Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 21/22 (1893)
Heft: 8

Artikel: Ueber die Schwächung des Arbeitsvermögens der Materialien durch Spannungswechsel

Autor: Autenheimer

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-18106

INHALT: Ueber die Schwächung des Arbeitsvermögens der Materialien durch Spannungswechsel. — Wettbewerb für ein Kantonsschulgebäude und Gewerbemuseum in Aarau. — Miscellanea: Für ein neues Verfahren zur Bearbeitung von Cementmörtel. Fortschritte der Elektrotechnik. Ueber eine Schiene von 335 *m* Länge. Ueber zu schöne architektonische Ausstattung städtischer Postgebäude. Zonenzeit. Elektrische Bahn zwischen Brüssel und Antwerpen. Eisenbahnunglück bei Zollikofen. Generalversammlung des deutschen Ziegler- und Kalkbrenner-Vereins. — Konkurrenzen: Ideen-Konkurrenz ohne Geldpreise für den Neubau des bayerischen Nationalmuseums in München. Gymnasium in Frankfurt a. M. Markuskirche in Chemnitz. — Vereinsnachrichten: Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein. Stellenvermittelung.

Ueber die Schwächung des Arbeitsvermögens der Materialien durch Spannungswechsel.*)

Von Prof. *Autenheimer* in Winterthur.

Ein Konstruktionsteil macht einen Spannungswechsel durch, wenn seine Spannung von einem bestimmten Wert an sich steigert und sodann wieder auf einen niedern Wert zurückgeht. Bei regelmässig wiederkehrenden Spannungswechseln sind Anfangs- und Endspannung gleich gross.

Vor Beginn der Spannung haben die kleinsten Teile des Körpers eine bestimmte Lage zu einander. Während nun die Spannung steigt, ändert sich diese Lage. Hält die Spannung in gleicher Höhe an, so verbleiben auch die Teile in dieser neuen Lage. Sowie aber die Spannung auf die ursprüngliche zurückgeht, so ist die Tendenz vorhanden, die ursprüngliche Lage der Teile wieder herzustellen. Bei Materialien, wie sie zu Konstruktionen verwendet werden, wird diese Wiederherstellung nicht vollständig erreicht, selbst dann nicht, wenn die Formänderung innerhalb der sogenannten Elasticitätsgrenze erfolgt.

So hat Eaton Hodgkinson bei Versuchen über das Ausdehnen schmiedeiserner Stäbe konstatiert, dass diese Stäbe bei Spannungen bis zu 1499 *kg* pro *cm*² Querschnitt eine *bleibende* Ausdehnung zeigten, nachdem die Spannung aufgehört hatte und dass diese bleibenden Ausdehnungen proportional waren den aufgewendeten Kräften; es traten daher selbst bei kleinen Kräften bleibende Aenderungen in der Lage der kleinsten Teile ein. Ganz Gleiches wies derselbe Experimentator nach über das Verhalten gusseiserner Stäbe beim Zusammendrücken sowohl wie beim Ausdehnen.

Wird eine geradlinige Schiene in horizontaler Lage am einen Ende angespannt und am andern Ende, innerhalb der Grenze der Elasticität, belastet, so senkt sich die Schiene. Hält die Senkung einige Zeit an, so nimmt die Schiene eine permanente Biegung an, nachdem die Last entfernt ist. Und doch hat die Schiene nur *einen* Spannungswechsel ausgehalten. Die permanente Biegung kann aber nur entstehen, indem sich die kleinsten Teile auf der konvexen Seite von einander entfernen, auf der konkaven sich nähern, beides in der Längenrichtung.

Unzählige Erscheinungen bestätigen, dass der Spannungswechsel eine Aenderung der kleinsten Teile bewirkt, oder wie sich Poncelet in seiner „Introduction à la mécanique", 1841, ausdrückt, eine „altération moléculaire", pag. 293, oder ein „déplacement moléculaire", pag. 294.

Bei *einem* Spannungswechsel, die Spannung immer innerhalb der Grenze der Elasticität gedacht, ist indessen diese Aenderung nicht immer bemerkbar, selbst nicht bei einer mässigen Anzahl solcher Wechsel. Da nun aber jeder Spannungswechsel eine molekulare Verschiebung hervorbringt, so muss nach einer genügend grossen Anzahl solcher Wechsel der neue Zustand wahrnehmbar vom ursprünglichen abweichen. Der neue Zustand charakterisiert sich dadurch, dass die Struktur des Materials grobkörniger, selbst blätterig und krystallinisch wird.

Hält ein Konstruktionsteil Spannungswechsel aus, so sagt man, er arbeite. Nur Materialien, die arbeiten, ändern ihren Molekularzustand. Wenn ein Stab verstreckt wird und seine Spannung hält Jahrzehnte, Jahrhunderte unverändert an, so arbeitet der Stab nicht. Er arbeitet nur wenig, wenn er in gegebener Zeit wenig Spannungswechsel mit geringen Spannungsdifferenzen durchmacht; er arbeitet „strenge", wenn sich an ihm rasch auf einander folgende und zudem intensive Wechsel vollziehen. Daher kann der eine lange aushalten, während der andere bald durch Brechen zu Grunde geht.

