

## 上海图书馆（上海科学技术情报研究所）

---

感谢使用上海图书馆的资源！使用本馆文献服务，意味着您同意下述条款与条件并受其约束。

### ● 知识产权

用户只能出于合法的、非商业目的使用本项服务。文献服务所提供的资料仅供个人学习、研究或者欣赏，使用他人已经发表的作品应当严格遵守《中华人民共和国著作权法》的规定，不得侵犯著作权人的合法权益！

### ● 免责声明：

本馆文献服务所提供的资料中包括第三方提供的出版物，资料所含的信息和/或表达的观点，并不反映上海图书馆的立场。上海图书馆不保证资料信息内容的准确性、完整性或有用性，用户据此做出的任何决定应自担风险，上海图书馆不承担用户因内容的使用而产生的一切责任。

18,00-	18,50-	19,00-	19,50-
1,741-	1,788-	1,835-	1,882
1,809-	1,858-	1,907-	1,956
1,882-	1,933-	1,983-	2,034
1,959-	2,011-	2,064-	2,117-
2,040-	2,095-	2,150-	2,204
2,127-	2,184-	2,241-	2,298
2,220-	2,280-	2,339-	2,397
2,320-	2,381-	2,443-	2,504
2,426-	2,490-	2,554-	2,618
2,541-	2,608-	2,674-	2,741
2,664-	2,734-	2,804-	2,873
2,798-	2,871-	2,943-	3,016
2,943-	3,019-	3,095-	3,170
3,100-	3,180-	3,259-	3,338
3,273-	3,356-	3,439-	3,521
3,461-	3,548-	3,635-	3,721
3,668-	3,760-	3,850-	3,941
3,896-	3,992-	4,088-	4,182
4,149-	4,250-	4,349-	4,449
4,430-	4,545-	4,640-	4,744
4,742-	4,863-	4,962-	5,071
5,091-	5,207-	5,322-	5,436
5,482-	5,603-	5,723-	5,842
5,921-	6,047-	6,173-	6,297
6,414-	6,546-	6,676-	6,805
6,968-	7,105-	7,240-	7,374
7,591-	7,732-	7,872-	8,010
8,288-	8,434-	8,577-	8,719
9,067-	9,216-	9,362-	9,506
9,933-	10,083-	10,231-	10,377
10,887-	11,038-	11,187-	11,333
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
-	-	-	-
8,851-	9,818-	-	-
6,718-	7,032-	7,367-	7,728-
5,706-	5,930-	6,160-	6,399-
5,027-	5,207-	5,390-	5,578-
4,518-	4,671-	4,827-	4,985-
4,115-	4,250-	4,386-	4,523-
3,785-	3,905-	4,027-	4,149
3,506-	3,616-	3,726-	3,837-
3,267-	3,368-	3,469-	3,570
3,059-	3,152-	3,245-	3,339
2,876-	2,962-	3,049-	3,136
2,713-	2,793-	2,874-	2,955
2,566-	2,642-	2,717-	2,794
2,433-	2,504-	2,576-	2,648
2,312-	2,380-	2,447-	2,515
2,202-	2,266-	2,330-	2,394
2,100-	2,161-	2,222-	2,283
2,006-	2,064-	2,122-	2,180
1,919-	1,974-	2,029-	2,084
1,838-	1,890-	1,943-	1,996

## Zur Refraktion von Licht im Meerwasser

Von GÜNTHER SAGER

*Zusammenfassung:* Es werden die Auffassungen und Ergebnisse zur Brechung des Lichtes im Meerwasser beleuchtet und die immer noch in der Literatur vorhandenen Fehlwerte herausgestellt, wobei die Darstellungen der Refraktion in den Standardwerken der Meereskunde kritisch gewertet werden. Für die gelbe Natrium-Linie des Spektrums werden Tabellen und graphische Darstellungen des Refraktionskoeffizienten und der Lichtgeschwindigkeit im Meerwasser abgeleitet.

### Rückschau auf grundlegende Arbeiten

Die Brechung des Lichtes im Meerwasser hängt ab vom Salzgehalt, der Temperatur und dem Druck und ist wegen der Dispersion des Lichts für jede Wellenlänge eine andere. Auf die besondere Schwierigkeit, optisch reines Wasser herzustellen, hat schon 1922 der Inder RAMAN hingewiesen. Von diesem Faktor hängen alle Messungen entscheidend ab. Verfolgt man die Angaben über Refraktionskoeffizienten in den einschlägigen Lehrbüchern der Ozeanographie, so stößt man auf zwei verschiedene Gruppen von Daten, die beide in die Zeit 1934/35 zurückreichen, nämlich eine amerikanische von UTTERBACK und Mitarbeitern und deutsche Untersuchungen von BEIN. Erst in jüngster Zeit sind französische Bestimmungen der Brechzahl hinzugekommen, die vor allem der Abhängigkeit von der Wellenlänge Rechnung tragen. Im folgenden sollen die Ergebnisse vom physikalisch-mathematischen Standpunkt kritisch betrachtet werden, während zur Methodik auf die Literaturangaben zurückgegriffen werden muß.

BEIN führte seine Untersuchungen an der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt für weißes oder gelbes He-Licht durch und publizierte die Resultate 1935. Seine Tabellen der Brechzahlen umfassen Dichtewerte  $\sigma = (\rho - 1) 10^3$  von 16, 20, 24, 28 und 32 und Temperaturen von 0 bis 40 °C in 5°-Intervallen und sind für verdünntes oder konzentriertes Ozeanwasser ausgelegt. Rein formal wurden die Brechzahlen als Differenzen gegen einen Fixwert angegeben, um Stellenwerte einzusparen. Die Daten sind auf Salzgehalt nach der Formel für den Zusammenhang von Dichte und Salzgehalt umrechenbar und bedecken dann etwa den Bereich von 20 bis 40‰ Salzgehalt.

