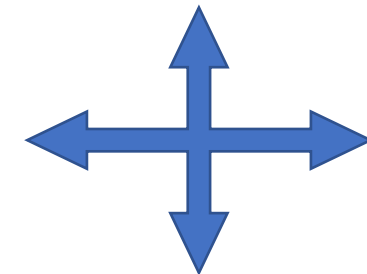


Bestandteile computergestützter Experimente und deren Zusammenspiel

VU Computergestützte Experimente und Signalauswertung SS 2023
Vortragender: Robert Nuster



Privat

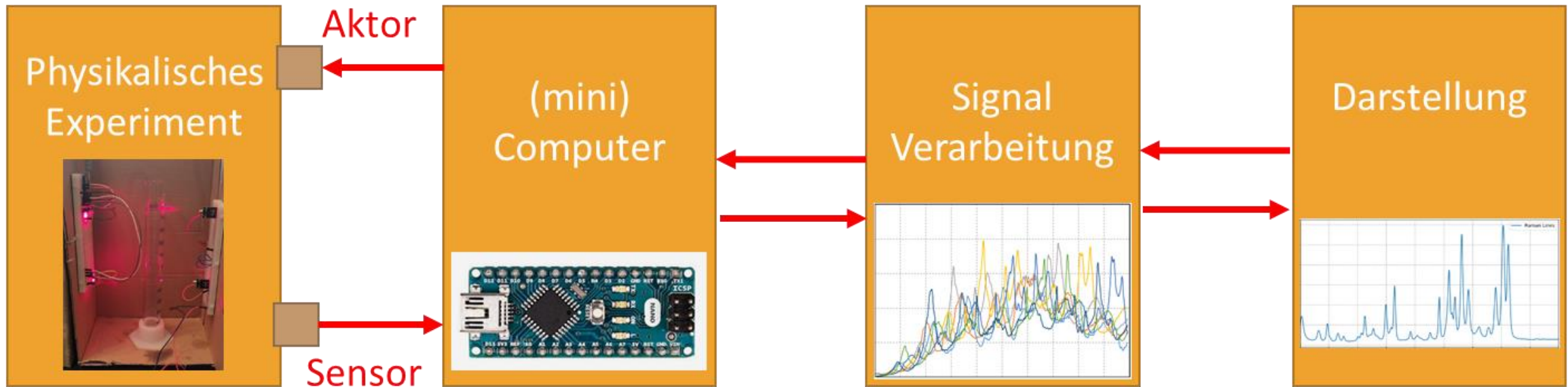
- Funktionsweise automatisierte Vorgänge im täglichen Leben besser verstehen.
- Eigene Automatisierungs- / computergestützte Experimente umsetzen.

UNI-Betrieb

- Vorbereitung auf die Labortätigkeit bei Bachelor-, Master- und Doktorarbeit
 - Technische Probleme lösen
 - Eigenes Messsystem aufbauen
 - Eigene Signalanalysemethoden erproben
- Automatisierung/Optimierung von Messabläufen, z.B. beim zukünftigen Arbeitgeber (UNI, Industrie)



Was ist ein computergestütztes Experiment?



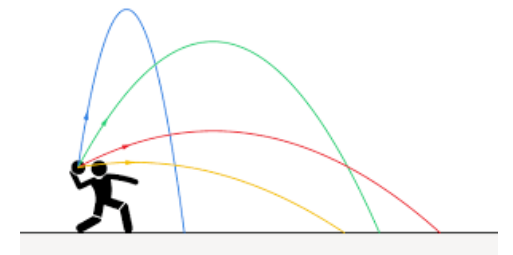
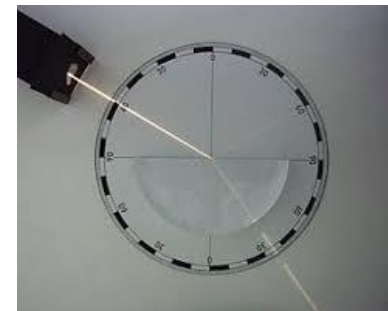
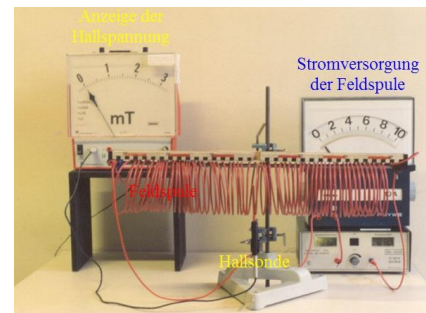
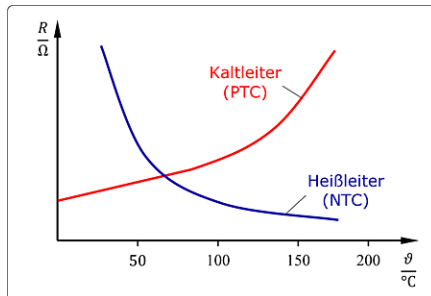
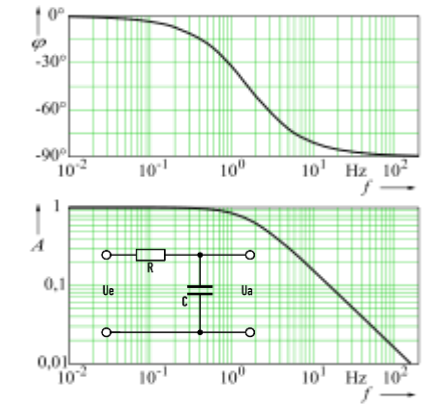
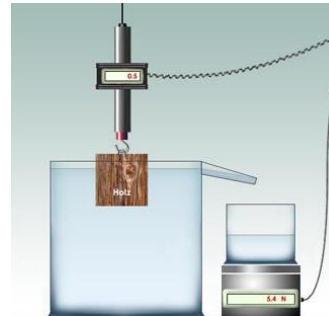
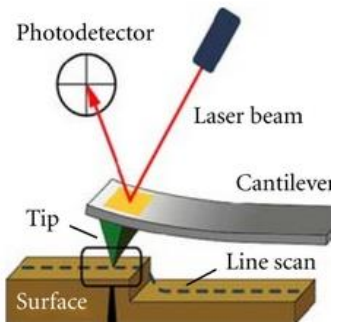
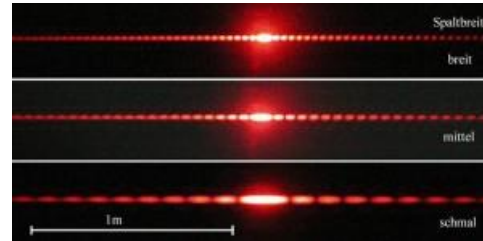
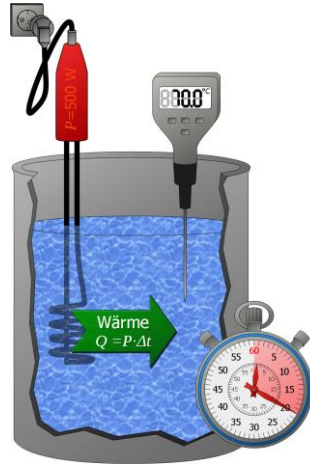
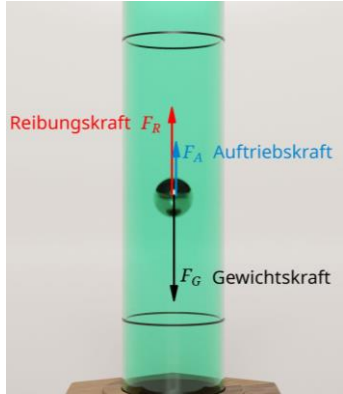
- Beobachtung
- Störgrößen
- Beeinflussung
- Quantifizierung

- Automatisierung
- Quantisierung /
Codierung
- Steuerung /
Regelung

- Filterung / Denoising
- Spektralanalyse
- Korrelationsanalyse
- Validierung

- Bewertung / Fehler
- Vergl. physik. Model
- Diskussion /
Interpretation

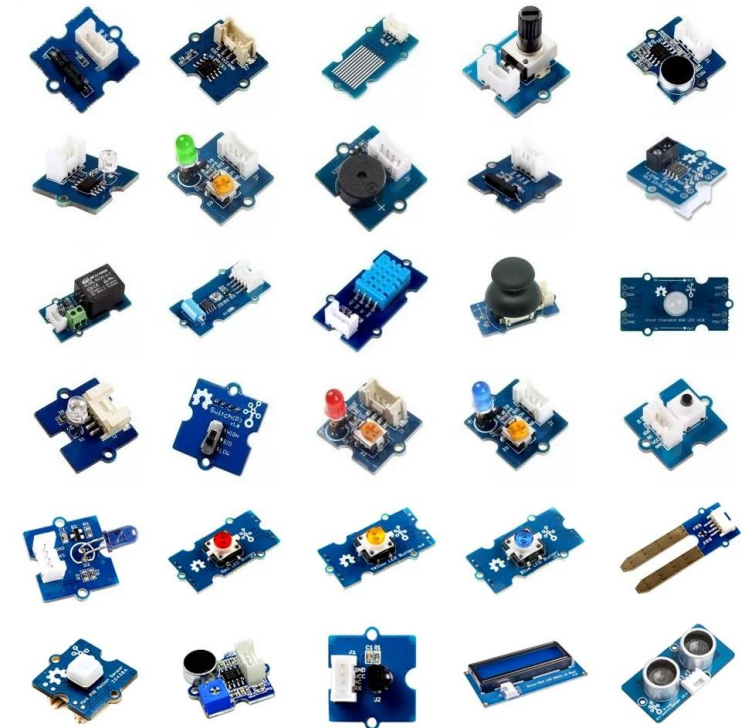
Beispiele: physikalische Beobachtungen



- **Sensor** ist ein Bauteil / Hilfsmittel welches zum quantitativen Erfassen/Messen einer physikalischen Messgröße verwendet wird. Dabei erfolgt eine Umwandlung der Messgröße in ein elektrisches Signal zur leichteren Übertragung und Weiterverarbeitung.

Kategorisierung von Sensoren:

- Aktive oder passiv: Aktive Sensoren benötigen ein externes Versorgungs-/Steuerungssignal. Damit können die Eigenschaften des Sensors gezielt gesteuert werden.
- Analog oder Digital: Analoge Sensoren erzeugen ein kontinuierliches (stufenloses) zeitliches Signal, welches am Analog-Ausgang als Spannungssignal meist im Bereich von 0-5V abgegriffen werden kann. Digitalen-Sensoren liefern diskrete, digitale Werte und beinhalten somit bereits die Digitalisierung und die Schnittstelle für die digitale Datenübertragung (z.B. I2C).



