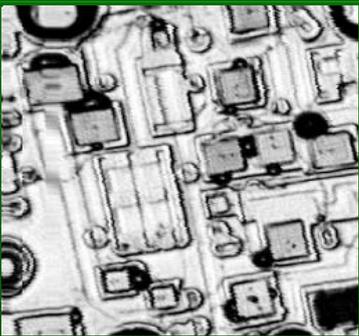
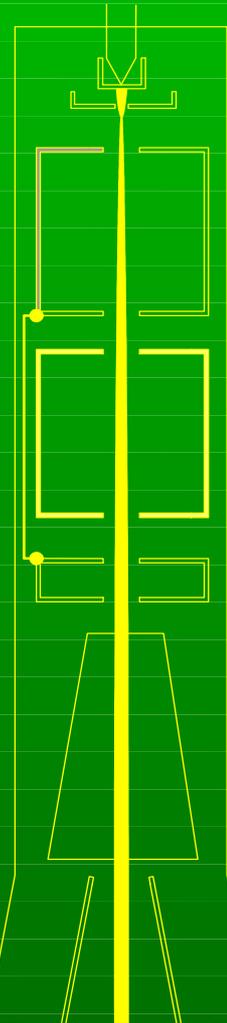
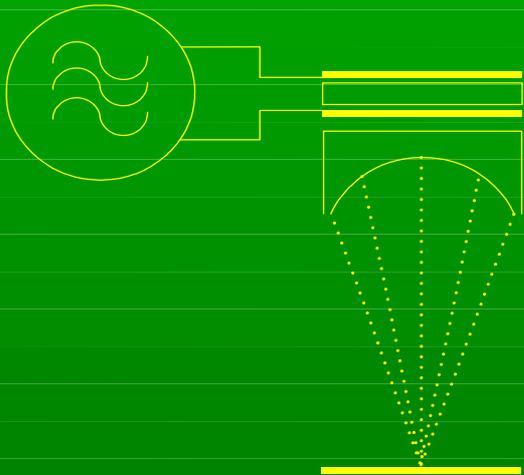


Rastersonden-Mikroskope

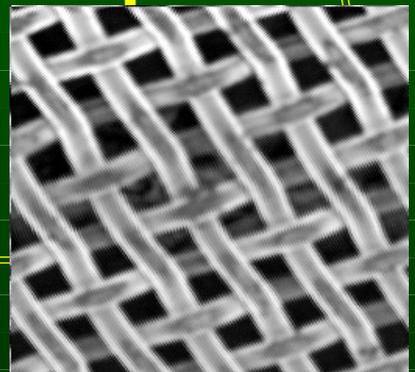
Grundlagen, Anwendung und Selbstbau

Teil 3, Ultraschall- und Elektronenmikroskope



8 Mhz

21 Mhz



1. DAS ULTRASCHALL-MIKROSKOP	3
1.1. GRUNDLAGEN	3
1.1.1 Die Schallgeschwindigkeit:	3
1.1.2. Die akustische Dämpfung:	3
1.1.3. Die akustische Impedanz:	4
1.2. AUFBAU EINES ULTRASCHALLMIKROSKOPS	4
1.3. TRANSDUCER.....	6
1.4. FOKUSSIERUNG DER ULTRASCHALLWELLEN	10
1.5. SCANNER	12
1.5.1. Spindelscanner.....	13
1.5.2. Seilzugscanner	13
1.6. ELEKTRONIK.....	16
1.6.1. Breitbandiger Impulssender.....	17
1.6.2. Schmalbandiger Sender mit Logikbausteinen	17
1.6.3. 3-Stufiger Schmalbandsender für 21 MHz.....	18
1.6.4. Universelle Sendeeinheit.....	19
1.6.5. Transduceranpassung	21
1.6.6. Sendeempfangsschalter.....	22
1.6.7. Zirkulator.....	22
1.6.8. Gabelschaltung	23
1.6.9. Diodenmatrix	24
1.6.10. Empfänger mit Breitbandverstärker.....	25
1.6.11. Empfänger mit selektiven Geradeausverstärker	26
1.6.12. Universelle Empfängereinheit.....	27
1.6.13. Sample/Hold-Schaltung.....	31
1.6.14. Schnelle AD-Wandler.....	31
1.7. GESAMTSCHALTUNG DES 21 MHz-MIKROSKOPS	33
1.7.1. CPU-Platine.....	34
1.7.2 Die Sende-Empfangsplatine	37
1.7.3 Die Stepperplatine.....	39
1.7.4. Bascom-Basic Betriebsprogramm.....	41
1.7.5. Delphi-Auswerteprogramm.....	42
1.8. MESSUNGEN MIT DEM ULTRASCHALLMIKROSKOP	42
1.8.1. Abbildung von Münzen.....	42
1.8.2. Abbildung von Schallplatten	43
1.8.3. Abbildung von integrierten Schaltungen.....	43
1.8.4. Abbildung von verdeckten Strukturen	44
1.8.5. Laufzeitmessungen	47
2. ELEKTRONENMIKROSKOPE	50
2.1. ELEKTRONENQUELLEN	51
2.1.1. Thermische Glühkathoden	51
2.1.2. Spitzenkathoden	52
2.1.3. Kalte Katoden	52
2.2. ELEKTRONENLINSEN.....	53
2.2.1 Elektrische Linsen.....	53
2.2.2. Magnetische Linsen.....	53
2.3. KATHODENABBILDUNG MIT EINER OSZIRÖHRE	54
2.4. FELDELEKTRONENMIKROSKOP	58
2.5. FELDIONENMIKROSKOP	62
2.6. RASTERELEKTRONENMIKROSKOP (REM).....	63
2.6.1. Ablenkverstärker	63
2.6.2. Eingangsverstärker	65
2.6.3. Elektronendetektor.....	66
2.7. AUFBAU EINES EINFACHEN REMS	68
2.7.1. Osziröhre als elektronenoptisches System	68
2.7.2. Bilder mit dem Eigenbau-REM.....	70
2.7.3. Vidicon als elektronenoptisches System.....	73
2.7.4. Bilder vom Vidikon-Mikroskop	76

1. Das Ultraschall-Mikroskop

1.1. Grundlagen

Ultraschallwellen können wie Licht gebrochen, gebeugt und reflektiert werden. So ist es möglich diese Wellen mit Linsen oder Hohlspiegel zu fokussieren und damit Gegenstände abzubilden.

Die erreichbare Auflösung hängt vor allem von der Wellenlänge des verwendeten Ultraschalls ab. Je kleiner die Wellenlänge des Schalls umso feinere Details der Probe können abgebildet werden. Wie bei der elektromagnetischen Lichtstrahlung berechnet sich die Wellenlänge des Ultraschalls aus seiner Frequenz und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit im umgebenden Medium ab. Für die Ausbreitung von Schallwellen sind drei Materialparameter wichtig:

1. Die Schallgeschwindigkeit
2. Die akustische Dämpfung
3. Die akustische Impedanz

1.1.1 Die Schallgeschwindigkeit:

Die Schallgeschwindigkeit bestimmt bei einer vorgegebenen Frequenz die Wellenlänge und damit die maximale Auflösung bei der Abbildung.

$$\lambda = c / f$$

λ Wellenlänge (m)
 c Ausbreitungsgeschwindigkeit (m/s)
 f Frequenz (1/s)

Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall in allen Medien viel kleiner ist als die von Licht werden schon bei relativ niedrigen Frequenzen kurze Wellenlängen erreicht.

grünes Licht	Ultraschall
$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$	$c = 1 \times 10^3 \text{ m/s}$
$\lambda = 5,5 \times 10^{-7} \text{ m}$	$\lambda = 5,5 \times 10^{-7} \text{ m}$
$f = 5,5 \times 10^{14} \text{ 1/s}$	$f = 1,8 \times 10^9 \text{ 1/s}$

Tab. 1: Vergleich der Eigenschaften von Licht und von Ultraschall

Die Tabelle zeigt, dass schon bei einer Frequenz von 1,8 Gigahertz die Wellenlänge von Licht erreicht wird. Das heißt, mit einer Schallfrequenz von 1,8 GHz können Bilder aufgenommen werden, deren Auflösung lichtmikroskopischen Bilder gleichkommt.

1.1.2. Die akustische Dämpfung:

Wie alle anderen Wellenformen wird auch der Ultraschall beim Durchgang durch ein Medium gedämpft, wobei diese Dämpfung besonders bei hohen Frequenzen extreme Werte annehmen kann. Besonders in Gasen ist die Ausbreitung der Ultraschallwellen sehr schlecht.

So beträgt die Dämpfung von Ultraschallwellen mit einer Frequenz von 1 MHz in Luft 1,7 dB/cm, bei 10 MHz schon 170 dB/cm.

Besser sind die Verhältnisse in Flüssigkeiten. So hat Wasser bei 1 MHz eine Dämpfung von nur 0,002 dB/cm und auch bei 10 MHz sind es nur 0,24 dB/cm.

Erst bei sehr hohen Frequenzen wird die Dämpfung untragbar, 2200 dB/cm bei 1 GHz und 8000 dB/cm bei 3 GHz. Weiter kommt man mit der Verwendung von ultrakalten, flüssigen Helium. Mit diesem Medium konnte ein Mikroskop gebaut werden, das mit einer Schallfrequenz von 4 GHz arbeitet und eine Auflösung von 55 nm bietet.

Hochauflösende Mikroskope mit hohen Betriebsfrequenzen können nur in einer Flüssigkeit betrieben werden und erfordern trotzdem eine ausgefeilte Messtechnik um die extrem schwachen Signale erfassen zu können.

Übrigens kann auch Schall mit Frequenzen im Terahertz Bereich erzeugt und gemessen werden. In diesem Bereich treten dann die Teilcheneigenschaften der Schallwellen zutage und man spricht analog zu den Photonen des Lichts von sogenannten Phononen. Phononen sind Schallquanten extrem hoher Frequenz, die sich in tiefkalten Festkörpern wie Teilchen ballistisch ausbreiten. Der Bau eines Phononenmikroskops konnte bislang aber noch nicht realisiert werden.

1.1.3. Die akustische Impedanz:

Bei der Ausbreitung wird eine Schallwelle von einer weiteren Eigenschaft des Mediums beeinflusst. An der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen Medien kommt die akustische Impedanz zur Geltung und verursacht ähnliche Effekte wie die Brechzahl eines Mediums in der Lichtoptik. Durch die Impedanzänderung gelangt nur ein Teil der Welle durch die Grenzfläche, der andere Teil wird reflektiert.

Der reflektierte Anteil ist umso höher je größer der Impedanzunterschied zwischen beiden Medien ist. Die akustische Impedanz ist das Produkt aus Schallgeschwindigkeit und Dichte des Mediums.

1.2. Aufbau eines Ultraschallmikroskops

Obwohl ein mit Ultraschallwellen abbildendes Mikroskop gebaut werden könnte, werden fast alle Ultraschallmikroskope im Scanning-Modus betrieben. Hier wird ein feiner Ultraschallstrahl erzeugt und mit diesem die Probe rasterförmig abgetastet. Der von der Probe reflektierte oder transmittierte Ultraschall wird zur Erzeugung des Bildes gemessen. Zusätzlich kann noch die Laufzeit des Signals oder seine Phasenschiebung als weitere Bildinformation gewonnen werden.

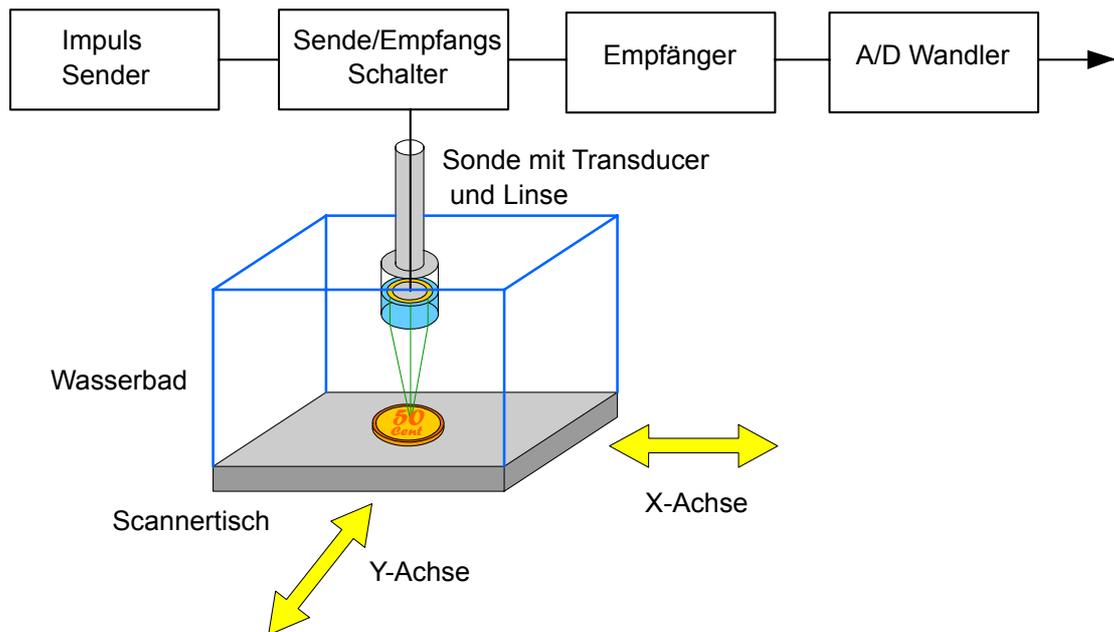


Abb. 1: Aufbau eines Ultraschallmikroskops im Reflektionsmodus

Ein Ultraschallmikroskop besteht somit aus einer Ultraschallquelle, einer Fokussiereinrichtung, einem Empfänger und einer Scaneinrichtung zur Bewegung der Probe. Bei den infrage kommenden Ultraschallfrequenzen von einigen Megahertz und höher müssen sich Probe und Transducer in einem Flüssigkeitsbad, meist Wasser, befinden. In Luft oder in anderen Gasen wäre die Dämpfung der Schallwellen zu groß.

Die Scaneinrichtung bewegt entweder die Probe unter dem Transducer oder den Transducer über der Probe. Es können aber auch die Achsen getrennt werden. Das heißt, in der X-Achse wird der Transducer verfahren und in der Y-Achse das Wasserbad mit der Probe. Bei schnellen Scangeschwindigkeiten kann es vorteilhaft sein den leichteren Transducer in der langsameren, meist die X-Achse zu bewegen und den schwereren Wasserbehälter in der Y-Achse.

Vor allem zur Untersuchung biologischer Objekte wird oft der Transmissionsmodus angewandt. Hierzu müssen dann zwei Transducer eingebaut werden. Werden beide Transducer mit einer Linse versehen, erhält man einen konfokalen Strahlengang, der besonders gute optische Eigenschaften aufweist. Allerdings müssen dann beide Transducer besonders genau justiert werden.

Da bei der Transmissionsmessung Sende- und Empfangssignal getrennt sind, besteht auch keine Notwendigkeit mehr mit kurzen Pulsen zu arbeiten, um beide Signale voneinander zu unterscheiden. Der nun mögliche Dauerstrich-, CW-Modus kann ein besseres Signal/Rauschverhältnis ergeben. Trotz des Dauersignals können über dem Umweg einer Phasenmessung auch Laufzeitunterschiede gemessen werden.

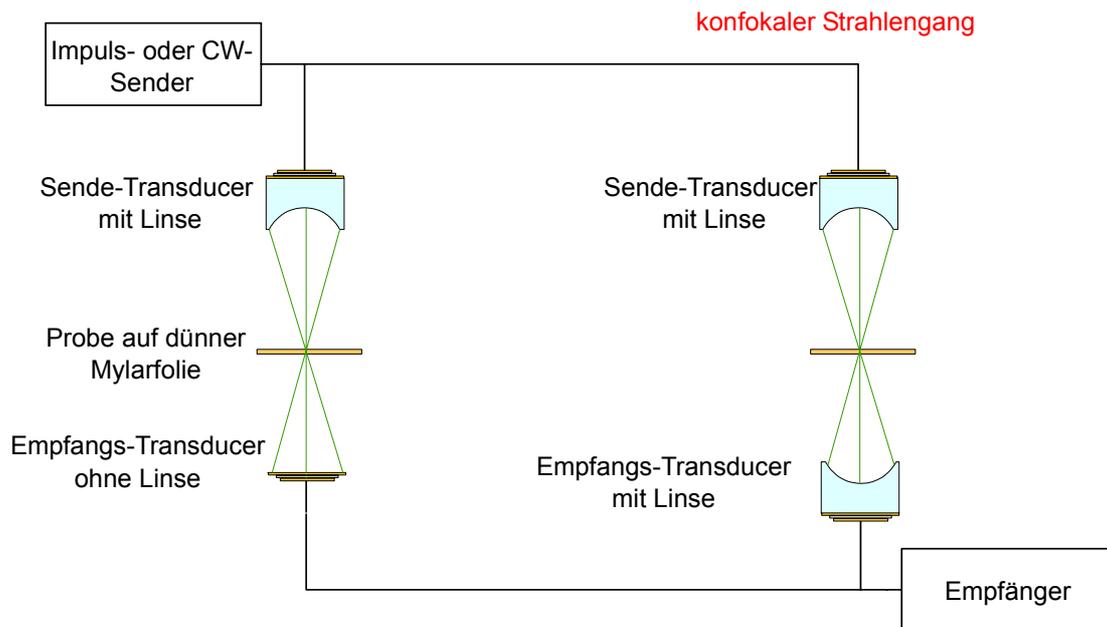


Abb. 2: Betrieb im Transmissions-Modus

1.3. Transducer

Zur Erzeugung der Ultraschallschwingungen werden Transducer benützt. Diese bestehen aus Kristall- oder Keramikplättchen mit aufgebrachtten Elektroden. Durch den Piezoeffekt werden mit angelegter Wechselspannung die Plättchen in Schwingungen versetzt und dadurch Ultraschallwellen abgestrahlt. In umgekehrter Weise entsteht an den Elektroden eine Wechselspannung, wenn sie durch eine auftreffende Ultraschallwelle in Schwingungen versetzt werden. So können die Plättchen sowohl zum Senden wie auch zum Empfangen von Ultraschall verwendet werden.

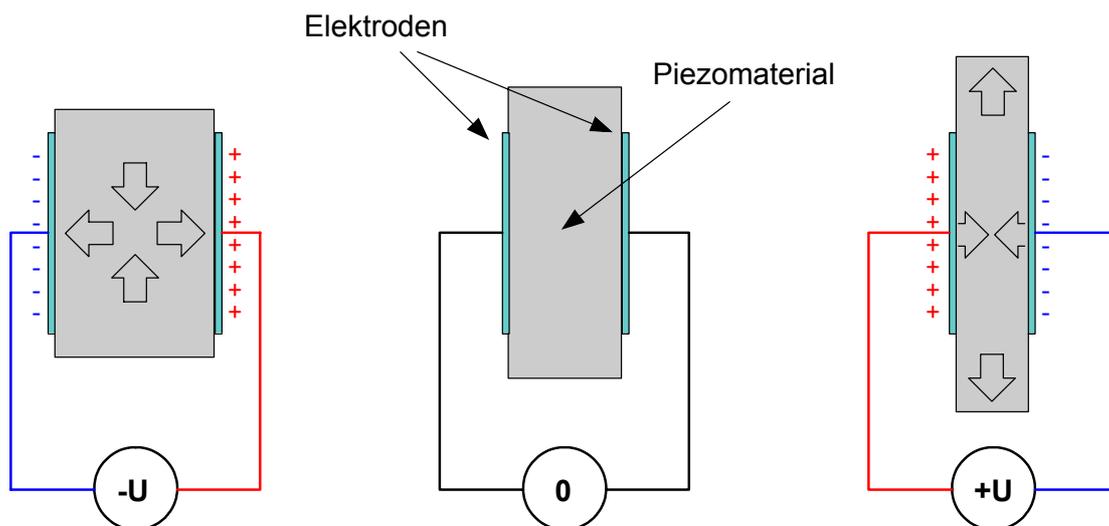


Abb. 3: Der Piezoeffekt an einem Plättchen

Besonders ausgeprägt wird der Effekt, wenn die Schwingfrequenz einer der mechanischen Resonanzen des Plättchens entspricht. Meist wird der Transducer in Dickenschwingung betrieben. Die Resonanzfrequenz wird im Wesentlichen hier von der Dicke des Plättchens bestimmt. Für die Grundschiwingung entspricht die Dicke der halben Wellenlänge des entstehenden Ultraschalls. Da die Wellenlänge in einem Material von der Schallgeschwindigkeit abhängt, ergibt sich die Grundresonanz nach der Formel.

$$f_0 = c / (2 \cdot d)$$

f_0 = Resonanzfrequenz (Hz)
 c = Schallgeschwindigkeit im Plättchen (m/s)
 d = Dicke des Plättchens (m)

Für die üblichen piezoelektrischen Materialien liegt die Schallgeschwindigkeit zwischen 4000 und 8000 m/s. Nur die ebenfalls für Transducer geeigneten Folien aus PVDF (Polyvinylidenfluorid) haben mit 2260 m/s wesentlich niedrigere Werte.

Schallgeschwindigkeiten		
Polyvinylidenfluorid	(PVDF)	2260 m/s
Kaliun-Natrium-Tartrat	Seignettesalz	4000 m/s
Bariumtitanat		4400 m/s
Bariumzirkonat-Titanat	(PZT)	4800 m/s
Zinkoxid		5700 m/s
Quarz		5760 m/s
Lithiumniobat		7300 m/s

Tab. 2: Schallgeschwindigkeiten in Piezomaterialien

Die üblichen Schwingquarze aus der Hochfrequenztechnik eignen sich wenig zur Ultraschallerzeugung. Die Schwingung, die ein Quarzplättchen im Hochfrequenzfeld ausführt, hängt von der Richtung ab, in der das Plättchen aus dem Quarzkristall geschnitten wurde. Aus Gründen der Frequenzstabilität haben Schwingquarze meist den AT-Schnitt. Solche Quarze führen Scherschwingungen aus, die Oberflächen bewegen sich gegen ineinander deshalb wird keine longitudinale Schallwelle senkrecht zur Oberfläche abgestrahlt. Quarze für Ultraschallanwendungen sollten im X-Schnitt ausgeführt sein um die nötige Dickenschwingung auszuführen damit Ultraschall abgestrahlt wird.

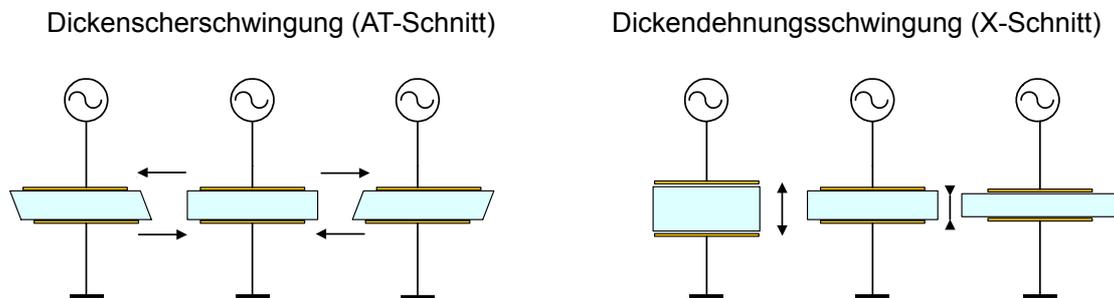


Abb. 4: Schwingmoden von Quarzkristallen

In X-Richtung geschnittene Quarze findet man in Drucksensoren oder in natürlich Ultraschalltransducern. Solche Teile sind aber schwer zu finden und meist sehr teuer.

Einfach zu bekommen und billig sind die vom Verfasser schon für andere Zwecke (Tunnelmikroskopie) missbrauchten Piezobeeper. Diese Bauteile bestehen aus einer dünnen Keramikschiicht auf einem Messing.- oder Stahlblech. Piezobeeper dienen normalerweise als Alarmtongeber und haben deshalb Resonanzfrequenzen von einigen Kilohertz was für die Ultraschallerzeugung natürlich zu niedrig wäre. In ihrer normalen Anwendung führen die Plättchen eine Biegeschwingung aus. Durch Anlegung einer Wechselspannung hoher Frequenz können sie aber auch zu Dickenschwingungen veranlasst werden. Die vom Verfasser verwendeten Piezobeeper EPZ 15MS60W (Conrad, Best. Nr. 690 635-62, 0,36 €) zeigen eine ausgeprägte Dickenschwingung bei 8 MHz. Eine weniger starke Resonanz ist bei etwa 21 MHz zu finden.

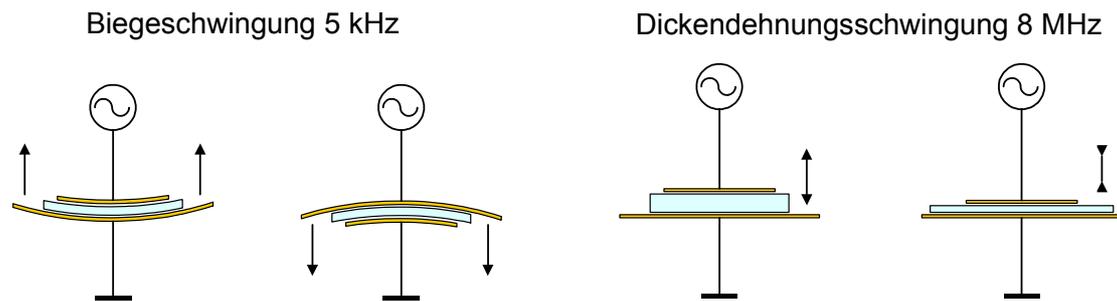


Abb. 5: Biege- und Dickeschwingung beim Piezobeeper

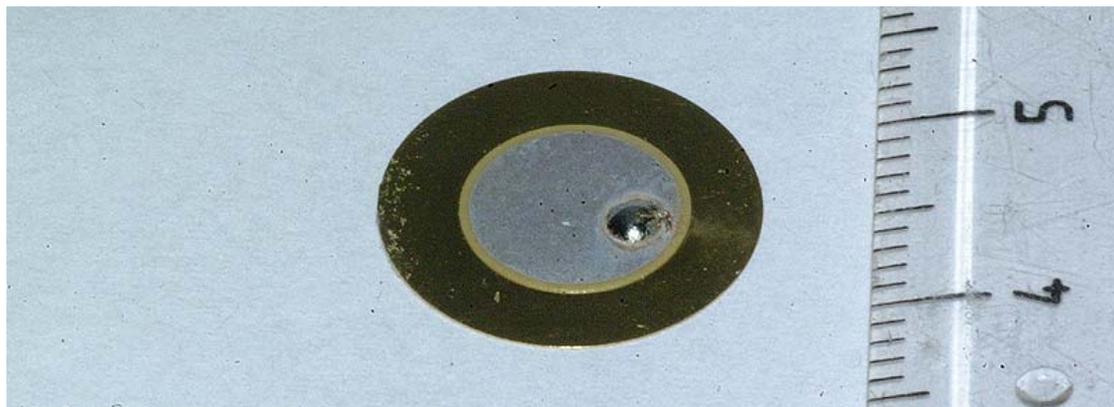


Abb. 6: Piezobeeper EPZ 15MS60W

EPZ 15MS60W			
Gesamtdurchmesser	15 mm	Piezodurchmesser	9 mm
Gesamtdicke	0,22 mm	Piezodicke	0,12 mm
Biegeresonanz	5 kHz	Dickenresonanz	8 MHz
Impedanz (5kHz)	1,5 KOhm	Kapazität	11 nF

Tab. 3: Eigenschaften des Piezos EPZ 15MS60W

Eigentlich sollte nach der Formel zur Berechnung der Resonanzfrequenz diese bei etwa 16 MHz liegen. Dass sie wesentlich tiefer bei 8 MHz liegt, ist wohl die Schuld des aufgeklebten Messingblechs, das durch seine Masse und Steifigkeit die Dickenschwingung verzerrt.

Zum Eignungstest werden zwei Piezobeeper auf die gegenüberliegenden Seiten einer Plexiglasplatte geklebt. Einer dient als Sender, der andere als Empfänger. Zur Erregung des Sendetransducers wird ein steuerbarer- oder gepulster Hochfrequenzgenerator, der den geforderten Frequenzbereich von 1 bis 25 MHz

aufweist, verwendet. Bei einer Wechselspannung von etwa 30 Volt am Transducer ist das Signal am Empfänger ausreichend, um mit einem Oszilloskop gesehen zu werden. Ein Vorverstärker ist nicht erforderlich. Bei der Dicke des Plexiglases von 20 mm beträgt die Laufzeit des Signals 7,5 μ s, der Sendepuls muss deshalb deutlich kürzer als die Laufzeit sein, damit eine Trennung möglich ist.

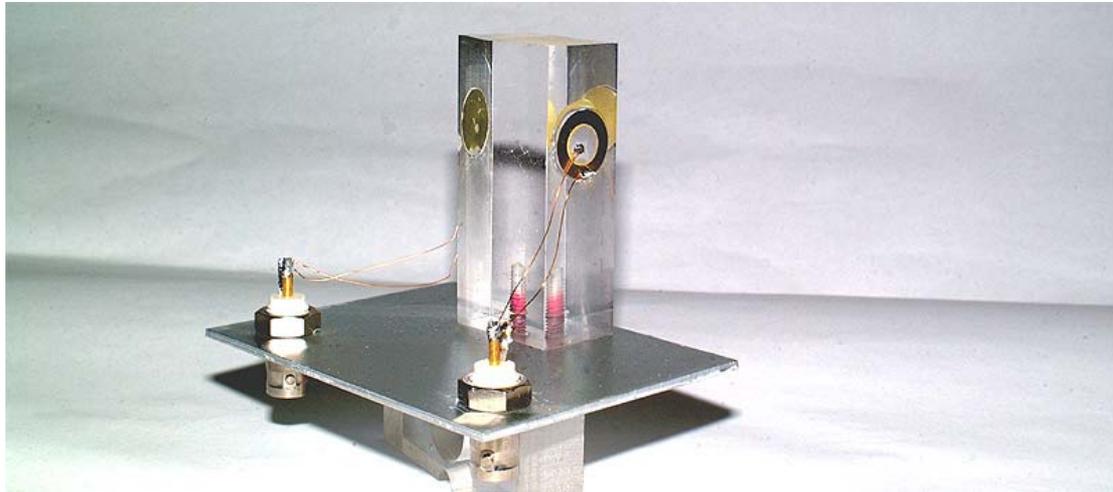


Abb. 7: Testaufbau

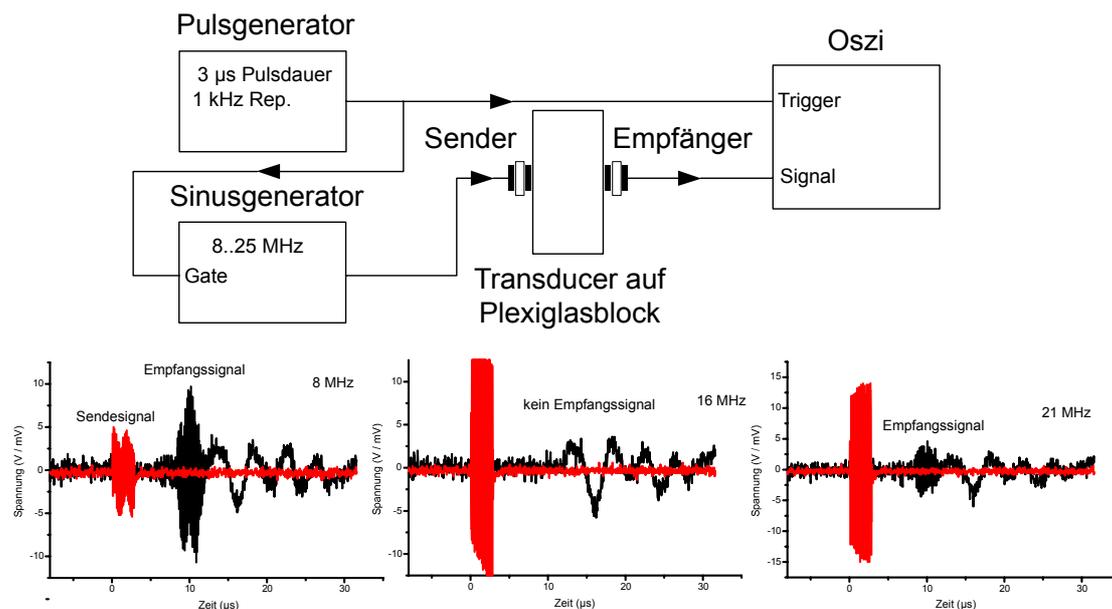


Abb. 8: Schaltung und Signale des Testaufbaus

Mit dem gleichen Aufbau können auch andere Piezomaterialien auf ihre Eignung getestet werden. Infrage kämen z. B. Schwinger aus Ultraschallverneblern.

Neben Piezokeramiken wie PTZ können auch bestimmte Plastikfolien als Wandlerelement verwendet werden. Vor allem Polyvinylidenfluorid (PVDF) zeigt einen starken Piezoeffekt und wird auch in der medizinischen Diagnose zum Bau von Transducern verwendet. Leider ist die Folie ziemlich teuer, so kostet ein Testpaket mit drei 5x5 cm großen Folien von 110 μ m, 52 μ m und 28 μ m Dicke immerhin 140 Euro (Precision Acoustic Ltd.).

Zu prüfen wäre es, ob sich die Elektretfolie aus billigen Mikrofonkapseln auch eignet. Eine andere Möglichkeit hat M. Robert beschrieben. Er erstellte Lösungen von

PVDF, die auf Oberflächen aufgebracht werden. Nach dem Verdunsten des Lösungsmittels erhält man dünne PVDF-Schichten, die nach Polarisation mit Hochspannung und Aufbringen von Elektroden als Transducer zu gebrauchen sind. Die Dicke der Schichten kann durch die Konzentration der Lösung eingestellt werden. Die Autoren erhalten Transducer, die bis etwa 80 MHz brauchbare Ergebnisse liefern. Ob dieser Weg mit Amateurmitteln gangbar ist, wäre noch zu prüfen.

1.4. Fokussierung der Ultraschallwellen

Von einem flachen Dickenschwinger wird ein Ultraschallstrahl emittiert, der in etwa den Durchmesser des Schwingers hat. Um mit dem Strahl hoch aufgelöste Bilder zu erzeugen, muss er fokussiert, das heißt auf einen möglichst kleinen Fleck gebündelt werden. Wie bei Lichtstrahlen kann diese Aufgabe mit einer Linse bewerkstelligt werden. Allerdings gibt es einige Unterschiede zwischen Licht- und Ultraschalloptik. Während bekannter Weise Lichtstrahlen durch eine konvexe Sammellinse gebündelt werden, sind die Verhältnisse beim Ultraschall genau umgekehrt. Hier wird der Strahl durch eine konkave Linse gebündelt. Das liegt an den unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten. So ist die Lichtgeschwindigkeit im Glas der Linsen kleiner als in der umgebenden Luft, die Schallgeschwindigkeit in einer Glaslinse aber größer als im umgebenden Wasser. Nach dem Snell-Gesetz wird ein Strahl beim Übergang von einem Medium in ein anderes abgelenkt. Beim Übergang vom dichteren Medium (niedrige Geschwindigkeit) in das dünnere Medium (höhere Geschwindigkeit) wird der Strahl vom Lot weg gebrochen. Geht der Strahl vom dünneren ins dichtere Medium, wird er zum Lot hin gebrochen. Der Unterschied der Geschwindigkeiten wird deshalb als Brechzahl bezeichnet.

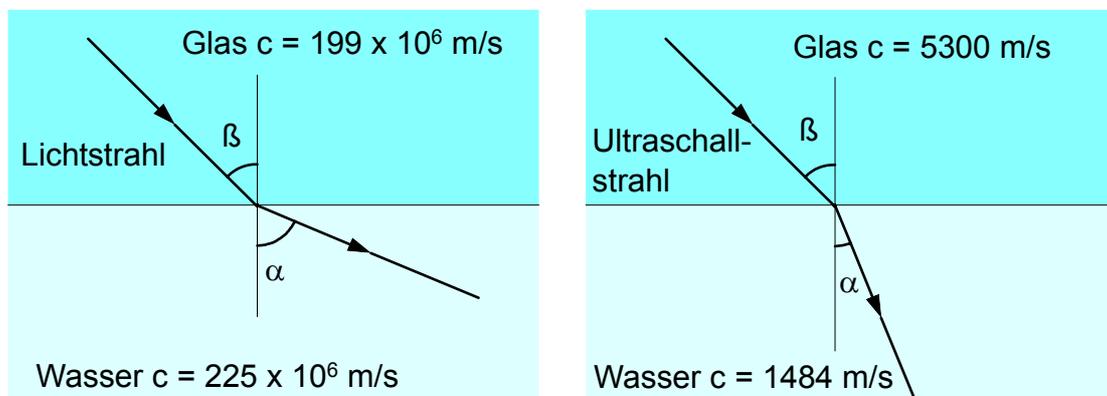


Abb. 9: Unterschiede der Brechung von Licht- und Ultraschallstrahlen

Daraus erklärt sich die unterschiedliche Richtung der Strahlbrechung und damit unterschiedliche Wirkung der Linsen. Bei Betrachtung der Zahlenwerte fällt noch ein weiterer Unterschied auf. So beträgt die Brechzahl einer Glaslinse in Wasser für Licht nur 1,1, für Ultraschall aber 3,5, bei gleichem Krümmungsradius haben Linsen für Ultraschall eine deutlich höhere Brechkraft.