Es leuchtet zwar ein, daß man in diesem Bereich die Abhängigkeit der Brechzahl klarer herauschälen kann als bei niedrigeren Werten, jedoch ist damit die Möglichkeit vergeben, die Tabellen auf Nebenmeere wie die Ostsee anzuwenden. Trotz dieses Mangels wurden die Tabellen von BEIN jahrzehntelang immer wieder angezogen. Das Fehlen des Intervalls von 0 bis 20‰ wirkt um so befremdender, als schon HALL und PAYNE (1922) Untersuchungen des Einflusses der Temperatur auf die Brechzahlen von reinem Wasser gegen gleichtemperierte Luft für eine Wellenlänge von  $\lambda = 0,589 \mu\text{m}$  durchgeführt haben, die in Tab. 1 aufgeführt sind.

Sieht man sich die ersten und die höheren Differenzen in der Tabelle von BEIN an, so stellt man in bezug auf den Salzgehalt ein quasilineares Verhalten für jede der angegebenen Temperaturen fest, wobei man mit BEIN der Meinung sein möchte, daß es sich vermutlich um einen rein linearen Zusammenhang handelt, der durch Mängel in der Meßanordnung verwischt worden ist. Extrapoliert man die Brechzahldifferenzen  $\Delta n$  in Richtung Süßwasser, so zeigt sich, daß mit verschwindendem Salzgehalt auch die Temperaturabhängigkeit verlorengeht, was in Widerspruch zu den Ergebnissen von HALL und PAYNE und den späteren Erkenntnissen steht.

Versucht man dennoch eine künstliche Anpassung an Süßwasser, so geht der strenge funktionelle Zusammenhang zwischen  $n$ ,  $T$  und  $S$  verloren. Es ist also praktisch nicht möglich, die Wertegruppe von BEIN mit niedrigeren Salzgehalten und deren Einfluß auf den Refraktionsindex hinreichend in Einklang zu bringen. Die weiteren Betrachtungen werden zeigen, daß dies fast gleichzeitig mit anderen Meßreihen in den Vereinigten Staaten gelungen war und 1968 von französischen Bearbeitern wiederholt und erweitert werden konnte.

1934 gaben UTTERBACK, THOMPSON und THOMAS für die Wellenlänge  $\lambda = 0,5893 \mu\text{m}$  (gelbe Natriumlinie des Spektrums) Beziehungen zwischen dem Refraktionskoeffizienten und der Temperatur bei 0, 5, 10, 15, 20 und 25 °C sowie jeweils 13 Chlorgehaltswerten zwischen 1,477 und 21,381‰ (2,668 und 38,626‰  $S$ ) an. Sie erkannten die lineare Relation vom Typ

$$n_{\text{c}} = a_{\text{c}} + b_{\text{c}} \cdot 10^{-4} \text{Cl } \text{‰}$$

und gaben die Koeffizienten für die genannten Temperaturen an, von denen die  $a_{\text{c}}$  vergleichsweise in der Tab. 1 wiedergegeben sind. Mit diesen Gleichungen wurden Tabellen mit ganzzahligem Chlorgehalt errechnet und mitgeteilt. Eine Investigation der Meßwerte durch alle höheren Differenzen läßt auf eine relativ sorgfältige Arbeit schließen. Die Extrapolation auf den der Tabelle direkt benachbarten Fall  $\text{Cl} = 0$  führt auf brauchbare Werte der Brechzahl in Süßwasser. Die Arbeit ist im Gegensatz zu BEIN sachlich kurz gehalten und gibt einige Rückblicke auf frühere Bemühungen. Die von UTTERBACK und Mitarbeitern für  $T = 25 \text{ °C}$  aufgestellte Gleichung wurde von MIYAKE (1939) fast genau verifiziert.

Der Brech

Trotz der gut widersprüchlichen wichtiger Werke

Die auf den S Aufnahme in die länge und Fixp BACK und Mitar das Standardwe punkt nicht nu LAUSCHER (1968 Gleichung von I zwischen Meerw tur und Wellenl keit von der Ten Näherung paral (vgl. Tab. 1 und

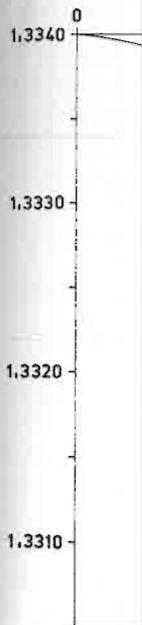


Abb. 1. Refraktion Spektr

Meereskunde, H.

## Der Brechungsindex in den meereskundlichen Standardwerken

Trotz der guten Basis der Werte von UTTERBACK und Mitarbeitern blieben die widersprüchlichen Werte von BEIN in der Literatur dominant. Eine Übersicht wichtiger Werke mit ozeanographischen Angaben liefert das folgende Bild:

Die auf den Salzgehalt umgerechneten Werte von BEIN fanden auszugsweise Aufnahme in die „Allgemeine Meereskunde“ von DIETRICH, wobei Bezugswellenlänge und Fixpunkt der Brechzahlen angegeben sind. Die Arbeit von UTTERBACK und Mitarbeitern wird nicht erwähnt. Die Gesamtheit der Werte wurde in das Standardwerk von LANDOLT-BÖRNSTEIN übernommen, wobei dort der Fixpunkt nicht numerisch genannt wird. Im „Handbuch der Geophysik“ gibt LAUSCHER (1968) zunächst die Ergebnisse von HALL und PAYNE und dann eine Gleichung von BEIN und HIRSEKORN an, die den Unterschied der Brechzahlen zwischen Meerwasser und reinem Wasser in Abhängigkeit von Dichte, Temperatur und Wellenlänge darstellen soll. Diese Formel liefert eine lineare Abhängigkeit von der Temperatur und ist damit indiskutabel, weil die Relation in erster Näherung parabolischen Charakter hat, wie nachher näher besprochen wird (vgl. Tab. 1 und Abb. 1).

