

# **Circuit Techniques for Ultrasound Measurements**

**Application for a Professorship  
@ University of Applied Science  
Munich, Germany**

**15<sup>th</sup> October 2010**

**Dr. Richard Izak**

# Inhaltsverzeichnis

1. **Physikalische Prinzipien**
2. **Messverfahren**
3. **Schaltungstechnik**

# 1. Physik des Ultraschalls (US)

- **elektro-mechanische (akustische) Schwingung: zeitvariable Auslenkung von Masselementen um ihre Gleichgewichtslage im Inneren der Materie (fest, flüssig, gasf.)**
- **im Gegensatz zur elektro-magnetischen Schwingung ist Ultraschall an das Vorhandensein der Materie gebunden (Ultraschall existiert nicht im Vakuum)**
- **Frequenzbereich des akustischen Schalls:**
  - **Infraschall < 16 Hz (Erdbeben, wirksame bei grossen Abmessg.)**
  - **hörbarer akustischer Schall (20 Hz ... 16/20 kHz)**
  - **Ultraschall > 20 kHz bis in den MHz-Bereich**
  - **Hyperschall > 10 GHz**
- **Wellenlänge, Schall-Geschwindigkeit:  $v = \lambda / T = \lambda \cdot f$**   
**das zu messende Objekt sollte in  $\lambda$ -Grössenordnung sein**

# 1. Physik des Ultraschalls (US)

## • Frequenz-Kompromiss:

hohe Frequenzen erfahren höhere Dämpfung (kurze Strecken)  
niedrige Frequenzen besitzen schlechte Zeitauflösung

## • Wellen:

- longitudinal (in Ausbreitungsrichtung, somit Kompressions- bzw. Druckwellen)
- transversal (senkrecht zur Ausbreitung, somit Schubwellen; beachte Polarisationssebene; nicht in Flüssigkeiten & Gasen)

## • Physikalische Effekte an Grenzflächen (materialabhängig):

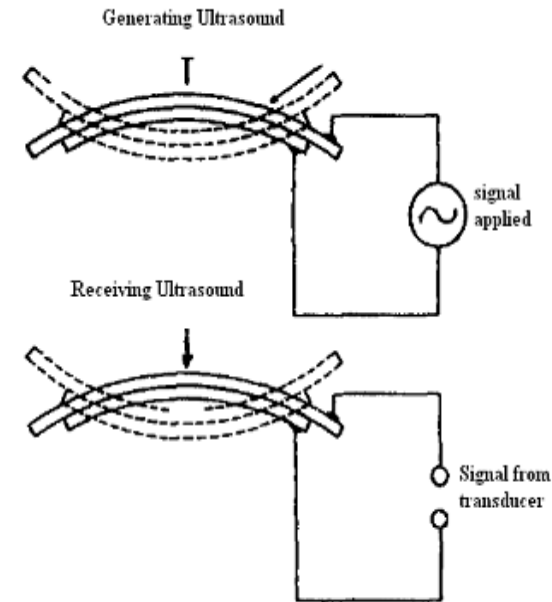
- Brechung (identisches Verhalten wie bei Optik)
- Reflexion (identisches Verhalten wie bei Optik)
- Beugung (nicht identisch mit optischer Beugung)

## • Nah- und Fern-Feldausbreitung unterscheiden

Fernfeld ab  $x > d^2/4\lambda$  ; Verlauf der Wellen divergent

# 1.1. Wandler - Transducer

- piezo-elektrisch (Curie 1880): longitud. & transversale Wellen;  
mechanische Deformation  $\leftrightarrow$  elektrische Spannung;  
umkehrbarer Effekt, deswegen als Generator/  
Sender als auch Messaufnehmer/Empfänger;  
bis in MHz-Bereich, dann aber an Stelle mit  
max. Feldstärke einzusetzen;  
verstärkende Wirkung wenn im Resonanz-  
Betrieb ( $d = n \cdot \lambda / 2$ ), wirkt dann über  
Q-Güteänderung im Resonanzkreis



- magneto-striktiv (Joule 1847): ferromagnetische Stoffe im  
Magnetfeld  $\leftrightarrow$  mechan. Deformation; umkehrbarer Effekt;  
nur  $< 100$  kHz; temperatur-abhängig; nur Resonanzbetrieb

# 1.1. Wandler - Transducer

- berührungslos: senkrecht (transversale Welle) oder waagrecht (longitudinale Welle) konstantes B-Feld, dazu Spule L erzeugt Wechselfeld, dann entsteht im Metall mechanische Schwingung; nicht umkehrbar.
- HF-Ultraschall: Laserlicht auf Oberfläche, Temperaturgradient verursacht US-Wellen; nicht umkehrbar.

# 2. Messverfahren

- **nach Strahlungsart:**

- kontinuierliche Dauerstrahlung: Interferenzen zur Resonanz (stehende Wellen) ausnutzen, bei Dicke  $d = n \cdot \lambda / 2$ ; Frequenz-Sweep bis Resonanz entsteht (Messung als Schwingkreis-Energie-Entnahme); Freq-Differenz 2 Resonanzstellen ergibt Dicke; Eigenresonanzen des Transducers (piezoelekt.) vermeiden!
- gepulster Betrieb (Impuls-Echo-Verfahren): serieller Nacheinander-Betrieb des Senders/Empfängers

