

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Encyklopaedie der Naturwissenschaften

Elektricität und Magnetismus

Winkelmann, Adolph August

1893

Elektrisches Leitungsvermögen von metallisch leitenden Körpern

Elektrisches Leitungsvermögen von metallisch leitenden Körpern.

Vorbemerkung.

Jede besondere Substanz hat ihr besonderes Leitungsvermögen. Es ist nämlich der Widerstand eines Drahtes von dieser Substanz von der Länge l und dem Querschnitt q

$$w = \frac{s l}{q},$$

worin man s den spezifischen Widerstand nennt. Die Grösse $k = \frac{1}{s}$ nennt man das spezifische Leitungsvermögen, oder kurzweg das Leitungsvermögen. Man ist übereingekommen, alle spezifischen Widerstände und Leitungsfähigkeiten auf die des Quecksilbers bei 0° zu beziehen, also für Hg (bei 0°) $s = k = 1$ zu setzen. Dann ist der Widerstand einer Quecksilbersäule von der Länge l und dem Querschnitt q einfach gleich

$$w = \frac{l}{q}.$$

Misst man die Länge mit der Einheit 106 cm aus und sei diese Einheit L , und drückt man den Querschnitt Q in mm^2 aus, so erhält man den Widerstand dieses Quecksilberdrahtes in Ohm

$$w = \frac{L}{Q} \text{ Ohm.}$$

Der Widerstand jedes Drahtes aus anderer Substanz ist bei derselben Einheit der Länge und des Querschnittes, wenn k die spezifische Leitungsfähigkeit, s der spezifische Widerstand ist

$$w = \frac{s L}{Q} = \frac{L}{k Q} \text{ Ohm.}$$

Drückt man die Längen in Metern aus, λ , so erhält man entsprechend die Widerstände in SIEMENS Einheiten

$$w = \frac{s \lambda}{Q} = \frac{\lambda}{k Q} \text{ S. E.}$$

Zuweilen bezeichnet man (namentlich in Frankreich) den Widerstand in Ohm, den ein Würfel von 1 cm Seite besitzt, als den spezifischen Widerstand σ der Substanz in Ohm. (Widerstand eines Centimeterwürfels). Man erhält aus den im folgenden angegebenen Leitungsfähigkeiten k diesen spezifischen Widerstand nach der Formel

$$\sigma = \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{106} \cdot \frac{1}{100} = \frac{1}{k \cdot 10600} \text{ Ohm.}$$

Der Widerstand eines Centimeterwürfels Quecksilber bei 0° ist also

$$\sigma = \frac{1}{10600} \text{ Ohm (legales Ohm).}$$

In wissenschaftlichen Einheiten ausgedrückt ist genauer

$$\sigma = \frac{1}{10632} \text{ Ohm} \left(\text{wissenschaftliche Ohm} = 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right) = 94060 \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \cdot 1)$$

Da der Widerstand die Dimensionen einer Geschwindigkeit hat, so sind die Dimensionen der elektrischen Leitungsfähigkeit

$$(K) = \left(\frac{T}{L^2} \right).$$

Die elektrische Leitungsfähigkeit des Quecksilbers ist also in absolutem $C \cdot G \cdot S$ Mass

$$K = \frac{10632}{10^8} \left(\frac{\text{sec}}{\text{cm}^2} \right) = 1.0632 \cdot 10^{-4}.$$

I. Elektrische Leitungsfähigkeit der reinen Metalle.

1. Aeltere und neuere Beobachtungen. Die Leitungsfähigkeit der Metalle für den elektrischen Strom ist vielfach seit langer Zeit untersucht worden. Da es sich jedoch allmählich gezeigt hat, dass kleine Verunreinigungen der Metalle ihre Leitungsfähigkeit wesentlich ändern, so sind direkt vergleichbar und wissenschaftlich werthvoll nur diejenigen Zahlen, welche sich auf möglichst vollkommen reine Metalle beziehen. Als die exaktesten Zahlen sind die von MATTHIESSEN anzusehen, der grosse Sorgfalt auf die Reindarstellung der Metalle verwendet hat. Sie sind in der folgenden Tabelle zusammen mit denen einiger neueren Beobachter zusammengestellt. Für die ältere Literatur seien hier nur die Citate angegeben. Sie ist in WIEDEMANN'S Elektricität I. pag. 503 f. vollständig zusammengestellt.

- 1) DAVY, Phil. Trans. 1821. 2, pag. 433.
- 2) BECQUEREL, Ann. Chim. et Phys. 32, pag. 428. 1828.
- 3) OHM, SCHWEIGG. Journ. 46, pag. 141. 1826.
- 4) CHRISTIE, Phil. Trans. 1833. 1, pag. 95.
- 5) LENZ, POGG. Ann. 34, pag. 418. 1835; 45, pag. 105. 1838.
- 6) POUILLET, POGG. Ann. 15, pag. 92. 1829; Ann. chim. et phys. (3) 17, pag. 244. 1846.
- 7) BECQUEREL, Ann. chim. et phys. (3) 17, pag. 261. 1846.
- 8) BUFF, Ann. d. Chem. u. Pharm. 102, pag. 283. 1857.
- 9) LAMY, Ann. chim. et phys. 51, pag. 316. 1856.
- 10) ARNDTSEN, POGG. Ann. 104, pag. 1; 105, pag. 148. 1858.
- 11) MATTHIESSEN, POGG. Ann. 103, pag. 428. 1858; 115, pag. 353. 1862.
- 12) G. WIEDEMANN, POGG. Ann. 108, pag. 405. 1859.
- 13) RIESS, Reibungselektricität, 1, pag. 431.

2. Reine Metalle haben MATTHIESSEN und BOSE²⁾ untersucht. Die Leitungsfähigkeit ist bestimmt für 0° und bezogen auf die des Quecksilbers bei 0°. Letztere ist gleich 1 gesetzt. Die Zahlen für Indium rühren von ERHARD her.³⁾

Neuere Beobachtungen liegen vor von BENOIT⁴⁾, H. F. WEBER⁵⁾, OBERBECK⁶⁾. H. F. WEBER bestimmte die Dämpfung schwingender Magnetenadeln unter dem Einfluss von stromdurchflossenen Ringen aus dem zu untersuchendem Metall. OBERBECK und BERGMANN maassen die Leitungsfähigkeiten mit der Induktionswaage.⁷⁾

1) F. KOHLRAUSCH, WIED. Ann. 35, pag. 763. 1888.

2) MATTHIESSEN u. v. BOSE, POGG. Ann. 115, pag. 353. 1862.

3) ERHARD, WIED. Ann. 14, pag. 504. 1881.

4) BÉNOIT, compt. rend. 76, pag. 342. 1873.

5) H. F. WEBER, Berl. Monatsbericht 1880, pag. 476.

6) OBERBECK u. BERGMANN, WIED. Ann. 31, pag. 792. 1887.

7) Die Zahlen von EMO, ATTI DEL R. ISTITUTO Veneto (6) 2, pag. 1884, weichen zum Theil erheblich von diesen ab.

Tabelle der Leitungsfähigkeit reiner Metalle bei 0°.

	MATTHIESSEN u. v. BOSE	BÉNOIT	H. F. WEBER	OBERBECK
Silber hart	60·39	—	—	—
„ weich	65·64	55·86	—	54·87
Kupfer hart	60·36	—	—	—
„ weich	61·70	—	—	—
Gold hart	47·07	—	—	—
„ weich	47·92	—	—	—
Aluminium weich	—	30·86	—	30·17
Zink	17·52	11·92 weich 16·10 hart	16·65	15·93
Cadmium	14·32	13·96 hart	13·95	13·77
Magnesium hart	—	22·57	—	18·94
Indium	11·23	—	—	—
Zinn	7·56	8·237	9·871	9·045
Blei	5·02	4·819	5·111	4·688
Arsen	2·87	—	—	—
Antimon	2·79	—	—	2·459
Wismuth	0·75	—	0·8004	0·8205
Thallium	0·55	—	—	—

Schon aus dieser Tabelle sieht man, dass die Zahlenwerthe selbst für (angeblich) reine Metalle sehr wesentlich, bis zu 25 $\frac{0}{0}$, von einander abweichen, was ausser von doch noch vorhandenen fremden Beimengungen, namentlich noch sehr wesentlich von Strukturverschiedenheiten und von Mangel an Homogenität herrührt.

Da jedoch die Leitungsfähigkeit für die meisten Metalle in demjenigen Zustand wichtig ist, in welchem sie als käuflich reine zu bezeichnen sind, so sind in der folgenden Tabelle deren Werthe angegeben, wobei zu beachten ist, dass diese Zahlen nur ungefähr Geltung haben, da eben der Begriff der käuflichen Reinheit kein fester ist. Auch diese Zahlen beziehen sich auf $Hg = 1$ und auf die Temperatur 0°.

Tabelle der specifischen Leitungsfähigkeit bei 0° (bezogen auf $Hg = 1$) für käuflich reine Metalle.