Die Brennweite einer plankonkaven Linse berechnet sich nach folgender Formel:

$$f = r / (1 - c_M / c_L)$$

f = Brennweite	(cm)
r = Krümmungsradius	(cm)
c _M = Schallgeschwindigkeit im Medium	(m/s)
c _L = Schallgeschwindigkeit in der Linse	(m/s)

Allerdings bringt die große Brechzahl auch einen Nachteil. Das Licht, bzw. der Schall wird an der Grenzfläche nicht nur gebrochen, sondern auch reflektiert. Der reflektierte Anteil wird umso höher je größer der Unterschied der Brechzahlen vom Linsenmaterial und umgebenden Medium ist. Das reflektierte Licht geht nicht nur für die Abbildung verloren, sondern durch wiederholte Reflektionen können Geisterbilder entstehen die die Abbildungsqualität verschlechtern.

Wie in der Lichtoptik können die Reflektionen durch Vergütungsschichten verringert werden. Mit Erfolg wurden Schichten aus Kohlenstoff aufgebracht, aber auch Kunststofffilme (z. B. Lackschichten) können verwendet werden.

Die Schallgeschwindigkeit in der Schicht errechnet sich aus der Wurzel des Produktes der Schallgeschwindigkeiten in der Linse und im umgebenden Medium. Im Falle einer Glaslinse in Wasser muss somit der Film eine Schallgeschwindigkeit von 2804 m/s haben. Die Dicke der Schicht beträgt ein Viertel der Wellenlänge und ist somit von der Schallfrequenz abhängig. Bei einer Frequenz von 50 MHz beträgt die Wellenlänge $2804 / 50 \times 10^6 = 56 \mu\text{m}$. Ein Plexiglasfilm ($c = 2670 \text{ m/s}$) mit dieser Dicke würde den Erfordernissen gut entsprechen.

Für erste Versuche mit einem Piezobeeper bei 8 MHz ist der Aufwand aber nicht gerechtfertigt. Hierfür genügt eine Linse aus Kunststoff die wesentlich einfacher zu fertigen ist als eine Glaslinse. Als Rohmaterial nimmt man einen 10 mm langen und 10 mm dicken Plexiglasstab, der an einem Ende flach geschliffen und poliert wird. Das andere Ende wird mit einem Kugelfräser mit einer tiefen Mulde versehen. Auch die Mulde wird mit einer passenden Stahlkugel und Polierpaste geglättet. Die Oberfläche der Mulde, die eigentliche Linsenfläche darf keine Kratzer mehr zeigen. Auf die flache Seite wird mit UHU-Plus der Piezobeeper geklebt. Nach der Linsenformel für Ultraschall hat die Plexiglaslinse eine Brennweite von $0,5 \text{ cm} / (1 - 1484 \text{ m/s} / 2735 \text{ m/s}) = 1,09 \text{ cm}$. Bei Plexiglaslinsen in Wasser entspricht die Brennweite etwa dem doppelten Krümmungsradius.

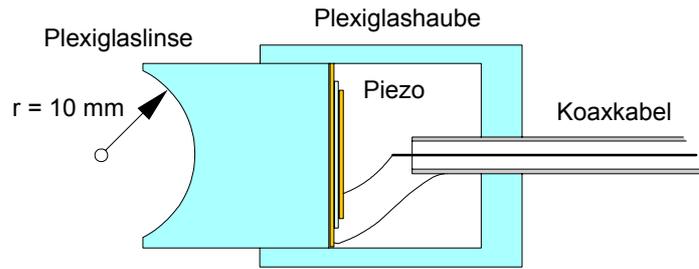


Abb. 10: Einfacher Transducer mit Plexiglaslinse

Da der Transducer im Wasser betrieben werden soll, wird die Rückseite mit einer wasserdichten Haube versehen. Das koaxiale Zuleitungskabel wird in die Haube eingeklebt.

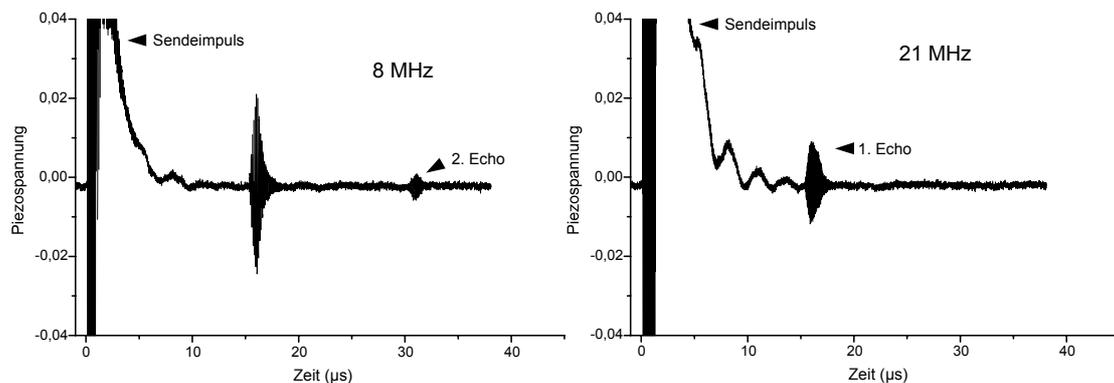


Abb. 11: Echoimpulse des Piezotransducers mit Plexiglaslinse in Wassermedium

1.5. Scanner

Zur Aufnahme eines Bildes muss das Objekt mit dem Transducer rasterförmig abgetastet werden. Die bei Tunnel- und Lasermikroskopen üblichen Piezo- oder Lautsprecher-Scannern sind hier nicht zu gebrauchen. Da Auflösung des Ultraschallmikroskops bestenfalls $10\ \mu\text{m}$ beträgt, müssen größere Bereiche gerastert werden. Am Besten eignet sich hierzu ein mit Schrittmotoren betriebener Kreuztisch.

Am einfachsten wird der Aufbau mit einem Seilzug. Hierbei wird eine Stahlritze direkt um die Motorachse gewickelt. Die erreichbare Auflösung hängt dann vom Schrittwinkel und vom Durchmesser der Motorachse ab. Bei einer Motorachse mit 6 mm Durchmesser und den üblichen 400 Halbschritten pro Umdrehung beträgt die Auflösung $6 \cdot \pi / 400 = 47 \mu\text{m}$. Alternativ kann der Antrieb auch mit einer Schraubenspindel erfolgen. Eine M6-Gewindestange hat eine Steigung von einem Millimeter. Mit dem Schrittmotor beträgt die maximale Auflösung dann $1000 / 400 = 2,5 \mu\text{m}$ bei Halbschritt und $1000 / 200 = 5 \mu\text{m}$ bei Vollschrittansteuerung.

1.5.1. Spindelscanner

Neben dem Antrieb braucht der Kreuztisch noch eine stabile Führung. Von den üblichen Typen wie Schwalbenschwanz-, Linearkugellager- und Buchsenlagerführung eignet sich die Letzte am Besten für den Selbstbau. Hier wird eine Sintermetallbuchse verwendet, die auf einer Stahlwelle gleitet.

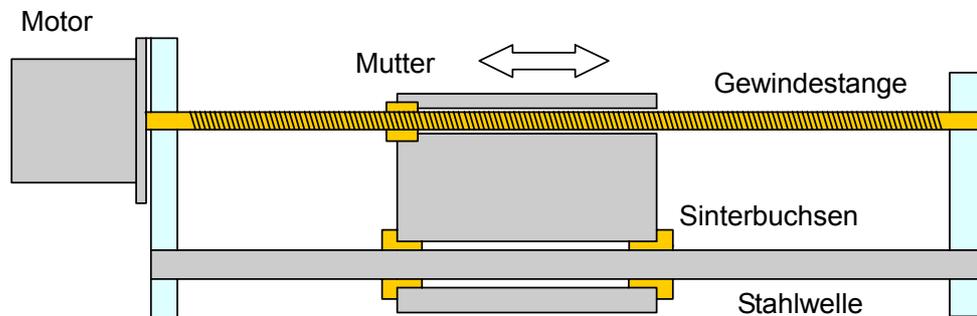


Abb. 12: Spindeltrieb des Schlittens

1.5.2. Seilzugscanner

Der Aufbau einer Verschiebeeinheit mit einer Spindel ist mechanisch anspruchsvoll da die Gewindestange und die Führungsstahlwelle exakt parallel verlaufen müssen. Ansonsten ist ein klemmfreier Lauf des Schlittens nicht möglich. Eine gute Bohrmaschine oder noch besser eine kleine Drehbank sollten zur Verfügung stehen. Etwas einfacher ist der Seilzugantrieb. Hier wird auf eine zweite Führung des Laufschlittens verzichtet, wodurch die Ansprüche an die mechanische Genauigkeit etwas abgeschwächt werden. Die horizontale Lage des Schlittens wird durch ein Laufrad stabilisiert.

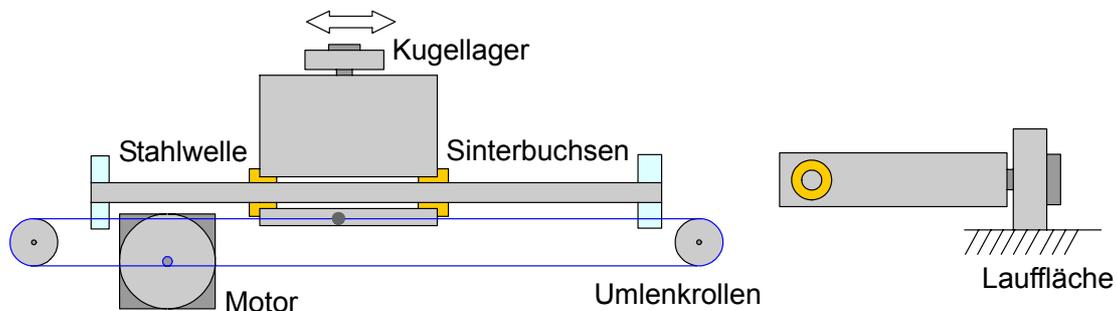


Abb. 13: Seilzugantrieb des Schlittens

Die bei beiden Ausführungen nötige Stahlwelle und die entsprechenden Laufbuchsen können gekauft (z. B. Conrad) oder auch aus einem alten Scanner ausgebaut werden.

Wesentlich einfacher wird der Aufbau, wenn man käufliche Linearführungen (z. B. Igus, Bosch-Rexroth, THK) verwendet. Da diese Teile neu ziemlich teuer sind, lohnt sich ein Blick in Ebay (Suchwort: Linearführung) wo man gebrauchte oft zu erstaunlich niedrigem Preis ersteigern kann. Bei diesen Führungen laufen die Schlitten auf Achse mit einem speziellen Kugellager. Durch dieses Kugelumlauflager ist trotz sehr kleinem Spiels kaum Reibung vorhanden und die Schlitten lassen sich ruckfrei bewegen.

Die Tabelle zeigt die Auflösung des Spindel- und Seilzugscanners mit üblichen Schrittmotoren mit 200 Schritten pro Umdrehung im Vollschrittmodus.

Modus	Schritte/ Umdrehung	Auflösung / Bildfeld (256 Bildpunkte)			
		Spindel M8 Schraube		Seilzug 6 mm Achse	
Vollschritt	200	6,25 µm	1,6 mm	94 µm	24 mm
Halbschritt	400	3,1 µm	0,8 mm	47 µm	12 mm

Tab. 4: Theoretische Auflösung beider Scanner

Man sieht, dass die theoretische Auflösung der Spindelscanner unnötig hoch ist. Wird das Mikroskop mit 21 MHz betrieben, liegt die maximale Auflösung bei etwa 25 µm und in der gleichen Größenordnung sollte auch die Schrittweite liegen. Im Prinzip wären die kleinen Schritte nicht hinderlich aber durch sie werden die Scanzeiten verlängert, da für die Verfahrung zwischen den Bildpunkten mehrere Motorschritte ausgeführt werden müssen. Für das Ultraschallmikroskop ist deshalb der Seilzugscanner besser geeignet, will man den Scanner auch für andere, hochauflösende Methoden wie ein Lasermikroskop verwenden, ist der Spindelscanner die bessere Wahl.

Ein anderer Weg trotz der Verwendung eines Seilzugs kleinere Schrittweite zu erreichen ist der Einsatz eines Treibers mit Feinschrittoption. Das IC TB6560 des Herstellers Toshiba ist hier gut geeignet. Der TB6560 beinhaltet geschaltete Brücken-Treiberstufen zur Ansteuerung eines bipolaren 2-Phasen Schrittmotors mit Versorgungsströmen bis zu 3,5 Ampere. Die Schrittzahl pro Umdrehung kann mit dem Signal an den Mode-Eingängen eingestellt werden. Die größte, einstellbare Auflösung beträgt 32 * 200 Schritte pro Umdrehung, sodass der Seilzugscanner mit 6 mm Achse eine Auflösung von 12 µm erreicht wird.

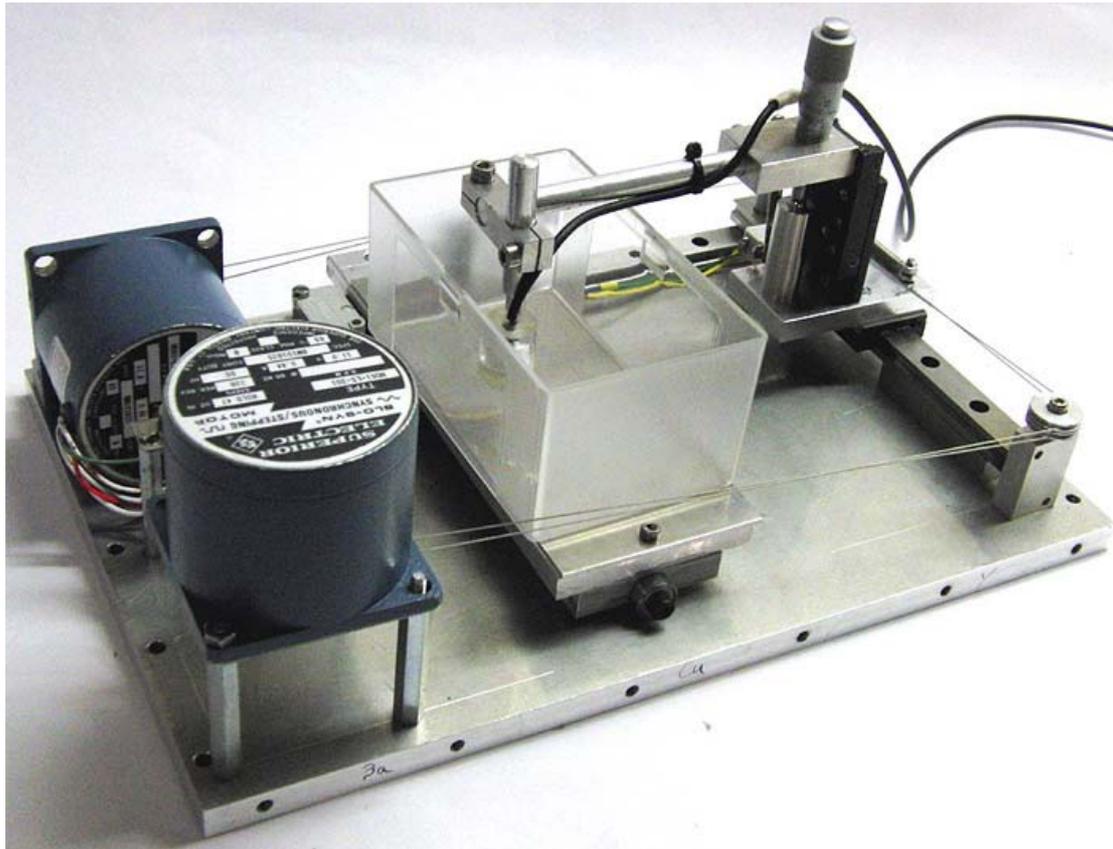


Abb. 14: Scanner mit Seilzugantrieb

Für das Ultraschallmikroskop ist es einfacher die Bewegung in der X- und Y-Achse zu trennen. Das heißt, mit der X-Verfahren wird der Transducerkopf bewegt und in der Y-Achse der Wasserbehälter mit der Probe verfahren. Dadurch wird bei der schnelleren X-Rasterung nur die kleine Masse des Transducers bewegt, während sich das schwerere Wasserbecken mit der Probe nur langsam in der Y-Richtung bewegt.

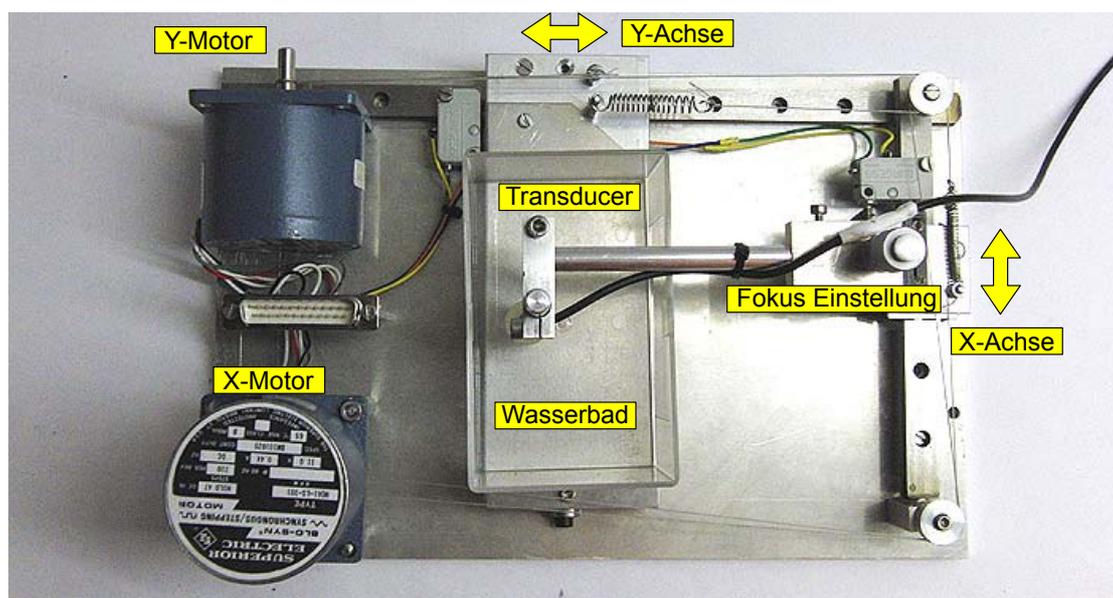


Abb. 15: Oberansicht des Scanners

Die Feinverstellung des Transducers mit der Mikrometerschraube in der Z-Achse ist optional und kann auch entfallen. Allerdings wird dann die Fokussierung schwieriger da der Einstellbereich, die Schärfentiefe nur etwa einen Millimeter beträgt. Die Schaltung zum Betrieb des Scanners wird in einem späteren Kapitel ausführlich beschrieben.

1.6. Elektronik

Neben den für ein Rastermikroskop notwendigen Schaltungen wie Scannertreiber und Interfaces zum steuernden Computer benötigt ein Ultraschallmikroskop spezielle Schaltungsteile zur Erzeugung und Detektion der Schallwellen, die im Folgenden einzeln beschrieben werden.

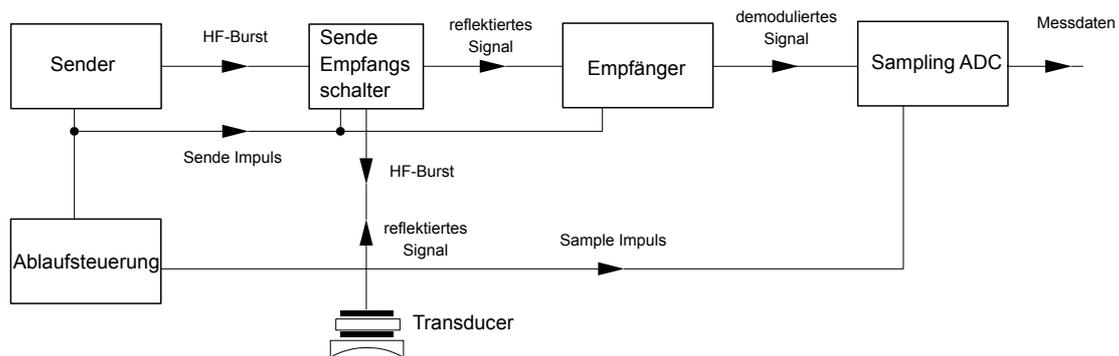


Abb. 16: Signalschaltungszug in einem Ultraschallmikroskop

Die Hochfrequenzschwingungen zum Antrieb des Transducers werden in Sendeschaltungen erzeugt, die je nach gefordertem Frequenzbereich und Leistung unterschiedlich konzipiert und aufgebaut sind.

Je nach geforderter Auflösung liegen die Betriebsfrequenzen im Kurzwellen- bzw. unterem VHF-Bereich. Allerdings sind auch UHF- und Mikrowellenmikroskope gebaut und betrieben worden. Zum Beispiel wurde ein C-Band Mikroskop gebaut, das bei 4,2 GHz arbeitet und die sagenhafte Auflösung von 55 Nanometern bietet. Aber die experimentellen Anforderungen sind sehr hoch (Betrieb in flüssigem Helium bei 100 mK) und vom Hobbybastler kaum zu bewältigen.

Relativ einfach zu realisieren sind Mikroskope mit einer Frequenz von 1 bis 20 MHz. In diesem Bereich ist die Dämpfung der Wellen noch niedrig, sodass mit kleinen Sendeleistungen und unempfindlichen Empfänger gearbeitet werden kann.

Die von der Ablaufsteuerung getastete Senderschaltung erzeugt einen HF-Burst von kurzer Dauer (100 ns - 1 μ s). Während dieser Zeit wird durch den Sende/Empfangsschalter der Transducer mit dem Sender verbunden und der Empfänger abgekoppelt und stumm geschaltet. Anschließend wird der Sender ausgeschaltet, der Transducer mit dem Empfängereingang verbunden und der Empfänger eingeschaltet. Das nach der Laufzeit eintreffende Echosignal wird im Empfänger verstärkt und demoduliert. Das demodulierte Impulssignal wird zur Samplezeit im ADC gespeichert und gemessen.

Für die Realisierung des Senders gibt es zwei Möglichkeiten. Man kann den Transducer mit einem Paket von HF-Pulsen oder auch einen möglichst steilen Einzelimpuls ansteuern.

1.6.1. Breitbandiger Impulssender

Die Schaltung für diese Betriebsart ist sehr einfach aufzubauen und arbeitet mit einer Kondensatorentladung.

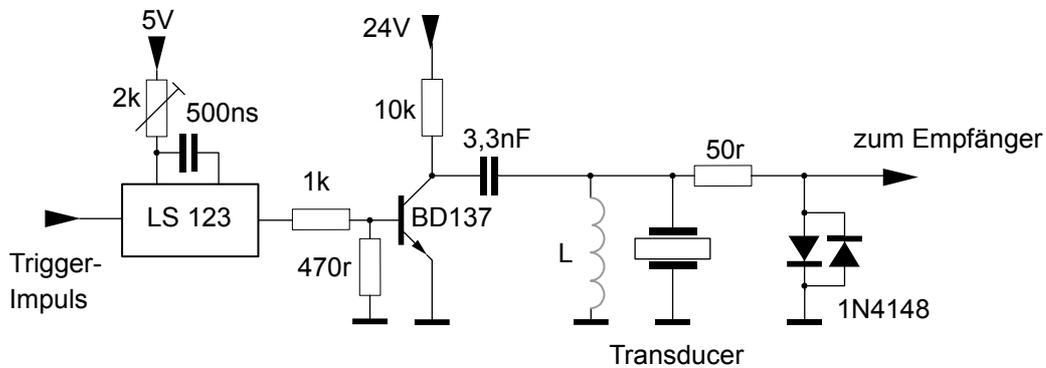


Abb. 17: Einfacher Pulssender

Der auf 24 V geladene 3,3 nF Kondensator wird mit einem Transistor über den Transducer entladen. Durch den Impuls wird der Transducer zu Schwingungen auf seiner Eigenfrequenz angeregt. Neben dem einfachen Aufbau hat diese Schaltung auch den Vorteil sehr kurze Impulse zu liefern und die Amplitude der Schwingung kann über die Ladespannung des Kondensators einfach verändert werden. Wird als Schalter ein passender Hochspannungstransistor verwendet, können Sendepulse von einigen Hundert Volt erzeugt werden.

Der Nachteil der Schaltung liegt in der breitbandigen Anregung, durch die mehrere Moden des Transducers angeregt werden, unter Anderen auch unerwünschte Scher- und Biegeschwingungen. Da diese aber deutlich tiefere Frequenzen als die Dickenschwingung haben, können sie durch eine passende Induktivität L parallel zum Transducer unterdrückt werden.

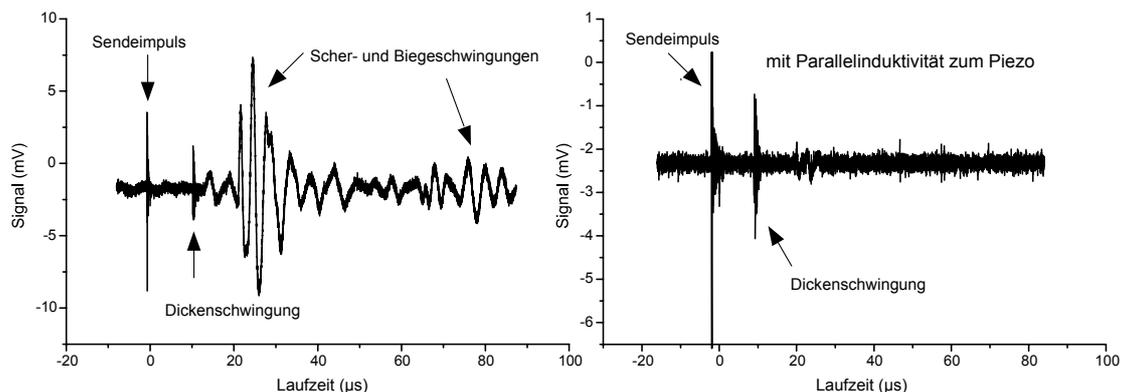


Abb. 18: Signale an einem einfachen Impulssender

1.6.2. Schmalbandiger Sender mit Logikbausteinen

Die Sendeschaltung zur Erzeugung von schmalbandigen HF-Paketen besteht aus einem Oszillator, einer Taststufe zur Erzeugung der kurzen Burstpulse und einem Leistungsverstärker zum Antrieb des Piezowandlers. Da die Anforderungen an Frequenzstabilität und Klirrfaktor nicht sehr groß sind, können einfache TTL-Schaltungen als Oszillator dienen. Will man bei einer festgelegten Frequenz arbeiten

kann ein Quarzoszillator verwendet werden. Einen größeren Abstimmbereich erhält man mit einem Schmitttrigger-Generator. Für sehr große Frequenzvariationen ist ein DDS-Generator die einfachste Lösung. Die Taststufe und auch die Endstufe für kleinere Leistungen werden mit Logikgattern aufgebaut.

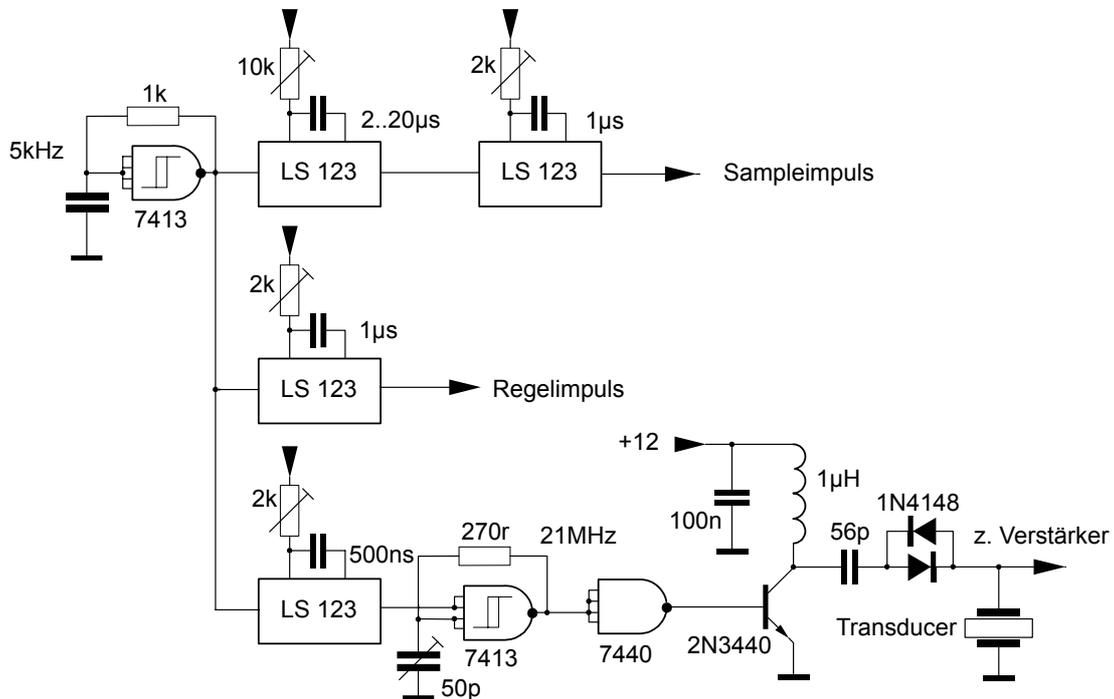


Abb. 19: Einfache Sendeschaltung mit Logikgatterns

Im Impulsteil werden aus einem mit 5 kHz Oszillator alle benötigten Signale abgeleitet. Der Sampleimpuls wird durch zwei Monoflops erzeugt. Der Erste bestimmt die Verzögerung des Impulses nach dem Sendepuls, seine Zeitkonstante muss der Laufzeit des Ultraschallimpulses entsprechen. Der zweite Monoflop bestimmt die Samplezeit. Ein weiterer Monoflop erzeugt den Abregelimpuls, um während der Sendezeit den Empfangsverstärker zu sperren. Ein vierter Monoflop schaltet den HF-Generator während der Sendezeit ein. Der HF-Generator arbeitet bei 21 MHz. Sein Ausgangssignal wird in einem 50-Ohm Leistungsgatter (SN 7440) verstärkt. Das Gatter steuert direkt den Sendetransistor 2N3440 im C-Betrieb. Der Arbeitswiderstand im Kollektorkreis ist eine 1 µH HF-Drossel.

1.6.3. 3-Stufiger Schmalbandsender für 21 MHz

Die folgende Senderschaltung ist für 21 MHz ausgelegt kann aber auch durch eine Änderung der Werte auf andere Frequenzen abgestimmt werden. Der Oszillator arbeitet in Clapp-Schaltung und wird durch eine negative Vorspannung getastet. Für die beim Selbstbau immer schwierigen Spulen werden fertige Bauteile von Neosid verwendet. Auf den Oszillator folgt eine ebenfalls getastete, breitbandig ausgelegte Treiberstufe, deren Ausgangswiderstand durch eine Festinduktivität mit 4,7 µH gebildet wird.

Chip mit Wärmeleitkleber auf ein kleines Messingblech geklebt. Das Messingblech ist etwas größer als das Gehäuse und dient auch als Massefläche. Die zahlreichen Gnd-Anschlüsse des AD9854 werden zum Blech gebogen und mit ihm verlötet. Auch die 100nF Chipkondensatoren zur Stützung der Betriebsspannung werden direkt auf das Blech gelötet und mit den Vdd-Anschlüssen verbunden. Das Verlöten der Pins im 0,65 mm Abstand erfordert einen feinen LötKolben, eine gute Lupe und eine ruhige Hand.

Da die Betriebsspannung des AD 9854 3,3 Volt beträgt, müssen auch die digitalen Steuersignale diesen Pegel aufweisen. Diese Umsetzung vom TTL-Pegel erfolgt mit Open-Collector-Treibern. Insgesamt müssen 7 I/O-Leitungen verdrahtet werden.

1	Pin 17	IO-Reset	Rücksetzen des Interfaces
2	Pin 19	SDIO	Serieller Eingang
3	Pin 20	IO DU CLK	Update Clock
4	Pin 21	SCLK	Serieller Clock
5	Pin 22	CS	Chip Select
6	Pin 29	FSK	Pulseingang
7	Pin 70	MRST	Master Reset

Tab. 5: I/O-Pins des AD 9854

Für die Anwendung als Ultraschallsender beschränkt sich die Programmierung auf wenige Befehle. Zur Initialisierung werden die Betriebsart der Clock-PLL, der DDS-Betriebsmodus und die Frequenz eingestellt, anschließend muss nur noch die Frequenz verändert werden.

Damit der DDS-Generator auch unabhängig vom Ultraschallmikroskop betrieben werden kann, erhält er einen eigenen PIC-Prozessor 16F84 zur Ansteuerung. Im Ultraschallmikroskop wird der PIC vom eigentlichen Interfaceprozessor Atmel Mega32 über einen 2-Drahtbus gesteuert. Wird der DDS als eigenständiges Gerät verwendet, kann der PIC mit entsprechenden Ein- und Ausgabeeinheiten, wie LCD-Display, Tasten und Drehgeber ausgestattet werden.

Die Schaltung des DDS-Generators entspricht weitgehend dem Datenblatt des Herstellers Analog Device. Allerdings wurde auf den bei DDS-Generatoren obligatorischen Tiefpass verzichtet, da die Übertragungsstrecke schon die Eigenschaften eines Tiefpasses aufweist, die Dämpfung des Ultraschalls steigt mit wachsender Frequenz stark an. Der maximale Ausgangsstrom des Sinus-DA-Wandlers beträgt zwischen 5 und 20 mA in einen Lastwiderstand von 50 Ohm und entspricht damit einer Leistung von 1,25 mW und 20 mW (1dBm..13dBm). Somit ist die Ausgangsleistung ausreichend um Breitbandendstufen auszusteuern.

Leider hat AD 9854 keinen Eingang zu einfachen Bursterzeugung. Zwischen DDS-Generator und Endstufe muss deshalb eine Taststufe eingefügt werden.

Etwas anspruchsvoller ist der Aufbau der Endstufe für höhere Leistungen bis zu einigen 10 Watt. Brauchbare Schaltungen findet man in den Zeitschriften und Internetseiten der Funkamateure unter dem Begriff QRP. Beim QRP-Betrieb werden meist Selbstbaugeräte mit Leistungen unter 10 Watt verwendet. So gibt es bei der Zeitschrift „Funkamateure“ (www.funkamateure.de) einen Endstufenbausatz QRP Linearendstufe BX-031 für nur 30 €. Die Schaltung hat eine Ausgangsleistung von 5 bis 8 Watt und eine Leistungsverstärkung > 30 dB im Frequenzbereich von 1,8 MHz bis 150 MHz. Zudem verhält sie sich gegen im Experimentierbetrieb leicht auftretenden Fehlanpassungen recht gutmütig.

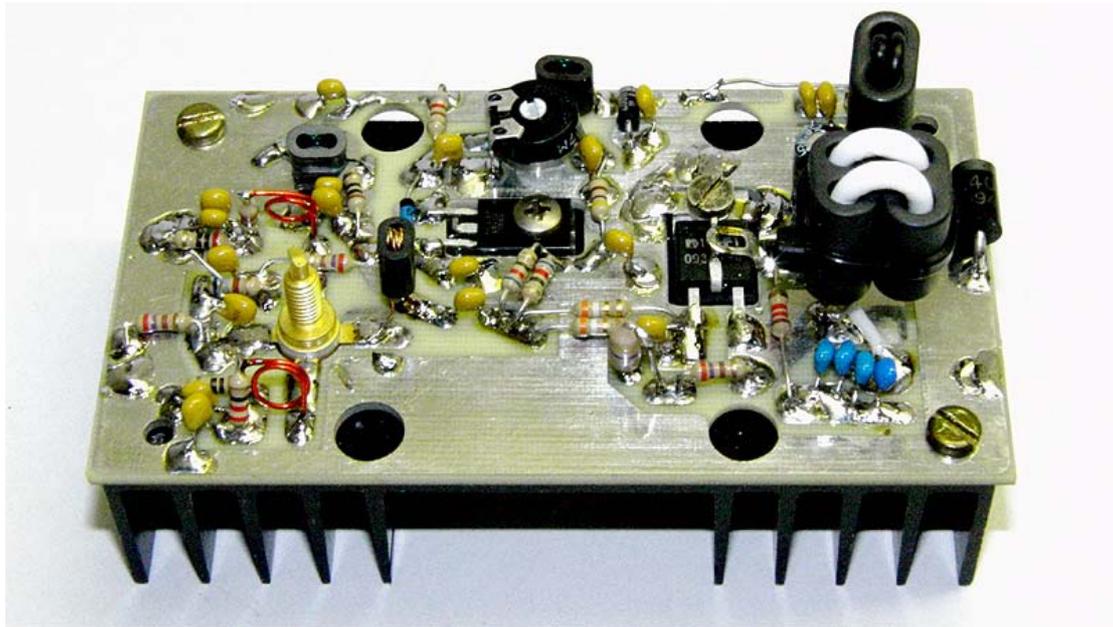


Abb. 21: 5 Watt Breitbandendstufe BX-031

1.6. 5. Transduceranpassung

Die Impedanz des Piezobeeperers ist zwar im Datenblatt mit 1,5 KOhm angegeben aber dieser Wert gilt nur bei einer Betriebsfrequenz von 5 kHz. Bei 8 oder gar 22 MHz ist sie wesentlich kleiner und beträgt nur noch Bruchteile eines Ohms. Um die Sendeenergie möglichst effektiv in den Schwinger einzukoppeln, sollte deshalb eine Anpassschaltung eingefügt werden. Für eine festgelegte Frequenz eignen sich hierfür LC-Netzwerke. Eine breitbandige Anpassung kann mit Übertragern erreicht werden. Allerdings wird die erreichbare Bandbreite umso kleiner je größere Übersetzungsverhältnisse man verwendet.

