

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung = Bulletin technique / Administration des télégraphes et des téléphones suisses = Bollettino tecnico / Amministrazione dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Telegraphen- und Telephonverwaltung

Band: 6 (1928)

Heft: 6

Artikel: Hifswerte zur Berechnung von Freileitungen auf Festigkeit

Autor: Nather, Eugen

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-873765>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Technische Mitteilungen

Herausgegeben von der schweiz. Telegraphen- und Telephon-Verwaltung

Bulletin Technique

Publié par l'Administration des
Télégraphes et des Téléphones suisses



Bollettino Tecnico

Pubblicato dall' Amministrazione
dei Telegrafi e dei Telefoni svizzeri

Hilfswerte zur Berechnung von Freileitungen auf Festigkeit.

Von Ing. Dr. Eugen Nather, Wien.

Die graphische Durchhangsermittlung nach dem Singer-Verfahren ist, wenn man aus Genauigkeitsrücksichten Tafeln von möglichst grossem Maßstab benützen will, für zwei Fälle nicht ganz bequem.

Nämlich einerseits bei den kleinsten Spannweiten und Seilquerschnitten, und zwar insbesondere dann, wenn grössere Zusatzlasten, wie in Rauhreifgegenden, zu berücksichtigen sind. Andrerseits bei den grössten Spannweiten, und zwar auch hier besonders dann, wenn es sich um kleinere Leiterquerschnitte handelt und ausserdem auch noch grösseren Zusatzlasten Rechnung getragen werden muss.

Nehmen wir als Beispiel für den ersterwähnten Fall die folgenden Zahlenwerte: Spannweite $a = 30$ m, Nennquerschnitt des Kupferleiters $q_n = 10 \text{ mm}^2$ (Seil- \mathcal{D} $d = 4,4 \text{ mm}$), Zusatzlast entsprechend 13 mm Eiswandstärke plus 50 kg/m^2 Wind (im Sinne der Rauhreifvorschrift für die Kreuzungen österreichischer Fernmeldeleitungen); hiefür ist $z = \frac{\delta}{\delta} = \frac{123}{9} = 13,7$.¹⁾

Man kann für die kleinen Spannweiten um 10 und 20 m, wie sie sich bei Strassenkreuzungen vielfach ergeben, als Temperaturmaßstab Doppelzentimeter wählen (20 mm in der Tafel = 10^6 Temperaturunterschied, 20 mm der Tafel = 10 m Spannweite). In einer solchen Tafel entspricht der Spannweite $a = 30$ m ein Abstand = 60 mm, der aequivalenten Spannweite $za = 414$ m ein Abstand = 828 mm; man sieht, es ist schon nicht mehr bequem, einen Punkt der za = Geraden (vom Abstand 828 mm) herunterzuprojizieren auf den der Spannweite entsprechenden Abstand 60 mm; es erscheint hier schon zweckmässiger, diesen Teil der zeichnerischen Ermittlung auszuschalten und durch Rechnung zu

¹⁾ $\bar{\delta} = \text{Scheindichte (oder Raumeinheitsgesamtbelastung in g/m, mm}^2 \text{ bei erhöhter Eislast gemäss}$

$$\bar{\delta} = \sqrt{\left(\frac{q}{q} \delta + 573\right)^2 + \left(\frac{1060}{q}\right)^2},$$

wenn q den Istwert des Leiterquerschnitts ($10,18 \text{ mm}^2$) bedeutet, 573 das Eiswalzengewicht je m in Gramm, 1060 den horizontalen Winddruck je m in g. Im übrigen vgl. hinsichtlich Bezeichnungsweise Techn. Mitt. T. T. 1927, S. 81 u. ff., bzw. 1925, S. 81 u. ff.

ersetzen, vorausgesetzt, dass letztere auch hinlänglich einfach ausfällt.

Was die grossen Spannweiten anbelangt, so geht man hier in der Regel auch mit den Durchhängen höher hinauf; unter Umständen bis rund 10%, wenn für jeden Leiter eine eigene Mastreihe vorgesehen werden kann. Bei so hohen prozentualen Durchhängen fällt schon die eine Tafelldimension beträchtlich aus;²⁾ die bequeme Handhabung erfordert, dafür wenigstens die andere Dimension möglichst zu beschränken, d. h. eben den Bereich der Spannweiten „ a “ bzw. der äquivalenten Spannweiten „ za “; es erscheint wünschenswert, die Tafel in der Spannweitenrichtung unterteilen zu können.

Man kann dies auch und es lassen sich Zahlenreihen zusammenstellen, die es für viele Fälle (mit den gewöhnlichen σ_{\max} - und z -Werten) leicht machen, den Ausgangspunkt \bar{A} für Zusatzlast durch Rechnung auszumitteln (anstatt durch Herunterprojizieren).

Es gilt nämlich für den Abstand des Punktes A von der Temperaturzähllinie Z bekanntlich die Beziehung:³⁾

$$Z : \bar{A} = \left\{ \frac{\bar{\delta}^2}{24 (10^6 \bar{\delta})} \right\} \left(\frac{a}{\sigma} \right)^2 - \frac{\bar{\sigma}}{\bar{\delta} E} \dots \dots \dots \quad (1)$$

Stellt man die Werte $\left\{ \frac{\bar{\delta}^2}{24 (10^6 \bar{\delta})} \right\}$ für die gangbaren Leiterquerschnitte und jedes Material nach Tabelle 1 zusammen, die Werte $\left(\frac{a}{\sigma} \right)^2$ für die gewöhnlichen Spannweiten und Höchstbeanspruchungen (Tabelle 2) und dementsprechend die Werte $\frac{\bar{\sigma}}{\bar{\delta} E}$ (Tabelle 3), dann ist die Lage von \bar{A} auf der a -Geraden rasch bestimmbar; das Herunterloten wird dann entbehrlich und man kann die Tafel in Streifen von zweckmässiger Höhendifferenz zerlegen, nach-

²⁾ Selbst dann, wenn man Halbzentimeter als Maßstab für die Temperaturdifferenzen und Spannweiten nimmt.

³⁾ Vgl. Techn. Mitteil. T. T. 1927, S. 90, Fussnote 33.

dem die Breite durch den grössten φ -Wert von vornherein gegeben ist.⁴⁾

Als Zahlenbeispiel für den allgemeinen Fall, wo die Lage von \bar{A} aus Gl. (1) rechnerisch zu bestimmen ist (ohne die Tabellen 1 bis 3), soll eine Fernmeldeleitungskreuzung dienen, die im Zuge einer österreichischen 110,000-Volt-Leitung im Gebirgsgelände⁵⁾ ausgeführt worden ist.

Zahlenbeispiel:

Wagrecht gemessener Abstand der Stützpunkte $a = 215$ m
Höhenunterschied der Stützpunkte $h = 106$ m
Schiefer gemessener Abstand der Stützpunkte $l' = \sqrt{a^2 + h^2} = 239,7$ m

Nennquerschnitt des Bronzeseiles ($\mathcal{D} d = 14$ mm) $q_n = 120$ mm²
Istquerschnitt des Bronzeseiles $q = 117$ mm²

Höchstbeanspruchung des Bronzeseiles am oberen Aufhängepunkt O' $\sigma_{\max} = 14$ kg/mm²

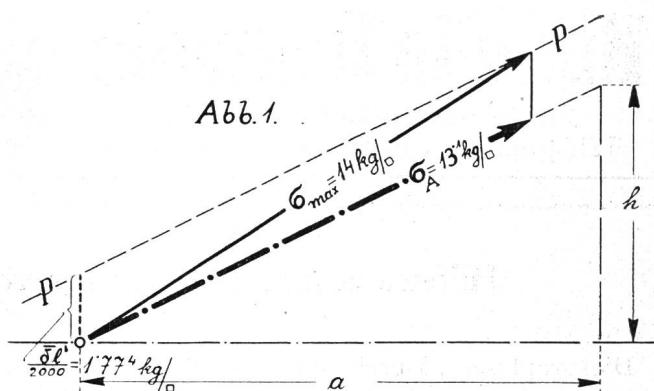
Höchstbeanspruchung des Bronzeseiles in Feldmitte (nach Seileck Abb. 1) $\sigma_A = 13,1$ kg/mm²

⁴⁾ Bei der Ermittlung von Punkt A kommt als Aneisungstemperatur \bar{t} in Betracht: $\bar{t} = 0$ für Schweizer Gebiet, $\bar{t} = -5^\circ C$ für Deutschland und Oesterreich. Der Schweizer Wert für Zusatzlasttemperatur $\bar{t} = 0$ empfiehlt sich durch Einfachheit und Uebersichtlichkeit vor jedem anderen; insbesondere beim Gebrauch von Durchhangstafeln wie derjenigen von Singer und von Truxa. Eine Einigung auf allgemeine Verwendung des Wertes $\bar{t} = 0^\circ$ würde sich sehr empfehlen, denn er leistet praktisch doch wohl dasselbe wie der Wert $\bar{t} = -5^\circ$, der beim Gebrauch von Durchhangstafeln nur als störend empfunden wird.