Aluminium weich	32·35	Silber weich	62·6
Blei	4·80	„ hart	57·8
Eisen	9·67	Wismuth	0·72
Eisendraht schwedisch	9·75	Zink	16·7
Gold weich	45·8	Zinn ¹⁾	7·14
„ hart	45·0	Natrium ²⁾ bei 21·7°C.	24·57
Kupfer sehr reines	58·9—59	Magnesium bei 17·0°	16·72
„ gewöhnliches	57	Calcium bei 16·8°	14·53
Nickel weich	3·14	Kalium bei 20·4°	13·69
Platin weich	14·4	Lithium bei 20·0°	12·47
Quecksilber	1	Strontium bei 20·0°	4·40

Es seien hier zum praktischen Gebrauch die Widerstände in Ohm einer Reihe von Metallen angeführt, von Drähten, die 1 m Länge und 1 mm Querschnitt haben (entnommen aus WIEDEMANN, Beibl. 10, pag. 772. 1886).

1) S. auch L. WEILER, Centralzeit f. Optik u. Mech. 6, pag. 28. 1885.

2) MATTHIESSEN, POGG. Ann. Bd. 100, pag. 185. 1857.

Widerstände ω in Ohm und Temperaturcoefficienten, α von Drähten von 1 m Länge und 1 mm Querschnitt.

Metall	ω	α
Aluminium gegläht . .	0·02916	0·00388
Blei gepresst	0·1964	387
Eisen gegläht	0·0973	650
Gold „	0·0206	365
„ hart	0·02097	365
Kupfer	0·0160	380
Neusilber	0·2670	34—37
Nickel gegläht	0·1244	365
Platin „	0·0907	—
Platinsilber	0·2466	032
Quecksilber	0·9434	0907
Silber gegläht	0·01506	377
„ hart	0·01631	377
Wismuth gepresst . .	1·3132	354
Zink gepresst	0·0563	365
Zinn	0·1322	365
Nickelin	0·4114	28

Wie bedeutend kleine Verunreinigungen die Leitungsfähigkeit der Metalle ändern können und selbst, wenn die Verunreinigung von gut leitenden Metallen herrührt, ist z. B. von MATTHIESSEN¹⁾ gezeigt worden. Nach ihm ist die Leitungsfähigkeit bezogen auf Silber = 100 von

chemisch reinem Gold	72·98
99·7 Gold + 0·3 Silber	66
99·4 Gold + 0·6 Silber	59

Ebenso nimmt die Leitungsfähigkeit des Kupfers von dem Werth 93·08 (Silber = 100) für chemisch reines Metall ab, z. B. auf den Werth 74·91, wenn es 0·05 % Kohle enthält.

Welche Verschiedenheiten im Leitungsvermögen durch Mangel an Homogenität sich zeigen können, lehren Versuche von KIRCHHOFF und HANSEMANN²⁾. Bei diesen wurden die Leitungsfähigkeiten der verschiedenen Abschnitte eines und desselben Stabes von 14 cm Länge gemessen und ergaben der Reihe nach folgende Zahlen (bei 15°) (in anderer Einheit)

Kupferstab 20·98·21·86·22·75·23·83·25·33·22·39·26·18·24·25.

Grösste Abweichung 25 %.

Zinnstab 9·501·8·876·8·943·9·036·8·574·8·760. Grösste Abweichung 9·7 %.

Eisenstab 6·841·6·829·6·236·6·510. Grösste Abweichung 8·8 %.

Zinkstab 14·43·14·54·14·74·14·72·12·02. Grösste Abweichung 3·7 %.

Bleistab 4·643·4·677·4·517·4·461·4·539. Grösste Abweichung 4·6 %.

3. Abhängigkeit der Leitungsfähigkeit reiner Metalle von der Temperatur.

Der Widerstand aller Metalle nimmt mit wachsender Temperatur zu, die Leitungsfähigkeit derselben für die Elektrizität nimmt also mit wachsender Temperatur ab. Die reinen Metalle sind von MATTHIESSEN und v. BOSE³⁾ darauf hin

¹⁾ MATTHIESSEN, POGG. Ann. 109, pag. 452. 1860; 110, pag. 222. 1860. S. auch JOHNSON, Beibl. 6, pag. 32. R. LENZ, Beibl. 8, pag. 39.

²⁾ KIRCHHOFF u. HANSEMANN, WIED. Ann. 13, pag. 415. 1881.

³⁾ MATTHIESSEN u. v. BOSE, POGG. Ann. 115, pag. 355. 1862.

untersucht worden. Sie bestimmten die Leitungsfähigkeit k der Metalle als Funktion der Temperatur und zwar im Intervall von 0° bis 100° . Sie stellten die Leitungsfähigkeit bei t^0 dar durch

$$k_t = k_0(1 - \alpha t + \beta t^2)$$

und fanden für α und β folgende Werthe

Metall	α	β
Silber hart	0·0038287	0·000009848
„ weich	0·0038287	
Kupfer hart	0·0036701	9009
„ weich	0·0036701	
Gold hart	0·0036745	8443
„ weich	0·0036745	
Zink	0·0037047	8274
Cadmium	0·0036871	7575
Zinn	0·0036029	6136
Blei	0·0038756	9146
Arsen	0·0038996	8879
Antimon	0·0039826	10364
Wismuth	0·0035216	5728
Thallium	0·0040264	8844
Eisen	0·0051182	12915
Kalium	0·004066	11668
Natrium	0·003294	3903

Aus diesen Zahlen ergibt sich, worauf zuerst ARNDTSEN¹⁾ aufmerksam machte, dass die Werthe von α für sämtliche Metalle sehr nahe bei einander liegen, nahezu gleich sind. CLAUSIUS²⁾, erinnerte daran, dass der Mittelwerth dieser Zahlen 0·00365 wäre, d. h. gleich den Ausdehnungscoefficienten der Gase. Wenn die Zunahme der Leitungsfähigkeit von Metallen eine allgemeine, nicht von der Substanz abhängige Grösse sei, so müsste sie mit der absoluten Temperatur in Beziehung stehen.

4. Leitungsfähigkeit bei höheren Temperaturen.

Diese einfachen Verhältnisse für die Zunahme des Widerstandes bei allen Metallen gelten nun nicht blos in dem Intervall von 0° bis 100° , sondern auch dann, wenn man zu viel höheren Temperaturen, beinahe bis zum Schmelzpunkt übergeht. Nach früheren, mehr qualitativen Versuchen von MÜLLER³⁾ hat BENOIST⁴⁾ derartige Messungen ausgeführt, in denen er die Drähte durch siedendes Wasser auf 100° , durch siedendes Quecksilber auf 360° , siedenden Schwefel auf 440° und siedendes Cadmium auf 860° erhitzte. Er giebt in der folgenden Tabelle zunächst die Leitungsfähigkeiten k seiner Metalle bei 0° (bezogen auf Silber = 100) und zugleich den Widerstand r eines Drahtes von 1 m Länge und 1 mm² Querschnitt in Ohm.

¹⁾ ARNDTSEN, POGG. Ann. 104, pag. 1. 1858.

²⁾ CLAUSIUS, POGG. Ann. 104, pag. 650. 1858 (Vergl. auch AUERBACH, WIED. Ann. 8, pag. 479. 1879.)

³⁾ MÜLLER, POGG. Ann. 104, pag. 176. 1858. Andere qualitative Versuche s. MACTAREANE, Proc. Ed. Soc. 8, pag. 629. 1875; WALTENHOFEN, Berl. Ber. pag. 83. 1874.

⁴⁾ BENOIST, Compt. rend. 76, pag. 342. 1873.

Name des Metalls	$K(Ag = 100)$	r in Ohm
Aluminium, weich	49.7	0.0309
Aluminiumbronze, weich . .	13.0	0.1189
Reines Blei	7.76	0.1985
Reines Cadmium, gehämmert	22.5	0.0685
Eisen, weich	12.7	0.1216
Reines Gold, weich	71	0.0217
Kupfer, weich	90	0.0171
Magnesium, gehämmert . . .	36.4	0.0423
Messing, weich	22.3	0.0691
Neusilber, weich	1.80	0.2654
Palladium, weich	11.1	0.1384
Platin, weich	9.77	0.1575
Quecksilber	1.61	0.9564
Silber, weich	100	0.0154
Silber, ($\frac{3}{4}$ weich)	80	0.0193
Stahl, weich	14.0	0.1099
Thallium	8.41	0.1831
Reines Zink, (weich bei 350°)	27.5	0.0565
Reines Zink, gehämmert . .	25.9	0.0594
Reines Zinn	13.3	0.1161

Die Aenderung des Widerstandes mit der Temperatur (bis zu 860°) ist durch die Formel

$$R_t = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$$

dargestellt, worin α und β folgende Werthe haben:

Name des Metalls	α	β
Aluminium	0.003876	0.000001320
Blei	954	1430
Cadmium	4264	1765
Eisen	4516	5828
Gold	3678	0426
Kupfer	3637	0587
Magnesium	3870	0863
Palladium	2787	0611
Platin	2454	0594
Quecksilber	0882	1140
Silber	3972	0687
Silber ($\frac{3}{4}$)	3522	0667
Stahl	4978	7351
Thallium	4125	3488
Zink	4192	1481
Zinn	4028	5826

Auch hierbei liegt also der Werth von α noch für alle Metalle innerhalb enger Grenzen.

