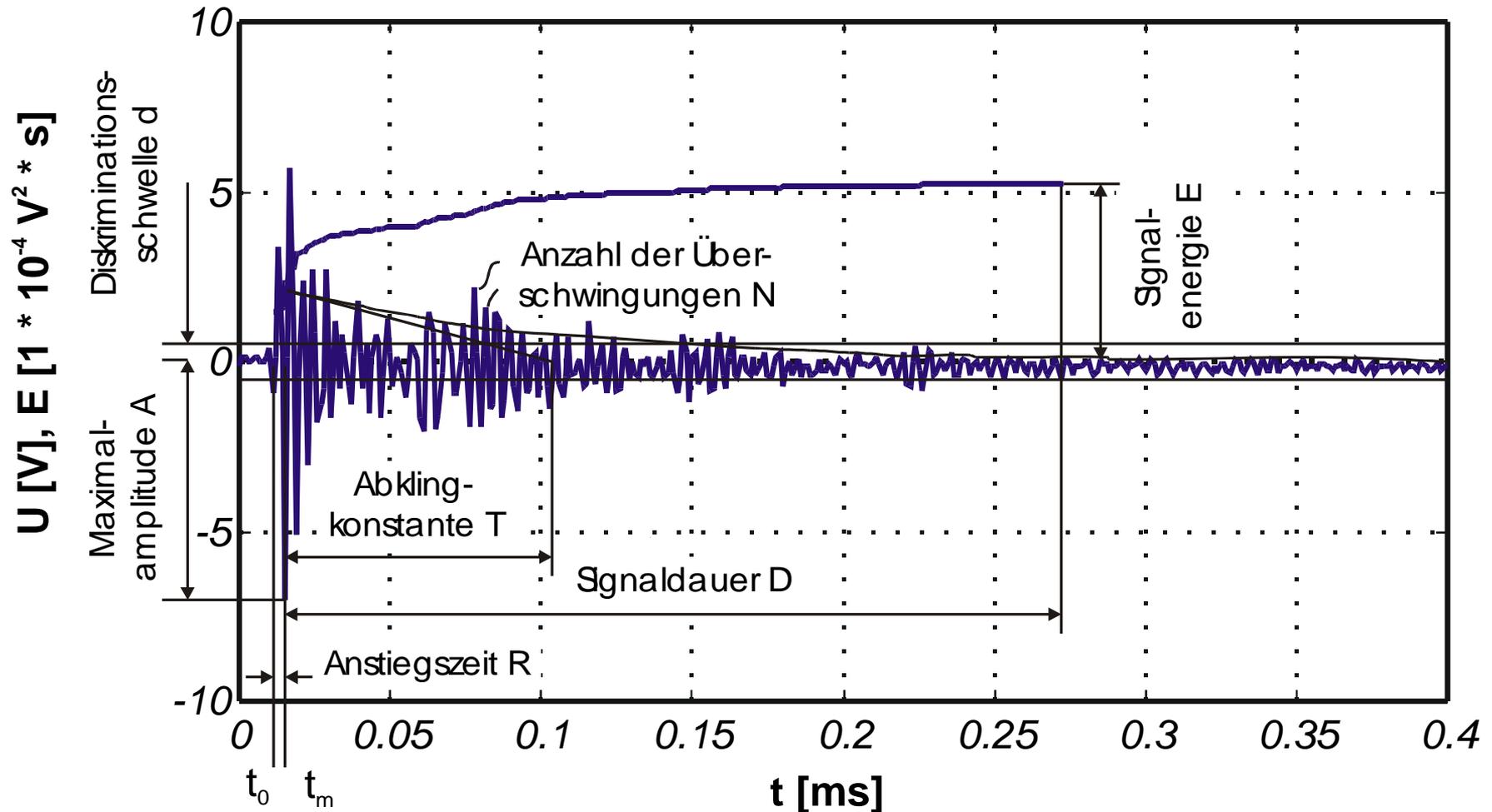


5.3.2 Messmethoden - Schallmessung an der Struktur

(13/