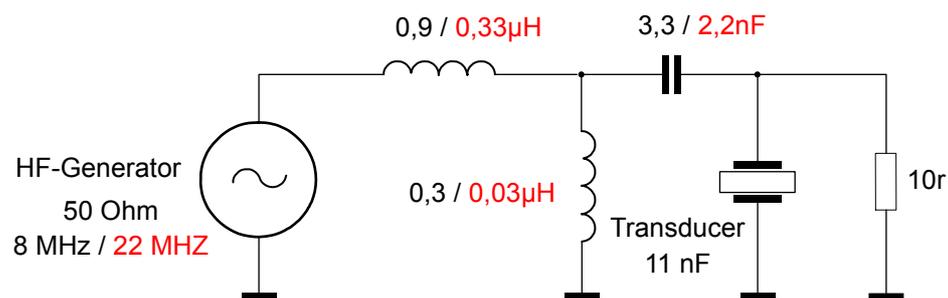


Abb. 22: Anpassschaltung mit LC-Netzwerk

	Drahtdurchmesser	Spulendurchmesser	Spulenlänge	Wicklungen
0,9 μ H	0,5 mm	6 mm	36 mm	30
0,3 μ H	0,5 mm	6 mm	12 mm	10
0,03 μ H	0,5 mm	4 mm	5 mm	3

Tab. 6: Parameterwerte des Anpassnetzwerkes

1.6.6. Sendeempfangsschalter

Wird das Mikroskop wie es meist der Fall ist im Reflektionsmodus betrieben wird üblicherweise nur ein Transducer zum Senden und Empfangen eingesetzt. Das ist möglich, weil das reflektierte Empfangssignal erst einige Mikrosekunden nach dem Sendepuls den Transducer erreicht und somit von diesem zu trennen ist. Voraussetzung ist natürlich, dass der Sendepuls kürzer als die Laufzeit des Signals ist. Trotz der zeitlichen Versetzung muss der empfindliche Empfängereingang während der Sendezeit geschützt werden, um eine Übersteuerung oder gar Beschädigung der Eingangsstufen zu verhindern. Für diesen Zweck wurden verschiedene Schaltungen entwickelt.

1.6.7. Zirkulator

Für Ultraschallmikroskope im Höchstfrequenzbereich von einigen Hundert Megahertz, bis einigen Gigahertz wird, ein Zirkulator eingesetzt. Dieses Bauteil hat die Eigenschaft hochfrequente Wellen nur in einer Richtung passieren zu lassen. Die Ein- und Ausgänge eines Zirkulators werden Tore genannt. Ein am Tor 1 eingespeistes Signal erscheint erst an Tor 2 und dann an Tor 3. Der direkte Weg von Tor 1 zum Tor 3 ist versperrt. Werden der Sender an Tor 1, der Transducer an Tor 2 und der Empfänger an Tor 3 angeschlossen, ist der Sender und Empfänger wirkungsvoll entkoppelt. Allerdings ist die Entkopplung nur wirksam, wenn die Transducerimpedanz richtig an den Zirkulator angepasst ist. Bei schlechter Anpassung wird am Transducer Sendeenergie reflektiert und zum Empfängertor weiter geleitet. Deshalb wird der Empfängereingang während der Sendezeit zusätzlich mit Pin-Dioden gesperrt.

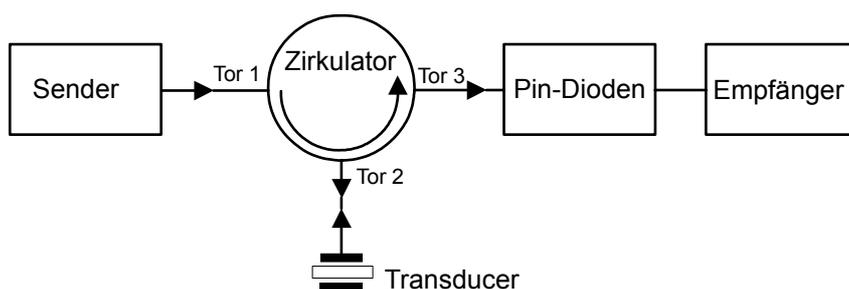


Abb. 23: Sender-Empfänger-Entkopplung mit Zirkulator

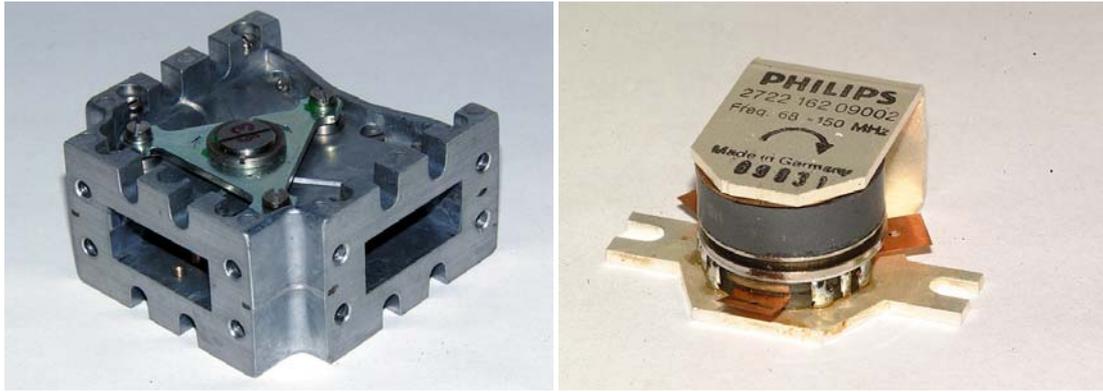


Abb. 24: Zirkulatoren für 10 GHz, links und für 68 -150 MHz rechts

1.6.8. Gabelschaltung

Zirkulatoren werden nur für hohe Frequenzen ab etwa 100 Megahertz gebaut. Für niedrigere Frequenzen gibt es die sogenannte Gabelschaltung. Die Gabelschaltung wurde in analogen Telefonen eingebaut. Hier müssen die eingehenden und ausgehenden Signale, die über eine gemeinsame Leitung laufen, getrennt werden. Die ins Mikrofon gesprochene Stimme soll nicht zu laut im eigenen Hörer vernehmbar sein. Die Gabelschaltung ist eine Brückenschaltung. Durch die symmetrische Ansteuerung des Überträgers wird erreicht, dass das Sendesignal nicht zum Empfängereingang durchschlägt, das vom Transducer kommende Signal aber durchgereicht wird. Auch bei der Gabelschaltung muss wie beim Zirkulator die Impedanz angepasst werden damit keine Reflektionen der Sendeenergie zum Empfänger gelangen.

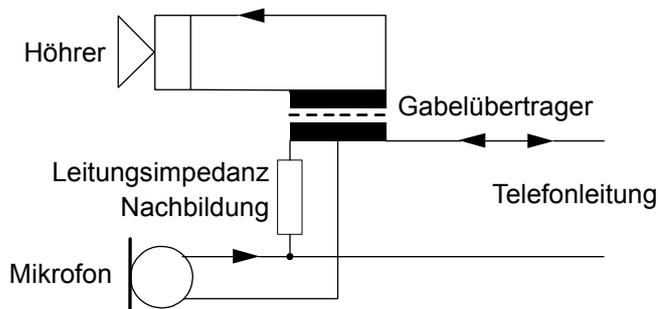


Abb. 25: Klassische Gabelschaltung im analogen Telefon

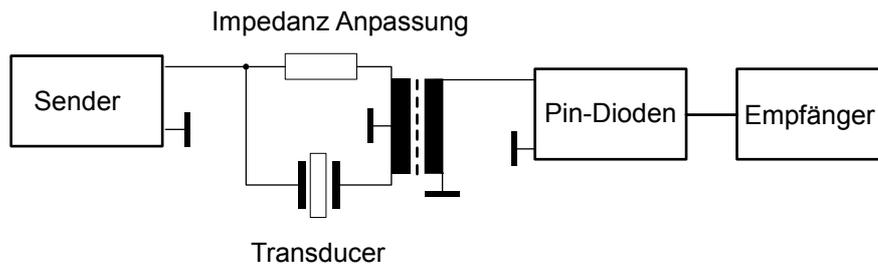


Abb. 26: Sender-Empfänger-Entkopplung mit Gabelschaltung

Die Schaltung hat den Nachteil, dass der Transducer nicht mit einem Anschluss an der Schaltungsmasse liegt, was den praktischen Aufbau etwas erschwert. Durch eine etwas abgeänderte Anordnung kann das geändert werden.

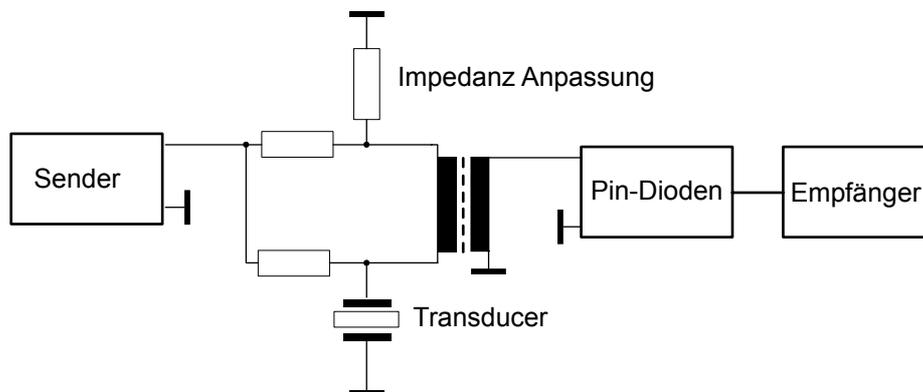


Abb. 27: Gabelschaltung mit einseitig geerdeten Transducer

Dem versierten HF-Amateur wird auffallen dass die Gabelschaltung, der eines Richtkopplers oder Reflektionsmesskopfes entspricht. Tatsächlich können derartige Messköpfe sehr gut für diesen Zweck verwendet werden (z. B. Reflektionsmesskopf BX-066, 29,80€ Funkamateurladen, www.box73.de)

1.6.9. Diodenmatrix

Neben Zirkulator, Gabelschaltung und Richtkoppler kann auch mit einer Diodenmatrix das Sendesignal am Eingang des Empfängers unterdrückt werden.

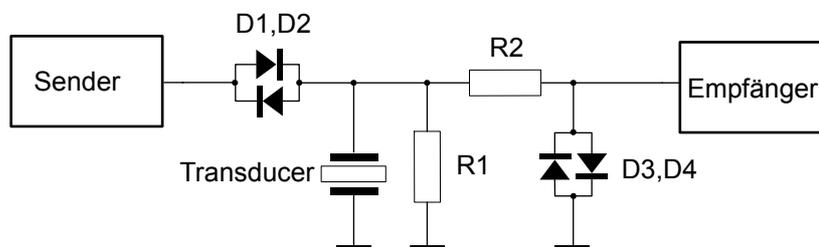


Abb. 28: Sende/Empfangsschalter mit Dioden

Während des Sendeimpulses leitet das Diodenpaar D1, D2 und die Sendeenergie gelangen kaum gedämpft zum Transducer. Auch das Diodenpaar D3, D4 leitet und begrenzt die Spannung am Empfängereingang auf niedrige Werte. Während der Empfangszeit sperren alle Dioden. Somit ist der Senderausgang vom Transducer entkoppelt. Die kleine Empfangsspannung gelangt ungehindert zum Empfänger.

Die Schaltung hat zwei Nachteile. Zum einem wird der Sendeimpuls über den Stromkreis R2 und D3D4 abgeschwächt und zum anderen wird auch das Empfangssignal durch den Widerstand R2 geschwächt.

Eine bessere Dämpfung erhält man durch einen aktiven Diodenschalter mit Pin-Dioden. Im Gegensatz zur obigen Schaltung muss die Pindiodenmatrix aktiv gesteuert werden, dafür sind aber hohe Dämpfungswerte erreichbar. Pin-Dioden verhalten sich wie steuerbare Widerstände. Der leicht erhältliche Infineontyp BA 595 kann bis zu einer unteren Frequenzgrenze von 1 MHz verwendet werden und kann durch einen Vorstrom auf Widerstandswerte zwischen einigen zehn Kiloohm und einigen Ohm eingestellt werden. Verwendet man ein Netzwerk aus drei Dioden, kann

zwischen einer Einfügedämpfung von einigen Dezibel und 50 bis 60 dB umgeschaltet werden.

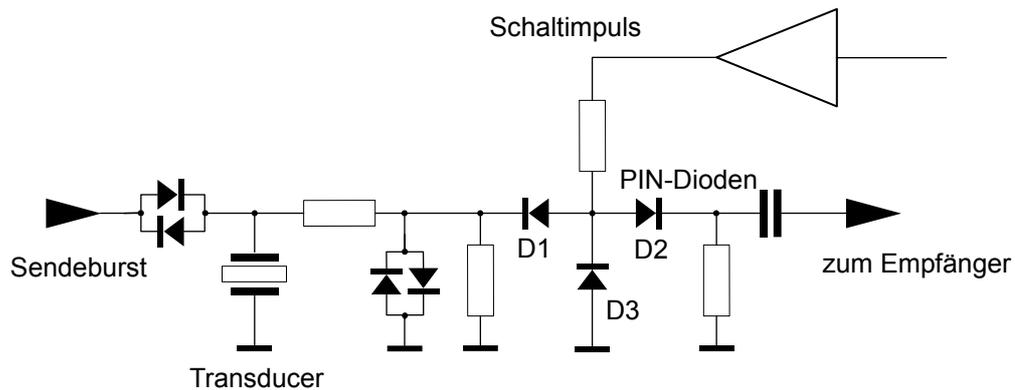


Abb. 29: Sende/Empfangsschalter mit PIN-Dioden

Auch bei der Verwendung von PIN-Dioden sollte ein Diodendiplexer vorgeschaltet werden, da sonst die hohe Spannung des Sendepulses die PIN-Dioden durchschalten könnte. Wichtig sind auch die Flanken des Schaltimpulses. Sind sie zu steil, könnten sie zum Empfänger durchschlagen und diesen beeinträchtigen.

Die empfangenen Signale sind sehr klein und müssen vor der Demodulation und AD-Wandlung verstärkt werden.

1.6.10. Empfänger mit Breitbandverstärker

Ein erster Versuchsaufbau wurde mit Breitband-Verstärkern gestaltet sodass mit verschiedenen Betriebsfrequenzen gearbeitet werden kann. Der Verstärker hat zwei HF-Stufen mit Plessey ICs SL560 die eine maximale Verstärkung von 60 dB liefern. Auf den Diodengleichrichter mit einer Germaniumdiode AA118 folgt eine Videostufe mit dem schnellen OP LM 318 der noch mal 5fach verstärkt.

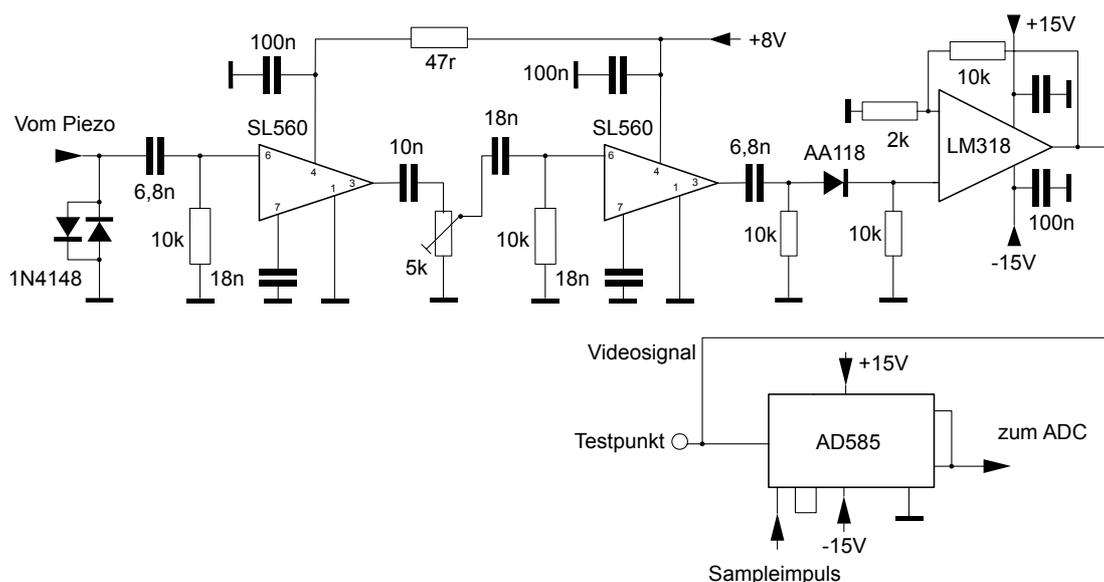


Abb. 30: Einfacher Breitbandverstärker für den Bereich von 1 bis 20 MHz

Das Videosignal wird im Sample/Hold-Baustein AD585 integriert und steht dann als Gleichspannungssignal für den AD-Wandler zur Verfügung.

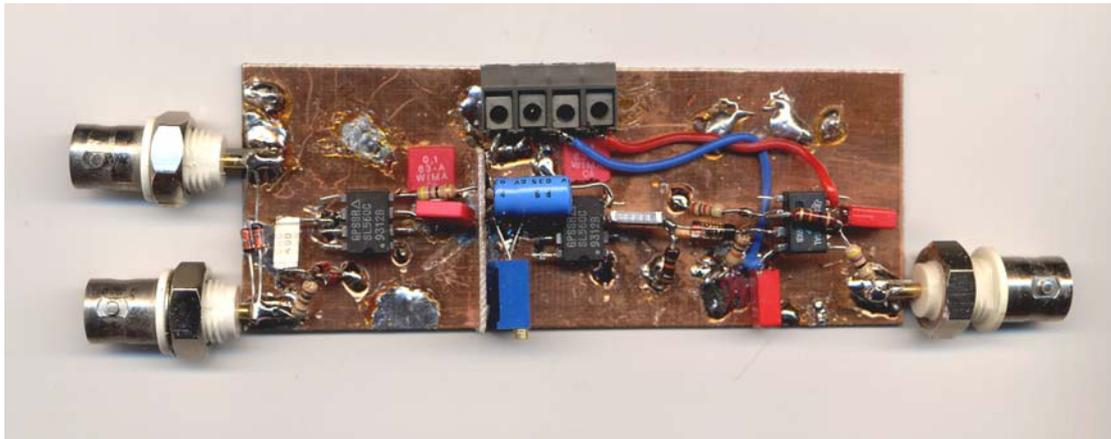


Abb. 31: Versuchsaufbau des Breitbandverstärkers

1.6.11. Empfänger mit selektiven Geradeausverstärker

Bei der 21 MHz Resonanz sind die Signale noch kleiner deshalb wurde ein anderes Verstärkerkonzept gewählt. Der Verstärker ist nach dem Vorbild eines Zwischenfrequenz-Verstärkers aufgebaut und verwendet integrierte Schaltungen vom Typ MC 1530. Dieses IC wurde für HF-Verstärker bis zu 60 MHz entwickelt und besitzt eine Leistungsverstärkung von 50 dB. Zudem ist ein Regeleingang vorhanden der eine Abregelung um 60 dB erlaubt. Der Verstärker ist zweistufig mit je einem MC 1350. Die Kopplung zwischen den Stufen erfolgt über ein Bandfilter und auch der Ausgang zu Demodulator ist induktiv ausgelegt.

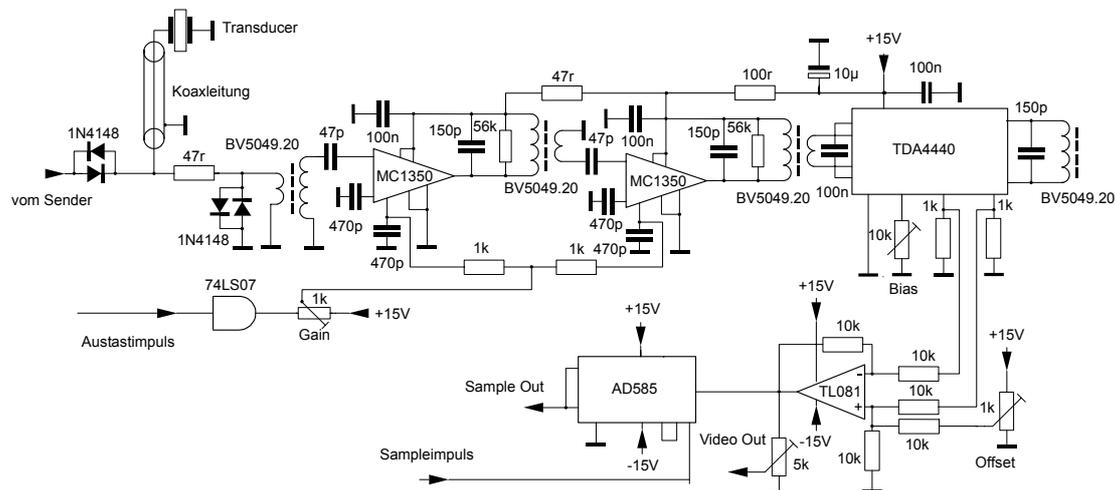


Abb. 32: 21 MHz-Verstärker mit Demodulator und Videoverstärker

Die verwendeten Bandfilter sind von Neosid. Beide Stufen werden mit dem Sendeimpuls abgeregelt, sodass in Verbindung mit dem Diodendiplexer das Übersprechen des Sendeimpulses klein bleibt. Auf den zweistufigen Verstärker folgt die Demodulatorstufe mit einem TDA4440. Dieser Schaltkreis wurde zu

Amplitudendemodulation von Fernsehsignalen entwickelt und eignet sich sehr gut für diesen Zweck. Am Ausgang des Demodulators steht das Videosignal in positiver und negativer Polarität zur Verfügung.

Beide Videosignale werden in einem Differenzverstärker zusammengeführt. Je nach Weiterverarbeitung des Signals wird es in einem Sample/Hold-Baustein gespeichert oder als Videosignal weitergegeben.

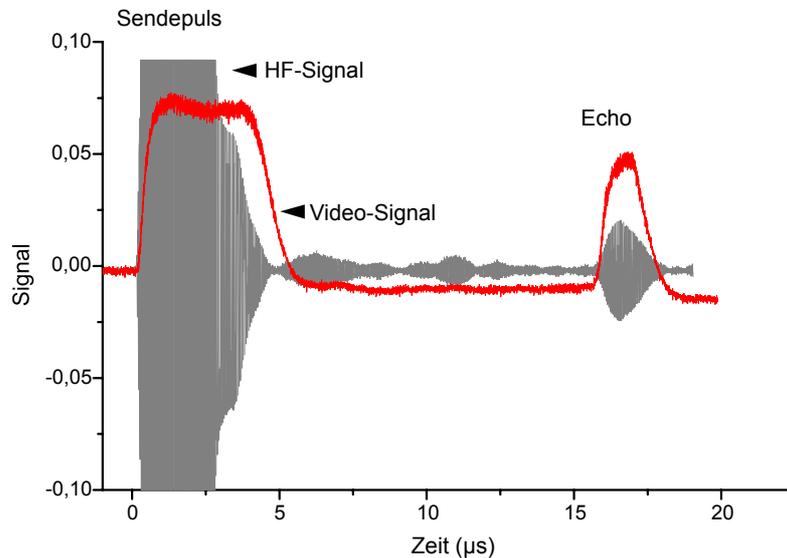


Abb. 33: Hf-Signal am Eingang und Video-Signal am Ausgang des Demodulators.

1.6.12. Universelle Empfängereinheit

Für die beschriebenen Piezobeepertransducer sind die vorgestellten Schaltungen ausreichend. Will man jedoch umfassende Experimente auch bei höheren Frequenzen anstellen, empfiehlt es sich andere Schaltungen zu verwenden. Empfänger, die über einen großen Bereich abstimmbare sind, werden üblicherweise als Superhet-Schaltung ausgeführt.

Wird der Empfänger als Superhet-Schaltung realisiert, kann der Hauptverstärkung auf einer konstanten Frequenz, der Zwischenfrequenz erfolgen. Zum Frequenzwechsel muss lediglich der Überlagerungszosillator verstimmbar werden.

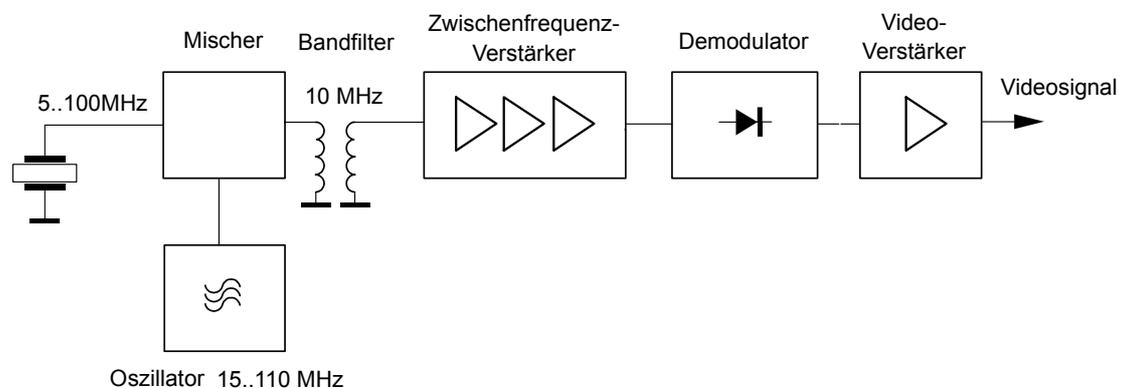


Abb. 34: Hf-Signal am Eingang und Video-Signal am Ausgang des Demodulators.

Viel Arbeit kann man sich sparen, wenn man ein fertiges TV-Tunermodul verwendet. Die in TV-Karten verbauten Module haben einen Empfangsbereich von 48 bis 860

MHz. Die Bandbreite des Videoausgangs beträgt einige Megahertz ist somit mehr als ausreichend für unsere Zwecke. Die Ansteuerung der Module erfolgt über ein I²C Interface. Leicht erhältlich sind Philips Module vom Typ FI1216 oder FM1216.

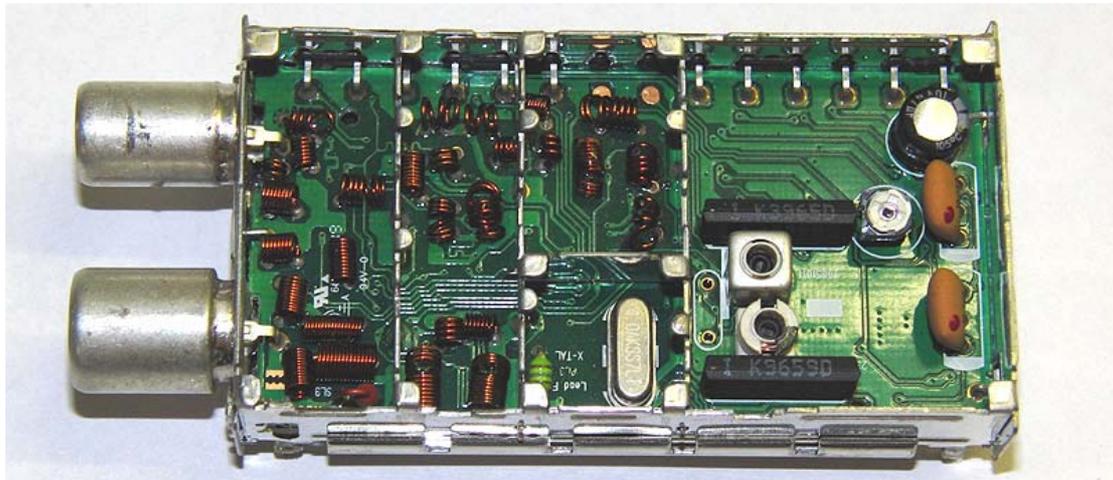


Abb. 35: Philipstuner FM 1216

	Band 1	Band 2	Band 3	FM-Band
Bereich	48,25 - 160 MHz	160 - 442 MHz	442 - 863,25 MHz	87,5 - 108 MHz
Verstärkung	45 dB	45 dB	42 dB	45 dB
Rauschpegel	5 - 7 dB	3,5 - 5,5 dB	5,5 - 7 dB	5 - 7 dB

Tab. 7: Empfangsparameter des FM 1216 Tuners

Für Ultraschallzwecke kommt wohl nur der Bereich 1 (48,25 – 160 MHz) infrage. Für den oberen VHF- und UHF-Bereich werden spezielle Transducer benötigt, die dem Hobbybastler normalerweise nicht zur Verfügung stehen.

Der Tuner besteht schaltungstechnisch aus zwei Komponenten, dem eigentlichen HF-Tuner und dem darauf folgenden Zwischenfrequenzverstärker. Beide Schaltungsteile haben eigene I²C Interfaces.

Um auch den Bereich unter 48 MHz empfangen zu können, wird dem Tuner ein Mischer vorgesetzt. Unter den vielen Realisierungsmöglichkeiten entschied sich der Verfasser für einen Breitbandringmischer. Der Typ IE 500 oder die entsprechenden Vergleichstypen sind billig und leicht erhältlich und die relativ hohe, benötigte Oszillatorleistung von 7 dBm kann leicht erzeugt werden. Als LO arbeitet ein Quarzoszillator auf 61 MHz, der sich in der Bastelkiste fand. Die bei Piezobeepern-Transducern wichtigen Frequenzen von 8 MHz und 22 MHz werden dann auf 69 bzw. 83 MHz umgesetzt.

Die genaue Frequenz ist nicht wichtig, Werte zwischen 50 und 70 MHz sind brauchbar. Übrigens sind alte Videokarten eine gute Quelle für Quarzoszillatoren mit verschiedensten Frequenzen. Das Ausgangssignal des Quarzoszillators wird mit einem Nand-Gatter 74 AS 00 während der Sendezeit ausgetastet, sodass das Übersprechen des Sendeimpulses weiter verringert wird. Alle Eingänge des Mixers sind mit Dämpfungsgliedern ausgestattet, die für konstante Impedanzen und damit saubere Mischprodukte sorgen.

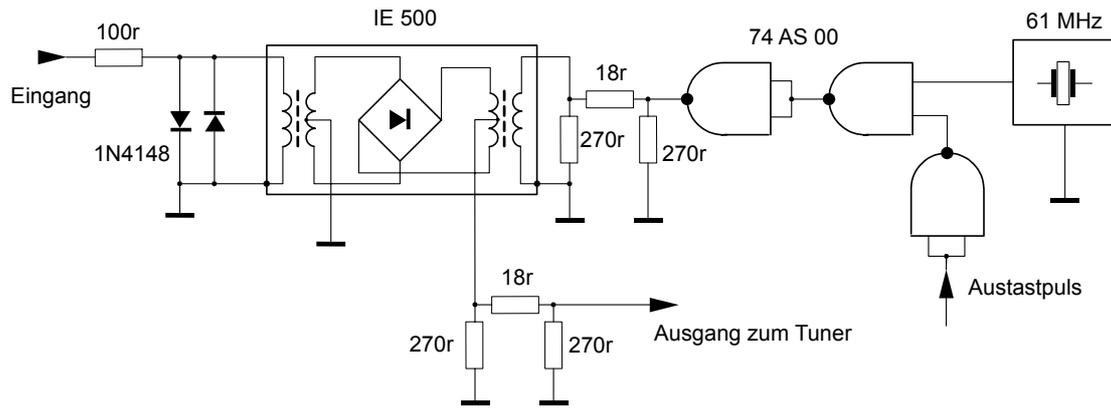


Abb. 36: Premixer für die Bereiche unter 48 MHz

Das Ausgangssignal des Mixers wird auf den Antenneneingang des Tuners gelegt. Nach einer Vorverstärkung im Tuner wird das Eingangssignal auf die Videozwischenfrequenz von 38,9 MHz umgesetzt. Der Tuner besitzt einen Testausgang, wo diese Zwischenfrequenz abgenommen werden kann.

Wie sich bei den Arbeiten herausstellte, kann der im Tuner enthaltene ZF-Verstärker und Videogleichrichter leider nicht verwendet werden. Der Videogleichrichter arbeitet mit einem Mischer, wobei die benötigte LO-Frequenz mit einer PLL-Schaltung aus dem ZF-Träger regeneriert wird. Da bei einem Fernsehsignal immer ein Träger vorhanden ist, funktioniert das in diesem Fall sehr gut, nicht aber beim gepulsten Ultraschallsignal. Hier rastet die PLL je nach Amplitudenverhältnis mal auf das Übersprechsignal des Sendepulses und mal auf das reflektierte Signal, sodass ein ordentliches Arbeiten des Gleichrichters unmöglich wird. Der Videoprocessor im Tuner wird deshalb nicht verwendet und braucht auch nicht programmiert werden.

Das Signal wird nach dem Mischer abgenommen, in einem externen Verstärker verstärkt und mit einer Diodenschaltung gleichgerichtet. Im externen ZF-Verstärker arbeitet der bewährte MC1350. Die Filter am Ein- und am Ausgang des Verstärkers beschränken die Bandbreite auf einige Megahertz. Über den Regeleingang kann der Verstärker während des Sendepulses abgeregelt werden. Nach dem zweiten Filter wird das Signal aufgeteilt und zum einem dem logarithmischen Detektor und zum anderen dem linearen Detektor zugeführt. Der Logdetektor ist ein AD 8307 Baustein von Analog Device. Am Ausgang des Bausteins steht das logarithmierte und damit auch gleichgerichtete Signal zur Verfügung, das mit einem Operationsverstärker noch mal 10fach verstärkt wird.

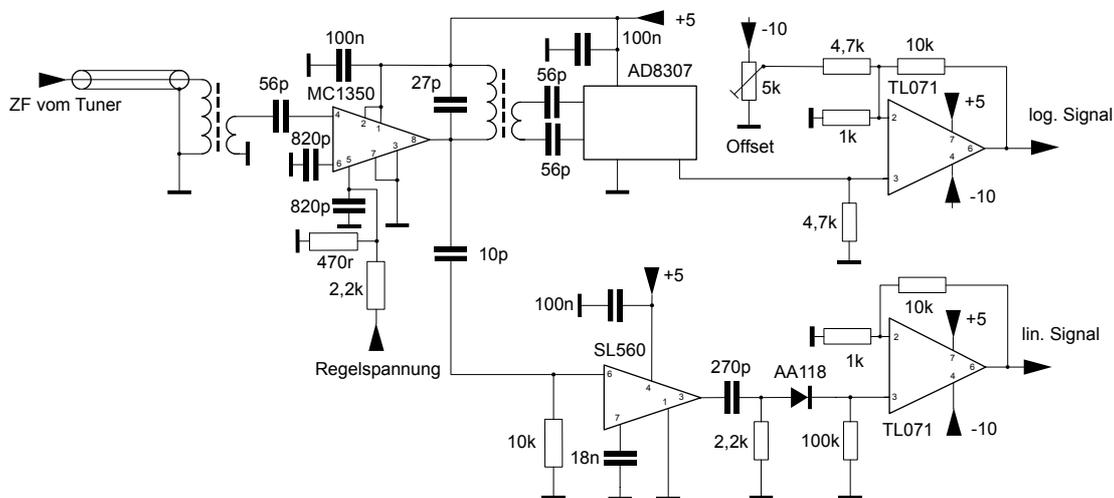


Abb. 37: Schaltung des externen ZF-Verstärkers

Im linearen Zweig der Signalverarbeitung wird die Zwischenfrequenz vor der Gleichrichtung mit einem Breitbandverstärker SL560 angehoben und dann mit einer Germaniumdiode AA119 gleichgerichtet. Auch hier folgt auf den Gleichrichter noch ein Operationsverstärker mit 10facher Verstärkung.