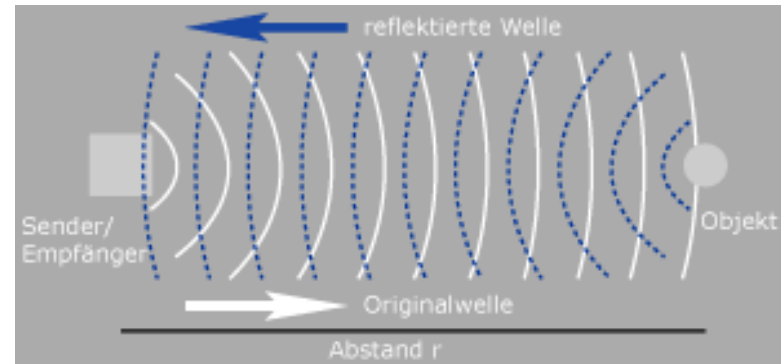
- **nach Messgröße:**

- Laufzeit (TOF time-of-flight, TOA time-of-arrival)
- Schallgeschwindigkeit (Materialeigenschaften messen)
- Dämpfung
- Bruch-/Fehler-Stellennachweis

## 2. Messverfahren

- nach Anordnung:
  - Durchschall (2-seitige Kontaktierung des Prüflings)

- Reflexion (1-seitig, event. Rx/Tx identisch in Multiplex-Betrieb)

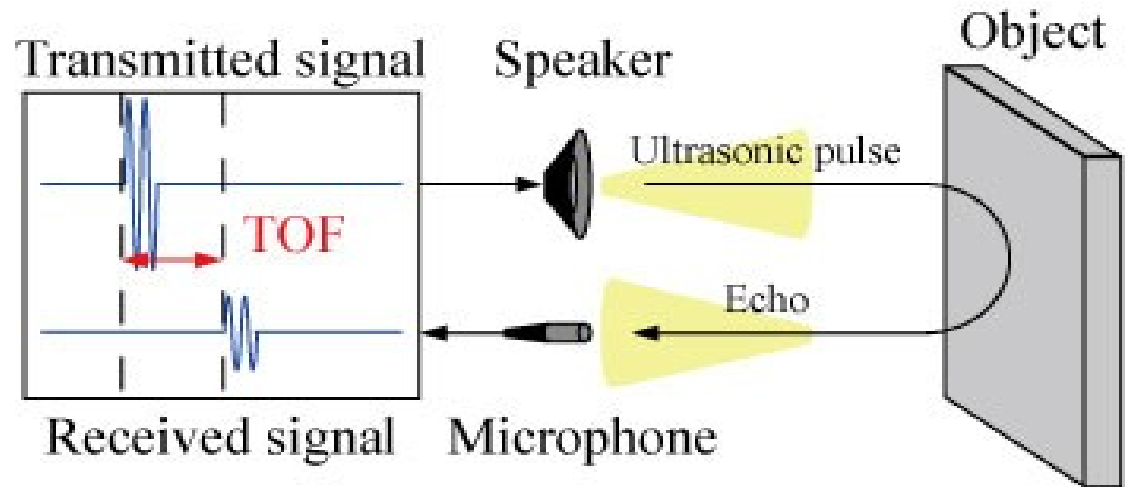


- Schalleitung
- Bildwandlung (Hologramme):
  - Kontrast ( $\approx$  Amplitudeninformation)
  - Flächenausfüllung ( $\approx$  Phaseninformation)



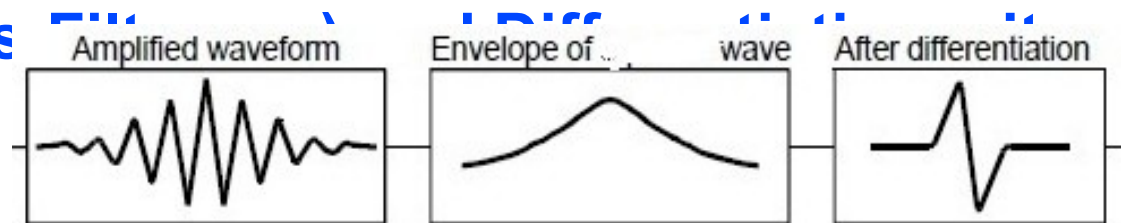
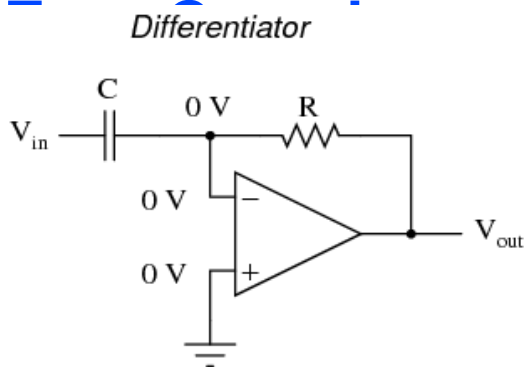
# 2.1. Impuls-Echo-Verfahren

- Sender/Empfänger identisch in Multiplex-Betrieb
- sowohl Laufzeit als auch Amplituden-Abschwächung auswertbar
- in festen Materialien Echos auch an Bruchstellen
- Probleme der “Toten Zone” sowie der Wellenausbildungs-Effekte, sowie Multiple-Reflexionen (Puls-Verbreiterung) wenn nicht senkrechte Abstrahlung



# 3.1. Schaltungen für TOF-Verfahren

- Umwandlung der gepulsten Schwingungsfolge in eine einheitlich zu beurteilende Größe (um Fehler wie Wellenfront-Ausbildungsunschärfe oder Gruppenlaufzeitverzerrungen zu unterdrücken)
- VGA kompensiert die Abschwächung der Echos:  
Time Gain Control (TGC): linear oder logarithmisch
- Lösung: Hüllkurven-Demodulation, bestehend aus einer Kaskade von Gleichrichtung, Hüllkurven-Detektion (Tiefpass