⁵⁾ Am Semmeringpass in rund 1000 m Seehöhe.

⁶⁾ Die Seilgewichtsbestimmung nach Abb. 1 vernachlässigt den Einfluss des Durchhanges auf den Spannungsanstieg ganz so, wie dies praktisch üblich ist bei der Berechnung von Wagrechtspannfeldern (vgl. Techn. Mitteil. T. T. 1927, S. 90, Fussnote 29, erster Absatz). Zum Teil wird diese Ungenauigkeit dadurch kompensiert (bzw. fallweise überkompensiert), dass statt

Elastizitätsmodul des Bronzeseiles $E = 10,000$ kg/mm²
Wärmedehnungszahl des Bronzeseiles $\vartheta = 17 \cdot 10^{-6}$
Spezifisches Gewicht des Bronzeseiles (ohne Zusatzlast) $\delta = 9$ g/cm³



Gewicht (je m Länge und mm² Querschnitt des Seiles) einschl. Zusatzlast (180 \sqrt{d}) $\delta = 14,8$ g/cm³
Wirkliches Aneisungsverhältnis $z = \frac{\delta}{\delta} = 1,644$ g/cm³
Länge einer Abspannkette (Doppelkette) $l_K = 1,5$ m
Gewicht einer Abspannkette (Doppelkette) ohne Zusatzlast $G_K = 96$ kg
Gewicht einer Abspannkette (Doppelkette) einschl. Zusatzlast $G_K = 104$ kg

der Seilsehnenlänge ($O'U'$ in Abb. 6) der grössere Wert $O U$ (Stützpunktverbindungslinie) eingeführt wird.

In besonderen Fällen wird es notwendig, insbesondere dem Einfluss des Durchhanges Rechnung zu tragen. Genauen Einblick in die damit zusammenhängenden Verhältnisse gibt die Abhandlung von G. Schmidt in E. T. Z. 1928, Nr. 6, S. 208 u. ff. (vgl. a. O. speziell die Formel S. 212, Zeile 21).

Tabelle 1 (Cu, Bronze).

Seildurchmesser d mm	Seilquerschnitt q mm ²	$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\delta}^2 \\ 24 (10^6 \vartheta) \end{array} \right\}$ [bei Normaleis (180 \sqrt{d})]	$\left\{ \begin{array}{l} \bar{\delta}^2 \\ 24 (10^6 \vartheta) \end{array} \right\}$ [bei Rauhreif d. i. 13 mm Eis + 50 kg/m ² Wind]
4,4	10	5,209	37,08
4,1	10	4,919	36,48
5,5	16	3,089	17,25
5,1	16	2,935	16,84
6,3	25	1,867	8,359
7,5	35	1,331	4,832
9	50	0,9706	2,883
9	50	1, —	3,003
10,5	70	0,7853	2,005
12,5	95	0,579	1,331

Tabelle 3
(Cu, Bronze)

$\bar{\sigma}$ kg/mm ²	$\bar{\sigma}$ ϑE
23	135,7
22	129,4
21	123,5
20	117,6
19	111,8
16	94,12
14	82,35
12	70,54
8	47,06

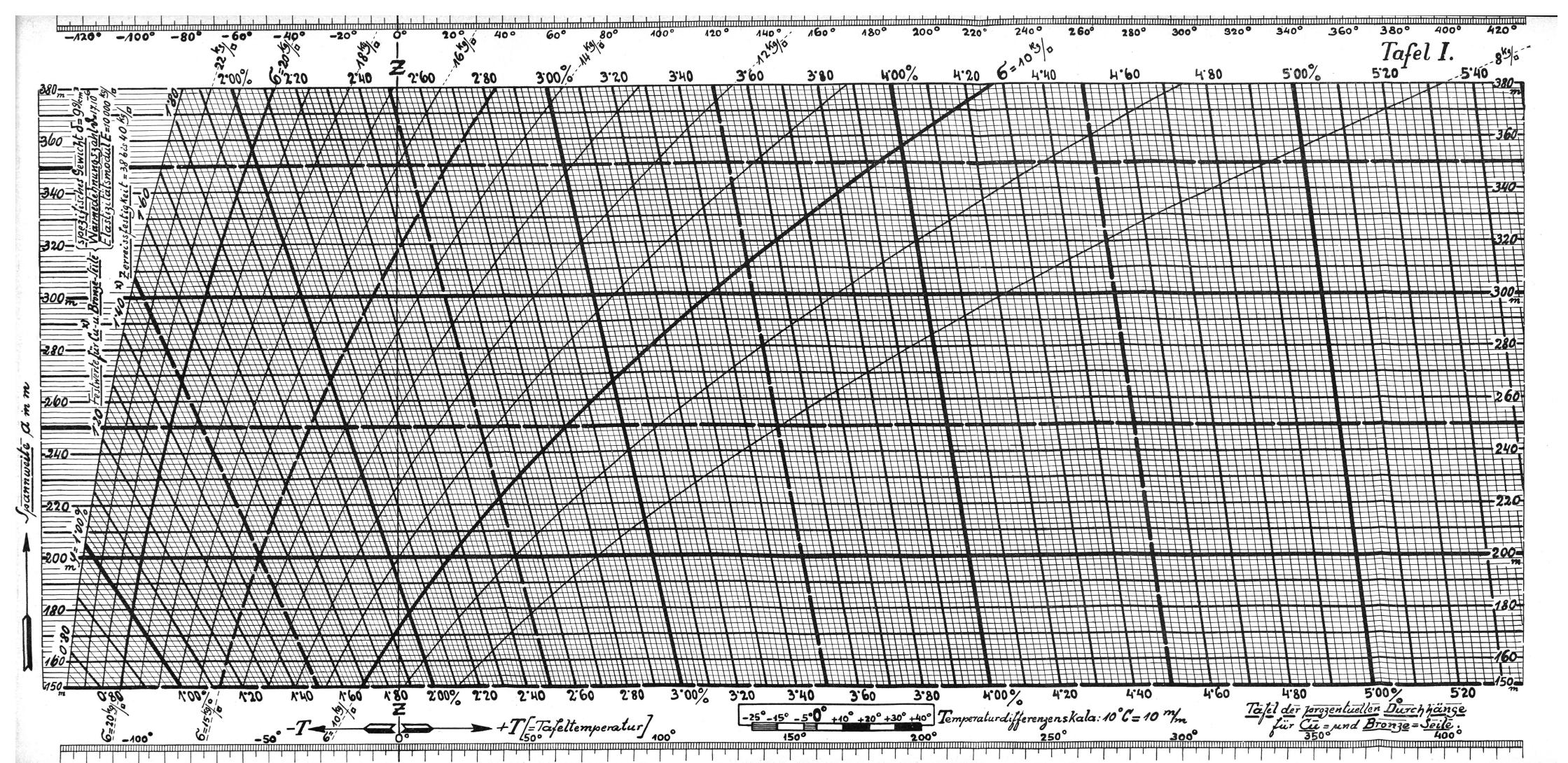


Tabelle 2. (Spannweiten 10 bis 50 m.)