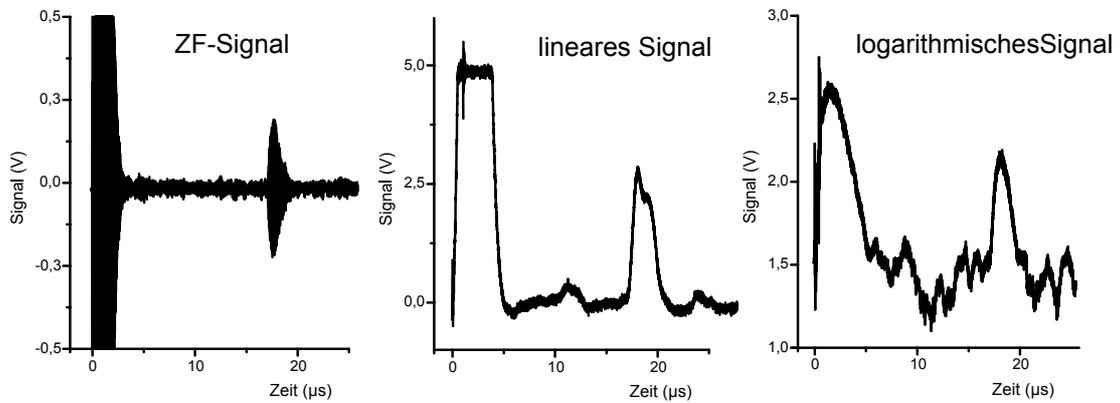


Abb. 38: Ausgangssignale des ZF-Verstärkers

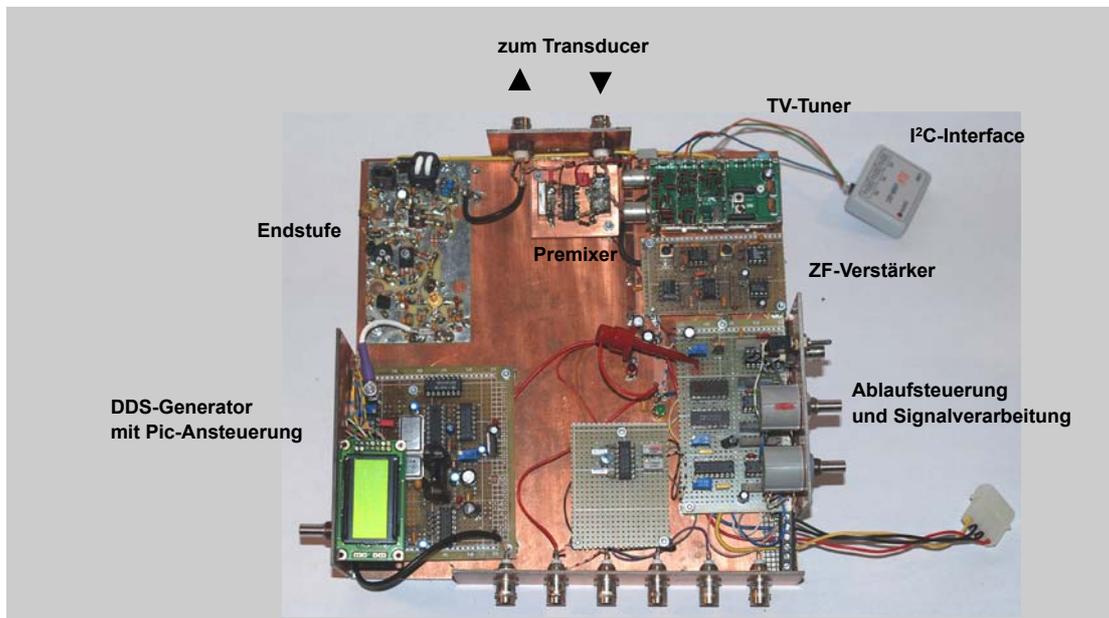


Abb. 39: Testaufbau eines universellen Sendeempfängers

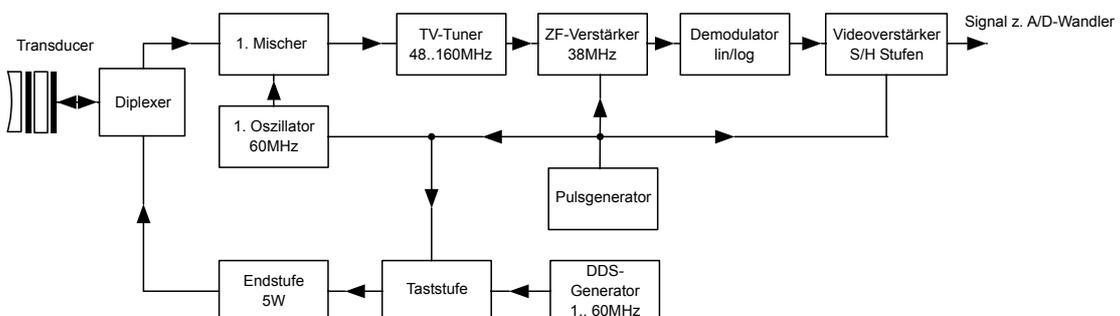


Abb. 40: Blockschaltung des Sendeempfängers für Frequenzen von 1 bis 60 MHz

1.6.13. Sample/Hold-Schaltung

Um das Ultraschallsignal in den Auswerterechner zu bekommen, muss es digitalisiert werden. Durch die Verwendung eines Analogspeichers, der sogenannten Sample/Hold-Schaltung ist es auch mit langsamen AD-Wandlern möglich die kurzen Impulse zu verarbeiten. Eine solche Schaltung speichert das Eingangssignal während der Sampleperiode ab und stellt es während der Hold-Periode am Ausgang zu Verfügung. Dabei kann die Hold-Periode wesentlich länger als die Sampleperiode sein. Der Sampleimpuls muss mit dem erwarteten Ultraschallsignal zeitlich übereinstimmen. Signale vor und nach dem Sampleimpuls werden nicht registriert. Dadurch trägt auch ein Übersprechen des Sendeimpulses nicht zum Messsignal bei. Eine bewährte Sample/Hold-Schaltung ist der Baustein AD585, der von Analog Device hergestellt wird.

Allerdings hat diese Schaltung einen Nachteil. Will man Signale mit Laufzeitunterschieden auswerten muss entweder der Sampleimpuls entsprechend verschoben werden oder man verwendet mehrere Sample/Hold-Schaltungen die mit zeitlich versetzten Sampleimpulsen angesteuert werden.

Speziell für farbige Ultraschallbilder werden drei Sample/Hold-Schaltungen mit eigenen Verzögerungsgeneratoren eingesetzt. Die drei Ausgänge liefern dann die Signale für die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau. Die unterschiedlichen Verzögerungszeiten entsprechen unterschiedlichen Laufzeiten des Signals und somit unterschiedlichen Abständen des Untersuchungsobjekts zum Sensor.

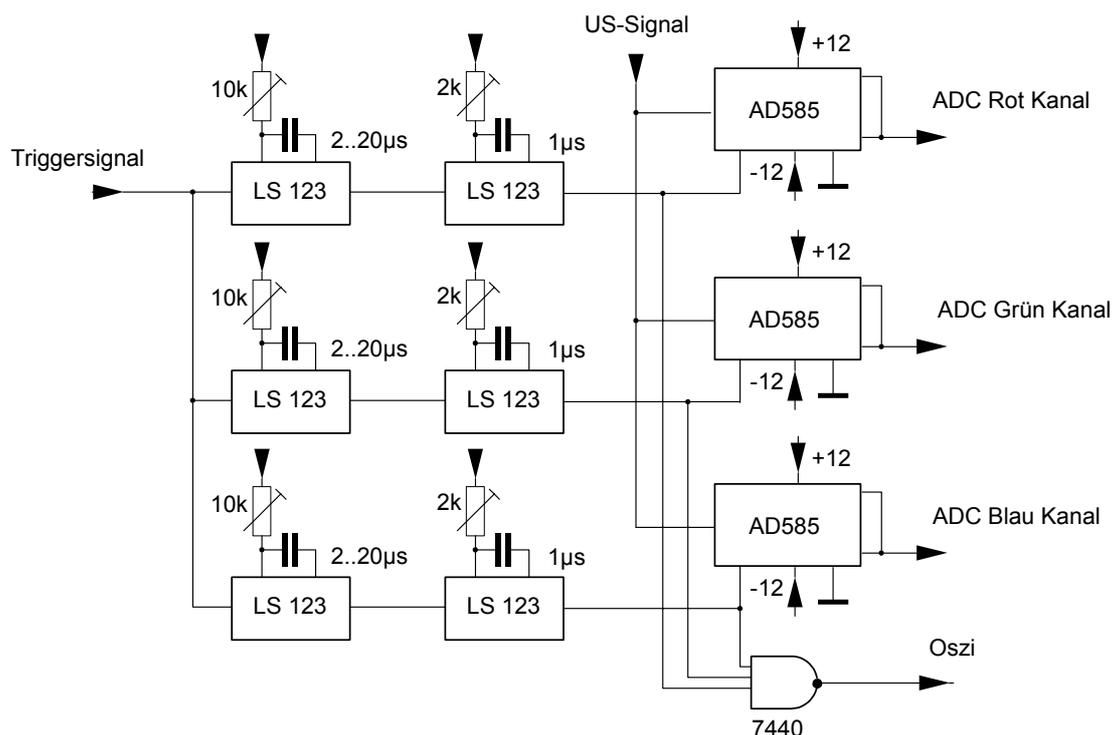


Abb. 41: 3fach Sample/Hold Schaltung zur Erfassung von drei Zeitfenster

1.6.14. Schnelle AD-Wandler

Will man mehrere Zeitfenster auswerten würde der Aufwand für viele Sample/Hold-Schaltungen sehr hoch, in diesem Fall ist es besser auf digitale Lösungen zu setzen.

Die Messung der Echopulse erfolgt mit einem digitalen Speicherosz. So kann ein längerer Zeitraum erfasst und gespeichert werden. Der Vorteil ist, dass man nicht zur Messzeit ein bestimmtes Zeitfenster auswählen muss, sondern die Auswahl bei der Auswertung stattfinden kann.

Eine einfache Möglichkeit die Schaltung eines einfachen Digitaloszi zu realisieren ist die Verwendung von Fifospeichern. Fifospeicher (First-In, First-Out) dient meist zur Verbindung von Datensystemen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten und sind z. B. in Festplattenkontrollern eingesetzt. Ein billiger und schneller Baustein ist der SN 74V225 von Texas Instruments. Dieser Fifo hat eine minimale Zykluszeit von 133 MHz bei einer Speichertiefe von 1k x 18 Bit. Etwas langsamer aber noch ausreichend ist der CY7C4211 mit 65 MHz und 512 x 9 Bit. (Rs-Components 74V225 = 9,51 €, CY7C4211 = 11,03 €). Beide Bausteine haben einen internen Adresszähler was die Schaltung sehr vereinfacht.

Natürlich muss auch AD-Wandler ausreichend schnell sein. Mittlerweile gibt es sehr viele passende Typen, die auch noch vergleichsweise billig sind.

TLC 5540	8 Bit	40 MSPS	5,90 € (Farnell)
TLC 5510	8 Bit	20 MSPS	5,41 € (RS Elektronik)
ADS 931	8 Bit	30 MSPS	5,17 € (Farnell)
TLV 5535	8 Bit	35 MSPS	5,78 € (Farnell)
AD 9203	10 Bit	40 MSPS	5,71 € (RS Elektronik)
ADC 207	7 Bit	20 MSPS	

Tab. 8: Schnelle Flash AD-Wandler

Der Verfasser verwendete den Typ AD 9203 von Analog Device mit 10 Bit Auflösung und 40 Megasamples pro Sekunde. Von den zur Verfügung stehenden 10 Bit werden nur die höheren acht verwendet.

Neben dem AD-Wandler und dem Ram werden noch ein Quarzoszillator, einige NAND's und ein D-Flipflop benötigt. Der Quarzoszillator mit 33 MHz erzeugt die Clockpulse für den AD-Wandler und nach einer Invertierung durch ein NAND-Gatter auch den Schreibclock für das Fifo. Die Schreibfreigabe des Fifos erfolgt durch ein Flipflop, das durch einen Startpuls gesetzt wird. Nachdem 512 Samples im Fifo gespeichert sind, wird das Flipflop durch den Fullflag-Ausgang des Speichers zurückgesetzt. Nun können die gespeicherten Daten durch fortlaufende Lesepulse in den Mikroprozessor (Atmel Mega 32) eingelesen werden.

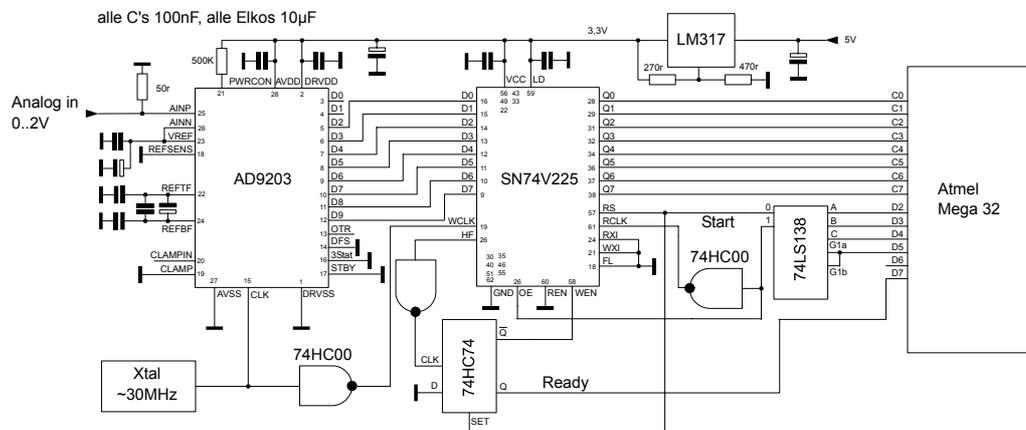


Abb. 42: Schaltung des digitalen Speicheroszis

Ein wenig wird die Freude über den einfachen Aufbau durch die Tatsache getrübt, dass sowohl der AD-Wandler wie auch das FIFO-Ram nur in kleinen SMD-Gehäuse zu haben sind. Aber mit einer guten Lupe und einer ruhigen Hand können trotz des kleinen Pin-Abstands die Schaltungen verdrahtet werden. Der Verfasser lötete die Schaltung auf einem kleinen Platinenstück, das wiederum auf einer Lochrasterplatine befestigt wurde. Nach der Fertigstellung und dem erfolgreichen Test der Schaltung wurden die Lötstellen an den Pins der ICs mit UHU-Plus vergossen. Natürlich könnte auch eine eigene Platine entworfen werden vor allem, wenn man die Absicht hat, die Schaltung als einfaches, universelles Digioszi zu verwenden.

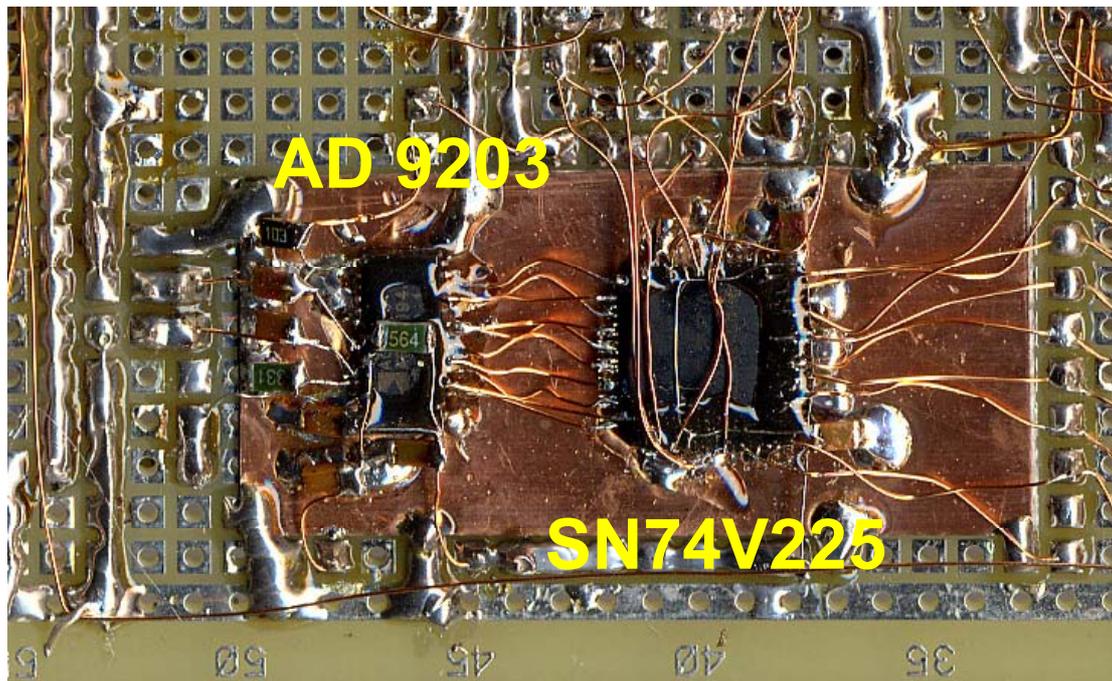


Abb. 43: Probeaufbau des digitalen Speicheroszils

1.7. Gesamtschaltung des 21 MHz-Mikroskops

Alle Einheiten des Mikroskops (Sende-Empfänger, Scannertreiber, CPU und Digitaloszi) wurden auf einzelnen Lochrasterplatinen im Euroformat aufgebaut und in einem 19 Zoll-Baugruppenträger zusammengeschaltet. Durch diese modulare Bauweise sind spätere Änderungen leicht möglich ohne die Gesamtschaltung ändern zu müssen. Zudem kann das Gerät leicht um zusätzliche Einheiten erweitert werden um auch andere Geräte (Elektronen-, Laser- und Tunnelmikroskop) anzusteuern. Alle Baugruppen, mit Ausnahme des Schrittmotortreibers, werden von einer zentralen Netzteilplatine mit stabilisierten Spannungen von $\pm 15V$ und $5V$ versorgt. Zusätzlich wird noch eine ungestabilisierte Spannung von $8V$ an die Platinen geführt. Die Schaltung dieses Netzteils wird nicht beschrieben, da es für den Nachbauer wohl keine Herausforderung darstellt.



Abb. 44: Elektronik des Ultraschallmikroskops

1.7.1. CPU-Platine

Auf der CPU-Platine befindet sich der Atmel Mega32 Prozessor, die Bauteile des Digital Samplers mit der erforderlichen 3,3V Versorgung und das RS232 Interface zur Anbindung an den Messrechner. Zum späteren Gebrauch im Zusammenhang mit anderen Mikroskopen sind zwei 8-Bit DA-Wandler (LTC 1257) und ein 8-Bit Latch (74 HCT 574) vorgesehen.

Port A0	Analog Eingang	Port C0	Daten Ein/Aus Bit 0
Port A1	Analog Eingang	Port C1	Daten Ein/Aus Bit 1
Port A2	Analog Eingang	Port C2	Daten Ein/Aus Bit 2
Port A3	Analog Eingang	Port C3	Daten Ein/Aus Bit 3
Port A4		Port C4	Daten Ein/Aus Bit 4
Port A5		Port C5	Daten Ein/Aus Bit 5
Port A6	Y Achse Referenzschalter	Port C6	Daten Ein/Aus Bit 6
Port A7	X Achse Referenzschalter	Port C7	Daten Ein/Aus Bit 7
Port B0	Y Achse Richtung	Port D0	RS 232 TX
Port B1	X Achse Richtung	Port D1	RS 232 RX
Port B2	Stepper Mode 0	Port D2	Adresse Aus Bit 0
Port B3	Stepper Mode 1	Port D3	Adresse Aus Bit 1
Port B4	Stepers enable	Port D4	Adresse Aus Bit 2
Port B5	MOSI	Port D5	Adressdekoeder enable
Port B6	MISO	Port D6	
Port B7	SCK	Port D7	Readybit Digisampler

Tab. 9: Portbelegung des Atmel Mega 32

Um wertvollen IO-Bereich zu sparen, werden Digisampler, Latch und DA-Wandler über einen 74LS138 Dekoder angesteuert. Port C wird als Datenbus verwendet und die Pins 2 bis 4 von Port D wird ein Adressbus simuliert, Port D5 gibt das Enable-Signal für den Adressdekoeder.

Port	D2	D3	D4	
0	0	0	0	Startpuls für digitalen Sampler
1	1	0	0	Lesepuls für Fifo-ram Port C Input
2	0	1	0	Y-DAC
3	1	1	0	X-DAC
4	0	0	1	Y Stepper Puls
5	1	0	1	X Stepper Puls
6	0	1	1	Stepper Mode Latch Port C Output
7	1	1	1	Reserve

Tab. 10: Funktionen der Dekoderausgänge

Der Prozessor läuft mit 16 MHz Taktfrequenz, die mit einem Schwingquarz erzeugt. Die RS232 Schnittstelle hat eine Baudrate von 115 kBaud und arbeitet mit dem üblichen MAX 232 Treiberbaustein. Das Betriebsprogramm wurde in Bascom Basic programmiert und wird über die ISP-Schnittstelle in den AVR geladen, sodass es jederzeit geändert und den Anforderungen der Messung angepasst werden kann.

Die Platine besitzt eine eigene 5V Stabilisierung mit einem üblichen Festspannungsregler. Auch die für den AD-Wandler und das Fifo-Ram des Digitaloszis notwendigen 3,3 V werden auf der Platine mit einem LM 138 Spannungsregler erzeugt. Ein weiterer Spannungsregler stabilisiert die -5V Spannung für den Eingangsverstärker OPA 623 des Digisamplers.

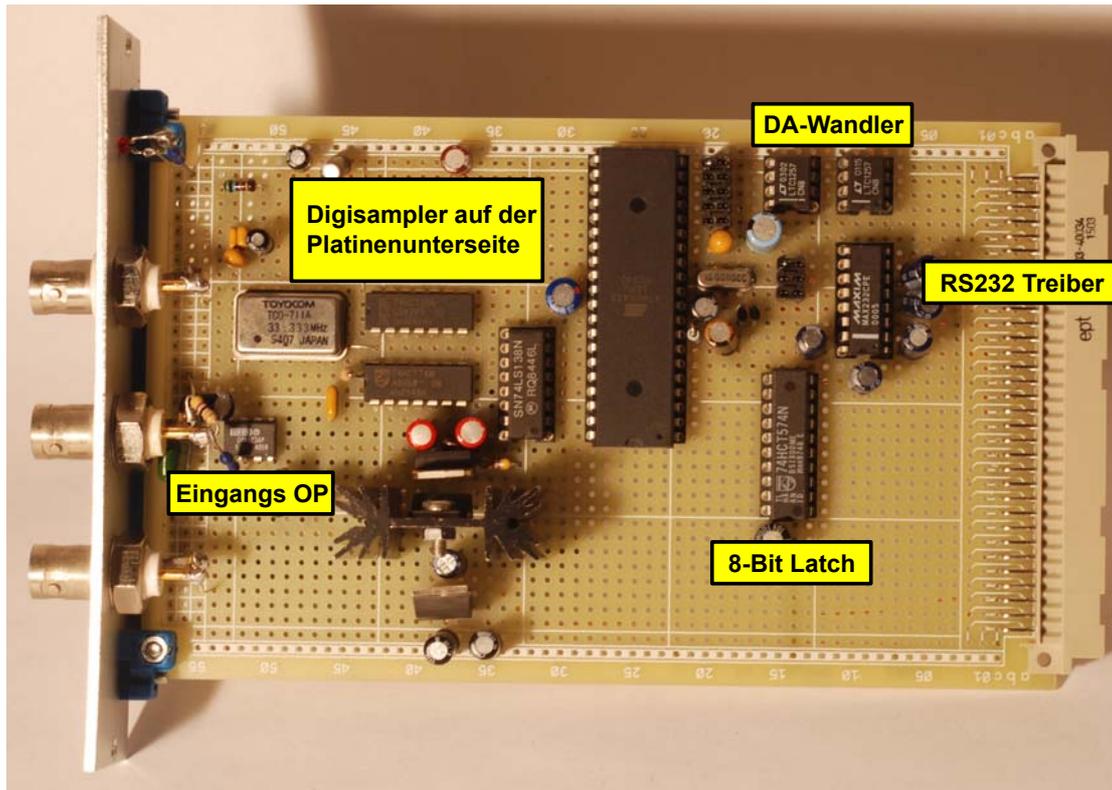


Abb. 45: CPU-Platine

1.7.2 Die Sende-Empfangsplatine

Auf der Sendeempfangsplatine sind die Bauteile des 3-stufigen Senders, des Geradeausempfängers mit Demodulator und die Ablaufsteuerung sowie die Signalauswertung untergebracht. Sender und Empfänger sind schon in vorherigen Kapiteln eingehend beschrieben.

Die Ablaufsteuerung erzeugt die Impulsfolgen zur Tastung des Senders, Austastung des Empfängers und Steuerung des S/H-Baustein. Der Takt wird mit einem Schmidt-Triggeroszillator erzeugt. Dessen Impulse triggern eine Kette von vier Monoflops, welche die einzelnen Tastimpulse erzeugen. Wird die Auswertung der Echosignale vom Digisampler übernommen, wird auch Takt für die Ablaufsteuerung vom Digisampler geliefert, um eine synchrone Funktion zu gewährleisten.

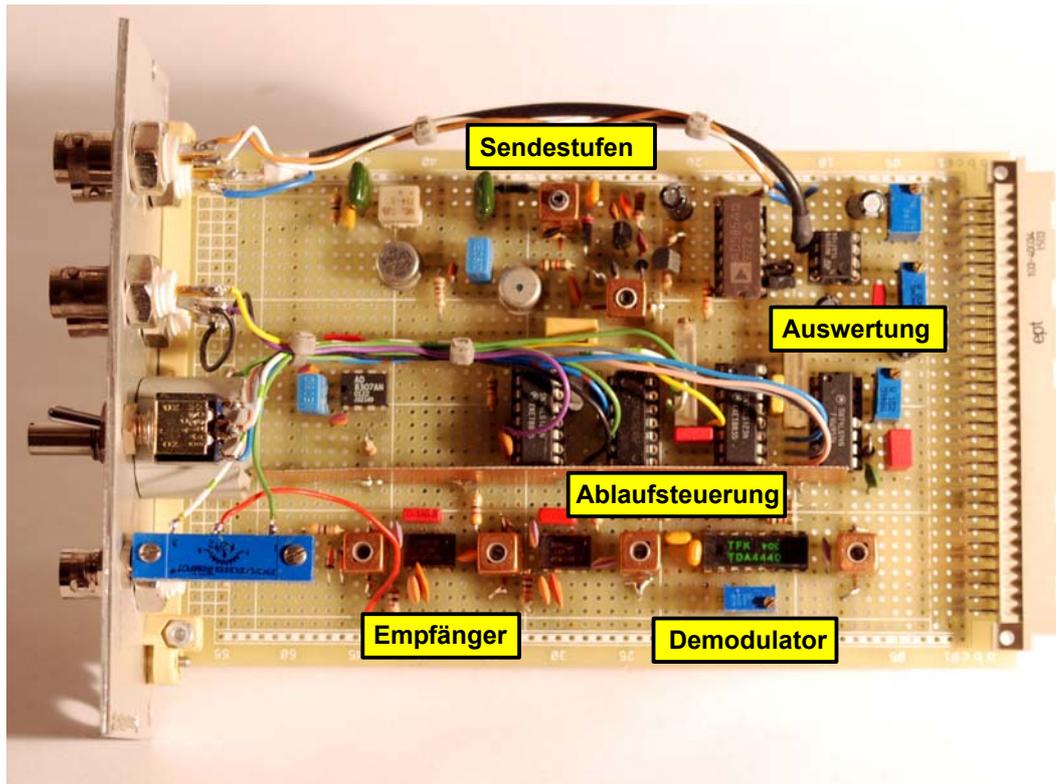
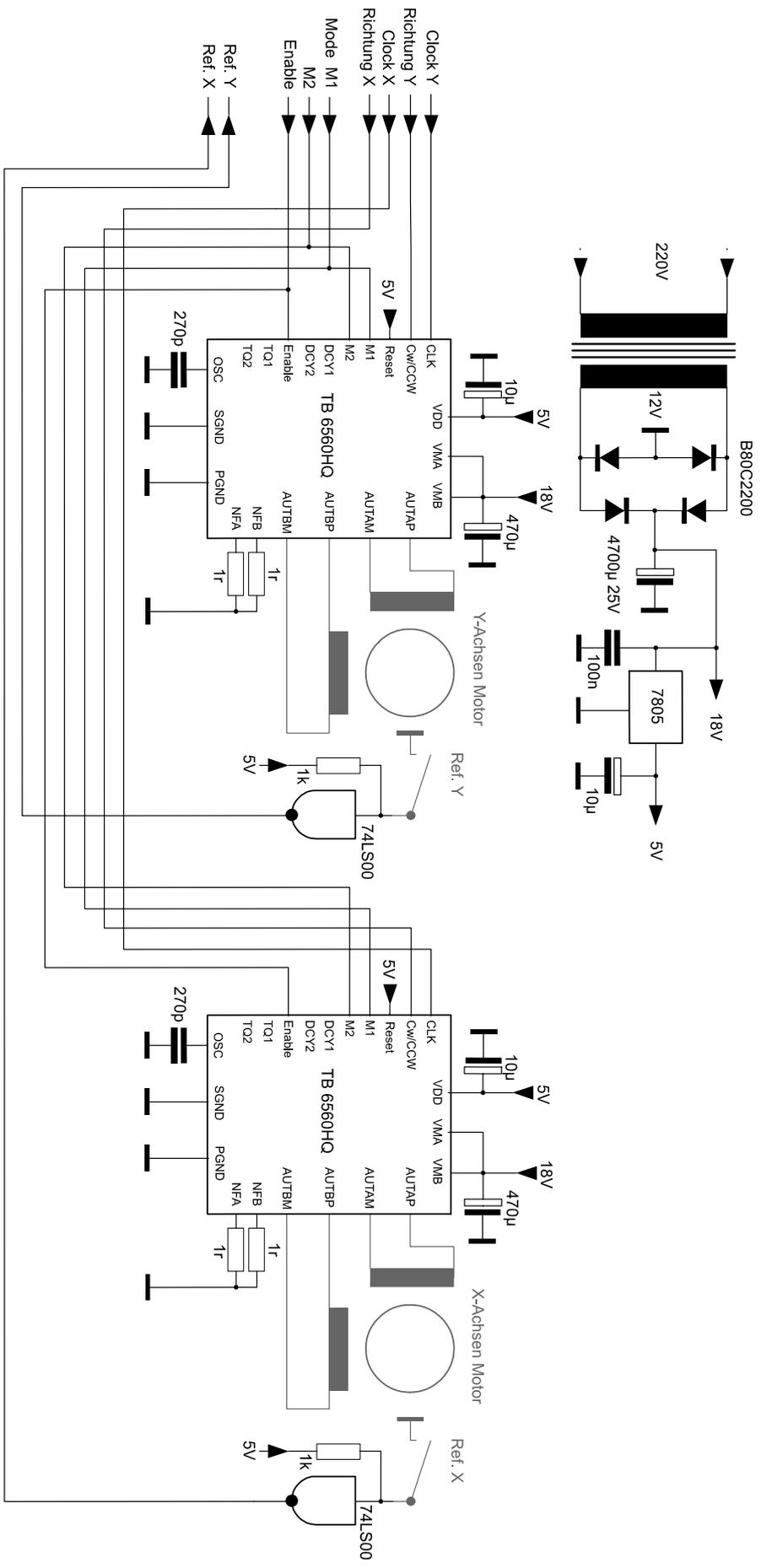


Abb. 47: Sende/Empfangsplatine

1.7.3 Die Stepperplatine

Auf der Stepperplatine arbeiten zwei Schrittmotortreiber TB6560HQ. Diese Treiber können bipolare Schrittmotoren mit Spitzenströmen bis zu 3,5 Ampere ansteuern. Eine Besonderheit der Treiber ist die auswählbare Feinschrittoption bis zu $1/16$ Schritten, die aber beim Ultraschallmikroskop nicht verwendet wird, da die normale Schrittweite schon der Auflösung entspricht.

Die Schrittmotor-Treiberplatine hat ein eigenes Netzteil, um zu vermeiden, dass die hohen Impulsströme der Motoren die Messelektronik stören. Ansonsten bietet die Schaltung keine Besonderheiten. Alle Funktionen zum Ansteuern der Schrittmotoren sind in den Treiber-ICs integriert.



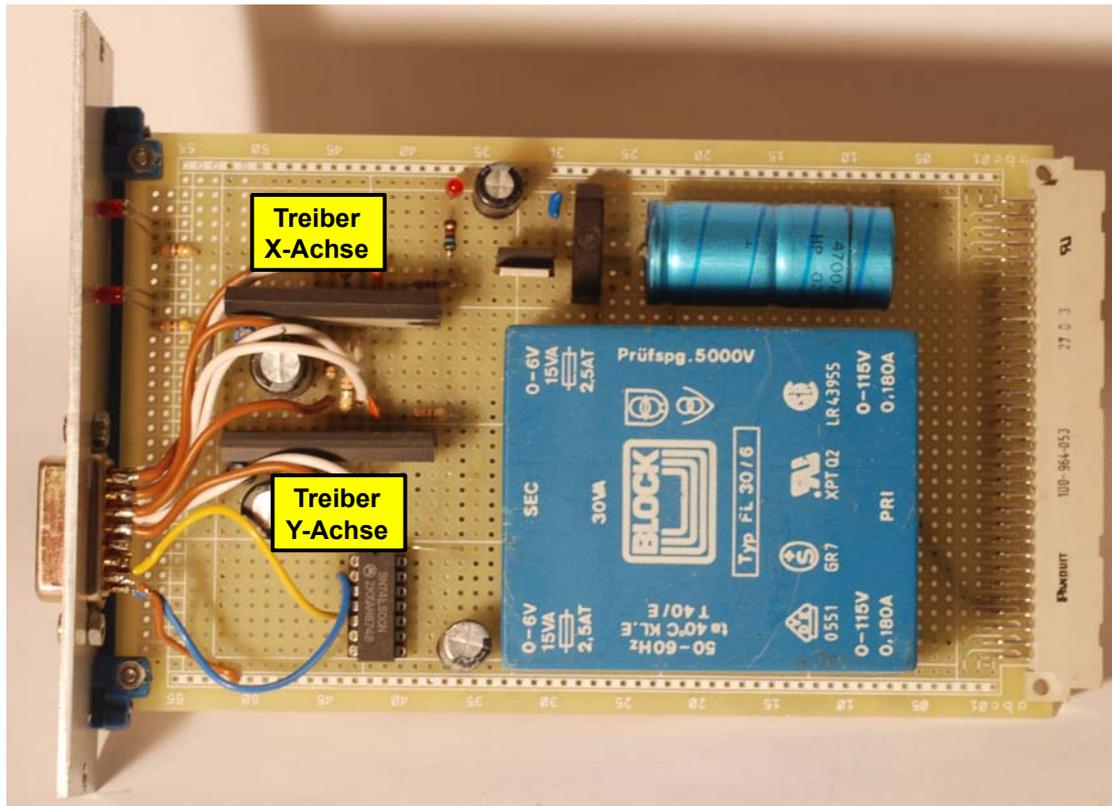


Abb. 48: Steppertreiberplatine

Die Software zum Betrieb des Mikroskops besteht aus zwei Teilen. Zum einen das Bascom Basic-Programm, das die Arbeit des Atmel-Prozessors auf der CPU-Platine steuert und zum anderen ein in Borlands Delphi geschriebenes Programm, das im PC läuft. Beide Programme kommunizieren über eine RS232 Schnittstelle.

1.7.4. Bascom-Basic Betriebsprogramm

Das Basicprogramm im AVR besteht aus einzelnen Unterprogrammen, die vom steuernden PC aufgerufen werden.

Die Unterprogramme steuern die Schrittmotoren des Scanners und übermitteln die aufgenommenen Messwerte während eines Scans an den PC. Weitere Subroutinen dienen zur Einstellung der Scan- und ADC-Parameter. Die Auswahl des auszuführenden Unterprogramms geschieht durch übermittelte Befehlscodes, die aus einem Ascii-Zeichen bestehen.

Routine	Code	Parameter	
SetADCVar	A	Anzahl der Mittelungen	Setzt die Anzahl der Mittelungen des AD-Wandlers
SetScanVar	B	Scanparameter	Bestimmt die Größe des Scanfelds
SetInitial	C	-----	Reset und Defaultwerte einstellen
GoXRef	D	-----	X-Motor zum Referenzpunkt fahren
GoYRef	E	-----	Y-Motor zum Referenzpunkt fahren
ADCFrame	F	-----	Bild über AD-Kanal 0 und 1 aufnehmen
SampleFrame	G	-----	Bild über Digisampler aufnehmen
GoCenter	H	-----	Scanfeldzentrum zur Einstellung anfahren
TestADC	I	-----	AD-Kanäle 0 und 1 zu Testzwecken ausgeben

Tab. 11: Subroutinen des Steuerprogramms

1.7.5. Delphi-Auswerteprogramm

Das Auswerteprogramm, das im PC läuft, übernimmt die Messdaten, und stellt sie als Bild dar. Natürlich können die gemessenen Bilder auch bearbeitet und abgespeichert werden.

Wird mit dem digitalen Sampler gemessen können mit dem Programm die zeitlichen Messfenster ausgewählt werden und den drei Grundfarben zugeordnet werden.

1.8. Messungen mit dem Ultraschallmikroskop

1.8.1. Abbildung von Münzen

Die Wellenlänge des Ultraschalls mit 8 MHz in Wasser beträgt 185 μm bei 21 MHz aber nur noch 71 μm . Deshalb haben Bilder mit der höheren Frequenz eine deutlich höhere Auflösung. Das folgende Bild eines 2 Euro Stücks zeigt den Unterschied.



Abb. 49: Abbildung eines 2 Euro Stücks mit verschiedenen Frequenzen

1.8.2. Abbildung von Schallplatten

Für weitere Tests der Auflösung wurde eine Schallplatte herangezogen. Die Rillen der Platte werden gut aufgelöst.

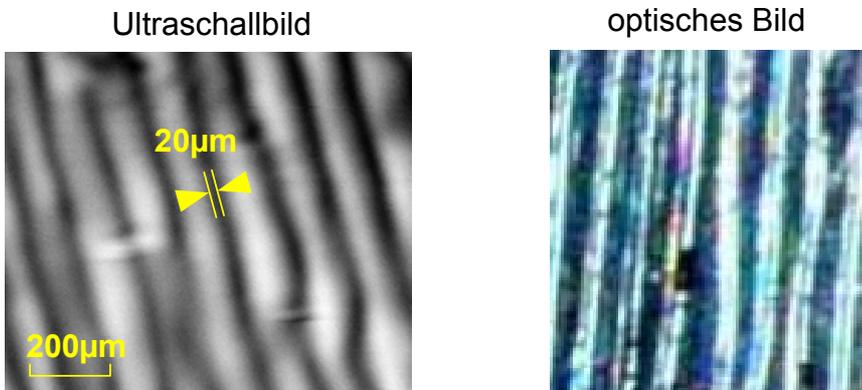


Abb. 50: Aufnahme der Oberfläche eine Schallplatte

Ein weiterer Test wurde mit einem feinen, geätzten Metallgitter unternommen. Auch hier wird die vermutete Auflösung etwa 100 µm bestätigt.