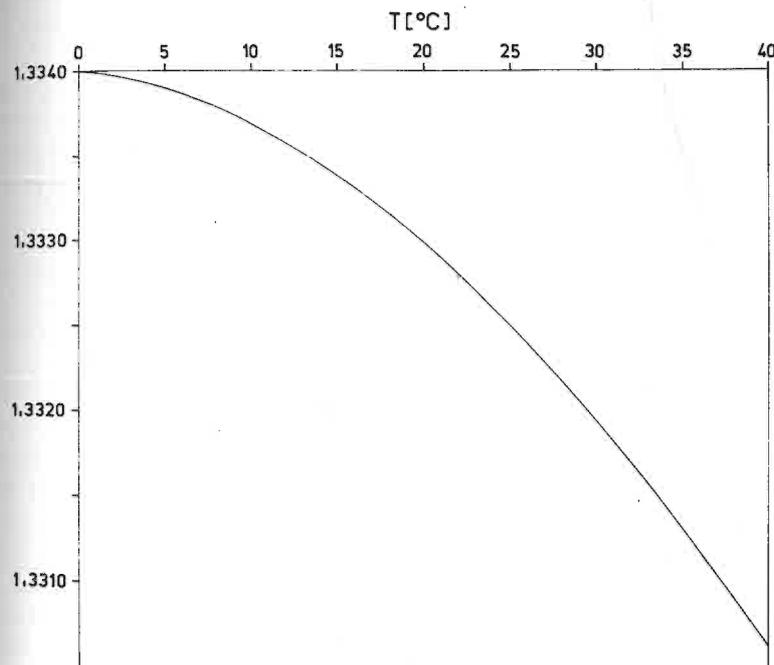


Abb. 1. Refraktionskoeffizient für reines Wasser und  $\lambda = 0,58926 \mu\text{m}$  (gelbe Na-Linie des Spektrums) in Abhängigkeit von der Temperatur bei 760 mm Hg

Was bei der Kompilation von Angaben für ein so weitgedehntes Gebiet wie die Meereskunde bei allgemeinen Lehrbüchern kaum realisierbar ist, nämlich physikalisch nicht genügend fundierte Tabellen auszuschneiden, scheint auch im engeren Fachbereich noch zu hinken. In seinem Buch „Optical Oceanography“ von 1968 übernimmt JERLOV ähnlich wie DIETRICH eine Auswahl der Differenzwerte von BEIN für  $\lambda = 0,5876 \mu\text{m}$  und gibt keinen numerischen Basiswert, an den die Differenzen angeschlossen werden sollen. BEIN wird dabei sogar das Kompliment zuteil, daß er „has treated this problem exhaustively“! Nicht in Schwierigkeiten gerät SCHULEIKIN in seiner „Physik des Meeres“ (4. Auflage 1968), wo er auf einigen Dutzend Seiten die Meeresoptik behandelt und keinerlei Angaben über den Brechungsindex macht.

Sein Landsmann ZUBOW hat in seinen „Ozeanographischen Tabellen“ (3. Aufl. 1957) Tabellen für den Brechungskoeffizienten bis zu 30 °C Temperatur und 40‰ Salzgehalt in Fünferintervallen für die Wellenlänge  $0,5896 \mu\text{m}$  aufgeführt. Die Ausgangswerte für Süßwasser decken sich weitgehend mit denjenigen der Tab. 1. Im einzelnen zeigen Differenzbildungen, daß die Ergebnisse den Werten von BEIN eng benachbart sind und damit von denen UTTERBACKS merklich abweichen. ZUBOW hat dabei offenbar den Versuch gemacht, die Werte von BEIN mit den Basiswerten von Süßwasser zu kombinieren, was exakt nicht möglich ist, aber immerhin einen Fortschritt bedeutete, der jedoch angesichts der kontinuierlichen Untersuchungen von UTTERBACK und seinen Mitarbeitern nicht erforderlich gewesen wäre.

Von den Standardwerken der Meereskunde bleibt zur Ehrenrettung der Gruppe UTTERBACK nur SVERDRUP mit seiner „Oceanography“ nach. Er erwähnt zwar die Arbeit von BEIN, wendet sich dann aber seinen Landsleuten zu und gibt als graphische Darstellung die zitierten Geradengleichungen als Schar für jeweils ein festes  $T$  über dem Chlorgehalt und neben den Brechzahlen als Ordinate. Diese Darstellung bleibt weitgehend gültig, wie anschließend auseinandergesetzt werden soll, während die Angaben von BEIN bei Neuauflagen der Lehrbücher verschwinden müssen.

#### Kritische Überarbeitung der Ergebnisse von UTTERBACK und Mitarbeitern

Der vertrauenerweckende Befund der Resultate von UTTERBACK, THOMPSON und THOMAS war für den Verfasser Anlaß, sich etwas eingehender mit der Thematik zu befassen. Zu diesem Zweck kam es darauf an, die  $a_{-c}$  und  $b_{-c}$  in bezug auf ihre Verträglichkeit kritisch zu untersuchen. Neben den Werten von HALL und PAYNE und den  $a_{-c}$  von UTTERBACK bot sich die Möglichkeit, für Süßwasser die Angaben von D'ANS-LAX im „Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Band I“ zu nutzen. Sie sind dort für eine Vielzahl von Wellenlängen, jedoch nur für Temperaturen von 15, 20, 25, 30 und 40 °C zu finden. In der Tab. 1 wurden die überraschend gut zusammenpassenden Brechzahlen von reinem Wasser gegen gleichtemperierte Luft für  $\lambda = 0,58926 \mu\text{m}$  gegenübergestellt.

