

BAYERISCHE AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
MATHEMATISCH-NATURWISSENSCHAFTLICHE KLASSE

ABHANDLUNGEN · NEUE FOLGE, HEFT 128

AUGUST KAROLUS UND JOSEF HELMBERGER

Messung der Lichtgeschwindigkeit
auf der 48-m-Basis des DGF1
in München

Mit 22 Abbildungen im Text,
6 Abbildungen auf Tafeln und 9 Tabellen

Vorgelegt von Herrn Max Kneißl
am 10. Dezember 1965

MÜNCHEN 1967

VERLAG DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN
IN KOMMISSION BEI DER C.H.BECK'SCHEN VERLAGSBUCHHANDLUNG MÜNCHEN

Druck der C. H. Beck'schen Buchdruckerei Nördlingen
Printed in Germany

INHALT

I. <i>Einleitung</i>	5
II. <i>Das Meßverfahren</i>	6
1. Die Bestimmung von c_L	6
2. Die Berechnung von c_0	8
III. <i>Der Meßaufbau</i>	11
1. Die Lichtquelle und ihre Stromversorgung	11
2. Der Lichtmodulator	12
3. Sende- und Empfangsoptik	13
4. Der Photomultiplier	15
a) Elektronenlaufzeit und Laufzeitstreuung	15
b) Örtliche Empfindlichkeit der Photokathode	16
c) Der Photoempfänger	17
5. Der Amplituden- und der Phasenabgleich	18
6. Die Meßfrequenz	21
7. Die Meßstrecke	22
a) Der Streckenaufbau	22
b) Die Basismessung	25
8. Die meteorologischen Daten	26
IV. <i>Fehlerquellen und ihr Einfluß auf das Meßergebnis</i>	28
1. Empfindlichkeit des Phasenabgleiches	28
2. Fehler in Frequenzbestimmung, Streckenmessung und Lichtführung	33
a) Frequenz 33, b) Streckenmessung 34, c) Lichtführung 38	
3. Fehler in der Ermittlung der meteorologischen Daten	39
4. Statistische Fehler durch Laufzeitstreuung und Phasenstruktur	40
a) Die Laufzeitstreuung des Photomultipliers 40, b) Die Phasenstruktur des modulierten Lichtes	41
5. Unsicherheit einer Meßreihe	42
V. <i>Die Messungen</i>	43
1. Ablauf einer Messung	43
2. Meßprotokoll und Auswertung	45
3. Zusammenstellung der Messungen	49
a) Meßgruppen	49
b) Meßreihen	51
VI. <i>Das Ergebnis</i>	70
1. Untersuchung systematischer Einflüsse	70
a) Die Phasenstruktur des modulierten Lichtes	70

b) Laufzeitstreuung des Photomultipliers	80
c) Divergentes Licht	83
2. Verteilung der Meßwerte	87
a) Übersicht	87
b) Mittlere Streuung	87
3. Meßergebnis	90
4. Grenzen der Meßgenauigkeit und mögliche Wege für eine Verkleinerung der Unsicherheit	90
VII. <i>Zusammenfassung</i>	94
VIII. <i>Literaturverzeichnis</i>	96
<i>Anhang</i> : Der Einfluß divergenten Lichtes (Rechnung)	97

I. EINLEITUNG

Präzisionsmessungen der Lichtgeschwindigkeit mit sichtbarem Licht sind in den letzten Jahren meist auf Strecken von mehreren Kilometern ausgeführt worden, weil auf langen Wegen bei gleicher relativer Meßgenauigkeit größere Absolutfehler in der Bestimmung der Laufzeit des Lichtes zugelassen werden dürfen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit elektromagnetischer Wellen in Luft hängt ab von der Temperatur, vom Luftdruck und von der Luftfeuchtigkeit. Sie ändert sich weiterhin mit der Trägerfrequenz, bei optischen Messungen also mit der Lichtfarbe. Alle diese Daten müssen während der c -Messung hinreichend genau bekannt sein.

Auf einer nur 48 m langen Basis sind die meteorologischen Werte einfach zu bestimmen. Die Lichtverluste auf der Meßstrecke durch Absorption und durch Streuung sind klein; es ist deshalb möglich, aus dem Spektrum einer Lichtquelle einen sehr schmalen Bereich auszufiltern. Die Basislänge kann mit Hilfe eines Interferenzkomparators nach VÄISÄLÄ gemessen werden; die dabei erreichbare Genauigkeit liegt bei $1 : 10^7$.

In der hier verwendeten Anordnung durchläuft das Licht zweimal eine Basis von 48 m, die in einem temperaturstabilen Kellerraum liegt. Temperatur, Druck und Feuchtigkeit werden unmittelbar vor und nach jeder Meßreihe mit der erforderlichen Genauigkeit bestimmt. Die Anforderungen an den Meßaufbau sind hoch: Soll c_0 mit einer relativen Genauigkeit von $1 : 10^6$ gemessen werden, so beträgt der zulässige Fehler in der Bestimmung der Laufzeit $3,2 \cdot 10^{-13}$ s.

Über den grundsätzlichen Versuchsaufbau und über einen Teil der auftretenden Schwierigkeiten ist bereits früher berichtet worden [1]. Erste Messungen über eine 9 m-Basis sind in [2] beschrieben. Ihnen schlossen sich im Herbst 1960 einige Versuchsmessungen über 37,5 m im Meßkeller des DGFI in München an [3]. Hierauf wurde der Meßaufbau weitgehend umgestaltet und der 48 m-Basis angepaßt. Mit zunehmender Stabilität traten neue Fehlereinflüsse hervor, die früher in den Schwankungen der Meßresultate untergegangen waren und die festgestellt und auf einen zulässigen Betrag herabgesetzt werden mußten. Messungen im Frühjahr 1961 und, nach weiteren Umbauten, im Februar 1962 dienten diesem Vorhaben [3, 4, 5]. Der Lichtmodulator wurde näher untersucht und verbessert [4, 6], doch scheiterten die Messungen 1962 an Fehlern der verwendeten Planspiegel.

Im Juni 1963 konnten die c -Bestimmungen am DGFI in München wieder aufgenommen werden. Jetzt war es möglich, die Fehlereinflüsse der wichtigsten Bauelemente systematisch zu untersuchen und die von ihnen ausgehenden Verfälschungen des Meßergebnisses festzustellen. Die vorliegende Arbeit gibt eine Übersicht über Meßmethode und Meßaufbau und beschäftigt sich dann hauptsächlich mit den Ergebnissen dieser letzten Messungen.

II. DAS MESSVERFAHREN

1. DIE BESTIMMUNG VON c_L

Bild 1 zeigt den grundsätzlichen Meßaufbau. Ein in seiner Intensität sinusförmig modulierte Lichtbündel wird an einer halbdurchlässigen Spiegelfläche in zwei Teilbündel aufgespalten. Das „Meßlicht“ \mathfrak{M} durchläuft den Weg s_{M1} (Meßweg), das „Vergleichslicht“ \mathfrak{B} die Strecke s_{V1} (Vergleichsweg). Anschließend treffen die Lichtbündel auf einer Opalglas-scheibe wieder zusammen und fallen gemeinsam auf die Kathode eines Photomultipliers.

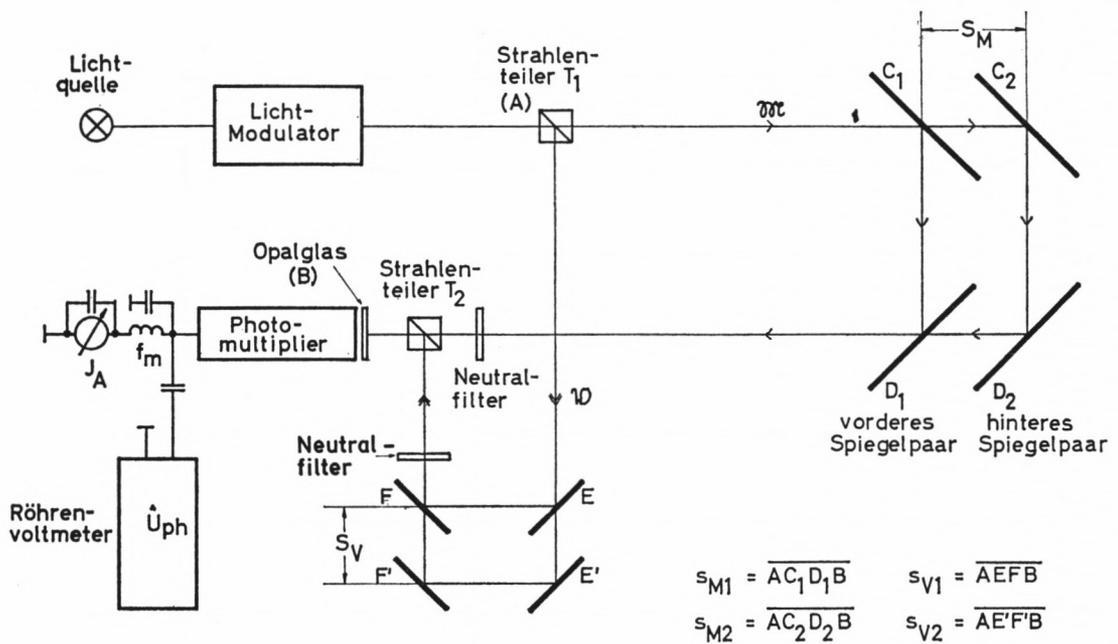


Bild 1: Grundsätzlicher Meßaufbau

Für die folgenden Überlegungen sind die zeitunabhängigen Anteile der beiden Teilbündel, sowie etwa enthaltene nicht mit f_m modulierte Anteile, ohne Bedeutung. Sie werden daher weggelassen.

Sind \mathfrak{M} und \mathfrak{B} am Strahlenteiler T_1 (A) streng gleichphasig

$$\mathfrak{M}(A) = \hat{M}(A) \sin \omega_m t$$

$$\mathfrak{B}(A) = \hat{V}(A) \sin \omega_m t$$

$$\begin{aligned}\hat{M} &= \text{Amplitude der Meßlicht-Intensität} \\ \hat{V} &= \text{Amplitude der Vergleichslicht-Intensität} \\ f_m &= \text{Modulationsfrequenz} \quad \omega_m = 2\pi \cdot f_m\end{aligned}$$

so weisen sie an der Opalglasscheibe (B) eine vom durchlaufenen optischen Weg abhängige Modulationsphase auf:

$$\begin{aligned}\mathfrak{M}(B) &= \hat{M}(B) \sin(\omega_m t - \varphi_M) \\ \mathfrak{B}(B) &= \hat{V}(B) \sin(\omega_m t - \varphi_V) \\ \varphi_M &= 2\pi \frac{s_{M1}}{\lambda_m} \quad \varphi_V = 2\pi \frac{s_{V1}}{\lambda_m} \quad \varphi_M - \varphi_V = \varphi \\ \lambda_m &= \text{Modulationswellenlänge auf dem Lichtweg}\end{aligned}$$

Mit Neutralfiltern im Meß- und im Vergleichsweg werden $\hat{M}(B)$ und $\hat{V}(B)$ gleich groß gemacht („Amplitudenabgleich“). Der zur Summe $[\mathfrak{M}(B) + \mathfrak{B}(B)]$ proportionale Anodenwechselstrom des Photomultipliers wird dann

$$J_{ph} = J_o \cdot \cos \frac{\varphi}{2} \cdot \sin \left(\omega_m t - \frac{\varphi_M + \varphi_V}{2} \right).$$

Er ruft am Resonanzkreis zwischen der Anode des Photomultipliers und Erde eine Spannung

$$U_{ph} = J_{ph} \cdot R_{Res}$$

hervor, deren Amplitude

$$\hat{U}_{ph} = U_o \cdot \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right| = J_o \cdot R_{Res} \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right|$$

mit einem Röhrenvoltmeter gemessen wird. Diese Spannung verschwindet, wenn

$$\begin{aligned}\varphi &= (2n_1 + 1)\pi \quad n_1 = 0, 1, 2, \dots \\ s_{M1} - s_{V1} &= (2n_1 + 1) \cdot \frac{\lambda_m}{2} \quad (\text{„Phasenabgleich“})\end{aligned}$$

Bei Anwesenheit von nicht frequenzgleichen Fremdspannungen (z. B. Rauschen) und bei unvollständigem Amplitudenabgleich geht die gemessene Spannung nicht auf Null zurück, zeigt aber bei kleinen Restspannungen ein eindeutiges Minimum.

Hat man ein solches Minimum aufgesucht, so kann bei bekanntem s_{M1} , s_{V1} und n_1 die Modulationswellenlänge auf dem Lichtweg λ_m berechnet werden. Aus einer gleichzeitigen Frequenzmessung erhält man die Modulationsfrequenz f_m . Die Gruppengeschwindigkeit des Lichtes auf dem Lichtweg ergibt sich dann aus

$$c_L = \lambda_m \cdot f_m.$$

Da die genauen Längen von s_{M1} und s_{V1} nur schwer erfaßt werden können, ermittelt man λ_m einfacher aus zwei nacheinander vorgenommenen Messungen mit unterschiedlichem n :

$$s_{M1} - s_{V1} = (2n_1 + 1) \frac{\lambda_m}{2} \quad (\text{Messung 1})$$

$$s_{M2} - s_{V2} = (2n_2 + 1) \frac{\lambda_m}{2} \quad (\text{Messung 2})$$

$$\lambda_m = \frac{(s_{M2} - s_{M1}) - (s_{V2} - s_{V1})}{(n_2 - n_1)}$$

Mit

$$n_2 - n_1 = N \quad s_{M2} - s_{M1} = 2 S_M$$

$$s_{V2} - s_{V1} = 2 S_V$$

wird

$$\lambda_m = \frac{2(S_M - S_V)}{N}$$

Die „Meßstrecke“ S_M ist eine Basis mit genau bekannter Länge. Mit Hilfe von s_{V1} und s_{V2} wird bei beiden Messungen der Phasenabgleich, also die genaue Einstellung des Minimums von \hat{U}_{ph} , vorgenommen. Die Größe der Strecke S_V ergibt sich dann aus der Differenz zweier Spiegelstellungen.

N , die „Ordnung“ der Messung, erhält man am einfachsten aus

$$N = \frac{2 S_M \cdot f_m}{c_L}$$

mit $c_L \approx 300000$ km/s (bis $N = 500$ zulässig) durch Abrunden auf die nächste ganze Zahl.

Somit wird

$$c_L = \frac{2}{N} \cdot f_m (S_M - S_V).$$

Das hier skizzierte Verfahren der Phasenmessung, die vektorielle Addition zweier hochfrequent modulierter Lichtströme, geht auf C. W. ANDERSON zurück, der es 1936–1941 erstmals zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit verwendet hat. [12, 13]

2. DIE BERECHNUNG VON c_0

Die dem annähernd monochromatischen Lichtbündel aufgeprägte Intensitätsmodulation durchläuft den Lichtweg mit der Gruppengeschwindigkeit c_L :

$$c_L = \frac{d\omega}{dk} = v_L - \lambda_L \frac{dv_L}{d\lambda_L} \quad [7]$$

Mit

$$\omega = 2\pi \cdot \nu \quad k = \frac{2\pi}{\lambda_L} \quad n_L = \frac{c_0}{v_L} = \frac{\lambda_0}{\lambda_L}$$

$$\nu = \text{Lichtfrequenz} \quad \lambda_L = \text{Lichtwellenlänge in Luft}$$

$$v_L = \text{Phasengeschwindigkeit des Lichtes in Luft} \quad \lambda_0 = \text{Lichtwellenlänge in Vakuum}$$

ergibt sich hieraus die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit c_0 zu

$$c_0 = c_L \cdot n_g \quad \text{wobei } n_g = n_L - \lambda_0 \frac{dn_L}{d\lambda_0}$$

Die Brechzahl n_L hängt ab von der Temperatur der Luft, dem Luftdruck und der Luftfeuchtigkeit [8]:

$$(n_L - 1) = \frac{(n_L^0 - 1) (1 + 15\alpha) \cdot \frac{p}{760} - 55 \cdot e \cdot 10^{-9}}{1 + \alpha \vartheta_m}$$

$$\begin{aligned} \alpha &= 0,00367 \text{ je } ^\circ\text{C} & \vartheta_m &= \text{Temperatur in } ^\circ\text{C} \\ & & p &= \text{Barometerstand in Torr} \\ & & e &= \text{Luftfeuchtigkeit in Torr} \end{aligned}$$

$$n_L^0 = n_L \text{ bei } 15^\circ\text{C, } 760 \text{ Torr und } 0,03 \text{ Volumprozenten } \text{CO}_2.$$

Sie ist wegen der in Luft auftretenden Dispersion darüber hinaus eine Funktion der Lichtwellenlänge λ_0 . Für diese Abhängigkeit sind von verschiedenen Autoren z. T. etwas abweichende Beziehungen angegeben worden. (Eine Zusammenstellung findet sich bei H. MECKENSTOCK [9].)

Die Joint Commission for Spectroscopy empfahl 1952 in Rom die Dispersionsformel von EDLEN [8] (λ_0 in μm)

$$(n_L^0 - 1) = A + \frac{B}{D - \lambda_0^{-2}} + \frac{C}{E - \lambda_0^{-2}}$$

mit

$$\begin{aligned} A &= 64,328 \cdot 10^{-6} \\ B &= 29498,10 \cdot 10^{-6} \\ C &= 255,40 \cdot 10^{-6} \\ D &= 146 \\ E &= 41 \end{aligned}$$

Diese Beziehung gilt für $\lambda_0 = 0,2 \mu\text{m} \dots 13,5 \mu\text{m}$, ist also nicht auf das sichtbare Spektrum begrenzt. Sie gilt insbesondere auch für $\lambda_0 < 0,5 \mu\text{m}$. Entwickelt man sie nach Potenzen von λ_0^{-2} , so erhält man

$$\begin{aligned} (n_L^0 - 1) &= A + \sum_{\nu=0}^{\infty} \lambda_0^{-2\nu} \left[\frac{B}{D^{\nu+1}} + \frac{C}{E^{\nu+1}} \right] \\ &\approx \left[A + \frac{B}{D} + \frac{C}{E} \right] + \lambda_0^{-2} \left[\frac{B}{D^2} + \frac{C}{E^2} \right] + \lambda_0^{-4} \left[\frac{B}{D^3} + \frac{C}{E^3} \right] + \lambda_0^{-6} \left[\frac{B}{D^4} + \frac{C}{E^4} \right] \end{aligned}$$

$$(n_L^0 - 1) \cdot 10^6 \approx 272,599 + \lambda_0^{-2} 1,5358 + \lambda_0^{-4} 0,01318 + \lambda_0^{-6} 0,0001553$$

Die Reihe konvergiert, wenn $\frac{1}{D\lambda_0^2} < 1$ und $\frac{1}{E\lambda_0^2} < 1$, was für $\lambda_0 = 0,2 \mu\text{m} \dots 13,5 \mu\text{m}$ stets erfüllt ist.

Entsprechend gilt für n_g :

$$(n_g - 1) = \frac{(n_L^0 - 1) (1 + 15\alpha) \frac{p}{760} - 55 \cdot e \cdot 10^{-9}}{1 + \alpha \vartheta_m}$$

wobei $n_g^0 = n_g$ bei 15° C, 760 Torr und 0,03 Volumprozenten CO₂ nur noch über die Dispersionsgleichung von λ_0 abhängt, und zwar:

Mit der EDLEN-Beziehung:

$$(n_g^0 - 1) = A + \lambda_0^2 \left\{ B \left[\frac{1}{(D\lambda_0^2 - 1)} + \frac{2}{(D\lambda_0^2 - 1)^2} \right] + C \left[\frac{1}{(E\lambda_0^2 - 1)} + \frac{2}{(E\lambda_0^2 - 1)^2} \right] \right\}$$

oder etwas bequemer aus ihrer Reihenentwicklung:

$$(n_g^0 - 1) \approx \left[A + \frac{B}{D} + \frac{C}{E} \right] + 3\lambda_0^{-2} \left[\frac{B}{D^2} + \frac{C}{E^2} \right] + 5\lambda_0^{-4} \left[\frac{B}{D^3} + \frac{C}{E^3} \right] + 7\lambda_0^{-6} \left[\frac{B}{D^4} + \frac{C}{E^4} \right]$$

$$(n_g^0 - 1) \cdot 10^6 \approx 272,599 + \lambda_0^{-2} \cdot 4,6074 + \lambda_0^{-4} \cdot 0,06590 + \lambda_0^{-6} \cdot 0,001087$$

Häufig wird zur Bestimmung der Brechzahlen n_L^0 und n_g^0 auch die Dispersionsformel von BARREL und SEARS benutzt: (λ_0 in μm)

$$(n_L^0 - 1) \cdot 10^6 = 272,585 + \lambda_0^{-2} \cdot 1,5437 + \lambda_0^{-4} \cdot 0,01293 \quad [9]$$

$$(n_g^0 - 1) \cdot 10^6 = 272,585 + \lambda_0^{-2} \cdot 4,6311 + \lambda_0^{-4} \cdot 0,06465$$

In Tabelle 1 sind für $\lambda_0 = 0,435 \mu\text{m}$ und für $\lambda_0 = 0,546 \mu\text{m}$ die $(n_g^0 - 1)$ -Werte nach der EDLEN-Gleichung und nach der BARREL-SEARS-Beziehung berechnet und zusammengestellt. Die Abweichungen liegen für $\lambda_0 = 0,546 \mu\text{m}$ unter $1 \cdot 10^{-8}$. Sie erreichen bei $\lambda_0 = 0,435 \mu\text{m}$ $1,06 \cdot 10^{-7}$.

Tabelle 1

$(n_g^0 - 1) \cdot 10^4$ aus	$\lambda_0 = 0,435 \mu\text{m}$	$\lambda_0 = 0,546 \mu\text{m}$
EDLEN-Gleichung	2,989 706	2,888 400
Reihenentw. [4 Glieder]	2,989 487	2,888 366
BARREL-SEARS-Gleichung	2,988 646	2,888 470

Bei der Auswertung der Meßergebnisse wurde ausschließlich die Dispersionsbeziehung nach EDLEN benutzt. Die Brechzahl n_g ergibt sich dann aus

$$(n_g - 1) = \frac{Z \cdot p [\text{Torr}] - 55 \cdot 10^{-9} \cdot e [\text{Torr}]}{1 + 0,00367 \cdot \vartheta_m [^\circ\text{C}]}$$

mit $Z = (n_g^0 - 1) \cdot \frac{1 + 15 \cdot 0,00367}{760} = (n_g^0 - 1) \cdot 1,388 223 \cdot 10^{-3}$

$$Z(\lambda_0 = 0,435 \mu\text{m}) = 0,415 038 \cdot 10^{-6}$$

$$Z(\lambda_0 = 0,546 \mu\text{m}) = 0,400 974 \cdot 10^{-6}$$

Die beiden Kollimatorlinsen K_1 und K_2 (Bild 2) bilden das Lichtgitter auf den Spalt Δ ($0,13 \times 0,10$ mm, oder $0,13 \times 0,12$ mm) ab. Zwischen ihnen liegt ein Interferenzfilter für die Lichtwellenlänge $0,472$ nm oder $0,476$ nm. Zur Kontrolle kann zusätzlich ein Planspiegel unter 45° in den telezentrischen Strahlengang gebracht werden, der auf einem weiter entfernten Schirm ein Bild der Lichtgitter erzeugt und Helligkeitsverteilungen und „Sprünge“ des Bogens sofort sichtbar macht. Da während des Betriebes vor allem Teile der dünnen Kathodenlampe am Ende ihrer Lebensdauer solche Instabilitäten zeigen, ist dann für Messungen nicht mehr verwendbar.

III. DER MESSAUFBAU

1. DIE LICHTQUELLE UND IHRE STROMVERSORGUNG

Lichtquelle ist der Bogen einer Quecksilber-Höchstdrucklampe OSRAM HBO 100W/2. Seine leuchtende Fläche ($0,25 \times 0,25$ mm) erreicht nach Angaben der Herstellerfirma eine mittlere Leuchtdichte von 170000 cd/cm^2 . Die Entladung wird durch einen hochfrequenten Spannungsstoß von ca. 25 kV eingeleitet.

Ein elektronisch stabilisiertes Netzgerät versorgt die Lampe über eine Siebkette und einen Vorwiderstand von $5 \dots 12 \Omega$ mit Gleichspannung. Lampenspannung U_L ($17 \dots 25 \text{ V}$) und Lampenstrom J_L ($6 \dots 4 \text{ A}$) werden ständig gemessen. Durch Ändern von U_L läßt sich die Nennleistung $N_L = U_L \cdot J_L$ einstellen.

Die Lampe selbst wird von zwei Klemmbacken gehalten, über die der Lampenstrom fließt. Sie ist in einem Brenngehäuse untergebracht und kann mit diesem senkrecht und waagrecht verschoben werden.

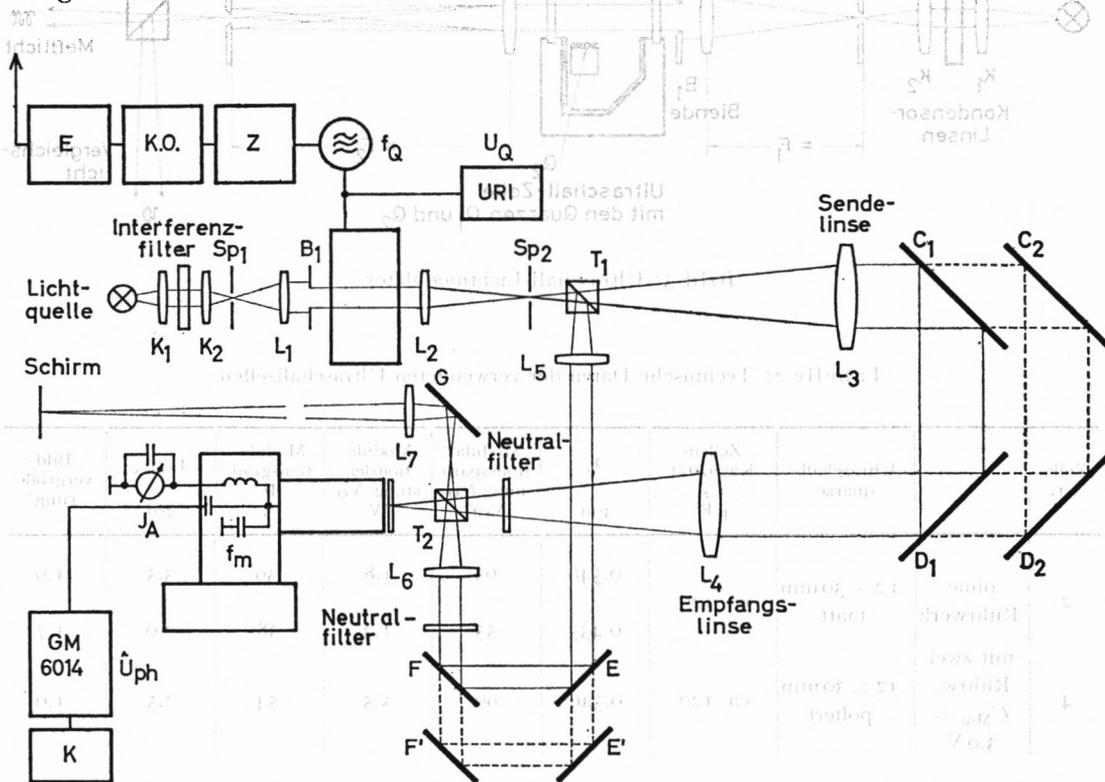


Bild 2: Messung der Lichtgeschwindigkeit

Die beiden Kollimatorlinsen K_1 und K_2 (Bild 2) bilden den Lichtbogen auf den Spalt Sp_1 ($0,13 \times 0,10$ mm, oder $0,13 \times 0,15$ mm) ab. Zwischen ihnen liegt ein Interferenzfilter für die Lichtwellenlänge $0,435 \mu\text{m}$ oder $0,546 \mu\text{m}$. Zur Kontrolle kann zusätzlich ein Planspiegel unter 45° in den telezentrischen Strahlengang gebracht werden, der auf einem weiter entfernten Schirm ein Bild der Lichtquelle entwirft und Helligkeitsschwankungen und „Sprünge“ des Bogens sofort sichtbar macht. Da während des Betriebes vor allem Teile der dünnen Kathodenspitze verdampfen, zeigt jede Lampe am Ende ihrer Lebensdauer solche Instabilitäten. Sie ist dann für Messungen nicht mehr verwendbar.

2. DER LICHTMODULATOR (Bild 3)

Der annähernd monochromatisch ausgeleuchtete Spalt Sp_1 bildet mit dem Objektiv L_1 (Brennweite $F_1 = 75$ mm) eine Einheit. Von der kreisförmigen Blende B_1 auf einen Durchmesser $D_1 \approx 10$ mm begrenzt, gelangt das nahezu achsenparallele Lichtbündel in die

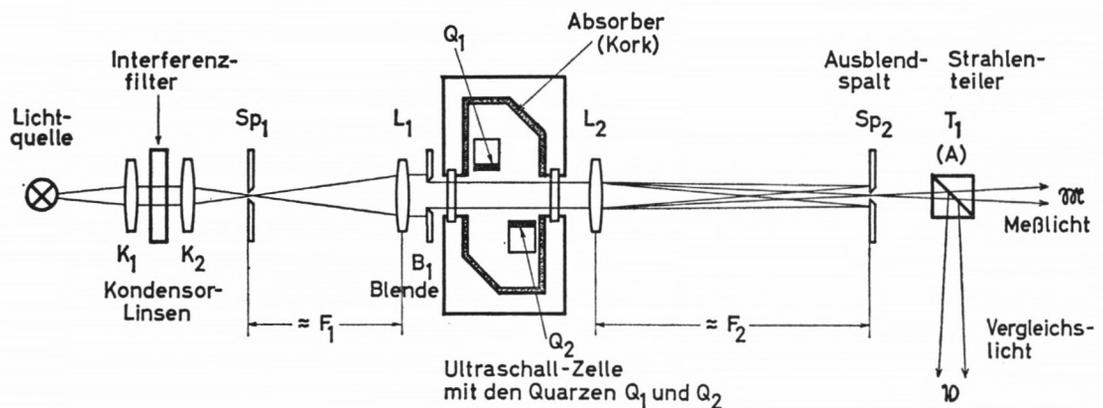


Bild 3: Ultraschall-Lichtmodulator

Tabelle 2: Technische Daten der verwendeten Ultraschallzellen

Zelle Nr.		Ultraschall-quarze	Zellen-Kapazität C_z pF	λ_0 μm	Modulationsspannung U_Q Veff	Modulationsleistung N_Q W	Modulationsgrad M %	$\Delta \varphi_{\text{max}}$ grd	Bildvergrößerung*
2	ohne Rührwerk	12×30 mm matt	ca. 120	0,546	65	1,8	39	3,5	1,9
				0,435	55	1,3	38	2,0	1,7
4	mit zwei Rührw. $U_{\text{Mot}} = 3,0$ V	12×30 mm poliert	ca. 120	0,546	90	5,5	54	2,5	1,0

Zellenfüllung: Paraffinöl

Quarzaufgabe: in beiden Fällen seitlich

$f_Q = 9,36$ MHz

* $a =$ Höhe der Ausleuchtung auf Sp_2

„Bildvergrößerung“ $= \frac{a(U_Q \neq 0)}{a(U_Q = 0)}$

Ultraschallzelle, durchläuft die beiden Schallwellen und fällt über L_2 (Brennweite $F_2 = 135$ mm) auf den Ausblendspalt Sp_2 , den es bei angelegter Spannung U_Q intensitätsmoduliert verläßt.

Die Wirkungsweise des Ultraschall-Lichtmodulators ist in [6] eingehend dargestellt worden. Tabelle 2 enthält die technischen Daten der hier verwendeten Zellen.

Die an den Quarzen liegende Spannung U_Q wird von einem Röhrevoltmeter angezeigt. Ein elektronisch stabilisiertes Netzgerät speist die Heizwicklungen der Zelle mit einer Gleichspannung von 9 . . . 12 V.

3. SENDE- UND EMPFANGSOPTIK

Das Meßlicht \mathfrak{M} durchläuft den auf Bild 2 eingezeichneten Strahlenteiler T_1 , der aus zwei zu einem Würfel verkitteten Dreiecksprismen besteht, und trifft dann auf die Sendelinse L_3 (Brennweite F_3). Das Lichtbündel hat beim Austritt einen Durchmesser

$$D_3 = D_1 \cdot \frac{F_3}{F_2}.$$

Bei telezentrischer Abbildung von Sp_2 wächst der Durchmesser bis zum Eintritt in die Empfangslinse L_4 auf

$$D_4 = D_3 + a \cdot \frac{s}{F_3}$$

a = Größe der Ausleuchtung auf Sp_2

s = Lichtweg zwischen Sendelinse und Empfangslinse

D_4 muß kleiner bleiben als die freie Öffnung D_4^* von L_4 , da sonst das Lichtbündel an der Empfangslinse beschnitten wird, was zu erheblichen Meßfehlern führen kann.

Die Höhe der Ausleuchtung auf Sp_2 ist nicht allein durch die Höhe des Spaltes Sp_1 und durch das Verhältnis der Brennweiten F_2/F_1 festgelegt. In der Ultraschallzelle entstehen im stationären Betrieb Wärmeschlieren, die eine zusätzliche Vergrößerung von a hervorrufen können [6]. Diese hängt vom Aufbau der Zelle, von der Zellenfüllung und von der an den Ultraschallquarzen liegenden Wechselspannung U_Q ab. Sie wurde in Tabelle 2 als „Bildvergrößerung“ eingetragen.

Die Linse L_4 entwirft im Abstand ihrer Brennweite F_4 ein Bild des Ausblendspaltes. Die Bildvergrößerung beträgt

$$V_{3-4} = \frac{F_4}{F_3}$$

und liegt je nach Wahl der Objektive zwischen 1 und 2.

In Tabelle 3 sind die verwendeten Objektive, Spalthöhen und Aperturblenden zusammengestellt und die sich daraus ergebenden Ausleuchtungen und Bildgrößen berechnet.

Eine zweite Abbildung von Sp_2 erhält man über das Vergleichslicht \mathfrak{B} . Der an T_1 reflektierte Anteil des modulierten Lichtes, etwa die Hälfte des ursprünglichen Lichtstroms, trifft auf L_5 und wird als nahezu achsenparalleles Strahlenbündel an den Planspiegeln E und F reflektiert. Diese Planspiegel sind auf einem Drehbanksupport befestigt, dessen jeweilige Schlittenstellung an einer Meßuhr abzulesen ist. Der Schlitten wird mit Hilfe der Support-Spindel genau in Lichtrichtung bewegt. Auf ihm kann das Spiegelpaar $E-F$ zu-

Tabelle 3: Übersicht über die Ausleuchtung von Sende- und Empfangslinse

Sendelinse L_3		Empfangslinse L_4		Spalthöhe $S\phi_1$ [mm]	Apertur- blende D_1 [mm]	Lichtfarbe	Höhe der Ausleuchtung auf $S\phi_2$ a [mm]	Höhe der Ausleuchtung		Bildhöhe auf der Streuscheibe a' [mm]	Bemerkungen
F_3 [mm]	D_3^* [mm]	F_4 [mm]	D_4^* [mm]					D_3 [mm]	D_4 [mm]		
700	140	950	140	0,10	10	grün	0,34	52	101	0,46	G 4, G 5
1000	100	950	140	0,10	10	grün	0,34	74	108	0,32	G 0-G 3
1000	100	950	140	0,15	10	grün	0,51	74	126	0,49	G 6, G 8-G 15, G 23, G 24, G 28
1000	100	950	140	0,15	10	blau	0,46	74	120	0,44	G 7, G 16-G 18, G 25 (ohne M 145)
1000	100	950	140	0,15	9	grün	0,51	67	119	0,49	M 145
1000	100	2000	200	0,15	10	grün	0,51	74	125	1,02	G 21, G 22, G 27 b
1000	100	2000	200	0,15	10	blau	0,46	74	120	0,92	G 19, G 20, G 26
2000	200	2000	200	0,15	9	grün	0,51	133	184	0,51	G 29-G 35
1000	100	950	140	0,15	10	grün	0,27	74	101	0,26	G 36, G 37

D_3^*, D_4^* = Freie Öffnungen der Linsen

F_3, F_4 = Brennweiten der Linsen

sätzlich um einen genau festgelegten Betrag $w \approx 30$ mm ebenfalls in Lichtrichtung durch einen Schwenkhebel verschoben werden. Bei einer Einstellung des Supports, also bei festem s_V , sind daher stets zwei verschiedene Längen des Vergleichsweges, nämlich $(s_V + w)$ und $(s_V - w)$ zugänglich.

Die Linse L_6 entwirft über den Strahlenteiler T_2 oder über einen Planspiegel G ein Bild des Spaltes Sp_2 . Verschiebt man das Spiegelpaar $E-F$, so ändert sich bei richtiger Justierung weder Lage noch Größe des Bildes.

Die Vergrößerung bei dieser Abbildung ist

$$V_{5-6} = \frac{F_6}{F_5} \approx 1.$$

Auf Bild 5 sind die Aufbauten des Vergleichsweges zu erkennen.

4. DER PHOTOMULTIPLIER

Das intensitätsmodulierte Licht aus Meß- und Vergleichsweg fällt auf die Kathode eines Photomultipliers RCA 7326 und löst dort eine der jeweiligen Intensität proportionale Anzahl von Elektronen aus. An 10 Dynoden wird dieser Kathodenstrom durch Sekundäremission 10^4 -fach verstärkt. Der an der Anode auftretende Gleichstrom darf 1 mA nicht überschreiten.

a) Elektronenlaufzeit und Laufzeitstreuung

Um von der Photokathode zur Anode zu gelangen, benötigen die Elektronen einige 10^{-8} s. Dies entspricht einem Lichtweg in Luft von ca. 10 m. Bei mehreren Photomultipliern des gleichen Typs fällt diese Strecke wegen der Herstellungstoleranzen i. a. verschieden lang aus; sie hängt ferner von den jeweiligen Elektrodenspannungen ab und schwankt mit diesen.

Die ANDERSON'sche Meßanordnung [12, 13] hat den Vorteil, daß die vom Meßlicht und die vom Vergleichslicht ausgelösten Elektronen im selben Photomultiplier den gleichen Weg zurücklegen; beide Elektronenströme fließen sogar gleichzeitig. Die Elektronenlaufzeit selbst geht daher nicht in das Meßergebnis ein. Selbst Schwankungen der Elektrodenspannungen wirken zunächst gleichartig auf beide Wege. Treten dagegen an zwei räumlich getrennten Stellen der Photokathode gleichzeitig Elektronen aus, so haben diese i. a. verschieden lange Wege zu durchlaufen, bis sie die erste Dynode erreichen und bis sie über die weiteren Vervielfacherstufen schließlich zur Anode gelangen. Bei im Mittel gleicher Geschwindigkeit kommen sie zu verschiedenen Zeiten auf der Anode an: Die Laufzeit von Elektronen, die an unterschiedlichen Stellen der Kathode ausgelöst werden, „stret“. Die Größe der Laufzeitstreuung ist vom geometrischen Aufbau des Photomultipliers und vom elektrischen Feld zwischen den Elektroden abhängig.

Für den Typ RCA 7326 beträgt der Laufzeitunterschied laut Datenblatt höchstens $1 \cdot 10^{-9}$ s, sofern die Elektronen im Zentrum der Kathode innerhalb eines Kreises von $1,12''$ ($\approx 2,84$ cm) Durchmesser ausgelöst werden. Die Lichtgeschwindigkeit wird aus je einer Messung der Laufzeit zum fernen und zum nahen Umkehrspiegelpaar bestimmt. Ist der „zusätzliche Lichtweg“ durch Laufzeitstreuung in beiden Fällen genau gleich, so geht er nicht in die Differenz $s_{M2} - s_{M1} = 2 S_M$ ein. Fällt das Meßlicht aber bei den zwei aufeinanderfolgenden Messungen auf verschiedene Stellen der Photokathode, so täuscht es i. a. eine Verlängerung oder Verkürzung der wahren Laufzeit vor. Das Meßergebnis kann

hierdurch beträchtlich verfälscht werden. Der Versuch, beide Meßlichter auf die gleiche Stelle der Photokathode zu lenken, stößt praktisch auf große Schwierigkeiten. Die Bilder sollen bei beiden Meßwegen gleiche Größe und gleiche Qualität haben. Bei Luftströmungen und Schlieren läßt sich dies nur unvollkommen erreichen. Die Umkehrspiegel stehen nicht beliebig stabil. Geringfügige Schwankungen des Bodens und Erschütterungen der Spiegelhalterung verändern die Lage des Bildes auf der Photokathode. Die angestrebte Justierung kann daher nur mit einer von der Stabilität des Meßaufbaus und der Lichtführung abhängigen Toleranz eingehalten werden.

Die Fehler durch Laufzeitstreuung lassen sich verkleinern, wenn die Bilder nicht auf der Photokathode selbst, sondern auf einer vor dem Photomultiplier eingesetzten Streuscheibe entworfen werden [11, 1, 2]. Leider geht dabei ein großer Teil (50 . . . 95%) der Intensität verloren. Man ist gezwungen, Lichtquellen hoher Leuchtdichte einzusetzen, um bei brauchbarem Störabstand arbeiten zu können.

b) Örtliche Empfindlichkeit der Photokathode

Die Kathode des Photomultipliers ist nicht an allen Stellen ihrer Oberfläche gleich empfindlich. Auch die Vervielfachung an den Dynoden hängt etwas vom Austrittsort des Elektrons ab [10]. Ein Lichtstrom gleicher Intensität führt deshalb an verschiedenen Stellen der Photokathode in der Regel nicht zu gleich großen Elektronenströmen. Würde man das Meßlicht als achsenparalleles Bündel auf den Photomultiplier lenken, so wäre u. U. eine annähernd homogene Ausleuchtung der Photokathode zu erzielen; einzelne Teilbündel können hierbei aber unterschiedlich verstärkt werden. Hat das Meßlicht eine Phasenstruktur, so erhält man bei Änderung dieser Struktur eine andere Gesamtphase des Lichtes. Wegen der natürlichen Divergenz des Lichtes, das aus einer ausgedehnten Lichtquelle stammt, bleibt die beim Austritt des Lichtes aus der Sendelinie L_3 vorhandene Phasenstruktur nicht erhalten. Mit zunehmender Entfernung vermischen sich die ursprünglichen Teilbündel immer mehr: Die Phasenverteilung wird homogener. Bei zwei aufeinanderfolgenden Messungen über verschieden lange Strecken s_{M1} und s_{M2} wird die Photokathode jetzt aber mit unterschiedlicher Phasenstruktur ausgeleuchtet. Dies kann auch dann zu Meßfehlern führen, wenn die Phasenverteilung im Modulator zeitlich konstant bleibt und wenn das Meßlicht in beiden Fällen ohne jede Beschneidung ankommt.

Bei einwandfreier optischer Abbildung treffen alle von einem Punkt des „Gegenstandes“ ausgehenden Lichtstrahlen, soweit sie das abbildende System durchlaufen, in einem „Bildpunkt“ wieder zusammen. Vermeidet man Vignettierungen, so leuchtet jede Stelle von $S\phi_1$ die ganze Apertur der Linse L_1 aus. Jeder einzelne Bildpunkt auf der Empfangsseite enthält also Lichtstrahlen aller Teilbündel. Deshalb ist eine Phasenstruktur innerhalb des Bildes – ideale optische Verhältnisse vorausgesetzt – nicht vorhanden. Werden einzelne Teilbündel im telezentrischen Strahlengang des Meßweges unterschiedlich geschwächt (z. B. durch nicht an allen Stellen gleichmäßige Reflexion an einem Spiegel), so kann die Modulationsphase des Meßlichtes hierdurch verändert werden und eine falsche Länge des durchlaufenen Lichtweges vortäuschen. Das Bild auf der Empfangsseite enthält diese verfälschte Modulationsphase aber homogen in allen seinen Bildelementen.¹

Die vom Empfänger aufgefangenen Bilder des Spaltes $S\phi_2$ sind sehr klein (siehe Tabelle 3). Entwirft man sie auf einer Opalglasscheibe, so geht die entstehende Streustrahlung nahezu von einem Punkt aus. Die hinter dem Opalglas liegende Photokathode wird dann von jedem

¹ Bei dieser Überlegung wurde eine hinreichend kleine Aufweitung des Lichtbündels zwischen L_1 und L_2 vorausgesetzt. Vergl. Abschn. VI. 1. a, Bild 21.