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

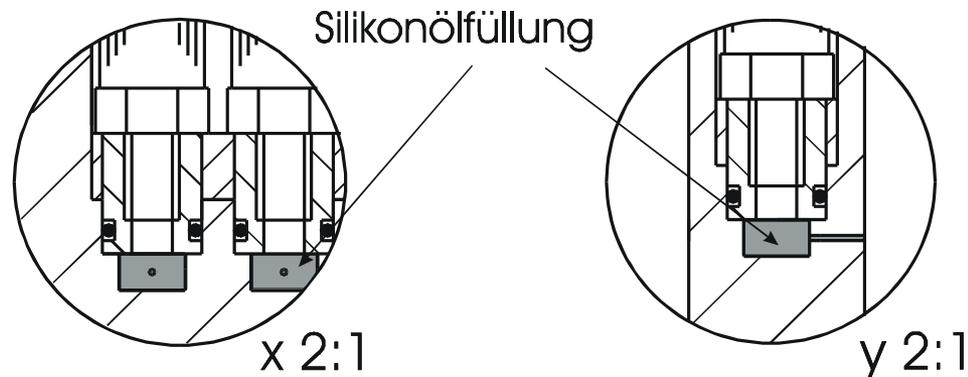
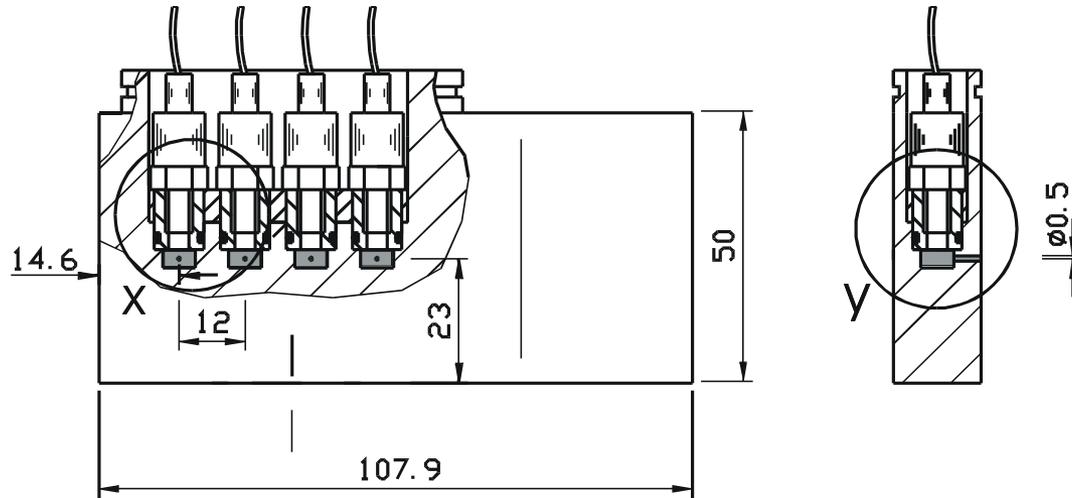