Die Werte der T  
Alsdann wurde  
ten Grades zu fix  
gedehnter — E  
wurden. Es erga

$T$  °C  
n

Brechzahlen

$T$ in °C	HALL u. PAYNE 1922
0	1,334
5	—
10	1,333
15	—
20	1,332
25	—
30	1,331
35	—
40	1,330

\*1 MIYAKE fand

Vergleichsmögl.  
lassen eine kaun  
erkennen. Dami  
prinzipiell von d

Es kam im w  
Differenzbildung  
Werte, wobei auf  
oder zwei Einhei  
wieder Auswirku  
Kollektiv besteh

Problematische  
wo wiederum Au  
wurden ebenfalls  
fert. Dann wurde  
und nochmals geg  
matischen Gründ  
zeln belegt sind, a  
Genauigkeit wur  
Refraktion in Ru

ein so weitgedehntes Gebiet wie die kaum realisierbar ist, nämlich physikalisch auszuschneiden, scheint auch im ersten Buch „Optical Oceanography“ von UTTERBACK eine Auswahl der Differenzen keinen numerischen Basiswert, an dem sie sich anlehnen sollen. BEIN wird dabei sogar das Problem exhaustively“! Nicht in der „Physik des Meeres“ (4. Auflage) von UTTERBACK und seinen Mitarbeitern wird die Meeresoptik behandelt und keinerlei

anographischen Tabellen“ (3. Auflage) enthalten bis zu 30 °C Temperatur und Wellenlänge 0,5896  $\mu\text{m}$  aufgeführt. Ich weitgehend mit denjenigen der Abbildungen, daß die Ergebnisse den Angaben von UTTERBACK merklich abweichen. Ich habe versucht, den Versuch gemacht, die Werte von UTTERBACK zu kombinieren, was exakt nicht möglich war. Ich deutete, der jedoch angesichts der Angaben von UTTERBACK und seinen Mitarbeitern nicht

bleibt zur Ehrenrettung der Gruppe „Optical Oceanography“ nach. Er erwähnt auch, daß er aber seinen Landsleuten zu und in Geradengleichungen als Schar für die Berechnung und neben den Brechzahlen als Ordnungszahl, wie anschließend auseinanderzusetzen. Ich habe bei Neuauflagen der Lehr-

von UTTERBACK und Mitarbeitern veröffentlichte Resultate von UTTERBACK, THOMPSON und anderen, die sich etwas eingehender mit der Theorie der Brechzahlen befassen. Ich habe es darauf an, die  $a_{\text{OC}}$  und  $b_{\text{OC}}$  zu untersuchen. Neben den Werten von UTTERBACK bot sich die Möglichkeit, für die Brechzahlen in „Taschenbuch für Chemiker und Physiker“ von BEIN für eine Vielzahl von Wellenlängen. Ich habe die Werte für 25, 30 und 40 °C zu finden. In der Zusammenfassung Brechzahlen von BEIN für  $\lambda = 0,58926 \mu\text{m}$  gegenüber

Die Werte der Tab. 1 sind in der Abb. 1 graphisch dargestellt.

Als dann wurden die Angaben von D'ANS-LAX benutzt, um ein Polynom höheren Grades zu fixieren, aus dem durch Interpolation und — leider ziemlich ausgedehnter — Extrapolation die fehlenden Zuordnungen genähert bestimmt wurden. Es ergaben sich dabei:

$T$ °C	0	5	10	35
$n$	1,333 982	1,333 893	1,333 689	1,331 308

Tabelle 1

Brechzahlen von reinem Wasser gegen gleichtemperierte Luft für  $\lambda = 0,58926 \mu\text{m}$

$T$ in °C	HALL und PAYNE 1922	UTTERBACK u. Mitarb. 1934	D'ANS-LAX 1967	MÉHU und JOHANNIN-GILLES 1968	benutzte Werte des Verfassers
0	1,33401	1,33402	—	—	1,33400
5	—	1,33391	—	1,33388	1,33390
10	1,33369	1,33370	—	1,33369	1,33369
15	—	1,33340	1,333387	1,33339	1,33338
20	1,33299	1,33301	1,332988	1,33299	1,33298
25	—	1,33250*	1,332503	1,33250	1,33250
30	1,33192	—	1,331940	1,33194	1,33194
35	—	—	—	—	1,33131
40	1,33051	—	1,330610	—	1,33061

\*; MIYAKE fand hier 1,332497.

Vergleichsmöglichkeiten bieten sich gerade für die extrapolierten Werte. Sie lassen eine kaum zu erwartende Annäherung an die sonst bekannten Werte erkennen. Damit konnten die Ausgangswerte von UTTERBACK für  $Cl = 0$  als prinzipiell von der richtigen Größenordnung verifiziert werden.

Es kam im weiteren darauf an, die  $a_{\text{OC}}$  in sich abzustimmen, was durch Differenzbildung geschehen ist. Dabei ergaben sich die in der Tab. 2 gewählten Werte, wobei auf fünf Dezimalen zurückgegangen wurde und die letzte um eine oder zwei Einheiten abweichen könnte. Solche Abweichungen hätten jedoch wieder Auswirkungen auf die höheren Differenzen und könnten daher nur im Kollektiv bestehen.

Problematischer war die Abstimmung am Ende der Tabelle von UTTERBACK, wo wiederum Ausgleichungen vorgenommen worden sind. Diese Koeffizienten wurden ebenfalls auf ihre Relation zueinander untersucht und noch leicht variiert. Dann wurden aus der Annahme eines linearen Verlaufs die  $b_{\text{OC}}$  bestimmt und nochmals gegeneinander abgewogen. Hier wurden in der Tab. 2 aus mathematischen Gründen drei Dezimalen mitgenommen, die meßtechnisch nicht einzeln belegt sind, auch nicht bei den neueren französischen Observationen. Diese Genauigkeit wurde in die Gleichungen projiziert, um die gegebene Tab. 3 der Refraktion in Rundungsfehlern günstig zu halten.

