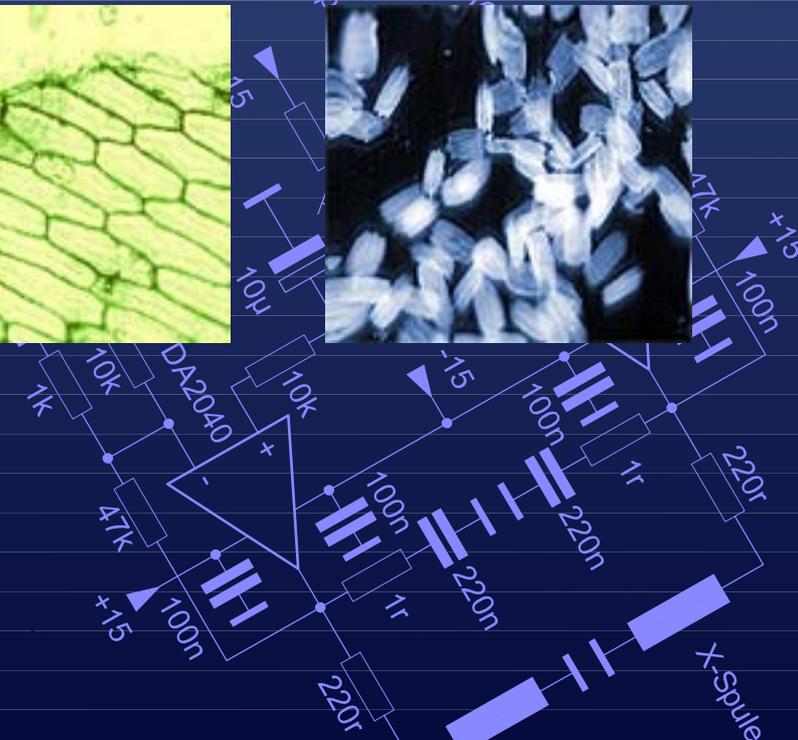
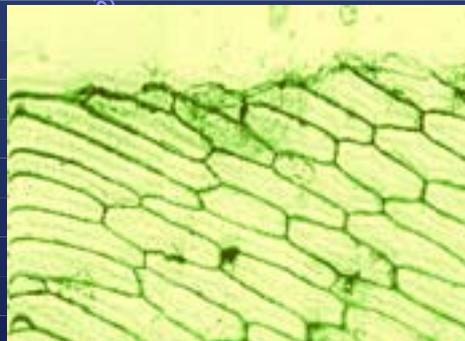
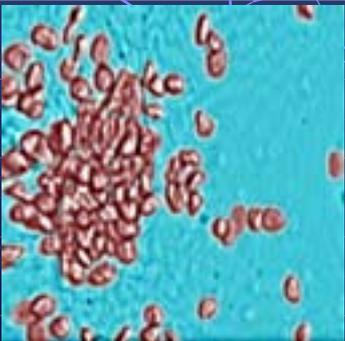
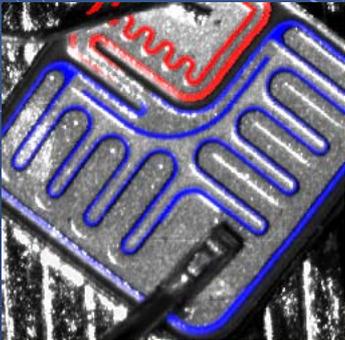
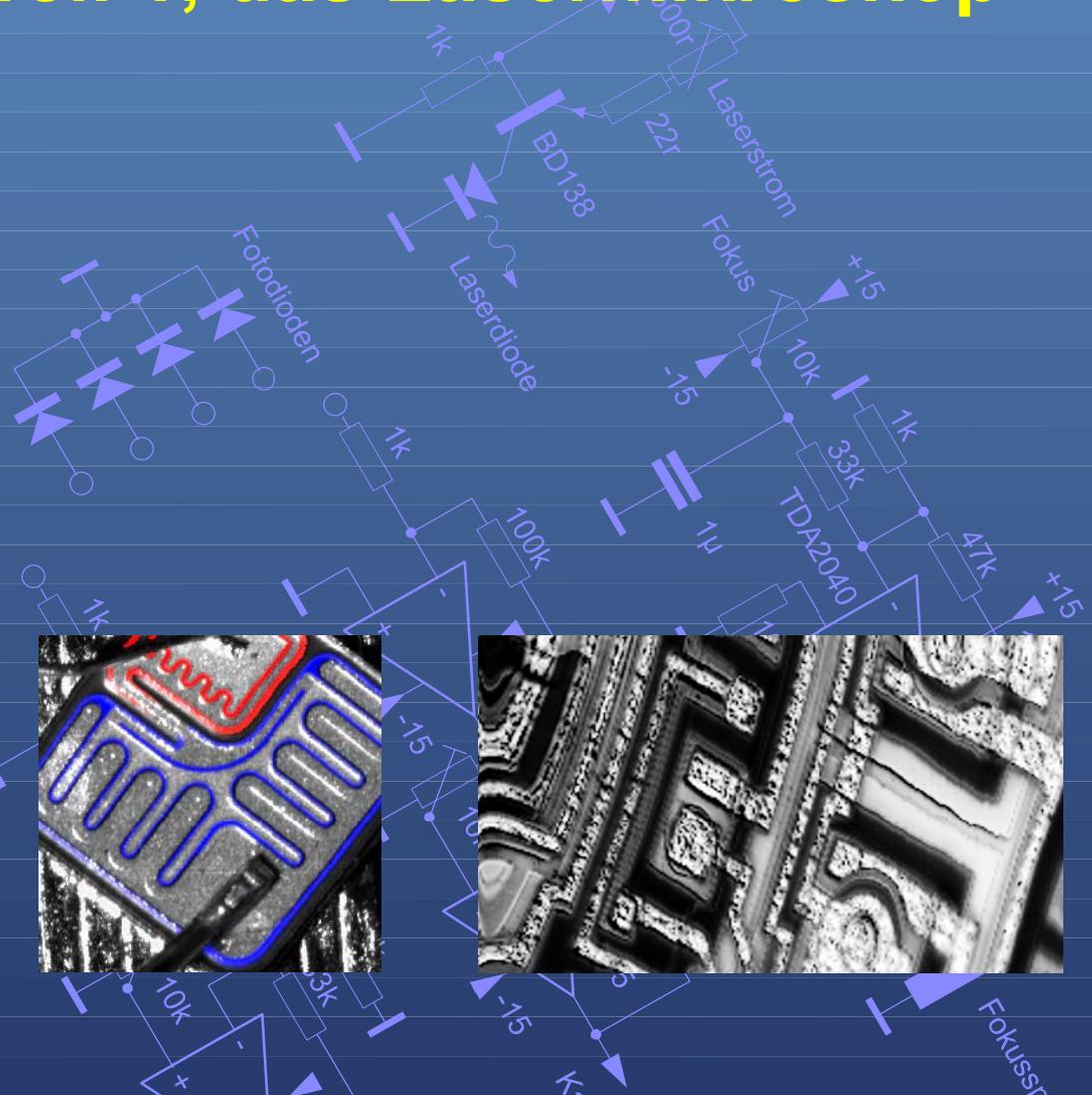


# Rastersonden-Mikroskope

## Grundlagen, Anwendung und Selbstbau

### Teil 1, das Lasermikroskop



<b>1. PRINZIPIEN.....</b>	<b>3</b>
1.1. ABBILDUNGSMÖGLICHKEITEN.....	4
1.2. KONFOKALES MIKROSKOP.....	7
<b>2. CD, DVD UND BLUERAY LESEKÖPFE.....</b>	<b>8</b>
2.1. CD-LESEKÖPFE.....	8
2.2. AUTOFOKUS .....	9
2.3. DVD-LESEKÖPFE .....	11
2.4. BLUERAY-LESEKÖPFE .....	12
2.5. DREIFARBEN-LASERDIODE .....	14
2.6. FOTODIODEN IN CD-LESEKÖPFEN .....	15
<b>3. SCANNERMECHANIKEN .....</b>	<b>17</b>
3.1. XY-SCANNER MIT LAUTSPRECHERN .....	17
<b>4. ELEKTRONIK FÜR SELBSTBAUMIKROSKEPE .....</b>	<b>20</b>
4.1. TREIBERSCHALTUNGEN FÜR LAUTSPRECHERSCANNER .....	20
4.2. FOKUSSPULENTREIBER UND LASERDIODEN VERSORGUNG .....	22
4.3. SIGNALAUFBEREITUNG .....	23
4.4. EINFACHES COMPUTER-INTERFACE .....	24
4.4.1. <i>Steuerprogramm</i> .....	26
<b>5. BETRIEB DES EIGENBAUMIKROSKOPS.....</b>	<b>28</b>
5.1. BILDER IM REFLEKTIERTEN LICHT.....	28
5.1.1. <i>Halbleiterchips</i> .....	28
5.1.2. <i>Autofokus</i> .....	32
5.2. DURCHLICHTAUFNAHMEN.....	33
5.2.1. <i>Pflanzenzellen</i> .....	34
5.2.2. <i>Rote Blutkörperchen</i> .....	35
5.3. POLARISATIONSMIKROSKOPIE.....	37
5.4. KERRMIKROSKOPIE .....	39
5.4.1. <i>MO-Leseköpfe</i> .....	41
5.5. DUNKELFELDAUFNAHMEN.....	42
5.6. INTERFERENZMIKROSKOPIE .....	44
5.7. OBIC-AUFNAHMEN .....	45
5.8. OBERFLÄCHENFOTOEFFEKT .....	49
5.9. THERMALWAVE MIKROSKOPIE .....	51
5.9.1. <i>Lockin-Verstärker</i> .....	52
5.10. NICHTLINEARE MIKROSKOPIE .....	56
<b>6. UNIVERSELLES INTERFACE .....</b>	<b>57</b>
6.1. DELPHI-BETRIEBS-SOFTWARE.....	64
<b>7. ANDERE SCANNERKONZEPTE .....</b>	<b>66</b>
7.1. X-Y-Z SCANNER MIT VIER LAUTSPRECHERN.....	66
7.2. SCANNER MIT ZWEI SCHRITTMOTOREN.....	69
7.2.1. <i>Schrittmotortreiber</i> .....	69
7.2.2. <i>Auf- und Durchlichtaufnahmen</i> .....	73
7.2.3. <i>Reliefaufnahmen</i> .....	75
7.2.4. <i>Polarisationsaufnahmen</i> .....	76
7.2.5. <i>Spektralaufnahmen</i> .....	77
7.3. SCANNER MIT MODELLBAUSERVOS .....	77
7.4. KREUZTISCH MIT SCHRITTMOTORANTRIEB.....	78
7.4.1. <i>Selbstbaukreuztisch mit Schrittmotorantrieb</i> .....	78
7.5. SCANNER AUS EINEM XY-SCHREIBER .....	81

## 1. Prinzipien



**Abb. 1: Zum Lasermikroskop umgebautes Forschungsmikroskop**

Auf den ersten Blick ist ein Lasermikroskop nicht unbedingt von einem normalen Mikroskop zu unterscheiden. Viele Lasermikroskope verwenden als Grundgerüst die Stative und Optiken üblicher Mikroskope.

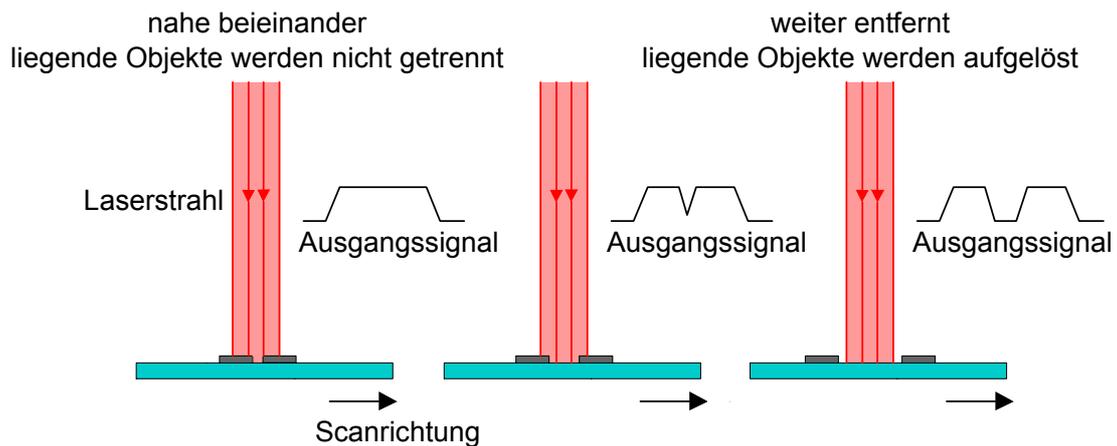
Im Gegensatz zu herkömmlichen Mikroskopen, bei denen ein Bild des Untersuchungsobjekts mit Linsensystemen stark vergrößert wird, verwendet ein Laser Mikroskop einen feinen Lichtstrahl zum Abtasten des Untersuchungsobjektes. Zur Aufnahme eines Bildes wird der Lichtstrahl rasterförmig über das Untersuchungsobjekt bewegt. An jedem Rasterpunkt wird das vom Objekt reflektierte, durchgelassene oder sonst wie beeinflusste Licht gemessen. Diese Messdaten bestimmen den Grauwert des entsprechenden Pixels des aufgezeichneten Bildes.

Zur Erzeugung des feinen Lichtpunktes wird meist ein Laser verwendet, daher der Name des Gerätes. Allerdings ist die Verwendung eines Lasers nicht zwingend notwendig, in manchen Fällen ist die hohe Kohärenz eines Laserstrahls sogar unerwünscht, weil durch sie leicht störende Interferenzen auftreten. Auch mit einer konventionellen Lichtquelle wie eine Glühlampe oder eine LED lassen sich durch geeignete optische Systeme scharfe Lichtpunkte erzeugen.

Die Vergrößerung des Mikroskops ist durch das Verhältnis der abgerasterten Fläche zur Fläche des Bildes bestimmt. Scant man mit einem Raster von  $1 \times 1 \text{ mm}$  und hat das Bild auf dem Bildschirm eine Kantenlänge von  $10 \text{ cm}$ , entspricht das einer Vergrößerung von  $100 \text{ mm} / 1 = 100\text{fach}$ . Bei einer Scan-Weite von  $0,1 \text{ mm}$  wäre die Vergrößerung schon  $1000\text{fach}$ , und damit fast an der Grenze der Lichtmikroskopie.

Nun macht es aber wenig Sinn die Vergrößerung weiter zu steigern, da sich zwei Objekte in kleinem Abstand nur unterscheiden lassen, wenn der Durchmesser des abtastenden Lichtstrahls nicht größer ist, als dieser Abstand.

Theoretisch kann ein Laserstrahl auf ein Viertel seiner Wellenlänge fokussiert werden, d. h. bei infrarotem Licht von  $780 \text{ nm}$  auf einen Fleck von  $195 \text{ nm}$ , in der Praxis wird dieser Wert aber durch die immer vorhandenen Linsenfehler kaum erreicht. Für das hier beschriebene Selbstbauprojekt liegt die Auflösung bei etwa einem Mikrometer.



**Abb. 2: Der Durchmesser des Laserstrahls bestimmt die erreichbare Auflösung**

Für die Rasterung der Probe können verschiedene Techniken zur Anwendung kommen, z. B. kann die Probe in X- und Y Richtung unter dem Laserstrahl verschoben werden. Ebenso kann auch der Strahl abgelenkt werden und auf diese Weise die Probe abtasten. Beide Vorgehensweisen haben ihre Vor- und Nachteile. Wird die Probe verschoben, geschieht das mit mechanischen Mitteln, wie Schrittmotoren, Piezoverstellern oder Magnetspulen. Da hierbei größere Massen zu bewegen sind, kann die Verschiebung nur langsam erfolgen. Im Gegensatz zu einem üblichen Mikroskop braucht die Bildentstehung beim Rastermikroskop, deshalb eine bestimmte Zeit. Werden für die Abtastung einer Zeile z. B. 10 Sekunden benötigt, braucht die Messung des gesamten Bildes bei einem üblichen Raster von 256 x 256 Bildpunkten immerhin 42 Minuten. Selbstverständlich können bei diesen Aufnahmezeiten keine beweglichen Objekte untersucht werden.

Eine Ablenkung des Laserstrahls hingegen kann mit rein elektronischen Mitteln, wie ultraschall- oder elektrooptischen Zellen nahezu trägheitslos erfolgen, sodass kürzere Aufnahmezeiten möglich werden. Selbst eine elektromechanische Ablenkung des Laserstrahls mit Kipp- und Drehspiegeln kann schnell sein, da in diesem Fall nur kleine Massen (die der Spiegel) bewegt werden müssen. Trotz dieser Vorteile arbeiten Lasermikroskope dagegen oft mit der ersten Methode und bewegen zur Abtastung die Probe. Der Grund dafür liegt in der einfacheren Optik.

Um eine hohe Auflösung zu erreichen, muss der Laserstrahl in einem möglichst kleinen Fleck auf die Probe fokussiert werden. Nach den Gesetzen der Optik sind dazu kurz brennweitige Objektive erforderlich, die sich in geringem Abstand der Probe befinden. Wegen des geringen Abstandes ist an dieser Stelle im Strahlengang kein Platz für die Ablenkspiegel, die sich deshalb hinter dem Objektiv befinden. Der begrenzte Öffnungsdurchmesser des Objektivs erlaubt aber nur kleine Ablenkwinkel und somit kleine Rasterflächen. Nachteilig ist auch das in diesem Fall der Strahl nicht immer in der optischen Achse verläuft, und sich so Unvollkommenheiten der Linsen stärker auswirken.

### 1.1. Abbildungsmöglichkeiten

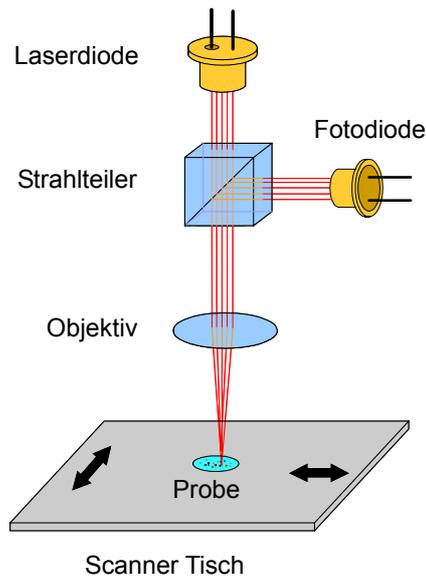
Trotz dieser Beschränkung gestattet das Laser Scanning Mikroskop die Aufnahme von Bildern, die mit einem üblichen Mikroskop nicht zu erhalten sind. Zu den in der normalen Mikroskopie gebräuchlichen Abbildungsmöglichkeiten wie Durchlicht, Auflicht, Dunkelfeld und Polarisation kommen noch spezielle Techniken, wie konfokale Mikroskopie, Höhenprofilmessungen, OBIC (optical beam induced contrast), Thermalwave Mikroskopie und nichtlineare Mikroskopie hinzu.

In der folgenden Liste sind einige der modernen Techniken die mit dem Rastermikroskop möglich sind aufgeführt.

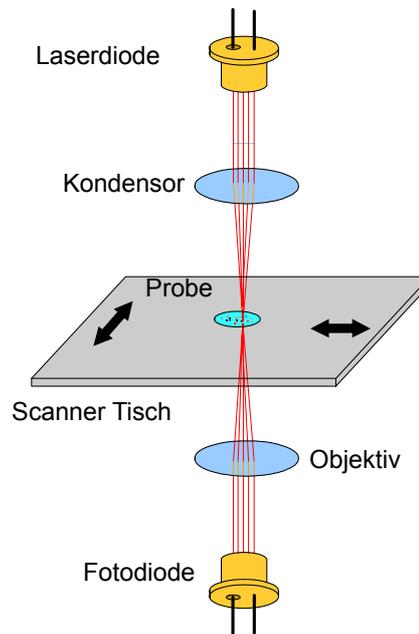
Auflicht-Mikroskopie	Von der Probe reflektiertes Licht
Durchlicht-Mikroskopie	Durch die Probe absorbiertes Licht
Dunkelfeld-Mikroskopie (Auf- und Durchlicht )	Von der Probe gestreutes Licht
Fluoreszenz-Mikroskopie (Auf- und Durchlicht)	In der Probe angeregte Fluoreszenzstrahlung
Polarisation (Auf- und Durchlicht)	Im Polarisationszustand verändertes Licht
Interferenz (Auf- und Durchlicht)	Durch die Probe verursachte Interferenzen
Konfokale (Auf- und Durchlicht)	Höhendifferenzierung der Probenoberfläche
OBIC	Durch das Licht erzeugte Ladungsträger
Magnetooptische Mikroskopie	Durch Magnetfelder geänderte Polarisation
Thermalwave-Mikroskopie	Durch Licht angeregte thermische Wellen
Fotoakustische Mikroskopie	Durch das Licht angeregte akustische Wellen
Nichtlineare Mikroskopie	In der Probe erzeugte harmonische Strahlung
Raman-Mikroskopie	In der Probe erzeugte Ramanstrahlung

Einige Techniken können auch in zeitaufgelöster Form verwendet werden. So kann z. B. die Fluoreszenzanregung mit Lichtpulsen erfolgen. Die Abklingdauer des Fluoreszenzlichtes enthält zusätzliche Informationen über den Zustand der Probe. Vor allem in der Halbleiterindustrie findet das Laser Scanning Mikroskop weite Verwendung zur Charakterisierung der Bauelemente in den verschiedenen Stadien der Herstellung.

### Reflektions /Auflicht Mikroskop



### Transmissions /Durchlicht Mikroskop



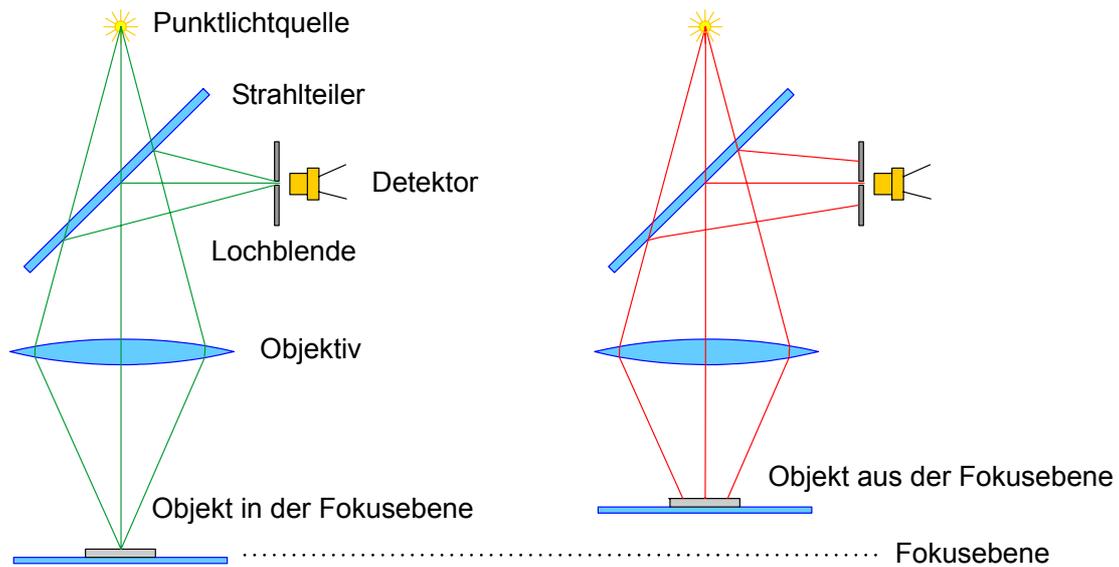
**Abb. 3: Die zwei Grundtypen des Laser Scanning Mikroskops**

Die Grafik zeigt die beiden Grundtypen des Lasermikroskops. Bei Reflektionsmikroskop wird der Strahl eines Lasers nach einem Strahlteiler mit einer Objektivlinse auf die Probe fokussiert. Das von der Probe reflektiertes Licht wird vom Strahlteiler auf die Fotodiode gespiegelt. Durch den verschiebbaren Scanner-Tisch werden nacheinander alle Punkte auf der Probe mit dem Laserstrahl abgetastet und mit der Fotodiode die reflektierten Intensitäten gemessen. Aus diesen Messwerten wird dann das Bild aufgebaut.

Ähnlich arbeitet das Transmissionsmikroskop. Auch hier wird der Laserstrahl mit einer Linse auf die Probe fokussiert. Das durch die Probe gegangene Licht wird mit einer Objektivlinse auf die Fotodiode konzentriert.

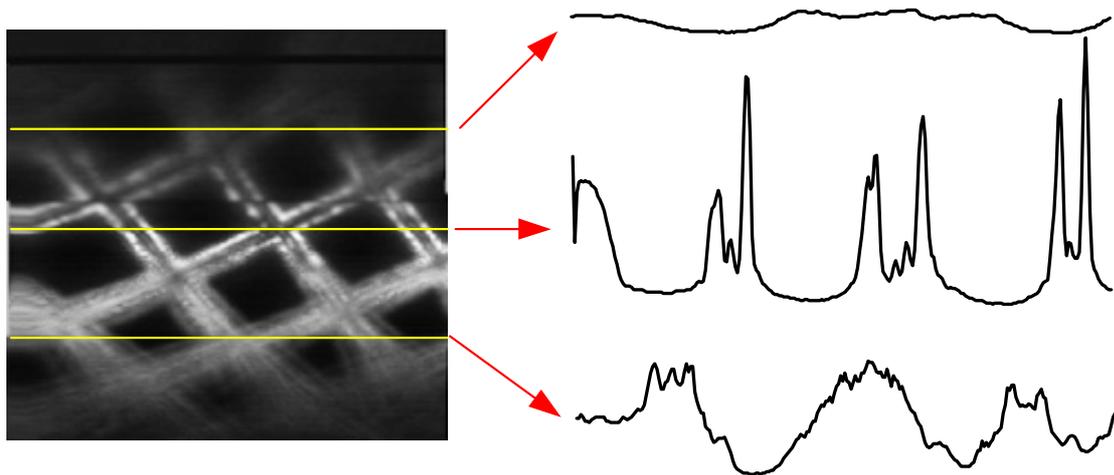
Einen etwas anderen Strahlengang besitzt das konfokale Mikroskop. Das konfokale Mikroskop kann in Reflektions- oder in Transmissionsmodus arbeiten. Die folgende Grafik zeigt den Strahlengang der Reflektionsausführung.

## 1.2. Konfokales Mikroskop



**Abb. 4: Strahlengang des konfokalen Reflektionsmikroskops**

Die Besonderheit des konfokalen Mikroskops ist, dass eine sehr kleine Lichtquelle und eine sehr kleine Fotodiode, oder eine Diode mit vorgesetzter Lochblende, verwendet wird. Durch diese Anordnung wird erreicht, dass nur bei exakt eingestelltem Fokus viel Licht auf die Fotodiode fällt, wie der grüne Strahlengang im obigen Bild zeigt. Bei defokussiertem System (roter Strahlengang) verteilt sich das Licht an der Fotodiode auf eine große Fläche und trägt wenig zum Signal bei. Ein defokussiertes Bild wird deshalb im konfokalen Mikroskop viel dunkler ausfallen als ein richtig eingestelltes.



**Abb. 5: Abbildung eines Gitters im konfokalen Strahlengang**

Für das obige Bild eines Gitters wurde mit der Verschiebung der Y-Achse auch die Fokuseinstellung verändert. Nur bei korrekter Fokuseinstellung, etwa auf halber Höhe des Bildes, werden Gitterstäbe scharf und hell wiedergegeben. Der Linienscan auf der rechten Seite zeigt deutlich den Anstieg der Ausgangsspannung und der Anstieg des Kontrastes im Fokuspunkt. Im idealen konfokalen Mikroskop sollte der Abfall des Signals auf beiden Seiten des Fokuspunktes steil und symmetrisch sein.

In diesem Beispiel ist das nicht der Fall, was auf die Optik im CD-Lesekopf zurückzuführen ist.

Macht man mehrere Aufnahmen mit verschiedenen Fokuseinstellungen und addiert die erhaltenen Bilder, so tragen die falsch eingestellten unscharfen und dunklen Bilder wenig zum Gesamtbild bei und man erhält als Ergebnis ein scharfes, kontrastreiches Bild mit großer Schärfentiefe. Diese Eigenschaft ist nur dem konfokalen Rastermikroskop zu eigen und wird von keinem herkömmlichen Mikroskop erreicht, egal wie aufwendig und teuer die Optik des Gerätes gebaut ist.

Auch eine Höhenprofilmessung ist mit dieser Technik möglich. Dazu wird nur die Fokussierung verstellt, bis am Detektor ein maximales Signal auftritt. Aus der, dazu notwendigen Verschiebung, lässt sich leicht die Höhe des gemessenen Objektes bestimmen. Zeichnet man die gemachten Fokuseinstellungen während eines Linienscans auf, erhält man das gewünschte Höhenprofil.

## 2. CD, DVD und Blu-ray Leseköpfe

### Optische Speichergeräte sind Lasermikroskope !!!

Geräte zum Auslesen optischer Speichermedien sind im Grunde Lasermikroskope im Reflektionsmodus. Deshalb liegt es nahe zum Bau eines solchen Mikroskops auf diese leicht erhältlichen Teile zu zugreifen. Die optische Auflösung dieser Geräte ist enorm und erreicht Werte im Submikrometer-Bereich.

System	Wellenlänge	Spurabstand	Pitlänge	Theor. Auflösung
CD	780 nm	1600 nm	800 nm	195 nm
DVD	660 nm	740 nm	400 nm	165 nm
Blue Ray	405 nm	320 nm	105 nm	101 nm

**Tab1: Wellenlängen und Auflösungsgrenzen der verschiedenen Speichermedien**

Weshalb man diese Teile für relativ wenig Geld bekommt, während schon das Objektiv eines vergleichbaren Mikroskops mehrere Tausend Euro kostet, hat einige Gründe. Zum einen ist das natürlich die günstige Massenproduktion der optischen Speichergeräte, zum anderen liegt es an der Art der Abbildung. Während das Objektiv eines herkömmlichen Mikroskops ein großes Bildfeld scharf abbilden muss, reicht beim Laser Scanning Mikroskop die gute Fokussierung achsennaher Strahlen, was den optischen Aufwand sehr verringert. Zudem kann die Linsenkorrektur auf eine Wellenlänge beschränkt sein, was die Verwendung einfacher, gepresster Kunststofflinsen erlaubt, während hochwertige Mikroskopobjektive aus bis zu zwanzig Linsen verschiedener Glassorten bestehen.

### 2.1. CD-Leseköpfe

Der prinzipielle Strahlengang eines CD-Lesekopfes ist in der folgenden Abbildung zu sehen. Das Licht der Laserdiode wird über einen Strahlteiler durch das Objektiv auf die reflektierende Schicht der CD fokussiert. Das von der CD reflektierte Licht gelangt über das Objektiv zurück zum Strahlteiler und wird von dort auf die Fotodiode gelenkt. Je nachdem wie viel Licht von der CD reflektiert wird, erzeugt die Fotodiode mehr oder weniger Strom und gibt so die Verhältnisse auf der CD-Oberfläche wieder. So werden die Daten auf der CD, die unterschiedlich reflektierenden Punkten auf der Oberfläche entsprechen, wieder gewonnen.

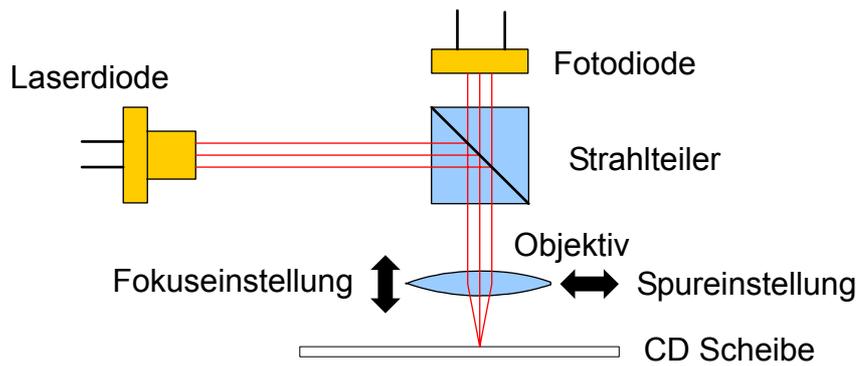


Abb. 6: Vereinfachter Strahlengang in einem CD-Lesekopf

## 2.2. Autofokus

Soweit das Prinzip, ein realer Lesekopf ist aber deutlich komplizierter aufgebaut. Es ist leicht einzusehen, dass für eine hohe Datendichte das Objektiv immer optimal fokussiert sein muss, das heißt, dass der Abstand zwischen Objektiv und CD auf einige tausendstel Millimeter konstant gehalten werden. Der mechanische Aufbau eines CD-Players müsste sehr stabil und dementsprechend schwer und teuer sein, um diese Forderung zu erreichen. Deshalb haben schlaue Ingenieure eine Fokussierautomatik eingebaut, die den Abstand, unabhängig von mechanischen Ungenauigkeiten, immer konstant hält. Wie schon oben beschrieben, enthält das Signal des reflektierten Lichtes im konfokalen Strahlengang die Information des Fokussierzustandes. Die Höhe des Signals wird maximal, wenn sich das System im Fokus befindet. Für die folgende Grafik wurde der Abstand des Objekts vor der Objektivlinse in kleinsten Schritten verschoben und das Ausgangssignal der Fotodiode gemessen.

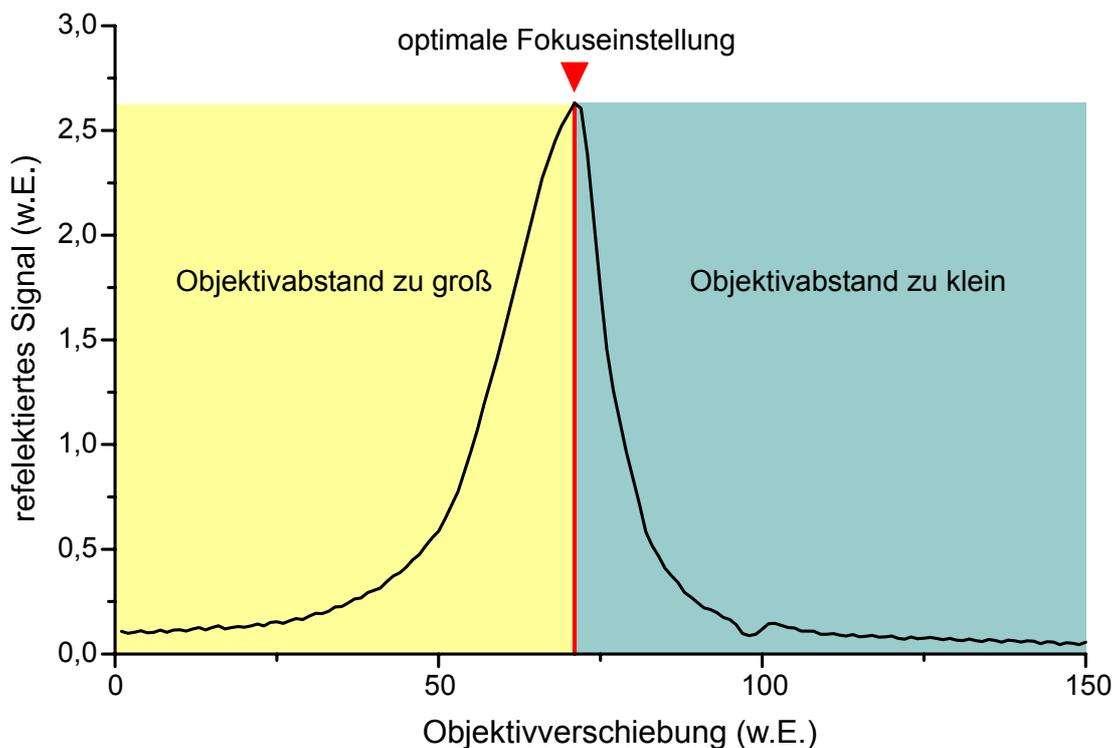
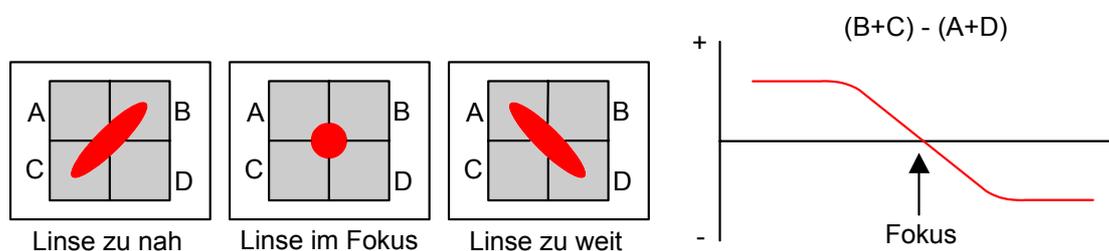


Abb. 7: Das Ausgangssignal in Abhängigkeit vom Fokussierzustand

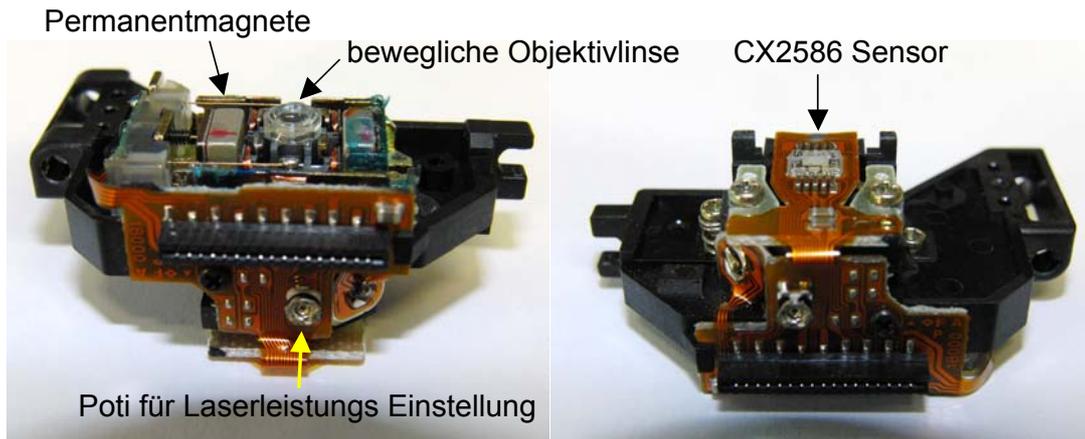
Allerdings ist diese Information nicht eindeutig. Man erhält ein niedrigeres Signal, wenn die Linse zu nah am Objekt und auch wenn sie zu weit entfernt ist. Das heißt, die Regelung kann nur den optimalen Punkt feststellen nicht die Richtung einer etwaigen Abweichung.

Um diesen Missstand zu beseitigen, können verschiedene Verfahren eingesetzt werden. Meist wird in den Strahlengang eine schwache Zylinderlinse eingefügt. Durch die so erzeugte stigmatische Abbildung wird erreicht, dass der Spot des reflektierten Lichtes außerhalb des Fokuspunktes nicht mehr kreisförmig ist, sondern zu einer Ellipse verzerrt wird, deren Achsen vor und hinter dem Fokus unterschiedliche Orientierungen aufweisen. Auf diese Weise kann zwischen zu nahem und zu weitem Abstand unterschieden werden. Zur Auswertung bedient man sich der Signale von vier Fotodioden. Durch eine geschickte Kombination der Signale erhält man eine eindeutige Zuordnung zwischen dem Ausgangssignal und dem Fokuszustand. Durch die Regelung wird die mit einer Spule verstellbare Objektivlinse so eingestellt, dass das Ausgangssignal im Nulldurchgang und somit der Strahlengang optimal fokussiert bleiben.