5.3.2 Messmethoden - Makroskopische Druckstöße

(14/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

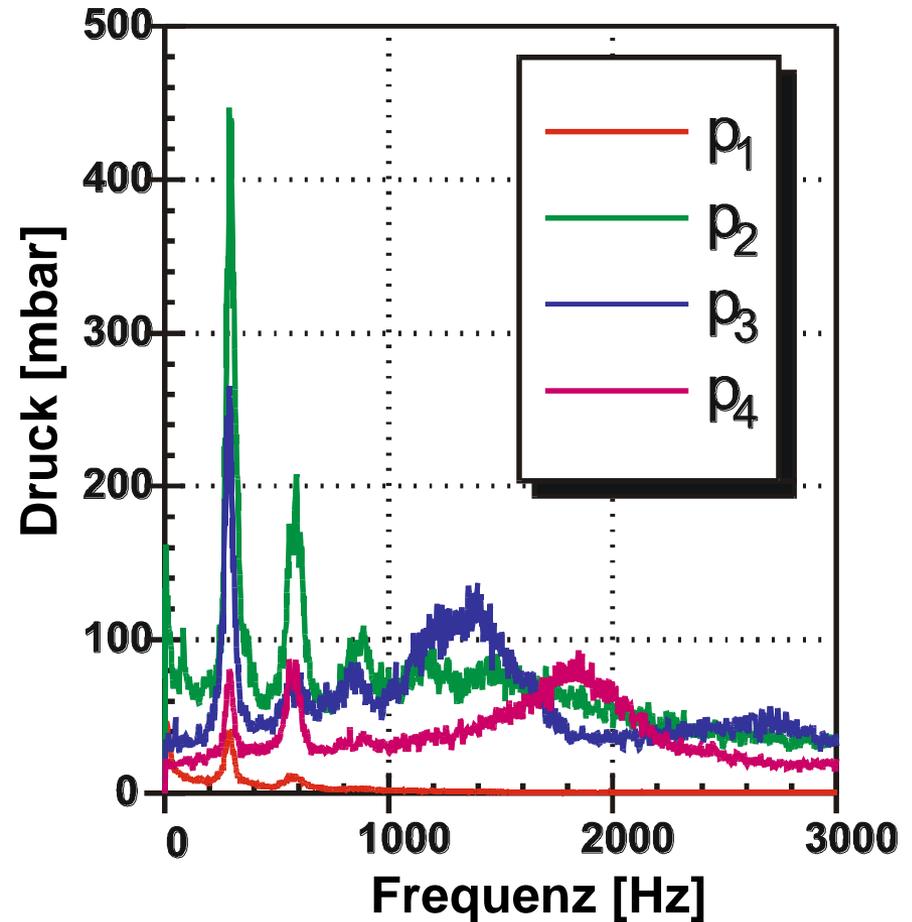
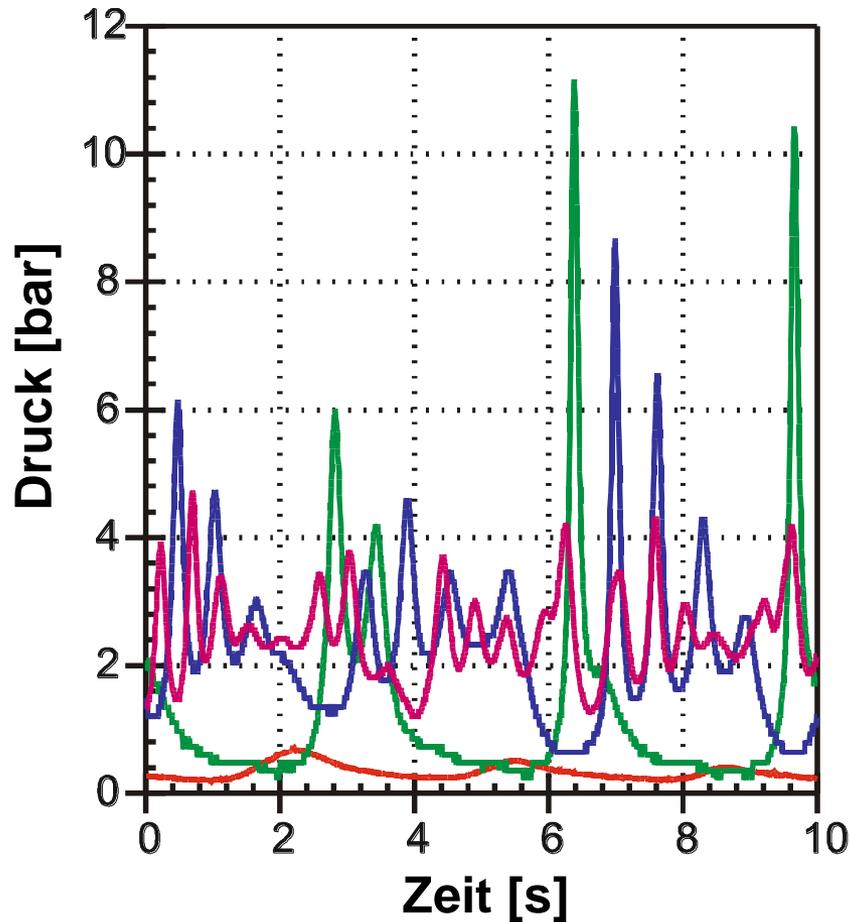


5.3.2 Messmethoden - Makroskopische Druckstöße

(15/15)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



5.3.2 Messmethoden (14) - Zusammenfassung

Direkte Methoden

- Werkstoff als Sensor, d.h. Analyse von „pits“
 - gilt als Referenzmethode
 - Werkstoffabhängiges Ergebnis
 - Auswertung offline
- Drucksensor, d.h. Analyse von Druckimpulsen
 - online
 - Oberfläche und Werkstoff in einer Ebene
 - begrenzte räumliche und zeitliche Auflösung
 - schwierige Applikation