Tabelle 2

Bezugsgleichungen zur Abhängigkeit des Brechungsindex vom Salzgehalt bei festen Temperaturen

$$n_{0^\circ} = 1,33400 + 1,966 \cdot 10^{-4} S^0_{/00}$$

$$n_{5^\circ} = 1,33390 + 1,919 \cdot 10^{-4} S^0_{/00}$$

$$n_{10^\circ} = 1,33369 + 1,884 \cdot 10^{-4} S^0_{/00}$$

$$n_{15^\circ} = 1,33338 + 1,857 \cdot 10^{-4} S^0_{/00}$$

$$n_{20^\circ} = 1,33298 + 1,835 \cdot 10^{-4} S^0_{/00}$$

$$n_{25^\circ} = 1,33250 + 1,816 \cdot 10^{-4} S^0_{/00}$$

$$n_{30^\circ} = 1,33194 + 1,799 \cdot 10^{-4} S^0_{/00}$$

$$n_{35^\circ} = 1,33131 + 1,783 \cdot 10^{-4} S^0_{/00}$$

$$n_{40^\circ} = 1,33061 + 1,768 \cdot 10^{-4} S^0_{/00}$$

Tabelle 3

Differenz des Brechungsindex  $\Delta n = n - 1,30000$  für  $\lambda = 0,58926 \mu m$

S <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	T °C								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	3400	3390	3369	3338	3298	3250	3194	3131	3061
2,5	3449	3438	3416	3384	3344	3295	3239	3176	3107
5,0	3498	3486	3463	3431	3390	3341	3284	3220	3151
7,5	3547	3534	3510	3477	3436	3386	3329	3265	3196
10,0	3597	3582	3557	3524	3482	3432	3374	3309	3240
12,5	3646	3630	3605	3570	3527	3477	3419	3354	3285
15,0	3695	3678	3652	3617	3573	3522	3464	3398	3329
17,5	3744	3726	3699	3663	3619	3568	3509	3443	3374
20,0	3793	3774	3746	3709	3665	3613	3554	3488	3419
22,5	3842	3822	3793	3756	3711	3659	3599	3532	3463
25,0	3892	3870	3840	3802	3757	3704	3644	3577	3508
27,5	3941	3918	3887	3849	3803	3749	3689	3621	3552
30,0	3990	3966	3934	3895	3849	3795	3734	3666	3597
32,5	4039	4014	3981	3942	3894	3840	3779	3710	3641
35,0	4088	4062	4028	3988	3940	3886	3824	3755	3686
37,5	4137	4110	4076	4034	3986	3931	3869	3800	3731
40,0	4186	4158	4123	4081	4032	3976	3914	3844	3775

Tabelle 4

Lichtgeschwindigkeit in Meerwasser für  $\lambda = 0,58926 \mu m$  [ $km s^{-1}$ ] bei 760 mm Hg

S <sup>0</sup> / <sub>00</sub>	T °C								
	0	5	10	15	20	25	30	35	40
0	224 732	224 749	224 785	224 837	224 904	224 985	225 080	225 185	225 306
2,5	224 650	224 668	224 705	224 759	224 827	224 909	225 004	225 110	225 221
5,0	224 567	224 588	224 626	224 681	224 749	224 832	224 928	225 035	225 146
7,5	224 485	224 507	224 547	224 603	224 672	224 756	224 852	224 960	225 071
10,0	224 402	224 426	224 468	224 524	224 595	224 679	224 776	224 885	225 000
12,5	224 319	224 346	224 388	224 446	224 518	224 603	224 700	224 810	224 921
15,0	224 236	224 265	224 309	224 368	224 441	224 527	224 625	224 735	224 846
17,5	224 154	224 185	224 230	224 290	224 364	224 450	224 549	224 660	224 771
20,0	224 072	224 104	224 151	224 212	224 287	224 374	224 473	224 585	224 696
22,5	223 990	224 024	224 072	224 134	224 210	224 297	224 398	224 510	224 621
25,0	223 907	223 943	223 994	224 057	224 133	224 221	224 322	224 435	224 546
27,5	223 825	223 863	223 915	223 979	224 056	224 145	224 247	224 360	224 471
30,0	223 743	223 783	223 836	223 901	223 979	224 069	224 171	224 285	224 396
32,5	223 661	223 703	223 758	223 823	223 903	223 993	224 096	224 211	224 322
35,0	223 579	223 623	223 679	223 746	223 826	223 917	224 020	224 136	224 247
37,5	223 498	223 543	223 600	223 669	223 749	223 841	223 945	224 061	224 172
40,0	223 416	223 463	223 521	223 591	223 673	223 765	223 870	223 986	224 107

Die Tab. 3 ist  
sich mit zunehm  
index etablieren  
die Temperatur  
dezimale um ei  
poliert werden.  
zur Anwendung  
Tabelle ausschö

Die Franzosen  
aufgegriffen, na  
Interesse an der  
gemacht hatte.  
dienst der Arbe

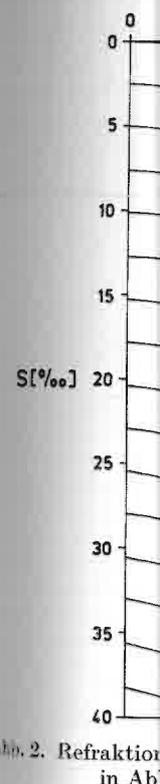


Abb. 2. Refraktion  
in Ab

index vom Salzgehalt bei festen Temperaturen  
 $n_{25^\circ} = 1,33250 + 1,816 \cdot 10^{-4} S$   
 $n_{30^\circ} = 1,33194 + 1,799 \cdot 10^{-4} S$   
 $n_{35^\circ} = 1,33131 + 1,783 \cdot 10^{-4} S$   
 $n_{40^\circ} = 1,33061 + 1,768 \cdot 10^{-4} S$