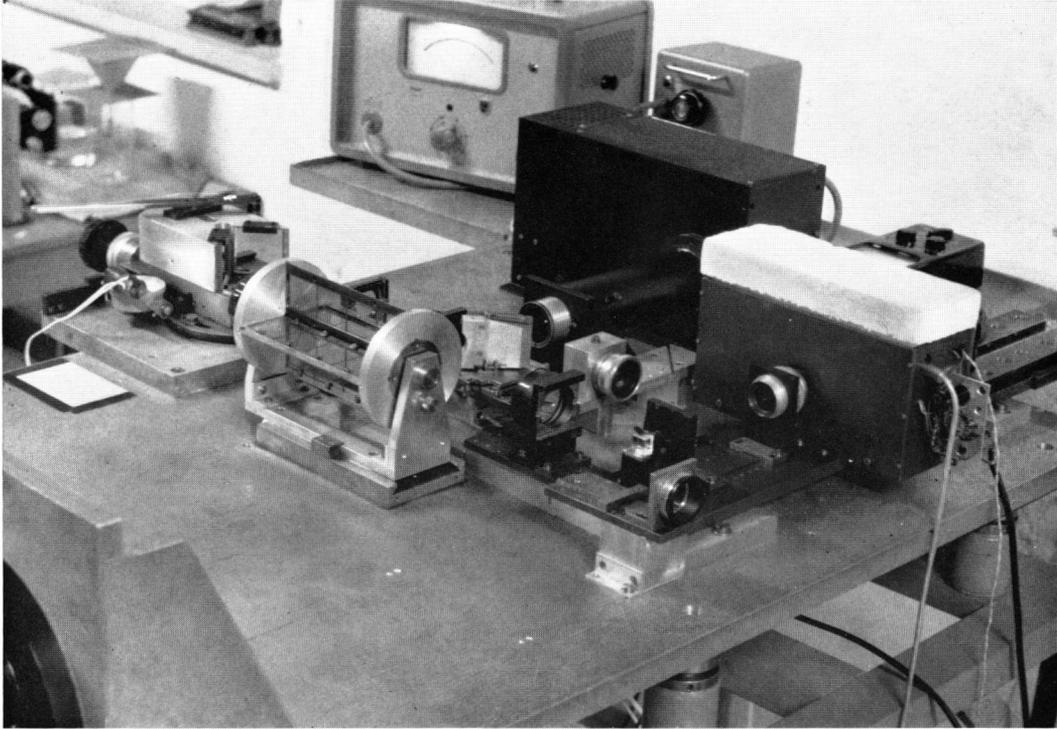


Bild 4: Aufbauten des Meßtisches: Lichtmodulator und Optik

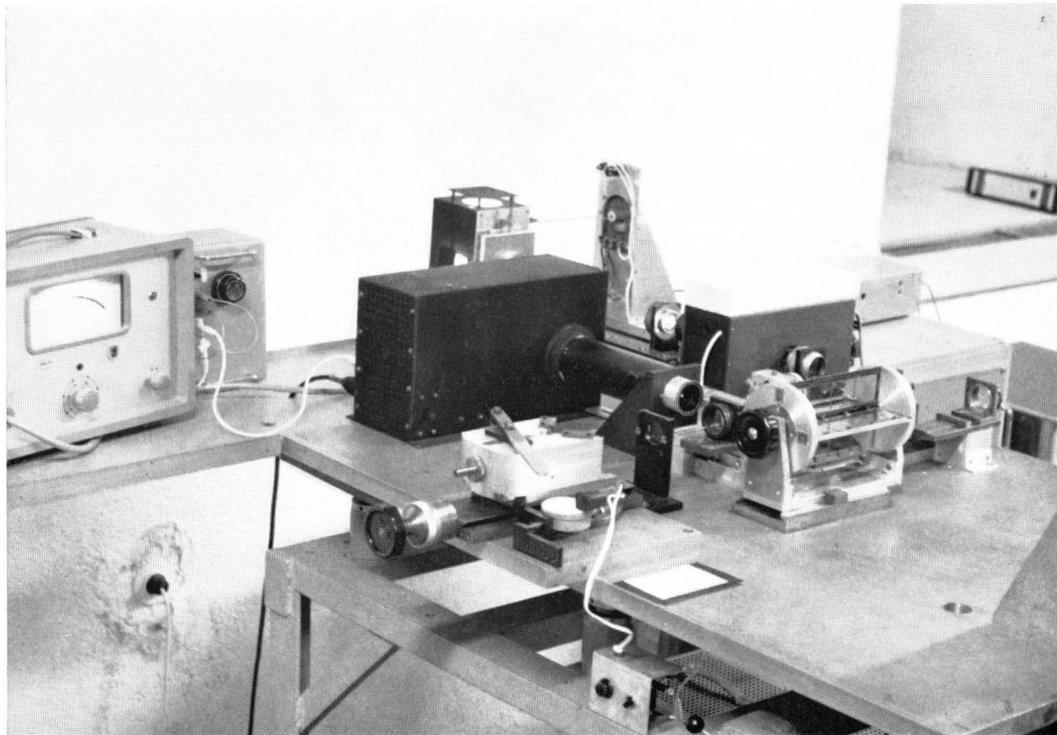


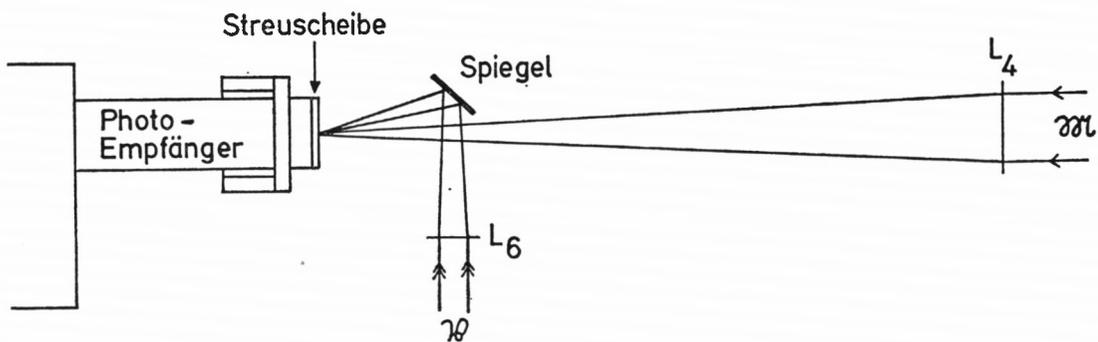
Bild 5: Aufbauten des Meßtisches: Neutralfilter, Vergleichsweg, Photoempfänger

Bildelement annähernd gleichartig ausgeleuchtet. Laufzeitstreuung und unterschiedliche Empfindlichkeit einzelner Kathodenstellen sollten das Meßergebnis nicht mehr verfälschen.

c) *Der Photoempfänger*

Der Aufbau ist auf Bild 5 zu erkennen. Ein fest mit dem Meßtisch verschraubter Aluminiumwinkel trägt die 1,8 mm starke Opalglasscheibe. Sie kann durch eingefügte Ab-

a) Meßstellung



b) Überwachung der Bildlage

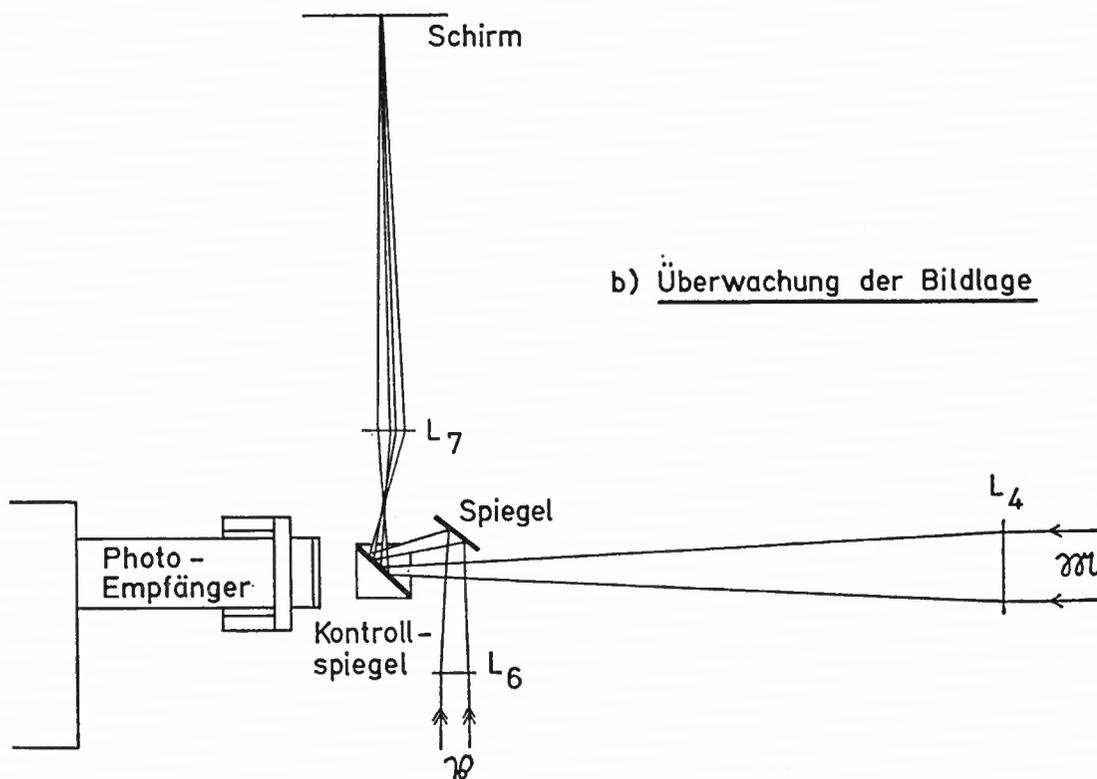


Bild 6: Aufbau mit Spiegel auf der Empfangsseite
a) Meßstellung, b) Überwachung der Bildlage

standsringe in verschiedener Entfernung von der Photokathode angeordnet werden. Bei der Justierung tritt an ihre Stelle eine Glasplatte mit Fadenkreuz, das vergrößert auf einem Schirm abgebildet wird und so den genauen Empfangsort für Meß- und Vergleichslicht festlegt. Der Photomultiplier steckt in einer Fassung an der Stirnseite des Empfängergehäuses. Ein Mu-Metall-Zylinder schützt ihn gegen magnetische Störfelder. Gehäuse und Aluminiumwinkel sind durch ein Messingrohr verbunden, das seitlich einfallendes Fremdlicht von der Photokathode fernhält und den Photomultiplier gegen elektrische Einstreuungen abschirmt. Um dem Störlicht auch den Weg zur Opalglasscheibe weitgehend zu versperren, begrenzt eine Metallblende die Eintrittsfläche auf einen Kreis von 4,5 mm Durchmesser.

Das Vergleichslicht verschiebt sich auf Fadenkreuz und Streuscheibe praktisch nicht. Durch Vergleich der relativen Lage von \mathfrak{M} und \mathfrak{B} ist deshalb leicht zu sehen, ob das Meßlicht noch auf die vorgeschriebene Stelle der Streuscheibe fällt. Liegt der Strahlenteiler T_2 vor dem Photomultiplier, so steht auch während der ϵ -Messung ein zweites Bilderpaar für die Überwachung der Bildlage zur Verfügung. Wird das Vergleichslicht über einen Planspiegel auf die Streuscheibe gelenkt, so läßt sich das Bilderpaar wenigstens vorübergehend vergrößert auf einem Kontrollschirm entwerfen (Bild 6). In beiden Fällen können Bildlage und Bildqualität jederzeit überprüft werden.

Zwischen Kathode und Anode des Photomultipliers liegen etwa 1400 V. Eine Kette von 13 Glimmröhren 108 C 1 unterteilt diese Spannung und versorgt die einzelnen Dynoden. Bei optimaler Einstellung der Fokussierspannung erreichten Photomultiplier vom Typ RCA 7326 in dieser Schaltung eine Stromverstärkung von $1,1 \dots 1,4 \cdot 10^4$. Der Glimmröhren-Kette vorgeschaltet ist ein Widerstand von 50 k Ω , an dem bei einem Querstrom von 17,5 mA 875 V abfallen. Die von einem elektronisch stabilisierten Netzgerät gelieferte Spannung beträgt ca. 2300 V.

Von der Meßreihe M 282 ab trat eine Reihenschaltung von 13 Drahtwiderständen mit je 10 k Ω an die Stelle der Glimmröhrenkette. Dieser Aufbau schließt Störungen des Anodenstromes aus, die durch das Flackern einzelner Glimmlampen verursacht werden. Die Spannung zwischen Kathode und Anode des Photomultipliers betrug bei den Meßreihen M 282 bis M 297 1350 V.

5. DER AMPLITUDEN- UND DER PHASENABGLEICH

Die Lichtgeschwindigkeit wird nach Abschnitt II. 1 aus zwei aufeinanderfolgenden Laufzeit-Messungen über verschieden lange Strecken s_M bestimmt.

Messung 1: Zum nahen Spiegelpaar C_1-D_1 am Basisanfang, über den Meßweg s_{M1}
(Vergleichsweg s_{V1})

Messung 2: Zum fernen Spiegelpaar C_2-D_2 am Basisende über den Meßweg s_{M2}
(Vergleichsweg s_{V2})

Soll das Meßverfahren die erwünschte hohe Empfindlichkeit haben, so dürfen sich die Intensitäten des Meß- und des Vergleichslichtes höchstens um 0,5% unterscheiden. Durch Gläser mit verschiedener Lichtdurchlässigkeit, die in den Meßweg oder in den Vergleichsweg gebracht werden, läßt sich die Gleichheit von $\hat{M}(B)$ und $\hat{V}(B)$ erzwingen („Amplitudenabgleich“). Diese Gläser müssen die Helligkeit gleichmäßig über den ganzen Bündelquerschnitt vermindern, da eine abweichende Schwächung einzelner Teilbündel bei einer

Phasenstruktur des Lichtes zu Meßfehlern führen kann. Leider bleibt der Amplitudenabgleich in der Regel nicht erhalten, wenn man vom nahen zum fernen Spiegelpaar übergeht. Die Intensitäten müssen daher zwischen Messung 1 und Messung 2 neu abgeglichen werden. Bei den eingeschalteten Neutralgläsern ist darauf zu achten, daß sie den optischen Weg nicht undefiniert verändern. Sie dürfen ferner Lage und Qualität der Bilder auf der Opalglasscheibe des Empfängers nur innerhalb der zulässigen Toleranz beeinträchtigen.

Helligkeitsunterschiede zwischen \mathfrak{M} und \mathfrak{B} werden zunächst durch Neutralfilter im Vergleichsweg, die bei Messung 1 und Messung 2 unverändert bleiben, weitgehend ausgeglichen. Zum endgültigen Amplitudenabgleich und zur Kompensation des Intensitätsunterschiedes zwischen Messung 1 und Messung 2 dienen 16 Neutralfilter, mit einer Transparenz von 79,5 . . . 87% in Stufen von 0,5%. Diese Gläser sind in einem Revolver untergebracht und können einzeln in den Weg des Meßlichtes geschoben werden. Sie bestehen aus jeweils zwei miteinander verkitteten quadratischen Glasplatten unterschiedlicher Transparenz, deren Dicke so gewählt ist, daß die gewünschte Lichtdurchlässigkeit erreicht wird und daß gleichzeitig alle Neutralfilter den optischen Weg um denselben Betrag verlängern. Damit lassen sich die Intensitäten von Meß- und Vergleichslicht so weit einander angleichen, daß im ungünstigsten Falle eine Differenz von 0,25% verbleibt. Diese Abstufung reicht aus. Viele Messungen haben gezeigt, daß Abgleichfehler bis zu 0,5% zwar auf die Empfindlichkeit der Apparatur z. T. großen Einfluß haben, daß sie das Spannungsminimum aber nicht verschieben können.

Der genaue Ort des Minimums ergibt sich aus dem „Phasenabgleich“. Beim Aufbau der Meßanordnung sind s_{M1} und s_{M2} so gewählt worden, daß bis auf wenige Millimeter die Bedingungen

$$s_{M1} - s_{V1} = (2n_1 + 1) \frac{\lambda_m}{2}$$

$$s_{M2} - s_{V2} = (2n_2 + 1) \frac{\lambda_m}{2}$$

$$s_{V1} \approx s_{V2}$$

(II. 1) erfüllt sind. Zum verbleibenden Feinabgleich wird das Spiegelpaar $E-F$ des Vergleichsweges auf dem Drehbanksupport verschoben, bis $|U_{ph}|$ am Resonanzkreis des Empfängers seinen kleinsten Wert annimmt. Ein HF-Millivoltmeter PHILIPS GM 6014 zeigt diese Spannung an. Ihr Verlauf in Abhängigkeit von s_V für Werte in der Nähe des Minimums $s_V = s_{V\min}$ ist aus Bild 7 zu ersehen. Da $|U_{ph}|$ vor und hinter dem Minimum innerhalb der erreichten Meßgenauigkeit symmetrisch ansteigt, kann die Lage der tiefsten Stelle aus zwei Punkten gleicher HF-Spannung bestimmt werden, die auf den Flanken der Kurve liegen. Ist ihr Abszissenabstand vom Minimum gleich w , so lautet die Bedingung für den Phasenabgleich:

$$U_{ph}(s_{V\min} + w) = U_{ph}(s_{V\min} - w)$$

Die Empfindlichkeit steigt mit der Steilheit der Flanken

$$\left| \frac{\partial U_{ph}}{\partial s_V} \right|_{(s_{V\min} \pm w)}$$

Bei der Supportstellung $s_V = s_{V\min}$, die an einer Meßuhr auf $\pm 10^{-2}$ mm abgelesen werden kann, sind durch die zusätzliche Verschiebung des Spiegelpaars $E-F$ auf dem Schlitten gerade die Stellungen $(s_{V\min} + w)$ und $(s_{V\min} - w)$ erreichbar. Ihre Lage ist mit der gleichen Genauigkeit bekannt.

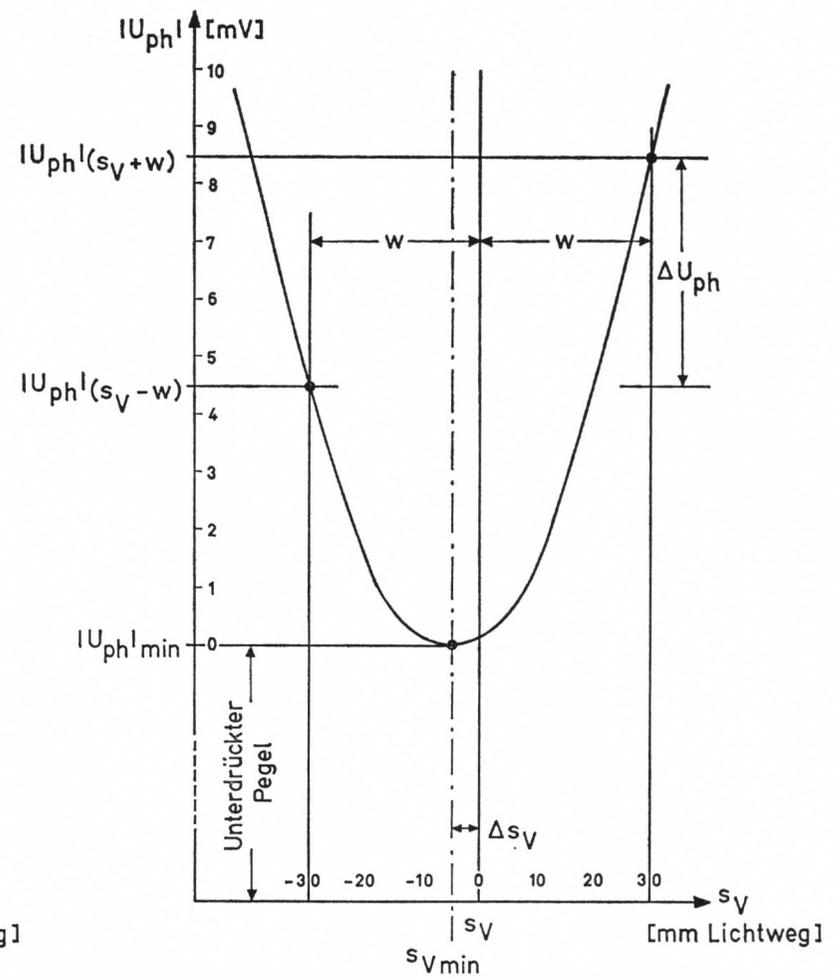
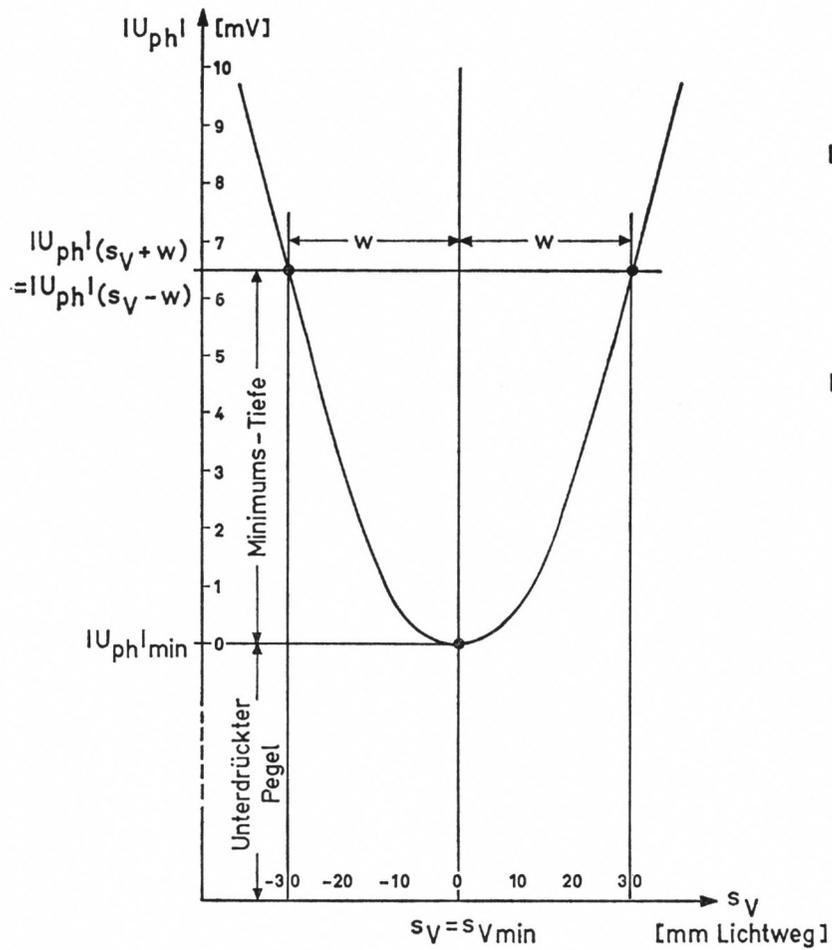


Bild 7: Abhängigkeit der Spannung $|U_{ph}|$ von s_V in der Nähe des Minimums

a) Phasenabgleich $s_V = s_{Vmin}$

b) Eine Fehleinstellung um $\Delta s_V = 2 \Delta s_V$ ergibt einen Anzeigeunterschied $\Delta U_{ph} \neq 0$

Weichen die Amplituden $\hat{M}(B)$ und $\hat{V}(B)$ voneinander ab, so verbreitert sich das Minimum: Die Flankensteilheit in den Punkten ($s_{V_{\min}} \pm w$) wird kleiner, und mit ihr geht die Einstellempfindlichkeit zurück.

Das Röhrenvoltmeter erreicht noch bei 30 MHz einen Eingangswiderstand von 50 k Ω . Der Tastkopf konnte daher in das Gehäuse des Photoempfängers einbezogen und unmittelbar mit dem HF-Kreis verbunden werden, ohne diesen störend zu bedämpfen. Im empfindlichsten Meßbereich erhält man bei einer effektiven Spannung von 1 mV Vollausschlag über die 125 mm lange Skala. Gleichzeitig ist das Instrument unempfindlich gegen Überlastung. Dies ist besonders wichtig, da bei jeder Unterbrechung eines Lichtweges (z. B. beim Hochziehen des Spiegelpaares C_1-D_1) die Wechselspannung auf etwa das 150fache des angezeigten Wertes steigt.

Der Phasenabgleich wird im 30 mV- oder im 10 mV-Bereich vorgenommen. Hier ist die Meßruhe i. a. genügend groß und die angezeigte Spannung gut abzulesen. Bei $w \approx 30$ mm erhält man Ausschläge von etwa 50 . . . 90% der Skalenlänge. Da lediglich zwei gleich große Zeigerausschläge einzustellen sind, geht die Eichung des Röhrenvoltmeters nicht in das Meßergebnis ein.

6. DIE MESSFREQUENZ

Die Höhe der Meßfrequenz wird weitgehend durch den Lichtmodulator und durch die Meßstrecke S_M bestimmt. Für Ultraschallzellen eignen sich Modulationsfrequenzen f_m zwischen 10 und 20 MHz. Nach Abschnitt II, 1 muß weiterhin

$$\lambda_m = \frac{2(S_M - S_V)}{N} \approx \frac{2S_M}{N}$$

sein, weil $S_V \approx 0$ lediglich die Rolle einer Korrekturgröße spielen soll. S_M liegt als geodätische Basis bereits fest; so bleibt für f_m nur noch eine beschränkte Auswahl:

$$f_m = \frac{c}{\lambda_m} \approx \frac{c \cdot N}{2S_M}$$

oder mit

$$S_M = 48,02 \text{ m} \quad N = 1, 2, 3, 4 \dots$$

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$f_m \approx \frac{3 \cdot 10^8 \cdot N}{2 \cdot 48,02} \text{ Hz} \approx 3,12 \cdot N \text{ MHz}$$

Man erhält die Werte

$N = 3$	$f_m = 9,36 \text{ MHz}$	$f_Q = 4,68 \text{ MHz}$
4	12,48	6,24
5	15,60	7,80
6	18,72	9,36

von denen die letzten beiden ausgewählt wurden. Gerade Ordnungszahlen erlauben auch Messungen über $S_M/2 = 24,01$ m. Bei kleineren Wellenlängen besteht zusätzlich die Möglichkeit, den Abstand des Meßtisches vom Spiegelpaar C_1-D_1 um $\lambda_m/2$ zu vergrößern. Am günstigsten ist bei den vorliegenden Platzverhältnissen $f_m = 18,72$ MHz, da man bei dieser Modulationsfrequenz ohne Umlenkspiegel messen kann,

Die Modulationsfrequenz f_m , die im Lichtmodulator durch Verdoppelung der an den Ultraschall-Quarzen liegenden Steuerfrequenz f_Q entsteht, geht unmittelbar in das Meßergebnis ein. Während der c -Bestimmungen muß die Frequenz f_Q deshalb ausreichend konstant und bis auf Abweichungen von weniger als 10^{-6} ihres Wertes bekannt sein. Sie wird von quarzgesteuerten Oszillatoren abgeleitet, deren Ausgangsspannung über Vorverstärker und Endstufe an die Ultraschallquarze gelangt.

Der elektrische Aufbau zerfällt in zwei Baugruppen: Im Oszillorteil enthält ein gemeinsamer Thermostat die beiden Schwingquarze für 7,80 MHz und 9,36 MHz. Sie bestimmen die Frequenz der Oszillatoren. Die Oszillatorspannung durchläuft zunächst ein Trennsystem und wird dann regelbar verstärkt dem 75 Ω -Ausgang zugeführt. Ein abgeschirmtes Kabel verbindet den Oszillorteil mit der Endstufe, die unter der Platte des Meßtisches in unmittelbarer Nähe der Ultraschallzelle liegt. Die Verbindungsleitung Endstufe-Ultraschallzelle ist daher sehr kurz. Ihre Kapazität und der Blindwiderstand der Zelle sind in den Ausgangskreis der Endstufe einbezogen worden, ebenso die Tastkopf-Kapazität des Röhrevoltmeters, das die an den Ultraschallquarzen liegende Spannung U_Q anzeigt.

Oszillator, Trennstufe, Verstärker und 75 Ω -Ausgang sind für beide Frequenzen getrennt vorgesehen. Über einen Umschalter erhält jedoch jeweils nur eine Gruppe Anoden- und Heizspannung. Die zweite, für die vorgenommene Messung nicht benötigte Frequenz wird nicht erzeugt. Alle Röhrengleichspannungen einschließlich der Röhrenheizungen sind elektronisch stabilisiert.

Parallel zur Endstufe liegt ein 10 MHz-Zähler, der die Frequenz f_Q überwacht. Seine interne Normalfrequenz (1 MHz) wird mit der einem Geradeausempfänger entnommenen Trägerfrequenz des Senders Droitwich verglichen und korrigiert.

Noch günstiger erwies sich die Steuerung des Zählers durch Sekundenimpulse einer sehr konstanten stationären Quarzuhr, deren Frequenz täglich mit der Trägerfrequenz des Senders Droitwich verglichen wurde. Das Frequenznormal erreicht in diesem Falle eine Genauigkeit von $1 : 10^9$. Die Korrekturen liegen weit unter der hier geforderten Meßgenauigkeit.

7. DIE MESS-STRECKE

Die Lichtgeschwindigkeitsmessungen wurden auf der Basis des DGFI in der Münchener Residenz ausgeführt. Die Strecke liegt in einem Kellerraum, dessen Lufttemperatur auf ca. 20° C gehalten wird. Die Länge von ca. 48,02 m kann mit einem Interferenzkomparator nach VÄISÄLÄ bestimmt werden.*

a) Der Streckenaufbau

Bild 8 zeigt den Grundriß des Raumes und die Aufstellung der Meßapparatur. Der Abstand der Spiegelpaare C_1-D_1 und C_2-D_2 entspricht annähernd der Basislänge. Beim Aufbau der Meßanordnung war darauf zu achten, daß der Spiegelabstand einfach und hinreichend genau an die gemessene Basis angeschlossen werden kann.

Auf Bild 9 ist das Spiegelpaar C_2-D_2 zu sehen. Eine Aluminiumplatte, 720 \times 340 \times 25 mm, trägt zwei Aufspannwinkel mit den an drei Stellen angedrückten Planspiegeln (ASKANIA-

* Längenmessungen mit diesem Komparator werden im folgenden kurz als „Interferenzmessungen“ bezeichnet.

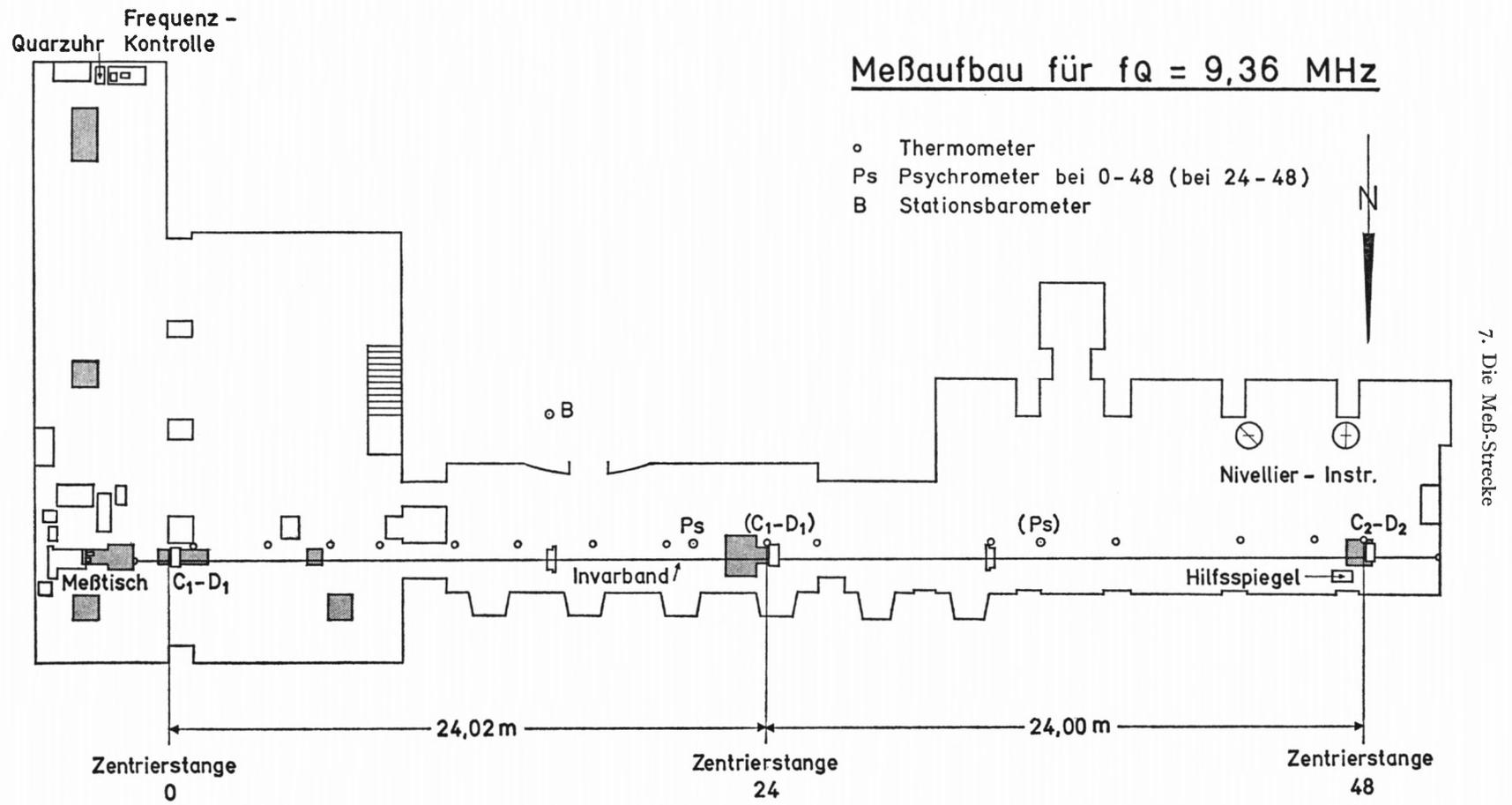


Bild 8: Meßaufbau: Grundriß des Raumes

WERKE, $280 \times 220 \times 22$ mm). Sie ruht auf drei kurzen, in ihrer Höhe verstellbaren Säulen, die unten jeweils mit einer eingesetzten Kugel enden. Auf dem Pfeiler sind drei Lager vorgesehen. Zwei von ihnen weisen kegelförmige Bohrungen zur Aufnahme der Kugeln auf. Das dritte Lager ist eben, mit gehärtetem Einsatz, so daß die dritte Kugel lediglich in ihrer Höhe, nicht aber in ihrer seitlichen Lage festgelegt ist. Diese Art der Lagerung gestattet eine Abnahme der Aluminiumplatte während der Interferenzmessung, ohne daß die Justierung hierdurch verlorengeht.

Zur Spiegeljustierung wird eine Dreieckschablone auf die Grundplatte gelegt, an deren Vorderkante angedrückt und verschraubt. Sie trägt auf ihrer Hypotenusenfläche einen kleinen planparallelen Oberflächenspiegel, mit dessen Hilfe diese Dreieckseite senkrecht zur Lichtrichtung justiert werden kann. An die Katheten der Schablone werden die Winkel mit den aufgespannten Planspiegeln angesetzt, so daß deren untere Kanten senkrecht zueinander verlaufen. Nachdem die Grundplatte nach Sekundenlibellen horizontal eingerichtet wurde, erfolgt die vertikale Justierung für beide Planspiegel einzeln mit Hilfe eines Nivelliers. Die beiden Spiegel können hierzu um die untere Kante gekippt werden.

Der 90° -Winkel zwischen C_2 und D_2 und zwischen C_1 und D_1 wird mit der gleichen, nur einmal vorhandenen Schablone und für beide Spiegelpaare nacheinander auf dem 48-m-Pfeiler eingerichtet. Die erzielbare Genauigkeit läßt sich auf der Meßstrecke prüfen. Die Abweichungen vom rechten Winkel sind hierbei hinreichend klein. Wichtiger und kritischer ist die Übereinstimmung des Winkels zwischen C_2 und D_2 mit dem Winkel zwischen C_1 und D_1 , da hiervon die Lage der Bilder des Spaltes Sp_2 , die auf der Streuscheibe entworfen werden, abhängt.

Eine Winkeldifferenz $\Delta\psi$ ergibt auf der Streuscheibe eine Bildverschiebung

$$\Delta B = \Delta\psi \cdot F_4$$

F_4 = Brennweite der Empfangslinse L_4 .

Läßt man (vergl. Abschnitt II, 4) eine maximale Bildversetzung $(\Delta B)_{\max} \approx 0,05$ mm zu, so erhält man für $F_4 = 950$ mm:

$$(\Delta\psi)_{\max} = \frac{(\Delta B)_{\max}}{F_4} = \frac{0,05}{950} \approx 5,3 \cdot 10^{-5}$$

also etwa 10 Bogensekunden. Bei $F_4 = 2000$ mm sinkt diese Toleranz auf die Hälfte. Diese Genauigkeit läßt sich nur erreichen, wenn während des Justierens die Lage des Bildes auf der Streuscheibe kontrolliert wird. Man kann durch Verschieben des Sendeobjektives L_3 den Spalt Sp_2 auch auf eine Kontrollscheibe vor der Empfangslinse abbilden und erhält dort Spaltbild und Bildverschiebung etwa 100-fach vergrößert.

Über den „Zentrierapparat“ des Interferenzkomparators werden die Spiegelpaare an die Basis angeschlossen: Für die VÄISÄLÄ-Apparatur sind auf den Meßpfeilern horizontal liegende runde Zentrierstangen senkrecht zur Meßrichtung vorgesehen, in die – mit prismatischer Führung – ein Joch eingesetzt werden kann. Dieses ist um die Zentrierstange kippbar und trägt auf seinem waagrechten Teil eine Mikrometerschraube, die in Meßrichtung weist. Bei der Basismessung steht auf dem Pfeiler hinter der Zentrierstange ein einzelner Planspiegel, dessen Ebene senkrecht zur Meßrichtung justiert wird. An diesen Spiegel stößt die Spitze der Mikrometerschraube, sobald man das Joch gegen ihn kippt.

Bei Verdrehen der Spindel kehrt das Meßjoch in die vertikale, die Mikrometerschraube damit in die horizontale Lage zurück, die an einer eingebauten Libelle kontrolliert werden

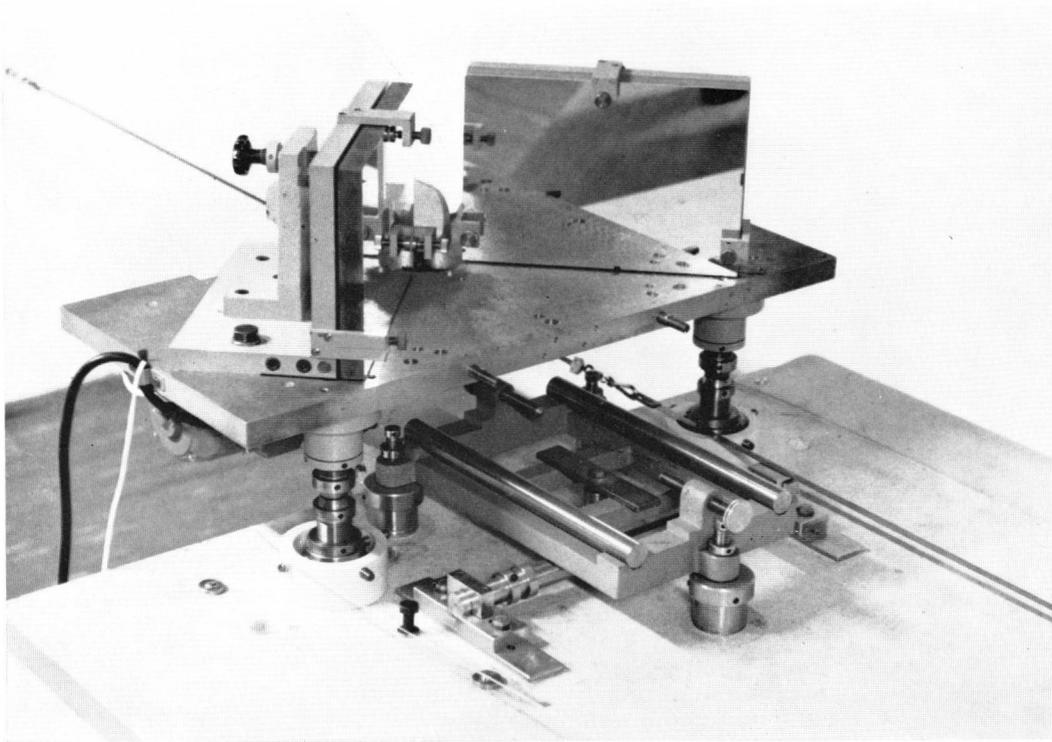


Bild 9: Meßstrecke: Spiegelpaar C_2-D_2 auf dem 48-m-Pfeiler

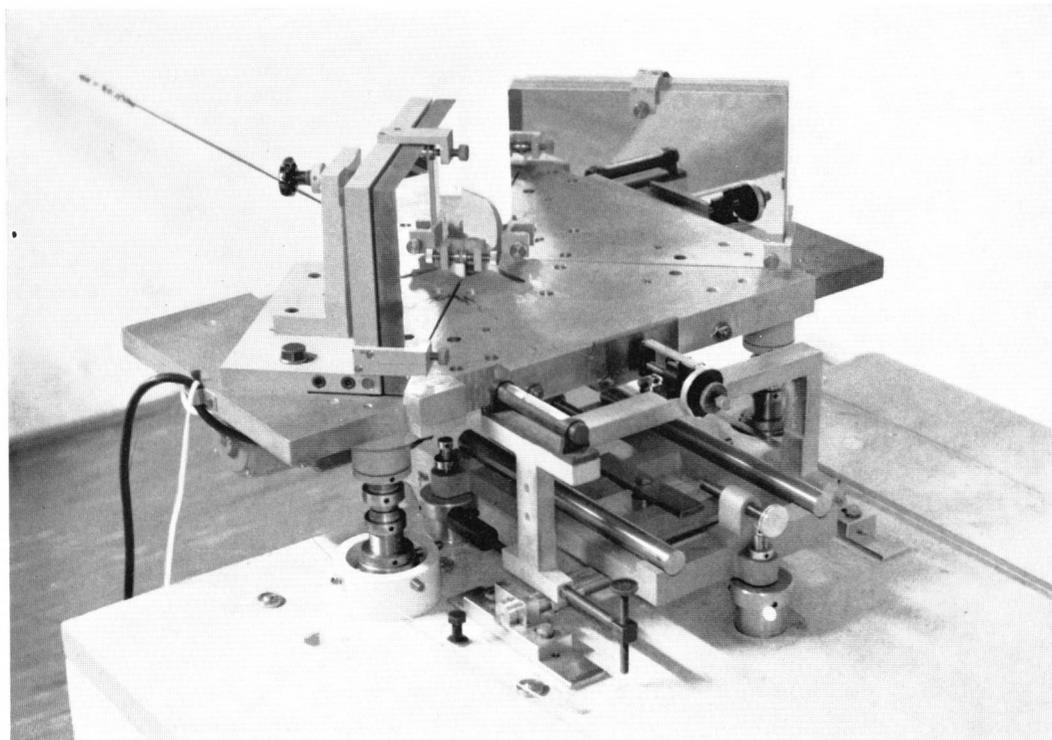


Bild 10: Meßstrecke: Anschluß des Spiegelpaares C_2-D_2 an die Zentrierstange des 48-m-Pfeilers

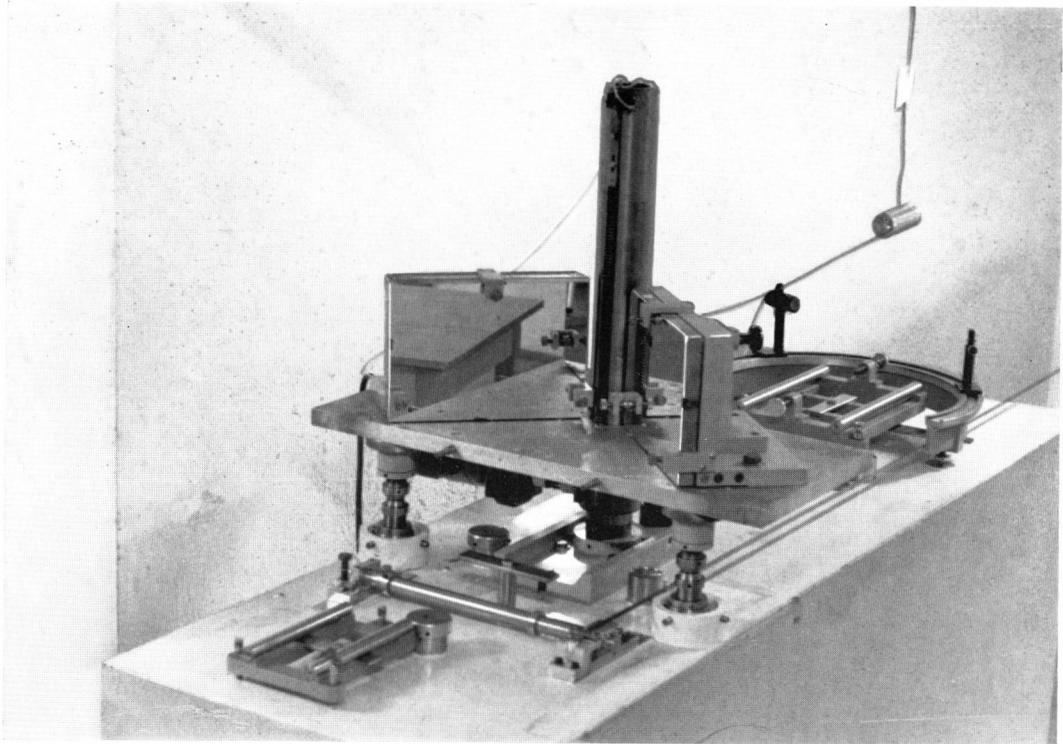


Bild 11: Meßstrecke: Spiegelpaar C_1-D_1 mit Aufzug auf dem o-m-Pfeiler

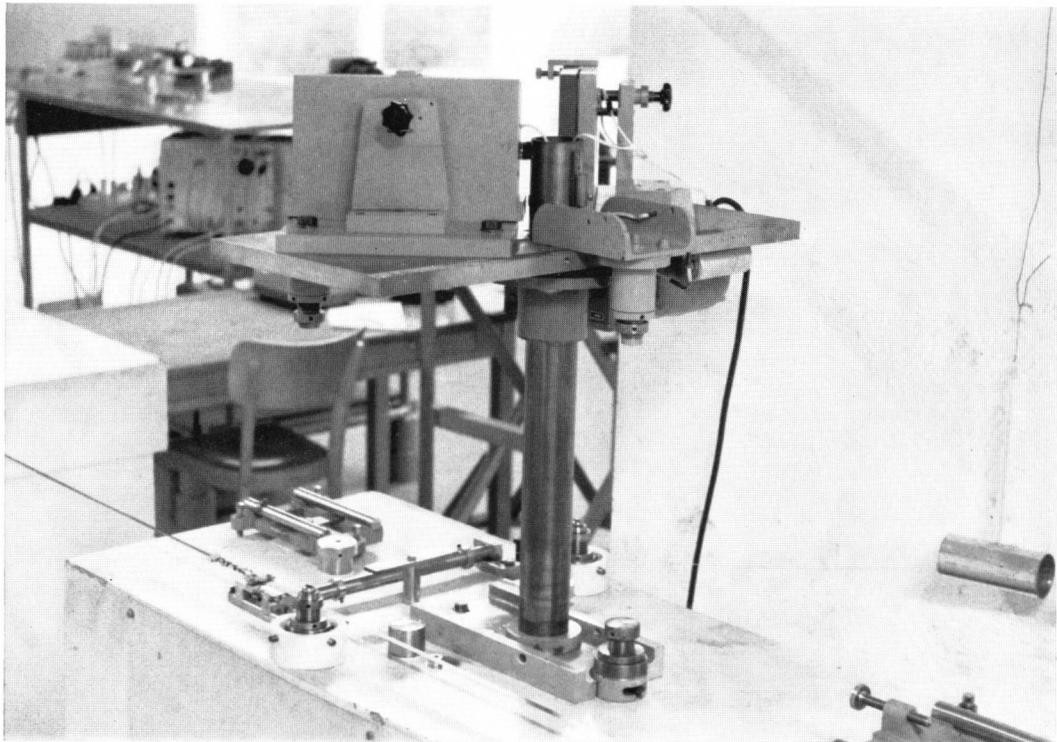


Bild 12: Meßstrecke: Spiegelpaar C_1-D_1 ausgefahren

muß. Jetzt wird die Anzeige des Mikrometers abgelesen. Entsprechend verfährt man am anderen Ende der Meßstrecke. Die Basislänge selbst liegt als Abstand zweier Spiegel­flächen fest. In den Abstand der Zentrierstangen ($\overline{S_M}$) geht zusätzlich noch die Differenz zweier Mikrometerablesungen am Meßjoch ein. Sie ist bei geeigneter Einstellung der Zentrierstangen nahezu Null.

