

KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

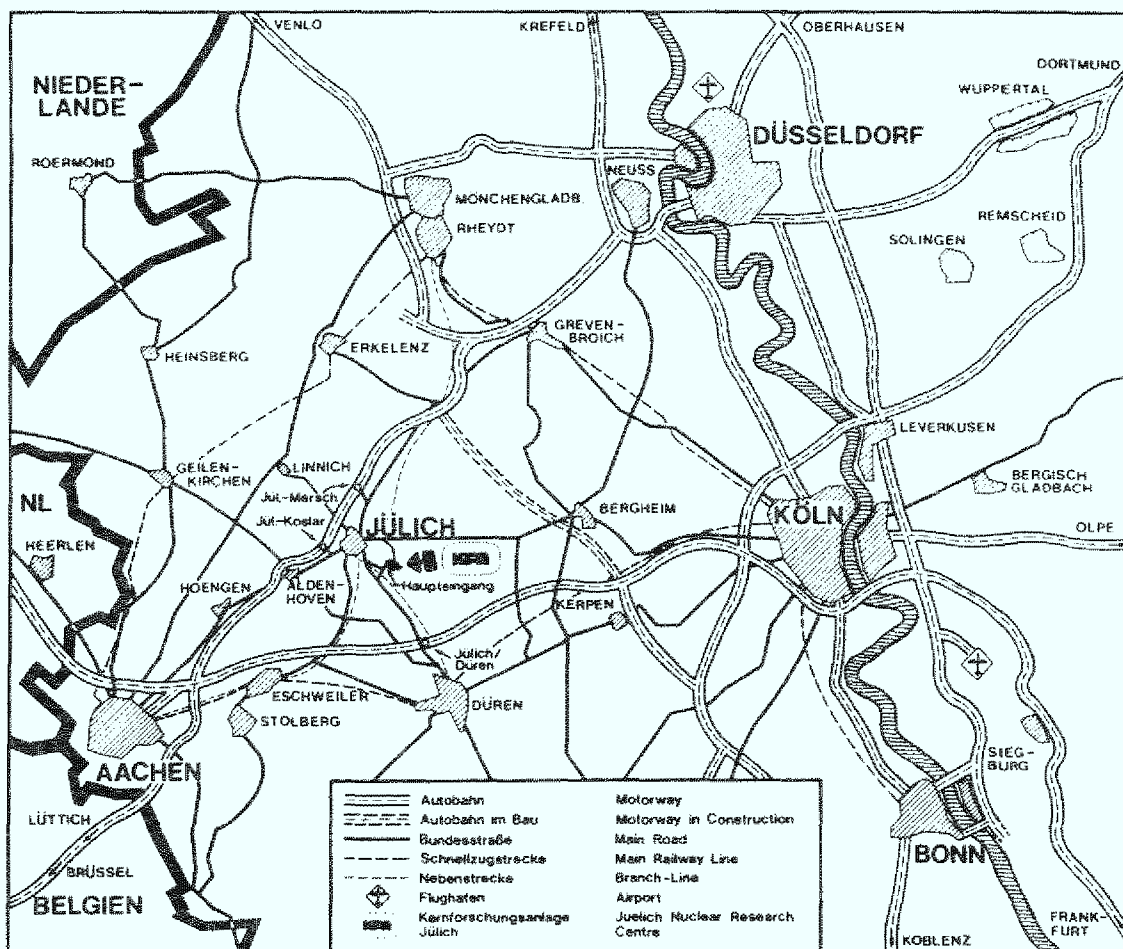
Zentrallabor für Elektronik

**Ein Fernsehmeßsystem zur Erfassung
von Wachstumsparametern bei der
Kristallzüchtung aus der Schmelze**

von

K.-J. Gärtner

JüI - 1730
August 1981
ISSN 0366 - 0885



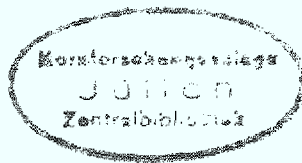
Als Manuskript gedruckt

Berichte der Kernforschungsanlage Jülich - Nr. 1730

Zentrallabor für Elektronik Jül - 1730

Zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH
Postfach 1913 · D-5170 Jülich (Bundesrepublik Deutschland)

Telefon: 0 24 61/61-0 Telex: 833 556 kfa d



Ein Fernsehmeßsystem zur Erfassung von Wachstumsparametern bei der Kristallzüchtung aus der Schmelze

von

K.-J. Gärtner

D 82 (Diss. T. H. Aachen)

127 159 136
ZUGABE-NR. _____

	Seite
1. Einleitung	1
2. Vergleich mit anderen Verfahren	4
3. Prinzipielle Wirkungsweise des Fernsehmeßsystems	6
3.1 Überblick	6
3.2 Kameraröhre und Abtastvorgang	9
3.3 Zeilenselektion	13
3.3.1 Manuelle Programmierung auf eine Zeile	14
3.3.2 Automatische Phasengrenzensuche	17
3.4 Durchmessermessung für horizontale Kamerablickrichtung	18
3.4.1 Elektronenoptische Grundlagen - Abtastung eines weißen Balkens -	18
3.4.2 Technische Realisierung	25
3.5 Bestimmung der Meniskusform	29
3.6 Ermittlung des maximalen Durchmessers der elliptischen Reflexion bei schrägem Kameraeinblick	32
3.7 Bestimmung der Höhe der Phasengrenze	34
3.8 Temperaturmessung	35
4. Einige spezielle Probleme bei der Auswahl der Komponenten und Realisierung des Meßsystems	40
4.1 Das Kameraobjektiv	40
4.2 Die Kameraröhre	42
4.3 Die Kamera	48
4.4 Rauscheinflüsse bei Längenmessungen in horizontaler Richtung	51
4.5 Realisierung des Video-Voltmeters für Temperaturmessung	54

	Seite
5. Steigerung der Meßgenauigkeit durch Ausreißer- eliminierung und Mittelwertbildung mit Hilfe eines Mikrorechners	59
5.1 Untersuchungen zur Gauß-Verteilung	59
5.2 Betriebsmäßige Durchführung statistischer Rechenoperationen	60
5.3 Ergebnisse	63
6. Integration des Meßsystems in die gesamte Kristallziehapparatur	67
7. Ausblick auf zukünftige Entwicklungen	70
8. Zusammenfassung	70
9. Literaturhinweise	72

III

A	Austastsignal
A_i	Verstärker
a	Abbildungsmaßstab
B	Bildsignal
BAS	Bild-Austast-Synchronsignal
B_T	Breite des Temperaturmeßflecks
b	Breite bzw. Abstand einer vertikalen Streifenvorlage
C	Kapazität
c_e	Kapazität eines Speicherelementes
D	Durchmesser eines Objektes
D_R	Droop Rate (Abfallrate der Spannung)
d	Kantenlänge bzw. Durchmesser eines Bildpunktes
F	Bildformat (Breite zu Höhe)
f_H	Zeilenfrequenz
f_V	Halbbildfrequenz
f	Frequenz
Δf	Bandbreite (-3 dB)
$f(t)$	Funktion der Zeit
$f(\lambda)$	Funktion der Wellenlänge
grad T	Temperaturgradient
g	Anzahl der Ganzbilder je Sekunde
H	horizontale Taktimpulse
H_T	Höhe des Temperaturmeßflecks
h	Höhe der Phasengrenze über dem Schmelzenniveau
I_D	Dunkelstrom der Aufnahmeröhre
I_L	Leckstrom
I_S	Signalstrom der Aufnahmeröhre
k	Boltzmann-Konstante
L_V	Leuchtdichte
l	Bildbreite
m	Modulationstiefe
n	laufende Nummer einer selektierten Zeile
n_o	oberste Zeile eines Scan-Bereiches
n_u	unterste Zeile eines Scan-Bereiches
p	Verhältnis von vertikaler Rücklaufdauer zur Periodendauer eines Halbbildes
q	Bildhöhe

R	Widerstand
R_i	Innenwiderstand eines Verstärkers
R_{ON}	"Ein"-Widerstand eines FET-Schalters
R_{OFF}	"Aus"-Widerstand eines FET-Schalters
r_e	Widerstand eines Speicherelementes
$r(99 \%)$	statistische Prüfgröße für 99 % Wahrscheinlichkeit
S	Störabstand
S_i	FET-Analog-Schalter
s	Substitutionsgröße
T	Temperatur
T_L	Temperatur der Schmelze
T_M	Erstarrungstemperatur
T_H	Periodendauer einer Zeile
$T_{H_{eff}}$	Effektive Zeilendauer
T_v	Periodendauer eines Halbbildes
$T_{v_{eff}}$	Effektive Halbbilddauer
T_{x_i}	Streubereich der Einzelwerte
$T_{\bar{x}}$	Streubereich der Mittelwerte (Vertrauensbereich)
t	STUDENT-Faktor
t_a	Anstiegsdauer des Photostromes (0 bis 100 %)
t_D	Abtastzeit, proportional zum Durchmesser eines Objektes
t_c	Wandelzeit des A/D-Wandlers
t_{KL}	Dauer des Klemmimpulses
t_p	Abtastzeit, proportional zur Ortskoordinate des Meniskus
t_r	Anstiegszeit (10 % bis 90 %)
t_T	Zeit, proportional zur Breite des Temperatur-Meßflecks
t_v	Verzögerung des A/D-Wandelbefehls
U_{max}	Maximalwert der Videoamplitude ohne Rauschanteil
U_{REF}	Spannung am Referenzeingang der analogen Komparatoren
U_{VIDEO}	Videospannung
ΔU	Spannungsverlust während der Halte-Phase des Videovoltmeters
ΔU_E	Minimalwert der Eingangsspannungsdifferenz der analogen Komparatoren
u_R	Rauschspannung (Momentanwert)

V	Vertikale Taktimpulse
v	Spannungsverstärkung
v_H	Horizontale Abtastgeschwindigkeit
w	Verhältnis von horizontaler Rücklaufdauer zur Periodendauer einer Zeile
x	x-Koordinate eines Bildpunktes
Δx	örtliche Auflösung in x-Richtung (horizontal)
$\bar{x}$	Mittelwert einer Meßreihe
x_i	Einzeldaten einer Meßreihe
y	y-Koordinate eines Bildpunktes
Δy	örtliche Auflösung in y-Richtung (vertikal)
z	Zeilenzahl des Fernsehsystems
Φ	Photostrom eines Wandlerelementes
α	Wachstumswinkel
γ	Exponent der Übertragungsfunktion der Aufnahmeröhre
λ	Wellenlänge
$\lambda_{\max}$	Wellenlänge beim Maximalwert der Leuchtdichtevertelung
ρ	Anzahl der Bildpunkte
σ	Standardabweichung
τ_E	Entladezeitkonstante
τ_H	Horizontale Rücklaufdauer
τ_V	Vertikale Rücklaufdauer

1. Einleitung

Unter den bekannten Verfahren zur Herstellung von Einkristallen hat das Czochralski-Verfahren /1/ - das Ziehen von Einkristallen aus der Schmelze - eine besondere Bedeutung, sowohl in der Industrie, als auch in der Forschung.

In der Industrie dient es zur Herstellung des größten Teils des Weltbedarfs aus Silizium, Germanium, Galliumarsenid und Galliumantimonid. In der Forschung werden aus verschiedenen Metallen, Nichtmetallen und deren Legierungen Kristalle nach dem Czochralski-Verfahren für Untersuchungen, wie Neutronen- und Elektronenstreuexperimente, Untersuchung der elektronischen Eigenschaften (Supraleitung, Restwiderstand) hergestellt.

Aus Abb. 1 geht die prinzipielle Wirkungsweise des Verfahrens hervor, das unter Schutzgasatmosphäre (≈ 760 Torr) bzw. unter Hochvakuum ($\approx 10^{-6}$ Torr) in einem Kessel betrieben wird. In einem z.B. aus Aluminiumoxyd oder Graphit bestehenden Tiegel wird das Material, aus dem der Einkristall gezogen werden soll, mit Hilfe einer induktiven oder Widerstands-Heizung aufgeschmolzen.

An einer Hub-Drehmechanik wird ein sogenannter Impfling befestigt, der aus dem gleichen Material wie das der Schmelze besteht. Dieser wird in die Schmelze eingetaucht und nach völliger Benetzung bei gleichzeitiger Drehbewegung langsam nach oben gezogen. Infolge der Oberflächenspannung haftet bei geeigneter Temperaturverteilung in der Schmelze und im Kristall sowie bei geeigneter Ziehgeschwindigkeit die Schmelze am Impfling und erstarrt aufgrund der Wärmeableitung über dem Kristall und der Wärmeabstrahlung an die Umgebung dicht oberhalb der Schmelzenoberfläche, an der sogenannten Phasengrenze /2/. Zwischen beiden bildet sich der Meniskus aus, dessen Form den Kristalldurchmesser bestimmt und durch Ziehgeschwindigkeit sowie Schmelztemperatur beeinflusst werden kann.

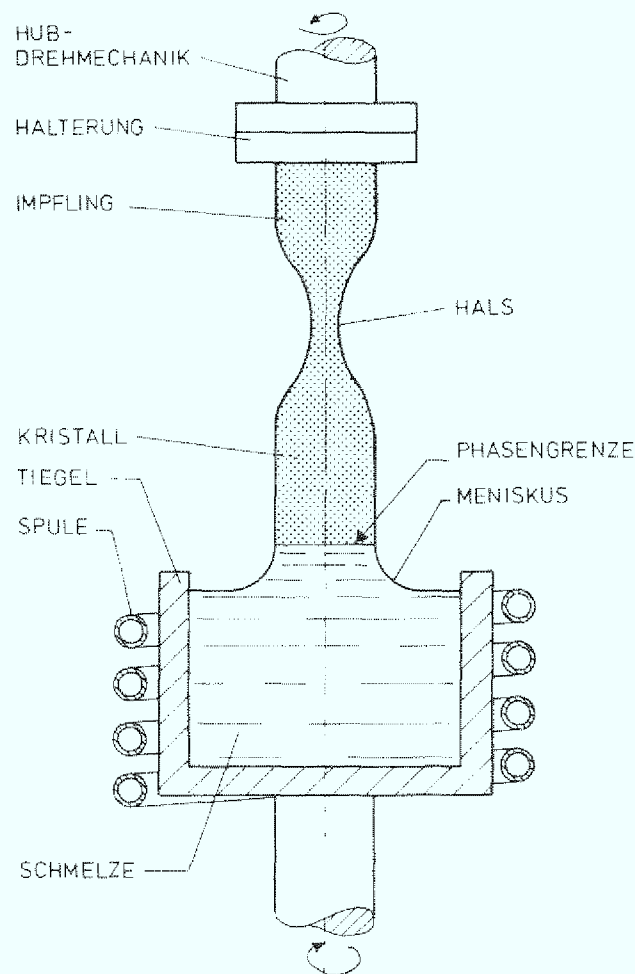


Abb. 1 Kristallziehordnung nach Czochralski

Zur Reduzierung von Gitterfehlern wird zunächst ein "Hals" gezogen, indem die Schmelzentemperatur erhöht wird (bei Cu z.B. 100°C über dem Schmelzpunkt von 1084°C). Hierauf wird für ein stationäres Wachstum (konstanter Durchmesser) die Temperatur wieder abgesenkt auf einen Wert, abhängig vom Material und gewünschtem Durchmesser (bei Cu von 10 mm Durchmesser $\approx 10^{\circ}\text{C}$ oberhalb der Schmelzentemperatur).

An der Phasengrenze ist eine Wärmebilanz immer erfüllt, indem ein Gleichgewicht besteht zwischen zugeführter Wärme aus der Schmelze und Kristallisationswärme einerseits sowie der abgeführten Wärme im Kristall andererseits. Abhängig von der Schmelzentemperatur stellt sich nach Geist und Grosse /3/ eine bestimmte Höhe der Phasengrenze über dem

Schmelzenniveau ein. Hierdurch wird bei bestimmter Oberflächenspannung des Materials die Meniskusform festgelegt. Für stationäres Wachstum folgt, daß eine ständige Korrektur der Schmelztemperatur infolge der sich ändernden Wärmeableitung und -abstrahlung erforderlich ist, wobei bei einem 10 mm Cu-Kristall eine Änderung der Schmelztemperatur um 1°C bereits eine Durchmesseränderung von ca. 5 % hervorruft /4/.

Es ist ersichtlich, daß für die Herstellung hochperfekter Kristalle sowie für das tiefere Verständnis ihres Wachstums neben der heute problemlosen Messung und Regelung der äußeren Bedingungen wie Gasdruck, Gasreinheit bzw. Qualität des Hochvakuums, Zieh- und Rotationsgeschwindigkeiten der Hub- und Drehmechanik, die Kenntnis sowie die Beherrschung der folgenden Wachstumsparameter von ausschlaggebender Bedeutung ist:

1. Kristalldurchmesser an der Phasengrenze
2. Meniskusform
3. Höhe der Phasengrenze über dem Schmelzenniveau
4. Temperatur am Kristall und in der Schmelze
5. Temperaturverteilung, insbesondere in der Nähe der Phasengrenze.

Diese Arbeit befaßt sich mit der Realisierung eines Fernsehmeßsystems, welches unter geeigneter Auswertung des Videosignales berührungslos die Messung der oben genannten Parameter während des Züchtungsprozesses gestattet.

2. Vergleich mit anderen Verfahren

Das folgende Zitat aus dem Buch von J.J. Gilman "Art and Science of Growing Crystals" aus dem Jahre 1963 /5/ kennzeichnete die Situation bei der Kristallzucht zum damaligen Zeitpunkt sehr deutlich: "It is somewhat ironic that although artificial crystal growth has had so much effect on various sciences, the process itself has retained more of the flavor of art than of science".

Gelöst wurden die Probleme der Messung und Regelung der erwähnten äußeren Bedingungen, die für das Ziehen von Kristallen erforderlich sind.

Schwierig ist nach wie vor die Automatisierung des Ziehprozesses über eine Messung des Kristalldurchmessers und Regelung der Heizleistung zur Einstellung einer für stationäres Wachstum geeigneten Schmelzentemperatur. Man hat zunächst eine indirekte Durchmesserregelung durch Programmregelung der Hochfrequenzleistung oder der Schmelzentemperatur durchgeführt /4, 6/. Diese sogenannten Open-Loop-Methoden sind jedoch nicht so wirkungsvoll wie die direkte Messung und Regelung des Durchmessers an der Phasengrenze, für die in den letzten Jahren eine Reihe von Verfahren angegeben wurden.

Erstmals schlug Stut (Siemens) 1962 in seiner Patentschrift - allerdings für das Zonenschmelzen - vor, den wachsenden Kristall auf dem Target einer Fernsehaufnahmeröhre abzubilden und den zeitlichen Abstand der Helligkeitssprünge an der linken und rechten Kante des leuchtenden Kristalls vor dem dunkleren Hintergrund elektronisch zu vermessen /7/. Ein auf diesem Gedankengang beruhendes Verfahren wurde von Bachmann et al. (HMI Berlin) bei der Czochralski-Züchtung (1971) angewandt /8/.

Ebenfalls 1971 veröffentlichten O'Kane und Mitarbeiter (IBM, USA) eine direkte Messung des Kristalldurchmessers

mit Hilfe eines Fernsehmeßsystems mit der zusätzlichen Möglichkeit, Temperaturmessungen oberhalb 350°C durchführen zu können /9, 10/. Über Ergebnisse wird leider nur wenig mitgeteilt. 1972 berichten Groß und Kersten (Philips, Aachen) von einer Laserstrahl-Reflexionsmethode, die den Neigungswinkel an einer bestimmten Stelle des Meniskus, dessen Abstand vom Zentrum konstant gehalten wird, als Maß für den Kristalldurchmesser verwendet /11/. 1972 und 1974 wird von Bardsley und Mitarbeitern (Royal Radar Establishment, UK) /12, 13/ eine auf einem US-Patent von Levinson /14/ basierende Gewichtsmethode vorgestellt, bei der über eine Wägung der Ziehspindel mit anhängendem Kristall und/oder einer Wägung des Tiegels auf den Durchmesser des Kristalls zurückgerechnet werden kann.

Die genannten Video-Verfahren wurden zum Teil nicht technisch durchentwickelt oder wurden nach kurzer Zeit wieder fallen gelassen, ebenso wie die Laserstrahl-Reflexionsmethode. Die Idee der Gewichtsmethode wurde von verschiedenen Firmen aufgegriffen und wird heute an einigen Stellen eingesetzt.

All diesen Verfahren ist ein wesentlicher Punkt gemeinsam: Sie erfassen direkt oder indirekt eine Größe proportional zum Durchmesser des wachsenden Kristalls und sind somit dientlich bei der Herstellung von Kristallen, versagen jedoch, wenn der Wachstumsprozeß studiert werden soll und daher die in der Einleitung genannten Parameter gemessen werden müssen.

Da in der Kernforschungsanlage Jülich neben der Herstellung hochperfekter Kristalle auch insbesondere das Studium ihres Wachstums im Vordergrund steht, haben wir uns im Zentrallabor für Elektronik der KFA entschlossen, die Möglichkeiten, die das Fernsehen bei zeitlicher und amplitudenmäßiger Auswertung des Videosignals bieten kann, auszuschöpfen und haben über einen ersten derartigen Testaufbau 1971 berichtet /15/. Jahrelange experimentelle Erfahrungen mit diesem ersten Fernsehmeßsystem /16, 17/ haben vor 3 Jahren zu der hier vorgelegten Konzeption geführt, die im Verlauf des Jahres 1981 fertig wurde.

3. Prinzipielle Wirkungsweise des Fernsehmeßsystems

3.1 Überblick

Üblicherweise wird das Fernsehen als Informationsmedium verwendet. Die Möglichkeiten, die es in einer Weiterentwicklung als elektronisches Meßgerät zur Messung der in der Einleitung genannten Parameter bieten kann, sollen nun erarbeitet werden.

Eine Fernsehanlage besteht aus einer Kamera, einer Übertragungsanlage, einem Empfänger und einem Taktgeber. Die Kamera hat die Aufgabe, die Ortskoordinaten einer Folge von verschieden hellen Bildpunkten der Vorlage in eine zeitliche Folge von Amplitudenschwankungen des Signalstromes zu überführen /18/. Dies geschieht in der Weise, daß eine Optik zunächst das zu übertragende Bild auf die lichtempfindliche Schicht einer Kameraröhre projiziert. In dieser Speicherschicht wird bei den heute üblichen Röhren vom Vidikon-Typ unter Ausnutzung des inneren Photoeffektes (lichtelektrischer Widerstandseffekt) das optische Bild in ein elektrisches Ladungsbild umgewandelt: es entsteht eine flächenhafte Anordnung unterschiedlicher Ladungen entsprechend der verschieden hellen Bildpunkte der Vorlage. Ein fein gebündelter Elektronenstrahl wird nun mit konstanter Geschwindigkeit zeilenweise durch Einwirken eines horizontalen und vertikalen magnetischen Feldes über die Speicherschicht geführt, wobei er nacheinander kleinste Flächenelemente (entsprechend seinem Querschnitt) in den Signalstromkreis einschaltet, die unterschiedlichen Ladungen dieser Elemente neutralisiert und so in zeitlicher Aufeinanderfolge das Bildsignal (B) entstehen läßt /18, 19/.

Die Übertragungsanlage beinhaltet im einfachsten Falle eine Kabelstrecke oder, wie im Fernsehrundfunk, einen hochfrequenten Übertragungskanal. Der Monitor hat die umgekehrte Aufgabe wie die Kamera, d.h., er wandelt das Frequenzspektrum der Signalamplitude um in eine der Bildvorlage entsprechende flächenhafte Anordnung verschiedener Helligkeitswerte.

Für meßtechnische Aufgaben hat der Monitor eine untergeordnete Bedeutung, da er lediglich der Beobachtung des Meßobjektes dient. Ihm können jedoch bestimmte Markierungssignale zur Kennzeichnung der für die Meßaufgabe wichtigen Bereiche des Fernsehbildes zugeführt werden.

Der Taktgeber erzeugt das zur synchronen Steuerung der Elektronenstrahlen in Aufnahme- und Wiedergaberöhre notwendige Synchronsignal (S), das seinerseits aus horizontalen (H) und vertikalen (V) Synchronimpulsen besteht. Er schafft im Zusammenwirken mit den magnetischen Feldern der Ablenkeinheiten eine eindeutige Verknüpfung zwischen den Ortskoordinaten der Vorlage bzw. des Monitorbildes und der Zeitfunktion des Bildsignals. Dies bedeutet, daß dem Videosignal zum Zeitpunkt t_1 eine Ortskoordinate x_1 , y_1 der Vorlage bzw. auf dem Schirm des Monitors zugeordnet ist. Durch Selektion einer bestimmten Zeile (y-Richtung) und Auswahl einer bestimmten Stelle innerhalb dieser Zeile (x-Richtung) kann jeder Bildpunkt der Vorlage ausgewählt werden, wobei die Amplitude dieses Videosignals der Helligkeit des Bildpunktes der Vorlage entspricht. Außerdem erzeugt der Taktgeber das sogenannte Austastsignal (A), das den vor jedem neuen Schreibvorgang zurückgeführten Elektronenstrahl austastet und somit unsichtbar macht. Üblicherweise werden B-, A- und S-Signal zum BAS-Signal zusammengemischt.

Da beim Czochralski-Verfahren der Prozeß in einem Kessel unter Hochvakuum oder Schutzgas betrieben wird, ist es notwendig, daß die Fernsehkamera durch ein Fenster in den Kessel hineinsieht, wie aus Abb. 2 ersichtlich ist. Für eine fast horizontale Blickrichtung bietet sich der Kamera bei gefülltem Tiegel ein Bild gemäß Abb. 3 (fotografische Farbaufnahme) für einen wachsenden Kupferkristall: Aufgrund unterschiedlicher Emissionsgrade und Temperaturen von Schmelze und Kristall ergeben sich nach den Gesetzen von Stefan-Boltzmann und Planck unterschiedliche Leuchtdichten: der Kristall wird dunkler abgebildet als die Schmelze. Zwischen beiden stellt sich die Phasengrenze als fast horizontale Linie dar. Diese Kameraposition ist vorzüglich zur Vermessung der einzelnen Parameter geeignet und wird daher bevorzugt angewendet. Sie versagt jedoch, wenn die Schmelzenoberfläche zu weit abgesunken ist und die

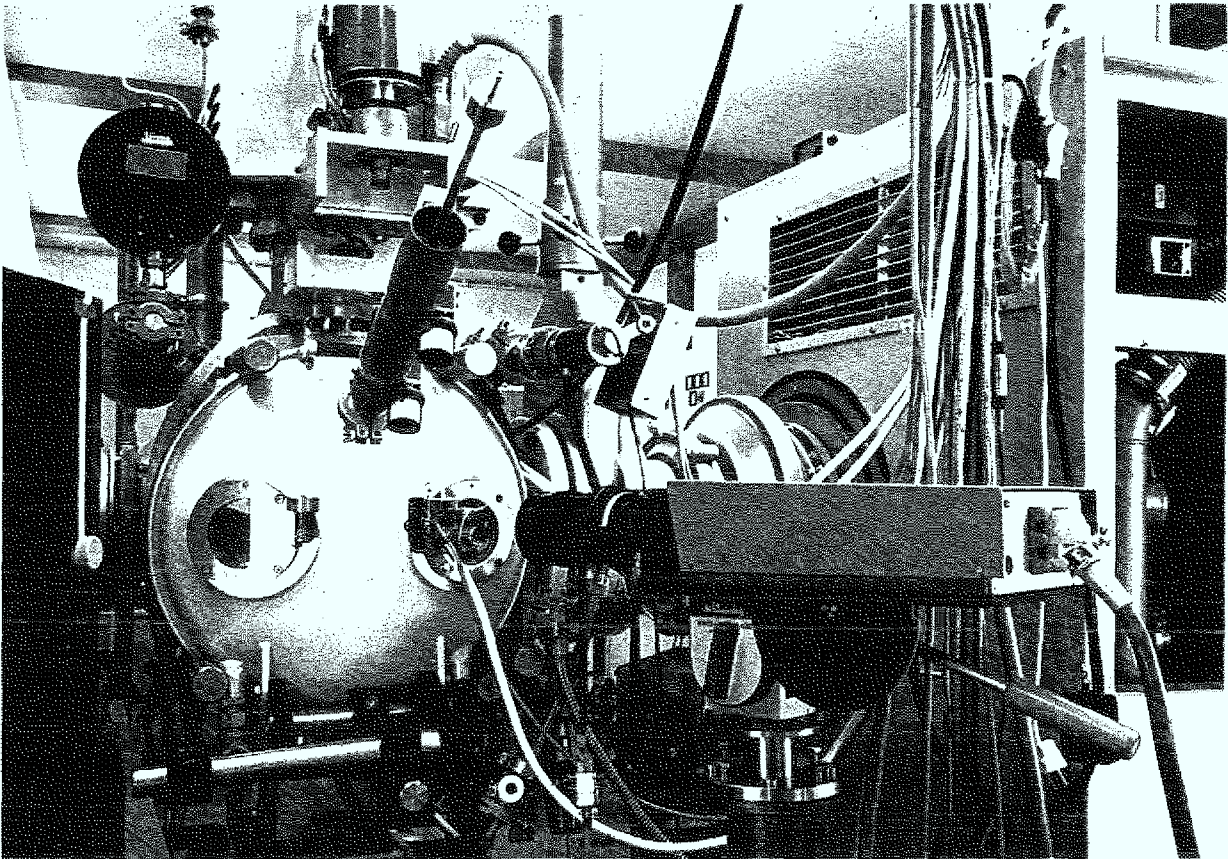


Abb. 2 Kessel, Pumpstand (rechts) und Fernsehkamera.
Die Kamera sieht in horizontaler Blickrichtung durch
eines der beiden Kesselfenster auf den wachsenden
Kristall.