Poncelet schreibt in dem oben erwähnten Buche, pag. 295: „Il est évident que pareille chose doit arriver quand, cette action étant seulement intermittente, les alternatives d'extension ou de compression sont suffisamment répétées; et c'est ce qui fait dire quelquefois aux ouvriers que *les ressorts les plus parfaits sont, à la longue, susceptibles de se fatiguer.*"

Wird ein Konstruktionsteil gespannt, so wird äussere Arbeit auf die Ueberwindung innerer Widerstände verwendet. Lässt die äussere Kraft nach, so reproduzieren die Molekularkräfte diese Arbeit. Diese zerlegt sich indessen in zwei Teile: der eine Teil wird auf die Wiederherstellung der ursprünglichen Form, der andere auf die molekulare Aenderung verwendet. Dieser letztere Teil muss für das Arbeitsvermögen des Körpers als verloren betrachtet werden, denn es bleibt für das Arbeitsvermögen des Körpers nur noch der erstere Teil disponibel. Unter diesem Arbeitsvermögen versteht man die grösste Arbeit, welche die Kohäsionskräfte bei gegebener Beanspruchung aushalten, bevor der Körpers bricht. Dieses Arbeitsvermögen wird daher durch auf einander folgende Spannungswechsel nach und nach erschöpft. Wo aber Spannungswechsel fehlen, da vermindert sich das Arbeitsvermögen nicht.

Im Folgenden wird vorausgesetzt, die äussere Einwirkung auf den Konstruktionsteil erfolge langsam genug, damit sich die Spannung über das ganze Volumen des Teiles verbreiten könne und zwar gerade so, wie dies bei Ableitung der Gleichungen über die statische Festigkeit angenommen wird.

Die Frage nach der Haltbarkeit eines Konstruktionsteiles ist dieselbe wie nach der Anzahl Spannungswechsel, welche er aushalten kann. Um diese Anzahl handelt es sich also hier. Sie hängt im wesentlichen ab: vom Arbeitsvermögen des Materials, der Grösse der eintretenden Spannung und von der Dauer eines Spannungswechsels.

Arbeitsvermögen. Es werde ein prismatischer Stab in der Längenrichtung verstreckt, so dehnt er sich aus. Man trage die Ausdehnungen, Fig. 1, als Abscissen, die entsprechenden Kräfte als Ordinaten auf und verbinde die Endpunkte der Ordinaten, so entsteht eine Fläche, welche die Arbeit misst, die auf die Ausdehnung verwendet wird. Für die Ausdehnung Bb und die Spannung bb_1 ist Bbb_1 diese Fläche; für den Bruch gehe sie über in die Fläche BCD. Daher ist die letztere Fläche das Arbeitsvermögen des Stabes. Der Inhalt des Rechteckes $BGDC$ ist $= BC \,.\, CD$. Die krummlinige Figur BCD ist aber nur ein Teil dieses Rechteckes, z. B. 0,6 bis 0,8, davon. Bezeichnet man das

*) Es wird kaum notwendig sein, nochmals darauf hinzuweisen, dass wir bei Abhandlungen, die mit dem Namen des Verfassers erscheinen, eine Verbindlichkeit für die darin entwickelten Ansichten nicht übernehmen können. Unsere Zeitschrift soll ein Sprechsaal sein, in welchem die verschiedensten Grundsätze und Anschauungen ihre Vertretung finden können. Deshalb wollen wir auch die nachfolgenden interessanten Entwickelungen des verdienten Herrn Autors unserem Leserkreise nicht vorenthalten, obschon wir hier auf einem etwas anderen Boden stehen. Wir sind nämlich, gestützt auf die Versuche von Wöhler & Bauschinger, der Ansicht, dass bei *schmiedbarem* Eisen durch zahlreiche, wiederholte Anstrengungen innerhalb der Elasticitätsgrenze eine Abminderung des Arbeitsvermögens nicht entsteht, selbst bei den als ungünstig angesehenen Anstrengungen mit kurzen Ruhepausen. Auch halten wir die vom Verfasser erwähnten zwei Beobachtungen (Panzerringe des Nymphenburger Gutofens und Stangen der Presse in Annonay) nicht für ausreichend, um daraus bestimmte Folgerungen zu ziehen; denn es liegen keinerlei Angaben darüber vor, wie deren Materialbeschaffenheit ursprünglich war, und ob die Behandlung der beanspruchten Teile im Laufe der Zeit eine angemessene gewesen ist. *Die Redaktion.*

Verhältnis der letztern Fläche zur erstern mit k, so ist das Arbeitsvermögen des Stabes

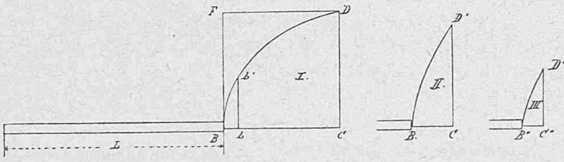
$$k \cdot BC \cdot CD. \quad (1)$$

In der folgenden Zusammenstellung sind die Werte der drei ersten Vertikalreihen Versuchen entnommen, diejenigen der vierten Reihe nach Ansatz (1) berechnet.

Material	Ausdehnung bis zum Bruch per 1 m Länge	Bruchspannung per 1 cm^2	Faktor k	Arbeitsvermögen per 1 cm^3 Inhalt
	m	kg		$m-kg$
Schmiedeisen, kurz	0,024	3 600	0,70	0,60
„ mässig dehnbar	0,120	3 600	0,75	3,24
„ stark dehnbar .	0,250	3 600	0,80	7,20
Eisendraht, ausgeglüht . . .	0,250	5 000	0,80	10,00

Da es sich je nur um das Arbeitsvermögen der Kubikeinheit, hier des Kubik-Centimeters, handelt, können die vorstehenden Werte auch als annähernd richtig gelten für Kompression, Biegung und Torsion.

Fig. 1.



Man ersieht, dass das Arbeitsvermögen, einer und derselben Materialgruppe angehörend, sehr verschieden sein kann. Bei Schmiedeisen z. B. steigt es von 0,6 bis 10, also auf das 17fache, möglicherweise bei weichem Flusseisen noch höher. Zu dieser Verschiedenheit beim Eisen trägt bei: das ursprüngliche Material (Erz), aus welchem das Fabrikat erstellt wird, die Art der Bearbeitung und die Dimensionen der erstellten Stücke. Dieses letztere deswegen, weil z. B. zu dünnem Draht, dünnem Blech etc. nur beste Qualität verwendet werden kann und weil die fortgesetzte, sorgfältige Bearbeitung alle Schäden beseitigt und den Zusammenhang der Teile gleichförmig macht.