Indirekte Methoden

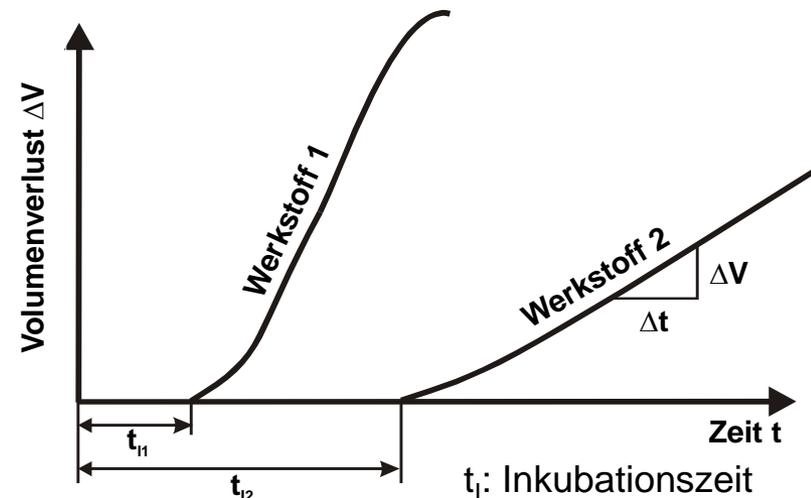
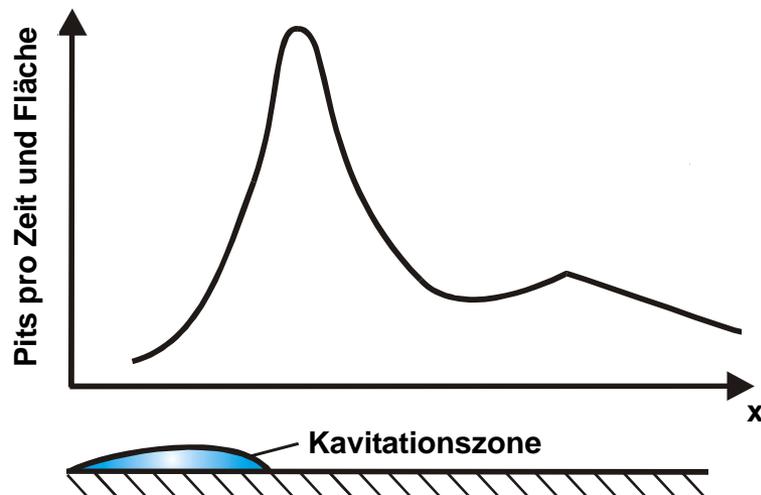
- Erfassung/Analyse von Schallsignalen im Fernfeld
 - online
 - Sensor-Orte frei wählbar
 - Einfluss des Übertragungsweges auf Signale, in-situ (online) Kalibrierung

5.3.2 Messmethoden (15)

Ansätze

- Kavitationsaggressivität = $f(E_{ak})$
- Kavitationsaggressivität = $f(E_{Werkstoff})$
- Messung von **Mean Depth of Penetration Rate (MDPR)**

$$MDPR = \frac{\Delta V}{\Delta t \cdot A_{Erosion}}$$



5.3.2 Messmethoden (16)

Daher Messung von MDPR bzw. pit-Volumen

- als **Maß** für Kavitationsaggressivität bei jeweils gleichem Werkstoff
- zum **Werkstoffvergleich** bei gleicher Aggressivität
(und bestimmter Art von Kavitation)
- zur Ermittlung von **Einflüssen** auf die Kavitationsaggressivität
(bei bestimmter Art von Kavitation)

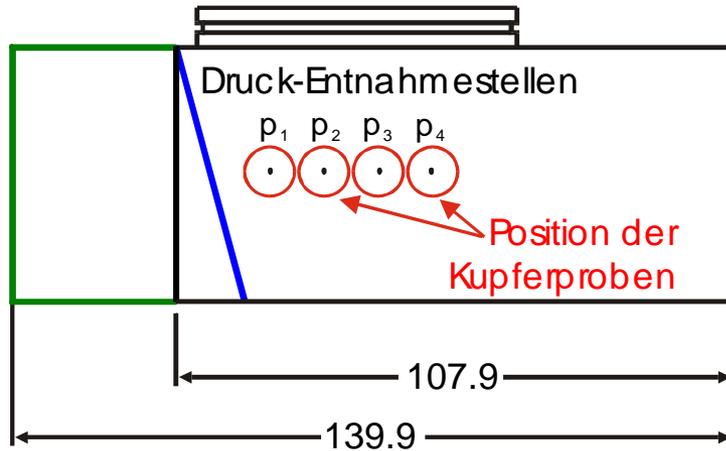
5.3.3 Maßgebende Einflussgrößen (1)



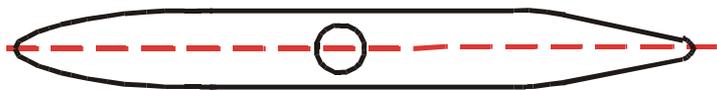
Die für die erosive Aggressivität maßgebenden Einflussgrößen sind

- Fortschrittsgrad → saugseitiger Druck
- Kavitationstyp → Geometrie
- Druckverlauf im Bereich der Kavitation → Geometrie, Fördergrad
- Flüssigkeitseigenschaften → Gasgehalt, Luftinjektion
- Strömungsgeschwindigkeit → Volumenstrom, Drehzahl

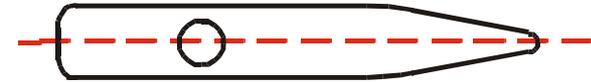
5.3.3 Maßgebende Einflussgrößen (2)