Kamera infolge des hervorstehenden Tiegelrandes die Phasengrenze und den Meniskus nicht mehr erkennen kann. Dies ist immer dann der Fall, wenn der Tiegel "leergezogen" wird, d.h. wenn das Schmelzenmaterial möglichst ganz genutzt werden soll, was für industrielle Anwendungen besonders wichtig ist.

Hier kann nur eine schräge Kamerablickrichtung unter etwa 60° Erhebungswinkel verwendet werden, die dann ein Bild gemäß Abb. 4 (fotografische Farbaufnahme) liefert: Meniskus und Phasengrenze sind nicht mehr erkennbar. Vielmehr bildet sich eine hell leuchtende ellipsenförmige Reflexion auf der Schmelzenoberfläche ab.

Für beide Kamerablickrichtungen werden nach einigen grundlegenden Erläuterungen über Kameraröhren und Abtastvorgang Lösungen zur Erfassung der für die Kristallzucht und für das Kristallwachstum interessierenden Parameter angegeben.

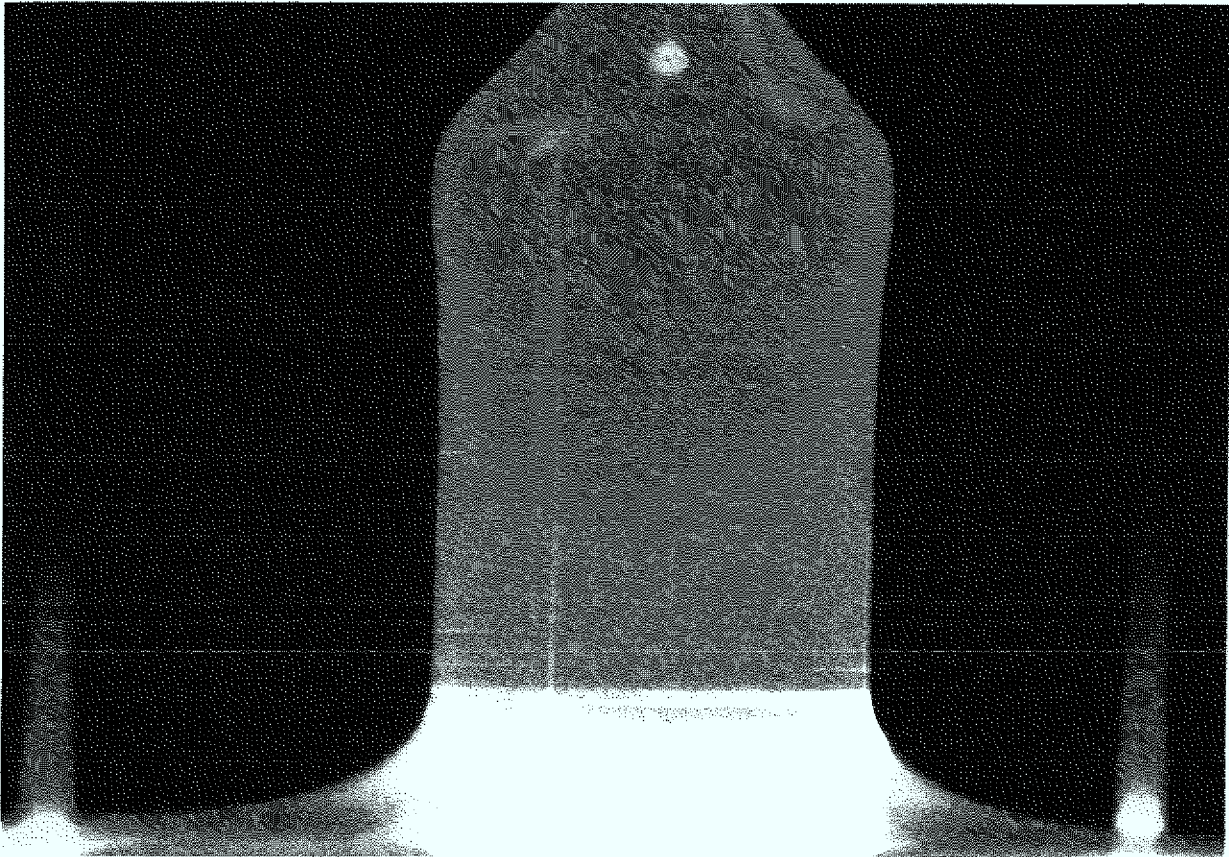


Abb. 3 Wachsender Kupferkristall bei horizontaler Blickrichtung (fotografische Farbaufnahme).

3.2 Kameraröhre und Abtastvorgang

Der prinzipielle Aufbau und die Wirkungsweise der hier verwendeten 1" Kameraröhren vom Vidikon-Typ soll kurz am Beispiel des Plumbicons (Handelsbezeichnung der Firma VALVO für eine spezielle Kamera-Aufnahmeröhre) behandelt werden. Abb. 5 zeigt eine solche Röhre sowie die für Fokussierung und Ablenkung des Elektronenstrahls notwendigen Spulen. Das optische Bild gelangt über ein Glasfenster auf die Speicherschicht. Auf der Fensterseite ist eine elektrisch leitende, lichtdurchlässige Schicht aus Zinnoxid (SnO_2) auf die Speicherschicht aufgebracht, die mit einem Kontaktring (Signalelektrode) verbunden ist.

Die Speicherschicht (hierin unterscheiden sich die verschiedenen Röhrentypen - s. Tab. 1) besteht beim Plumbicon aus

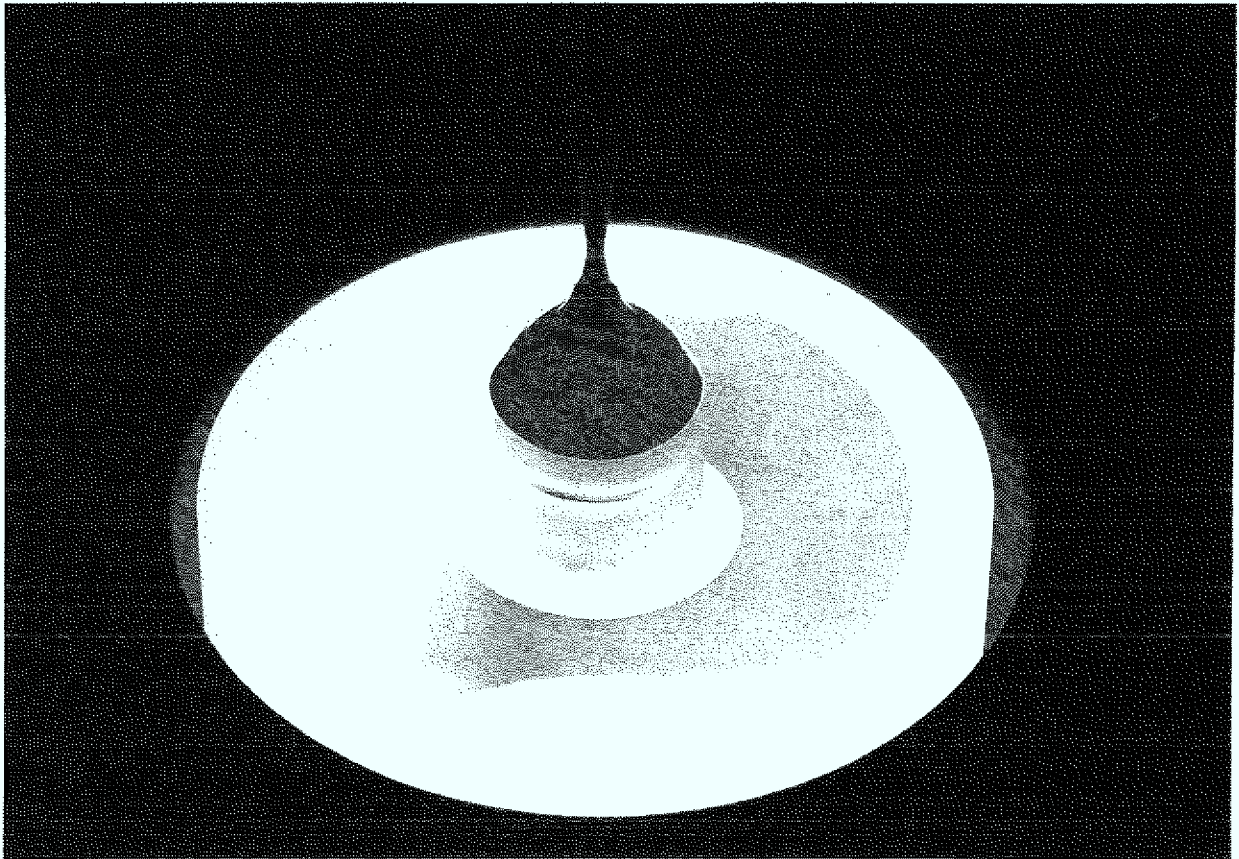


Abb. 4 Wachsender Kupferkristall bei einer Blickrichtung unter etwa 60° Neigungswinkel (fotografische Farbaufnahme).

Bleimonoxid (PbO) /20/. Die Kristallite der Schicht haben gemäß /21/ die ungefähren Abmessungen $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m} \times 0,1\mu\text{m}$. Die Schichtdicke beträgt 10 bis $20\mu\text{m}$.

Das Elektrodensystem besitzt eine indirekt geheizte Kathode, ein Steuergitter G_1 , eine Beschleunigungselektrode G_2 , eine Fokussierelektrode G_3 sowie ein Feldnetz G_4 zur Erzeugung eines gleichförmigen Feldes vor der Speicherplatte. Die Fokussierspule erzeugt ein axiales Magnetfeld, das in Zusammenwirken mit einer entsprechenden Spannung an G_3 den Elektronenstrahl in einer Schraubenlinie auf die Speicherplatte fokussiert. Die Ablenkspulen erzeugen die Magnetfelder zur Ablenkung des Elektronenstrahls in horizontaler und vertikaler Richtung, um die zeilenweise Abtastung der Speicherplatte zu gewährleisten.

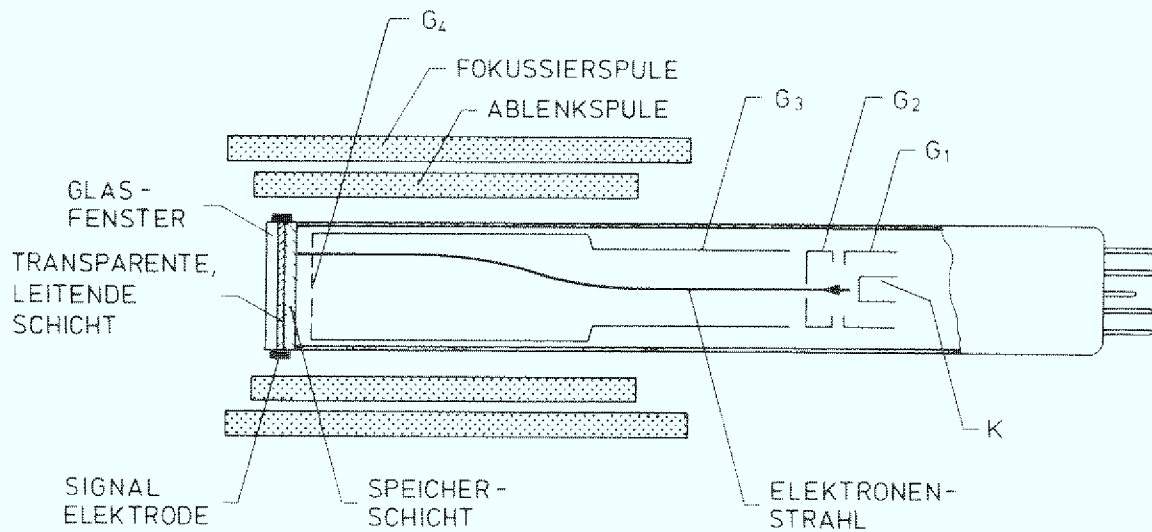


Abb. 5 Prinzipieller Aufbau einer Fernsehkameraröhre vom Vidikon-Typ mit Ablenk- und Fokussierspulen.
K: Kathode; G_1 : Steuergitter; G_2 : Beschleunigungselektrode; G_3 : Fokussierelektrode; G_4 : Feldnetz.

Die Speicherschicht kann man sich unterteilt denken in einzelne Speicherelemente, die gemäß Abb. 6 aus der Parallelschaltung eines Photowiderstandes r_e und einer Speicherkapazität c_e bestehen. Die Anzahl der Speicherelemente entspricht der Anzahl der Bildpunkte. Diese ergibt sich zu:

$$\mathcal{S} = z^2 F \quad (3.2-1),$$

wobei

$$F = \frac{1}{q} \quad (3.2-2)$$

das Verhältnis von Breite (l) zu Höhe (q) des Bildfeldes (4:3) und z die Anzahl der Zeilen ist.

Bei dem hier verwendeten System mit $z = 875$ Zeilen erhält man $\mathcal{S} = 1.02 \cdot 10^6$ Speicherelemente oder Bildpunkte. Setzt man voraus, daß sich die quadratisch angenommenen Bildpunkte zwischen den Abtastzeilen gerade berühren, so ergibt sich für ihre Kantenlänge

$$d = \frac{q}{z} \quad (3.2-3)$$

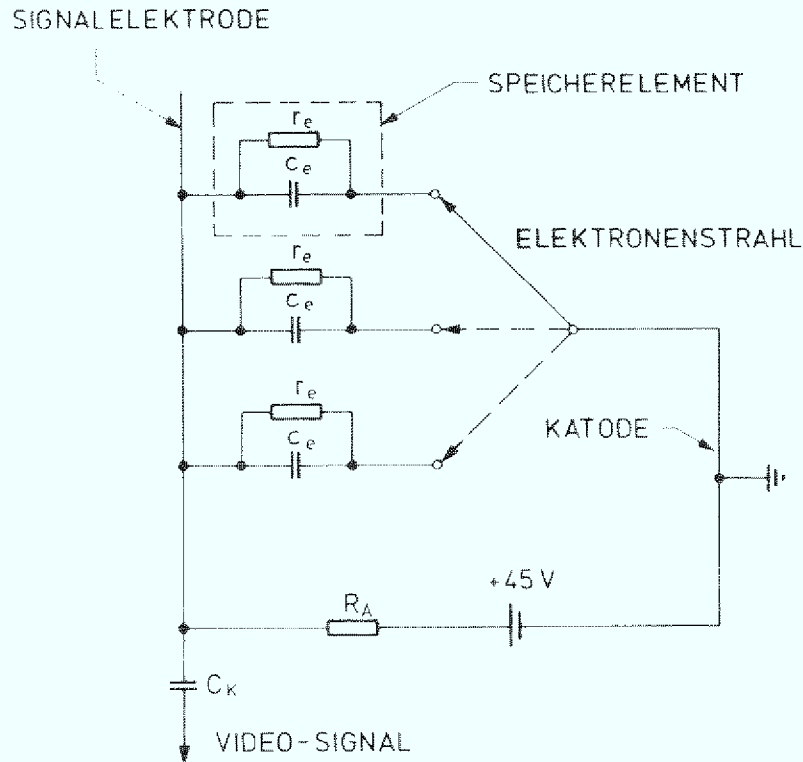


Abb. 6 Aufbau der Speicherschicht einer Kameraröhre vom Typ Vidikon mit Arbeitswiderstand R_A , Targetspannung sowie Koppelkondensator C_K .
 r_e : Photowiderstand eines Speicherelementes;
 c_e : Speicherkapazität.

Für eine 1"-Röhre ist $l = 12,8 \text{ mm}$ und $q = 9,6 \text{ mm}$. Aus (3.2-3) folgt für die Kantenlänge des Bildpunktes, wiederum für ein 875-Zeilen-System ($z = 875$), $d \approx 11 \mu\text{m}$.

Der Abtastvorgang erklärt sich wie folgt: Die Signalelektrode ist über einen Arbeitswiderstand (Größenordnung $10^6 \Omega$) mit einer Spannung von +45 V gegen Null (Kathodenpotential) verbunden. Beim Abtasten der Bildelemente durch den zeilenweise abgelenkten Elektronenstrahl werden die Teilkapazitäten c_e auf Signalelektrodenpotential gegenüber Kathode aufgeladen. Bei völliger Abdunklung der Röhre sind die Widerstände r_e der Bildelemente hochohmig (Größenordnung einige $10^9 \Omega$) und entladen die Speicherkapazitäten c_e nur geringfügig bis zum Wiederauftreffen des Elektronenstrahls, der diesen Ladungsverlust ausgleicht. Hierdurch entsteht ein geringer Dunkelstrom I_D , der am Arbeitswiderstand nur einen entsprechend kleinen Spannungsabfall hervorruft. Beim Plumbicon ist $I_D \leq 3 \text{ nA}$.

Beim Auftreffen von Licht auf die Speicherplatte werden die Teilwiderstände r_e durch Wirksamwerden des inneren photoelektrischen Effektes niederohmiger: die einzelnen Speicherelemente werden mehr oder weniger entsprechend der Helligkeitsverteilung des optischen Bildes entladen, d.h. man erhält eine entsprechende Ladungsverteilung. Das bedeutet, daß beim Wiederaufladen der Speicherkapazitäten durch den Elektronenstrahl unterschiedliche Ströme fließen, die am Arbeitswiderstand R_A verschiedene Spannungsabfälle in zeitlicher Aufeinanderfolge verursachen. Diese sogenannte Videospannung wird über den Koppelkondensator C_k dem Kameravorverstärker zugeführt. Die dunkelsten Bereiche der Vorlage ergeben den sogenannten Schwarzwert und die hellsten Bereiche entsprechend den sogenannten Weißwert des Signals. Auf den Zusammenhang zwischen dem Videosignal und der Leuchtdichte des Objektes wird in Kapitel 4.2 näher eingegangen.

3.3 Zeilenselektion

Um an bestimmten Stellen des abgebildeten Kristalls Video-signalauswertung vornehmen zu können, muß zunächst eine bestimmte Zeile oder auch eine Folge von Zeilen aus dem Fernsehbild ausgewählt werden.

Die Bildvorlage wird von der Kamera in z Zeilen zerlegt, und zwar in der Weise, daß, unter Anwendung des sogenannten Zeilensprungverfahrens, zunächst die ungeradzahligen Zeilen (1, 3, 5, usw.) in einem Halbbild übertragen werden und danach die geradzahligen. Es werden $g = 25$ Ganzbilder in einer Sekunde übertragen, bzw. 50 Halbbilder mit $z/2$ Zeilen in der Zeit von $\frac{1}{2g}$. Daraus ergibt sich die Impulsfolgefrequenz der vom Taktgeber jeweils zu Beginn einer Zeile erzeugten horizontalen (H) Synchronimpulse, die sogenannte Zeilenfrequenz zu

$$f_H = g \cdot z \quad (3.3-1)$$

und diejenige der vertikalen (V) Synchronimpulse zu Beginn eines jeden Halbbildes, die sogenannte Bildfrequenz zu

$$f_V = 2 \text{ g} \quad (3.3-2)$$

Die entsprechenden Periodendauern sind die Zeilendauer

$$T_H = \frac{1}{g \cdot z} , \quad (3.3-3)$$

und die Halbbilddauer

$$T_V = \frac{1}{2 \cdot g} , \quad (3.3-4)$$

jeweils unter Einbeziehung der Rücklaufzeiten des Elektronenstrahls.

Für das 875-Zeilen-System erhält man für $T_H = 45,7 \mu\text{s}$ und für $T_V = 20 \text{ ms}$. In der Fernseh-Norm nach CCIR ist festgelegt, daß zu Beginn der ungeradzahligen Halbbilder die Vorderflanken der V und H-Impulse zusammenfallen. Gemäß Abb. 7 wird mit Hilfe dieser Koinzidenz ein H-Impuls-Vorwahlzähler gestartet, der auf die Nummer der zu selektierenden Zeile programmiert ist. Am Ausgang dieses Zählers steht dann jeweils zu Beginn der zu selektierenden Zeile ein Triggerimpuls (SZ) mit einer Periodendauer von $2 T_V = 40 \text{ ms}$ für die weitere Signalverarbeitung (Durchmessermessung, Temperaturmessung) zur Verfügung. Die Programmierung auf eine bestimmte Zeile oder auf einen Bereich von Abtastzeilen kann einmal manuell erfolgen (Kap. 3.3.1). Unter Auswertung des Helligkeitssprunges an der Phasengrenze ist die Programmierung des Zählers für die Zeile an der Phasengrenze aber auch automatisch möglich, wie in Kap. 3.3.2 noch weiter ausgeführt wird.

3.3.1 Manuelle Programmierung auf eine Zeile

Die Programmierung des H-Impuls-Zählers kann in einfachster Weise mit bekannten Codierschaltern durchgeführt werden. Diese haben jedoch den Nachteil, daß im Falle einer erwünschten schnellen Vorstellung insbesondere von einer Dekade zur anderen die Handhabung etwas schwierig wird, da dann 2 oder sogar 3 Schalter gleichzeitig betätigt werden müssen. Aus diesem Grunde wird eine quasi kontinuierliche Einstellung der Zählerprogram-

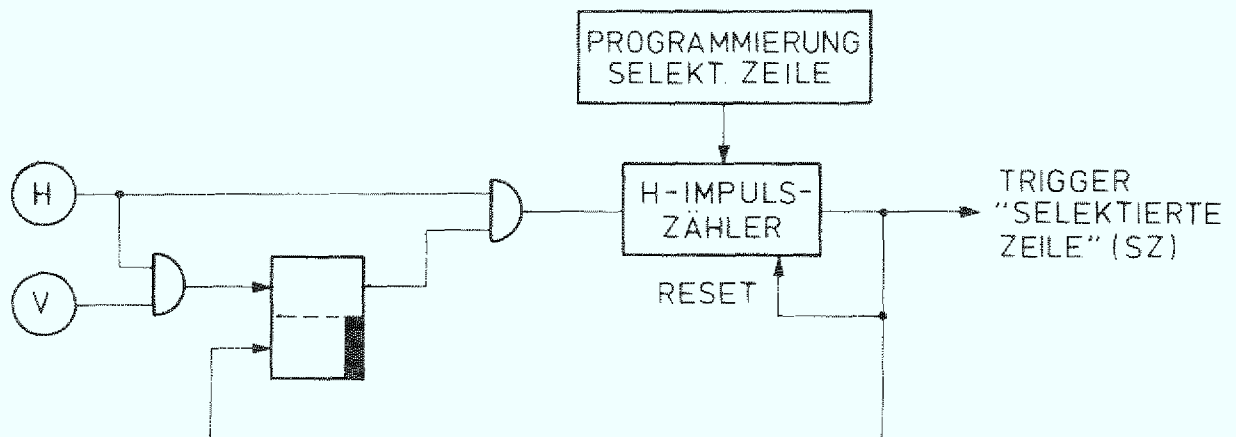


Abb. 7 Prinzipielle Wirkungsweise der Zeilenselektion.
H: Horizontale Synchronimpulse; V: Vertikale Synchronimpulse.

mierung mit einem Tandempotentiometer (P_1, P_2) und einem Generator von 0,5 Hz - 12 Hz als Einstelltakt vorgenommen (Abb. 8): Die Ruhelage ist die Mittenstellung des Potentiometers; bei Rechtsdrehung kippt der Ausgang des analogen Komparators (K_1) auf eine positive Spannung, d.h. das Gatter G_1 wird für die Taktimpulse des Generators durchlässig. Über die ODER-Verknüpfung (G_3) zählt der Auf-Ab-Zähler mit 3 Dekaden aufwärts mit einem von der Generatorfrequenz abhängigen Takt bis zu einer gewünschten Zeilennummer (a). Der Einstelltakt ist variabel und abhängig von der Stellung des Schleifers an P_2 : nahe der Mittenstellung ergeben sich etwa 0,5 Hz, und bei den Endlagen etwa 12 Hz. Der Abwärts-Zählvorgang wird durch Linksdrehung des Potentiometers eingeleitet und läuft über K_2, G_2, G_4 entsprechend ab. Nach Erreichen eines bestimmten Wertes für (a) bringt man das Potentiometer wieder in die Mittenstellung. Die vorgewählte Stellung (a) am Ausgang des Auf-Ab-Zählers wird im digitalen Komparator C_1 mit der jeweiligen Stellung (b) des H-Impuls-Zählers (vgl. Abb. 7) verglichen, und man erhält den Triggerimpuls für die selektierte Zeile (SZ) dann, wenn b den Wert von a angenommen hat.

Die ODER-Gatter G_3, G_4 besitzen außerdem Anschlüsse für eine zeilenweise Verstellung über Taster (T_1 : "auf"; T_2 : "ab") und für eine Ansteuerung aus der im folgenden beschriebenen auto-

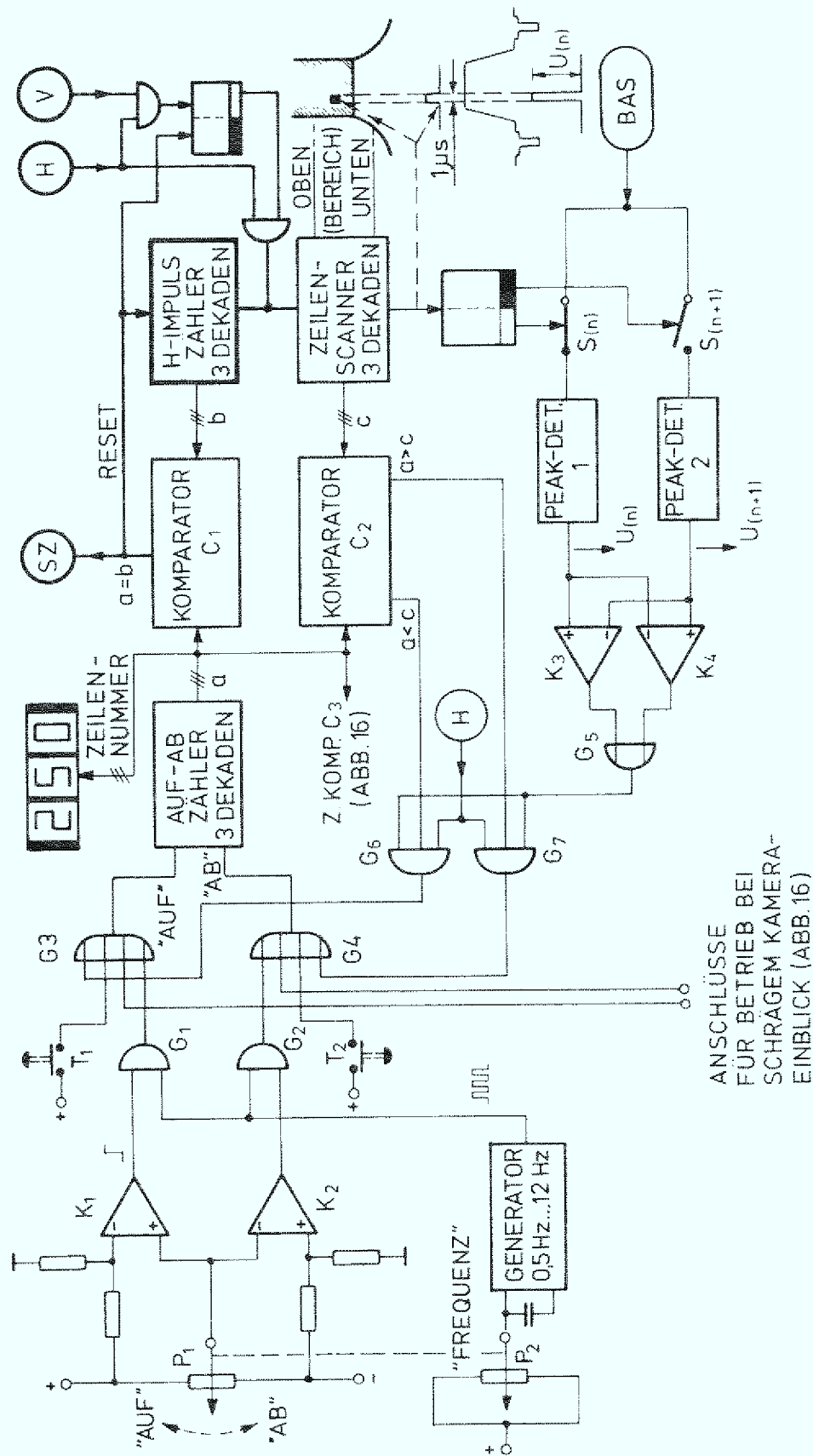


Abb. 8 Manuelle Programmierung der Zeilenselektion sowie automatische Phasengrenzen-
suche mit Anschlüssen für Betrieb bei schräger Kamerablickrichtung
(vgl. Abb. 16).

matischen Phasengrenzensuche sowie für die in Kapitel 3.6 erläuterte Meßanordnung bei schrägem Einblick der Kamera in den Kessel.