Beispiel: Typen von Temperatursensoren

Passiver Sensor

Widerstands-
thermometer (RTD)



- Dynamikbereich: $-50^{\circ}\text{C} \sim 250^{\circ}\text{C}$
- PT100 (100Ω @ 0°C)
- Genauigkeit: Klasse A, 0.5°C
- Schnittstelle: analog

Aktiver Sensor



- Dynamikbereich: $-55^{\circ}\text{C} \sim 150^{\circ}\text{C}$
- Linear $+10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ Skalierungsfaktor
- Genauigkeit: 0.5°C
- Stromverbrauch: $60\mu\text{A}$
- Schnittstelle: analog
- Versorgungsspannung: 4V bis 30V

Digitaler Sensor



- Dynamikbereich: $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$
- Features: 8x Sensoren an einem I²C Bus
- Genauigkeit: 0.25°C
- Auflösung: 0.0625°C
- Messzeit: 30ms – 250ms
- Stromverbrauch: $200\mu\text{A}$
- Schnittstelle: I²C

<https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/25095A.pdf>

Beeinflussung der Beobachtung der Messung mit Aktoren

- **Aktuator** ist ein Bauteil / Hilfsmittel, welches ein elektrisches Signal in eine mechanische Bewegung zur Positionierung oder Änderung einer physikalischen Größe wie z.B. Druck, Temperatur, Lichtstärke, usw. Bewirken, um damit in einen Prozess eingreifen zu können.

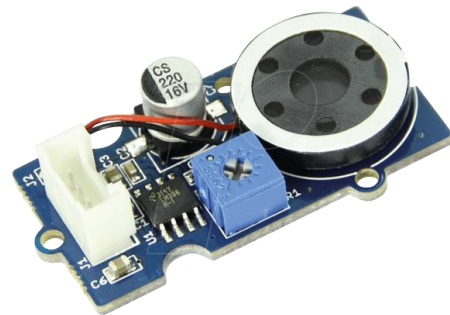
LEDs



Laser



Lautsprecher / Schallgeber



Ultraschallgeber / Detektor



Elektromagneten



Peltierelement
heizen/kühlen



Piezoaktuatoren



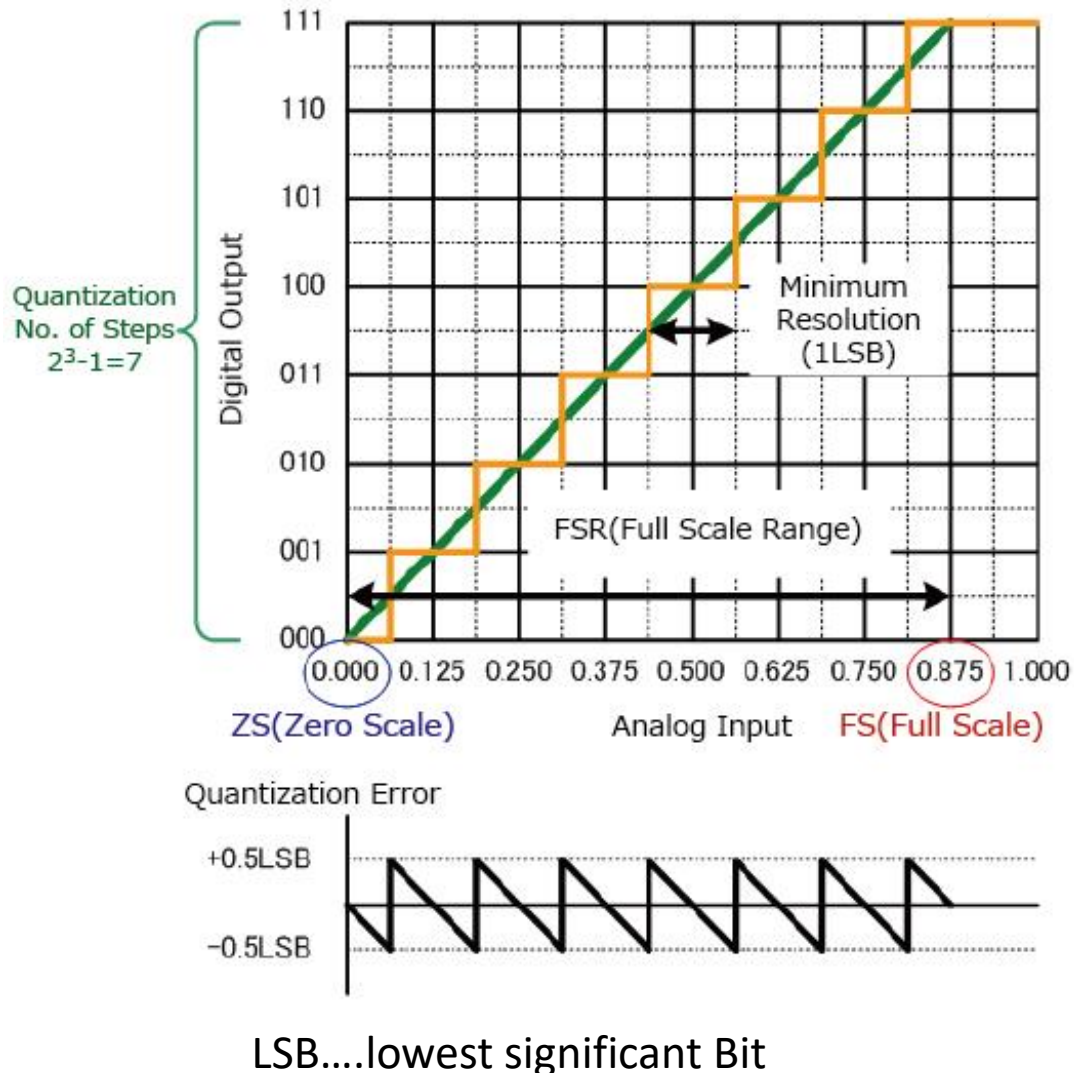
Pumpen



Schritt- /Servomotoren



Schnittstelle zwischen analoger und digitaler (quantisierten) „Welt“ (ADC- und DAC)



- ADC (**A**nalog to Digital Converter): Umwandlung analoges Spannungssignal in ein digitales (diskretisiertes) binäres Signal.

ADC Eigenschaften bezogen z.B auf Arduino Nano:

- Integriert oder als eigener Baustein/Chip
- Auflösung – Arduino Nano 10 Bit
- Messbereich: z.B. 0-5V
- Messzeit
 - Architektur/Genauigkeitsabhängig
 - $1/\text{Messzeit} = \text{max. Abtastrate}$
- SNR
 - Arduino eher schlechtes SNR
 - Externe ICs gutes SNR
 - Externe meist höhere Auflösung



Adafruit ADS1115 Board
Quelle: adafruit.com

Wieviel Bits dürfen es sein?

Auflösung:

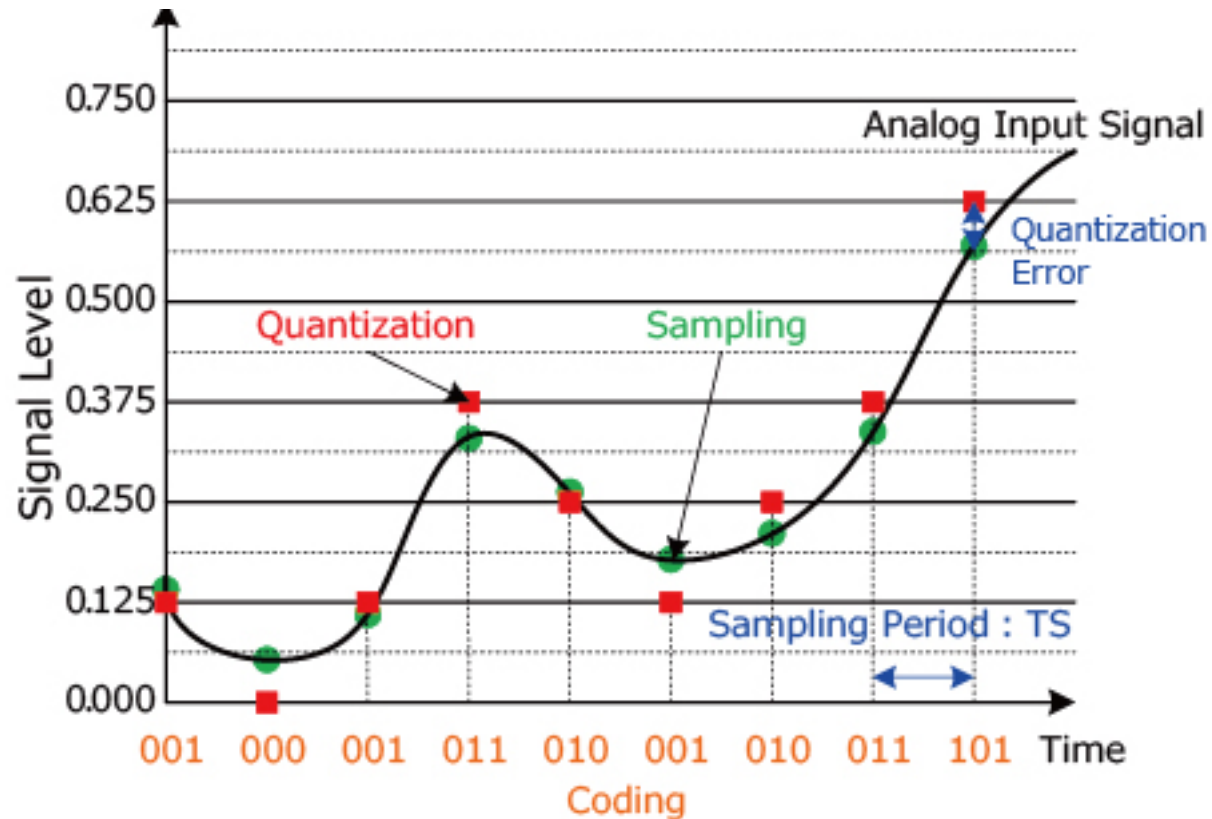
$$R_{\%} = \frac{100\%}{2^n} \text{ oder } R = n \text{ Bit}$$

$$\text{Accuracy}[V] = \frac{\text{Voltage Range}[V]}{2^n} = \frac{5V}{2^{10}} = 4.88 \text{ mV} \dots \text{for Arduino Nano}$$

Number of binary Bits n	Full-Scale (FS) Dezimale Value (2 ⁿ)	Resolution in % R _%	Accuracy in voltage for 1V Full-Scale range	Quantization error, % of FS range	Dynamic range 6.02*n (dB)
4	16	6.25	63 mV	3.12	24
6	64	1.56	16 mV	0.78	36
8	256	0.3906	3.9 mV	0.195	48
10	1024	0.0977	0.98 mV	0.0488	60
12	4096	0.0244	0.24 mV	0.0122	72
14	16384	0.00610	61 μV	0.00305	84
16	65536	0.00153	15 μV	0.00075	96

Z.B. Temperaturmessung von -40° bis 60° mit 0.5° Auflösung gefordert. Die geforderte Auflösung entspricht 0.5 % des Messbereichs, daher sollte ein ADC mit **8 Bit** Auflösung genügen.

Schnittstelle zwischen analoger und digitaler (quantisierten) „Welt“ (ADC- und DAC)



In welchen Zeitabständen sollte gemessen werden?