C. W. SIEMENS¹⁾ hat die Aenderung des Widerstandes mit wachsender Temperatur von $t = 0$ bis $t =$ etwa 750°C auf die absolute Temperatur T bezogen und den Widerstand r durch folgende Formeln dargestellt

$$\text{Platin } r = 0.034369\sqrt{T} + 0.00216407 \cdot T - 0.2413$$

$$\text{Kupfer } r = 0.026577\sqrt{T} + 0.0031443 \cdot T - 0.22751$$

$$\text{Eisen } r = 0.072545\sqrt{T} + 0.0038133 \cdot T - 1.23971.$$

¹⁾ C. W. SIEMENS, Proc. Roy. Soc. 19, pag. 443. 1871.

Ein ganz besonderes Verhalten zeigt Eisen¹⁾. Der Temperaturcoefficient α beträgt bei ihm bei gewöhnlicher Temperatur 0.0048 und nimmt langsam zu bis auf 0.018 dicht unterhalb 855°. Bei dieser Temperatur ändert er sich plötzlich auf 0.0067. Dies ist nahezu dieselbe Temperatur, bei der die Magnetisirung des Eisens verschwindet. Aehnlich sollen sich einige Legirungen verhalten²⁾.

Ueber Nickel haben W. KOHLRAUSCH³⁾, KNOTT⁴⁾ und BATTELI⁵⁾ Untersuchungen angestellt ohne allgemeine Resultate.

5. Leitungsfähigkeit bei sehr tiefen Temperaturen.

Wenn die Leitungsfähigkeit mit steigender Temperatur proportional der absoluten Temperatur abnimmt, so ist zu erwarten, dass bei sehr tiefen Temperaturen die Leitungsfähigkeit der Metalle ausserordentlich stark zunimmt und in der Nähe des absoluten Nullpunktes unendlich gross wird. Versuche darüber sind an Kupfer von CAILLETET u. BOUTY⁶⁾ und von WROBLEWSKI⁷⁾ angestellt worden. WROBLEWSKI untersuchte die Leitungsfähigkeit des Kupfers bei den Temperaturen 100°, c. 20°, 0°, — 103° (Siedetemperatur des Aethylens bei 1 Atm. Druck), — 146° (kritische Temperatur des Stickstoffes), — 193° (Siedetemperatur des Stickstoffes), — 200 bis 202° (ungefähre Erstarrungstemperatur des Stickstoffes).

Es ergaben sich folgende Zahlen für die Leitungsfähigkeit k des Kupfers, bezogen auf diejenige bei 0° als Einheit, und für den Temperaturcoefficienten α . Letzterer ist aus zwei benachbarten Temperaturen berechnet und auf 0° bezogen. Es ist also $w_{\vartheta} - w_{\vartheta'} = w_0(\vartheta - \vartheta')$ gesetzt, wo ϑ und ϑ' zwei Temperaturen sind

ϑ	k	α
0	1	—
— 103	1.743	0.00414
— 146	2.657	0.004588
— 193	6.231	0.004592
— 200	8.729	0.006562

Die Leitungsfähigkeit wächst also noch rascher, als man nach dem Verhalten bei höheren Temperaturen vermuthen sollte, und würde schon oberhalb — 273° unendlich werden, wenn dies Wachsthum andauerte.

Auch CAILLETET und BOUTY fanden, dass die Temperaturcoefficienten bei niederen Temperaturen grösser werden. Es ergaben sich nämlich für das α der Formel

$$w = w_0(1 + \alpha t)$$

folgende Werthe, wenn t zwischen den Grenzen t_1 und t_2 lag:

Metall	t_1	t_2	α
Silber	29.79°	— 101.75	0.00385
Aluminium	27.7	— 90.57	0.00388
Magnesium	0	— 88.31	0.00390
Zinn	0	— 85.08	0.00424
Eisen	0	— 92.0	0.00490
Kupfer	0	— 58.22	0.00408
	— 63.5	— 101.30	0.00426
	— 113.08	— 122.82	0.00424

1) HOPKINSON, Proc. Roy. Soc. Lond. 45, pag. 457. 1889.

2) LE CHATELIER, Compt. rend. 111, pag. 454. 1890.

3) W. KOHLRAUSCH, WIED. Ann. 33, pag. 42. 1888.

4) KNOTT, Trans. Roy. Soc. Edinb. 33 (1), pag. 187. 1887.

5) BATTELI, ATTI DELLA R. Acad. di Torino. 22, pag. 169. 1888.

6) CAILLETET u. BOUTY, Compt. rend. 100, pag. 1188. 1885.

7) WROBLEWSKI, WIED. Ann. 26, pag. 27. 1885.

6. Einfluss von Strukturänderungen auf die Leitungsfähigkeit der Metalle.

Alle Strukturänderungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die Leitungsfähigkeit, bald im Sinne einer Zunahme, bald im Sinne einer Abnahme derselben¹⁾.

a) durch Compression wird die Leitungsfähigkeit verkleinert²⁾;

b) ebenso durch Dehnung wird die Leitungsfähigkeit verkleinert³⁾;

c) durch Torsion ändert sich der Widerstand und die Stromvertheilung in Metallen⁴⁾;

d) durch Ziehen, Wickeln wird die Leitungsfähigkeit verändert⁵⁾;

e) Härten, Ausglühen, Ablöschen vermindert in manchen Fällen und vermehrt in anderen die Leitungsfähigkeit bedeutend⁶⁾ (insbesondere bei Stahl auf das 2—3fache);

f) Gevulverte Metalle (auch Kohle, Metalloxyd etc.) leiten den Strom um so besser, je enger die Berührung zwischen den Theilchen ist⁷⁾. Ihre Leitungsfähigkeit wächst aber mit steigender Temperatur, wegen der besseren Berührung⁸⁾;

g) nach starkem Erwärmen ist die Leitungsfähigkeit der Metalle geändert⁹⁾;

h) Ausziehen und Zusammenlassen von Spiralen (aus Nickeldraht) ändert die Leitungsfähigkeit in cyklischer Weise¹⁰⁾.

7) Einfluss der Magnetisirung auf die Leitungsfähigkeit der Metalle.

Manche Metalle erfahren eine Aenderung ihres Leitungsvermögens, wenn sie in ein magnetisches Feld gebracht werden, und zwar nimmt bei Eisen und Nickel nach W. THOMSON¹¹⁾ der Widerstand in Richtung der magnetischen Kraftlinien zu, senkrecht dazu ab¹²⁾.

¹⁾ Ueber etwaige Beziehungen zur Elasticität s. Ascoli Mem. delle R. Ac. dei Lincei 4. 1887; 6, pag. 502.

²⁾ WARTMANN, Archiv. natur. sciences (4) pag. 12. 1859; CHWOLSON, Bull. d. St. Petersburg 11, pag. 353. 1880.

³⁾ MOUSSON, Neue Schweizer Zeitschr. 14, pag. 37. 1855; DE MARCHI, Beibl. 5, pag. 680; TOMLINSON, Proceed. Roy. Soc. 25, pag. 451. 1876; 26, pag. 401. 1877; Proc. R. S. 1881; Phil. Trans. 1883; 1, MAC GREGOR, Beibl. 1, pag. 292; MEIK u. MURRAY, ibidem. Pine. Proc. Amer. Acad. 11, pag. 303. 1876; GÖTZ u. KURZ, EXNER, Rep. 20, pag. 739. 1884; 21, pag. 87. 1885.

⁴⁾ W. THOMSON, Nat. 17, pag. 180. 1878; WITKOWSKI, Proc. Roy. Soc. Edinb. 1881.

⁵⁾ MOUSSON l. c., HOPPE, Phil. Mag. (5) 18, pag. 433. 1884.

⁶⁾ BARUS, WIED. Ann. 7, pag. 385. 1879; MATTHIESSEN, POGG. Ann. 115, pag. 353. 1862; W. SIEMENS, POGG. Ann. 110, pag. 18. 1860; BECQUEREL, Ann. chim. et phys. (3) 17, pag. 253. 1846; CHWOLSON, Beibl. 1, pag. 363. 1877.

⁷⁾ RIJSKE, Arch. Néerl. 14, pag. 1. 1879; AUERBACH, WIED. Ann. 28, pag. 604. 1886; s. a. CALZECCHI ONESTI, N. Cim. 16, pag. 58. 1884 und Diskussion.

⁸⁾ MEIDINGER, DINGL. J. 148, pag. 364. 1858; MAHIESSEN, POGG. Ann. 103, pag. 432. 1858; BEETZ, POGG. Ann. 111, pag. 619. 1860; DU MONCEL, Compt. rend. 81, pag. 766. 1875; 87, pag. 131. 1878.

⁹⁾ Ausser von BECQUEREL, SIEMENS u. MATTHIESSEN (l. c.) sind darüber Versuche angestellt von CHWOLSON, Bull. d. St. Petersburg 23, pag. 465. 1877; KALISCHER, Carl. Rep. 18, pag. 193. 1882; BERGMANN, WIED. Ann. 36, pag. 783. 1889.