Circular Leading Edge



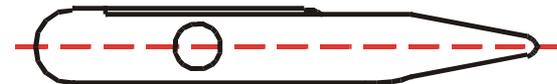
Elliptic Leading Edge 1



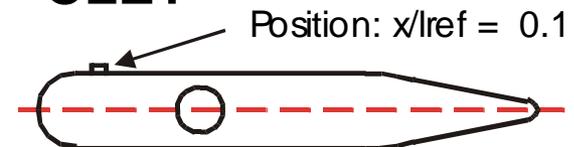
ELE2



ALE1

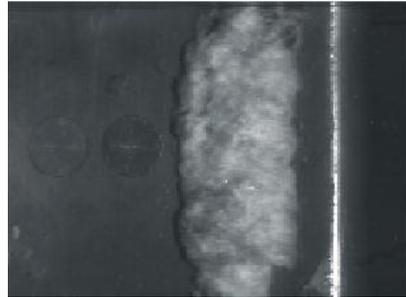


CLE1



CLE2

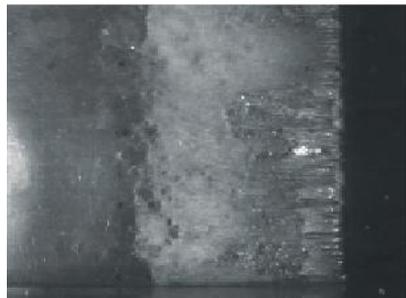
5.3.3 Maßgebende Einflussgrößen (3)



CLE



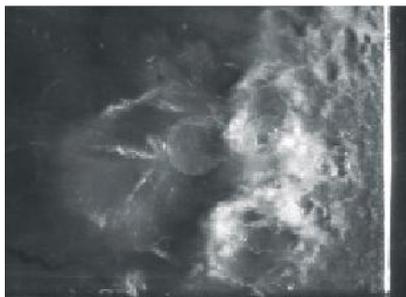
ALE1



ELE1



CLE1



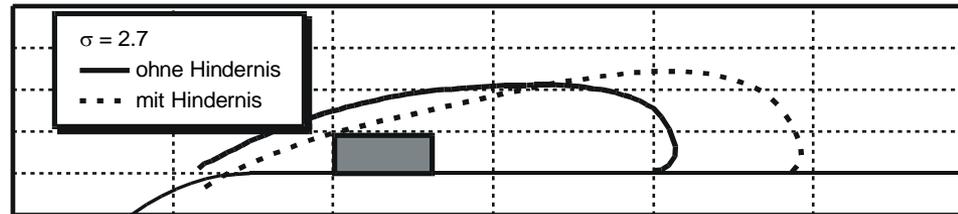
ELE2



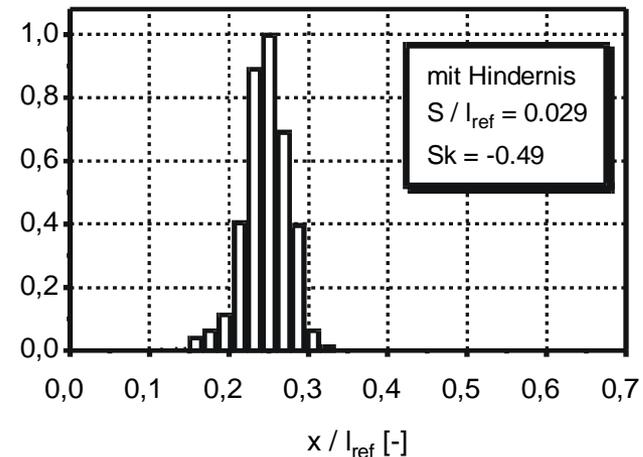
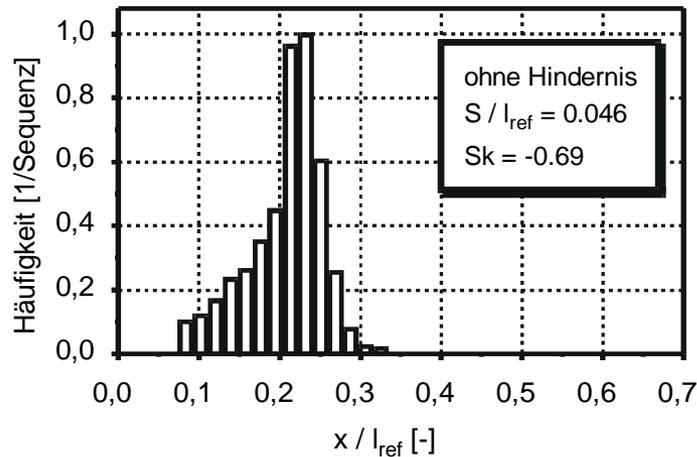
CLE2

5.3.3 Maßgebende Einflussgrößen (4)

Beispiel Geometrievariation: Profil CLE/CLE2 (ohne/mit Hindernis)