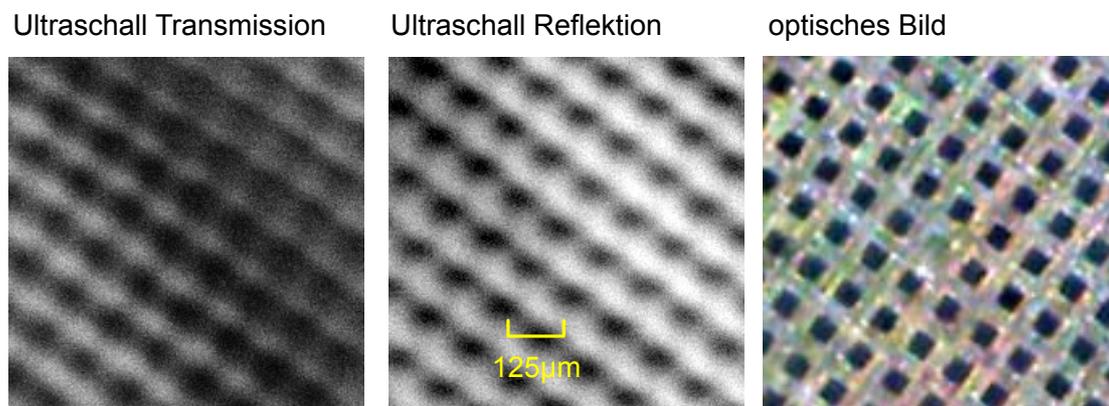


Abb. 51: Aufnahme eines feinen Metallgitters

Man sieht, dass trotz der einfachen Linse des Mikroskops die durch die Wellenlänge gegebene Auflösung erreicht wird. Die Linsenfehler spielen in der Ultraschallmikroskopie eine weit kleinere Rolle als in der Lichtmikroskopie. In der Lichtmikroskopie wäre es unmöglich mit einer einfachen, sphärischen Plexiglaslinse die durch die Wellenlänge gegebene Grenze auch nur näherungsweise zu erreichen.

1.8.3. Abbildung von integrierten Schaltungen

Das nächste Bild zeigt ein Stück Solarzellensilizium in Ultraschall- und in optischer Abbildung.

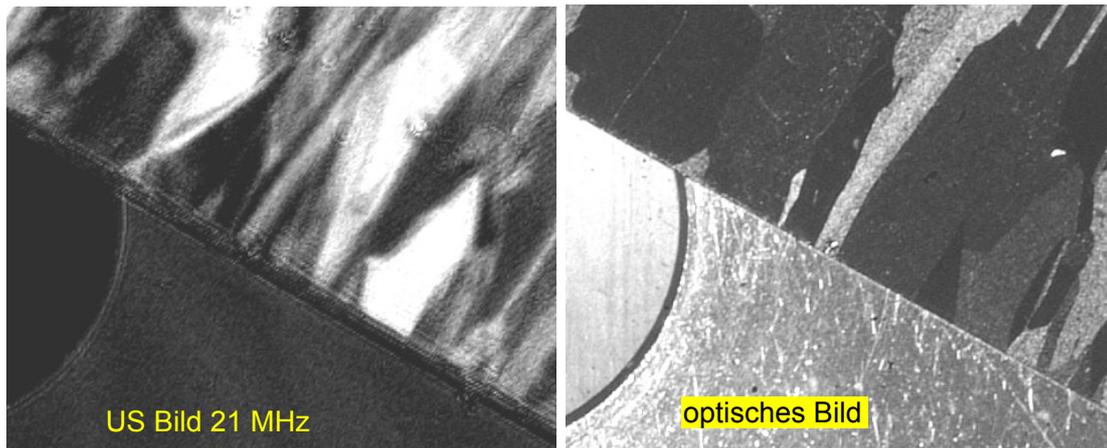


Abb. 52: Solarzellensilizium

In beiden Bildern sind die unterschiedlich orientierten Kristallite zu sehen, aber die Reflektion des Ultraschalls erfolgt nach anderen Regeln wie die Reflektion des Lichts. Die Stärke der Reflektion des Ultraschalls wird von der akustischen Impedanz bestimmt, die ein Produkt der Schallgeschwindigkeit und der Dichte des Materials ist. Auch das folgende Bild eines IC's zeigt unterschiedliche Strukturen in der optischen- und der Ultraschallabbildung.

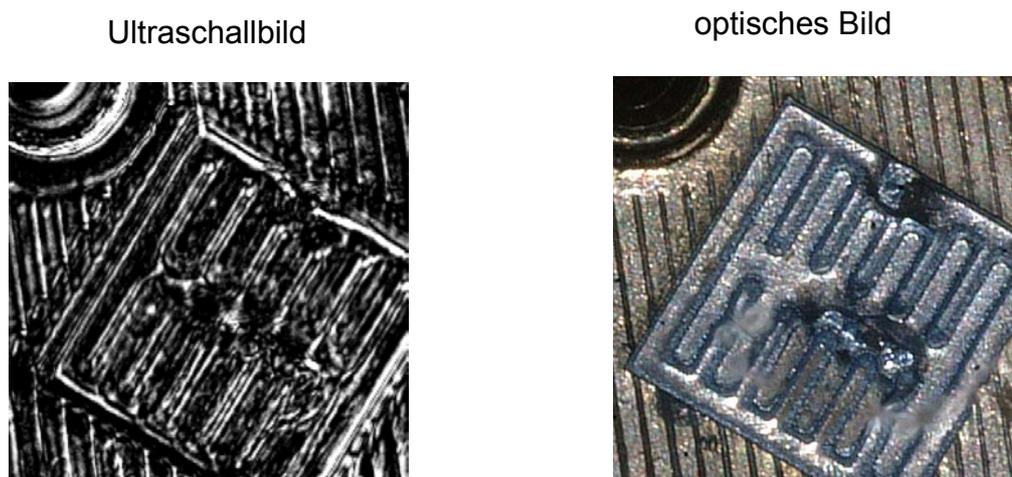


Abb. 53: Leistungs-IC in der Ultraschall- und optischen Abbildung

1.8.4. Abbildung von verdeckten Strukturen

Das besondere an einer Abbildung mit Ultraschall ist aber die Fähigkeit unter die Oberfläche eines Körpers zu blicken. Von diesem Umstand wird vor allem bei der medizinischen Sonografie und in der Materialprüfung mit Ultraschall Gebrauch gemacht. Allerdings wird bei diesen Anwendungen mit niedrigen Frequenzen von einigen Megahertz gearbeitet. Bei höheren Frequenzen fällt die mögliche Abbildungstiefe durch die steigende Dämpfung schnell ab.

Ultraschallfrequenz	Eindringtiefe	Wellenlänge (in H ₂ O)
2 MHz	200 mm	740 µm
20 MHz	4 mm	74 µm
200 MHz	0,3 mm	7,4 µm
2000 MHz	0,01 mm	0,74µm

Tab. 12: Eindringtiefe von Ultraschallwellen

Die in der Tabelle angegebenen Werte sind Richtwerte, da die Eindringtiefe neben der Frequenz auch stark vom jeweiligen Material abhängt. Trotzdem kann man erkennen, dass sich Hochfrequenzmikroskope nur zur Abbildung von Oberflächen eignen.

Bei 21 MHz können aber noch Strukturen im Innern einer Probe gesehen werden.

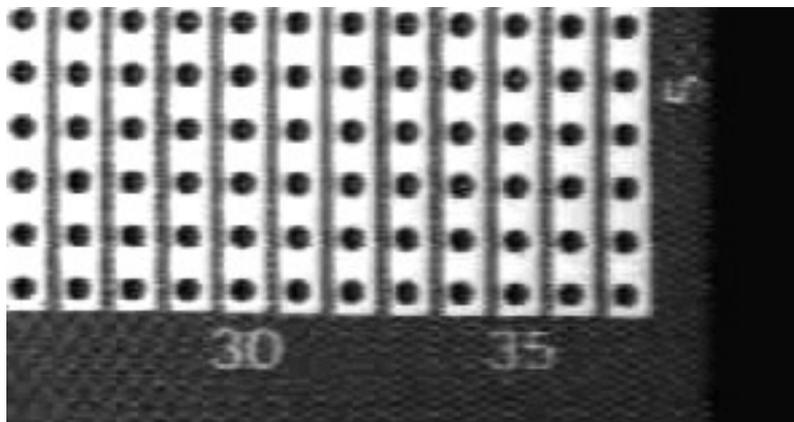


Abb. 54: Lochrasterplatte

In der Abbildung einer Lochrasterplatte sieht man neben der stark reflektierenden Metallbelegung auch die kreuzweise angeordneten Glasfaserstränge im Epoxidmaterial.

Noch auffälliger wird die Durchdringungsfähigkeit des Ultraschalls bei der Abbildung eines IC.

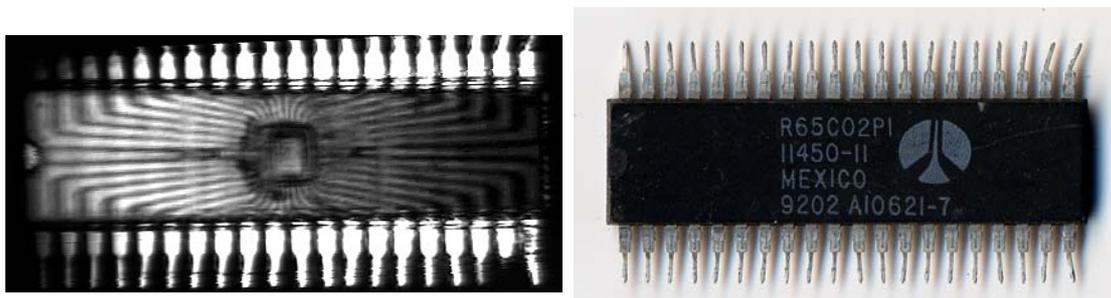


Abb. 55: Durchleuchtung einer integrierten Schaltung mit Ultraschall

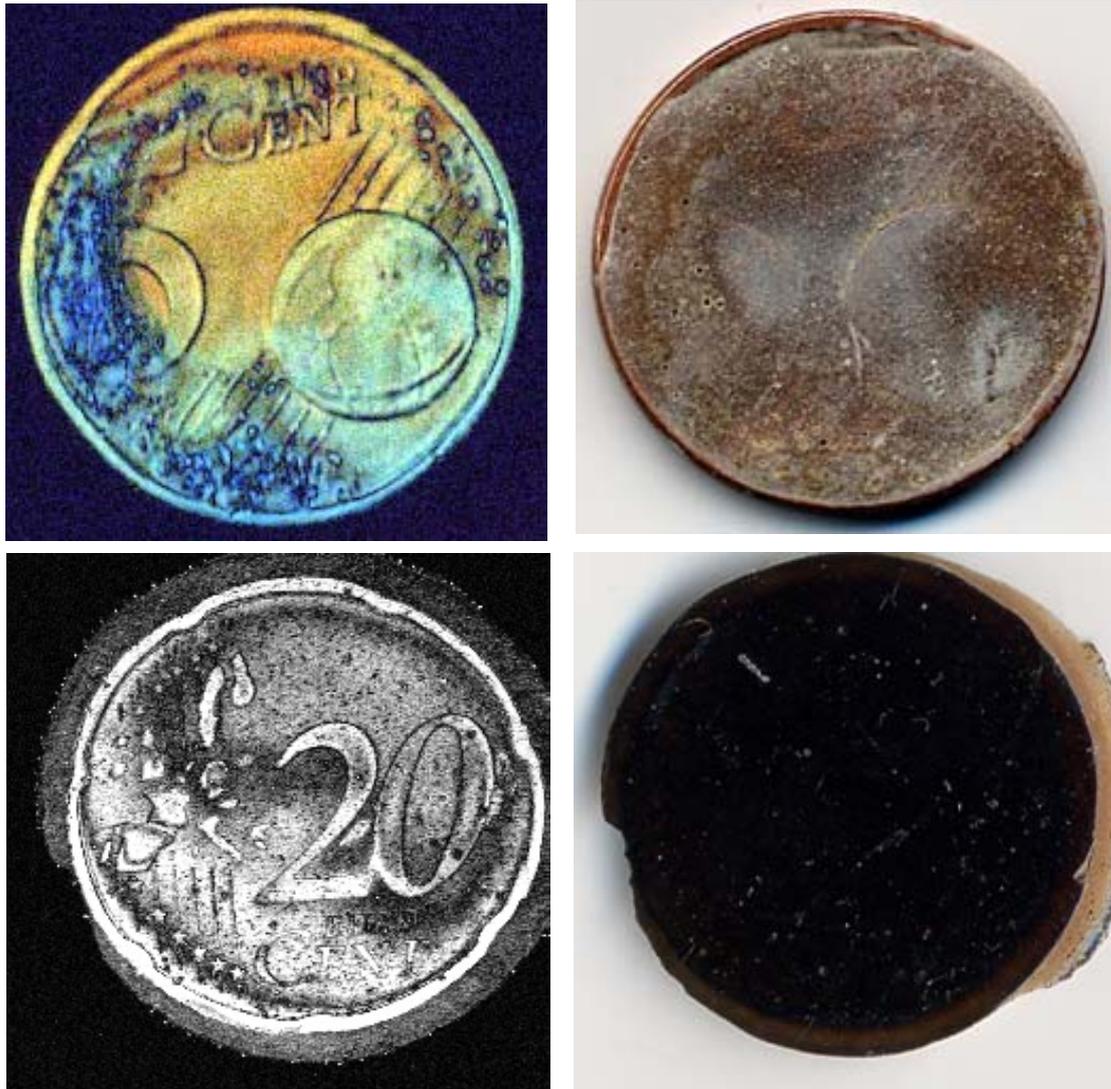


Abb. 56: Sichtbarmachung der Oberfläche verschmutzter Münzen

Bei mit Klebstoff verdeckten Münzen kann die Münzoberfläche mit Ultraschall wieder sichtbar gemacht werden.

Für das nächste Bild wurde eine Münze zum Teil mit einem 0,15 mm dünnen Glasplättchen (Deckglas) und zum Teil mit einer undurchsichtigen Kaptonfolie abgedeckt. Beide Plättchen sind mit einem Streifen Tesafilm befestigt.



Abb. 57: Durchleuchtung einer integrierten Schaltung mit Ultraschall

Während das Glasplättchen für Lichtstrahlen natürlich durchsichtig ist, reflektiert es die Ultraschallwellen so stark, dass die Münze darunter nicht mehr sichtbar ist. Bei der Kaptonfolie ist es genau umgekehrt. Für Licht vollkommen undurchlässig wird sie hingegen vom Ultraschall durchdrungen und so wird die Münze dahinter sichtbar.

1.8.5. Laufzeitmessungen

Die folgenden Bilder wurden mit drei Sample/Hold-Schaltungen aufgenommen, sodass Signale mit verschiedenen Laufzeiten aufgenommen werden können. So kann zwischen Oberflächen, die verschiedene Abstände zum Transducer haben differenziert werden. Werden die drei Einzelbilder in den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau eingefärbt und zu einem RGB-Bild kombiniert werden die verschiedenen Oberflächen farblich differenziert.

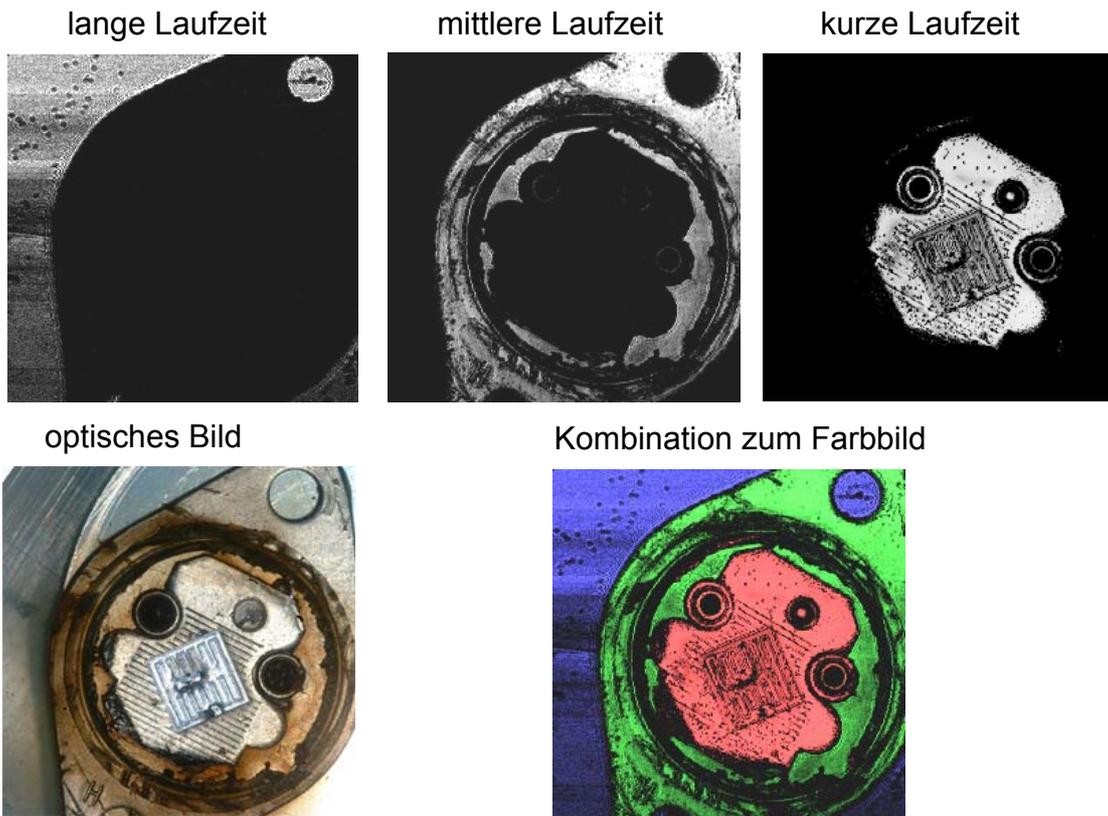


Abb. 58: Kombination der drei Zeitfensterbilder zu einem Farbbild

Werden die Zeitfenster so eingestellt, dass sie sich teilweise überlappen entstehen im Kombinationsbild auf Mischfarben.

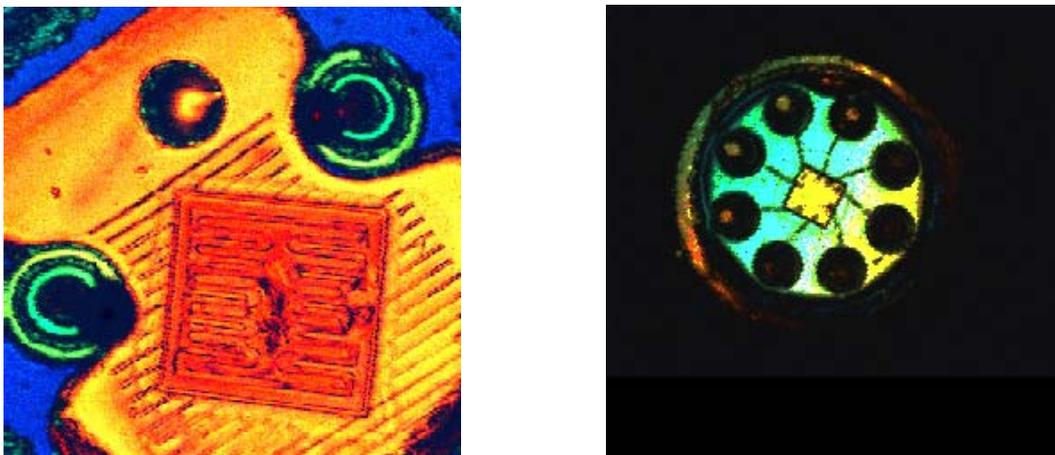


Abb. 59: Erzeugung von Mischfarben durch überlappende Zeitfenster

Wenn zur Messung des reflektierten Pulses ein digitaler Sampler verwendet wird, kann das Signal ohne großen Aufwand zu verschiedenen Zeiten gemessen werden. Da die Laufzeit des Impulses vom Abstand des Transducers von der Objektoberfläche abhängt, können auf diese Weise Höhenunterschiede des Objekts gemessen werden. Getestet wurde das Prinzip mit verschiedenen dicken Beilagscheiben als Messobjekte. Es wurde drei 440 Nanosekunden breite

Zeitfenster, 17,4 μ s, 18,0 μ s und 18,6 μ s nach dem Sendepuls gemessen. Die so erhaltenen Bilder wurden in den drei Grundfarben eingefärbt und zu einem RGB-Bild kombiniert.

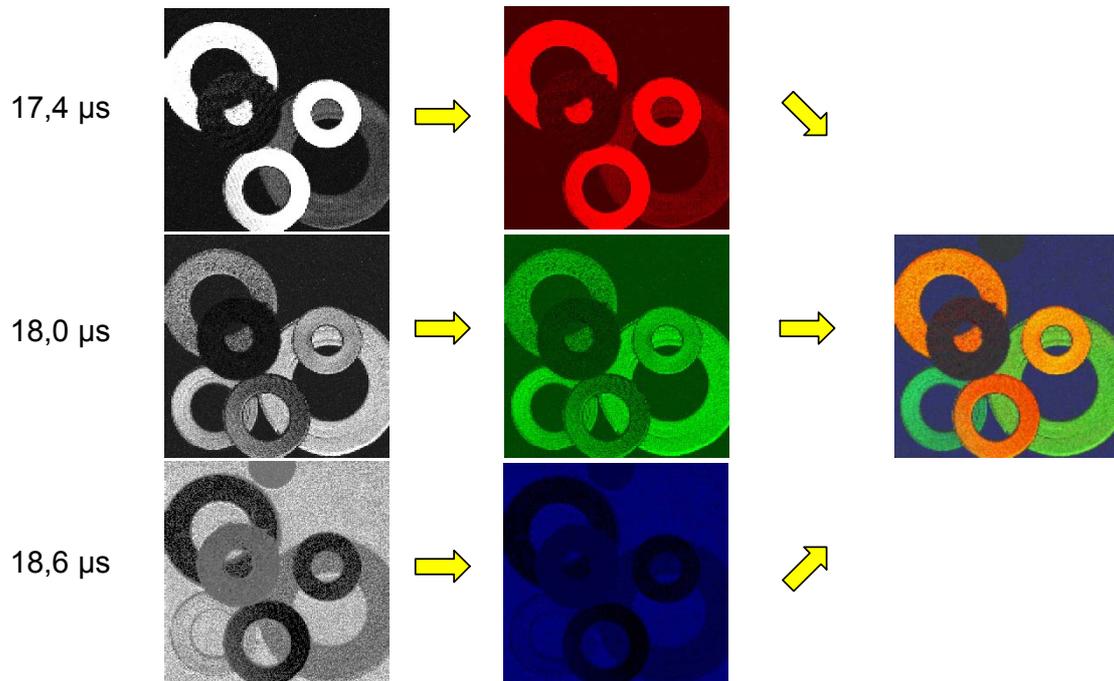


Abb. 60: Kombination der verschiedenen Zeitfensterbilder



Abb. 61: Ultraschallabbildung durch unterschiedliche Laufzeiten

Bei dem Bild der Beilagscheiben wurden die durch die Dicke der Scheiben unterschiedliche Laufzeit der Ultraschallwelle zur Farbgebung verwendet. So können recht kleine Dickenunterschiede erkannt werden. Die türkisgrüne Scheibe hat eine Dicke von 0,7 mm, die hellgrüne 1 mm und die unten liegende orange 1,8 mm. Der Unterschied zwischen den beiden grünlichen Scheiben beträgt nur 0,3 mm entsprechend einem Laufzeitunterschied von 400 Nanosekunden.

2. Elektronenmikroskope

Schon bald nach ihrer Entdeckung wurde erkannt, dass sich die sogenannten Kathodenstrahlen durch elektrische und magnetische Felder ablenken lassen und dass es durch diese Ablenkung möglich ist, diese Strahlen zu bündeln oder zu zerstreuen. Heute weiß man, dass Kathodenstrahlen aus einem Strom schneller Elektronen bestehen, die sich durch entsprechende Felder wie Lichtstrahlen durch Linsen beeinflussen lassen. Wie in der Lichtoptik kann man in der Elektronenoptik Sammel- und Zerstreuungslinsen und sogar Elektronenspiegel konstruieren, sodass es möglich ist, mit den Elektronenstrahlen vergrößerte Abbildung kleiner Strukturen zu erreichen.

Wie bei anderen Mikroskopen hängt die mögliche Auflösung bei Elektronenmikroskopen neben den Linsenfehlern vor allem von der Wellenlänge der verwendeten Strahlen ab. Die Wellenlänge der Elektronenstrahlen hängt wie bei allen Korpuskelstrahlen von der Masse der Teilchen und deren Geschwindigkeit ab. Diesen Zusammenhang fand der Physiker Broglie im Jahre 1925 und stellte folgende Formel auf:

$$\lambda = h / (m \times v)$$

λ = Wellenlänge
h = Planksche Wirkungsquatum
m = Masse des Teilchens
v = Geschwindigkeit des Teilchens

Da die Elektronengeschwindigkeit aus der Elektronenenergie abgeleitet werden kann und die Elektronenenergie wiederum von der Beschleunigungsspannung abhängt, kann für eine gegebene Beschleunigungsspannung leicht die Wellenlänge der Elektronenstrahlen berechnet werden.

$$\lambda = (h \times c) / (e \times U)$$

h = Planksche Wirkungsquatum
c = Lichtgeschwindigkeit
e = Elementarladung
U = Beschleunigungsspannung

Zahlenbeispiel

$$\lambda = (6,6 \cdot 10^{-34} \times 3 \cdot 10^8) / (1,6 \cdot 10^{-19} \times 3 \cdot 10^4) = 4,1 \cdot 10^{-11} \text{ m} = 41 \text{ pm}$$

Schon bei einer Beschleunigungsspannung von 30 kV wie sie bei Bildröhren vorkommt erreicht die Wellenlänge mit 41 Picometer extrem kleine Werte, man erinnere sich das die Größe eines Atoms einige Hundert Picometer beträgt.

Man sieht das schon bei kleinen Energien bzw. kleinen Beschleunigungsspannungen die Wellenlänge der Elektronenstrahlen sehr klein ist, wesentlich kleiner als die Wellenlänge der Lichtstrahlen, sodass man hoffen konnte ein Elektronen Mikroskope zu konstruieren, deren Auflösungsvermögen dass der Lichtmikroskope weit übersteigt.

Ernst Ruska baute 1933 erstmals ein Elektronenmikroskop, das mit 12000facher Vergrößerung die Leistungsfähigkeit von Lichtmikroskopen überschritt.

Seit damals wurden eine Vielzahl verschiedener Elektronenmikroskopen konstruiert und erfolgreich in Betrieb genommen und durch diese Geräte grundlegende Entdeckungen in allen Bereichen der Wissenschaft und Technik gemacht.

Leider gibt es beim Betrieb eines Elektronenmikroskops eine unumgängliche Voraussetzung, Elektronenmikroskope müssen im Vakuum betrieben werden. Nur im Hochvakuum können sich die freien Elektronen ungehindert ausbreiten, sodass elektronenoptische Abbildungen möglich sind. Ein Hochvakuum von 10^{-5} bis 10^{-4} mbar ist die oberste Grenze des Brauchbaren. Ein Vakuum dieser Größe ist nur mit einer dichten Apparatur und einem zweistufigen Pumpaufbau zu erreichen. Üblicherweise wird eine rotierende Drehschieberpumpe als Vorstufe und eine Diffusions- oder Turbopumpe als Hochvakuumstufe verwendet. Solche Pumpen, die entsprechenden Armaturen und notwendigen Messgeräte sind nicht ganz billig. Mit etwas Glück können aber auf Flohmärkten und bei Ebay durchaus Schnäppchen erstanden werden und für 300 bis 500 € ein passender Pumpstand gebastelt werden. Natürlich ist das immer noch viel Geld aber mit einem Hochvakuumpumpstand eröffnen sich viele Möglichkeiten zu Experimenten im Bereich der Physik, wie der Laser- und Röntgentechnik um nur zwei Beispiele zu nennen.

Wie bei lichtoptischen Geräten besteht ein Elektronenmikroskop im Wesentlichen aus drei Elementen:

1. der Elektronenquelle, entsprechend der Mikroskopierleuchte im Lichtmikroskop
2. einem Linsensystem
3. einem Elektronendetektor, entsprechend dem Auge oder der Fotoplatte im Lichtmikroskop

2.1. Elektronenquellen

Die meisten in der Mikroskopie verwendeten Quellen gehören in eine der drei folgenden Kategorien.

2.1.1. Thermische Glühkathoden

Die thermische Elektronenquelle ist sicher die am weitesten verbreitete Quelle, nahezu alle Elektronenröhren arbeiten mit diesem Prinzip. Thermische Elektronenquellen haben eine, meist durch Strom erwärmte, Kathode. Übersteigt die thermische Energie der Elektronen in der Kathode die Austrittsarbeit des Materials, aus dem die Kathode besteht, können Elektronen aus dem Material austreten. Für die meisten Metalle ist die Austrittsarbeit hoch, deshalb müssen sie zur Emission sehr hoch, oft über ihren Schmelzpunkt, erhitzt werden. Nur wenige Materialien (Wolfram, Tantal, Molybdän, Rhenium etc.) können ohne zu schmelzen so hoch erhitzt werden, dass sie eine nennenswerte Elektronenemission zeigen.

Sehr günstige Verhältnisse findet man hingegen bei bestimmten Alkalimetallen. Vor allem Barium hat eine sehr niedrige Austrittsarbeit und muss nur auf 1000°C erhitzt werden. Übliche Bariumkathoden bestehen aus einem Trägermaterial meist Wolfram oder Nickel, auf dem eine dünne Bariumschicht aufgebracht ist. Leider ist Barium sehr reaktiv und oxidiert an der Luft sofort zu Bariumoxid. Deshalb können Bariumkathoden nur in einem guten Vakuum betrieben werden.

Eine hohe Emission zeigen auch Thoriumkathoden, die auch etwas robuster als Bariumkathoden sind. Die benötigten Thorium dotierten Wolframdrähte sind aber nicht leicht aufzutreiben.

Material	Temperatur für	Austrittsarbeit	Schmelzpunkt
----------	----------------	-----------------	--------------

	$3A/cm^2$		
Rhenium	2590°	4,7 eV	3710°
Wolfram	2780°	4,6 eV	3655°
Tantal	2585°	4,2 eV	3300°
Thorium auf Wolfram	1700°	2,6 eV	
Barium auf Wolfram	1000°	1,6 eV	

Tab. 13: Betriebswerte verschiedener thermischer Katoden

2.1.2. Spitzenkathoden

Spitzenkathoden arbeiten mit Feldemission. Übersteigt die Feldstärke an der Oberfläche bestimmte Werte, können auch bei niedriger Temperatur Elektronen aus der Kathode ins Vakuum austreten. Die dazu notwendigen Feldstärken sind sehr hoch, etwa 10^9 V/m, und können deshalb mit üblichen Spannungen nur an scharfen Spitzen und Kanten erreicht werden. Aufgrund der kleinen Oberfläche werden Spitzenkathoden durch auftreffende positive Ionen stark belastet. Deshalb werden Spitzenkathoden üblicherweise nur bei sehr niedrigen Druck im Bereich von 10^{-9} bis 10^{-10} mbar eingesetzt. In diesem Druckbereich werden durch den Elektronenstrahl nur noch wenige positive Ionen gebildet und die durch die geringe Belastung der Spitze wird deren Lebensdauer lang. Ein großer Vorteil der Spitzenkatode ist die schmale Energieverteilung der Elektronen und vor allem der hohe Richtstrahlwert. Das heißt die Elektronen werden in einem kleinen Winkelbereich emittiert und können deshalb auch wieder auf einen kleinen Punkt fokussiert werden.

2.1.3. Kalte Katoden

In den Anfängen der Elektronenmikroskopie wurden hauptsächlich kalte Kathoden verwendet. Kaltkathoden sind einfach aufgebaut und können ohne Problem belüftet werden, ohne ihre Eigenschaften zu verändern. Kalte Kathoden arbeiten mit einer Glimmentladung und benötigen deshalb einen relativ hohen Betriebsdruck von 10^{-2} bis 10^{-1} mbar. Da sicher der Elektronenstrahl aber nur bei Drücken kleiner 10^{-4} ungestört ausbreiten kann, muss die Mikroskopkammer ständig abgepumpt werden, um den erforderlichen Druckunterschied aufrechtzuerhalten. Ein weiterer Nachteil ist die breite Energieverteilung der emittierten Elektronen die große chromatische Fehler in der Elektronenoptik erzeugt.

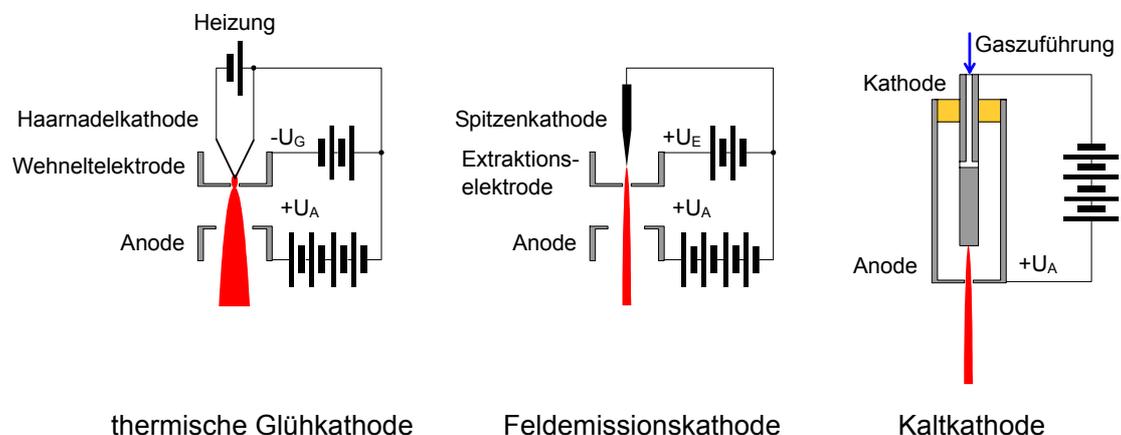


Abb. 62: Verschiedene Arten der Elektronenerzeugung

2.2. Elektronenlinsen

Wie schon erwähnt werden die negativ geladenen Elektronen durch magnetische und elektrische Felder abgelenkt. Durch entsprechende Formgebung der Felder werden dadurch Elektronenstrahlen gebündelt oder zerstreut.

2.2.1 Elektrische Linsen

Im einfachsten Fall besteht eine elektrische Linse nur aus einer Lochblende auf einem vom Elektronenstrahl unterschiedlichen Potenzial. Meist bestehen diese Linsen aber aus drei Lochblenden oder nacheinander angeordneten Röhren wobei die beiden äußeren Blenden oder Röhren auf gleichem Potenzial liegen. Durch das elektrische Feld zwischen den Blenden werden die Elektronen abgelenkt und so gebündelt, zerstreut oder reflektiert:

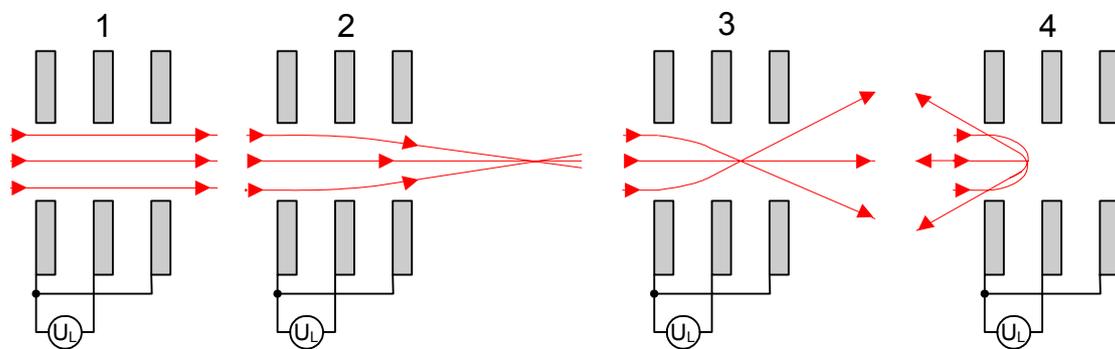


Abb. 63: Elektrostatische Linse mit wachsender Erregung

- | | |
|-----------------------------------|--|
| 1 keine
Linsenspannung | Elektronen können das System ungehindert passieren |
| 2 Linsenspannung
steigt | Elektronen werden durch die Felder abgelenkt und in einem Punkt fokussiert > Sammellinse |
| 3 Linsenspannung
steigt weiter | Elektronen werden in der Linse fokussiert. Das System wirkt nach außen wie eine Zerstreulinse |
| 4 Hohe
Linsenspannung | Elektronen können die Potenzialbarriere nicht überwinden. System wirkt wie ein Spiegel |

Die Brennweite einer elektrostatischen Linse kann über die Linsenspannung in weiten Grenzen verändernd werden.

Reale Linsen haben kompliziertere Formen als die einfache Blendenlinse im obigen Beispiel. Auch Elektronenlinsen haben Linsenfehler, die durch geeignete Formgebung der Elektroden klein gehalten werden können. Ebenso wichtig ist die richtige Form der Elektroden zur Vermeidung von Überschlägen bei den oft vorkommenden hohen Feldstärken.

2.2.2. Magnetische Linsen

Im einfachsten Fall besteht eine magnetische Linse aus einer von Strom durchflossenen Spule, durch deren Zentrum der Elektronenstrahl geht. Die geladenen Elektronen werden durch das Magnetfeld abgelenkt und können bei geeignetem Feldverlauf in einem Punkt vereinigt werden. Wie bei der elektrischen Linse findet eine Abbildung statt.