**Abb. 8: Die Funktion der Fokuskontrolle**

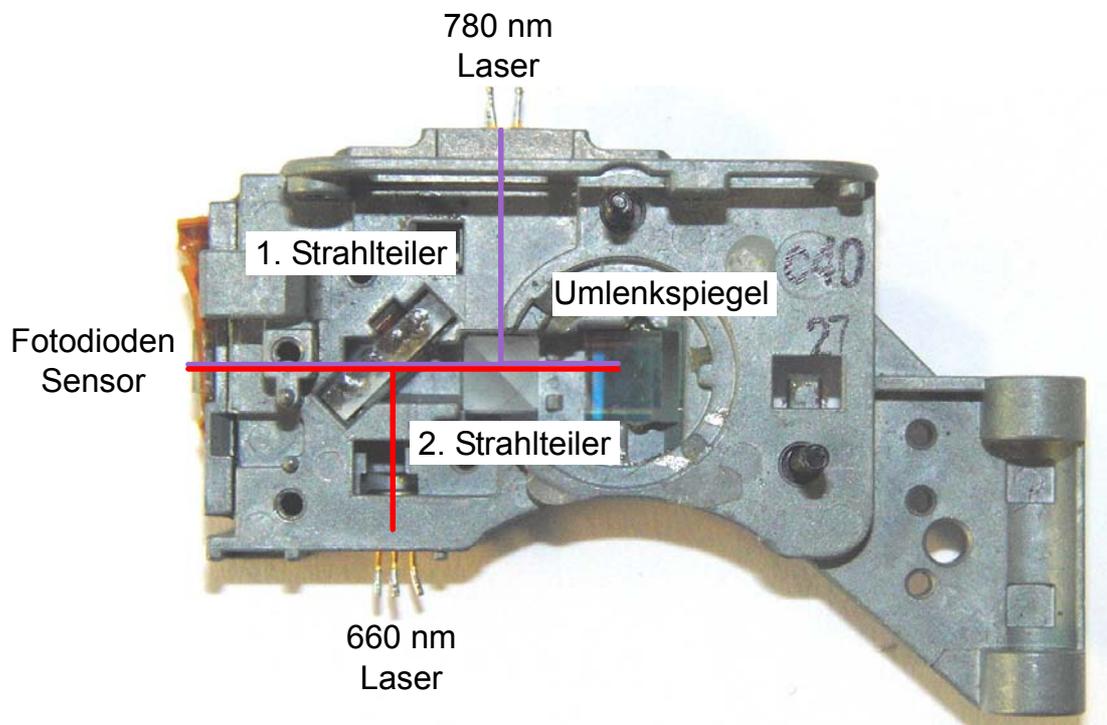
Eine weitere Regelung stellt die Spurlage ein. Da die Datenspur auf der CD spiralförmig angelegt ist, muss der Lesekopf über den Radius der CD verschiebbar sein, um alle Spuren auslesen zu können. Auch hier wären die Anforderungen an die Positioniergenauigkeit sehr hoch, würde nicht eine elektronische Regelung verwendet. Zu diesem Zweck ist das Objektiv durch eine zweite Spule auch lateral verschiebbar. Zur Messung der Spurlage wird der Laserstrahl durch ein Beugungsgitter in drei Einzelstrahlen aufgespalten. Neben dem Hauptstrahl in der Mitte, der zur eigentlichen Informationsgewinnung dient, treffen zwei Hilfsstrahlen links und rechts von der Spur auf die Disk. Diese reflektierten Hilfsstrahlen werden von zwei weiteren Dioden detektiert. Nur wenn die Signale der beiden Dioden gleich groß sind, befindet sich der Hauptstrahl genau auf der Spur. Die Spurlagedioden liegen links und rechts der Quadrantendiode und geben ein Signal bei entsprechender Abweichung der Spur. Alle sechs Fotodioden befinden sich auf einem Chip in einem gemeinsamen Gehäuse. Eine der Schwierigkeiten, beim Bau eines Laser Scanning Mikroskops, besteht im Herausfinden der richtigen Anschlüsse der Fotodioden.



**Abb. 9: CD-Lesekopf aus einem älteren Laufwerk**

### 2.3. DVD-Leseköpfe

Die Verhältnisse bei einem DVD-Lesekopf sind noch verwickelter. Da ein DVD-Laufwerk auch CDs lesen können muss, sind im Lesekopf zwei Laser eingebaut. Ein 780 nm Laser für den CD- und ein 660 nm Laser für den DVD-Betrieb. Prinzipiell könnte man wohl eine CD-ROM auch mit einem 660 nm Laser auslesen. Aber bei wieder beschreibbaren Medien ist die Reflektionsschicht für eine bestimmte Wellenlänge optimiert. Das Fotodiodenarray des Detektors kann aber für beide Strahlengänge verwendet werden.

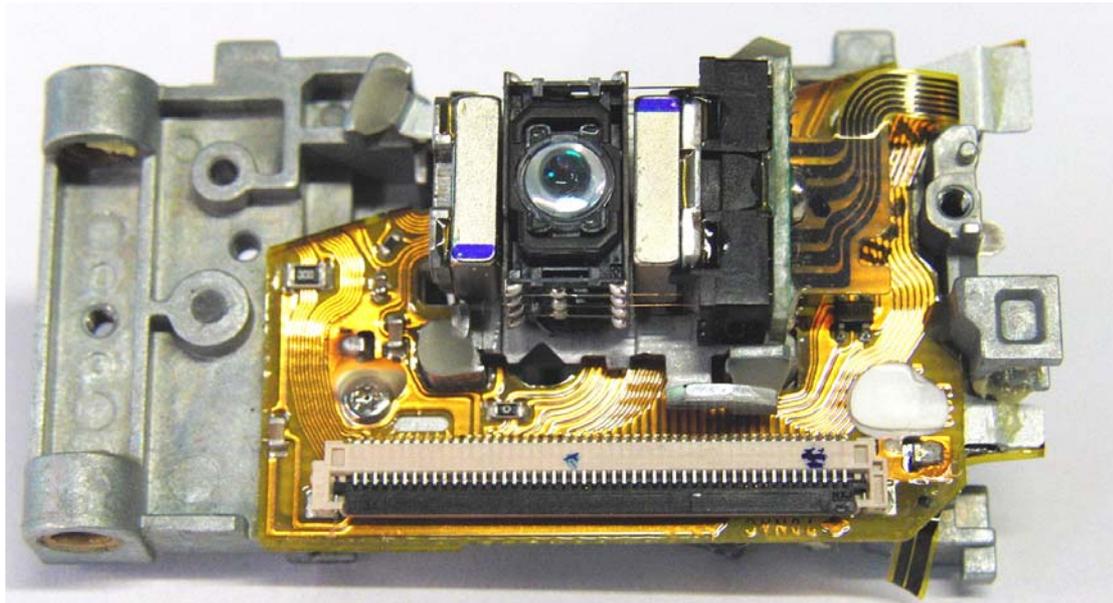


**Abb. 10: Strahlengang in einem älteren DVD-Lesekopf**

An einem teilweise demontierten DVD-Kopf kann man den Strahlengang gut erkennen. Beide Laserstrahlen werden über Strahlteiler zu einem Strahl

zusammengefasst und über den Umlenkspiegel auf die (nicht mehr vorhandene) Objektivlinse gerichtet. Nach der Reflektion auf der Speicherscheibe geht der Lichtstrahl wieder durch das Objektiv über den Umlenkspiegel zu dem Fotodiodenarray.

Obwohl es wegen der besseren Auflösung und der Wahl der verschiedenen Wellenlängen wünschenswert wäre, einen DVD-Kopf zu verwenden, scheitert das meist an praktischen Gründen. Während der abgebildete alte CD-Kopf nur 18 Anschlüsse aufweist, die leicht zuzuordnen sind, besitzt der moderne DVD-Kopf eine Steckerleiste mit etwa 40 Anschlüssen. Abgesehen vom Problem der Zuordnung der Anschlüsse, ist es auch fast unmöglich bei den geringen Abständen der Steckerpins daran mit der Hand zu löten.



**Abb. 11: DVD-Lesekopf aus einem neueren Laufwerk**

Trotzdem ist es interessant einen modernen Lesekopf mal genauer zu betrachten. Den Entwicklern ist es mittlerweile gelungen die Fotodioden, den Laser und sogar Teile des optischen Strahlengangs auf ein Bauteil zu integrieren. Der Baustein HUL 7207 (Panasonic) enthält in einem 12 poligen SMD-Gehäuse alle Teile des Strahlengangs, außer dem Umlenkspiegel und der Objektivlinse die für einen CD-Lesekopf notwendig sind. Der ähnliche Baustein HUL 6273 bietet die gleichen Funktionen bei einer Wellenlänge von 660 nm für DVD-Leseköpfe. Diese Ausführung erlaubt es, den Stecker mit seinen engen Pinabständen zu umgehen und Drähte direkt an die beiden Bausteine zu löten. Eine ruhige Hand und eine feine LötKolbenspitze sind aber auch für diese Operation notwendig. Das Anschließen der Fokussierspule ist hingegen keine Herausforderung.

#### **2.4. Blu-ray-Leseköpfe**

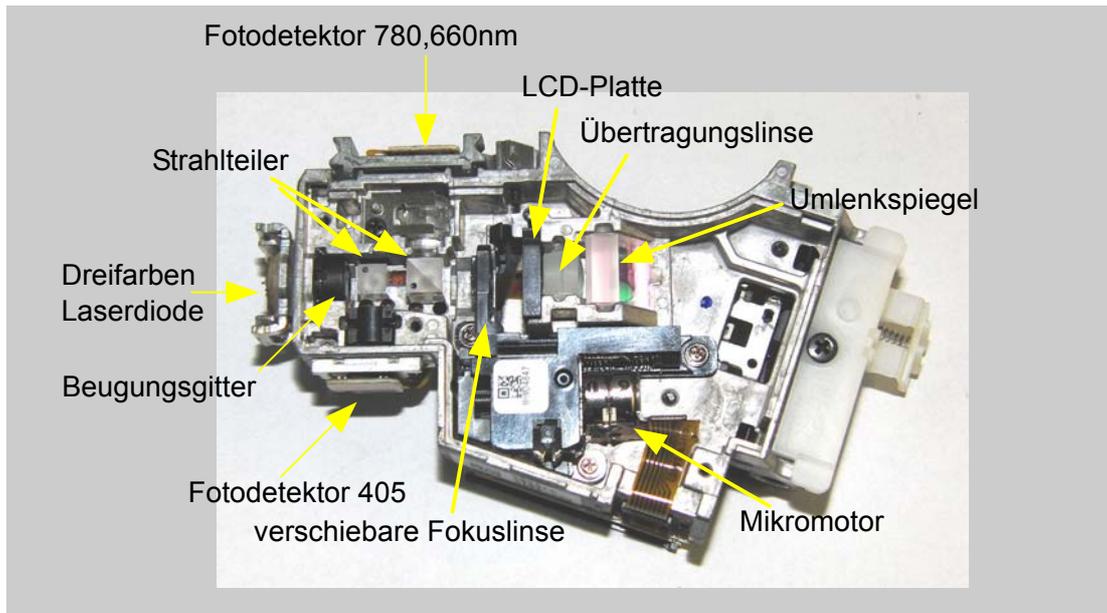
Noch komplexer sind die Leseköpfe der neuen Blu-ray-Geräte, die neben den schon bekannten Wellenlängen 780 nm und 660 nm auch einen violetten Laser bei 405 nm verwenden. Besonders interessant ist der Lesekopf der PS3 Playstation von Sony, der als Ersatzteil für etwas über 50 Euro im Handel zu bekommen ist. Ein Lasermikroskop mit diesem Bauteil hätte neben den drei verschiedenen Wellenlängen auch noch den Vorteil der besseren Auflösung. Die Auflösung im

Blu-ray Modus ist viel besser als 1 Mikrometer und beträgt mindestens 200 Nanometer.



**Abb. 12: Blu-ray-Lesekopf aus Sony Playstation**

Der Lesekopf ist ein reines Wunderwerk der Feinmechanik und Mikrooptik. Die Entwicklungsingenieure von Sony haben es geschafft drei Systeme in diesem Kopf zu vereinigen. Da das Laufwerk neben Blu-ray Scheiben auch CDs und DVDs lesen können muss, werden drei Laser mit 780 nm, 660 nm und 405 nm benötigt. Alle drei Laserdioden sind in einem Gehäuse untergebracht. Der Laserstrahl durchläuft einige optische Komponenten bis er über den Umlenkspiegel auf die Disk fokussiert wird. Direkt nach dem Laser kommt ein Beugungsgitter. Das Gitter spaltet Laserstrahl in verschiedene Einzelstrahlen auf, welche zur Kontrolle des Fokus und der Spurlage dienen. Die folgenden Elemente sind zwei Strahlteiler, die das rückreflektierte Licht auf die Fotodetektoren lenken. Nach den Strahlteilern kommt eine durch einen Mikromotor auf einem Schlitten verschiebbare Fokussierlinse. Diese Linse ist notwendig, weil die Objektivlinse nicht achromatisch ist, d. h., die Brennweiten für verschiedene Farben sind unterschiedlich. Der Unterschied zwischen der Brennweite bei 780 nm und 405 nm ist zu groß, um eine Fokussierung zu gewährleisten. Durch das Verschieben der Zwischenlinse kann diese Fokussierdifferenz ausgeglichen werden. Auf die Zwischenlinse folgt ein Phasenplättchen, eigentlich ein kleines LCD-Display. Durch Ein- und Ausschalten verschiedener Sektoren des Phasenplättchens kann das Strahlprofil der Laser verändert werden. Das nächste Glied in der Kette ist eine weitere Linse. Der Umlenkspiegel und die mit Spulen bewegliche Objektivlinse sind schon aus CD-Leseköpfen bekannt.

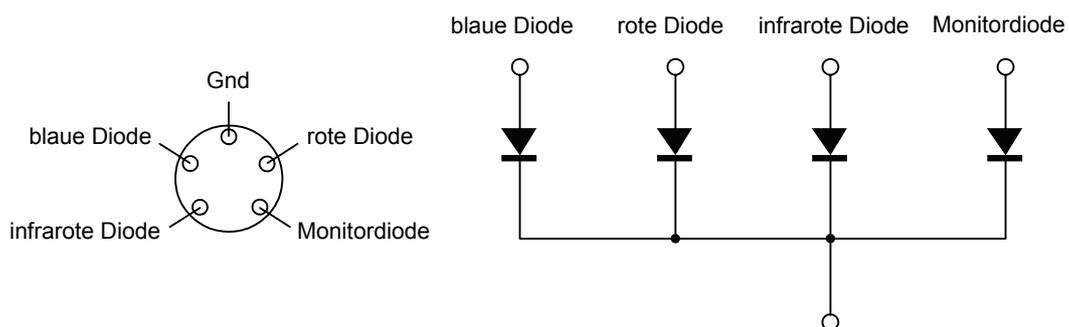


**Abb. 13: Die Optik eines Blu-ray-Lesekopfs**

## 2.5. Dreifarben-Laserdiode

Man bekommt schon ein wunderbares Stück Technik für die erwähnten 50 Euro. Wie auch beim DVD-Kopf ist es auch hier schwierig die richtigen Anschlüsse zu finden. Bei den Fokussier- und Trackingspulen, dem Kleinstschrittmotor und der Laserdiode ist das kein Problem, schwierig wird's bei den Fotodioden. Der Blu-ray-Kopf besitzt wie schon erwähnt drei Laser, die einzeln angesteuert werden können.

### SLD 6562 TL



**Abb. 14: Die Dreifarbendiode SLD 6562 TL**

Leider konnten für die SLD 6562 TL keine Daten ausfindig gemacht werden, weshalb es besser ist, mit den Betriebsströmen am unteren Limit zu bleiben. Für die blaue Diode wurde ein Schwellenstrom von 26 mA gemessen und ein Betriebsstrom von 35 mA eingestellt. Die rote Diode erhält 30 mA (28 mA Schwellenstrom) und die infrarote Diode läuft mit ebenfalls 30 mA (22 mA Schwellenstrom). An der Monitordiode wurden folgende Kurzschlussströme gemessen.

Wellenlänge	Schwellenstrom	Betriebsstrom	Diodenspannung	Monitorstrom
405 nm	26 mA	35 mA	4,5V	340 $\mu$ A
660 nm	28 mA	30 mA	2,1V	350 $\mu$ A
780 nm	22 mA	30 mA	1,7V	500 $\mu$ A

Tab2: Betriebsdaten der 3-Farbenlaserdiode

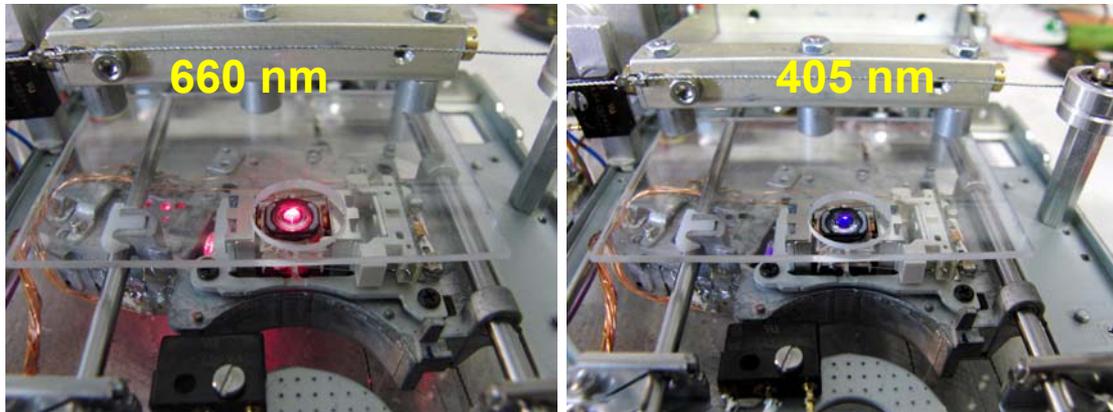


Abb. 15: Die Dreifarbendiode SLD 6562 TL in Betrieb

Allerdings ist es dem Verfasser bislang nur gelungen die Laser in Betrieb zu nehmen und nicht die Fotodetektoren zu kontaktieren. Diese Detektoren sind in der Ball-Grid Technik kontaktiert, sodass es unmöglich ist, an den Anschlüssen zu löten.

## 2.6. Fotodioden in CD-Leseköpfen

Für erste Versuche verwendet man aber am Besten den Lesekopf aus einem möglichst alten CD-Laufwerk. Alt deshalb, weil bei diesen Teilen die Einzelkomponenten noch relativ groß und leicht zu erkennen sind. Während man die Anschlüsse der Fokus- und Spurspule und des Lasers meist leicht findet, kann, ist dies bei der Fotodiode ein Problem. Oft ist auch das Fotodiodenarray zusammen mit Vorverstärkern in einem Gehäuse untergebracht.

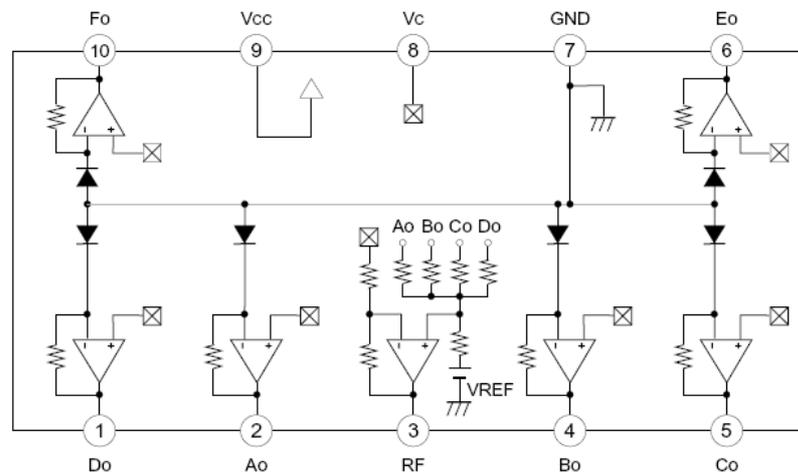
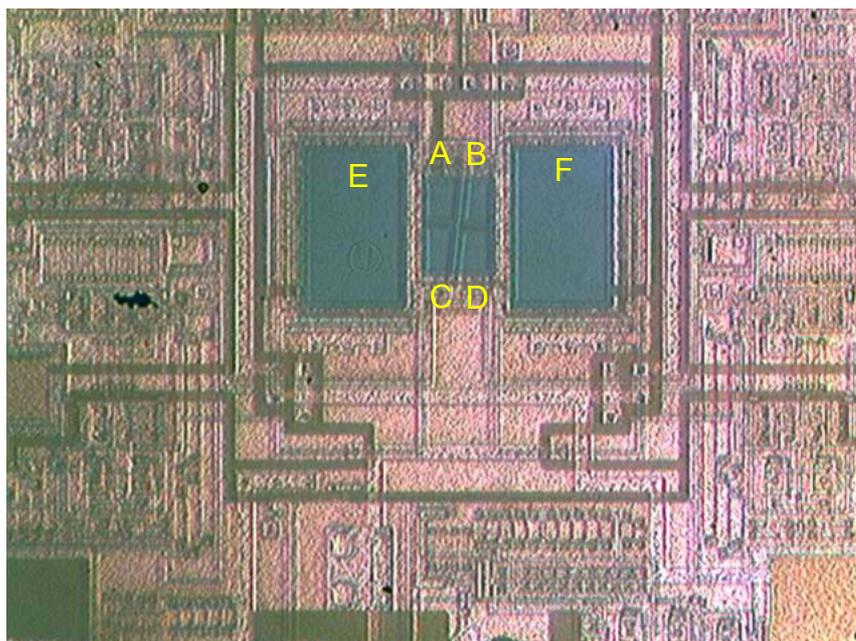


Abb. 16: Das Innenleben des CX2586

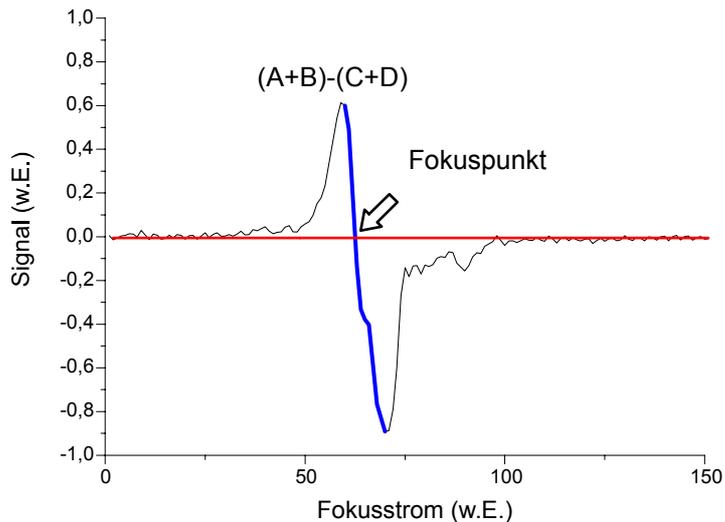


**Abb. 17: Ein Mikroskopbild des CX 2586 zeigt die Quadrantendiode A, B, C, D und links und rechts davon die beiden großflächigen Spurlagedioden E und F**

In vielen Geräten ist hier der Sony Chip CXA 2586 verbaut, der an seinen Anschlüssen die verstärkten Signale der sechs Dioden und ein Summensignal (RF) abgibt. Die Trefferquote des Verfassers erreichte 100 %. Bei drei, willkürlich auf dem Flohmarkt gekauften CD-Laufwerken, waren der Sony Chip oder baugleiche Sensoren anderer Hersteller eingebaut.

Dieses IC verlangt eine Betriebsspannung von 5 Volt an dem Pin Vcc und eine Referenzspannung von 2,5 Volt an Vc. Die Referenzspannung ist dem Ausgangssignal als Offsetspannung überlagert und muss in der folgenden Schaltung wieder subtrahiert werden. Alternativ kann der CXA 2586 auch mit einer bipolaren Versorgung betrieben werden, Pin Gnd an -2,5 Volt, Vc an 0 Volt und Vcc an + 2,5 Volt. Diese Betriebsart hätte den Vorteil, dass die Ausgangssignale keine Offset-Spannung aufweisen. Bei dieser Beschaltung muss aber berücksichtigt werden, dass in vielen Fällen der Minusanschluss der Laserdiode im Lesekopf mit dem GND-Pin des CXA 2566 verbunden ist. Die Signale A, B, C, D oder das Signal RF können zum Bildaufbau im Lasermikroskop verwendet werden.

Zum Test wurde in einem Millimeter Abstand ein Spiegel vor die Linse montiert und durch Verändern des Spulenstroms der Objektivverstellung der Fokusbereich durchfahren. Aufgezeichnet ist das Differenzsignal  $(A+D) - (B+C)$ .



**Abb. 18: Die Fokussierungskurve**

Im optimalen Fokuspunkt zeigt die Spannung den erwarteten Nulldurchgang. Allerdings ist der Regelbereich nicht allzu groß, nur im blauen Bereich der Kurve kann die Fokusregelung richtig arbeiten. Links und rechts der Nulldurchgangskurve fällt das Signal entsprechend der konfokalen Abbildung stark ab. Wird die Abweichung zu groß, ist der Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung und Fokussierung nicht mehr eindeutig. Das hat zur Folge, dass diese Autofokusfunktion nur bei sehr glatten und wenig strukturierten Oberflächen funktioniert. Bei der ursprünglichen Anwendung der Abtastung einer CD, DVD oder Blu-ray Disk, ist das natürlich der Fall.

Hat man doch einen Lesekopf mit einem anderen Sensor, dessen Anschlussbelegung nicht herauszufinden ist, kann man auch den Sensor vorsichtig entfernen und eine einfache Diode (z. B. BPW 34) aufkleben. Allerdings wird man dann nicht die hohe Auflösung des Originals erreichen und kann auch nicht die Autofokus- und Höhenprofilfunktionen implementieren.

### 3. Scannermechaniken

Zum Abtasten muss die Probe rasterförmig über die Optik bewegt werden. Der erforderliche Scanner richtet sich nach der Größe der abzutastenden Fläche.

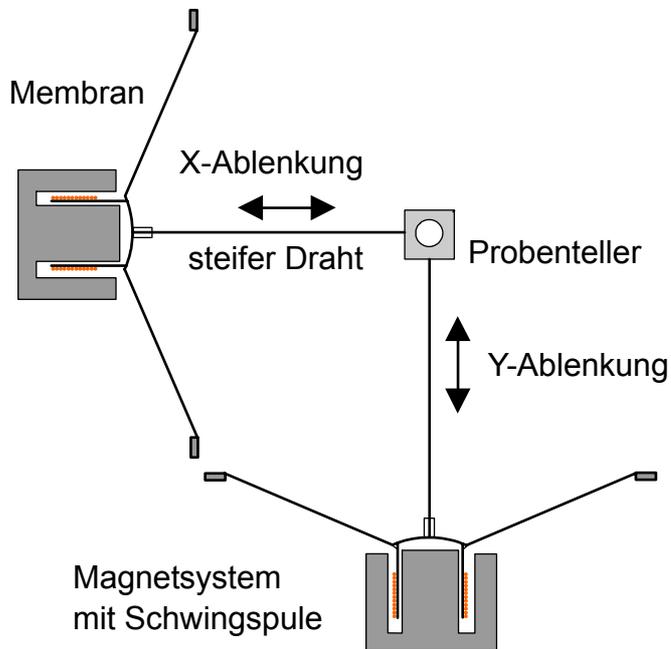
Will man nur kleine Bereiche von einigen zehntel Millimetern abtasten, kann der Scanner aus zwei kleinen Lautsprechern aufgebaut werden.

Größere Scan-Bereiche erhält man mit Kreuztischen, die durch Schritt- oder Stellmotoren angetrieben werden. Solche mechanische Präzisionsgeräte sind aber sehr teuer und für den Bastler kaum erschwinglich und auch der Selbstbau ist ohne großen Gerätepark kaum möglich. Werden jedoch statt der üblichen kugelgelagerten Linearführungen Blattfedern verwendet, kann ein einfacher Kreuztisch auch selbst gebaut werden. Der mögliche Scan-Bereich liegt hier bei einigen Millimetern bis zu einigen Zentimetern. Ein entsprechender Aufbau wird in einem späteren Kapitel gezeigt.

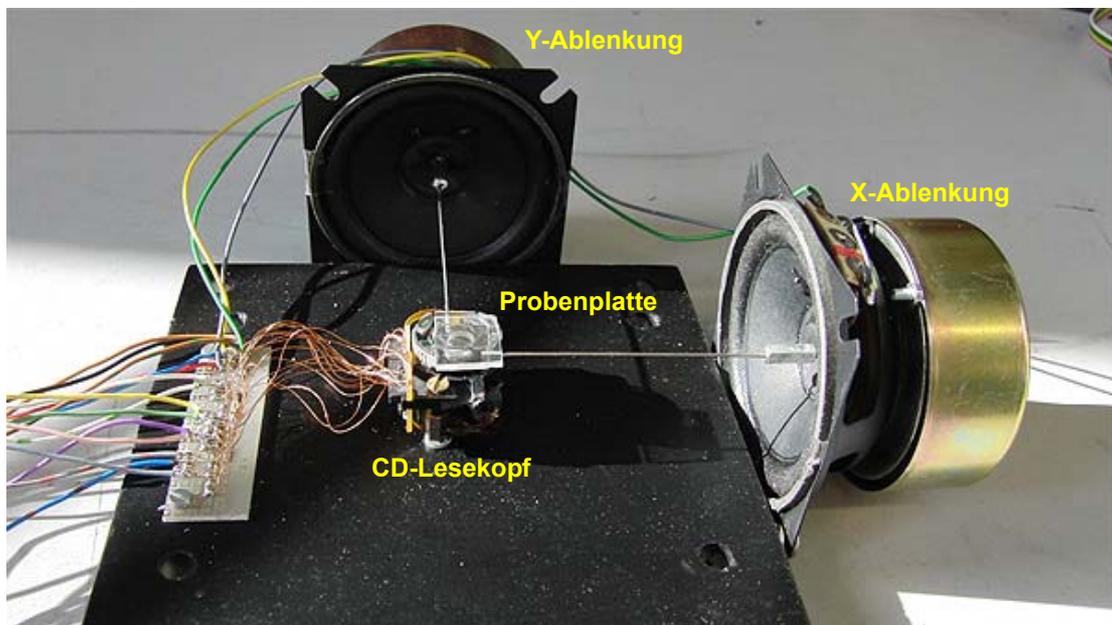
#### 3.1. XY-Scanner mit Lautsprechern

Für einen schnellen Probeaufbau werden die Lautsprecher rechtwinklig zueinander an einer Grundplatte befestigt. Möglichst mittig auf den Membranen sind kleine

Abstandsbolzen (M2,5 oder M2) aufgeklebt. In die Bohrungen der Abstandsbolzen sind wiederum steife Stahldrähte eingeklebt, die den kleinen, leichten Probenteller aus einem Kunststoffblättchen tragen. Allerdings sind bei dieser Methode die beiden Achsen nicht entkoppelt. Eine Bewegung in der X-Richtung hat auch einen kleinen Y-Versatz zur Folge. Der dadurch entstehende Fehler bleibt bei ausreichend langen Drähten aber klein, sodass er nicht störend in Erscheinung tritt.



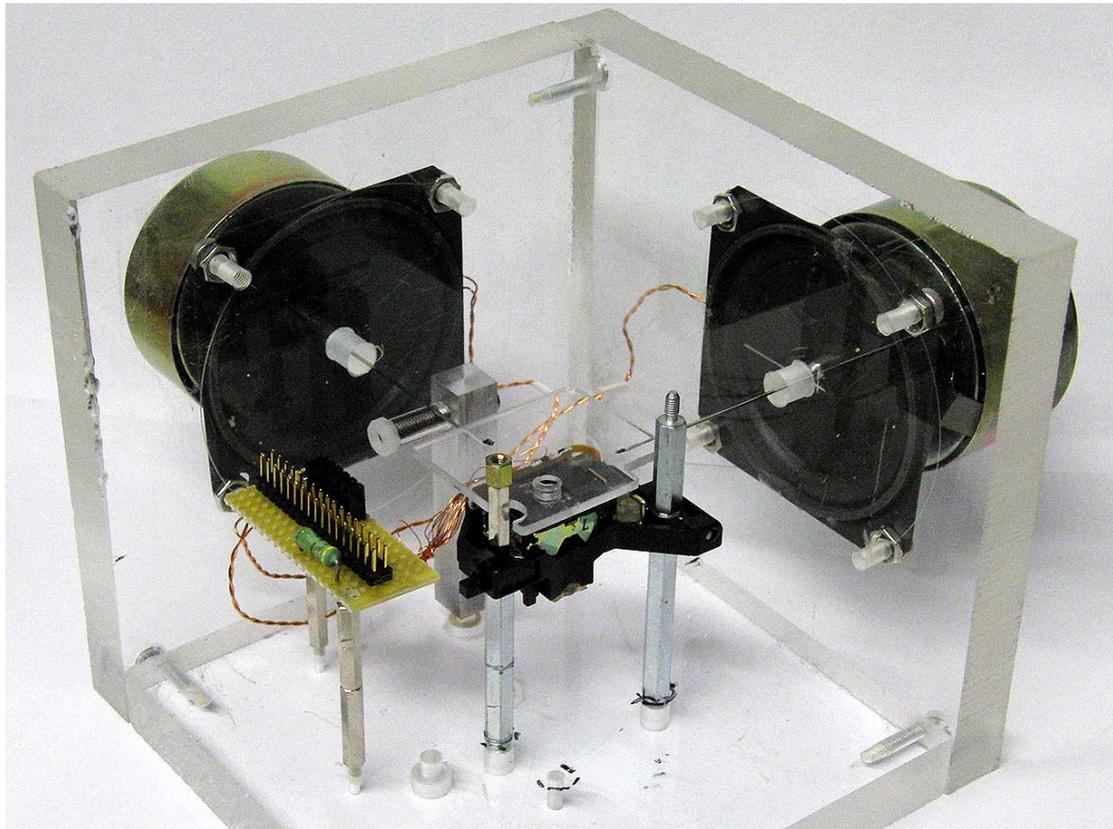
**Abb. 19: Schema des Lautsprecher-scanners**



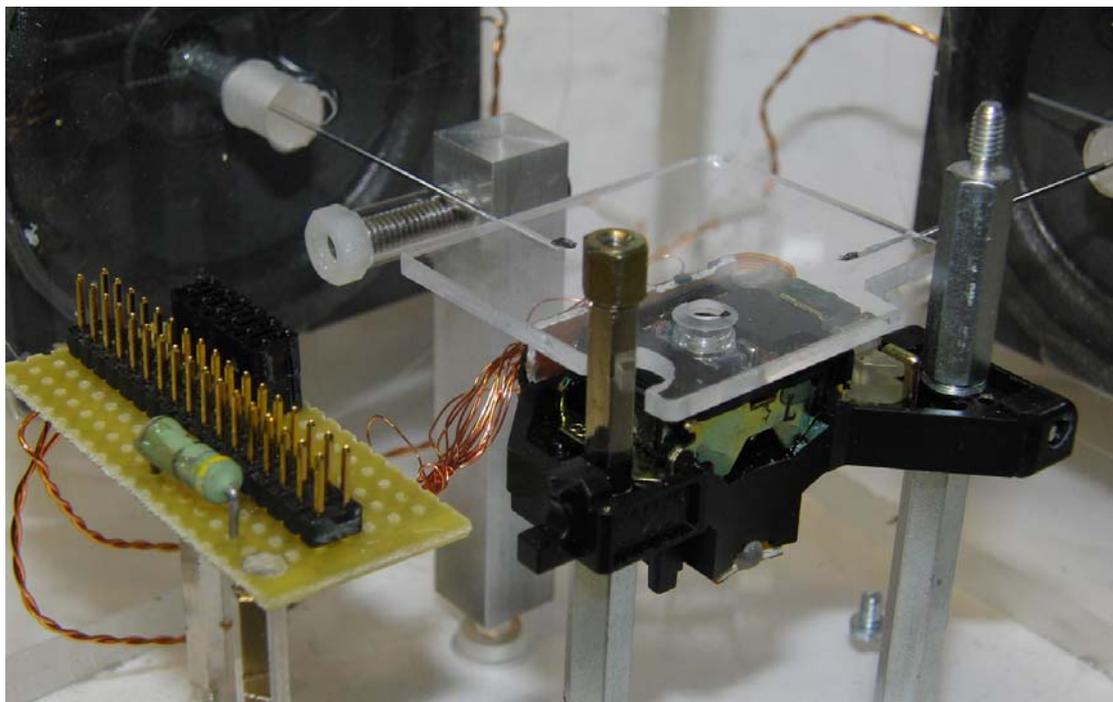
**Abb. 20: Probeaufbau des Lautsprecher-scanners**

Einen stabilen Aufbau zur endgültigen Verwendung bekommt man durch die Verschraubung dreier massiver Platten, die zusammen ein Winkeleck bilden. Die Lautsprecher sind auf die beiden Seitenplatten geschraubt. Die beiden Stahldrähte zu Bewegung des Probentischens ragen durch kleine Löcher in den Seitenplatten.

Durch das sich zwischen der Platte und der Lautsprechermembran bildende Luftpolster wird die Membran in ihrer Bewegung etwas gedämpft, sodass der Scanner weniger anfällig auf Störungen durch Luft- oder Körperschall wird.



**Abb. 21: Stabiler Scanneraufbau mit Plexiglasscheiben des Lautsprecherscanners**



**Abb. 22: Der Probestisch des Scanners und die Glasrohrstütze**

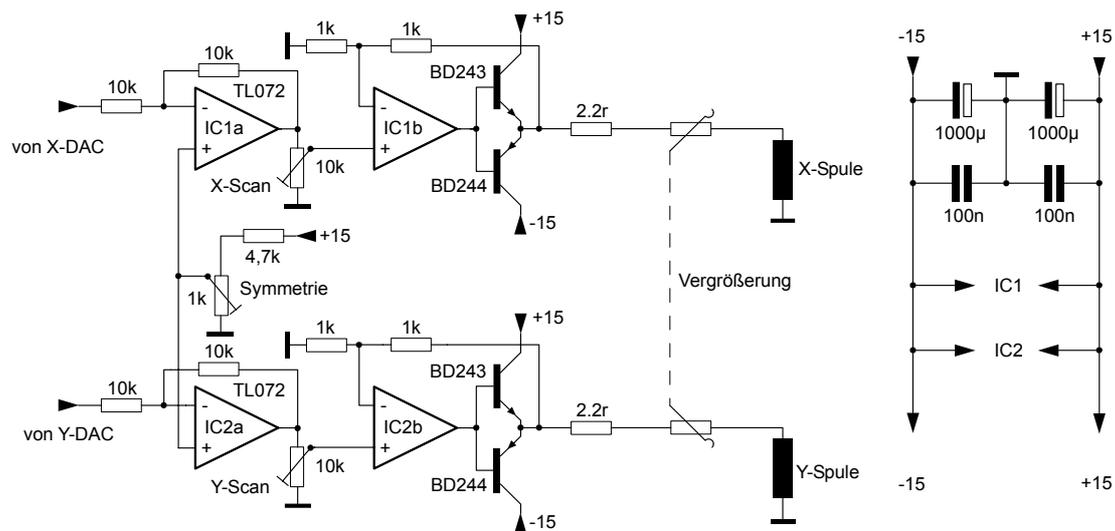
Ebenfalls zur Stabilität trägt ein dünnes Glasröhrchen bei auf dem einer der beiden Stahldrähte aufliegt. Die zusätzliche Reibung zwischen der glatten Glasoberfläche des Röhrchens und dem Draht tritt nicht störend in Erscheinung. Durch dieses Röhrchen wird die Höhenposition des Probentischchens festgelegt und kann nicht durch das Gewicht der Probe oder durch schlechte Zentrierung der Schwingspulen im Lautsprecher verändert werden. Es zeigte sich auch, dass bei manchen Leseköpfen die Magnete der Fokussier- und Trackmechanik ein starkes äußeres Magnetfeld besitzen, wodurch magnetisierbare Proben mitsamt dem Tisch angezogen werden, was eine korrekte Fokuseinstellung ohne Auflageröhrchen unmöglich macht. Die beiden Abstandsbolzen neben dem Probentischchen dienen zur Anbringung der hier noch nicht montierten Durchlichteinheit.