Bei obiger Berechnung ist die Temperatur des Materials nicht berücksichtigt. Nun steigt aber die Festigkeit z. B. des Schmiedeisens mit wachsender Temperatur bis zu circa 180°, etwa im Verhältnis von 100 : 120. Ebenso nimmt wohl auch die Dehnbarkeit zu, in welchem Masse, ist uns jedoch nicht bekannt. Eine Schätzung der Steigerung des Arbeitsvermögens von Schmiedeisen giebt folgende Zusammenstellung:

Temperatur	0	45	90	135	180°
Steigen des Arbeitsverm.	1	1,07	1,14	1,21	1,28

Hält also ein Dampfkessel seine Spannungswechsel bei einer durchschnittlichen Temperatur von 135° aus, so muss das oben für Schmiedeisen angegebene Arbeitsvermögen mit 1,21 multipliciert werden.

Grösse der Spannungen. Der in Fig. 1 dargestellte Stab werde pro Flächeneinheit des Querschnittes gespannt mit einer Kraft $b b_1 = s$; dabei dehne sich der Stab auf eine ursprüngliche Länge L aus um ΔL, so besteht *innerhalb der Grenze der Elasticität* das Gesetz

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{s}{E}, \quad (2)$$

worin E den Modul der Elasticität bezeichnet.

Dadurch nimmt der Stab Arbeit auf, die dargestellt ist durch ein Dreieck mit der Grundlinie ΔL und der Höhe s; daher ist diese Arbeit $= \frac{1}{2} \cdot s \cdot \Delta L$. Dieser Ausdruck stimmt mit dem Ansatz (1) überein, weil nunmehr $k = \frac{1}{2}$ wird. Führt man in diese Arbeitsgrösse den Wert von ΔL aus (2) ein, so ist die auf den Stab verwendete Arbeit gleich

$$\frac{1}{2} \frac{s^2}{E} L. \quad (3)$$

Setzt man hierin $L = 1$, so stellt der aus (3) hervorgehende Wert

$$\frac{1}{2} \frac{s^2}{E} \quad (4)$$

die Arbeit dar, welche die Volumeneinheit aufnimmt.

Hört die Spannung s auf, so zieht sich der Stab zusammen, allein nicht auf die ursprünglichen Dimensionen. Die Arbeit der Molekularkräfte ist daher kleiner als (4). Sie sei

$$\frac{a}{2} \cdot \frac{s^2}{E},$$

worin a eine Zahl bezeichnet, die um sehr wenig unter der Einheit liegt. Das Arbeitsvermögen des Stabes hat also abgenommen um

$$\frac{1-a}{2} \frac{s^2}{E} = \frac{b}{2} \frac{s^2}{E}, \quad (5)$$

wo $1 - a = b$ gesetzt ist.

Befindet sich der Stab in einer Spannung s_1 und geht diese über in die grössere s, so nimmt der Stab bei diesem Uebergang an Arbeit auf

$$\frac{1}{2} \frac{s^2}{E} - \frac{1}{2} \frac{s_1^2}{E} = \frac{1}{2} \frac{s^2 - s_1^2}{E}.$$

Geht die Spannung s wieder auf s_1 zurück, so ersetzen die Molekularkräfte nach (5) nur die Arbeit

$$\frac{b}{2} \frac{s^2 - s_1^2}{E}. \quad (6)$$

Wird hierin $s_1 = s$, so geht keine Arbeit verloren, weil kein Spannungswechsel entsteht.

Nun wollen wir annehmen, dieser Spannungswechsel wiederhole sich n mal, so wird auch der Arbeitsverlust (6) n mal eintreten; nur wird die Konstante b möglicher Weise sich ändern. Es seien b_1, b_2, . . b_n die aufeinander folgenden Werte von b, so wird die Summe aller Arbeitsverluste sein

$$\frac{b_1 + b_2 + \ldots + b_n}{2} \frac{s^2 - s_1^2}{E}.$$

Die Grössen b_1, b_2, . . sind wahrscheinlich unter einander verschieden; allein auf diese Verschiedenheit kann hier nicht Rücksicht genommen werden.

Es bezeichne $2\,c_1$ das arithmetische Mittel aus den Werten b_1, b_2, . ., so kann der vorstehende Ausdruck für den Arbeitsverlust ersetzt werden durch

$$c_1\, n \frac{s^2 - s_1^2}{E} \quad (8)$$

Hierin ist der Einfluss der Zeit nicht berücksichtigt. Es wurde bei Ableitung von (8) stillschweigend vorausgesetzt, jeder Spannungswechsel dauere gerade eine Zeiteinheit.

Einfluss der Zeit auf die Schwächung des Arbeitsvermögens. Dass die Zeitdauer, innerhalb welcher ein Spannungswechsel erfolgt, auf die Schwächung des Arbeitsvermögens von Einfluss ist, zeigen folgende Beispiele.

Es werde eine geradlinige Schiene in horizontaler Lage, wie schon oben angenommen, eingespannt und am andern Ende belastet, jedoch so, dass die höchste eintretende Spannung diejenige der Grenze der Elasticität nicht erreiche, so biegt sich die Schiene. Lässt die Last nach, so entsteht eine bleibende Senkung, die sehr wesentlich von der Dauer der Senkung abhängt. Dauert nämlich der Versuch nur ganz kurze Zeit, so fällt die bleibende Senkung nur klein aus; ja sie kann so klein sein, dass sie nicht gemessen werden kann. Dauert aber die Spannung lange an, so wird die bleibende Senkung recht erheblich ausfallen. Das ist eine Thatsache, die jeder erfahrene Techniker zugiebt. Allein es fehlen darüber bestimmte Messungen.