a	$\binom{a}{23}^2$	$\binom{a}{22}^2$	$\binom{a}{21}^2$	$\binom{a}{20}^2$	$\binom{a}{19}^2$	$\binom{a}{16}^2$	$\binom{a}{14}^2$	$\binom{a}{12}^2$	$\binom{a}{8}^2$
10	0,1890	0,2066	0,2268	0,2500	0,2770	0,3906	0,5102	0,6945	1,563
1	.2287	.2500	.2744	.3025	.3353	.4727	.6174	.8403	.891
2	.2722	.2975	.3265	.3600	.3989	.5625	.7347	1,000	2,250
3	.3195	.3492	.3832	.4225	.4681	.6602	.8623	.174	.640
4	.3705	.4050	.4445	.4900	.5430	.7656	1,000	.361	3,063
15	0,4253	0,4649	0,5102	0,5625	0,6233	0,8789	1,148	1,563	3,516
6	.4839	.5289	.5805	.6400	.7091	1,000	.306	.778	4,000
7	.5463	.5971	.6553	.7225	.8006	.129	.475	2,007	.516
8	.6125	.6694	.7347	.8100	.8975	.266	.653	.250	5,063
9	.6824	.7459	.8186	.9025	1,000	.410	.842	.507	.641
20	0,7562	0,8265	0,9070	1,000	1,108	1,563	2,041	2,778	6,250
1	.8336	.9111	1,000	1,102	.222	.723	.250	3,062	.890
2	.9149	1,000	.098	.210	.341	.891	.469	.361	7,563
3	1,000	.093	.200	.323	.465	2,066	.699	.674	8,266
4	.089	.190	.306	.441	.595	.250	.939	4,000	9,000
25	1,182	1,291	1,417	1,562	1,730	2,440	3,187	4,338	.761
6	.278	.397	.533	.690	.873	.641	.449	.694	10,56
7	.378	.506	.653	.822	2,019	.848	.719	5,062	11,39
8	.482	.620	.778	.960	.172	3,063	4,000	.444	12,25
9	.590	.738	.907	2,102	.330	.285	.291	.840	13,14
30	1,701	1,860	2,041	2,250	2,493	3,516	4,592	6,250	14,06
1	.817	.986	.179	.403	.662	.754	.903	.674	15,02
2	.936	2,116	.322	.560	.837	4,000	5,224	7,111	16,00
3	2,059	.250	.469	.722	3,017	.253	.556	.563	17,02
4	.185	.388	.621	.890	.202	.516	.898	8,028	18,06
35	.316	.531	2,778	3,063	3,393	4,785	6,250	8,507	19,14
6	.450	.678	.939	.240	.590	5,063	.612	9,000	20,25
7	.588	.829	3,104	.423	.792	.348	.985	.507	21,39
8	.730	.983	.274	.610	4,000	.641	7,367	10,03	22,56
9	.875	3,143	.449	.802	.213	.941	.760	.56	23,77
40	3,025	3,306	3,628	4,000	4,432	6,250	8,163	11,11	25,00
1	.178	.473	.812	.202	.656	.566	.577	.67	26,27
2	.335	.645	4,000	.410	.886	.891	9,000	12,25	27,56
3	.495	.820	.193	.622	5,122	7,223	.434	.84	28,89
4	.660	4,000	.390	.840	.363	.563	.878	13,44	30,25
45	3,828	4,183	4,592	5,063	5,609	7,910	10,33	14,06	31,64
6	4,000	.372	.798	.290	.861	8,266	.79	.69	33,06
7	.176	.564	5,009	.522	6,119	.629	11,27	15,34	34,51
8	.356	.760	.224	.760	.382	9,000	.76	16,00	36,00
9	.539	.961	.444	6,002	.651	.379	12,25	.67	37,52
50	4,726	5,165	5,669	6,250	6,925	9,766	12,76	17,36	39,06

Tabelle 2. (Spannweiten 50 bis 100 m.)

a	$\left(\frac{a}{23}\right)^2$	$\left(\frac{a}{22}\right)^2$	$\left(\frac{a}{21}\right)^2$	$\left(\frac{a}{20}\right)^2$	$\left(\frac{a}{19}\right)^2$	$\left(\frac{a}{16}\right)^2$	$\left(\frac{a}{14}\right)^2$	$\left(\frac{a}{12}\right)^2$	$\left(\frac{a}{8}\right)^2$
50	4,726	5,165	5,669	6,250	6,925	9,766	12,76	17,36	39,06
1	,917	,374	,898	,503	7,205	10,16	13,27	18,06	40,64
2	5,112	,587	6,132	,760	,491	,56	,80	,78	42,25
3	,310	,804	,370	7,023	,782	,97	14,33	19,51	43,89
4	,513	6,025	,613	,290	8,078	11,39	,88	20,25	45,56
55	5,719	6,250	6,860	7,563	8,380	11,82	15,43	21,01	47,27
6	,928	,480	7,111	,840	,687	12,26	16,00	,78	49,00
7	6,142	,713	,368	8,123	9,00	,69	,58	22,56	50,77
8	,359	,951	,628	,410	,319	13,14	17,16	23,36	52,56
9	,581	7,192	,894	,703	,643	,60	,76	24,17	54,39
60	6,805	7,438	8,163	9,000	9,972	14,06	18,37	25,00	56,25
1	7,034	,688	,438	,303	10,31	,54	,98	,84	58,14
2	,267	,942	,717	,610	,65	15,02	19,61	26,69	60,06
3	,503	8,200	9,000	,923	11,00	,50	20,25	27,56	62,02
4	,743	,463	,288	10,24	,35	16,00	,90	28,44	64,00
65	7,990	8,729	9,581	10,56	11,70	16,50	21,56	29,34	66,00
6	8,234	9,000	,880	,89	12,15	17,02	22,23	30,25	68,06
7	,486	,273	10,18	11,22	,44	,54	,90	31,17	70,14
8	,741	,554	,49	,56	,81	18,06	23,59	32,11	72,25
9	9,000	,837	,80	,90	13,19	,60	24,29	33,06	74,39
70	9,262	10,12	11,11	12,25	13,57	19,14	25,00	34,03	76,56
1	,529	,42	,43	,60	,96	,69	,72	35,01	78,77
2	,800	,71	,76	,96	14,36	20,25	26,45	36,00	81,00
3	10,07	11,01	12,08	13,32	,76	,82	27,19	37,01	83,27
4	,24	,31	,42	,69	15,17	21,39	,94	38,03	85,56
75	10,63	11,62	12,76	14,06	15,58	21,97	28,70	39,06	87,89
6	,92	,93	13,10	,44	16,00	22,56	29,47	40,11	90,25
7	11,21	12,25	,44	,82	,42	23,16	30,25	41,17	92,64
8	,50	,57	,80	15,21	,85	,77	31,04	42,25	95,06
9	,80	,90	14,15	,60	17,29	24,38	,84	43,34	97,52
80	12,10	13,22	14,51	16,00	17,73	25,00	32,65	44,45	100,00
1	,40	,56	,88	,40	18,18	,63	33,48	45,56	102,5
2	,71	,89	15,25	,81	,63	26,27	34,31	46,70	105,1
3	13,02	14,23	,62	17,22	19,08	,91	35,15	47,84	107,6
4	,34	,58	16,00	,64	,55	27,56	36,00	49,00	110,3
85	13,66	14,93	16,38	18,06	20,01	28,22	36,86	50,17	112,9
6	,98	15,28	,77	,49	,49	,89	37,74	51,36	115,6
7	14,31	,64	17,16	,92	,97	29,57	38,62	52,56	118,3
8	,64	16,00	,56	19,36	21,45	30,25	39,51	53,78	121,0
9	,97	,37	,96	,80	,94	,94	40,41	55,01	123,8
90	15,31	16,74	18,37	20,25	22,44	31,64	41,33	56,25	126,6
1	,61	17,11	,78	,70	,95	32,35	42,25	57,51	129,4
2	16,00	,48	19,19	21,16	23,45	33,06	43,18	58,71	132,3
3	,35	,87	,61	,62	,96	,78	44,13	60,06	135,1
4	,70	18,26	20,04	22,09	24,48	34,52	45,08	61,36	138,1
95	17,06	18,65	20,47	22,56	25,00	35,35	46,05	62,67	141,0
6	,42	19,04	,90	23,04	25,53	36,00	47,02	64,00	144,0
7	,79	,44	21,34	,52	26,06	36,75	48,01	65,34	147,0
8	18,16	,84	,78	24,01	,60	37,52	49,00	66,70	150,1
9	,53	20,25	22,23	,50	27,15	38,29	50,01	68,06	153,1
100	18,90	20,66	22,68	25,00	27,70	39,06	51,02	69,45	156,3