¹⁰⁾ SCHUMANN, WIED. Ann. 38, pag. 256. 1889.

¹¹⁾ W. THOMSON, Math. and Phys. Papers, 2, pag. 307.

¹²⁾ Weitere Literatur darüber: ADAMS, Phil. Mag. (5) 1, pag. 153. 1876; DE LUCCHI, Atti del R. Ist. Ven. 8, pag. 17. 1882; BEETZ, POGG. Ann. 128, pag. 202. 1866; TOMLINSON, Proc. R. Soc. Lond. 33, pag. 276. 1882; Phil. Trans. 1883, pag. 1; RIGHI, Journal de Phys. (2) 3, pag. 355. 1884; HURION, Compt. rend. 98, pag. 1257. 1884; LEDUC, Compt. rend. 98, pag. 673. 1884 u. 102, pag. 358. 1886; ETTINGSHAUSEN u. NERNST, Wien Ber. 94, (2), pag. 560. 1886.

Aus den neuesten Versuchen von GOLDHAMMER¹⁾ sei hier folgendes angeführt. Die Metalle wurden in Form von Platten angewendet.

1) Wismuth. Der Widerstand nimmt im magnetischen Felde immer zu. Bezeichnet Δw die Widerstandsänderung im magnetischen Felde, w den Widerstand ohne Magnetismus, so variiert $\frac{100\Delta w}{w}$ zwischen 0.09 und 0.15.

Waren die Platten \parallel magnetischen Kraftlinien und die Stromrichtung \parallel Kraftlinien (Lage I)
 oder „ „ \perp „ „ „ „ „ \perp „ (Lage II),

so war $\frac{\Delta w}{w}$ gleich.

War dagegen die Platten \parallel magn. Kraftlinien und die Stromrichtung \perp Kraftlinien (Lage III),

so war $\frac{\Delta w}{w}$ 1.5 mal grösser.

2) Tellur. Der Widerstand nahm im magnetischen Felde immer zu, aber weniger als bei Wismuth.

Am grössten ist diese Zunahme in Lage I, dann folgt Lage II, dann III.

3) Antimon. Die Widerstandszunahme ist in den Lagen I, II, III, nahezu die gleiche.

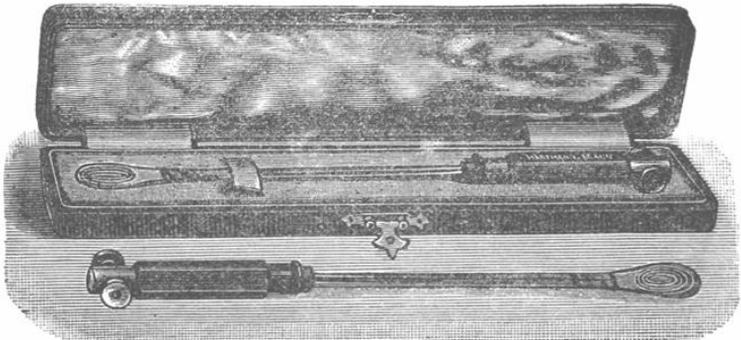
Anders als bei diesen drei diamagnetischen Metallen stellen sich die Verhältnisse bei den magnetischen.

4) Nickel. Der Widerstand nimmt in der Richtung der magnetischen Kraftlinie zu, senkrecht dazu ab. Die Abnahme ist im Allgemeinen 2—5 mal kleiner als die Zunahme.

5) Kobalt. Dieses verhält sich ganz so wie Nickel; nur ist die Zunahme des Widerstandes in der Richtung der Kraftlinien viel kleiner als bei Nickel. Die Abnahme senkrecht zu den Kraftlinien ist ungefähr ebenso gross wie bei Nickel.

6) Eisen. Die Wirkung ist sehr gering, aber von derselben Art wie bei Ni und Co, d. h. Zunahme \parallel Kraftlinien, Abnahme \perp Kraftlinien.

Diese Verhältnisse wurden bei Wismuth, wo die magnetische Einwirkung am stärksten ist, am meisten untersucht, zunächst von RIGHI, dann von ETTINGHAUSEN und NERNST, E. VAN AUBEL²⁾, LENARD³⁾ und anderen. LE-



(P. 77.)

NARD verwendete schmale Wismuthspiralen (Fig. 77), wie sie jetzt von HARTMANN und BRAUN verfertigt werden. Der Widerstand derselben war gegen gleichgerichtete

¹⁾ GOLDHAMMER, WIED. Ann. 31, pag. 360. 1887.

²⁾ E. v. AUBEL, Arch. de Gen. (3) 19, pag. 105. 1888; Phil. Mag. (5) 28, pag. 332. 1849.

³⁾ LENARD, WIED. Ann. 39, pag. 669. 1890.

Ströme ein anderer, wie gegen Wechselströme. Es ergaben sich, wenn der Wismuthdraht in ein Magnetfeld von verschiedener Stärke (in $C \cdot G \cdot S$ gemessen) gebracht wurde und senkrecht zu den Kraftlinien stand, folgende Werthe für die Widerstände (für gleichgerichtete Ströme).

Wismuthdraht senkrecht zu den Kraftlinien.

Magnetfeld $C \cdot G \cdot S$	Widerstand
0	1
2000	1·049
4000	1·126
6000	1·217
8000	1·316
10000	1·420
12000	1·527
14000	1·634
16000	1·740

War der Wismuthdraht parallel zu den Kraftlinien, so ergab sich

Wismuthdraht parallel zu den Kraftlinien.

Magnetfeld	Widerstand
0	1
7390	1·203
9880	1·233
10930	1·302

Der spezifische Widerstand des Wismuths ergab sich um so kleiner, je sorgfältiger gereinigt, und zwar elektrolytisch gereinigt das Wismuth war. Das reinste Wismuth zeigte gegen Quecksilber einen spezifischen Widerstand $w = 1 \cdot 152 - 1 \cdot 227$ bei 22° .

Die grossen Aenderungen des Widerstandes von Wismuthdraht machen es daher geeignet, zur Messung der Stärke von Magnetfeldern zu dienen, wofür obige Spiralen construiert sind.

Bei Antimon und Tellur erhielt LENARD viel geringere Aenderungen (\perp zu den Kraftlinien), nämlich für

Antimon		Tellur	
Magnetfeld ($C \cdot G \cdot S$)	Widerstand	Magnetfeld $C \cdot G \cdot S$	Widerstand
0	1	0	1
4210	1·005	11450	1·0016—1·003
6620	1·012		

Auffallender Weise ergaben sich die spezifischen Widerstände, sowie auch die Aenderungen derselben bei allen drei Substanzen anders für gleichgerichtete Ströme als für Wechselströme von Perioden, die noch mit dem Telephon erkannt werden konnten. Auf der Selbstinduktion beruhte dieser Unterschied angeblich nicht.

8) Leitungsfähigkeit flüssiger und erstarrender Metalle.

Die Leitungsfähigkeit des Quecksilbers bei 0° ist oben angegeben. Sie

ändert sich mit der Temperatur viel weniger als die der festen Metalle. Wenn das Quecksilber sehr rein ist, so ist die Leitungsfähigkeit desselben bei t° , wenn sie bei 0° gleich 100 gesetzt wird, nach¹⁾

MATTHIESSEN und v. BOSE	$k_\tau = 100 - 0.07443t + 0.00008263t^2$,
MÜLLER	$k_\tau = 100 - 0.118t$,
E. BECQUEREEL	$k_\tau = 100 - 0.104t$,
W. SIEMENS	$k_\tau = 100 - 0.0985t$,
SCHRÖDER VAN DER KOLK	$k_\tau = 100 - 0.086t$,
SIEMENS und HALSKE ²⁾	$k_\tau = 100 - 0.0889t$,
RAYLEIGH und SIDGWICH ³⁾	$k_\tau = 100 - 0.0869t$,
LENZ und RESTZOFF ⁴⁾	$k_\tau = 100 - 0.0884t$,
MASCART, NERVILLE und BENOIT ⁵⁾	$k_\tau = 100 - 0.0895t$,
STRECKER ⁶⁾	$k_\tau = 100 - 0.0907t$.

Für Temperaturen zwischen -30° und $+45^\circ$ fand C. L. WEBER⁷⁾

$$k_\tau = 100 - 0.0927t.$$

Lässt man das Quecksilber erstarren, so tritt nach C. L. WEBER beim Festwerden eine bedeutende Erhöhung der Leitungsfähigkeit statt. Die Leitungsfähigkeit ist für das feste Metall beim Schmelzpunkt etwa 4mal so gross, als für das flüssige, unmittelbar vor dem Erstarren⁸⁾.

Der Temperaturcoefficient des Widerstandes des festen Quecksilbers wird

$$0.004549,$$

ist also nicht mehr weit von dem Werth desselben für andere feste Metalle entfernt.

Geschmolzenes Kalium und Natrium wurden von MATTHIESSEN⁹⁾ untersucht.