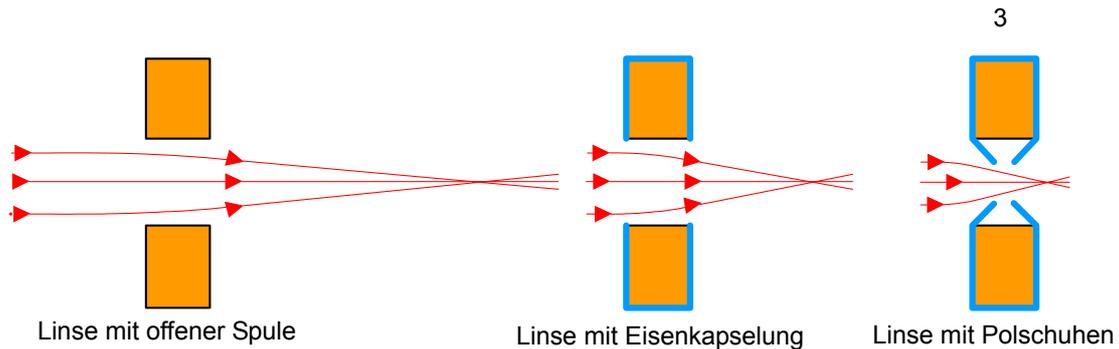


Abb. 64: Verschiedene magnetische Linsen

Der Grad der Ablenkung und damit die Brennweite der Linse hängen bei gegebener Elektronenenergie von der Stärke und dem Gradienten des magnetischen Feldes ab. Die Brennweite einer einfachen, kurzen Spule hängt vom Erregerstrom ab. Dieser kann aber aus thermischen Gründen nicht beliebig groß gemacht werden. Deshalb ist die Ausführung nur für relativ lange Brennweiten geeignet. Wird die Spule mit einem Eisenmantel umkleidet wird das Magnetfeld bei gleichem Strom viel größer und so wird eine kürzere Brennweite erzielt. Für besonders kurze Brennweiten wird die Linse noch mit Polschuhen versehen, zwischen denen ein starkes Magnetfeld herrscht.

Obwohl die folgenden Experimente zur Bilderzeugung zwar keine Rastertechniken verwenden, werden sie doch hier vorgestellt.

2.3. Kathodenabbildung mit einer Osziröhre

Die Technologie der Elektronenerzeugung und Bündelung wurde auch in den Röhren der Fernsehtechnik angewandt. In den Bildröhren der Fernsehgeräte, Computermonitore und Oszillographen wurde ein feiner Elektronenstrahl erzeugt, fokussiert und mit Spulen oder Ablenkplatten über die Fluoreszenzschicht des Bildschirms gerastert. Auch die Bildaufnahmeröhren wie Vidikons oder Plumbikons arbeiteten auf ähnliche Weise. Heutzutage sind Bildröhren und Bildaufnahmeröhren meist durch Halbleiterbauelemente und LCD-Techniken ersetzt, aber es gibt noch genügend Bildröhren und Aufnahmeröhren aus Restbeständen zu kaufen.

Am Besten eignet sich für erste Experimente eine kleine Oszillographenröhre. Oszillographenröhren arbeiten schon mit relativ niedrigen Spannungen und haben meist elektrostatische Fokussier- und Linsensystem die einfach zu handhaben sind. Der Verfasser verwendete eine Röhre DG 7-74 (3 ARP 1) des Herstellers Telefunken.

Betriebs- und Grenzdaten der DG 7-74			
Heizspannung	U_f	6,3 V	
Heizstrom	I_f	300 mA	
Anodenspannung	U_{a1}	500 V	max. 1000 V
Beschleunigungsspannung	U_{a2}	1000 V	max. 2000 V
Fokussierungsspannung	U_{g3}	50..110 V	max. 800 V
Gittersperrspannung	U_{g1}	-36...-25V	max. 0...-250 V

Tab. 14: Daten der Osziröhre DG 7_74

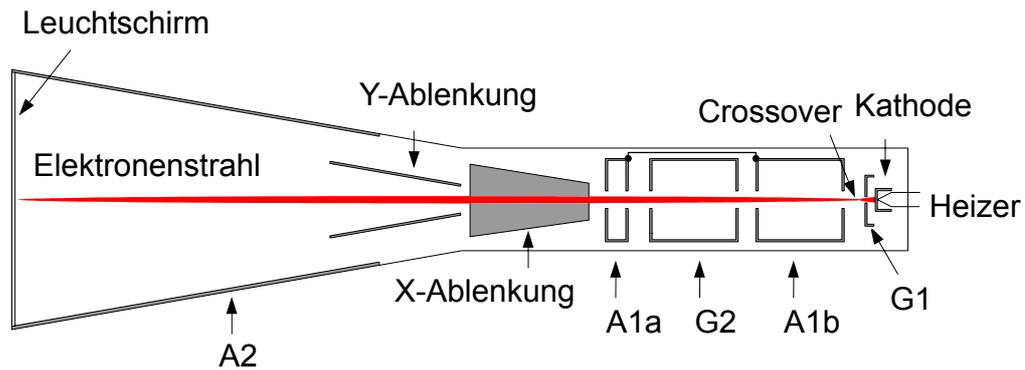


Abb. 65: Aufbau einer Osziröhre (DG 7-74A)

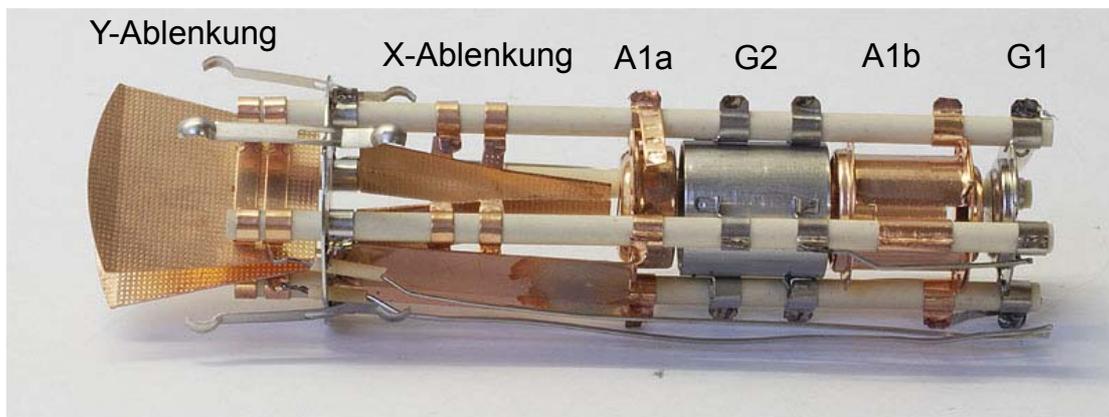


Abb. 66: Elektronenoptisches System der DG 7-74, ohne Kathode und Heizer

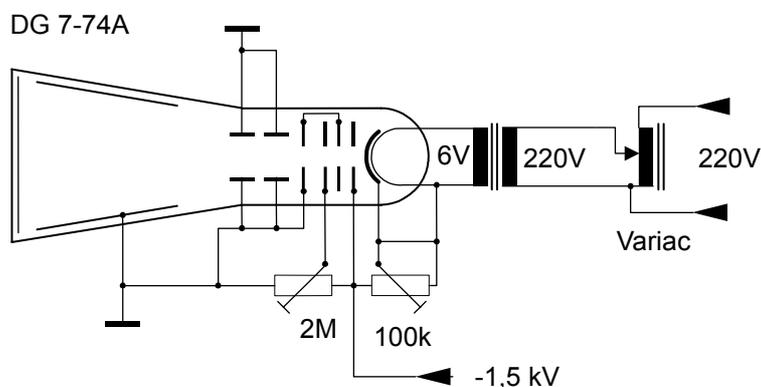


Abb. 67: Beschaltung der Oszillographenröhre

Schon mit der unveränderten Röhre kann ein interessantes Experiment durchgeführt werden. Durch Verändern der Betriebsspannungen kann nämlich erreicht werden, dass ein vergrößertes Bild der Kathode auf dem Leuchtschirm dargestellt wird. Normalerweise wird bei einer Oszillographenröhre der Elektronenstrahl auf den Schirm fokussiert und so ein kleiner Leuchtfleck erzeugt. Zu diesem Zweck werden die von der Kathode ausgehenden Elektronen zu einem dünnen Strahl, dem sogenannten Crossover, gebündelt. Der Durchmesser des Crossovers wird durch die negative Spannung am Gitter 1, dem sogenannten Wehnetzylinder eingestellt. Dieser Crossover, der dünnste Punkt des Strahls wird mit einer Elektronenlinse bestehend aus A1a, G2 und A1b, auf den Leuchtschirm abgebildet. Die Brennweite

der Linse wird durch das Spannungsverhältnis zwischen A1a, A1b und G2 eingestellt.

Durch Verändern der Linsenspannung U_{G2} und Wehneltspannung U_{G1} kann erreicht werden dass nicht mehr der Crossover, sondern die Kathodenoberfläche auf dem Schirm abgebildet wird. Da die Kathodenoberfläche meist mehr oder weniger emittierende Stellen aufweist, kann man diese dann als helle und dunkle Flecken auf dem Schirm betrachten.

		Normal Betrieb	Kathodenabbildung
Heizspannung	U_f	6,3 V	2 V
Anodenspannung	U_{a1}	500 V	1500 V
Beschleunigungsspannung	U_{a2}	1000 V	1500 V
Fokussierungsspannung	U_{g3}	50..110 V	0 V
Gittersperrspannung	U_{g1}	-36...-25V	0 V

Tab. 15: Betriebsdaten für die Kathodenabbildung

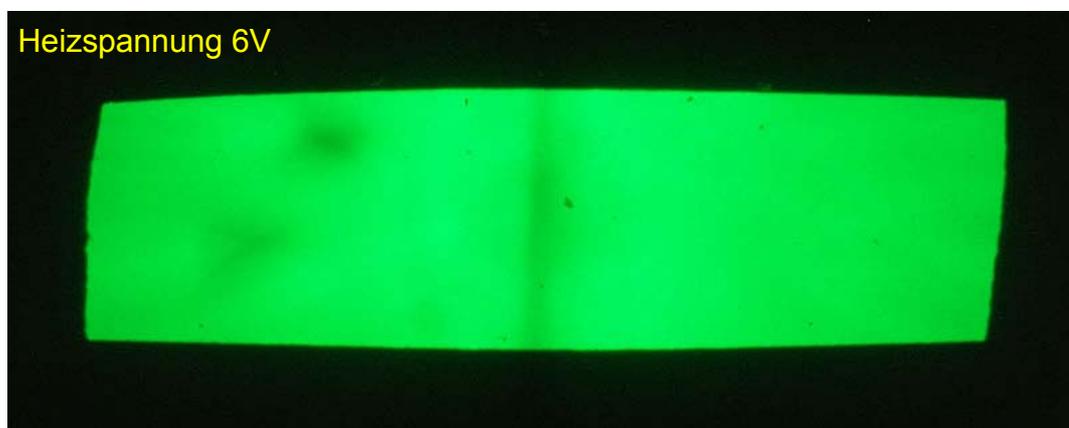


Abb. 68: unscharfes, aber immerhin vergrößertes Bild der Kathode

Die Unschärfe des Bildes liegt unter anderem an der, durch den Strahl erzeugten Raumladung. Die negativen Elektronen im Strahl stoßen sich gegenseitig ab, sodass das Elektronenbild verschmiert wird. Diese Raumladungseffekte werden mit sinkendem Strahlstrom kleiner. Die übliche Vergrößerung der negativen Vorspannung der Wehneltelektrode zur Verringerung des Strahlstroms führt hier aber nicht zum Ziel da mit einer Veränderung der Wehneltspannung auch die elektronenoptischen Verhältnisse geändert werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Verringerung der Emission der Kathode durch Unterheizung. Wird die Heizspannung von den nominellen 6V auf 2V erniedrigt wird das Bild zwar dunkler aber die körnige Struktur der Kathodenoberfläche tritt deutlich zutage.

Der Betrieb der Röhre mit Unterheizung sollte nicht zulange dauern, da dieser Modus die Kathodenschicht zerstören kann.

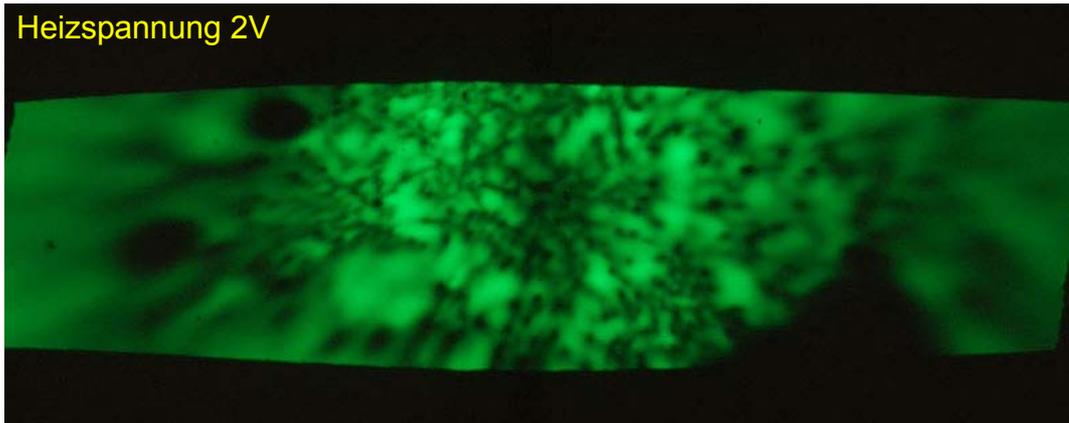


Abb. 69: scharfes Bild der Kathode durch Unterheizung

Durch eine entsprechende Einstellung der Spannungen kann erreicht werden, dass mit der Kathodenschicht auch der Rand der Wehneltblende scharf dargestellt wird. Bei der DG 7-74A beträgt der Durchmesser des Lochs etwa 0,8 mm, damit kann auch die Vergrößerung des Bildes bestimmt werden.

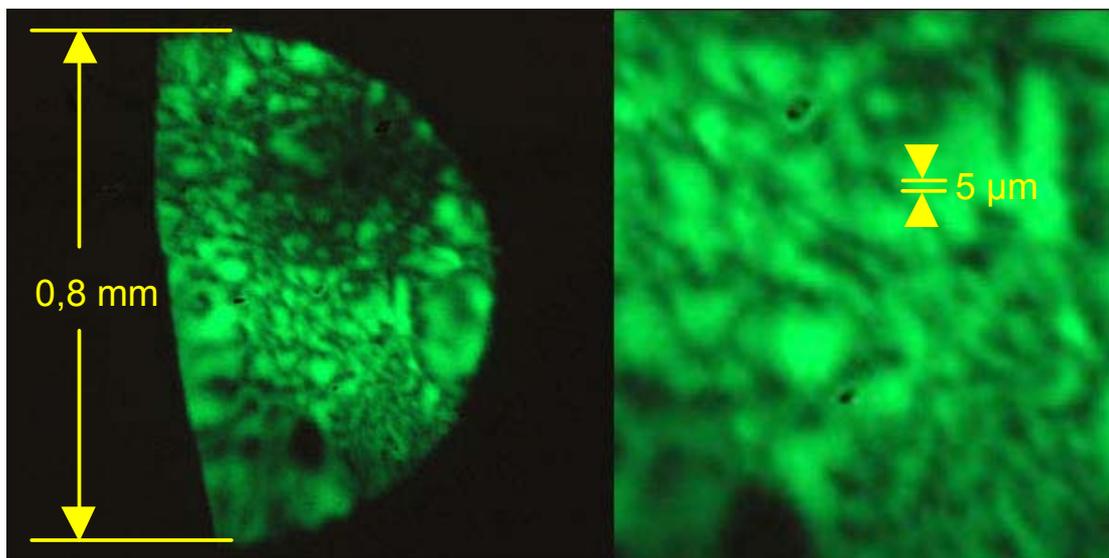


Abb. 70: Bestimmung der Vergrößerung und Auflösung

Die Vergrößerung des Bildes beträgt demnach etwa 60fach und die Auflösung liegt bei einigen Mikrometern.

Noch besser funktioniert die Kathodenabbildung mit einer Fernsehbiröhre da bei dieser keine Ablenkplatten vorhanden sind die den Strahlengang abschatten. Das folgende Bild zeigt die Kathode einer kleinen Fernsehbiröhre M 17-11 GM.

Im Gegensatz zur Osziröhre hat die M 17-11 GM eine Elektronenkanone mit einer zusätzlichen Anode (Tetrodensystem).

M 17-11 GM

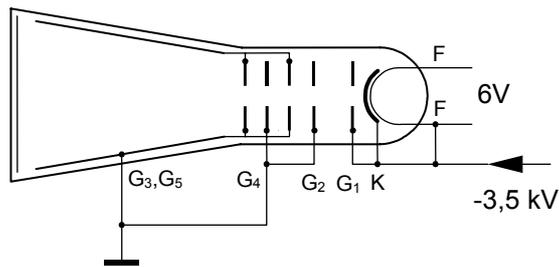


Abb. 71: Beschaltung der M 17-11 GM

Auch bei der Fernsehbildröhre bringt eine Unterheizung mit 6V (nominell 11V) eine Verbesserung der Abbildung. Ansonsten werden die Elektroden ohne Spannungsteiler auf Hochspannung bzw. Masse gelegt.

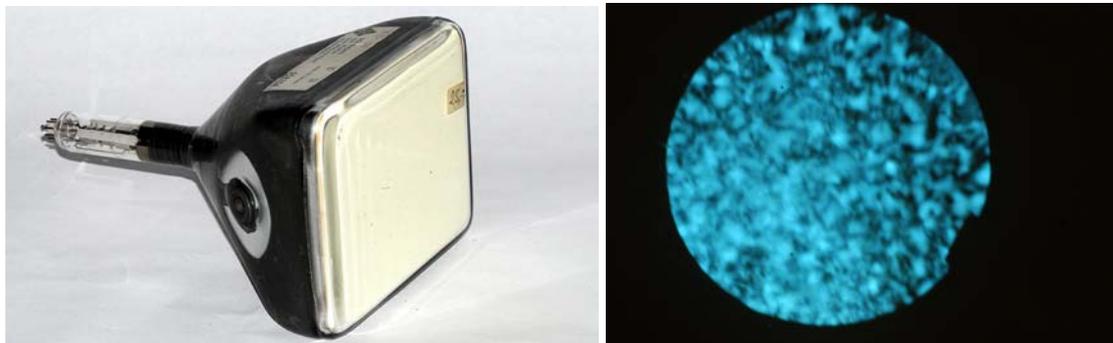


Abb. 72: Die Fernsehöhre M 11-17 GM und ihre Kathodenabbildung

2.4. Feldelektronenmikroskop

Einen besonders einfachen Aufbau besitzt das von E. Müller erfundene Feldelektronenmikroskop. Das Feldelektronenmikroskop, kurz FEM, gehört zur Klasse der Projektionsmikroskope und kommt ganz ohne jede Linse aus. Es besteht nur aus einer feinen Spitze und einem Leuchtschirm die zusammen in einem Vakuumgefäß untergebracht sind.

Wird an die Spitze eine hohe negative Spannung angelegt, können aus der Spitze durch Feldemission Elektronen austreten. Die durch das Feld beschleunigten Elektronen fliegen zum Leuchtschirm, auf dem dann ein stark vergrößertes Bild der Spitze sichtbar wird. Der Vergrößerungsmaßstab ist einfach durch dem Krümmungsradius der Spitze und deren Abstand zum Leuchtschirm gegeben.

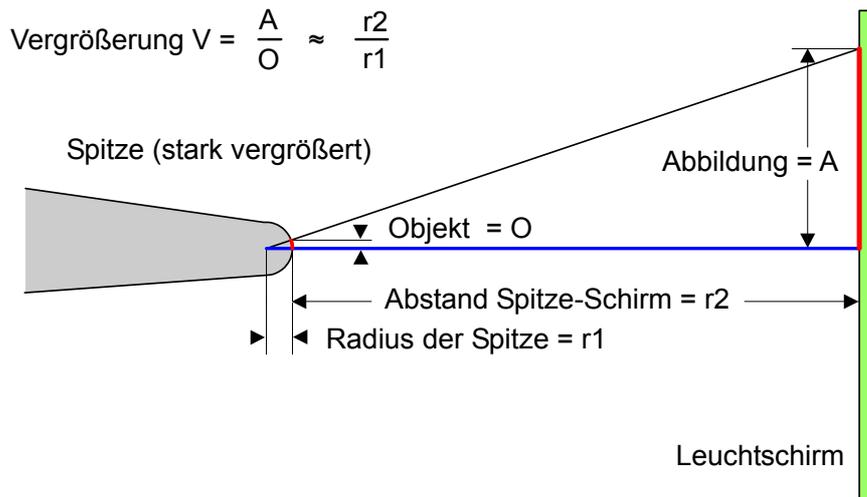


Abb. 73: Abbildung im Feldelektronenmikroskop

Bei einem Radius der Spitze von 50 Nanometern und einem Abstand zum Leuchtschirm von 10 cm erhält man schon die enorme Vergrößerung von 200000. Damit werden zwar nicht die Atome der Spitze selbst aber immerhin die Strukturen der Kristallorientierung sichtbar.

Die Funktion des FEM hängt entscheidend von der verwendeten Spitze ab. Wie erwähnt muss die Spitze sehr fein, d. h. im Bereich von einigen zehn Nanometern sein. Obwohl sich viele Stoffe zu feinen Spitzen verarbeiten lassen wird man für erste Versuche Wolfram verwenden da dieses Material ohne großen Aufwand gute und belastbare Spitzen gibt. Von den verschiedenen Verfahren zur Herstellung von Spitzen eignet sich vor allem die elektrolytische Ätzung, die ausführlich im ersten Teil des Buches (Rastertunnelmikroskope) beschrieben ist.

Die Emission einer Spitze hängt neben dem Krümmungsradius und der Kristallstruktur auch noch von der Bedeckung mit Fremdstoffen ab. Da bei dem mit Amateurmitteln erreichbaren Vakuum die Spitze immer mit Fremdstoffen bedeckt ist, muss die Möglichkeit einer Heizung der Spitze vorgesehen werden. Durch eine erhöhte Temperatur werden die Fremdstoffe abgedampft und die reine Spitzenoberfläche tritt in Erscheinung. Diese Heizung erfolgt durch Strom über eine Drahtschlinge, die um die Basis der Spitze gelegt wird.

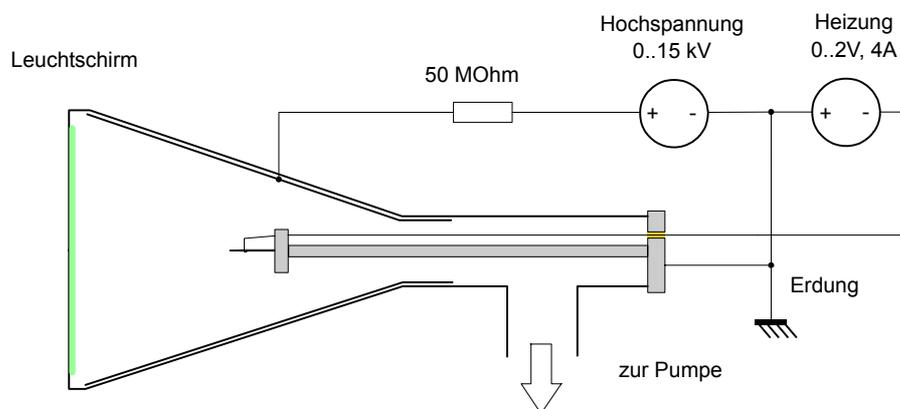


Abb. 74: Aufbau eines Feldelektronenmikroskops

Zum Aufbau verwendet man am Besten eine ausrangierte Oszillographenröhre, die am Hals mit einer Diamanttrennscheibe (z. B. Dremel) aufgeschnitten wird. Diese

Arbeit ist etwas kritisch, da im ungünstigsten Fall die Röhre implodieren kann. Deswegen müssen unbedingt Handschuhe und Schutzbrille getragen werden. Außerdem wird die gesamte Röhre mit Klebeband umwickelt, sodass bei einer etwaigen Implosion keine Glassplitter durch die Gegend fliegen können. Normalerweise hört man aber nur ein leises Zischen, wenn die Röhre durchtrennt wird. Das abgeschnittene Röhrenteil mit dem Elektronensystem wird nicht entsorgt, sondern am Besten vakuumverpackt für spätere Experimente aufgehoben.



Abb. 75: Zwei Oszirrohren DG 7-74A, und der Spitzenthalter

Für das FEM benötigt man aber nur den kegelförmigen Röhrenteil mit dem Leuchtschirm das in ein Flanschstück eingeklebt wird.

Der Spitzenthalter ist ein kleiner Aluklotz in dem die Spitze mit einem Stahlröhrchen (Injektionsnadel) befestigt ist. Mit einer Drahtschlinge wird die Spitze von der Seite kontaktiert und kann so durch Stromfluss geheizt werden. Die Heizstromzuführung ist mit Keramikröhrchen im Spitzenthalter isoliert montiert. Die Spitze wird als Kathode betrieben, als Anode dient die Graphitschicht, mit der die Bildröhre ausgekleidet ist.

Am einfachsten legt man die Grafitschicht auf hohes, positives Potenzial, während die Spitze geerdet ist. So hat man kleine Schwierigkeiten mit dem Anschluss der Heizstrom-Versorgung, die dann ebenfalls auf Erdpotenzial liegt. In die Anodenleitung wird noch ein hoher Widerstand (~ 50 Megaohm) eingeschaltet um im Falle eines Überschlags die Spitze zu schützen. Die benötigte Hochspannung liegt je nach Spitzenradius bei 5 bis 10 Kilovolt. Der Emissionsstrom der Spitze ist sehr

klein, ausreichend helle Bilder erhält man schon bei Strömen unter einem Mikroampere, sodass ein einfaches Hochspannungsnetzgerät für den Betrieb ausreicht. Der Heizstrom beträgt bei den vom Verfasser verwendeten 0,3 mm Drähten maximal 4 Ampere.

Hat man alle Teile zusammengebaut, kann man die Röhre abpumpen, für den Betrieb ist ein möglichst gutes Vakuum wichtig. Mit einer Diffusions- oder Turbopumpe zusammen mit einer mechanischen Vorpumpe kann das erforderliche Vakuum von 10^{-7} bis 10^{-6} mbar erreicht werden. Aber auch schon im 10^{-5} mbar Bereich ist ein Betrieb möglich. Bei abgedunkeltem Umgebungslicht wird die Hochspannung langsam erhöht, bis ein Leuchten auf dem Schirm sichtbar ist.

Meist wird man erst auf dem Schirm einen unstrukturierten Leuchtfleck sehen, da die Spitze mit Verunreinigungen und einer Wasserschicht bedeckt ist. Wird nun der Heizstrom eingeschaltet und die Spitze langsam erwärmt dampfen die Verunreinigungen ab und die eigentliche, hoch geordnete Kristallstruktur der Wolframspitze wird sichtbar.

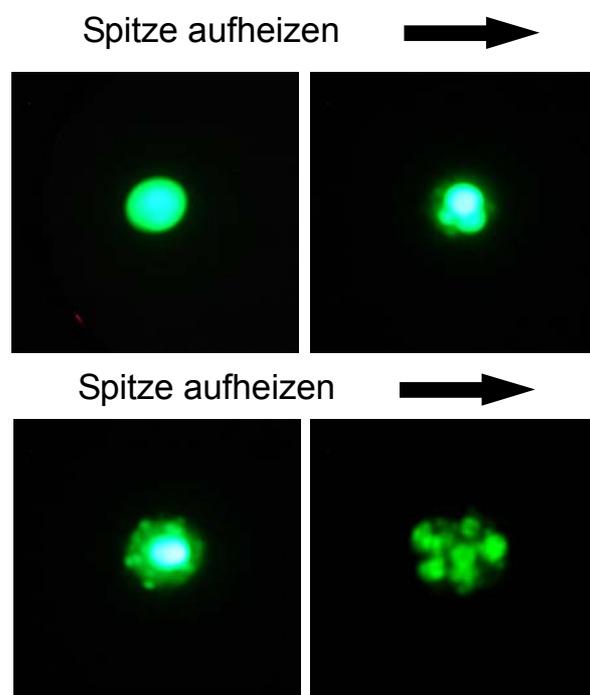


Abb. 76: Durch Aufheizen wird die Spitze sauber

Durch wiederholtes Aufheizen und Abkühlen der Spitze kann die Bedeckung mit Gasmolekülen sehr schön beobachten. Bei einem guten Vakuum würde die Wiederbedeckung lange Zeit brauchen, hier aber geht das in Sekunden.

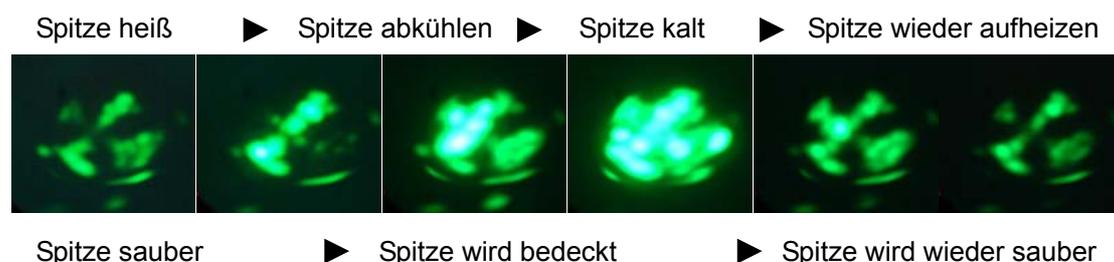


Abb. 77: Bedeckungszyklus der Spitze

Leider ist die Auswahl der Untersuchungsobjekte beim FEM sehr begrenzt, im wesentlichen kann man nur die Oberfläche von Metallspitzen und deren Bedeckung betrachten. Da gilt im selben Maße auch für das ebenfalls von Müller erfundene Feldionenmikroskop, kurz FIM. Im Unterschied zum FEM werden beim FIM nicht Elektronen, sondern Ionen zur Abbildung benützt. Wegen der wesentlich höheren Masse der Ionen ist die Wellenlänge eines Ionenstrahls noch wesentlich kleiner als bei Elektronen, sodass hier schon die Abbildung einzelner Atome möglich wird. Allerdings sind auch die experimentellen Rahmenbedingungen beim FIM wesentlich härter als beim FEM. So muss zum Beispiel die Spitzentemperatur auf einige Kelvin weit abgesenkt werden, dass nicht durch die Wärmebewegung die hohe Auflösung zunichtegemacht wird.

2.5. Feldionenmikroskop

Wer FIM-Versuche machen will, muss ansonsten lediglich etwas Gas, z. B. Helium in die abgepumpte Röhre einlassen (ca. 10^{-4} bis 10^{-3} mbar) und die Polarität der Spitzenspannung ändern. Mit positiver Spitzenspannung werden Heliumatome in der Nähe der Spitze ionisiert und durch das Feld zum Leuchtschirm beschleunigt. Die Ionisationswahrscheinlichkeit an der Spitze hängt von lokalen Gegebenheiten ab, sodass durch den Ionenstrahl wieder ein Bild der Spitze erzeugt wird.

Die Spitzenspannung muss bei FIM mit etwa 20 kV deutlich höher sein als beim FEM mit etwa 4 bis 5 kV und die Bilder sind wesentlich lichtschwächer als beim FEM. Zum Vergleich konnten FEM-Bilder mit 1600 ASA, Blende 2,8 unter einer Zeit von 1/500 Sekunden aufgenommen werden, beim FIM-Betrieb wurde bei sonst gleichen Einstellungen eine Belichtungszeit von 30 Sekunden nötig.

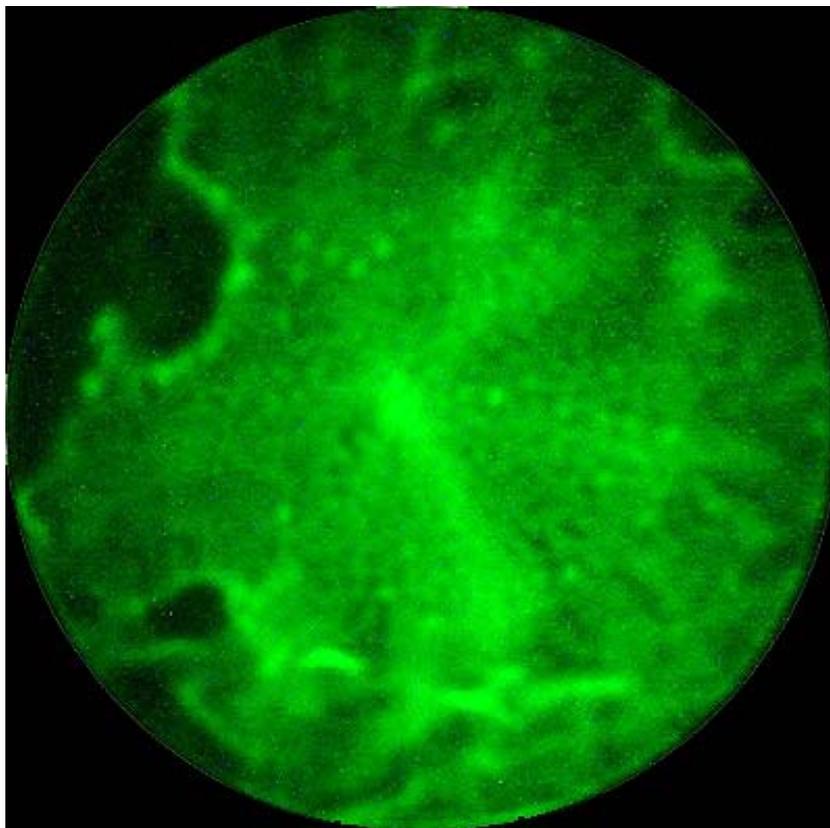


Abb. 78: FIM-Bild einer Wolframspitze

Das Bild wurde mit einer Spannung von 20 kV bei einem Heliumdruck von etwa 10^{-4} mbar aufgenommen. Der Hintergrunddruck vor dem Einlassen des Heliums betrug 5×10^{-6} mbar. Die einzelnen hellen Punkte auf der Oberfläche sind wohl adsorbierte Atome des Hintergrundgases. Die Wolframatomspitze werden nicht aufgelöst. Für eine bessere Auflösung wären ein besseres Vakuum und vor allem eine Kühlung der Spitze notwendig.

Zum Schluss wäre noch zu bemerken dass sich nicht alle Osziröhren zum Umbau in ein FIM eignen. Bei manchen Röhren ist die Leuchtschicht mit einer dünnen Aluschicht überzogen, um sie vor den im normalen Betrieb unerwünschten Ionen zu schützen. Während Elektronen problemlos die dünne Aluschicht durchdringen und zum Leuchtschirm gelangen, ist das für die größeren Ionen nicht möglich. Für den FIM-Betrieb sind solche Röhren damit nicht zu gebrauchen.

2.6. Rasterelektronenmikroskop (REM)

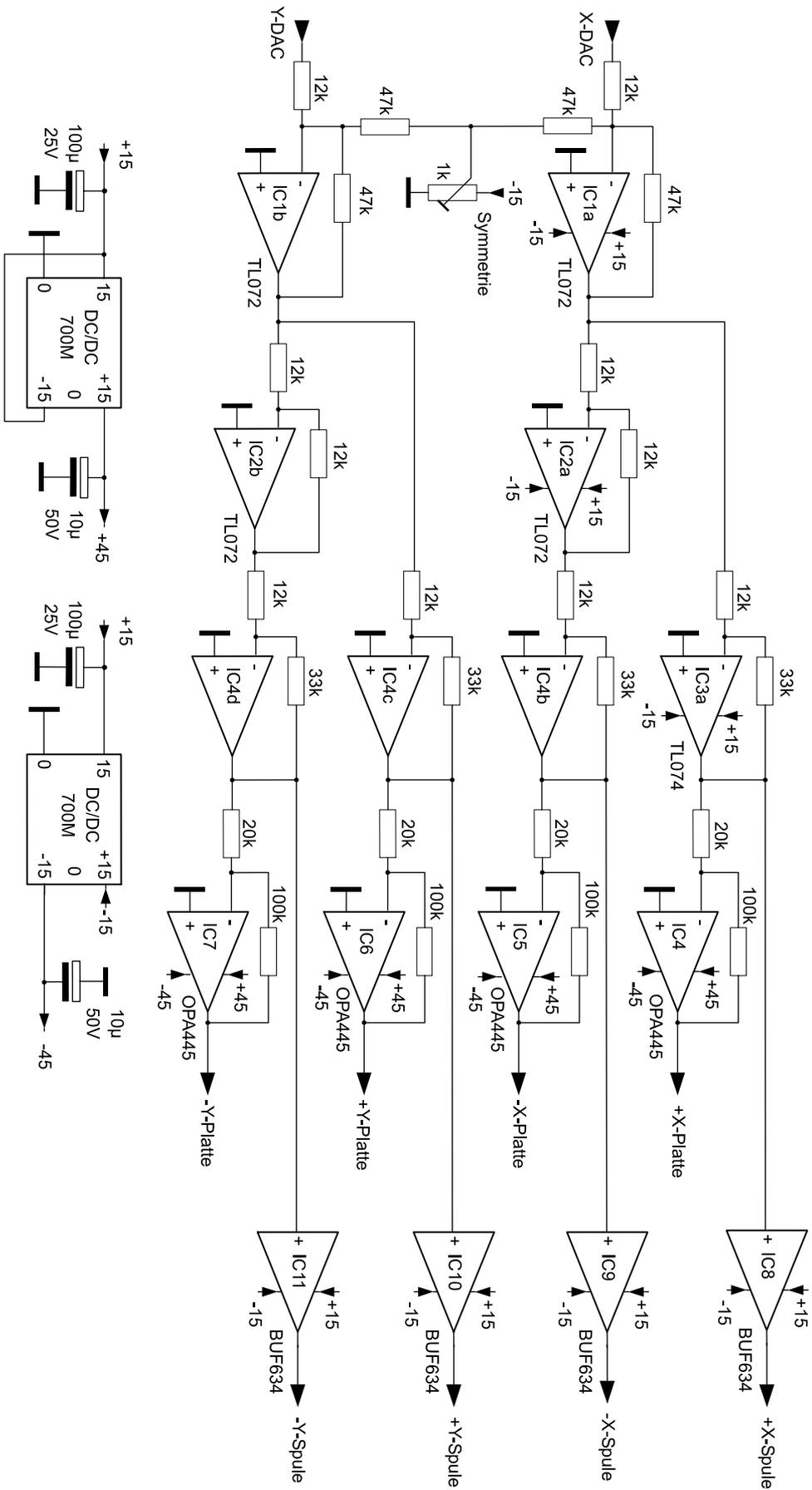
Im Prinzip gleicht der Aufbau eines REMs dem eines Rasterlichtmikroskops. Auch hier findet sich eine Quelle, deren Strahlen mit Linsen auf die Probe fokussiert werden. Zur Erzeugung des Bildes wird der fokussierte Strahl über die Probe gerastert, was durch eine Bewegung der Probe oder des Strahls geschehen kann. Das in jedem Rasterpunkt reflektierte Licht oder hier die zurückgestreuten Elektronen werden gemessen und bestimmen die Helligkeit des Pixels in der Abbildung.