3  
 $n - 1,30000$  für  $\lambda = 0,58926 \mu m$

T °C	20	25	30	35	40
	3298	3250	3194	3131	3061
	3344	3295	3239	3176	3105
	3390	3341	3284	3220	3149
	3436	3386	3329	3265	3184
	3482	3432	3374	3309	3228
	3527	3477	3419	3354	3282
	3573	3522	3464	3398	3324
	3619	3568	3509	3443	3370
	3665	3613	3554	3488	3413
	3711	3659	3599	3532	3459
	3757	3704	3644	3577	3500
	3803	3749	3689	3621	3547
	3849	3795	3734	3666	3590
	3894	3840	3779	3710	3636
	3940	3886	3824	3755	3680
	3986	3931	3869	3800	3724
	4032	3976	3914	3844	3768

4  
 $n - 1,30000$  für  $\lambda = 0,58926 \mu m$  [km s<sup>-1</sup>] bei 760 mm Hg

T °C	20	25	30	35	40
	224904	224985	225080	225185	225305
	224827	224909	225004	225110	225230
	224749	224832	224928	225035	225156
	224672	224756	224852	224960	225081
	224595	224679	224776	224885	225006
	224518	224603	224700	224810	224931
	224441	224527	224625	224735	224857
	224364	224450	224549	224660	224782
	224287	224374	224473	224585	224707
	224210	224297	224398	224510	224633
	224133	224221	224322	224435	224559
	224056	224145	224247	224360	224485
	223979	224069	224171	224285	224411
	223903	223993	224096	224211	224336
	223826	223917	224020	224136	224262
	223749	223841	223945	224061	224188
	223673	223765	223870	223986	224114

Die Tab. 3 ist auf Temperaturen von 35 und 40 °C extrapoliert worden, weil sich mit zunehmender Temperatur eine relativ stabile Beziehung zum Brechungsindex etablieren läßt. Die Salzgehalte sind in Abständen von 2,5 Promille und die Temperaturen von 5 °C zugrunde gelegt worden. In der Tabelle, deren letzte Dezimale um einige Einheiten unsicher sein kann, darf senkrecht linear interpoliert werden. In der Waagerechten müßte eine quadratische Interpolation zur Anwendung kommen, wenn man die optimal mögliche Genauigkeit der Tabelle ausschöpfen will.

Die Ergebnisse von MÉHU und JOHANNIN-GILLES

Die Franzosen MÉHU und JOHANNIN-GILLES haben 1968 die Thematik wieder aufgegriffen, nachdem eine von der UNESCO berufene Kommission 1962 das Interesse an der Bestimmung der Refraktion des Lichtes im Meerwasser deutlich gemacht hatte. Für die Methode sei auf den Beitrag selbst verwiesen. Das Verdienst der Arbeit liegt einmal in Paralleluntersuchungen zu denjenigen von

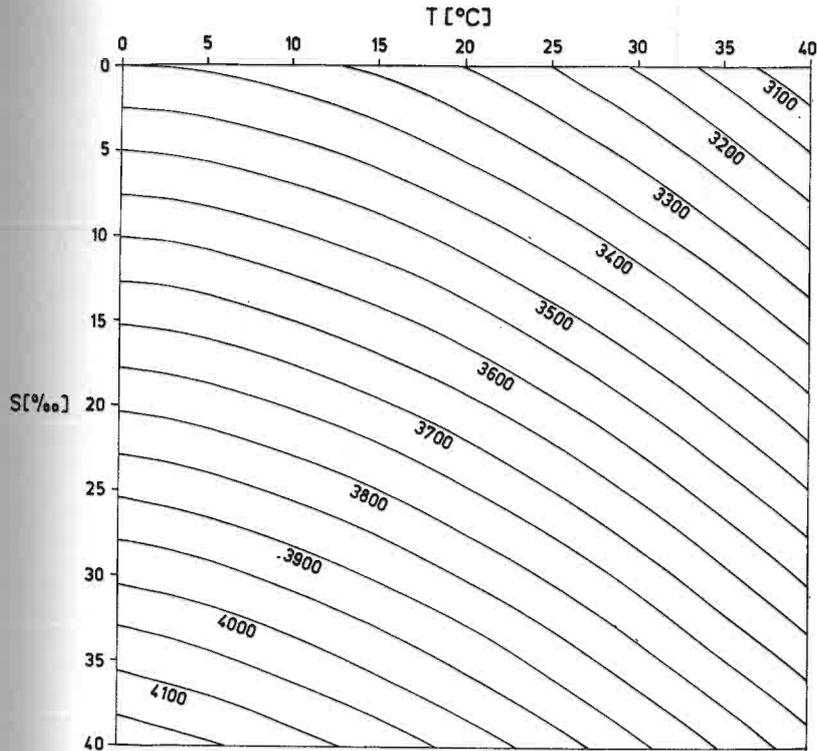


Abb. 2. Refraktionskoeffizient  $\Delta n = n - 1,30000$  für Meerwasser und  $\lambda = 0,58926 \mu m$  in Abhängigkeit von Temperatur und Salzgehalt bei 760 mm Hg