# 3.1. Schaltungen für TOF-Verfahren

Ausgangstreiber

event. Gegentakt

Ansteuerung

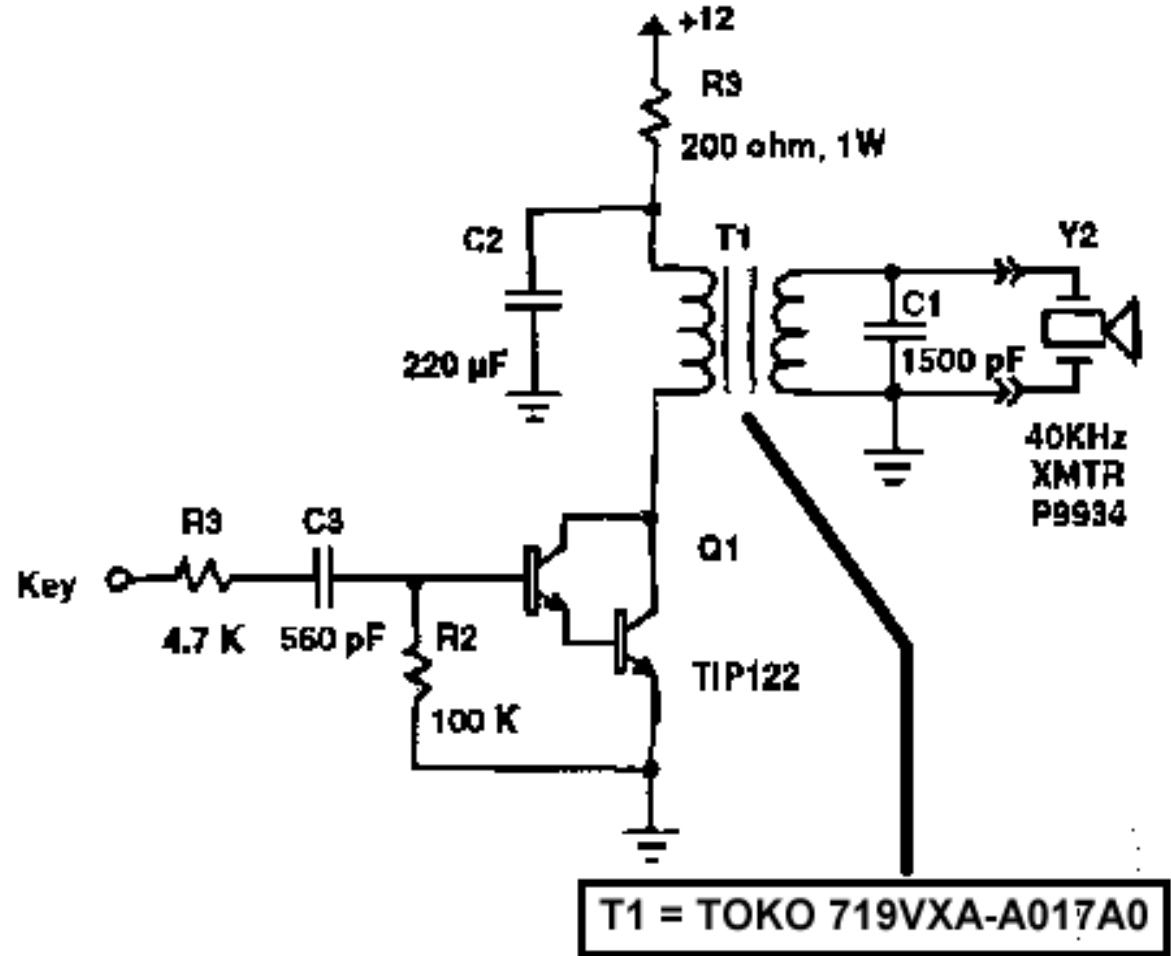


Figure 1: Ultrasonic Transmitter

# 3.1. Schaltungen für TOF-Verfahren

## Verbesserungen aufgrund Messfehler:

- Schallgeschwindigkeit in der Luft hängt von Temp, Feuchte, Druck → Einbeziehung einer Referenz-Entfernungsstrecke (möglichst integriert im Messgerät! erfordert hohe Dynamik bei Zeitauflösung)  
[Chande ´84] IEEE Trans. IM, vol.33(3): June 1984
- Tx/Rx als 1 Modul verursacht Übersprechen der Anregungsschwingung auf dem Empfangspfad: LM1812 löst es mit langsamer Hochschaltung der Gain am VGA je nach Ausschwingungs-Schwelle  
“variable thresholding”

# 3.1. Schaltungen für TOF-Verfahren

- 2-stufige Verstärkung mit inherenter 40kHz-Filterung
- Echo-Durchlass-Komparator mit variabler Schwelle je nach Zeitabstand vom letzten Anregungspuls