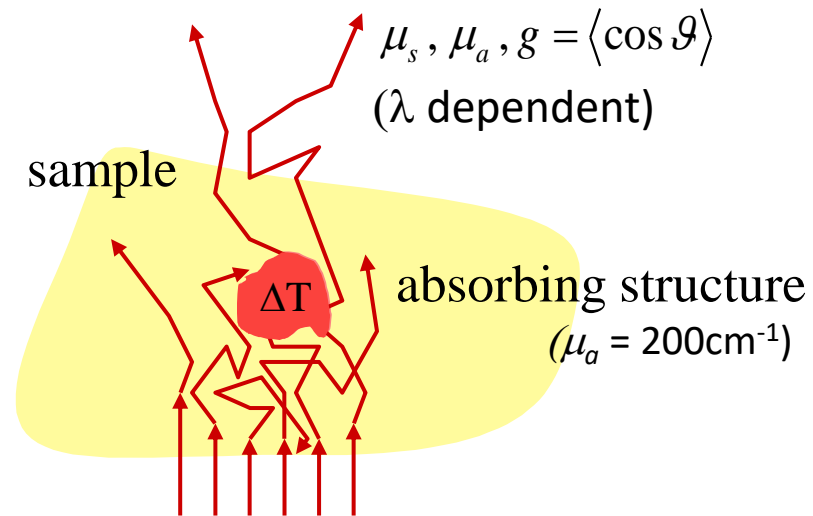
- Nyquist-Shannon Abtasttheorem: Die Abtastfrequenz f_{SF} (sampling frequency) muss mindestens doppelt so groß sein als die im Nutzsignal maximal vorkommende/abzutastende Frequenz f_{max} .

$$f_{SF} \geq 2 \cdot f_{max}$$

- In der Praxis wählt man für die Abtastfrequenz

$$f_{SF} = 3 \text{ bis } 5 \cdot f_{max}$$





laser pulse

$\tau_p < \frac{d}{v} = \frac{1}{\mu_a v}$

stress confinement

absorption/ heating

$$\Delta T(\vec{x}) = \frac{H(\vec{x}) \cdot \mu_a(\vec{x})}{c_p \cdot \rho}$$

typical $\Delta T \approx \text{mK} - \text{K}$



initial pressure distribution

$$p_0(\vec{x}, t = 0) = \frac{\beta v^2}{c_p} \cdot \mu_a(\vec{x}) \cdot H(\vec{x})$$

Γ Grüneisen coefficient

$H(x)$ = radiant exposure

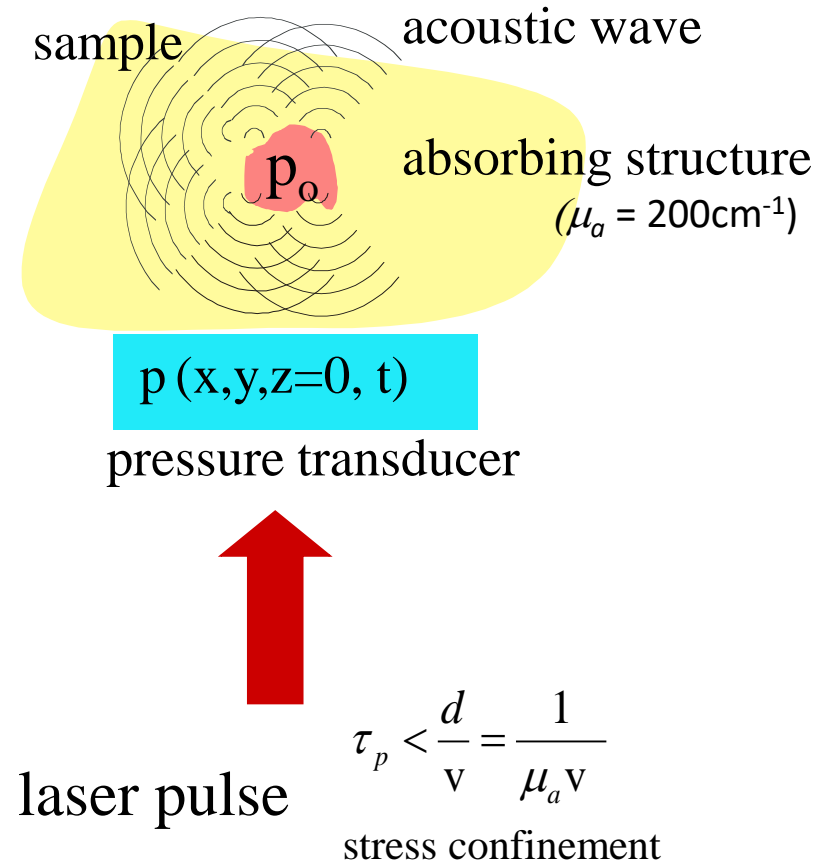
typical $p_0 \approx \text{mbar} - \text{bar}$

Analogie Druckkochtopf



Umwandlung von Lichtenergie
in mechanische Energie.

Funktionsweise der Photoakustik



↓
wave propagation

$$\frac{\partial^2 p(\vec{x}, t)}{\partial t^2} - v^2 \Delta p(\vec{x}, t) = \Gamma \frac{\partial}{\partial t} S(\vec{x}, t)$$

$S(\vec{x}, t)$ = heat producing radiation deposited in the tissue per unit volume and unit time

$$S(\vec{x}, t) = \mu_a(\vec{x}) \cdot H(\vec{x}) \cdot \delta(t)$$

Funktionsweise der Photoakustik

General solution of the PA wave equation:

$$p(x, t) = \frac{1}{4\pi v} \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{1}{vt} \int_{S(x, t)} p_0(x') dx' \right],$$

with $p_0(x') = \Gamma(x') \mu_a(x') H(x')$

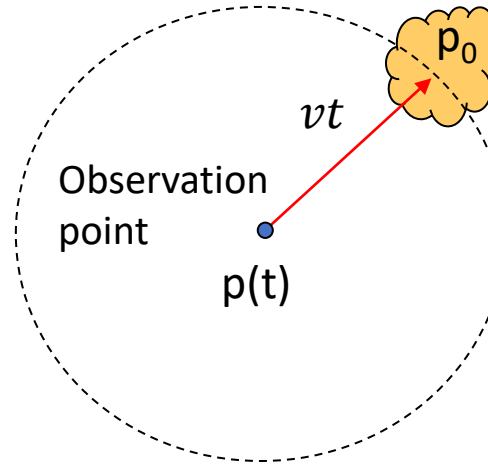
...the integral is performed along a spherical surface $S(x, t)$ with radius $|x' - x| = vt$.

Special case: homogeneously absorbing sphere:

$$p_{sph}(x, t) = p_0 \frac{R - vt}{2R} \Theta \left(\frac{d_a}{2} - |R - vt| \right)$$

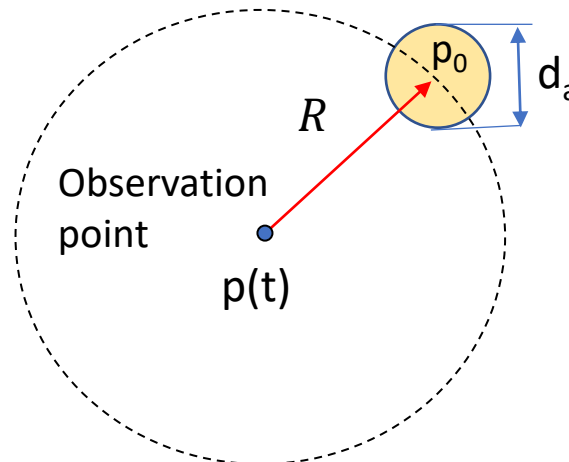
Heavyside function

Initial pressure source

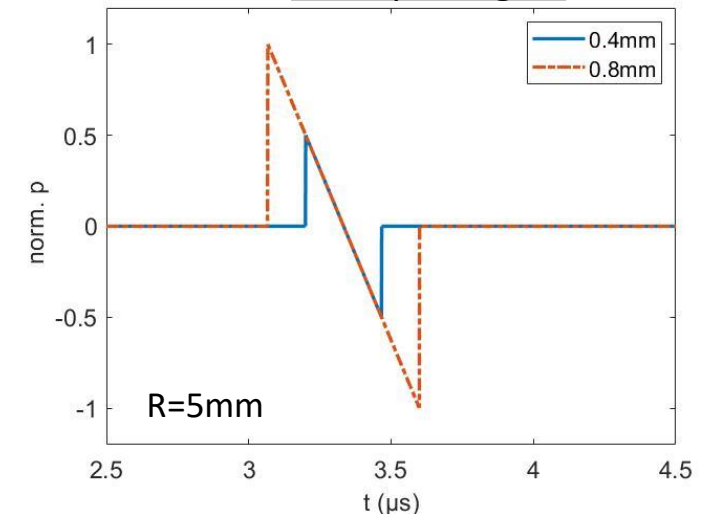


Welche Druckamplituden und daraus folgende Signalstärken sind zu erwarten?

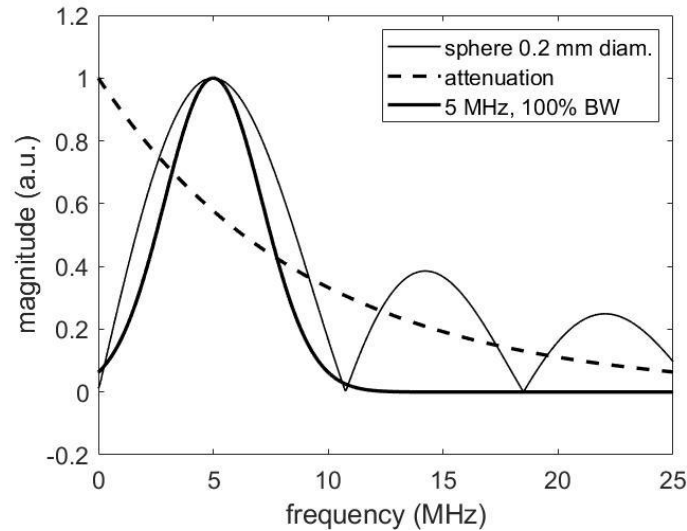
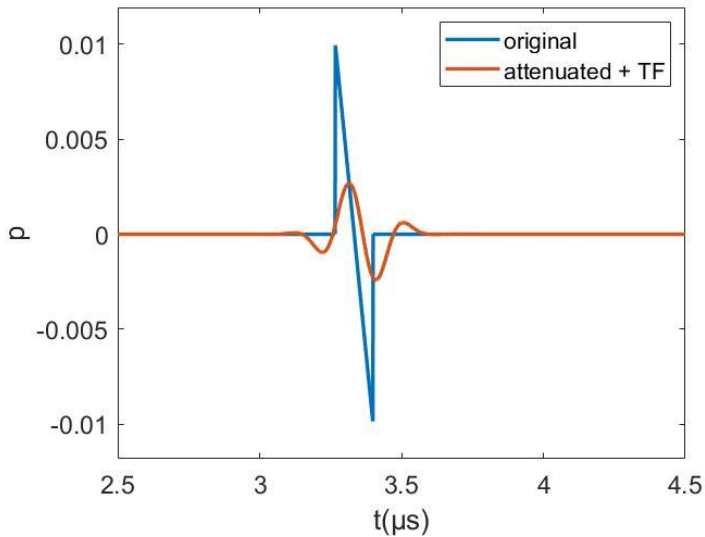
$$p_{sph}^{max} = p_0 \cdot \frac{d_a}{4R}$$