Für ein REM benötigt man demnach ein System, das einen möglichst feinen Elektronenstrahl erzeugt, mit dem die Probe abgerastert wird. Je feiner der Elektronenstrahl ist desto höher werden die Auflösung der Abbildung werden. In kommerzielle REMs wird das Bild des Crossover mit mehreren Linsen verkleinert. Und sie erreichen so Strahldurchmesser von wenigen Ångström und erlauben Vergrößerungen bis zu 500000-fach. Diese Werte sind mit einem Selbstbau natürlich nicht zu erreichen.

Zum Betrieb des REMs wird die schon beim Ultraschallmikroskop verwendete 19-Zoll Messeinheit verwendet. Dazu werden zwei zusätzliche Platinen eingebaut.

2.6.1. Ablenkverstärker

Der Treiber zur Erzeugung der Ablenkspannung arbeitet mit vier Operationsverstärkern Typ OPA 445. Diese Typen können mit einer Betriebsspannung von bis zu ± 45 Volt arbeiten. Mit einer Ausgangsspannung ± 30 Volt kann der Elektronenstrahl etwa 10 mm abgelenkt und somit eine Fläche von einem Quadratcentimeter abgerastert werden. Wird das Bild auf dem Computer in einem 10×10 cm Fenster dargestellt, hat man eine 10fache Vergrößerung. Für eine stärkere Vergrößerung müssen nur die Ablenkspannungen verringert werden. Werden die Ablenkspannungen auf ± 3 V erniedrigt, beträgt die Vergrößerung das 100fache. Die sägezahnförmigen Eingangsspannungen für die Ablenkverstärker werden von DA-Wandlern auf der CPU-Platine erzeugt. Da diese DA-Wandler eine Ausgangsspannung von 0 bis 2,5 Volt liefern, zur Ablenkung aber zu Null symmetrische Spannungen benötigt werden sind vor den Endstufen noch Symmetrierstufen eingefügt. Die hohe Betriebsspannung der Endstufen von ± 45 V wird mit zwei Spannungswandlern erzeugt.



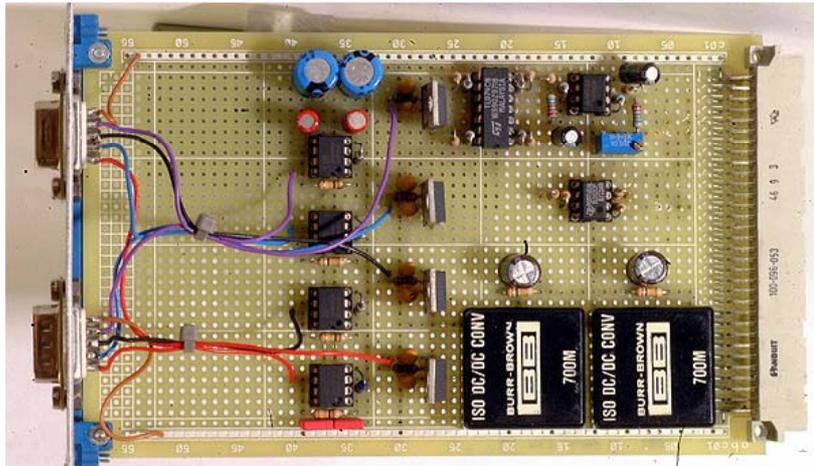


Abb. 79: Platine der Ablenktreiberschaltung

Diese Schaltung eignet sich auch für den Betrieb der Piezoscanner eines Rastertunneltunnelmikroskops.

Auf der gleichen Platine ist noch Platz für vier Hochstromtreiber BUF 634 T. Diese Treiber die Ausgangsströme von ± 500 mA liefern, können die Ablenkspulen der später beschriebenen Vidikonröhre ansteuern. Auch für die Hochstromendstufen wird eine vor geschaltete Symmetriestufe benötigt. Diese Schaltung eignet sich auch für den Betrieb eines Lautsprecher-scanners für ein Lasermikroskop.

Auf der zweiten Platine befinden sich zwei Eingangsverstärker zur Messung des Proben- und des Sekundärelektronenstroms.

2.6.2. Eingangsverstärker

Zur Messung des Probensignals sind zwei gleich aufgebaute Kanäle vorgesehen. Die Eingangsstufen sind Instrumentenverstärker vom Typ AD 524 von Analog Device. Die Verstärkung der Bauteile kann durch Lötbrücken zwischen 1, 10, 100 und 1000fach verändert werden. Auf die Eingangsverstärker folgen Isolationsverstärker ISO 103 von Burr Brown. Durch die galvanische Trennung in diesen Verstärker kann das Bezugspotenzial der Eingangsstufen beliebige Werte annehmen. Da der Faradaykäfig auf einer Spannung von 300 V liegt, ist in diesem Schaltungszug die galvanische Trennung unumgänglich. Bei der Messung des Probenstroms auf normalem Erdpotential wäre diese Trennung nicht zwingend notwendig, hilft aber bei der Vermeidung von Brummschleifen. Ein großer Vorteil der verwendeten Isolationsverstärker ISO 103 ist, dass diese Bauteile auch eine isolierte Betriebsspannung zur Versorgung der Eingangsstufen liefern.

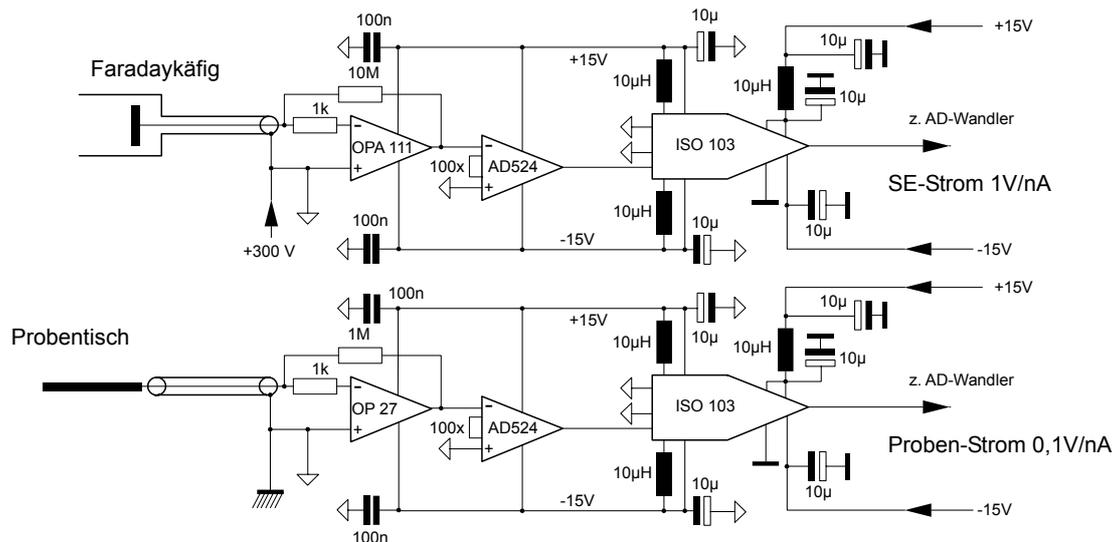


Abb. 80: Schaltung Eingangsverstärkers

Nicht auf der Eurokarte befinden sich die beiden Vorverstärker, die als Strom-Spannungs-Wandler zur Vermeidung von Störungen direkt an die Anschlüsse des Mikroskops gelötet werden.

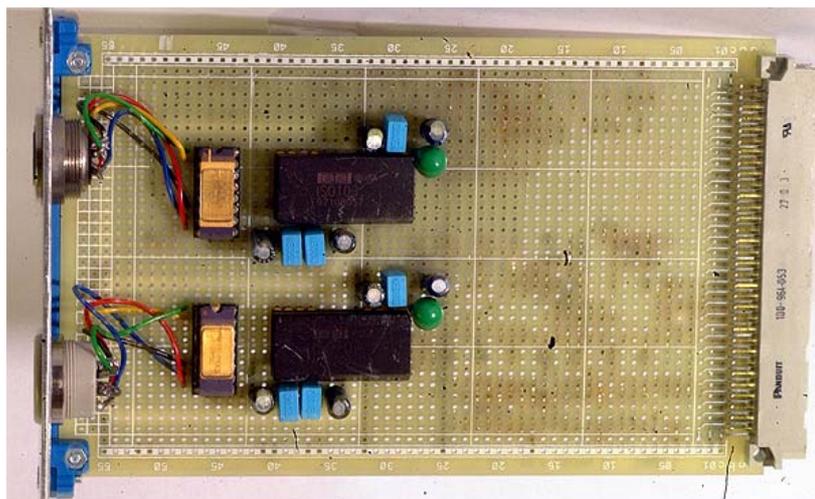


Abb. 81: Die Platine mit Isolationsverstärkern

2.6.3. Elektronendetektor

Neben den Strahl erzeugenden System braucht man eine Messeinrichtung, welche die vom Untersuchungsobjekt kommenden Sekundärelektronen detektiert und daraus die entsprechende Spannung zur Helligkeit des momentanen Messpunktes generiert.

Dieser Sekundärelektronenstrom ist sehr klein und muss dementsprechend hoch verstärkt werden. Kommerzielle Mikroskope haben zu diesem Zweck eine Kombination aus einem Leuchtschirm und einem optisch angekoppelten Fotomultiplier. Die langsamen Sekundärelektronen werden durch eine hohe Spannung von etwa 10 kV zum Leuchtschirm beschleunigt. Das durch die, nun schnellen Elektronen im Leuchtschirm erzeugte Licht wird mit dem Fotomultiplier gemessen. Diese Kombination aus Leuchtschirm (Szintillator) und Multiplier hat trotz

Rauscharmut eine sehr hohe Verstärkung und erlaubt die Messung von Elektronenströmen im Picoamperebereich. Einen Eindruck von der Leistungsfähigkeit dieser Methode erhält man schon beim Betrieb einer Osziröhre. Auch wenn der Strahlstrom mit elektronischen Mitteln noch kaum messbar ist, kann der Leuchtfleck auf dem Schirm mit dem bloßen Auge schon gut gesehen werden.

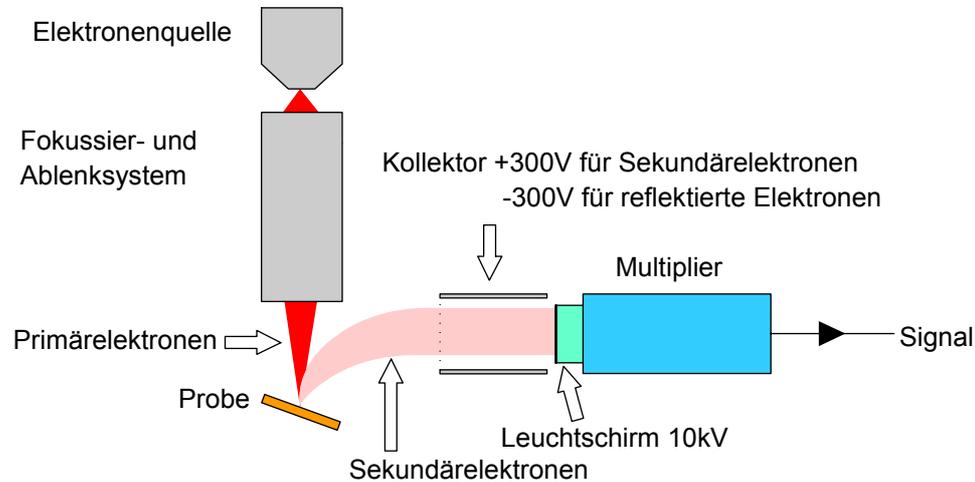


Abb. 82: Detektion der Elektronen mit einem Multiplier

Zur Messung höhere Ströme kann aber auch ein einfacher Faradaykäfig verwendet werden.

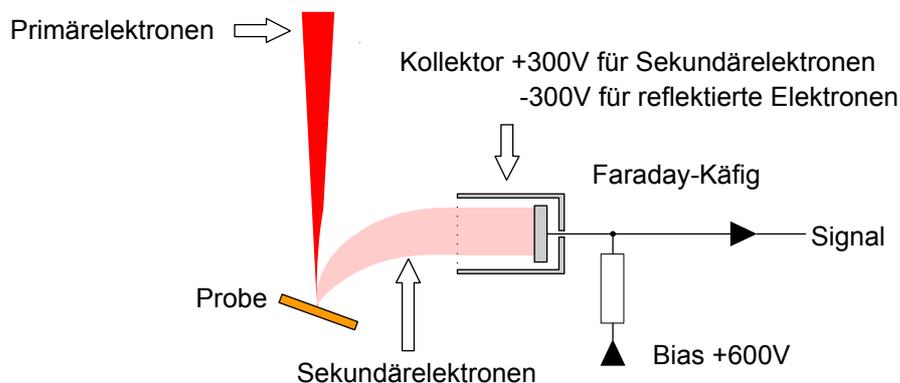


Abb. 83: Detektion der Elektronen mit dem Faradaykäfig

Neben den Sekundärelektronen können noch andere Effekte zur Bilderzeugung verwendet werden. Infrage kommen reflektierte Elektronen hoher Energie, der Probenstrom, oder speziell bei Halbleiterprobe der EBIC-Effekt (Electron Beam Induced Current). Auch das durch den Elektronenstrahl erzeugt Fluoreszenzlicht der Probe kann zur Signalerzeugung herangezogen werden. Bei sehr dünnen Proben kommt noch eine Transmissionsmessung infrage, bei der der Elektronendetektor unter der Probe angeordnet ist.

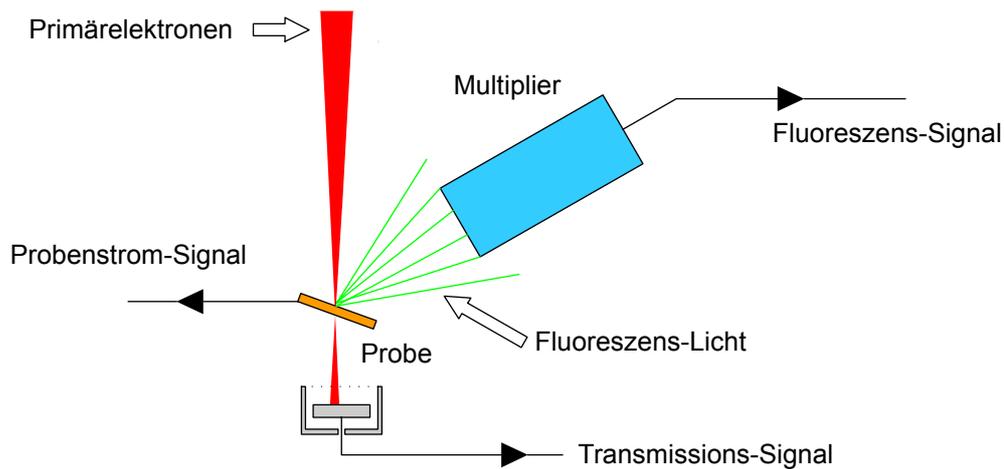


Abb. 84: Zusätzliche Möglichkeiten der Signalerzeugung

Kommerzielle Geräte bieten noch weitere Möglichkeiten. Mit den durch die Elektronen ausgelösten Röntgenstrahlen können die in der Probe vorhandenen chemischen Elemente bestimmt werden (EDX Energy Dispersive X-Ray). Allerdings überschreiten solche Geräte die Möglichkeiten des durchschnittlichen Bastlers.

2.7. Aufbau eines einfachen REMs

Für den Bau eines einfachen REMs kann man das Strahlerzeugungs- und Ablenssystem einer Bild-, Oszillographen- oder Vidikonröhre verwenden.

2.7.1. Osziröhre als elektronenoptisches System

Erste Versuche wurden mit dem System der für das FEM zerlegten Osziröhre DG 7-74A unternommen. Zu diesem Zweck wurde der zylindrische Teil der Röhre, der das Elektrodensystem enthält in einen passenden Flansch eingeklebt. Das Problem an dieser einfachen Methode liegt in der Empfindlichkeit der Kathode der Röhre. Die aktive Kathodenfläche besteht aus einer dünnen Bariumschicht, welche beim Kontakt mit Luft sofort oxidiert. Zwar kann diese Schicht im Vakuum durch Aufheizen wieder regeneriert werden aber die Anzahl der möglichen Regenerationszyklen ist begrenzt, sodass die Kathode nach mehrmaligem Belüften, Abpumpen und wieder Aufheizen unbrauchbar wird. Am Besten ist es, wenn das Mikroskop zum Probenwechsel nicht mit Luft, sondern mit einem inerten Gas wie Stickstoff, Argon oder Helium (Ballongas) geflutet wird.

Als Mikroskopkammer dient ein senkrecht stehendes KF40-Kreuzstück. An das obere Rohrstück wird die Osziröhre angeflanscht, die beiden seitlichen Rohrstutzen tragen den Probenhalter und den Sekundärelektronendetektor. Das untere Rohrstück wird an die Pumpleitung angeschlossen. Durch die senkrechte Anordnung kann davon ausgegangen werden, dass beim Fluten mit einem leichten Gas wie Helium die Kathode der Osziröhre beim Probenwechseln kaum mit Luft in Berührung kommt. Als Sekundärelektronendetektor dient ein einfacher Faradayscher Käfig aus einem dünnwandigen, kurzen Metallrohr. Ein kurzes Stück Semirigid-Kabel, das isoliert in einem Blindflansch eingeklebt ist, trägt den Faradayschen Käfig. Am Innenleiter des Kabels ist die Auffängerplatte angelötet. Neben der Befestigung des Käfigs dient das Kabel gleichzeitig zur Zuführung der Saugspannung und Ableitung des Messsignals.

Auch das Probenstischchen wird mit einem Semirigid-Kabel befestigt, sodass durch dieses Kabel der Probenstrom oder das EBIC-Signal abgenommen werden können. Semirigidkabel sind nicht wirklich gasdicht deswegen werden die äußeren Enden mit einem Tropfen UHU-Plus verklebt.

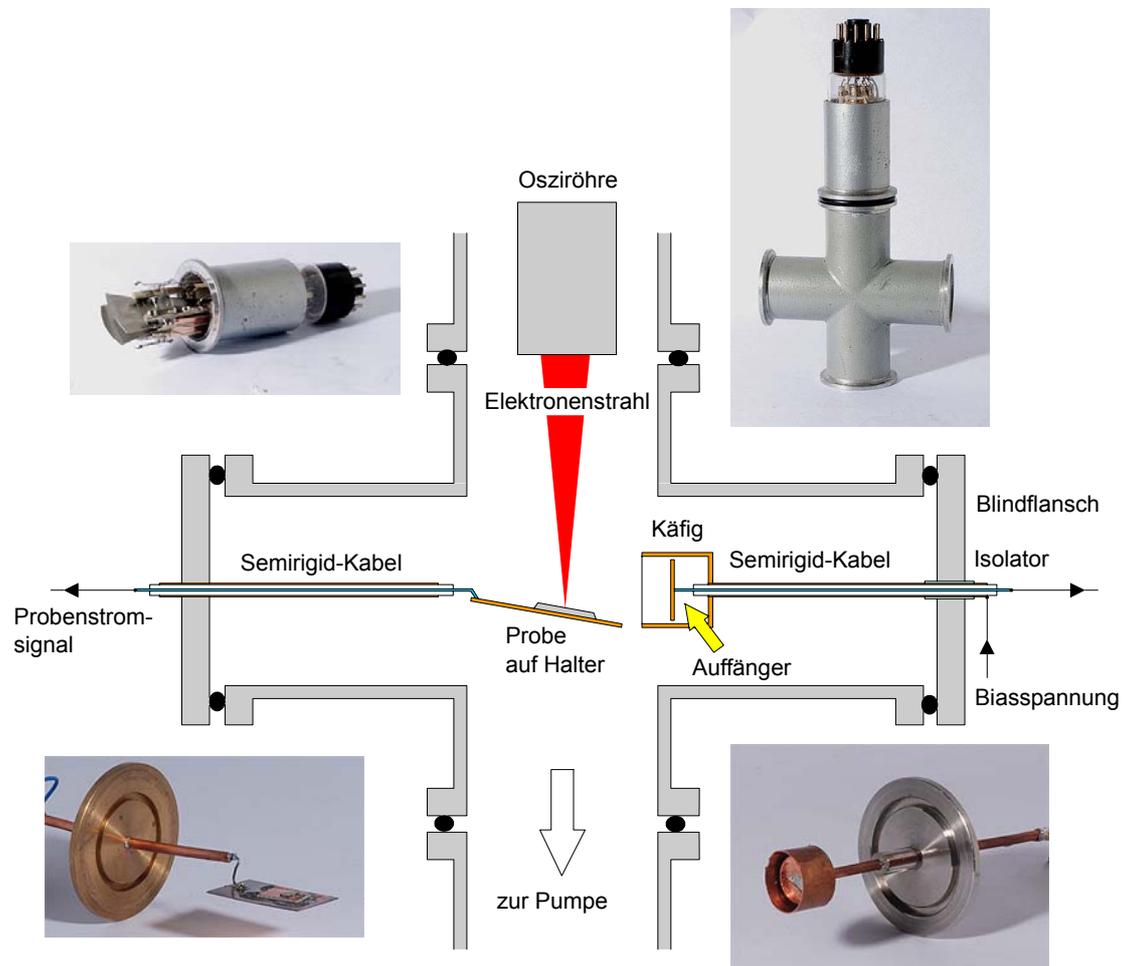


Abb. 85: Aufbau der Mikroskopkammer

Die Messung des Sekundärelektronenstroms birgt noch eine schaltungstechnische Schwierigkeit. Sowohl der Faradaykäfig wie auch die Auffängerplatte liegen auf einer hohen Spannung von etwa 300V. Um das Signal auf das erforderliche Erdpotential umzusetzen, muss die hohe Spannung durch einen Isolationsverstärker abgetrennt werden.

Zum Betrieb des Geräts ist ein Vakuum von $< 10^{-4}$ mBar ausreichend, und wenn wie schon erwähnt die Kammer mit Ballongas geflutet wird, hat auch bei diesem hohen Druck die Kathode eine ausreichend lange Lebensdauer. Die Betriebsspannungen in der folgenden Tabelle sind auf das Kathodenpotential bezogen.

Heizspannung	U_f	7,8 V
Kathodenpotential	U_K	0 V
Wehneltspannung	U_{G1}	-10 V
Anodenspannung	U_{A1}	1550 V
Beschleunigungsspannung	U_{A2}	1550 V
Fokussierungsspannung	U_{G2}	370 V

Tab. 16: Betriebsdaten der Elektronenkanone

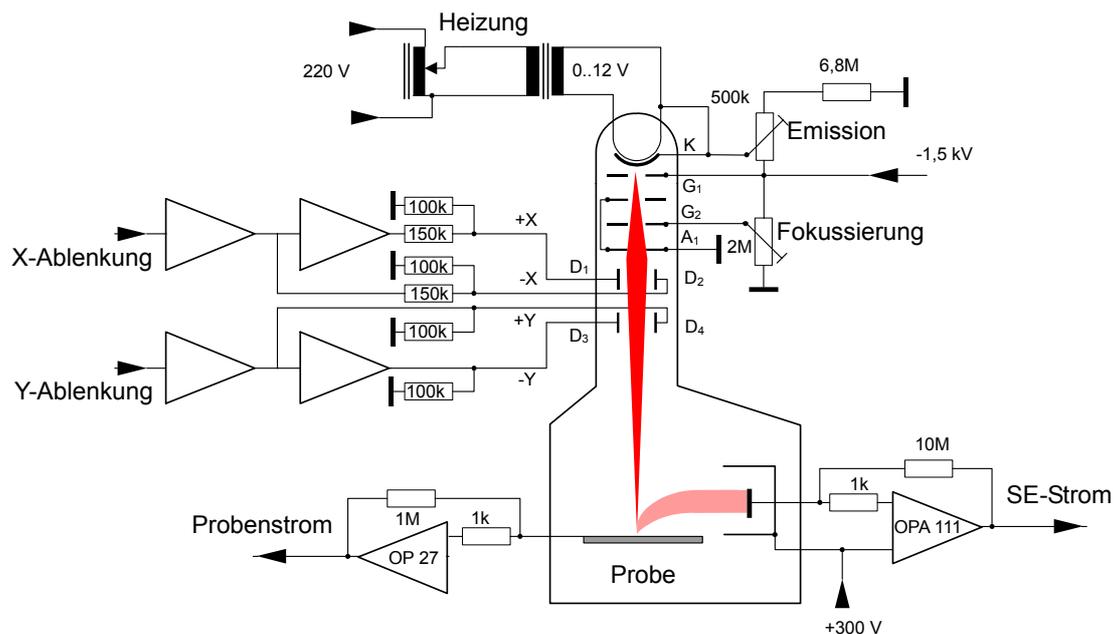


Abb. 86: Schaltung des Versuchsmikroskops

Eine Saugspannung am Faradaykäfig von 300 V ist ausreichend um die Sekundärelektronen quantitativ zu erfassen. Der mittlere Sekundärelektronenstrom beträgt 2 nA, sodass nach dem Stromverstärker 2 V am AD-Wandler Eingang zur Verfügung stehen.

2.7.2. Bilder mit dem Eigenbau-REM

Für das folgende Bild wurde als Probe ein Alu-Lochblech eingebaut. Die Ablenkempfindlichkeit der beiden Plattenpaare ist unterschiedlich, das kathodennahe Paar zeigt eine stärkere Ablenkung. Da beide Plattenpaare mit gleicher Amplitude angesteuert werden, ist das Bild verzerrt.

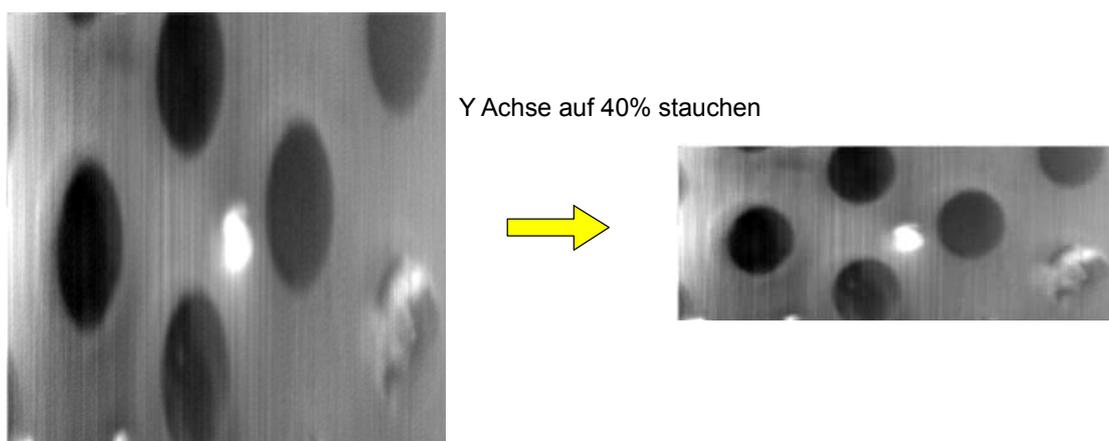
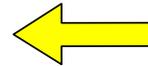
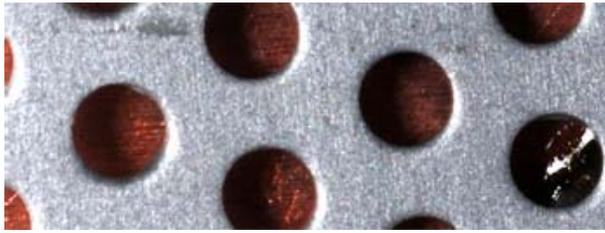
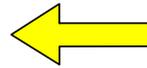
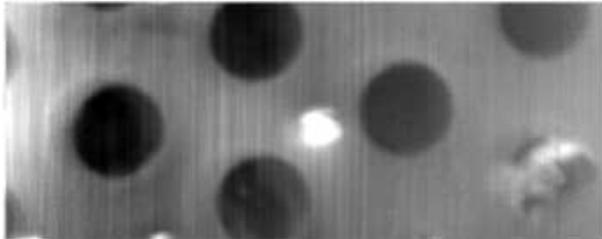


Abb. 87: Abbildung eines Alu-Lochblechs mit dem Selbstbau-REM

Durch eine Stauchung des Bildes in der Y-Achse kann die Verzerrung aber rückgängig gemacht werden. Später wurde ein quadratisches Rasterfeld durch den Einbau eines Spannungsteilers (150 k Ω / 100 k Ω) in X-Ablenkung erreicht.



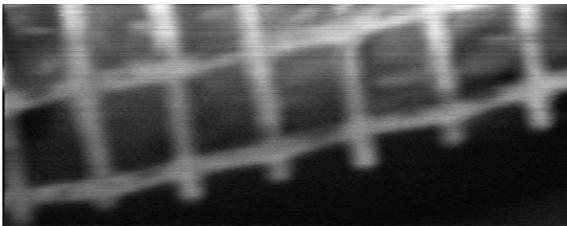
optisches Bild



Rem-Bild

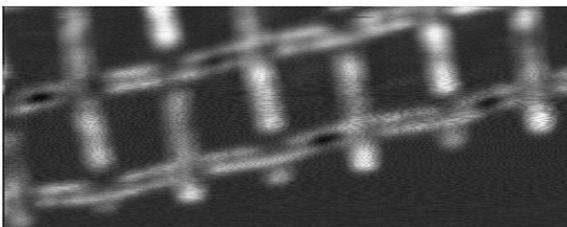
Abb. 88: Vergleich des optischen Bildes mit dem REM-Bild

Die Löcher haben einen Durchmesser von einem Millimeter. Die Vergrößerung beträgt demnach etwa 12fach. Das ist natürlich für ein Elektronenmikroskop kein berauschender Wert, man hat wohl eher eine Elektronenlupe denn ein Mikroskop. Aber mit dem Gerät sollte ja nur das Prinzip des Rasterelektronenmikroskops demonstrieren. Für eine höhere Auflösung und eine damit stärkere mögliche Vergrößerung müsste der Fokus des Elektronenstrahls viel kleiner sein. Mit der einfachen Elektronenlinse einer Osziröhre ist das leider nicht möglich, zumal hier durch die geometrischen Verhältnisse der Crossover vor der Kathode noch vergrößert, statt verkleinert wird.



Sekundärelektronen-Bild

optisches Bild →



Probenstrom-Bild

Abb. 89: Abbildung eines Drahtgitters mit Sekundärelektronen und Probenstrom

Werden die Ablenkplatten mit höheren Amplituden angesteuert, wird eine größere Rasterfläche beschrieben, sodass größere Proben abgebildet werden können. Für das folgende Bild eines 5 Cent Stücks und das Alu-Lochblech wurde die Ablenkspannung auf $\pm 30V$ vergrößert.

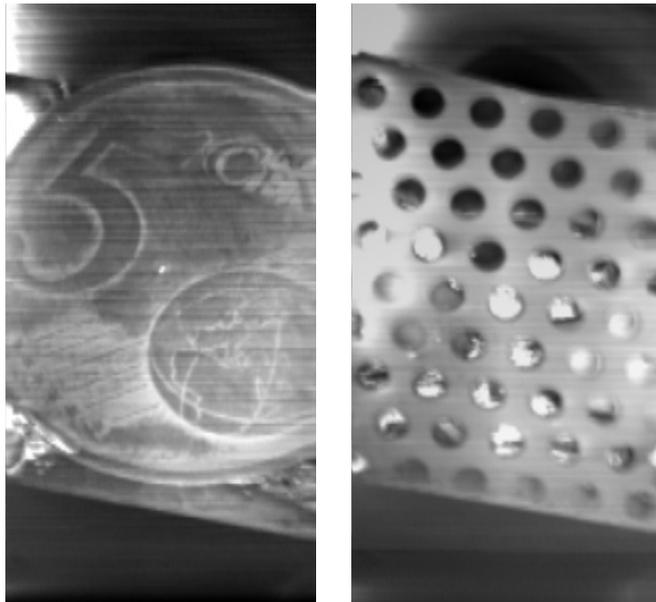


Abb. 90: Abbildung bei vergrößerter Ablenkspannung

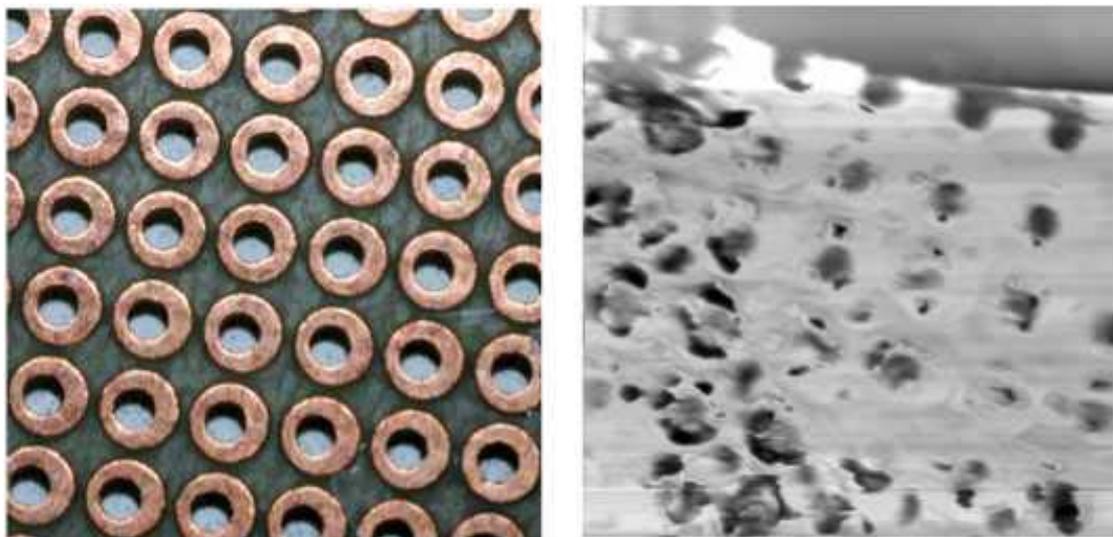


Abb. 91: Aufladung einer isolierenden Probe durch den Elektronenstrahl

Bekannterweise können mit einem REM nur leitfähige Proben untersucht werden. Deutlich ist das an dem Bild einer Lochrasterplatine zu sehen. Die einzelnen Kupferpads werden durch den Elektronenstrahl aufgeladen und diese Ladungsinselfenken den Strahl ab, eine Abbildung wird unmöglich.

Wird die Probe jedoch mit einem leitfähigen Überzug versehen, können die Ladungen abfließen und eine ungestörte Abbildung wird möglich. Für den Test wurde die Platine mit Grafitsspray behandelt und so eine leitfähige Oberfläche erzielt.

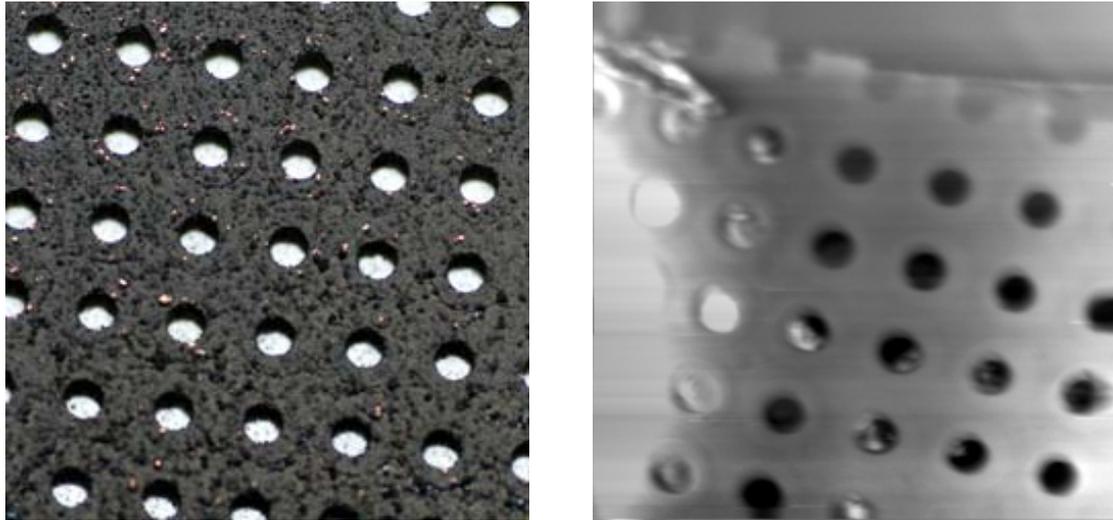


Abb. 92: Abfließen der Ladungen durch eine Grafitsschicht

In der wirklichen, hoch auflösenden Elektronenmikroskopie kann natürlich kein Grafitsspray verwendet werden, da dessen Struktur die feinen Einzelheiten des eigentlichen Untersuchungsobjekts überdecken würde. Normalerweise werden zu diesem Zweck strukturlose dünne Gold- oder Kohleaufdampfschichten verwendet. Die Messungen zeigen, dass mit handelsüblichen Elektronenkanonen von Osziröhren nur eine mäßige Auflösung zu erreichen ist, sodass sie sich bestenfalls für eine Demonstration des Prinzips eignen. Allerdings wurden auch schon bei diesen Versuchen wichtige Erkenntnisse gewonnen. So wurde festgestellt, dass mehrmaliges Belüften der Kammer der empfindlichen Kathodenschicht nicht schadet, sofern mit Helium (Ballongas) geflutet wird.