Der Abstand der Spiegelpaare C_2-D_2 und C_1-D_1 von ihren jeweiligen Zentrierstangen wird mit demselben Meßjoch bestimmt: An die Stelle des VÄISÄLÄ-Spiegels tritt ein geschliffener Einsatz auf der Hypotenusenfläche der Dreieckschablone (Bild 10). Da diese wiederum für beide Spiegelpaare gemeinsam benutzt wird, ist damit auch die Lage der Spiegel zu den Zentrierstangen definiert. Man erhält die Länge der Meßstrecke S_M aus:

$$S_M = \overline{S_M} + (H - V)$$

$\overline{S_M}$ = Abstand der Zentrierstangen
(aus der Interferenzmessung bekannt)

H = Mikrometerablesung bei C_2-D_2 (hinteres Spiegelpaar)

V = Mikrometerablesung bei C_1-D_1 (vorderes Spiegelpaar)

Auch hier ist nur die Differenz zweier Mikrometerablesungen von Bedeutung, die durch geeignete Aufstellung der beiden Spiegelpaare sehr klein gemacht werden kann ($H-V \approx 1$ mm). Lediglich bei Messungen über die Strecke 24–48 ist diese Differenz größer und beträgt nahezu 10 mm, da die Zentrierstange auf dem 24-m-Pfeiler nicht bei 48,02 m/2 = 24,01 m, sondern bei 24,02 m liegt.

Die Aufstellung des Spiegelpaares C_1-D_1 am Anfang der Meßstrecke stimmt mit der bereits beschriebenen Anordnung des Spiegelpaares C_2-D_2 überein. Zusätzlich kann hier aber die Aluminiumplatte mit Aufspannwinkeln und Planspiegeln durch einen Aufzug über den Lichtweg gehoben werden, so daß der Weg zum hinteren Spiegelpaar freigegeben wird. Die Bilder 11 und 12 zeigen den Aufbau. Die Hauptschwierigkeit war hier, die Lage des Spiegelpaares C_1-D_1 bei jedem Aufsetzen so genau festzulegen, daß das an ihm reflektierte Licht innerhalb weniger 10^{-2} mm auf die gleiche Stelle der Streuscheibe gelangt. Eine frühere Anordnung, bei der C_1-D_1 seitlich ausgefahren wurde, konnte dieser Forderung nicht gerecht werden.

Die beiden Spiegelpaare sind vollkommen gleichartig aufgebaut und untereinander austauschbar.

b) Die Basismessung

Mit dem Interferenzkomparator kann die Länge der Basis mit einer Unsicherheit von wenigen μm bestimmt werden. Leider lassen sich im vorliegenden Aufbau Streckenmessung und ϵ -Bestimmung nicht gleichzeitig ausführen. Schwankungen der Außentemperatur führen zu Pfeilerbewegungen, die in extremen Fällen im Laufe eines Tages einige 10^{-2} mm erreichen können. Dadurch geht die bei der Streckenmessung erreichte Genauigkeit weitgehend verloren.

Die verfügbare Meßzeit reicht nicht aus, um täglich neben den ϵ -Bestimmungen mehrere Interferenzmessungen vorzunehmen. Deshalb wird die Streckenlänge zwischen den Komparator-Messungen mit einem 48 m-Invarband überwacht, das längs der Basis unter dem Lichtweg verläuft. Die Zentrierstangen auf dem 0- und dem 48-m-Pfeiler erhielten hierfür

je eine Strichmarke. Gleiche Markierungen wurden auf dem Invarband so vorgesehen, daß ihr Abstand von den Strichmarken der Pfeiler mit einem Meßmikroskop ablesbar ist. Berücksichtigt man den Einfluß der Temperatur auf die Bandlänge durch eine Korrektur, so bleibt der korrigierte Abstand der Bandstrichmarken konstant. Aus den Ablesungen am Meßmikroskop kann unmittelbar die Streckenänderung errechnet werden. Gemessen werden nur die relativ kleinen Abstände der Strichmarken; die Länge des Invarbandes geht nicht in das Ergebnis dieser Interpolationsmessungen ein.

Mit dem Verfahren lassen sich sehr große Pfeilerbewegungen innerhalb eines Tages feststellen. Es dient aber hauptsächlich zur Ermittlung der Streckenlänge, wenn über mehrere Tage hinweg keine Interferenzmessungen zur Verfügung stehen.

8. DIE METEOROLOGISCHEN DATEN

Wenngleich die Temperatur des Meßkellers durch eine Warmluftheizung stets auf etwa 20° C gehalten wird, so tritt doch – bedingt durch die Anlage von Meßraum und Heizung – längs der Basis ein Temperaturgradient auf. Die mittlere Temperatur auf der Meßstrecke wird durch 14 Quecksilber-Thermometer erfaßt, die längs der Basis in unmittelbarer Nähe des Lichtweges angebracht sind. Ihr gegenseitiger Abstand ist nach den Erfordernissen der Streckenmessung gewählt worden. Gegen Strahlung wurden sie durch seitlich offene Metallschirme geschützt. Bild 8 zeigt die Lage der Thermometer.

Die mittlere Temperatur ergibt sich zu

$$\vartheta_m = \frac{\sum_k \vartheta_k s_k}{\sum_k s_k} = \frac{\sum_k \vartheta_k G_k}{\sum_k G_k}$$

k = Nummer des Thermometers

ϑ_k = Anzeige des Thermometers k [°C]

s_k = Länge der Zone, für die ϑ_k gilt

G_k = Gewicht der Temperatur ϑ_k $G_k = 4 s_k$

Für Messungen auf der Strecke 0–48:

k	2	4	6	7	9	10	11	12	14	15	17	18	19	20	21
G_k^*	10	11	9	10	11	11	12	14	12	18	24	20	20		10
G_k	10	11	9	10	11	11	12	14	12	18	24	20	16	14	

G_k^* gilt bis M 13 einschließlich

G_k gilt ab M 14

$$\sum_k G_k = 192$$

Für Messungen auf der Strecke 24–48:

k	14	15	17	18	19	20	21
G_k^*	4	18	24	20	20		10
G_k	4	18	24	20	16	14	

In die Brechzahl der Luft geht der Partialdruck e des Wasserdampfes ein, der mit einem Aspirations-Psychrometer nach ASSMANN bestimmt wird. Nach der SPRUNGSCHEN Gleichung [8] erhält man

$$e = p'_0 - 0,00066 p (\vartheta - \vartheta')$$

p'_0 = Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei ϑ' [°C] in Torr

p = Barometerstand in Torr

ϑ = Temperatur des trockenen Thermometers
(Lufttemperatur) in °C

ϑ' = Temperatur des feuchten Thermometers in °C

Der Sättigungsdruck des Wasserdampfes p'_0 ist in [8] in Abhängigkeit von ϑ' tabelliert. Er wurde auf $|\Delta\vartheta'| = 0,1^\circ\text{C}$ interpoliert.

Der Luftdruck p wurde zu Beginn und am Ende jeder Meßreihe mit einem Normalbarometer der Firma FUESS, Berlin, bestimmt, das im Meßraum fest installiert ist.

Zeitweilig wurde p auch an einem PAULIN-Dosenbarometer abgelesen und dieses täglich mit dem Normalbarometer verglichen. Eine merkliche Einbuße an Genauigkeit ist dabei nicht zu erwarten.

IV. FEHLERQUELLEN UND IHR EINFLUSS AUF DAS MESSERGEBNIS

1. EMPFINDLICHKEIT DES PHASENABGLEICHES

Die Meßanordnung erreicht eine hohe Empfindlichkeit, wenn kleine Änderungen Δs_V zu großen Spannungsänderungen ΔU_{ph} führen. Die Flanken der Minimumskurve Bild 7 sollen deshalb möglichst steil verlaufen.

Theoretisch ergibt sich die Flankensteilheit aus Abschnitt II:

$$\hat{U}_{ph} = J_0 \cdot R_{Res} \cdot \left| \cos \frac{\varphi}{2} \right|$$
$$\left| \frac{d\hat{U}_{ph}}{d\varphi} \right| = \frac{1}{2} \cdot J_0 \cdot R_{Res} \cdot \left| \sin \frac{\varphi}{2} \right|.$$

Die Minimumskurve läuft in eine Spitze aus; die Flankensteilheit erreicht im Abgleichpunkt ihren Höchstwert.

Für $\varphi = \pi$ (Phasenabgleich) wird

$$\frac{d\hat{U}_{ph}}{d\varphi} = \frac{1}{2} \cdot J_0 \cdot R_{Res}$$

und mit

$$\varphi = \varphi_M - \varphi_V \quad (\varphi_M = \text{const.})$$

$$d\varphi = -d\varphi_V = -\frac{2\pi}{\lambda_m} ds_V$$

$$\left| \frac{d\hat{U}_{ph}}{ds_V} \right| = \frac{\pi}{\lambda_m} \cdot J_0 \cdot R_{Res}$$

Die Empfindlichkeit steigt mit Signalstrom und Arbeitswiderstand des Photomultipliers. Sie nimmt ferner mit der Modulationsfrequenz zu. Leider haben Ultraschall-Lichtmodulatoren bei höheren Modulationsfrequenzen meist auch größere Phasenfehler und kleineren Modulationsgrad. Die Vorteile der kleineren Wellenlänge gehen dadurch schnell verloren.

Gelingt der Amplitudenabgleich $\hat{M}(B) = \hat{V}(B)$ nicht vollständig, so nimmt der zur Minimumsbildung auswertbare Signalstrom J_0 ab. Abgleichfehler von 0,25% sind bei sonst günstigen Meßbedingungen bereits feststellbar.

Die Empfindlichkeit der Meßanordnung wird begrenzt durch Störspannungen, die gleichzeitig mit der Signalspannung an das Anzeigeelement gelangen.

Die am Eingang des Röhrenvoltmeters auftretende Rauschspannung wird zum überwiegenden Anteil vom Schrotrauschen des Photomultipliers geliefert. Nach [10] erhält man an der Photokathode

$$i_R \text{ (Schrotrauschen)} = \sqrt{2e \cdot J_k \cdot \Delta f}.$$

Damit wird die effektive Rauschspannung am Eingang des Röhrenvoltmeters wegen $J_A = V \cdot J_K$

$$u_R \text{ (Schrotheffekt)} = \sqrt{2e \cdot J_A \cdot V \cdot \Delta f \cdot R_{Res}}$$

- e = elektrische Elementarladung $\approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ As
- Δf = Bandbreite des Empfangskreises ≈ 95 kHz
- R_{Res} = Resonanzwiderstand des Empfangskreises ≈ 54 k Ω
- J_K = Kathodengleichstrom des Photomultipliers
- J_A = Anodengleichstrom des Photomultipliers $\approx 0,4$ mA
- V = Stromverstärkung des Photomultipliers $\approx 1,4 \cdot 10^4$

und mit den angegebenen Zahlenwerten

$$u_R \text{ (Schrotheffekt)} \approx 23 \text{ mV.}$$

Rauschen, das durch Schwanken des Vervielfachungsfaktors der Sekundäremission verursacht wird, soll in dieser Abschätzung mit etwa 20% des Schrotrauschens berücksichtigt werden [10], während vom thermischen Rauschen (Dunkelstrom) abgesehen werden kann. Vernachlässigbar klein wird auch das Widerstandsrauschen des Empfangskreises. Der Rauschanteil der Verstärkerstufen des Röhrenvoltmeters ist vom Hersteller schon so klein gehalten, daß keine störenden Zeigerschwankungen auftreten. Der zeitlich konstante Anteil wird bei der Eichung des Instrumentes berücksichtigt.

Somit kann die effektive Rauschspannung am Eingang des Röhrenvoltmeters mit

$$u_R \approx 30 \text{ mV}$$

veranschlagt werden. Diese Spannung gelangt über die Verstärkerstufen des Instrumentes an eine Gleichrichterschaltung mit Spannungs-Verdoppelung. Ein großer Kondensator vor dem Anzeigeelement sorgt dafür, daß bei Sinusspannungen von 10 kHz bis 30 MHz der Spitzwert angezeigt wird. Die Eichung der Skala gibt den zu dieser Sinusspannung gehörenden Effektivwert an. Rauschspannungen werden in dieser Schaltung in der Regel zu hoch gemessen, da die Anzeige von der Kurvenform abhängt. Im vorliegenden Fall erhielt man bei $J_A = 0,4$ mA ohne Modulation

$$u_R \approx 43 \text{ mV.}$$

Dieser Pegel wird durch eine Gleichspannung am Anzeigeelement kompensiert.

Wie Bild 13 zeigt, kann der Nullpunkt im 10 mV-Bereich bis zu 40 mV unterdrückt werden, ohne daß die Eingangsspannung den Verstärker des Röhrenvoltmeters GM 6014 unzulässig übersteuert. Bei Eingangsspannungen >40 mV sinkt die Empfindlichkeit des Instrumentes rasch. Die höhere Anzeige bei 10 . . . 30 mV unterdrückter Spannung ist eine Folge der nichtlinearen Skala des Röhrenvoltmeters. Die Messung wurde bei einer Frequenz von 18,5 MHz durchgeführt; die unterdrückte Spannung entstammte der gleichen Quelle wie die Signalspannung, war also mit dieser kohärent und phasengleich.

Nach der Kompensation des Rauschpegels verbleibt als störender Rest ein Wechselanteil der Rauschspannung mit Frequenzen unter der reziproken Beruhigungsdauer τ des Anzeigeelementes. Im ursprünglichen Rauschen waren, entsprechend der Bandbreite $\Delta f = 95$ kHz bei $f_m = 18,72$ MHz, solche Frequenzen praktisch nicht vorhanden. Sie entstehen

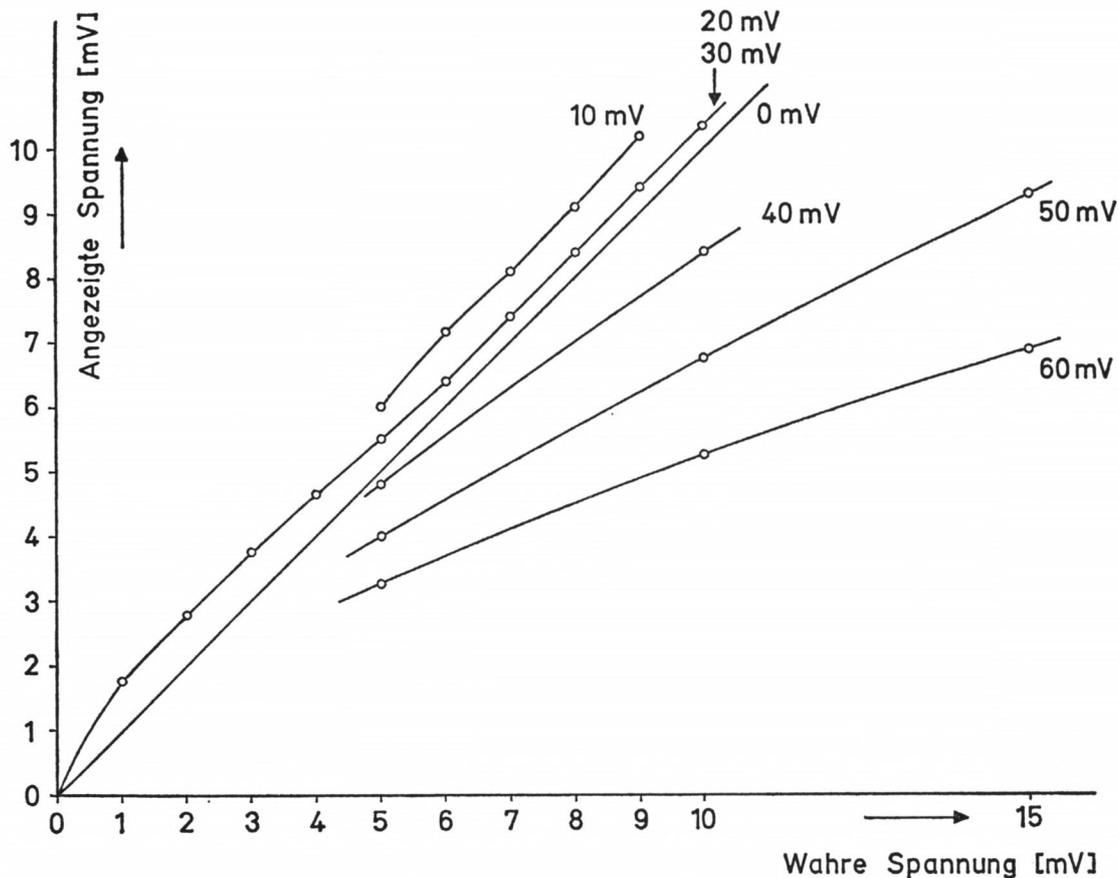


Bild 13: Linearität der Anzeige im 10 mV-Bereich bei Gleichspannungskompensation
 Parameter: Nullpunktsunterdrückung [in mV Wechselspannung]
 Meßfrequenz: 18,5 MHz

erst als Mischprodukte bei der Gleichrichtung. Ist die Gleichrichter-Kennlinie genau bekannt, so können die entstehenden Spannungen berechnet werden [14].

Bei Annahme einer linearen Kennlinie

$$i = \beta \cdot u \quad (u \geq 0)$$

$$i = 0 \quad (u \leq 0)$$

erhält man

$$\sqrt{i^2} = \frac{\beta}{4} \sqrt{\frac{u_R^2 \cdot \pi}{\Delta f \cdot \tau}}$$

Damit wird

$$u_{RNF} = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{u_R^2 \cdot \pi}{\Delta f \cdot \tau}} = \frac{\sqrt{\pi} \cdot u_R}{4 \sqrt{\Delta f \cdot \tau}}$$

u_R = Effektive Rauschspannung am Eingang des Instrumentes

Δf = Bandbreite des ursprünglichen Rauschspektrums

τ = Zeitkonstante des Anzeigeelementes

Von der ursprünglich gemessenen Rauschspannung $u_R \approx 43 \text{ mV}$ ($\Delta f = 95 \text{ kHz}$) bleiben bei $\tau = 1 \text{ s}$ noch

$$u_{RNF} \approx 0,06 \text{ mV}.$$

Tritt zur Rauschspannung u_R am Eingang des Röhrenvoltmeters jetzt ein sinusförmiges Nutzsignal mit dem Effektivwert u_S , so folgt die Anzeige hinter dem Gleichrichter für $u_S/u_R < 1$ nicht einer linearen Zunahme von u_S , sondern steigt zunächst wesentlich langsamer an und geht erst bei $u_S/u_R \gg 1$ in einen linearen Bereich über [14]. Eine theoretisch spitze Minimumkurve erscheint daher auch bei linearer Gleichrichtung verrundet. Bild 14 zeigt schematisch die mit steigendem Rauschpegel u_R zunehmende Verflachung des Minimums.

Bei der Spitzenwert-Gleichrichtung im GM 6014 ist mit noch größerem Rauscheinfluß zu rechnen. In Bild 15 sind die Ergebnisse einer Messung mit diesem Röhrenvoltmeter aufgetragen. Parameter ist der Rauschpegel u_R , der bei der Messung – wie bei den c -Bestimmungen – stets vollständig durch eine Gleichspannung kompensiert wurde.

Die Kurven beginnen daher bei Null, steigen aber bei gleicher zugeführter Signalspannung um so langsamer an, je höher der unterdrückte Rauschpegel ist.

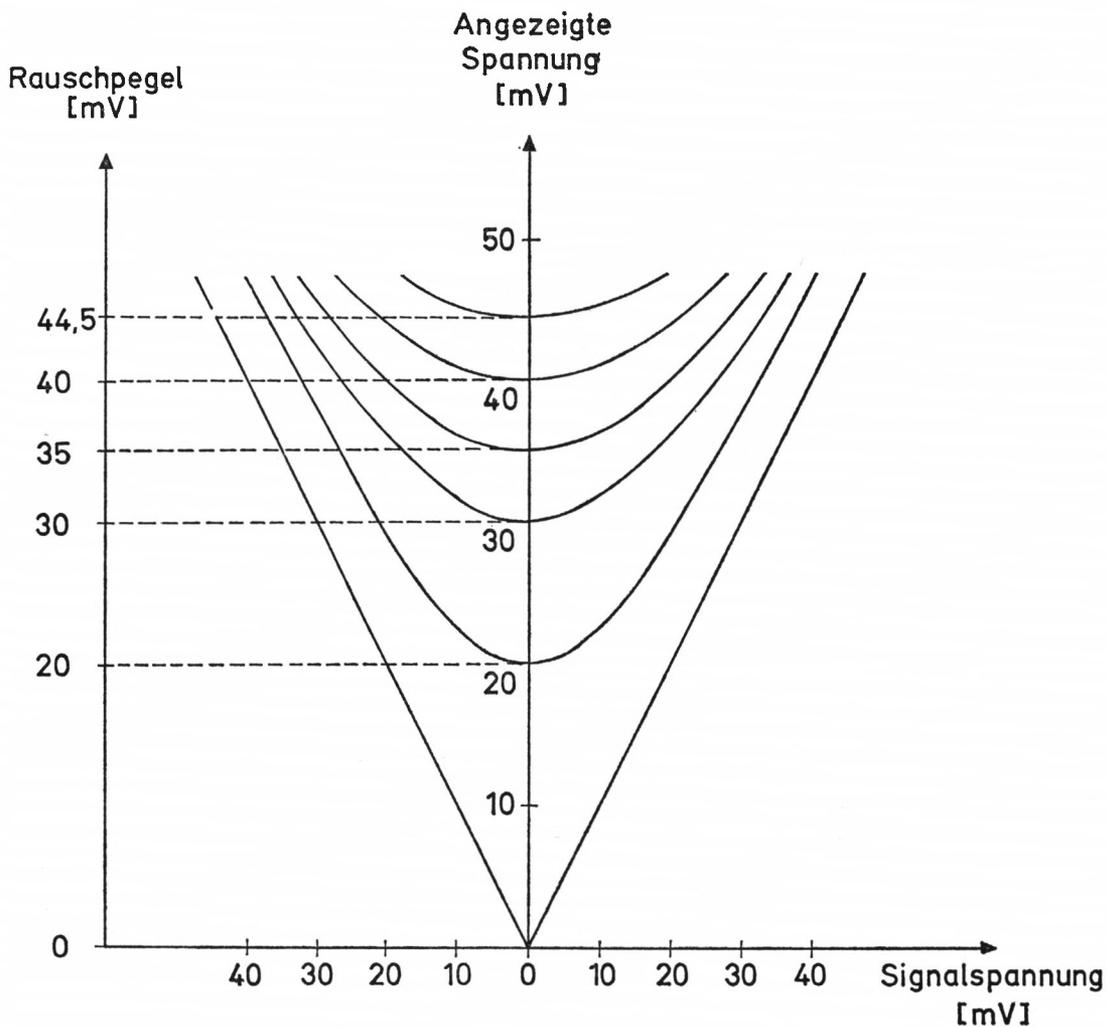


Bild 14: Zunehmende Verflachung des Spannungsminimums mit steigendem Rauschpegel

Elektrische Einstreuungen aus den Netzgeräten und aus der Endstufe können bei günstiger Abschirmung und Erdung sehr klein gehalten werden. Ihr Anteil (hauptsächlich aus der Stromversorgung des Photomultipliers) bleibt stets unter 0,5 mV.

Hauptstörquelle bei den c -Bestimmungen sind die Intensitätsschwankungen der Lichtquelle. Sie überwiegen in der Regel weit die Änderungen von Absorptions- und Streuverlusten auf dem Meßweg, den verbleibenden niederfrequenten Rauschanteil und die Phasenschwankungen durch Störungen im Ultraschall-Lichtmodulator.

Ein Maß für die Güte des Phasenabgleiches ist die „Minimumstiefe“, also die Spannung $[U_{ph}(s_{V\min} \pm w) - U_{ph}(s_{V\min})]$, die am Ende jeder Meßreihe abgelesen wird. Aus ihr kann man, durch Vergleich mit auftretenden Störspannungen, auf die jeweilige Empfindlichkeit der Meßanordnung schließen.

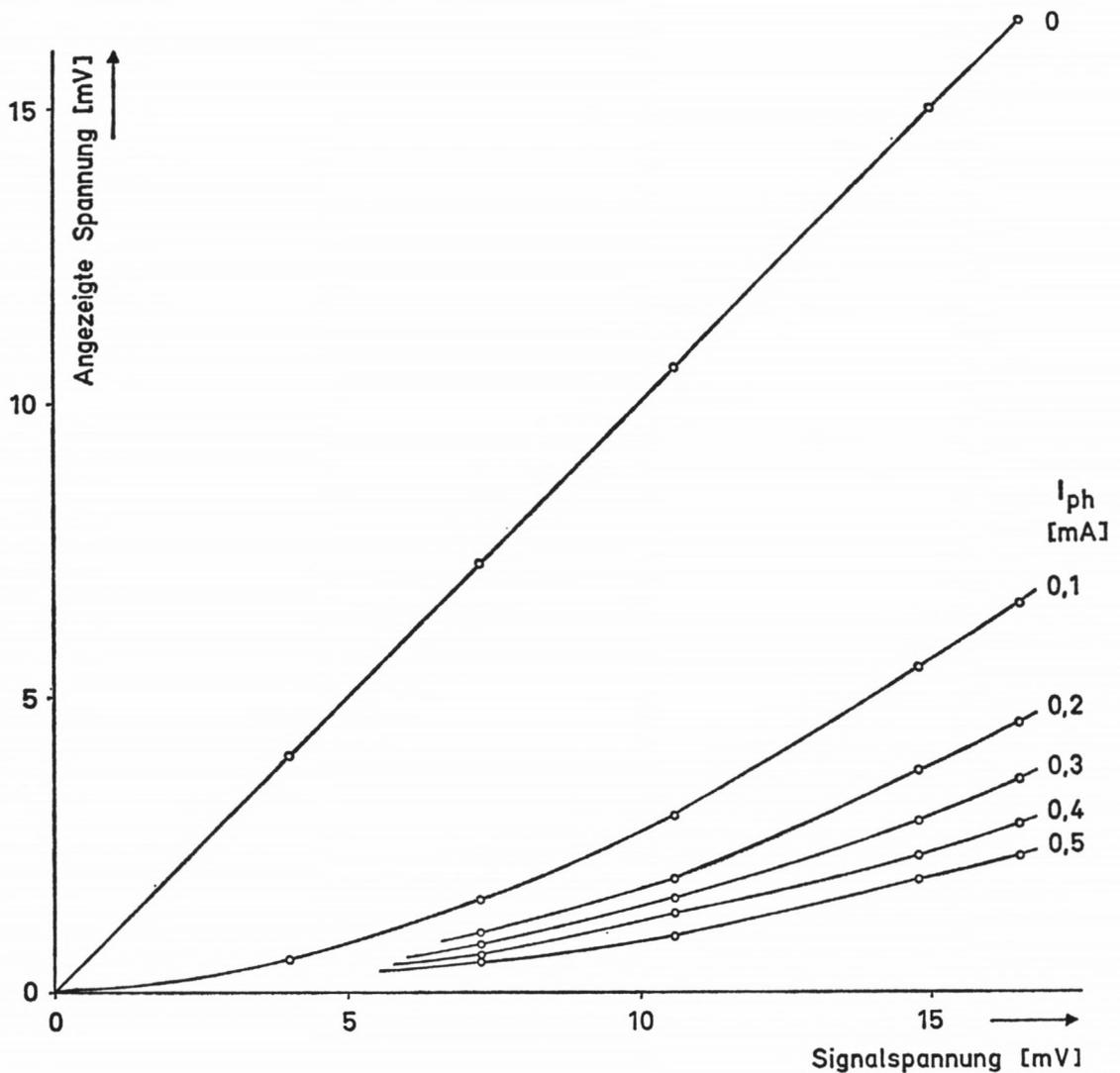


Bild 15: Einfluß des Rauschpegels auf die Empfindlichkeit der Anzeige. (Der Rauschpegel wurde durch eine Gegenspannung jeweils vollständig unterdrückt.)

Photostrom I_{ph} [mA]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
Rauschpegel u_R [mV]	0	20	30	35	40	44,5

Die mittlere Unsicherheit für eine einzelne Minimumeinstellung liegt etwa bei 0,07 mm, für ein Ablesungspaar $\frac{1}{2}(s_{V2}-s_{V1})$ also bei $0,07 \text{ mm} \cdot \sqrt{2} \approx 0,10 \text{ mm}$. Beide Ablesungen werden bei einer Meßreihe mit 50 Werten je 25mal wiederholt. Um die Meßgeschwindigkeit zu erhöhen wurde zugelassen, daß ein Wert von vorneherein in der Nähe seines Vorgängers gesucht wird. Man kommt dabei mit $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ der bei vollkommen blinder Einstellung notwendigen Zeit aus. Bei starken Lampenschwankungen ist der Zeitgewinn noch wesentlich größer. Dadurch war es möglich, auch bei ungünstigen Bedingungen die Zeit zwischen Messung 1 und Messung 2 klein zu halten und Änderungen innerhalb der Apparatur zu eliminieren.

Man darf bei diesem Ableseverfahren allerdings nicht voraussetzen, daß die Werte vollkommen unabhängig voneinander sind. Vor allem fallen die Streuungen naturgemäß zu klein aus. Reelle Änderungen der Minimumlage lassen sich dagegen – wie die Messungen gezeigt haben – gut erkennen. Aus diesem Grunde wurde darauf verzichtet, die Einzelablesungen als „Messungen“ zu bezeichnen; auch eine „mittlere Streuung“ wurde aus ihnen nicht berechnet.

Zur Abschätzung der mittleren Unsicherheit eines aus 25 Wertpaaren ermittelten S_V -Wertes darf man annehmen, daß wenigstens ein Drittel der Werte voneinander unabhängig sind. Getrennte Messungen bei sehr stabiler Apparatur haben dies bestätigt.

Damit ergibt sich für die mittlere Unsicherheit von S_V etwa 0,035 mm entsprechend

$$|\Delta c| \approx 0,219 \text{ km/s.}$$

2. FEHLER IN FREQUENZBESTIMMUNG, STRECKENMESSUNG UND LICHTFÜHRUNG

a) Frequenz

Die Steuerfrequenz f_Q für die Ultraschallquarze wird von einem elektronischen Zähler auf ± 1 Hz angezeigt. Die Unsicherheit der letzten Stelle sinkt im Mittel auf $\pm 0,5$ Hz, da während jeder Meßreihe in regelmäßigen Abständen mindestens 5 Ablesungen gemacht wurden.

Als systematischer Fehler einer Meßreihe kommt hinzu die absolute Abweichung der Normalfrequenz des Zählers vom Nennwert. Bis M 131 einschließlich dieser Meßreihe und bei M 175 und M 176 diente der interne Quarz des Zählers als Bezugsnormal, dessen Frequenz mit der Trägerfrequenz des Senders Droitwich verglichen wurde. Der Meßfehler beträgt hierbei etwa $1 \cdot 10^{-7}$.

Einen größeren Frequenzfehler können die Meßreihen M 29–M 67 aufweisen, da bei diesen Messungen der Frequenzvergleich mit Droitwich fehlte. Nach späteren Untersuchungen muß man hierbei mit einer Unsicherheit von ± 10 Hz rechnen. Es ist jedoch zu erwarten, daß f_Q während dieser Messungen auf etwa ± 2 Hz konstant blieb, so daß sie untereinander innerhalb dieser Fehlergrenze vergleichbar sind.

Die Meßreihen M 29–M 67 wurden wegen ihres möglichen systematischen Fehlers nicht in die Gesamtwertung einbezogen.

Von M 132 ab steuerten Sekundenimpulse einer stationären Quarzuhr (die ihrerseits bei täglichen Kontrollen gegen Droitwich maximale Frequenzabweichungen von $1 \cdot 10^{-9}$ hat) den Zähler. Die Bezugsfrequenz hat hierbei einen Fehler von höchstens $1 \cdot 10^{-9}$ ihres Wertes.

Als mittlere Frequenzfehler ergeben sich demnach:

$$\text{I. Mit internem Normal: } |\Delta f| = 0,5 \text{ Hz} + 1 \text{ Hz} = 1,5 \text{ Hz}$$

$$\left| \frac{\Delta f}{f_0} \right| = \frac{1,5}{9,36} \cdot 10^{-6} \approx 1,6 \cdot 10^{-7} \rightarrow |\Delta c| \approx 0,048 \text{ km/s}$$

$$\text{II. Mit externem Normal: } |\Delta f| = 0,5 \text{ Hz} + 0,01 \text{ Hz} \approx 0,5 \text{ Hz}$$

$$\left| \frac{\Delta f}{f_0} \right| = \frac{0,5}{9,36} \cdot 10^{-6} \approx 0,6 \cdot 10^{-7} \rightarrow |\Delta c| \approx 0,018 \text{ km/s}$$

Ein allen Meßreihen gemeinsamer und somit für das Meßergebnis systematischer Fehler müßte unter $1 \cdot 10^{-8}$ liegen und kann deshalb hier vernachlässigt werden.

b) Streckenmessung

Der Abstand der Zentrierstangen wird bei einer Interferenzmessung mit einer mittleren Unsicherheit von $\pm 4 \mu\text{m}$ angegeben. Diese Genauigkeit geht durch Pfeilerbewegungen verloren.

Aufschluß über die Zuverlässigkeit der Invarband-Interpolationen erhält man durch Vergleich der aus aufeinanderfolgenden Komparator-Messungen gewonnenen „wahren Streckenänderungen“ mit entsprechenden Bandablesungen. Aus 23 Vergleichen ergab sich für die 48 m-Strecke ein durchschnittlicher Fehler von $10 \mu\text{m}$ (Tabelle 4a).

Die Messungen sind nicht geeignet, die gewöhnlich im Laufe eines Tages vorkommenden Pfeilerbewegungen festzustellen (Tabelle 4b). Nur wenn die Strecke sehr großen Schwankungen unterworfen ist, bringen Invarband-Messungen neben täglichen Interferenzmessungen einen Gewinn.

Anders bei den Meßreihen M 187 bis M 281, bei denen die Basis nicht jeden Tag mit dem VÄISÄLÄ-Komparator ausgemessen werden konnte. In Tabelle 4c sind die Ergebnisse der Interpolationsmessungen zusammengestellt und die Differenzen errechnet, die man erhält, wenn an ihrer Stelle die Resultate der jeweils zeitlich am nächsten liegenden Interferenzmessung benutzt werden. Aus 96 Werten ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung von $22 \mu\text{m}$. Hier verringern die Invarband-Interpolationen den mittleren Fehler also auf die Hälfte.

Bei der Auswertung der c -Messungen wurden die aus Interpolationsmessungen errechneten Streckenlängen immer dann verwendet, wenn für den betreffenden Tag keine Interferenzmessung vorlag.

Die mittlere Unsicherheit der Basismessung beträgt damit

$$\sqrt{4^2 + 10^2} \mu\text{m} \approx 11 \mu\text{m}$$

An die Zentrierstangen der Pfeiler werden beide Spiegelpaare über den Zentrierapparat der VÄISÄLÄ-Apparatur und über die Dreieckschablone angeschlossen. Der dabei entstehende mittlere Fehler entspricht dem Lotungsfehler der Interferenzmessung. Er beträgt für beide Anschlüsse zusammen etwa $\pm 4 \mu\text{m}$.

Bei der Spiegeljustierung mit Hilfe der Dreieckschablone muß für beide Spiegelpaare zusammen mit einem maximalen Fehler von $15 \mu\text{m}$ gerechnet werden. Dieser Fehler ent-

Tabelle 4a: Zuverlässigkeit der Invarband-Messungen

Interferenz-Messung	Tag	Streckenlänge [mm]	ΔJ [μm]	ΔB [μm]	$\Delta J - \Delta B$ [μm]
204	10. 4. 64	48.020,915	+ 36	+ 13	+ 23
205	13. 4.	951	+ 44	+ 56	- 12
206	17. 4.	995	- 22	- 13	- 9
207	20. 4.	973	+ 5		
208	24. 4.	978	- 48	- 59	+ 11
209	27. 4.	930	+ 46	+ 32	+ 14
210	30. 4.	976			
211	13. 7. 64	48.021,147	+ 53	+ 57	- 4
212	14. 7.	200	+ 79	+ 82	- 3
213	17. 7.	279	+ 117	+ 121	- 4
214	21. 7.	396	- 7	- 11	+ 4
215	24. 7.	389			
216	31. 8. 64	48.021,243	- 40	- 40	0
217	1. 9.	203	- 44	- 42	- 2
218	7. 9.	159	- 31	- 33	+ 2
219	14. 9.	128	- 59	- 24	- 35
220	21. 9.	069	- 51	- 56	+ 5
221	22. 9.	018	- 34	- 57	+ 23
222	28. 9.	48.020,984	- 46	- 39	- 7
223	7. 10.	938	- 55		
224	13. 10.	883	- 27	- 2	- 25
226	14. 10.	856	+ 2	- 17	+ 19
228	15. 10.	858			
235	5. 3. 65	48.020,554	+ 3	+ 1	+ 2
236	11. 3.	557	- 3	- 5	+ 2
237	15. 3.	554	+ 60	+ 50	+ 10
238	17. 3.	614	+ 42	+ 51	- 9
239	22. 3.	656	+ 34	+ 25	+ 9
240	24. 3.	690			

ΔJ = Differenz der Interferenzmessungen

ΔB = Differenz der Invarband-Messungen

Durchschnittliche Abweichung
(aus 23 Messungen): $\frac{234 \mu\text{m}}{23} \approx 10 \mu\text{m}$

fällt weitgehend, wenn die Spiegelpaare regelmäßig vertauscht werden. Er bewirkt dann lediglich eine etwas größere Streuung der einzelnen ϵ -Werte, hat auf den Mittelwert aus vielen Meßreihen aber keinen Einfluß.