## **4. Elektronik für Selbstbaumikroskope**

### **4.1. Treiberschaltungen für Lautsprecherscanner**

Je nach verwendeten Lautsprechern werden zum Verfahren der Probe Ströme von einigen Hundert Milliampere benötigt. Die 60 mm großen Lautsprecher des Verfassers haben bei einer Stromamplitude von 250 mA einen Hub von etwa einem Millimeter. Als Treiberstufen können Leistungs-Operationsverstärker verwendet werden. Problemlos anwendbar aber teuer ist der Typ LM12CL von National Semiconductor. Wesentlich billiger sind kleinere Typen, wie LM675 oder auch der bekannte NF-Baustein TDA 2040 der ebenfalls im Gleichspannungsbetrieb arbeiten kann. Allerdings neigen diese Typen zu hochfrequenten Schwingungen, wenn sie mit niedriger Verstärkung betrieben werden. Vor allem bei provisorischen Aufbauten auf Lochrasterplatinen ist es nicht immer einfach ein stabiles Arbeiten zu erreichen. Neben der Entkopplung der Betriebsspannungen mit Kondensatoren und dem obligatorischen RC-Glied am Ausgang hilft eine große Verstärkung der Schaltung die Schwingneigung zu unterdrücken. Die erforderliche niedrige Gesamtverstärkung wird dann durch ein Dämpfungsglied am Eingang des Operationsverstärkers sichergestellt.

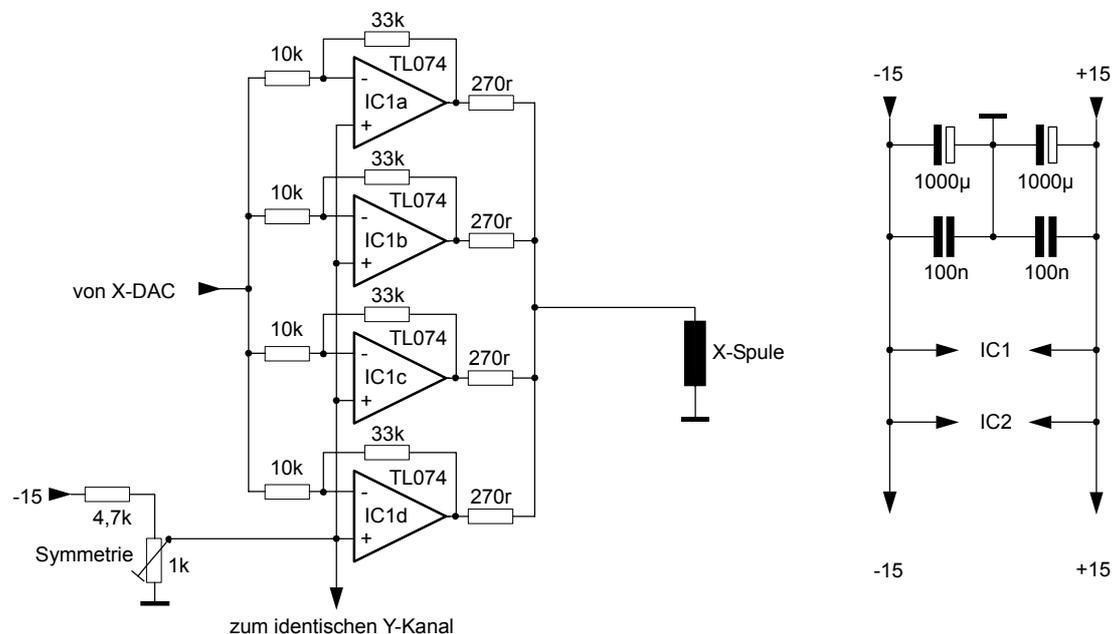
Da an die Linearität des Verstärkers keine besonderen Anforderungen gestellt werden, bietet sich auch die Verwendung eines Kleinleistungs-Operationsverstärkers mit einer nachfolgenden Pufferstufe mit Transistoren an. Um den vollen Scan-Bereich ausnützen zu können, muss die Schaltung bipolare Signale verarbeiten. Ein einfacher Operationsverstärker mit einer nachfolgenden komplementären Pufferstufe erfüllt diese Anforderungen. Die Signale der DA-Wandler für den X- und Y Kanal werden in einer Eingangsstufe symmetrisiert, d. h. aus einem Spannungsbereich von 0..5 V werden -2,5V ... +2,5V erzeugt. Mit dieser zu Null symmetrischen Spannung werden die Leistungsstufen angesteuert, die aus einem Operationsverstärker und einem Komplementärpaar mit zwei Leistungstransistoren bestehen. Die Amplitude des Stroms durch die Lautsprecherspulen bestimmt die Vergrößerung des Mikroskops. Je kleiner dieser Strom ist umso größer wird der Abbildungsmaßstab. Deshalb kann durch veränderliche Vorwiderstände in der Leitung zu den Lautsprecherspulen die Vergrößerung eingestellt werden. Durch die Widerstände nach dem Leistungsverstärker wird sichergestellt, dass dieser immer im maximalen Aussteuerbereich arbeitet und so der Einfluss der Übernahmeverzerrungen klein bleibt. So können hinreichend lineare Scan-Ströme ohne aufwendige Biasnetzwerke in den Leistungsstufen erreicht werden.



**Abb. 23: Schaltung des Lautsprechertreibers**

Die Größe der Vorwiderstände des Vergrößerungseinstellers muss durch Versuche ermittelt werden.

Wie sich bei den folgenden Messungen herausstellt, genügen bei einem Scan-Bereich von einigen 100 Mikrometern schon Stromamplituden von einigen 10 Milliampere zur Aussteuerung von kleinen Lautsprechern. Da die Operationsverstärker der Serie TL071, TL074 in der Lage sind Ausgangströme von maximal 35 mA zu liefern, kann für kleine Scan-Bereiche der Treiberverstärker vereinfacht werden. Die Treiberstufe besteht dann aus vier parallel geschalteten Kleinleistungsverstärkern.



**Abb. 24: Schaltung des vereinfachten Treibers für kleine Scanbereiche**

Jeder Einzelverstärker liefert einen maximalen Strom von 27 mA an die Lautsprecherspule, sodass insgesamt ein Steuerstrom von 110 mA fließt. Mit den vom Verfasser verwendeten Lautsprechern ergibt das einen Scan-Bereich von 560 µm.

## 4.2. Fokusspulentreiber und Laserdioden Versorgung

Eine weitere Leistungsstufe wird für die Einstellung der Fokussierspule benötigt. Bei CD-Kopf des Verfassers reichte eine Stromamplitude von 300 mA, um den ganzen Fokusbereich zu durchfahren. Die Leistungsstufe ist ähnlich wie die Scan-Stufen aufgebaut nur, dass hier die Eingangsstufe entfallen kann. Zur manuellen Fokussierung wird der Leistungsverstärker mit einem Potentiometer angesteuert. Ein zusätzlicher Eingangskanal dient zu Versuchen mit der Autofokusfunktion.

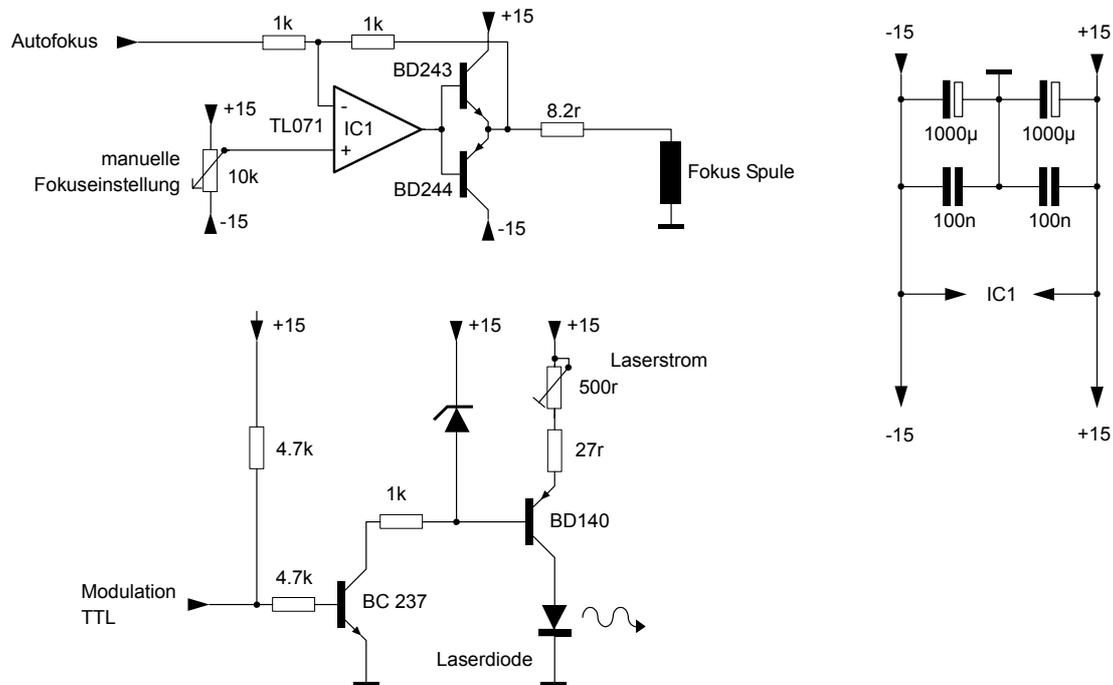


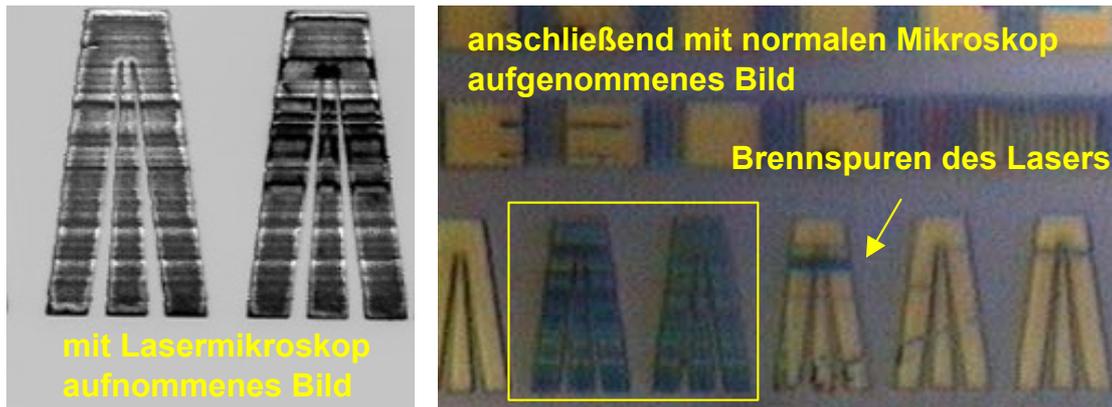
Abb. 25: Die Schaltung des Fokusspulen- und des Lasertreibers

Die im CD-Kopf eingebaute Laserdiode benötigt Ströme bis zu 50 mA. Diesen Strom liefert eine diskret aufgebaute Stromquelle.

### Hier noch ein Wort der Warnung !

**Die Laserleistung von CD-Köpfen, vor allem von CD-Brennern, ist nicht unerheblich und kann bis zu Hundert Milliwatt betragen. Obwohl die Gefahr einer Verletzung nur gering ist, da der Laserstrahl durch die Fokuslinse schon nach wenigen Zentimetern stark aufgeweitet wird, sollte man nie bei laufendem Laser in die Fokuslinse blicken.**

Die hohe Intensität des Lasers stellt aber auch eine Gefahr für die Probe dar. Es ist nicht auszuschließen, dass beim Scannen, ganz im Sinn eines CD-Brenners, Spuren in die Probe gebrannt werden, vor allem wenn es sich um gut absorbierende Materialien handelt.



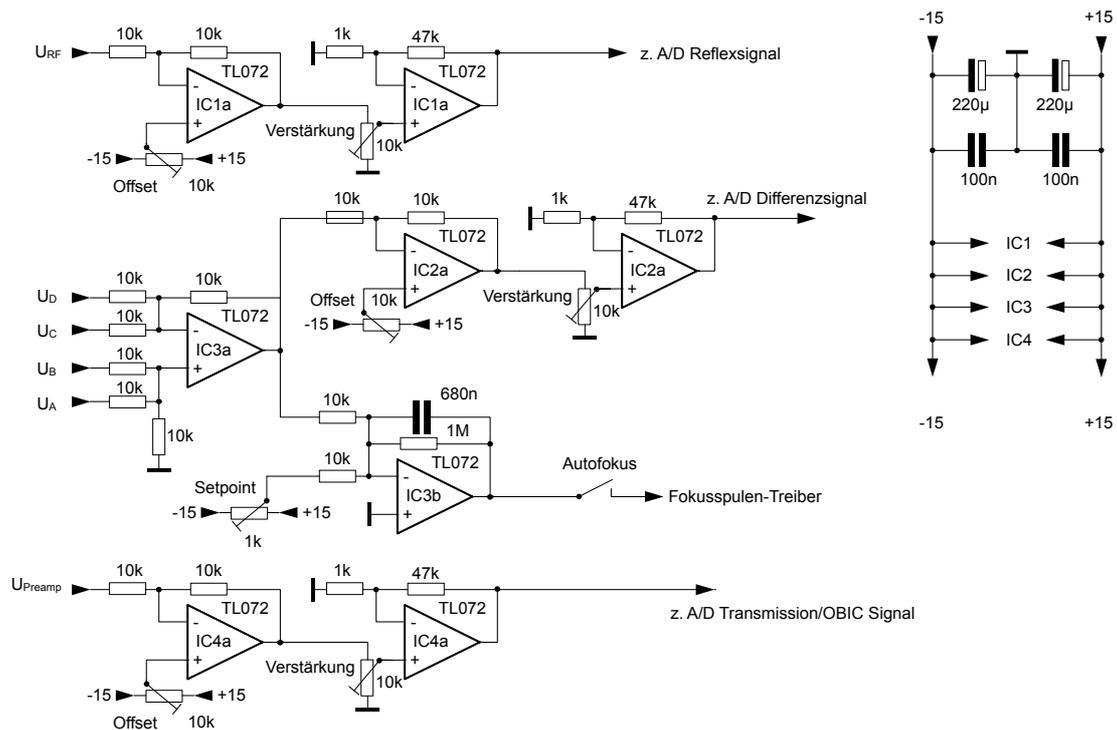
**Abb. 26: Brennspuren auf einer Probe**

Auf dem Bild sind belackte Metallstrukturen auf einer Halbleiterscheibe zu sehen. Zwei der v-förmigen Strukturen wurden im Lasermikroskop abgescannt. Nach der Aufnahme sind auf einem Bild im normalen Lichtmikroskop die Spuren des Lasers deutlich zu erkennen.

Auf eine Stabilisierung der Laserleistung über die eingebaute Monitordiode wurde verzichtet. Dafür wurde die Stromquelle mit einer Modulationsmöglichkeit ausgerüstet. In manchen Betriebsarten (Dunkelfeld, Thermalwave usw.) sind die Signale sehr klein, sodass es nötig wird, den Laser zu modulieren und die Messung mit einem Lockin-Verstärker durchzuführen.

### 4.3. Signalaufbereitung

Ein weiterer Schaltungszug des Lasermikroskops sind die Verstärker zur Aufbereitung des eigentlichen Signals. Da die Fotodiodensignale schon im Vorverstärker CX2586 angehoben werden, kann der nachfolgende Verstärker einfach ausfallen und besteht nur aus einem Operationsverstärker, der das Signal an den nachfolgenden AD-Wandler anpasst. Mit zwei Potentiometern können der Offset und die Amplitude eingestellt werden. Etwas aufwendiger ist die Schaltung für die Autofokusfunktion die zwei Operationsverstärkerstufen benötigt. Die erste Differenzstufe kombiniert die Signale der Fotodioden A bis D, die folgende Stufe ist der eigentliche Regelverstärker. Da der Autofokus nur in Verbindung mit ebenen Probenflächen richtig arbeitet kann, wird er für anders beschaffene Proben ausgeschaltet. Das kombinierte Signal der Fotodioden A bis D kann auch auf einen Signalkanal geschaltet werden. Bei manchen Proben zeigt dieses differenzielle Signal feine Strukturen, die beim einfachen Reflektionskanalbild nicht zu sehen sind. Auch bei diesem Signal können Offset und Amplitude über zwei Potis eingestellt werden. Ein weiteres Signal erzeugt eine Fotodiode, die über dem Untersuchungsobjekt angeordnet ist und durchfallendes Licht registriert. So kann auch ein Bild der Transmission des Objektes aufgenommen werden.

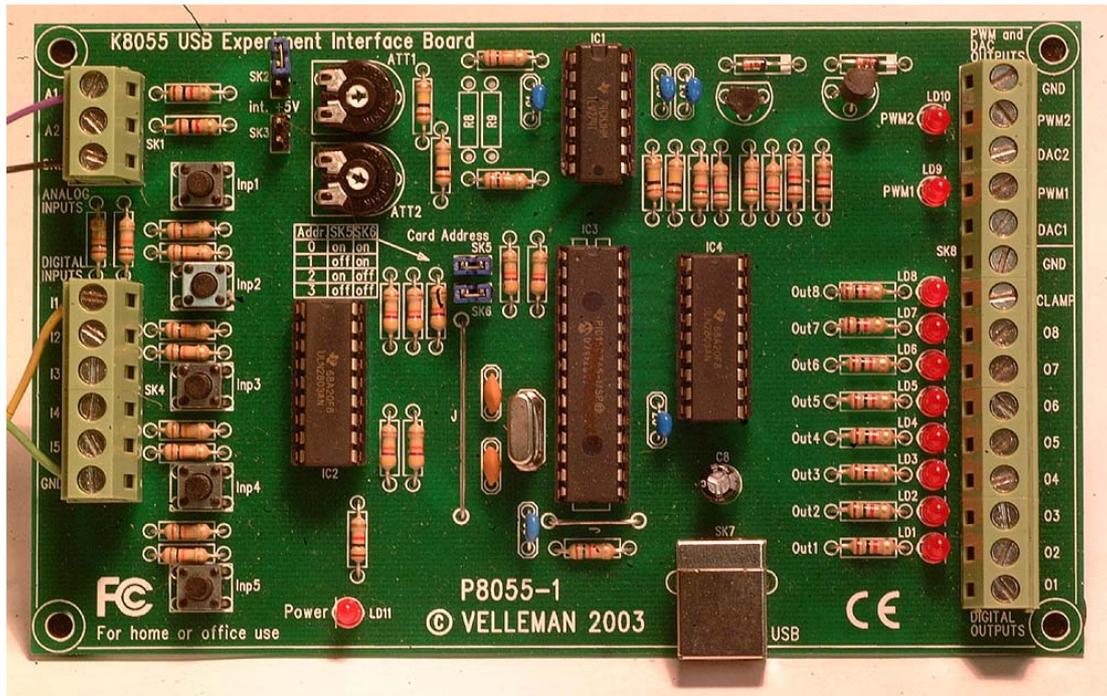


**Abb. 27: Schaltung der Signalaufbereitung**

Zur Stromversorgung braucht man eine bipolare Spannungsquelle, die mit etwa einem Ampere belastbar sein muss. Der Verfasser verwendete hierfür zwei Steckernetzgeräte, um die Gefahren eines 220V Anschlusses zu vermeiden.

#### 4.4. Einfaches Computer-Interface

Für die Anbindung der Mikroskop-Elektronik an den steuernden Computer wird ein Interface benötigt. Diese muss mindestens zwei Analogausgänge und mindestens einen Analogeingang haben. Für erste Versuche ist eine preisgünstige Schnittstellenkarte ausreichend, z. B. die USB-Interfacekarte K8055 von Velleman. Die Karte hat zwei Analogeingänge und zwei Analogausgänge. Ein großer Vorteil dieses Interfaces sind die mit gelieferten DLLs (dynamic link libraries), die ein problemloses Einbinden in selbst erstellte Programme ermöglichen.



**Abb. 28: USB-Interface von Velleman**

Das vom Verfasser entwickelte einfache Delphi-Programm erlaubt die Aufnahme von Daten über das USB-Interface und Darstellung der Daten als Bilder und sowie der Speicherung der Messdaten in Text-Dateien. Im Wesentlichen besteht das Programm aus zwei geschachtelten Schleifen, in denen zwei Zähler erhöht werden. Der Wert des einen Zählers bestimmt den Ausgangswert des X-Kanal Analogausganges, der andere ist für den Y-Kanal zuständig. Für jeden Zählerwert wird der Eingangswert der beiden Analogeingänge gemessen und somit den Grauwert des entsprechenden Bildpunkts ermittelt. Bei der Ausgabe der Scan-Spannungen für die Lautsprechertreiber ist zu beachten, dass keine ruckartigen Spannungswechsel erfolgen. Anstelle des üblichen Sägezahnverlaufs muss die Scan-Spannung einen unsymmetrischen Dreiecksverlauf haben. Das heißt, am Ende einer Zeile springt die Spannung nicht auf den maximalen negativen Wert, sondern fährt langsam zum Zeilenanfang zurück. Die Messwerte beider Kanäle werden mit den zugehörigen X- und Y-Koordinaten als Zahlenwerte in Text-Dateien gespeichert. Die Speicherung in Text-Dateien bringt den Vorteil, dass die originalen Messwerte erhalten bleiben. Bei der zur Umwandlung in Bild-Dateien notwendigen Normierung auf Byte-Werte könnten feine Unterschiede verloren gehen. Die Umwandlung in BMP-Dateien erfolgt in einem eigenen Programmmodul, in dem die Messwerte in passender Weise skaliert werden können. Die weitere Bildverarbeitung wie Filteroperationen, Histogrammeinstellungen und Einfärben der Bilder kann selbst programmiert werden oder man verwendet ein übliches Bildverarbeitungsprogramm wie Photoshop, Photopaint oder ähnliche.

#### 4.4.1. Steuerprogramm

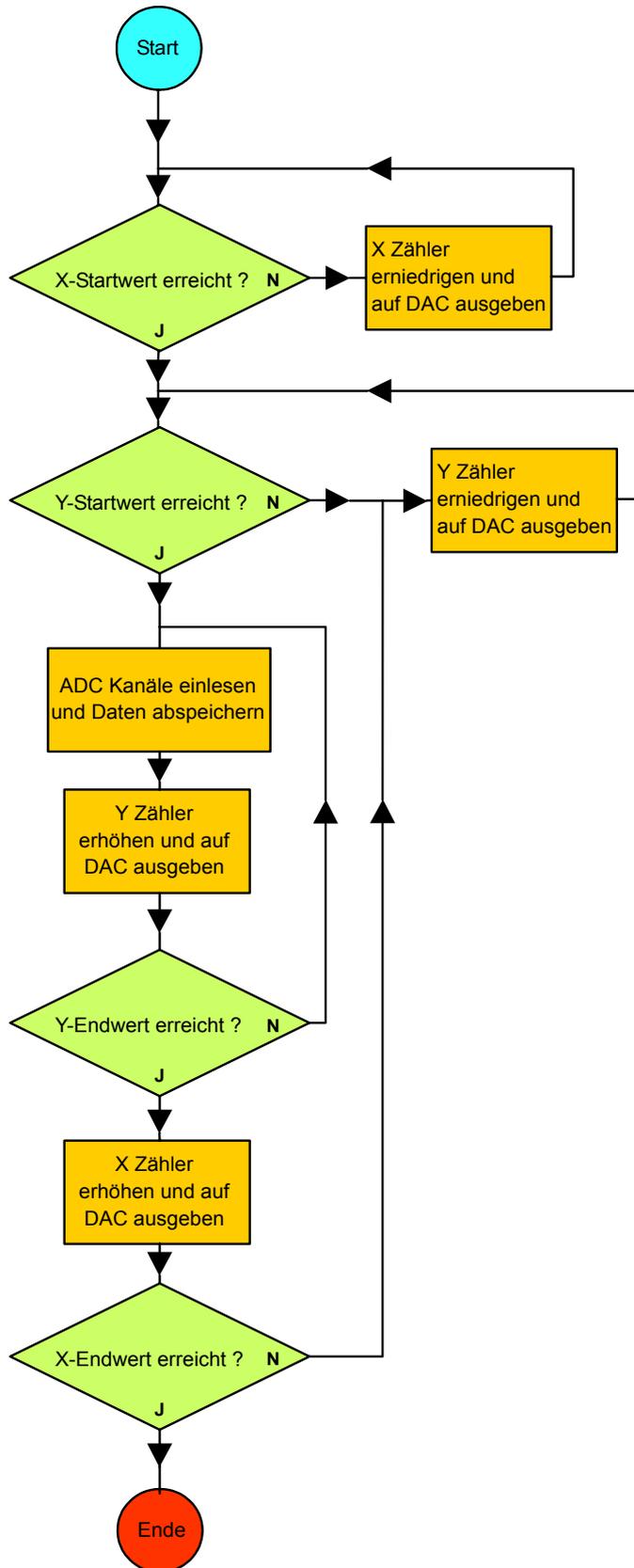


Abb. 29: Struktogramm der Scannerroutine

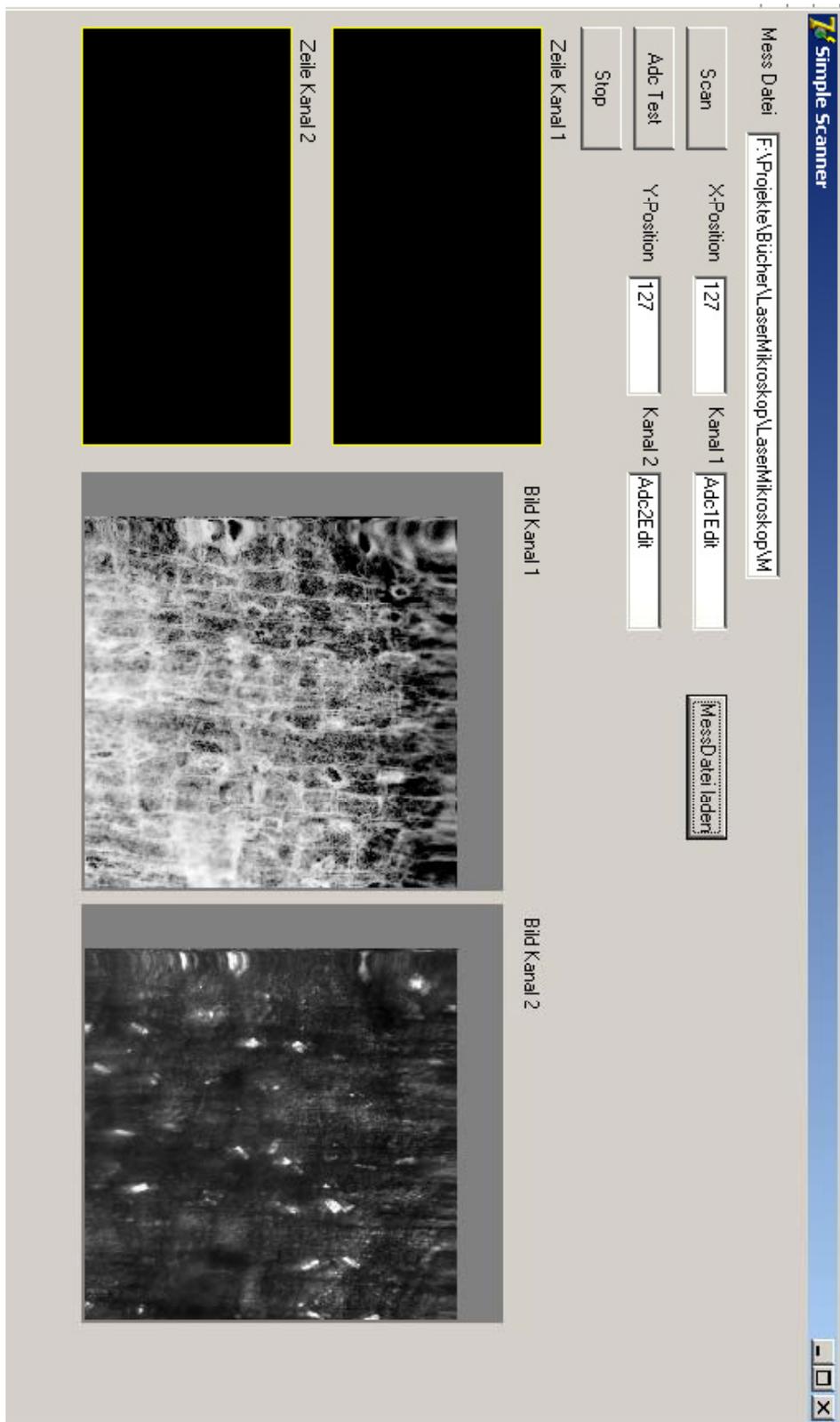
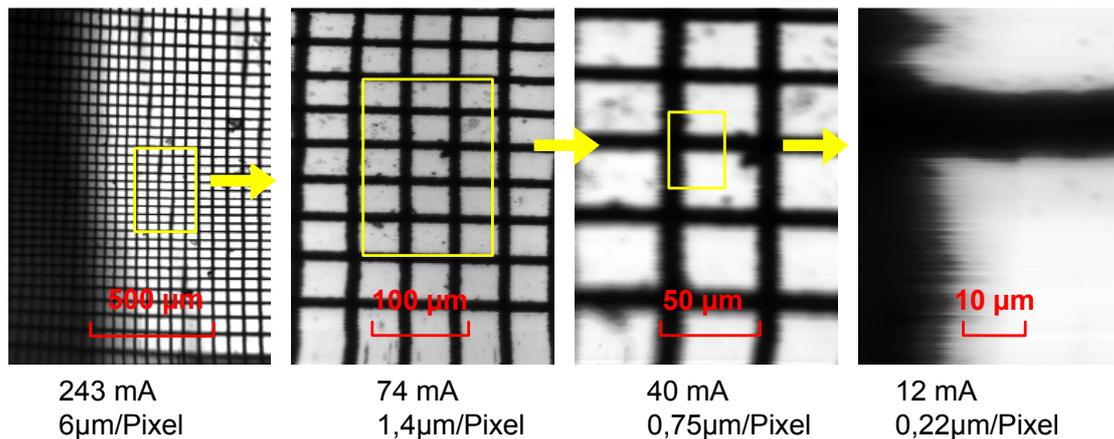


Abb. 30: Screenshot des einfachen Scannerprogramms

## 5. Betrieb des Eigenbaumikroskops

### 5.1. Bilder im reflektierten Licht

Für die ersten Versuche mit dem Mikroskop eignen sich ebene Flächen mit kleinen Strukturen. Für das Bild wurde ein Glasscheiben, dass mit einem Mosaik kleiner Metallflächen bedeckt ist, verwendet. Solche Testsubstrate können im Mikroskopiehandel bezogen werden.

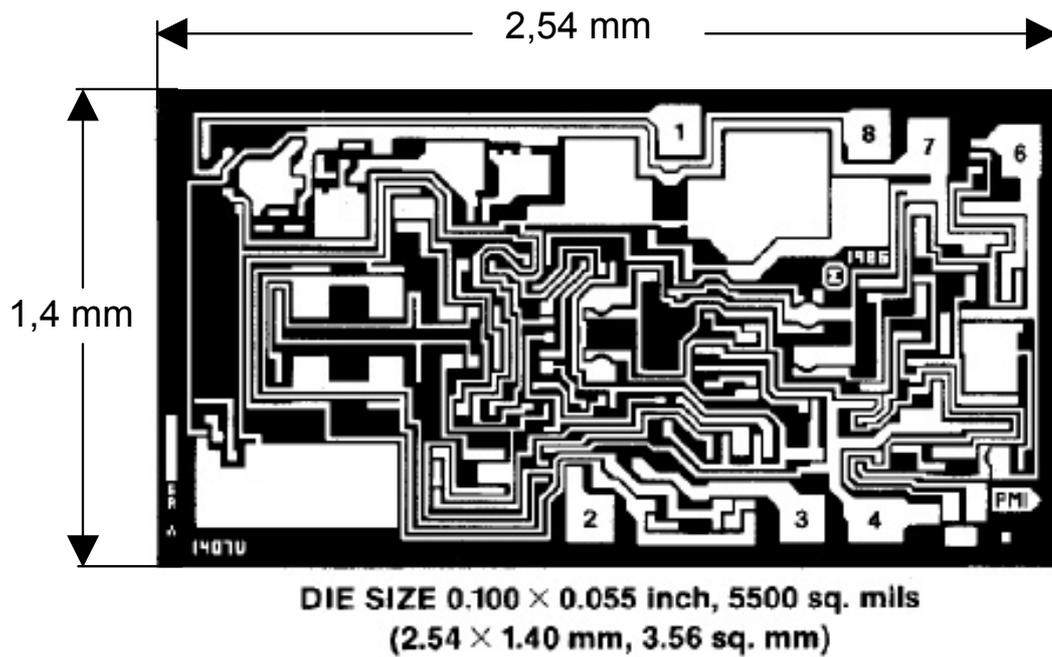


**Abb. 31: Aufnahme des Testmosaiks**

Bei diesem Substrat sind die Metallinseln Quadrate mit einer Kantenlänge von  $35\ \mu\text{m}$  und einer Gitterkonstante von  $50\ \mu\text{m}$ . Die Bilder wurden mit  $180 \times 254$  Pixel gescannt. Zur Gewinnung der Helligkeitsinformation wurde das Signal des Kanals mit reflektiertem Licht verwendet. Man sieht, dass der einfache Lautsprecherscanner in einem Bereich von 100 bis etwa  $500\ \mu\text{m}$  ganz brauchbare Ergebnisse liefert. Die erforderlichen Stromamplituden zur Aussteuerung der Lautsprecher betragen dann 40 bis 100 mA.

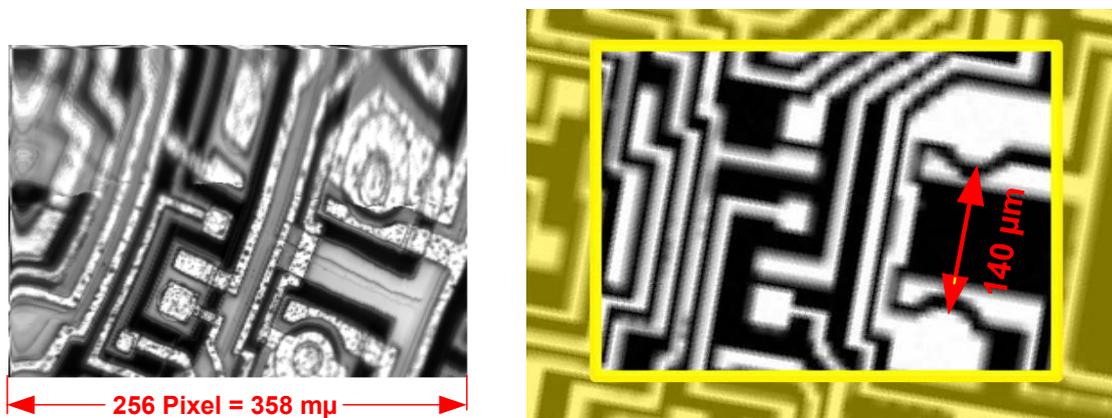
#### 5.1.1. Halbleiterchips

Hat man kein geeignetes Gitter zur Hand sind unter anderem integrierte Schaltungen die nicht vergossen, sondern in einem Metall TO5 Gehäuse untergebracht sind gute Testobjekte. Schaltungen in solchen Gehäusen sind leicht zu öffnen, sodass der Chip zugänglich ist. Die meisten der folgenden Bilder stammen von einem OP7 Operationsverstärker.



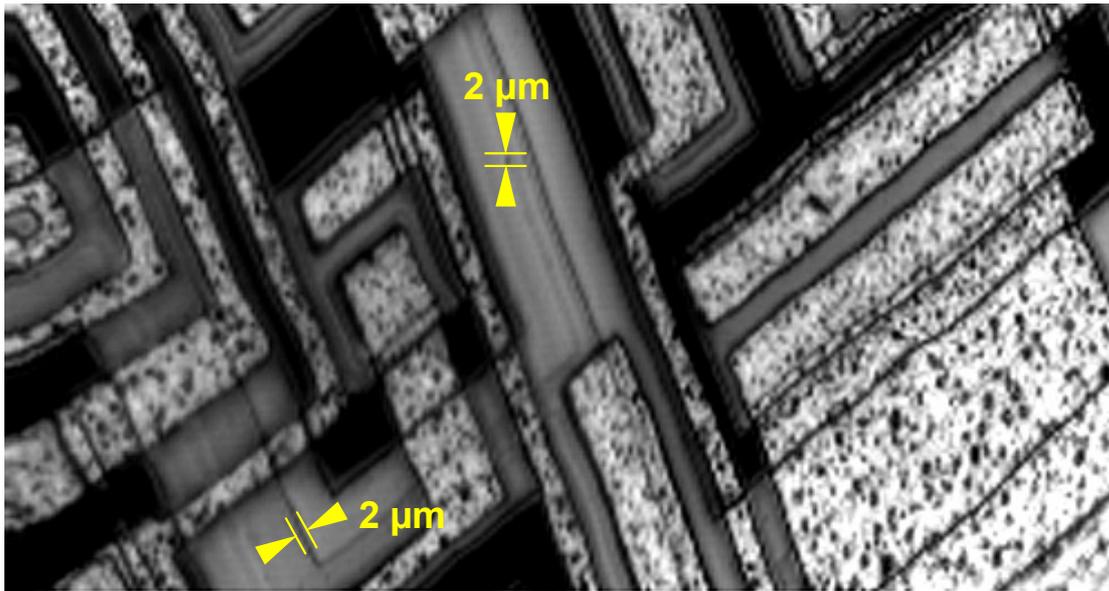
**Abb. 32: Layout des OP 07 Chips**

Aus dem Datenblatt erhält man das Metallisierungs-Layout des Verstärker-Chips. Dieses Bild ist bei der späteren Orientierung auf den Mikroskopbildern sehr hilfreich. Die Größenangaben des Chips können für eine Kalibrierung des Scan-Bereichs dienen.