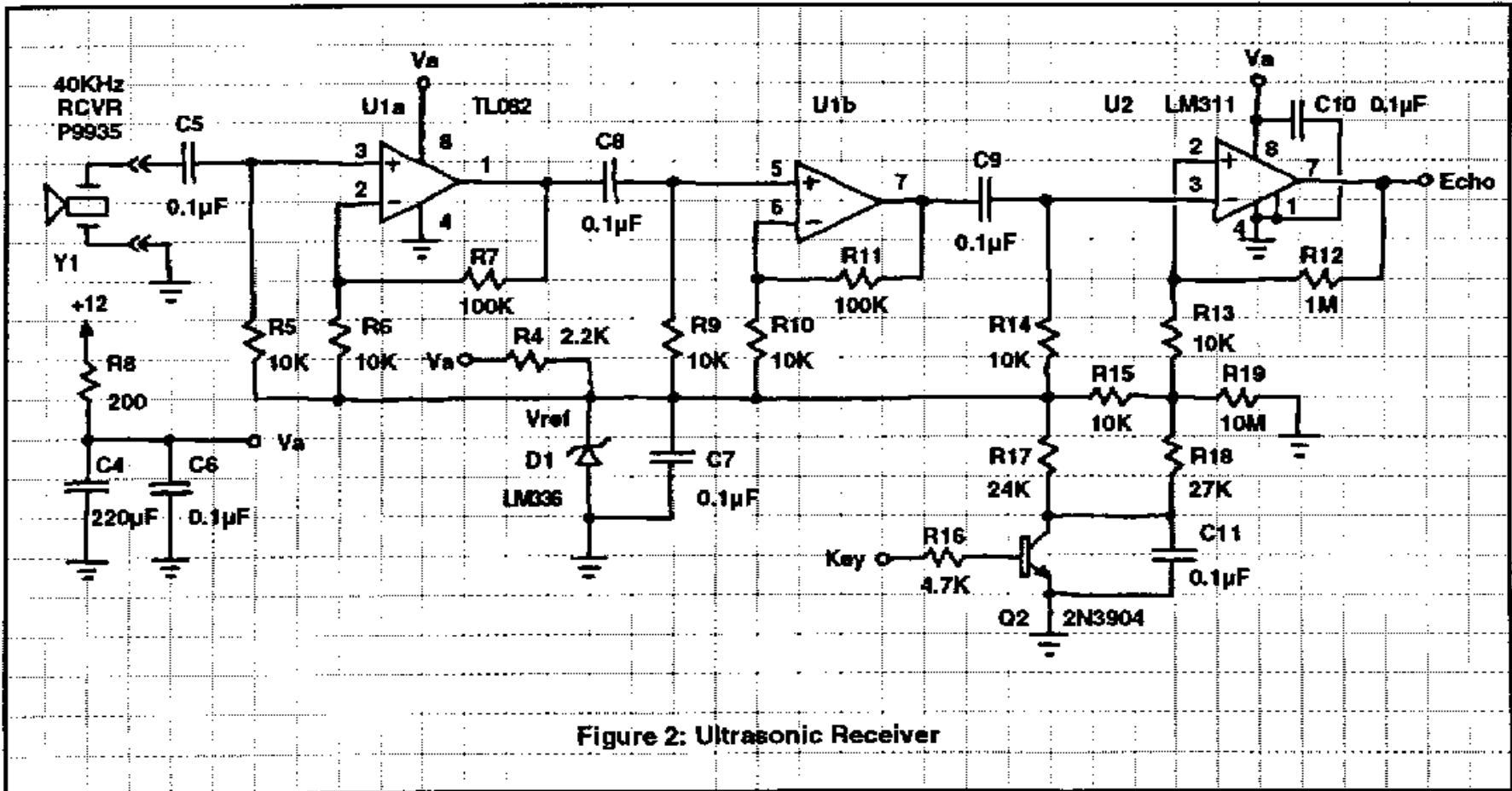


Figure 2: Ultrasonic Receiver

# 3.1. Schaltungen für TOA-Verfahren

## Verbesserungen aufgrund Messfehler:

[Figueroa '92] J.Acoust.Soc.Am. vol.91(1): Jan. 1992

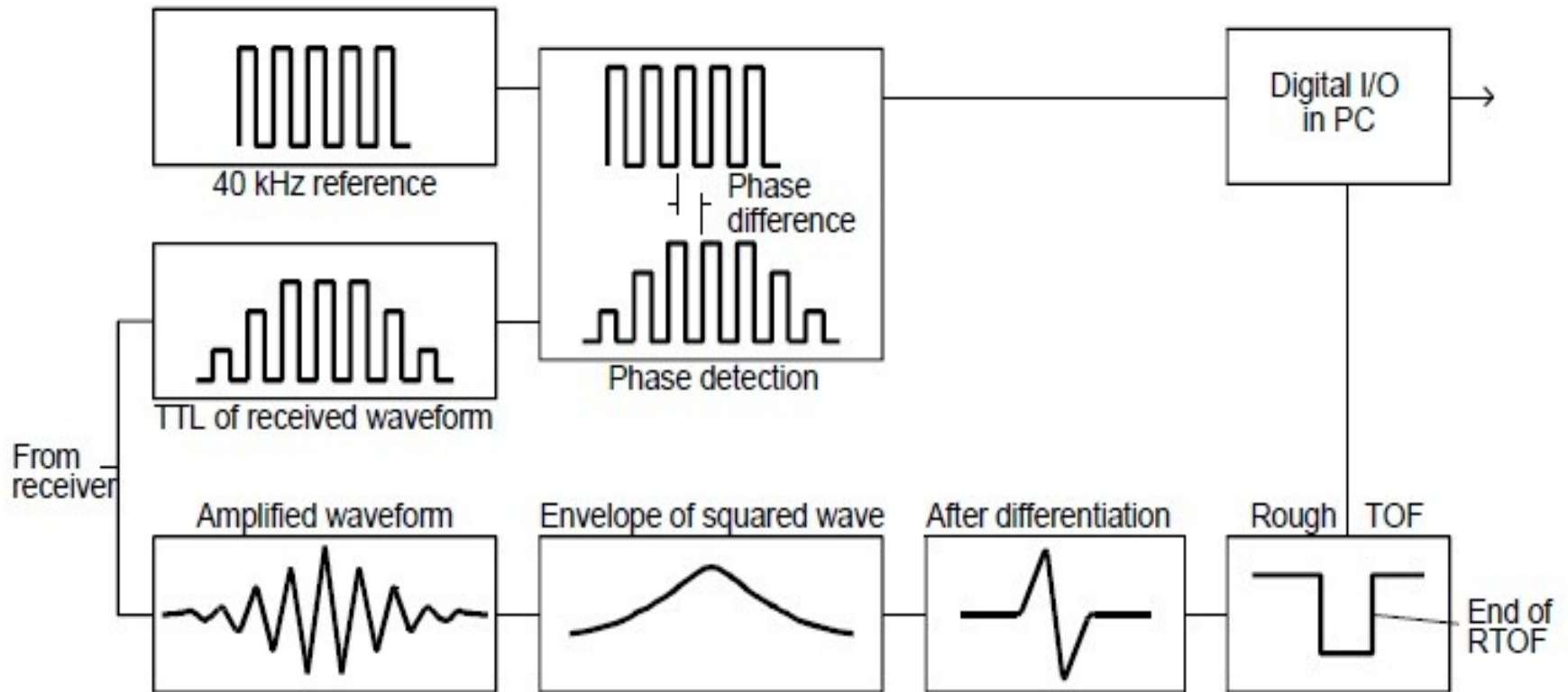
[Figueroa '01] IEEE Trans-IM vol.50(5): Oct. 2001