Damit ergibt sich der mittlere Fehler von S_M zu

$$\sqrt{4^2 + 10^2 + 4^2} \mu\text{m} \approx 12 \mu\text{m}$$

Tabelle 4b: Interpolationsmessungen verglichen mit täglichen Interferenzmessungen

M	Tag	Interferenz-Messung [mm]	Interpolations-Messung [mm]	Δ [μm]
1	18. 6. 63	48.021,107	48.021,112	+ 5
2			121	+ 14
7	21. 6.	110	125	+ 15
8			155	+ 45
9	24. 6.	171	175	+ 4
22	3. 7.	284	323	+ 39
23	4. 7.	304	309	+ 5
24			313	+ 9
25	5. 7.	315	315	0
26			318	+ 3
27	8. 7.	341	341	0
28			340	- 1
31	10. 7.	308	314	+ 6
32			325	+ 17
33	11. 7.	311	313	+ 2
34			315	+ 4
35	12. 7.	292	292	0
36			292	0
41	16. 7.	339	338	- 1
42	17. 7.	345	350	+ 5
43			360	+ 15
44			360	+ 15
47	19. 7.	413	412	- 1
48	22. 7.	485	457	- 28
49			476	- 9
50	23. 7.	486	490	+ 4
51			498	+ 12
66	2. 8.	474	474	0
67			510	+ 36

Durchschnittliche Abweichung der Interpolationsmessungen
von der täglichen Interferenzmessung (aus 29 Messungen) $\frac{295 \mu\text{m}}{29} \approx 10 \mu\text{m}$

und unter Einschluß der Justierfehler

$$\sqrt{4^2 + 10^2 + 4^2 + 15^2} \mu\text{m} \approx 19 \mu\text{m}.$$

Er soll hier zu 20 μm abgeschätzt werden und entspricht dann

$$|\Delta c| = 0,125 \text{ km/s}$$

In diesem Wert nicht enthalten sind systematische Fehler des Quarzmeters. Alle hier verwendeten Messungen mit dem VÄISÄLÄ-Interferenzkomparator gehen vom Maßstab Nr. 42 aus. Die Länge dieses Endmaßes aus Quarzglas wurde bei den Auswertungen mit $1 \text{ m} + 33,16 \mu\text{m}$ eingesetzt. Nach sehr genauen Relativmessungen von Y. VÄISÄLÄ ist nicht

Tabelle 4c: Interpolationsmessungen

M	Interferenz-M. [mm]	Interpolat.-M. [mm]	Δ [μm]	M	Interferenz-M. [mm]	Interpolat.-M. [mm]	Δ [μm]
187	48.020,951	48.020,950	- 1	235		48.021,368	- 28
188		958	+ 7	236		382	- 14
189		962	+ 11	237		382	- 14
190		952	+ 1	238		395	- 1
191		960	- 35	239	48.021,396	407	+ 11
192		949	- 46	240		419	+ 23
193		965	- 30	241		427	+ 31
194	48.020,995	977	- 18	242		427	+ 31
195	48.020,973	977	+ 4	243		426	+ 30
196		981	+ 8	244		430	+ 34
197		981	+ 8	245		437	+ 41
198		983	+ 10	246		446	+ 50
199		987	+ 14	247		425	+ 36
200		985	+ 12	248		418	+ 29
201		983	+ 10	249		418	+ 29
202		983	+ 10	250		418	+ 29
203		993	+ 15	251	48.021,389	386	- 3
204		996	+ 18	252		385	- 4
205		987	+ 9	253		389	0
206		991	+ 13	254		389	0
207		992	+ 14	255	48.021,203	148	- 55
208		993	+ 15	256	48.021,159	132	- 27
209	48.020,978	971	- 7	257		131	- 28
210		975	- 3	258		116	- 43
211	48.020,930	931	+ 1	259		118	- 41
212		933	+ 3	260		112	- 47
213		937	+ 7	261		128	- 31
214		949	+ 19	262	48.021,128	136	+ 8
215		952	+ 22	263		150	+ 22
216		957	+ 27	264		167	+ 39
217		961	- 15	265		172	+ 44
218		964	- 12	266		195	+ 67
219		971	- 5	267		189	+ 61
220		974	- 2	268		186	+ 58
221		971	- 5	269		148	+ 79
222		971	- 5	270	48.021,069	140	+ 71
223	48.021,147	48.021,175	- 28	271	48.021,018	48.020,962	- 56
224		175	- 28	272		941	- 77
225		189	- 11	273		954	- 30
226	48.021,200	189	- 11	274	48.020,984	958	- 26
227		197	- 3	275		974	- 10
228		207	+ 7	276		964	- 20
229		265	- 14	277		961	- 23
230		270	- 9	278		955	+ 17
231	48.021,279	291	+ 12	279		958	+ 20
232		309	+ 30	280A		930	+ 8
233		309	+ 30	280	48.020,938	938	0
234		356	- 40	281		952	+ 14

Durchschnittliche Abweichung der Interpolationsmessung von der ihr zeitlich am nächsten liegenden Interferenzmessung (aus 96 Messungen):

$$\frac{2125 \mu\text{m}}{96} \approx 22 \mu\text{m}$$

zu erwarten, daß sich der Maßstab zwischen 1961 und 1964 durch Alterung um mehr als die Eichgenauigkeit ($\pm 0,02 \mu\text{m}$) geändert hat.

Eine absolute Eichung wurde 1964 von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig vorgenommen. Laut Prüfschein vom 24. 6. 1964 beträgt die Länge des Quarzmeters Nr. 42 $1 \text{ m} + 34,21 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$. Zu allen in den Abschnitten V bis VI. 2 aufgeführten Werten ist demnach

$$\Delta c_0 = \frac{\Delta L}{L} \cdot c_0 = \frac{1,05 \cdot 10^{-6}}{1} \cdot 299\,792 \text{ km/s} \approx 0,315 \text{ km/s}$$

zu addieren.¹

c) Lichtführung

Die Lage des Lichtes auf den beiden Spiegelpaaren wird mit Blechschablonen überwacht, die bei der Justierung an die Spiegelgrundplatten festgeschraubt werden. Durch zwei kreisrunde Öffnungen mit 69 mm Durchmesser fällt der größte Teil des Lichtes auf das Spiegelpaar und kehrt zum Meßtisch zurück. Nur der Rand des Bündels beleuchtet die genau zentrierte Schablone. Die Grundplatten selbst liegen nach Libelleneinstellung horizontal und mit dem Meßtisch auf gleicher optischer Höhe.

Das zurückkommende Licht trifft an der Empfangslinse auf eine Zielscheibe und wird dort auf Lage und Bündeldurchmesser kontrolliert. Bei der c -Messung werden alle Schablonen entfernt, damit sie das Meßlicht nicht beschneiden. Nur an der Empfangslinse wird die Kontrollscheibe auch zwischen den Messungen einer Reihe gelegentlich eingesetzt, um sicherzustellen, daß die Lichtjustierung sich nicht ändert.

Die Abweichungen des Lichtes vom vorgesehenen geometrischen Weg werden mit $10 \mu\text{m}$ berücksichtigt. Sie entsprechen

$$|\Delta c| = 0,062 \text{ km/s}$$

¹ Für die beiden Quarzmaßstäbe des D.G.F.I. in München liegen bisher folgende Eichungen vor:

	Maßstab Nr. 42	Maßstab Nr. 53
A	$1 \text{ m} + 33,16 \mu\text{m}$	$1 \text{ m} + 33,56 \mu\text{m}$ [15]
B	$1 \text{ m} + 34,21 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$	$1 \text{ m} + 34,57 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$
C		$1 \text{ m} + 34,84 \mu\text{m} \pm 0,03 \mu\text{m}$

A Ursprüngliche Eichung in Turku (Finnland) 1960 (Nr. 42) bzw. 1962 (Nr. 53) durch Anschluß an zwei 1953 beim Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) in Sèvres geeichte Quarzmaßstäbe von 1 m Länge.

Die Eichung des Maßstabes Nr. 53 ist 1964 nach der Messung B wiederholt worden, um echte Längenänderungen feststellen zu können. Innerhalb von $\pm 0,02 \mu\text{m}$ ergab sich der frühere Wert.

B Absolute Eichung bei der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig, Prüfungsscheine vom 24. 6. 1964.

C Absolute Eichung beim BIPM in Sèvres, Certificat vom 10. 12. 1965.

Danach besteht zwischen den Eichungen A und B ein systematischer Unterschied von etwa $1 \mu\text{m}$, der mit großer Wahrscheinlichkeit zu Lasten der Eichung A geht. Herr Professor Dr. Y. VÄISÄLÄ hat 1965 in Turku ebenfalls eine Absolutmessung vorgenommen und nach vorläufigen Ergebnissen den von der PTB festgestellten Wert bestätigt.

Der Unterschied von $0,27 \mu\text{m}$ (etwa $3 \cdot 10^{-7}$) zwischen den Eichungen B und C konnte bisher nicht geklärt werden.

3. FEHLER IN DER ERMITTLUNG DER METEOROLOGISCHEN DATEN

Der Einfluß von Temperatur ϑ_m , Partialdruck des Wasserdampfes e und Luftdruck p ergibt sich aus Abschnitt II, 2. Da λ_0 während einer Meßreihe konstant bleibt und n_g in Luft ≈ 1 ist, gilt:

$$\frac{\Delta n_g}{n_g} \approx \Delta n_g = \frac{\partial n_g}{\partial \vartheta_m} \Delta \vartheta_m + \frac{\partial n_g}{\partial e} \Delta e + \frac{\partial n_g}{\partial p} \Delta p$$

mit

$$\frac{\partial n_g}{\partial \vartheta_m} = -\frac{n_g - 1}{1 + \alpha \vartheta_m} \cdot \alpha \approx -1 \cdot 10^{-6} \text{ je } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\partial n_g}{\partial e} = -\frac{55 \cdot 10^{-9}}{1 + \alpha \vartheta_m} \approx -0,05 \cdot 10^{-6} \text{ je Torr}$$

$$\frac{\partial n_g}{\partial p} \approx \frac{n_g - 1}{p} \approx +0,4 \cdot 10^{-6} \text{ je Torr}$$

die angegebenen Werte wurden für $\lambda_0 = 0,435 \dots 0,546 \mu\text{m}$ bei $\vartheta_m = 20^\circ\text{C}$, $e = 10$ Torr und $p = 715$ Torr berechnet.

Die einzelnen im Meßkeller angebrachten Thermometer weisen untereinander und beim Vergleich mit einem an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig geeichten Thermometer Abweichungen von weniger als $0,1^\circ\text{C}$ auf. Sie werden bei den c -Bestimmungen auf $\pm 0,05^\circ\text{C}$ abgelesen. Der mittlere Fehler $|\Delta \vartheta_m|$ bei der Messung der Lufttemperatur liegt demnach unter $0,15^\circ\text{C}$.

$$\left| \frac{\Delta c}{c} \right| < 1 \cdot 10^{-6} \cdot 0,15 = 1,5 \cdot 10^{-7}. \quad |\Delta c| < 0,045 \text{ km/s}$$

Am ASSMANN-Aspirations-Psychrometer werden die beiden Thermometer mit einem Fehler $\lesssim 0,1^\circ\text{C}$ abgelesen. Damit kann p'_0 mit einem Fehler $|\Delta p'_0| \lesssim 0,2$ Torr ermittelt werden ($\vartheta \approx 20^\circ\text{C}$).

$|\Delta p|$ ist sicher kleiner als 1 Torr. So ergibt sich nach der SPRUNG'schen Formel e mit einem Fehler $|\Delta e| \lesssim 0,24$ Torr.

$$\left| \frac{\Delta c}{c} \right| < 0,05 \cdot 10^{-6} \cdot 0,24 = 0,12 \cdot 10^{-7}. \quad |\Delta c| < 0,004 \text{ km/s}$$

Das Normalbarometer gestattet eine Messung des Luftdruckes mit einem Fehler von etwa $0,1$ Torr. Übertragungsfehler auf das Dosenbarometer sollen mit $0,05$ Torr berücksichtigt werden. Der mittlere Fehler bei der Bestimmung von p liegt somit bei $|\Delta p| \approx 0,15$ Torr.

$$\left| \frac{\Delta c}{c} \right| \lesssim 0,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,15 = 0,6 \cdot 10^{-7}. \quad |\Delta c| \lesssim 0,018 \text{ km/s}$$

Als mittlerer Fehler bei der Bestimmung der meteorologischen Daten ϑ_m , e , p erhält man

$$|\Delta c| \approx \sqrt{0,045^2 + 0,004^2 + 0,018^2} \text{ km/s} \approx 0,049 \text{ km/s}$$

4. STATISTISCHE FEHLER DURCH LAUFZEITSTREUUNG UND PHASENSTRUKTUR

a) Die Laufzeitstreuung des Photomultipliers

Der Abstand Opalglasscheibe–Photokathode beträgt im vorliegenden Meßaufbau 32 mm. Die Größe der Bilder auf der Vorderseite der Streuscheibe liegt unter 0,5 mm (Tabelle 3). Es ist schwer, die bei guter Justierung noch verbleibende Laufzeitstreuung sicher zu messen. Fehljustierungen, wie sie bei den c -Bestimmungen auftreten können, lassen sich durch Verschieben des Meßlichtes auf der Opalglasscheibe nachbilden, wenn es gelingt, alle anderen Einflüsse dabei konstant zu halten. Wegen stets möglicher Phasenänderungen auf dem inneren Lichtweg bleibt auch hier nur der Ausweg einer Differenzmessung:

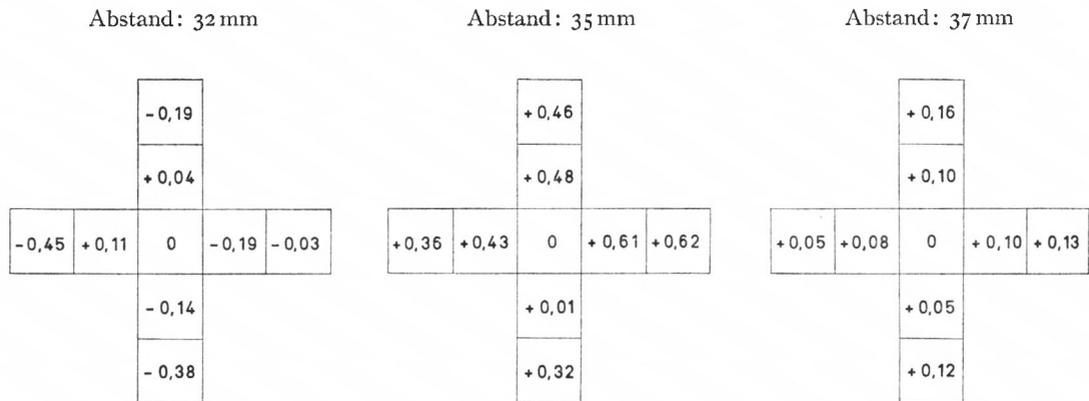
Man geht von der richtigen Lage der beiden Bilder aus, verschiebt das Meßlicht um einen definierten Betrag und sucht die zugehörige Minimumslage. Hierauf kehrt man zur Ausgangsstellung zurück und überprüft den ursprünglichen Wert von s_V .

Untersuchungen bei $\lambda_0 = 0,546 \mu\text{m}$, $f_0 = 9,36 \text{ MHz}$ und $F_3 = 1000 \text{ mm}$, $F_4 = 950 \text{ mm}$ mit dem Photomultiplier RCA 7326 Nr. 8.8.392 lieferten folgende Ergebnisse:

Bei Verschiebungen des Meßlichtes bis zu 0,05 mm ($\triangleq 1/4$ Bildbreite) waren signifikante Änderungen der Minimumslage nicht festzustellen. Bei größeren Verschiebungen nahm die Abweichung nicht immer monoton zu; die Fehler können bei Lageänderungen um 0,1 mm u. U. größer sein als bei Verschiebungen des Meßlichtes um 0,2 mm. Im allgemeinen wachsen sie jedoch mit dem Abstand der Bilder.

Ein größerer Abstand Streuscheibe–Photokathode verkleinert in der Regel die Fehler durch Laufzeitstreuung, verringert aber auch das Nutzlicht.

Auch hier sinken die Fehler nicht immer monoton mit wachsendem Abstand. So waren z. B. die Änderungen der Minimumslage bei einer Entfernung von 35 mm z. T. größer als bei 32 mm und gingen erst bei 37 mm weiter zurück.



Von vorne auf die Streuscheibe gesehen. Werte in mm Streckenänderung

Bildgröße: 0,22 mm breit	}	horizontal und vertikal
0,42 mm hoch		

Verschiebung: $\pm 0,1 \text{ mm}$
 $\pm 0,2 \text{ mm}$

Bild 16: Änderung der Minimumslage bei Verschiebung des Meßlichtes auf der Streuscheibe

Da die Ausleuchtung der Photokathode, ihre örtliche Empfindlichkeit und die vom Ausgangsort der Elektronen abhängige Laufzeit hier zusammenwirken, dürften die gefundenen Werte stark vom verwendeten Photomultiplier, seiner jeweiligen Lage, seinen Betriebsspannungen und seiner Ausleuchtung abhängen. Die in Bild 16 dargestellten Laufzeit-einflüsse sind daher nur als Beispiel einer solchen Messung zu werten. Die mittlere Unsicherheit betrug etwa $\pm 0,07$ mm ($\triangleq 0,5 \cdot 10^{-12}$ s).

Für die Lichtgeschwindigkeits-Messung ist demnach zu fordern, daß die Meßlichter über s_{M1} und s_{M2} höchstens um 0,05 mm gegeneinander versetzt auf der Streuscheibe auf-treffen. Die Fehler durch Laufzeitstreuung liegen dann unter 0,07 mm. Bei mehreren auf-einanderfolgenden Meßreihen ist nicht zu erwarten, daß der Fehler stets gleiches Vor-zeichen hat. Da die Meßlichter vor jeder Meßreihe neu eingestellt werden, ändern die beiden Bilder sicher häufig ihre gegenseitige Lage innerhalb der vorgegebenen Toleranz. Die c -Werte der einzelnen Meßreihen werden deshalb statistisch um einen Mittelwert streuen.

Als Folge der Laufzeitstreuung sind bei Messungen über 48 m Abweichungen von höch-stens 0,438 km/s zu erwarten. Setzt man den mittleren Fehler auf die Hälfte dieses Betrages an, so entspricht er

$$|\Delta c| = 0,219 \text{ km/s}$$

Diese Unsicherheit wächst bei 24-m-Messungen auf den doppelten Wert, wenn die gleiche Justiergenauigkeit erreicht wird.

b) Die Phasenstruktur des modulierten Lichtes

Es ist bisher kein Modulator bekannt, der die Intensität eines Lichtbündels an allen Stellen seines Querschnittes homogen und streng gleichzeitig ändert. Die Ursachen hierfür sind je nach dem verwendeten Modulator verschieden. Vergleicht man die Modulations-phasen einzelner Teilbündel, so weichen diese zum Teil erheblich voneinander ab: Das Ge-samtbündel hat eine Phasenstruktur.

Im Photoempfänger wird die mittlere Modulationsphase φ gemessen, die sich aus den Phasen φ_k der k Teilbündel zusammensetzt:

$$\varphi = \arctan \frac{\sum_k A_k \sin \varphi_k}{\sum_k A_k \cos \varphi_k}$$

A_k = Intensität des k^{ten} Teilbündels

φ_k = Phasenwinkel des k^{ten} Teilbündels.

Beispiele für die Phasenstruktur der zur c -Messung verwendeten Lichtbündel bringt Bild 20. Die Messung der einzelnen Teilphasen ist in [6] beschrieben worden.

Da die φ_k untereinander nicht gleich sind, hat im allgemeinen jede unterschiedliche Änderung der A_k auch Einfluß auf φ . Sie kann, sofern sie innerhalb einer Meßreihe kon-stant bleibt, zu einer systematischen Verfälschung des Meßergebnisses führen.

Die Größe des Fehlers ist zunächst nicht abzuschätzen, weil die Störquellen und ihr Einfluß auf φ nicht bekannt sind. Im Verlaufe der vorliegenden Messungen sind Unter-suchungen solcher systematischer Einflüsse in großer Vielfalt durchgeführt worden. Der Abschnitt VI. 1. a bringt eine Zusammenstellung und die Diskussion der Ergebnisse.

Setzt man voraus, daß sich systematische Fehler, verursacht durch ungewollte Änderung der Phasenstruktur auf einem der Meßwege, nicht mehr nachweisen lassen, so darf man ihren Einfluß gleich der Unsicherheit der Minimumeinstellung setzen:

$$|\Delta c| = 0,219 \text{ km/s.}$$

5. UNSICHERHEIT EINER MESSREIHE

(Alle Werte als $|\Delta c|$ in km/s eingesetzt)

		0-48 m		24-48 m	
		I	II	I	II
1	Minimumeinstellung	0,219	0,219	0,438	0,438
2	Frequenz	0,048	0,018	0,048	0,018
	Strecke, Lichtführung	0,140	0,140	0,280	0,280
3	Meteorologische Daten	0,049	0,049	0,049	0,049
4	Photomultiplier	0,219	0,219	0,438	0,438
	Phasenstruktur, Spiegel	0,219	0,219	0,438	0,438
zusammen:		0,410	0,408	0,812	0,810

I = Messungen mit internem Frequenznormal

II = Messungen mit externem Frequenznormal

Nach dieser Abschätzung ist zu erwarten, daß die mittlere Streuung

bei Meßreihen über 48 m unter 0,42 km/s

bei Meßreihen über 24 m unter 0,82 km/s

bleiben wird.

V. DIE MESSUNGEN

1. ABLAUF EINER MESSUNG

Mit der beschriebenen Anlage sind bisher mehr als 250 Meßreihen aufgenommen worden. Trotzdem lassen sich die Lichtgeschwindigkeitsbestimmungen nicht als Routinemessungen ausführen. Die Anforderungen an die Apparatur sind so hoch, daß stets sehr gute Justierung, große Sorgfalt und kritische Aufmerksamkeit während der Messung notwendig sind, um Fehlermöglichkeiten und Störungen rechtzeitig zu erkennen und zu eliminieren. Daneben ändern sich die Meßbedingungen durch äußere Einflüsse und vor allem durch die im Arbeitsprogramm vorgesehenen Umbauten, durch den Wechsel der Lichtfarbe und der ausnutzbaren Intensität.

Es ist nicht immer möglich, eine Baugruppe oder ein Bauelement für sich so weit zu prüfen, daß ein einwandfreies Arbeiten im Meßaufbau gewährleistet ist. Das empfindlichste Prüfverfahren ist in vielen Fällen die Messung selbst. Die in den Ablauf einer Meßreihe eingebauten Kontrollen sollen weitgehend sicherstellen, daß die gewählte Einstellung reproduzierbar ist oder gezielt verändert werden kann. Umbauten wurden nach Möglichkeit zwischen zwei unmittelbar hintereinanderliegenden Meßreihen vorgenommen. Nach längeren Unterbrechungen wurden meist die letzten Meßreihen wiederholt. Zeigte sich im Resultat einer Meßgruppe eine auffallende Abweichung von anderen Meßergebnissen, so war festzustellen, ob die Verschiebung des Meßwertes für den betreffenden Aufbau kennzeichnend ist, ob also ein systematischer Einfluß vorlag. Aus diesem Grunde wurden manche Meßgruppen mit besonderer Sorgfalt wiederholt.

Für die einzelnen Meßreihen hat sich die im folgenden skizzierte Einteilung bewährt.

A. Basismessung

1. Der Abstand der Zentrierstangen wird mit dem Interferenzkomparator nach VÄISÄLÄ ausgemessen („Interferenzmessung“).
2. Unmittelbar danach wird der Abstand der Strichmarken auf Invarband und Pfeiler mit dem Meßmikroskop festgestellt. („Bandablesung“).

B. c -Bestimmung

I. Vorbereitung

1. Die Spiegelpaare $C-D$ werden auf den 0-m- (oder 24-m-) und den 48-m-Pfeiler gesetzt. (Sie mußten zur Ausführung der Interferenzmessung entfernt werden.) Auf dem 48-m-Pfeiler wird die senkrechte Stellung beider Einzelspiegel mit einem Nivellierinstrument überprüft.
2. Die Lichtquelle, die Modulationsspannung und die Stromversorgung des Photomultipliers werden eingeschaltet, damit die Apparatur bis zur Messung ihren thermischen Endzustand erreicht.

3. Die Lage des Meßlichtes auf den beiden Spiegelpaaren, auf der Empfangslinse und auf der Streuscheibe wird kontrolliert, Spiegel, Meßtisch und Vergleichslicht, wenn nötig, nachjustiert.
4. Jetzt kann der Amplitudenabgleich vorgenommen werden. Ein geeignetes Neutralfilter (abhängig von den jeweiligen Lichtverlusten auf dem Meßweg) wird in den Vergleichsweg eingebaut.
Danach ist die Lage des Lichtes auf der Streuscheibe erneut zu kontrollieren; falls notwendig, wird das Vergleichslicht nachjustiert.
Hierauf: Phasenabgleich für C_1-D_1 und für C_2-D_2 .
5. Jetzt oder am Ende der Messung „Bandablesung“.
6. Der Abstand Zentrierstange–Dreieckschablone wird zunächst am V -, dann am H -Spiegelpaar gemessen ($\rightarrow [H-V]$), die Thermometer längs der Strecke ($\rightarrow \vartheta_m$), das Psychrometer ($\rightarrow e$) und das Barometer ($\rightarrow p$) werden abgelesen.

II. Messung

Bis hierher wurde nur zur Lichtjustierung I, 3 die Raumbelichtung abgeschaltet. Für die Kontrollmessung I, 4 genügt eine Abdunklung der Umgebung des Meßtisches. Jetzt wird die Raumbelichtung vollständig gelöscht.

1. Letzte Feinjustierung der Lichtquelle (Lage des Bogens, Leistungsaufnahme).
Die Fokussierspannung des Photomultipliers wird auf maximalen Photostrom J_A eingestellt, der Empfangskreis genau abgeglichen, die Modulationsspannung U_Q kontrolliert.
2. Jetzt beginnt die Messung, deren Dauer im Meßprotokoll vermerkt wird.
Der Phasenabgleich am V - und am H -Spiegelpaar wird 50- oder 25-fach wiederholt ($\rightarrow S_V$). Zusätzlich sind in regelmäßigen Zeitabständen abzulesen und zu notieren:
die Steuerfrequenz f_Q
der Anodenstrom des Photomultipliers J_A
die Modulationsspannung U_Q
die Lampenspannung U_L und der Lampenstrom J_L
die Neutralfilter-Nennwerte bei Messung 1 und bei Messung 2.
3. Die Reihe schließt mit der Messung der Minimumtiefe und – wenn dies für die Untersuchung wichtig ist – mit der Aufnahme der konstanten Einstreuungen. Hier kann die Raumbelichtung wieder eingeschaltet werden. In das Meßprotokoll sind noch einzutragen:
die Nennwerte der Neutralfilter im Vergleichsweg,
die Lampennummer,
die jeweils wichtigen optischen Parameter: F_S , F_E , Empfangswürfel oder -spiegel, Art der Streuscheibe usw.

III. Abschluß

Der Abstand Zentrierstange–Dreieckschablone wird zunächst am H -, dann am V -Spiegelpaar gemessen. Thermometer, Psychrometer und Barometer werden wie bei I, 6 abgelesen.

C. Basismessung. Frequenzzeichnung

1. Nach einem Tag oder nach wenigen Tagen – je nach Möglichkeit – werden Interferenzmessung und Bandablesung nach A wiederholt.

2. Täglich oder im Abstand von wenigen Tagen wird die Normalfrequenz mit der Trägerfrequenz des Senders Droitwich verglichen.

Zu einer c -Messung sind zwei Mitarbeiter (Physiker oder Ingenieure) erforderlich, die sich in die Ablese- und Protokollarbeit teilen. Die Komparatormessungen wurden von einem Diplomingenieur des Vermessungswesens ausgeführt.

2. MESSPROTOKOLL UND AUSWERTUNG

Nach abgeschlossener Messung sind die Mittelwerte für S_V , f_Q und ϑ_m zu errechnen. Liegt die endgültige Streckenlänge \bar{S}_M (= Zentrierstangenabstand) aus Interferenz- und Bandmessung fest, so läßt sich c_0 nach Abschnitt II, 2 ermitteln.

Die folgenden Seiten zeigen ein Meßprotokoll mit 25 Wertepaaren und die Auswertung der Meßreihe M 265 als Beispiel.

Blatt 1 enthält die Daten zur Berechnung von p , e und ϑ_m ; ferner die Mikrometerablesungen am Zentrierapparat (am rückwärtigen Pfeiler mit „H“, am vorderen mit „V“ bezeichnet). Es folgen Angaben über die Spiegelstellung: Auf dem vorderen Pfeiler die Einzelspiegel B_2 - B_1 , auf dem hinteren Pfeiler die Planspiegel O_2 - O_3 ; vom Meßtisch aus gesehen B_2 und O_2 links, B_1 und O_3 rechts (\rightarrow Spiegelstellung D). Gemessen wurde mit zwei 2000 mm-Objektiven als Sende- und Empfangslinse, wobei die Sendelinse unvergütet war. Der Photomultiplier trug vor der Streuscheibe keine Schutzblende (die sonst Störlicht abhält). Das Vergleichslicht fiel über einen Spiegel etwas schräg auf die Opalglasscheibe.

Auf Blatt 2 sind die einzelnen Supportstellungen eingetragen. Der Einfachheit halber und weil Mißverständnisse hier nicht zu befürchten sind, wurden die zum vorderen (V) und die zum hinteren (H) Spiegelpaar gehörenden Ablesungen an der Meßuhr wieder mit V und H bezeichnet.

M_V ist der Mittelwert der vorausgehenden und der nachfolgenden V -Ablesung, eine Interpolation für den Zeitpunkt der dazwischenliegenden H -Ablesung. Entsprechend ist M_H der Mittelwert der vorausgehenden und der nachfolgenden H -Ablesung. $D = H - M_V$ oder $M_H - V$. Der Mittelwert aller Differenzen D ergibt $D_{Mittel} \equiv S_V$.

- U_Q = Modulationsspannung an den Ultraschallquarzen
 - J_A = Anodengleichstrom des Photomultipliers 1 Skt \triangleq 0,05 mA
 - $f \equiv f_Q = f_m/2$
 - NF_V = Neutralfilter bei Messung zum vorderen Spiegelpaar
 - NF_H = Neutralfilter bei Messung zum hinteren Spiegelpaar
- (angegeben ist die Transparenz der Filter)

„Filter: grün“ bedeutet, daß mit Licht von $\lambda_0 = 0,546 \mu\text{m}$ gemessen worden ist. Daneben stehen Nummer, Spannung und Strom der Quecksilber-Höchstdrucklampe HBO 100 W/2 RH.

Blatt 3 bringt die Auswertung der Messung. Aus Blatt 1 stammen die hier eingetragenen Mittelwerte für p , e , ϑ , ($H-V$), aus Blatt 2 die Angaben über S_V und f_Q . Zusätzlich muß noch \bar{S}_M aus den Interferenz- und den Bandmessungen eingesetzt werden. Die Berechnung von c_L und c_0 folgt den Angaben in Abschnitt II.

[Blatt 1]

Datum: 16. 9. 1964

Zu c -Messung Nr. 265

Uhrzeit		9.45	10.55
Luftdruck p in Torr	ϑ_{Bar} mm Hg — a p	— Paulin-Barometer Korr. — 0,1 Torr 716,8	— 716,6
	p Mittel	716,7 — 0,1	
Luftfeuchtigkeit e in Torr	ϑ	22,4	22,5
	ϑ'	16,3	16,4
	$\vartheta - \vartheta'$	6,1	6,1
	e_0'	13,9	14,0
	— b	— 2,9	— 2,9
	e	11,0	11,1
	e Mittel	11,05	
Lufttemperatur ϑ in °C	Nr. 2	22,8	23,0
	4	9	2
	6	9	2
	7	7	0
	9	3	22,5
	10	4	6
	11	3	5
	12	2	3
	14	5	5
	15	5	5
	17	4	5
	18	5	6
	19	6	9
20	9	23,2	
	ϑ Mittel	22,54	22,71
Lotungen	H	28,733	28,729
	V	29,659	29,661
	$H - V$	— 0,926	— 0,932
	$(H - V)$ Mittel	— 0,929	
Spiegelstellung		D	
Bemerkungen		$F_S = 2000$ mm (U) $F_E = 2000$ mm SEV mit Spiegel ohne Blende	

[Blatt 2]

Lichtgeschwindigkeitsmessung Nr. 265							Datum: 16. 9. 1964 Strecke: 0-48		
Nr.	Zeit	V	H	M _V	M _H	D	Bemerkungen		
10	10.16	5,28	5,05	5,28	5,04	- 0,23	$U_Q = 65 \text{ V}$		
		5,27				23			
	10.18	5,27	5,04	27	04	23	$J_A = 9,2 \text{ Skt}$		
		5,26	5,05	26	06	21			
	10.20	5,27	5,06	26	06	20	$f = 9,362.034$		
		5,27	5,05	27	06	21			
	20	10.22	5,27	5,06	27	06	21	$NF_V = 82\%$ $NF_H = 84\%$	
			5,27	5,05	27	06	22		
		10.26	5,27	5,06	28	06	21	$f = .034$	
			5,28	5,06	28	08	20		
		30	10.28	5,30	5,09	29	09	20	$f = .034$
				5,30	5,09	30	09	21	
10.30	5,31		5,10	30	10	20			
	5,31		5,10	31	10	21			
10.32	5,31		5,11	30	10	19			
	5,30		5,10	31	10	20			
40	10.34	5,32	5,11	32	10	21	$f = .034$		
		5,31	5,10	30	10	21			
	10.37	5,29	5,09	30	10	19			
		5,30	5,11	30	10	20			
	10.40	5,30	5,10	30	10	20			
		5,29	5,09	30	10	19			
10.42	5,30	5,11	30	10	19	$f = .035$			
	5,30	5,09	30	10	20				
	5,30	5,09	30	09	21				

[Blatt 2] Fortsetzung

Lichtgeschwindigkeitsmessung Nr. 265							Datum: 16. 9. 1964 Strecke: 0-48
Nr.	Zeit	V	H	M _V	M _H	D	Bemerkungen
50	10.44	5,31	5,10	31	10	21	$J_A = 9,7$ Skt. $U_Q = 65$ V
		5,31			10	21	
		5,31	5,10	31	10	21	
	10.47	5,31	5,11	30	10	21	
			5,30			19	

Minimumstiefe: $\begin{cases} 6,0 \text{ mV im } 10 \text{ mV-Bereich (H)} \\ 6,5 \text{ mV im } 10 \text{ mV-Bereich (V)} \end{cases}$

$$D_{\text{Mittel}} = \frac{-10,58}{51} = -0,207 \text{ mm}$$

Lampe: Nr. 0306 kb; 20,4 V; 4,9 A Filter: grün

$$f_{\text{Mittel}} = 9,3620342 \text{ MHz}$$

Neutralfilter im VW: 80,5%

[Blatt 3]

M 265 (16. 9. 64) $\lambda_0 = 546 \text{ nm}$

ρ [Torr]:	716,6	2,873380	\bar{S}_M :	48021,172 mm
e [Torr]:	11,05	- 0,006078		- 0,929 mm (H-V)
		<u>2,867302</u>	S_M :	48020,243 mm
			S_V :	- 0,207 mm
			<u>$S_M - S_V =$</u>	48020,450 mm
θ [°C]:	22,63	1,083052	f_Q :	9,362034 MHz (Q. U.)
$(n_g - 1) =$	0,000264743		$^{2/3} \cdot f_Q$:	6,241356 MHz
			$c_L =$	299712,72 km/s
			$c_L (n_g - 1) +$	79,35 km/s
			<u>$c_0 =$</u>	299792,07 km/s

3. ZUSAMMENSTELLUNG DER MESSUNGEN

a) Meßgruppen

Abkürzungen:

 k = Nummer der Gruppe n_k = Zahl der Meßreihen in der Gruppe k λ_0 = Lichtwellenlänge in Vakuum F_S = Brennweite der Sendelinse ($\equiv F_3$) F_E = Brennweite der Empfangslinse ($\equiv F_4$) $c_{0\nu}^{(k)}$ = c_0 -Wert der Meßreihe ν in der Gruppe k ($\nu = 1 \dots n_k$) c_{0k} = c_0 -Mittelwert der Gruppe k

$$= \frac{1}{n_k} \sum_{\nu=1}^{n_k} c_{0\nu}^{(k)} \equiv 299700 \text{ km/s} + c_{0k}^*$$

$$\mu_k = \sqrt{\frac{\sum_{\nu=1}^{n_k} (c_{0\nu}^{(k)} - c_{0k})^2}{n_k}} = \text{mittlere quadratische Streuung der Gruppe } k$$

 K = kleiner Strahlenteilerwürfel auf der Empfangsseite G = großer Strahlenteilerwürfel auf der Empfangsseite S = Spiegel auf der Empfangsseite (Schrägeinfall des Vergleichslichtes) VW = Vergleichsweg VL = Vergleichslicht MW = Meßweg ML = Meßlicht KM = Kontrollmessung W = Wiederholung einer Gruppe

Zusammenstellung der Meßgruppen

k	n_k		Meßreihen Nr.	λ_0 nm	F_S mm	F_E mm		c_{0k}^* [km/s]		μ_k km/s	Bemerkungen
	24-48	0-48						24-48	0-48		
(0)		10	1-10	546	1000	950	K		(89,34)	1,07	
1	11		11-21	546			K	93,26		1,14	
2a		5	22-25, 28	546			K		92,47	0,41	
(2b)		9	29-32d, 43-46	546			K		(92,37)	0,43	
3		2	26-27	546			K		93,11	(0,11)	8. 8. 377
(4)		6	33-36, 41-42	546	700	950	K		(92,94)	0,57	$F_S = 700$ mm 0-48
(5)	4		37-40	546	700	950	K	(93,68)		0,86	$F_S = 700$ mm 24-48
(6a)		11	47-51, 62-67	546	1000	950	K		(91,71)	0,52	
6b		4	68-71	546			K		91,28	0,59	
(7)		10	52-61	435	1000	950	K		(91,65)	0,90	ohne Zellenjustierung
8		7	72-78	546	1000	950	K		91,73	0,19	glatte Streuscheibe
9		6	79-84	546			K		91,91	0,23	Spiegelwechsel im VW
10		11	85-95	546	1000	950	G		91,99	0,15	großer Würfel
11		7	96-102	546			G		91,91	0,29	O 3 \leftrightarrow O 2
12		7	103-109	546			G		92,24	0,18	B 1 \rightarrow O 4
(13)		1	110	435	1000	950	G		(87,39)	—	
14		8	111-118	546	1000	950	K		92,23	0,23	matt. Streuscheibe
15		7	119-125	546			K		92,15	0,26	KM ohne SEV -Blende
16		9	126-134	435	1000	950	K		91,80	0,28	mit Zellenjustierung
17	9		135-142, 146	435			K	91,84		0,56	
18		3	143-145	435			K		91,88	0,07	KM
19	8		147-154	435	1000	2000	K	92,69		0,36	$F_E = 2000$ mm 24-48,
20		8	155-162	435			K		92,06	0,17	$F_E = 2000$ mm 0-48
21		8	163-170	546			K		92,58	0,37	$F_E = 2000$ mm 0-48
22		8	171-178	546	1000	2000	S		92,41	0,21	$F_E = 2000$ mm, S
23		8	179-186	546	1000	950	S		92,27	0,19	S
24		8	187-194	546			S		91,96	0,19	$KM: S$
25		8	195-197, 200, 201 204, 205, 208	435	1000	950	S		92,16	0,27	S
26		8	198, 199, 202, 203, 206, 207, 209, 210	435	1000	2000	S		92,23	0,19	$F_E = 2000$ mm, S
(27a)		2	211, 212	546	1000	950/ 2000	K		(89,26)	(0,05)	
27b		10	213-222	546	1000	2000	K		92,38	0,21	$F_E = 2000$ mm
28		8	223-230	546	1000	950	S		92,33	0,08	W
29		8	231-238	546	2000	2000	S		91,65	0,21	F_S unvergütet
30		8	239-246	546			S		92,43	0,64	F_S unv., ohne SEV -Blende
31		8	247-254	546			S		92,14	0,25	F_E unvergütet
32		8	255-262	546			S		91,93	0,16	F_S unvergütet, W
33		8	263-270	546			S		92,07	0,12	F_S unvergütet ohne SEV -Blende, W
34		8	271-278	546			S		92,13	0,08	F_S unv., 12. 2. 34
35		4	279, 280, 280A, 281	546			S		92,00	0,09	F_E unv., 12. 2. 34/ 8. 8. 392
36		8	282-289	546	1000	950	S		92,28	0,33	Zelle Nr. 4
37		8	290-297	546			S		92,14	0,09	Zelle Nr. 4, O 4 \rightarrow O 2

b) Meßreihen

Abkürzungen:

 J_A = Anodenstrom des Photomultipliers 1 Skt \triangleq 0,05 mALichtverluste Δ [%] = Differenz der Neutralfilter-Nennwerte bei Messung 1 und bei Messung 2 ϑ = mittlere Temperatur auf der Meßstrecke ($\equiv \vartheta_m$) p = Luftdruck e = Partialdruck des Wasserdampfes \bar{S}_M = Abstand der Zentrierstangen= 48000,000 mm + \bar{S}_M^* bei Messungen über 0-48= 24000,000 mm + \bar{S}_M^* bei Messungen über 24-48 $H-V$ = Mikrometerablesung bei C_2-D_2 - Mikrometerablesung bei C_1-D_1 (vergl. III. 7) S_V = Mittelwert der Differenzen ($\equiv D_{Mittel}$) f_Q = halbe Modulationsfrequenz \equiv 9362000 Hz + f_Q^* c_L = Gruppengeschwindigkeit des Lichtes in Luft \equiv 299700,00 km/s + c_L^* c_0 = Lichtgeschwindigkeit in Vakuum \equiv 299700,00 km/s + c_0^* F (bei Bemerkungen) = Frequenzkontrolle (Vergleich mit Droitwich) J (bei Bemerkungen) = Interferenzmessung (mit Nummer der Messung) U_{φ} = Anodenspannung des Photomultipliers

Spiegelstellungen:

	C_1-D_1	C_2-D_2
A	$B\ 2-O\ 4$	$O\ 3-O\ 2$
B	$O\ 3-O\ 2$	$B\ 2-O\ 4$
\bar{A}	$B\ 2-O\ 4$	$O\ 2-O\ 3$
\bar{B}	$O\ 2-O\ 3$	$B\ 2-O\ 4$
C	$O\ 2-O\ 3$	$B\ 2-B\ 1$
D	$B\ 2-B\ 1$	$O\ 2-O\ 3$
E	$B\ 2-B\ 1$	$O\ 4-O\ 3$
F	$O\ 4-O\ 3$	$B\ 2-B\ 1$

Messung				Spiegel-Stellg.	Lampe Nr.	f_A [Skt]	Min.-Tiefe [mV]	Licht-verluste Δ [%]	Refraktion			$\overline{S_M^*}$ [mm]	$H-V$ [mm]	S_V [mm]	f_Q^* [Hz]	c_L^* [km/s]	c_0^* [km/s]	Bemerkungen	
Nr.	Tag	Zeit	Werte						δ [°C]	ρ [Torr]	e [Torr]								
Gruppe: (o) Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 10 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich																			
c_0 : 299789,34 km/s Δ = 3,53 km/s μ = 1,07 km/s																			
	1963																		
1	18. 6.	9.37-11.16	101	A	0028 pC	4,4	5,5	0	20,89	715,9	9,5	21,107	0,187	1,450	18	08,41	88,17	F	J 121
2		13.24-15.01	101	A	0080 pC	4,7	5,8	0...0,5	21,30	713,6	9,2	21,107	0,188	1,371	22	09,06	88,46		
3	19. 6.	8.57-10.18	101	A	0080 pC	4,7	5,2	0	20,57	716,7	9,1	21,160	0,192	1,019	20	11,56	91,50	F	
4		13.05-14.27	101	B	0080 pC	4,6	5,2	1,5	20,65	716,1	8,3	21,127	0,156	1,366	23	09,06	88,93		
5	20. 6.	8.46-10.14	101	B	0080 pC	4,5	5,2	1	20,33	714,8	9,35	21,106	0,160	1,475	20	08,18	87,97		
6		12.50-14.05	102	A	0080 pC	4,4	5,6	0	20,49	714,6	9,5	21,107	0,196	1,265	24	09,82	89,54		
7	21. 6.	9.50-11.03	101	A	0080 pC	4,4	5,8	0	21,16	717,4	11,3	21,110	0,185	1,341	22	09,24	89,07	F	J 122
8		13.00-14.20	101	B	0080 pC	5,0	6,0	2...2,5	21,37	717,8	11,4	21,110	0,134	1,291	27	09,38	89,19		
9	24. 6.	11.05-12.11	101	B	0080 pC	4,6	5,6	2,5	20,40	718,4	10,65	21,171	0,127	1,301	24	09,56	89,72		vorher Sp. 04 gereinigt
10	25. 6.	8.38-10.01	101	A	0080 pC	4,5	5,0	1,5	20,71	713,4	11,75	21,179	0,184	1,061	21	11,37	90,87	F	[J 123

Vertauschen der beiden Spiegelpaare

Fehlmessung: Wahrscheinlich Licht am Strahlenteilerwürfel auf der Empfangsseite beschnitten