3.3.2 Automatische Phasengrenzensuche

Für eine Automatisierung des Ziehprozesses ist die Kenntnis des Kristalldurchmessers an der Phasengrenze von entscheidender Bedeutung. Die Lage der Phasengrenze ist jedoch nicht konstant, sondern vielmehr von den aktuellen Wachstumsbedingungen abhängig /3/. Ein ständiges Nachstellen der selektierten Zeile wäre umständlich und würde einer Automatisierung im Wege stehen.

Aufgrund unterschiedlicher Emissionsgrade und Temperaturen von festem und flüssigem Material ist an der Phasengrenze im allgemeinen ein Helligkeitssprung im Videosignal erkennbar (s. Abb. 3), der ein automatisches Detektieren der Phasengrenze ermöglicht. Hierzu erzeugt zunächst ein sogenannter Zeilen-Scanner (Abb. 8) innerhalb eines vorgewählten Bereiches ("oben"- "unten") nacheinander Triggerimpulse von etwa $1\mu\text{s}$ Dauer und einer Periodendauer von $2 T_V = 40\text{ ms}$ an einer bestimmten einstellbaren Stelle aufeinanderfolgender Zeilen, wie es die Skizze in Abb. 8 andeutet. Diese Triggerimpulse steuern mit Hilfe eines Flip-Flops wechselweise die analogen Schalter $S(n)$ und $S(n+1)$, wodurch dem Videosignal jeweils benachbarter Zeilen nacheinander Proben von $1\mu\text{s}$ Dauer entnommen werden, deren Amplituden $U(n)$ und $U(n+1)$ die beiden Peak-Detektoren ermitteln. Diese Amplitudenwerte werden alternierend in den beiden analogen Komparatoren (K_3, K_4) miteinander verglichen. Erreicht der Scanner die Phasengrenze, so wird $U(n) \neq U(n+1)$, und es erscheint am Ausgang des ODER-Gatters G_5 ein "1"-Pegel, der die UND-Gatter G_6, G_7 vorbereitet.

Im gleichen Augenblick wird im digitalen Komparator C_2 die Stellung (c) des Zeilen-Scanners mit der des Auf-Ab-Zählers (a) verglichen. Ist $a < c$, so wird Gatter G_6 geöffnet und der Auf-Ab-Zähler läuft im Takt der an G_6, G_7 anliegenden H-Impulse hoch, solange bis $a = c$ ist. Entsprechendes gilt, wenn

$a > c$ ist. Damit ist die neue Zeilennummer, an der sich die Phasengrenze befindet, automatisch programmiert.

Ein interessierender Bereich von z.B. 100 Zeilen, innerhalb dessen sich die Phasengrenze bewegen kann, kann mit dieser Anordnung zur Gewinnung des Triggerimpulses (SZ) in der Zeit von $100 \cdot 2 \cdot T_V$, entsprechend 4 Sekunden auf das Vorhandensein einer Phasengrenze abgefragt werden, was für den relativ langsamen Ziehprozess völlig ausreichend ist.

3.4 Durchmesser messung für horizontale Kamerablickrichtung

3.4.1 Elektronenoptische Grundlagen - Abtastung eines weißen Balkens -

Zunächst sollen einige Zusammenhänge referiert werden /18, 19/.

Da der Elektronenstrahl, der die Speicherschicht der Aufnahme- röhre abtastet, eine bestimmte Zeit für den Rück- lauf von der rechten zur linken Seite der Vorlage benötigt, vermindert sich die Zeilendauer T_H gemäß Gl. (3.2-3) um die Zeilenrücklaufdauer τ_H :

$$\tau_H = w T_H \quad (3.4-1)$$

wobei nach CCIR-Norm $w = 0,18$ ist.

Dies ergibt eine effektive Zeilendauer für die Abtastung der Vorlage von

$$T_{H_{eff}} = (1-w) T_H \quad (3.4-2)$$

Die Abtastgeschwindigkeit in horizontaler Richtung ergibt sich zu

$$v_H = \frac{l}{T_{H_{eff}}} \quad (3.4-3)$$

Die vertikale Rücklaufdauer ist

$$\mathcal{C}_V = p T_V , \quad (3.4-4)$$

wobei nach CCIR-Norm $p = 0,05$ ist.

Daraus folgt eine effektive Halbbilddauer von

$$T_{V_{\text{eff}}} = (1-p) T_V . \quad (3.4-5)$$

Nimmt man als Bildvorlage eine Mosaikanordnung von schwarzen und weißen Bildelementen der Anzahl φ gemäß (3.2-1) an, so ist die bei der Abtastung dieser Vorlage entstehende maximale Frequenz der Grundwelle unter Berücksichtigung von p und m gegeben zu

$$f_{\text{max}} = \frac{g}{2} \frac{z^2}{F} \cdot \frac{1-p}{1-w} . \quad (3.4-6)$$

Eine Zusammenstellung einiger Zahlenwerte für das von uns verwendete 875-Zeilen-System im Vergleich zu dem im Fernseh-Rundfunk in Westeuropa sehr verbreiteten 625-Zeilen-System zeigt Tab. 1.

Bei der Klärung der Frage, welches Videosignal die Fernsehkamera unter horizontaler Blickrichtung von dem selbstleuchtenden Kristall während des Ziehprozesses liefert, gehen wir davon aus, daß der Hintergrund sich als Bildschwarz und der Kristall als Bildweiß abbilden, d.h. es handelt sich um die Abtastung eines weißen Balkens vor schwarzem Hintergrund nach Abb. 9. Die Breite D des Balkens entspricht dem zu messenden Durchmesser des Kristalls. Der Elektronenstrahl der Kameraröhre tastet die Speicherschicht in x -Richtung mit einer konstanten Geschwindigkeit v_H gemäß Gl. (3.4-3) zeilenweise ab. Er hat einen möglichst kleinen Querschnitt, mit einer bestimmten Verteilung der Elektronendichte über dem Querschnitt. In Abb. 9 sind zwei mögliche Querschnittsprofile und Elektronendichteverteilungen dargestellt:

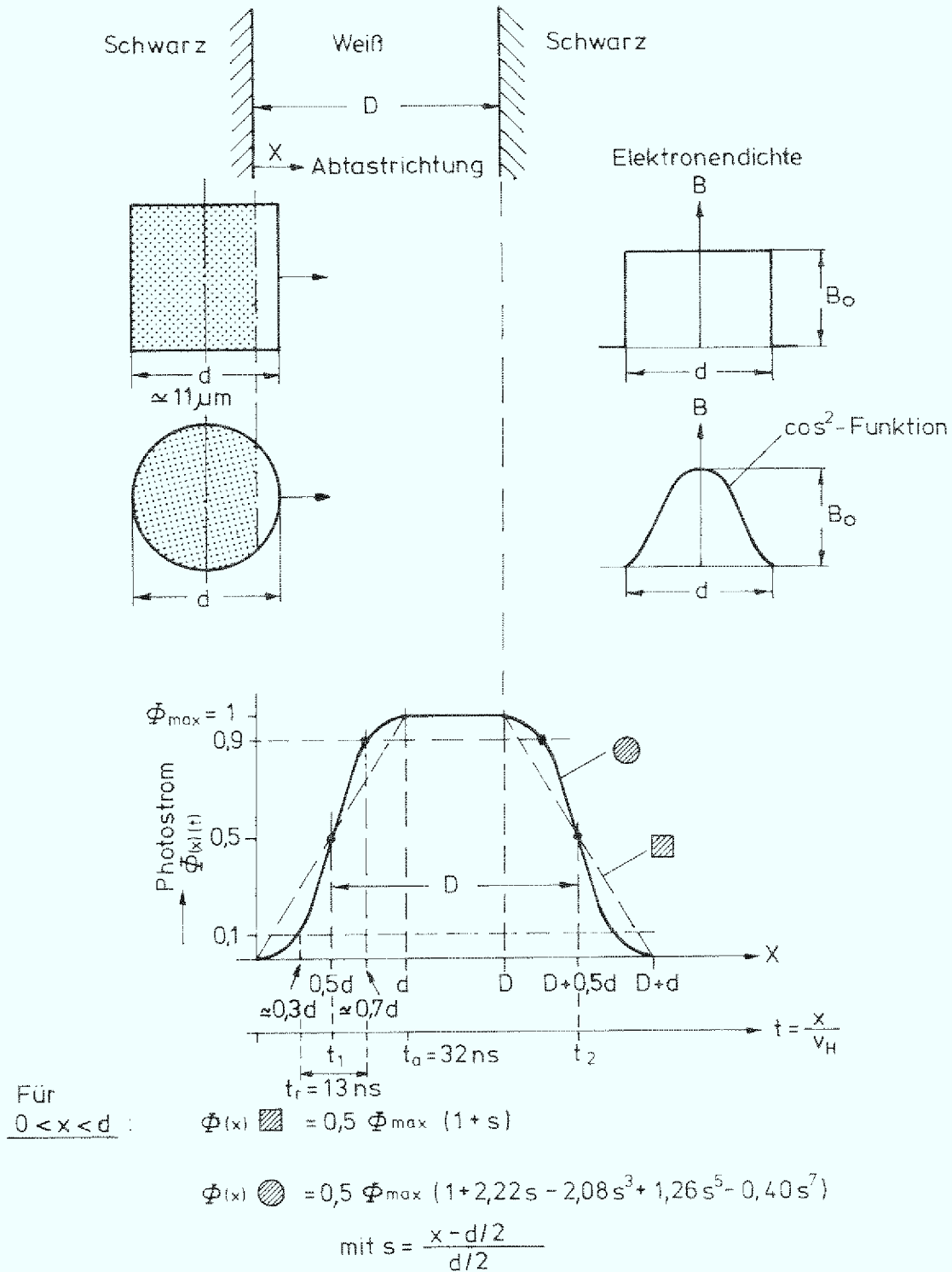


Abb. 9 Abtastung eines weißen Balkens der Breite D vor schwarzem Hintergrund durch ein quadratisches (konstante Elektronendichte B über dem Querschnitt) und ein kreisrundes ($\cos^2$ -Verlauf der Elektronendichte B über dem Querschnitt) Abtastelement. Aufgetragen ist der Verlauf des Photostromes Φ des Abtastelementes in Abhängigkeit vom Abtastweg x bzw. der Zeit t .

1. Quadratischer Querschnitt der Kantenlänge d mit einer konstanten Verteilung der Elektronendichte $B = B_0 = \text{const.}$ über dem Querschnitt.
2. Runder Querschnitt mit dem Durchmesser d und einer $\cos^2$ -Verteilung der Elektronendichte B über dem Querschnitt.

Größe	Einheit	$z = 625$	$z = 875$
f_H	Hz	15625	21875
T_H	μs	64	45,7
τ_H	μs	11,5	8,2
T_{Heff}	μs	52,5	37,5
v_H	$\frac{m}{s}$	244	341,5
f_{max}	MHz	7,55	14,8
f_V	Hz	50	50
T_V	ms	20	20

Tab. 1

Charakteristische Größen für zwei Fernsehsysteme mit $z = 625$ - und $z = 875$ -Zeilen.
(Abkürzungen siehe Text bzw. Symboltabelle)

Für beide Fälle muß gelten, daß die Strahlbündelung so gut sein muß, daß die Abmessungen des Strahlquerschnittes kleiner oder höchstens gleich dem kleinsten Flächenelement der Vorlage sein dürfen. D.h., nach Gl. (3.2-3) ergibt sich für ein 875-Zeilen-System d zu $11 \mu m$.

Der Fall 1) ist wenig wahrscheinlich, jedoch einfach überschaubar und im Vergleich zu Fall 2) interessant, der in einer Arbeit von Schwartz /22/ behandelt wird und dessen Ergebnisse auch in /18/ besprochen werden. Gemäß dem Maxwell'schen Gesetz der Geschwindigkeitsverteilung von aus einer Kathode abgelösten Elektronen ist eine Elektronendichteverteilung B im Strahlquerschnitt nach einer Gauss'schen Fehlerkurve zu erwarten. Um den Verlauf der Signalspannung entlang einer Abtastzeile einer einfacheren Berechnung zugänglich zu machen, hat Schwartz stattdessen eine $\cos^2$ -Funktion gewählt, bei der die Wahrscheinlichkeit, mit der sich Elektronen außerhalb des Strahlquerschnittes befinden, im Vergleich zur Gaussfunktion nur 1 % beträgt.

Unter der Voraussetzung unendlicher Bandbreite der nachfolgenden Videoverstärker ergeben sich dann entlang einer

(selektierten) Zeile für $D = 5/3 d$ die in Abb. 9 dargestellten Verläufe des Photostromes $\phi = f(x)$ bzw. über die Verknüpfung

$$x = v_H t \quad (3.4-7)$$

der Zusammenhang $\phi = f(t)$.

Im Falle quadratischen Strahlquerschnittes mit $B = B_0 = \text{const.}$ erhält man lineare Zusammenhänge für den Anstieg des Signalstromes als Funktion von x und t .

Mit der Substitution

$$s = \frac{x - d/2}{d/2} \quad (3.4-8)$$

erhält man für den Bereich $0 < x < d$:

$$\phi(x)_{\text{Z}} = 0,5 \phi_{\text{max}} (1+s) \quad (3.4-9)$$

und mit Gl. (3.4-7):

$$\phi(t)_{\text{Z}} = \phi_{\text{max}} \cdot \frac{v_H}{d} t \quad (3.4-10)$$

Für den Bereich $d < x < D$ ist $\phi(x), (t) = \phi_{\text{max}}$ (der Elektronenstrahl befindet sich ganz im Bildweiß) und für Werte von $x > D$ ist der Abfall des Signalstromes spiegelbildlich zum Anstieg.

Aus Gl. (3.4-10) errechnet sich die Dauer des Anstieges von 0 auf 100 % der Amplitude zu:

$$t_a = \frac{d}{v_H} \quad (3.4-11)$$

Für ein 875-Zeilen-System ergibt dies $t_a = 32 \text{ ns.}$

Im Falle eines runden Strahlquerschnittes mit einer $\cos^2$ -Verteilung der Elektronendichte erhält man für $\phi(x)$ im Bereich $0 < x < d$ eine Integralgleichung, die nach Sub-

stitution nach Gl. (3.4-8), Reihenentwicklung sowie gliedweiser Integration nach /22/ folgende Form annimmt:

$$\phi(x)_{\odot} = 0,5 \phi_{\max} (1 + 2,22 s - 2,08 s^3 + 1,26 s^5 - 0,40 s^7) \quad (3.4-12)$$

Ersetzt man das in s nach Gl. (3.4-8) enthaltene x durch den Zusammenhang nach Gl. (3.4-7), so erhält man die entsprechende Zeitfunktion $\phi(t)$, aus der sich die Anstiegszeit zwischen 10 % und 90 % der Amplitude zu $t_r = 13 \text{ ns}$ für $z = 875$ errechnet. Die Zeitdauer für einen Anstieg zwischen 0 und 100 % ist wiederum $t_a = 32 \text{ ns}$, wie im vorigen Falle. Für die Bereiche $d < x < D$ und $x > D$ gelten entsprechend die analogen Überlegungen wie für den quadratischen Querschnitt.

Für beide Querschnittsprofile des abtastenden Elektronenstrahls bildet sich der Durchmesser D des Objektes proportional dem Zeitintervall $t_D = t_2 - t_1$ ab:

$$D = a v_H (t_2 - t_1) = a v_H t_D \quad (3.4-13)$$

mit a, dem Abbildungsmaßstab der Optik.

In beiden Fällen ist zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 die Amplitude des Signalstromes bzw. der Videoamplitude 50 % vom maximalen Wert. Dies bedeutet, daß eine Messung des Zeitintervalls $t_2 - t_1$ nur an dieser Stelle einen Durchmesserwert ergibt, der unabhängig ist von Elektronenstrahlquerschnitt (auch bei anderen als den hier betrachteten Querschnitten) und Dichteverteilung unter der Voraussetzung, daß der Strahl in Abtastrichtung symmetrisch ist.

Es folgt weiter, daß $t_2 - t_1$ nicht kleiner werden darf als t_a gemäß Gl. (3.4-11), da sonst eine Fehlmessung für D auftritt. Für die örtliche Auflösung in x-Richtung (Δx) bzw. für den minimal erfaßbaren Durchmesser ergibt sich daher:

$$\Delta x = D_{\min} = a v_H t_a, \quad (3.4-14)$$

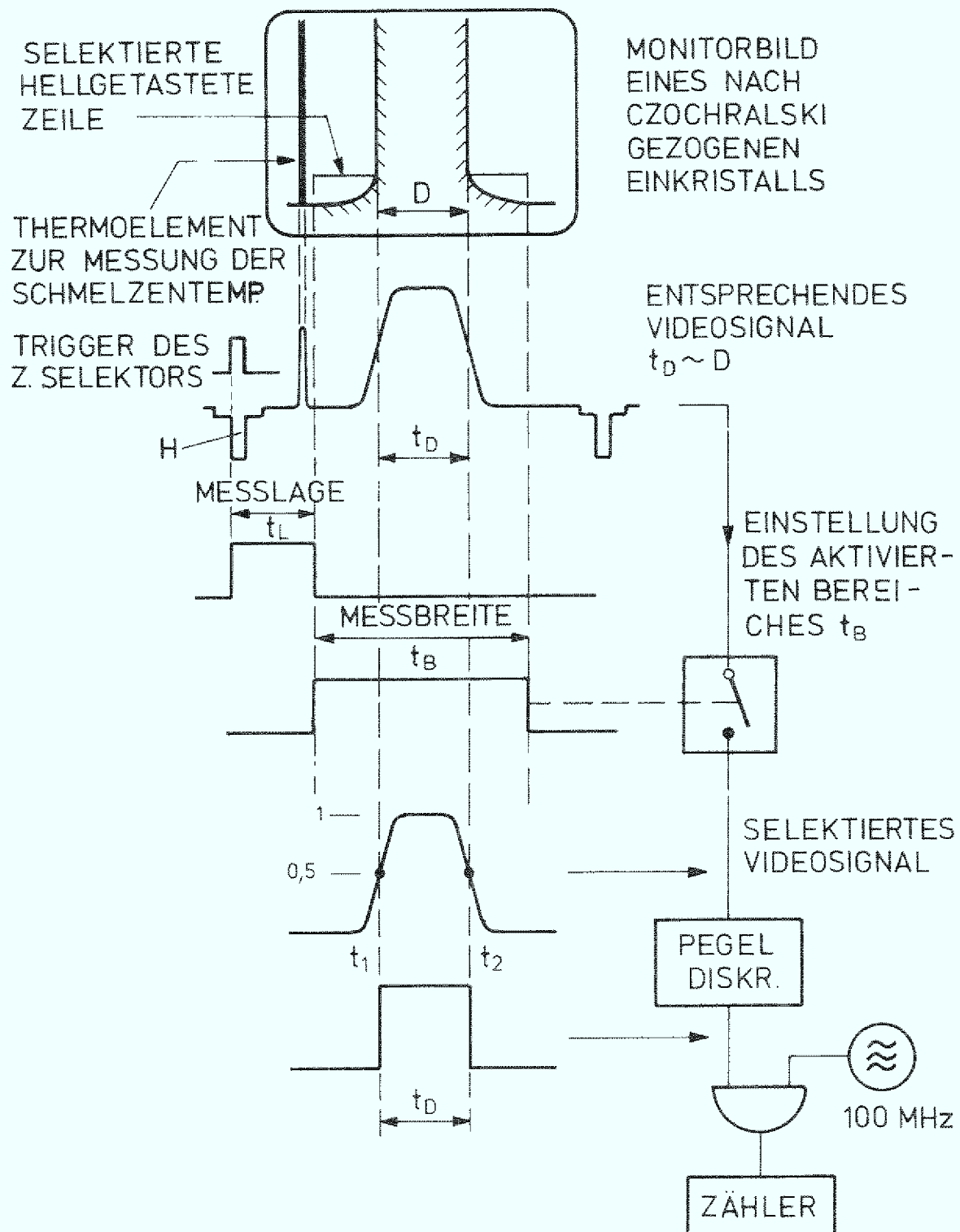


Abb. 10 Prinzip der Durchmessermessung.
(Die Bezeichnungen gehen aus dem Text hervor.)

selbstverständlich unter der bereits getroffenen Voraussetzung unendlicher Bandbreite nachfolgender Verstärker.

Der maximal meßbare Durchmesser ist bei gegebenem Abbildungsmaßstab a begrenzt durch die effektive Dauer der Zeile $T_{H_{eff}}$ gemäß Gl. (3.4-2)

$$D_{max} = a v_H (T_{H_{eff}} - t_a) \quad (3.4-15)$$

Dies ergibt einen theoretischen Meßbereich von

$$\frac{D_{max}}{D_{min}} = \frac{T_{H_{eff}} - t_a}{t_a} \quad (\text{für } a = \text{const.}) \quad (3.4-16)$$

wobei wegen $t_a \ll T_{H_{eff}}$ geschrieben werden kann:

$$\frac{D_{max}}{D_{min}} \approx \frac{T_{H_{eff}}}{t_a} \quad (3.4-17)$$

3.4.2 Technische Realisierung

Aus Abb. 10 geht der prinzipielle Aufbau der Durchmesser-Meßanordnung hervor. Der Zeilenselektor liefert alle 40 ms zu Beginn der zu selektierenden Zeile einen Triggerimpuls, aus dem ein Steuerimpuls für einen analogen Schalter gewonnen werden muß. Um Objekte, wie z.B. ein Thermoelement, oder auch Reflexionen auf der Innenwand des Kessels ausblenden zu können, wird nur ein bestimmter Bereich der zu selektierenden Zeile für die Durchmessermessung verwendet, indem nur während der Dauer t_B des Impulses Messbreite (MB) ein analoger Schalter das Videosignal durchschaltet. Die Lage dieses Steuerimpulses innerhalb der betreffenden Zeile kann mit dem Verzögerungsimpuls Messlage (ML) eingestellt werden. Am Ausgang des analogen Schalters ist dann nur noch das Videosignal des zu vermessenden Kristalls während einer Zeile vorhanden. In einem Pegeldiskriminator wird dieses Signal jeweils bei 50 % seines Maximalwertes diskriminiert, so daß sich am Ausgang ein Rechteckimpuls der Dauer $t_D = t_2 - t_1$ er-

gibt, die nach Gl. 3.4-13 dem Durchmesser des Kristalls proportional ist. t_D wird mit Hilfe eines Zählers mit einer Zeitbasis von 100 MHz (Konstanz 3×10^{-7} zwischen 0°C und $+70^\circ\text{C}$) entsprechend einer Auflösung von ± 10 ns gemessen.

Wie in Kapitel 3.4.1 hervorgehoben wurde, ist es unbedingt notwendig, daß die Messung von t_D bei 50 % der jeweiligen Videoamplitude durchgeführt wird. Mit anderen Worten, es muß entsprechend der üblichen Definition /23/ die Impulsdauer des Videosignals gemessen werden, auch dann, wenn sich die Videoamplitude aufgrund der folgenden Einflüsse ändert:

1. Änderung der Kristalltemperatur
2. Änderung des Transmissionsgrades des Kesselfensters wegen Bedampfung durch evaporierendes Schmelzenmaterial bei Versuchen unter Vakuum
3. Veränderung der Blendeneinstellung am Objektiv
4. Veränderung der Verstärkungseinstellung des Kameraverstärkers.

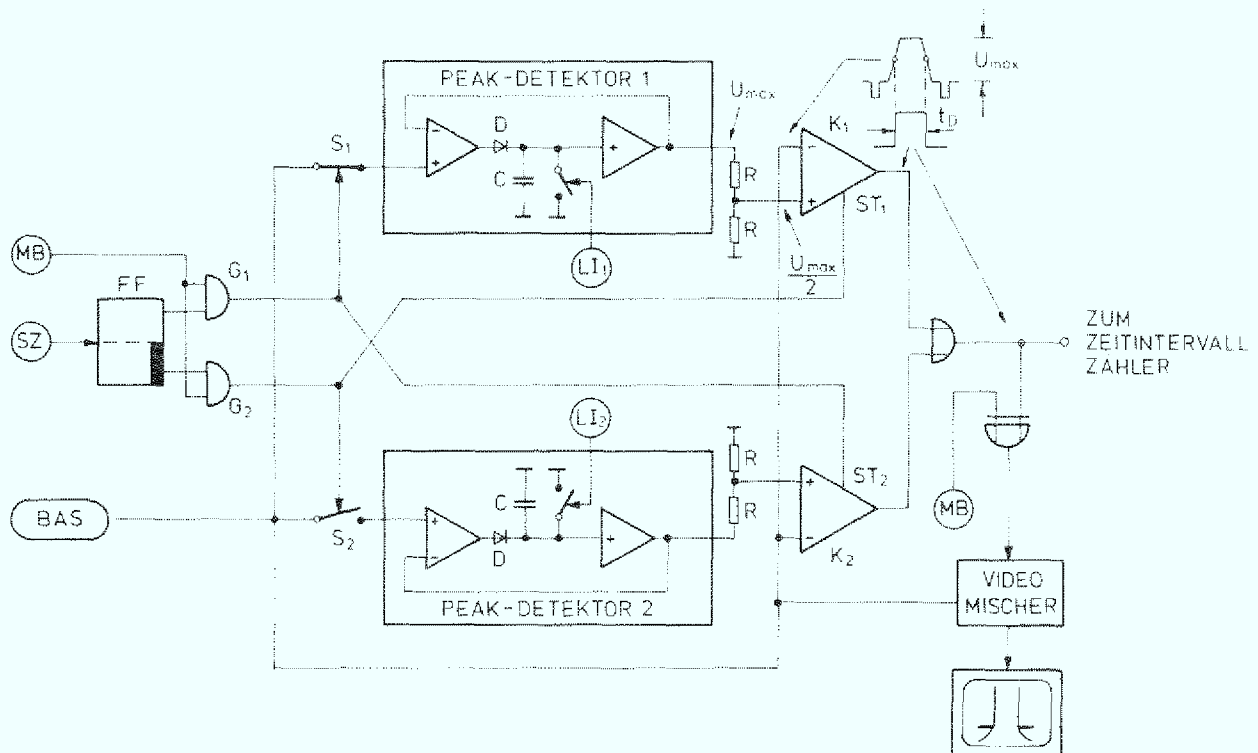


Abb. 11 Automatische Pegeldiskriminierung bei der Durchmesser-messung - Blockschaltbild.
 MB: Impuls "Meßbreite"; SZ: Triggerimpuls "Selektierte Zeile"; BAS: Bild-Austast-Synchronsignal.