- Berücksichtigung der Temp/Druck/Feuchte-Effekte auf Schallgeschwindigkeit durch Kombination der groben “adjustable thresholding” (Puls-) und feinen “phase detection” (kontinuierlichen) Methoden.

Die Kombination der Auswertungen zeigt eine erhöhte Genauigkeit.

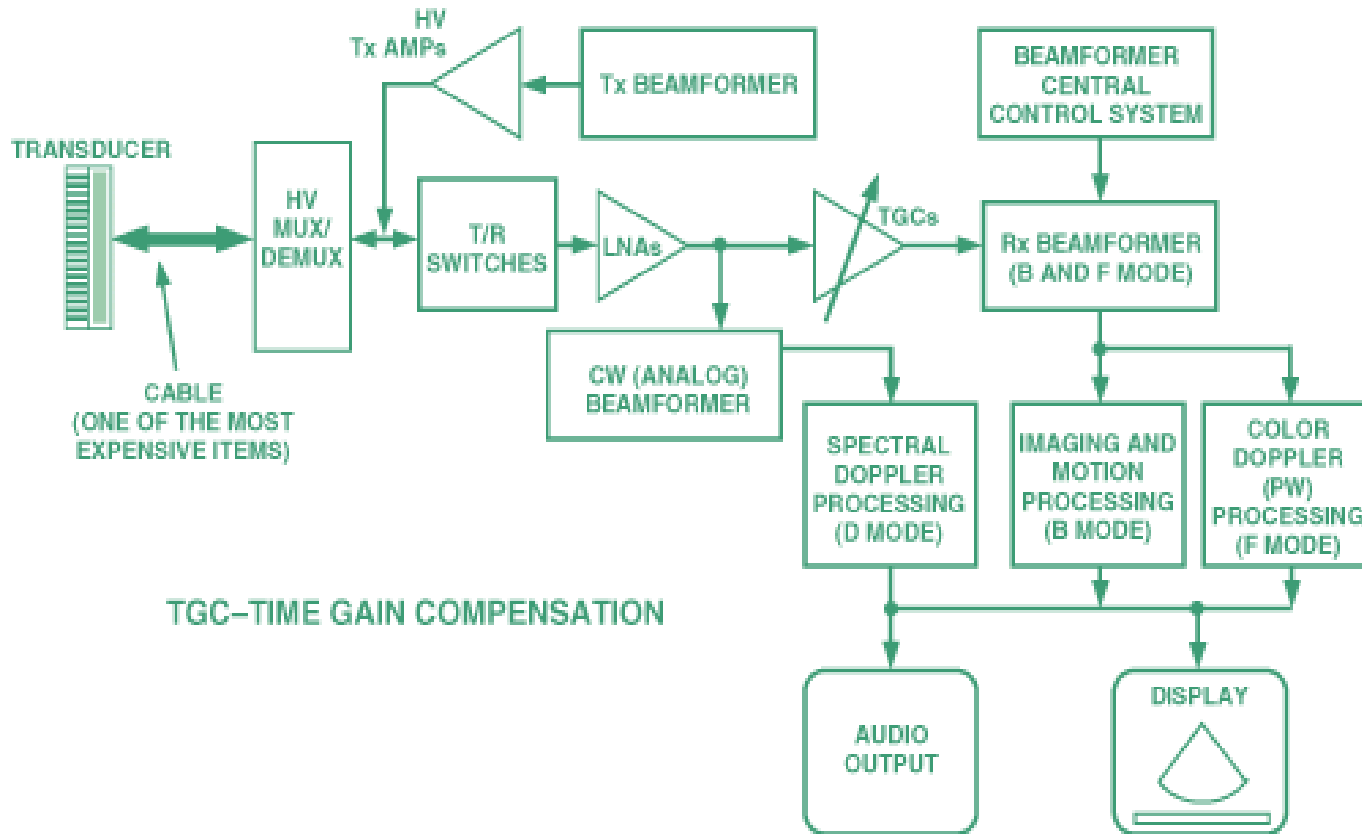
- Differentiation der Hüllkurven-Demodulierten zeigt höhere Schärfe wenn man statt Gleichrichtung eine Quadratur des Echo-Pulses benutzt!