So lange Natrium fest ist, also unterhalb des Schmelzpunktes 96° , war die Leitungsfähigkeit

$$\lambda = 32.54 - 0.1179t + 0.000127t^2.$$

Im flüssigen Zustand von 96.1° bis 120° war

$$\lambda = 23.38 - 0.07222t,$$

also auch hier ist der Temperaturcoefficient im flüssigen Zustand kleiner als der für feste Metalle.

Bei Kalium wurde ebenso gefunden:

Im festen Zustand ($0-46.8^\circ$) . . . $\lambda = 20.14 - 0.0819t + 0.000235t^2$,

im erweichenden Zustand ($46.8-56.8^\circ$) $\lambda = 668.26 - 40.402t + 0.83801t^2 - 0.0058155t^3$,

im flüssigen Zustand ($56.8-100^\circ$). $\lambda = 13.35 - 0.03393t$.

Beim Festwerden von geschmolzenen K und Na wird also, wie bei Hg, der Widerstand sprungweise geringer.

¹⁾ S. die Zusammenstellung in WIED. Elektr. I, pag. 528.

²⁾ SIEMENS u. HALSKE, Elektrotechn. Zeitschr. III, pag. 408. 1882.

³⁾ RAYLEIGH u. SIDGWICH, Phil. Trans. I, pag. 173. 1883.

⁴⁾ LENZ u. RESTZOFF, Etudes électrometrologiques 2. 1884.

⁵⁾ MASCART, NERVILLE u. BENOIT, Résumé d'expériences sur la détermination de l'ohm 1884.

⁶⁾ STRECKER, WIED. Ann. 25, pag. 475. 1885.

⁷⁾ C. L. WEBER, WIED. Ann. 25, pag. 249. 1885 (s. auch GRUMNACH, WIED. Ann. 35, pag. 764. 1888, u. Diskussion).

⁸⁾ Auch BOUTY u. CALLETET fanden (Compt. rend. 100, pag. 1188. 1885) eine Steigerung der Leitungsfähigkeit im Verhältniss von 1:4.087.

⁹⁾ MATTHIESSEN, POGG. Ann. 100, pag. 188. 1857.

Dasselbe findet bei Zinn¹⁾ und Blei²⁾ und Cadmium³⁾ statt. Dagegen wird umgekehrt (nach DE LA RIVE) beim Festwerden von geschmolzenem Wismuth und Antimon der Widerstand sprungweise höher. DE LA RIVE giebt folgende Zahlen für die Leitungsfähigkeit der Metalle bei verschiedenen Temperaturen t und beim Schmelzpunkt ϑ (sowohl vor dem Schmelzen als nachher). Die Leitungsfähigkeit des Quecksilbers (bei 21°) ist = 1 gesetzt.

	$t = 358^\circ$	$t = 440^\circ$	$t = 460^\circ$	ϑ	
				fest	flüssig
Zinn	1·88	—	1·42	4·4	2·0
Zink	—	2·58	—	5·2	2·6
Blei	—	—	0·771	1·9	1·0
Cadmium . . .	—	2·62	—	5·0	2·8
Wismuth . . .	0·70		0·596	0·43	0·73
Antimon . . .	—		0·783	0·59	0·84

Bezeichnet r_1 den Widerstand bei 358°, r_2 den bei 860°, so ist $\frac{r_2 - r_1}{r_1} =$

0·32 für Eisen,

0·24 „ Blei,

0·18 „ Wismuth.

II. Elektrische Leitungsfähigkeit von Legierungen.

1) Drei Gruppen von Legierungen. Da die Leitungsfähigkeit der Metalle sehr wesentlich von dem Grade ihrer Reinheit abhängt, da sie sehr bedeutend durch kleine Beimengungen von anderen Metallen verändert wird, so unternahmen MATTHIESSEN u. A. eine ausführliche Untersuchung des Verhaltens der Legierungen, da aus diesen die Gesetze über die Veränderung der Leitungsfähigkeit von Metallen durch Beimengungen sich ergeben konnten.

Aus den Untersuchungen der verschiedenen Beobachter, insbesondere von MATTHIESSEN und HOLZMANN⁴⁾ und MATTHIESSEN und VOIGT⁵⁾ ergab sich, dass in Bezug auf ihre Legierungen die Metalle sich in zwei Gruppen eintheilen lassen, welche verschiedene Eigenschaften haben.

I. Zur Gruppe I gehören:

Blei, Zinn, Cadmium, Zink.

Diese Gruppe hat folgende Eigenschaften:

1) Die Legierungen dieser Metalle untereinander haben das mittlere Leitungsvermögen der in ihnen gemischten Volumina der einzelnen Metalle.

2) Der Temperaturcoefficient des Widerstandes ist bei ihnen nahezu derselbe, wie für die reinen Metalle, nämlich im Mittel 0·002930.

II. Zur Gruppe II gehören:

Wismuth, Antimon, Platin, Palladium, Eisen, Aluminium, Natrium, Gold, Kupfer, Silber, Thallium.

Diese Gruppe hat folgende Eigenschaften:

1) Wird eines dieser Metalle mit einem Metall der Gruppe I legirt, auch wenn nur wenig von I in die Legierung eintritt, so ist die Leitungsfähigkeit der

1) W. SIEMENS, POGG. Ann. 113, pag. 99. 1861.

2) MATTHIESSEN, POGG. Ann. 116, pag. 379. 1862.

3) DE LA RIVE, Compt. rend. 57, pag. 698. 1863.

4) MATTHIESSEN u. HOLZMANN, POGG. Ann. 110, pag. 190. 1860.

5) MATTHIESSEN u. VOIGT, POGG. Ann. 116, pag. 369. 1862; 122, pag. 19. 1864.

Legirung bedeutend kleiner, als es nach dem Verhältniss der Volumina folgen würde.

2) Ein Metall der Gruppe I kann viel von der Gruppe II aufnehmen, ohne dass die Leitungsfähigkeit von I sich bedeutend ändert.

3) Legirungen aus zwei Metallen der Gruppe II untereinander haben gewöhnlich kleinere Leitungsvermögen, als den gemengten Volumina entsprechen.

4) Die Abnahme des Leitungsvermögens mit steigender Temperatur ist für die Legirungen dieser Gruppe geringer als für die reinen Metalle und die Gruppe I.¹⁾

Zu keiner dieser beiden Gruppen gehört streng genommen das Quecksilber, welches als eine besondere

III. Gruppe: Quecksilber, anzusehen ist.

Aus den Zahlenwerthen für die Leitungsfähigkeit der Legirungen gelang es in der That MATTHIESSEN und VOIGT in manchen Fällen die Leitungsfähigkeit reiner Metalle aus der von käuflichen, also verunreinigten abzuleiten¹⁾.

2) Amalgame.

Aus den oben angeführten beiden Klassen von Legirungen, welche MATTHIESSEN festgestellt hat, treten die Legirungen mit Quecksilber, die Amalgame, ganz heraus. Sie gehören, wie erwähnt, weder zur ersten noch zur zweiten Klasse. Die Leitungsfähigkeit verschiedener Amalgame hat C. L. WEBER²⁾ zunächst bei gewöhnlicher Temperatur, wo sie fest waren, dann aber, um alle Struktureinflüsse zu vermeiden, bei hoher Temperatur³⁾ (240—260°) untersucht, und zwar Legirungen von Hg mit Sn, Bi, Pb und Cd.

Es zeigte sich, dass die Leitungsfähigkeit der Legirungen nicht die mittlere Leitungsfähigkeit der Componenten ist. Der Widerstand nimmt stets rasch ab, sobald dem Quecksilber nur wenige Procente fremden Metalls zugesetzt werden. Bei weiterem Zusatz fremden Metalls nähert sich bei Sn und Cd der Widerstand der Legirung dem des fremden Metalls. Dagegen erreicht der Widerstand bei Bi- und Pb-Amalgamen zuerst ein Minimum, nimmt dann zu und erreicht ein Maximum, von dem aus es wieder sinkt.

Während bei den Legirungen der Klasse II von MATTHIESSEN die Leitungsfähigkeit des besser leitenden Metalls rasch abfällt durch Zusatz geringer Mengen eines anderen Metalls, nimmt bei Quecksilberlegirungen umgekehrt in diesem Falle die Leitungsfähigkeit des Quecksilbers zu⁴⁾.

Einige leicht schmelzbare Legirungen hat C. L. WEBER⁵⁾ in jüngster Zeit untersucht, nämlich ROSE'sches, LIPOWITZ'sches und WOOD'sches Metall.

(ROSE'sches Metall . . 48·90 Thle. Bi + 23·55 Sn + 27·54 Pb

LIPOWITZ'sches Metall . 49·98 „ Bi + 12·76 Sn + 26·88 Pb + 10·38 Cd

WOOD'sches Metall . . 55·74 „ Bi + 13·73 Sn + 13·73 Pb + 16·80 Cd.)

Im flüssigen Zustand ändern diese drei Legirungen ihren Widerstand mit abnehmender Temperatur nur wenig, so dass der Widerstand mit abnehmender Temperatur abnimmt und zwar beim ROSE'schen Metall um 0·0007, beim LIPOWITZ'schen um 0·005 seines Werthes pro Grad. Beim Erstarren zeigt sich, wie

¹⁾ MATTHIESSEN u. VOIGT, POGG. Ann. 122, pag. 68. 1864.