Abb. 11 zeigt das Blockschaltbild und Abb. 12 den entsprechenden Impulsplan des automatischen Pegeldiskriminators, der diese Probleme beseitigt.

Der Triggerimpuls für die selektierte Zeile (SZ) schaltet den Impuls "Meßbreite" (MB) mit Hilfe eines Flip-Flop (FF) und der beiden Gatter G_1 , G_2 wechselweise als Schaltimpuls an die beiden analogen Schalter S_1, S_2 . Das Videosignal (BAS) wird zunächst mit einer hier nicht dargestellten Klemmschal-

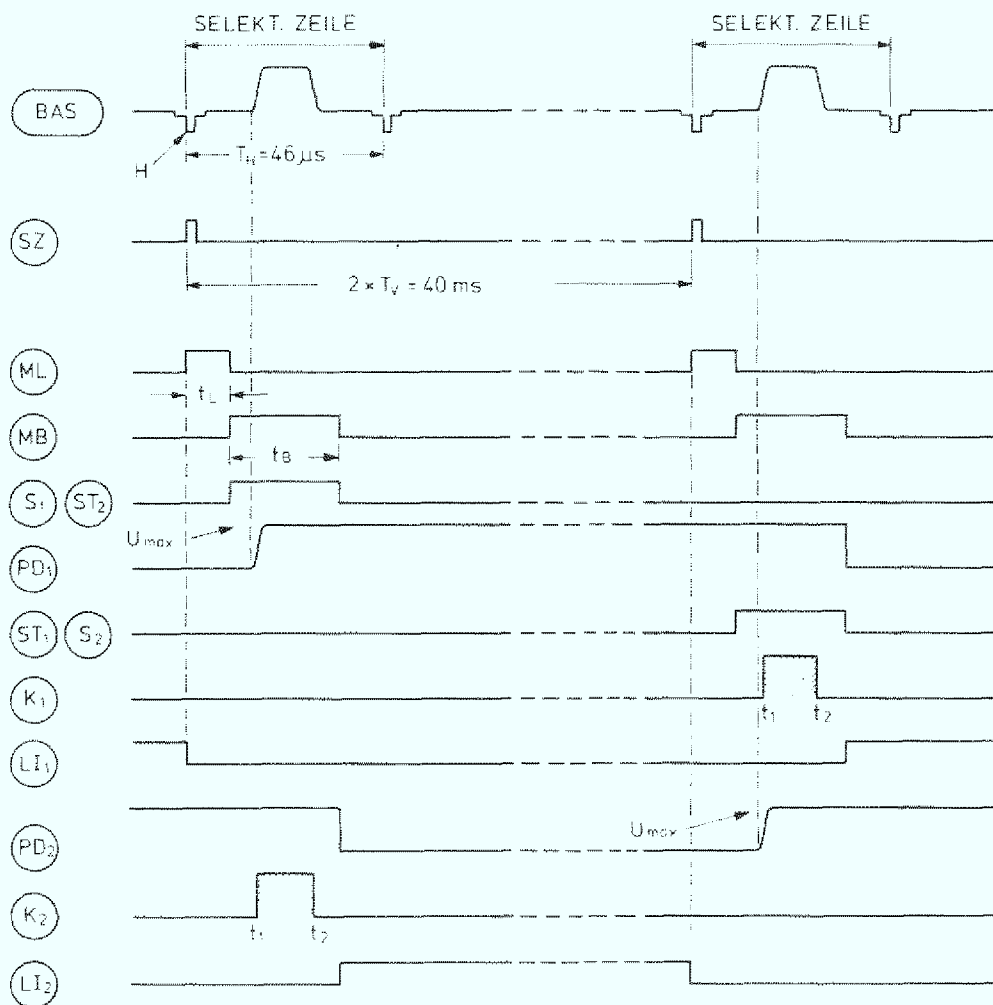


Abb. 12 Automatische Pegeldiskriminierung bei der Durchmesser-messung - Impulsplan.
PD₁, PD₂ sind die Ausgangsspannungen der beiden Peak-Detektoren. Weitere Erläuterungen im Text.

tung auf den Schwarzwert geklemmt /19/ und alternierend an die Eingänge der beiden Peak-Detektoren geschaltet. Dabei laden sich die Kondensatoren C jeweils auf den Spitzenwert ($U_{\max}$) des Videosignals auf. Am Spannungsteiler aus zwei gleichgroßen Widerständen (R) entsteht $0,5 U_{\max}$ als Referenz-Eingangsspannung für die beiden analogen Komparatoren K_1 und K_2 .

Wenn S_1 geschlossen ist (Peak Detektor 1 ermittelt den neuen Wert für $U_{\max}$), erhält der Komparator K_2 durch einen Impuls mit der Dauer t_B an seinem Steuereingang ST_2 den Befehl, das am invertierenden Eingang angeschaltete BAS-Signal mit dem 40 ms vorher ermittelten Wert für $U_{\max}/2$ zu vergleichen. D.h., sobald das BAS-Signal den Wert $U_{\max}/2$ zuzüglich einer minimal notwendigen Eingangsdifferenzspannung ΔU_{E1} (≥ 5 mV) überschreitet, springt der Ausgang von K_2 auf einen Wert, der einer logischen "1" entspricht und fällt auf einen Wert für logisch "0", sobald das Signal um einen bestimmten Betrag ΔU_{E2} unterhalb von $U_{\max}/2$ abgesunken ist. In Abb. 13 sind nochmals die Pegel an den Eingängen dargestellt, wobei die Anstiegs- und Abfallzeiten des Videosignals als auch ΔU_{E1} und ΔU_{E2} zur Verdeutlichung stark vergrößert gezeichnet wurden.

Nach diesem Vergleich wird mit Hilfe des Löschimpulses (LI_1) der Kondensator C entladen. Der Vorgang wiederholt sich für den ersten Komparator 40 ms später.

Die Ausgangssignale beider Komparatoren werden über eine ODER-Schaltung zusammengeschaltet und vom Zeitintervall-Zähler bezüglich ihrer Dauer t_D vermessen.

Zur Sichtbarmachung eines korrekten Meßvorganges am Monitor wird außerdem der Impuls Meßfleckbreite (MB) mit dem Signal K_1 oder K_2 in einer EXCLUSIV-ODER-Schaltung verknüpft und mit dem Videosignal (BAS) gemischt. Dadurch erscheint auf dem Monitor an der Stelle der selektierten Zeile eine hellgetastete Linie mit der Länge entsprechend t_B , wobei bei korrekter Messung des Kristalldurchmessers diese Linie für die Dauer von t_D unterbrochen ist.

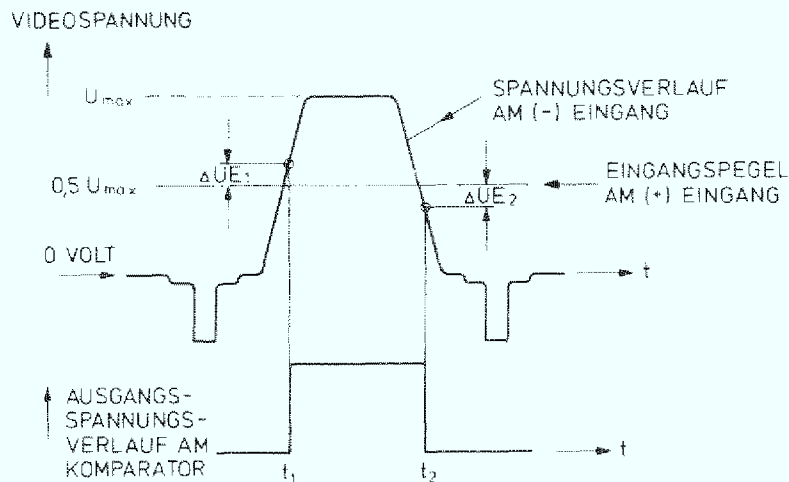


Abb. 13

Spannungsverhältnisse an den Eingängen der analogen Komparatoren K_1 , K_2 bei der Pegeldiskriminierung (s. Abb. 11).

Der vom Zeitintervallzähler ermittelte Wert für t_D wird in einen analogen Wert gewandelt und als Durchmesseristwert einer Regelstrecke zugeführt.

Über besondere Probleme, wie Eliminierung von Meßwertausreißern und Mittelwertbildung mit Hilfe eines Mikrorechners wird in Kapitel 5.2 eingegangen.

3.5 Bestimmung der Meniskusform

In Abb. 14 ist die Bestimmung der Form des Schmelzenmeniskus für horizontale Kamerablickrichtung dargelegt. Hierzu müssen die Ortskoordinaten (x, y) aller Punkte (P) , die sich am Helligkeitssprung entlang des Meniskus (vor dunklerem Hintergrund) ergeben, ermittelt werden. Der Ursprungspunkt in y -Richtung ist die einstellbare obere Begrenzung (n_0) eines 3-dekadischen Zeilenscanners, der, wie bei der automatischen Phasengrenzensuche (vgl. Abb. 8) Triggerimpulse in aufeinanderfolgenden Zeilen eines Halbbildes mit 40 ms Periodendauer erzeugt.

Die örtliche Auflösung, d.h. der Abstand zwischen zwei Zeilen ergibt sich dabei wegen der Ausnutzung nur eines Halbbildes mit Gl. 3.2-3 und dem optischen Abbildungsmaßstab a zu:

$$\Delta y = 2 a \frac{q}{z} \quad (3.5-1)$$

Für $a = 1$ und ein 1"-Vidikon erhält man ein Δy von ca. $22 \mu\text{m}$. Der Wert für y folgt aus Gl. 3.5-1 multipliziert mit der Differenz aus der momentan angewählten Zeilennummer n und der Nummer der Startzeile n_0 :

$$y = (n - n_0) \cdot 2 \cdot a \cdot \frac{q}{z} \quad (3.5-2)$$

Der Endpunkt des Koordinatensystems in y -Richtung ist durch die ebenfalls einstellbare untere Begrenzung (n_u) des Scanbereichs gegeben.

Wie bei der Durchmessermessung werden aus dem Triggersignal die Impulse Meßlage (ML) und Meßbreite (MB) gebildet, wobei die Vorderflanke des Meßbreite-Impulses den Ursprung des Koordinatensystems in x -Richtung darstellt.

Der Impuls MB schaltet nun die Videosignale aufeinanderfolgender Zeilen zum automatischen Pegeldiskriminator durch, dessen invertiertes Ausgangssignal mit MB und einem 100 MHz-Taktgenerator über eine UND-Schaltung verknüpft werden. Das Ausgangssignal dieses UND-Gatters mit der Dauer t_p ist proportional zur jeweiligen x -Koordinate des momentan angewählten Punktes.

Mit Gleichung 3.4-7 und dem optischen Abbildungsmaßstab a ergibt sich

$$x = a \cdot v_H \cdot t_p \quad (3.5-3)$$

In Abb. 14 sind für 2 Punkte P_1 , P_2 die Zusammenhänge dargestellt.

Die Werte für x und y der einzelnen Punkte werden in den in das Meßsystem integrierten Mikrorechner übernommen. Aus ihnen kann die Steigung der Meniskusfunktion, insbesondere in der Nähe der Phasengrenze, ermittelt werden, woraus sich der Wachstumswinkel α (Abb. 14) errechnen läßt, der bei einem Kristallwachstum mit konstantem Durchmesser (stationäres Wachstum) zu Null wird (Abb. 37).

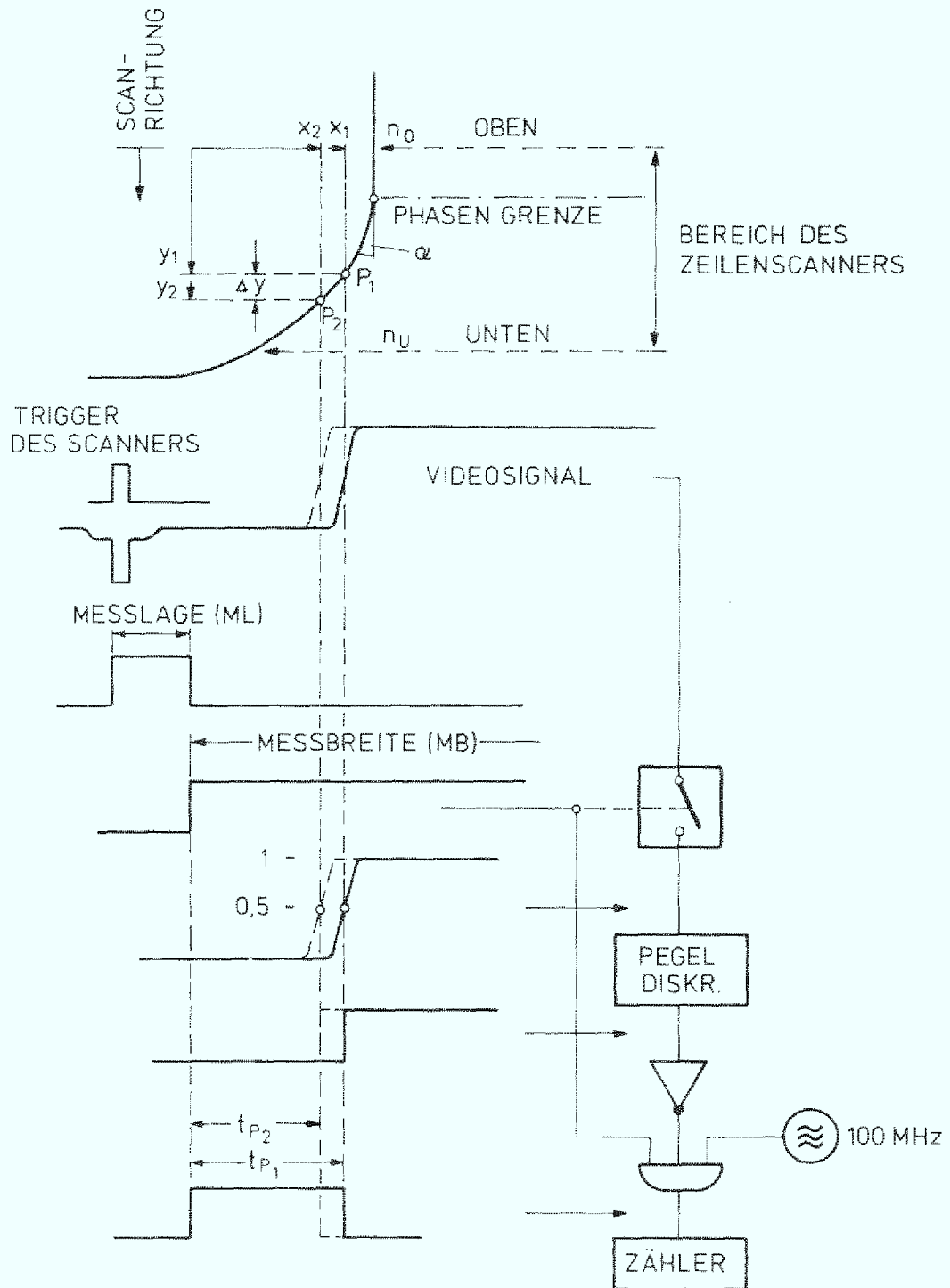


Abb. 14 Bestimmung der Meniskusform durch Ermittlung der Ortskoordinaten (x, y) aller Punkte (P) entlang des Meniskus innerhalb eines abgetasteten Bereiches (Scan) zwischen einer oberen (n_0) und unteren Zeile (n_u).

3.6 Ermittlung des maximalen Durchmessers der elliptischen Reflexion bei schrägem Kameraeinblick

Wie in Kapitel 3.1 bereits ausgeführt wurde, ist in den Fällen, in denen das Schmelzenmaterial voll ausgenutzt werden soll, eine horizontale Blickrichtung der Kamera von einem bestimmten Zeitpunkt an nicht mehr möglich. Dies bedeutet, daß eine direkte Bestimmung des Kristalldurchmessers an der Phasengrenze (Kapitel 3.4), ihre automatische Detektion sowie die Vermessung der Meniskusform (Kapitel 3.5) nicht mehr möglich sind. Um auch hier, wenn die Kamera unter etwa 60° Erhebungswinkel in den Rezipienten sieht, eine Regelgröße für konstanten Kristalldurchmesser zu erhalten, wird der maximale Durchmesser der in Abb. 4 erkennbaren, vom Kristalldurchmesser abhängigen elliptischen Reflexion (auf der Schmelzenoberfläche in der Nähe des Meniskus), bzw. eine daraus abgeleitete Größe ermittelt.

Eine direkte Messung des maximalen Ellipsendurchmessers mit einer Schaltung gemäß Abb. 10 ist nicht möglich, da das entsprechende Videosignal entlang einer Zeile innerhalb der Reflexion wegen des etwas dunkler abgebildeten Kristalls Einbrüche erleidet, die zu Fehlermessungen führen würden.

Aus diesem Grunde wird zunächst das Profil des linken Teils der Reflexion mit der in Kapitel 3.5 (Abb. 14) beschriebenen Anordnung kontinuierlich ermittelt, indem die Koordinaten x_i , y_i aller Punkte P_1 bis P_n auf dem linken Rand der Ellipse innerhalb des Bereiches n_0 bis n_u bestimmt werden (Abb. 15).

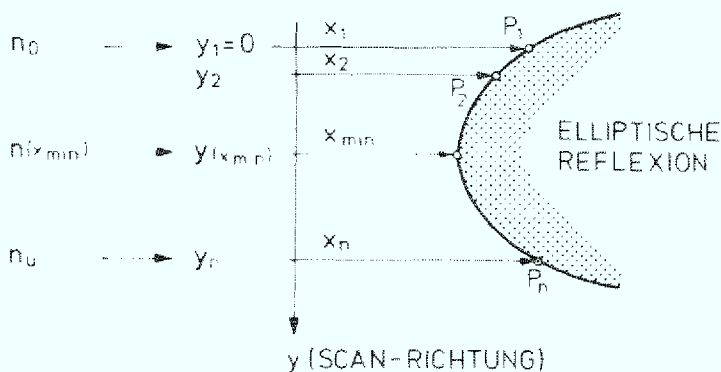


Abb. 15

Ermittlung des maximalen Durchmessers der elliptischen Reflexion (s. Text).

Alle Werte x_i, y_i werden dem Mikrorechner zugeführt, der den Minimalwert $x_{\min}$ und die dazu gehörende Zeile $n(x_{\min})$ ermittelt. Da $x_{\min}$ mit dem maximalen Durchmesser der Ellipse korrespondiert, ist hierdurch seine Lage bereits automatisch gefunden.

Dieser Vorgang dauert für einen interessierenden Bereich ($n_u - n_o$) von z.B. 100 Zeilen wiederum 4 s. Hinzu kommt eine Rechenzeit des Mikroprozessors von etwa 100 ms. In Abb. 8 war gezeigt worden, wie mit Hilfe der automatischen Detektion der Phasengrenze der Triggerimpuls SZ für die Durchmesser-messung gewonnen werden konnte. Dort waren auch bereits an den Gattern G_3, G_4 die Anschlüsse für den Betrieb bei schrägem Kameraeinblick vorgesehen.

Abb. 16 erklärt nun die Zusammenschaltung: Der Mikrorechner μP erhält die x und y-Daten aus der Ellipsenformbestimmung und schaltet an den digitalen Komparator C_3 die ermittelte Nummer von $n(x_{\min})$. Solange die Ausgangsgröße a des Auf-Ab-Zählers kleiner ist als $n(x_{\min})$, wird sein aufwärtszählender Eingang im Takt von H-Impulsen über G_1, G_3

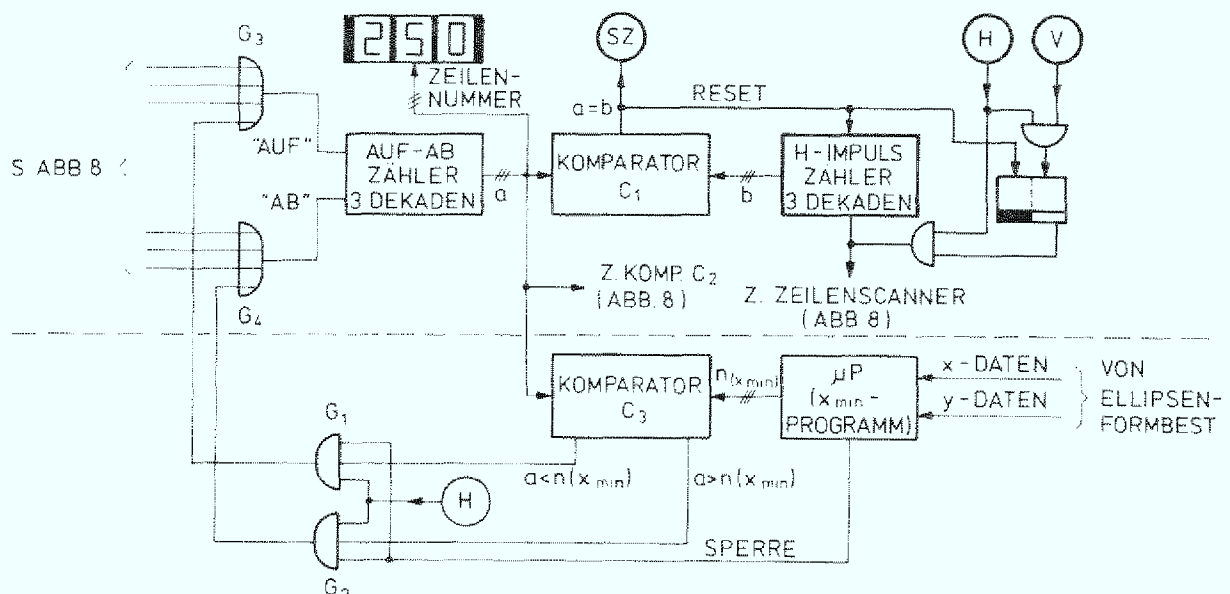


Abb. 16 Blockschaltbild zur Ermittlung des Triggerimpulses für die zu selektierende Zeile (SZ) in Abhängigkeit von der Lage des maximalen Durchmessers der elliptischen Reflexion bei schräger Kamerablickrichtung (Abb. 4) in Ergänzung zu Abb. 8.

geladen und umgekehrt bei $a > n_{(x_{\min})}$ wird über G_2, G_4 der abwärtszählende Eingang aktiv. Alles weitere ist entsprechend zu dem in Kapitel 3.3.2 Gesagten.

Der so gewonnene Triggerimpuls SZ in der Zeile mit dem Wert $x_{\min}$ steuert nun eine Schaltung entsprechend Abb. 14 und tritt anstelle des dort eingezeichneten Triggerimpulses des Zeilenscanners. Auf diese Weise erhält man alle 40 ms eine Information über die Größe von $x_{\min}$, die, genau wie bei der Durchmessermessung, als Regelgröße für konstanten Kristalldurchmesser dienen kann.

3.7 Bestimmung der Höhe der Phasengrenze über dem Schmelzenniveau

Die Kenntnis der Höhe (h) der Phasengrenze über der Schmelzenoberfläche ist insbesondere für den Züchter von Legierungskristallen von entscheidender Bedeutung, da sich aus ihr der Temperaturgradient im Bereich der Phasengrenze nach der Beziehung von Geist und Grosse /3/ errechnen läßt:

$$\text{grad } T = \frac{T_L - T_M}{h} \quad (3.7-1)$$

mit T_L = Temperatur der Schmelze
 T_M = Erstarrungstemperatur.

Die Einstellung eines bestimmten Temperaturgradienten ist jedoch wesentlich für die Homogenität eines Legierungskristalls.

Weiterhin ist über h und grad T der gesamte Wärmehaushalt berechenbar, wie insbesondere neuere Untersuchungen zu einem Wachstumsmodell von A.W.A. van der Hart /24/ zeigen.

Um die Phasengrenzhöhe h über dem Schmelzenniveau bestimmen zu können, genügt es nicht, die Position der Phasengrenze, z.B. aus der "automatischen Phasengrenzensuche" zu kennen, da die Schmelzenoberfläche während des Prozesses langsam wegen des herausgezogenen Kristallvolumens absinkt.

Durch Bestimmung der Position der Zugspindel, die einen Wert für die Länge des Kristalles ergibt sowie durch die dauernde

Messung des Kristalldurchmessers ist dieses Absinken der Schmelzenoberfläche jedoch einfach berechenbar und kann zu dem jeweiligen Positionswert der Phasengrenze addiert werden.

3.8 Temperaturmessung

Der Temperaturmessung mit einer Fernsehkamera liegt der Gedanke zugrunde, einen ausreichenden Anteil der Temperaturstrahlung des gezogenen Einkristalls oder der Schmelze (oder eines sonstigen Temperaturstrahlers) in einem bestimmten lokalen Bereich des Objektes in ein Videosignal umzuwandeln, welches nach entsprechender Eichung ein Maß für die Temperatur darstellt.

Ausreichender Anteil bedeutet, daß die Kameraröhre von ihrer spektralen Empfindlichkeit her in der Lage sein muß, bei einer gegebenen spektralen Leuchtdichteverteilung des Objektes ein Videosignal mit ausreichendem Signal-Rauschabstand zu erzeugen.

Nun sind Fernsehkameraröhren vorwiegend bezüglich ihrer spektralen Empfindlichkeit an diejenige des menschlichen Auges angepaßt, was sie für Temperaturmessungen im langwelligeren IR-Bereich für recht unbrauchbar erscheinen läßt. Um eine Vorstellung zu haben, bei welcher Wellenlänge sich das Maximum der Leuchtdichteverteilung eines Planckschen Strahlers bei einer Temperatur von 1357 K (Schmelzpunkt von Kupfer) befinden würde, kann man das Wiensche Verschiebungsgesetz anwenden:

$$\frac{\lambda_{\max}}{\mu\text{m}} = \frac{2900}{T/\text{K}} \quad (3.8-1)$$

Diese Gleichung ergibt ein $\lambda_{\max}$ von $2,14 \mu\text{m}$, also einen Wert, der weit außerhalb des spektralen Empfindlichkeitsbereiches von Kameraröhren liegt (siehe Abb. 22) und auch außerhalb der unteren Grenzwellenlänge üblicher Kameraobjektive ($\approx 1,5 \mu\text{m}$).

Messungen mit Plumbicons mit erweiterter Rotempfindlichkeit (XQ 1073R) und Silizium-Vidikons (XQ 1400) ergaben jedoch

sowohl bei Kupfer als auch bei Aluminium ($T_M = 923 \text{ K}$) ausreichende Videoamplituden bei Blendenwerten um 8 bis 11, was zum Teil daran liegt, daß Metalle und Metall-Legierungen selektive Strahler sind, deren Emissionskoeffizient eine Funktion von Wellenlänge und Temperatur darstellt. Das heißt, daß der Verlauf ihrer spektralen Leuchtdichteverteilung nicht den eines schwarzen oder grauen Strahlers aufweist, sondern, daß unter Umständen stärkere spektrale Anteile in den Empfindlichkeitsbereich der Optik und Aufnahmeröhre fallen können. Hier sei angemerkt, daß der Emissionskoeffizient sprunghaft seinen Wert ändert, wenn das Material vom flüssigen in den festen Zustand übergeht, was die automatische Detektion der Phasengrenze aus dem Leuchtdichteunterschied begünstigt.

Wären nun die Leuchtdichteverteilungen aller für die Kristallzucht verwendeten Materialien im Festen und Flüssigen in einem genügend großen Temperaturbereich bekannt sowie die Übertragungsfunktionen der verwendeten Optik und des Kesselfensters, durch das die TV-Kamera den Kristallziehprozess beobachtet, dann könnte der Zusammenhang zwischen der gemessenen Temperatur und der Videoamplitude, falls die relative Empfindlichkeit der Kameraröhre vorliegt, über eine Faltung errechnet werden.

Es liegt auf der Hand, daß hier nur ein Eichexperiment der einzige brauchbare Weg ist, diese Abhängigkeit zu ermitteln.

Ein solcher Versuch wurde für Kupfer von W. Uelhoff et al. /25/ durchgeführt. Das Ergebnis zeigt Abb. 17. Hierzu wurden 8 Messungen unter den gleichen Bedingungen wie bei der Kristallzucht durchgeführt. Der größte Abstand zwischen zwei Messungen lag bei zwei Monaten, was die Stabilität des Systems sehr gut demonstriert. Als Bezug diente ein Thermoelement, dessen Eichung jeweils am Schmelzpunkt des Kupfers überprüft wurde. Die Steigung der Eichkurve im oberen Bereich beträgt etwa $6,6 \text{ mV/}^\circ\text{C}$. Die Auflösungsgrenze lag bei 4°C .