Gruppe: 1 Strecke: 24-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 11 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich																			
c_0 : 299793,26 km/s Δ = 3,22 km/s μ = 1,14 km/s																			
	1963																		
11	25. 6.	13.59-15.13	100	A	0039 pC	4,7	4,8	0,5...0	20,61	713,75	12,65	0,479	9,367	-0,342	27	12,04	91,59	F (vor M 10) $\overline{S_M^*}$ = 0,462	24. 6. 63:
12	26. 6.	14.16-15.41	101	A	0039 pC	4,7	5,7	0	20,93	717,65	10,05	0,448	9,262	-0,444	29	11,67	91,61		
13	27. 6.	10.48-11.51	101	A	0080 pC	4,3	5,5	0...0,5	21,38	718,15	12,1	0,461	9,312	-0,397	28	11,84	91,68		J 124
14		13.34-14.43	100	B	0080 pC	4,4	5,4	0,5	21,70	717,05	13,45	0,461	9,578	-0,394	30	15,20	94,81 ¹		
15	28. 6.	10.05-11.10	101	B	0039 pC	3,8	6	2...2,5	21,79	714,45	13,7	0,466	9,518	-0,380	25	14,17	93,46		Vorher: Neujustierung
16		14.40-15.51	101	A	0039 pC	4,4	5,3	0	22,08	716,2	13,0	0,465	9,480	-0,398	26	13,93	93,35		
17	1. 7.	10.50-11.57	101	A	0039 pC	4,4	5,2	0...0,5	21,41	718,75	11,35	0,498	9,491	-0,390	26	14,38	94,29	F	J 125
18		13.29-14.39	100	B	0039 pC	4,5	6,2	0,5...1	21,67	718,35	11,6	0,498	9,497	-0,379	28	14,39	94,18		
19	2. 7.	9.49-11.12	100	B	0039 pC	4,4	4,8	3,5...2,5	21,41	718,95	12,8	0,504	9,502	-0,372	27	14,42	94,34	F	J 126
20		13.43-15.29	100	B	0052 pC	4,2	5,5	1...2,5	21,44	718,8	12,8	0,504	9,495	-0,340	29	13,98	93,87		
21	3. 7.	10.12-11.27	100	B	0052 pC	4,1	5	1	21,66	720,15	11,45	0,504	9,492	-0,241	29	12,70	92,70	F	J 127

Messung über 24-48 mit Vertauschen der beiden Spiegelpaare

¹ Während der Messung V-Sp.-Untersätze locker geworden

Gruppe 2a Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 5 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299792,47 km/s Δ = 1,20 km/s μ = 0,41 km/s

1963																			
22	3. 7.	13.14-14.31	103	B	0052 pC	4,2	4,6	1,5...2	22,10	719,35	10,9	21,284	0,146	1,097	32	11,94	91,74	F vor M 21	J 127
23	4. 7.	10.26-11.45	101	B	0052 pC	4,4	4,7	1...1,5	21,80	720,7	10,8	21,304	0,148	1,049	30	12,29	92,32		J 128
24		13.45-15.00	101	A	0052 pC	4,1	4,6	0,5	22,13	720,15	10,8	21,304	0,157	0,957	33	13,01	92,89		
25	5. 7.	9.38-11.06	100	A	0052 pC	4,0	4,2	3,5...1,5	21,77	720,25	11,75	21,315	0,200	1,061	31	12,65	92,62	F	J 129
28	8. 7.	13.20-14.30	102	A	0052 pC	4,1	5,2	0...0,5	20,77	718,6	12,0	21,341	0,192	1,070	31	12,71	92,77	F vor M 27	J 130

Wiederholung von G o (G 2 b abgetrennt, weil dort keine Frequenzkontrolle)

Gruppe: (2b) Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 9 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299792,37 km/s Δ = 1,22 km/s μ = 0,43 km/s

1963																			
29	9. 7.	9.55-11.06	101	A	0052 pC	4,5	5,7	2	21,13	717,2	9,65	21,304	0,206	1,058	31	12,64	92,48	vorher: Neujust. d. Sp.	
30		13.07-14.15	102	B	0052 pC	4,3	4,3	2	21,48	716,35	9,15	21,288	0,176	1,011	33	12,69	92,35		
31	10. 7.	9.59-10.59	102	B	0052 pC	4,2	4,4	2...2,5	21,34	716,2	9,5	21,308	0,134	1,056	31	12,23	91,90	J 131	
32a		12.39-13.11	50	B	0052 pC	3,6	—	2	21,66	715,4	8,65	21,308	0,135	1,043	33	12,36	91,87		
32b		13.14-13.42	50	B	0052 pC	4,3	—	2	21,66	715,4	8,65	21,308	0,135	1,053	34	12,35	91,86	$U_F = 1300 V$	Fokussier- Spg. am Photo- multiplier
32c		13.47-14.23	50	B	0052 pC	3,7	4,5	2	21,66	715,4	8,65	21,308	0,135	1,055	34	12,34	91,85	$U_F = 1280 V$	
32d		14.32-15.03	50	B	0052 pC	4,3	4,5	2	21,66	715,4	8,65	21,308	0,135	1,057	34	12,32	91,83	$U_F = 1300 V$	
43	17. 7.	13.06-14.07	101	B	0536 mn	5,3	5,7	1,5	22,88	716,65	10,75	21,345	0,152	0,912	35	13,61	92,90	J 136	
44		14.44-15.54	101	A	0536 mn	5,4	5,5	0,5	22,91	716,0	10,6	21,345	0,175	0,965	37	13,48	92,69		
45	18. 7.	8.09- 9.16	102	A	0536 mn	4,9	5,4	0,5...1	22,18	716,65	11,6	21,398	0,194	0,986	31	13,60	93,06		
46		13.00-14.11	101	A	0536 mn	5,0	4,5	0,5	22,64	715,55	13,15	21,408	0,194	1,110	36	13,03	92,23		

Wiederholung der Gruppe o M 32a-d Untersuchung des Einflusses der Fokussierspg. U_F Letzte Frequenzkontrolle: 8. 7. 1963 Nächste Frequenzkontrolle: 28. 8. 1963

Gruppe: 3 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 2 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299793,11 km/s Δ = 0,22 km/s μ = 0,11 km/s

1963																			
26	5. 7.	13.03-14.24	103	A	0052 pC	2,6	3,5	1...1,5	21,92	719,5	12,3	21,315	0,216	0,976	34	13,88	93,22	F	J 129
27	8. 7.	10.04-11.22	101	A	0052 pC	2,8	4	0	21,09	718,15	12,5	21,341	0,194	1,003	29	13,09	93,00	F	J 130

RCA-Photomultiplier 7326 Nr. 8. 8. 377 statt 8. 8. 392 (weniger empfindlich, daher nur 2 Meßreihen)

Messung				Spiegel- Stellg.	Lampe Nr.	J_A [Skt]	Min- Tiefe [mV]	Licht- verluste Δ [%]	Refraktion			$\overline{S_M^*}$ [mm]	$H-V$ [mm]	S_V [mm]	f_Q^* [Hz]	c_L^* [km/s]	c_0^* [km/s]	Bemerkungen
Nr.	Tag	Zeit	Werte						δ [°C]	ρ [Torr]	e [Torr]							
Gruppe: (4) Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 6 F_S [mm]: 700 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299792,94 km/s Δ = 1,54 km/s μ = 0,57 km/s																		
	1963																	
33	11. 7.	10.38-11.53	101	B	0052 pC	3,1	2,5	2,5...3	21,04	716,60	11,8	21,311	0,151	1,068	31	12,28	92,04	J 132
34		13.42-14.53	101	A	0052 pC	3,1	2,4	0,5	21,24	716,65	12,25	21,311	0,184	1,050	33	12,64	92,35	
35	12. 7.	9.45-11.02	101	A	0536 mn	3,9	4	0,5	21,42	717,05	9,5	21,292	0,200	0,857	32	13,83	93,58	J 133
36		13.06-14.17	102	B	0536 mn	4,0	4,6	0,5	21,75	716,4	8,85	21,292	0,154	0,908	35	13,32	92,92	
41	16. 7.	13.40-14.40	102	A	0536 mn	4,3	4,4	0...0,5	22,61	720,3	11,20	21,339	0,199	0,969	36	13,51	93,27	J 135
42	17. 7.	9.55-11.24	101	B	0536 mn	4,0	4,0	2	22,50	717,55	10,75	21,345	0,151	0,854	35	13,97	93,46	J 136

Messungen mit $F_S = 700$ mm Letzte Frequenzkontrolle: 8. 7. 1963 Nächste Frequenzkontrolle: 28. 8. 1963

Gruppe: (5) Strecke: 24-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 4 F_S [mm]: 700 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299793,68 km/s Δ = 2,21 km/s μ = 0,86 km/s																		
	1963																	
37	15. 7.	14.40-15.56	100	B	0536 mn	3,5	4,1	0,5	21,74	721,8	11,0	0,523	9,555	-0,330	33	14,98	95,15	Vorher: Neujustierung der Spiegel J 134
38	16. 7.	8.10- 9.11	101	A	0536 mn	3,7	4	0	21,65	721,3	10,8	0,539	9,564	-0,175	30	13,26	93,40	J 135
39		9.44-10.38	102	B	0536 mn	4,0	4,5	1,5	21,94	721,1	11,2	0,539	9,534	-0,191	34	13,21	93,24	
40		12.15-13.09	102	A	0536 mn	4,1	4,3	0	22,44	720,6	11,55	0,539	9,551	-0,164	35	13,11	92,94	

Messungen mit $F_S = 700$ mm über 24-48 Letzte Frequenzkontrolle: 8. 7. 1963 Nächste Frequenzkontrolle: 28. 8. 1963

Gruppe: (6a) Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 11 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299791,71 km/s Δ = 1,44 km/s μ = 0,52 km/s																		
	1963																	
47	19. 7.	9.58-11.21	102	A	0039 pC	5,4	5,5	0,5...1	22,08	719,55	13,4	21,413	0,235	1,202	34	12,70	92,49	J 137
48	22. 7.	9.09-10.37	100	A	0039 pC	5,7	7	2,5	22,20	720,7	13,9	21,485	0,234	1,378	30	11,90	91,77	J 138
49		13.52-15.18	101	B	1052 kn	6,6	6,5	4...2,5	22,79	719,8	14,40	21,485	0,246	1,301	34	12,60	92,21	
50	23. 7.	9.17-10.21	102	B	1052 kn	6,8	7,5	4...3,5	22,62	718,3	14,55	21,486	0,168	1,210	33	12,64	92,12	J 139
51		12.45-13.50	101	A	1052 kn	6,3	7,0	4	22,97	717,3	13,7	21,486	0,204	1,158	36	13,28	92,57	
62	1. 8.	8.58-10.30	102	B	0391 mn	5,5	6	4...2,5	22,79	717,8	11,20	21,442	0,148	1,310	39	11,81	91,24	Strecken-Messung vom 31. 7. 63: 21,437

63		11.03-12.10	102	A	0391 mn	6,0	6,8	1,5	23,13	717,75	10,85	21,450	0,154	1,326	39	11,79	91,13
64		13.13-14.06	101	A	0391 mn	6,0	7,6	1,5	23,27	717,35	10,9	21,457	0,164	1,336	43	11,98	91,24
65		14.41-15.52	101	B	0391 mn	5,9	6,5	1,5...2	23,38	717,0	10,85	21,457	0,150	1,326	49	12,15	91,34
66	2. 8.	10.07-11.18	102	B	0390 mn	6,3	8,7	2...1,5	23,25	718,0	12,3	21,474	0,162	1,321	40	12,07	91,39
67		12.53-13.58	100	A	0390 mn	6,5	6,8	2...0,5	23,70	717,85	12,55	21,474	0,166	1,326	42	12,12	91,30

J 146

Großer Spalt S_{β_1} : $0,13 \times 0,15$ mm Letzte Frequenzkontrolle: 8. 7. 1963 Nächste Frequenzkontrolle: 28. 8. 1963
(G 6b abgetrennt, weil dort wieder Frequenzkontrolle)

Gruppe: 6b Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 4 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299791,28 km/s $\Delta = 1,40$ km/s $\mu = 0,59$ km/s

68	1963	10. 9.	12.30-14.03	100	B	0390 mn	4,5	5,5	3,5	20,56	717,05	9,75	21,152	0,214	1,329	38	10,29	90,27	F	J 148
69		11. 9.	9.37-11.00	100	B	0390 mn	4,7	5,5	3...4	20,32	717,2	9,9	21,142	0,207	1,111	37	11,50	91,56	F	J 149
70			12.41-14.12	101	A	0390 mn	5,0	5,0	2...2,5	20,93	716,4	10,65	21,142	0,202	1,066	40	11,84	91,63		
71		12. 9.	9.37-11.08	101	A	1026 kn	4,5	4,9	3...4	19,85	717,8	9,5	21,137	0,256	1,161	36	11,41	91,67	F	J 150

Großer Spalt ($0,13 \times 0,15$ mm statt $0,13 \times 0,10$ mm) Eingeführt, da für Messungen mit $\lambda_0 = 435$ nm weniger Licht zu erwarten

Gruppe: (7) Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 435 Zahl der Meßreihen: 10 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299791,65 km/s $\Delta = 2,86$ km/s $\mu = 0,90$ km/s

52	1963	24. 7.	9.36-10.44	100	A	1052 kn	5,0	9,5	1,5	22,66	717,9	12,8	21,541	0,202	1,739	35	09,99	92,24		J 140
53			13.10-14.50	104	B	1052 kn	4,6	9	1,5...2,5	23,28	717,25	12,15	21,541	0,179	1,677	37	10,28	92,29		
54		25. 7.	9.58-11.10	101	B	0391 mn	3,6	6	4	23,47	718,55	13,25	21,536	0,148	1,885	36	08,71	90,80		J 141
55			14.39-15.52	101	A	0391 mn	3,7	7,5	0,5...0	23,93	716,8	12,75	21,536	0,200	1,701	38	10,28	92,05		
56		26. 7.	8.46- 9.50	102	A	0391 mn	3,1	8,2	0	22,37	722,35	14,0	21,547	0,206	1,756	33	09,85	92,67		J 142
57			12.51-14.03	101	B	0391 mn	4,0	6,7	3,5	21,79	724,75	11,5	21,547	0,170	2,115	36	07,48	90,78		
58		29. 7.	9.51-11.06	103	B	0391 mn	3,3	8,0	2	21,96	723,75	9,15	21,460	0,162	1,809	31	08,65	91,82		J 143
59			13.11-14.26	101	A	0391 mn	3,8	8,3	0	22,24	723,25	8,8	21,460	0,184	1,672	35	09,79	92,83		
60		30. 7.	8.49-10.05	101	A	0391 mn	3,5	8,7	1,5	21,94	722,6	8,95	21,447	0,192	1,950	34	07,97	91,02		J 144
61			12.27-13.43	102	B	0391 mn	3,9	7,5	2,5	22,50	721,5	8,2	21,447	0,158	2,064	38	07,19	89,97		

Ultraschallzelle nicht für $\lambda_0 = 435$ nm abgeglichen; nur $U_Q = 55 V_{\text{eff}}$ Große Phasenfehler! Letzte Frequenzkontrolle: 8. 7. 1963 Nächste Frequenzkontrolle: 22. 8. 1963 55

Messung				Spiegel-Stellg.	Lampe Nr.	JA [Skt]	Min.-Tiefe [mV]	Licht-verluste Δ [%]	Refraktion			\overline{S}_M^* [mm]	H-V [mm]	S _V [mm]	f_Q^* [Hz]	c_L^* [km/s]	c_0^* [km/s]	Bemerkungen
Nr.	Tag	Zeit	Werte						φ [°C]	ρ [Torr]	ϵ [Torr]							
Gruppe: 8 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 7 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Glatte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299791,73 km/s Δ = 0,57 km/s μ = 0,19 km/s																		
	1963																	
72	12. 9.	12.21-13.30	101	A	1026 kn	4,5	4,8	4...3,5	20,45	717,8	9,9	21,137	0,254	1,147	39	11,58	91,67	F vor M 71 J 150
73	13. 9.	9.56-11.23	112	A	1026 kn	4,6	5,1	3	20,31	721,65	11,15	21,099	0,292	1,162	39	11,49	92,03	F J 151
74		12.54-14.07	101	B	1026 kn	5,0	5,4	4,5...4	20,55	721,65	11,7	21,099	0,221	1,104	41	11,50	91,96	
75	1. 10.	9.06-10.23	101	B	1026 kn	4,0	4,5	2	20,13	718,5	7,0	21,134	0,182	1,043	28	11,43	91,73	F; Sp. im VW neu justiert J 153
76		12.53-14.17	101	A	1026 kn	4,5	4,5	0,5...0	20,45	717,2	6,7	21,134	0,208	1,057	33	11,64	91,71	
77	2. 10.	10.03-11.27	101	A	1026 kn	4,5	5,5	3...1,5	19,66	711,2	7,75	21,148	0,240	1,050	32	11,98	91,58	F
78		13.21-14.32	101	B	1026 kn	4,6	5,3	2	19,86	710,6	7,6	21,148	0,198	1,022	35	11,98	91,46	

Glatte Streuscheibe

Gruppe: 9 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 6 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Glatte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299791,91 km/s Δ = 0,66 km/s μ = 0,23 km/s																		
	1963																	
79	3. 10.	10.15-11.30	101	B	1026 kn	4,8	5,0	3	18,89	717,2	7,8	21,080	0,205	1,001	32	11,64	92,12	F J 155
80		13.12-14.20	101	A	1026 kn	5,0	5,8	1,5	18,95	716,9	8,0	21,080	0,206	1,014	34	11,61	92,04	
81	4. 10.	9.25-11.00	101	A	1026 kn	4,7	5,5	0,5	19,27	715,7	7,8	21,082	0,242	1,003	32	11,87	92,08	F J 156
82		12.58-14.03	101	B	1026 kn	4,9	6,2	1	19,64	714,4	7,6	21,082	0,211	1,039	34	11,50	91,46	
83	7. 10.	9.38-10.47	101	B	1026 kn	4,3	6,0	3...3,5	19,19	707,5	8,4	21,094	0,220	0,871	28	12,49	91,79	F J 157
84		12.53-14.09	101	B	1027 kn	5,4	6,6	1,5	19,20	709,2	8,6	21,094	0,220	0,884	31	12,50	91,99	

Spiegel im VW ausgetauscht

Gruppe: 10 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 11 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Großer Würfel Glatte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299791,99 km/s Δ = 0,40 km/s μ = 0,15 km/s																		
	1963																	
85	8. 10.	12.45-13.54	101	B	1027 kn	7,3	8,5	2	20,48	724,65	7,4	21,098	0,214	1,099	36	11,29	92,17	F J 158
86		14.30-15.40	101	A	1027 kn	7,4	8,5	3	20,22	724,7	6,3	21,098	0,190	1,100	35	11,14	92,12	
87	9. 10.	9.26-10.38	101	A	1027 kn	7,4	9,0	4,5...2	20,62	726,55	6,65	21,099	0,188	1,151	35	10,81	91,88	F J 159
88		12.29-13.41	101	B	1027 kn	7,3	7,5	3,5...2	20,76	726,15	7,5	21,099	0,188	1,157	38	10,87	91,84	
89		13.55-14.59	101	B	1027 kn	7,7	9,5	1,5...2	20,76	726,15	7,3	21,099	0,184	1,161	39	10,82	91,80	

90	10. 10.	9.52-11.40	101	B	1027 kn	7,0	8,5	4,5...2,5	20,89	727,15	8,05	21,120	0,173	1,160	36	10,79	91,83	F	J 160
91		13.23-14.21	101	A	1027 kn	7,5	9,0	2,5...1	20,91	726,3	8,3	21,120	0,190	1,168	37	10,90	91,84	F	
92	11. 10.	9.15-10.30	101	A	1027 kn	6,8	8	2	20,84	729,75	8,05	21,140	0,192	1,193	36	10,83	92,17	F	J 161
93		12.29-14.26	100	B	1027 kn	7,0	8	2,5	21,10	729,15	8,05	21,140	0,163	1,169	38	10,90	92,10	F	J 162
94	14. 10.	9.48-11.21	101	B	1027 kn	6,5	8	2,5	20,63	721,25	7,3	21,145	0,196	1,091	35	11,52	91,98	F	
95		14.36-15.48	101	B	1027 kn	6,8	8	1,5...2	20,45	721,75	5,95	21,145	0,190	1,086	38	11,61	92,20	F	

Großer Strahlenteilerwürfel auf der Empfangsseite gibt günstigere Lichtteilung; deshalb J_A größer.

Gruppe: 11 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 7 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Großer Würfel Glatte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299791,91 km/s Δ = 0,89 km/s μ = 0,29 km/s

1963																				
96	16. 10.	9.09-11.14	101	\bar{A}	1028 kn	6,6	7,5	5...6,5	20,30	721,65	6,0	21,097	0,188	1,101	41	11,30	91,92	F	J 163	
97		12.55-14.02	100	\bar{B}	1028 kn	6,9	8,5	5...4	20,86	721,1	6,45	21,097	0,170	1,077	42	11,34	91,74	F	J 164	
98	17. 10.	9.39-10.47	101	\bar{B}	1028 kn	6,8	7,5	4...3	20,91	719,6	6,15	21,098	0,171	1,056	40	11,44	91,66	F		
99		12.45-15.34	111	\bar{A}	1028 kn	7,0	8,0	1,5...0,5	21,12	718,75	7,3	21,098	0,180	1,060	43	11,56	91,61	F	J 165	
100	18. 10.	9.17-10.22	101	\bar{A}	1028 kn	6,7	8,0	2	20,90	724,0	8,75	21,155	0,183	1,166	39	11,13	91,81	F		
101		12.48-13.49	101	\bar{B}	1028 kn	6,6	8,0	1	21,16	723,85	8,15	21,155	0,208	1,153	43	11,51	92,11	F		
102	21. 10.	10.02-11.26	101	\bar{B}	1028 kn	6,5	9,5	2,5...2	21,06	726,8	7,7	21,134	0,199	1,095	38	11,54	92,50	F	J 166	

O 3 \leftrightarrow O 2 Spiegel eines Paares vertauscht

Gruppe: 12 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 7 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Großer Würfel Glatte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299792,24 km/s Δ = 0,59 km/s μ = 0,18 km/s

1963																				
103	21. 10.	13.32-14.29	101	C	1028 kn	7,0	8,0	2,5	21,26	725,75	8,75	21,134	0,192	1,110	40	11,46	92,23	F	J 166	
104	23. 10.	9.54-10.58	101	C	1028 kn	7,0	7,0	3...1,5	21,04	727,6	8,90	21,189	0,185	1,158	36	11,31	92,35	F	J 167	
105		12.56-14.11	101	D	1028 kn	7,0	8,5	0,5	21,12	726,9	9,1	21,189	0,198	1,153	40	11,57	92,50	F	J 168	
106	24. 10.	9.48-10.57	101	D	1028 kn	6,4	7,5	3,5...2	21,06	726,35	7,05	21,179	0,202	1,170	40	11,42	92,34	F		
107		12.42-14.14	102	C	1028 kn	7,6	8,5	1	21,13	725,35	7,8	21,179	0,196	1,163	42	11,48	92,26	F	J 169	
108	25. 10.	9.36-10.48	101	C	1029 kn	6,1	7,5	2	21,13	724,25	6,7	21,184	0,190	1,183	38	11,25	91,91	F		
109		12.21-13.13	101	D	1029 kn	6,5	7,5	0,5	21,13	723,65	6,8	21,184	0,192	1,153	40	11,50	92,10	F		

B 1 \rightarrow O 4 Spiegel O 4 durch B 1 ersetzt

Messung				Spiegel-Stellg.	Lampe Nr.	J_A [Skt]	Min.-Tiefe [mV]	Licht-verluste Δ [%]	Refraktion			$\overline{S_M}$ [mm]	$H-V$ [mm]	S_V [mm]	f_Q^* [Hz]	c_L^* [km/s]	c_0^* [km/s]	Bemerkungen
Nr.	Tag	Zeit	Werte						φ [°C]	ρ [Torr]	e [Torr]							
Gruppe: (13) Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 435 Zahl der Meßreihen: 1 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Großer Würfel Glatte Streuscheibe mit SEV-Blende 10 mV-Bereich c_0 : (299787,39) km/s																		
110	1963 6.11.	9.49-11.06	101	D	0392 mn	4,3	8	0,5	21,50	702,55	8,8	21,072	0,208	1,838	37	06,53	87,39	F; Streckenmessung vom 5. 11. 63 Vorher: US-Zelle auf $\lambda_0 = 435$ nm u. $U_Q = 55$ V abgeglichen

Fehlmessung! Starke Reflexion des blauen Lichtes am großen Empfangswürfel. Reflektiertes Licht trifft z. T. fokussiert auf die Streuscheibe.
Am 7. 11. starker Einfluß der SEV-Blende nachgewiesen. (Großer Würfel optisch schlechter als kleine Würfel, die für $\lambda_0 = 546$ nm vergütet sind).
Verfälschung des Meßergebnisses auf der Empfangsseite. Umfangreiche Kontrollmessungen mit $\lambda_0 = 546$ nm siehe Gruppen 14 und 15.

Gruppe: 14 Strecke 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299792,33 km/s $\Delta = 0,71$ km/s $\mu = 0,23$ km/s																		
111	1963 13.11.	10.02-11.05	101	C	0392 mn	4,7	5,5	1	21,61	713,75	8,0	21,118	0,208	0,902	40	12,75	92,10	F J 171
112	14.11.	9.56-11.02	101	C	0392 mn	4,8	6	1	21,59	714,9	7,95	21,109	0,179	0,928	41	12,40	91,88	F J 172
113		13.02-14.12	101	D	0392 mn	5,0	5,2	0	21,72	715,3	7,45	21,109	0,184	0,889	43	12,72	92,22	F
114	15.11.	9.50-10.54	61	D	0392 mn	4,6	—	5...7,5	21,61	705,5	6,95	21,109	0,236	0,707	41	14,14	92,59	F; wegen zu hoher Absorption abgebrochen J 173
115		12.42-13.50	101	D	0392 mn	4,7	5,2	7,5...4,5	21,65	703,7	7,35	21,109	0,224	0,703	43	14,14	92,37	
116		14.20-15.18	101	C	0392 mn	4,6	4,5	4,5...2	21,79	702,75	7,8	21,109	0,188	0,626	45	14,44	92,52	F
117	18.11.	9.06-10.12	101	C	0392 mn	4,1	5,5	1,5	21,58	714,75	7,2	21,102	0,188	0,828	38	12,94	92,42	ML und VL um halbe Bildbreite versetzt F J 174
118		10.29-11.30	101	C	0392 mn	4,6	5,5	1,5	21,60	714,65	7,4	21,102	0,182	0,820	42	13,05	92,51	ML und VL genau aufeinander justiert Nächste F, nach M 119a

Kontroll-Messungen: Wiederholung von G 6a, G 6b

☞ Gruppe: 15 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 7 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299792,15 km/s $\Delta = 0,71$ km/s $\mu = 0,26$ km/s

119	18.11.	14.10-15.12	101	C	0395 mn	4,6	5,2	1,5	21,70	713,45	7,4	21,102	0,192	0,819	42	13,12	92,42	ohne SEV-Blende	J 174
119a		15.15-15.21	15	C	0395 mn	4,7	5,2	2,0	21,70	713,45	7,4	21,102	0,192	0,819	42	13,12	(92,42)	F; mit SEV-Blende	
120	19.11.	9.27-10.36	101	C	0395 mn	4,6	5,4	1,5	21,76	715,5	7,35	21,103	0,194	0,853	41	12,93	92,45	F; ohne SEV-Blende	
120a		9.13- 9.25	15			4,3													J 175
		10.40-10.50	15	C	0395 mn	4,6	5,3	1,5	21,76	715,5	7,35	21,103	0,194	0,853	41	12,93	(92,45)	mit SEV-Blende	
121		13.10-14.15	101	D	0395 mn	4,8	5,0	0	21,91	714,9	8,0	21,103	0,200	0,853	43	13,01	92,41	ohne SEV-Blende	
121a		12.55-13.05	15				5,5												
		14.17-14.26	15	D	0395 mn	4,6	5,0	0,5	21,91	714,9	8,0	21,103	0,200	0,845	43	13,06	(92,46)	F; mit SEV-Blende	
122	21.11.	9.16-10.28	101	D	0395 mn	4,3	5	0,5	21,86	727,2	7,7	21,136	0,194	1,133	38	11,29	92,07	F; ohne SEV-Blende	J 176
123		11.05-12.16	100	C	0395 mn	4,7	5,1	1	21,89	727,5	7,2	21,136	0,168	1,158	41	11,07	91,89	ohne SEV-Blende	
124		13.43-14.46	101	D	0395 mn	4,7	5	0,5	21,88	727,3	6,6	21,136	0,198	1,161	43	11,28	92,09	F; ohne SEV-Blende	
125	22.11.	9.18-10.17	101	D	0395 mn	4,5	4,7	0,5	21,85	720,8	6,1	21,117	0,230	1,116	43	11,64	91,74	F; ohne SEV-Blende	J 177

Wie G 14 aber ohne SEV-Blende Dazu unmittelbar vor und nach M 119, M 120, M 121 Kontrollmessungen mit SEV-Blende

Gruppe: 16 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 435 Zahl der Meßreihen: 9 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299791,80 km/s $\Delta = 0,87$ km/s $\mu = 0,28$ km/s

126	22.11.	11.11-12.05	101	D	0395 mn	2,8	5	0	21,90	720,15	6,1	21,117	0,220	1,520	44	09,11	91,93		J 177
127		13.47-14.46	101	C	0395 mn	2,7	5	2,5	21,94	719,3	6,0	21,117	0,176	1,493	47	09,10	91,81	F	
128	27.11.	9.10-10.19	101	C	0395 mn	2,5	4,5	3,5	21,37	714,85	7,25	21,062	0,182	1,311	36	09,54	91,88	F	J 178
129		12.38-13.52	101	D	0395 mn	2,6	4,5	0,5	21,38	715,15	7,05	21,062	0,198	1,316	41	09,80	92,18		
130	29.11.	9.43-10.52	101	D	0395 mn	2,5	5	5...3,5	19,68	718,4	6,0	21,010	0,239	1,453	40	08,83	92,08	F	J 179
131		12.29-13.28	101	C	0395 mn	2,6	4,2	4	19,73	717,7	6,0	21,010	0,180	1,407	40	08,75	91,91	F	
132	13.12.	10.12-11.22	101	D	0485 mn	2,5	5	2	19,81	712,35	4,1	20,827	0,234	1,262	38	08,80	91,34	Ab hier: Steuerung d. Frequenzzählers durch sec-Impulse aus stationärer Quarzuhr	
																			J 180
133		12.55-14.07	101	C	0485 mn	2,7	4,8	3,5...4	19,80	711,85	4,0	20,827	0,234	1,275	41	08,82	91,31		
134	16.12.	9.34-10.32	101	C	0485 mn	2,5	4,3	5	19,42	711,55	4,0	20,758	0,212	1,095	35	09,18	91,74		J 181

Messungen mit blauem Licht

Messung				Spiegel-Stellg.	Lampe Nr.	J_A [Skt]	Min.-Tiefe [mV]	Licht-verluste Δ [%]	Refraktion			\overline{S}_M [mm]	$H-V$ [mm]	S_V [mm]	f_Q^* [Hz]	c_L^* [km/s]	c_0^* [km/s]	Bemerkungen
Nr.	Tag	Zeit	Werte						ϑ [°C]	ρ [Torr]	e [Torr]							
Gruppe: 17 Strecke: 24-48 λ_0 [nm]: 435 Zahl der Meßreihen: 9 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299791,84 km/s $\Delta = 1,96$ km/s $\mu = 0,56$ km/s																		
135	1963 16. 12.	12.56-14.00	101	C	0485 mn	2,6	4,6	3	19,05	709,95	4,1	0,037	9,388	-0,446	39	08,47	90,95	J 181
136	17. 12.	9.47-10.47	101	C	0485 mn	2,5	5,2	3	19,05	711,75	3,8	0,025	9,403	-0,445	39	08,50	91,19	J 182
137		13.14-14.22	101	D	0485 mn	2,8	5,0	0	19,07	710,8	3,6	0,025	9,253	-0,614	42	08,83	91,41	
138		15.05-16.11	101	C	0485 mn	2,9	5,0	3	19,08	710,8	3,6	0,025	9,432	-0,488	43	09,52	92,10	
139	18. 12.	10.51-11.43	101	C	0485 mn	2,6	4,5	6,5...6	18,93	707,8	3,25	0,030	9,440	-0,565	43	10,64	92,91	vorher Messung wegen zu hoher Absorption unmöglich J 183
140		13.25-14.31	101	D	0485 mn	2,7	4,4	1	19,20	706,8	3,6	0,030	9,286	-0,664	43	09,95	92,03	
141	19. 12.	9.44-10.50	101	D	0485 mn	2,5	4,5	4,5...2	19,09	702,2	3,9	0,012	9,278	-0,707	41	10,09	91,66	J 184
142		13.02-14.09	101	C	0485 mn	2,5	4,5	5,5...7,5	19,22	701,2	4,1	0,012	9,454	-0,577	42	10,72	92,13	
146	1964 23. 1.	9.37-10.58	101	D	0535 mn	3,2	5,8	4,5...5	19,42	732,5	5,0	-0,006	9,284	-0,485	41	07,17	92,15	Probemessung vor Umbau auf $F_E = 2000$ mm J 189

Messungen mit blauem Licht über 24-48

Gruppe: 18 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 435 Zahl der Meßreihen: 3 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299791,88 km/s $\Delta = 0,16$ km/s $\mu = 0,07$ km/s

143	1964 16. 1.	10.05-11.11	101	C	0485 mn	2,7	5,4	4,5	20,02	729,9	4,4	20,781	0,188	1,404	37	07,30	91,81	J 186
144		13.59-15.12	101	D	0532 mn	3,2	6	0,5...1	19,95	730,1	4,2	20,781	0,143	1,374	40	07,30	91,86	
145	17. 1.	9.04-10.25	101	D	0485 mn	2,7	5,0	4,5...3	19,96	732,7	4,4	20,789	0,144	1,404	38	07,12	91,97	Blende vor US-Zelle \varnothing 9 mm (bisher u. später \varnothing 10 mm) J 187

Kontroll-Messungen vor Einbau der beiden 2000-mm-Objektive (Anschlußmessungen)

Am 21. 1. und am 22. 1. waren wegen zu hoher Absorption 0-48-Messungen nicht möglich. Deshalb Übergang zu 24-48 am 23. 1.

Die Probemessung M 146 (23. 1. 64) gehört zu Gruppe 17.

Gruppe: 19 Strecke: 24-48 λ_0 [nm]: 435 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 2000 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299792,69 km/s $\Delta = 1,18$ km/s $\mu = 0,36$ km/s

147	1964	23. 1.	13.21-14.18	101	D	0535 mn	3,7	6,9	1	19,51	731,0	4,8	-0,006	9,287	-0,511	43	07,61	92,39	vorher: Meßtisch um ca. 17 mm verschoben J 189
148			14.50-15.53	101	C	0535 mn	3,7	6,2	2,5...2	19,52	730,4	4,8	-0,006	9,424	-0,367	45	07,59	92,30	
149		24. 1.	10.27-11.27	101	C	0535 mn	3,2	6,0	2,5	19,49	728,5	4,8	-0,002	9,440	-0,401	42	08,17	92,67	J 190
150			13.15-14.15	101	D	0535 mn	3,2	6,5	1	19,51	728,5	4,6	-0,002	9,346	-0,503	45	08,36	92,85	
151			14.58-15.58	101	C	0535 mn	3,5	6,6	2,5	19,53	728,9	4,5	-0,002	9,430	-0,463	46	08,94	93,48	
152		27. 1.	9.24-10.20	101	C	0535 mn	3,1	6	2,5	19,60	725,6	5,4	+0,023	9,442	-0,384	39	08,20	92,32	J 191
153			10.52-11.44	101	D	0535 mn	3,5	6,6	0,5	19,54	725,6	5,3	+0,023	9,298	-0,549	42	08,56	92,70	
154			13.32-14.28	101	C	0535 mn	3,5	6,5	1,5	19,46	724,6	5,3	+0,023	9,412	-0,450	44	08,79	92,83	

Messungen mit blauem Licht über 24-48 $F_E = 2000$ mm (Zweites 2000 mm-Objektiv wegen Vergütungsfehler nicht verwendbar. Vergütung muß abpoliert werden.)

Gruppe: 20 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 435 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 2000 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299792,06 km/s $\Delta = 0,42$ km/s $\mu = 0,17$ km/s

155	1964	28. 1.	13.37-14.35	101	C	0535 mn	3,5	7	3,5	19,63	719,2	5,2	20,786	0,159	1,179	45	08,79	92,16	J 192
156			15.03-16.01	101	D	0535 mn	3,6	6,6	0,5	19,65	719,0	5,0	20,786	0,166	1,185	46	08,84	92,18	
157			16.26-17.14	101	C	0535 mn	3,7	6,7	3,5...4	19,50	719,0	5,0	20,786	0,150	1,177	46	08,80	92,19	
158		29. 1.	9.38-10.47	101	C	0535 mn	3,3	6,0	5...7,5	19,63	718,5	5,2	20,781	0,164	1,178	44	08,80	92,09	J 193
159			12.25-13.27	101	D	0535 mn	3,4	6,5	6...4	19,59	718,6	5,1	20,781	0,190	1,199	46	08,88	92,19	
160			13.52-14.47	101	D	0535 mn	3,7	6,4	2,5...1	19,49	718,5	5,0	20,781	0,190	1,210	46	08,81	92,14	Filter im VW gewech- selt; Tisch + V-Spiegel neu justiert
161		30. 1.	10.24-11.25	101	D	0535 mn	3,3	6,4	6...3,5	19,70	716,2	5,0	20,784	0,221	1,224	42	08,79	91,79	J 194
162			13.18-14.30	101	C	0535 mn	3,3	5,5	3,5...4,5	19,55	715,0	4,9	20,784	0,147	1,154	44	08,86	91,77	

Messungen mit blauem Licht $F_E = 2000$ mm

Gruppe: 21 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 2000 Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299792,58 km/s $\Delta = 1,17$ km/s $\mu = 0,37$ km/s

163	1964	30. 1.	15.21-16.28	101	C	0535 mn	5,0	5	2,5...2	19,50	713,7	4,8	20,784	0,150	0,694	46	11,80	91,77	J 194
164		31. 1.	9.06-10.03	101	C	0535 mn	4,8	5,0	1	19,77	717,6	5,7	20,808	0,144	0,590	42	12,41	92,73	J 195
165			10.33-11.33	101	D	0535 mn	5,0	5,2	0,5	19,65	717,9	5,5	20,808	0,135	0,582	46	12,55	92,94	

Messung				Spiegel- Stellg.	Lampe Nr.	J_A [Skt]	Min.- Tiefe [mV]	Licht- verluste Δ [%]	Refraktion			\bar{S}_M^* [mm]	$H-V$ [mm]	S_V [mm]	f_Q^* [Hz]	c_L^* [km/s]	c_0^* [km/s]	Bemerkungen
Nr.	Tag	Zeit	Werte						ϑ [°C]	ρ [Torr]	e [Torr]							
166		13.15-14.11	101	C	0535 mn	4,9	5,1	1	20,06	717,8	5,4	20,808	0,135	0,577	47	12,63	92,89	
167	3. 2.	10.43-11.54	101	C	0535 mn	4,5	5,1	2	20,57	724,5	7,1	20,883	0,162	0,831	40	11,44	92,29	J 196
168		13.29-14.28	101	C	0531 mn	4,8	5,2	1,5	20,57	723,8	6,8	20,883	0,158	0,781	42	11,78	92,55	
169		14.57-15.54	101	D	0531 mn	5,0	5,1	1	20,51	723,8	6,7	20,883	0,175	0,761	44	12,10	92,89	
170	4. 2.	15.01-16.22	101	D	0531 mn	4,7	5,3	0,5...1	20,52	724,8	6,0	20,907	0,234	0,919	44	11,64	92,55	J 197

$F_E = 2000$ mm

Gruppe: 22 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 2000 Spiegel (Schrägeinfall des VL) Mattierte Streuscheibe
30 mV-Bereich c_0 : 299792,41 km/s $\Delta = 0,58$ km/s $\mu = 0,21$ km/s

	1964																	
171	5. 2.	9.00-10.14	101	D	0534 mn	11,6	25	2...0,5	20,53	721,4	5,6	20,933	0,232	0,892	42	11,86	92,40	J 198
172		10.49-11.43	101	C	0534 mn	12,1	22	2	20,51	721,7	5,4	20,933	0,166	0,852	44	11,79	92,37	
173		13.30-14.30	101	D	0534 mn	11,3	23	0	20,43	723,8	5,3	20,933	0,191	0,879	45	11,78	92,62	
174	6. 2.	16.00-16.58	101	D	0531 mn	11,8	23	0,5	20,58	727,5	4,4	20,912	0,247	1,064	46	10,89	92,11	J 199
175	14. 2.	9.45-11.19	101	D	0531 mn	10,05	20	2	20,52	713,5	5,0	20,904	0,251	0,677	37	12,99	92,65	vorher: Spiegel u. VW neu justiert J 200
176		12.57-14.10	103	D	0231 mc	11,8	23	1,5...0,5	20,56	713,5	4,6	20,904	0,244	0,687	41	13,03	92,69	F *
177	17. 2.	10.10-10.37	37	C	0231 mc	10,6	—	6...7,5	20,39	704,2	5,4	20,820	0,179	0,446	38	13,51	92,16	abgebrochen (Nebel)
178		14.56-15.51	101	C	0231 mc	10,5	20	6,5...5	20,40	705,1	5,4	20,820	0,180	0,454	42	13,56	92,31	[J 201

$F_E = 2000$ mm Schrägeinfall des Vergleichslichtes * Quarzuhr am 14. 2. 64 nicht verwendbar

Gruppe: 23 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Spiegel (Schrägeinfall des VL) Mattierte Streuscheibe
30 mV-Bereich c_0 : 299792,27 km/s $\Delta = 0,61$ km/s $\mu = 0,19$ km/s

	1964																	
179	17. 2.	16.27-17.03	51	C	0231 mc	10,8	19	6,5...7,5	20,39	705,1	5,6	20,820	0,186	0,449	44	13,73	92,48	abgebrochen (Nebel) J 201
180	18. 2.	8.55- 9.56	101	C	0231 mc	10,8	22	2...3,5	20,14	708,6	5,4	20,834	0,183	0,537	40	13,10	92,31	J 202
181		10.25-11.18	101	D	0231 mc	10,7	20	2	20,20	709,0	5,2	20,834	0,190	0,547	42	13,13	92,37	
182		13.12-14.13	101	C	0231 mc	10,6	19	1,5...2	20,24	708,8	5,2	20,834	0,186	0,544	44	13,22	92,43	

183		14.39-15.27	101	D	0231 mc	10,7	20,5	2	20,32	709,0	5,4	20,834	0,171	0,541	45	13,15	92,36	vorher: Spiegel und Neutralfilter sorgf. ge- reinigt J 203
184	19. 2.	9.40-11.03	151	D	0231 mc	10	18	1...2	20,78	709,5	6,8	20,835	0,224	0,628	39	12,75	91,87	
185		13.05-14.01	101	C	0231 mc	10,4	18,5	2	20,95	709,3	7,4	20,835	0,174	0,558	43	13,02	92,06	
186		14.37-15.25	101	D	0231 mc	10,5	19	0	20,89	709,7	7,4	20,835	0,188	0,555	44	13,17	92,27	

Schrägeinfall des Vergleichslichtes

Gruppe: 24 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 mm F_E [mm]: 950 mm Spiegel Mattierte Streuscheibe 30 mV-Bereich
 c_0 : 299791,96 km/s Δ = 0,68 km/s μ = 0,19 km/s

	1964																	
187	13. 4.	14.03-15.21	101	C	0231 mc	9,0	19	2,5...1,5	21,19	714,4	6,7	20,950	0,190	0,804	34	12,01	91,57	J 205
188	14. 4.	9.53-10.57	101	C	0231 mc	10,1	20	1	21,21	717,2	6,95	20,958	0,193	0,826	35	11,99	91,85	
189		13.11-14.17	101	D	0231 mc	10,1	17	0	21,13	717,6	6,85	20,962	0,246	0,872	37	12,11	92,04	
190	15. 4.	9.43-10.56	101	D	0231 mc	10,1	20	0	21,40	723,1	5,75	20,952	0,242	0,931	35	11,60	92,08	
191		13.15-14.17	101	C	0231 mc	10,1	21	2	21,38	721,9	5,7	20,960	0,178	0,862	36	11,68	92,04	
192	16. 4.	9.08-10.00	101	C	0924 kn	10,2	23	2,5...2	21,30	719,4	6,6	20,949	0,173	0,807	34	11,88	91,97	Lampe sehr ruhig
193		13.15-14.23	101	D	0924 kn	10,4	19	0	21,48	717,7	6,0	20,965	0,250	0,902	38	12,01	91,87	Lampe unruhig
194	17. 4.	10.20-11.15	101	D	0924 kn	10,2	21	0	21,79	715,3	5,95	20,995	0,238	0,804	38	12,74	92,25	Vorher Spiegel neu- justiert; Lampe etwas besser J 206

Wiederholung von G 23 (Anschlußmessungen)

Gruppe: 25 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 435 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 mm F_E [mm]: 950 mm Spiegel Mattierte Streuscheibe c_0 : 299792,16 km/s
 Δ = 0,72 km/s μ = 0,27 km/s

	1964																	
195	20. 4.	13.40-14.17	51	D	0924 kn	5,0	> 10	0	21,35	713,5	7,35	20,973	0,252	1,270	37	09,73	91,92	10 mV-B. J 207
196		15.13-15.44	51	D	0924 kn	8,3	30	0	21,36	713,1	7,5	20,981	0,245	1,277	39	09,69	91,83	30 mV-B.
197	21. 4.	9.44-10.11	51	D	0924 kn	8,3	> 30	1...0	21,41	714,4	7,3	20,981	0,244	1,251	36	09,80	92,08	30mV-B.
200		15.45-16.15	51	C	0924 kn	8,7	32	2	21,43	713,3	7,4	20,985	0,177	1,233	41	09,71	91,85	30 mV-B.
201	22. 4.	9.41-10.08	51	C	0924 kn	8,0	30	2	21,43	718,1	7,2	20,983	0,184	1,227	37	09,64	92,34	30 mV-B.
204		15.54-16.22	51	D	0924 kn	8,5	29	0	21,49	716,9	5,85	20,996	0,248	1,291	42	09,86	92,43	30 mV-B.
205	23. 4.	9.41-10.14	51	D	0924 kn	7,9	29	1	21,41	718,4	7,35	20,987	0,244	1,308	39	09,58	92,32	30 mV-B.
208		16.05-16.31	51	C	0924 kn	8,7	22	1,5	21,34	717,6	6,9	20,993	0,196	1,240	43	09,88	92,55	30 mV-B.