Aus den oben erwähnten Versuchen von Hodgkinson über das Ausdehnen von schmiedeisernen Stäben wurde der Schluss gezogen, es sei die bleibende Ausdehnung proportional den Kräften, welche den Stab spannten. Dieses Gesetz hat seine Richtigkeit indessen nur dann, wenn die Versuche resp. die Spannungswechsel gleich lange andauern, was bei den von Hodgkinson vorgenommenen auch nahe der Fall gewesen sein mag. Hätten aber einzelne Spannungen weit länger gedauert als andere, z. B. 50, 100 mal länger, so hätten sich auch bei den Wechseln von langer Dauer grössere bleibende Ausdehnungen einstellen müssen und von der erwähnten Proportion könnte dann nicht die Rede sein.

Wird ein Draht an einem Ende festgehalten und am andern verdreht, jedoch innerhalb der Grenze der Elasticität, so zeigt er, wenn die Verdrehung bald aufhört, eine so kleine bleibende Verdrehung, dass sie möglicherweise ihrer Kleinheit wegen nicht bemerkt werden kann. Dauert aber die Spannung lange an, so macht sich die bleibende Verdrehung bemerkbar; sie wird grösser, je länger die Spannung andauert.

Diese und andere Beispiele zeigen, dass bei Versuchen über Spannungswechsel die Zeitdauer derselben mit beobachtet werden muss. Spannungswechsel von kurzer Dauer ändern den Molekularzustand des Körpers wenig; dieser kann daher, unter sonst gleichen Umständen, eine grosse Zahl von Spannungswechseln aushalten. Anders verhält es sich mit Spannungswechseln von langer Dauer; hier fällt die Anzahl möglicher Wechsel klein aus.

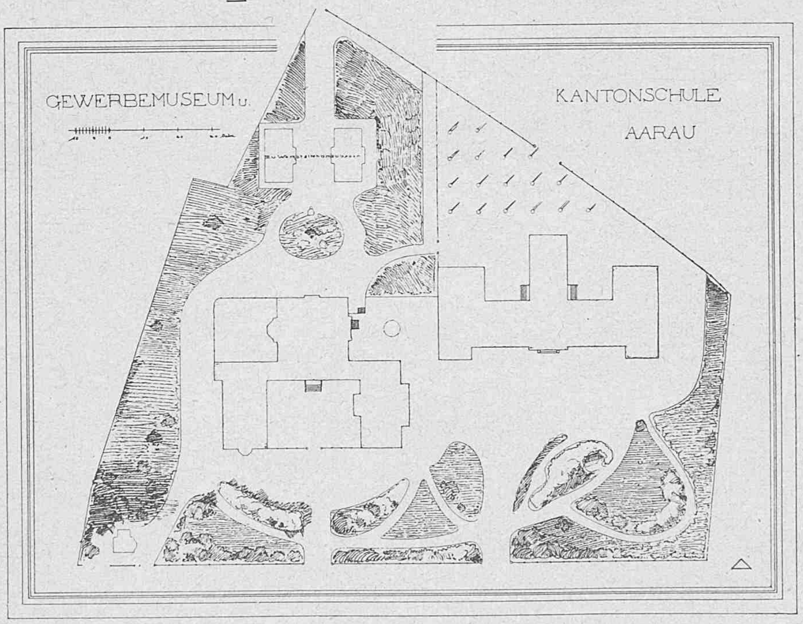
Bei dem Umbau eines etwa 60 Jahre alten *Gutofens in der Porzellanfabrik in Nymphenburg* mussten die Reifen der schmiedeisernen Rüstung, die aus drei Teilen bestehen, auf den grössern Durchmesser des neu zu errichtenden Ofens aufgebogen werden. Beim Abfahren der Reife nach der Schmiede fiel ein Stück vom Wagen auf den Rasen des Hofes und — zerbrach. Bei näherer Untersuchung fand es sich, dass der ganze Bestand des Schmiedeisens der Ofenrüstung durch und durch in krystallinisches Eisen verwandelt war, das bei jedem Hammerschlag zerbrach (Dingler, 1858, S. 157). Die Erklärung ist folgende: Man spannt den Reif mittelst Schraube oder Keil vor dem Brande so, dass er gerade leicht anliegt; während des Brandes dehnt sich der Ofen fühlbar aus und spannt den Reif so straff, dass derselbe beim Anschlagen tönt. Nach dem Erkalten des Ofens zieht sich alles wieder zusammen. In einem 60-jährigen Ofen haben ungefähr 3000 Brände stattgefunden; es haben sich also 3000 Spannungswechsel wiederholt, wodurch die vollständige Erschöpfung des Materials eingetreten ist.

Eine *hydraulische Presse*, welche in Annonay zum Pressen von Papier gebraucht wurde, hatte vier Stangen von gutem Schmiedeisen, welche beim Pressen auf etwa 800 *kg* per *cm*² gespannt wurden. Diese Stangen hielten fünf bis sechs Monate aus, sie brachen unter jenem Zuge, nachdem sie 4000 bis 5000 mal dieser Spannung ausgesetzt waren. So berichtet Poncetet (Introduction à la mécanique, S. 341).