Der wesentliche Vorteil der Temperaturmessung mit einem Fernsehsystem liegt darin, daß die lokale Auflösung extrem hoch getrieben werden kann. Bei einer 1:1-Abbildung wurden minimale Abmessungen für den Meßfleck von $30 \mu\text{m} \times 11 \mu\text{m}$ (Breite x Höhe)

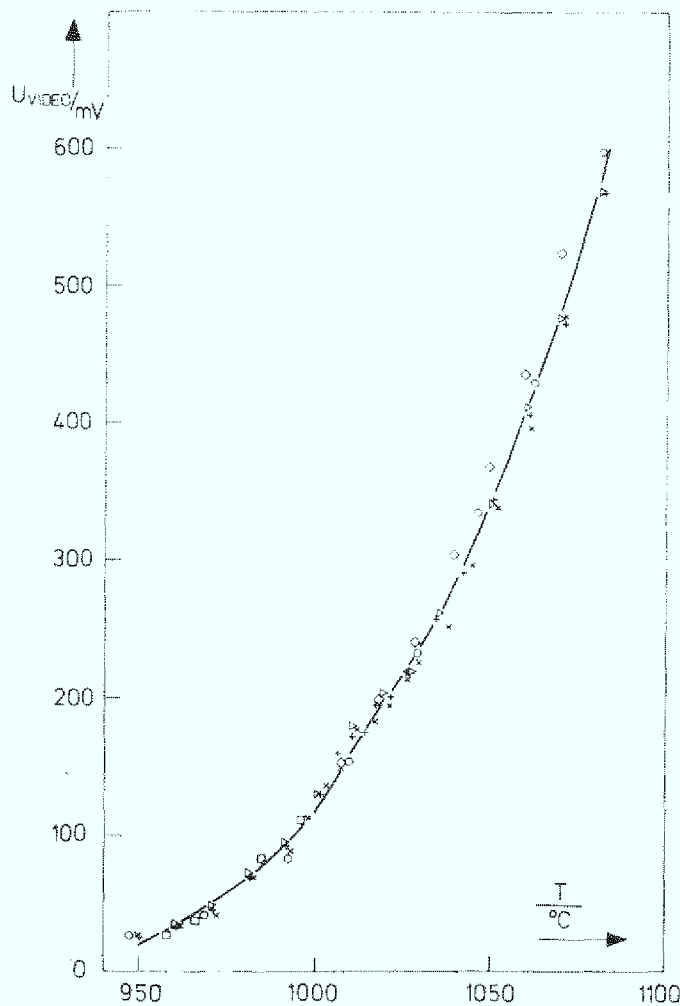


Abb. 17

Verlauf der Videospannung in Abhängigkeit von der Temperatur, gemessen an einer Kupfereichprobe unter Kristallzuchtbedingungen. Insgesamt 8 Meßreihen sind aufgetragen /25/.
(Röhre: XQ 1073 R;
Optik: Rank Monital 5:1
mit Macro-Vorsatz,
Blende 8)

erreicht. Abb. 18 zeigt das Prinzip der Anordnung.

Innerhalb einer von einem Zeilenselektor oder Scanner (bei Temperaturgradienten-Messung) selektierten Zeile wird über die Dauer des Impulses "Lage" (ML) der Temperaturmeßfleck positioniert. Die Breite t_T des Impulses "Temperatur-Meßfleck" (MF) bestimmt über die analoge Schaltanordnung (S) die Meßzeit des Videovoltmeters und damit die Meßfleckbreite B_T . Den Zusammenhang zwischen t_T und B_T erhält man unter Verwendung von Gleichung (3.4-13) zu

$$B_T = a v_H t_T \quad (3.8-2)$$

Die Meßfleckhöhe H_T entspricht der Höhe einer Zeile gemäß Gl. (3.2-3) ebenso unter Einbeziehung des optischen Abbildungsmaßstabes a :

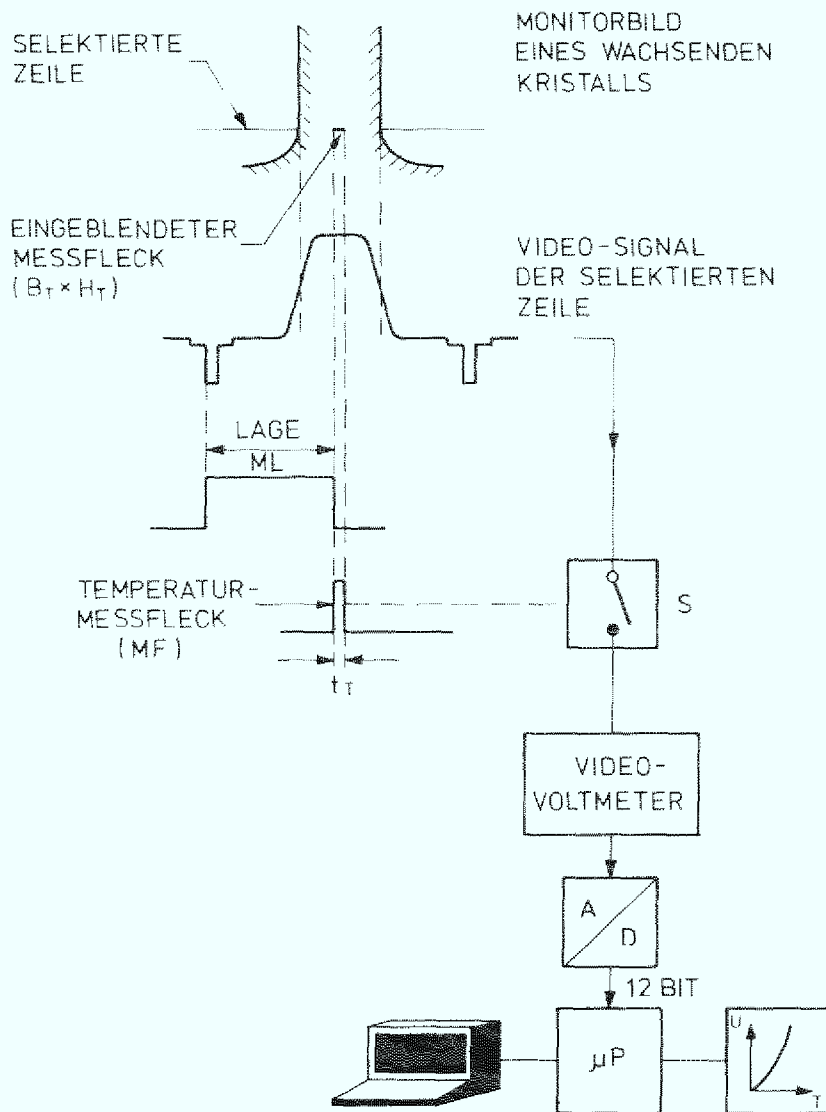


Abb. 18
Prinzipielle Wirkungsweise der Temperaturmessung mit einer Videokamera.

$$H_T = a \frac{q}{z} \quad (3.8-3)$$

Das Videovoltmeter ermittelt den Spitzenwert der Videoamplitude während der Dauer t_T . Der nachgeschaltete 12-bit Analog-Digital-Wandler wandelt den Meßwert in eine digitale Information für den Mikrorechner (μP). Nähere Einzelheiten enthält Kapitel 4.5.

Die im Eichversuch ermittelten Wertepaare für Videoamplitude und Temperatur werden dem Mikrorechner über eine Tastatur eingegeben. Aus diesen Werten errechnet er die am besten angepaßte Eichkurve in Form einer quadratischen Funktion (Regression nach der Kleinstquadratmethode) und bewertet die vom

Videovoltmeter während des Kristallziehversuches ermittelten Meßwerte mit den daraus gewonnenen Koeffizienten zur Bestimmung der Temperatur.

Zur Steigerung der durch Rauscheinflüsse begrenzten Genauigkeit wird wie bei der Durchmessermessung auch hier eine Mittelwertbildung vom Mikrorechner durchgeführt.

Es sei darauf hingewiesen, daß wegen der unterschiedlichen Emissionsgrade die Eichkurve vor Beginn eines Kristallziehversuches jeweils für das Material ermittelt werden muß, aus dem der Einkristall gezogen werden soll. Außerdem ist zu beachten, daß Eichung und Messung am gleichen geometrischen Ort (der Speicherschicht) erfolgen müssen, da sowohl die Aufnahmeröhre als auch die Optik Inhomogenitäten hervorrufen, die am Rand Unterschiede der Empfindlichkeit bis zu 20 % bewirken können. Dies erschwert insbesondere die Bestimmung von Temperaturgradienten. Eine Lösung dieses Problems wird in Kapitel 4.2 angegeben.

4. Einige spezielle Probleme bei der Auswahl der Komponenten und der Realisierung des Meßsystems

4.1 Das Kameraobjektiv

Das Kameraobjektiv hat die Aufgabe, das räumliche Bildmuster der Vorlage mit größtmöglicher Lichtstärke und Schärfe auf die Speicherschicht der Kameraröhre in einem geeigneten Maßstab abzubilden.

Daraus ergeben sich folgende Kriterien:

- a) Möglichst kleine Blendenzahl F bzw. kleines Verhältnis (relative Öffnung) von Brennweite f zum Durchmesser der Eintrittspupille D ($f/D = F$).
- b) Hoher Transmissionsgrad bis zu großen Wellenlängen, d.h. möglichst weit bis in den IR-Bereich /27/.
- c) Geringe Vignettierung, d.h. geringer Abfall des Transmissionsgrades zum Bildrand hin auch bei großen Öffnungen bzw. kleinen Blenden.
- d) Flexibilität bei der Einstellung des Abbildungsmaßstabes (Zoom).
- e) Breitbandiger Verlauf der Kontrastübertragungsfunktion.

Bedauerlicherweise ist von den Objektiv-Herstellern lediglich zu den Punkten a) und d) eine ausreichende Information zu erhalten. Fragen zum Transmissionsgrad, zur Vignettierung und insbesondere auch zum Verlauf der Kontrastübertragungsfunktion (Modulationsübertragungsfunktion) bleiben gänzlich unbeantwortet. Die Beschreibung der Bildqualität eines Objektivs durch seine Modulationsübertragungsfunktion entsprechend der Amplitudencharakteristik eines elektrischen Vierpols, wie sie bei Kameraröhren üblich ist, wurde erstmals in einer Arbeit von A. Lohmann /28/ 1959 angegeben und von W.N. Sproson vom BBC Research Department 1961 /29/ als Untersuchungsmethode benutzt.

Wegen der großen Flexibilität hinsichtlich der möglichen Variationen des Abbildungsmaßstabes wurde ein fernbedienbares Zoom-Objektiv der Firma Rank Precision Industries vom

Typ Monital 5:1 mit Macro-Zoom-Vorsatz und Vorsatzlinse ausgewählt. Es hat die folgenden Eigenschaften:

Brennweitenbereich	50 - 250 mm
relative Öffnung	f/5,2
geeignet für Kameraröhren	1" und 1 1/4"
Bildwinkel horizontal (ohne Vorsätze)	15° - 30°

Mit Macro-Zoom-Vorsatz:

Einstellentfernung ab Brennebene	360 mm
Vorlagenbreite bei längster Brennweite	7 mm

Mit Vorsatzlinsen (1 1/2 Dioptrien):

Einstellentfernung ab Brennebene	500 mm
Vorlagenbreite bei längster Brennweite	15 mm

Mit diesen optischen Möglichkeiten können alle zu ziehenden Kristalle mit Durchmessern zwischen 1 mm und 25 mm formatfüllend abgebildet werden.

Als Nachteil muß die relativ geringe Lichtstärke gewertet werden, die unter Umständen zu ungünstigen Signal-Rauschabständen des Videosignals führt und nicht immer eine Abblendung um 1 bis 2 Stufen vom Minimalwert zuläßt, die wünschenswert wäre wegen des dann geringeren Randabfalls des Transmissionsgrades.

Die Einstellung der Brennweite auf einen bestimmten Abbildungsmaßstab a für die Längenmessungen (Durchmesser, Meniskusform etc.) erfolgt nach exakter Positionierung der Kamera an dafür angefertigten Eichproben, die im Inneren des Kessels vor einem Kristallziehversuch an der Hubmechanik befestigt werden. Die entsprechenden Eichfaktoren werden dann über das Datenterminal dem Mikrorechner als Parameter eingegeben, so daß das jeweilige Ergebnis der Messungen in "mm" angezeigt wird.

4.2 Die Kameraröhre

Aus dem großen industriellen Angebot an 1"-Kameraröhren, die nach dem Vidikon-Prinzip arbeiten, können nur diejenigen für ein messendes Fernsehsystem verwendet werden, die die folgenden Kriterien erfüllen:

- a) Hohe spektrale Empfindlichkeit innerhalb der spektralen Strahlungsdichteverteilung der wachsenden Kristalle, d.h. das Empfindlichkeitsmaximum muß möglichst weit im langwelligen Rot-Bereich liegen und nach Möglichkeit einer Quantenausbeute des inneren lichtelektrischen Effektes von nahe 1 entsprechen. Nur dann kann ein ausreichendes Signal-Rausch-Verhältnis des Videosignals erreicht werden.
- b) Die Übertragungskennlinie ist charakterisiert durch den Exponenten γ ihrer normierten Übertragungsfunktion

$$\frac{I_s}{I_{s_{\max}}} = \left(\frac{L_v}{L_{v_{\max}}} \right)^\gamma \quad (4.2-1)$$

mit dem Signalstrom I_s der Röhre und der Leuchtdichte L_v eines betrachteten Bildpunktes, wobei der Transmissionsgrad der Optik hier zu 1 gesetzt wurde.

Daraus ergeben sich die prinzipiellen Verläufe in Abb. 19. Wünschenswert, insbesondere für Temperatur-Meßzwecke ist eine lineare Abhängigkeit des Signalstromes von der Leuchtstärke, d.h. ein γ -Wert von 1.

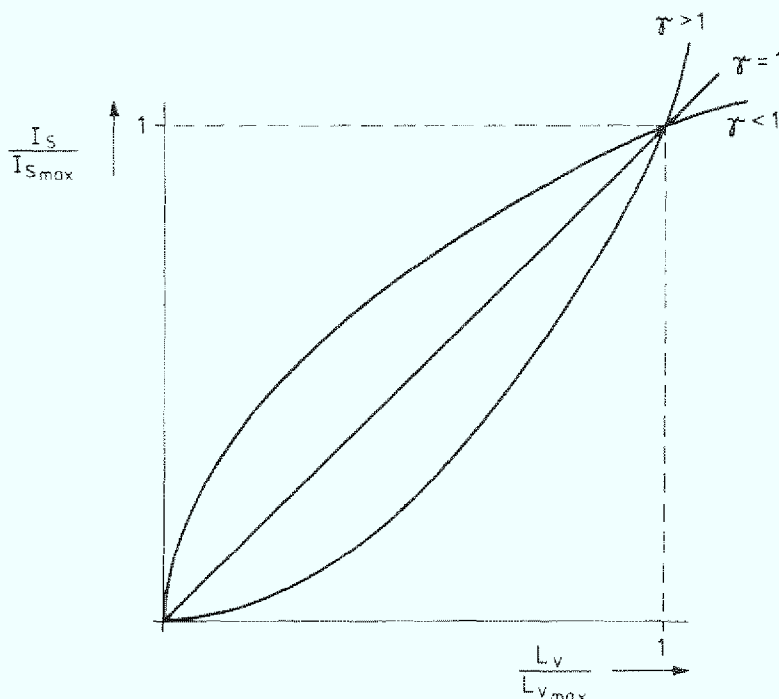


Abb. 19

Verlauf des normierten Signalstromes $I_s/I_{\max}$ in Abhängigkeit von der ebenfalls normierten Leuchtdichte $L_v/L_{\max}$ des Objektes. Der Parameter ist der Exponent γ der Übertragungsfunktion.

- c) Niedriger und über der Fläche gleichmäßiger sowie von Temperatur und Signalelektrodenspannung unabhängiger Dunkelstrom I_D (Signalstrom bei Abdunkelung der Speicherplatte). Werte von < 3 nA sind anzustreben.
- d) Gute Homogenität, d.h. gleichmäßige Empfindlichkeit über der gesamten Fläche der Speicherschicht. Dies bedeutet, daß Einflüsse durch Landefehler und Ungleichmäßigkeiten im Schichtaufbau gering sein müssen. Nach dem "Technischen Pflichtenheft der öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten in der Bundesrepublik Deutschland" Nr. 8/4.3.1 (Kameraröhren mit Bleioxid-Halbleiter-Schicht) /30/ darf die maximale Abweichung des Weißwertes vom Weißwert in Bildmitte $+5 \text{ } \%/ -15 \text{ } \%$ ($-20 \text{ } \%$ bei Rotröhren) nicht übersteigen.

Eine gute Homogenität ist insbesondere für die Temperaturmessung an verschiedenen Orten des Objektes von Bedeutung, wie in Kapitel 3.8 erläutert wurde. Ein Korrekturfaktor kann gewonnen werden, indem die Kamera in ihrer Gesamtheit (Optik, Röhre, Ablenkeinheit) Punkt für Punkt über der gesamten Fläche der Speicherschicht vermessen wird. Eine solche Untersuchung wurde von W. Uelhoff und A.W.A. van der Hart /25/ durchgeführt, allerdings bei einer Farbtemperatur von 2856 K (Normlichtart A). Die Ergebnisse sind in Abb. 20 in Form eines 3-dimensionalen Plots und in Abb. 21 als Höhenlinien dargestellt. Als Beleuchtungsquelle diente ein Leuchtdichtenormal der Firma LMT, Berlin, mit einer Konstanz der Leuchtdichte von besser 1 % über einer kreisrunden Fläche von 6 cm Durchmesser. In 350 Zeilen wurden insgesamt 14400 Punkte mit dem Videovoltmeter vermessen, wobei jeder Punkt einem Mittelwert aus 375 Einzelmessungen entspricht.

Der maximale Unterschied der Signalamplituden betrug etwa $+3 \text{ } \%/ -10 \text{ } \%$ bezogen auf Bildmitte.

- e) Eine möglichst geringe Anzahl von Flecken (Fehlstellen in der Speicherschicht) ist sowohl für die Längenmessungen als auch für die Temperaturmessung wünschenswert. Auch hier sollten die Werte des Pflichtenheftes für Studioröhren angestrebt werden: In Zone 2 (Bildfeld innerhalb eines Kreises mit dem Durchmesser gleich der Bildhöhe)

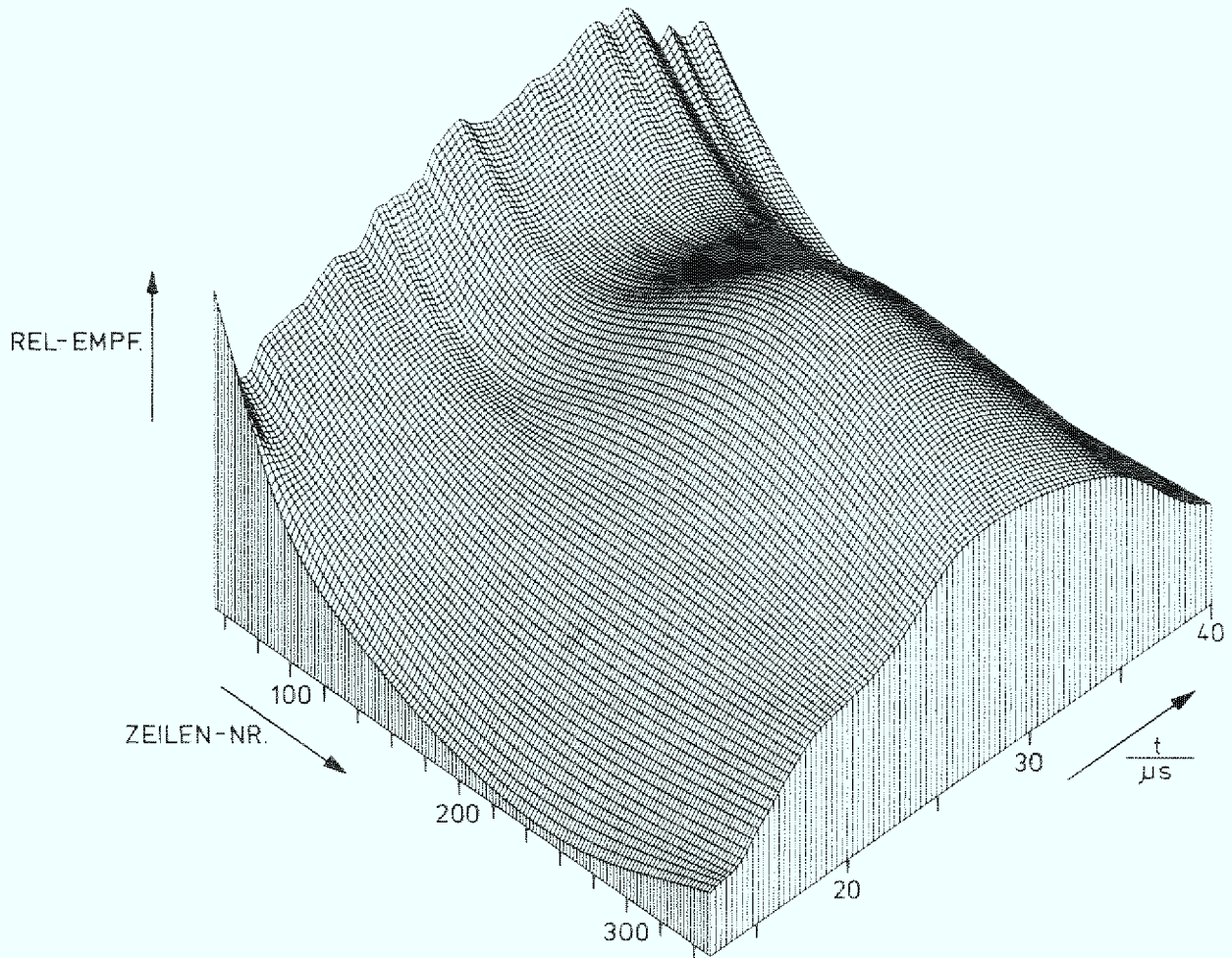


Abb. 20 Computer-Plot /25/ der Empfindlichkeitsverteilung einer Plumbicon-Kameraröhre vom Typ XQ 1073 R, eingebaut in eine Kamera ohne Shading-Kompensation.

sind für rotempfindliche Röhren nicht mehr als 2 Flecken zugelassen mit einer Summe der Störwerte von 20. Der Störwert ergibt sich dabei als Produkt aus dem Fleckdurchmesser (in % der Bildhöhe) multipliziert mit der Flecksignalamplitude (in % des Weißwertes).

- f) Eine hohe Auflösung, d.h. ein breitbandiger Verlauf der Modulationsübertragungsfunktion (MÜF), angepaßt an die Zeilenzahl der Kamera, ist für die Längenmessungen, insbesondere in vertikaler Richtung, wesentlich. Charakteristische Größe für die MÜF ist die Modulationstiefe m . Sie ist das Verhältnis der Signalamplitude $I_s(f_2)$ bei Abtastung einer dichten vertikal angeordneten Streifen-

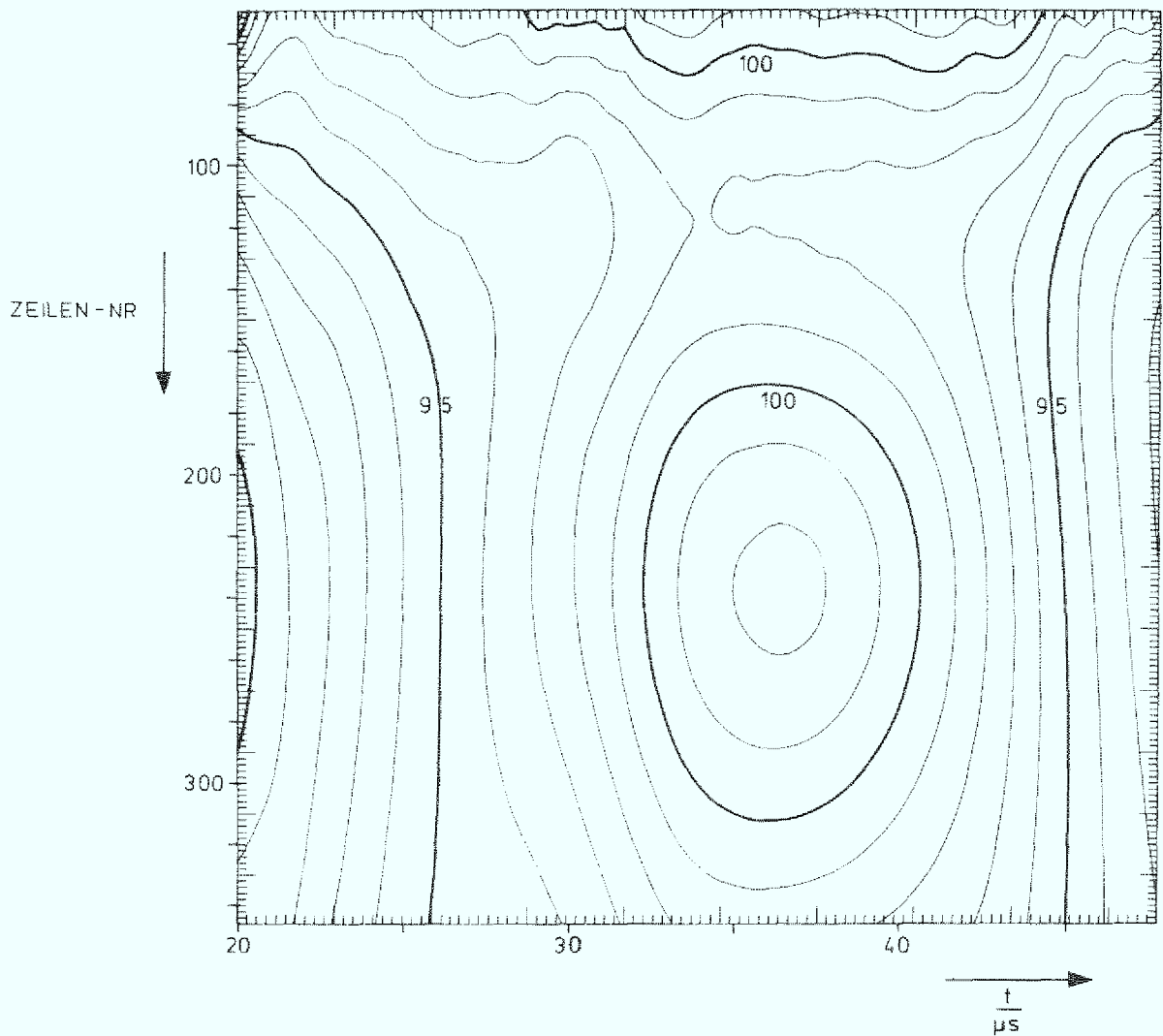


Abb. 21 Linien gleicher Empfindlichkeit /25/ gemäß Abb. 20. Der maximale Empfindlichkeitsunterschied beträgt etwa 13 %.

folge (entsprechend einer Signalfrequenz f_2) zu der Signalamplitude $I_s(f_1)$ eines Grobkontrastes (Signalfrequenz f_1), die als 100 % angenommen wird /18, 19/.

Die optische Vorlage, bestehend aus den beiden Streifenfolgen, wird so gewählt, daß bei einer bestimmten Zeilen-norm die Anzahl der dicht angeordneten Streifen einer Frequenz der Grundwelle von $f_2 = 5$ MHz entspricht und die der grob angeordneten einer solchen von $f_1 = 0,5$ MHz.