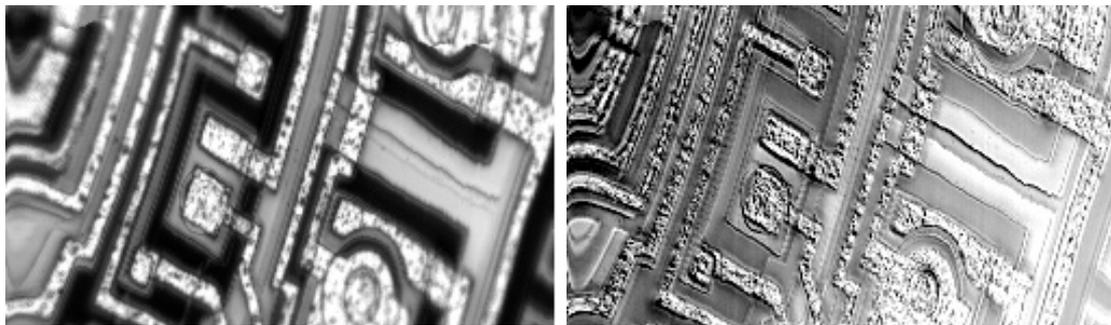
**Abb. 33: Rasteraufnahme und zugehörigen Ausschnitt aus dem Layout**

Die Bilder zeigen die Rasteraufnahme mit reflektiertem Licht und der dazugehörige Ausschnitt aus dem Chip-Layout. Mithilfe des Abstands der beiden Transistoren der aus dem Chip-Layout ermittelt wird, kann die Vergrößerung der Aufnahme bestimmt werden. In diesem Fall beträgt der Abbildungsmaßstab 1,4 µm/Pixel.



**Abb. 34: Details auf dem OP 07 Chip**

Eine andere Aufnahme des Chips dient zur Ermittlung der erreichten Auflösung. Man sieht, dass die Auflösung des Mikroskops bei etwa 1 Mikrometer liegt, ein Wert, der angesichts des einfachen Aufbaus hervorragend ist.



reflektiertes Licht  $U_r$

Differenzbild  $(U_A+U_B)-(U_C+U_D)$

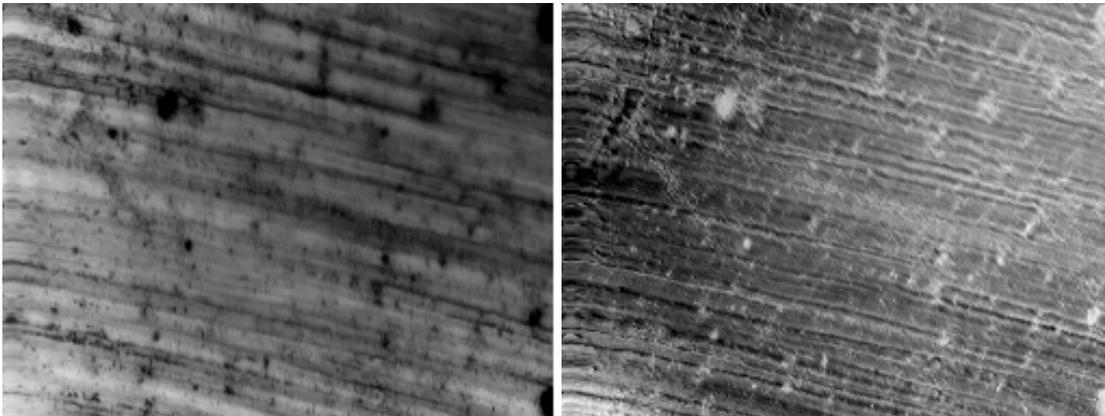
**Abb. 35: Bild im reflektierten Licht und Differenzbild**

Bei der nächsten Aufnahme wurde auch das Differenzsignal  $(U_A+U_B)-(U_C+U_D)$  verwendet, um ein Bild zu erzeugen. Durch diese Technik werden vor allem Kanten des Objekts verstärkt, sodass insgesamt ein schärferer Bildeindruck entsteht. Deutlich zeigt sich die körnige Struktur der Leiterzüge aus Aluminium. Besonders hohen Kontrast erhält man durch die Überlagerung des Reflex- und Differenzbildes.



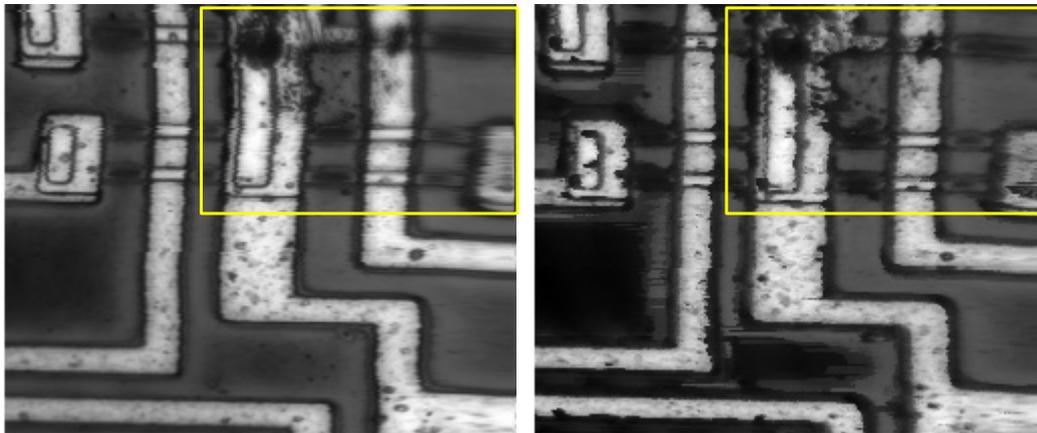
**Abb. 36: Überlagerung von Reflex- und Differenzbild**

Auch bei der im nächsten Bild gezeigten Messingfolie, die für das unbewaffnete Auge glatt und glänzend wirkt, sind durch die Differenztechnik deutliche Riefen zu erkennen. Diese Riefen stammen von den Presswalzen, mit denen die Folie hergestellt wurde.



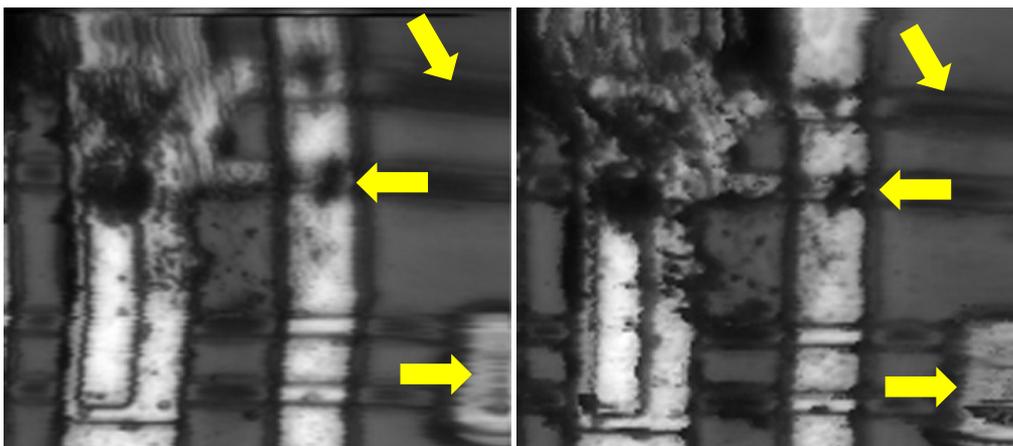
**Abb. 37: Aufnahme einer Messingfolie und Differenzbild**

### 5.1.2. Autofokus



ohne Autofokus

mit Autofokus



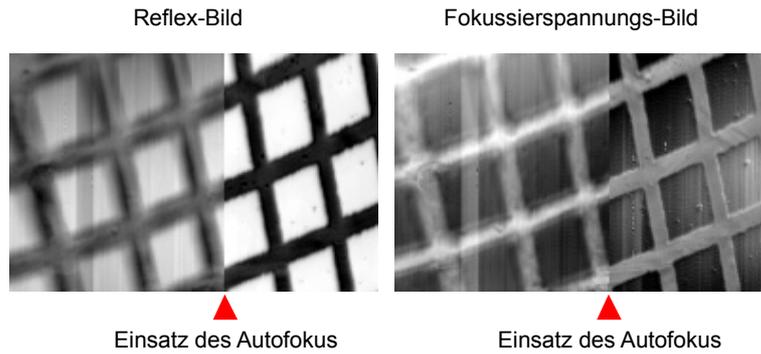
ohne Autofokus

mit Autofokus

**Abb. 38: Funktion des Autofokus**

Das Bild eines Halbleiterchips ( $\mu\text{A 733}$ ) zeigt die Wirkung der Autofokusfunktion. Während das linke Bild ohne die Fokussierung im rechten oberen Bereich durch thermische Drift unscharf ist, bleibt die Schärfe im rechten Bild mit Autofokus über den ganzen Bereich erhalten. Besonders deutlich zeigt das die Ausschnittvergrößerung des entsprechenden Bereichs.

Für den Autofokus wird das Differenzsignal  $(A+B)-(C+D)$  in den Fokussierungsstrom eingespeist. Durch diese Rückkopplung versucht das System den Fokusabstand immer konstant zu halten. Allerdings ist der Regelbereich sehr klein und so funktioniert der Autofokus nur bei der Abbildung von ohnehin glatten Oberflächen, wie die folgende Abbildung des Testsubstrates zeigt.

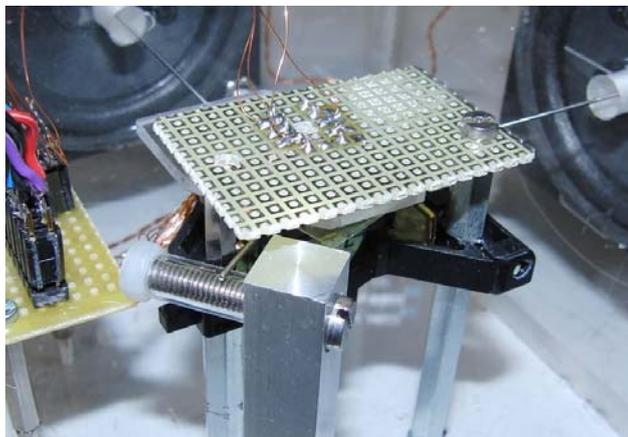


**Abb. 39: Funktion des Autofokus auf einer glatten Oberfläche**

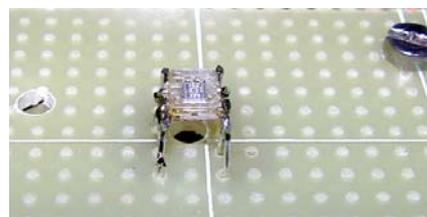
Anstelle der Rückkopplung des Differenzsignals könnte man auch in jedem Bildpunkt durch einen rampenförmigen Fokussierungsstrom den gesamten Fokusbereich durchfahren. Anhand der beiden Fokusbedingungen,  $(A+B)-(C+D) = 0$ , und  $A+B+C+D \neq 0$  kann dann die Rastersoftware den korrekten Fokuswert bestimmen und den zugehörigen Pixelwert aufzeichnen. Allerdings wird durch dieses Verfahren die ohnehin lange Scan-Zeit, die für ein Bild benötigt wird, noch stark vergrößert.

## 5.2. Durchlichtaufnahmen

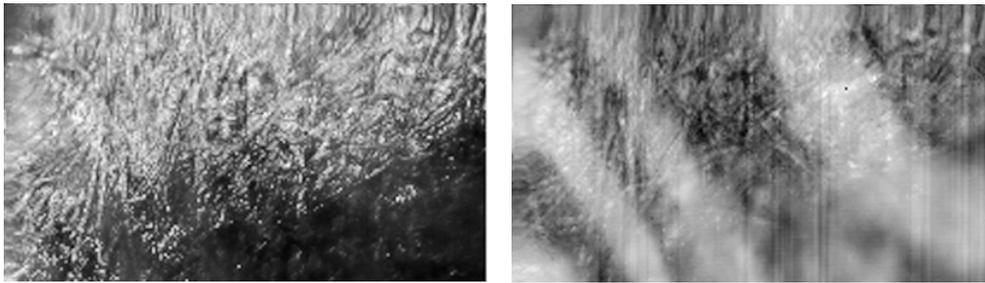
Für Durchlichtaufnahmen wird einfach eine Fotodiode z. B. BPW 34 über dem Objekt montiert, welche zur Steigerung der Bildschärfe mit einer Lochblende abgedeckt ist. Verwendet man eine andere Fotodiode mit kleiner Chipfläche wie der CX2586, kann natürlich auf die Lochblende verzichtet werden.



Der CX2586 ist auf einer kleinen Platine montiert sodass er das durch die Probe scheinende Licht erfasst



**Abb. 40: Die Anordnung des Detektors über der Probe für Durchlichtaufnahmen**



Auflicht (Reflektion) Bild

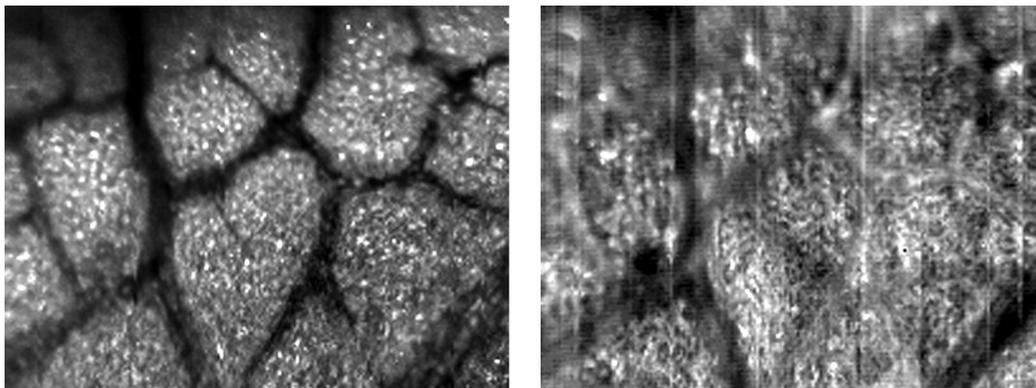
Durchlicht (Transmission) Bild

**Abb. 41: Auflicht und Durchlichtbild einer Briefmarke.**

Während das Auflichtbild nur die Fasern auf der Papieroberfläche zeigt, sind im Durchlichtbild Fasern unter der Oberfläche und auch die mit Farbe bedruckten Stellen zu sehen.

### 5.2.1. Pflanzenzellen

Natürlich können nicht nur technische Oberflächen mit dem Mikroskop betrachtet werden. Die nächsten Bilder zeigen Aufnahmen von einem Blatt, das in Auf- und Durchlicht betrachtet wurde. Das Reflexbild zeigt die Blattunterseite mit den dunklen Adern und Infrarot reflektierende Chlorophyllklümpchen als weiße Flecken. Weniger aussagekräftig ist das Durchlichtbild, das aufgrund der Dicke des Blattes unscharf wirkt.



Auflichtbild

Durchlichtbild

**Abb. 42: Auflicht- und Durchlichtbild eines Blattes**

Auch Insekten oder Teile von diesen eignen sich zur Untersuchung mit dem Lasermikroskop. Auf Fensterbrettern findet man oft tote Fliegen und andere verendete Insekten.

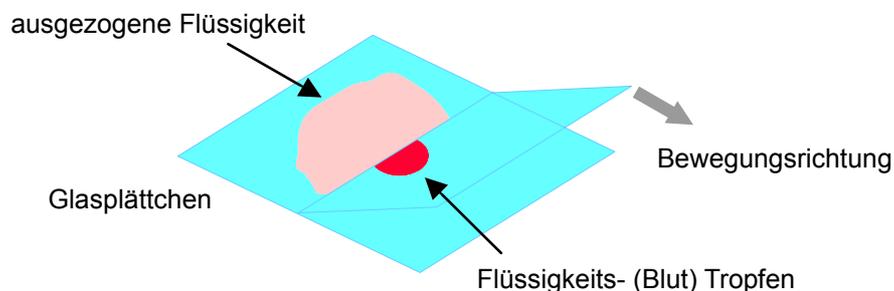


**Abb. 43: Durchlichtbilder eines Mückenflügels und die Schuppen eines Schmetterlings**

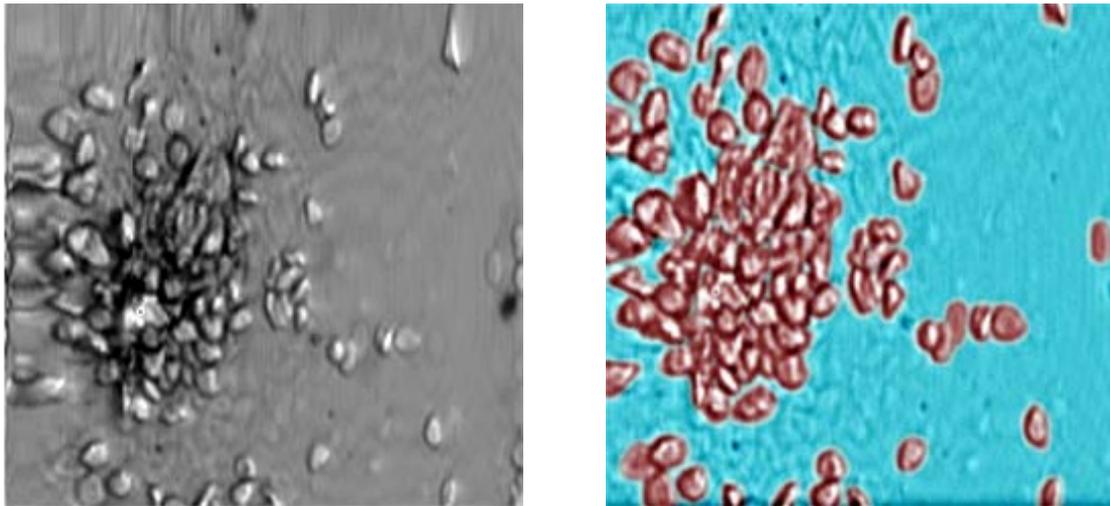
Die Körperteile von Insekten bestehen meistens aus Chitin einem Stoff, der für das infrarote Licht eines CD-Lesekopfes sehr durchlässig ist, sodass auch Strukturen in den Flügeladern sichtbar werden. Das rechte Bild zeigt die Schuppen vom Flügel eines toten Schmetterlings. Für die Aufnahme wurden diese Schuppen, die sehr leicht von den Flügeln abgehen, auf ein Stück Tesafilm gestäubt. Der Tesafilm wird dann auf den Probentisch geklebt.

### 5.2.2. Rote Blutkörperchen

Natürlich kann auch der Experimentator selbst zu schönen Bildern beitragen. Wenn man sich beim Basteln in den Finger geschnitten hat, kann man etwas Blut auf ein Glasplättchen tropfen und dieses untersuchen. Die Kunst bei diesem Vorgang ist es das Blut in möglichst dünner Schicht zu verteilen, sodass eine Durchlichtaufnahme möglich wird. Die Untersuchungsobjekte in der Flüssigkeit sollen möglichst nebeneinander und nicht übereinander liegen. Dazu wird der Tropfen wie auf der Grafik mit einem zweiten, schräg über den Tropfen gezogenen Glasplättchen verteilt. Dieses Verfahren des Ausstreichens eignet sich natürlich auch für andere flüssige Proben.



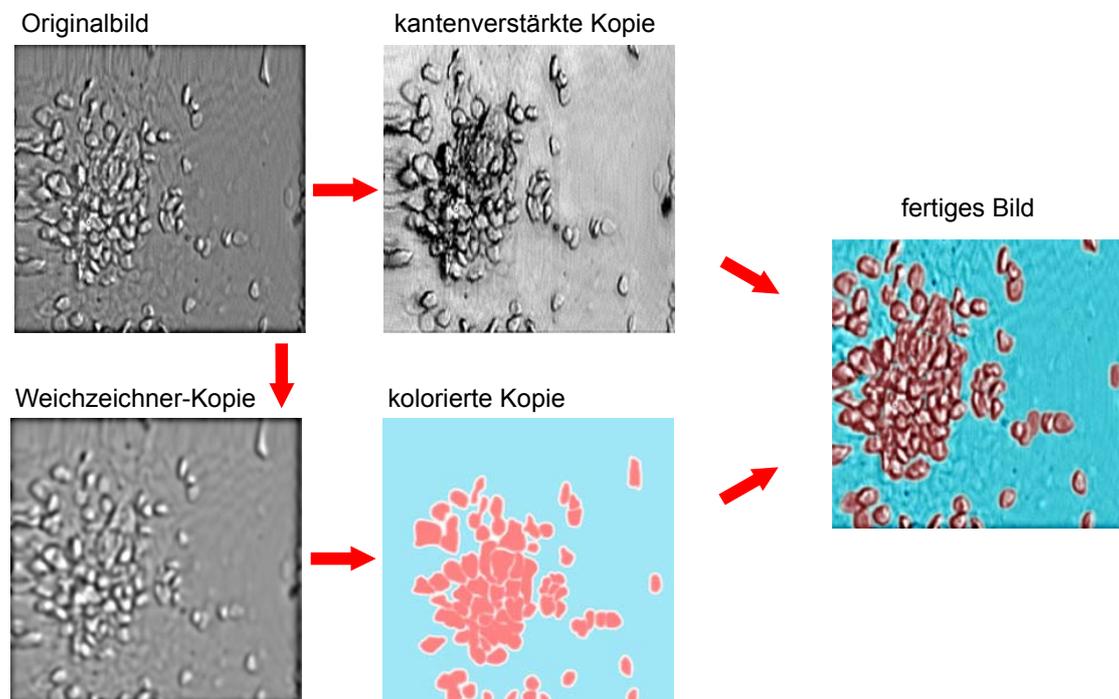
**Abb. 44: Ausziehen eines Tropfens zu einer dünnen Schicht**



**Abb. 45: Menschliche Blutkörperchen**

Die Blutkörperchen im menschlichen Blut haben nur einen Durchmesser von 7,5 Mikrometern. Deshalb stößt ihre Abbildung schon an die Grenzen des einfachen Selbstbaumikroskops.

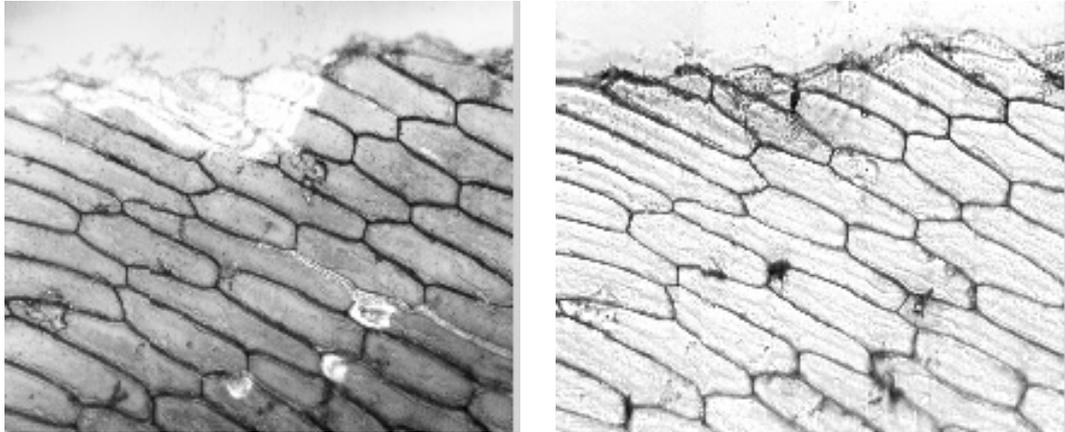
Für eine etwas deutlichere Darstellung muss man ein passendes Bildverarbeitungsprogramm, z. B. Photoshop, bemühen. Zuerst wird vom Originalbild eine mittels Filter etwas verwischte Kopie gezogen und diese manuell mit passenden Farben koloriert. Eine weitere Kopie des Originals wird durch einen Hochpass in der Kantenwiedergabe verstärkt. Die Kombination der kolorierten und der kantenverstärkten Kopie ergeben das gewünschte Endbild.



**Abb. 46: Vorgehen zum Erstellen eines kolorierten Bildes**

Ein weiteres lohnendes Objekt ist eine normale Speisezwiebel. Die unter der harten Schale befindliche äußere sehr dünne Haut lässt sich leicht abziehen. Ein kleines Stück der Haut klebt man zur Untersuchung auf ein dünnes Glasscheibchen.

Passende 0.15 mm dünne Glasscheibchen, die in der normalen Mikroskopie zum Abdecken von Präparaten verwendet werden. Für unser Lasermikroskop benutzen wir sie sowohl als Deckgläser und als Objektträger. Zum Aufkleben der Objekte wird ein klarer Kleber verwendet, z. B. Plastikspray von Kontaktchemie oder UHU Plus 5 Minuten von UHU. Man muss darauf achten, dass möglichst keine Luftblasen mit eingeschlossen werden.



Auflichtbild

Durchlichtbild

**Abb. 47: Zellen in einer Zwiebelschale**

Schon bei mäßiger Vergrößerung können in der Auflicht- und Durchlichtaufnahme die Zellen der Zwiebel gesehen werden.

**Konfokale Durchlichtmikroskopie**

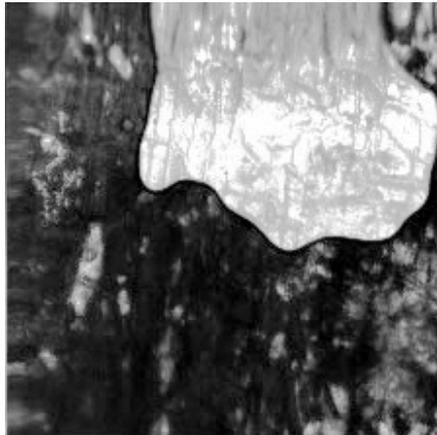
Mit der beschriebenen Anordnung erreicht man keine konfokale Abbildung. Dafür ist ein zweites Objektiv vor der Fotodiode nötig. Zu diesem Zweck müsste man einen zweiten Lesekopf verwenden der über der Probe angeordnet wird. Der Laser in diesem Lesekopf wird selbstverständlich nicht aktiviert. Die optischen Achsen des unteren und oberen Lesekopfs müssen genau aufeinander ausgerichtet werden, ein nicht ganz einfaches Unterfangen. Eine weitere Schwierigkeit ist das nun zwei Fokuseinstellungen vorgenommen werden müssen.

**5.3. Polarisationsmikroskopie**

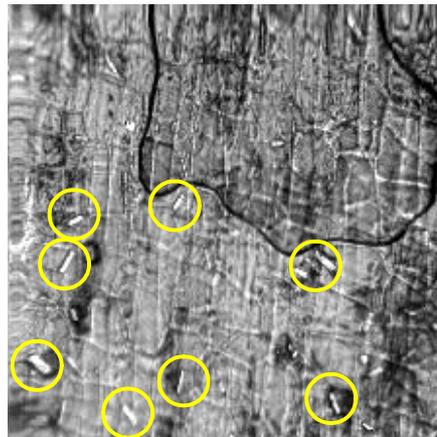
Auch die äußere, harte Schale der Speisezwiebel ist ein interessantes Mikroskopierobjekt. In der Schale sind kleine Kristalle eingelagert. Diese Kristalle bestehen aus Kleesalz, Kalziumoxalat und haben besondere optische Eigenschaften. Kalziumoxalat ist doppelbrechend, und verändert somit den Polarisationszustand von Licht.

Bedingt durch den im Strahlengang befindlichen Strahlteiler ist das Licht von CD-Leseköpfen meist linear polarisiert. Wird nun ein zusätzliches Polarisationsfilter in geeigneter Weise den Strahlengang gebracht, wird das polarisierte Licht durch diesen Filter abgeschwächt und das Bild erscheint dunkel. Die besten Bilder erhält man, wenn das Polfilter so gedreht wird, dass ohne Probe möglichst wenig Licht den Detektor erreicht. Die optisch aktiven Kristalle sind nun in der Lage die Polarisationsrichtung des Lichtes etwas zu drehen, sodass sie im ansonsten dunklen Bild hell aufleuchten.

Reflexbild

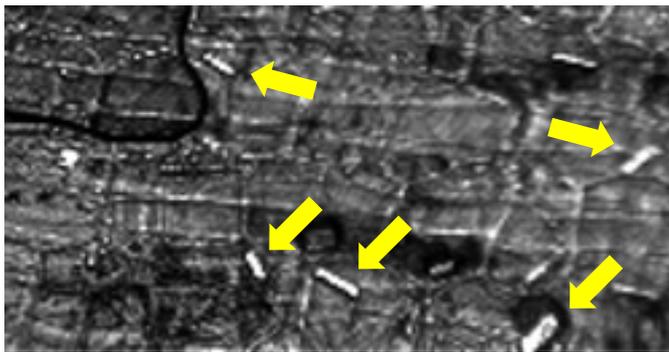


Durchlichtbild mit Polfilter



**Abb. 48: Reflex- und Polarisations-Bild einer Zwiebelschale**

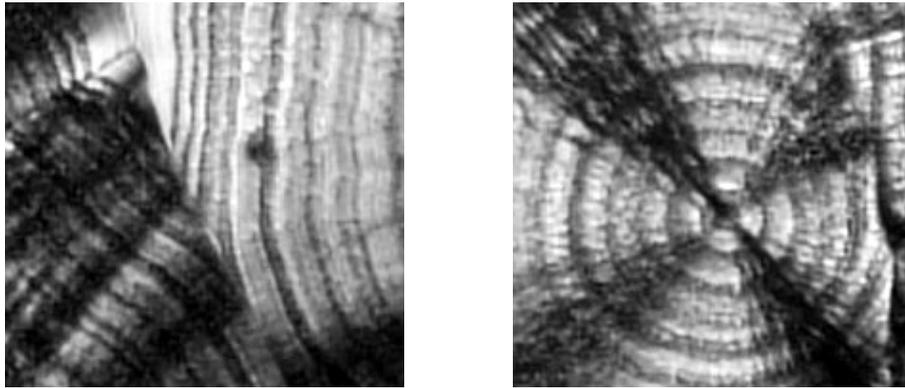
Während das Bild mit reflektiertem Licht außer der störenden Luftblase kaum Einzelheiten bietet, sind im polarisierten Durchlicht die kleinen Oxalatkristalle gut zu sehen.



**Abb. 49: Oxalatkristalle in der Zwiebelschale**

Neben Kalziumoxalat haben viele kristallisierende Substanzen diese optischen Eigenschaften, sodass die Polarisationsmikroskopie ein weites Untersuchungsfeld bietet.

Starke Polarisierungseffekte zeigen auch die Kristalle der Zitronen- und der Ascorbinsäure (Vitamin C). Man kann einen Tropfen der Lösung dieser Substanzen auf einem Glasträger eintrocknen lassen und anschließend im Mikroskop untersuchen.



**Abb. 50: Strukturen auf einem Ascorbinsäure-Kristall**

Aber auch in der Technik spielt die Abbildung mit polarisiertem Licht eine große Rolle. LCD-Displays arbeiten im Allgemeinen mit polarisiertem Licht, so kann man auch für das Mikroskop brauchbare Polarisationsfilter aus alten LCD-Displays gewinnen.

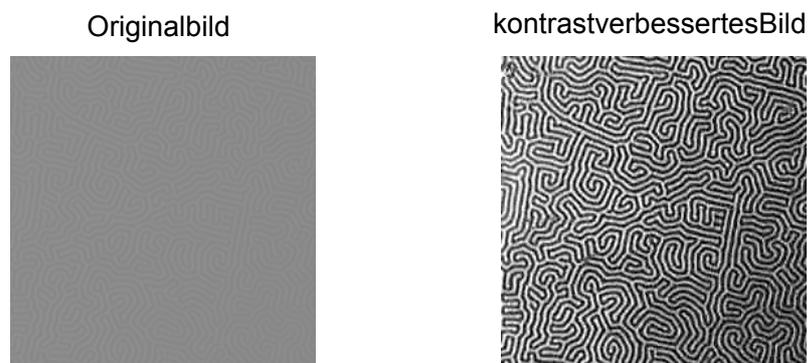
#### 5.4. Kermikroskopie

Interessant sind auch der magneto-optische Kerreffekt und der verwandte Faradayeffekt. Bei manchen Materialien ändern sich die optischen Eigenschaften, wenn sie einem Magnetfeld ausgesetzt werden. Je nach Magnetisierung des Materials ändert sich die Reflektion (magneto-optische Kerreffekt) oder die Transmission (Faradayeffekt) polarisierten Lichts. Ein Material, das diese Eigenschaften in besonderem Maße aufweist, ist Yttriumeisengranat, kurz YIG nach der englischen Bezeichnung Yttriumirongarnet. YIG-Kristalle wurden vor einigen Jahrzehnten in den damaligen Hoffnungsträger der Speicherindustrie, den Magnetblasen-Speichern eingesetzt. Diese Speicherbausteine haben die hochgesteckten Erwartungen nicht erfüllt und wurden von anderen Entwicklungen überholt. Die Restbestände der Bausteine, die bei Surplus-Händlern für wenig Geld noch zu bekommen sind, stellen eine billige Quelle dieses ansonsten schwer zu bekommenden exotischen Materials dar.



**Abb. 51: Magnetblasen-Speicher und der im Inneren befindliche YIG-Chip**

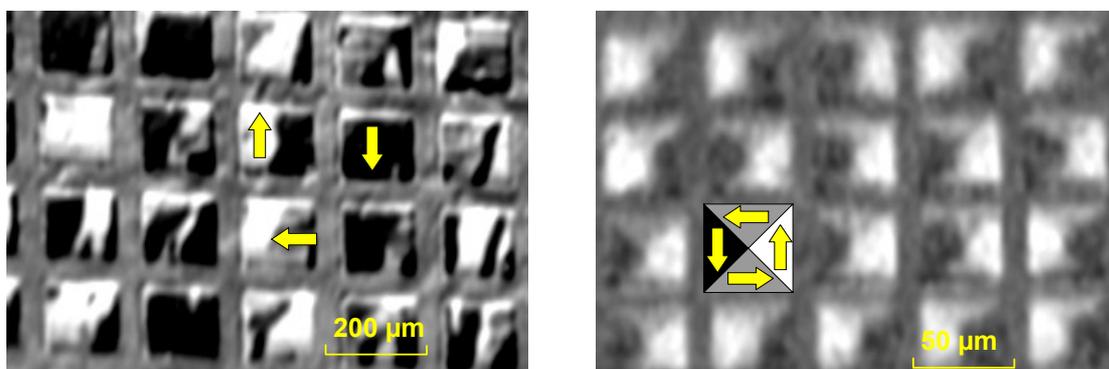
Mit einem starken Messer und etwas Geduld sind die Bausteine zu öffnen und der im Inneren befindliche etwa 4x4 mm großen YIG-Kristall zu entnehmen. Zur mikroskopischen Untersuchung müssen die metallischen Strukturen auf dem Kristall mit einer scharfen Rasierklinge entfernt werden. Um die natürlichen magnetischen Strukturen, die sogenannten Domänen, des Kristalls zu sehen, muss er noch entmagnetisiert werden, was am einfachsten mit einer an einem Regeltrafo angeschlossenen Magnetspule geschieht. Durch die Spule wird ein 50 Hz Wechselfeld erzeugt, dessen Stärke mit dem Regeltrafo innerhalb von einigen Sekunden auf Null gestellt wird. Durch dieses Verfahren wird der YIG-Kristall entmagnetisiert und die kleinen magnetischen Bereiche, die sogenannten Domänen, bilden energetisch günstige Strukturen. Nun kann mit dem Mikroskop ein Bild mit polarisiertem Durchlicht erstellt werden. Bei richtiger Einstellung werden dann diese Domänen durch den Faradayeffekt sichtbar.



**Abb. 52: Domänenstruktur in einem YIG-Kristall**

Der Kontrast des Faradaybildes ist sehr gering und muss durch anschließende Bearbeitung angehoben werden. Nach der Bildverarbeitung sieht man die erstaunlichen, künstlerisch anmutenden, fraktalen Strukturen der magnetischen Domänen.

Der magnetooptische Kerreffekt findet bei der Reflektion von polarisiertem Licht an meist metallischen Oberflächen statt. Durch den Effekt wird die Polarisationsrichtung des reflektierten Lichtes um sehr kleine Winkel gedreht. Auch hier werden interessante Bilder nach der Entmagnetisierung erhalten. Da das Material nun makroskopisch gesehen unmagnetisch ist, müssen sich die Domänen so anordnen, dass sich deren Felder kompensieren. Bei einzelnen quadratischen Flächen mit 180  $\mu\text{m}$  Kantenlänge geschieht das in unregelmäßiger Weise. Werden die Flächen kleiner, entsteht eine neue Ordnung. Jedes Quadrat bildet vier dreieckige Domänen, das sogenannte Landaumuster. Auch hier kompensieren sich die Felder.

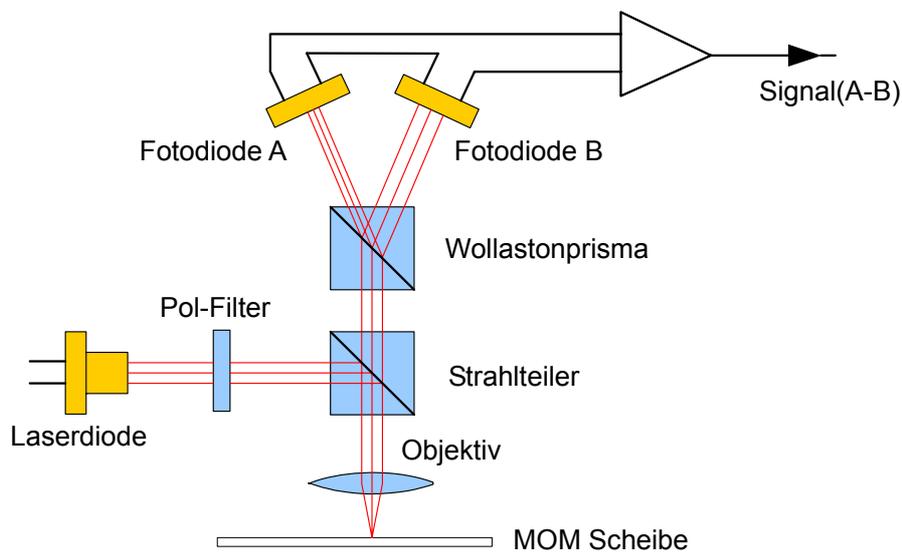


**Abb. 53: Domänenstrukturen in Permalloy-Filmen**

Da die Winkeldrehung beim magnetooptischen Kerreffekt sehr klein ist, wird auch der Kontrast der Bilder verschwindend gering. Man muss sehr viele Messungen mitteln, um die Strukturen im Rauschen sichtbar machen zu können. Für die Bilder der Domänenstrukturen wurden deshalb Rasterzeiten von bis zu zehn Stunden notwendig.