²⁾ C. L. WEBER, WIED. Ann. 23, pag. 474. 1884.

³⁾ C. L. WEBER, WIED. Ann. 31, pag. 243. 1887.

⁴⁾ Na- und K-Amalgame hat auch GRIMALDI, R. Acc. dei Lincei (4) 1887, pag. 32, untersucht, andere Amalgame BATTELLI, ebenda, pag. 19.

⁵⁾ C. L. WEBER, WIED. Ann. 27, pag. 145. 1886.

bei den reinen Metallen (s. o.), eine plötzliche starke Abnahme des Widerstandes, beim ROSE'schen Metall um 20%, beim LIPOWITZ'schen um 54%, während dieser Sprung z. B. beim Quecksilber 400% beträgt (s. o. pag. 277). In einer folgenden Arbeit untersuchte WEBER¹⁾ einige Legierungen von Zinn und Blei und von Zinn und Wismuth. Die Blei-Zinn-Legierungen bekommen beim Schmelzen eine rapide Widerstandsvermehrung von 50—60%, wie ja auch reines Blei und Zinn (s. o. pag. 278). Dagegen zeigten die Wismuth-Zinn-Legierungen beim Schmelzen eine Abnahme des Widerstandes, wie das reine Wismuth selbst²⁾ (s. o. pag. 278).

3) Praktisch angewendete Legierungen. Einige Metalllegierungen haben die Eigenschaft, dass ihr Temperaturcoefficient ein sehr geringer ist, so dass sie sich besonders zur Herstellung von mit der Temperatur unveränderlichen Widerständen eignen.

Platinoid³⁾ (Legierung von Neusilber mit 1—2% Wolframmetall):

Widerstand eines Centimeterwürfels Neusilber $20.935 \cdot 10^{-6}$ Ohm,

„ „ „ „ „ $31.9 \cdot 10^{-6}$ Ohm,

Temperaturcoefficient für Neusilber 0.044,

„ „ „ „ 0.02087.

Ueber Platin, Iridium, Nickelin, Platinsilber liegt eine sehr ausführliche Untersuchung von KLEMENCIC⁴⁾ vor.

Ueber einige neuere wichtige Metalllegierungen, die namentlich zur Herstellung von Widerstandsrollen gebraucht werden, machen FEUSSNER und LINDECK⁵⁾ folgende Angaben. Der spezifische Widerstand ist in Milliontel Ohm für den Centimeterwürfel angeführt. Die ersten Zahlen geben die Zusammensetzung.

Zusammensetzung	I Neusilber	II Nickelin		IV Rheo- tan	V Patentnickel		Mangan- kupfer	Nickel- mangan- kupfer
		Durchm. 1.0 mm	Durchm. 0.1 mm		Durchm. 0.6 mm	Durchm. 1.0 mm		
Cu	60.16	61.63	54.57	53.28	74.41	74.76	70	73
Zn	25.37	19.67	20.44	16.89	0.23	0.52	—	—
Sn	—	—	—	—	—	Spur	—	—
Ni	14.03	18.46	24.48	25.31	25.10	24.14	—	3
Fe	0.30	0.24	0.64	4.46	0.42	0.70	—	—
Co	Spur	0.19	—	—	Spur	Spur	—	—
Mn	„	0.18	0.27	0.37	0.13	0.17	30	24
Specifischer Widerstand	30.0	33.2	44.8	52.5	34.2	32.8	100.6	47.7
Temperatur- coefficient	0.00036	0.00030	0.00033	0.00041	0.00019	0.00021	0.00004	—0.00003

III. Beziehung der elektrischen Leitungsfähigkeit der Metalle und Legierungen zu ihrer Wärmeleitungsfähigkeit.

Die Leitungsfähigkeit der Metalle für Elektrizität ist nahezu proportional ihrer Leitungsfähigkeit für die Wärme. Dieser Satz wurde zuerst bewiesen von

1) C. L. WEBER, WIED. Ann. 34, pag. 576. 1888.

2) Weitere Untersuchungen über Legierungen s. RAINY u. CLAKSON, Proc. Roy. Soc. Edinb. 1885/86, pag. 686; BORUS, Sill. J. of Sc. (3) 36, pag. 427. 1888.

3) BOTTOMLEY, Proc. Roy. Soc. 38, pag. 340. 1885.

4) KLEMENCIC, Wien. Ber. 97 (IIa), pag. 838. 1888.

5) FEUSSNER u. LINDECK, Zeitschr. f. Instrumentenkunde 9, pag. 233. 1889.

WIEDEMANN und FRANZ¹⁾, nachdem er schon vorher von FORBES²⁾ ohne Beweis ausgesprochen war. Diese Beziehung zeigt sich z. B. in folgender Reihenfolge der Metalle und Legirungen, wie sie von WIEDEMANN und FRANZ und dann von WIEDEMANN³⁾ allein aufgestellt ist. Alle Zahlen für die elektrische Leitungsfähigkeit k und für die Wärmeleitungsfähigkeit λ sind auf Silber = 100 reducirt.

	Ag	Cu	Au	Zn	Messing	Sn	Fe	Pb	Pt	Bi
k	100	73·2	53·2	28·1	23·6	15·2	11·9	8·4	8·4	1·8
λ	100	79·3	58·5	27·3	21·5	17·0	13·0	10·7	10·3	1·9.
	8 Cu 1 Zn	6·5 Cu 1 Zn	4·7 Cu 1 Zn	1 Cu 1 Zn	3 Sn 1 Bi	1 Sn 1 Bi	1 Sn 3 Bi	Rose'sches Metall		
k	27·3	29·3	31·1	25·8	10·1	5·6	2·3	4·0		
λ	25·5	30·9	29·2	25·4	9·0	4·4	2·0	3·2.		

Diese Beziehung wurde dann von CHANDLER ROBERTS⁴⁾ für andere Legirungen, von F. E. NEUMANN⁵⁾ wieder für einige Metalle nach anderen Bestimmungsmethoden bewiesen. Von H. F. WEBER⁶⁾ wurde zwar die Richtigkeit dieser Beziehung bestritten, indess bisher ohne genaue Angaben seiner Versuchszahlen, dagegen haben die neueren Untersuchungen von KIRCHHOFF und HANSEMANN⁷⁾ sowie von L. LORENZ⁸⁾ die Uebereinstimmung der relativen Werthe von k und λ wieder festgestellt.

KIRCHHOFF und HANSEMANN fanden das Verhältniss $\frac{\lambda}{k}$ bei 15° für 4 Metalle nahezu gleich, bei Eisen aber abweichend. Ihre Zahlen sind folgende:

Metalle	λ_{15}	k_{15}	$\frac{\lambda_{15}}{k_{15}}$
Blei	7·93	4·569	1·74
Zinn	14·46	8·823	1·64
Zink	25·45	14·83	1·72
Kupfer	41·52	24·04	1·73
Eisen I	14·18	6·803	2·08
„ II	9·64	4·060	2·37
„ III	13·75	6·565	2·09

Die Ausnahmstellung des Eisens scheint mit seinem magnetischen Verhalten im Zusammenhang zu stehen. Ausführlichere Versuche hat LORENZ unternommen.

Er findet, dass sowohl bei 0° wie bei 100° $\frac{\lambda}{k}$ nahezu constant ist und zwar besonders für gut leitende Metalle, dass aber für die schlecht leitenden Metalle dieses Verhältniss mit abnehmendem Leitungsvermögen wächst. Dagegen zeigt sich bei allen Metallen (das Eisen ausgenommen) das Verhältniss $\frac{\lambda_{100}}{k_{100}} : \frac{\lambda_0}{k_0}$ constant und zwar nahezu gleich 1·367, so dass also

$$\frac{\lambda}{k} = T \cdot const$$

- 1) WIEDEMANN u. FRANZ, POGG. Ann. 89, pag. 498. 1853.
- 2) FORBES, Proc. R. Soc. Edinb. 1, pag. 133. 1860.
- 3) WIEDEMANN, POGG. Ann. 95, pag. 337. 1855; 108, pag. 405. 1859.
- 4) CHANDLER ROBERTS, Phil. Mag. (5) 8, pag. 551. 1879.
- 5) F. E. NEUMANN, Ann. chim. et phys. (3) 66, pag. 183. 1862.
- 6) H. F. WEBER, Züricher Vierteljahresschrift 25, pag. 184. 1880.
- 7) KIRCHHOFF u. HANSEMANN, WIED. Ann. 13, pag. 417. 1881.
- 8) L. LORENZ, WIED. Ann. 13, pag. 598. 1881.

ist, wo T die absolute Temperatur ist, eine Beziehung, die LORENZ schon früher theoretisch als wahrscheinlich erkannt hatte¹⁾. Die Zahlen von LORENZ sind folgende:

Metalle	λ_0	λ_{100}	$k_0 \cdot 10^5$	$k_{100} \cdot 10^5$	$\frac{\lambda_0}{k_0}$	$\frac{\lambda_{100}}{k_{100}} : \frac{\lambda_0}{k_0}$
Kupfer	0·7198	0·7226	45·74	33·82	1574	1·358
Magnesium	0·3760	0·3760	24·47	17·50	1537	1·398
Aluminium	0·3435	0·3619	22·46	17·31	1529	1·367
Messing (roth)	0·2460	0·2827	15·75	13·31	1562	1·360
Cadmium	0·2200	0·2045	14·41	10·18	1527	1·315
Messing (gelb)	0·2041	0·2540	12·62	11·00	1617	1·428
Eisen	0·1665	0·1627	10·37	6·628	1605	1·530
Zinn	0·1528	0·1423	9·346	6·524	1635	1·334
Blei	0·0836	0·0764	5·141	3·602	1627	1·304
Neusilber	0·0700	0·0887	3·766	3·632	1858	1·314
Antimon	0·0442	0·0396	2·199	1·522	2011	1·294
Wismuth	0·0177	0·0164	0·929	0·633	1900	1·372

Die Zahlen λ und k sind in absolutem Maasse angegeben.