Tabelle 2. (Spannweiten 100 bis 150 m.)

a	$\left(\frac{a}{23}\right)^2$	$\left(\frac{a}{22}\right)^2$	$\left(\frac{a}{21}\right)^2$	$\left(\frac{a}{20}\right)^2$	$\left(\frac{a}{19}\right)^2$	$\left(\frac{a}{16}\right)^2$	$\left(\frac{a}{14}\right)^2$	$\left(\frac{a}{12}\right)^2$	$\left(\frac{a}{8}\right)^2$
100	18,90	20,66	22,68	25,00	27,70	39,06	51,02	69,45	156,3
1	19,29	21,09	23,14	,51	28,27	,86	52,07	70,87	159,5
2	,68	,51	,60	26,02	,84	40,66	53,11	72,29	162,7
3	20,06	,93	24,07	,54	29,40	41,46	54,16	73,71	165,9
4	,45	22,36	,54	27,05	,87	42,26	55,20	75,14	169,1
5	20,84	22,78	25,00	27,56	30,54	43,07	56,25	76,56	172,3
6	21,25	23,22	,49	28,10	31,14	,91	57,35	78,05	175,6
7	,65	,67	,98	,64	,74	44,75	58,44	79,55	179,0
8	22,06	24,11	26,46	29,17	32,35	45,59	59,54	81,04	182,3
9	,46	,56	,95	,71	,95	46,43	60,64	82,54	185,7
110	22,87	25,00	27,44	30,25	33,53	47,27	61,74	84,03	189,1
1	23,30	,47	,95	,89	34,15	48,14	62,88	85,59	192,6
2	,72	,93	28,46	31,53	,77	49,02	64,03	87,15	196,1
3	24,15	26,40	,97	32,18	35,39	,90	65,18	88,72	199,6
4	,57	,86	29,48	,82	36,01	50,78	66,33	90,28	203,1
5	25,00	27,33	29,99	33,46	36,64	51,66	67,48	91,84	206,7
6	,44	,81	30,52	,97	37,29	52,58	68,67	93,47	210,3
7	,89	28,30	31,05	34,48	,94	53,50	69,87	95,10	214,0
8	26,33	,78	,59	,98	38,59	54,41	71,07	96,74	217,7
9	,78	29,27	32,12	35,49	39,24	55,33	72,27	98,37	221,3
120	27,22	29,75	32,65	36,00	39,89	56,25	73,47	100,00	225,0
1	,68	30,26	33,21	,71	40,57	57,21	74,72	101,7	228,8
2	28,15	,76	,76	37,41	41,25	58,16	75,96	103,4	232,7
3	,61	31,27	34,32	38,12	,92	59,12	77,21	105,1	236,5
4	29,08	,77	,87	,82	42,60	60,08	78,45	106,8	240,3
5	29,54	32,28	35,43	39,53	43,28	61,04	79,70	108,5	244,2
6	30,02	,81	36,01	40,07	,99	62,03	81,00	110,3	248,1
7	,50	33,34	,59	,62	44,69	63,02	82,31	112,1	252,1
8	,99	,86	37,16	41,16	45,40	64,02	83,62	113,8	256,1
9	31,47	34,39	,74	,71	46,10	65,01	84,92	115,6	260,1
130	31,95	34,92	38,32	42,25	46,81	66,02	86,23	117,4	264,0
1	32,45	35,47	,92	43,02	47,55	67,05	87,58	119,2	268,2
2	,95	36,01	39,52	,79	48,28	68,09	88,93	121,1	272,4
3	33,45	,56	40,13	44,57	49,02	69,42	90,28	122,9	276,5
4	,97	37,10	,73	45,34	,75	70,16	91,63	124,7	280,7
5	34,45	37,65	41,33	46,11	50,49	71,19	92,99	126,6	284,8
6	,97	38,22	,95	,69	51,25	72,26	94,39	128,5	289,1
7	35,49	,79	42,58	47,27	52,01	73,34	95,79	130,4	293,4
8	36,01	39,36	43,20	,84	,77	74,41	97,19	132,3	297,7
9	,53	,93	,82	48,42	53,53	75,49	98,60	134,2	302,0
140	37,05	40,50	44,45	49,00	54,30	76,56	100,00	136,1	306,3
1	,59	41,08	45,09	,71	55,08	77,67	101,5	138,1	310,7
2	38,13	,67	,74	50,42	,87	78,79	102,9	140,1	315,2
3	,67	42,26	46,38	51,14	56,66	79,90	104,4	142,1	319,6
4	39,21	,85	47,03	,85	57,45	81,02	105,8	144,1	324,1
5	39,75	43,44	47,68	52,56	58,24	82,13	107,3	146,1	328,5
6	40,30	44,05	48,34	53,30	59,05	83,28	108,8	148,1	333,1
7	,86	,66	49,01	54,04	,88	84,43	110,3	150,2	337,7
8	41,42	45,27	,68	,80	60,69	85,59	111,8	152,2	342,3
9	,97	,88	50,35	55,51	61,51	86,74	113,3	154,2	346,9
150	42,53	46,49	51,02	56,25	62,33	87,89	114,8	156,3	351,6

Tabelle 2. (Spannweiten 150 bis 200 m.)