UTTERBACK und Mitarbeitern und zum anderen insbesondere in der Ausdehnung auf 10 Wellenlängen. Für die Stufen im Chlorgehalt fallen die Franzosen auf nur 4 gegenüber 13 bei UTTERBACK zurück. Ein Vergleich der auf Chlorgehalt bezogenen  $b_c$  liefert eine enge Übereinstimmung der beiderseitigen Ergebnisse für  $\lambda = 0,5893 \mu\text{m}$ . Die benutzten Basiswerte der  $a_c$  sind in der Tab. 1 eingetragen, wobei der Wert für  $0^\circ\text{C}$  fehlt, desgleichen für  $35$  und  $40^\circ\text{C}$ . Die Tabelle für Temperaturen von  $1, 5, 10, 15, 20, 25$  und  $30^\circ\text{C}$  zeigt eine außergewöhnlich gute Übereinstimmung zu den überarbeiteten Werten von UTTERBACK, wenn man sie auf die vergleichbaren Salzgehalte umrechnet. Für  $\text{Cl} = 19,373\text{‰}$  bzw.  $S = 35\text{‰}$  ergibt sich am rechten unteren Rand der Tabelle bei  $30^\circ\text{C}$  Temperatur  $1,33824$  in voller Übereinstimmung mit der Tab. 3. Stichproben für andere Werte und der Versuch der Bestimmung von  $b_c$  zeigen, daß noch kleine Streuungen vorhanden sind, von denen schon die zweite Dezimale der  $b_c$  betroffen werden kann.

Auf die weiteren Werte der französischen Bearbeiter soll hier nicht eingegangen werden. Der Beitrag hinterläßt den Eindruck einer recht gründlichen Arbeit, wobei sich bei den geringeren Wellenlängen für  $\text{Cl} = 0$  Abweichungen von den

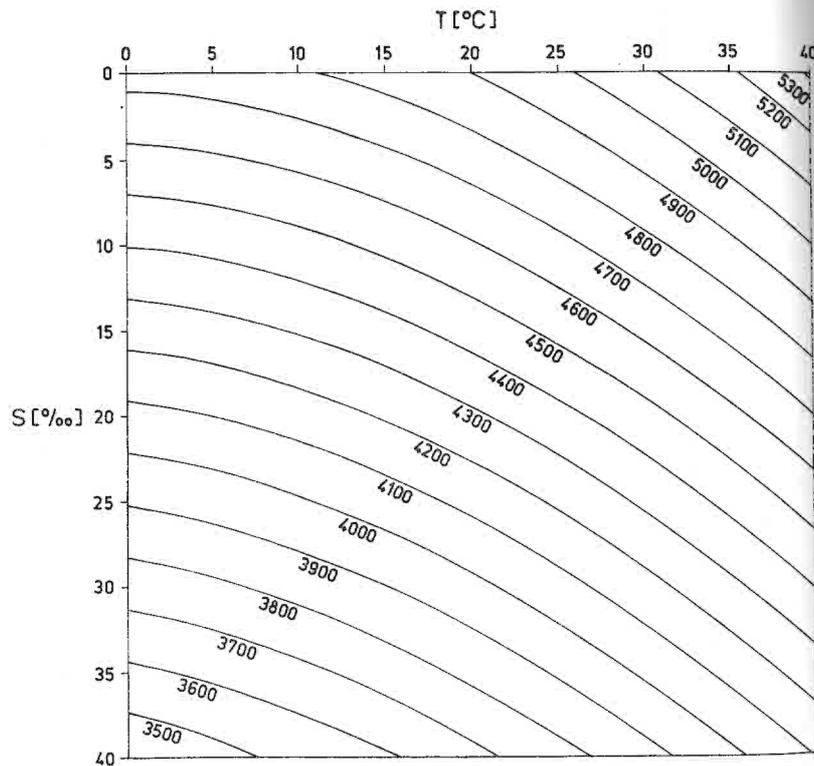


Abb. 3. Lichtgeschwindigkeit  $\Delta c = c - 220\,000 \text{ km s}^{-1}$  in Meerwasser für  $\lambda = 0,58926 \mu\text{m}$  in Abhängigkeit von Temperatur und Salzgehalt bei  $760 \text{ mm Hg}$

bei D'ANS-LAX  
welche Basisw  
Wunsch der fr  
koeffizienten v  
der Charakteri  
nur anschließe

Zur I

Für optisch m

wenn  $c_2$  die Lie

geschwindigkeit

gilt. Der Index

Werte der Tab.

geschwindigkeit

Dezimale etwas

gänge der Tab.

Entsprechendes

noch graphisch

$\lambda = 0,58926 \mu\text{m}$

[1] BEIN, W., P

über Wasser

über Wasserl

gen des Inst.

Reihe, H. 28.

[2] D'ANS-LAX,

kalisch-chem

[3] DIETRICH, G

Ozeanograph

[4] JERLOV, N. G

Geophysik, E

[5] LANDOLT-BÖ

buch der Geo

[6] LAUSCHER, F

mer étalon d

température

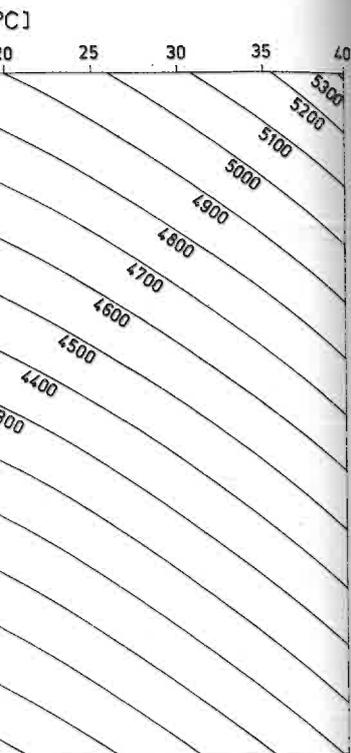
[7] MÉHU, A. un

of sea water.