Bei der Ausnahmstellung, die das Eisen sowohl bei KIRCHHOFF und HANSE-MANN, wie bei LORENZ zeigt, ist es von besonderem Interesse, dass F. KOHLRAUSCH²⁾ gezeigt hat, dass beim Stahl die Härtung gleich grosse Aenderungen im Wärmeleitungsvermögen, wie im elektrischen Leitungsvermögen hervorbringt. Es wurden zwei Stahlstäbe untersucht, von denen der eine gegläht und langsam erkaltet war, während der andere glasgehärtet war. Es ergab sich das Wärmeleitungsvermögen in absolutem Maass für

$$\begin{aligned} \text{harten Stahl } \lambda &= 0\cdot062 \left(\frac{\text{gr} \cdot \text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec}} \right) \\ \text{weichen } ,, \lambda &= 0\cdot111 \left(\frac{\text{gr} \cdot \text{cal}}{\text{cm} \cdot \text{sec}} \right) \end{aligned}$$

Die auf Quecksilber bezogenen Leitungsvermögen für Elektrizität waren

$$\begin{aligned} \text{harter Stahl } k &= 3\cdot3, \\ \text{weicher } ,, k &= 5\cdot5. \end{aligned}$$

Das Verhältniss $\frac{\lambda}{k}$ war also:

$$\begin{aligned} \text{harter Stahl } \frac{\lambda}{k} &= 0\cdot019, \\ \text{weicher } ,, \frac{\lambda}{k} &= 0\cdot020. \end{aligned}$$

Während also bei hartem und weichem Stahl k ungefähr um das doppelte verschieden ist, ist das Verhältniss von λ zu k angenähert dasselbe.

IV. Andere metallisch leitende Substanzen mit theilweise eigenthümlichem Verhalten. Uebergang zu den Elektrolyten.

1) Kohle. Die Kohle leitet in ihren verschiedenen Formen den Strom metallisch. Nur Diamant und reine Holzkohle sind Nichtleiter. Dagegen zeigen alle Kohlen eine Zunahme der Leitungsfähigkeit mit wachsender Temperatur³⁾.

¹⁾ L. LORENZ, POGG. Ann. 147, pag. 429. 1872. Neuere Arbeiten darüber s. POLONI, Beibl. 7, pag. 32; BERGET, J. de phys. (2) 9, pag. 135. 1890.

²⁾ F. KOHLRAUSCH, WIED. Ann. 33, pag. 678. 1888.

³⁾ Literatur darüber: MATTHIESSEN, POGG. Ann. 103, pag. 428. 1858; BEETZ, POGG. Ann. 111, pag. 619. 1860; 158, pag. 653. 1876; WIED. Ann. 12, pag. 73. 1881; SCHRADER, Götting. Ber. 1875, pag. 325 (AUERBACH, Götting. Ber. 1879, pag. 259 widerlegt); W. SIEMENS,

Der spezifische Widerstand bei 0° liegt nach MURAOKA bei verschiedenen Kohlenarten ($Hg = 1$ gesetzt) zwischen 12.2 und 55.15 (bei FABER'schen Bleistiften ist er 952). Die Abnahme des Widerstandes beträgt pro Grad zwischen $156 \cdot 10^{-6}$ und $739 \cdot 10^{-6}$ des ursprünglichen Werthes und wird bei steigender Temperatur meistens geringer.

2) Selen. Das Selen zeigt sehr eigenthümliche Verhältnisse seines Leitungsvermögens, je nach der Modification, in der es angewendet wird. Durch Beleuchtung wird nämlich, wie WILLOUGHBY SMITH¹⁾ zuerst nach einer Beobachtung vom Mai publicirte, die Leitungsfähigkeit des Selens bedeutend erhöht.

Da dies eine dem Selen besondere Eigenschaft ist, die zum Beispiel selbst dem ihm so nahe stehenden Tellur nicht zukommt, so untersuchte SIEMENS die Eigenschaften des Selens in elektrischer Beziehung genauer. SIEMENS²⁾ unterscheidet, je nach der Behandlung des Selens, drei Modificationen desselben:

Modification I: Krystallinisches Selen, welches aus amorphem Selen durch Erhitzung auf 100° erzeugt ist.

Modification II: Grosskörniges Selen, welches aus amorphem Selen durch 10stündige Erhitzung auf 200° erzeugt ist.

Modification III: Selen, welches aus geschmolzenem Selen durch langsame Abkühlung entstanden ist.

	Modification I	Modification II	Modification III
Leitungsfähigkeit	$\frac{1}{1.4}$ Billionen	$\frac{1}{4000}$ Millionen	$\frac{1}{80000}$ Millionen

Modification III leitet völlig metallisch, Modification II scheint als eine Lösung von metallischem in krystallinischem Selen aufgefasst werden zu müssen.

Die vielen einzelnen Eigenthümlichkeiten dieser Modificationen und anderer, welche durch rascheres oder langsames Abkühlen entstehen, sind in den Originalarbeiten nachzusehen³⁾.

Die Modification II ist es nun, welche besonders die Eigenschaft zeigt, durch Beleuchtung ihren Widerstand erheblich zu verringern⁴⁾. Doch sind auch die anderen krystallinischen Selenmodificationen leicht empfindlich.

Diffuses und direktes Licht verringern den Widerstand des Selens und zwar momentan⁵⁾. Diffuses Tageslicht verdoppelt schon die Leitungsfähigkeit, direktes Tageslicht kann sie auf mehr als das 10fache steigern. Von den verschiedenen Farben wirkt Roth am stärksten, wie z. B. folgende Tabelle von SIEMENS zeigt, in der die Ablenkungen eines Galvanometers angegeben sind, das den Strom

WIED. Ann. 10, pag. 560. 1880; BORGMANN, Beibl. 3, pag. 288. 1879; MURAOKA, WIED. Ann. 13, pag. 307. 1881.

¹⁾ WILLOUGHBY SMITH, SILLIMANN's Journ. 5, pag. 301. 1873.

²⁾ SIEMENS, POGG. Ann. 159, pag. 117. 1876; s. a. SIRKS u. BIDWELL, Beibl. 5, pag. 316.

³⁾ s. a. SABINE, Phil. Mag. (5), pag. 401. 1878; J. MOSER, Phil. Mag. (3) 12, pag. 212. 1881; ADAMS, Phil. Mag. (5) 1, pag. 155.

⁴⁾ s. ULJANIN, WIED. Ann. 34, pag. 247. 1888.

⁵⁾ Literatur darüber: SALE, Phil. Mag. (4) 47, pag. 216. 1874; W. SIEMENS, POGG. Ann. 156, pag. 334. 1875; WIED. Ann. 2, pag. 534. 1877; EARL of ROSSE, Phil. Mag. (4) 47, pag. 161. 1874; ADAMS, Proc. Roy. Soc. 23, pag. 535. 1875; 24, pag. 163. 1875; 25, pag. 113. 1876; Phil. Trans. 167, pag. 313. 1877; OBACH, Beibl. 5, pag. 139; FORSMANN, WIED. Ann. 2, pag. 513. 1877; BELL u. TAINTER, SILL. J. (3) 22, pag. 305. 1880; BELLATI u. ROMANESE, Beibl. 6, pag. 116. 1881; KALISCHER, WIED. Ann. 32, pag. 108. 1887 u. Diskussion.

durch das Selenpräparat maass, woraus die Grösse der Lichtwirkung sich berechnete:

	Dunkel	Violett	Blau	Grün	Gelb	Roth	Ultraroth	Dunkel
Ablenkung .	139	148	158	165	170	188	180	150
Lichtwirkung	0	9	19	26	39	49	41	11
Differenzen .		9	10	7	13	10	-8	-30

Zur Erklärung dieser Erscheinungen nimmt SIEMENS an, dass die Selenpräparate aus einer Mischung einer metallisch leitenden und einer krystallinen Modification bestehen, und dass die Wirkung der Lichtes in einer Verwandlung der krystallinen Oberfläche in eine metallische, also besser leitende, bestehe. Eine ähnliche Ansicht stellte HESEHUS¹⁾ auf. Er nimmt an, dass eine Modification des Selen vom Licht dissociirt werde und dann besser leite.