Messungen mit blauem Licht Schrägeinfall des Vergleichslichtes

Messung				Spiegel- Stellg.	Lampe Nr.	J_A [Skt]	Min.- Tiefe [mV]	Licht- verluste Δ [%]	Refraktion			$\overline{S_M}$ [mm]	$H-V$ [mm]	S_V [mm]	f_Q^* [Hz]	c_L^* [km/s]	c_0^* [km/s]	Bemerkungen
Nr.	Tag	Zeit	Werte						ϑ [°C]	ρ [Torr]	e [Torr]							
Gruppe: 26 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 435 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 mm F_E [mm]: 2000 mm Spiegel Mattierte Streuscheibe 30 mV-Bereich c_0 : 299792,23 km/s Δ = 0,55 km/s μ = 0,19 km/s																		
	1964																	
198	21. 4.	11.03-11.33	51	D	0924 kn	8,6	> 30	0	21,41	714,2	7,0	20,983	0,247	1,250	38	09,93	92,19	
199		14.06-14.34	51	C	0924 kn	8,7	> 30	2	21,43	713,4	7,2	20,987	0,173	1,206	40	09,82	91,98	
202	22. 4.	10.56-11.25	51	C	0924 kn	8,4	24	2,5	21,44	717,8	6,8	20,983	0,190	1,241	39	09,63	92,30	
203		14.07-14.39	51	D	0924 kn	8,5	30	0	21,46	717,2	6,35	20,993	0,246	1,285	40	09,82	92,42	
206	23. 4.	11.12-11.40	51	D	0924 kn	8,3	29	0	21,37	718,5	7,05	20,991	0,244	1,316	40	09,60	92,37	
207		14.39-15.12	51	C	0924 kn	8,9	30	3,5	21,40	717,7	6,8	20,992	0,197	1,238	42	09,85	92,52	
209	24. 4.	9.44-10.22	51	C	0924 kn	8,1	24	2	21,38	715,7	7,2	20,978	0,194	1,256	39	09,53	91,97	J 208
210		11.08-11.38	51	C	0924 kn	8,7	23	2,5	21,33	715,2	6,85	20,978	0,196	1,244	41	09,72	92,12	

Messungen mit blauem Licht $F_E = 2000$ mm Schrägeinfall des Vergleichslichtes

Gruppe: (27a) Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 2 F_S [mm]: 1000 mm F_E [mm]: Siehe Bemerkungen Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe
10 mV-Bereich c_0 : (299789,26) km/s Δ = 0,11 km/s μ = 0,05 km/s

	1964																	
(211)	27. 4.	13.39-14.14	51	C	0930 kn	4,5	5,5	1	21,29	723,2	6,00	20,930	0,150	1,301	39	08,68	89,20	$F_E = 2000$ mm J 209
(212)		14.52-15.27	51	C	0930 kn	4,5	5,2	1	21,31	722,8	6,05	20,930	0,160	1,301	41	08,84	89,31	$F_E = 1000$ mm

Fehlmessungen: Apparatur sehr unempfindlich Starke Einstreuungen festgestellt

Gruppe: 27b Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 10 F_S [mm]: 1000 mm F_E [mm]: 2000 mm Kleiner Würfel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich
 c_0 : 299792,38 km/s Δ = 0,66 km/s μ = 0,21 km/s

	1964																	
213	28. 4.	10.08-10.43	51	C	0930 kn	4,5	5,3	1,5	21,58	721,5	5,9	20,937	0,156	0,818	38	11,78	92,03	
214		12.56-13.26	51	C	0930 kn	4,7	5,5	2	21,75	720,6	5,75	20,949	0,161	0,796	40	12,07	92,18	
215		14.16-14.49	51	D	0930 kn	4,8	5,2	0	21,83	720,0	5,15	20,952	0,258	0,879	41	12,22	92,25	
216		15.35-16.06	51	D	0928 kn	5,0	5,7	0	21,79	719,6	4,95	20,957	0,258	0,885	42	12,21	92,21	
217	29. 4.	9.14- 9.44	51	D	0928 kn	4,6	5,9	0	21,56	721,3	7,75	20,961	0,252	0,872	38	12,19	92,40	
218		10.24-10.56	51	D	0928 kn	4,8	5,7	0	21,43	721,3	7,50	20,964	0,245	0,864	40	12,26	92,51	

219		13.21-13.52	51	C	0928 kn	4,5	5,0	1,5	21,37	720,8	7,20	20,971	0,153	0,752	41	12,48	92,69
220		14.25-14.57	51	C	0828 kn	4,4	5,0	2	21,33	720,4	6,9	20,974	0,158	0,755	42	12,51	92,69
221	30. 4.	9.22- 9.54	51	C	0928 kn	4,1	4,7	1	21,33	723,6	7,15	20,976	0,160	0,853	38	11,82	92,36
222		11.18-11.54	51	D	0928 kn	4,2	4,5	0	21,29	723,5	7,6	20,971	0,263	0,943	42	12,00	92,53

J 210

Wiederholung von G 21

Gruppe: 28 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 mm F_E [mm]: 950 mm Spiegel Mattierte Streuscheibe 30 mV-Bereich/10 mV-Bereich* c_0 : 299792,33 km/s $\Delta = 0,30$ km/s $\mu = 0,08$ km/s

	1964																
223	14. 7.	9.39-10.14	51	C	0928 kn	9,1	13,0	2,0	22,11	723,5	10,0	21,200	-0,982	-0,174	27	12,12	92,39
224		10.52-11.22	51	C	0928 kn	9,3	14,0	1,0	22,40	723,5	10,2	21,200	-0,978	-0,181	29	12,29	92,48
225		13.23-13.58	51	D	0928 kn	9,7	14,5	0	22,63	723,1	9,4	21,200	-0,884	-0,078	30	12,23	92,32
226		14.44-15.12	52	D	0928 kn	9,6	15	0	22,68	722,9	10,0	21,200	-0,885	-0,080	31	12,28	92,33
227	15. 7.	9.38-10.05	51	D	0928 kn	8,9	15,5	1	22,35	725,3	11,4	21,197	-0,910	-0,068	28	11,94	92,32
228		10.45-11.21	51	D	0928 kn	9,2	16	1,5	22,60	725,1	11,5	21,207	-0,918	-0,065	29	11,98	92,27
229	16. 7.	14.15-14.45	51	C	0928 kn	8,8	5,3*	2	23,20	724,0	10,2	21,265	-0,984	-0,085	33	12,15	92,18
230		15.32-16.01	51	C	0928 kn	9,1	4,8*	2	23,26	723,8	10,1	21,270	-0,973	-0,104	33	12,37	92,36

J 212

Wiederholung von G 24 (Anschlußmessungen) Ab hier: Neues Hochspannungs-Netzgerät

Gruppe: 29 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 2000 mm (unvergütet) F_E [mm]: 2000 mm (vergütet) Spiegel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299791,65 km/s $\Delta = 0,67$ km/s $\mu = 0,21$ km/s

	1964																
231	17. 7.	12.00-12.29	51	C	0928 kn	7,0	7,5	2,5	23,18	724,3	12,9	21,279	-0,984	-0,042	33	11,97	91,99
232		14.05-14.42	51	C	0928 kn	6,7	7,5	2,5	23,33	723,9	12,9	21,279	-0,987	-0,011	33	11,76	91,70
233		15.44-16.09	51	D	0928 kn	7,2	7	1...2,5	23,02	723,9	13,2	21,279	-0,892	+0,095	33	11,69	91,71
234	20. 7.	9.50-10.19	51	D	0928 kn	6,5	7,5	1	23,08	719,8	13,0	21,356	-0,902	+0,057	29	12,25	91,80
235		10.48-11.14	51	D	0928 kn	6,9	7,5	1	23,28	719,6	13,1	21,368	-0,908	+0,056	30	12,29	91,76
236		13.30-13.58	51	C	0928 kn	7,2	7,5	1,5	23,59	718,8	13,1	21,382	-0,972	+0,030	33	12,24	91,54
237		14.59-15.28	51	C	0928 kn	7,2	7,5	1,5	23,68	718,3	11,9	21,382	-0,976	+0,040	33	12,15	91,39
238		16.00-16.27	51	C	0928 kn	7,4	7,5	2,5	23,75	718,0	12,4	21,395	-0,985	+0,054	34	12,14	91,32

J 213

Neutralfilter imVW
gewechselt

$F_S = F_E = 2000$ mm Kleinere Aperturblende vor der Ultraschallzelle $D_1 = 9$ mm (bisher 10 mm)

Messung				Spiegel-Stellg.	Lampe Nr.	J_A [Skt.]	Min.-Tiefe [mV]	Lichtverluste Δ [%]	Refraktion			\overline{S}_M^* [mm]	$H-V$ [mm]	S_V [mm]	f_Q^* [Hz]	c_L^* [km/s]	c_0^* [km/s]	Bemerkungen
Nr.	Tag	Zeit	Werte						ϑ [°C]	ρ [Torr]	ϵ [Torr]							

Gruppe: 30 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 2000 mm (unvergütet) F_E [mm]: 2000 mm (vergütet) Spiegel Mattierte Streuscheibe
10 mV-Bereich c_0 : 299792,43 km/s Δ = 2,05 km/s μ = 0,64 km/s

	1964																	
239	21. 7.	10.33-11.06	51	C	0928 kn	7,7	7	0,5	23,59	718,7	11,2	21,396	-0,992	0,055	32	12,04	91,36	J 214
240		13.05-13.35	51	C	0928 kn	8,0	7,5	0,5	23,90	717,8	11,6	21,396	-0,996	-0,061	34	12,79	91,92	
241		14.40-15.17	52	D	0928 kn	8,1	6	0	23,92	717,2	12,4	21,396	-0,885	-0,185	35	14,31	93,36	Lampe sehr unruhig
242		16.02-16.43	51	D	0928 kn	8,2	6	0...1,5	23,78	716,8	13,0	21,396	-0,898	-0,210	35	14,38	93,41	
243	22. 7.	9.30-10.10	51	D	0361 mc	9,4	7	2	23,19	719,2	12,2	21,426	-0,904	0,049	32	12,82	92,29	
244		10.47-11.41	50	D	0361 mc	9,8	8	-0,5	23,32	719,2	12,4	21,430	-0,909	0,048	34	12,87	92,30	
245		13.52-14.28	51	C	0361 mc	9,5	8,5	2	23,60	718,4	12,4	21,437	-0,970	-0,031	35	13,07	92,33	
246		15.30-16.07	51	C	0361 mc	9,5	9	0,5	23,60	718,5	12,0	21,446	-0,974	-0,040	36	13,16	92,44	

Wie G 29 aber ohne SEV-Blende Bei M 239-M 243 Störungen durch Nebenlicht der Tischlampe

Gruppe: 31 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 2000 mm (vergütet) F_E [mm]: 2000 mm (unvergütet) Spiegel Mattierte Streuscheibe
10 mV-Bereich c_0 : 299792,14 km/s Δ = 0,58 km/s μ = 0,25 km/s

	1964																	
247	23. 7.	10.27-11.05	51	C	0361 mc	8,6	8,5	3,0	22,38	721,7	12,6	21,425	-0,980	0,022	32	12,51	92,47	
248		12.43-13.17	51	C	0361 mc	8,9	8,5	4,0	22,41	721,9	12,4	21,418	-0,988	0,015	34	12,50	92,47	
249		14.53 15.30	51	D	0361 mc	8,7	8,5	2...0,5	22,58	721,7	12,4	21,418	-0,890	0,134	35	12,42	92,32	
250		16.06-16.56	50	D	0361 mc	8,8	8,5	2...1,5	22,67	721,5	12,05	21,418	-0,892	0,144	36	12,35	92,21	
251	24. 7.	8.28- 8.59	51	D	0361 mc	7,7	7,5	2	22,42	722,8	9,7	21,389	-0,904	0,163	30	11,78	91,89	J 215
252		10.40-11.01	51	D	0194 mb	8,7	8,5	0,5...1	22,63	722,6	9,4	21,389	-0,908	0,167	34	11,87	91,91	
253		13.18-13.47	51	C	0196 mb	8,5	9,5	1	22,87	722,2	9,3	21,389	-1,008	0,059	36	11,97	91,90	
254		13.58-14.27	51	C	0196 mb	9,2	10	2	22,87	722,2	9,2	21,389	-1,006	0,060	36	11,98	91,91	

Wie G 29 aber vergütete Linse auf der Sendeseite

Gruppe: 32 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 2000 (unvergütet) F_E [mm]: 2000 (vergütet) Spiegel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich c_0 : 299791,93 km/s Δ = 0,54 km/s μ = 0,16 km/s

	1964																	
255	2. 9.	10.59-11.40	53	D	0231 mc	8,2	7,8	0	21,32	725,2	7,0	21,148	-0,866	-0,020	28	11,61	92,33	
256	8. 9.	9.35-10.08	51	C	0308 kb	9,3	6,5	2,5	21,35	720,7	9,95	21,132	-0,965	-0,150	29	11,75	91,91	
257		13.57-14.31	52	D	0308 kb	10,1	7	0,5	21,30	720,5	9,15	21,131	-0,902	-0,052	32	11,62	91,79	

258	9. 9.	10.50-11.21	51	D	0308 kb	9,5	7	0,5	21,48	722,1	10,5	21,116	-0,920	-0,078	32	11,58	91,86
259		13.55-14.43	51	C	0308 kb	9,8	6,5	1	21,63	721,3	10,0	21,118	-0,995	-0,160	34	11,68	91,84
260	10. 9.	10.01-10.50	50	C	0308 kb	9,5	7	2,5...1	21,77	721,9	10,65	21,112	-0,997	-0,172	32	11,66	91,83
261		15.32-16.06	51	D	0306 kb	9,6	6,5	0	22,06	720,7	10,7	21,128	-0,868	-0,072	36	12,04	92,00
262	11. 9.	13.35-14.11	53	D	0306 kb	8,9	7,0	1	22,41	720,1	10,9	21,136	-0,882	-0,082	35	12,06	91,86

Neues Psychrometer

Wie G 29 Ab hier: Neues Anzeiginstrument Neuer Frequenzzähler (Hewlett-Packard) Wiederholung von G 29 mit sehr sorgfältiger Linsenjustierung

Gruppe: 33 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 2000 (unvergütet) F_E [mm]: 2000 (vergütet) Spiegel Mattierte Streuscheibe
10 mV-Bereich c_0 : 299792,07 km/s $A = 0,40$ km/s $\mu = 0,12$ km/s

1964																	
263	15. 9.	11.14-12.03	51	D	0306 kb	9,3	6,5	2...0	22,54	719,7	12,25	21,150	-0,918	-0,207	34	12,66	92,36
264		14.30-15.02	51	D	0306 kb	9,8	6,5	0,5	22,91	718,8	10,9	21,167	-0,922	-0,163	36	12,51	92,03
265	16. 9.	10.16-10.47	51	D	0306 kb	9,2	6,0	2	22,63	716,6	11,05	21,172	-0,929	-0,207	34	12,72	92,07
266		14.20-14.53	51	C	0306 kb	9,8	6,0	2,5	23,13	715,7	10,45	21,195	-0,987	-0,273	37	13,01	92,13
267	17. 9.	10.44-11.13	51	C	0306 kb	8,7	6,5	1	22,03	718,5	8,8	21,189	-1,007	-0,195	34	12,27	92,02
268		14.01-14.30	53	D	0306 kb	9,3	6,5	0	22,03	717,7	8,6	21,186	-0,904	-0,096	36	12,32	91,99
269	18. 9.	10.10-10.42	51	D	0306 kb	8,7	6,7	0	21,44	719,8	9,6	21,148	-0,917	-0,088	34	11,91	91,96
270		13.43-14.18	51	C	0306 kb	9,6	6,0	1	21,29	719,6	9,45	21,140	-1,002	-0,174	36	11,91	91,98

Wiederholung v. M 263

Wiederholung von G 30 mit sehr sorgfältiger Justierung und möglichst geringem Nebenlicht.

Gruppe: 34 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 2000 (unvergütet) F_E [mm]: 2000 (vergütet) Spiegel Mattierte Streuscheibe
10 mV-Bereich c_0 : 299792,13 km/s $A = 0,26$ km/s $\mu = 0,08$ km/s

1964																	
271	23. 9.	14.36-15.09	51	C	0041 nC	6,8	7,5	1...0,5	20,71	725,9	5,95	20,962	-0,998	-0,254	36	11,32	92,30
272	24. 9.	10.08-10.39	51	C	0041 nC	6,7	7,3	1,5	21,07	723,0	6,7	20,941	-0,997	-0,320	35	11,61	92,16
273		14.20-15.19	51	D	0041 nC	6,9	7,6	0	21,13	721,9	7,65	20,954	-0,872	-0,181	37	11,65	92,04
274	25. 9.	13.20-13.58	51	D	0041 nC	6,7	7,5	0	21,37	722,8	8,3	20,958	-0,908	-0,231	37	11,76	92,18
275	29. 9.	16.34-17.00	51	D	0041 nC	6,3	7,0	1,5	20,94	721,4	9,65	20,974	-0,940	-0,238	37	11,71	92,07

Vorher: Phasenstruktur überprüft. Ohne Nachstellg. $\Delta\varphi_{max} \approx 3,5^\circ$

Messung				Spiegel-Stellg.	Lampe Nr.	J_A [Skt.]	Min.-Tiefe [mV]	Licht-verluste Δ [%]	Refraktion			$\overline{S_M}$ [mm]	$H-V$ [mm]	S_V [mm]	f_Q^* [Hz]	c_L^* [km/s]	c_0^* [km/s]	Bemerkungen
Nr.	Tag	Zeit	Werte						δ [°C]	p [Torr]	e [Torr]							
276	30. 9.	11.09-11.48	51	D	0041 nC	6,4	6,4	1,5...1	21,30	722,5	9,8	20,964	-0,948	-0,258	37	11,72	92,10	Vorher: Glimmlampen-Wechsel
277	2. 10.	14.48-15.17	51	D	0041 nC	6,7	7,3	1,5	21,18	720,7	9,3	20,961	-0,950	-0,320	31	11,88	92,10	
278	5. 10.	13.45-14.33	51	C	0041 nC	6,7	8,0	2...2,5	21,27	724,1	9,5	20,955	-1,001	-0,297	35	11,53	92,10	

Neuer Photomultiplier RCA 7326 Nr. 12. 2. 34 Die Messungen sind wesentlich störanfälliger als früher (G 32, G 33)
Am 30. 9. 64 wurden Einstreuungen um 0,5 mV festgestellt. Untersuchungen ergaben Kippschwingungen einzelner Glimmlampen.

Gruppe: 35 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 4 F_S [mm]: 2000 (vergütet) F_E [mm]: 2000 (unvergütet) Spiegel Mattierte Streuscheibe 10 mV-Bereich $c_0 = 299792,00$ km/s $\Delta = 0,24$ km/s $\mu = 0,09$ km/s

279	1964 5. 10.	15.57-16.41	51	C	0041 nC	6,6	8,0	2,5	21,26	723,7	9,7	20,958	-1,002	-0,292	36	11,51	92,04	abgebrochen
280A	6. 10.	11.25-12.12	32	C	0041 nC	6,3	—	2,5	21,29	724,3	10,0	20,930	-1,001	-0,319	35	11,51	92,09	
280		14.04-16.08	75	C	0041 nC	6,5	6,0	1,5...2	21,18	722,8	9,85	20,938	-1,014	-0,324	37	11,56	92,01	
281	7. 10.	13.51-15.04	51	C	0041 nC 0017 nC	8,2 10,3	6,8	1	21,47	713,4	8,7	20,938	-1,000	-0,455	38	12,51	91,85	Lampenwechsel vor Wert 23 J 223

Photomultiplier RCA 7326 Nr. 12. 2. 34 bringt Störungen Ab M 280 Wert 25 wieder Nr. 8. 8. 392 verwendet.

Gruppe: 36 Strecke: 0-48 λ_0 [nm]: 546 Zahl der Meßreihen: 8 F_S [mm]: 1000 F_E [mm]: 950 Spiegel Mattierte Streuscheibe 30 mV-Bereich $c_0: 299792,28$ km/s $\Delta = 1,14$ km/s $\mu = 0,33$ km/s

282	1965 12. 3.	11.28-12.03	52	C	041 nC	8,0	33	3,5...3	20,28	721,6	4,2	20,559	-1,248	-1,026	24	11,68	92,33	$\Delta\varphi_{max}$ [grd.] 3,3
283		14.02-14.37	52	D	041 nC	8,2	32	1,5	20,30	720,7	4,15	20,566	-1,150	-0,877	24	11,41	91,95	2,7
284	15. 3.	11.42-12.20	51	D	041 nC	7,0	26	2...2,5	20,39	720,45	5,0	20,554	-1,122	-0,912	21	11,63	92,11	3,3
285		14.37-15.17	51	C	041 nC	7,8	30	2,5	20,36	720,1	5,2	20,554	-1,229	-1,054	21	11,85	92,29	3,3

J 237

286	16.	3.	10.10-10.39	51	C	041 nC	8,0	33	2,5	20,36	718,0	5,55	20,589	-1,233	-1,061	21	12,08	92,28	3,0
287			15.49-16.15	51	D	304 kb	10,4	> 33	0	20,41	718,5	6,75	20,610	-1,122	-1,038	23	12,86	93,09	3,0
288	17.	3.	11.00-11.30	51	D	304 kb	9,8	> 33	0	20,52	715,75	5,6	20,614	-1,179	-0,970	23	12,11	92,09	3,3
289			16.16-16.48	51	C	304 kb	10,6	> 33	1	20,57	712,6	5,4	20,614	-1,238	-1,103	23	12,57	92,11	3,0

J 238

Ultraschallzelle mit Rührwerk $U_{\text{Mot}} = 3 \text{ V}$ $U_Q = 90 \text{ V}$ Neues Empfängergehäuse $U_{\mathcal{E}} = 1350 \text{ V}$, Spannungsteiler für Dynodenspannungen: Drahtwiderstände (bisher Glimmlampen) Phasenstruktur bei jeder Meßreihe überprüft

Gruppe: 37 Strecke: 0-48 $\lambda_0[\text{nm}]$: 546 Zahl der Meßreihen: 8 $F_S[\text{mm}]$: 1000 $F_E[\text{mm}]$: 950 Spiegel Mattierte Streuscheibe 30 mV-Bereich c_0 : 299792,14 km/s $\Delta = 0,33 \text{ km/s}$ $\mu = 0,09 \text{ km/s}$

	1965																		
290	18.	3.	10.50-11.17	53	E	304 kb	9,7	> 33	2,5	20,55	709,95	5,5	20,628	-1,172	-1,083	22	12,90	92,15	3,0
291			14.58-15.30	51	F	304 kb	11,3	> 33	0	20,58	707,9	5,85	20,637	-1,252	-1,187	25	13,20	92,21	2,7
292	22.	3.	11.33-12.05	51	F	304 kb	8,6	> 33	0...0,5	20,60	715,35	6,8	20,656	-1,251	-1,013	22	12,24	92,06	3,3
293			14.07-14.42	51	E	304 kb	10,2	32	2,5	20,62	714,9	6,5	20,656	-1,160	-0,912	22	12,17	91,94	2,7
294	23.	3.	10.12-10.43	51	E	027 mb	10,4	30	3...1,5	20,54	707,35	6,4	20,668	-1,160	-1,070	23	13,19	92,14	3,0
295			12.58-13.28	51	F	025 mb	10,0	29	0,5	20,69	707,7	6,6	20,676	-1,244	-1,158	22	13,21	92,15	2,4
296	24.	3.	11.40-12.13	51	F	025 mb	10,1	32	0	20,83	709,6	6,95	20,690	-1,243	-1,114	24	13,08	92,20	3,3
297			14.19-14.49	52	E	025 mb	10,5	> 33	0,5	20,88	710,45	6,85	20,690	-1,148	-1,017	24	13,07	92,27	2,7

J 239

Starke Lampenschwankungen

J 240

Wie G 36 aber Spiegel O 2 durch O 4 ersetzt, weil dieser homogener reflektiert.

VI. DAS ERGEBNIS

1. UNTERSUCHUNG SYSTEMATISCHER EINFLÜSSE

Sind Meßstrecke S_M , Modulationsfrequenz f_m und die Brechzahl n_g hinreichend genau bekannt, so bestimmt der Phasenabgleich die Meßgenauigkeit. Seine Empfindlichkeit wurde in Abschnitt IV untersucht; sie sagt aus, wie genau der Ort des Spannungs-Minimums festgelegt werden kann. Bei zwei aufeinanderfolgenden Messungen über s_{M1} und s_{M2} liefert der Abstand der zugehörigen Spannungs-Minima $s_{V2}-s_{V1} = 2 S_V$ die letzte zur Berechnung von c_0 fehlende Größe.

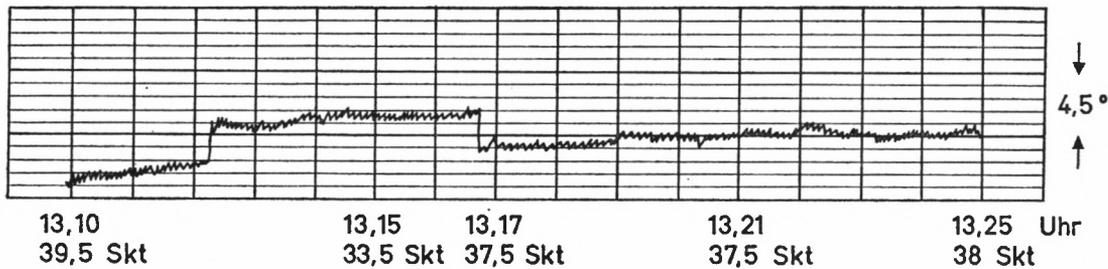
Zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit wird vorausgesetzt, daß der Phasenunterschied der im Empfänger gemessenen Wechselspannungen nur vom optischen Weg abhängt, den Meß- und Vergleichslicht durchlaufen. Zusätzliche Phasenverschiebungen sind zulässig, wenn sie bei Messung 1 und Messung 2 konstant bleiben. Jede Änderung der Modulationsphase, die nur bei jeweils einer Messung auftritt, führt zu falschen Ergebnissen. Die Fehler können statistisch schwanken, sie verringern dann die Empfindlichkeit des Phasenabgleiches, erschweren die Messung und ergeben eine größere Streuung der Meßwerte. Sie können aber auch konstant sein oder sich nur langsam ändern. Man spricht dann von systematischen Einflüssen, die um so schwerer zu finden sind, je kleiner sie sind und je stabiler sie mit dem Meßaufbau verbunden sind.

Als Fehlerursachen kommen hauptsächlich in Frage:

- a) Die Phasenstruktur des modulierten Lichtes, wenn sie auf den zwei Meßwegen unterschiedlich verändert wird.
- b) Die Laufzeitstreuung des Photomultipliers, wenn der Unterschied der Elektronenlaufzeiten bei beiden Messungen über ganze Meßreihen konstante Anteile hat.
- c) Divergent aus der Sendelinse austretendes Licht, das z. T. vom Spiegelpaar C_1-D_1 reflektiert wird und auf den Photomultiplier fällt, während der vom Spiegelpaar C_2-D_2 zurückgeworfene Anteil viel kleiner ist.

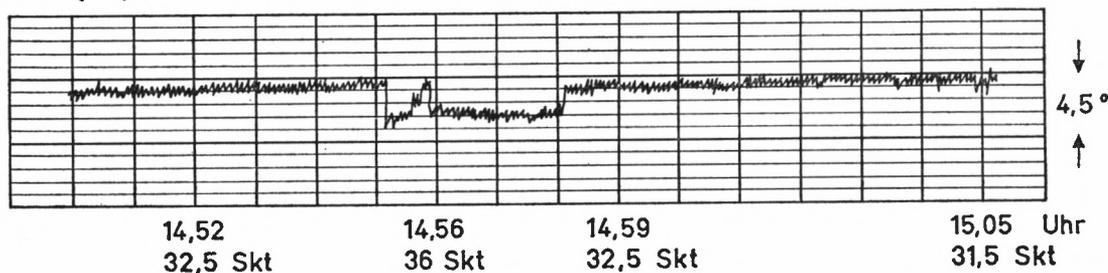
a) Die Phasenstruktur des modulierten Lichtes

Der Einfluß einer unterschiedlichen Änderung der Intensitäten einzelner Teilbündel auf die Modulationsphase φ tritt bereits deutlich hervor, wenn der Bogen der Quecksilber-Höchstdrucklampe sprunghaft seine Lage und seine Lichtverteilung ändert und dabei den Spalt $S\varphi_2$ anders ausleuchtet. Zeichnet man die Phase eines Teilbündels (bezogen auf die mittlere Phase des Gesamtbündels) in Abhängigkeit von der Zeit auf, so registriert man den Wechsel der Ausleuchtung als Phasensprung. Der Lichtbogen kann nach kurzer Zeit wieder in seine Ausgangslage zurückspringen, wenn sich die neue Bogenlage als weniger stabil

Messung 28.8.1963 /31Min
↔ $\lambda_0 = 546 \text{ nm}$ Ausblendung: II, 2 $U_Q = 62 \text{ V}$ $f_Q = 9,362032 \dots 37 \text{ MHz}$

Lampe: HBO 100 W/2 RH, Nr. 0391 mn.

Die ausgeblendete Teilphase steigt langsam an. (Einlauffeffekt der Oszillatoren.) Kurz nach 13.12 Uhr springt sie um $-2,7^\circ$ und kehrt kurz vor 13.17 Uhr auf ihren früheren Wert zurück.

aus Messung 28.8.1963 /51Min
↔ $\lambda_0 = 546 \text{ nm}$ Ausblendung: II, 2 $U_Q = 64 \text{ V}$

Lampe: HBO 100 W/2 RH, Nr. 0391 mn.

Die ausgeblendete Teilphase ist jetzt konstant. Kurz nach 14.55 Uhr springt sie um $+2,7^\circ$. Die Phasenänderung geht zunächst teilweise, dann vollständig zurück. Um 14.56 Uhr springt die Phase wieder auf den neuen Wert und kehrt kurz nach 14.58 Uhr in die Ausgangslage zurück.

Bild 17: „Phasensprung“ bei plötzlicher Änderung der Lichtbogenlage

erweist (Bild 17). Während einer c -Messung erhält man bei „Lampensprüngen“ plötzlich neue Supporteinstellungen für beide Meßwege. Ändert sich die Ausleuchtung zwischen Messung 1 und Messung 2, so wird die Differenz $H-V = S_V$ falsch. Es ist dann nicht sinnvoll, diese Werte zur Bestimmung von c_L zu verwenden. Die Meßreihe wurde an solchen Stellen unterbrochen und mit den neuen Phasenwerten weitergeführt. Auch hier konnte ein Zurückspringen des Bogens in die alte Lage beobachtet werden. Daneben kommen bei instabilen Lampen weitere Lageänderungen vor. Es ist praktisch nicht möglich, solche Lampen als Lichtquellen für die c -Messung weiter zu verwenden. Bild 18 zeigt einen Ausschnitt aus dem Meßprotokoll von M 90 mit zwei Lampensprüngen. Durch den gleichartigen Aufbau von Meßweg und Vergleichsweg verringert sich die Phasenänderung auf ca.

Bild 18: Ausschnitt aus dem Meßprotokoll von M 90 (10. 10. 1963)

Nr.	Zeit	V	H	M_V	M_H	D	Bemerkungen	
30	10.22	5,28	6,46	5,28	6,46	+ 1,18	$NF_V = 80,5\%$ $NF_H = 83\%$	
		5,29			6,46	17		
		5,29	6,46	5,29	6,46	17		
		5,29			6,46	17		
36	10.25	5,29	6,45	5,29	6,46	17	$f_Q = 9,362036$	
		5,00			6,46	17		
37	10.37	5,00	6,17	5,00	6,16	+ 1,17	$U_Q = 65 \text{ V}$	
		4,99				6,16		16
40	10.40	5,00	:	:	:	:	NF_V } unverändert NF_H }	
		:						
		:						
		11.22						5,02
80	11.25	5,03	6,18	5,02	6,18	15	$NF_V = 80,5\%$ $NF_H = 84\%$	
		5,02			6,18	16		
		5,30			6,17	16		
81	11.30	5,30	6,47	5,30	6,47	+ 1,17	$U_Q = 65 \text{ V}$	
		5,31				6,47		16
		11.32				5,31		6,47

Sprunghafte Lageänderungen des Lichtbogens verursachen eine Verschiebung beider Minima. Die Differenz $D = S_V$ bleibt konstant.

Der erste Sprung liegt zwischen den Meßwerten 36 und 37. Die Messung läuft dann normal weiter, bis der Bogen zwischen den Meßwerten 80 und 81 in seine ursprüngliche Lage zurückspringt.

0,014 Grad entsprechend einer Supportverschiebung von 0,30 mm, die dann bei der Differenzbildung $H-V = S_V$ ganz herausfällt.

In Tabelle 2 sind die maximalen Phasenunterschiede $\Delta\varphi_{\max}$ eingetragen, die man bei guter Justierung der hier eingesetzten Ultraschall-Lichtmodulatoren erhält, wenn das Gesamtbündel in 16 Teilbündel unterteilt wird. Sie liegen bei 2 bis 3,5 Grad, entsprechen also Wegänderungen um 70 mm. Die erzielbare Empfindlichkeit und die angestrebte Meßgenauigkeit betragen etwa 1 Promille dieser Strecke. Änderungen der A_k (vgl. IV. 4. b) zwischen Messung 1 und Messung 2 dürfen die mittlere Modulationsphase also höchstens um $3,5 \cdot 10^{-3}$ Grad verfälschen. Jede Schwächung des Lichtstroms auf einem Meßweg – ob beabsichtigt oder nur in Kauf genommen – muß deshalb so homogen erfolgen, daß der entstehende Phasenfehler diese Grenze nicht erreicht.

Große Abweichungen treten auf, wenn Teile des Meßlichtes auf einem der Meßwege abgeschnitten werden. Das Licht muß ohne jede Behinderung auf das Spiegelpaar $C-D$ fallen und von diesem reflektiert werden. An der Empfanglinse darf der Bündeldurchmesser

nicht größer sein als die freie Öffnung D_4^* . Der Strahlenteilerwürfel T_2 und die dahinter liegende Blende müssen dem Bündel ungehinderten Zutritt zur Streuscheibe gestatten.

Wegen der Bildvergrößerung durch die Ultraschallzelle sind die Ränder des Lichtbündels etwas verwaschen und schwer zu erkennen. Es bedurfte einiger Erfahrung im Justieren der Apparatur, um hier Phasenfehler sicher zu vermeiden. Bei der Meßgruppe G_0 hat sehr wahrscheinlich ein kleiner Teil des Meßlichtes vom fernen Spiegel beim Durchgang durch T_2 den unteren Rand des Würfels überschritten. Der optisch sehr sorgfältig ausgeführte, leider aber etwas kleine Strahlenteiler wurde bei diesen Messungen erstmals benutzt. Durch ein Versehen ist der Lichtdurchgang am Strahlenteiler zunächst stets bei eingefahrenem vorderen Spiegelpaar kontrolliert worden. Der Bündeldurchmesser ist in dieser Stellung etwas kleiner, und das Bündel gelangte ungehindert durch den Glaswürfel. Die Fehlermöglichkeit wurde erst beim Umbau zur Messung 24–48 (G_1) entdeckt und durch sorgfältige Justierung von Meßlichtern und Würfel eliminiert. Die Ergebnisse von G_0 liegen – verglichen mit den anderen Meßwerten – zu tief. Wegen der Inkonstanz der Phasenstruktur schwanken die Werte. Auch die Ergebnisse der einzelnen Meßreihen streuen stark, weil der abgeschnittene Teil des Lichtes bei mehrmaliger Neujustierung verändert worden ist. Dieses Verhalten ist kennzeichnend für Phasenfehler, die durch Beschneidung des Lichtbündels entstehen. Er läßt sich jederzeit nachbilden, wenn man an der Empfangslinse einen kleinen Teil des Lichtes am Bündelrande abdeckt. Die Resultate der Meßgruppe G_0 sind als offensichtlich falsch nicht weiter verwendet worden.

Auch bei sehr sorgfältiger Justierung nicht zu entdecken sind Phasenfehler durch inhomogene Reflexion an den Umkehrspiegeln. Bedingt durch das Aufdampfverfahren sinkt das Reflexionsvermögen der meisten Oberflächenspiegel gegen die Ränder hin etwas ab. Dort auftreffende Lichtbündel kehren deshalb mit kleinerer Intensität zum Meßtisch zurück als Teilbündel, die in der Spiegelmitte reflektiert werden. Wegen der Bündelaufweitung ist die Ausleuchtung des hinteren Spiegelpaares (C_2 – D_2) größer als die von C_1 – D_1 und die Ränder des Lichtbündels erfassen dort leicht Zonen mit niedrigerem Reflexionsfaktor. Frühere Messungen mußten aus diesem Grunde abgebrochen werden [4]. Die Planspiegel wurden z. T. mehrmals neu belegt und das Reflexionsvermögen der einzelnen Zonen gemessen. Die Bilder 19a–c zeigen die Ergebnisse. Hiernach war es erstmals möglich, die beiden Spiegelpaare auszutauschen, ohne das Meßergebnis zu verfälschen. Um sicherzustellen, daß Spiegelfehler keinen Einfluß mehr auf den gemessenen ε -Wert haben, wurden folgende Änderungen vorgenommen:

1. Austausch der Spiegelpaare (Spiegelstellungen A, B): G_0 – G_{10} .
2. Austausch der Planspiegel eines Paares, dann Spiegelwechsel wie bei (1). (Spiegelstellungen \bar{A}, \bar{B}): G_{11} .
3. Ersetzen eines Planspiegels durch einen neuen, dann Spiegelwechsel wie bei (1). (Spiegelstellungen C, D): ab G_{12} .
4. Änderung der Phasenstruktur durch Übergang von $\lambda_0 = 546$ nm zu $\lambda_0 = 435$ nm ohne Neujustierung der Ultraschallzelle (Vergrößerung von $\Delta\varphi_{\max}$, Änderung der φ_k): G_7 .
5. Änderung der Phasenstruktur durch Übergang von $\lambda_0 = 546$ nm zu $\lambda_0 = 435$ nm mit Neujustierung der Ultraschallzelle (Änderung der φ_k und der A_k): G_{16} – G_{20} , G_{25} , G_{26} .
6. Änderung der Spiegelausleuchtung durch andere Sendelinsen ($F_3 = 700$, $F_3 = 2000$ mm, statt $F_3 = 1000$ mm): G_4 , G_5 , G_{29} – G_{35} .