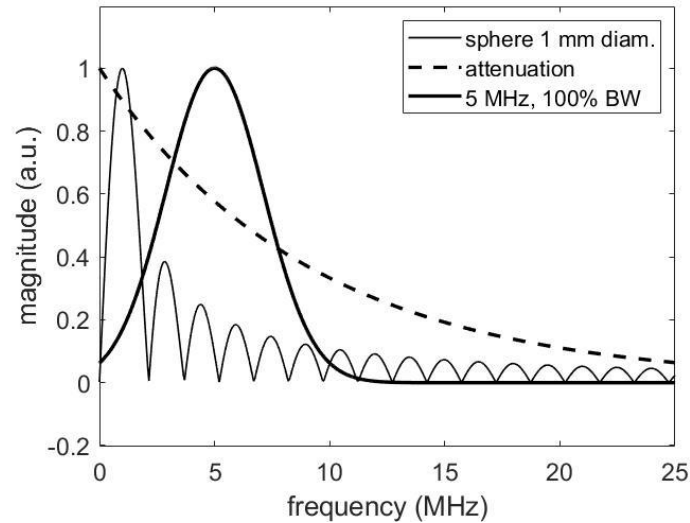
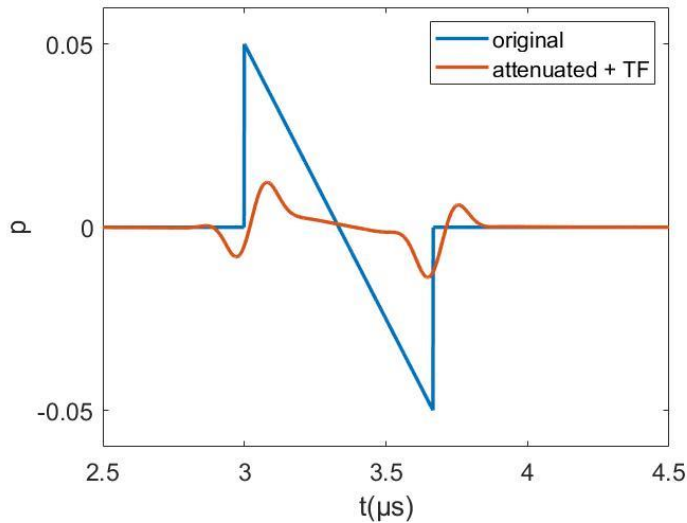
N-shaped signal



Abhängigkeit der Signalform von der Detektionsbandbreite

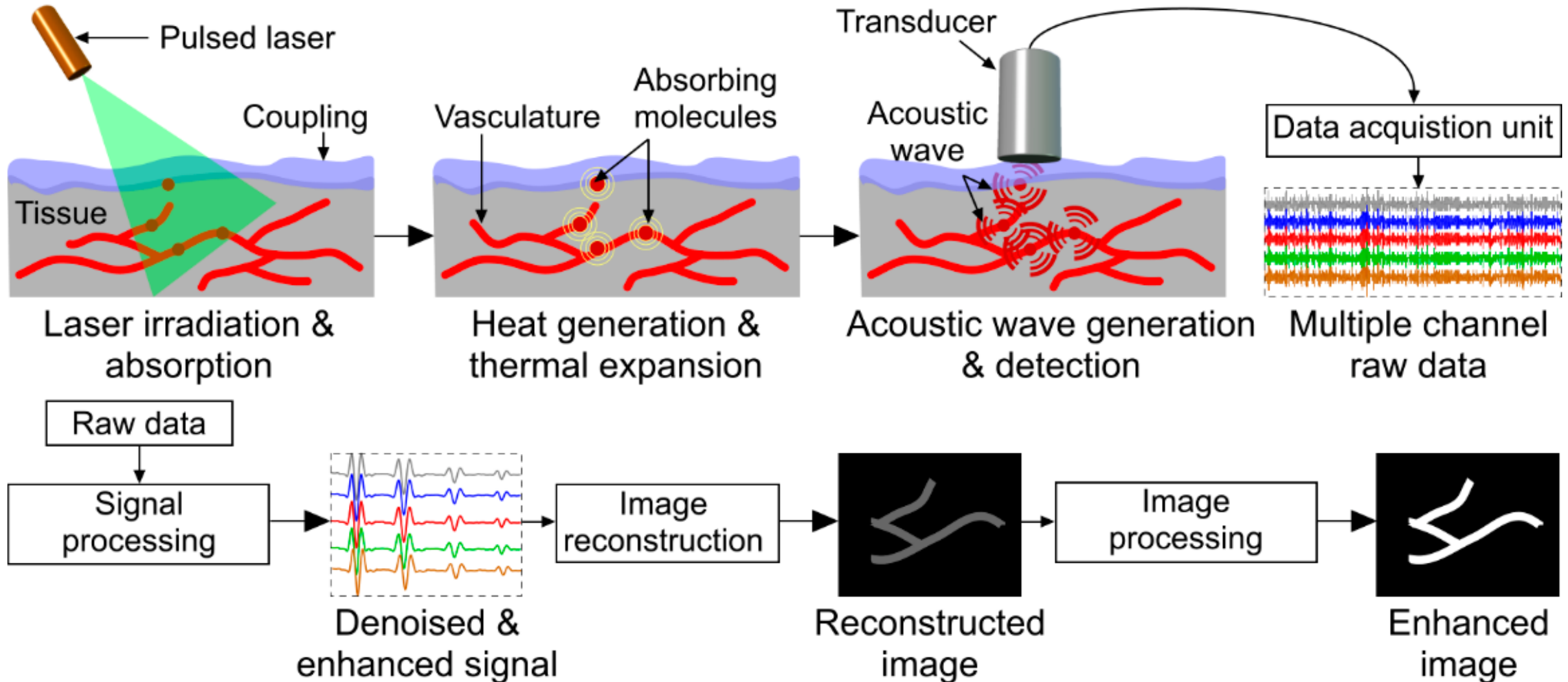


Measured
with „point“
detector

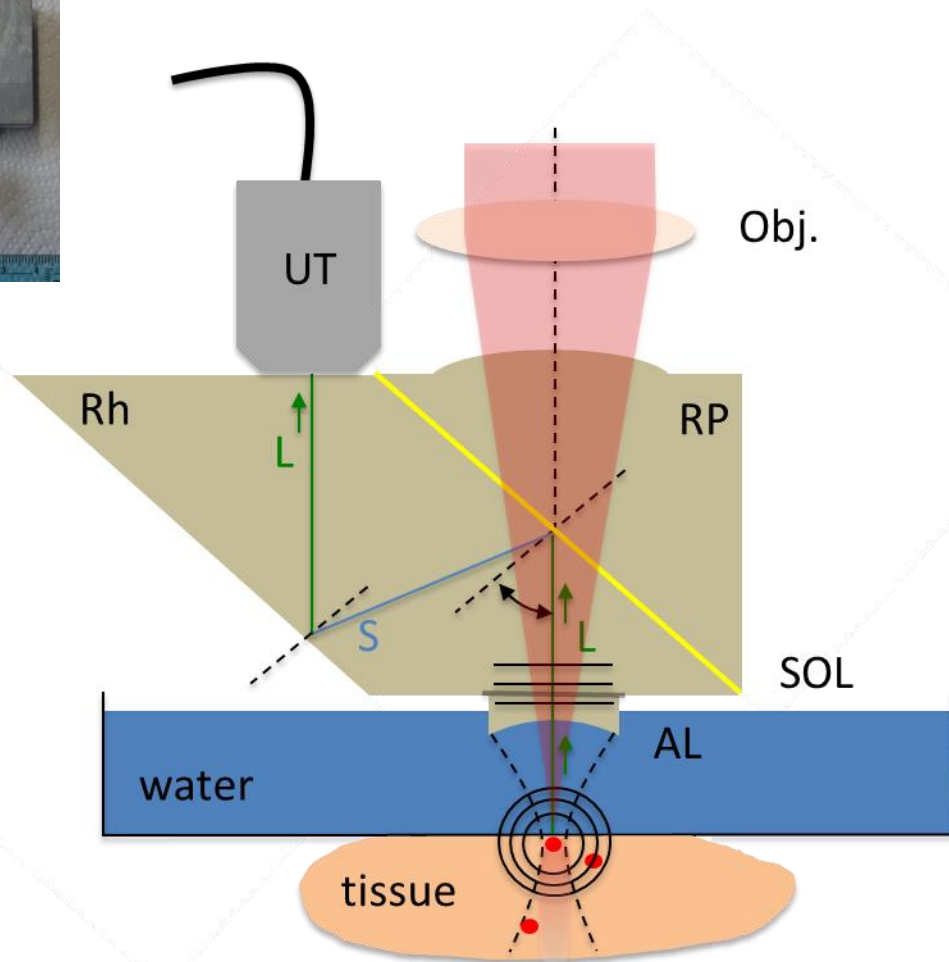


Bei nicht angepasster Bandbreite
entspricht die Signalform nicht den
waren Abmessungen vorkommender
Strukturen. Es können dadurch
Bildartefakte entstehen.

Funktionsweise der photoakustischen Bildgebung



Mögliche Implementierung eines photoakustischen Mikroskops



S. Hu, et.al., Optics Letters, V36,No.7 (2011)

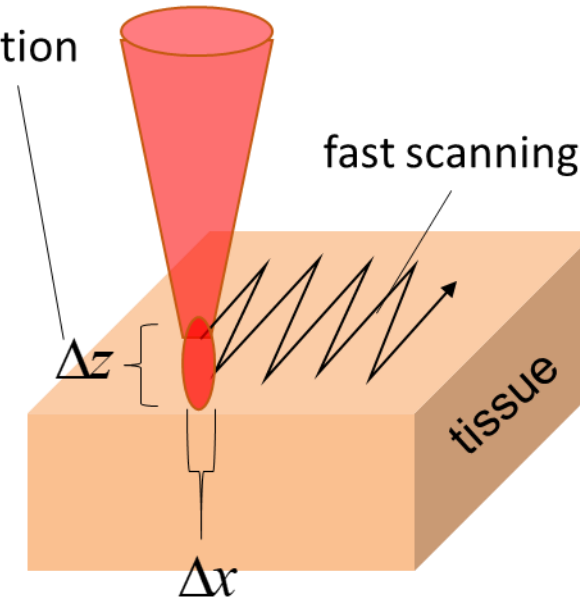
2D-raster scan

axial resolution

ultrasound
time resolution

laser beam or
Ultrasound scan-head

fast scanning

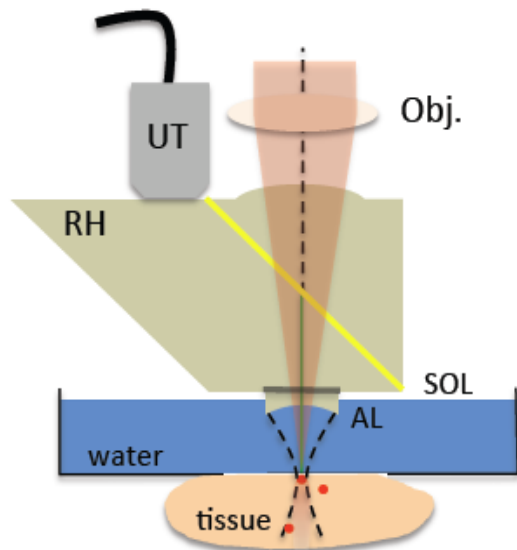


lateral
resolution

laser focus
or
acoustic focus

Mögliche Implementierung & erzielbare laterale Auflösung

OR-PAM

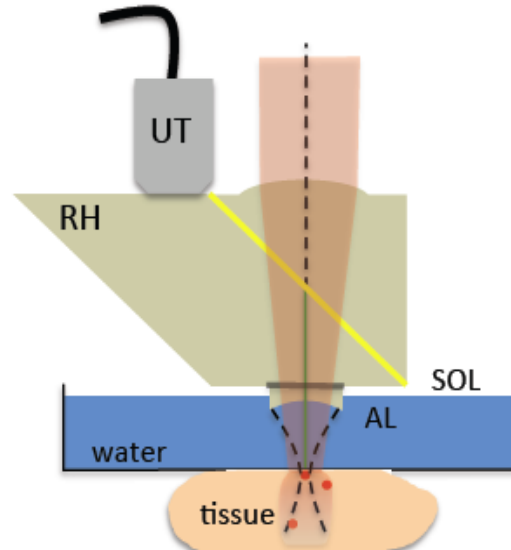


Diffraction limited
optical illumination

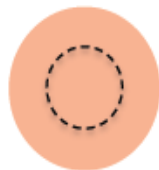


$$l_{or} \approx \frac{\lambda^{obj}}{NA^{obj}}$$

BF-AR-PAM



Large field
illumination



$$l_{ar} \approx \frac{c_{H2O}}{f^{us} \cdot NA^{us}}$$

Beispiel OR-PAM:

$$\lambda^{obj} = 532 \text{ nm}$$

$$NA^{obj} = D^{LB} / 2F^{Obj} = 0.4$$

$$l_{or} \approx 1.3 \mu\text{m}$$



Beispiel AR-PAM:

$$c_{H2O} = 1500 \text{ m/s}$$

$$f^{us} = 50 \text{ MHz}$$

$$NA^{us} = D^{AL} / 2F^{AL} = 0.4$$

$$l_{AR} \approx 75 \mu\text{m}$$



Spezielle Anforderungen
an Implementierung!