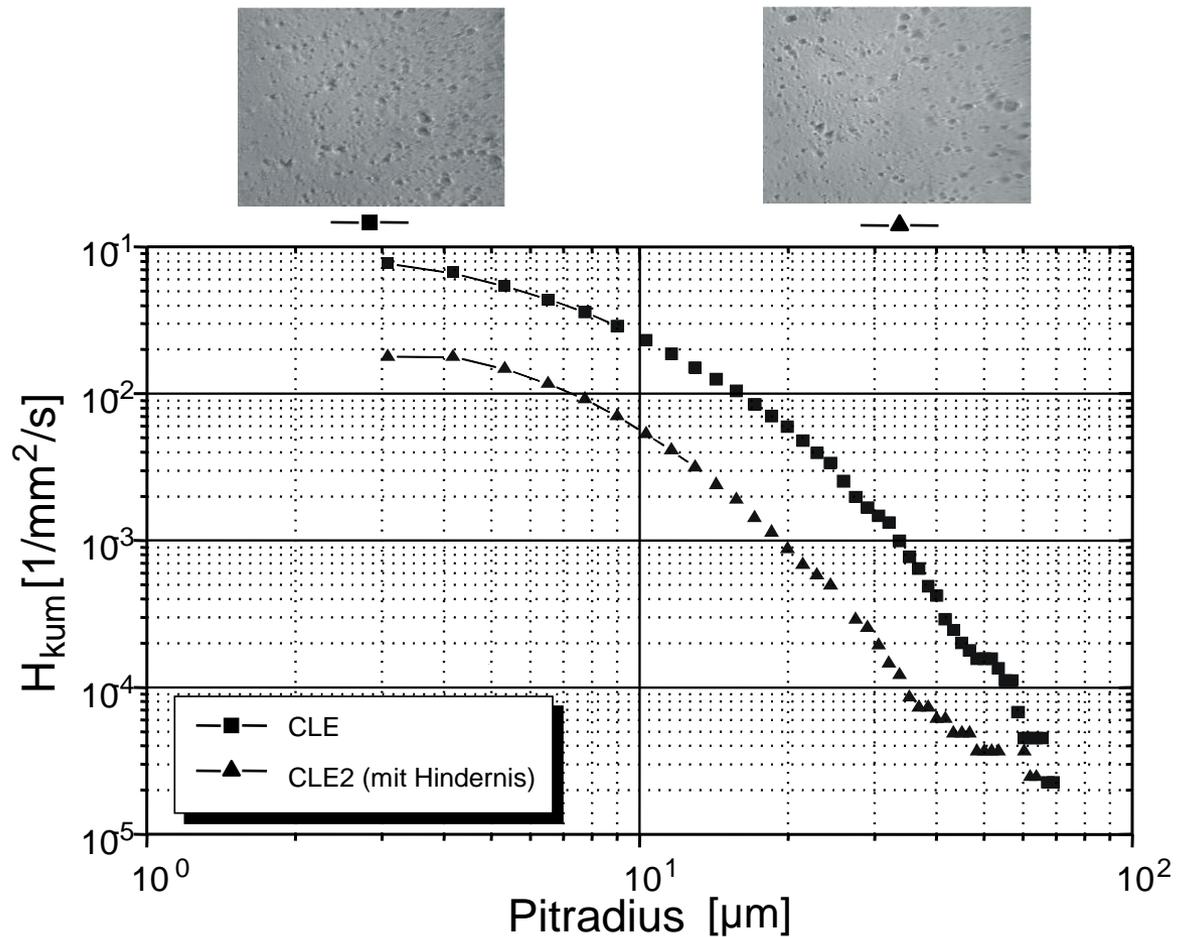


Gemittelte Erscheinungsbilder von Kavitationszuständen



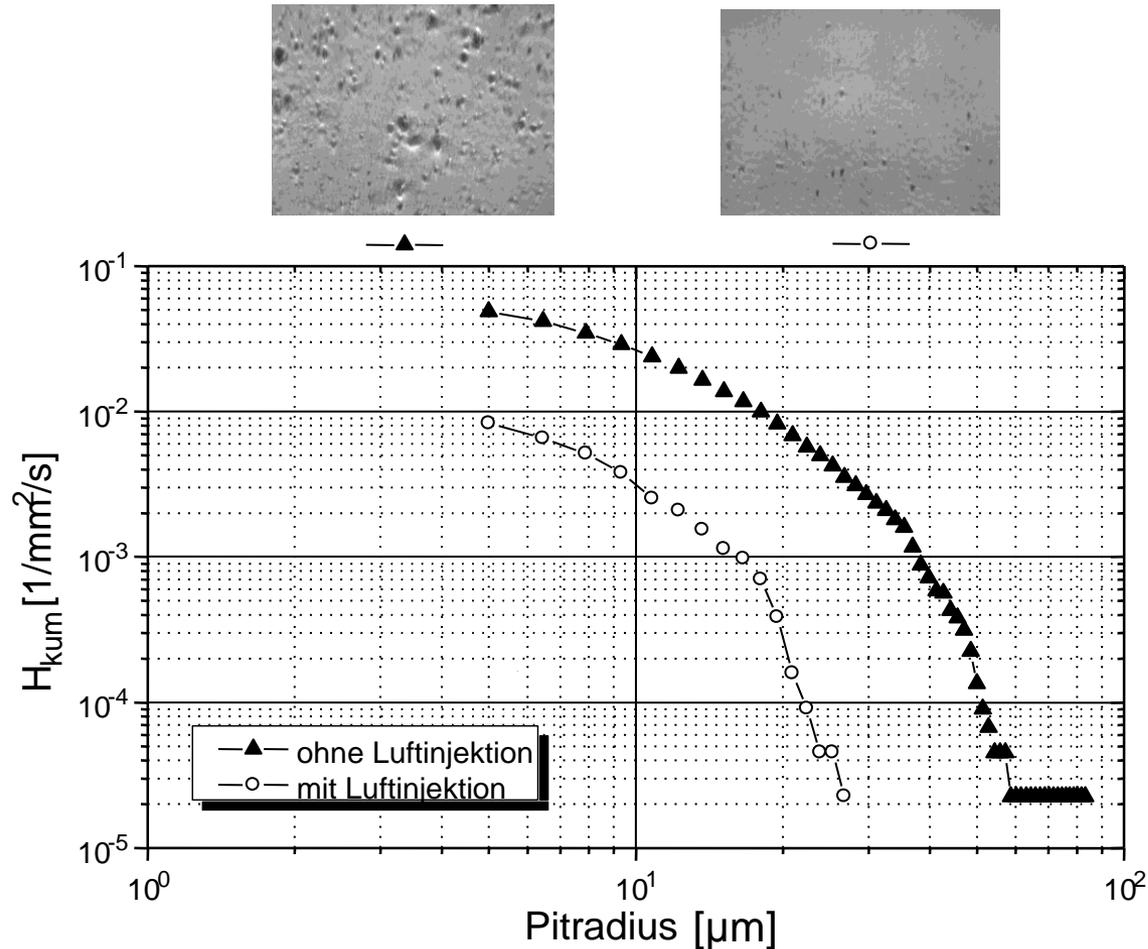
Histogramme der Kavitationslängen