2.7.3. Vidicon als elektronenoptisches System

Für eine höhere Auflösung sollte die folglich nach einer besseren Elektronenkanone gesucht werden. Eine Möglichkeit ist die Verwendung des Strahlsystems einer Bildaufnahmeröhre.

In früheren Fernsehkameras wurden Vidikon- oder Plumbikonröhren eingesetzt. Solche Röhren sind mittlerweile sehr günstig (einige Euro) bei Ebay zu kaufen, da kaum jemand etwas mit diesen Teilen anfangen kann, ausgenommen den Lesern dieses Buches natürlich.

In diesen Röhren wird ein feiner Elektronenstrahl erzeugt und mit Magnetfeldern über die sogenannte Speicherschicht gerastert. Das Strahlsystem dieser Röhren ist darauf ausgelegt einen sehr feinen Strahl zu erzeugen.



Abb. 93: Diverse Vidikons, links 1/2 Zoll und rechts 2/3 Zoll Typen

Bei einer üblichen Röhre (XQ 1270) beträgt die Größe dieser Speicherschicht etwa 6 x 8 mm bei circa 450 Zeilen. Aus diesen Werten können die Spotgröße des Elektronenstrahls und damit die Auflösung mit etwa 10 μm bestimmt werden. Sicherlich kein besonders guter Wert, aber schon deutlich besser als bei Osziröhren deren Spotgröße bei einigen 100 μm liegt.

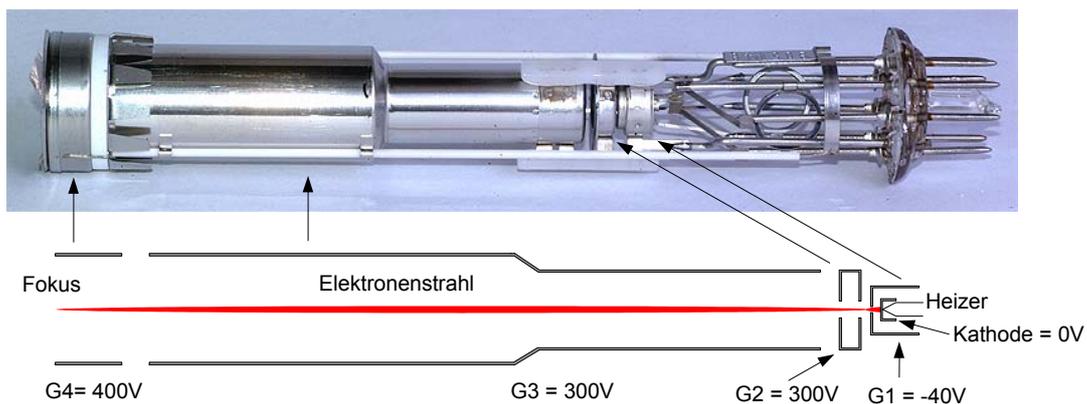


Abb. 94: Strahlengang und Potenziale in einem Vidikon

Bei den meisten Vidikonröhren wird die Fokussierung mit einer Magnetspule vorgenommen, es gibt aber auch Typen (z. B. XQ 1772) bei denen zu diesem Zweck eine elektrostatische Linse, wie bei Osziröhren, eingebaut ist.

		XQ 1032	XQ 1270	XQ 1272
		1 Zoll mag. Fokus	2/3 Zoll mag. Fokus	2/3 Zoll elektr. Fokus
Heizung	U_F / I_F	6,3 V / 95 mA	6,3 V / 110 mA	6,3 V / 95 mA
G1 Sperrspannung	U_{G1}	-60 V	-60 V	-60 V
G2 Beschl. Spannung	U_{G2}	300 V	300 V	300 V
G3 Spannung	U_{G3}	250 .. 300 V	300 V	300 V
G4 Fokusspannung	U_{G4}	-----	-----	35..55 V
G5 Feldnetzspannung	U_{G5}	Mit G3 verbund.	Mit G3 verbund.	500 V

Tab. 17: Betriebswerte verschiedener Vidikonröhren

Aus der Tabelle kann man ersehen, dass die Betriebswerte der verschiedenen Röhren nur wenig voneinander abweichen. So wird man auch Röhren mit unbekanntem Daten mit diesen Werten betreiben können.

So besorgt man sich bei Ebay eine Anzahl von Vidikons oder Plumbikons und die dazugehörige Ablenkeinheit. Oder man kauft gleich eine komplette Röhrenkamera, die man zerlegt.

Die Röhre wird direkt hinter dem Frontfenster mit der Diamantsäge aufgetrennt und sofort in das vorbereitete Flanschteil eingeklebt und mit Ballongas gespült.

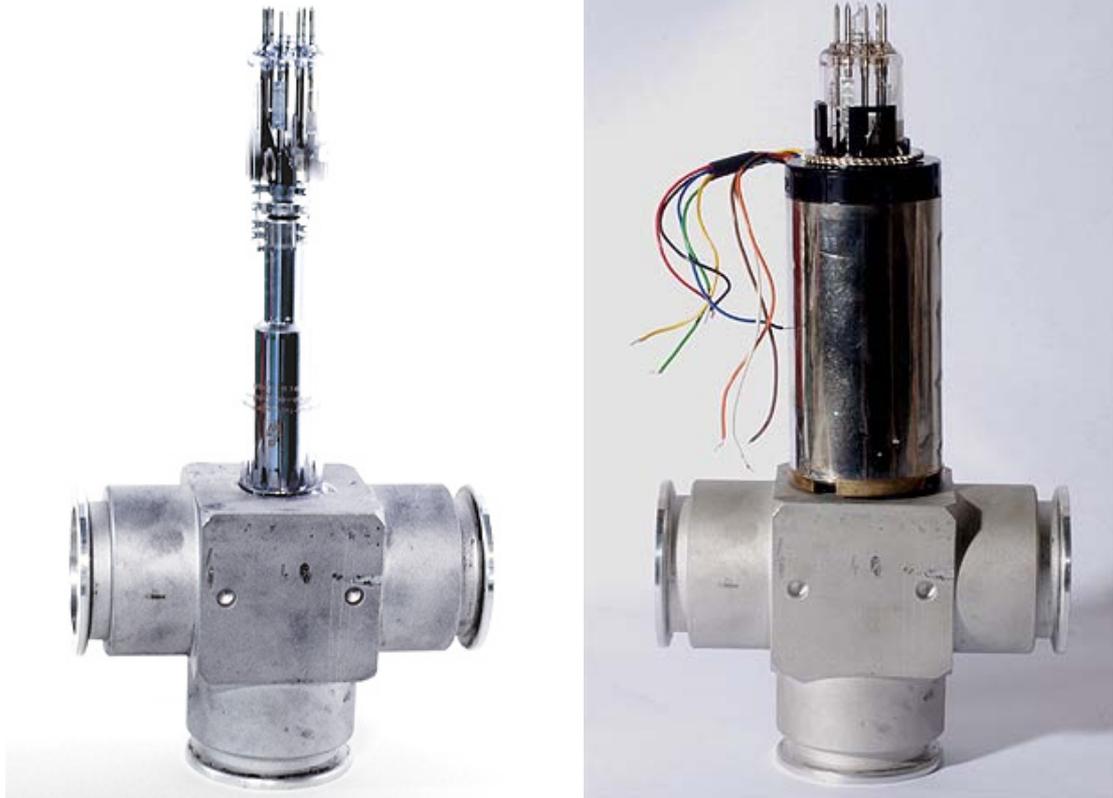


Abb. 95: Strahlengang und Potenziale in einem Vidikon

Die einzelnen Spannungen zum Betrieb der Röhre sind nicht besonders hoch und können mit einem einfachen Netzteil erzeugt werden. Da auch die Ströme klein sind, können die Teilspannungen über einfache Spannungsteiler eingestellt werden. Für den Betrieb mit geerdeter Probe ist es sinnvoll die Kathode hochzulegen.

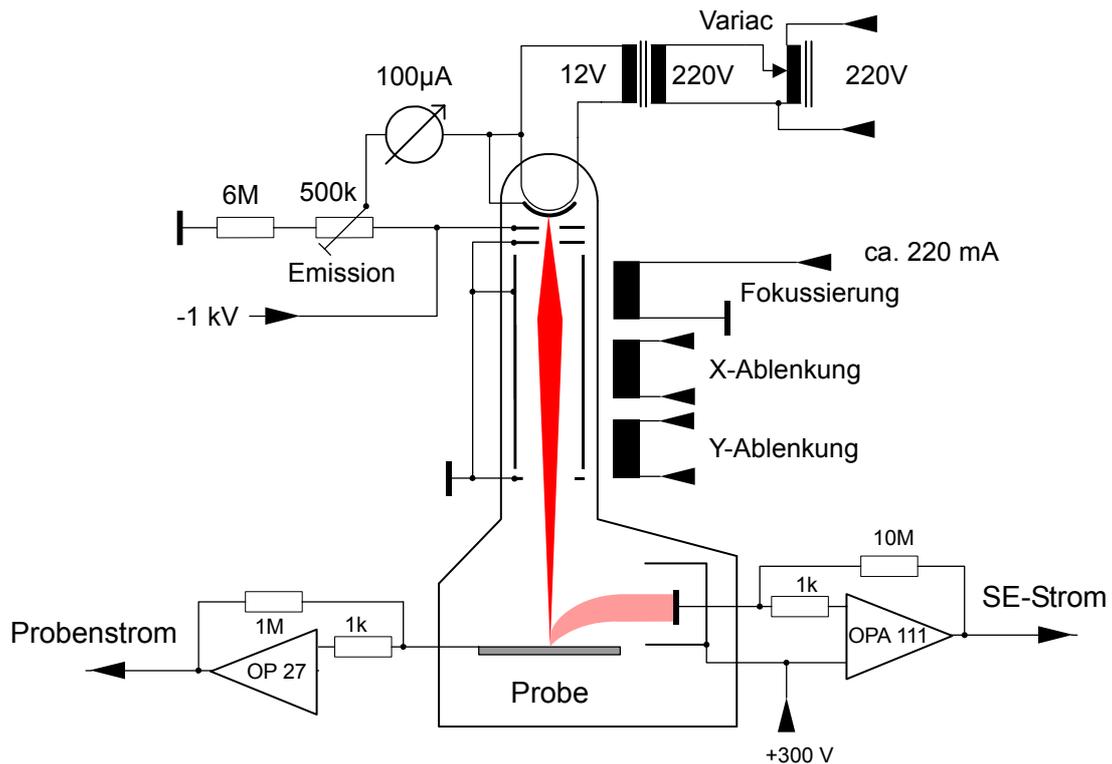


Abb. 96: Schaltung des Vidikon-Mikroskops

Die Kathode liegt auf einem Potenzial von -1 kV und die negative Vorspannung des ersten Gitters wird mit einem Spannungsteiler eingestellt. Zusammen mit der Heizspannung bestimmt diese Vorspannung den Emissionsstrom der Kathode. Für die folgenden Messungen wurde ein Emissionsstrom von 30 bis $50\ \mu\text{A}$ eingestellt. Alle übrigen Elektroden liegen auf Massepotenzial und haben gegenüber der Kathode eine Spannung von 1 kV .

2.7.4. Bilder vom Vidikon-Mikroskop

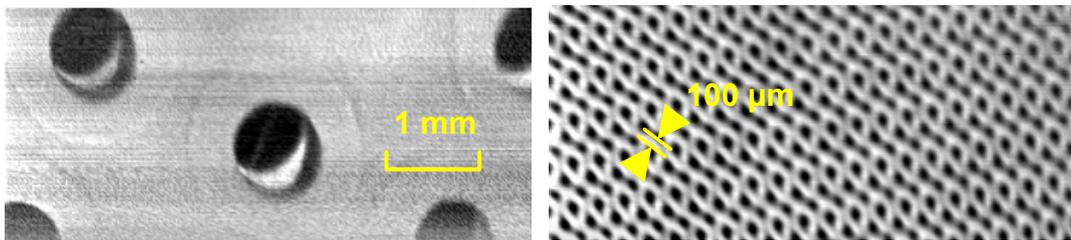


Abb. 97: Die ersten Bilder mit der Vidikonkanone

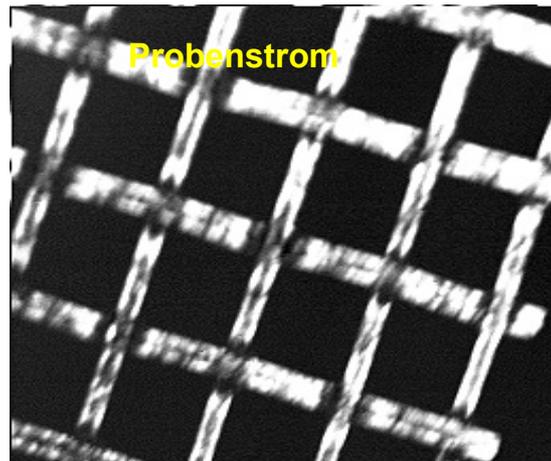
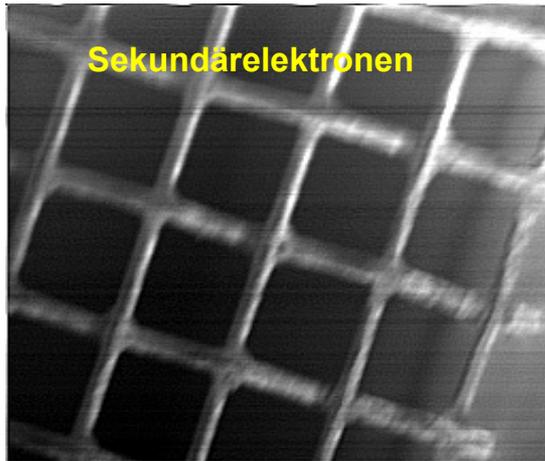
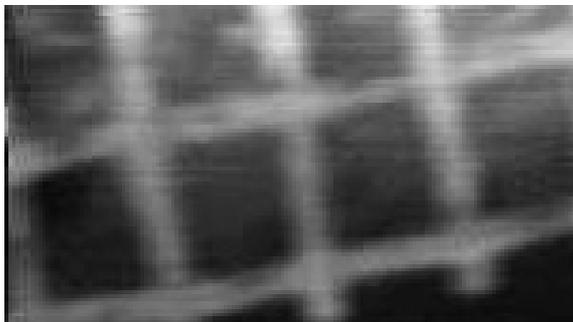
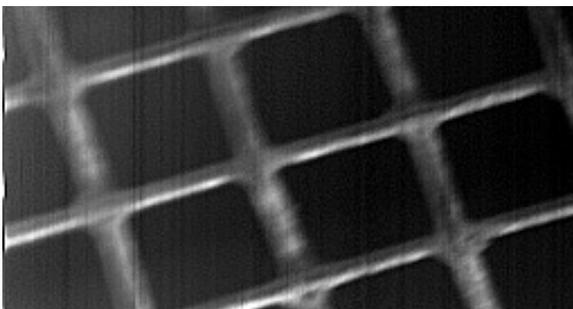


Abb. 98: Aufnahme des Testgitters



mit Elektronenkanone aus Oszi-Röhre



mit Elektronenkanone aus Vidikonröhre

Abb. 99: Vergleich zwischen Oszi-Röhre und Vidikon

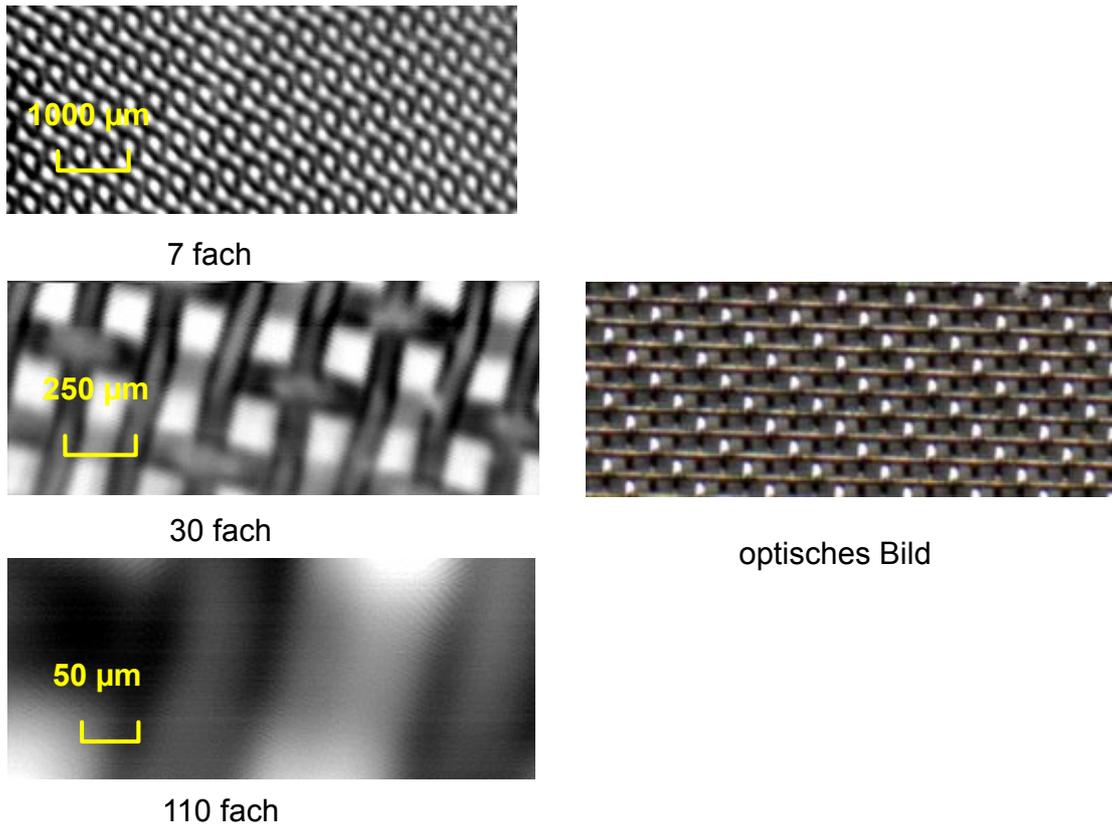


Abb. 100: Feines Gitter bei höherer Vergrößerung

Die Auflösung der Bilder liegt bei etwa 50 μm und ist schon deutlich besser als bei der Oszi-Röhre.

Eine noch etwas höhere Auflösung wurde mit einem 2/3 Inch Vidikon XQ 1072 mit elektrischer Fokussierung erreicht. Die Röhre wurde mit einer Gesamtspannung von 1300 V und einem Emissionsstrom von 10 μA betrieben. Bei einer genaueren Messung des Probenstroms wurde festgestellt, dass nicht wie erwartet der Primärstrom des Elektronenstrahls über den Probenanschluss abfließt, sondern im Gegenteil ein zur Probe fließender Strom messbar ist. Am Messwiderstand entsteht nicht das erwartete negative Signal, sondern ein positives.

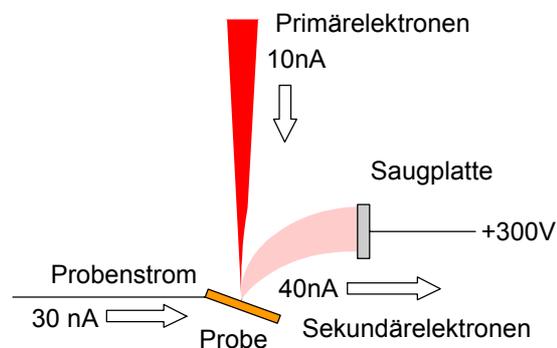


Abb. 101: Verteilung der Ströme im REM

Die Erklärung dieses Phänomens liegt im Mechanismus der Sekundäremission. Viele Materialien emittieren pro einfallendes Primärelektron mehrere Sekundärelektronen. Dieser Effekt wird bekanntlich beim Fotomultiplier technisch genutzt. Im Beispiel erzeugt ein Primärelektronenstrom von 10 nA einen Sekundärelektronenstrom von 40 nA. Demzufolge müssen die fehlenden 30 nA durch die Probenhalterung fließen. Der Vorteil dieser Anordnung ist, dass man den Isolationsverstärker einsparen kann, da der Probentisch auf dem normalen Massepotenzial liegt.

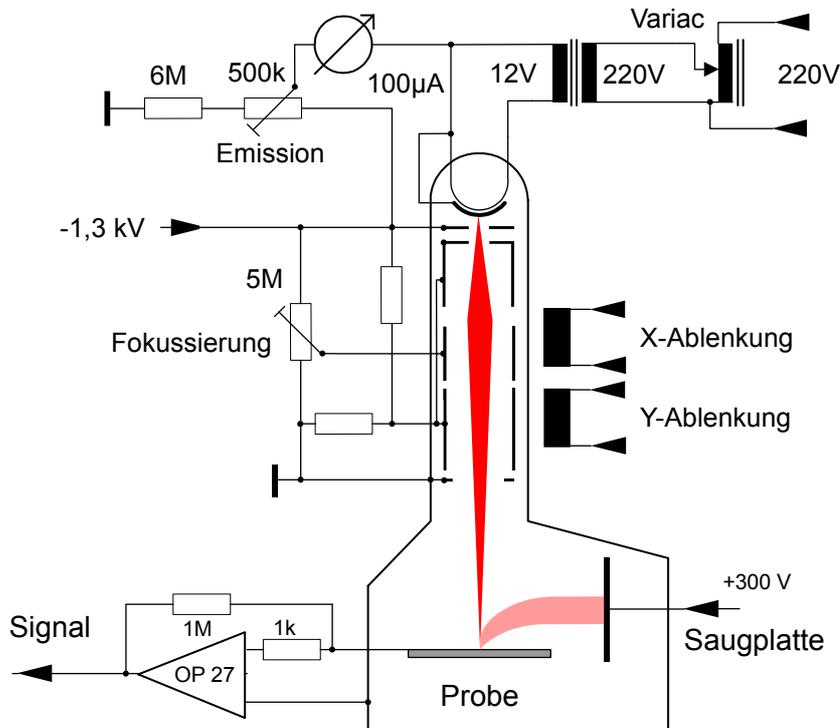


Abb. 102: Beschaltung des Mikroskops mit der XQ 1272 Röhre

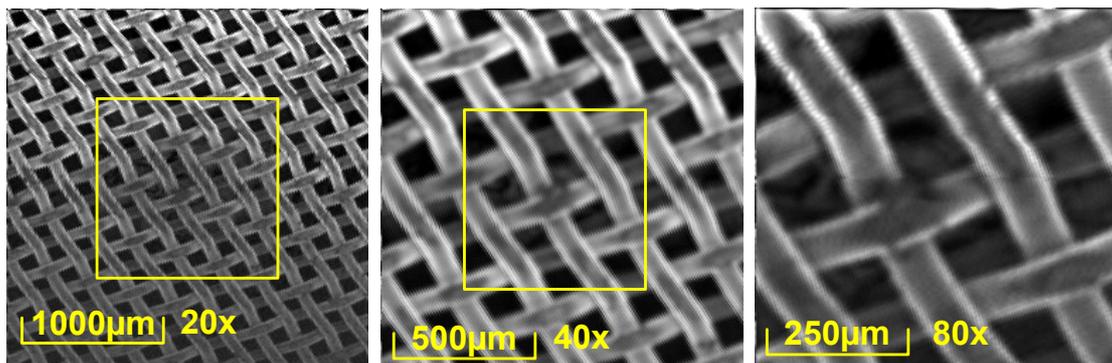


Abb. 103: Aufnahmen mit dem elektrisch fokussiertem Vidikon



Abb. 104: Blick in eine Armbanduhr und auf den Faden einer Glühlampe

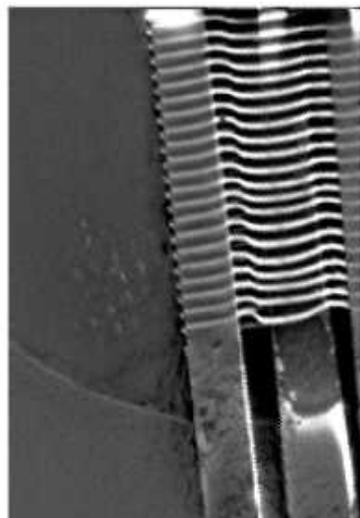
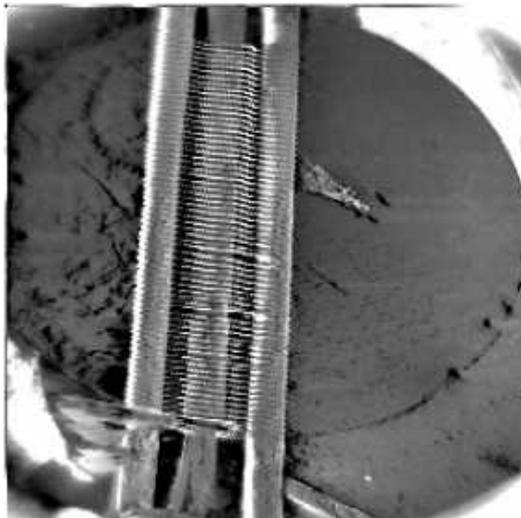


Abb. 105: Gitter-Kathoden-System einer EC 92 Röhre

Die folgende Aufnahme zeigt das Bild eines noch feineren, geätzten Gitters. Die Löcher im Gitter haben eine Fläche von $50 \times 50 \mu\text{m}$. Die Auflösung der Anordnung wird auf etwa 20 bis 30 μm geschätzt.

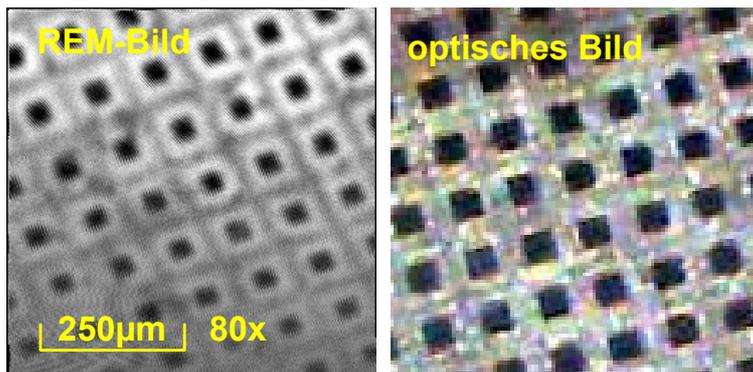


Abb. 106: Aufnahmen eines feinen Gitters

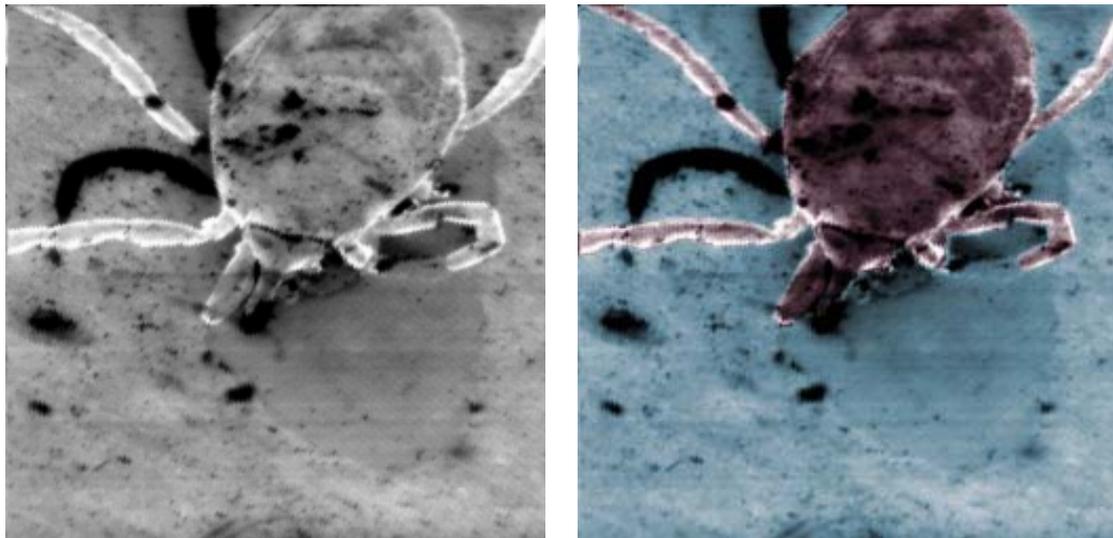


Abb. 107: Bild einer Zecke

Das rechte Bild wurde im Photoshop eingefärbt. Das hat natürlich nichts mehr mit der realen Messung zu tun sondern ist rein subjektiv und dient nur noch zu Befriedigung des Auges.

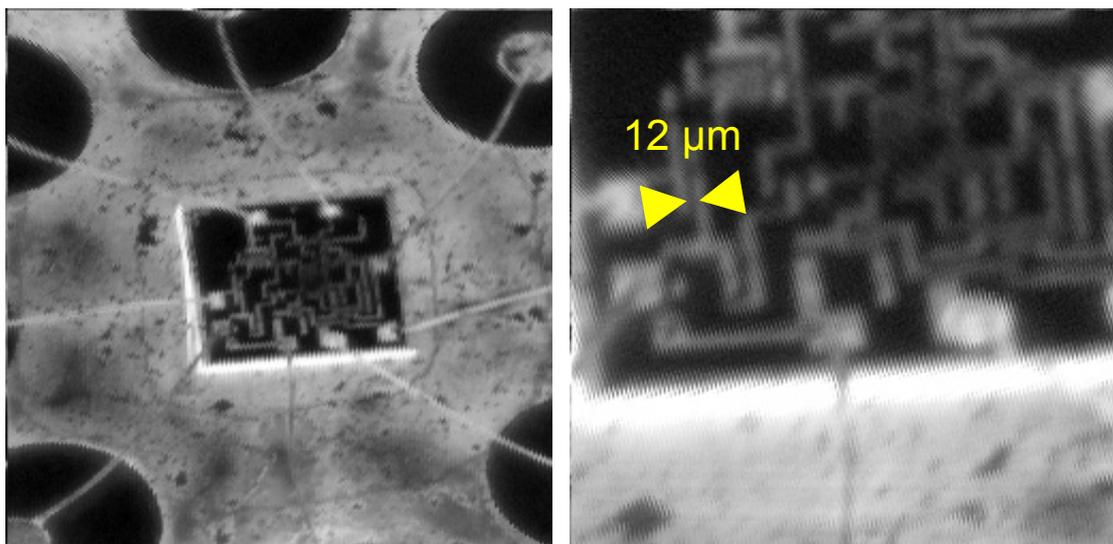


Abb. 108: Operationsverstärker

Das Bild des Operationsverstärkers bietet noch mal die Möglichkeit die Auflösung abzuschätzen. Der Abstand der beiden markierten Metallisierungsbahnen beträgt 12 Mikrometer. Da beide Bahnen gut zu trennen sind, dürfte die Auflösung noch etwas besser sein und bei 10 Mikrometer liegen. In den Datenblättern der verwendeten Röhre XQ 1272 wird eine Auflösung von > 500 Zeilen bei einer Rasterfläche von $6,6 \times 8,8 \text{ mm}^2$ angegeben. Daraus errechnet sich eine Spotgröße $< 13,2 \text{ }\mu\text{m}$.

Damit dürfte die optische Grenze des Geräts mit einstufiger Verkleinerung erreicht sein.

Interessant ist der Vergleich einer Aufnahme desselben Chips mit einem kommerziellen REM (Hitachi S-4000).

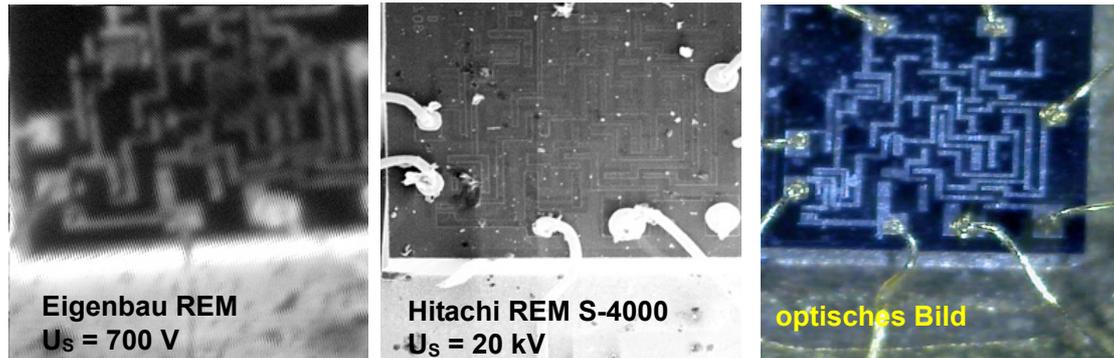


Abb. 109: Operationsverstärker

Neben der natürlich viel besseren Auflösung des 250.000 € Geräts fällt auf, dass die Leiterbahnen des ICs wenig zur Siliziumoberfläche kontrastieren. Wahrscheinlich liegt das an der viel höheren Elektronenenergie (20 kV) des kommerziellen Geräts gegenüber den 700V der Vidikonröhre. Der Materialkontrast hängt offenbar von der Elektronenenergie ab. Die 20 keV schnellen Elektronen können im Gegensatz zu den langsamen 700 eV Elektronen die Aluminiummetallisierung ohne Wechselwirkung durchdringen.

Man kann das Gerät sogar noch weiter vereinfachen und dabei sogar noch etwas an Auflösung gewinnen. Anstelle der seitlichen Saugplatte kann auch das Feldnetz des Vidikons zu diesem Zweck auf ein höheres Potenzial gelegt werden. Nun kann die Probe direkt vor dem Vidikon angebracht werden und der abgebildet Spot wird noch etwas kleiner.

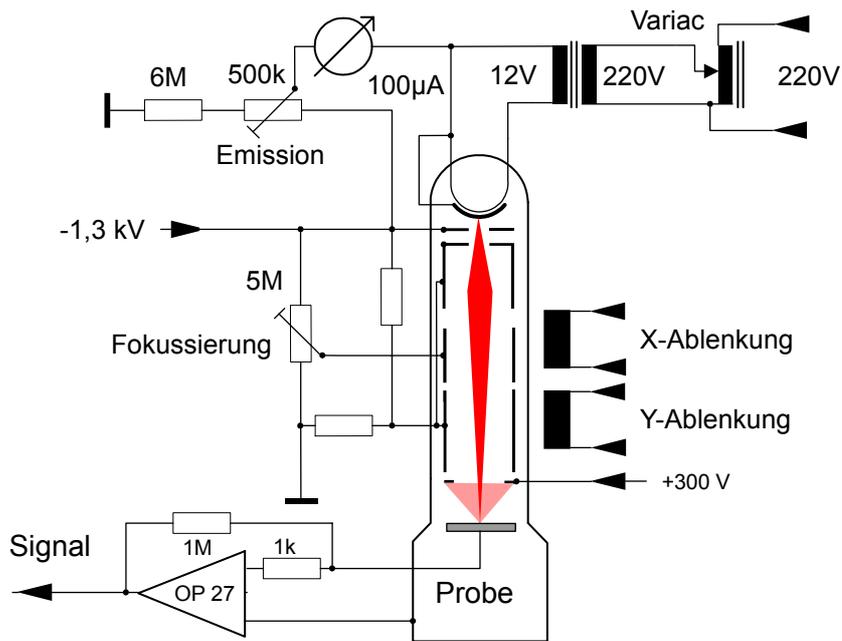


Abb. 110: Schaltung unter Verwendung des Feldnetzes als Saugelektrode

Wenn die Fokusspannung etwas verstellt wird, kann statt der Probe auch das Feldnetz selbst in Transmission abgebildet werden.

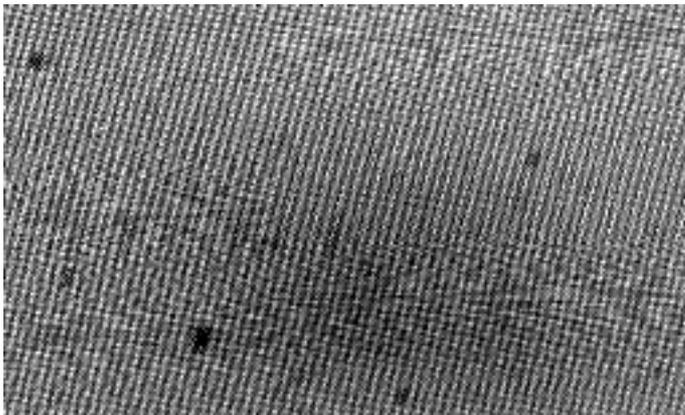


Abb. 111: Abbildung des Feldnetzes der Vidikonröhre

Mit der Abbildung des Feldnetzes ist die Grenze der Auflösung des einfachen Gerätes erreicht. In diesem Fall beträgt der Abbildungsmaßstab etwa 1:1. Die Blende vor der Kathode wird in gleicher Größe auf dem Feldnetz abgebildet, der Durchmesser des Elektronenstrahls ist somit so groß wie der Blendendurchmesser. Für einen kleineren Strahldurchmesser müsste entweder die Hauptebene der Linse weiter von der Quelle entfernt sein oder die Quelle einen kleineren Durchmesser haben. Beides ist konstruktiv nicht möglich.