a	$\left(\frac{a}{23}\right)^2$	$\left(\frac{a}{22}\right)^2$	$\left(\frac{a}{21}\right)^2$	$\left(\frac{a}{20}\right)^2$	$\left(\frac{a}{19}\right)^2$	$\left(\frac{a}{16}\right)^2$	$\left(\frac{a}{14}\right)^2$	$\left(\frac{a}{12}\right)^2$	$\left(\frac{a}{8}\right)^2$
150	42,53	46,49	51,02	56,25	62,33	87,89	114,8	156,3	351,6
1	43,11	47,12	,71	57,01	63,17	89,08	116,4	158,4	354,6
2	,68	,75	52,40	,78	64,02	90,27	117,9	160,5	357,7
3	44,26	48,38	53,10	58,54	,86	91,47	119,5	162,6	360,7
4	,84	49,01	,79	59,30	65,71	92,66	121,0	164,7	363,8
55	45,42	49,64	54,48	60,06	66,55	93,85	122,6	166,8	366,9
6	46,01	50,29	55,19	,85	67,42	95,08	124,2	169,0	373,5
7	,61	,94	56,30	61,64	68,30	96,31	125,8	171,2	380,1
8	47,20	51,59	,62	62,43	69,17	97,54	127,4	173,4	386,7
9	,80	52,24	57,34	63,21	70,04	98,77	129,0	175,6	393,4
160	48,39	52,89	58,05	64,00	70,91	100,0	130,6	177,8	400,0
1	49,01	53,56	,79	,81	71,81	101,3	132,3	180,0	405,1
2	,62	54,24	59,52	65,63	72,71	102,5	133,9	182,3	410,2
3	50,24	,91	60,16	66,44	73,61	103,8	135,6	184,6	415,2
4	,85	55,58	61,00	67,25	74,51	105,1	137,3	186,8	420,3
65	51,47	56,25	61,74	68,06	75,42	106,4	138,9	189,1	425,4
6	52,10	,94	62,50	,90	76,34	107,7	140,6	191,4	430,6
7	,73	57,63	63,25	69,73	77,07	109,0	142,3	193,7	435,9
8	53,36	58,33	64,01	70,57	78,20	110,3	144,0	196,0	441,1
9	54,00	59,02	,77	71,41	79,13	111,6	145,7	198,4	446,3
170	54,63	59,71	65,53	72,25	80,06	112,9	147,5	200,7	451,6
1	55,28	60,42	66,32	73,11	81,01	114,2	149,2	203,1	457,0
2	,93	61,14	67,10	,98	,97	115,6	151,0	205,5	463,3
3	56,59	,85	,88	74,84	82,92	116,9	152,7	207,9	467,7
4	57,24	62,56	68,66	75,70	83,88	118,3	154,5	210,3	473,1
75	57,89	63,28	69,45	76,56	84,83	119,6	156,3	212,7	478,5
6	58,56	64,01	70,25	77,45	85,82	121,0	158,1	215,1	484,1
7	59,23	,74	71,06	78,34	86,82	122,4	159,9	217,6	489,6
8	,91	65,47	,86	79,23	87,78	123,8	161,7	220,1	495,2
9	60,58	66,21	72,67	80,11	88,77	125,2	163,5	222,5	500,7
180	61,25	66,94	73,47	81,00	89,75	126,6	165,3	225,0	506,3
1	,94	67,70	74,29	,91	90,76	128,0	167,2	227,5	512,0
2	62,63	68,45	75,12	82,83	91,77	129,4	169,0	230,1	517,7
3	63,32	69,20	,94	83,74	92,78	130,8	170,9	232,6	523,4
4	64,01	,96	76,77	84,65	93,80	132,3	172,7	235,1	529,1
85	64,70	70,71	77,61	85,56	94,81	133,7	174,6	237,7	534,8
6	65,41	71,49	78,46	86,50	96,05	135,2	176,5	239,3	540,6
7	66,12	72,26	79,31	87,44	97,28	136,6	178,4	241,9	546,5
8	,82	73,04	80,16	88,38	98,52	138,1	180,4	244,5	552,3
9	67,53	,81	81,01	89,31	99,76	139,5	182,3	247,1	558,2
190	68,24	74,59	81,86	90,25	100,0	141,0	184,2	250,7	564,1
1	,97	75,38	82,73	91,21	101,1	142,5	186,2	253,4	570,1
2	69,70	76,18	83,61	92,17	102,1	144,0	188,1	256,0	576,1
3	70,42	,97	84,48	93,14	103,2	145,5	190,1	258,7	582,1
4	71,15	77,77	85,35	94,10	104,3	147,0	192,0	261,4	588,1
95	71,88	78,56	86,23	95,06	105,3	148,5	194,0	264,1	594,1
6	72,63	79,38	87,12	96,05	106,4	150,1	196,0	266,8	600,3
7	73,37	80,20	88,02	97,04	107,5	151,6	198,0	269,5	606,5
8	74,12	81,01	88,91	98,02	108,6	153,2	200,0	272,3	612,7
9	,87	81,83	89,81	99,01	109,7	154,7	202,1	275,0	618,8
200	75,62	82,65	90,70	100,0	110,8	156,3	204,1	277,8	625,0

Kritische Spannweite

$$a_{kr} < \sigma_A \sqrt{24 (10^6 \vartheta) \frac{t - t_{\min.}}{\bar{\delta}^2 - \delta^2}} =$$

$$\sigma_A \sqrt{24 (10^6 \vartheta) \frac{-5 - (-25)}{\bar{\delta}^2 - \delta^2}} = 101 \text{ m}^7$$

zufolge $a > 101 > a_{kr}$ ist Ausgangszustand: -5^0 + Zusatzlast;
d. h. $\sigma_A = \bar{\sigma} = 13,1 \text{ kg/mm}^2$

Die allgemeine Zustandsgleichung ist:⁸⁾

Die allgemeine Zustandsgleichung ist:⁸⁾

$$\frac{E}{2400} \left(\frac{a}{100} \right)^2 \left[\frac{\bar{\delta}^2 + C}{\sigma^2} - \frac{\bar{\delta}^2 + \bar{C}}{\bar{\sigma}^2} \right] = \vartheta E(t - \bar{t}) + (\sigma - \bar{\sigma})$$

worin bedeutet:

$$C = \frac{l_K G_K}{q \left(\frac{l'}{100} \right)^2} \left[1,2 \delta + \frac{800 G_K}{q l'} \right] = 2,9$$

$$\bar{C} = \frac{l_K \bar{G}_K}{q \left(\frac{l'}{100} \right)^2} \left[1,2 \bar{\delta} + \frac{800 \bar{G}_K}{q l'} \right] = 4,81$$

$$v = \frac{\sqrt{\delta^2 + C}}{\delta} = 1,018$$

$$\bar{\delta}_R = \sqrt{\bar{\delta}^2 + \bar{C}} = 14,7 \text{ g/cm}^3$$

$$g_B \equiv vg \equiv 1.918 \cdot 215 \text{ m} \equiv 219 \text{ m}$$

Die Zustandsgleichung lässt sich auch schreiben:

$$\frac{E}{2400} \left(\frac{a_R}{100} \right)^2 \left[\frac{\dot{\sigma}^2}{\sigma^2} - \frac{\dot{\sigma}^2_R}{\sigma^2_R} \right] = \vartheta E (t - \bar{t}) + (\sigma - \bar{\sigma})$$

Das heisst: Unser ansteigendes Spannfeld (an Abspannketten) lässt sich hinsichtlich Spannungsänderung ebenso rechnen wie ein gedachtes Wagrechtspannfeld (an Stützisolatoren), dessen Mastabstand (d. i. Rechnungsspannweite a_R) um 1,8 % grösser ist als a und welches auf eine Rechnungsscheindichte (\bar{c}_R) von $14,7 \text{ g/cm}^3$ aneist. Das rechnungsmässige

Aneisungsverhältnis ist $x_R = \frac{\bar{\delta}_R}{\bar{\delta}} = 1,633$.