λWellenlänge

NAnumerische Apertur

cSchallgeschwindigkeit

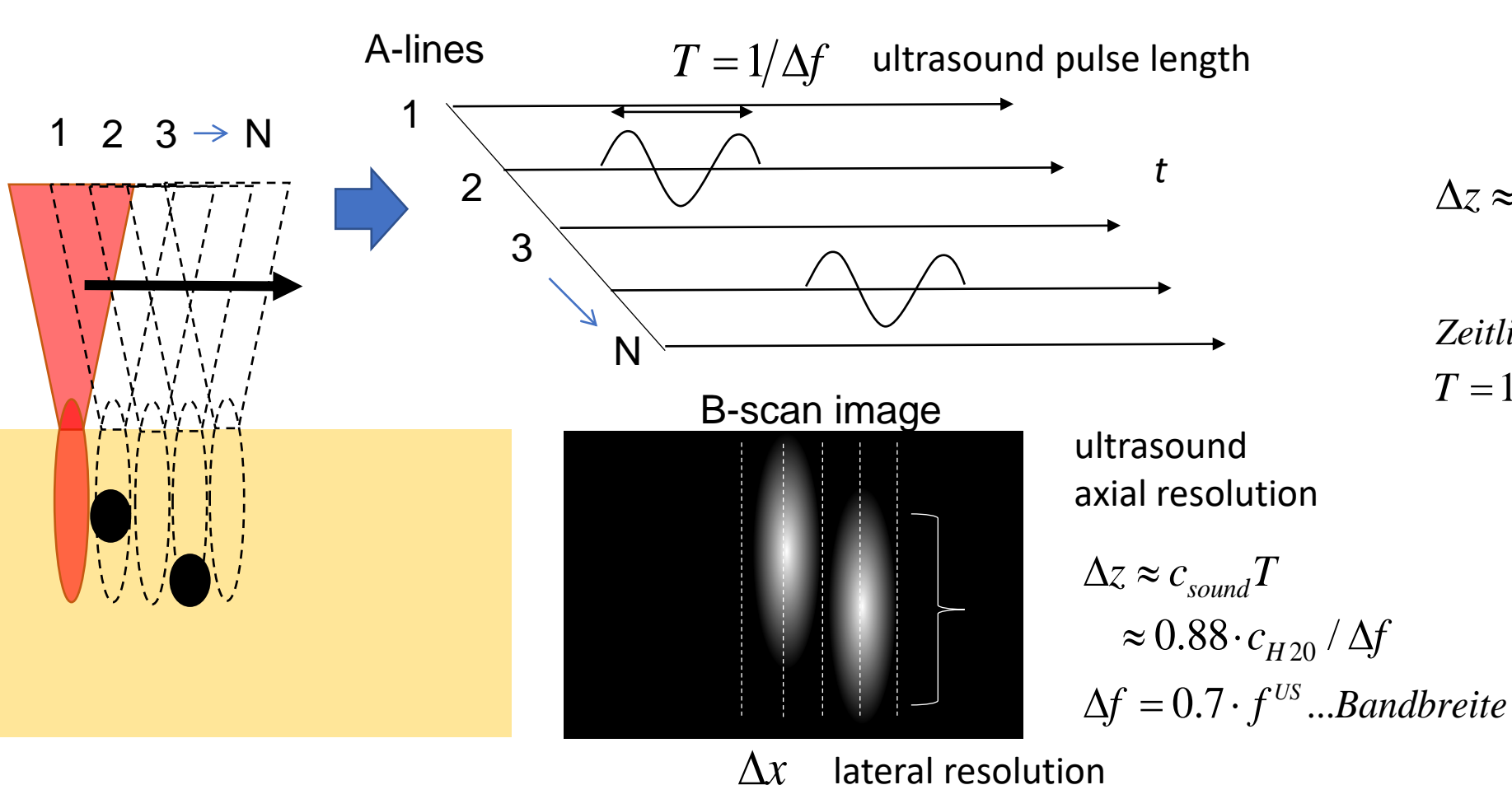
f^{us}Zentrumsfrequenz Ultraschallsensor

FBrennweite der opt./akust. Linse

DDurchmesser Laserstrahl od. akust. Linse

Vorgehensweise für die photoakustische 3D-Datenaufzeichnung

Raster-scan diffraction-limited optical beam or ultrasound transducer along tissue surface.



**Beispiel axiale
Auflösung:**

$$\Delta z \approx 0.88 \cdot \frac{1500 \text{ m/s}}{0.7 \cdot 50 \text{ MHz}} = 38 \mu\text{m}$$

Zeitliche Ausdehnung US – Puls :
 $T = 1 / (0.7 \cdot 50 \text{ MHz}) \approx 29 \text{ ns}$



Anforderung an
Digitizer!

-

Positionierungssystem

Figure 1 consists of two panels. Panel (a) is a fluorescence image of a brain microvasculature, showing a dense network of vessels. A color scale on the right indicates the oxygen saturation (sO_2) from 0 (blue) to 1 (red). Panel (b) is a heatmap showing the normalized power at 0 s. The x and y axes represent spatial coordinates in μm , ranging from 0 to 100. A color scale on the right indicates the normalized power (Norm. PA) from 0.15 (dark red) to 1.0 (yellow).

Anforderung an die Lichtquelle für die PAM

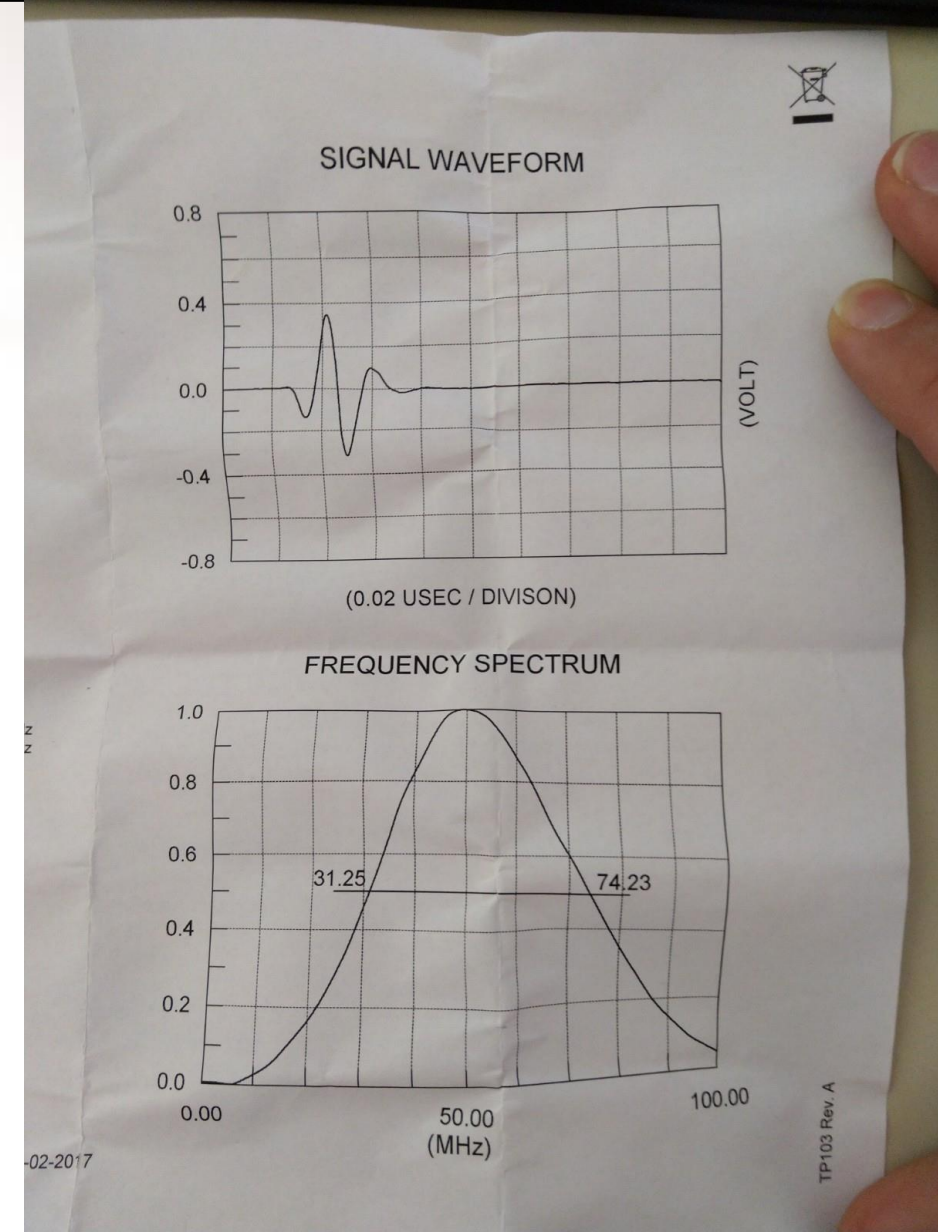
- Pulsdauer im Bereich von 2ns bis 10ns
- Pulsenergien von 1μJ bis 1mJ
- Pulswiederholraten im Bereich von 500Hz bis 100kHz
- Wellenlängen durchstimmbare für multispektrale Experimente
- Ausreichend gutes Strahlprofil für die Fokussierung auf kleinen Spot.
- Trigger Aus- und Eingänge für die Synchronisierung mit peripheren Hardwarekomponenten (Scaneinheiten, DAQ-System, etc...)
- Software mit Hardwareschnittstelle um Laserparameter automatisiert einstellen zu können.