# 3.1. Schaltungen für TOA-Verfahren



[Figueroa '92] J.Acoust.Soc.Am. vol.91(1): Jan. 1992

# 3.2. US-Imaging für die Medizin



M "motion" Mode: z.B. Darstellung von fetalen Herzrhythmusstörungen

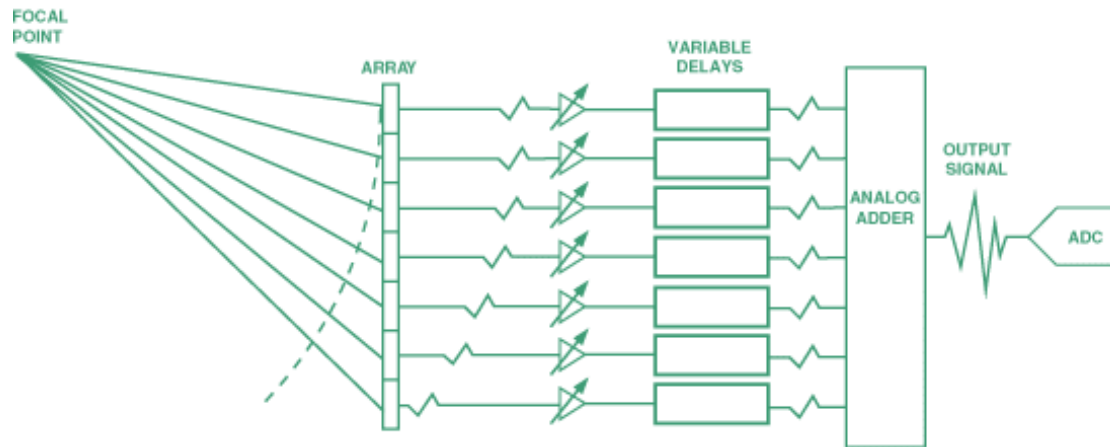
B "brightness" Mode: um 2-D Schnittbilder zu erhalten

Doppler: Messung der Blutstromgeschwindigkeit aufgrund Freq-Verschiebung

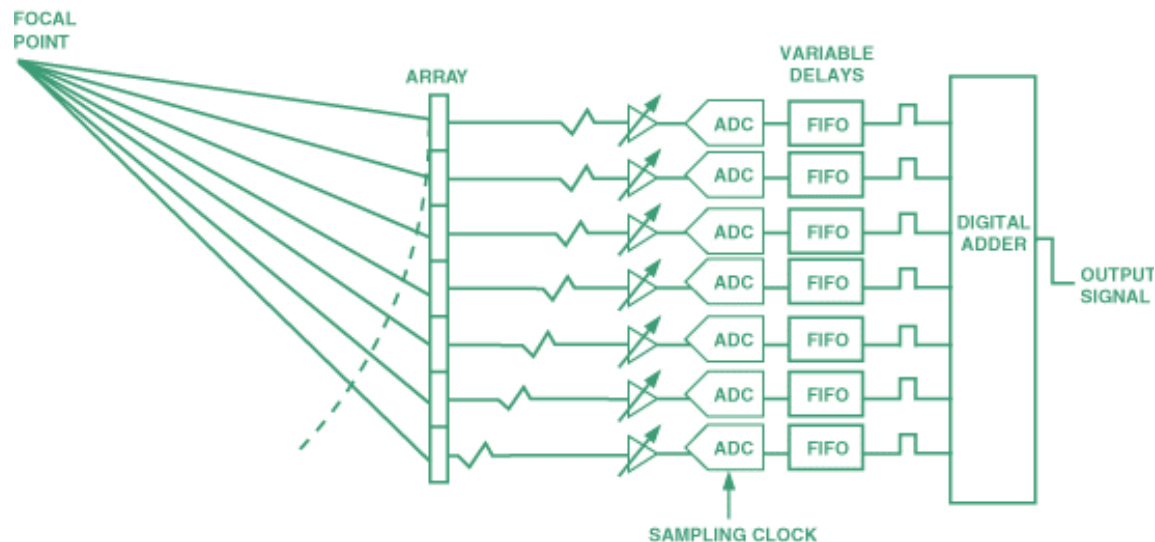
Farbdoppler: Farblich codierte flächige Darstellung der Blutstromgeschwindigkeit in Gefäße



## 3.2. US-Imaging für die Medizin



mehrkanalige Signalverarbeitung und die Array-Anregung  
(Beam-Forming): analog vs. digital approach