[8] MIYAKE, Y.,

eren insbesondere in der Ausdehnung  
Chlorgehalt fallen die Franzosen auf  
k. Ein Vergleich der auf Chlorgehalt  
nmung der beiderseitigen Ergebnisse  
erte der  $a_c$  sind in der Tab. 1 ein-  
leichen für 35 und 40 °C. Die Tabelle  
und 30 °C zeigt eine außergewöhnlich  
eten Werten von UTTERBACK, wenn  
umrechnet. Für  $Cl = 19,373\text{‰}$  bzw.  
Rand der Tabelle bei 30 °C Tempera-  
t der Tab. 3. Stichproben für andere  
von  $b_c$  zeigen, daß noch kleine Streu-  
die zweite Dezimale der  $b_c$  betreffen

n Bearbeiter soll hier nicht eingegan-  
druck einer recht gründlichen Arbeit  
n für  $Cl = 0$  Abweichungen von den



$n_\lambda$  in Meerwasser für  $\lambda = 0,58926 \mu\text{m}$   
und Salzgehalt bei 760 mm Hg

bei D'ANS-LAX mitgeteilten Werten ergeben. Leider ist nicht ersichtlich, auf welche Basiswerte sich MÉHU und JOHANNIN-GILLES dabei stützen. Dem Wunsch der französischen Bearbeiter, daß die Angaben über den Refraktionskoeffizienten von Licht im Meerwasser neben der Chlorgehaltsbestimmung auch der Charakterisierung der Wassermassen dienlich sein mögen, kann man sich nur anschließen.

#### Zur Lichtgeschwindigkeit im Meerwasser bei Normaldruck

Für optisch reines Wasser gilt bei jeder Wellenlänge eine Beziehung der Form

$$c_\lambda = \frac{c_0}{n_\lambda},$$

wenn  $c_\lambda$  die Lichtgeschwindigkeit bei der Wellenlänge  $\lambda$  und  $c_0$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist, für die

$$c_0 = 299793 \text{ km s}^{-1}$$

gilt. Der Index  $\lambda$  fällt hier fort, weil es im Vakuum keine Dispersion gibt. Die Werte der Tab. 3 gestatten nunmehr die Berechnung der Tab. 4 mit der Lichtgeschwindigkeit im Meerwasser für  $\lambda = 0,58926 \mu\text{m}$ . Dabei kann die letzte Dezimale etwas unsicher sein, obwohl sie bereits ausgeglichen wurde. Die Eingänge der Tab. 4 sind dieselben wie bei Tab. 3 und für die Interpolation gilt Entsprechendes. Für einen schnellen Überblick sind schließlich in Abb. 2 und 3 noch graphische Darstellungen der Brechzahl und der Lichtgeschwindigkeit für  $\lambda = 0,58926 \mu\text{m}$  beigegeben worden.

#### Literatur

- [1] BEIN, W., Physikalische und chemische Konstanten des Meerwassers und Ergebnisse über Wasserkörper. In: Konstantenbestimmungen des Meerwassers und Ergebnisse über Wasserkörper von W. BEIN, H.-G. HIRSEKORN und L. MÖLLER. Veröffentlichungen des Inst. f. Meereskunde an der Univ. Berlin. Neue Folge A. Geogr.-naturwiss. Reihe, H. 28, Berlin 1935.
- [2] D'ANS-LAX, Taschenbuch für Chemiker und Physiker, Bd. I. Makroskopische physikalisch-chemische Eigenschaften, Berlin, Heidelberg, New York 1967.
- [3] DIETRICH, G. und KALLE, K., Allgemeine Meereskunde. Eine Einführung in die Ozeanographie, Berlin 1957.
- [4] JERLOV, N. G., Optical Oceanography, Amsterdam, London, New York 1968.
- [5] LANDOLT-BÖRNSTEIN, Zahlenwerte und Funktionen, 6. Aufl., 3. Bd. Astronomie und Geophysik, Berlin, Göttingen, Heidelberg 1952.
- [6] LAUSCHER, F., Sonnen- und Himmelsstrahlung im Meer und in Gewässern. In: Handbuch der Geophysik VIII, 1942–1961, Berlin 1961.
- [7] MÉHU, A. und JOHANNIN-GILLES, A., Variation de l'indice de réfraction de l'eau de mer étalon de Copenhague et de ses dilutions en fonction de la longueur d'onde, de la température et de la chlorinité. Cahiers Océanographiques XX (1968), No. 9, Paris.
- [8] MIYAKE, Y., Chemical studies of the western Pacific Ocean. IV. The refractive index of sea water. Chem. Soc. Japan 14 (1939), No. 6.

- [9] RAMAN, C. V., On the molecular scattering of light in water and the colour of the sea. Proc. Roy. Soc., Series A, Vol. 101, London 1922.
- [10] SCHULEIKIN, W. W., Physik des Meeres, 4. Aufl., Moskau 1968.
- [11] SVERDRUP, H. U., JOHNSON, M. W. und FLEMING, R. H., The Oceans. Their physics, chemistry, and general biology, 11. Auflage, Englewood Cliffs, N. J., 1962.
- [12] UTTERBACK, L., THOMPSON, T. G. und THOMAS, B. D., Refractivity-chlorinity-temperature relationships of ocean waters. Journal du Conseil pour l'Exploration de la Mer, H. 9, Kopenhagen 1934.
- [13] ZUBOW, N. N., Ozeanologische Tabellen, 3. Aufl., Leningrad 1957.

Abschluß der Arbeit: 20. 1. 1972

Anschrift des Verfassers:

Dr. habil. GÜNTHER SAGER, Institut für Meereskunde der AdW  
DDR — 253 Rostock-Warnemünde

Beiträge zu

Empirische

Zusammenf.

Meerwassers a

Die Beziehung

Wellenlänge v

abweichungen

druck  $n = f(T)$

$0 \leq S \leq 35\text{‰}$

und berechnet

Der Brech

peratur  $T$ , d

Während Un

von STANLE

Abhängigkei

BACK, THOM

in jüngster Z

JOHANNIN-G

suchungen v

verglichen u

polation un

$0\text{‰} \leq S \leq$

mitgeteilten

Interpolation

gerechte Gle

schlossener a

Aus insges

den Brechun

$= 0,5893 [\mu$

$0\text{°C} \leq T \leq$