Eine *arbeitende Lokomotivachse* wird gebogen und verdreht. Die Torsion ist jedoch so gering, dass sie ausser Betracht fallen kann. Die Biegung, infolge des Rahmendruckes, ruft in der Achse eine Verstreckung auf der konvexen, eine Verkürzung auf der konkaven Seite hervor. Die untere Seite ist also auf Zug, die obere auf Druck in Anspruch genommen. Macht die Achse eine Viertelsdrehung, so sinkt dieser Zug auf Null; das Material verkürzt sich daher auf die ursprüngliche Länge. Geht die Drehung um ein weiteres Viertel vor sich, so macht sich der Druck geltend und es verkürzt sich die Schicht um ebenso viel, als sie sich vorher ausgedehnt hat. Dieses Ausdehnen und Verkürzen tritt je ein Mal ein bei jeder Umdrehung. Hat das Rad 4 *m* Umfang und durchläuft der Wagen 500 000 *km*, bis die Achse ausgewechselt werden muss, so macht diese Achse 500 000 . 1000 : 4 = 125 Millionen Umdrehungen; also hat jede Schicht zweimal so viel Spannungswechsel ertragen. Allerdings kommen zu diesen Spannungswechseln noch andere hinzu, die später erwähnt werden, die aber den Zusammenhang der Teile mit lockern helfen und ohne welche die Achse weit mehr als 125 Millionen Umdrehungen aushielte.

Wettbewerb für ein Kantonsschulgebäude und Gewerbemuseum in Aarau.

III. Preis. Motto: △. Verf.: Arch. *Karl Moser* in Karlsruhe (II. Entwurf).



Lageplan 1 : 2000.

Bei der Lokomotivachse wird, wie man sieht, die Zahl der Spannungswechsel sehr gross, weil sie nur kurze Zeit dauern; bei den Stangen der hydraulischen Presse und den Reifen des Gutofens dagegen wird diese Zahl weit kleiner, weil sie länger dauern.

Es ist gewagt, den Einfluss der Zeit in Rechnung zu ziehen, da das benötigte Beobachtungsmaterial fehlt. Gleichwohl mag es angezeigt sein, eine Abschätzung zu versuchen.

Der Uebergang von der niedern Spannung zur höhern erfordert eine bestimmte Zeit, ebenso der von der höhern zur niedern. Dann kann zwischen beiden eine Pause von kürzerer oder längerer Dauer liegen. Die letztere Zeit fällt ganz aus bei einer arbeitenden Welle, ist dagegen gross bei einem Dampfkessel, dessen Material den ganzen Tag hindurch in Spannung erhalten wird, welche nur während der Nacht nachlässt. Jede dieser drei Zeiten haben ihren besondern Einfluss. Gleichwohl ziehen wir, der Einfachheit wegen, die beiden Zeiten für das Anspannen und Nachlassen zusammen und nehmen an, es sei die abschwächende Wirkung auf das Arbeitsvermögen dieser Zeit proportional.

Ohne Zweifel schwächer ist die Wirkung des Gespanntseins oder der Pausezeit. Ist diese gross, so wird der Einfluss aufeinander folgender gleicher Zeitteile, aus welchen die gesamte Dauer besteht, wohl ungleich sein; allein zu der Abschätzung, um welche es sich hier handelt, mag er als gleich vorausgesetzt werden. Dann kann man annehmen, es sei die Pausezeit die Grundzahl einer Potenz, deren Exponent zu bestimmen ist.

Nun sei t die Zeit zum Anspannen und Nachlassen und t_1 die des Gespanntseins, so wird die Wirkung auf das Arbeitsvermögen proportional der Grösse $t + t_1^x$.

Führt man diese Zeitfunktion statt des Faktors 1 in den Ausdruck (8), so erhält man als Arbeitsverlust während der Dauer von n Spannungswechseln

$$c_1 \, n \, \frac{s^2 - s_1^2}{E} \, (t + t_1^x) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (9)$$

Als Zeiteinheit kann die Sekunde, Minute, Stunde etc. angenommen werden. Im folgenden wird die Stunde zu Grunde gelegt.

Anzahl Spannungswechsel. Bezeichnet A den Teil des Arbeitsvermögens, der bereits durch n Spannungswechsel verbraucht ist, so wird A nichts anderes sein als der Wert (9). Daher durch Gleichsetzen beider Grössen die gesuchte Anzahl Spannungswechsel

$$n = c \frac{E}{s^2 - s_1^{\,2}} \cdot \frac{A}{t + t_1^{\,x}}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

worin c statt $1 : c_1$ gesetzt wurde.

Ueber die Grössen E und A dieser Schlussgleichung möge noch folgendes beigefügt werden.

Der *Modul E* kann für dieselbe Materialsorte als Konstant angesehen werden, da die Aenderungen, welche er bei der Steigerung der Spannung und bei der Schwächung des Arbeitsvermögens erfährt, nicht erheblich sind.

Bei Berechnung des *Arbeitsvermögens* wurde der Vorgang der Ausdehnung benutzt. Das bezügliche Verfahren findet Anwendung sowohl auf solche Stäbe, welche schon durch Spannungswechsel gelitten haben, wie auf neue Stäbe. In Fig. 1 stellt die Diagrammfläche I das Arbeitsvermögen eines neuen Stabes dar, Fläche II dasjenige eines Stabes, der schon lange gearbeitet hat, dessen Festigkeit indessen gleich geblieben ist und Fläche III das eines Stabes, dessen Arbeitsvermögen so sehr abgenommen hat, dass sein Bruch bald eintreten muss; bei allen drei Stäben sonstige Umstände gleich vorausgesetzt.

Die allmähliche Abnahme der Diagrammfläche kann so erfolgen, dass die ursprüngliche Länge des Stabes zunimmt oder abnimmt, oder gleich bleibt. Das erstere tritt z. B. ein bei den Stangen einer hydraulischen Presse, das letztere bei einer schmiedeisernen Achse, deren Material abwechselnd gleich stark auf Zug und Druck in Anspruch genommen wird.

Die Gleichung (10) soll nun auf *schmiedeiserne* Konstruktionsteile angewendet werden, die unter den verschiedensten Umständen arbeiten. Zuerst müssen aber die Konstanten c und x bestimmt werden.