#### 5.4.1. MO-Leseköpfe

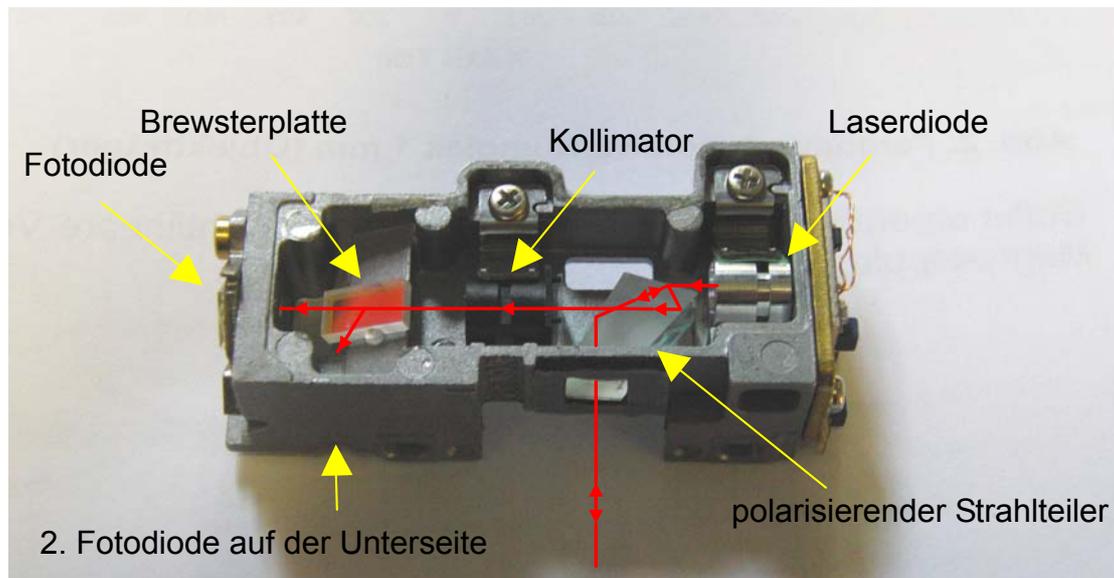
Eine Anwendung des magnetooptischen Kerreffekts findet auch bei einer anderen Speichertechnologie Verwendung. Bei MO-Laufwerken (magneto-optic) sind ähnlich wie bei einer Festplatte die Informationen in magnetischen Strukturen gespeichert, nur werden sie hier nicht mit einem magnetischen Lesekopf gelesen, sondern über die Kerrdrehung eines polarisierten Lichtstrahls detektiert. Abgesehen von speziellen polarisierenden optischen Bauteilen ist der der Strahlengang in einem MO-Laufwerk mit dem eines CD-Laufwerkes vergleichbar. Auch MO-Leseköpfe eignen sich deshalb für den Bau eines Lasermikroskops, speziell, wenn man optisch aktive Materialien oder magnetische Strukturen untersuchen will.



**Abb. 54: Aufbau eines MO-Lesekopfes**

Das Bild zeigt den prinzipiellen Aufbau eines MO-Lesekopfes. Aus dem Licht des Lasers wird eine Polarisationsrichtung mit einem Polfilter selektiert. Der nun linear polarisierte Lichtstrahl trifft über einen Strahlteiler und das Objektiv auf die Speicherdisk. Je nach dem Zustand der Speicherschicht ist das von ihr reflektierte Licht durch den Kerreffekt in seiner Polarisationsrichtung gedreht. Nach der Reflektion durchläuft das Licht nach dem Strahlteiler ein Wollastonprisma. Dieses Bauteil ist in der Lage Licht mit unterschiedlichen Polarisationszuständen in unterschiedliche Richtungen abzulenken. Wurde die Polarisationsrichtung auf der Speicherschicht in eine Richtung gedreht, wird nun die Fotodiode A beleuchtet, wurde die Richtung in die andere Richtung gedreht gibt Diode B ein Signal ab. Aus der Differenz beider Signale kann der Magnetisierungszustand der Speicherschicht und somit das eingeprägte Bitmuster rekonstruiert werden. Obiger Strahlengang ist aber nur eine von vielen Realisierungsmöglichkeiten. Da das Licht mancher Laserdioden schon linear polarisiert ist, kann in diesem Fall das Pol-Filter eingespart werden. Auch das wegen seines Materials (kristalliner Quarz oder Kalzit) teure

Wollastonprisma kann durch billigere polarisierende Strahlteiler oder einem Brewsterspiegel ersetzt werden.

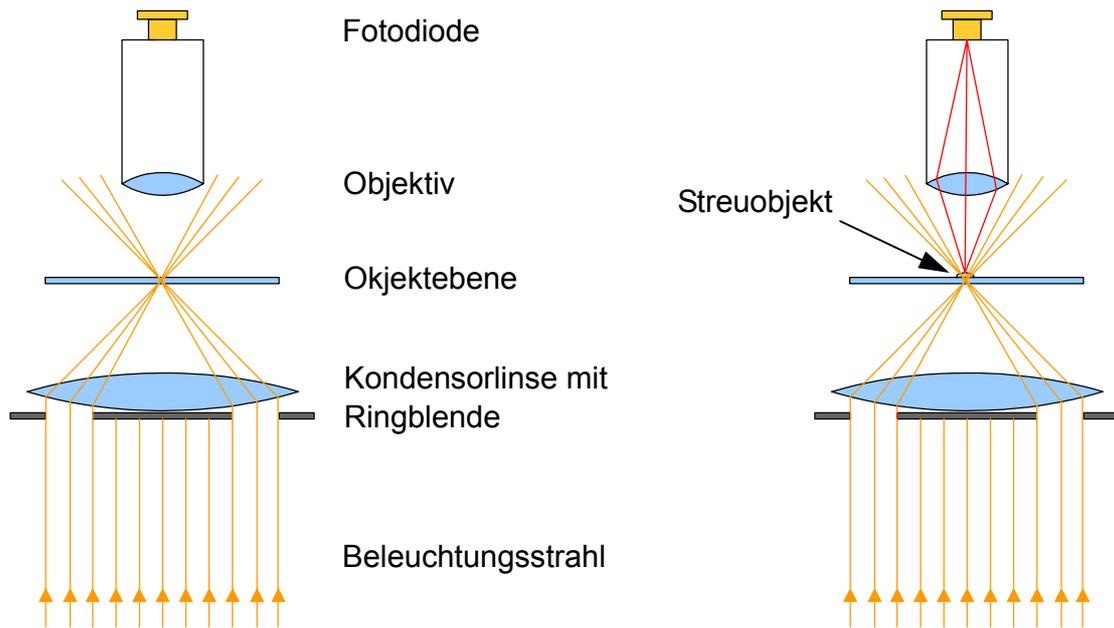


**Abb. 55: Praktische Ausführung eines einfachen MO-Lesekopfes**

Kleinere MO-Laufwerke mit ein bis zwei Gigabyte sind mittlerweile für wenige Euros erhältlich und eignen sich hervorragend für Experimente. Auch die vor Jahren bei Musik Enthusiasten sehr beliebte MiniDisk arbeiten nach dem magnetooptischen Prinzip.

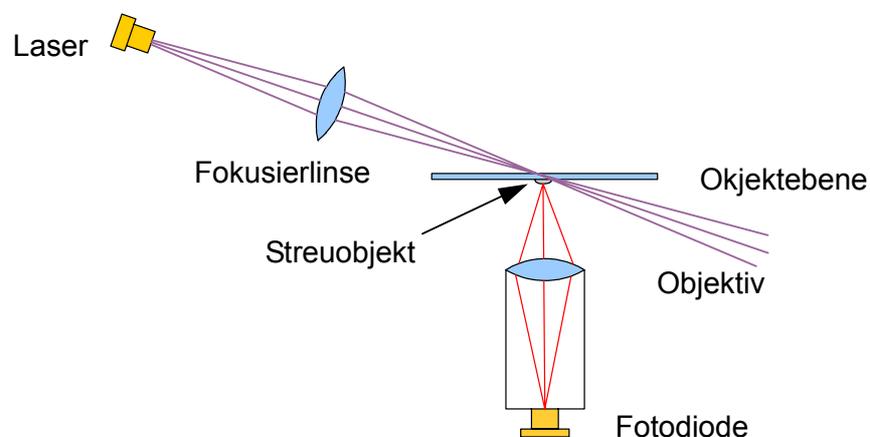
### 5.5. Dunkelfeldaufnahmen

Von einer Dunkelfeldaufnahme spricht man, wenn nicht das direkte Licht der Beleuchtung zum Detektor gelangt, sondern nur im Objekt stark gebeugtes, gestreutes oder gebrochenes Licht zum Aufbau des Bildes beiträgt. In der üblichen Mikroskopie wird für die Dunkelfeldtechnik eine besondere Kondensorlinse mit einer ringförmigen Dunkelfeldblende verwendet. Da die Apertur (der Öffnungswinkel) des Kondensors größer ist als die des Objektivs, gelangt bei einem ungestörten Strahlengang kein Licht in das Objektiv und somit auch auf die Fotodiode, das Bild bleibt dunkel. Wird aber vom Objekt Licht abgelenkt oder gestreut kann es das Objektiv und die Fotodiode erreichen und ein Signal erzeugen. Das Dunkelfeldbild wird somit vor allem Kanten und sonstige Streuzentren im Objekt zeigen. Die Intensität des gestreuten Lichtes ist aber meist sehr gering, sodass eine kräftige Beleuchtung notwendig wird.



**Abb. 56: Strahlengang im Dunkelfeld-Durchlichtmikroskop**

Der Strahlengang der CD-Köpfe eignet sich nicht für eine Dunkelfeldbeleuchtung, da das Einfügen eines entsprechenden Blendensystems nicht möglich ist. Eine improvisierte Dunkelfeld Beleuchtung kann aber durch einen seitlich angebrachten Laser erreicht werden. Der Laser im CD-Kopf wird dann natürlich abgeschaltet. Auch mit dieser Methode kann erreicht werden, dass kein direktes Licht, sondern nur im Objekt Gestreutes auf die Fotodiode gelangt. Um ein ausreichend großes Signal zu erhalten, muss ein stärkerer Laser verwendet werden, z. B. die Pumpdiode aus einem grünen Laserpointer oder der Laser aus einem DVD-Brenner mit hoher Brenngeschwindigkeit. Die Laserleistung ist umso größer je höher die Brenngeschwindigkeit ist, für die das System ausgelegt wurde. Die Verwendung einer DVD-Diode hat auch noch den Vorteil, dass mit einer kürzeren Wellenlänge gearbeitet wird. Die 660 nm Strahlung ist gut sichtbar und somit besteht kaum die Gefahr, dass man versehentlich in den Strahl blickt. Ein weiterer Vorteil liegt in der Frequenzabhängigkeit der Lichtstreuung. Die Streuung und damit der Signalpegel an der Fotodiode wird mit steigender Lichtfrequenz viel größer.



**Abb. 57: Vereinfachte einseitige Dunkelfeldbeleuchtung**

## 5.6. Interferenzmikroskopie

Durch das monochromatische und kohärente Licht des Lasers treten an dünnen Schichten Interferenzen auf. Legt man auf eine Glasplatte eine Konvexlinse mit großem Krümmungsradius, so werden die sogenannten Newtonringe sichtbar. Licht, das durch die Linse auf die Glasplatte fällt, wird zum Teil an der Unterseite der Linse und zu Teil an der Oberseite der Glasplatte reflektiert. Beide Strahlen interferieren und je nach Wegunterschied kommt es zur Verstärkung oder zur Auslöschung des reflektierten Lichtes. Da der Wegunterschied mit steigendem Radius schnell größer wird, entsteht eine Reihe konzentrischer Ringe mit kleiner werdendem Abstand. Der Abstand der Ringe gibt die Dicke des Luftkeils zwischen Linse und Glasplatte wieder.

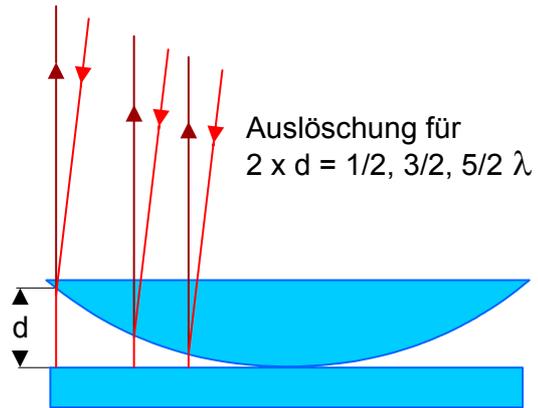
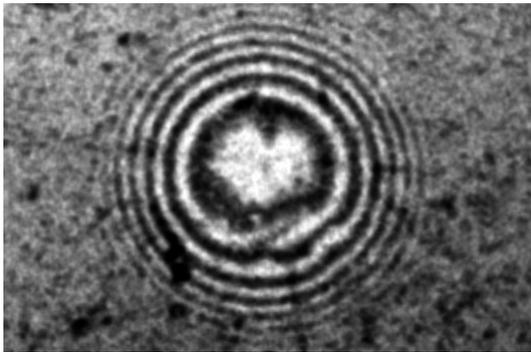


Abb. 58: Newtonringe und ihre Entstehung

Auch das Durchlichtbild einer Lackschicht zeigt Interferenzstreifen, deren Abstand die lokale Änderung der Schichtdicke zeigt. Der Schichtdickenunterschied zwischen zwei Ringe beträgt  $\lambda/2$  oder  $780/2 = 390$  Nanometer.

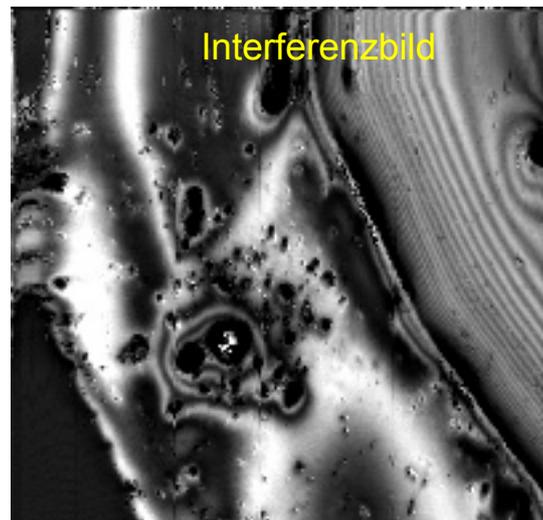
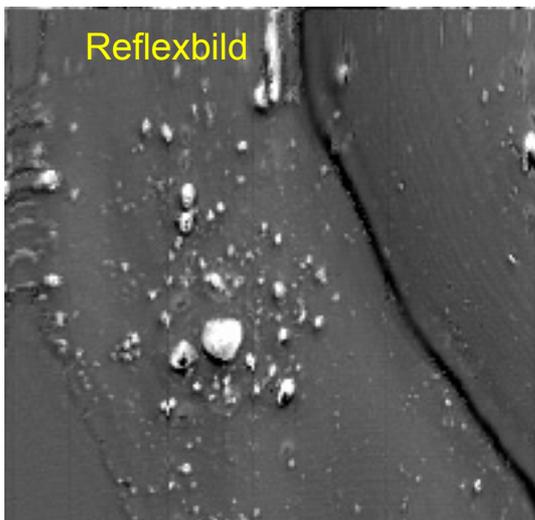


Abb. 59: Reflex- und Interferenzbild einer Lackschicht

## Fluoreszenzmikroskopie

Viele Stoffe zeigen das Phänomen der Fluoreszenz. Werden diese Stoffe mit Licht einer bestimmten Wellenlänge angeregt, strahlen sie Licht in einer anderen Farbe, meist mit längerer Wellenlänge ab. Das Auftreten der Fluoreszenz hängt von der

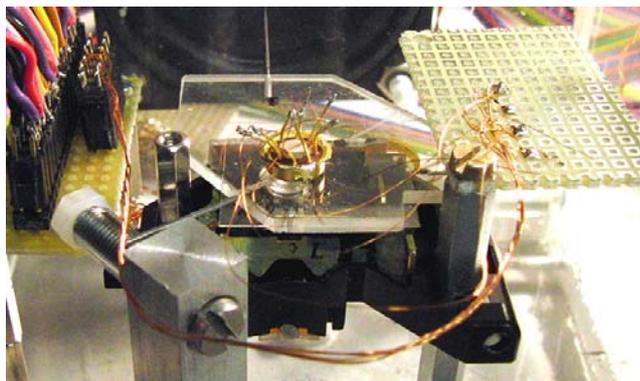
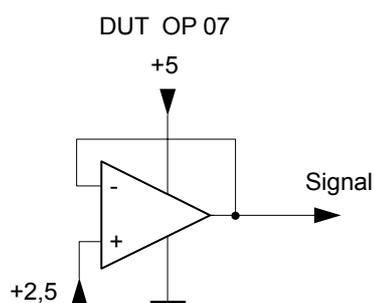
Wellenlänge des eingestrahnten Primärlichtes ab. Während bei roten und gelben Primärlicht nur wenige Stoffe fluoreszieren ändert sich das im grünen und vor allem blauen und ultravioletten Teil des Spektrums. Im blauen und ultravioletten Licht leuchten viele Materialien in ihren Fluoreszenzfarben. Das infrarote Licht der Laserdiode ist mit 780 Nanometern Wellenlänge kaum in der Lage Fluoreszenz auszulösen. Auch würde die abgestrahlte Sekundärwellenlänge noch weiter im Infraroten liegen und könnte möglicherweise von der Fotodiode nicht mehr detektiert werden. Die spektrale Empfindlichkeit von Siliziumfotodioden endet bei etwa 1000 nm für noch größere Wellenlänge ist das Bauteil blind.

Anders liegen die Verhältnisse beim blauen Licht eines Blu-ray-Lesekopfes. Die Laserdioden bei der Blu-ray-Technologie strahlen im violetten Bereich bei 405 nm und sind geradezu ideal für die Fluoreszenzexperimente.

Die Fluoreszenzmikroskopie kann sowohl im Durchlicht- wie im Auflichtverfahren arbeiten. Wichtig ist, dass die Empfängerdiode nur das meist schwache sekundäre Fluoreszenzlicht anspricht und nicht auf die starke Primärstrahlung. Erreicht wird das durch passende Filter im Strahlengang. Ein gelbgrünes Kantenfilter wird nur die grünen, gelben und roten Fluoreszenzfarben durchlassen nicht aber das violette Primärlicht des Lasers.

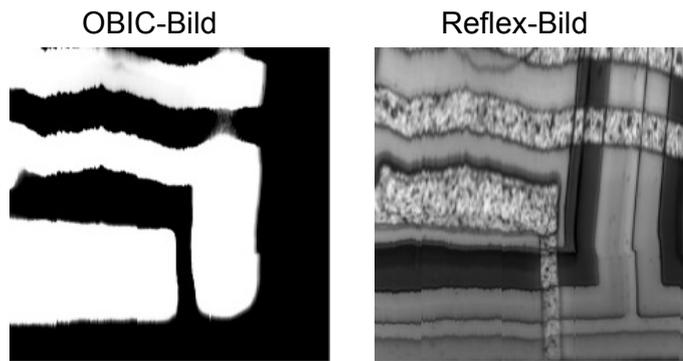
## 5.7. OBIC-Aufnahmen

Bei sogenannten OBIC (optical beam induced contrast) werden die durch den Laserstrahl induzierten Ladungsträger in einer Halbleiterprobe zur Erzeugung des Bildes verwendet. Auch für diese Versuche musste der entblößte OP 07 Verstärker erhalten. Dazu wurde der Verstärker in einer normalen, invertierenden Schaltung benützt. Das Signal am Ausgang wird als Helligkeitssignal für das Rasterbild verwendet. Beim Rastern des Lasers über den Chip werden wie erwähnt im Silizium Ladungsträger generiert. Entstehen diese Ladungsträger in einem Transistor oder einer Diode des Operationsverstärkers, werden die Biasströme im Verstärker verändert und somit ändert sich auch die Ausgangsspannung.



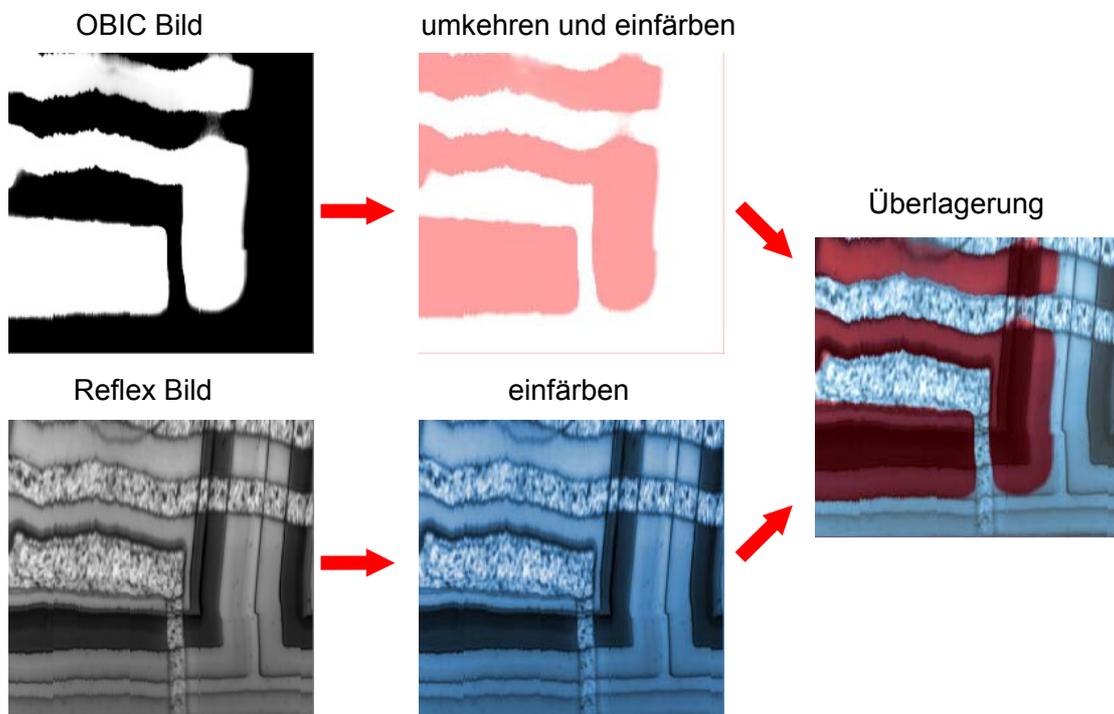
**Abb. 60: Beschaltung des OP07 zur OBIC-Messung**

Trifft der Laser auch die für Licht undurchlässige Aluminiummetallisierung, bleibt die Ausgangsspannung unverändert. Zusätzlich wurden im zweiten Kanal das Signal des reflektierten Lichtes aufgezeichnet.



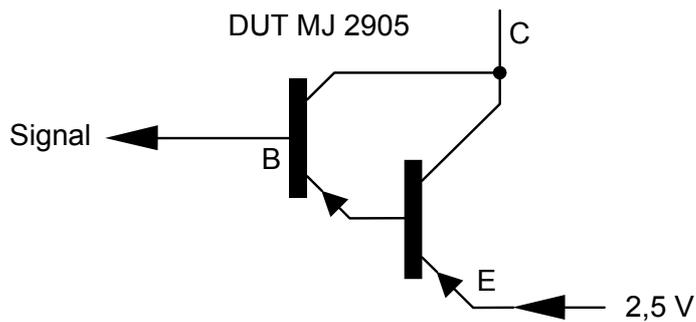
**Abb. 61: Reflex- und OBIC-Bild**

Zur besseren Visualisierung wurden anschließend das OBIC- und das Reflex-Bild eingefärbt und überlagert.



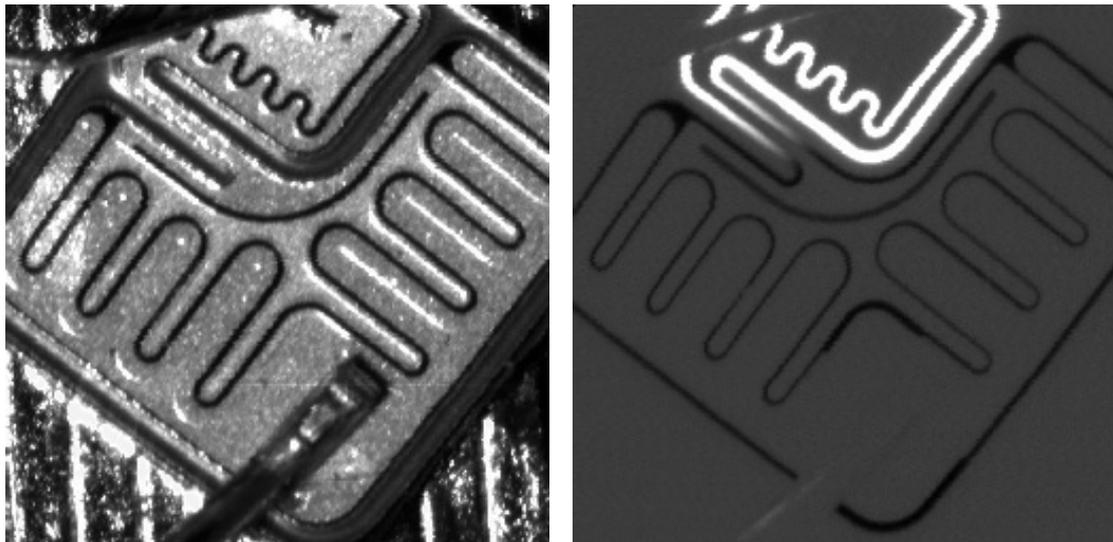
**Abb. 62: Überlagerung von Reflex- und OBIC-Bild**

Im Überlagerungsbild ist die aktive Transistorfläche durch die rote Einfärbung deutlich sichtbar.  
Das nächste Bild zeigt die Chipfläche eines Leistungstransistors vom Typ MJ 2905.



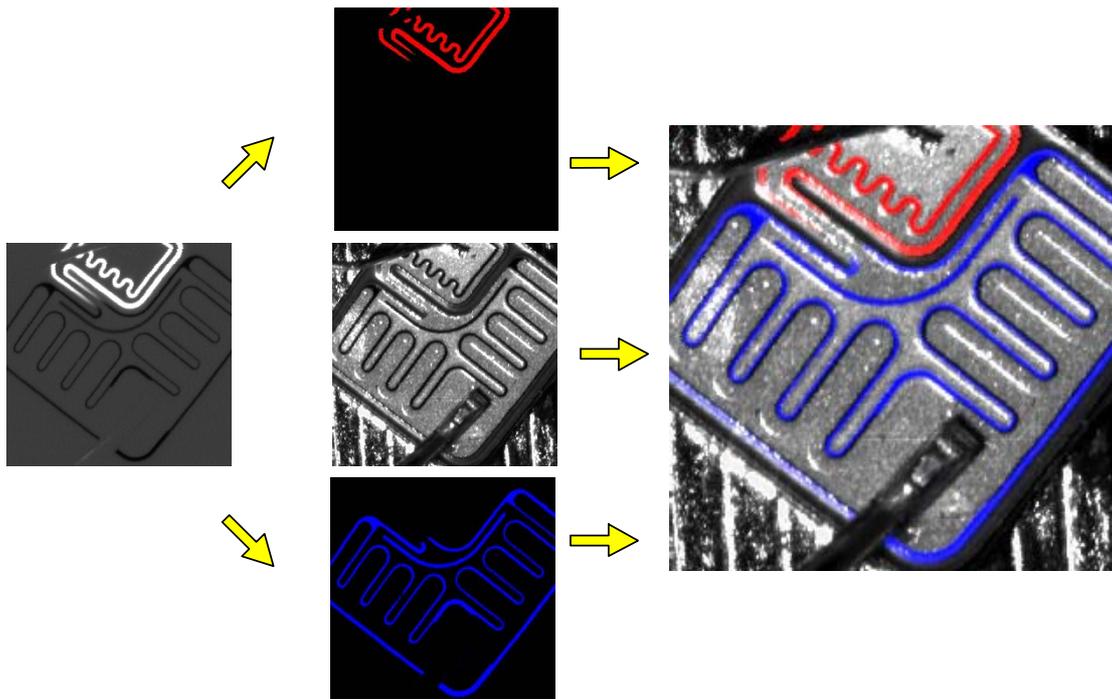
**Abb. 63: Beschaltung des Darlington-Transistors für OBIC-Bilder**

Der Chip ist ziemlich groß und hat eine Kantenlänge von 5 x 5 mm. Zum Abtasten wurde ein Schrittmotorscanner verwendet. Nachdem die Metallkappe des TO-3 Gehäuses geöffnet wurde, ist die Chipfläche zugänglich. Oben im Bild ist der Basisanschluss und die Eingangsstufe des Darlingtontransistors, unten der Emitter des Ausgangstransistors mit seinem massiven Drahtanschluss. Das Signal für das OBIC-Bild wurde zwischen Emitter und Basis abgenommen. Interessant ist der Wechsel der Polarität des Signals zwischen dem ersten und dem zweiten Transistors. Die Beleuchtung des ersten Transistor liefert ein positives, die des zweiten ein negatives OBIC-Signal.



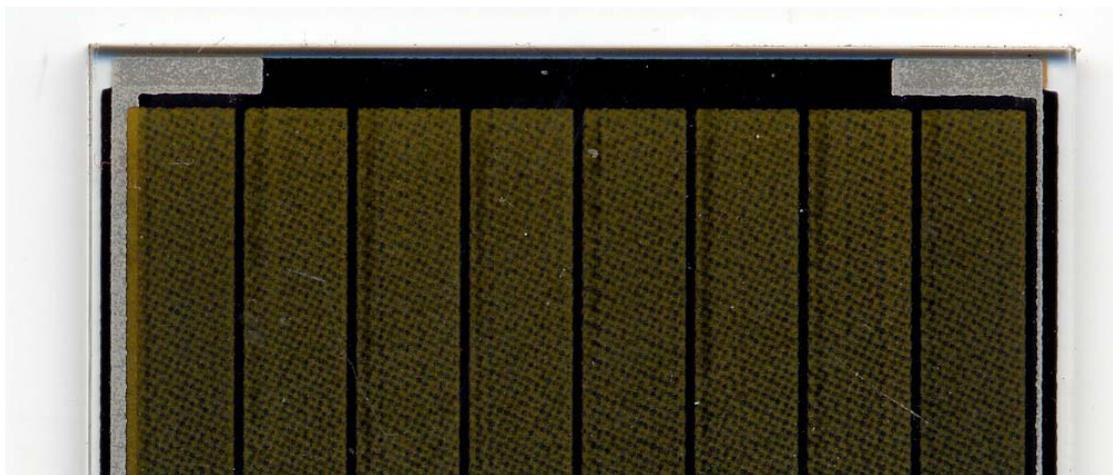
**Abb. 64: Reflex- und OBIC-Bild eines Leistungstransistors**

Durch eine entsprechende Einfärbung der Bilder kann zwischen beiden Transistorflächen unterschieden werden.

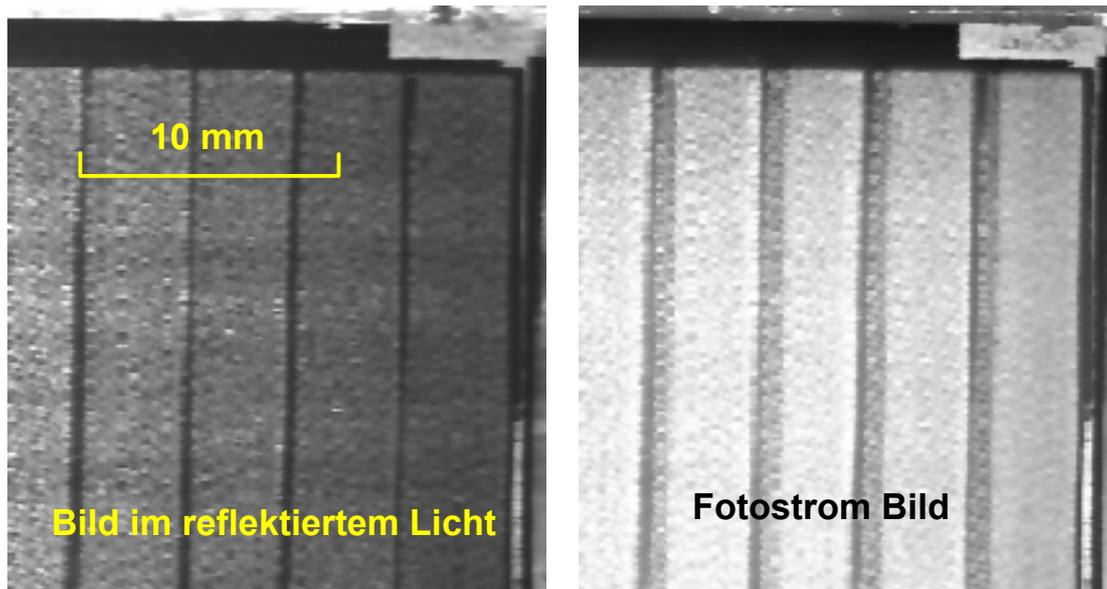


**Abb. 65: Einfärbung des Bildes entsprechend der Polarität**

Besonders wichtig ist die OBIC-Methode bei elektrooptischen Bauteilen. Bei Solarzellen ist der generierte Fotostrom einer der wichtigsten Merkmale für die Funktion des Panels. Auch die folgenden Bilder wurden mit dem Schrittmotorscanner aufgenommen um einen größeren Bereich von 20 x 20 mm sichtbar zu machen.



**Abb. 66: Kleine Solarzelle von Panasonic**

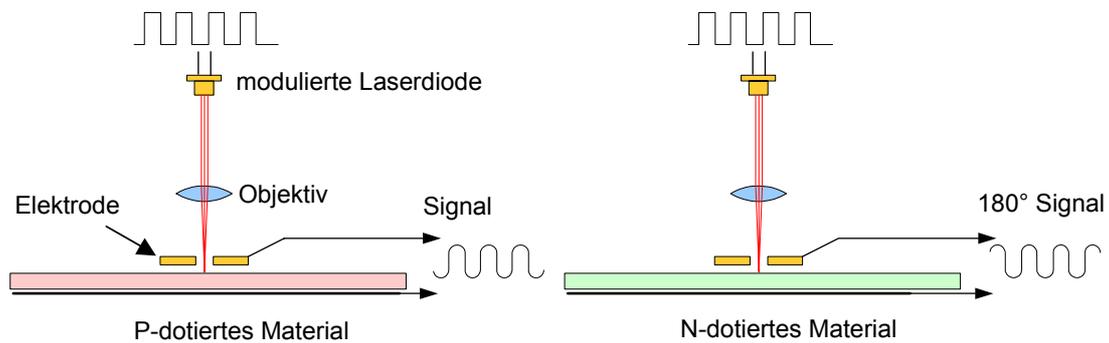


**Abb. 67: Gescanntes Bild der Solarzelle im reflektierten Licht und mittels Fotostroms**

Interessant sind die zur Stromabnahme aufgebrauchten Kontaktstreifen, die im OBIC-Bild wesentlich breiter ausfallen, als auf der Aufnahme im reflektierten Licht. Daraus kann man schließen, dass diese Kontakte auch das in der Nähe befindliche Silizium verändern und dadurch den Fotostrom verringern. Fraglich ist, weshalb auch die Kontaktfläche rechts oben auf dem Fotostrombild hell erscheint. Der Kontakt besteht aus einer Metallisierung, die nicht halbleitend ist und sicher keinen Fotostrom erzeugt. Wahrscheinlich wird der Laser von der Fläche auf die lichtempfindliche Schicht gestreut und so der Fotostrom erzeugt.

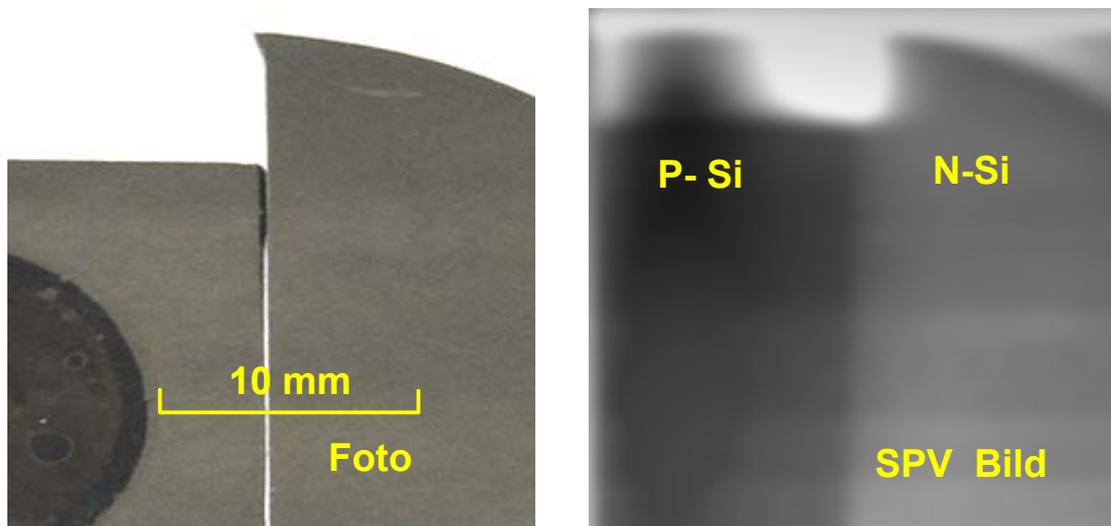
### **5.8. Oberflächenfotoeffekt**

An vielen Halbleiteroberflächen tritt der Oberflächenfotoeffekt auf. Auch hier werden durch die einfallenden Photonen Ladungsträger generiert. Im Gegensatz zur OBIC-Methode muss zur Messung dieser Ladungen die Probe aber nicht zwingend kontaktiert werden, sondern man kann diese auch kontaktlos über die erzeugten elektrischen Felder detektieren. Zu diesem Zweck wird die Probe durch eine transparente aber leitfähige Elektrode beleuchtet. Oder der Laserstrahl wird durch ein Loch in einer massiven Elektrode geführt. Die hochempfindlichen Halbleiterscheiben können ohne die Gefahr einer Verschmutzung berührungslos gemessen werden.



**Abb. 68: Schema der SPV\_Messung**

Durch die Bestimmung der Oberflächenfotospannung (SPV surface photo voltage) gewinnt man wichtige Informationen über die Eigenschaften des Halbleiters. So können neben der Polarität der Dotierung auch Diffusionslängen und die wichtige Lebensdauer der Ladungsträger gemessen werden.



**Abb. 69: Foto und SPV-Bild von zwei Siliziumproben**

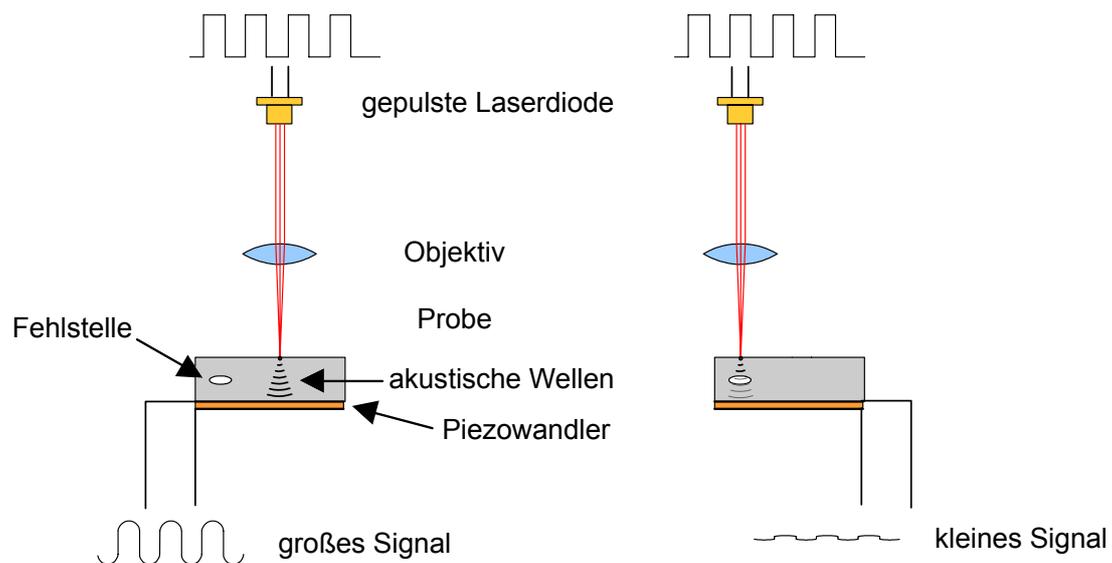
Für die Messung wurden zwei Siliziumscheiben, eine mit n- und eine mit p-Dotierung nebeneinandergelegt und abgescannt. Während im Foto der beiden Wafer kaum Unterschiede zu erkennen sind, zeigt sich im SPV-Bild die unterschiedliche Dotierung der beiden Halbleiter.