Daraus errechnet sich die Modulationstiefe m :

$$m = \frac{I_s(f_2)}{I_s(f_1)} \quad (4.2-2)$$

Die Breite b der vertikal angeordneten Streifen, bzw. ihre Abstände auf der Vorlage errechnet sich zu

$$b = \frac{1}{2 \cdot f_{1,2} \cdot T_{H_{eff}}} \quad (4.2-3)$$

Für eine 1"-Röhre ergeben sich die im folgenden angegebenen Werte für b für ein 625- und 875-Zeilensystem bei einem Abbildungsmaßstab $a = 1$.

	f_1 0,5 MHz	f_2 5 MHz
b (625 Zeilen)	245 μm	24,5 μm
b (875 Zeilen)	340 μm	34 μm

Tabelle 2 gibt einen Überblick der Eigenschaften verschiedener Röhren, und in Abb. 22 sind die spektralen Empfind-

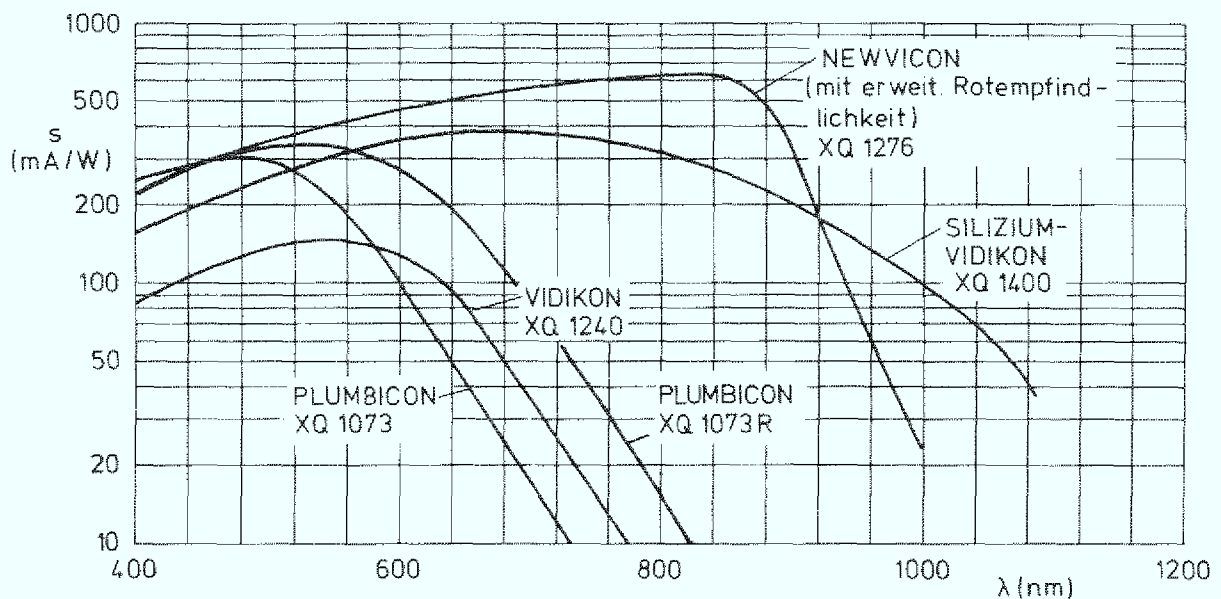


Abb. 22 Spektrale Empfindlichkeit verschiedener Kameraröhren nach Unterlagen der Firmen Valvo und Siemens.

Tab. 2 Eigenschaften verschiedener Kameraröhren.

	Speicher- schicht	Übertra- gungskenn- linie γ	Dunkel- strom I_0 [nA]	maximale spektrale Empf. s [mA/W]	Maximum d Empf bei λ [nm]	Modulations- tiefe m [%] bei 5MHz	Bemerkung
Vidikon (XQ 1240) 1"	Sb ₂ S ₃ (Antimon- trisulfid)	$\approx 0,7$	≥ 20 $= f(T, U_A)$	150	560	50	ungeeignet f. Meßsystem
Plumbicon (XQ 1073) 1"	PbO (PIN-Photo- diode)	1	≤ 3 $\neq f(T, U_A)$	300	480	50	in Studio- Qualität erhältlich
Silizium Vidikon (XQ 1400) 1"	Mosaikonordn von $\approx 1,5 \cdot 10^6$ Si-Planar Dioden	1	≥ 10 $= f(T, U_A)$	400	680	35	wird nicht mehr gefertigt
Newvicon (Sperrsch Vidikon) (XQ 1276) 2/3"	Zn Se Zn Te Cd Te (Teilschichten)	1	≥ 5 $\neq f(U_A)$ $= f(T)$	650	800	35	große Empfindlich- keit im IR
Plumbicon (XQ 2075) 1" (Neuentwickl.)	PbO (Diodensyst.)	1	≤ 3 $\neq f(T, U_A)$	350	500	70	hohe Auflösung Studio- Qualität

lichkeiten ($s = f(\lambda)$) dargestellt. Die Daten sind aus Unterlagen der Firmen Valvo /20, 31/ und Siemens /32/ zusammengestellt.

Daraus ergibt sich folgendes:

Das Vidikon ist wegen $\gamma < 1$ und wegen eines relativ hohen und von Temperatur sowie Signalelektrodenspannung abhängigen Dunkelstroms für ein Meßsystem ungeeignet. Das Plumbicon wird in Studioqualität (fleckfrei) mit extrem kleinen und konstanten Dunkelströmen gefertigt bei einem γ von etwa 1 ($\gamma = 0,95 \pm 0,05$). Die Modulationstiefe ist insbesondere bei der Neuentwicklung XQ 2075 (mit einem Diodensystem) /31/ sehr gut. Lediglich die spektrale Empfindlichkeit könnte mehr ins langwellige Rot reichen. Diese Röhrentype wird in unserem System bei allen Kristallen mit einem $T_M \geq 1100$ K eingesetzt. Für Materialien mit einem niedrigeren Schmelzpunkt (z.B. Aluminium) bieten sich das Silizium-Vidikon sowie das Newvicon von ihrer spektralen Empfindlichkeit her an. Jedoch ist beim

Silizium-Vidikon der Dunkelstrom mit 10 nA relativ hoch und von Temperatur und Signalelektrodenspannung abhängig. Die Modulationstiefe ist mit 35 % recht gering. Außerdem wird dieser Röhrentyp von Siemens und Valvo nicht mehr gefertigt.

Das Newvicon hat einen ausgezeichneten Verlauf der spektralen Empfindlichkeit mit einem Maximum bei 800 nm. Der Dunkelstrom ist von der Temperatur abhängig und die Modulationstiefe bei 5 MHz ist recht gering. Trotzdem scheint dieser Röhrentyp z.Zt. der beste Kompromiß für niedrig schmelzende Substanzen zu sein. Im Gegensatz zum Silizium-Vidikon wurde das Newvicon noch nicht im Meßsystem erprobt.

Es zeigt sich deutlich, daß für die verschiedenen Anwendungsfälle jeweils der beste Kompromiß bei der Auswahl der Kameraröhre getroffen werden muß.

4.3 Die Kamera

Das Angebot an Schwarz-Weiß-Fernsehkameras reicht von billigen Kompaktanlagen bis zur Studiokamera. Aus den im folgenden aufgeführten Kriterien folgt, daß die Wahl auf eine solche der mittleren bis oberen Preisklasse fallen muß.

Es seien zunächst die Eigenschaften genannt, die eine Kameraanlage unbedingt erfüllen muß:

1. Geeignet für 1"-Röhren vom Vidikon-Plumbicon-Typ.
2. Betrieb nach dem Zeilensprungverfahren wegen der notwendigen Koinzidenz zwischen den V- und H-Impulsen bei den ungeradzahligen Halbbildern als Startpunkt für Zeilenselektor und -scanner sowie getrennte Ausgänge für BAS, V, H und A.
3. Zeilennorm: 875-Zeilen, 50 Halbbilder/s
Dies ergibt eine Erhöhung des Durchmesser-Meßbereichs $D_{\max}/D_{\min}$ (Gl. 3 ä-14) sowie eine Verbesserung der vertikalen Auflösung Δy (Gl. 3.5-1) von jeweils dem Faktor 1,4 gegenüber der Standardnorm von 625-Zeilen.
4. Signal-Rauschabstand wenigstens 46 dB.

5. Obere Grenzfrequenz des Videoverstärkers größer als 15 MHz (entsprechend $f_{\max}$ aus Gl. 3.4-6).
6. Möglichst geringe Nichtlinearitäten der vertikalen und horizontalen Ablenkung. Werte unter 1 % wären wünschenswert, sind jedoch kaum zu tragbaren Preisen erhältlich. Zur Justierung der Kamera auf minimale Nichtlinearität sei angemerkt, daß hierzu das von den Rundfunkanstalten verwendete Schachbrett-Testdia (T06) von der Kamera aufgenommen und mit einem elektronisch erzeugten Gittermuster (von dem Kamerataktgeber synchronisiert) aus 14 horizontalen und 19 vertikalen Linien gemischt wird. Die Schnittpunkte dieses Gitters müssen sich dann mit den Ecken des Schachbrettes bei idealer Geometrie decken /33/. Durch diese Methode sind Nichtlinearitäten des angeschlossenen Kontrollmonitors ohne Bedeutung.
7. Zur Kompensation von Randabfällen in der Empfindlichkeit (s. Kapitel 4.2) sollte eine sogenannte Shading-Kompensation vorhanden sein, mit der in vertikaler und horizontaler Richtung durch Hinzumischung von sägezahn- und parabelförmigen Signalen zum Videosignal eine gleichmäßige Empfindlichkeit eingestellt werden kann.
8. Der durch den nicht idealen Verlauf der Modulationsübertragungsfunktion von Optik und Kameraröhre bedingte Abfall bei hohen Frequenzen (Schärfeverlust) sollte zumindest in Zeilenrichtung durch eine Aperturkorrektur ausgeglichen werden können.

Die Daten der von uns verwendeten Kamera zeigt die folgende Übersicht.

Hersteller und Type:	IKEGAMI, CTC 8001
Zeilennorm:	875-Zeilen, 50 Halbbilder/s (Zeilensprungverfahren)
verwendbare Röhren:	1"-Röhren, Vidikon-Plumbicon
Signal-Rauschabstand:	$\geq$ 43 dB
Grenzfrequenz des Video- verstärkers:	25 MHz $\pm$ 1 dB 30 MHz - 3 dB
Nichtlinearität:	$<$ 1 % innerhalb eines Kreises mit einem Durchmesser = Bildhöhe $<$ 2 % darüber hinaus
Shading-Kompensation:	horizontal und vertikal durch Para- bel und Sägezahn zwischen 0 und 40 % der Bildamplitude
Aperturkorrektur:	nur horizontal wirksam 0 bis 10 dB (variabel)
Kabellängenausgleich:	6-stufig bis 300 m
Objektivanschluß:	Typ C (16 mm Kameraobjektive)
Kamerakopf und Steuerteil getrennt.	

Hieraus geht hervor, daß der Signal-Rauschabstand von $\geq$ 43 dB verbesserungswürdig wäre (Studiokameras erreichen mehr als 50 dB). In /19/ wird dargelegt, daß für Vidikon-Kamera-verstärker der wesentlichste Rauschanteil vom Verstärker selbst geliefert wird. Der Störabstand ergibt sich danach zu:

$$\frac{S}{dB} = 20 \lg \frac{1}{2\pi\sqrt{4kT}} \cdot \frac{I_s}{C\sqrt{\frac{R_{\text{äq}}}{3}} (\Delta f)^3} \quad (4.3-1)$$

mit C = Kapazität des Eingangskreises

$R_{\text{äq}}$ = Äquivalenter Rauschwiderstand

Δf = Bandbreite

I_s = Signalstrom

k = Boltzmann-Konstante

T = Temperatur.

Die wirkungsvollste Verbesserung des Störabstandes ist demnach durch Reduzierung der Kapazität des Eingangskreises zu erzielen. Aus diesem Grunde sind in neuester Zeit so-

genannte Low-Capacity-Röhren (LOC-Röhren) mit einem direkt im Spulensatz integrierten FET-Eingangsverstärker entwickelt worden, die eine Verbesserung des Störabstandes von etwa 4 dB erbringen /34/.

Einflüsse des Rauschens bei Längenmessungen werden im folgenden Kapitel behandelt.

4.4 Rauscheinflüsse bei Längenmessungen in horizontaler Richtung

Es zeigt sich in der Praxis, daß die aus Gl. 3.4-11 errechnete kleinste theoretische Anstiegszeit des Videosignals t_a (gemessen an einem Schwarz-Weiß-Sprung) von 32 ns um einen Faktor von maximal 2 größer ist, aufgrund einer begrenzten Auflösung der Kameraröhre, die nicht 875 Zeilen entspricht. Zum anderen hat der Kameraverstärker mit seiner Bandbreite von 30 MHz (-3 dB) einen Bandbreitenüberschuß, was einen größeren Rauschbeitrag ergibt. Beides führt dazu, daß im Videosignal Rauschanteile enthalten sind, die relativ zum Signal selbst kürzere Anstiegszeiten besitzen. Dieser Umstand ist natürlich bei kleinen Videoamplituden besonders kritisch. Bei Längenmessungen in horizontaler (Zeilen-) Richtung (Durchmessermessung, Bestimmung der Meniskusform, Ermittlung des maximalen Durchmessers der elliptischen Reflexion) werden zur Detektion des Videosignals analoge Komparatoren verwendet (vgl. Abb. 11, K_1 ; K_2), die bereits bei einer Eingangsdifferenzspannung ΔU_E von ≥ 5 mV ihren Ausgangszustand innerhalb von 7,5 ns ändern (vgl. Abb. 13). Es wird hier der Typ AM 685 der Firma Advanced Micro Devices eingesetzt.

Abb. 23 zeigt nun am Beispiel der Durchmessermessung ein gegenüber Abb. 13 stark verrauschtes Videosignal mit dem für den Komparator maßgeblichen Referenzpegel $U_{REF} = U_{max}/2$, entsprechend dem halben ermittelten Spitzenwert der Videoamplitude. Dieser Wert ist natürlich auch statistischen Schwankungen unterworfen, ist aber während einer Meßphase (= Zeilendauer) für den Komparator konstant.

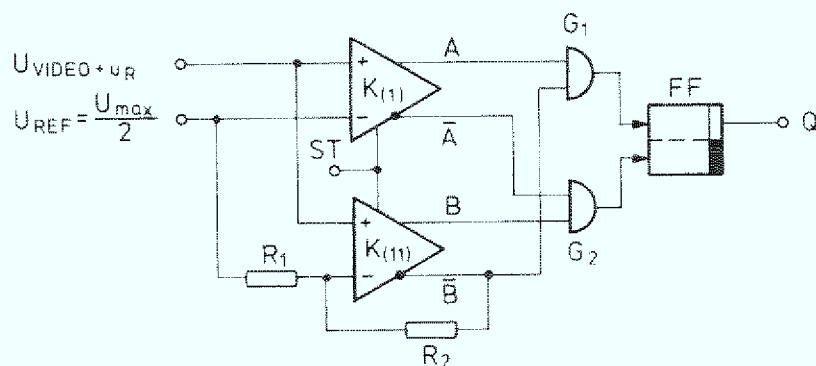
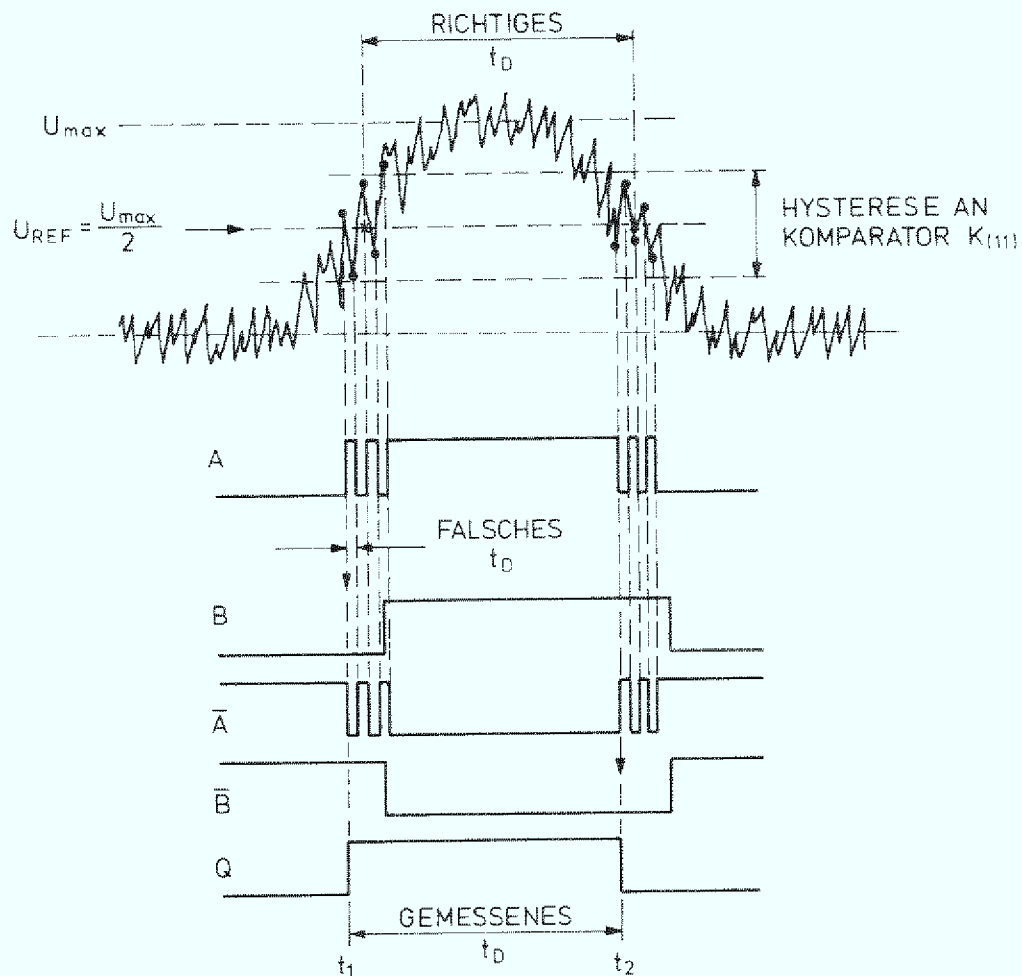


Abb. 23 Rauscheinflüsse bei Längenmessungen in horizontaler Richtung und deren Reduzierung durch Einsatz eines zusätzlichen analogen Komparators K_{11} mit Hysterese.

Übersteigt nun eine Rauschspitze den Wert $U_{\text{REF}} + \Delta U_E$, so schaltet der Komparator K_1 durch, d.h. sein nichtinvertierter Ausgang A geht von logisch "0" auf logisch "1" Pegel (Zeit-

punkt t_1). Folgt hiernach in kurzem zeitlichen Abstand eine Rauschspitze, die den Wert $U_{REF} - \Delta U_E$ unterschreitet, so kippt dieser Ausgang wieder in den alten Zustand zurück, usw. Diese entsprechende Zeit t_D würde nun vom nachgeschalteten Zähler gemessen und natürlich zu einem völlig falschen Durchmesserwert führen.

Eine solche Fehlmessung könnte vermieden werden, wenn der Komparator unempfindlicher gemacht würde (Hysterese) und zwar so, daß sein ΔU_E größer wird als der maximal auftretende Spitzenwert der Rauschamplituden. Dies würde jedoch einen anderen Meßfehler begünstigen, der dadurch entsteht, daß die Anstiegs- und Abfallzeiten des Videosignals nicht als unbedingt gleich anzusehen sind.

Eine Lösung des Problems liegt darin, daß in Anlehnung an eine Idee von J.P. Mefford /35/ zwei Komparatoren (K_1 , K_{11}) benutzt werden. K_1 arbeitet mit der maximalen Empfindlichkeit und K_{11} erhält über die Widerstände R_1 , R_2 eine von seinem invertierten Ausgang B her kontrollierte Hysterese der oben genannten Größe. Nun werden die Ausgänge A, $\bar{B}$ sowie B, $\bar{A}$ jeweils über UND-Gatter an die R- und S-Eingänge eines Flip-Flops geschaltet. Dadurch wird erreicht, daß zum Zeitpunkt t_1 (A geht zum erstenmal auf "1") das Flip-Flop umkippt (Q geht auf "1"). Da der Ausgang B sich jedoch noch auf einer "0" befindet, wird verhindert, daß bei der ersten ansteigenden Flanke von $\bar{A}$ das Flip-Flop wieder umgestellt wird. Dies geschieht vielmehr erst zum Zeitpunkt t_2 . Die vom Zähler gemessene Zeit t_p ($t_2 - t_1$) entspricht bis auf durch das Rauschen bedingte statistische Schwankungen dem richtigen Durchmesserwert.

Durch diese Maßnahmen konnte erreicht werden, daß noch Signalamplituden von 20 mV mit Rauschanteilen von 5 mV_S einwandfrei detektiert werden können, wie es das Oszillogramm in Abb. 24 verdeutlicht.

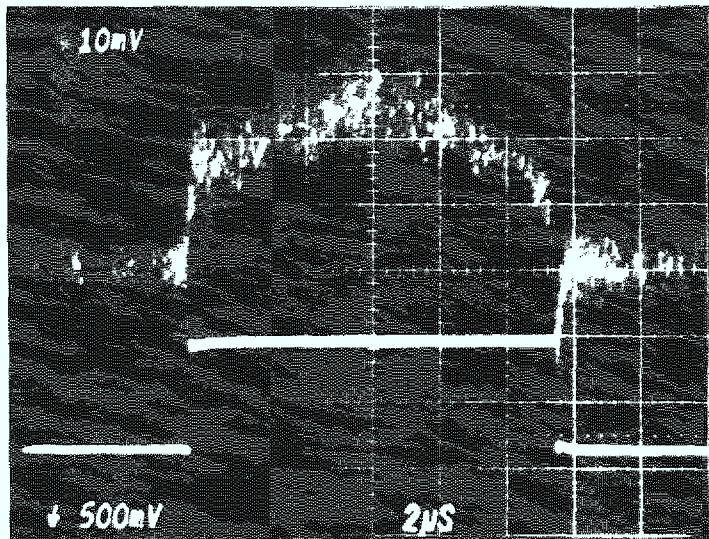


Abb. 24

Oszillogramm eines verrauschten Videosignals (oben) und das dazu gehörende Ausgangssignal (Q in Abb. 23) der Doppel-Komparator-Anordnung. Spannungsmaßstab 10 mV/cm für das Videosignal; Zeitmaßstab 2 µs/cm.

4.5 Realisierung des Video-Voltmeters für die Temperaturmessung

Für die Temperaturmessung mit hoher lokaler Auflösung muß, wie in Kap. 3.8 bereits dargelegt wurde, ein Video-Voltmeter realisiert werden, das innerhalb möglichst kleiner, aber variabler Zeiten (Meßfleckbreiten) den aktuellen Video-Pegel erfaßt. Hierzu wurde eine Kombination aus einer "Track and Hold"-Schaltung und einem "Peak-Detektor" gewählt mit einer vorgeschalteten getasteten Klemmstufe.

Ein vereinfachtes Schaltbild ist in Abb. 25 dargestellt.

Hiernach wird das Bildsignal (B) über einen Pufferverstärker A_O der Schwarzwert-Klemmstufe, bestehend aus C_O und S_O zugeführt. Der Klemmimpuls KL hat eine Dauer von $t_{KL} = 1 \mu s$. Für die Aufladezeitkonstante während der Klemmphase (S_O geschlossen) wird ein Wert von $t_{KL}/10$ gewählt, entsprechend einem Ladefehler von $4,5 \cdot 10^{-5}$. Nach dem Ersatzschaltbild Abb. 26a) errechnet sich dann C_O zu:

$$C_O \leq \frac{t_{KL}}{10} \cdot \frac{1}{R_i + R_{ON}} \quad (4.5-1)$$

R_i = Innenwiderstand des Pufferverstärkers A_O

R_{ON} = "Ein"-Widerstand des FET-Schalters S_O

a) AUFLADEN

b) ENTLADEN

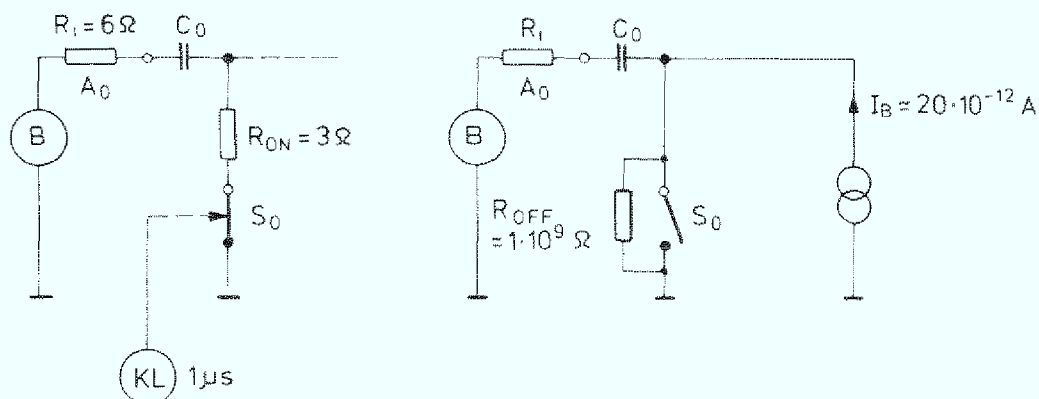


Abb. 26 Verhältnisse an der getasteten Klemmstufe in Abb. 25 während (a) und nach (b) der Klemmung.

Mit den angegebenen Werten und einem $\Delta U/U$ von $1 \cdot 10^{-5}$ erhält man für C_0 einen Wert von 11 nF und ein realisierbares R_{OFF} für den Schalter S_0 von $3,75 \cdot 10^8 \Omega$.

Die Kombination aus einer "Track and Hold"-Schaltung (S_2 geschlossen) und einem "Peak-Detektor" (S_2 geöffnet) /36, 37, 38/ wird nach dem Impulsplan in Abb. 27 folgendermaßen gesteuert: Zum Zeitpunkt 1 wird über den Steuerimpuls "Track" (TR) S_1 geschlossen sowie über "Meßfleck-Lage" (ML) S_2 geschlossen und damit der "Track"-Zustand eingeschaltet, d.h., die Spannungen am Kondensator C und damit am Ausgang von Verstärker A_2 folgen dem Videosignal. Zum Zeitpunkt 2 wird der "Peak-Detektor" eingeschaltet, indem mit Beendigung des Impulses Meßlage der Schalter S_2 geöffnet wird und dadurch die Diode D_1 ein Abfließen der Kondensatorladung in den Ausgang des Verstärkers A_1 bei eventuell fallendem Video-Pegel verhindert. Bis zum Punkt 3 folgt die Ausgangsspannung U_v des Verstärkers A_2 nur noch steigenden Video-Amplituden, ermittelt also jeweils den größten aufgetretenen Wert.

Bei größeren Meßfleckbreiten bedeutet dies eine geringere Streuung der Einzelwerte bei der Vermessung rauschbehafteter Signale, jedoch eine stets positive Abweichung vom wahren

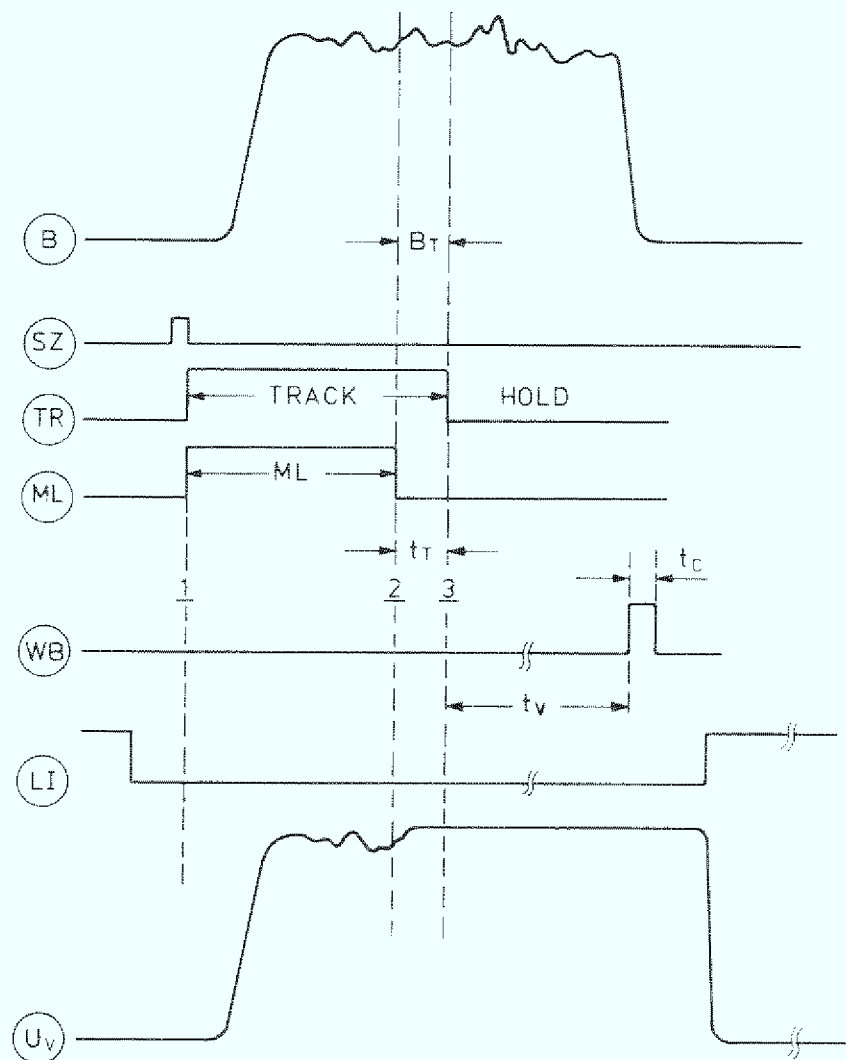


Abb. 27 Impulsplan sowie möglicher Verlauf des Bildsignals B und des dazu gehörigen Ausgangsspannungsverlaufs U_v des Video-Voltmeters bei einer eingezeichneten Dauer t_T des Temperaturmeßflecks B_T .