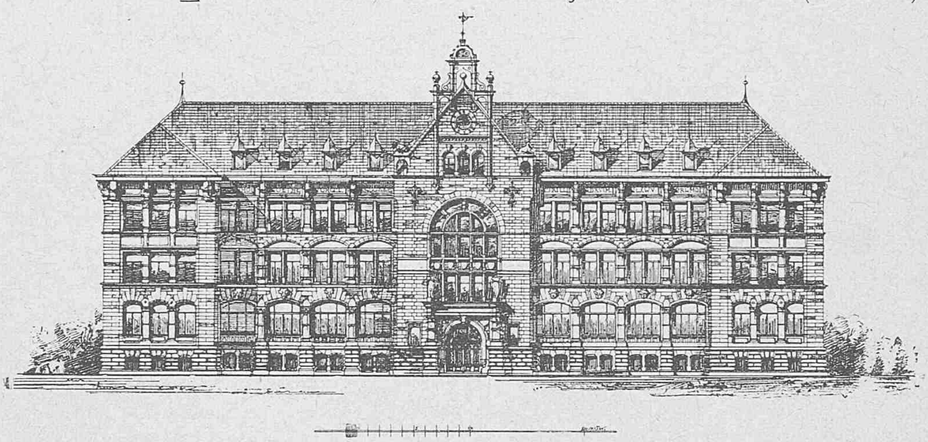
Konstante c. Zur Bestimmung derselben benützen wir die oben erwähnte arbeitende Lokomotivachse, setzen diese aber von Schmiedeisen voraus, aus dem sie früher erstellt worden, da uns über das nunmehr verwendete Material, den Stahl, die nötigen Daten fehlen.

Die Achse macht zweierlei Spannungswechsel durch: solche erster Art, wenn sie sich dreht und solche zweiter Art, wenn sie ruht. Wird nämlich die Achse zur Ruhe gebracht, so gehen bei der letzten Viertelsdrehung in ihrem Material zwei halbe Spannungswechsel vor; das Material, das gänzlich entlastet war, wird auf der untern Seite verstreckt, auf der obern verkürzt. Dieses Gespanntsein dauert so lange, bis wieder eine erste Viertelsdrehung erfolgt, während dieser vollzieht sich das Nachlassen der Spannung. Solche Wechsel der zweiten Art kommen vor an den Haltstellen während des Dienstes und ausserhalb der Betriebszeit, z. B. während die Lokomotive in der Remise steht. Wir werden sehen, dass diese Wechsel die Achse annähernd ebenso sehr erschöpfen wie die der ersten Art.

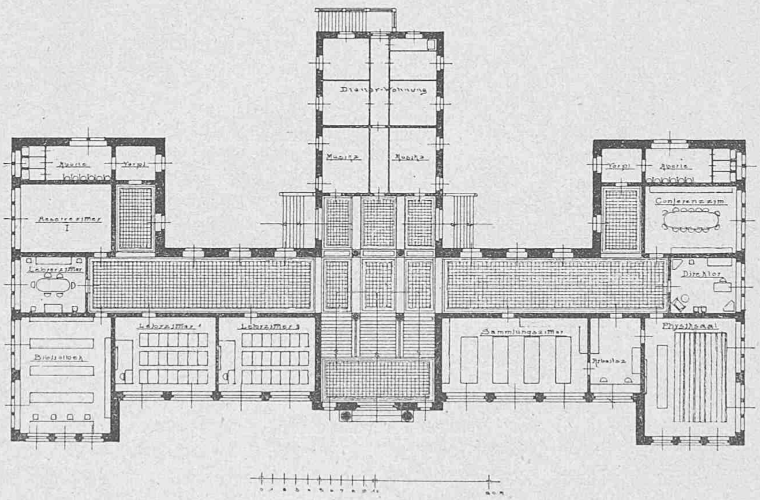
Um in Gleichung (10) nur c als Unbekannte zu haben, lassen wir einstweilen die Spannungswechsel der zweiten Art ausser Betracht. Dann wird $t_1 = 0$.

Wettbewerb für ein Kantonsschulgebäude und Gewerbemuseum in Aarau.

III. Preis. Motto: $\triangle$. Verf.: Arch. *Karl Moser* in Firma *Curjel & Moser* in Karlsruhe (II. Entwurf.)



Kantonsschulgebäude. Hauptfassade 1 : 600.



Kantonsschulgebäude. Hauptgrundriss 1 : 600.

Wenn der Umfang des Rades zu 4 *m* und die mittlere Geschwindigkeit der Lokomotive zu 10 *m* angenommen wird, so ergiebt sich als Zeit zu einer halben Umdrehung $^1/_5$ Sek.; daher $t = 1 : 5 \,.\, 3600$ Stunden.

Die Spannung s_1 wird immer $= 0$; die höchste, von der Last herrührende Spannung s sei $= 220$ *kg*. Allein beim Fahren entstehen heftige Stösse auf die Achse, namentlich an den Schienenstössen, die rasch auf einander folgen; ferner durch das Zucken, Schlingern, Nicken, Wanken, Wogen etc. Wir nehmen daher $s = 400$ *kg* an.

Das Arbeitsvermögen der Achse sei $= 6$. Allein es ist zu berücksichtigen, dass die Achse beim Auswechseln noch Arbeitsvermögen besitzen muss und dass vom Gesamtbetrag mindestens ebenso viel von den Wechseln zweiter Art verbraucht wird wie von denen erster Art. Wir nehmen daher $A = 2$ an.