Durch die Diffusion, der erzeugten Ladungsträger und deren Messung über das ausgedehnte elektrische Feld, ist allerdings die räumliche Auflösung nicht sehr groß und beträgt bestenfalls einige 100 Mikrometer. Nicht nur das übliche Halbleitermaterial Silizium zeigt den Oberflächenfotoeffekt, sondern auch andere halbleitende Materialien, interessanterweise auch vergammelte Kupferflächen. Der Belag auf Kupferflächen besteht oft aus  $\text{Cu}_2\text{O}$ , einem halbleitenden Kupferoxid, das

früher mal für Trockengleichrichter verwendet wurde. Voraussetzung für das Auftreten des Oberflächenfotoeffekts bei Kupferoxid ist, dass das anregende Licht die Bandlücke von etwa 2 eV überschreitet. Das infrarote Licht der CD-Laser mit 1,6 eV ist dazu nicht in der Lage, wohl aber das Licht eines grünen Laserpointers (532 nm, ca. 2,2 eV) oder das einer Blu-ray-Laserdiode (405 nm, ca. 3 eV)

## 5.9. Thermalwave Mikroskopie

Besonders bei der Charakterisierung von Halbleiterchips hat sich die sogenannte Thermalwave Mikroskopie bewährt. Trifft der abtastende Laser auf die Probe, wird sie an dieser Stelle durch die absorbierte Energie etwas erwärmt. Ist der heizende Laserstrahl moduliert, entstehen durch die ständige Erwärmung und Abkühlung Wellen, die sich in der Probe ausbreiten und an anderer Stelle mit geeigneten Methoden detektiert werden. Die Ausbreitung dieser Wellen wird durch die Struktur im Inneren der Probe beeinflusst. Die Thermalwave Mikroskopie erlaubt somit Einblicke ins Innere einer Probe, die sonst nicht möglich sind. Diese thermischen Wellen selbst sind schwer zu detektieren. Leichter geht das mit den von den Wellen ausgelösten Druckschwankungen. Diese kleinen Druckschwankungen sind Schallwellen und können auch wie diese mit Mikrofonen gemessen werden. Folgerichtig wird deshalb die Thermalwave Technik auch fotoakustische Mikroskopie genannt. Während die Fotoakustik für die Gasanalyse ein seit langem bekanntes und verwendetes Verfahren ist, wurde ihre Eignung zur Mikroskopie von Festkörpern erst spät entdeckt.

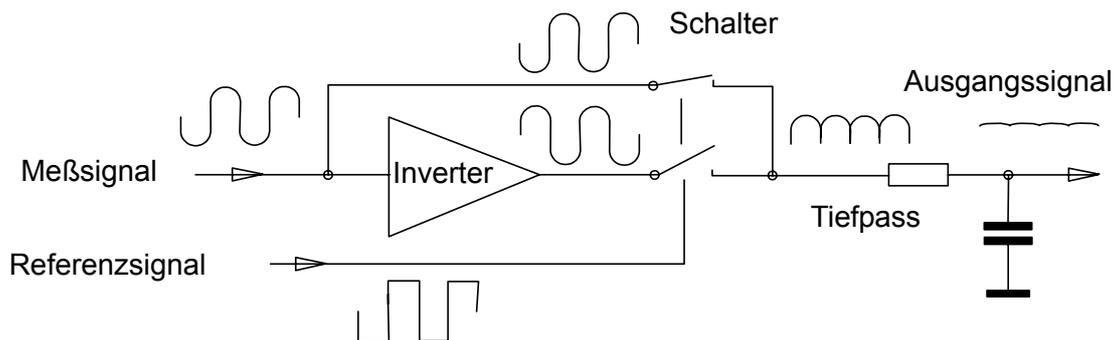


**Abb. 70: Aufbau einer fotoakustischen Messung**

Die Detektion der Wellen kann im einfachsten Fall mit einem Piezowandler erfolgen. Die so erhaltenen Signale sind aber sehr klein, sodass man mit großen Laserleistungen arbeiten muss, um den Effekt im Rauschen sehen zu können. Der Laser im Schreib/Lesekopf eines DVD-Brenners sollte, zumindest gepulst, in der Lage sein die Lichtleistungen von 100 mW und mehr zu erzeugen und so diese Bedingung zu erfüllen. Auf der Empfängerseite sollte ein Lockin-Verstärker eingesetzt werden. Neben einer rauscharmen Verstärkung erhält man vom Lockin-Verstärker auch Information über die Phasenlage des Signals. Die Phase wiederum ist ein Maß für die Laufzeit der Wellen in der Probe, sodass auch diese zur Bilderzeugung dienen kann.

### 5.9.1. Lockin-Verstärker

Diese Stelle scheint geeignet, den schon mehrfach erwähnten Lockin-Verstärker näher zu betrachten. Das Basisprinzip des Lockin-Verstärkers ist das eines Synchrongleichrichters. Durch diese Schaltung wird erreicht, dass nur Signale einer bestimmten Frequenz und Phase zum Ausgangssignal beitragen. Störfrequenzen und Rauschen können auf diese Art und Weise wirkungsvoll unterdrückt werden. Dieser Synchrongleichrichter ist im Grunde ein Mischer, dessen erster Eingang das Messsignal  $F_{\text{mess}}$  und dessen anderer Eingang ein Referenzsignal  $F_{\text{ref}}$  erhält. Am Ausgang des Mixers steht dann das Summensignal ( $F_{\text{mess}} + F_{\text{ref}}$ ) und das Differenzsignal ( $F_{\text{mess}} - F_{\text{ref}}$ ) zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung. Haben die beiden Eingangssignale die gleiche Frequenz ( $F_{\text{mess}} = F_{\text{ref}}$ ) wird die Differenzfrequenz zu Null, ist somit eine Gleichspannung, deren Höhe bei konstantem Referenzsignal vom Messsignal bestimmt wird. Die ebenfalls entstehende Summenfrequenz ( $F_{\text{mess}} + F_{\text{ref}} = 2F_{\text{ref}}$ ) spielt hier keine Rolle und wird durch einen dem Mischer folgenden Tiefpass beseitigt. Von der Referenzfrequenz abweichende Eingangssignale ergeben keine Gleichspannung, sondern Wechselspannungen, die ebenfalls vom Tiefpass unterdrückt werden. Je niedriger die Grenzfrequenz des Tiefpasses umso wirkungsvoller werden so Störungen unterdrückt. Mit sinkender Grenzfrequenz steigt aber natürlich auch die Zeit, die die Schaltung braucht, um einem sich ändernden Messsignal zu folgen. Die Wahl der Zeitkonstante des Tiefpasses ist ein Kompromiss zwischen hoher Störunterdrückung und hoher Messgeschwindigkeit.



**Abb. 71: Das Prinzip des Synchrongleichrichters**

Bei den heutzutage in der Forschung verwendeten Lockin-Verstärkern werden der Mischer und der folgende Tiefpass durch die entsprechenden mathematischen Operationen nachgebildet. Schnelle Analogdigitalwandler digitalisieren das Eingangssignal und Signalprozessoren erledigen die notwendige Mathematik zur Mischung und Tiefpassfilterung in Echtzeit auch für hohe Messfrequenzen. Nach diesem Prinzip gebaute Geräte sind sehr flexibel und können durch Änderung der Programmparameter an die unterschiedlichsten Messaufgaben angepasst werden. Für eigene Versuche auf diesem Gebiet empfiehlt sich die Verwendung entsprechender Evaluationboards von Signalprozessoren, die verschiedene Hersteller auf den Markt bringen.

Für einfachere Messaufgaben ist aber auch rein analoge Realisierung der Schaltung geeignet. Obwohl man den Synchrongleichrichter auch mit einigen Operationsverstärkern bauen kann, empfiehlt sich doch die Verwendung einer speziell für diesen Zweck entwickelten Schaltung.

Der Verfasser empfiehlt den Baustein AD 630 von Analogdevice, der bei den üblichen Distributoren gut erhältlich und mit etwa 25 Euro nicht allzu teuer ist.

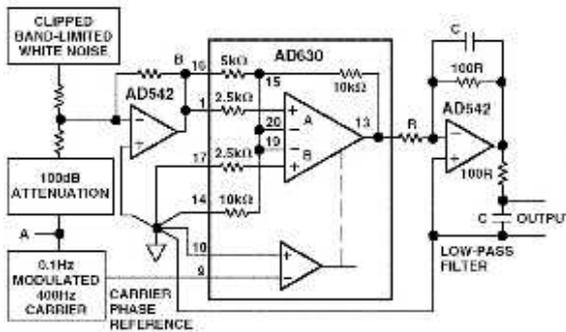


Figure 14. Lock-In Amplifier

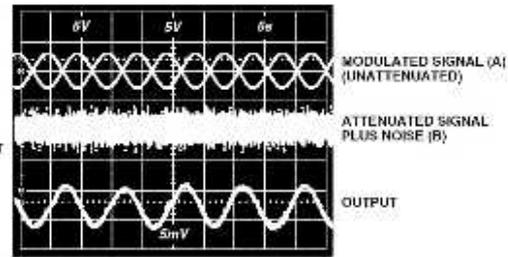


Figure 15. Lock-In Amplifier Waveforms

## Abb. 72: Lockin-Verstärker mit AD630

Der Auszug aus dem Datenblatt des AD 630 zeigt den Aufbau eines einfachen Lockin-Verstärkers. Es zeigt auch wie aus einem scheinbar hoffnungslos verrauschtem Signal die Messfrequenz gewonnen werden kann. Allerdings geht bei dieser einfachen Schaltung die Phaseninformation des Signals verloren.

Will man auch die Phase des Signals messen, müssen zwei Mischbausteine verwendet werden. Auf beide Mischer wird das Messsignal gegeben. Während der eine Mischer wie üblich das Referenzsignal (Sinussignal) erhält, wird an dem anderen das um  $90^\circ$  phasenverschobene Referenzsignal (Cosinussignal) eingespeist. Aus den Ausgangssignalen der beiden Mischer kann das Messsignal und das Phasensignal gewonnen werden. Das hat auch den Vorteil, dass der Betrag des Messsignals unabhängig von der Phasenlage wird. Bei der obigen einfachen Schaltung ist das nicht der Fall. Würde sich dort die Phase des Messsignals zur Phase des Referenzsignals ändern, änderte sich trotz gleicher Amplitude des Messsignals die Ausgangsspannung.

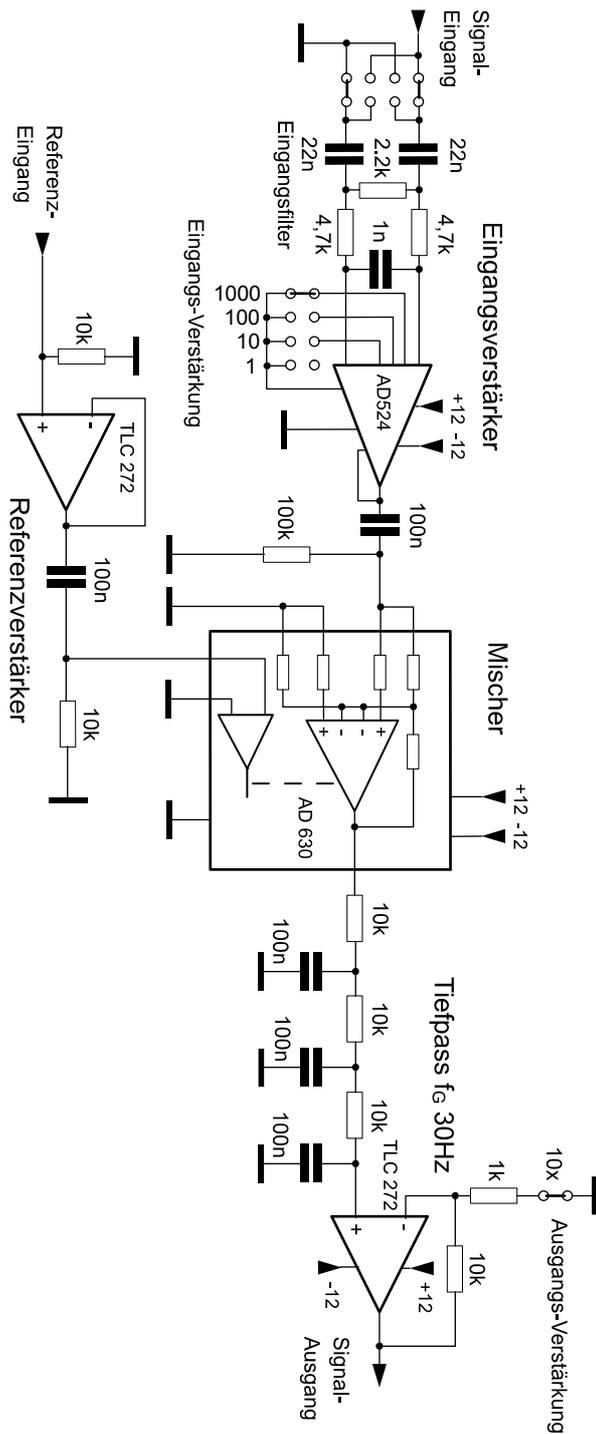
Bei Messaufgaben, bei denen ein fester Bezug zwischen Referenz- und Messsignalphase gewährleistet ist, kann die Schaltung aber verwendet werden.

Auch für die Thermalwave-Mikroskopie braucht trotz einer möglichen Phasenschiebung durch Laufzeiteffekte die Phase nicht gemessen werden, da man lediglich an einer Kontrastentstehung interessiert ist unabhängig davon ob der Kontrast durch eine Änderung der Amplitude oder der Phase entsteht.

Der folgende einfache Lockin-Verstärker verwendet den AD630 Baustein von Analog Device. Mit einer Steckbrücke am Eingang kann die Polarität des Signals ausgewählt werden. Auf die Brücke folgt ein einfacher passiver Filter, der im Beispiel für eine Mittenfrequenz von 10 kHz ausgelegt ist. Auf das Filter folgt ein Instrumentenverstärker AD524, ebenfalls von Analog Device. Dieser, für hochwertige Messaufgaben optimierte Baustein, kann durch interne Widerstände auf Verstärkungsfaktoren von 1, 10, 100 und 1000 eingestellt werden. Der auf den Eingangsverstärker folgende Mischer AD 630 benötigt außer ein paar Koppelkondensatoren und Widerständen keine externen Bauteile.

Ein Pufferverstärker im Referenzkanal entkoppelt die Referenzfrequenzquelle vom Mischer. An dieser Stelle könnte auch ein Phasenschieber eingefügt werden, um die Phase des Referenzsignals and die des Messsignals anzupassen.

Der Tiefpass am Ausgang des Mischers hat eine Grenzfrequenz von 30 Hz und unterdrückt die im Mischer ebenfalls erzeugte Summenfrequenz und eventuell vorhandene Reste der Signalfrequenz. Vor allem wird durch den Tiefpass der Einfluss von nicht kohärentem Rauschen und anderen Störungen verringert. Für den notwendigen hochohmigen Abschluss des Filters sorgt ein Operationsverstärker in Elektrometerschaltung, der auch noch eine 10fache Nachverstärkung gestattet.



**Abb. 73: Schaltung eines einfachen Lockin-Verstärkers**

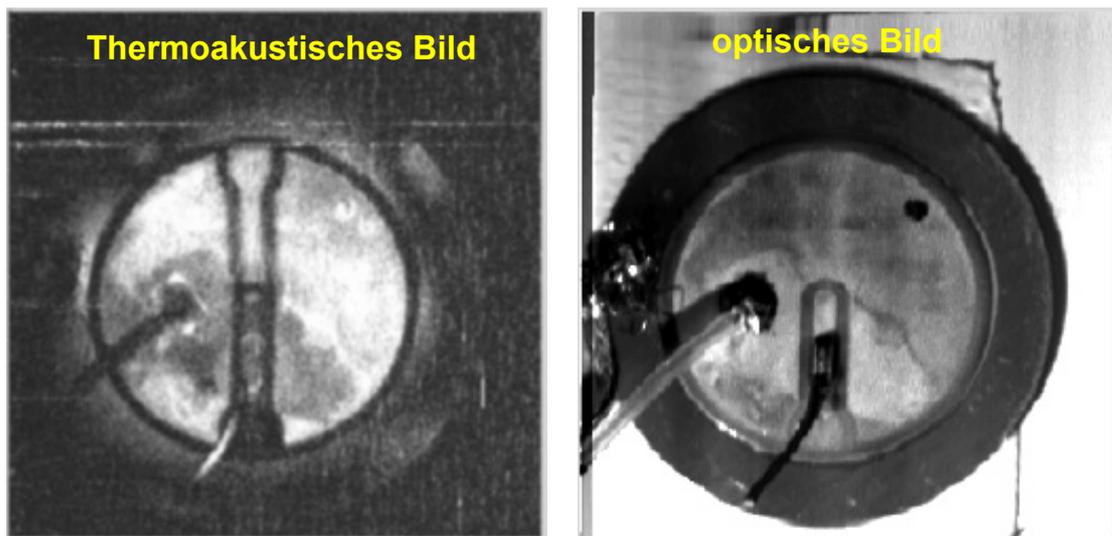
Auch für die Dunkelfeld-, die OBIC- und die Fluoreszenz-Mikroskopie, für alle Verfahren, die nur kleine Signalspannungen erreichen, ist die Einfügung eines Lockin-Verstärkers in den Signalpfad sinnvoll, um ein besseres Signalrauschverhältnis zu erreichen. Die dafür notwendige Modulation des Laserlichtes wird durch Ein- und Ausschalten des Lasers über die Stromquelle erreicht. Die Schaltfrequenz sollte möglichst hoch sein, da die Grenzfrequenz des Tiefpasses im Lockin-Verstärker mindestens zehnmals niedriger liegen sollte. Diese Grenzfrequenz bestimmt aber auch die Zeit, die zur Messung eines Pixels und damit

zum gesamten Bildaufbau notwendig ist, sollte also möglichst hoch sein. Die folgende Tabelle zeigt die Verhältnisse für ein 256 x 256 Pixel Bild.

Zeit zum Scannen eines Bildes	42 min	
Zeit zum Scannen einer Zeile	10 s	0,1 Hz
Zeit zum Messen eines Pixels	39 ms	~25 Hz
Grenzfrequenz Tiefpass		500 Hz
Taktfrequenz Laser		10 kHz

**Tab3: Messzeiten eines thermoakustischen Bildes**

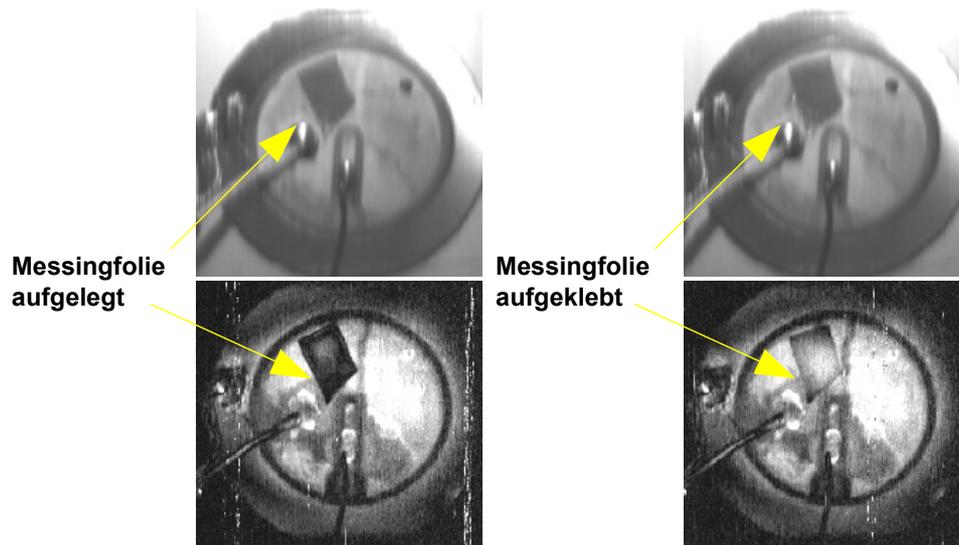
Zum Test des Prinzips wurde ein Piezobeeper mit einem modulierten Laser (660 nm ca. 100 mW) abgescannt. Die durch die thermischen Wellen ausgelösten Druckschwankungen werden durch den Piezoeffekt in elektrische Signale umgewandelt und diese zur Bilderstellung verwendet. Um ein möglichst großes Signal zu erhalten, wurde der Laser mit der Resonanzfrequenz (ca. 3 kHz) der Piezoscheibe moduliert. Trotzdem ist das thermoakustische Signal mit etwa 10  $\mu\text{V}$  ziemlich klein, sodass am Lockin Verstärker eine sehr hohe Verstärkung eingestellt werden muss. Obwohl bei der großen Scan-Fläche und damit kleiner Vergrößerung kaum von Mikroskopie gesprochen werden kann, zeigen die Bilder interessante Details.



**Abb. 74: Thermoakustisches und optisches Bild des Piezotransducers**

Durch einen Vergleich der beiden Bilder wird deutlich, dass im thermoakustischen Bild Strukturen zu sehen sind, die im optischen Bild kaum oder gar nicht zu erkennen sind.

Für die folgenden Bilder wurde ein kleines Stück einer Messingfolie erst auf den Piezo gelegt und später aufgeklebt. Im ersten Fall erscheint die Folie im thermoakustischen Bild dunkel, da sie thermisch und akustisch schlecht an den Piezo angekoppelt ist. Nach erfolgter Klebung jedoch wird das Bild der Folie wesentlich heller, da die thermoakustischen Wellen durch die Klebeschicht in den Piezo geleitet werden.



**Abb. 75: Untersuchung einer Klebeverbindung**

Eine Anwendung der fotoakustischen Mikroskopie ist die Prüfung von Klebeflächen oder laminierten Schichten, wo sich etwaige Fehler sofort durch eine große Absorption und daraus folgende dunkle Stellen bemerkbar machen. Tatsächlich werden fotoakustische Messverfahren bei der serienmäßigen Überprüfung von Flugzeugzellen angewandt, um Defekte unter der Außenhaut erkennen zu können. In vielen Fällen hat diese elegante Technik, die ohne Sendetransducer auskommt, die herkömmliche Werkstoffprüfung mit Ultraschall abgelöst. Noch eleganter wird das Verfahren, wenn auch auf den Empfangstransducer verzichtet wird und der Verlauf der thermischen Wellen mit einem Wärmedetektor gemessen wird. Auf diese Weise ist eine vollkommen berührungslose Messung möglich.

### 5.10. Nichtlineare Mikroskopie

Ein weiteres exotisches Verfahren in der Lasermikroskopie ist die nichtlineare Mikroskopie. Hierbei wird ausgenutzt das manche Materialien optisch nichtlineares Verhalten zeigen. Wie in der Elektrotechnik, wo nichtlineare Bauelemente Signale verzerren und Oberwellen erzeugen, gibt es optische Kristalle, die einfallendes Licht nicht nur transmittieren, absorbieren oder reflektieren, sondern auch verzerren und Oberwellen erzeugen. So wird einfallendes z. B. rotes Licht mit einer Wellenlänge von 700 nm den Kristall als ultraviolettes Licht mit der Wellenlänge 350 nm verlassen. Die Wellenlänge wurde halbiert und die Frequenz verdoppelt. Weit verbreitet findet dieses Prinzip in den DPSS-Lasern (diode pumped solid state laser, Dioden-gepumpter Festkörperlaser). Solche Laser findet man z. B. in grünen Laserpointern. Bei grünen Laserpointer wird ein Neodymdotierter YAG-Kristall mit der 880 nm Strahlung einer Laserdiode gepumpt. Der YAG-Kristall wiederum emittiert infrarote Strahlung mit einer Wellenlänge von 1064 nm. Diese Strahlung wird endlich in einem Verdopplerkristall, meist KDP (Kaliumdihydrogenphosphat) in die gewünschte grüne Wellenlänge von 532 nm umgewandelt.

Für die nichtlineare Mikroskopie wird der Umstand ausgenutzt, dass der Umwandlungskoeffizient stark von den Materialeigenschaften des Kristalls abhängt. So können kleine Abweichungen in der Struktur und Stöchiometrie starke Auswirkungen auf die Intensität des verdoppelten Lichtes haben. Da die Intensität des anregenden Lasers, die der erzeugten Oberwellen um Größenordnungen

überragt, muss sich nach dem Untersuchungsobjekt ein Filter im Strahlengang befinden, das die primäre Wellenlänge unterdrückt.

Mit einem CD-Lesekopf ist allerdings die nichtlineare Mikroskopie nicht zu bewerkstelligen. Für eine wirkungsvolle Erzeugung von Oberwellen muss der erregende Laser gewisse Bedingungen erfüllen. Vor allem wird eine gute Strahlqualität gefordert die eine Laserdiode normalerweise nicht liefert. Möglicherweise könnte man den infraroten Strahl eines grünen Laserpointer, dessen Verdopplerkristall entfernt wurde, in den Strahlengang einkoppeln.

## 6. Universelles Interface

Um alle Optionen des Lasermikroskops nützen zu können, reichen die Anschlussmöglichkeiten der ursprünglich verwendeten Vellman-Karte nicht aus, weshalb ein eigenes Interface entwickelt wurde. Die Schaltung verwendet einen Atmel Mega 32 als Subprozessor und ist mit dem steuernden PC über eine serielle Schnittstelle RS 232 verbunden. Zur Programmierung des Mega 32 wurde der Basic Compiler Bascom verwendet. Über die ISP-Schnittstelle des Prozessors kann dieser jederzeit neu programmiert und eventuell geänderten Anforderungen angepasst werden. Der Prozessor läuft mit einer Taktfrequenz von 16 MHz und hat genügend Ein- und Ausgangsports, um den hier gestellten Anforderungen gerecht zu werden. Neben den acht analogen Eingangskanälen des Mega 32 besitzt das Interface vier analoge Ausgänge, die mit den seriellen DA-Wandlern LTC 1257 implementiert wurden. Zwei dieser Kanäle steuern den XY-Scanner, der dritte dient zur Fokuseinstellung und der vierte ist als Reserve gedacht. X- und Y-DAC steuern über Treiberstufen die Lautsprecher-scanner. Mit einem per Relais schaltbaren Vorwiderstand kann der Scan-Bereich verändert werden. Der Wert des Vorwiderstands ist so bemessen das mit ihm der Scan-Strom 16-mal kleiner ist als ohne. Für eine Bildgröße von 256x256 Pixel ergeben sich dann die in Tabelle 6 gezeigten Werte. Die Scan-Bereiche sind immer zum Nullpunkt zentriert. Da die DA-Wandler nur positive Spannungen ausgeben können, wird zu deren Ausgangsspannung eine negative Offsetspannung addiert. Die Ruhestellung der Scanner wird unabhängig vom Scan-Bereich bei einem DAC-Ausgabewert von 2047 erreicht. Für ein 256 x 256 Bild müssen die DA-Wandler mit Werten zwischen 1920 (2047-127) und 2175 (2047+128) angesteuert werden.

Abgesehen vom Netzteil findet die gesamte Schaltung des Interfaces auf einer Eurokarte Platz. Um IO-Pins einzusparen und so für zukünftige Entwicklungen offen zu sein, werden der Takt- und der Dateneingang der vier DA-Wandler zusammen angesteuert. Die Auswahl der DA-Wandler erfolgt über deren Enable-Eingänge, welche über einen Adressdekoder ausgewählt werden. Die Leistungsverstärker für die Lautsprecher-scanner sind als einfache Operationsverstärker mit nachgeschalteten Emitterfolgern. Der Treiber für die Fokusspule ist nur unipolar ausgeführt, da das Objektiv von seiner Ruhelage aus nur in einer Richtung bewegt werden muss, um den Fokuspunkt zu erreichen. Die Signalaufbereitung ist an das Fotodioden-IC CX2586 angepasst und berücksichtigt dessen Offsetspannung von 2,5Volt. Um den Eingangsspannungsbereich des AD-Wandlers des Mega 32 auszunutzen, wurden für die Signalverstärkung Operationsverstärker vom Typ TLC274 verwendet, da diese Rail-to-Rail Typen einen Ausgangsspannungsbereich von 0..5Volt haben.

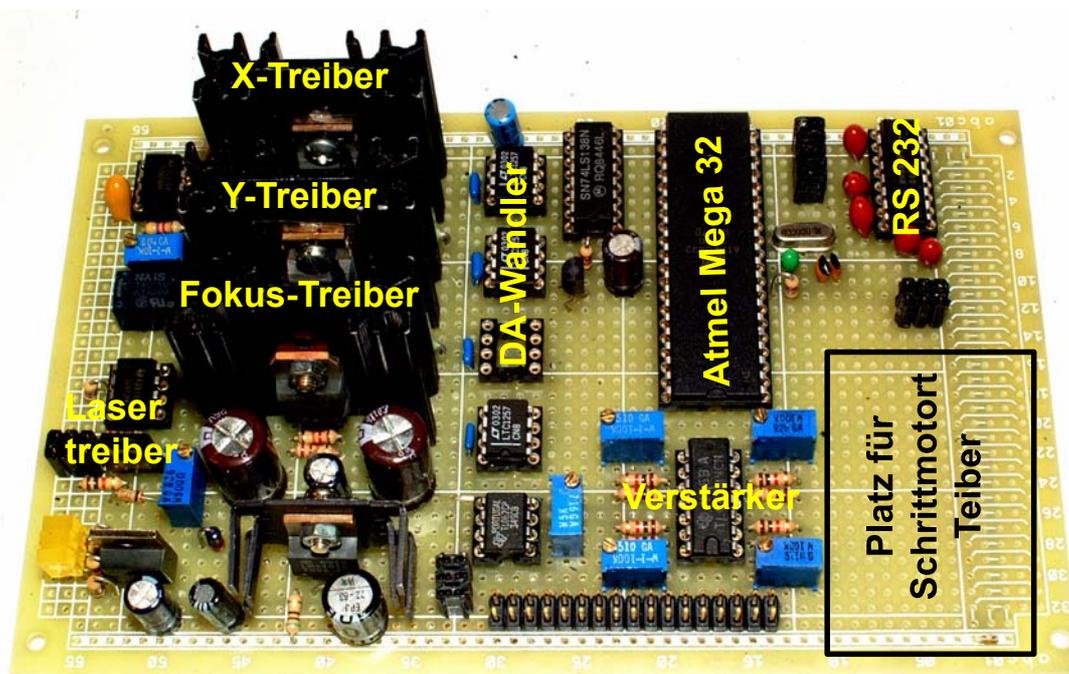
IO-Belegung des Mega 32					
PortA 0	Kanal 1	AD-Wandler	PortC 0	Adresse A0	DAC Dekoder
PortA 1	Kanal 2		PortC 1	Adresse A0	
PortA 2	Kanal 3		PortC 2	Adresse A2	
PortA 3	Kanal 4		PortC 3	Enable	
PortA 4			PortC 4	Scanbereich Relais	
PortA 5			PortC 5		
PortA 6	Endschalter X	Schrittmotor Anschlüsse	PortC 6		
PortA 7	Endschalter Y		PortC 7		
PortB 0	Richtung X		PortD 0	RDX	RS 232 Schnittstelle
PortB 1	Richtung Y		PortD 1	TDX	
PortB 2	Mode 0		PortD 2		
PortB 3	Mode 1		PortD 3		
PortB 4	Enable		PortD 4		
PortB 5	MOSI	SPI-Schnittstelle	PortD 5	Laser Enable / Modulation	
PortB 6	MISO		PortD 6	Takt	UART für DACs
PortB 7	SCK		PortD 7	Daten	

Tab4: IO-Belegung des Mega 32

Funktionen des Dekoders an PortC 0 bis PortC 3				
A0	A1	A2		
0	0	0	Enable X-DAC	
1	0	0	Enable Y-DAC	
0	1	0	Enable Fokus-DAC	
1	1	0	Enable Reserve- DAC	
0	0	1	Takt für X-Schrittmotor	
1	0	1	Takt für Y-Schrittmotor	

Tab5: Funktionen des Dekoders

Tabelle 4 zeigt die Portbelegung des Prozessors und Funktionen des Dekoders. Blau und Rot markierte Einträge sind für zukünftige Erweiterungen. PortA 6 bis PortB 3 erlauben den Anschluss von zwei Schrittmotoren zum Betrieb eines Scanners mit größerem Scan-Bereich. Mit dem Anschluss an PortD 5 kann der Laser mit dem Timer des Prozessors moduliert bzw. ein und ausgeschaltet werden, was für Lockin Messungen notwendig ist. Durch Beschreiben des Timerregisters kann die Modulationsfrequenz des Lasers in einem weiten Bereich verstellt werden.



**Abb. 76: Eigenbauinterface auf Lochrasterplatine**

Das Interface erhält die verschiedenen Befehle per RS 232. Um die übertragene Datenmenge zu begrenzen, wurden für die Kodierung nur einzelne Buchstaben verwendet. Die Parameter und Rückgabewerte sind Zahlen im 12 Bit Format und werden als Ascii Zeichen übertragen.

Befehl A (65 Dez.)

Mit diesem Befehl werden die Anzahl der Mittelungen (Variable: Aver\_var) der ADC-Messungen eingestellt. Je größer diese Zahl ist umso genauer werden die gemessenen Werte, allerdings braucht die Messung entsprechend länger. Die Grundeinstellung beträgt 5. Der erlaubte Wertebereich ist liegt zwischen 1 und 4095.

Befehl B (66 Dez.)

Einstellung der Scan-Bereiche nach folgender Tabelle

256 x 256 Pixel					
Kode	DAC-Werte	Increment	Widerstand	Scan-Bereich	Auflösung
1	1920..2175	1	ein	51 µm	0,2 µm /Pixel
2	1792..2302	2	ein	102 µm	0,4 µm/Pixel
3	1537..2557	4	ein	204 µm	0,8 µm/Pixel
4	1027..3067	8	ein	408 µm	1,6 µm/Pixel
5	0007..4087	16	ein	816 µm	3,2 µm/Pixel
6	1920..2175	1	aus	816 µm	3,2 µm/Pixel
7	1792..2302	2	aus	1,6 mm	6,4 µm/Pixel

Größere Scan-Felder als 1,6 x 1,6 mm machen bei den verwendeten Lautsprecher-scannern keinen Sinn da die Verzerrungen zu groß werden

**Tab6: Scan-Bereiche 256 x 256 Pixel**

Höher aufgelöste Bilder mit 512 x 512 Pixel, deren Messung allerdings viermal solange dauert, sind mit folgenden Daten möglich.

512 x 512 Pixel					
Kode	DAC-Werte	Increment	Widerstand	Scan-Bereich	Auflösung
8	1792..2302	1	ein	102 µm	0,2 µm /Pixel
9	1536.. 2558	2	ein	204 µm	0,4 µm/Pixel
10	1025.. 3069	4	ein	409 mm	0,8 µm/Pixel
11	0003.. 4091	8	ein	818 mm	1,6 µm/Pixel
12	1792..2302	1	aus	1,6 mm	3,2 µm/Pixel
Größere Scan-Felder als 1,6 x 1,6 mm machen bei den verwendeten Lautsprecher-scannern keinen Sinn, da die Verzerrungen zu groß werden.					

**Tab7: Scan-Bereiche 512 x 512 Pixel**

Die Grundeinstellung des Scan-Bereiches ist 1 d. h., 51 x 51 µm bei 256 x 256 Pixel, der erlaubte Wertebereich liegt zwischen 1 und 12.

Einstellung des Schrittmotorscanners			
Kode	Einzel-schritte	Scan-Bereich	Auflösung
1	1	1 mm	3,9 µm
2	2	2 mm	7,8 µm
3	3	3 mm	15,6 µm
4	4	4 mm	31,2 µm
5	5	5 mm	62,5 µm

**Tab8: Bereiche des Schrittmotorscanners**

Befehl C (67 Dez)

Durch diesen Befehl werden die Defaultwerte der Karte gesetzt und eine Begrüßungsmeldung gesendet und der X- und Y-DAC auf Null gesetzt.

Befehl D (68 Dez)

Wert über Reserve DAC ausgeben. Erlaubter Wertebereich zwischen 0 und 4095

Befehl E (69 Dez)

Wert über Fokus-DAC ausgeben. Erlaubter Wertebereich zwischen 0 und 4095.

Befehl F (70 Dez)

ADCs auslesen. Durch diesen Befehl werden die vier ADC Kanäle ausgelesen. Die Anzahl der Mittelungen wird durch die Variable Aver\_var bestimmt. Die Ausgabe des Befehls sind vier Zahlenwerte, die durch Kommas getrennt sind.

Befehl G(71 Dez)

Der Befehl H startet einen Rasterscan entsprechen des eingestellten Scan-Bereichs. Die Ausgabe besteht aus 6 Zahlenwerten für die X-Position, die Y-Position und die vier Kanäle eines Pixels. Die einzelnen Werte sind durch Kommas getrennt. Der Scan kann durch das Senden einer Null (48 Dez) abgebrochen werden. Beim Abbrechen der Funktion wird erst der Scan der laufenden Zeile beendet und dann das Abbruchzeichen B (66 Dez) ausgegeben. Nach einem kompletten Scan, der nicht unterbrochen wurde, wird das Endzeichen E (69 Dez) ausgegeben.

#### Befehl H(72 Dez)

Durch diesen Befehl wird eine Schleife gestartet, die laufende ADC-Messungen und die Ausgabe der Messwerte veranlasst. Zum Beenden der Schleife muss der eine Null (48 Dez) gesendet werden. Das Interface antwortet mit dem Abbruchzeichen B (66 Dez).

#### Befehl I(73 Dez)

Durch diesen Befehl wird eine Fokusschleife durchfahren und für jeden Fokuswert die ADC-Kanäle gemessen und ausgegeben. Ausgegeben werden der aktuelle Wert des Fokus\_Dacs und die vier ADC- Kanäle. Wie bei den anderen Ausgaben sind die Zahlenwerte durch Kommas getrennt. Durch die erhaltenen Messwerte kann die optimale Fokussierung ermittelt werden. Wie alle anderen Schleifenbefehle kann auch der Befehl I durch das Senden einer Null (48 Dez) abgebrochen werden.