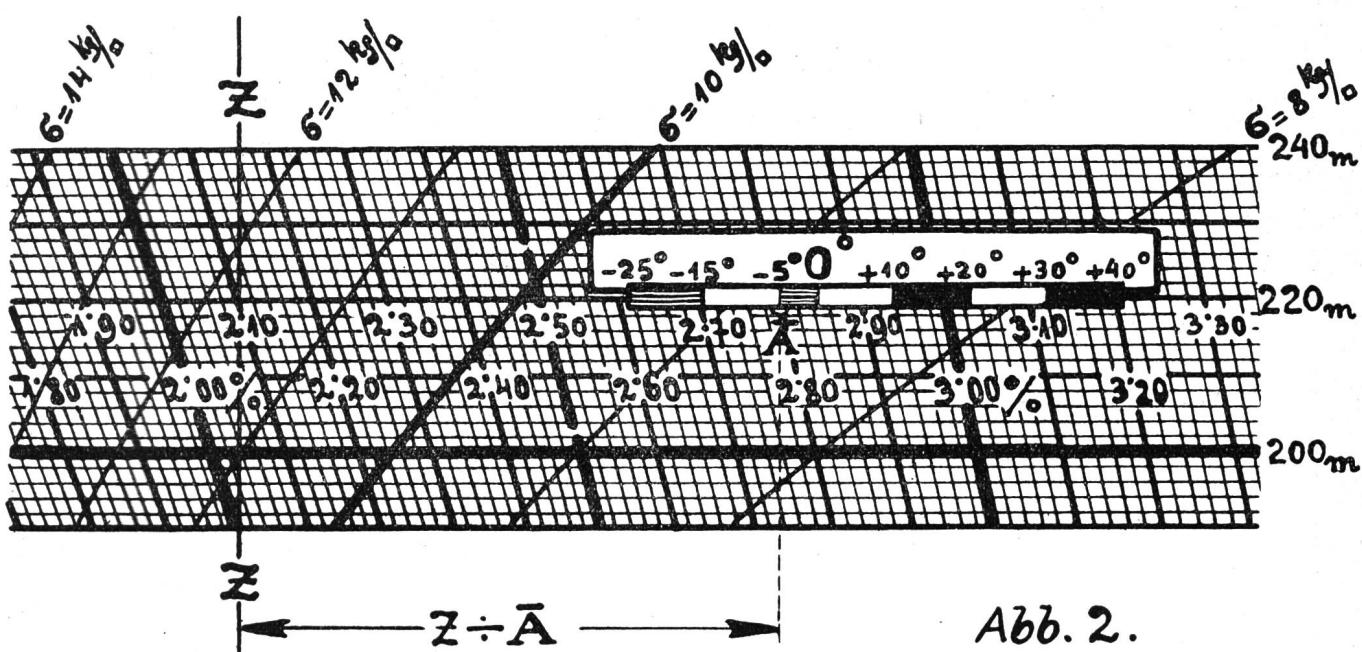


Abb. 2.

I. Durchhang im Feldmittel.

Der Ausgangspunkt A (in der Durchhangstafel) soll nicht graphisch (durch Herunterprojizieren des Schnittpunktes der Parabel $\sigma = 13,1$ mit der Geraden $x_R a_R = 258$ m) bestimmt werden, sondern rechnerisch aus:

$$Z : \bar{A} = \left[\frac{\bar{\sigma}^2}{24 \cdot (10^6 \vartheta)} \right] \left(\frac{a_R}{\bar{\sigma}} \right)^2 - \frac{\bar{\sigma}}{\vartheta E} = \\ = \frac{14,7^2}{408} \left(\frac{219}{13,1} \right)^2 - \frac{13,1}{0,17} = 71^0$$

Für eine im Zentimetermaßstab gezeichnete Tafel beträgt also die Distanz von $Z \div A = 71$ mm, wie in Abb. 2 (an einem Ausschnitt aus Tafel I) dargestellt ist.

$$a\text{Kr} < \sigma_A \sqrt{\frac{480 (10^6 \vartheta)}{\vartheta^2}} < 80 \text{ m}.$$

⁸⁾ Vgl. Techn. Mitt. T. T. 1927, S. 89, Gleichung (I).

$$\bar{F}_s'' = \frac{(l' - 2l_k)^2}{\bar{\sigma}''} \cdot \frac{\bar{\delta}}{8000}$$

$$\bar{\sigma}'' = \frac{(l' - 2l_k)^2}{\bar{F}_s''} \cdot \frac{\bar{\delta}}{8000} = \frac{236,7^2}{9,51} \cdot \frac{14,8}{8000} = 10,95 \text{ kg/mm}^2$$

damit folgt:

$$\begin{aligned} \bar{F}_k'' &= \frac{l_k}{2} \left(\frac{\bar{G}_k}{q} + \frac{l' \bar{\delta}}{1000} \right) \frac{1}{\bar{\sigma}''} = \\ &= \frac{1,5}{2} \left(\frac{104}{117} + \frac{239,7 \cdot 14,8}{1000} \right) \cdot \frac{1}{10,95} = 0,304 \text{ m} \end{aligned}$$

Gesamtdurchhang (nach Kettenriss):

$$\bar{F}'' = \bar{F}_s'' + \bar{F}_k'' = 9,81 \text{ m.}$$

II. Durchhang ausser Feldmitte.

Hier genügt in der Regel die Anwendung rein geometrischer Beziehungen, um rasch und einfach zu praktisch brauchbaren Durchhangswerten zu gelangen. Ueber die einfachen geometrischen Verhältnisse, die dabei in Betracht kommen, sollen einige allgemeine Bemerkungen vorausgeschickt werden, die sich auf ansteigende Spannfelder mit Stützisolatoren beziehen. Die Ergebnisse lassen sich dann auf ansteigende Felder mit Abspannketten übertragen.

a) *Vorbemerkung: Allgemeines, betreffend ansteigende Felder ohne Isolatorenketten.*

Bei den heute üblichen relativ stark angespannten Leitern kann man ansteigende Felder genau so behandeln wie Wagrechtspannfelder, d. h. man kann die gemeine Kettenlinie mit praktisch ausreichender Annäherung ersetzen durch eine Parabel.

Denkt man sich aus einer Parabel ein Stück herausgeschnitten, wie es einem geneigten Spannfeld entspricht ($O' M U'$ in Abb. 5), dann lassen sich die Durchhänge ausserhalb des Feldmittels (Y') bekanntlich aus folgender Ueberlegung bestimmen:

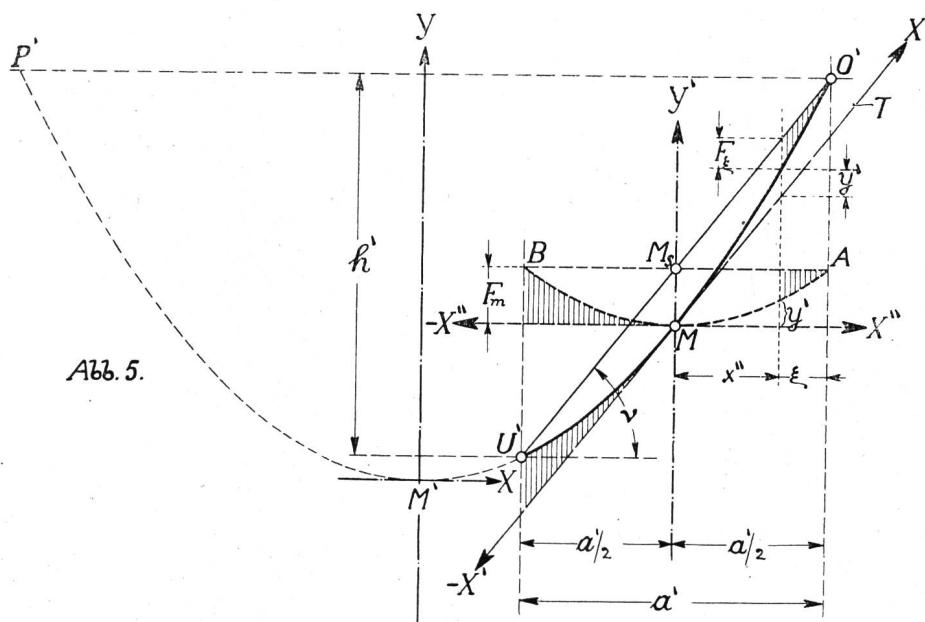
F_m ($= M M_s$) sei der Durchhang des Spannfeldes in Feldmitte (gemessen in Richtung des freifallenden Lotes), F_ξ sei der (in gleicher Richtung gemessene)

Durchhang für den beliebigen Abstand ξ (von der Lotrechten durch Stützpunkt O').

Wir denken uns die Parabelschnitte (Stützpunktverbindungssehne $O' U'$) in Abb. 5 parallel zu sich selbst verschoben, und zwar solange, bis die Parabel nicht mehr davon geschnitten, sondern nur mehr berührt wird; der entsprechende Berührungsrandpunkt (M) dieser Tangente (T) liegt im Feldmittel, welches durch M_s in Richtung des freifallenden Lotes geführt ist.¹⁶⁾ M kann man als neuen Koordinatenmittelpunkt wählen und Tangente T bzw. Feldmittel Y' kann man als schiefwinklige Systemachsen (konjugierte Achsen) annehmen; werden die schief (in der Tangentensteigung v gegen die Wagrechte) gemessenen Abszissen der Parabel mit x' , die in der Richtung Y' gemessenen Parabelordinaten mit y' bezeichnet, dann besteht zwischen x' und y' eine ganz analoge Beziehung wie für die auf X , Y bezogenen Parabelkoordinaten x , y : gilt für das rechtwinklige Koordinatensystem X , Y die Gleichung $y = \frac{x^2}{2p}$, so gilt für das schiefwinklige Koordinatensystem X' , Y' die analog gebaute Beziehung:

¹⁶⁾ Vgl. „Hütte“, 18. Aufl. von 1902, Bd. I, S. 98 sowie S. 99, Abb. 16.