Video-Pegel, die allerdings nach erfolgter Mittelwertbildung der gemessenen Amplitudenwerte einzeichbar ist.

Zum Zeitpunkt 3 wird S_1 geöffnet und die "Hold"-Phase eingeleitet.

Die Breite des Meßflecks B_T wird durch die Zeitdifferenz t_T vorgegeben und errechnet sich aus Gl. (3.8-2).

Um eventuell auftretende Polarisierungseffekte am Speicherkondensator C zu umgehen, setzt der Wandelbefehl (WB) für den nachgeschalteten 12 Bit A-D-Wandler erst nach der Zeit $t_v = 30 \mu s$ nach Beginn der "Hold"-Phase ein. Die Wandelzeit t_c selbst beträgt $2,8 \mu s$ /39/.

Die Kondensatorspannung bzw. die Spannung U_v darf vor Ablauf der Wandlung nicht um mehr als $0,125 \text{ }^\circ/\infty$ ($= 1/2$ LSB des Wandlers) abgesunken sein.

Bezogen auf "full-scale" des Wandlers von $4,095 \text{ V}$ erhält man damit eine Abfallsrate der Spannung ("Drop Rate") von $D_R = 15,6 \text{ V/s}$.

Unter Berücksichtigung aller Leckströme (I_L) führt dies zu einem Minimalwert der Speicherkapazität von

$$C \geq \frac{\sum I_L}{D_R} \quad (4.5-5)$$

Dies ergibt mit $\sum I_L = 2,7 \cdot 10^{-10} \text{ A}$ einen Wert von mindestens $17,3 \text{ pF}$.

Um einen gewissen Abstand von parasitären Kapazitäten zu erhalten, wurden 50 pF verwendet. Mit dieser Anordnung konnten Meßfleckbreiten bei 1:1 Abbildung von $30 \mu m$ erreicht werden ($t_T \approx 90 \text{ ns}$).

Nach Ablauf der Analog-Digital-Wandlung wird mit dem Schalter S_3 (Ansteuerung mit Löschimpuls LI) der Kondensator C entladen und somit für die nächste Messung vorbereitet.

Weitere Einzelheiten der Dimensionierung, insbesondere Detailprobleme zur Reduzierung der Leckströme der verwendeten FET-Schalter sowie die Beschreibung der gesamten Ansteuerlogik enthält eine Graduierungsarbeit von W. Selt /40/.

5. Steigerung der Meßgenauigkeit durch Ausreißereliminierung und Mittelwertbildung mit Hilfe eines Mikrorechners

Die hier angewandten Rechenregeln der Statistik zur Steigerung der durch Rauschen verursachten Meßungenauigkeit dürfen nur verwendet werden, wenn die Daten im Sinne einer Gaußfunktion streuen /41/.

5.1 Untersuchungen zur Gauß-Verteilung

Obwohl anzunehmen ist, daß von allen möglichen Formen von elektrischen Störsignalen der Einfluß des elektronischen Rauschens mit Normalverteilung überwiegt /42, 44/, so wurden doch, um auch eventuelle systematische Meßfehler aufdecken zu können, umfangreiche Meßreihen durchgeführt, dies insbesondere bei der Längenmessung.

Zu diesem Zweck wurde eine Meßanordnung nach Abb. 28 mit Hilfe einer optischen Bank aufgebaut. Ein einstellbarer Spalt diente als Meßobjekt. Er wurde von einem Leuchtdichtenormal mit vorschaltbaren Abschwächern ausgeleuchtet. Die selektierte Meßzeile war typisch die Zeile 220 (etwa Bildmitte). Es wurden aber auch Scan-Messungen zwischen den Zeilen 40 und 420 durchgeführt. Etwa 20.000 Einzelmeßwerte wurden verarbeitet.

Alle Meßreihen lieferten eine gute Annäherung an die Gaußsche Fehlerkurve und ließen keine systematischen Fehler erkennen. Ein Beispiel hierzu zeigt das Histogramm in Abb. 25. Es stellt die Verteilung der Meßwerte t_D gemessen an einem Spalt mit der Breite 2,27 mm (Abbildungsmaßstab $a = 1,33$; Gl. 3.4-13) dar.

Die Intervallbreite wurde gleich der Auflösung des Zählers (10 ns) gewählt. Vor der Erstellung des Histogramms wurden Ausreißertests (nach Nalimov /41/) durchgeführt. Im Beispiel sind 4 Ausreißer (99 % Wahrscheinlichkeit) von 1200 Meßwerten erkannt worden. Hiernach wurde der Mittelwert ($\bar{x} = 5,003 \mu s$) gebildet sowie die Standardabweichung ($\sigma = \pm 1 \cdot 10^{-2} \mu s$). Außerdem wurde der Vertrauensbereich der Mittelwerte

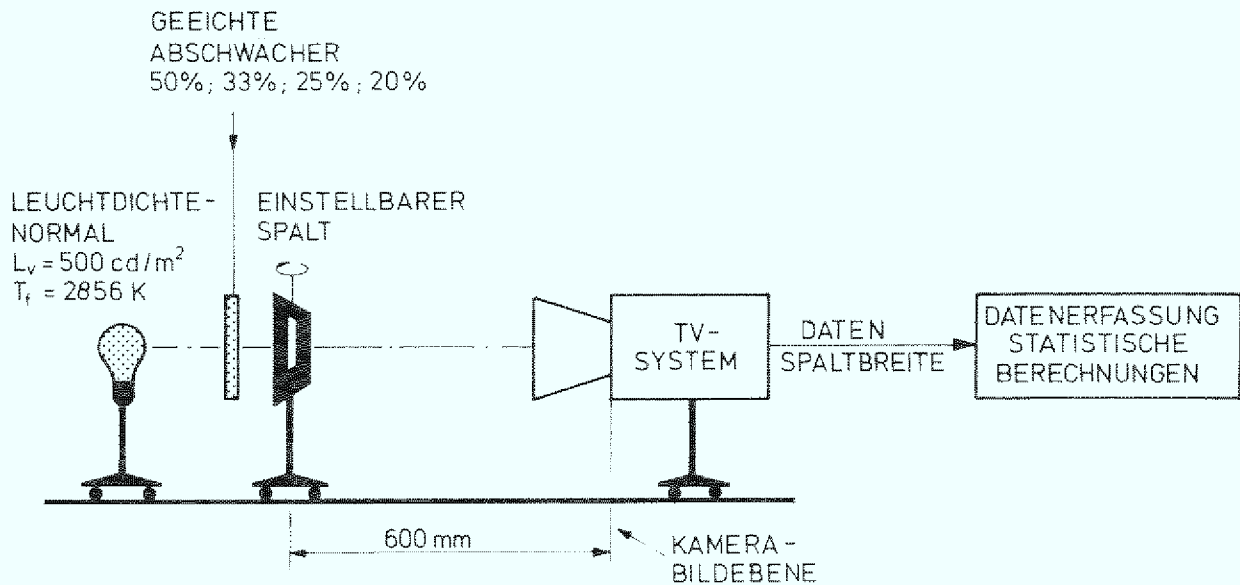


Abb. 28 Aufbau zur Untersuchung der Meßeigenschaften bei Längenmessung.

($T_{\bar{x}} = \pm 7,2 \cdot 10^{-4} \mu s$) errechnet sowie der Streubereich der Einzelwerte ($T_{x_i} = \pm 0,025 \mu s$) bei einer Wahrscheinlichkeit von 99 %.

Die Durchführung dieser Rechenoperationen sei im folgenden erläutert.

5.2 Betriebsmäßige Durchführung statistischer Rechenoperationen

Der Mikrorechner besteht aus einer Hardware der Fa. Siemens (SMP 80) mit einem 8 Bit-Mikroprozessor vom Typ 8080 und einer Software von etwa 7 k Bytes, die in E-PROMS gespeichert ist.

Bei der Durchführung aller Berechnungen wurden die Ausführungen und das Tabellenwerk von Kaiser und Gottschalk /41/ zugrunde gelegt sowie entsprechende Stellen in /43/.

Dabei wird zunächst aus allen zu einer Meßreihe gehörenden Daten x_i der Mittelwert $\bar{x}$ und die Standardabweichung σ (oder auch mittlere quadratische Abweichung der Einzelwerte x_i vom Mittelwert $\bar{x}$) gebildet:

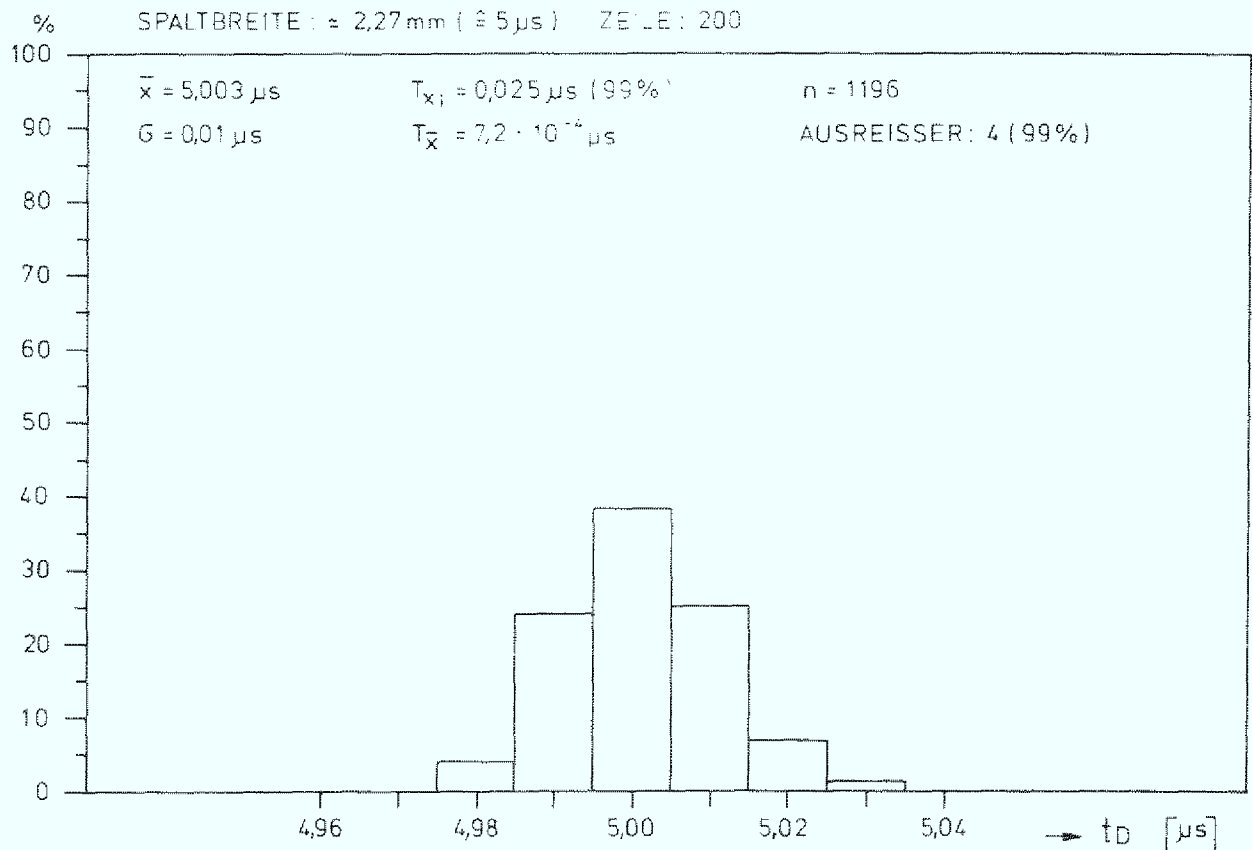


Abb. 29 Histogramm einer Meßreihe aus 1200 Einzelwerten (4 Ausreißer) für die Vermessung eines Spaltes mit der Breite von $2,27 \text{ mm}$ ($\hat{=} 5 \mu\text{s}$) in der Zeile 220. Gemessen wurde bei einer Leuchtdichte von 500 cd/m^2 mit Blende 8.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.2-1)$$

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.2-2)$$

Hiernach kann ein Ausreißertest nach Nalimov /41; S. 18/ durchgeführt werden, wozu alle Meßwerte x_i nach folgendem Kriterium untersucht werden:

Wenn

$$r(99 \%) \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}} \cdot \sigma - |x_i - \bar{x}| < 0, \quad (5.2-3)$$

dann ist der Meßwert x_i "signifikant" ein Ausreißer. Hier-

bei ist $r(99\%)$ eine statistische Prüfgröße für eine Wahrscheinlichkeit von 99 %.

Die Zahlenwerte für den Term $r(99\%) \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}$ können der sogenannten "Ausreißertabelle" nach Fricke /41; S. 50/ für verschiedene n entnommen werden.

Der Programmablauf für diesen Test ("NALIM") ist aus dem Fließdiagramm in Abb. 30 zu ersehen.

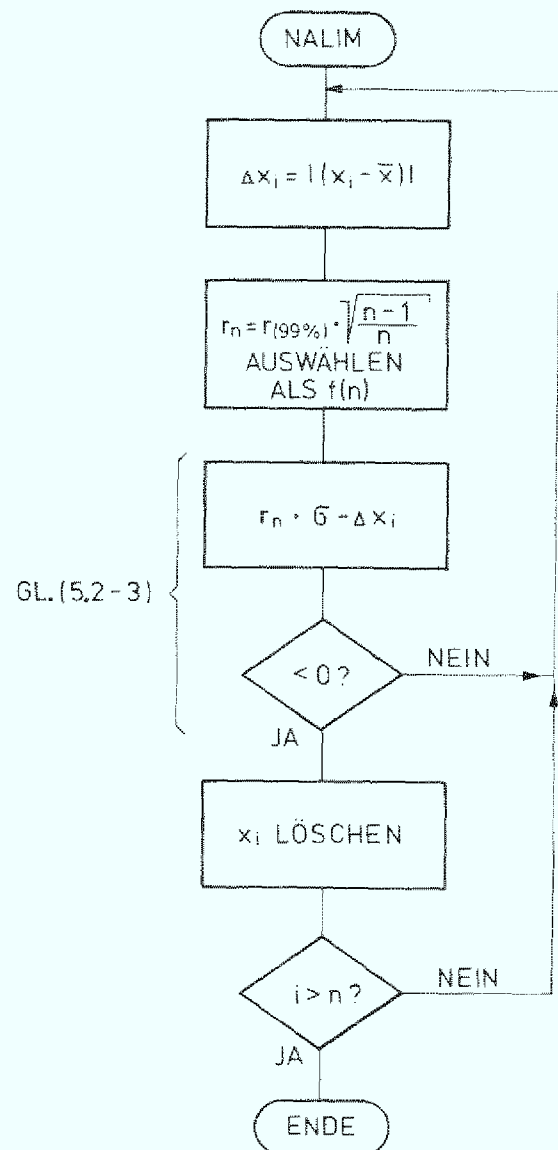
Abb. 30

Programmablauf des Ausreißertest-Programms
"NALIM" nach Nalimov.

Die Eingangsparameter für das Unterprogramm "NALIM" sind alle Einzelwerte x_i , ihre Anzahl n , der daraus gebildete Mittelwert $\bar{x}$ sowie die Standardabweichung σ . In einer Tabelle sind für 7 verschiedene n die Prüfwerte $r(99\%) \cdot \sqrt{\frac{n-1}{n}}$ aus der "Fricke"-Tabelle abgelegt.

Nach Durchlauf dieses Unterprogramms erfolgt eine neue Berechnung von σ und $\bar{x}$ aus den verbliebenen x_i .

Weiterhin werden nun die folgenden, bereits in Kapitel 5.1 zitierten Größen ermittelt, die dem Anwender jederzeit einen Aufschluß über die Funktionsfähigkeit des Systems vermitteln:



1. Der Streubereich T_{x_i} der Einzelwerte ergibt sich zu:

$$T_{x_i} = \pm \sigma \cdot t \quad (5.2-4)$$

mit dem sogenannten STUDENT-Faktor t , der aus Tabellen für eine statistische Wahrscheinlichkeit von 99 % entnommen wurde (wiederum für 7 verschiedene n).

T_{x_i} gibt dann an, daß 99 % aller Einzelwerte x_i im Bereich $\bar{x} \pm T_{x_i}$ zu erwarten sind.

2. Aus T_{x_i} errechnet sich der sogenannte Vertrauensbereich $T_{\bar{x}}$, der Streubereich der errechneten Mittelwerte:

$$T_{\bar{x}} = \pm \frac{T_{x_i}}{\sqrt{n}} \quad (5.2-5)$$

Er drückt die Verbesserung des Meßergebnisses um den Faktor $\sqrt{n}$ bei Mittelwertbildung aus.

Dieser gesamte Programmablauf wird betriebsmäßig (on-line) beim Einsatz des Systems vorgenommen, wobei maximal $n = 255$ Meßwerte für eine Mittelung erfaßt werden können, für die dann eine Gesamtmeßdauer von 10,2 Sekunden (Meßrate 40 ms) zuzüglich einer Rechenzeit von etwa 100 ms benötigt wird.

Alle Rechenergebnisse erscheinen auf einem Datenterminal und werden wahlweise an weitere Datenverarbeitungsanlagen weitergeleitet. Der Durchmessermittelwert wird in einem 16 Bit Digital/Analog-Konverter in eine analoge Regelgröße für die Durchmesserkontrolle umgewandelt.

5.3 Ergebnisse

Sehr deutlich vermittelt Abb. 31 die Verbesserung des Meßergebnisses bei der Durchmessermessung (Streuung der Mittelwerte) durch die Mittelung aus $n = 200$ Einzelwerten. Es sind aufgetragen, bezogen auf den jeweiligen Mittelwert $\bar{x}$, die relative Streuung der Mittelwerte, die relative Streuung der Einzelwerte sowie die relative Genauigkeit des Zählers über einer variablen Spaltbreite entsprechend einem t_D von 0,5 bis $10 \mu s$ (Abbildungsmaßstab wiederum $a = 1,33$).

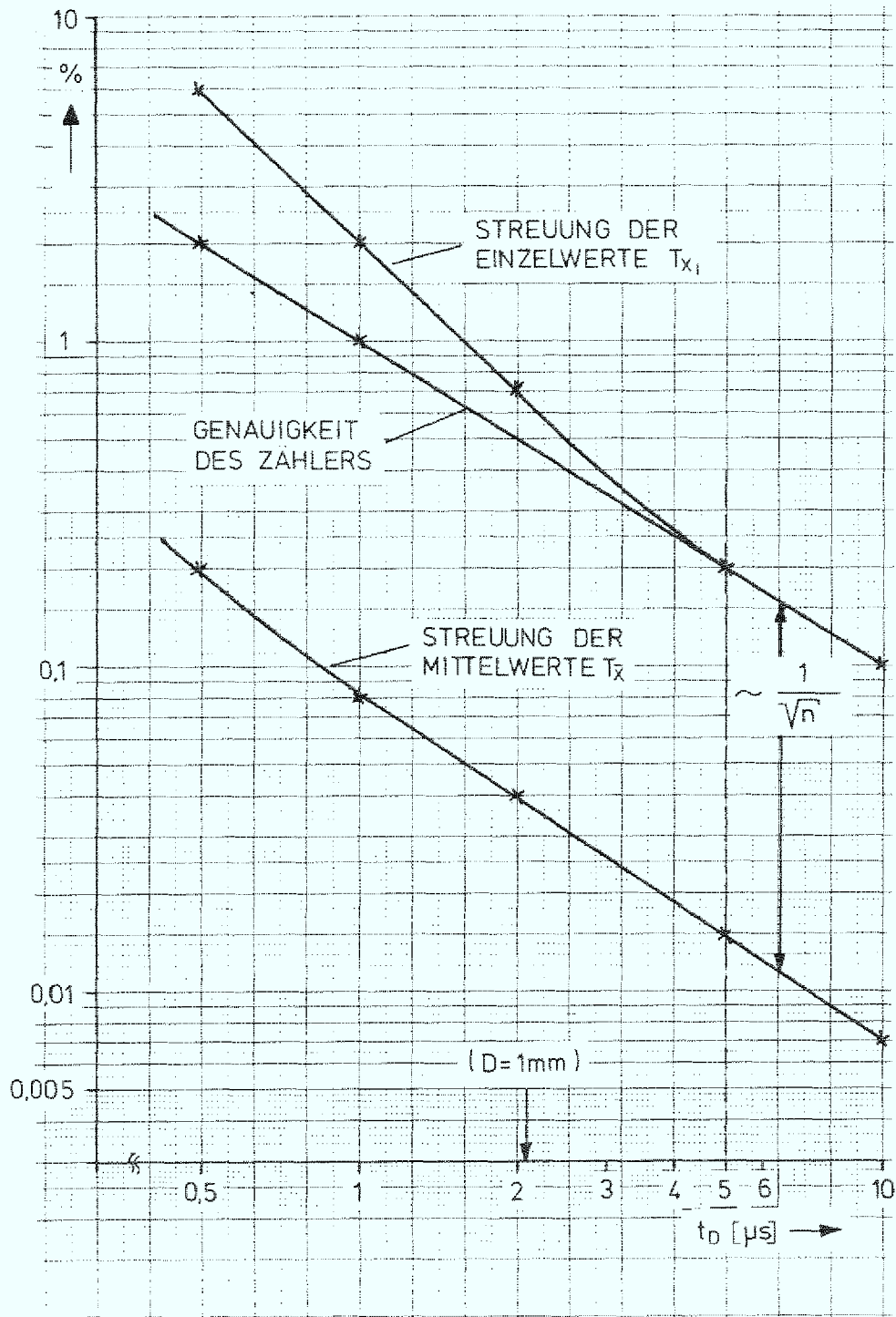


Abb. 31 Relative Streuung der Einzelwerte (T_{x_i}), relative Genauigkeit des Zählers sowie relative Streuung der Mittelwerte $T_{\bar{x}}$ als Funktion der Spaltbreite jeweils für 200 Meßwerte.

Im Bereich $0,5 \mu s < t_D < 5 \mu s$ ist an der relativ hohen Streuung der Einzelwerte (größer als die Genauigkeit des Zählers) deutlich der Einfluß des Rauschens (vgl. Abb. 24) bei der Durchmessermessung zu erkennen und eine gegenüber

dem Faktor $1/\sqrt{n}$ überproportionale Verbesserung des Vertrauensbereiches der Mittelwerte durch Ausreißereliminierung.

Oberhalb einer Spaltbreite entsprechend $5\mu\text{s}$ ist der Rauscheinfluß nicht mehr erkennbar, und die Streuung der Einzelwerte geht in die relative Genauigkeit des verwendeten Zählers (0,2 % bei $t_D = 5\mu\text{s}$) über.

Im Bereich $5\mu\text{s} < t_D < 10\mu\text{s}$ gilt das $1/\sqrt{n}$ -Gesetz.

Für den Scan-Betrieb (z.B. zur Vermessung der Meniskusform) ist von Interesse, wie sich die Meßwerte an einem Objekt konstanten Durchmessers über der Bildhöhe ändern. Hierzu wurde an einem Spalt mit einer Breite entsprechend $t_D = 5\mu\text{s}$ zwischen Zeile 40 und 420 in 3 Durchläufen gemessen. Das Ergebnis zeigt das Histogramm in Abb. 32.

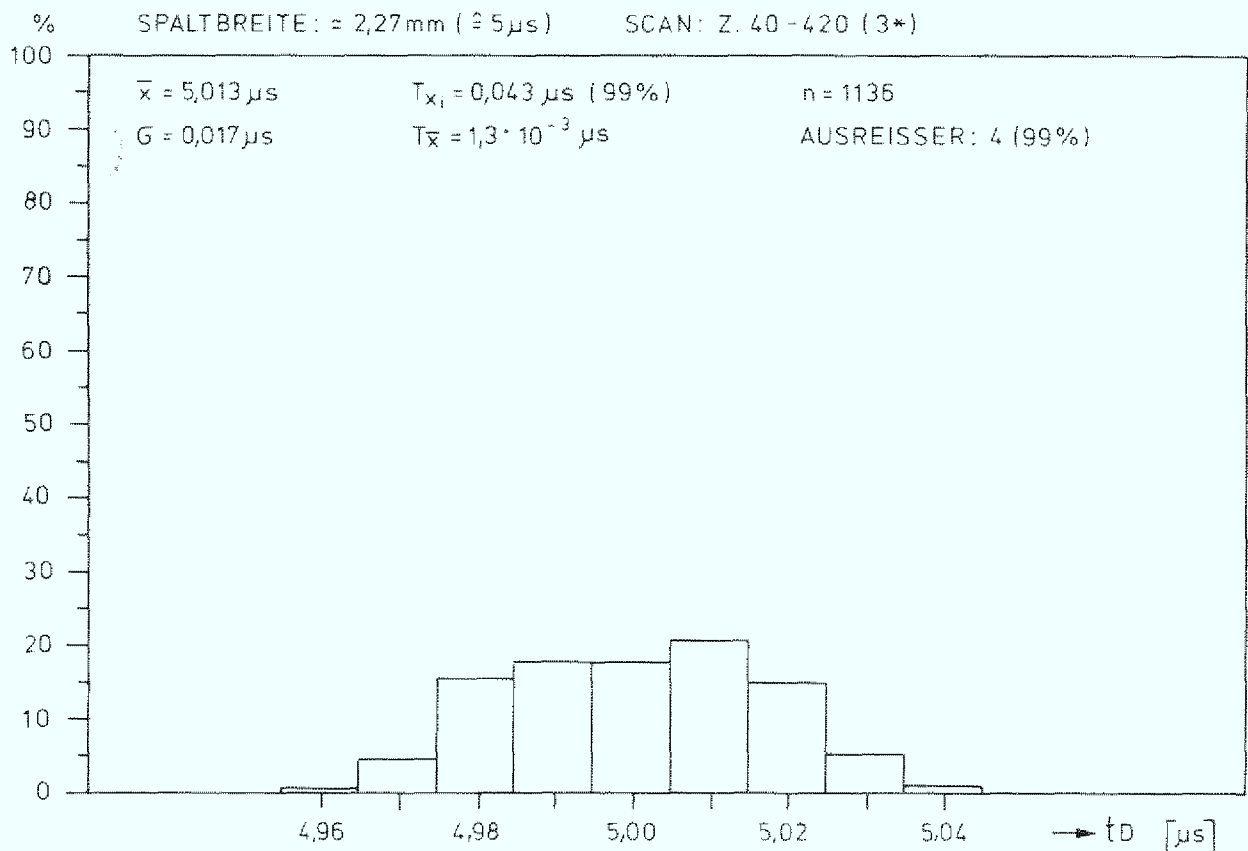


Abb. 32 Vermessung des gleichen Objektes wie in Abb. 29 unter gleichen Bedingungen, jedoch zwischen den Zeilen 40 und 420 in 3 Durchläufen entsprechend 1140 (4 Ausreißer) Einzelwerten (Scan-Betrieb).