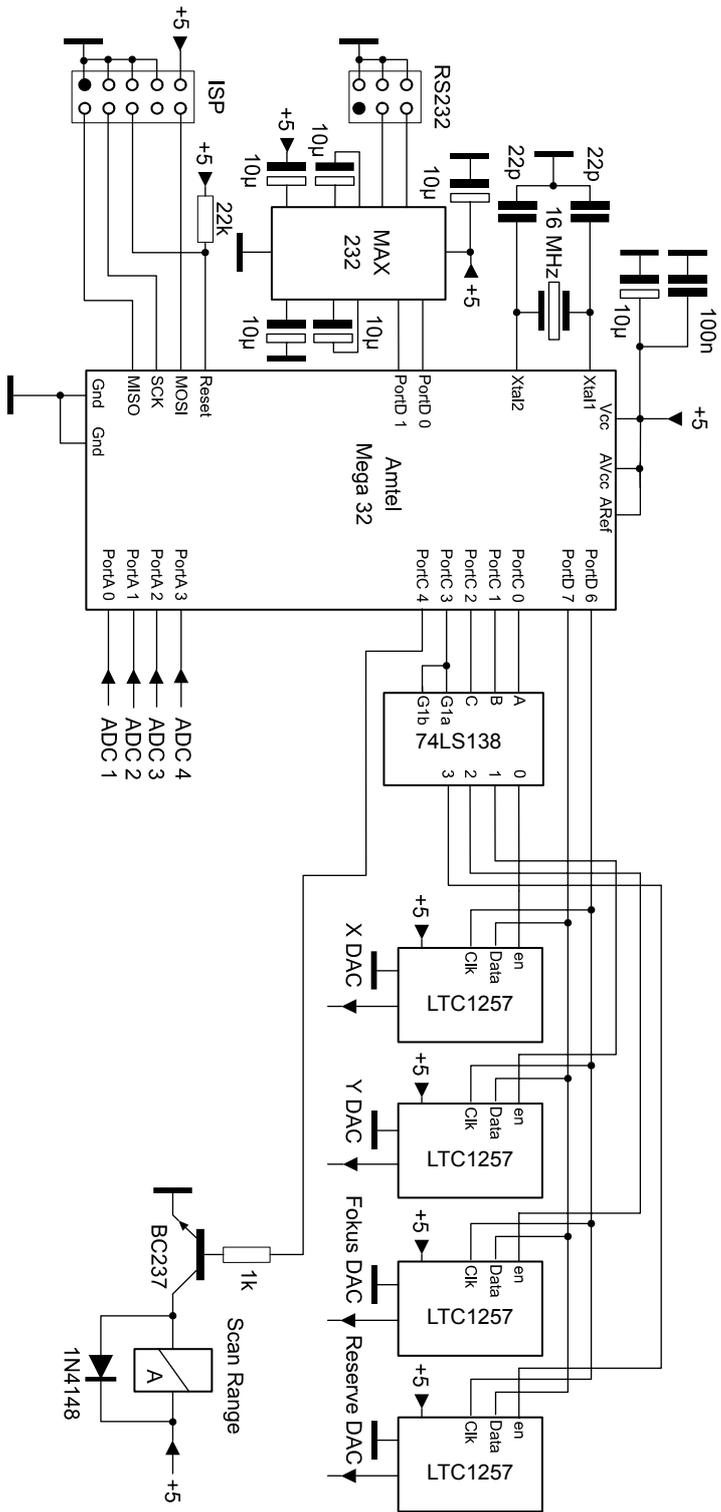


Abb. 77: Digitalteil des Interfaces

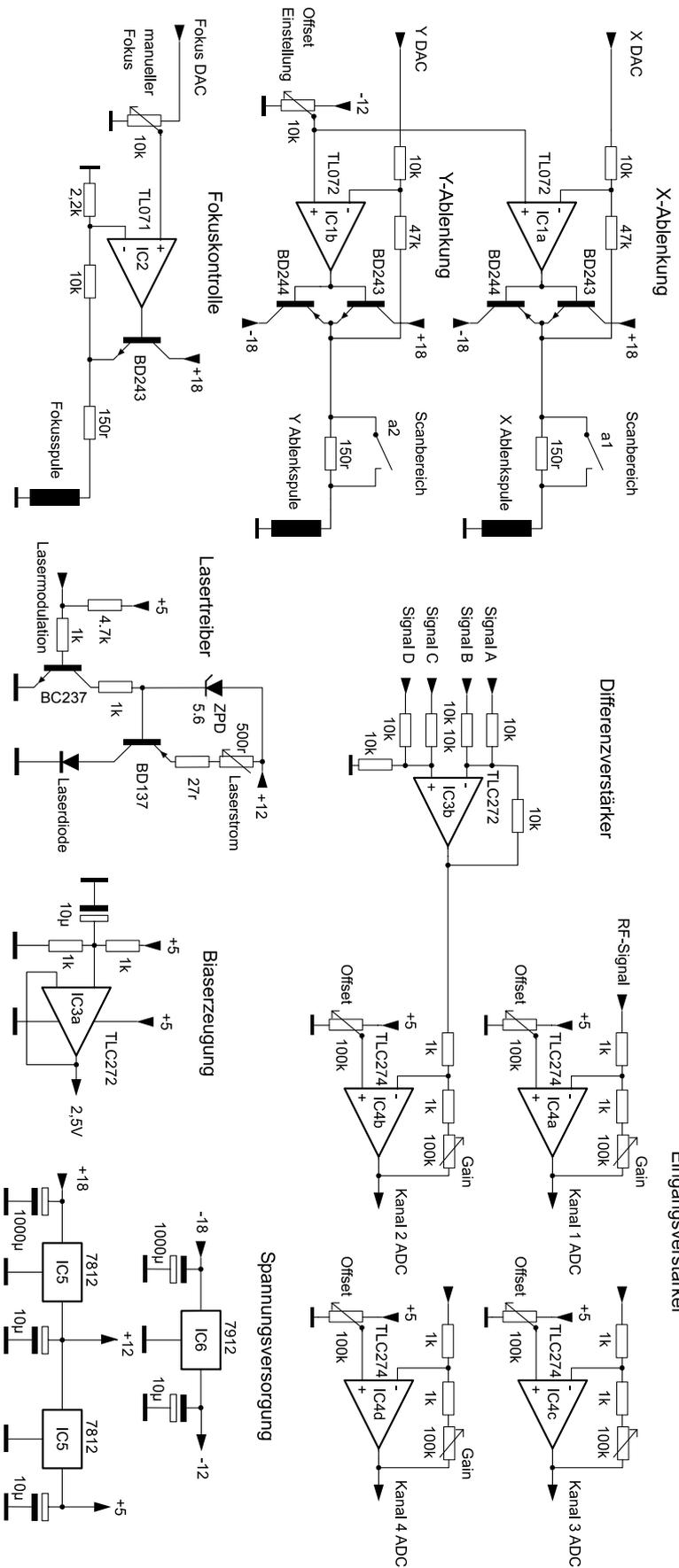


Abb. 78: Analogteil des Interfaces

## 6.1. Delphi-Betriebs-Software

Auch diese Interface-Schaltung wird auf dem PC mit einem Delphi-Programm gesteuert. Das Programm gibt die entsprechenden Codes und die zugehörigen Parameter über die RS 232 Schnittstelle aus und empfängt und verarbeitet die vom Interface gelieferten Messdaten. Die Daten der vier Messkanäle werden als Grauwerte in vier Bildfeldern angezeigt und die Daten eines ausgewählten Kanals werden für die aktuelle Zeile in einem Oszillographendisplay angezeigt. Diese Zeilenanzeige ist sehr hilfreich, um die Verstärkung der Kanäle und den Fokus einzustellen. Die Grauwerte der Bilder werden während der Messung auf die Minimal- und Maximalwerte normiert. Die originalen Messwerte, die in Textdateien abgespeichert werden, werden aber nicht verändert.

Die Dateien enthalten einen Header, in dem die Rasterdaten abgespeichert werden, sodass Größen der Bilder immer rekonstruiert werden können.

Stepper Scan-Bereich: 1 x1 mm					
X	Y	Z1	Z2	Z3	Z4
0	0	446	0	547	427
1	0	463	0	542	427
2	0	457	0	542	427
3	0	474	0	545	427
4	0	477	0	546	427
5	0	469	0	548	427

Tab9: Aufbau der Messdateien

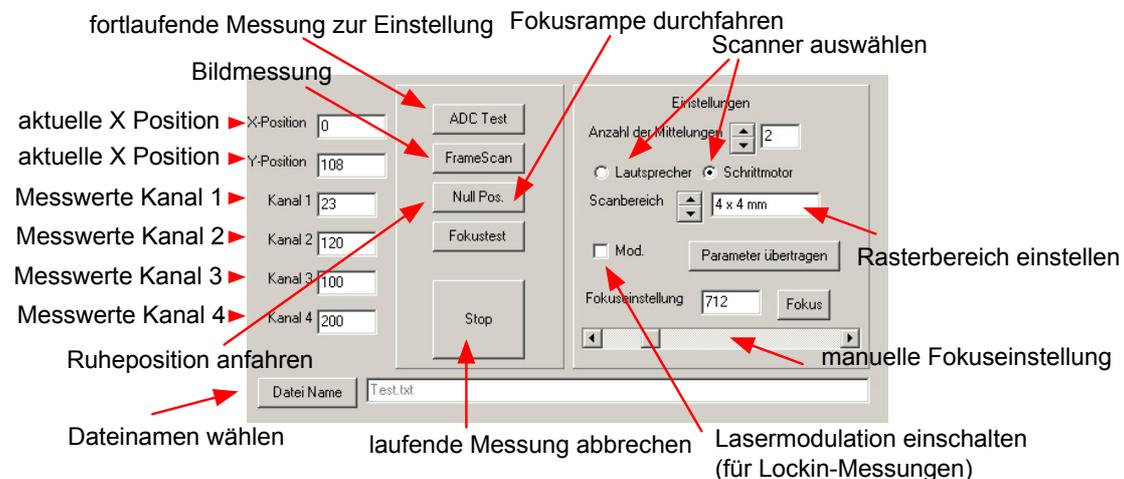


Abb. 79: Bedienfeld des Rasterprogramms

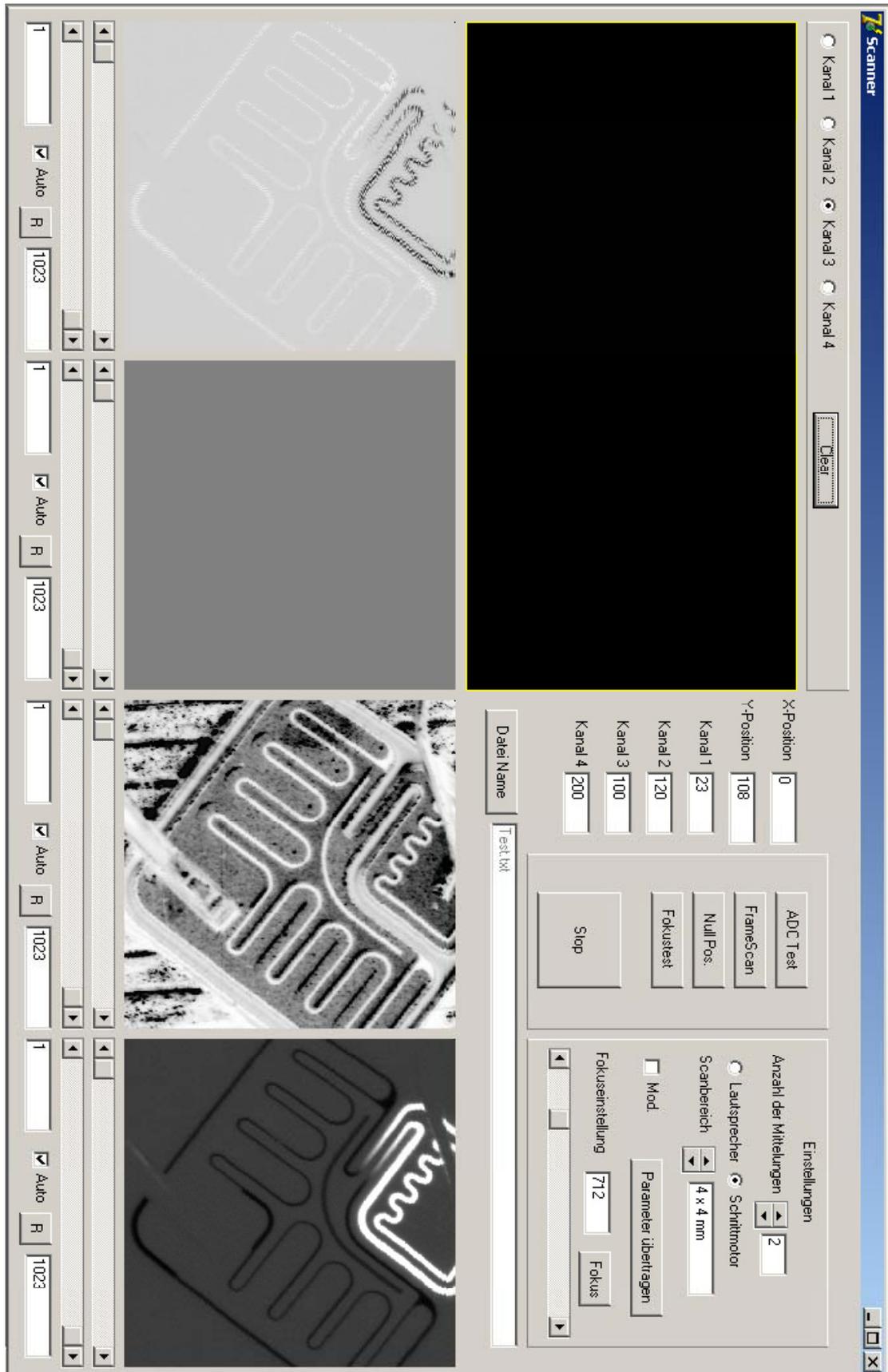
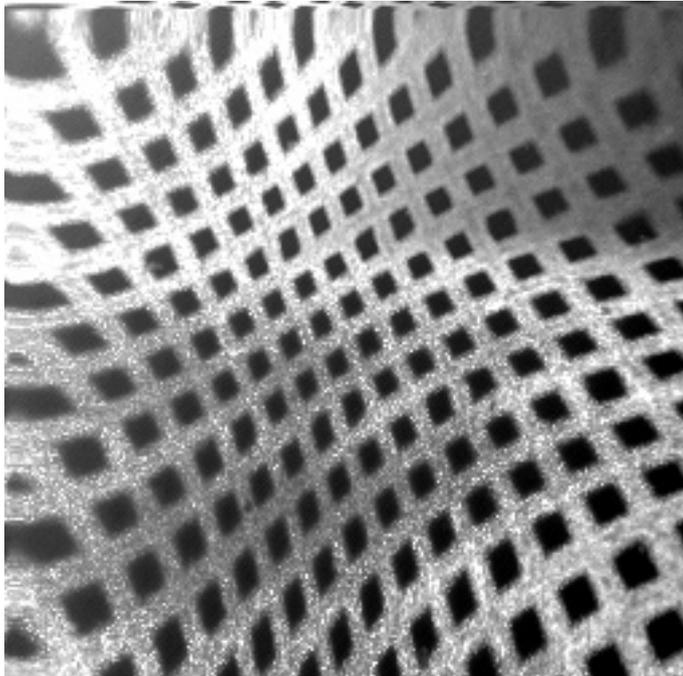


Abb. 80: Screenshot des Rasterprogramms

## 7. Andere Scannerkonzepte

Der bislang verwendete Lautsprecherscanner weist leider einige schwerwiegende Nachteile auf. Bei Scan-Amplituden, die einen Millimeter deutlich überschreiten, machen sich die Nichtlinearitäten der Spulenauslenkung und die gegenseitige Beeinflussung der Achsen bemerkbar und führen zu einer starken Verzerrung des Rasters und damit auch der aufgenommenen Bildern.



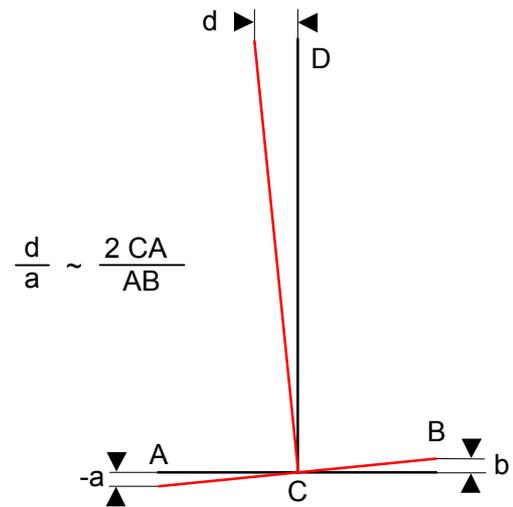
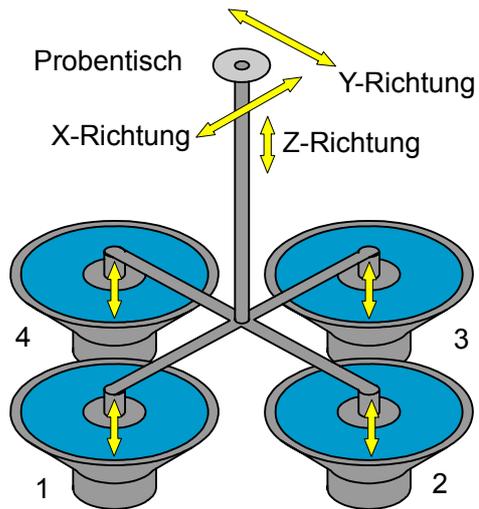
**Abb. 81: Verzerrung des Bildes einer Gitterstruktur bei großen Rasteramplituden**

Auch die unvermeidliche Reibung der Schwingspulenlagerung führt zu Rasterfehlern, die sich vor allem am Anfang einer Zeile störend auswirken. Diese Reibung kann zwar durch die Überlagerung einer kleinen Wechselfspannung, die zur Rasteramplitude addiert wird, vermindert, aber nicht völlig beseitigt werden. Ein weiterer Nachteil ist die relativ große Membranfläche der Lautsprecher. Durch die Membran wird der Scanner empfindlich auf akustische Störungen, da jede Auslenkung der Membran durch Schallwellen direkt auf den Scan-Tisch übertragen wird.

### 7.1. X-Y-Z Scanner mit vier Lautsprechern

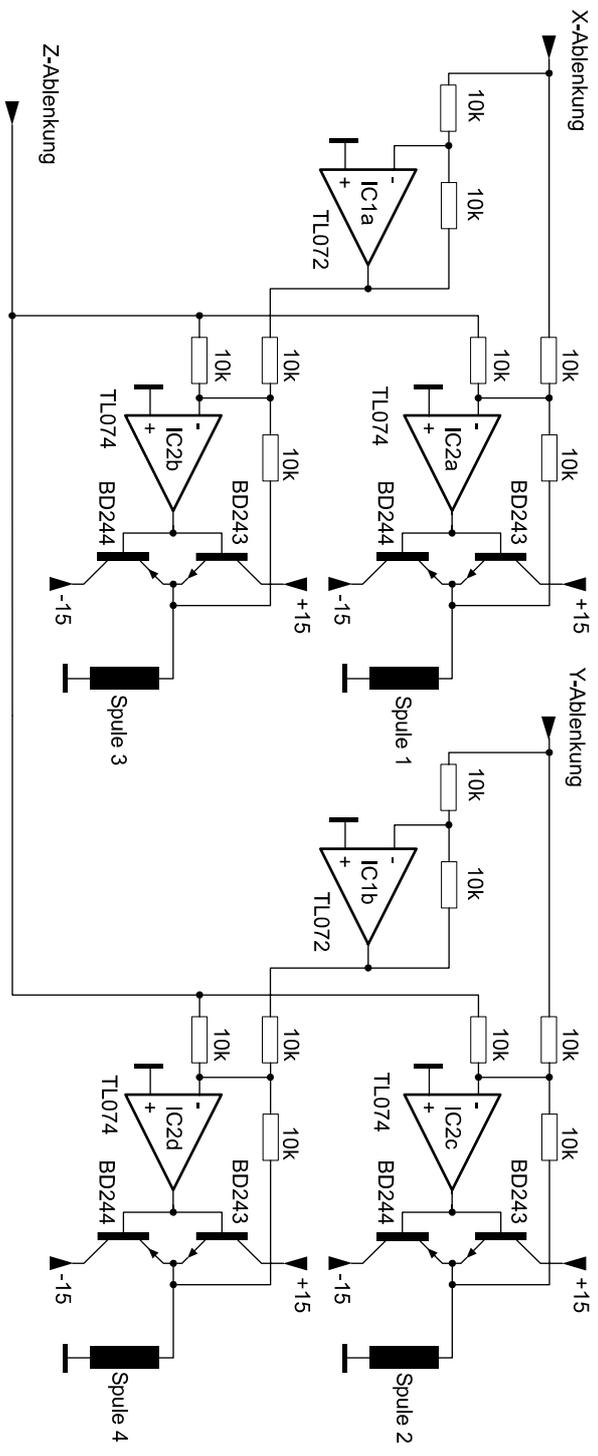
Um einige dieser Schwierigkeiten zu umgehen, wurde von italienischen Forschern (u.A. T.Mariani) ein besonders genialer Aufbau ersonnen.

Hier werden vier Lautsprecher verwendet, die über einen Hebel den Probentisch verstellen. Durch den Hebel erhält man eine mechanische Übersetzung der Membranausschläge, sodass größere Rasterflächen möglich werden. Je nach Ansteuerung der vier Lautsprecher kann der Probentisch nicht nur in der X- und Y-Richtung, sondern auch noch in der Z-Richtung bewegt werden. Die vier Lautsprechermembranen sind über ein Kreuz verbunden, in dessen Mitte ein Stab mit dem Probentisch liegt.



**Abb. 82: Scanner mit vier Lautsprechern**

Durch gegenphasiges Ansteuern der Lautsprecher 1 und 3 wird der Stab in der X-Achse gekippt und entsprechend wird die Probe bewegt. Für eine Bewegung in der Y-Achse werden Lautsprecher 2 und 4 angesteuert. Gleichphasiges Ansteuern aller vier Lautsprecher bewegt die Probe in Z-Richtung. Die richtige Ansteuerung der Lautsprecher erfolgt mit einer Operationsverstärker-Schaltung.



**Abb. 83: Schaltung der Ansteuerung**

Mariani benutzen diesen Scanner zusammen mit einem Tonabnehmersystem aus einem Plattenspieler zum Aufbau eines einfachen Rasterkraftmikroskopes. Dieses Mikroskop erlaubt eine Höhengauflösung von einigen Zehntel Ångström, doch das gehört in eine andere Kategorie.

## 7.2. Scanner mit zwei Schrittmotoren

Eine weitere Möglichkeit größere Rasterflächen zu erlangen, ist der Ersatz der Lautsprecher durch zwei Schrittmotoren, die über „Zugseile“ den Probentisch bewegen.

Die Seile sind dünne Perlonschnüre, wie sie für Skalenantriebe benutzt wurden. Durch das Aufwickeln auf der Motorachse wird die lineare Zugbewegung erreicht. Eine kräftige Feder sorgt dafür, dass die Schnüre immer unter einer Vorspannung stehen und so die Anordnung spielfrei arbeitet. Auch bei diesem Aufbau sollte die freie Schurlänge wesentlich größer als die Rasteramplitude sein. So wird erreicht, dass die Auslenkung einer Achse gerade ist und wenig von der anderen Achse abhängt. Weiter ist es wichtig die Schnüre über zwei kleine Rillenscheiben zu führen, damit sich der Probentisch in einer Ebene bewegt. Ansonsten könnte sich der Abstand des Probentischchens zum Lesekopf ändern und die Fokuseinstellung verloren gehen. Im Gegensatz zum Lautsprecherantrieb braucht der Schrittmotorscanner einen Referenzpunkt, der den Startpunkt der X- und der Y-Achse definiert. Dazu werden die Schnüre durch die Schalthebel von zwei Endschaltern geführt. Auf die Achse aufgepresste Stopperröhrchen betätigen die Schalter.

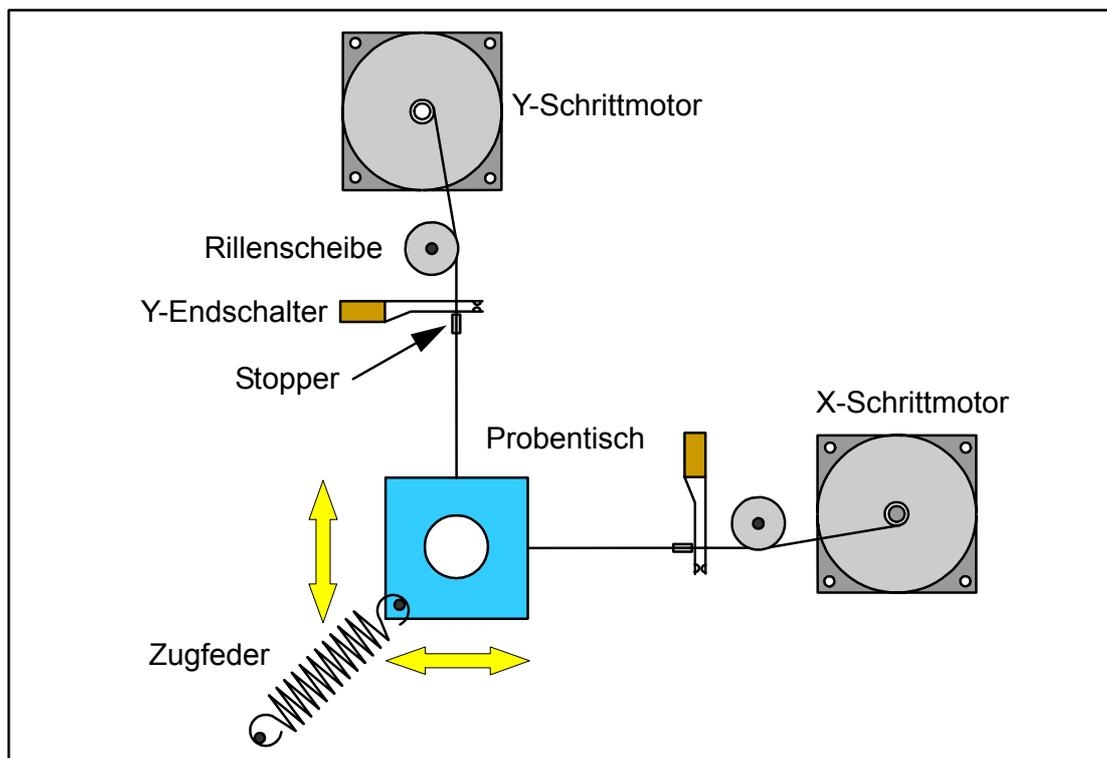


Abb. 84: Schema eines mit Schrittmotoren bewegten Scanners

### 7.2.1. Schrittmortreiber

Zur Abschätzung der erreichbaren Auflösung dient eine kleine Rechnung. Die üblichen Schrittmotoren haben eine Schrittweite von  $1,8^\circ$  und somit 200 Schritte pro Umdrehung. Bei Halbschrittbetrieb sind 400 Schritte für eine volle Umdrehung nötig. Verwendet man eine Achse von 3 mm Durchmesser, auf die das Zugseil aufgewickelt wird, beträgt die kleinste Schrittweite  $3\text{mm} \cdot \pi / 400 = 0,0236\text{ mm}$ .

Durch Motoren mit kleinerer Schrittweite, durch Viertel- oder sogar Feinschrittbetrieb oder eine dünnere Achse sind noch kleinere Werte erreichbar.

Der Antrieb der Schrittmotoren erfolgt durch zwei Treiberschaltungen vom Typ TB6560 des Herstellers Toshiba. Der TB6560 beinhaltet geschaltete Brücken-Treiberstufen zur Ansteuerung eines bipolaren 2-Phasen Schrittmotors mit Versorgungsströmen bis zu 3,5 Ampere. Soviel Strom wird für den Scanner nicht benötigt. Die Schrittmotoren haben auch schon mit 500 mA genügend Drehmoment, um gegen die Spannung der Zugfeder arbeiten zu können. Die Treiberschaltungen können deshalb ohne Kühlkörper betrieben werden. Wichtiger als ein hoher Ausgangsstrom ist die eingebaute Feinschrittoption, die mit Signalen an den beiden Mode-Pins ausgewählt werden kann.

Mode-Pins				
M1	M2			
0	0	Vollschritt	1,8 ° / Schritt	200 Schritte / Umdrehung
1	0	Halbschritt	0,9° / Schritt	400 Schritte / Umdrehung
0	1	Viertelschritt	0,45° / Schritt	800 Schritte / Umdrehung
1	1	Achtelschritt	0,23° / Schritt	1600 Schritte / Umdrehung

**Tab10: Auflösung des Schrittmotorscanners**

Die Achsverlängerungen der Schrittmotoren haben einen Durchmesser von zwei Millimetern. Pro Umdrehung der Achsen bewegt sich der Probenstisch um ( $\pi * 2 \text{ mm}$ ) 6,28 Millimeter. Bei 200 Schritten pro Umdrehung beträgt die Schrittweite 31,4  $\mu\text{m}$ .

Mit der Feinschrittoption des Treibers kann dieser Wert noch mal durch 8 geteilt werden, sodass die kleinste Schrittweite etwa 3,9  $\mu\text{m}$  beträgt. Damit ist die Auflösung zwar deutlich geringer als die des durch Lautsprecherspulen angetriebenen Scanners, aber dafür sind große Scan-Flächen von mindestens 10 x 10 mm möglich.

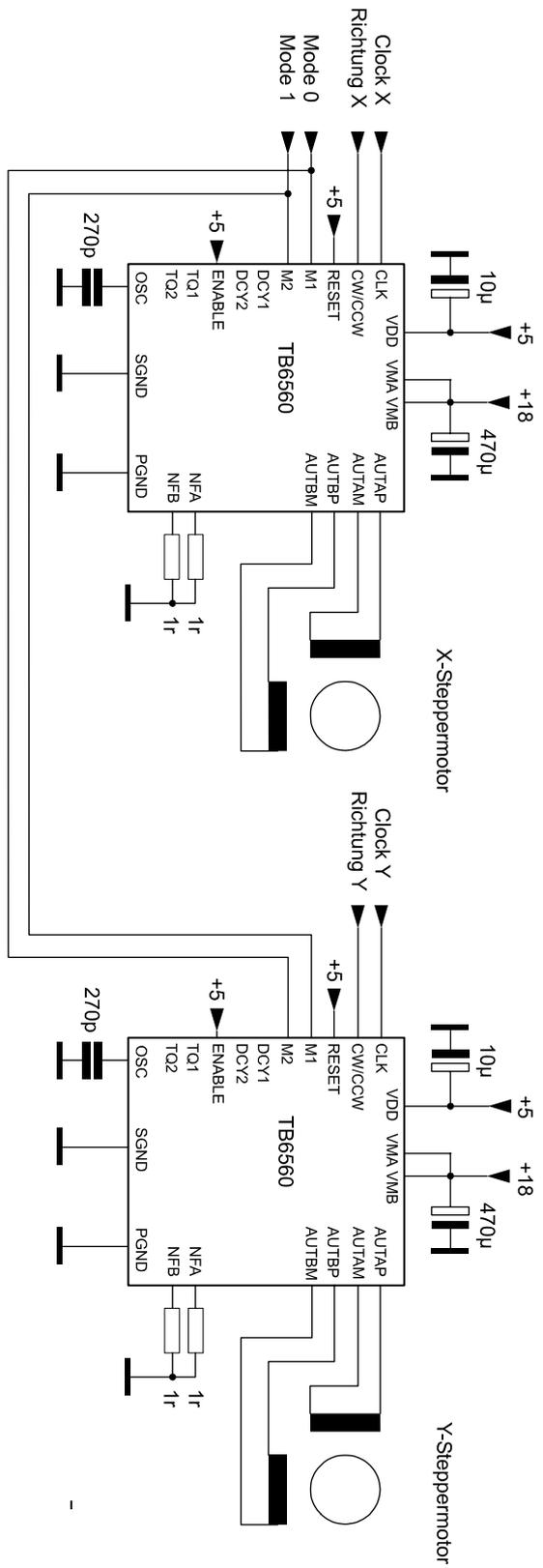
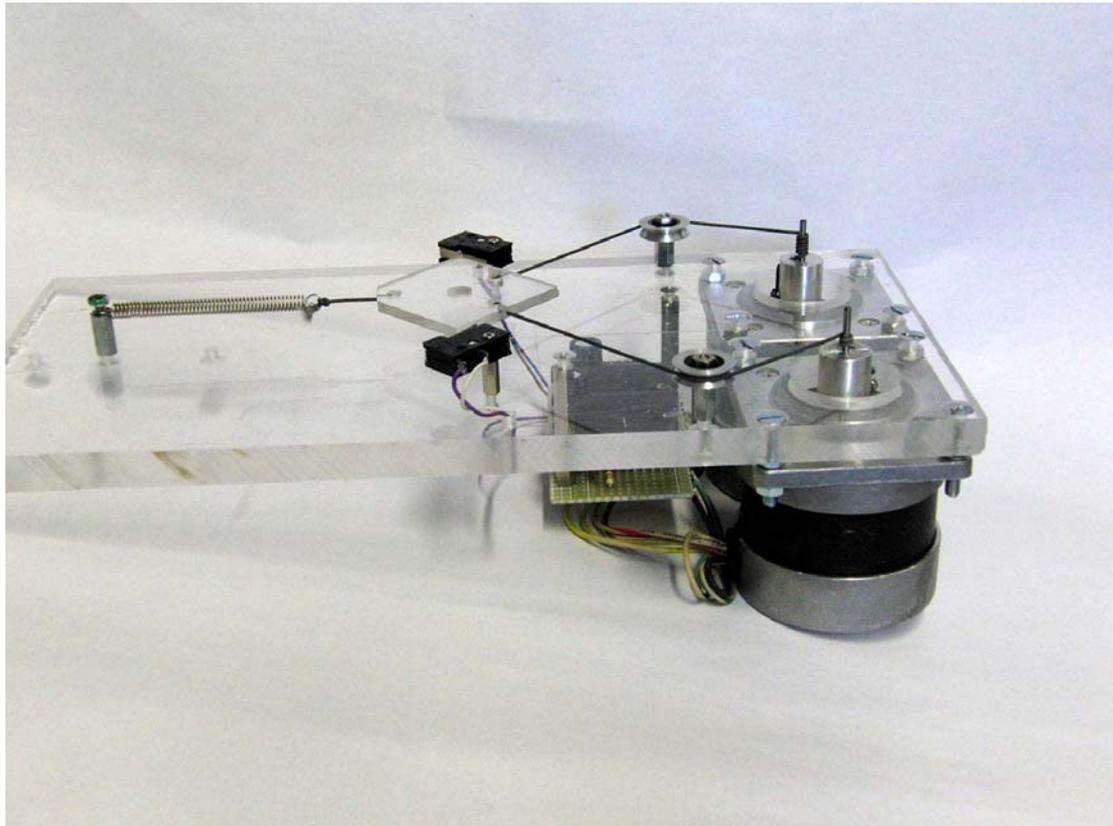


Abb. 85: Schrittmotortreiber mit TB6550



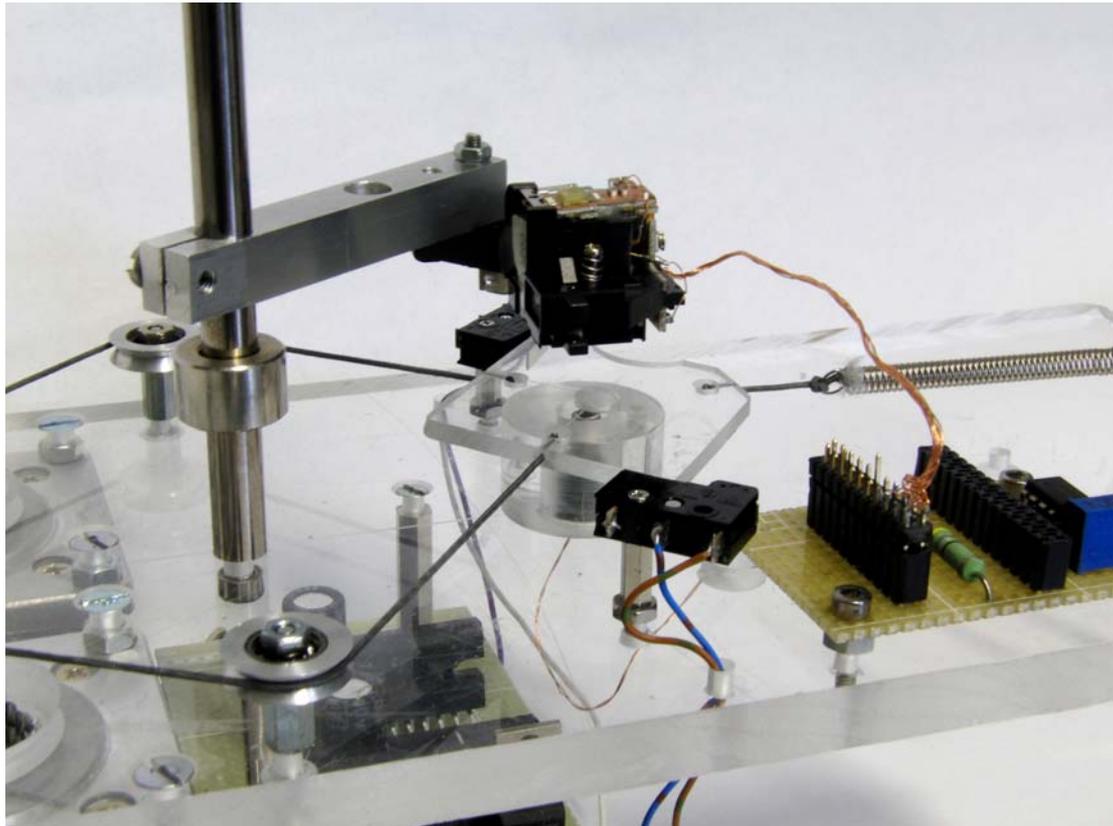
**Abb. 86: Aufbau eines mit Schrittmotoren bewegten Scanners noch ohne Optik**

Das Bild zeigt den Probeaufbau des Scanners. Im Gegensatz zum obigen Schema werden die Endschalter direkt vom Probenstisch betätigt. Bei den ersten Tests zeigte sich, dass es besser ist, den Probenstisch in der Höhe zu fixieren. Dazu wird ein runder Plexiglaszylinder verwendet, auf dem das Tischchen aufliegt. Der Zylinder ist etwa zwei Millimeter höher als die natürliche Lage des Probenstischchens, sodass dieses durch die Feder mit geringer Kraft auf den Zylinder gepresst wird. Da die Oberfläche des Zylinders poliert wurde, bleibt die Reibung klein und beeinträchtigt die Scan-Bewegungen in keiner Weise. Die ruckartige Bewegung der Schrittmotoren überträgt sich durch die Zugseile auf den Probenstisch. Deshalb ist es nötig, die Probe zu fixieren, um ein unkontrolliertes Verschieben zu verhindern. Für diese Aufgabe ist doppelseitiger Klebeband gut geeignet.

In einer zentralen Bohrung des Zylinders wird eine Fotodiode für Durchlichtaufnahmen befestigt.

Der CD-Lesekopf ist an einem senkrechten Stab mit einer Klemmvorrichtung befestigt. So kann der Abstand zum Probenstisch verändert werden, um trotz unterschiedlicher Probendicken im Verstellbereich der Fokussierspule zu bleiben. Zusätzlich kann der Stab im Sinne einer optischen Bank verwendet werden. Die Klemmen zur Verbindung von Stabteilen können aus Vierkantstäben leicht selbst gefertigt werden.