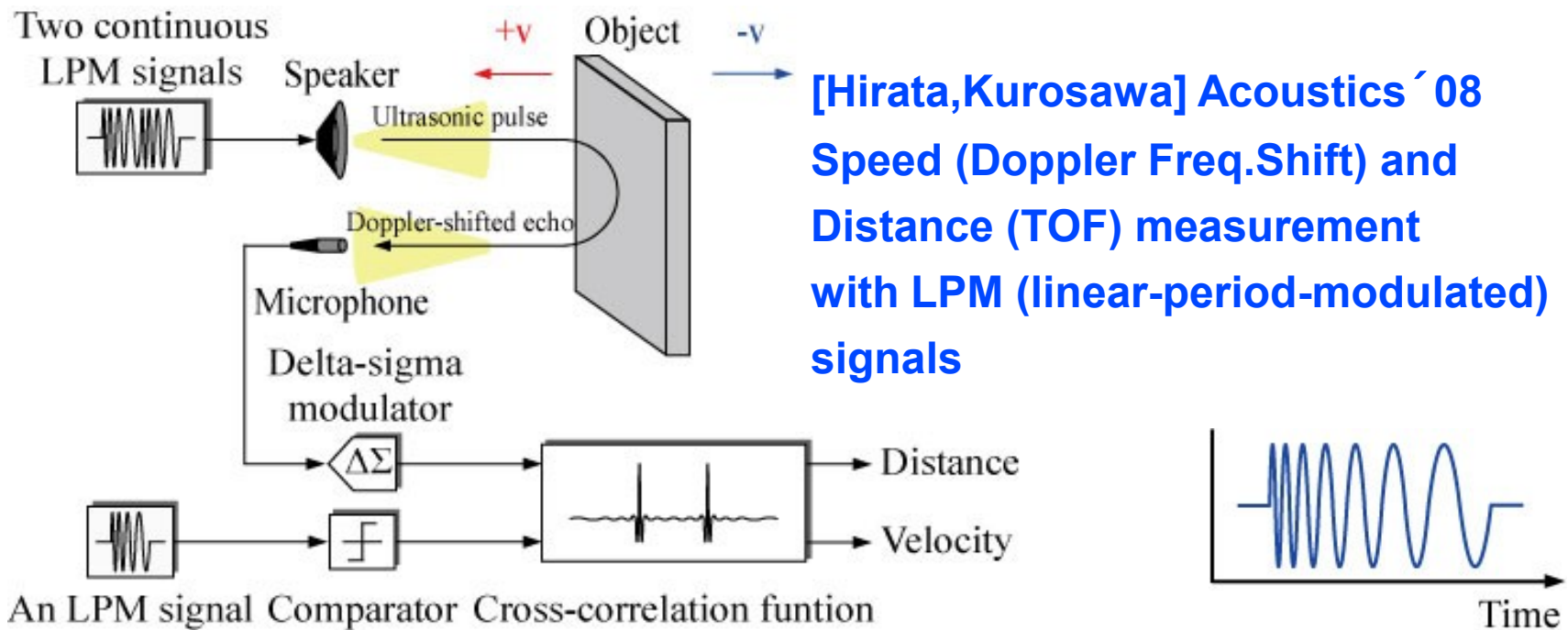
# 3.3. Future Outlook

Wie kann man all diese mehrkanaligen Signalverarbeitungen und die Array-Anregung (Beam-Forming) am besten realisieren

- Dank der fortschreitenden VLSI-Integration ist es möglich die A/D-Schnittstelle möglichst nach vorne zu verschieben und mit Hilfe der DSP-Algorithmen dann jede beliebige Operation auszuführen.
- Im Bezug auf optimale A/D-Wandler (ADC) ist zu berücksichtigen, daß zeitkontinuierliche  $\Sigma\Delta$ -ADC keine Antialiasing-Filter am Eingang brauchen und zugleich entweder hohe Sample-Raten (oder equivalent durch hohes OSR hohe Auflösung bei kleinen Sampleraten) erreichen und die inherente Integration des VGA in den Loop-Filter des  $\Sigma\Delta$ -ADC ermöglichen.
- Das gleiche gilt auch für 1-kanalige Abstandsmessung mittels Ultraschall: möglichst früh wandeln und anschliessend jede beliebige Verarbeitung digital ausführen: Korrelation zw. Sende-/Empfangs-Pulse, Phasendetektion, Kompensation der Pulsverbreiterung, ....

# 3.3. Future Outlook

Das gleiche gilt auch für 1-kanalige Abstandsmessung mittels Ultraschall: möglichst früh wandeln und anschliessend jede beliebige Verarbeitung digital ausführen: Korrelation zw. Sende-/Empfangs-Pulse, Phasendetektion, Kompensation der Pulsverbreiterung, ....



# Literatur-Referenzen

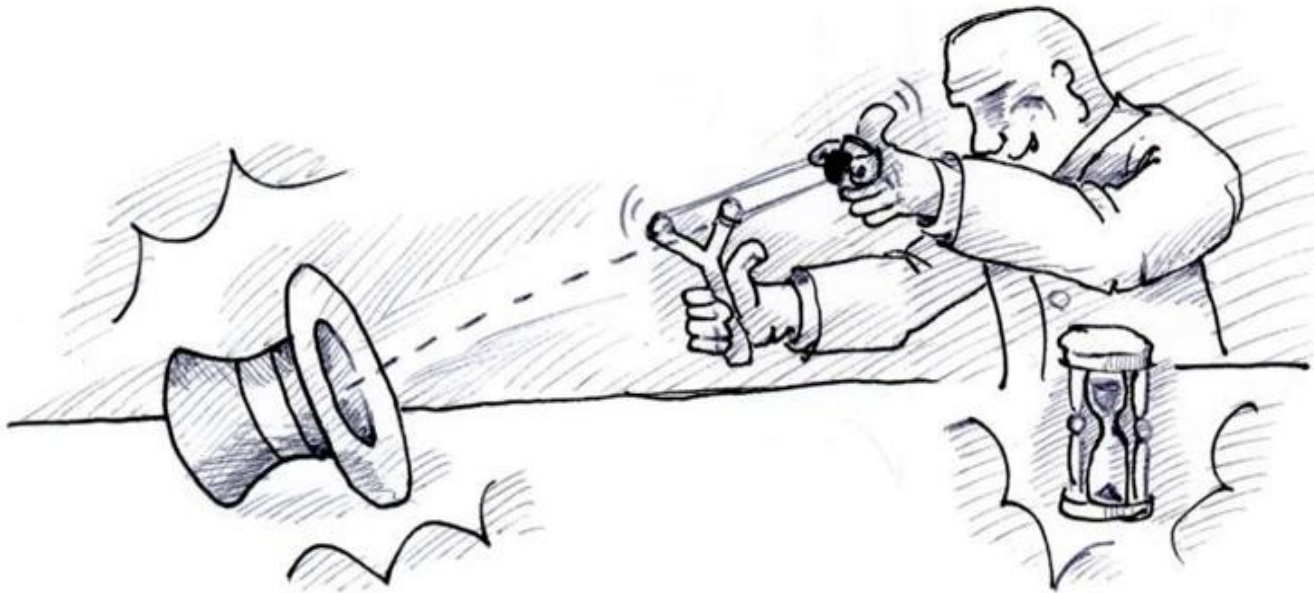
**H.D.Tietz: Ultraschall-Meßtechnik, Verlag Technik Berlin, 1969**