Anforderung an den Ultraschallsensor für die PAM

Ideal:

- Bandbreite (-6dB): 0.1-100MHz
- Sensitivität im Bereich von 100nV/Pa
- Geringes Rauschlevel
- Akustisch angepasst an die Umgebung



Anforderung an Signalverstärkung/-Filterung für die PAM

....ergibt sich aus der Bandbreite und Amplitude des Sensorsignals und deren Anpassung auf das DAQ-System.

Beispiel:

- Sensorspannungsbereich $\pm 10\mu\text{V}$ bis $800\mu\text{V}$
- Kleinster Eingangsspannungsbereich
Datenerfassungskarte/Oszilloskop $\pm 200\text{mV}$ (full scale range) mit einer 12bit Auflösung.

Spannungsauflösung:

$$\Delta U = 400\text{mV} / 2^{12} = 98\mu\text{V}$$



Signalverstärkung um mindestens einen Faktor 10 (20dB) notwendig.
Zwecks besserer Abdeckung des Eingangsspannungsbereichs ist es sinnvoll zwei Verstärker in Serie zu schalten mit einer Gesamtverstärkung von 48dB.

MODEL NO.	FREQUENCY (MHz)		NOISE FIGURE (dB)	GAIN (dB)	
	f_L	f_H		Flatness Max.	Total Range
ZFL-500LN(+)	0.1	500	Typ. 2.9	Min. 24	± 0.5



Anforderung an Oszilloskop/Datenerfassungskarte für die PAM

Abtastung:

- Signale bis zu einer Frequenz von 100MHz sollen verlustfrei digitalisiert werden.



- Abtastfrequenz muss mindestens 200MHz betragen.

Auflösung:

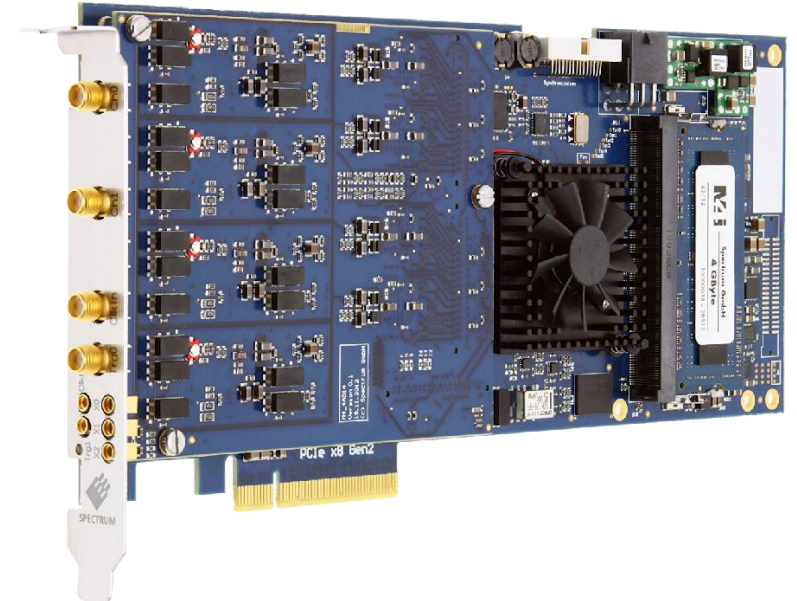
- Mindestens 12 Bit, sofern keine Einschränkung bei der Abtastung und Datenspeicherung je höher desto besser (z.B. 16 Bit).

Rasche Datenspeicherung:

- Notwendigkeit von ausreichend On-Board Memory (z.B. 2GSample)
- Interface mit schneller Datentransferrate (z.B. PCIe)

Software Schnittstellen & Driver:

- C++, C#, Python, VB, Matlab, LabView, etc...



M4i.44xx-x8 - 14/16 bit Digitizer up to 500 MS/s

- Up to 500 MS/s on four channels
- Up to 8 synchronous Digital Inputs (Option)
- Ultra Fast PCI Express x8 Gen 2 interface
- Separate dedicated ADC and amplifier per channel
- 6 input ranges: ± 200 mV up to ± 10 V
- 2 GSample (4 GByte) on-board memory
- Window, re-arm, OR/AND trigger
- Synchronization of up to 8 cards per system
- Features: Single-Shot, Streaming, Multiple Recording, Gated Sampling, ABA, Timestamps
- Boxcar Average (high-resolution) mode to increase resolution
- Direct data transfer to CUDA GPU using SCAPP option

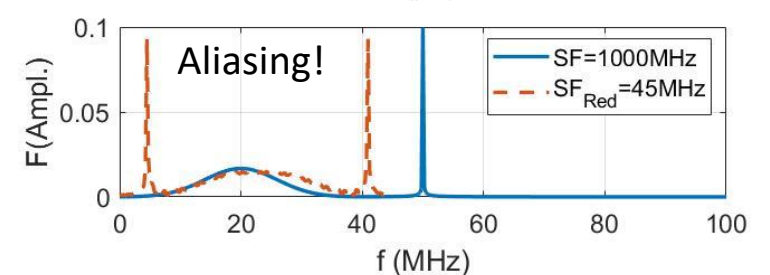
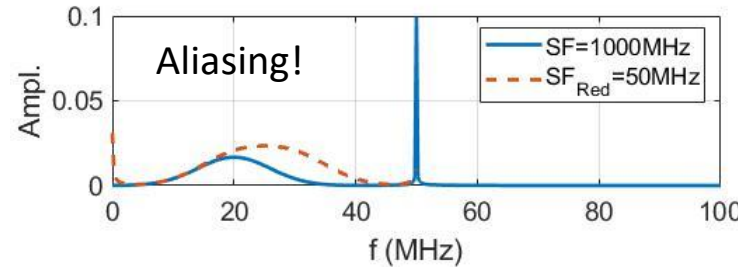
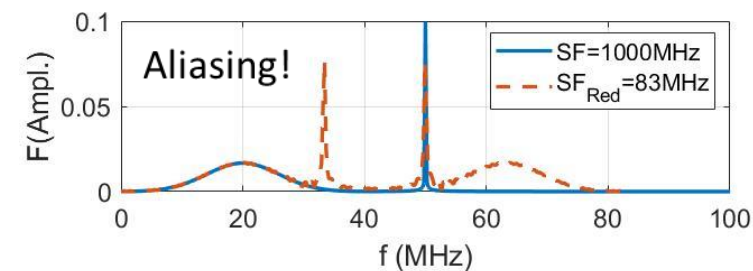
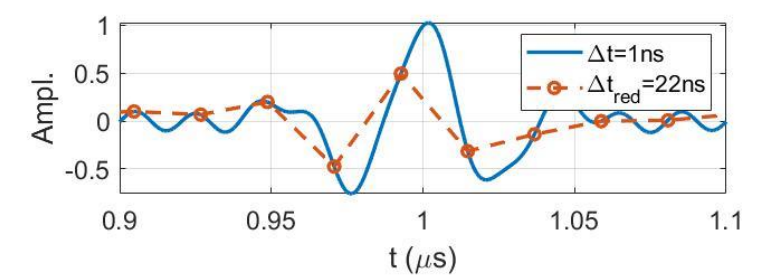
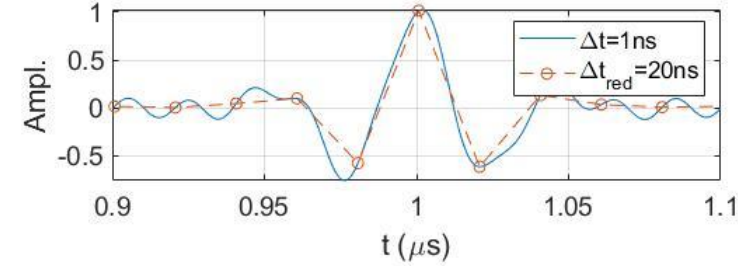
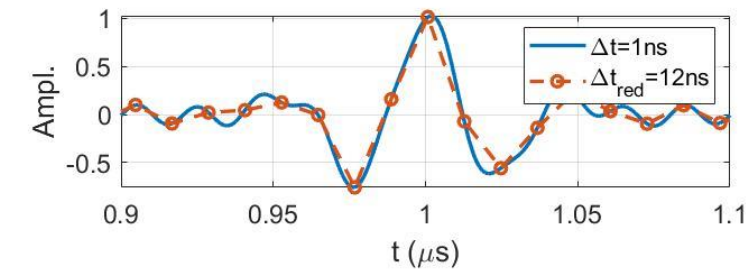
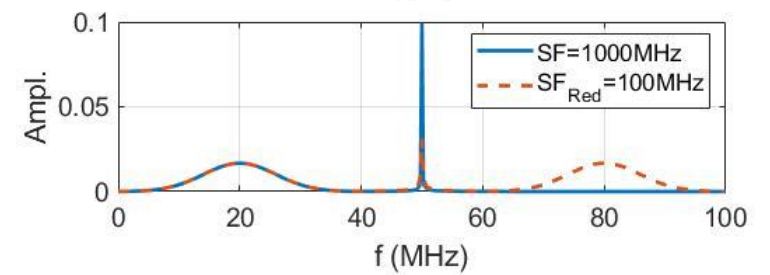
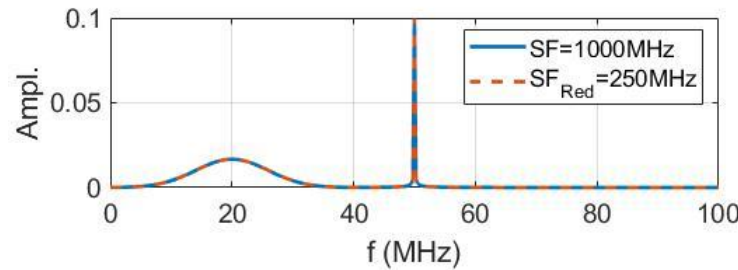
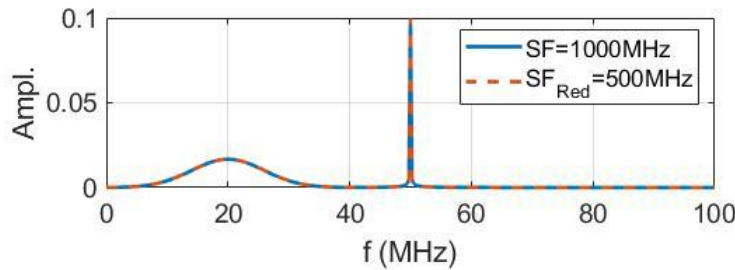
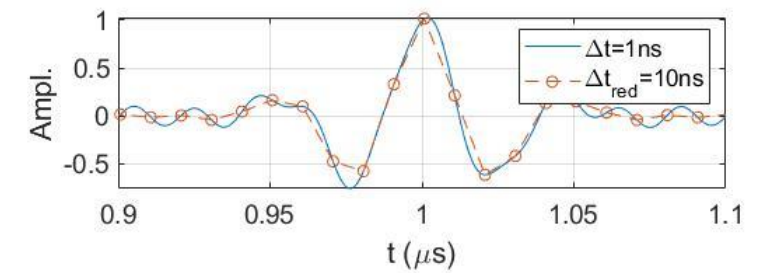
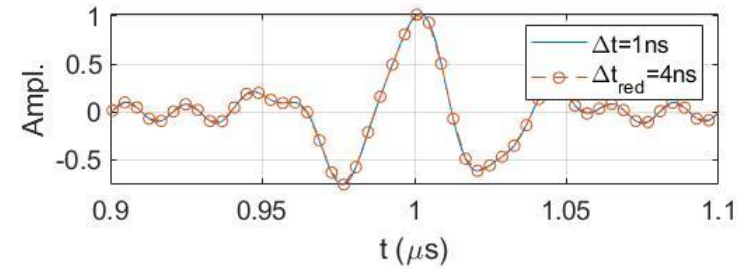
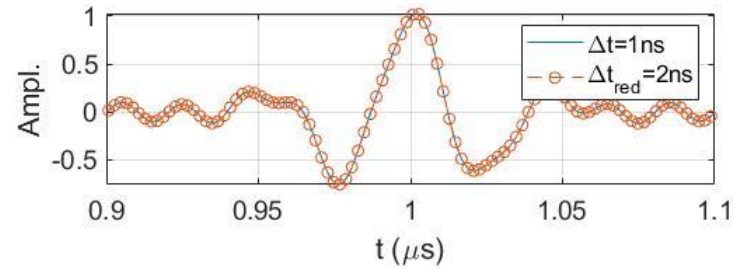
Ein periodisches Signal lässt sich aus einer endlichen Anzahl von Abtastwerten (ohne Verluste) rekonstruieren, sofern die Abtastpunkte nicht weiter auseinanderliegen als eine halbe Periode der höchsten Frequenz, die im Signal vorkommt.