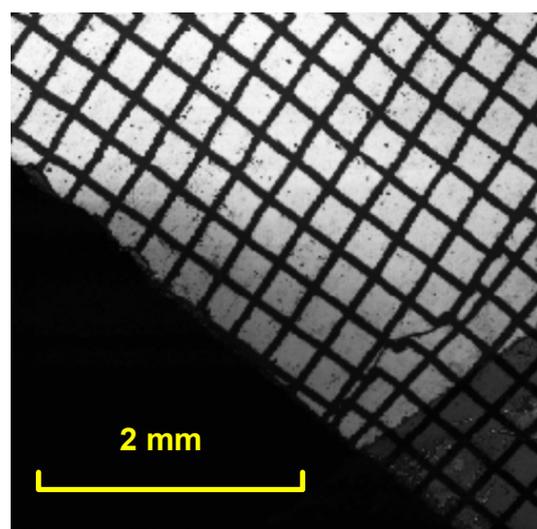
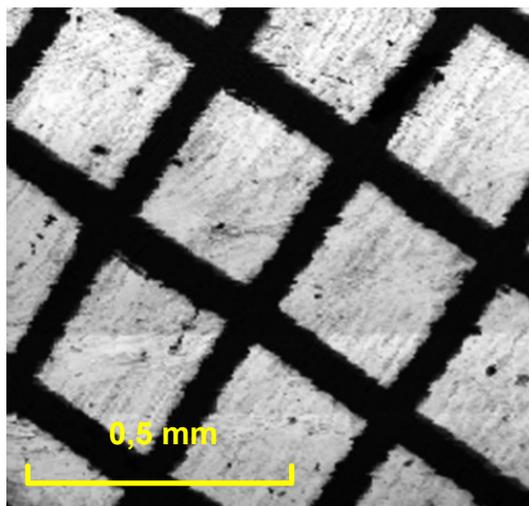
So können Experimente mit verschiedenen Lichtquellen und Fokussier- und Detektorsystemen unternommen werden.



**Abb. 87: Das Probestischchen gleitet auf einem Plexiglaszylinder**

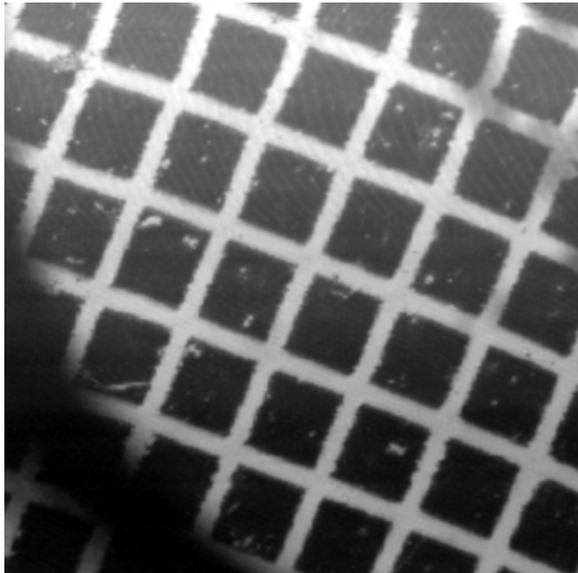
Die Probekörper mit einem Testsubstrat zeigen die gute Linearität des Scanners auch bei einer großen Scan-Fläche von 4 x 4 mm.

### 7.2.2. Auf- und Durchlichtaufnahmen

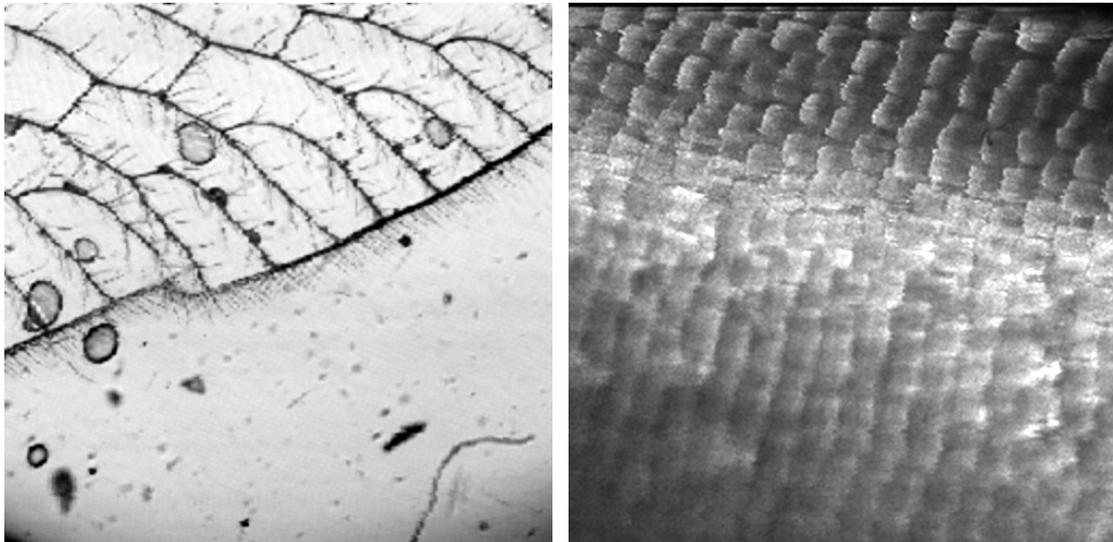


**Abb. 88: Bild des Testgitters mit dem Schrittmotorscanner**

Mit der Fotodiode unter der Probe im Plexiglassockel können Durchlichtaufnahmen gemacht werden.



**Abb. 89: Auch an dem Durchlichtbild gibt's nichts auszusetzen**



**Abb. 90: Mückenflügel und die Schuppen auf einem Schmetterlingsflügel**

Der relativ große Scan-Bereich von etwa 10 x 10 mm erlaubt auch Bilder von größeren Objekten. Man muss nicht einen CD-Lesekopf verwenden, sondern es genügt auch ein einfacher Laserpointer mit einer eingebauten Fokussierlinse. Der Detektor ist eine Fotodiode BPW 34, die etwas seitlich angeordnet ist und das von der Probe reflektierte Licht empfängt. Beträgt die Bildgröße z. B. 5 x 5 mm und die Auflösung 256 x 256 Pixel sollte der fokussierte Laserpunkt eine Größe von höchstens  $5 \text{ mm} / 256 = 20 \mu\text{m}$  haben. Ein Laserpointer mit Linse sollte das erreichen. Der Laser wird wie die Fotodiode mit Klammern an dem Ministativ befestigt. Um den Einfluss des Umgebungslichts auszuschalten hat man zwei Möglichkeiten. Entweder man legt einfach ein dunkles Tuch über das Mikroskop, oder man verwendet für die Messung das Lockin-Prinzip. Dazu wird der Laser moduliert und die Ausgangsspannung der Fotodiode mit dem Lockin-Verstärker gemessen. Da der Lockin-Verstärker nur den Wechselspannungsanteil verstärkt wird das Gleichlicht der Umgebungsbeleuchtung wenig Einfluss haben. Bei sehr starken Schwankungen der Umgebungsbeleuchtung ändert sich allerdings auch

der Arbeitspunkt der Fotodiode, was zu einer Änderung der Wechselspannung führt. In diesem Fall ist eine zusätzliche Abdunklung des Mikroskops notwendig.

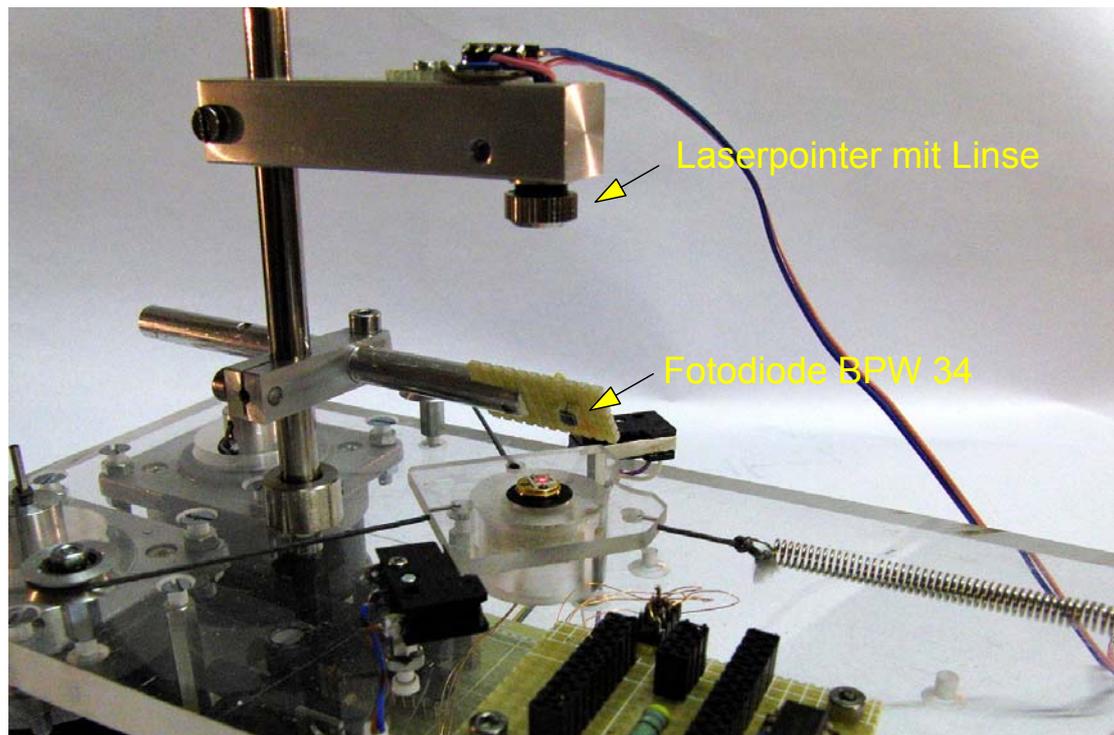


Abb. 91: Einfaches Auflicht-Mikroskop mit Laserpointer

### 7.2.3. Reliefaufnahmen

Ein Vorteil dieses Aufbaus ist die vergleichsweise große Schärfentiefe und der große Abstand des Lasers mit Linse von der Probe, sodass zu Experimentierzwecken verschiedene optische Komponenten eingefügt werden können. Für differenzielle Bilder können zwei Fotodioden in geringem Abstand auf beiden Seiten des einfallenden Strahls eingebaut werden.

Bild der linken Fotodiode



Bild der rechten Fotodiode



Abb. 92: Bilder von einem 1-Cent Stück

Durch die seitliche Position der Fotodioden zeigen Bilder eine ausgeprägte Reliefwirkung.

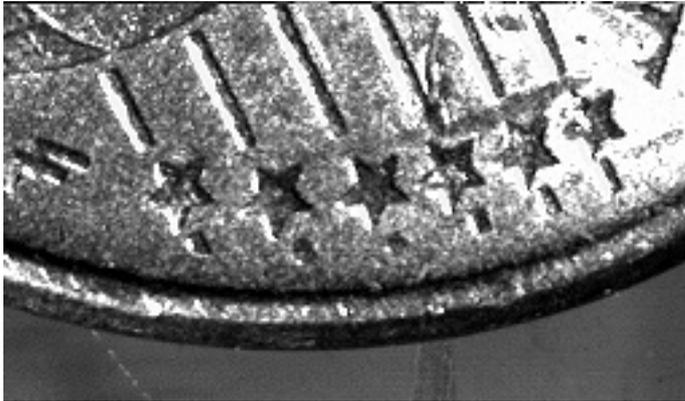


Abb. 93: Der Rand eines 1 Cent Stückes

#### 7.2.4. Polarisationsaufnahmen

Auch Durchlichtbilder mit polarisiertem Licht sind leicht möglich. Da das Licht des Lasers schon polarisiert ist, braucht nur noch ein Analysatorfilter über der Fotodiode im Plexiglassockel montiert zu werden. Als Objekt wurde eine kristallisierte, dünne Schicht von Ascorbinsäure (Vitamin C) gewählt. Nacheinander wurden drei Bilder aufgenommen, zwischen denen der Polarisationsfilter um etwa  $30^\circ$  gedreht wurde. Nach der Einfärbung der Einzelbilder wurden sie zu einem bunten Gesamtbild überlagert.

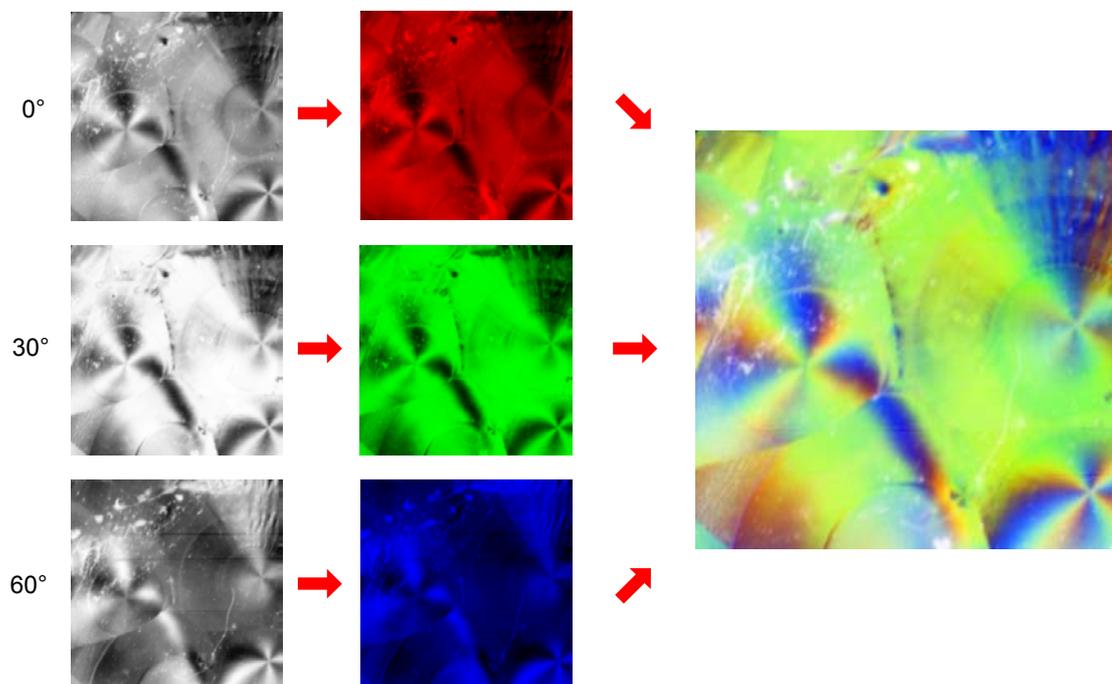
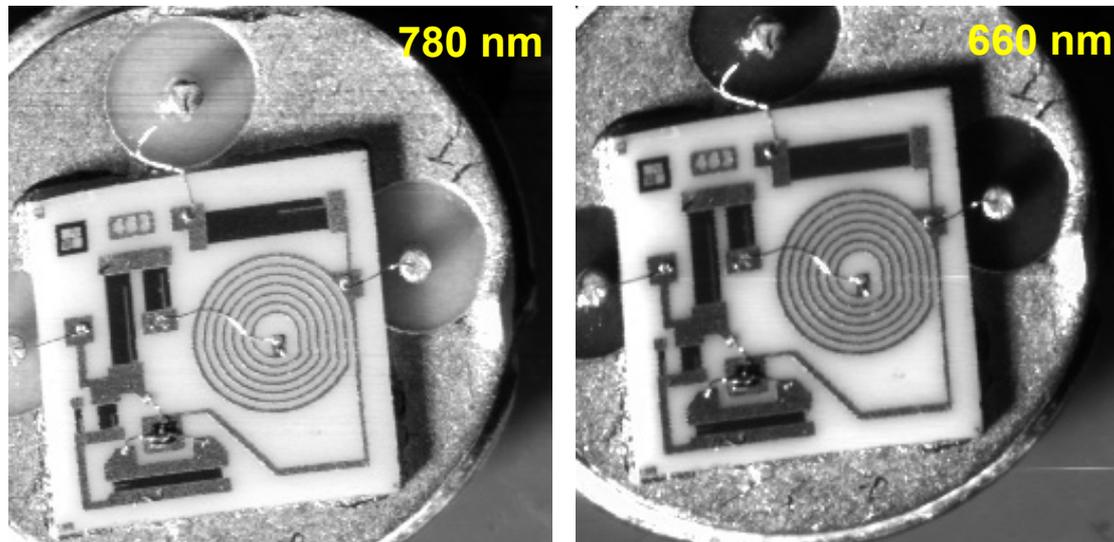


Abb. 94: Ascorbinsäure-Kristalle in polarisiertem Licht

### 7.2.5. Spektralaufnahmen

Durch die Verwendung verschiedener Laserwellenlängen sind auch Multi-spektralbilder möglich. Die folgenden Bilder einer Dickschichtschaltung (Breitbandverstärker GPD 461) wurden einmal mit 780 nm und dann mit 660 nm aufgenommen. Unterschiede in der Reflektion zeigen sich an den Gehäusedurchführungen.



**Abb. 95: Bild eines Verstärkers mit verschiedenen Wellenlängen**

Kommen ein roter, ein grüner und ein blauer Laser zum Einsatz, können durch eine Überlagerung der drei Einzelbilder sogar Bilder in natürlichen Farben erstellt werden. Voraussetzung ist natürlich, dass die drei Einzelbilder deckungsgleich überlagert werden. Eine weitere Möglichkeit zur Gewinnung mehrfarbiger Bilder ist die Verwendung einer weißen LED-Lichtquelle. Mit einem optischen System aus einer Blende und einer Linse kann das Licht einer weißen LED auf einen kleinen Punkt fokussiert werden. Als Empfänger arbeitet ein sogenannter Farbsensor KPS 5130 PD7C (Conrad 180381-62). Dieser Sensor besteht aus drei Fotodioden mit integrierten Farbfiltern, sodass getrennte Signale für den Rot-, Grün- und Blauanteil des reflektierten Lichtes aufgezeichnet werden können. Die Kombination der drei Farbauszüge ergibt dann das Bild in natürlichen Farben.

Nun könnte man Bilder in diesem Vergrößerungsbereich natürlich auch mit einer Digitalkamera und einem guten Makroobjektiv aufnehmen, aber Messverfahren wie OBIC, Thermalwave und Fotoakustik sind natürlich nur mit dem Scannermikroskop möglich.

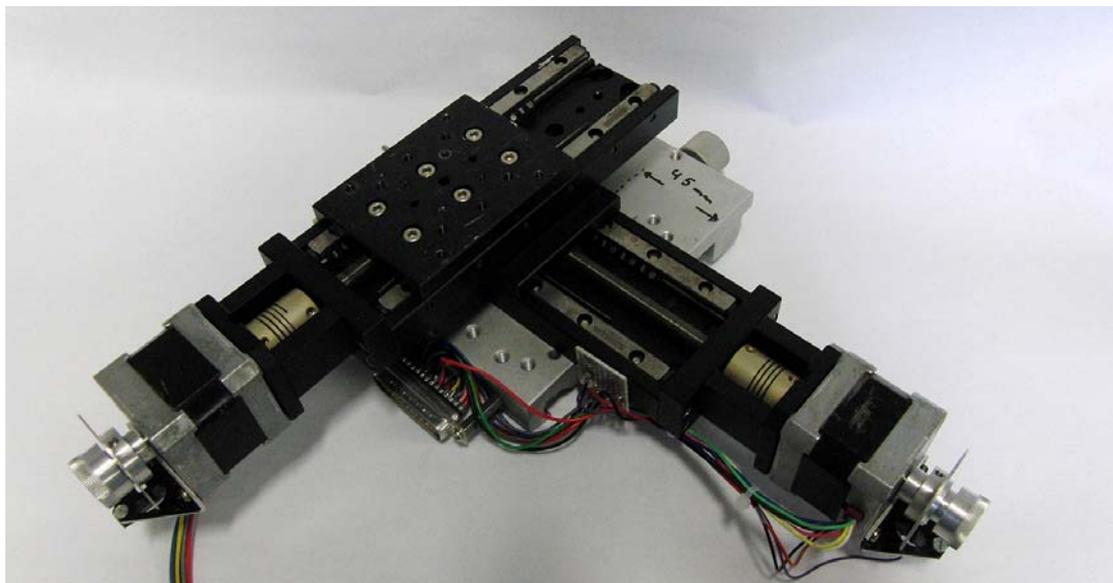
### 7.3. Scanner mit Modellbauservos

Anstelle der Schrittmotoren könnten auch Modellbauservos zum Antrieb der Zugseile verwendet werden. Allerdings ist die Einstellgenauigkeit der Servos meist nicht besonders gut, was vor allem an den eingebauten einfachen Potentiometern liegt, welche die Position der Achsen bestimmen. Auch hier müssten die Zugseile auf möglichst dünne Achsen aufgewickelt werden. Mit einer 2 mm Achse und einem Ruderausschlag von 120° wäre das ein Scan-Weg von 2,1 mm. Ein Vorteil der Servos wäre die kurze Verstellzeit, die durchweg kleiner als eine Sekunde ist. Ein

weiterer Vorteil liegt in der einfachen Ansteuerung. Der Basic Compiler Bascom unterstützt die Ausgabe entsprechender Pulse zum Betrieb üblicher Modellbauservos. Die Pulsdauer muss zwischen 0,5 und 2,5 Millisekunden liegen.

#### 7.4. Kreuztisch mit Schrittmotorantrieb

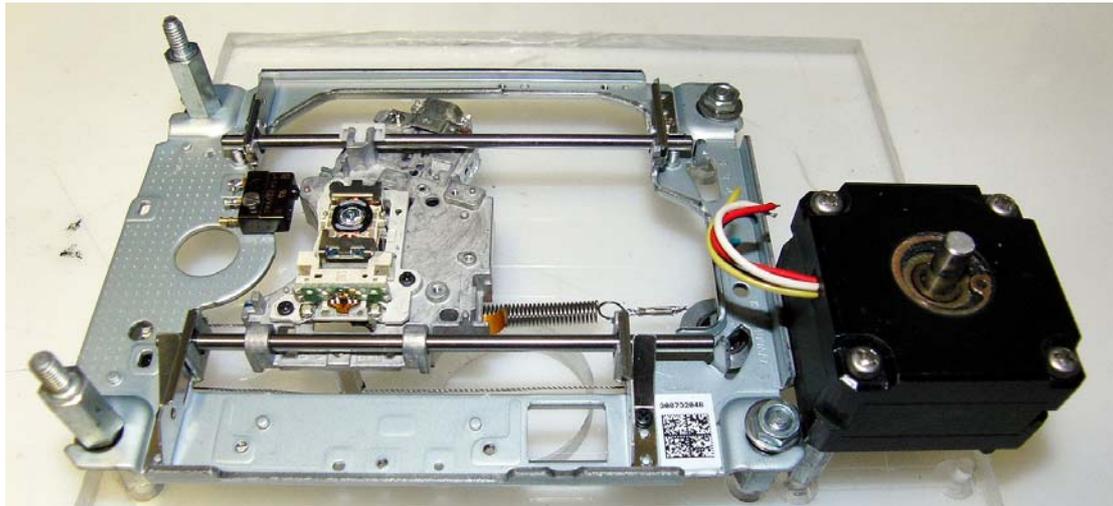
Eine andere Alternative zum Lautsprecherscanner ist ein durch Schrittmotoren bewegter Kreuztisch. Fertige Aufbauten, wie auf dem Bild, sind für leider sehr viel Geld, von den Herstellern optischer Mechanik (Physik Instrumente, Thor Labs, Phywe) zu bekommen. Mit etwas Glück kann man solche Teile auch deutlich billiger auf Flohmärkten oder bei EBAY bekommen, über Hundert Euro wird man aber auch hier bezahlen müssen. Hat man so ein Teil erstanden, bleiben kaum mehr Wünsche offen, da hiermit sowohl große Verfahwege wie auch hohe Auflösung möglich sind.



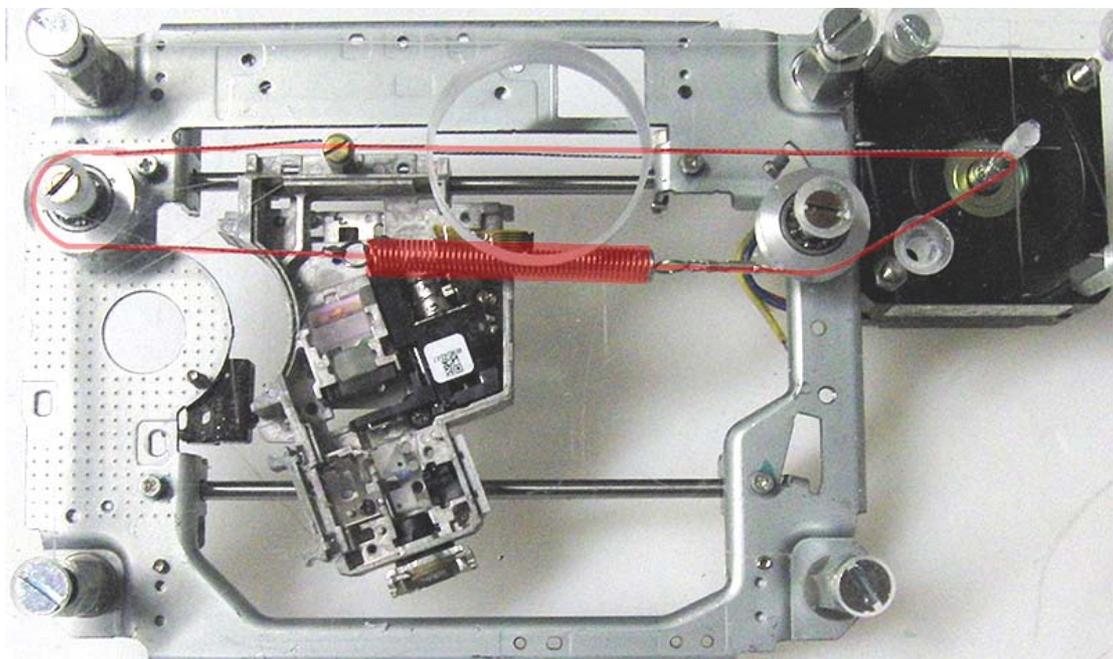
**Abb. 96: Professioneller Kreuztisch mit großem Verfahweg (100 mm) und hoher Auflösung (< 1 $\mu$ m)**

##### 7.4.1. Selbstbaukreuztisch mit Schrittmotorantrieb

Für den Selbstbau wird man wie bei der Optik auf billige Massenprodukte zurückgreifen. Man kann die in den Laufwerken eingebauten Führungen verwenden. Üblicherweise ist der Lesekopf auf zwei Stahlstäben geführt. Der Antrieb des Kopfes geschieht mittels einer Zahnstange mit Zahnrädern oder über eine Schraubenspindel. Allerdings erlauben diese Mechanik und der meist verwendete Gleichstrommotor keine genaue Positionierung des Kopfes. In der ursprünglichen Anwendung spielt das keine Rolle, da die Position des Kopfes anhand der Informationen auf der CD eingestellt wird. Für das Lasermikroskop ist aber eine von der Probe unabhängige Positionierung erforderlich. Deshalb demontiert man die Antriebsmechanik und baut an deren Stelle eine eigene Seilzugverstellung mit Schrittmotor.



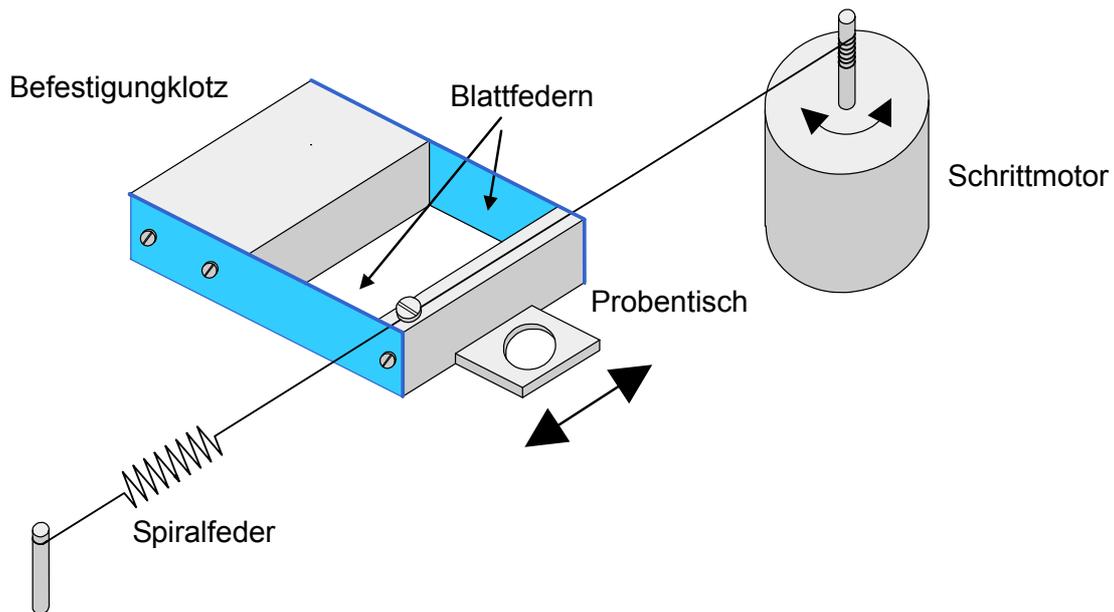
**Abb. 97: Die Überreste des Blu-ray-Laufwerks mit neuem Schrittmotor und Seilzug**



**Abb. 98: Auf der Unterseite ist der Seilzug angebracht**

Das Verschieben des Lesekopfes auf der Stangenführung erlaubt das Rastern in einer Richtung. Die andere Verfahrrichtung muss natürlich senkrecht dazu liegen. Für eine einfache mechanische Lösung werden die beiden Rasterachsen getrennt, d. h., der Lesekopf verfährt nur in einer Richtung, der Probestisch mit der Probe verfährt senkrecht dazu. Für die Verfahrung des Probestisches könnte man ein zweites, entsprechend modifiziertes Laufwerk, verwenden. Anstelle des Lesekopfes würde man hier den Probestisch auf den Spurstangen bewegen.

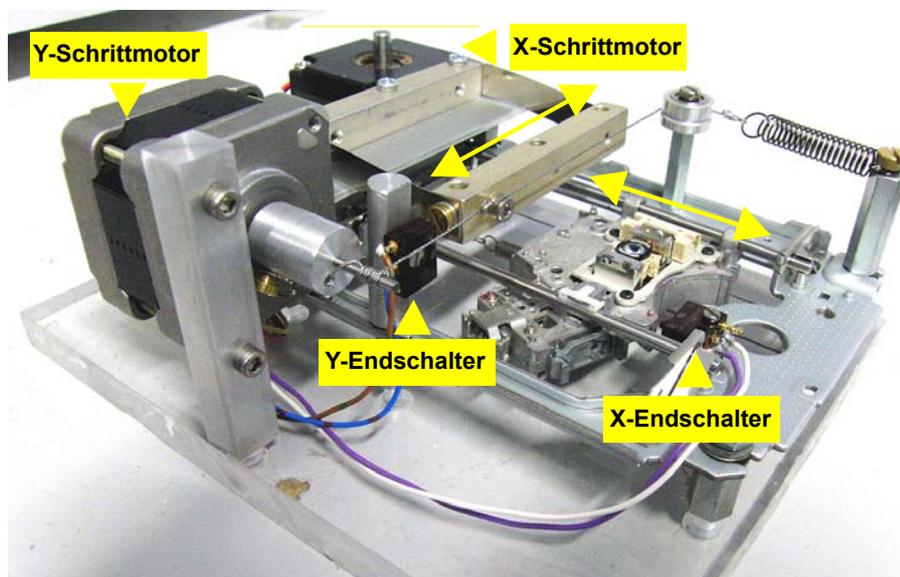
Der Verfasser entschied sich hier einen anderen Weg zu gehen und eine selbst gebaute Blattfederführung zu verwenden. Diese Vorrichtung besteht im Wesentlichen aus zwei Klötzchen, die durch zwei Federbleche verbunden sind. Auch bei der Blattfederführung beschreibt der Weg der Probe keine Gerade, sondern einen Kreisbogen. Ist aber die Federlänge viel größer als der Verstellweg, bleibt der Fehler klein.



**Abb. 99: Aufbau des Blattfederscanners für eine Achse**

Auch die Blattfedermechanik wird durch einen Seilzug bewegt. Gegen die Spannung einer Feder wird das Zugseil auf der Achse eines Schrittmotors aufgewickelt und bewegt so den Probentisch.

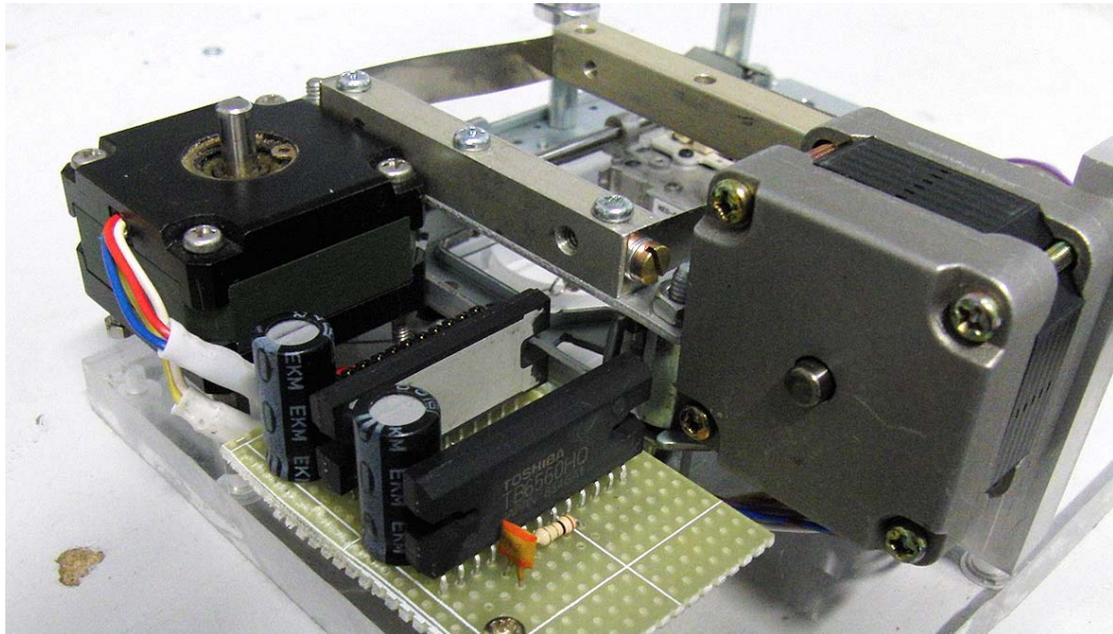
Die Schwierigkeiten bei diesem Aufbau liegen in der Justierung. Der Probentisch muss exakt wagrecht ausgerichtet sein, da sich sonst während der Rasterbewegung der Abstand zum Lesekopf ändert und die Fokuseinstellung verloren geht.



**Abb. 100: Die fertige Verfahrenseinheit mit der Blattfederverstellung in Y-Richtung (noch ohne Probentisch)**

Der Seilzug für die Y-Richtung wurde aus Platzgründen mit einer Rolle umgelenkt. Hat man eine größere Grundplatte gewählt, kann der Seilzug natürlich auch gerade verlaufen.

Für die Schrittmotoren wurden kleine 12 V Typen verwendet, wie sie in alten Scannern oder Diskettenlaufwerken zu finden sind. Zum Antrieb der Motoren wird die schon erwähnte Treiberschaltung TB 560 HQ verwendet.

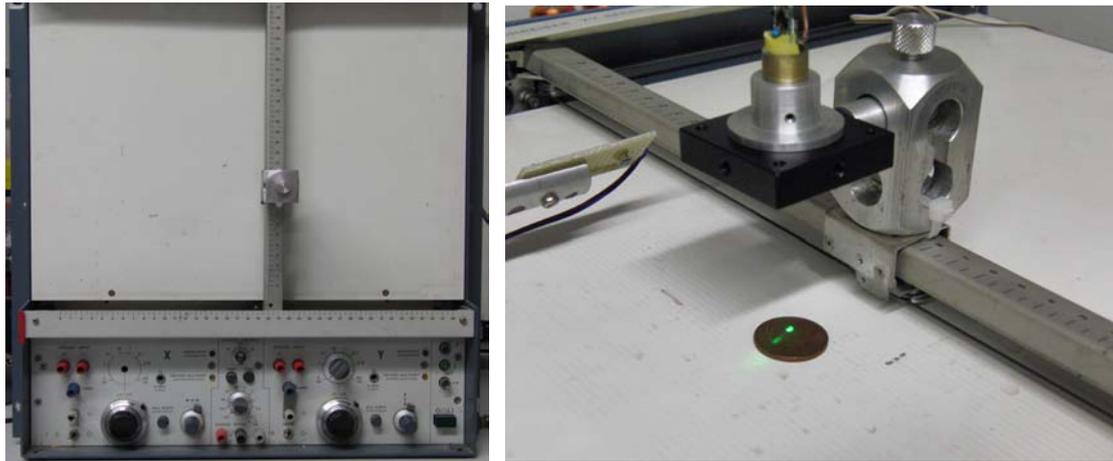


**Abb. 101:** Dank des hochintegrierten Bausteins kommt der Treiber mit wenigen Bauteilen aus

## 7.5. Scanner aus einem XY-Schreiber

Analoge XY-Schreiber wurden früher viel in naturwissenschaftlichen Labors zur Aufzeichnung von Messergebnissen verwendet. Mit der Einführung von Computer mit AD-Wandlern zur Aufnahme von Messdaten wurden diese Geräte überflüssig und landeten erst meist in der Schrottkiste und später auf Flohmärkten und bei Ebay. Hat man die Gelegenheit ein solches Gerät zu erwerben, sollte man zugreifen. Zur Verwendung als Scanner wird der Lesekopf anstelle des Schreibstiftes montiert und die zu rasternde Probe auf die ehemalige Papieraufgabe gelegt. Die Auflösung dieser Geräte liegt zwar nur bei etwa 100  $\mu\text{m}$ , dafür sind sie aber in der Lage große Flächen abzurastern. Die Ansteuerung erfolgt einfach mit DA-Wandlern über den X- und Y-Messkanal.

Ein Scanner mit einem XY-Schreiber ist schnell aufgebaut und auch die Ansteuerung ist einfach, und deshalb eignet er sich sehr gut für provisorische Aufbauten, um etwa ein neues Messverfahren zu testen. So wurden die Thermal Wave- und die Oberflächenfotospannungs-Bilder mit einem XY-Schreiber aufgenommen.



**Abb. 102: Analoger XY-Schreiber und Probeaufbau mit Laserpointer und Fotodiode**

Ähnlich wie XY-Schreiber lassen sich alte Flachbettplotter, bei denen nur der Stift und nicht das Papier bewegt wird, zum Scannen verwenden. Hier erfolgt die Ansteuerung natürlich digital, meist mit HPGL-Befehlen.

Vor allem bei Techniken, bei denen es nicht auf höchste Auflösung ankommt, sind XY-Schreiber oder Plotter eine einfache Lösung, die ohne große mechanische Arbeiten schnell zum Erfolg zu führt.