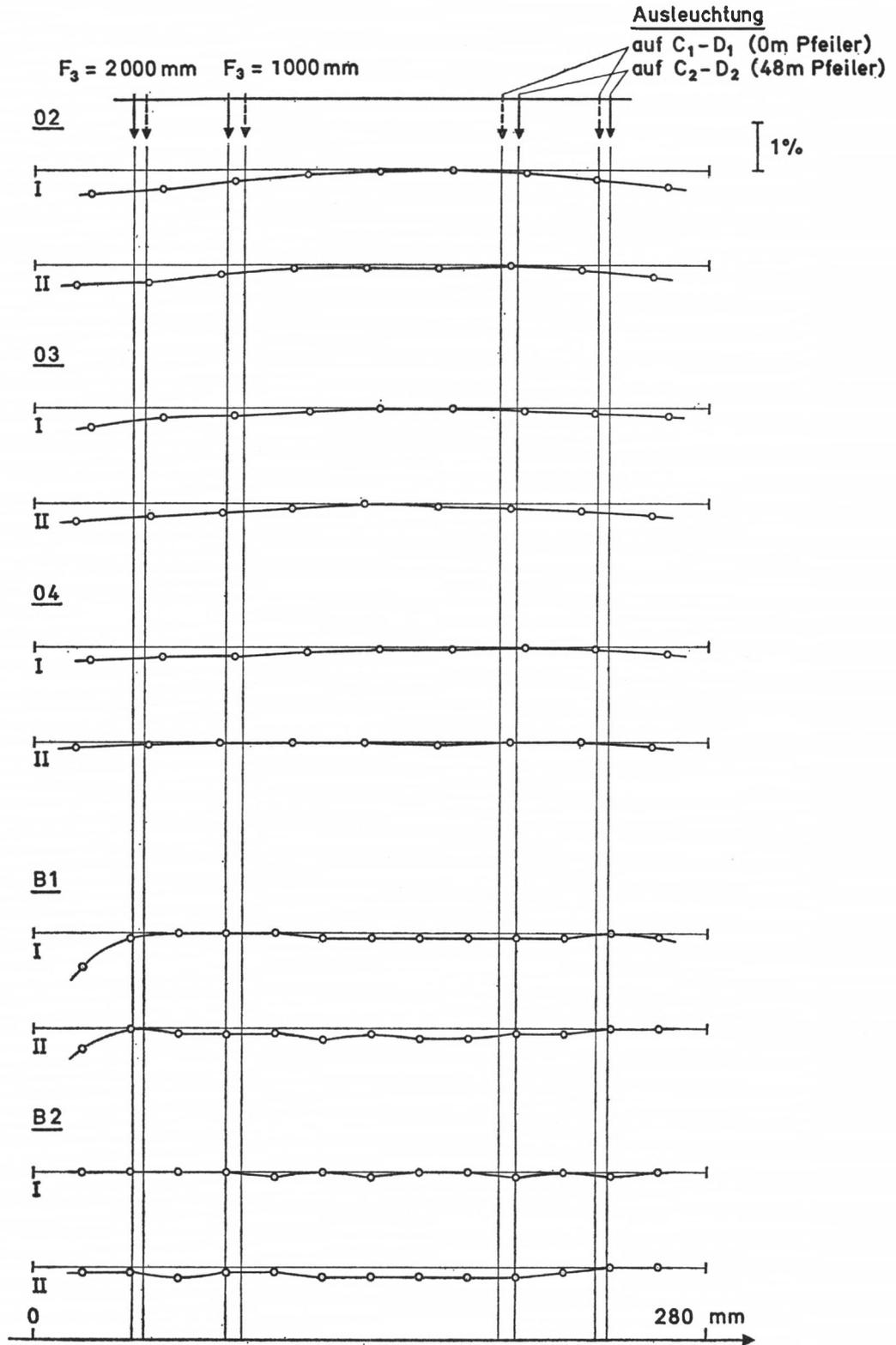


Bild 19a: Spiegelreflexion und -ausleuchtung (horizontal)

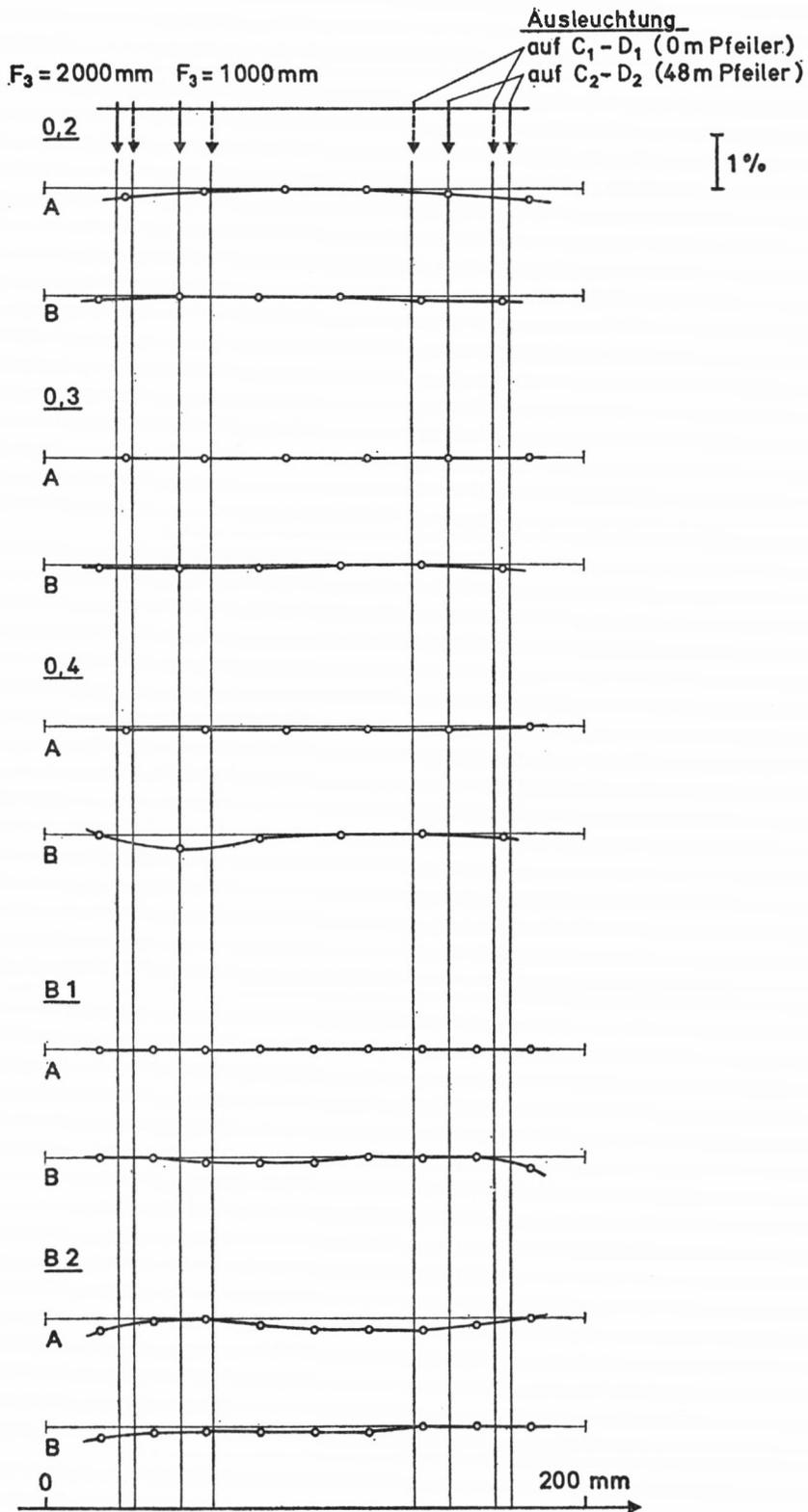


Bild 19b: Spiegelreflexion und -ausleuchtung (vertikal)

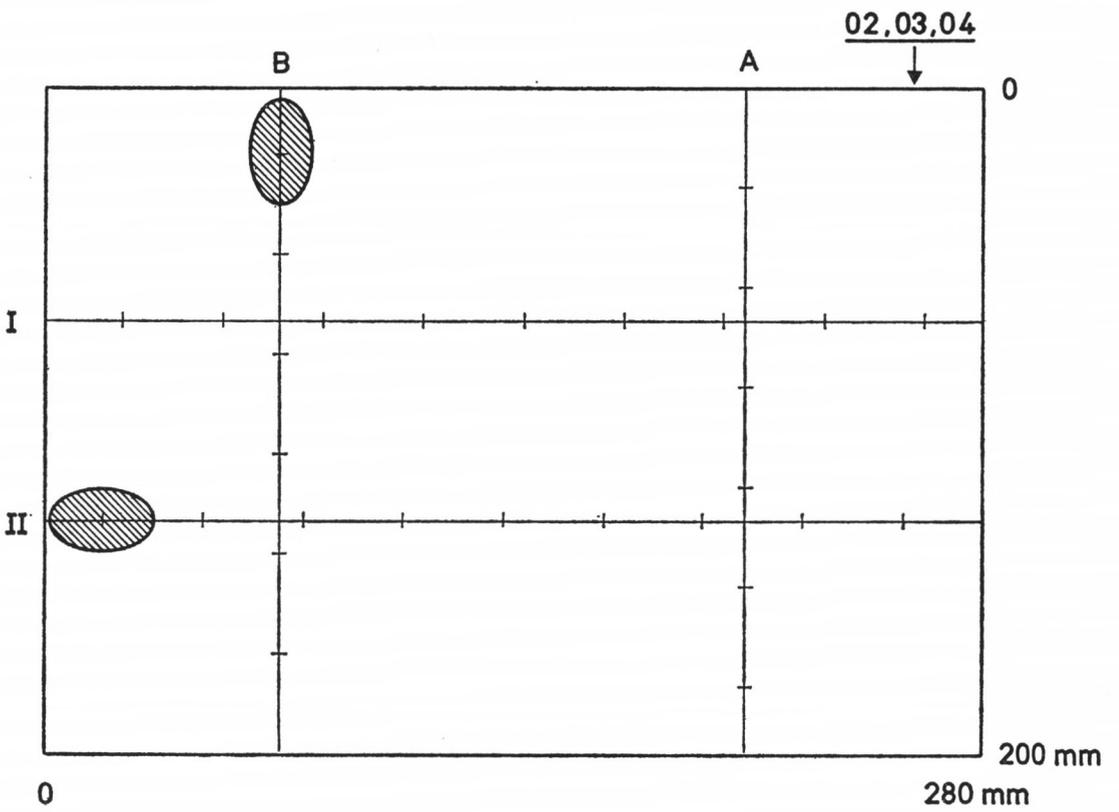
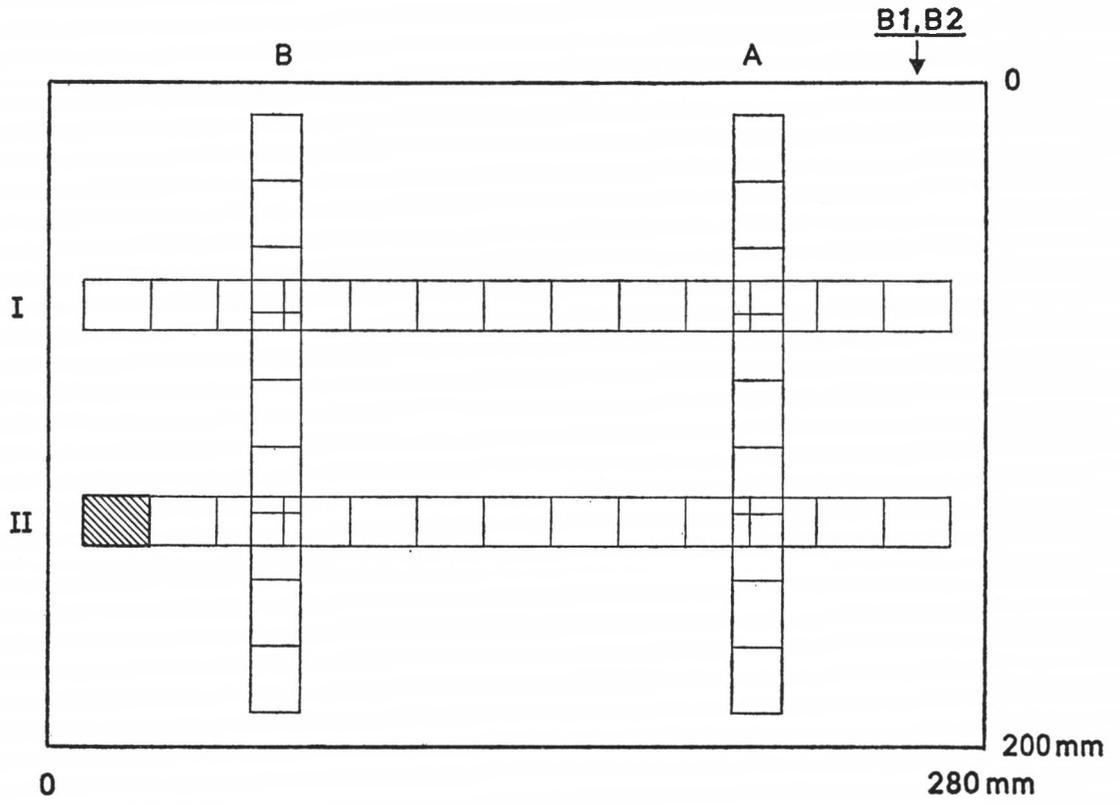


Bild 19c: Spiegelreflexion: Lage der Meßpunkte

7. Änderung der Spiegelausleuchtung durch anderen Abstand zum Meßtisch (24-48): G 1, G 5, G 17, G 19.

8. Änderung der Phasenstruktur durch Lampenwechsel (Änderung der A_k , z. T. auch der φ_k).

Deutlich sichtbar wird der gesuchte Fehler beim Versuch 4: Die größeren Phasenunterschiede ($\Delta\varphi_{\max} \approx 7,8^\circ$) führen zu stärker streuenden Ergebnissen. Trotzdem ist zu sehen, daß bei aufeinanderfolgenden Messungen die Spiegelstellung A höhere c -Werte liefert als die Spiegelstellung B . Bei den unmittelbar anschließenden Messungen von G 6a liegen die Werte bei A geringfügig unter den c -Werten der Spiegelstellung B . In beiden Fällen sind die systematischen Fehler von der Größenordnung der Meßwertstreuungen. Sie werden erst deutlich, wenn man mehrere Meßpaare miteinander vergleicht. In Bild 20 sind die Meßgruppen G 7, G 6a (ab M 62) und G 16 noch einmal nach Spiegelstellungen zusammengefaßt und den zugehörigen Phasenstrukturen gegenübergestellt.¹ G 16 ist die erste Meßgruppe mit blauem Licht, bei der die Ultraschallzelle für $\lambda_0 = 435$ nm abgeglichen worden war (Versuch 5).

Bild 20

G 7		G 6a (ab M 62)		G 16	
A	B	A	B	C	D
(M 52) 92,24	92,29 (M 53)	(M 63) 91,13	91,24 (M 62)	(M 127) 91,81	91,93 (M 126)
(M 55) 92,05	90,80 (M 54)	(M 64) 91,24	91,34 (M 65)	(M 128) 91,88	92,18 (M 129)
(M 56) 92,67	90,78 (M 57)	(M 67) 91,30	91,39 (M 66)	(M 131) 91,91	92,08 (M 130)
(M 59) 92,83	91,82 (M 58)			(M 133) 91,31	91,34 (M 132)
(M 60) 91,02	89,97 (M 61)			(M 134) 91,74	
Phasenstruktur		Phasenstruktur		Phasenstruktur	
	1 2 3 4		1 2 3 4		1 2 3 4
I	7,8° 7,2° 5,4° 4,2°	I	1,8° 2,4° 3,3° 3,3°	I	0,6° 1,5° 1,8° 1,2°
II	4,8° 4,2° 2,4° 0,6°	II	0,3° 1,2° 2,4° 2,4°	II	0,9° 1,5° 1,5° 0,9°
III	2,4° 1,8° 0,6° 0°	III	0° 0,9° 2,4° 2,4°	III	0,3° 1,2° 1,2° 0,6°
IV	0,3° 0,6° 0° 0°	IV	1,2° 2,1° 3,6° 4,5°	IV	0° 0,6° 0,6° 0,6°
$U_Q = 57$ V _{eff}		$U_Q = 65$ V _{eff}		$U_Q = 55$ V _{eff}	
$\lambda_0 = 435$ nm		$\lambda_0 = 546$ nm		$\lambda_0 = 435$ nm	
$\Delta\varphi_{\max} = 7,8^\circ$		$\Delta\varphi_{\max} = 4,5^\circ$		$\Delta\varphi_{\max} = 1,8^\circ$	

Die Versuche zeigen, daß die befürchteten Fehler tatsächlich vorhanden sind und daß sie durch die homogene Belegung der Planspiegel und durch sorgfältigen Abgleich der Ultraschallzelle hinreichend verkleinert werden konnten.

Bei der Rückkehr vom Meßweg tritt das Meßlicht durch die Empfangslinse L_4 . Der Bündelquerschnitt hängt dabei ab von D_1 und F_2 , von der Ausleuchtung auf $S\hat{p}_2$, der

¹ Statt der c_0 -Werte selbst wurden in Bild 20 die entsprechenden c_0^* -Werte eingetragen. $c_0 = 299700$ km/s + c_0^* .

Brennweite der Sendelinse (F_3) und von der Länge des durchlaufenen Weges (Tabelle 3). Das von C_2 - D_2 kommende Bündel ist breiter und höher und besitzt eine etwas andere Phasenverteilung als das Meßlicht, das nur den kürzeren Weg s_{M1} durchlaufen hat. Das Empfangsobjektiv muß deshalb gleichmäßig durchlässig sein und darf keine Schlieren und Luftblasen einschließen, die auf beide Meßlichter unterschiedlich wirken. Als Empfangsobjektive wurden eingesetzt:

1. Ein unvergüteter Achromat mit einer Brennweite $F_4 = 950$ mm und einer freien Öffnung $D_4^* = 140$ mm, unterschiedlich ausgeleuchtet bei Messungen über 24-48 und über 0-48, bei Messungen mit unterschiedlicher Aperturblende D_1 , abweichender Spalthöhe Sp_1 und verschieden großer Ausleuchtung auf Sp_2 .
2. Ein ASKANIA-Achromat mit $F_4 = 2000$ mm, $D_4^* = 200$ mm, vergütet für $\lambda_0 = 546$ nm, unterschiedlich ausgeleuchtet bei Messungen über 24-48 und über 0-48 mit $F_3 = 1000$ mm und bei Messungen über 0-48 mit $F_3 = 2000$ mm.
3. Ein ASKANIA-Achromat mit $F_4 = 2000$ mm, $D_4^* = 200$ mm, unvergütet, bei Messungen über 0-48 mit $F_3 = 2000$ mm.

Systematische Fehler wurden nicht beobachtet, solange die Empfangslinse einwandfrei sauber war. Wischspuren führten zu instabiler Anzeige und stark abweichenden c -Werten. Sie konnten daher rasch gefunden und beseitigt werden.

Die Intensität des zurückkommenden Lichtes ist wegen der abweichenden Reflexionsfaktoren der beiden Spiegelpaare und wegen der unterschiedlichen Lichtverluste auf den zwei Meßwegen i. a. verschieden groß. Für den Amplitudenabgleich werden deshalb gewöhnlich zwei Neutralfilter mit verschiedener Transparenz verwendet. Ihre Ausleuchtung hängt von der Länge des Meßweges ab. Phasenänderungen durch die Neutralfilter sind auch bei häufigem Filterwechsel nicht beobachtet worden. Bei vielen Meßreihen in Spiegelstellung D glichen die Lichtverluste auf der Meßstrecke den höheren Reflexionsfaktor des Spiegelpaares C_2 - D_2 gerade aus, so daß bei beiden Messungen das gleiche Filter eingesetzt werden konnte. Die Ergebnisse dieser Meßreihen weichen nicht von anderen c -Werten ab. Fällt Staub auf die Neutralfilter oder bleiben nach der Reinigung schwache Wischspuren zurück, so wirken diese Störungen viel eher auf den Amplitudenabgleich als auf die Modulationsphase. Schon um die Apparatur wieder auf ihre frühere Empfindlichkeit zu bringen, ist es dann notwendig, die Filter sorgfältig zu reinigen. Beim Austausch der Empfangslinse und bei Änderung ihrer Ausleuchtung bleibt die durchstrahlte Fläche der Graugläser nicht konstant. Systematische Einflüsse auf das Meßergebnis wurden nicht festgestellt.

Die optische Dicke der Filter ist interferometrisch überprüft worden. Dabei zeigten sich folgende Unterschiede: (Bezugsfilter: 79,5%, Meßwerte angegeben als ΔS)

87 %	+ 3 μm	83 %	+ 1 μm
86,5	+ 2	82,5	— 2
86	+ 4	82	+ 2
85,5	— 1	81,5	+ 1
85	0	81	+ 4
84,5	+ 4	80,5	+ 2
84	+ 2	80	+ 2
83,5	+ 4	79,5	0

Die Unsicherheit bei dieser Messung betrug etwa $\pm 2 \mu\text{m}$. In der gleichen Größenordnung liegen im ausgenutzten Filterbereich die optischen Dickenunterschiede durch Abweichungen von der Planparallelität.

Die echten Wegunterschiede, verursacht durch verschiedene optische Dicke der einzelnen Filter, betragen demnach höchstens etwa $10\ \mu\text{m}$.

Hinter dem Neutralfilter trifft das Meßlicht auf den Strahlenteiler T_2 und muß dort zwei Glas-Luft-Übergänge und eine halbdurchlässige Spiegelfläche durchlaufen. Es wurden folgende Aufbauten benutzt:

1. Großer Strahlenteilerwürfel (Kantenlänge 19 mm), unvergütet $G\ 10$, $G\ 11$, $G\ 12$
2. Kleiner Strahlenteilerwürfel (Kantenlänge 15 mm), vergütet für $\lambda_0 = 546\ \text{nm}$
 $G\ 0-G\ 9$, $G\ 14-G\ 21$, $G\ 27\text{b}$
3. Schrägeinfall des Vergleichslichtes nach Reflexion an einem Planspiegel, kein Hindernis für das Meßlicht
 $G\ 22-G\ 26$, $G\ 28-G\ 35$

Weder diese Umbauten, noch die häufige Reinigung und Neujustierung der Glaswürfel ergaben eine nachweisliche Änderung des gemessenen ϵ -Wertes.

Auf der Streuscheibe vor der Photokathode sollte in erster Näherung die in der Ultraschallzelle erzeugte Phasenstruktur des modulierten Lichtes nicht auftreten. Eine genauere Untersuchung zeigt, daß auch dort – speziell an den Bildrändern – die Phasenverteilung nicht streng homogen zu sein braucht. Wie aus Bild 21 zu ersehen, ist die endliche Größe von Sp_1 hierfür verantwortlich. Nimmt man schematisch an, daß die Phasenstruktur in der Ebene MR entsteht, so wird deutlich die Zone MN nur von Strahlen aus der unteren Spalthälfte durchdrungen, die Zone QR hingegen nur von Strahlen der oberen Spalthälfte. Die Verhältnisse sind stark vereinfacht. Grundsätzlich bleibt dieser Vorgang aber auch bei Betrachtung der gekrümmt verlaufenden Lichtstrahlen in einem ausgedehnten Schallfeld erhalten. Das Verhältnis Spalthöhe zu Brennweite F_1 ist hier viel zu groß dargestellt. Man wird aber eine geringe Phasenstruktur innerhalb des Spaltbildes nicht von vornherein ausschließen dürfen. Somit muß damit gerechnet werden, daß Fehler der Streuscheibe (Kratzer, inhomogene Stellen, Verunreinigungen) Phasenänderungen erzeugen können. Um solche Verfälschungen des Meßergebnisses aufzudecken, wurden folgende Versuche unternommen:

1. Messungen mit einer Opalglasscheibe, die auf der Eingangsseite mattiert ist. (Alle Messungen außer $G\ 8-G\ 13$).
2. Messungen mit einer beidseitig glatten Opalglasscheibe ($G\ 8-G\ 13$).
3. Häufiges Reinigen und Drehen der Streuscheibe.

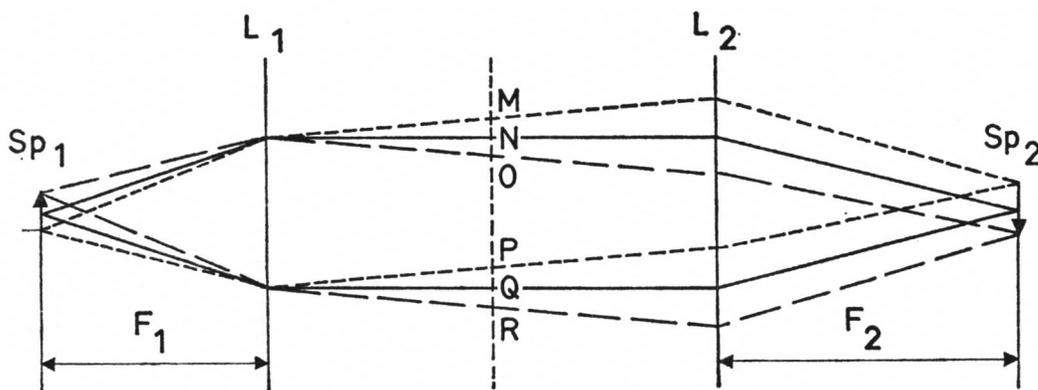


Bild 21: Phasenstruktur im Spaltbild auf Sp_2

4. Häufiges Neujustieren der Lichter, die dabei auf verschiedene Stellen im Zentrum der Opalscheibe fielen.

Auch hier wurden keine für die einzelnen Untersuchungen charakteristischen Änderungen des gemessenen c -Wertes entdeckt.

Alle Phasenverfälschungen dieser Art, auch solche, deren Ursachen nicht im einzelnen gefunden wurden, müßten zutage treten, wenn die Phasenstruktur des Lichtbündels geändert wird. Die Fehler sollten dann wenigstens dem Betrage nach anders ausfallen.

Kleinere Änderungen der Phasenstruktur ergeben sich bereits beim Wechseln der Quecksilber-Höchstdrucklampe. Beim Übergang $\lambda_0 = 435 \text{ nm} \rightarrow \lambda_0 = 546 \text{ nm}$ wachsen die Phasenunterschiede innerhalb des Bündels nahezu auf das Doppelte an. Da auch hierbei keine systematischen Einflüsse gefunden werden konnten, muß man annehmen, daß die auf kurzen Meßstrecken recht verhängnisvollen Phasenfehler bei der verwendeten Meßanordnung jetzt ausreichend klein sind.

b) Laufzeitstreuung des Photomultipliers

Die Phase der im Photoempfänger gemessenen Wechselspannungen ändert sich mit der Lage der Lichter auf der Streuscheibe (III, 4). Meßlicht und Vergleichslicht müssen deshalb bei zwei zusammengehörenden Messungen auf die gleichen Stellen der Opalglascheibe fallen. Beim Vergleichslicht ist dies leicht zu erreichen, da der Vergleichsweg bis auf die kleine Supportverschiebung S_V unverändert bleibt. Das Meßlicht dagegen wird bei Messung 1 an C_1-D_1 , bei Messung 2 an C_2-D_2 reflektiert und durchläuft bei beiden Messungen gewöhnlich verschiedene Neutralfilter. Fehljustierungen der Spiegelpaare bewirken sofort, daß die Meßlichter auf verschiedene Stellen der Streuscheibe fallen. Bei stabilem Aufbau der Meßanordnung behalten sie diese Lagen während der ganzen Meßreihe und führen so zu einem systematischen Fehler des Meßergebnisses.

Ähnliche Differenzen entstehen durch keilförmige Neutralfilter oder bei schrägem Einbau der Graugläser. Das Spaltbild erscheint bei einer Messung in der gewünschten Lage, bei der anderen aber versetzt auf der Streuscheibe.

Zum Unterschied von Phasenstruktur-Einflüssen sind mögliche Fehler durch Laufzeitstreuungen leicht zu erkennen, wenn die Lage der Spaltbilder auf der Streuscheibe überwacht wird. So ergab sich bereits vor Beginn der c -Messungen, daß der früher verwendete Neutralfiltersatz den neuen, höheren Anforderungen an die Planparallelität der Gläser nicht genügte, da mehrere Filter bei einer Neukittung zu große Keilfehler bekommen hatten. Für die Lichtgeschwindigkeitsmessungen wurden neue Neutralfilter eingesetzt und sorgfältig montiert, so daß die Lagefehler jetzt unter der in VI, 4 angegebenen Toleranz bleiben. Schwierig ist die richtige Justierung der Meßlichter. Bei dem häufigen Wechsel der Spiegelstellung entfällt ein großer Teil der Meßarbeit auf das genaue Ausrichten der Spiegelpaare. Vor allem bei den langbrennweitigen Sende- und Empfangsobjektiven ($F_3 = F_4 = 2000 \text{ mm}$) reicht die Stabilität des Meßaufbaus gerade noch aus, um die festgelegten Toleranzen bei Messungen auf der Strecke 0–48 einzuhalten. Schwierigkeiten zeigten sich beim vorderen, beweglichen Spiegelpaar, das im Laufe einer Meßreihe durch häufiges Aufsetzen leicht seine Vertikaljustierung verlieren kann. Die ab $M 195$ verkürzte Meßzeit (25 Wertepaare) wirkte sich hier sehr vorteilhaft aus. Die eingesparte Zeit wurde fast ausschließlich für eine weiter verbesserte und noch häufiger überprüfte Justierung verwendet.

Bei den Messungen über die Strecke 24–48 mußte das bewegliche Spiegelpaar C_1-D_1 auf dem 24-m-Pfeiler aufgebaut werden, dessen Zentrierstange sehr weit hinten liegt. Das

dritte, ebene Lager für den Spiegel konnte deshalb nicht mehr auf dem Pfeiler selbst verschraubt werden, sondern wird von einer am Pfeiler angebrachten Stütze getragen.

Dieser Aufbau erreicht nicht die Stabilität der Strecke 0-48. Es gelang nicht, die in IV, 4. festgelegte Toleranz für die Justierung beider Meßlichter während einer ganzen Meßreihe einzuhalten. Die Lage des vom Spiegelpaar C_1-D_1 reflektierten Lichtes änderte sich während der Messungen unregelmäßig. Systematische Fehler waren bei solchen wechselnden Versetzungen des Meßlichtes auf der Streuscheibe im einzelnen nicht nachzuweisen, doch liegt die Streuung der Meßwerte höher als in IV, 5 veranschlagt. Die Fehler durch Laufzeitstreuung dürften im Mittel $|\Delta S| \approx 0,07$ mm oder $|\Delta c| \approx 0,876$ km/s erreichen.

Es ist nicht notwendig, daß sich Meßlicht und Vergleichslicht auf der Streuscheibe genau überdecken. Verschiebt man das Vergleichslicht, so ändert sich die Minimumlage s_V . Der Unterschied ist bei Messung 1 und Messung 2 jedoch gleich und die Differenz $s_{V2} - s_{V1} = 2 S_V$ bleibt konstant. Besonders deutlich wird dies aus den unmittelbar hintereinander aufgenommenen Meßreihen $M 117$ und $M 118$. In Bild 22 sind die Lage der Spaltbilder und die Supportstellungen eingetragen.

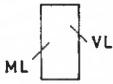
$M 117$	$M 118$
	
$H = 3,52$ mm	$H = 3,32$ mm
$V = 2,69$ mm	$V = 2,49$ mm
$S_V = + 0,83$ mm	$S_V = + 0,83$ mm
$c_0 = 299792,42$ km/s	$c_0 = 299792,51$ km/s

Bild 22: Verschieben des Vergleichslichtes

Auch in der Bildgröße dürfen Meßlicht und Vergleichslicht differieren. Bei den Meßgruppen $G 19-G 21$ und $G 27b$ betragen die Vergrößerungen $V_{3-4} = 2$, $V_{5-6} = 1$; das Meßlicht war also zweimal so hoch und zweimal so breit wie das Vergleichslicht. Die Meßreihen $M 198-M 210$ ($G 25$, $G 26$) sind abwechselnd mit $F_4 = 1000$ mm und mit $F_4 = 2000$ mm aufgenommen worden (Bild 23). Einheitlich ergibt sich, daß keine systematische Änderung der gemessenen c -Werte auftritt.

Die am weitesten gehende Änderung im Vergleichsweg war die Rückkehr zum Schrägfall des Vergleichslichtes. Diese Anordnung entspricht dem ursprünglich von D. FRIES verwendeten Aufbau [1, 2]. An die Stelle des unmittelbar vor der Streuscheibe stehenden Strahlenteilers T_2 tritt ein seitlich angebrachter Oberflächenspiegel. Das Meßlicht trifft wie bisher senkrecht auf das Opalglas. Das Vergleichslicht hingegen wird am Spiegel reflektiert und fällt unter einem Winkel von etwa 20° zur Senkrechten ein. Da der Lichtstrom vor dem Photomultiplier nicht mehr geteilt wird, entfällt der Lichtverlust von 50% auf der Empfangsseite: Empfindlichkeit und Störabstand der Apparatur steigen. Auch Mehrfachreflexionen von Meßlicht und Vergleichslicht im Strahlenteilerwürfel können nicht mehr auftreten. Andererseits ist zunächst nicht abzusehen, wie der Streukegel des Vergleichs-

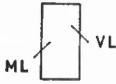
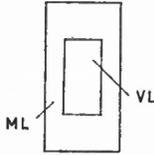
<i>G</i> 25		<i>G</i> 26	
			
<i>M</i>	c_0 [km/s]	<i>M</i>	c_0 [km/s]
195	299 791,92	198	299 792,19
196	91,83	199	91,98
197	92,08	202	92,30
200	91,85	203	92,42
201	92,34	206	92,37
204	92,43	207	92,52
205	92,32	209	91,97
208	92,55	210	92,12

Bild 23: Unterschiedliche Größe von Meßlicht und Vergleichslicht

lichtes an der Photokathode aussieht. Behält das Vergleichslicht nach der Streuung seinen Einfallswinkel als Vorzugsrichtung bei, so muß es seitlich versetzt auf den Photomultiplier treffen. Sollten Phasenstruktur und Laufzeitunterschiede hier die Phase des Vergleichslichtes ändern, so wäre auch dieser Einfluß für Messung 1 und Messung 2 zunächst gleich. Schwankt die Phasenstruktur aber rasch, so sind starke Störungen zu erwarten, die die Apparatur unempfindlich machen.

Auf Photographien des Streukegels in der Ebene der Photokathode konnte bei den hier vorkommenden Einfallswinkeln keine seitliche Versetzung des Vergleichslichtes festgestellt werden. Die Vorzugsrichtung scheint also zumindest nur schwach ausgeprägt zu sein. Bei den Meßgruppen *G* 22–*G* 26, bei denen das Vergleichslicht schräg einfiel, überwog der Lichtgewinn bei weitem einen etwaigen Empfindlichkeitsverlust. Die Messungen erwiesen sich als wesentlich weniger störanfällig. Es wurden Meßgruppen mit $\lambda_0 = 546$ nm und $\lambda_0 = 435$ nm und mit verschiedenen Brennweiten von Sende- und Empfangsobjektiv vorgenommen, ohne daß ein systematischer Unterschied der gemessenen c -Werte festzustellen war.

Der Schrägeinfall des Vergleichslichtes bringt demnach keinen Fehler, der die erreichte Genauigkeit überschreitet.

Ändert man die Fokussierspannung U_F des Photomultipliers, so erhalten die an der Photokathode ausgelösten Elektronen eine andere Geschwindigkeit und legen zwischen Kathode und erster Dynode andere Wege zurück. Obwohl Meßlicht und Vergleichslicht gleichzeitig im selben Photomultiplier in Elektronenströme umgesetzt werden, hängt die Minimumlage s_V von der angelegten Fokussierspannung ab. Offenbar vermag die Photokathode Meßlicht und Vergleichslicht auch nach der Streuung noch zu unterscheiden, selbst wenn die zugehörigen Spaltbilder gleich groß sind, gut übereinander liegen und wenn beide Lichter senkrecht auf die Streuscheibe fallen.

Tabelle 5 zeigt eine Zusammenstellung aus den Meßreihen M 32 a–d, bei denen U_F systematisch geändert wurde. Dabei entspricht $U_F = -1300$ V der üblichen Einstellung auf maximalen Anodenstrom. Zwischen Kathode und erster Dynode liegen 170 V. Der vorgesehene Regelbereich der Fokussierspannung umfaßt 60 V.

Tabelle 5: Änderung der Fokussierspannung U_F

Messung	U_F [V]	V [mm]	H [mm]	$(H-V) = S_V$ [mm]	c_0 [km/s]
M 32 a	— 1320	2,70	3,74	1,04	299 791,87
M 32 b	— 1300	2,40	3,45	1,05	91,86
M 32 c	— 1280	2,35	3,41	1,06	91,85
M 32 d	— 1300	2,40	3,46	1,06	91,83

Aus den gleichbleibenden Werten von c_0 (max. Differenz 0,04 km/s) ist zu ersehen, daß der Einfluß der Fokussierspannung auf das Meßergebnis durch die Differenzmessung eliminiert wird. Der Minimumverschiebung entspräche bei M 32 a (0,30 mm) eine Änderung um 1,8 km/s, bei M 32 c (0,05 mm) eine Änderung um 0,30 km/s. Selbst eine versehentlich falsch eingestellte Fokussierspannung verfälscht das Meßergebnis also nicht.

Insgesamt sind für die Lichtgeschwindigkeitsmessungen bisher drei verschiedene Photomultiplier vom Typ RCA 7326 eingesetzt worden:

1. Nr. 8.8.377 für M 26 und M 27
2. Nr. 12.2.34 für M 271–278, M 279, M 280 A
3. Nr. 8.8.392 für alle übrigen Messungen.

Die Verstärkung des Photomultipliers Nr. 8.8.377 lag um mehr als 20% unter der von Nr. 8.8.392. Er wurde deshalb zunächst nur für zwei Probemessungen verwendet, deren Ergebnisse mit 299 793,22 km/s und 299 793,00 km/s recht hoch lagen. Als nach Vergrößerung von S_{p_1} ein größerer Lichtstrom zur Verfügung stand, sollten diese relativ unempfindlichen Messungen ($J_A = 0,13 \dots 0,14$ mA) wiederholt werden. Leider fiel in der Zwischenzeit der Photomultiplier durch Lufteinbruch aus.

Der daraufhin beschaffte Photomultiplier Nr. 12.2.34, der etwa die gleiche Empfindlichkeit wie Nr. 8.8.392 aufweist, wurde für insgesamt 10 Meßreihen eingesetzt, deren Ergebnisse gut mit den übrigen Resultaten übereinstimmen (Mittelwert von G 34: 299 792,13 km/s). Allerdings verliefen diese Messungen wesentlich störanfälliger als die vorausgehenden. Die Störungen verschwanden beim Einbau des alten Photomultipliers (M 280). Das Meßergebnis änderte sich dabei nicht. Bei einer genauen Überprüfung fanden sich kleine Inhomogenitäten auf der Photokathode, die zunächst als unbedeutend angesehen worden waren. Es besteht die Möglichkeit, daß diese – abhängig von der Justierung der Lichter auf der Streuscheibe – etwas verschieden auf Meßlicht und Vergleichslicht wirken und dadurch die Störungen hervorrufen. Ob auch andere Bauteile des Photomultipliers zu den Störungen beitragen, konnte nicht ermittelt werden.

c) Divergentes Licht

Nach den FRESNELSchen Formeln wird an jedem Glas-Luft-Übergang ein Teil des auffallenden Lichtes reflektiert. Bei unvergüteten Glasflächen sind dies, je nach der Glasart, 4...6%, bei vergüteten Flächen bis zu 1% des ankommenden Lichtstroms.

Von dem auf das Sendeobjektiv fallenden Licht wird ein Teil bereits beim Eintritt in die Linse divergent reflektiert, da die dem Licht zugewandte Glasfläche konvex gekrümmt ist. Reflexionen im Inneren von verkitteten Linsen sind klein. Beim Austritt aus dem Objektiv trifft der Lichtstrom auf eine konkave Kugelfläche. Das hier zurückgeworfene Licht wird in einem deutlich sichtbaren „Konvergenzpunkt“ gesammelt und verläuft anschließend divergent. Lange vor Erreichen des dingseitigen Konvergenzpunktes wird ein Teil dieses Lichtes beim Verlassen der Linse ein zweites Mal an einer konkaven Fläche reflektiert, verläuft – jetzt stark konvergent – in der ursprünglichen Richtung auf einen bildseitigen Konvergenzpunkt zu und fällt als divergentes Lichtbündel auf eines der Spiegelpaare $C-D$. Von dort wird es zum Empfangsobjektiv und schließlich zum Photomultiplier weitergeleitet.

Im vorliegenden Aufbau befindet sich das Spiegelpaar C_1-D_1 recht nahe bei L_3 ; zwischen L_3 und C_2-D_2 aber liegt zusätzlich die ganze Meßstrecke S_M . Der auf den Photomultiplier fallende Teil des divergenten Bündels ist bei Messung 1 und Messung 2 deshalb sehr verschieden. Abgesehen von der Phasenstruktur hat das zweifach reflektierte Licht wegen des längeren durchlaufenen Weges eine andere Phase als das normale Meßlicht. Es muß daher grundsätzlich die Phasenlage des Lichtes auf der Photokathode ändern, und zwar unterschiedlich bei Messung 1 und Messung 2.

Mit Ausnahme der Gruppen $G 4$ und $G 5$ wurden als Sendeobjektive bei allen Meßreihen Achromaten der ASKANIA-Werke eingesetzt, die aus zwei verkitteten Teillinsen (aus $BK 7$ bzw. $SF 12$) bestehen:

- | | | | |
|----|-------------------------|--------------------------|---|
| 1. | $F_3 = 1000 \text{ mm}$ | $D_3^* = 100 \text{ mm}$ | vergütet für $\lambda_0 = 546 \text{ nm}$ |
| 2. | 2000 mm | 200 mm | einseitig vergütet für $\lambda_0 = 546 \text{ nm}$ |
| 3. | 2000 mm | 200 mm | unvergütet |

Übereinstimmend mit der eingangs skizzierten Überlegung zeigt sich auf der der Lichtquelle zugewandten Seite ein sehr heller, auf der Seite des Lichtaustritts ein schwächerer, jedoch deutlich ausgeprägter Konvergenzpunkt. Etwa $2,4\%$ des auftreffenden Lichtstromes verlassen die (unvergütete) Sendelinse demnach als zunächst konvergentes Bündel, das hinter dem bildseitigen Konvergenzpunkt rasch auseinanderläuft.

Eine Berechnung des auf den Photomultiplier fallenden Anteils an divergentem Licht wurde für die ungünstigste Zusammenstellung (unvergütete Sendelinse, $F_3 = F_4 = 2000 \text{ mm}$, 0-48) im Anhang ausgeführt. Sie ergibt einen Fehler, der weit unter der Meßgenauigkeit liegt. Da bereits früher mehrmals auf die Möglichkeit solcher systematischer Fehler hingewiesen worden ist [2, 4] – in beiden Fällen ohne Verfälschungen des Meßergebnisses zu finden –, sollten jetzt eingehende Messungen diesen Befund bestätigen oder richtigstellen.

Mit wachsendem Abstand zwischen Sendeobjektiv L_3 und dem Spiegelpaar C_1-D_1 muß auch bei Messung 1 der Einfluß des divergenten Lichtes abnehmen. Leider kann man auf der Basis des DGFI die Meßstrecke nicht geradlinig über den 48 m-Pfeiler hinaus fortsetzen. Bei feststehendem Meßtisch blieb daher nur die Möglichkeit, mit einer auf 24 m verkürzten Strecke zu arbeiten.

Dabei sind die von der Minimums-Einstellung herrührenden Streuungen die gleichen wie bei Messungen über die vollen 48 m (Messung 2 ist identisch gleich; Messung 1, wegen des größeren Abstandes, etwas unsicherer als bei 0-48). Der Fehler von ϵ_0 wächst also auf den doppelten Betrag. Aus konstruktiven Gründen war es nicht möglich, das ausfahrbare Spiegelpaar C_1-D_1 auf dem 24-m-Pfeiler ähnlich stabil aufzubauen wie auf dem 0-m-Pfeiler. Man erhält deshalb auch etwas höhere Fehler durch Laufzeitstreuung. Dies vor allem bei der Meßgruppe $G 1$, bei der erst Erfahrungen in der Justierung des Lichtweges gesammelt werden mußten.

Bei den weiteren Vergleichsmessungen wurde der Einfluß des divergenten Lichtes vergrößert durch höhere Reflexionsverluste an der Sendelinse ($\lambda_0 = 435 \text{ nm}$) und durch ein Empfangsobjektiv mit größerem Durchmesser ($D_4^* = 200 \text{ mm}$). Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 zusammengefaßt. Fehler durch divergentes Licht sind danach sicher kleiner als $1,0 \text{ km/s}$.

Tabelle 6: Vergleich von Messungen über 0-48 und 24-48 mit verschiedener Lichtfarbe und unterschiedlichen Empfangsobjektiven

($F_3 = 1000 \text{ mm}$, vergütet für $\lambda_0 = 546 \text{ nm}$, $D_3^* = 100 \text{ mm}$)

λ_0 nm	F_4 mm	0-48	24-48	c_0 km/s	Zahl der Meßreihen	μ km/s
546	950	Mittelwert aus 15 Gruppen *	G 1	299 793,26	11	1,14
				92,11	104	
435	950		G 17	91,84	9	0,56
		G 16		91,80	9	0,28
		G 18		91,88	3	0,07
435	2000		G 19	92,69	8	0,36
		G 20		92,06	8	0,17

* G 2a, G 3, G 6b, G 8-G 12, G 14, G 15, G 23, G 24, G 28, G 36, G 37.

Eine engere Fehlereingrenzung ist zu erwarten, wenn zwischen zwei vergleichbaren Meßreihen nur kleine oder gar keine Umbauten notwendig sind. Verwendet man die Achromaten mit 2000 mm Brennweite, so erreicht wesentlich mehr divergentes Licht den Photomultiplier als beim vorausgehenden Aufbau mit $F_3 = 1000 \text{ mm}$: Einmal sind Sende- und Empfangslinse um je einen Meter näher an das Spiegelpaar C_1-D_1 herangerückt, zum anderen nimmt der Öffnungswinkel des Störlichtbündels ab, da die Krümmungsradien der Objektive größer sind. Das divergente Licht fällt also mit vergleichsweise hoher Konzentration auf die Streuscheibe.

Von den beiden verfügbaren Achromaten trägt nur einer am Übergang $SF 12$ -Luft einen Vergütungsbelag. Beim anderen mußte diese Schicht abpoliert werden. Die Grenzfläche $BK 7$ -Luft ist bei keinem der Objektive vergütet. Verwendet man die Linsen abwechselnd als Sendeobjektive, so entsteht am vergüteten Achromaten ein Streufluß von nur $0,4\%$, am unvergüteten Objektiv werden dagegen $2,4\%$ des grünen Meßlichtes als divergentes Bündel weitergeleitet. Ein hieraus entstehender Fehler müßte im einen Falle also sechsmal so groß sein wie im anderen. Entfernt man jetzt noch die vor der Streuscheibe liegende Blende („SEV-Blende“), so steigt der Anteil an divergentem Licht in dieser Anordnung weiter um den Faktor 44, ist also rund 250mal so groß wie beim Aufbau mit vergütetem Objektiv und SEV-Blende.