Anmerkung. In anderem Zusammenhange (wo es hauptsächlich auf den Feldmitteldurchhang bzw. das Pfeilverhältnis des Seilbogens ankommt) wird bei derartigen Ermittlungen vorteilhaft mit einer anderen Lage des Berührungsrandpunktes gerechnet (nämlich in einer bei M_s errichteten Normalen auf $O' U'$); letztere Näherungsannahme ersetzt den unsymmetrischen Kettenlinienabschnitt, der bei ansteigenden Feldern tatsächlich vorliegt, durch einen symmetrischen Parabelabschnitt (d. i. die in Abb. 7 strichiert eingetragene Parabel). In Abb. 5 dagegen wird der Kettenlinienabschnitt ersetzt durch einen unsymmetrischen Parabelabschnitt (d. i. die in Abb. 7 stark ausgezogene Parabel). Dem unsymmetrischen Kettenlinienabschnitt wird sich der unsymmetrische Parabelabschnitt im allgemeinen etwas enger anschliessen, wobei jedoch bemerkt werden muss, dass für die Zwecke der Praxis beide Näherungsannahmen genau genug sind, so dass für einen bestimmten Fall der Untersuchung jede Annahme dann zulässig ist, wenn sie zu Formeln führt, die in Herleitung und Verwendung genügend einfach sind (vgl. S. 250, Fussnote 18).



$$y' = \frac{x'^2}{2 \left(\frac{p}{\cos^2 \nu} \right)} = \frac{x'^2}{2p}$$

Statt dessen können wir auch schreiben:

$$y' = \frac{(x' \cos \nu)^2}{2p}$$

oder wenn $x' \cos \nu$, d. h. die Projektion von x' auf die Horizontalachse X'' mit x'' bezeichnet wird:

$$y' = \frac{x''^2}{2p}$$

Demnach müssen wir eine *Parabel* vom ursprünglichen Parameter p erhalten, wenn wir die Ordinaten y' nicht von der schiefen Tangente (Achse $X', -X'$) aus abtragen, sondern von der Horizontalen $X'', -X''$ als Achse. Also lässt sich F_ξ des schießen Spannfeldes genau so bestimmen wie der Durchhang ($F_m - y'$) des gedachten parabolischen Wagrechspannfeldes AMB .

Für letztere Hilfsparabel gilt:

$$F_m = \frac{\left(\frac{a'}{2}\right)^2}{2p} \quad \dots \dots \dots (6)$$

und

$$y' = \frac{x''^2}{2p} \quad \text{oder}$$

$$F_m - F_\xi = \frac{\left(\frac{a'}{2} - \xi\right)^2}{2p} \quad \dots \dots \dots (7)$$

Gleich (7) dividiert durch Gleich. (6) ergibt:

$$F_\xi = 4 F_m \left(\frac{\xi}{a'} \right) \left[1 - \left(\frac{\xi}{a'} \right) \right] \quad \dots \dots \dots (8)$$

Sind für ein ansteigendes Spannfeld drei Größen bekannt, nämlich a' , h' , F_m , dann sind die 3 Punkte U' , O' , M festgelegt, d. h. es ist eindeutig jene Parabel bestimmt, durch welche die gemeine Kettenlinie ausreichend ersetzt werden darf.

b) Anwendung auf ansteigende Felder mit Isolatorenketten.

Bei ansteigenden Spannfeldern an Abspannketten wird es nur eine ausnahmsweise niedrig gewählte Seilbeanspruchung nötig machen, dass man die wahren Kettenneigungen $\nu_{oo'}$ am oberen, $\nu_{uu'}$ am unteren Seilendpunkt (Abb. 6) ermittelt und hieraus die genauen Werte a' und h' bestimmt. Für die Mehrzahl der praktischen Fälle wird es ausreichen, folgende Näherungen anzunehmen: die inneren Kettenendpunkte O' , U' stehen von der Stützpunktverbindungsgeraden $O U$ gleich weit ab und jede Kette ist ungefähr um ν gegen die Wagrechte geneigt. Dann ist $a' = a - 2l_k \cos \nu$ und $h' = h - 2l_k \sin \nu$.¹⁷⁾ Für die getroffenen Näherungen ist:

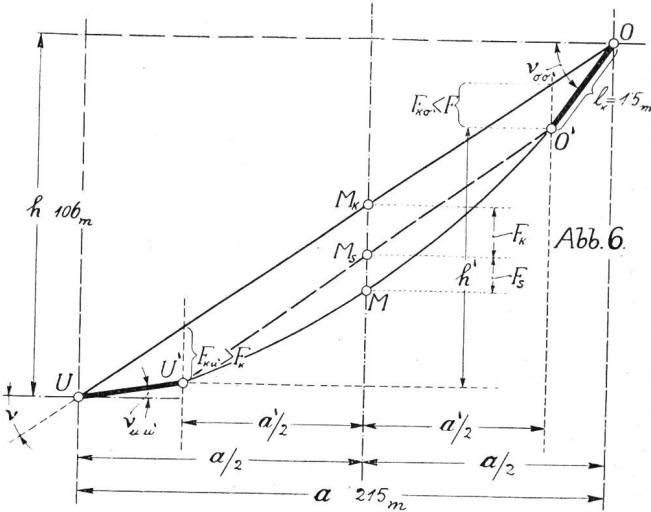
$$\cos \nu = \frac{a'}{\sqrt{a'^2 + h'^2}} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + h^2}} = \frac{215}{\sqrt{215^2 + 106^2}} = 0,897$$

¹⁷⁾ Abb. 6 stellt die wirklichen Verhältnisse bloss angenähert dar; tatsächlich werden das Mittel von $O U$ und jenes von $O' U'$ nicht ganz miteinander übereinstimmen; praktisch aber wird man beide Mittel als zusammenfallend (in M_s M) annehmen dürfen. (Statt $F_{ko'} < F$ sollte es in Abb. 6 richtig heißen: $F_{ko'} < F_k$).

und damit:

$$a' = 215 - 2 \cdot 1,5 \cdot 0,897 = 213,3 \text{ m}$$

$$h' = 106 - 2 \cdot 1,5 \cdot 0,44 = 104,7 \text{ m}$$

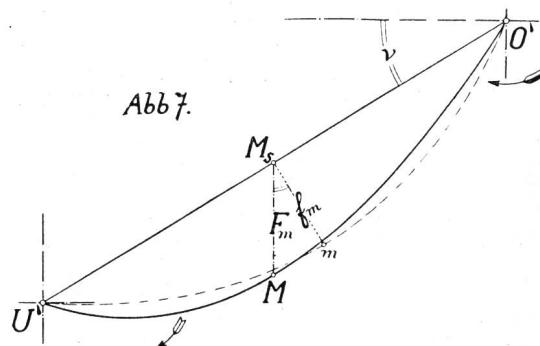


Als F_m kommt der Zusatzlastdurchhang des Seiles für sich allein (d. h. ohne Kettendurchhang) für Gleich. (8) in Betracht, d. i. in unserem Ziffernbeispiel:

$$F_m = \bar{F}_s = 7,91 \text{ m}$$

damit folgt aus Gleich. (8) der Seildurchhang $\bar{F}_{s,\xi}$ für den Abstand 58 m vom fixen Stützpunkt, entsprechend $\xi = 58 - l_k \cdot \cos \nu = 58 - 1,5 \cdot 0,897 = 56,65 \text{ m}$:

$$\bar{F}_{s,\xi} = 4 \cdot 7,91 \left(\frac{56,65}{213,3} \right) \left[1 - \left(\frac{56,65}{213,3} \right) \right] = 6,17 \text{ m}$$



Zumeist wird man die kleinen Unterschiede zwischen $F_{ko'}$, F_k und $F_{ku'}$ praktisch vernachlässigen, also $O'U'UO'$ als symmetrisches Parallelogramm annehmen können.¹⁸⁾ Dann folgt der Gesamtdurchhang \bar{F}_ξ (im Abstand ξ) aus: $\bar{F}_\xi = \bar{F}_k + \bar{F}_{s,\xi}$.