5.3.3 Maßgebende Einflussgrößen (5)



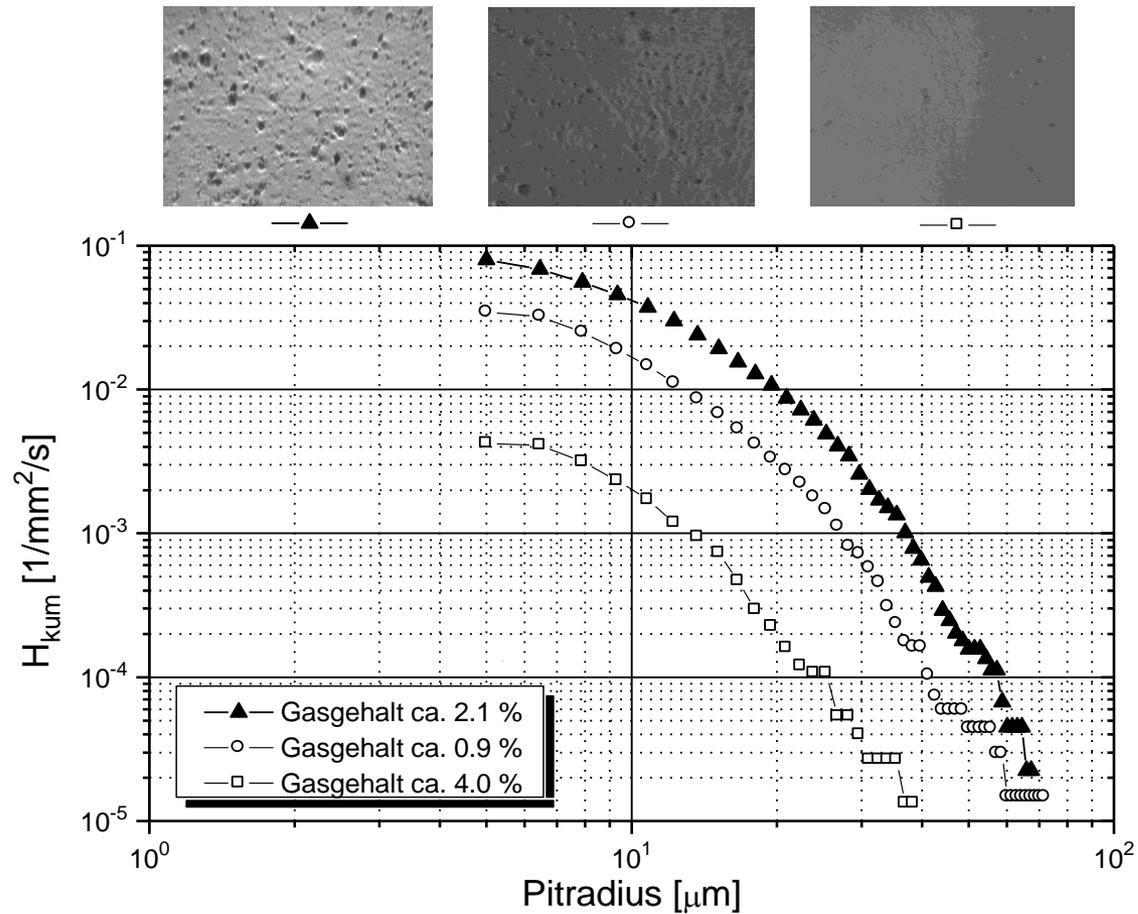
Beschädigte Werkstoffoberflächen und kumuliertes Pitradienhistogramm