BIDWELL²⁾ meint, dass reines Selen gar nicht leite. Die Leitung entstehe erst dadurch, dass in Selen Verbindungen des Selen mit anderen verunreinigten Metallen vorhanden sei. Im amorphen Zustand seien diese leitenden Selenide von einander im Allgemeinen isolirt. Durch die Krystallisation des Selen aber könnten diese einzelnen Selenide leitende Brücken bilden. Daher könne der Widerstand abnehmen. ULJANIN (l. c.) nimmt an, dass die Selenpräparate aus mehreren Modificationen bestehen, worunter 1) eine lichtempfindliche Modification, die durch das Licht in eine andere übergeführt wurde, 2) elektrolytische Theilchen, welche durch das Licht wieder vereinigt werden. Dadurch soll auch das elektromotorische Verhalten des Selen bei Beleuchtung erklärt werden (s. d.).

3) Tellur zeigt beim ersten Erwärmen erst eine Zunahme der Leitungsfähigkeit bei 70–80°, dann eine Abnahme³⁾.

4) Phosphor ist im groben Zustand ein sehr schlechter Leiter. Sein Widerstand ist bei 15° 84000 Megohms. Nach dem Schmelzen ist er bei 25° nur 2:30 Megohms⁴⁾.

5) Schwefel. Oktaëdrischer Schwefel zeigt kein Leitungsvermögen bis etwa 80°. Bei erhöhter Temperatur nimmt der Widerstand rasch ab, beim Schmelzen auf den vierzigsten Theil. Prismatischer zeigt sehr grossen aber mit der Zeit abnehmenden Widerstand⁵⁾.

6) Schwefelmetalle leiten zum Theil metallisch, zum Theil elektrolytisch. In letzterem Falle erhöht sich ihre Leitungsfähigkeit mit steigender Temperatur⁶⁾. Zu diesen gehören Schwefelsilber, Ag₂S und halb Schwefelkupfer, Cu₂S⁷⁾. Der spezifische Widerstand s derselben bei verschiedenen Temperaturen ist folgender:

1) HESEHUS, CARL's Repert. 20, pag. 564. 1884.

2) BIDWELL, Phil. Mag. (5) 20, pag. 178. 1885.

3) MATTHIESSEN, POGG. Ann. 115, pag. 385. 1862; F. EXNER, Wien. Ber. (2) 73, pag. 285. 1876.

4) FOUSSEREAU, Compt. rend. 97, pag. 991. 1883; s. MATTHIESSEN, l. c.

5) FOUSSEREAU, l. c.

6) FARADAY, Exp. Res. § 432 ff.; KARSTEN, POGG. Ann. 71, pag. 239. 1847; RIESS, Reibungselectr. I, pag. 34.

7) HITTORFF, POGG. Ann. 84, pag. 1. 1851; W. KOHLRAUSCH, WIED. Ann. 17, pag. 149. 1882.

Cu ₂ S		Ag ₂ S	
Temperatur	$s \cdot 10^{-3}$	Temperatur	$s \cdot 10^{-3}$
0	7430	84.1	2270
10	4476	93	1610
51	790	113.2	600
67	447	129.2	506
85	264	148	284
103	148	158.2	170
107	62	165.2	108
113	54	170	58
136	34	180.5	3.71
152	25	195	3.25
184	14.5		
192	13		

Andere, wie Selensilber und Halbselenkupfer, leiten dagegen metallisch, ihr Widerstand wächst mit zunehmender Temperatur¹⁾.

Bei einigen Schwefelmetallen, sowie bei Psilomelan hat F. BRAUN²⁾ unipolare Leitung constatirt. Seine Beobachtungen lassen sich so zusammenfassen: Der Widerstand dieser Körper ist abweichend vom OHM'schen Gesetz, abhängig von der Richtung, Dauer und Intensität des constanten Stromes. Die Verschiedenheit des Widerstandes mit der Richtung und die mit der Intensität des Stromes scheinen im Zusammenhang zu stehen. Bei einer bestimmten Intensität geht ein Strom leichter in einer Richtung (I) durch den Körper, als in der entgegengesetzten (II). Bei einer höheren (oder geringeren) Intensität sind beide Richtungen gleichwerthig. Bei noch höherer (oder geringerer) Intensität leitet der Körper in Richtung II besser als in I. Ein constanter Strom verbessert beim Durchgang selbst die Leitungsfähigkeit.

Der Oeffnungsstrom eines Indicationsapparates geht ohne Ausnahme leichter durch diese Substanzen als der Schliessungsstrom. In vielen Fällen ist aber die Richtung der besseren Leitung für den Oeffnungsstrom die entgegengesetzte wie für den constanten Strom.

Die Abhängigkeit des Widerstandes solcher Körper von der Stromintensität, also von der angewendeten elektromotorischen Kraft, wird durch folgende quantitativen Versuche von BRAUN (WIED. Ann. 19) illustriert.

Die elektromotorische Kraft von 0.08 Bunsen, die den Strom durch Psilomelan sendete, wurde so compensirt, dass der Strom einen Ausschlag (nach abnehmenden Zahlen) von — 9 Skalentheilen am Galvanometer gab. Durch plötzliche Anwendung von 1 Bunsen hätte dieser Ausschlag auf $\frac{-9}{0.08} = -123$ Skalentheilen sich steigern müssen. Statt dessen ging der Spiegel nach der entgegengesetzten Seite über das Galvanometer hinaus. Ebenso war in folgenden Versuchen:

¹⁾ s. a. BUFF, LIEB. Ann. 102, pag. 283. 1857; DU MONCEL, Compt. rend. 81, pag. 514. 1874; S. P. THOMPSON, Lum. él. 22, pag. 621. 1886; BELLATI u. LUSSANA, Atti. R. Ist. Veneto (6) 6. 1888.

²⁾ BRAUN, POGG. Ann. 153, pag. 556. 1874; WIED. Ann. 1, pag. 163. 1877; 4, pag. 476. 1878; H. MEYER, Beibl. 5, pag. 199; DUFET, Compt. rend. 81, pag. 62. 1875; BRAUN, WIED. Ann. 19, pag. 340. 1883; H. MEYER, WIED. Ann. 19, pag. 70. 1883.

Ausschlag bei 0·08 Bunsen	Ausschlag bei 1 Bunsen		
	berechnet	beobachtet	Differenz
— 45 Sek.	— 630 Sek.	+ 366 Sek.	+ 996 Sek.
— 74 „	— 1036 „	+ 163 „	+ 1199 „
— 54 „	— 756 „	+ 325 „	+ 1080 „
— 89 „	— 1246 „	— 89 „	+ 1160 „

Der zu jeder Stromstärke gehörige Widerstand stellt sich schon in weniger als $\frac{1}{500}$ Sekunden her, konnte also nicht durch sekundäre Wärmewirkungen verursacht sein.

V. Elektrische Leitungsfähigkeit von metallischen Krystallen.

Ueber die Leitungsfähigkeit von metallisch leitenden Krystallen liegen noch wenig Angaben vor, MATTEUCCI¹⁾ hatte den Widerstand von Wismuth senkrecht zur Basis (0001) w_c und parallel der Basis w_a gemessen und gefunden

$$\frac{w_a}{w_c} = 1.6.$$

BÄCKSTRÖM²⁾ hat Stäbe aus Eisenglanz untersucht, die nach verschiedenen Richtungen geschnitten waren und gefunden, dass parallel der Hauptaxe und den beiden Nebenaxen die Widerstände sich wie

$$68.59 : 35.40 : 35.44$$

verhielten.

Bei verschiedenen Temperaturen ergab sich das Verhältniss der Widerstände w_c in der Hauptaxe und w_a parallel dazu zu³⁾

$t = 0^\circ$	17°	100°	236.7°
$\frac{w_c}{w_a} = 1.98$	1.96	1.81	1.55.

Die Widerstände nehmen mit wachsender Temperatur ab. Weitere Untersuchungen über elektrolytisch leitende Krystalle s. in dem Abschnitt »Leitungsvermögen elektrolytisch leitender Körper«.

GRAETZ

Elektrisches Leitungsvermögen von elektrolytisch leitenden Körpern.

A. Leitungsfähigkeit der Lösungen.

I. Allgemeines.

1) Vorbemerkung.

Die Lösungen von Salzen und Säuren in Wasser und anderen Flüssigkeiten leiten den elektrischen Strom verhältnissmässig gut, während Wasser und andere Lösungsmittel selbst sehr schlechte Leiter sind. Reines Wasser leitet den Strom sehr schlecht und um so schlechter, je reiner er ist. Durch sorgfältige Destillation in Platingefässen über übermangansaurem Kali, Aetzkali, saurem schwefel-

¹⁾ MATTEUCCI, Compt. rend. 40, pag. 541. 1855; 42, pag. 1133. 1856.

²⁾ BÄCKSTRÖM, Oefvers. k. Vet. Akad. Handlinger 1887, pag. 343.

³⁾ BÄCKSTRÖM, ebenda 1888, No. 8, pag. 533.