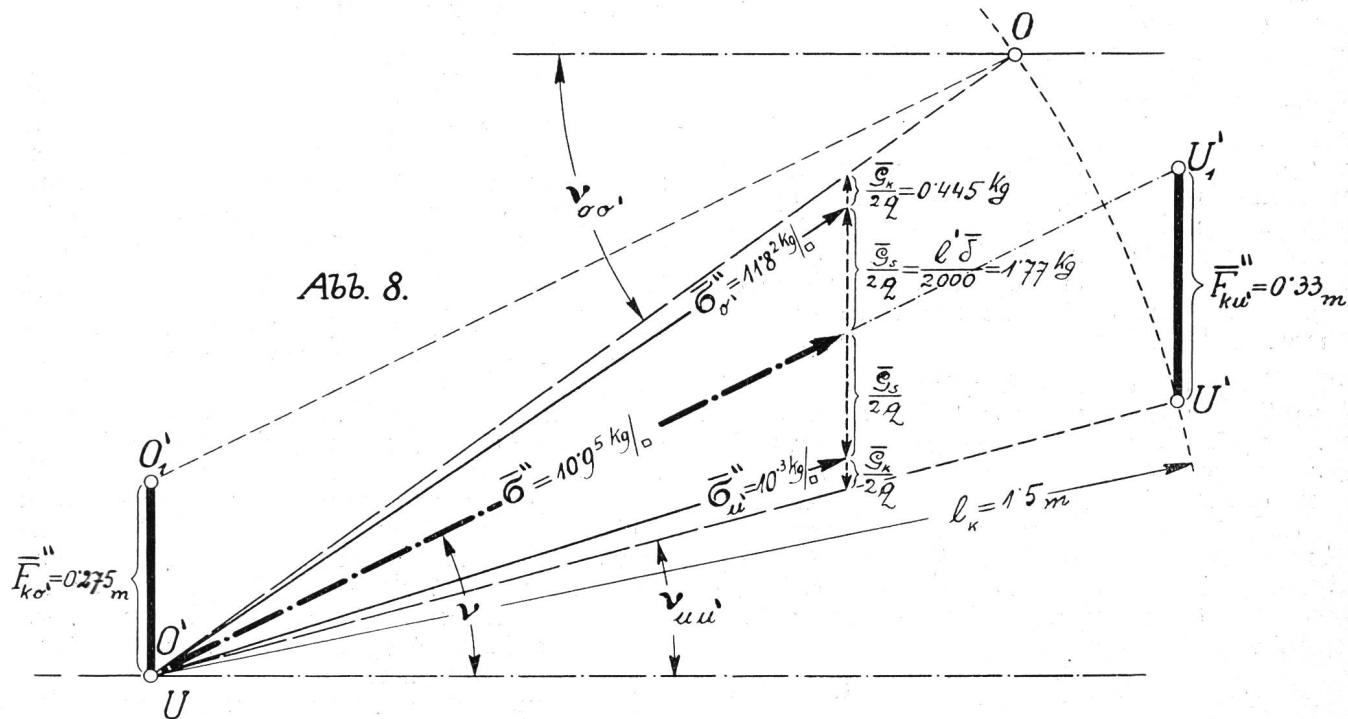
¹⁸⁾ Seilbogen $O'MU'$ wird hiebei nicht als symmetrisch angenommen, sondern, wie schon erwähnt, als schiefer Parabolast (im Gegensatz zur Ableitung der Zustandsgleichung schiefer Kettenspannfelder, wobei $O'MU'$ grundsätzlich als symmetrisch angesehen wird, nämlich wie eine wagrechte Parabel [Spannweite $O'U'$, Durchhang $f_m = F_m \cdot \cos \nu$, Abb. 7]), unter Vernachlässigung der — praktisch sehr geringfügigen — Verschiebungen der Seillinie in der Richtung $O'U'$.

In unserem Beispiel ist der Kettendurchhang \bar{F}_k bei Zusatzlast: $F_k = 0,254$ m und demgemäss: Gesamtdurchhang $\bar{F}_\xi = 0,254 + 6,17 = 6,42$ m.¹⁹⁾

III. Angenäherte Kontrolle der Annahme eines gleichgrossen Durchhanges von oberer und unterer Abspannkette.

Die im vorstehenden verwendete Seilspannung $\bar{\sigma}'' = 10,95 \text{ kg/mm}^2$ bezieht sich auf den im Spannfeldmittel liegenden Punkt der Seilkurve. Aus dem

Die Abspannketten können in diesem Zusammenhang als starr betrachtet werden; dann folgt aus dem Seileck, wenn an $\bar{\sigma}_{o'}''$ bzw. $\bar{\sigma}_u''$ das halbe Ketten gewicht einschliesslich Zusatzlast (je mm^2 Seilquerschnitt) d. i. $\frac{\bar{G}_k}{2q}$ in entsprechender Richtung ange tragen wird, die Neigung $\nu_{oo'}$ der Verbindungs linie $O' O$ bzw. die Neigung $\nu_{uu'}$ der Verbindungs linie $U U'$ (Abb. 8).²⁰⁾ Wird die Kettenlänge $l_k = 1,5 \text{ m}$ auf den letzteren Neigungen abgeschnitten (durch Kreisbogen $O' O = U U' = l_k$), dann ergibt sich der Durch-



Seileck folgen die Seilspannungen bei O' bzw. U' (Abb. 8), wenn an $\bar{\sigma}''$ die Eigengewichtskomponenten $\frac{\bar{G}_s}{2q} = \frac{l' \bar{\sigma}}{2000}$ vertikal nach aufwärts bzw. abwärts abgetragen wird ($\bar{\sigma}_{o'}'' = 11,82 \text{ kg/mm}^2$, $\bar{\sigma}_u'' = 10,3 \text{ kg/mm}^2$).

¹⁹⁾ Analog folgt mit Feldmitteldurchhang $\bar{F}_m'' = 9,51 \text{ m}$ (nach Kettenriss, für den gleichen Endabstand $\xi = 56,65 \text{ m}$): $\bar{F}_{s,\xi}'' = 4 \cdot 9,51 \left(\frac{56,65}{213,3} \right) \left[1 - \left(\frac{56,65}{213,3} \right) \right] = 7,42 \text{ m}$ als Seildurchhang und $\bar{F}_\xi'' = \bar{F}_k'' + \bar{F}_{s,\xi}'' = 0,304 + 7,42 = 7,72$ als Gesamtdurchhang.

hang \bar{F}_{k_0}'' der oberen Kette zu $\bar{F}_{k_0}'' = O' O_1 = 0,275 \text{ m}$ ($O_1 O \parallel O' U_1$), der Durchhang \bar{F}_{k_u}'' der unteren Kette zu $\bar{F}_{k_u}'' = U' U_1 = 0,33 \text{ m}$.

Man sieht: obwohl hier die Spannfeldneigung, welche auf Unsymmetrie der Kettenlage hinwirkt, recht erheblich ist und auch die Seilspannung nur mässig ist (was die Ausbildung der erwähnten Unsymmetrie ebenfalls fördert), so sind doch die Unterschiede gegenüber dem früheren Näherungswert $\bar{F}_k'' = 0,304 \text{ m}$ nicht beträchtlich, können also praktisch vernachlässigt werden.

²⁰⁾ Zur Vereinfachung wird vorausgesetzt, dass der Kettenbruch gerade in halber Kettenlänge erfolgt.