In Tabelle 7 sind diese Messungen zusammengestellt. Sie ergeben keinen Anhaltspunkt für irgendeinen systematischen Fehler durch modulierte Störlicht, das – an Glas-Luft-Übergängen der Sendelinse reflektiert – divergent auf das Empfangsobjektiv fällt. Bei

Tabelle 7: Vergleich von Messungen mit unvergütetem und mit vergütetem Sendeobjektiv und von Messungen mit und ohne SEV-Blende

$$(F_3 = F_4 = 2000 \text{ mm}, D_3^* = D_4^* = 200 \text{ mm}, \lambda_0 = 546 \text{ nm})$$

L_3	L_4	SEV-Blende	Meßgruppe	c_0 km/s	Zahl der Meßreihen	μ km/s
unvergütet	vergütet	mit	G_{29}	299791,65	8	0,21
			G_{32}	91,93	8	0,16
unvergütet	vergütet	ohne	G_{30}	92,43	8	0,64
			G_{33}	92,07	8	0,12
vergütet	unvergütet	mit	G_{31}	92,14	8	0,25

Messungen mit SEV-Blende liegt der Einfluß mit Sicherheit wesentlich unter der Empfindlichkeit der Meßanordnung.

In diesem Zusammenhang sind noch die auf der Meßstrecke auftretenden Lichtverluste zu erklären. Schon früher wurde darauf hingewiesen, daß Absorption und Lichtstreuung dafür verantwortlich sind [4]. Vergleicht man die Neutralfilter-Nennwerte bei den Messungen 1 und 2, so ergeben sich Differenzen, die zunächst von der jeweiligen Spiegelstellung abhängen. Man erhält bei grünem Licht ($\lambda_0 = 546 \text{ nm}$) und günstigen Bedingungen über $S_M = 48 \text{ m}$

$$\begin{array}{ll} \text{in Spiegelstellung } C & 1 \dots 2\% \\ \text{in Spiegelstellung } D & 0\% \end{array}$$

Die mittleren Reflexionsfaktoren der beiden Spiegelpaare O_2-O_3 und B_2-B_1 weichen demnach um $0,5 \dots 1\%$ voneinander ab. Die verbleibenden $0,5 \dots 1\%$ gehen auf dem 96 m langen Lichtweg verloren. Bei ungünstigen Bedingungen, z. B. bei leichtem Nebel, nehmen diese Verluste rasch zu. Bei einbrechendem oder sich auflösendem Dunst durchlaufen die Filtereinstellungen innerhalb einer Meßreihe (also innerhalb von etwa einer Stunde) alle vorhandenen Werte. Eine Änderung des gemessenen c -Wertes über die erzielbare Meßgenauigkeit hinaus wurde hierbei nicht beobachtet. Offenbar wachsen die Streuverluste wesentlich rascher als der Einfluß solcher feinverteilter Wassertröpfchen auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes. Erreichen die Intensitätsunterschiede $7,5\%$, so müssen die Messungen abgebrochen werden, da solche Differenzen mit dem Neutralfiltersatz nicht mehr auszugleichen sind (M_{177} , M_{179}). An verschiedenen Tagen konnte aus diesem Grund überhaupt nicht gemessen werden. Bei blauem Meßlicht ($\lambda_0 = 435 \text{ nm}$) liegen die Verluste noch etwas höher. Da die Meßstrecke in einem abgeschlossenen Raum liegt, mag ein solcher Einfluß zunächst überraschen. Der Meßkeller des DGFI wird über eine temperaturgeregelt Lüftung geheizt. Die Anlage saugt Frischluft wenig oberhalb des Bodens an, erwärmt sie und pumpt sie in die Kellerräume. Eine besondere Trocknung ist nicht vorgesehen. Offenbar gelangen dabei auch feinverteilte Wassertröpfchen in den Meßraum, die diese Lichtverluste hervorrufen. Sie treten nur bei Dunst oder Nebel auf und sind nicht durch Psychrometermessungen festzustellen.

In die Zusammenstellung der Meßreihen (Abschnitt V, 3) wurde der jeweils festgestellte Intensitätsunterschied als „Lichtverluste Δ “ eingetragen. Die Prozentzahl gibt die Differenz der Filternennwerte an. Bei wechselnden Lichtverlusten wurden der höchste und der kleinste Helligkeitsunterschied in der Reihenfolge ihres Auftretens angegeben.

2. VERTEILUNG DER MESSWERTE

a) Übersicht

Die Bilder 24 und 25 geben eine Übersicht über die c_0 -Werte der einzelnen Meßreihen. Die Intervallbreite beträgt bei den Messungen über 48 m 0,1 km/s, bei den Messungen über 24 m 0,2 km/s. Jede Meßreihe ist durch ein Rechteck bezeichnet. Die eingetragenen Zahlen entsprechen den Nummern in der Zusammenstellung V. 3, aus der die für die beiden Bilder benutzten c_0 -Werte entnommen sind.¹

b) Mittlere Streuung

c_{0x} = Mittelwert der Meßreihe x

$$\Delta_x = c_{0x} - \bar{c}_0$$

x = Index der die gültigen Meßreihen durchlaufend (für Messungen über 48 m und für Messungen über 24 m getrennt) numeriert

	Messungen über 48 m	Messungen über 24 m
n = Zahl der Meßreihen	218	28
N = Zahl der Meßgruppen	30	3
$\bar{c}_0 = \frac{1}{n} \sum_{x=1}^n c_{0x}$ [km/s]	299792,127	299792,641
Mittlere Streuung einer Meßreihe		
$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{x=1}^n \Delta_x^2}{n-1}}$ [km/s]	0,373	1,022
Durchschnittliche Abweichung von \bar{c}_0		
$m = \frac{\sum_{x=1}^n \Delta_x }{n}$ [km/s]	0,275	0,819
Mittlerer Fehler von \bar{c}_0		
$\bar{\mu} = \frac{\mu}{\sqrt{N}}$ [km/s]	0,068	0,590

Aus der Zusammenstellung der Meßreihen ist ersichtlich, daß diese zum Teil eine gewisse Tages- u. Gruppensystematik aufweisen. Zur Berechnung des mittleren Fehlers von \bar{c}_0 wurde deshalb nicht die Zahl der Meßreihen n , sondern die Zahl der Meßgruppen N benutzt.

¹ Man beachte, daß alle in den Abschnitten V bis einschließlich VI. 2. b genannten c_0 -Werte mit der ursprünglich für das Quarzmetre angegebenen Länge ermittelt worden sind. Sie erhöhen sich nach der PTB-Eichung vom 24. 6. 1964 um jeweils 0,315 km/s (IV. 2. b).

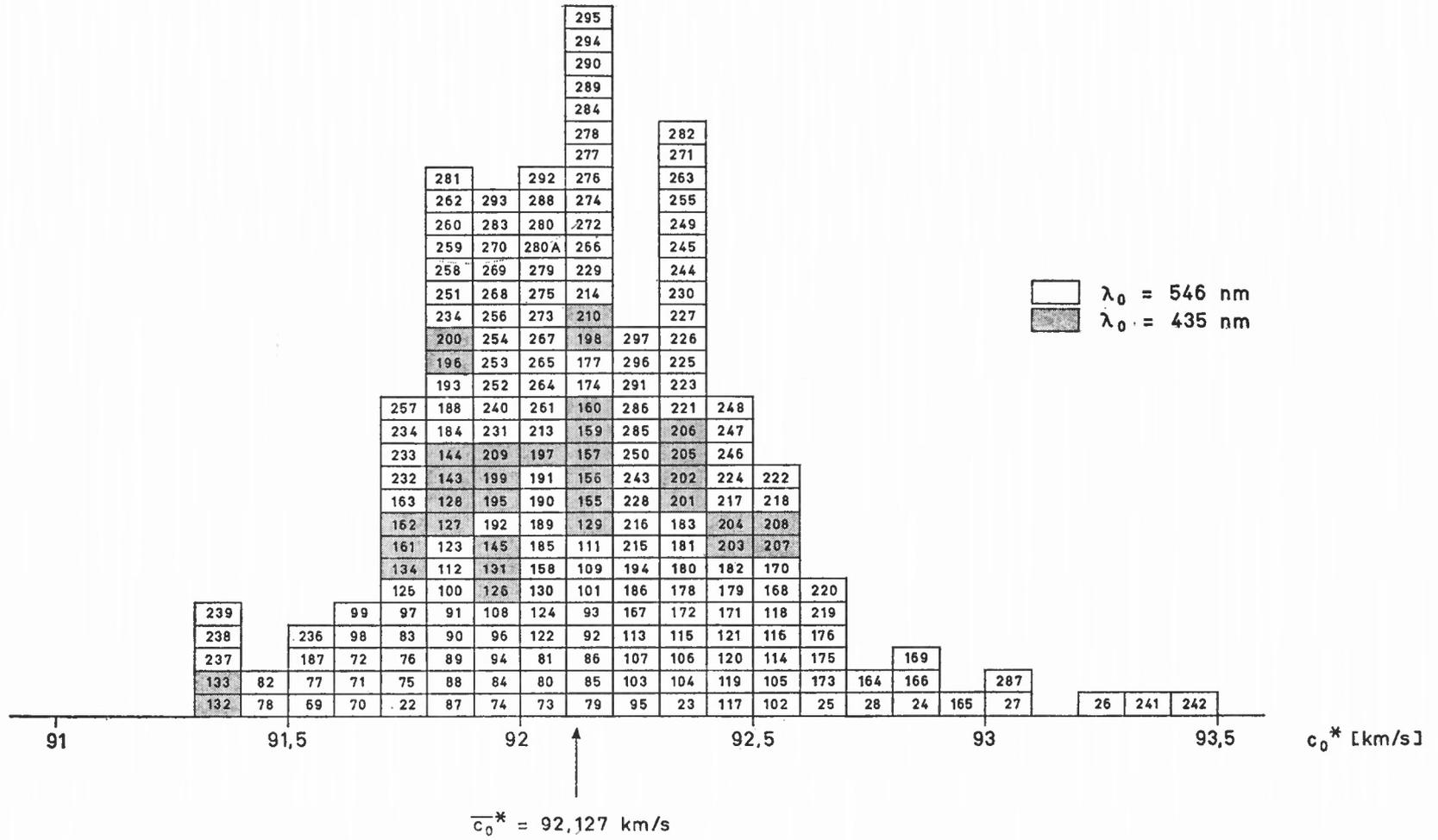


Bild 24: c -Messungen über 48 m

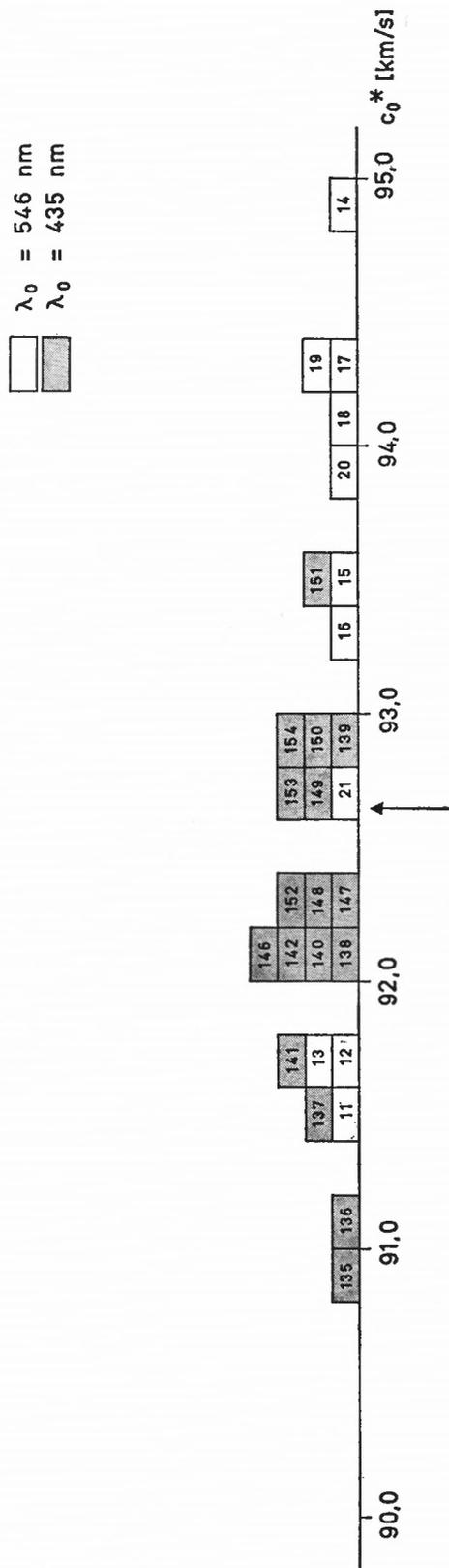


Bild 25: c_0 -Messungen über 24 m

3. MESSERGEBNIS

Der Fehler des Ergebnisses setzt sich zusammen aus dem mittleren Fehler von \bar{c}_0 und aus Fehlern, die allen Meßreihen gemeinsam sein können.

Diese betragen

1. für die Frequenz höchstens $2 \cdot 10^{-8}$ $|\Delta c| = 0,006 \text{ km/s}$

2. für die Strecke etwa $8 \cdot 10^{-8}$ $|\Delta c| = 0,024 \text{ km/s}$

(Eichgenauigkeit des Quarzmeters nach Angaben der PTB $5 \cdot 10^{-8}$

Unsicherheit der Al-Schichtdicken des 0-m- und des 1-m-Komparator-Spiegels zusammen etwa $6 \cdot 10^{-8}$)

3. für die meteorologischen Daten etwa $|\Delta c| = 0,015 \text{ km/s}$

Eventuell nicht vollständig eliminierte systematische Fehler durch Phasenstruktur und Laufzeitstreuung sollen mit $|\Delta S| = 0,015 \text{ mm}$ berücksichtigt werden. Sie entsprechen

bei Messungen über 48 m $|\Delta c| = 0,094 \text{ km/s}$

bei Messungen über 24 m $|\Delta c| = 0,188 \text{ km/s}$

Es ist nicht anzunehmen, daß alle Fehlereinflüsse mit dem ungünstigsten Vorzeichen zusammentreffen. Die einzelnen Komponenten sind deshalb quadratisch zu addieren und ergeben

bei Messungen über 48 m $|\Delta c|_s = 0,098 \text{ km/s}$

bei Messungen über 24 m $|\Delta c|_s = 0,190 \text{ km/s}$

Wir bestimmen den mittleren Fehler des Ergebnisses durch lineare Addition von $\bar{\mu}$ und $|\Delta c|_s$ und runden die Beträge nach oben ab.

Für die Lichtgeschwindigkeit in Vakuum ergeben sich damit folgende Werte:

1. Aus 218 Meßreihen über eine Strecke von 48 m $c_0 = 299\,792,44 \text{ km/s} \pm 0,2 \text{ km/s}$

2. Aus 28 Meßreihen über eine Strecke von 24 m $c_0 = 299\,792,96 \text{ km/s} \pm 0,8 \text{ km/s}$

Diesen Werten liegt die Eichung des Quarzmeters durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig vom 24. 6. 1964 zugrunde.

Die beiden c_0 -Werte stimmen innerhalb ihrer Fehlergrenzen überein. Wegen der wesentlich kleineren Anzahl der Messungen über 24 m und wegen ihrer größeren Unsicherheit sehen wir bei der Festsetzung des Endergebnisses von diesen Messungen ab und erhalten

$$c_0 = 299\,792,44 \text{ km/s} \pm 0,2 \text{ km/s}$$

4. GRENZEN DER MESSGENAUIGKEIT UND MÖGLICHE WEGE FÜR EINE VERKLEINERUNG DER UNSICHERHEIT

Vergleicht man das Ergebnis für c_0 mit den Resultaten verschiedener Autoren (Bild 26), so erhebt sich die Frage, ob das Meßverfahren eine weitere Verkleinerung der Unsicherheit erlaubt und welche Teile der Meßanordnung hierzu geändert werden müßten.

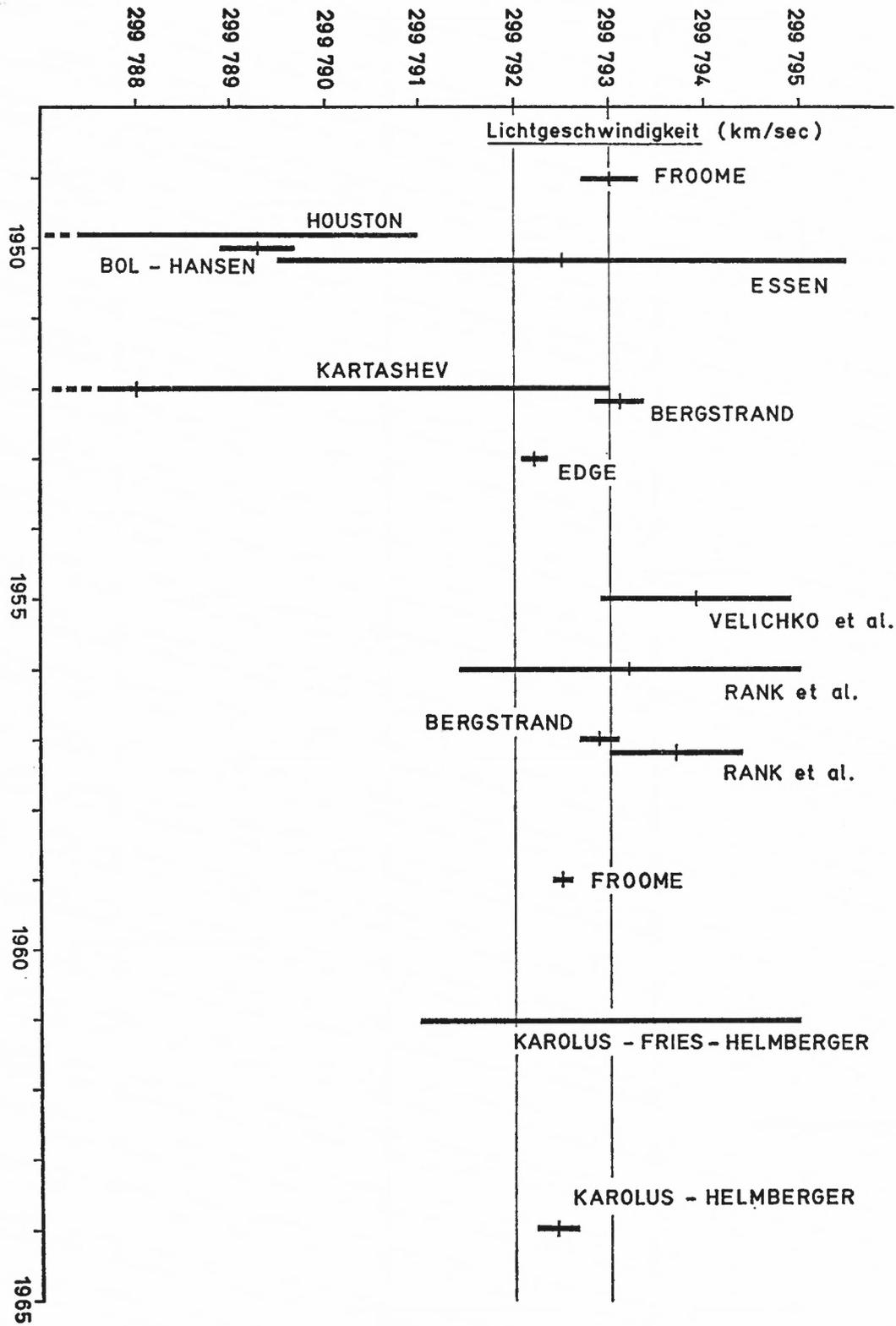


Bild 26: Ergebnisse von Lichtgeschwindigkeitsmessungen in den Jahren 1948-1965

Die Genauigkeit des nach dem hier beschriebenen Verfahren ermittelten c_0 -Wertes wird begrenzt

1. durch die Eichgenauigkeit des Längen- und des Frequenzmaßstabes,
2. durch die Streuung der Meßwerte verursacht durch zufällige Fehler und durch die Unsicherheit bei der Minimumeinstellung,
3. durch systematische Fehler, deren Ursachen im Meßaufbau und in der Durchführung der Messungen liegen.

Eine obere Schranke bildet die Eichgenauigkeit des Quarzmeters, mit einer Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-8}$. Wie die Erfahrung gezeigt hat, ist es zweckmäßig, diesen Wert von verschiedenen Eichinstituten überprüfen zu lassen. Die Frequenzunsicherheit dagegen kann ohne zusätzlichen Aufwand über die $2 \cdot 10^{-8}$ hinaus verbessert werden.

Durch eine Anzahl gleichartiger Messungen läßt sich nach den Gesetzen der Statistik die durch zufällige Fehler hervorgerufene Streuung erfassen. Für den Mittelwert gelten dann wesentlich engere Angaben der Meßunsicherheit. Wegen der Vielzahl der Fehlerursachen stößt man hierbei aber bald an Grenzen, die durch den wirtschaftlich vertretbaren Aufwand und durch die für jede Einzelmessung erforderliche Zeit gezogen werden. Damit steigt die Gefahr unentdeckter systematischer Einflüsse, und die errechneten engen Fehlergrenzen zeigen im besten Fall eine hohe innere Genauigkeit der Messung, sie können über den wirklichen Wert der Lichtgeschwindigkeit aber nicht viel aussagen. Ein Vergleich der von verschiedenen Autoren angegebenen c_0 -Werte und Fehlergrenzen zeigt deutlich, daß diese Gefahr häufig unterschätzt worden ist.

Man muß deshalb danach trachten, die Streuung der Einzelwerte von Anfang an zu verkleinern. In der vorliegenden Meßanordnung gibt es hierfür eine Reihe von Möglichkeiten:

1. Eine stabilere Lichtquelle mit höherer Leuchtdichte.

Dadurch würden zunächst die äußerst störenden Intensitätsschwankungen der Quecksilberlampe sowie deren Bogenverlagerungen wegfallen oder doch auf einen kleineren Betrag herabgesetzt.

Die größere Flächenhelligkeit ermöglicht eine kleinere Ausleuchtung des Spaltes S_{p1} und eine Verkleinerung der Apertur an der Ultraschallzelle. Auf diese Weise erhält man auf dem Meßweg ein Lichtbündel mit geringerem Durchmesser und mit besserer Bündelung. Die reflektierenden Flächen lassen sich verkleinern und damit noch homogener belegen. Die Umlenkspiegel selbst können durch Glasprismen ersetzt werden, bei denen der Lichtweg innerhalb des Prismas optisch bestimmbar ist. Kleinere Spiegel oder Prismen sind mechanisch einfacher und stabiler zu montieren. Sie erlauben eine noch genauere und eine zeitlich konstantere Justierung des Meßlichtes auf der Streuscheibe und verkleinern damit die durch die Laufzeitstreuung des Photomultipliers hervorgerufenen Fehler. Die bessere Bündelung führt zu einer angenähert gleichmäßigen Ausleuchtung von Spiegeln und Empfangslinse bei den Messungen über s_{M1} und s_{M2} und vermindert damit den möglichen Einfluß der Phasenstruktur.*

2. Verlegung des Lichtweges in eine auf etwa 1 Torr evakuierte Röhre.

Auf diese Weise könnte man Luftschlieren und Schwankungen des Brechungsindex sowie Feuchtigkeitseinflüsse eliminieren. Gleichzeitig würden die Korrekturen zur Ermittlung der Vakuumwerte und der Amplitudenabgleich entfallen.

* Versuche mit einem He-Ne-Laser sind im Gange. Über das Ergebnis wird getrennt berichtet werden.

3. Eine stabilere Basis, mit der die Genauigkeit der Interferenzmessung voll ausgeschöpft werden kann.

Da aber die Unsicherheit der Interferenzmessung mit $\pm 4 \mu\text{m}$ für die 48 m-Strecke praktisch bereits bei $1 \cdot 10^{-7}$ liegt, wird man auch bei günstigstem Aufbau mit einem relativen Fehler des c_0 -Wertes von mehreren 10^{-7} rechnen müssen.

VII. ZUSAMMENFASSUNG

Auf der 48-m-Basis des Deutschen Geodätischen Forschungsinstituts in München wurden von Juni 1963 bis März 1965 Messungen zur Bestimmung der Vakuumlichtgeschwindigkeit durchgeführt.

Das Meßprinzip und der Meßaufbau werden beschrieben, die auftretenden Fehlerquellen diskutiert:

Annähernd monochromatisches, in seiner Intensität sinusförmig moduliertes Licht der Wellenlänge 546 nm oder 435 nm durchläuft bei zwei aufeinanderfolgenden Messungen zwei verschieden lange Wege. Es trifft in beiden Fällen mit der gleichen Modulationsphase auf den Photoempfänger. Aus der genau bekannten Differenz der beiden Wege ergibt sich die Modulationswellenlänge λ_m (≈ 16 m). Mit einem elektronischen Zähler wird die Modulationsfrequenz f_m ($\approx 18,72$ MHz) gemessen.

Das Licht wird durch zwei gegenläufige Ultraschallwellen moduliert. Aus dem entstehenden Beugungsspektrum wird die nullte Ordnung zur Messung verwendet.

Die Strecke ist aus Messungen mit einem Interferenz-Komparator nach VÄISÄLÄ und aus Interpolationsmessungen mit einem Invarband bis auf eine mittlere Unsicherheit von $12 \mu\text{m}$ ($= 2,5 \cdot 10^{-7}$ der 48-m-Strecke) bekannt.

Die Genauigkeit der Frequenzmessung lag anfangs bei $1,6 \cdot 10^{-7}$ (internes Frequenznormal des elektronischen Zählers); sie wurde später auf $0,6 \cdot 10^{-7}$ (Zählersteuerung durch eine stationäre Quarzuhr) verbessert.

In 33 Gruppen mit zusammen 246 Meßreihen werden systematische Einflüsse einzelner Bauelemente untersucht. Dabei treten als Hauptstörquellen die Phasenstruktur des modulierten Lichtes und die Laufzeitstreuung des Photomultipliers auf. Die Empfindlichkeit der Meßanordnung wird in erster Linie durch Helligkeitsschwankungen der Quecksilber-Höchstdrucklampe begrenzt.

Aus 218 Meßreihen über die 48-m-Strecke ergab sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im leeren Raum zu

$$c_0 = 299\,792,44 \text{ km/s} \pm 0,2 \text{ km/s.}$$

Diesem Wert liegt die Quarzmetereichung der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt Braunschweig vom 24. Juni 1964 zugrunde.

Herr Professor Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. M. KNEISSL, Direktor der Zentraleitung des DGFI, hat die Messungen der Vakuumlichtgeschwindigkeit in das Arbeitsprogramm der I. Abteilung aufgenommen und sie im Rahmen der Möglichkeiten seines Instituts unterstützt und gefördert. Wir benutzen gerne die Gelegenheit, ihm hierfür unseren aufrichtigen Dank auszusprechen.

Unser Dank gilt weiter dem Direktor und den Mitarbeitern der I. Abteilung des DGFI für die Messung der 48-m-Basis und für freundliche Hilfe bei Justierarbeiten und Umbauten der Meßeinrichtung.

Für finanzielle Unterstützung sind wir verbunden:

der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AIF) in Köln, die über die Arbeitsgemeinschaft für Elektronenoptik (AEO) in Karlsruhe die Entwicklung der Meßanlage gefördert und uns einen Teil der elektrischen und optischen Ausrüstung zur Verfügung gestellt hat;

dem Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg in Stuttgart für Unterstützung bei der Weiterentwicklung der Apparatur;

der Deutschen Forschungsgemeinschaft in Bad Godesberg für die Finanzierung der systematischen Untersuchungen und für die Bereitstellung eines Teiles der hierzu benötigten Meßinstrumente.

Bei den langwierigen Arbeiten der Lichtjustierung, bei den ϵ -Messungen selbst und bei ihrer Auswertung haben die Herren Dipl.-Phys. R.-J. CUNO und Dipl.-Ing. A. SCHLISSER wertvolle Hilfe geleistet. Ihnen und nicht zuletzt Herrn Feinmechanikermeister J. GRAFMÜLLER, Freiburg i. Br., der die gesamte Meßapparatur einschließlich der Ultraschallzellen gebaut und hierzu viele eigene Ideen beigesteuert hat, danken wir herzlich für ihre Mitarbeit.

VIII. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] A. KAROLUS, D. FRIES: Eine neue Anordnung zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. *Annalen der Physik*, 7. Folge, Bd. 4, Heft 1–5 (1959), Seite 269–282.
- [2] D. FRIES: Eine elektro-optische Messung der Lichtgeschwindigkeit auf einer 9 m-Basis. Dissertation Universität Freiburg i. Br., 1959.
- [3] A. KAROLUS: Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit auf einer Basis von 48 m. Mitt. Nr. 58 des IFAG Frankfurt a. M., 1963.
- [4] J. HELMBERGER: Eine Anordnung zur elektro-optischen Messung der Lichtgeschwindigkeit auf der 48 m-Basis des DGFI in München. Dissertation Universität Freiburg i. Br., 1962.
- [5] A. KAROLUS: Messungen der Lichtgeschwindigkeit auf der Basis des DGFI München, 1960 bis 1962. *Association Internationale de Géodésie, Section I, Publication No 2*, Seite 22–27. Frankfurt 1963.
- [6] A. KAROLUS, J. HELMBERGER: Die Ultraschallzelle mit zwei gegenläufigen Schallwellen als Lichtmodulator. *Annalen der Physik*, 7. Folge, Band 14, Heft 1–2 (1964), Seite 36–52.
- [7] E. BERGSTRAND: Determination of the Velocity of Light. In S. FLÜGGE, *Handbuch der Physik*, Bd. 24, Berlin 1956.
- [8] F. KOHLRAUSCH: *Praktische Physik*, Band 1 und 2. Stuttgart 1960 bzw. 1955.
- [9] H. MECKENSTOCK: Untersuchungen über die Fehlereinflüsse und Reduktionen bei der elektrischen Entfernungsmessung für geodätische Zwecke. Dissertation Technische Hochschule Hannover, 1963.
- [10] W. HARTMANN, F. BERNHARD: *Fotovervielfacher*. Berlin 1957.
- [11] A. HÜTTEL: Eine Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit unter Anwendung des Kerr-effektes und einer Photozelle als phasenabhängigen Gleichrichter. *Annalen der Physik*, 5. Folge, Band 37 (1940), Seite 365–402.
- [12] W. C. ANDERSON: A Measurement of the Velocity of Light. *Rev. Sci. Instr.* 8 (1937), Seite 239–247.
- [13] W. C. ANDERSON: Final Measurements of the Velocity of Light. *Journal of the Optical Society of America*, Volume 31 (1941), Seite 187–197.
- [14] A. VAN DER ZIEL: *Noise*. Englewood Cliffs, N. J., 1956.
- [15] Y. VÄISÄLÄ, L. OTERMA: Comparaisons des mètres en quartz fondu. Turku 1964.

ANHANG: DER EINFLUSS DIVERGENTEN LICHTES

1. BERECHNUNG DES STREUFLUSSES, DER AUF DIE STREUSCHEIBE FÄLLT

Aus L_3 (Sendelinse) austretender Streufluß:

$$\Phi_S = \Phi \cdot R_1 \cdot R_2 \quad \begin{array}{l} \Phi = \text{Gesamter auf die Sendelinse } L_3 \\ \text{fallender Lichtstrom} \\ R_1, R_2 = \text{Reflexionsfaktoren der beiden} \\ \text{Glas-Luft-Übergänge} \end{array}$$

Auf L_4 (Empfangslinse) fallender Streufluß:

$$\begin{aligned} \Phi_{S(E)} &= \Phi_S \cdot \frac{D_E^2}{D_S^2} & D'_S &= D_S \cdot \frac{L}{q_K} \\ &= \Phi_S \cdot \frac{D_E^2}{D_S^2} \cdot \frac{q_K^2}{L^2} \end{aligned}$$

Auf die Streuscheibe fallender Streufluß:

$$\begin{aligned} \Phi_{S(M)} &= \Phi_{S(E)} \cdot \frac{D_B^2}{D_E'^2} & \text{wenn } D_B < D'_E \\ \Phi_{S(M)} &= \Phi_{S(E)} & \text{wenn } D_B \geq D'_E \end{aligned}$$

wobei $\frac{D'_E}{D_E} = \frac{b'_K}{b'_K + F_E} \quad b'_K = \frac{F_E^2}{L - F_E}$

$$= \frac{\frac{F_E^2}{L - F_E}}{\frac{F_E^2}{L - F_E} + F_E} = \frac{F_E^2}{F_E^2 + F_E L - F_E^2} = \frac{F_E}{L}$$

für $D_B < D'_E$:

$$\Phi_{S(M)} = \Phi \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \frac{D_E^2}{D_S^2} \cdot \frac{q_K^2}{L^2} \cdot \frac{D_B^2}{D_E^2} \cdot \frac{L^2}{F_E^2} = \Phi \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{D_B}{D_S}\right)^2 \cdot \left(\frac{q_K}{F_E}\right)^2$$

für $D_B = D'_E$:

$$\Phi_{S(M)} = \Phi \cdot R_1 \cdot R_2 \cdot \left(\frac{D_E}{D_S}\right)^2 \cdot \left(\frac{q_K}{L}\right)^2$$

D_S = Durchmesser der Ausleuchtung auf L_3

D_E = Durchmesser von L_4 (wobei $D'_S \geq D_E$ vorausgesetzt)

D_B = Durchmesser der SEV-Blende

q_K = Abstand des Konvergenzpunktes K von L_3

L = Abstand des Konvergenzpunktes K von L_4

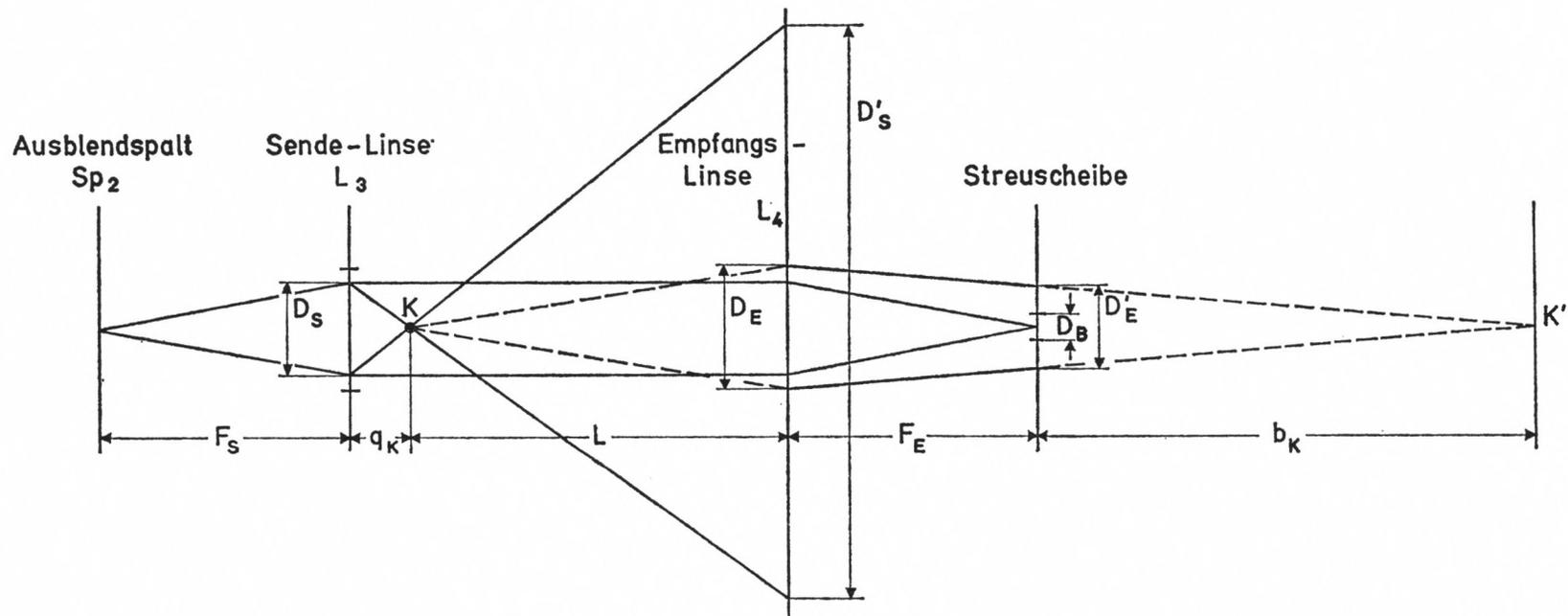


Bild 27: Der Einfluß divergenten Lichtes

2. BERECHNUNG DES ENTSTEHENDEN PHASENFEHLERS

$$\Phi_{S(M)} \ll \Phi \quad \text{tg } \Delta\varphi \approx \Delta\varphi \approx \frac{\Phi_{S(M)} \sin \delta}{\Phi} \approx \frac{\Phi_{S(M)}}{\Phi} \delta$$

$$\delta \ll 1$$

$\Delta\varphi$ = Phasenfehler

δ = Phasenunterschied des Streulichtes

Für $F_S = F_3 = 2000$ mm (unvergüteter ASKANIA-Achromat)

$F_E = F_4 = 2000$ mm (vergüteter ASKANIA-Achromat)

erhält man im verwendeten Aufbau:

$$R_1 = \left(\frac{0,52}{2,52}\right)^2 = 4,25\% \quad R_2 = \left(\frac{0,65}{2,65}\right)^2 = 6\% \quad (\lambda_0 = 546 \text{ nm})$$

$$D'_E = D_E \cdot \frac{F_E}{L} \quad D_E = 200 \text{ mm}$$

$$= 200 \text{ mm} \cdot \frac{2000}{2700} = 148 \text{ mm} \quad D_B = 4,5 \text{ mm (SEV-Blende)}$$

$$\gg D_B$$

$$D_S = 146 \text{ mm}$$

$$q_K = 310 \text{ mm}$$

$$L = 2700 \text{ mm}$$

$$\Phi_{S(M)} = \Phi \cdot 25,5 \cdot 10^{-4} \cdot \left(\frac{4,5}{146}\right)^2 \cdot \left(\frac{310}{2000}\right)^2 = \Phi \cdot 5,8 \cdot 10^{-8}$$

Ist L_3 vergütet, so wird $R_2 \approx 1\%$ und $\Phi_{S(M)} = \Phi \cdot 0,97 \cdot 10^{-8}$.

Entfernt man die SEV-Blende, so steigt D_B auf 30 mm. Der Streufluß wächst um den Faktor $(30/4,5)^2 = 44,5$ und beträgt bei unvergütetem Sendeobjektiv

$$\Phi_{S(M)} = \Phi \cdot 5,8 \cdot 10^{-8} \cdot 44,5 = \Phi \cdot 258 \cdot 10^{-8}$$

Der Phasenunterschied des Streulichtes ist für $\lambda_0 = 546$ nm:

$$\delta = 2 (d'_1 \cdot n_1 + d'_2 \cdot n_2) \quad d'_1 = 35,0 \text{ mm} \quad n_1 = 1,52$$

$$= 2 \cdot 86,2 \text{ [mm Lichtweg]} \quad d'_2 = 20,0 \text{ mm} \quad n_2 = 1,65$$

$$= 86,2 \text{ [mm Supportverschiebung]}$$

Entsprechend betragen die Phasenfehler (ausgedrückt als ΔS_V)

a) bei vergütetem Sendeobjektiv mit SEV-Blende $\Delta\varphi = 0,97 \cdot 10^{-8} \cdot 86,2 \text{ mm}$
 $= 8,36 \cdot 10^{-7} \text{ mm}$

b) bei unvergütetem Sendeobjektiv mit SEV-Blende $\Delta\varphi = 5,8 \cdot 10^{-8} \cdot 86,2 \text{ mm}$
 $= 50 \cdot 10^{-7} \text{ mm}$

c) bei unvergütetem Sendeobjektiv ohne SEV-Blende $\Delta\varphi = 258 \cdot 10^{-8} \cdot 86,2 \text{ mm}$
 $= 2220 \cdot 10^{-7} \text{ mm} \approx 0,2 \text{ } \mu\text{m}$

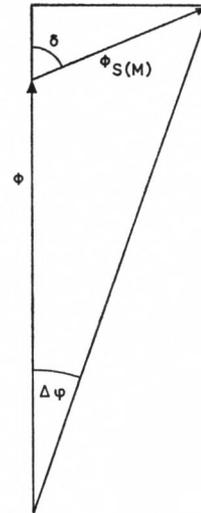


Bild 28

III. DER MESSAUFBAU

1. DIE LICHTQUELLE UND IHRE STROMVERSORGUNG

Lichtquelle ist der Bogen einer Quecksilber-Höchstdrucklampe OSRAM HBO 100W/2. Seine leuchtende Fläche ($0,25 \times 0,25 \text{ mm}$) erreicht nach Angaben der Herstellerfirma eine mittlere Leuchtdichte von 170000 cd/cm^2 . Die Entladung wird durch einen hochfrequenten Spannungsstoß von ca. 25 kV eingeleitet.

Ein elektronisch stabilisiertes Netzgerät versorgt die Lampe über eine Siebkette und einen Vorwiderstand von $5 \dots 12 \Omega$ mit Gleichspannung. Lampenspannung U_L ($17 \dots 25 \text{ V}$) und Lampenstrom I_L ($6 \dots 4 \text{ A}$) werden ständig gemessen. Durch Ändern von U_L läßt sich die Nennleistung $N_L = U_L \cdot I_L$ einstellen.

Die Lampe selbst wird von zwei Klemmbacken gehalten, über die der Lampenstrom fließt. Sie ist in einem Brenngehäuse untergebracht und kann mit diesem senkrecht und waagrecht verschoben werden.

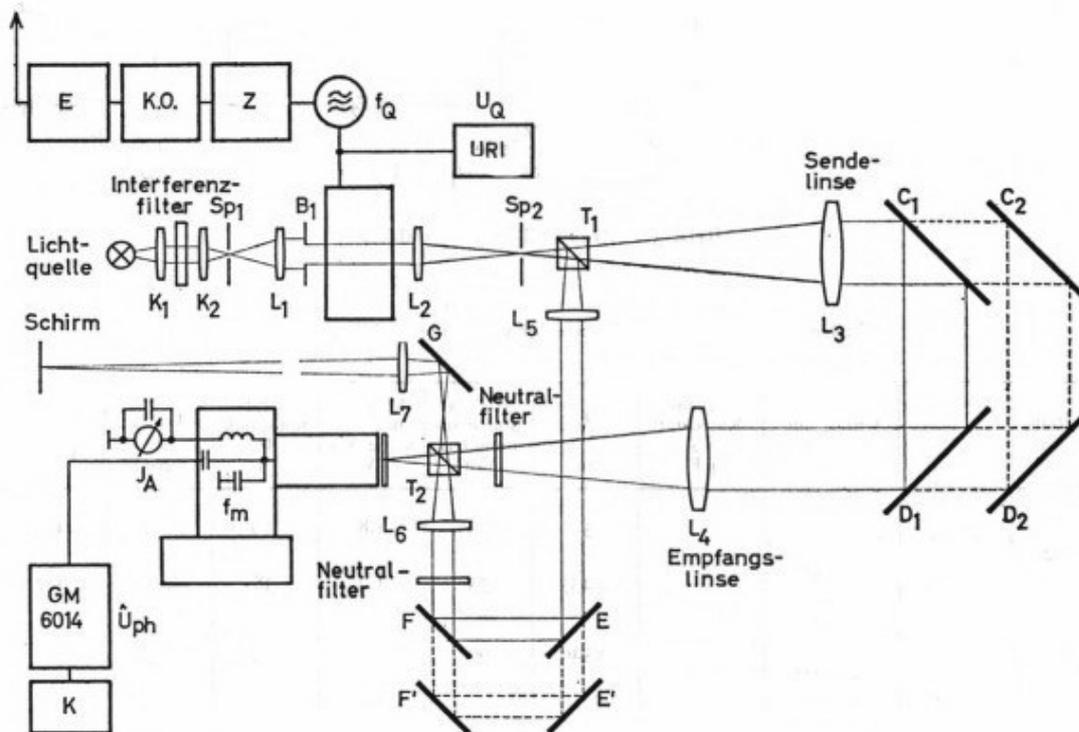


Bild 2: Messung der Lichtgeschwindigkeit