- Spektrum muss dafür bandbegrenzt sein: **Maximalfrequenz f_{max} darf die halbe Abtastfrequenz f_{SF} nicht überschreiten.**

$$f_{max} \leq \frac{1}{2} f_{SF} \quad \text{bzw.} \quad f_{SF} \geq 2f_{max}$$

- Wird diese Bedingung nicht eingehalten, kommt es zu **Aliasing Effekten** und damit zu einer nicht fehlerfreien Wiedergabe des kontinuierlichen Signals aus dem abgetasteten Signal. **Störfrequenz (Aliasing-Frequenzen) treten auf bei $f_{SF} - f_{max}$.**

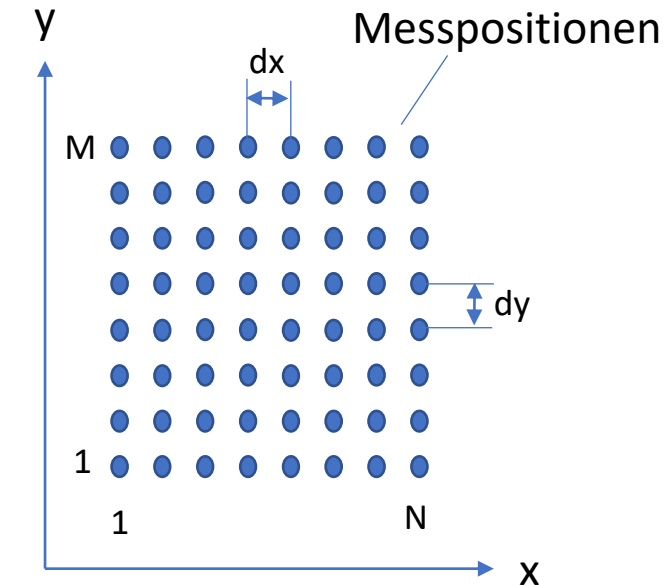
Nyquist-Shannon-Abtasttheorem: Gaußpuls und Sinus mit f_{\max} bei 50MHz



- Notwendige Anzahl von Samples je Messposition
 - Es soll ein Tiefenbereich von $z_{\max}=3\text{mm}$ mit einer angenommenen Schallgeschwindigkeit von $v=1.5\text{mm}/\mu\text{s}$ abgedeckt werden.
 - Mit einer Samplingrate $SR=250\text{MS/s}$ werden somit 500 Abtastung mit einer Auflösung von 16 Bit im Zeitfenster vorgenommen. Dies entspricht einen Speicherbedarf von $500 \cdot 2 \text{ Byte} = 1\text{kByte}$ je Messposition.
- Die Anzahl der notwendigen Messpositionen ergibt sich aus dem gewählten Scanbereich (FOV) und den Schrittweiten dx und dy für den Rasterscan.
 - Bei einem Scanbereich von $10 \times 10 \text{mm}^2$ und einer Schrittweite von $50\mu\text{m}$ ergeben sich somit $200 \times 200 = 40000$ Messpositionen
- Der gesamt Speicherbedarf für eine komplette 3D-Bildaufnahme wäre somit $40000 \text{ Messpositionen} \times 1\text{kByte/Messposition} = 40 \text{ MByte}$.



Zeitfenster: $t_{\max} = z_{\max} / v = 2\mu\text{s}$



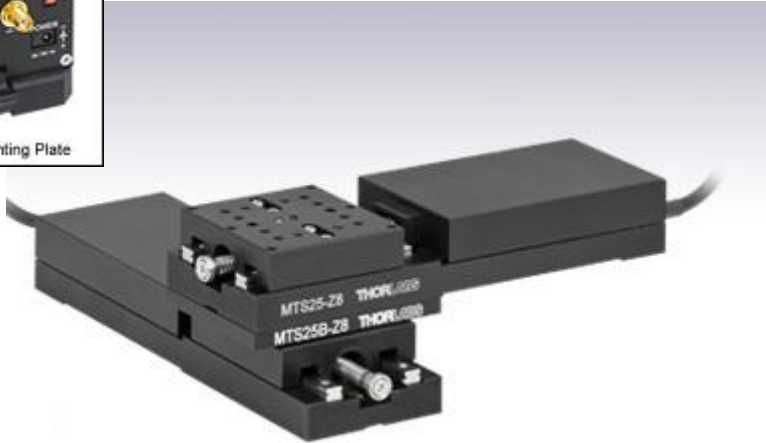
Kann durch den On-Board-Memory abgedeckt werden!



Welche Alternativen gibt es falls nicht möglich?

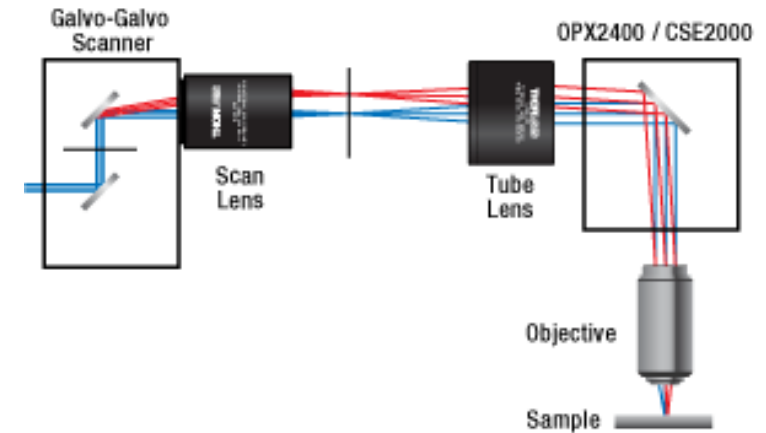
Anforderung an Scansystem: schnell & präzise

Mechanisches Scannen



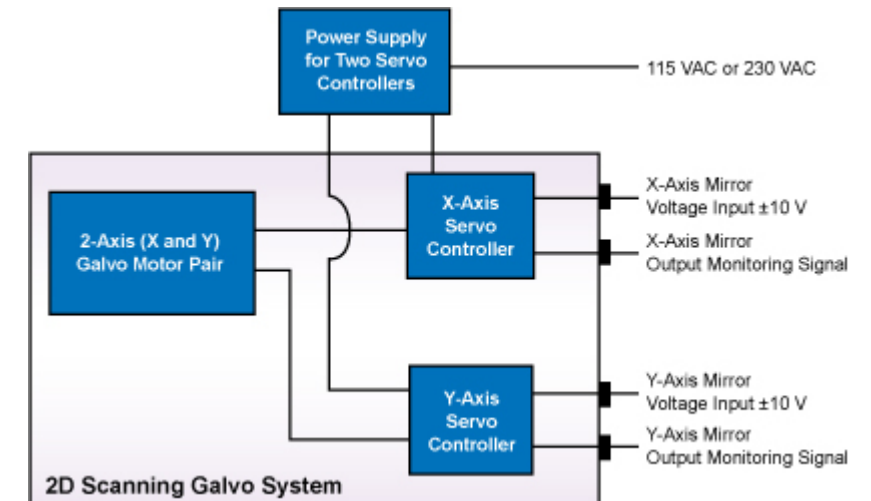
- Ausreichend Scanbereich, Positioniergenauigkeit und Scangeschwindigkeit
- Ausreichend Belastbarkeit im Bereich von einigen Kilogramm.
- Controller mit Trigger Ein- und Ausgänge für die Synchronisation
- Driver für Steuerung über C++, Python, Labview, Matlab, VB,....

Optisches Scannen mit Galvo System:



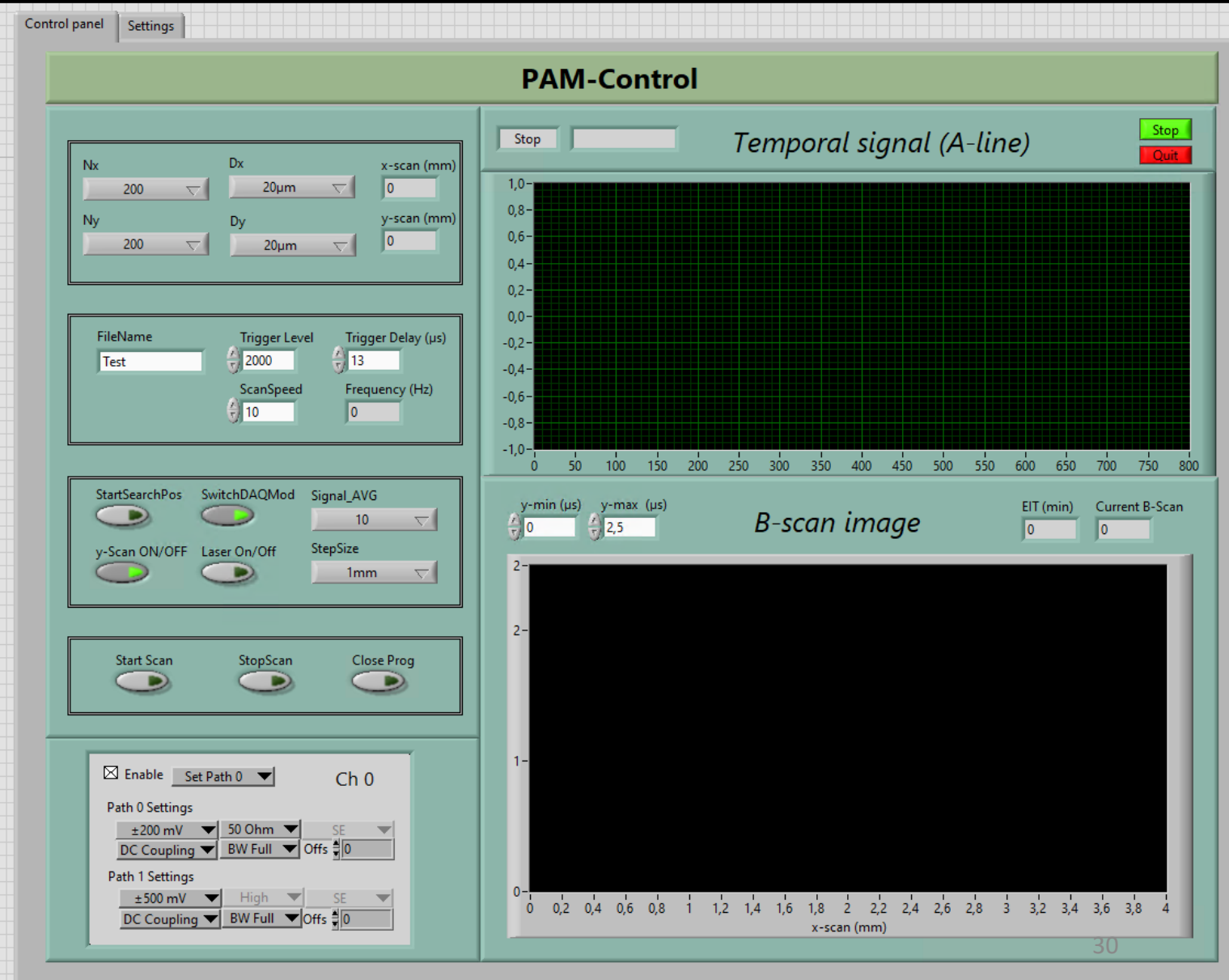
Maximum Scan Range:
Full Scale Bandwidth:

$\pm 20^\circ$ (input scale factor $0.5V/^\circ$)
130 Hz Sine Wave



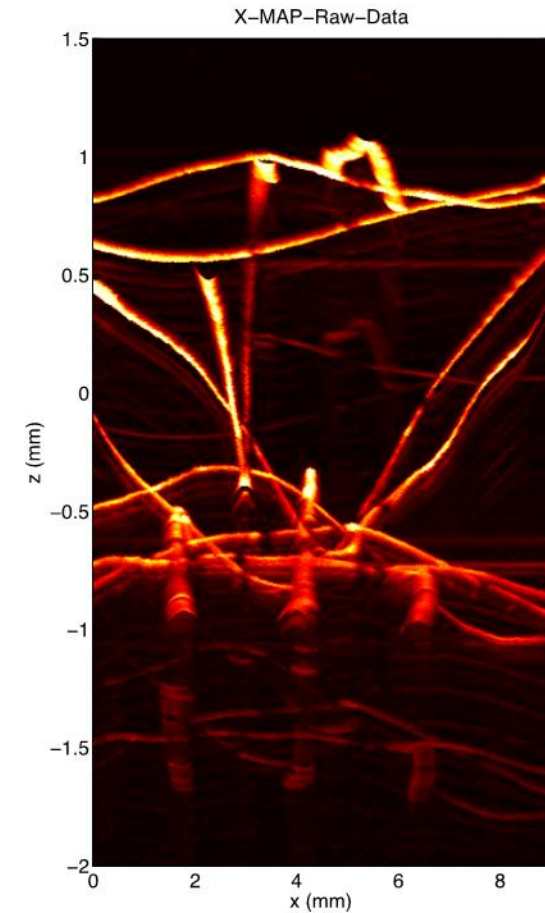
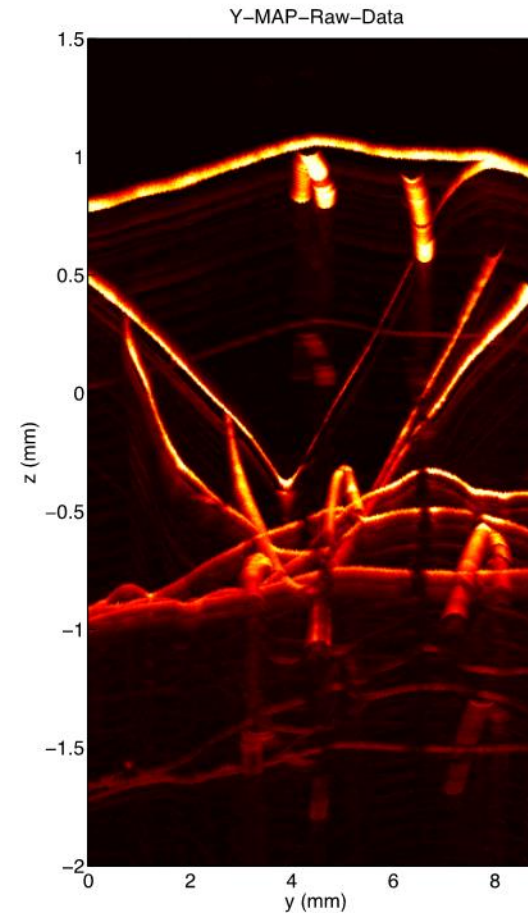
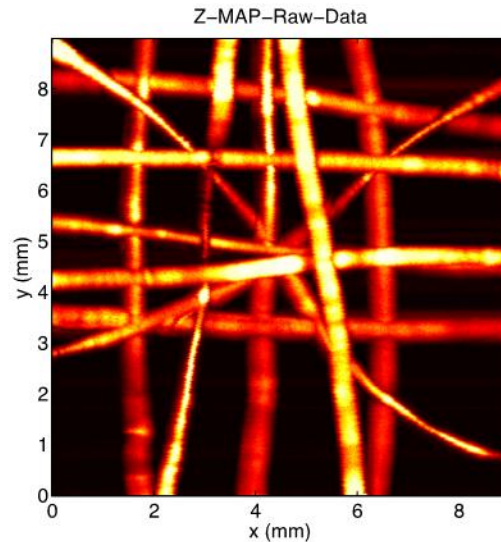
Anforderung an die Steuerungssoftware

- Selbsterklärend
- Übersichtliche Darstellung der Bedienfelder
- Modularer Aufbau, um Modifikationen einfach durchführen zu können
- Stabilität / Sicherheitsvorkehrungen bei fehlerhafter Ausführung



Performance of the PAM for 3D-imaging: MAP-Darstellung

Metal wires (\varnothing 100 μ m)
in water environment



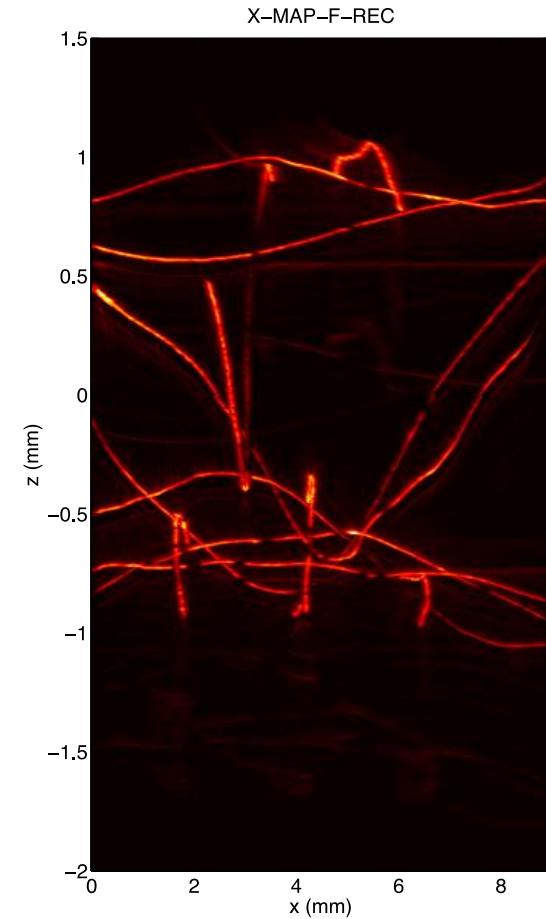
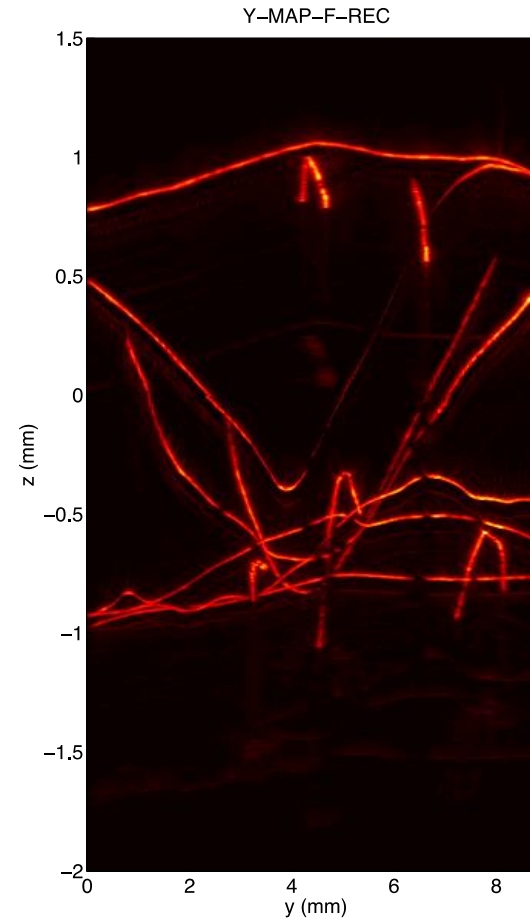
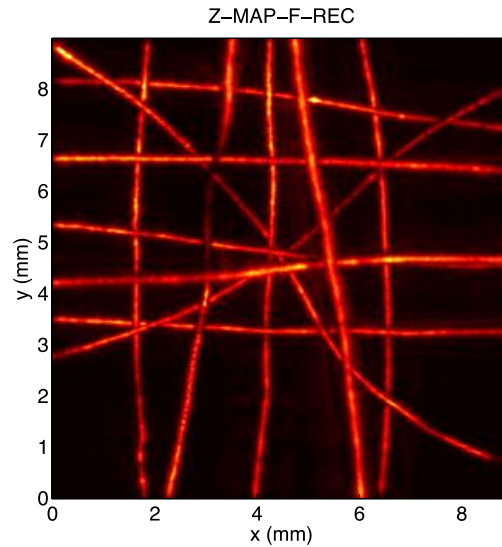
Imaging parameters:

Excitation wavelength: 532 nm
Pulse energy: 60 μ J
Spot size at sample: 600 μ m
Scan area: 9x9 mm
Scan step size: 30 μ m
Imaging period: about 20 min

Can you identify any imaging artifacts?

Improvement of image quality/resolution by applying the SAFT to the 3D data

Metal wires ($\varnothing 100\mu\text{m}$)
in water environment



- No resolution improvement for structures close to the focal plane
- Imaging artifacts from reverberations can be reduced

Was ist LabVIEW und wie kommen Sie zu dieser Software?

- LabVIEW ist eine Entwicklungsumgebung, mit deren Hilfe Programme für mess-, steuer- und regelungstechnische Anwendungen erstellt werden können.
- Es ist eine graphische Programmiersprache.
- Es bietet die Möglichkeit effizient physikalische Signale in das Programm einzulesen, zu verarbeiten und visuell darzustellen.
- LabVIEW ermöglicht es virtuelle Instrumente (VI) / Messgeräte zu entwerfen, die auf die konkrete Messaufgabe zugeschnitten sind.
- LabVIEW Community Edition ist für die nicht-kommerzielle Nutzung kostenlos.
- Das LINX-Toolkit ermöglicht die Verwendung von LabVIEW mit Raspberry Pi, BeagleBoard und Arduino.

<https://www.ni.com/de-at/shop/labview/select-edition/labview-community-edition.html>

<https://www.labviewmakerhub.com/doku.php?id=libraries:linx:start>