5.3.3 Maßgebende Einflussgrößen (6)



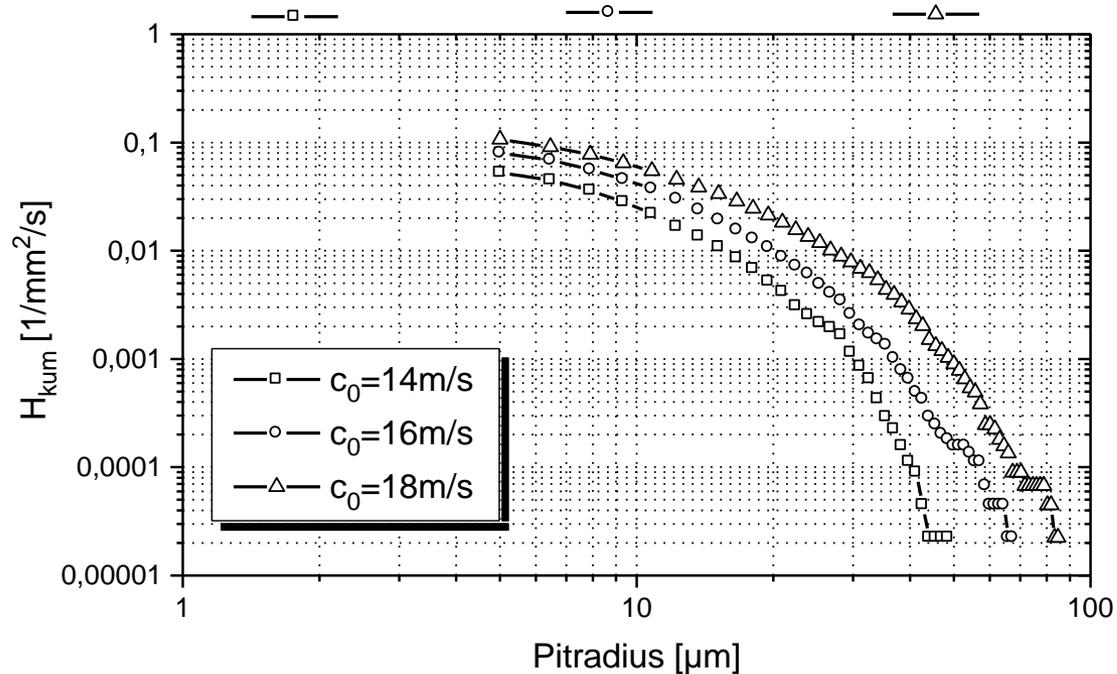
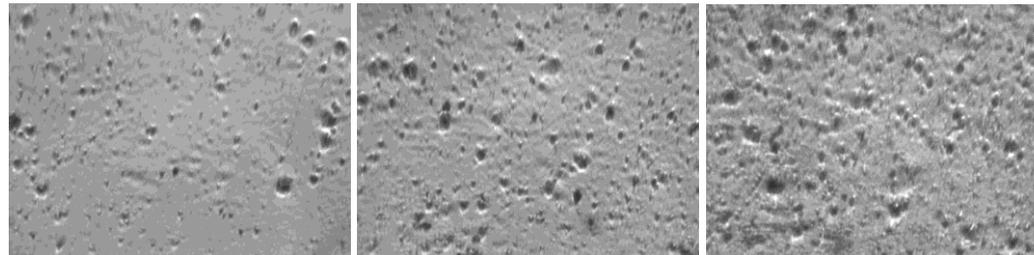
Beschädigte Werkstoffoberflächen und kumuliertes Pitradienhistogramm

5.3.3 Maßgebende Einflussgrößen (7)



Beschädigte Werkstoffoberflächen und kumuliertes Pitradienhistogramm

5.3.3 Maßgebende Einflussgrößen (8)



Beschädigte Werkstoffoberflächen und kumuliertes Pitradienhistogramm