Endlich sei $E = 1\,800\,000$ und $n = 250\,000\,000$; so folgt aus Gleichung (10) $c = 617{,}4$, wofür wir annehmen wollen

$$c = 620.$$

Exponent x. Wir wählen zur Bestimmung dieser Grösse das oben citierte Beispiel der hydraulischen Presse in Annonay. Die Zeit zum Spannen und Nachlassen mag betragen 1 Minute, die des Gespanntseins (zum Abtropfen des Wassers) 4 Minuten; daher $t = {}^1/_{60}$ und $t_1 = {}^4/_{60}$. Während der Spannung ist $s = 800$, nach der Entlastung immer $s_1 = 0$; Mittel aus der Anzahl angegebener Spannungswechseln $n = 4500$. Da diese Zahl klein ist, so muss angenommen werden, das Eisen der Stangen habe keine sehr grosse Dehnungsfähigkeit gehabt; wir nehmen daher $A = 1{,}1$ an und erhalten mittelst Glchg. (10) $x = 0{,}3296$; wofür wir in der Folge in Rechnung bringen

$$x = {}^1/_3.$$

Anwendung der Hauptgleichung auf die Spannungswechsel zweiter Art bei einer Lokomotivachse. Jede Eisenbahnverwaltung benützt ihre Lokomotiven in besonderer Weise. Auf der einen Strecke giebt es wenig, auf einer andern viel Haltstellen; an der einen Station wird lange, auf einer andern kurze Zeit angehalten; ist eine Endstation erreicht, so kehrt bei der einen Bahn die Lokomotive, nachdem sie Wasser und Kohlen gefasst hat, sogleich um, während sie bei einer andern längere Zeit stehen bleibt. Nachdem die Lokomotive ihre tägliche Fahrt durchlaufen hat, bleibt sie noch kürzere oder längere Zeit auf dem Bahnhof stehen, um dann in die Remise gebracht zu werden etc. Hier bleibt nun nichts anderes übrig, als bestimmte Annahmen zu machen. Diese seien:

Mittlere Geschwindigkeit auf offener Fahrt 10 *m*; Dauer der Fahrt, die Zeit für das Anhalten an den Stationen nicht inbegriffen, 6 Stunden; daher durchlaufener Weg pro Tag 10 . 6 . 3600 = 216 000 *m*. Da der ganze Weg, den die Lokomotive durchlaufen kann, bevor die Achse ausgewechselt werden soll (wie oben angegeben) 500 000 *km* beträgt, so kann die Achse 2315 Tage im Betrieb stehen.

a) Wechsel an kurzen Haltstellen. Mittlere Entfernung zweier Haltstellen 8000 *m*; daher Anzahl Haltstellen täglich 27; mittlere Dauer eines solchen Haltes angenommen zu 2 Minuten. Im ganzen macht also die Lokomotive in den 2315 Tagen 2315 . 27 = 62 505 Halte von je 2 Minuten Dauer, also auch ebenso viele Spannungswechsel mit einer Spannung $s = 220\,kg$, da hier die Stösse ausser Betracht fallen. Da die Zeit für das Anspannen und Nachlassen (für Viertelsdrehungen) klein ist, so setzen wir $t = o$. Endlich sind zu nehmen $t_1 = 2/60$; $c = 620$; $E = 1800\,000$ und $A = 6$; so giebt Gl. (10)

$$n = 429\,840,$$

d. h. die Achse könnte 429 840 Spannungswechsel dieser Art aushalten, bis ihr ganzes Arbeitsvermögen erschöpft wäre. Da sie aber nur 62 505 solcher Wechsel durchmacht, so wird folgender Anteil ihres Arbeitsvermögens dadurch verbraucht

$$62\,505 : 429\,840 = 0{,}1454.$$

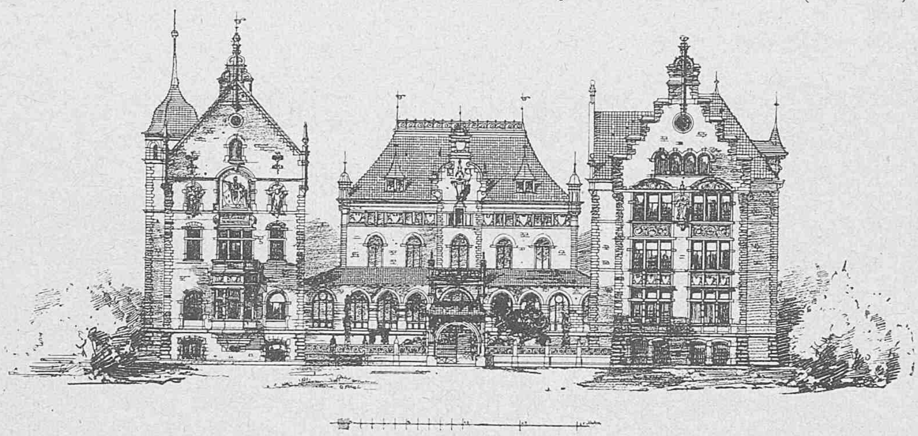
b) Halte von längerer Dauer. Wir nehmen täglich 4 solcher an von je 1 Stunde Dauer. Dieser Zeit gegenüber ist $t = o$; daher nach Gl. (10) die Anzahl möglicher Wechsel, da alle Daten wie unter *(a)* gelten

$$n = 138\,347.$$

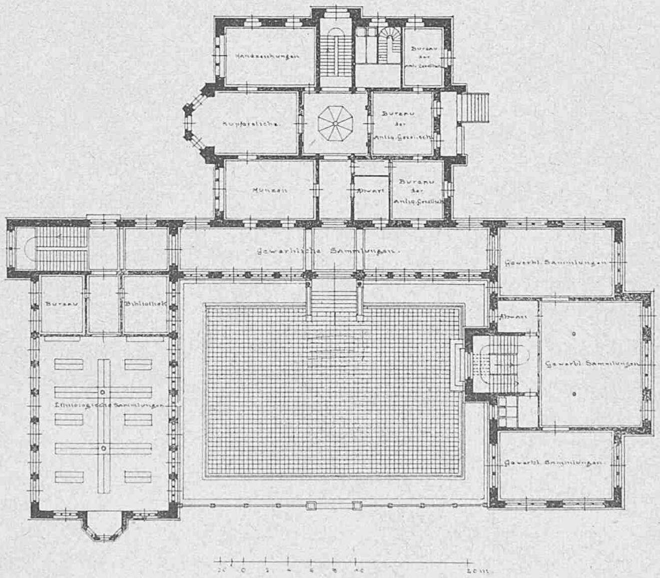
Allein die Achse macht nur 4 . 2315 solcher Wechsel durch; daher absorbieren diese Wechsel

Wettbewerb für ein Kantonsschulgebäude und Gewerbemuseum in Aarau.