Dabei verschlechterte sich der Vertrauensbereich der Mittelwerte $T_{\bar{x}}$ auf $\pm 1,3 \cdot 10^{-3} \mu s$ und die Standardabweichung σ auf $\pm 0,017 \mu s$ (vgl. Abb. 29), infolge der Nichtlinearität der Ablenkung in der Kamera.

Abschließend wurden auf der optischen Bank Messungen über die Abhängigkeit der Durchmesser messung von der Kameraverstärkung (Abb. 33) und der Leuchtdichte des Objektes (Abb. 34) vorgenommen. Aufgetragen sind die gemittelten Werte aus 200 Einzelmessungen. Die Abhängigkeit von der Kameraverstärkung wurde bei konstanter Leuchtdichte ermittelt, so daß bei günstigen Signal-Rauschabständen gemessen wurde. Bei einer Variation der Verstärkung um den Faktor 5 ergab sich eine Änderung des Meßwertes von nur $-0,5 \text{ ‰}$.

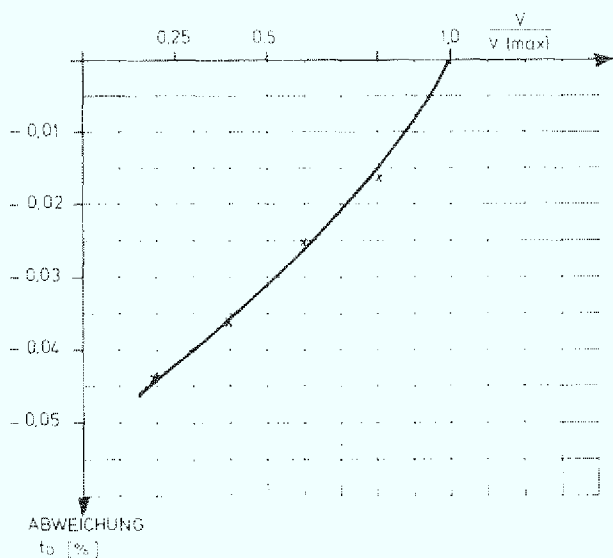


Abb. 33

Abweichung des gemessenen Durchmessers bei Veränderung der Kameraverstärkung. Aufgetragen ist die Änderung der dem Durchmesser proportionalen Zeit t_D in % als Funktion der normierten Kameraverstärkung $V/V_{\max}$, gemessen bei einer Spaltbreite von $2,27 \text{ mm}$ ($\approx 5 \mu s$). Jeder eingetragene Wert entspricht dem Mittelwert aus 200 Einzelmessungen. Blende 8, Leuchtdichte 500 cd/cm^2 . Meßzeile 220.

Zur Ermittlung der Leuchtdichteabhängigkeit wurden geeichte Abschwächer der Fa. LMT verwendet, wobei die Verstärkung der Kamera konstant gelassen wurde. Da sich hierbei das Signal-Rauschverhältnis ständig verschlechtert, betragen die Abweichungen -1 ‰ bei einer Reduzierung der Leuchtdichte um den Faktor 5.

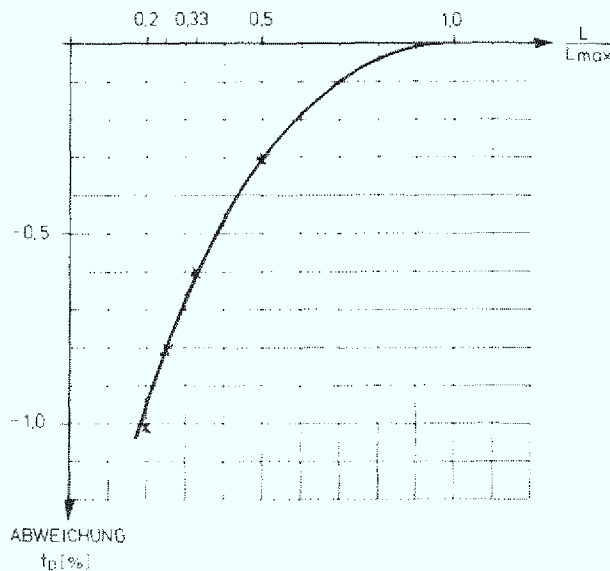


Abb. 34

Abweichung des gemessenen Durchmessers bei Veränderung der Leuchtdichte. Aufgetragen ist die Änderung der dem Durchmesser proportionalen Zeit t_D in % als Funktion $L/L_{\max}$. Die Leuchtdichte wurde auf 50 %, 33 %, 25 % und 20 % abgeschwächt mit geeichten Blenden der Firma LMT. Spaltbreite 2,27 mm ($\hat{=}$ 5 μ s), Blende 8, $L_{\max} = 500 \text{ cd/m}^2$. Jeweils 200 gemittelte Einzelmessungen. Meßzeile 220.

6. Integration des Meßsystems in die gesamte Kristall-ziehapparatur

Das modular aufgebaute System (Abb. 35) ist als ein wesentlicher Bestandteil in die gesamte Ziehapparatur integriert. Es liefert seine Daten an das Meß-Steuer- und Regelsystem, wie aus Abb. 36 hervorgeht und darüber hinaus an einen Prozeßrechner vom Typ PDP 11/45. Hier werden dann weiterführende Berechnungen on-line vorgenommen (Bestimmung von Wachstumswinkel, Wärmefluß, Temperaturgradient usw.), die dann schließlich von einem Plotter für jeden Kristall aufgezeichnet werden. Ein Beispiel hierzu gibt Abb. 37.

Hier sind aufgetragen jeweils über der Position der Hubmechanik, d.h. über der Länge des Kristalls der Kristalldurchmesser, der Wachstumswinkel (vgl. Abb. 14, Winkel α), die Höhe der Phasengrenze über dem Schmelzenniveau, die Temperaturdifferenz zwischen der Schmelzentemperatur T_L und der Erstarrungstemperatur T_M , der Temperaturgradient an der Phasengrenze sowie der Wärmefluß über den Kristall und die Zugspindel.

Eine derart registrierte "Wachstumsgeschichte" bietet die Möglichkeit der Korrelation mit den in späteren physikalischen Untersuchungen gefundenen Eigenschaften des Kristalls.

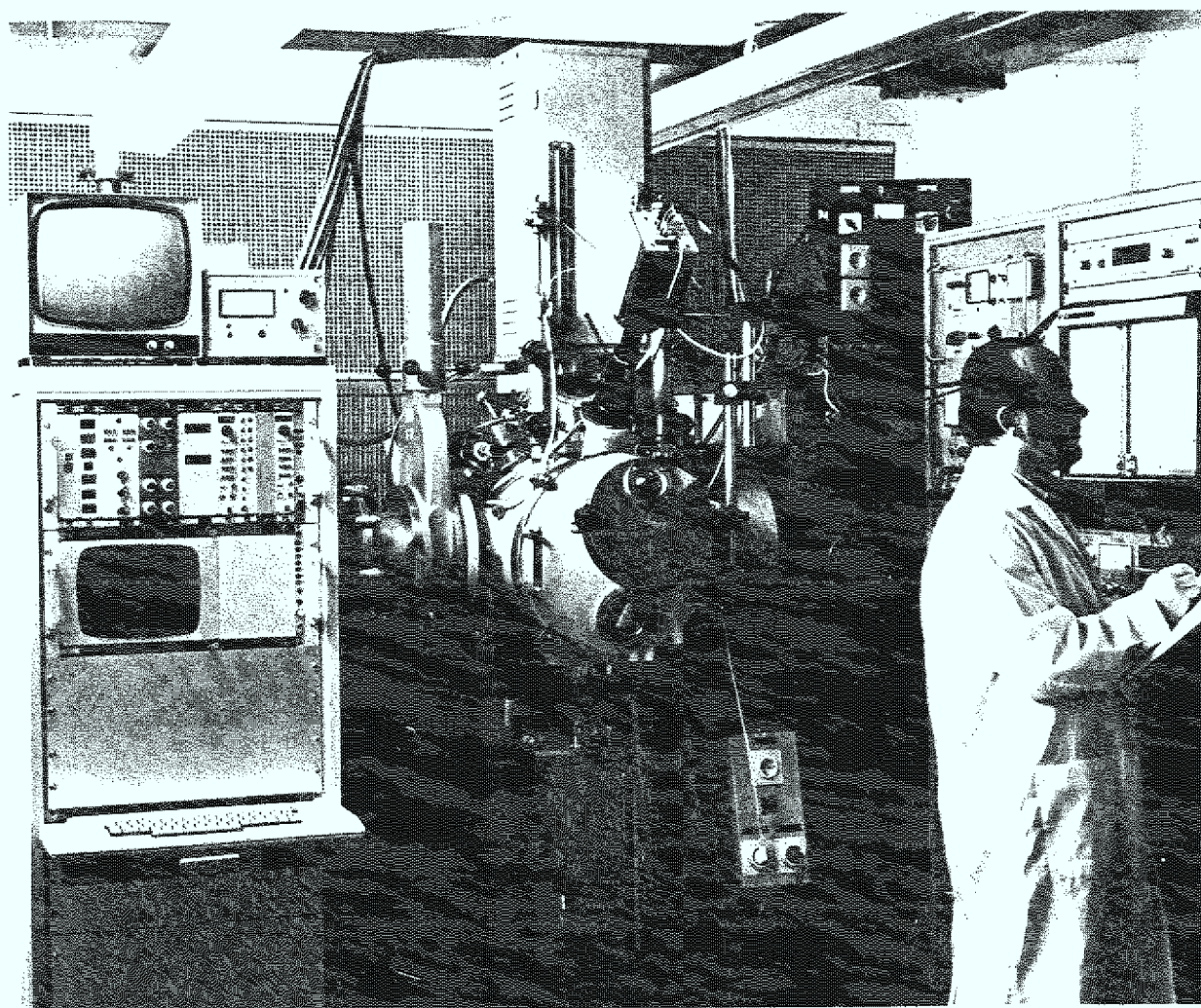


Abb. 35 Die Fernsehmeßeinrichtung neben dem Kessel für die Kristallzucht. Hub-Drehmechanik oberhalb und unterhalb des Kessels. HF-Generator für die induktive Beheizung rechts im Hintergrund.

Um die Übereinstimmung der Meßergebnisse unter anderem mit der quantitativen Theorie des makroskopischen Kristallwachstums von A.W.A. van der Hart /24/ gewinnen zu können, besteht außerdem ein Datentransfer über eine Fernleitung zu dem Großrechner der KFA (IBM 370/168), wegen des für solche Berechnungen notwendigen größeren Rechenspeichers (Abb. 36).

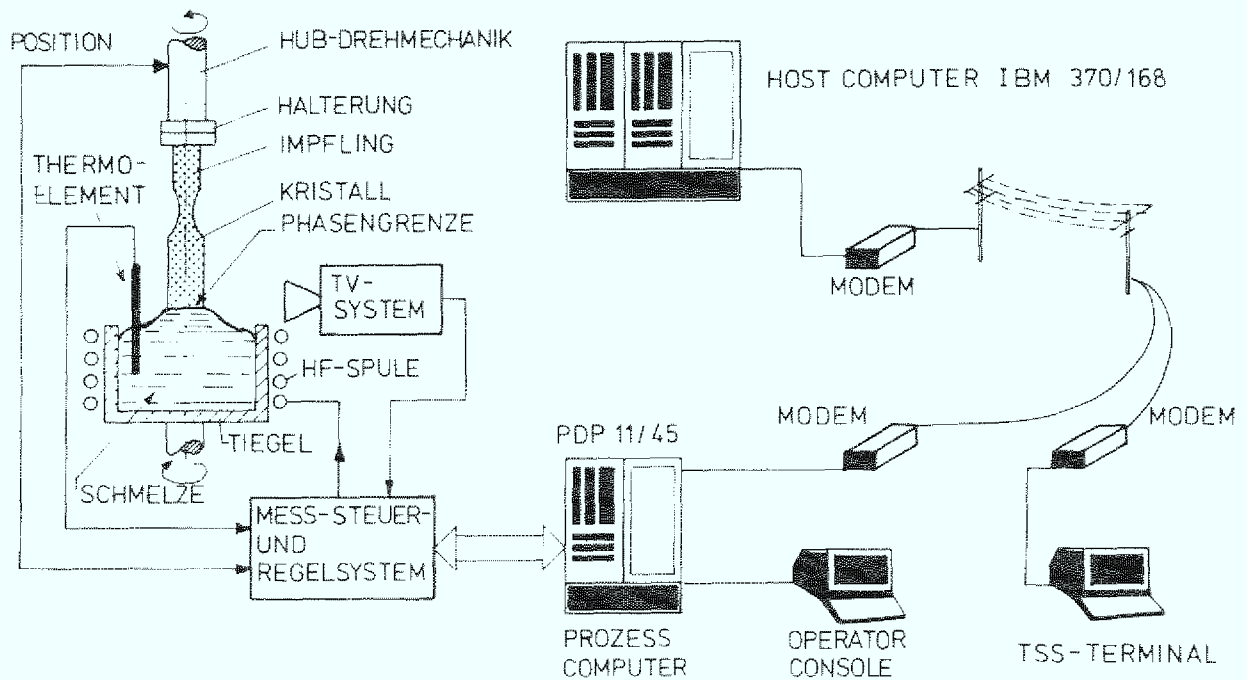


Abb. 36 Kristallziehapparatur mit Peripherie: Prozeßrechner-PDP 11/45 sowie über TSS (Time-Sharing-System) angeschlossener Großrechner IBM 370/168.

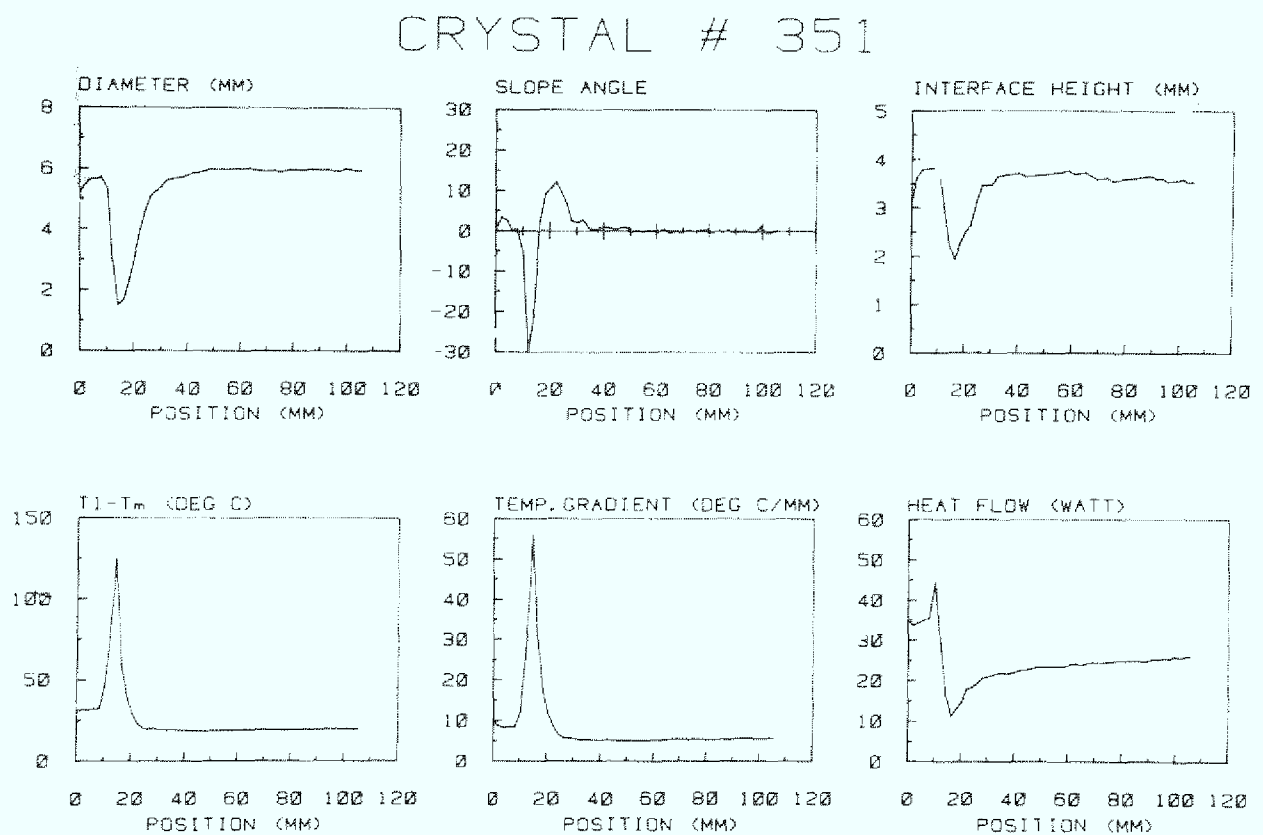


Abb. 37 Resultate weiterführender Computer-Auswertung der Meßergebnisse der Fernsehmeßeinrichtung.

7. Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Die sprunghafte Entwicklung der letzten Jahre auf dem Gebiet hochintegrierter Schaltkreise hat dazu beigetragen, daß inzwischen Videokameras mit Halbleiterbildwandlern, sogenannte CCD (Charge Coupled Devices)-Kameras mit brauchbaren Auflösungen erhältlich sind. Der letzte Stand der Technik ist ein Flächensensor mit 488 x 380 (Breite x Höhe) Bildpunkten, also mit etwa der halben Auflösung der von uns verwendeten 1"-Röhren-Kamera. Mit der Verwendung dieser Sensoren sind Probleme von Abbildungsfehlern aufgrund von Nichtlinearitäten der Ablenkung natürlich völlig behoben. Außerdem ist der elektronische Aufwand für Zeilenselektion und Scan-Betrieb sowie für die Durchmesser-messung beträchtlich geringer und der Störabstand dürfte nach Angaben der Hersteller größer als 60 dB sein.

Bei weiterer Erhöhung der Bildpunktzahl und bei geeigneter spektraler Empfindlichkeit der Elemente sind hier Ansatzpunkte für weitere elektronische Entwicklungen gegeben.

8. Zusammenfassung

Im Institut für Festkörperforschung der KFA Jülich werden für Materialuntersuchungen sowie zur Erforschung des Wachstumsprozesses hochperfekte Einkristalle aus Metallen, Nichtmetallen und deren Legierungen nach dem Czochralski-Verfahren hergestellt.

Es bestand die Aufgabe, ein System zu entwickeln, welches berührungslos während des Ziehprozesses die Messung der verschiedenen Wachstumsparameter gestattet, wie Kristalldurchmesser an der Phasengrenze, Meniskusform, Höhe der Phasengrenze über dem Schmelzenniveau, Temperatur am Kristall und in der Schmelze sowie die Temperaturverteilung, insbesondere in der Nähe der Phasengrenze.

Hierzu wurde eine Fernsehanlage zu einem Meßgerät weiterentwickelt, indem eine zeitliche und amplitudenmäßige Auswertung

des Video-Signals mit Hilfe einer umfangreichen analogen und digitalen Elektronik vorgenommen wird. Besonderer Wert wurde darauf gelegt, den Meßort (Phasengrenze) automatisch zu detektieren, eine amplitudenunabhängige Durchmesserbestimmung sicherzustellen sowie eine hohe lokale Auflösung bei der Temperaturmessung zu erreichen. Betriebsmäßig werden statistische Berechnungen wie Mittelwertbildung, Ermittlung von Standardabweichung und Vertrauensbereich zur Erhöhung der Meßgenauigkeit sowie zur ständigen Überwachung des Systems von einem Mikrorechner durchgeführt.

Das System ist als ein wesentlicher Bestandteil in die gesamte Ziehapparatur integriert und liefert einerseits eine Regelgröße für eine automatische Kristallzucht mit konstantem Durchmesser und andererseits Daten der Prozeßparameter an den Großrechner der KFA für weiterführende physikalisch-mathematische Untersuchungen.

Die systemcharakteristischen Eigenschaften sowie die Kriterien, die bei der Auswahl der Komponenten sowie bei der technischen Realisierung einiger Schaltungsdetails zu berücksichtigen waren, werden diskutiert. Die mit der Apparatur erzielten Ergebnisse werden vorgestellt.

9. Literaturhinweise

- /1/ Czochralski, J.: J. Phys. Chem. 92, 219 (1917)
- /2/ Kappler, E., Uelhoff, W., Fehmer, H., Abbink, F.:
Forschungsber. d. Landes NRW Nr. 2181, Westdeutscher
Verlag Opladen 1971
- /3/ Geist, D., Grosse, P.: Z. Angew. Phys. 14, 105 (1962)
- /4/ Uelhoff, W.: Dissertation Münster 1963
- /5/ Gilman, J.J.: The Art and Science of Growing Crystals
(Wiley, New York) 1963
- /6/ Uelhoff, W., in: Jül-Conf-18, Februar 1976, Dreiländer-
Jahrestagung
- /7/ Stut, H.: Deutsche Patentschrift 1231671 (Anmeldung
27. April 1962)
- /8/ Bachmann, K.J., Kirsch, H.J., Vetter, K.J.: J. Crystal
Growth 7, 290 (1970)
- /9/ O'Kane, D.F., Kwap, T.W., Gulitz, L., Bednowitz, A.L.:
J. Crystal Growth 13/14, 624 (1972)
- /10/ Kwap, T.W., O'Kane, D.F., Gulitz, L.: Temperature
Measurements with an Infrared Television System.
IBM-Res., 30. April 1971
- /11/ Gross, U., Kersten, R.: J. Crystal Growth 15, 85 (1972)
- /12/ Bardsley, W., Cockaney, B., et al.: J. Crystal Growth 16,
277 (1972)
- /13/ Bardsley, W., Cockaney, B., et al.: J. Crystal Growth 24/25,
369 (1974)
- /14/ Levinson, J.: US-Patent Nr. 290 8004 (1957)
- /15/ Gärtner, K.J., Rittinghaus, K.F., Seeger, A., Uelhoff, W.:
J. Crystal Growth 13/14, 619 (1972)
- /16/ Uelhoff, W., Gärtner, K.J.: Further Developments of the
TV-System for Controlling the Crystal Diameter and Surface
Temperature during Czochralski Growth. ICCG4-Int. Conf.
on Crystal Growth, 24.3.-29.3.1974, Tokyo

- /17/ Gärtner, K.J., Uelhoff, W.: Detecting the Solid-Liquid Interface in Television Controlled Czochralski Growth Systems. ICCG5-Int. Conf. on Crystal Growth, 17.7.-22.7.1977, MIT, Boston
- /18/ Schröter, F., Theile, R., Wendt, G.: Fernsehtechnik I, (Springer-Verlag) 1956
- /19/ In der Smitten, F.J.: Elektronische Fernsehtechnik (Institut f. Technische Elektronik, RWTH Aachen) 1971
- /20/ Valvo-Handbuch Kameraröhren, August 1978
- /21/ Valvo-Technische Informationen für die Industrie TI141: Plumbicon Kameraröhren
- /22/ Schwartz, E.: A.E.Ü. 4, 517-522 (1950)
- /23/ Lueg, H.: Grundlegende Systeme, Netzwerke und Schaltungen der Impulstechnik (Institut f. Technische Elektronik, RWTH Aachen) 1978
- /24/ van der Hart, A.W.A.: Dissertation Leiden (Holland) 1978
- /25/ Uelhoff, W., van der Hart, A.W.A., Fattah, A., Hanke, G., Jedamzik, D., Knook, B., van der Berg, G.J., Wenzl, H.: Bericht der Kernforschungsanlage Jülich, JÜL-1554, 1978
- /26/ Valvo-Technische Informationen für die Industrie, 770330: Optische Gesichtspunkte für den Einsatz von Kameraröhren
- /27/ Lang, H.: Farbmetik und Farbfernsehen (Verlag R. Oldenbourg) 1978
- /28/ Lohmann, A.: Optica Acta 6, 2, 175-185 (1959)
- /29/ Sproson, W.N.: RTM 6, 2 (1962)
- /30/ Technische Pflichtenhefte der Öffentlich-rechtlichen Rundfunkanstalten in der Bundesrepublik Deutschland: Pflichtenheft Nr. 8/4.3.1, Ausg. 3, 1975
- /31/ Valvo-Brief: Neue 1"- und 2/3"-Plumbicon-Kameraröhren. April 1979
- /32/ Siemens-Datenblatt XQ 1400
- /33/ Institut für Rundfunktechnik (IRT): "Fernsehringbuch" Testfiguren, August 1967

- /34/ Becker, H.: private Mitteilung
- /35/ Mefford, J.P.: Electronic Design, Juli 1980, S. 191-194
- /36/ Graeme, J.G.: Designing with Operational Amplifiers
(McGraw-Hill Book Company) 1977
- /37/ Graeme, J.G.: Applications of Operational Amplifiers
(Third Generation Techniques), (McGraw-Hill Book Company)
1973
- /38/ Arbel, A.F.: Analog Signal Processing and Instrumentation
(Cambridge University Press) 1980
- /39/ Burr-Brown: Datenbuch 1979
- /40/ Selt, W.: Entwicklung und Bau eines Video-Voltmeters.
Graduierungsarbeit Fachhochschule Aachen, Abt. Jülich, 1980
- /41/ Kaiser, R., Gottschalk, G.: Elementare Tests zur Beurteilung
von Meßdaten. B.I.-Hochschultaschenbücher, Band 774,
1972
- /42/ Lange, F.H.: Methoden der Meßstochastik (Verlag Vieweg) 1978
- /43/ Kleine Enzyklopädie Mathematik (Verlag Harri Deutsch,
Thun und Frankfurt/M) 1977
- /44/ Lüke, H.D.: Signalübertragung (Springer Verlag) 1979

Die vorliegende Arbeit entstand im Zentrallabor für Elektronik in enger Zusammenarbeit mit dem Institut für Festkörperforschung der Kernforschungsanlage Jülich im Rahmen gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungsvorhaben.

Allen, die zum Gelingen dieser Arbeit ihren Beitrag leisteten, möchte ich an dieser Stelle ganz herzlich danken.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. H. Lueg, Direktor des Instituts für Technische Elektronik der RWTH Aachen, für die vielfältigen, wertvollen Anregungen und Hilfen sowie für die mit großem persönlichen Interesse durchgeführte Betreuung der Arbeit.

Desgleichen danke ich sehr herzlich Herrn Professor Dr. K.A. Hempel, Direktor des Instituts für Werkstoffe der Elektrotechnik der RWTH Aachen, für die mit der Übernahme des Korreferates verbundenen Mühen.

Ein besonderer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. K.F. Rittinghaus, Leiter des Zentrallabors für Elektronik der KFA Jülich, für die Unterstützung dieser Arbeit sowie für die ständige Bereitschaft zu wertvollen Diskussionen und Ratschlägen.

Weiterhin gilt mein Dank Herrn Professor Dr. H. Wenzl, Direktor am Institut für Festkörperforschung der KFA Jülich, für die wohlwollende Förderung meiner Arbeit.

Bei Herrn Dr. W. Uelhoff möchte ich mich ganz besonders bedanken für die vielen aus seinen fundierten experimentellen Erfahrungen mit der Kristallzüchtungsapparatur gewonnenen Vorschläge, die in unzähligen, stets freundschaftlich geführten Diskussionen zu konkreten elektronischen Realisierungsmöglichkeiten führten.

Des weiteren bedanke ich mich herzlich bei Herrn Dr. A.W.A. van der Hart, der die Möglichkeiten des Meßsystems im Rahmen seiner Arbeiten zu einem Wachstumsmodell erstmals voll ausschöpfte und dadurch wertvolle Verbesserungshinweise geben konnte.

Für viele wertvolle Gespräche über den Einsatz und die Entwicklungstendenzen von Kameraröhren möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. H. Becker, Mitarbeiter der Firma Valvo, Hamburg, Abteilung Spezialröhren, bedanken.

Ein ganz besonderern Dank gilt meinen engsten Mitarbeitern und Freunden, Herrn P. Drechsler und Herrn H. Meier für ihre unermüdliche und ideenreiche Hilfe bei der Erstellung der Software und Hardware sowie Herrn H.P. Wegener für die Mithilfe im Rahmen der Graduierungsarbeit von Herrn W. Selt.

Den Kollegen und Mitarbeitern des Zentrallabors für Elektronik und des Instituts für Festkörperforschung, die beim Aufbau, bei der Erstellung des Manuskripts und der Unterlagen sowie bei der Durchführung der vielen Experimente mithalfen, gilt ebenso mein herzlichster Dank.

Klaus-Jürgen Gärtner