**sehr gute Erklärungen der Messverfahren und deren Fehler,  
Schaltungstechnisch endet alles auf dem Oszilloskop! 1969!**

**J.Kutzner: Grundlagen der Ultraschallphysik, Teubner Stuttgart, 1983**

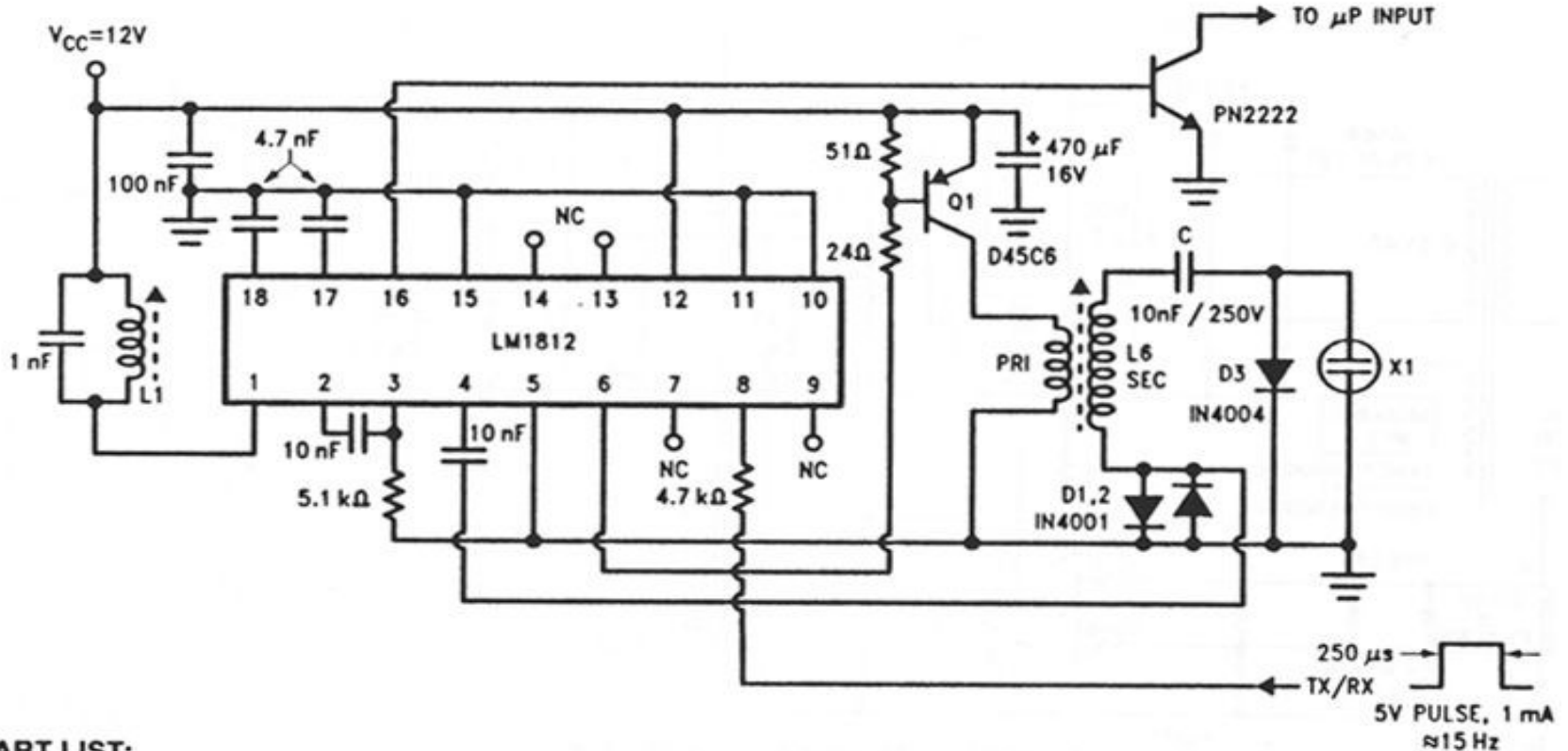
**teilweise Erklärungen der Messverfahren**

# Danke für Ihre Aufmerksamkeit zum Thema “Analog Time-Of-Flight Measurement”



# Anhang: NSC LM1812

Input path: 4-3-2-1 Output Driver: 6



## PART LIST:

L1	15.8 mH adjustable. #CLN-2A900HM	TOKO
L6	PRIMARY 8 TURNS #24*	
	SECONDARY 110 TURNS #30*	
	POTCORE RM8P-A630-3B7	FERROXCUBE
	BOBBIN RM8 PCB1-4	
	CLIPS 991-393-00	
X1	POLAROID TRANSDUCER	POLAROID
Q1	D45C6 $I_C = 5A_{min}$ $V_{CBO} = 40V_{min}$	NSC
C	250V, 10 nF MYLAR	

\*If machine wound, slightly larger wire sizes may be used.

# Anhang: Microchip PIC16F84

## PIC 16F84 APPLICATION

### ULTRASONIC DISTANCE MEASUREMENT