III. Preis. Motto: △. Verf.: Arch. *Karl Moser*, Firma *Curjel & Moser* in Karlsruhe (II. Entwurf).



Gewerbemuseum. Hauptfassade 1 : 600.



Gewerbemuseum. Hauptgrundriss 1 : 600.

$$4 . 2315 : 138\,347 = 0{,}0670$$

des ganzen Arbeitsvermögens.

c) Wechsel in der Remise. Die bisherigen in Betracht gezogenen Wechsel beanspruchen folgende Zeit: für die Wechsel erster Art = 6 Stunden; für die 27 Haltstellen zu 2 Minuten = 54/60 Std. und für die 4 längern Halte = 4 Std.; daher verbleiben für die Remise täglich 13,1 Std. Daher könnte die Achse solcher Wechsel durchmachen, da $t = o$ angenommen werden kann

$$n = 58\,687.$$

Die Achse hat nur 2315 solcher Wechsel durchzumachen; daher absorbieren diese $2315 : 58\,687 = 0{,}0395$.

d) Wechsel an Rasttagen. Die Lokomotive stehe ein Jahr ausser Dienst und zwar zu je 5 Tagen; dafür entfallen 73 Wechsel. Da $t = o$ und $t_1 = 5 . 24$, so wird $n = 27\,984$, folglich der Anteil des Arbeitsvermögens, der durch diese 73 Wechsel verbraucht wird $73 : 27\,984 = 0{,}0026$.

Die Wechsel der ersten Art vollziehen sich so, dass das Material rings um den Umfang der Achse herum gleichmässig erschöpft wird, während dies mit den Wechseln der zweiten Art nicht vorausgesetzt werden kann. Eine und dieselbe Stelle der Oberfläche der Achse, unmittelbar unter dem Rahmen, kann 10 und 100 Mal zu unterst oder zu oberst liegen, also dem höchsten Zug oder Druck ausgesetzt sein, während eine andere, in demselben Querschnitt liegend, nie oder nur wenige Male die höchste Spannung auszuhalten hat. Man kann unendlich viel gegen eins wetten, die grösste Spannung verteile sich nicht gleichförmig über den Umfang des Querschnittes, wie, sie treffe nicht immer dieselbe Stelle. Immerhin lässt sich hieraus der Schluss ziehen: Hält die Achse lange Stand, so kann, unter sonst gleichen Umständen, angenommen werden, die Erschöpfung des Materials sei relativ sehr gleichförmig eingetreten; geht die Achse bald zu Grunde, so muss auf eine einseitige Schwächung geschlossen werden.

Die gleichförmige Verteilung würde nach obigem für die Wechsel zweiter Art erfordern

$$0{,}1454 + 0{,}0670 + 0{,}0395 + 0{,}0026 = 0{,}2545$$

des gesamten Arbeitsvermögens und für die Wechsel beider Art zusammen

$$0{,}3333 + 0{,}2545 = 0{,}5878.$$

Es bleibt also an Arbeitsvermögen noch vorrätig 0,4122.

Trifft die grösste Spannung immer nur dieselbe Stelle, so ist das Arbeitsvermögen der Achse kleiner als bei gleichförmiger Verteilung und zwar im Verhältnis von $2^2 : \pi^2$ oder von 1 : 2,4674. Daher würde durch die Wechsel der zweiten Art am Arbeitsvermögen aufgezehrt

$$2{,}4674 \cdot 0{,}2545 = 0{,}6279$$

und durch beide Arten von Wechseln

$$0{,}3333 + 0{,}6279 = 0{,}9612.$$

Es bliebe also vom Arbeitsvermögen nur noch 0,0388, so dass die Achse schon hätte brechen müssen, bevor so viel Wechsel eingetreten wären.

Allein weder der eine noch der andere dieser extremen Fälle kommt vor. Die Wahrscheinlichkeit spricht für den mittleren Wert aus 0,2545 und 0,6279, also für 0,4412. Es kann daher angenommen werden, die Erschöpfung betrage für die Wechsel beider Art

$$0{,}3333 + 0{,}4412 = 0{,}7745$$

vom Arbeitsvermögen.

J. Claudel giebt in seinem Aide-Mémoire (1872) an, Perdonnet habe angeraten, die Lokomotiven jährlich keine zu grossen Wege durchlaufen zu lassen, um sie nicht zu rasch abzunützen. Nach Vorstehendem ist diese Auffassung unrichtig, weil sich der Einfluss der Spannungswechsel zweiter Art mit der Zeit steigert.

Haltbarkeit des Mantels eines Schiffskessels. Der cylindrische Teil des Kessels habe in der Querrichtung eine Spannung $s = 300\ kg$ auszuhalten. Diese halte durchschnittlich 11 Stunden im Tage an, so dass $t_1 = 11$ wird. Nachher kühle sich der Kessel ab und es werde zuletzt $s_1 = o$. Die Zeit zum Anheizen und Abkühlen betrage $t = 7$ Stunden. Wenn nun noch $A = 5$ und $E = 1\,800\,000$ angenommen wird, so giebt Gl. (10)

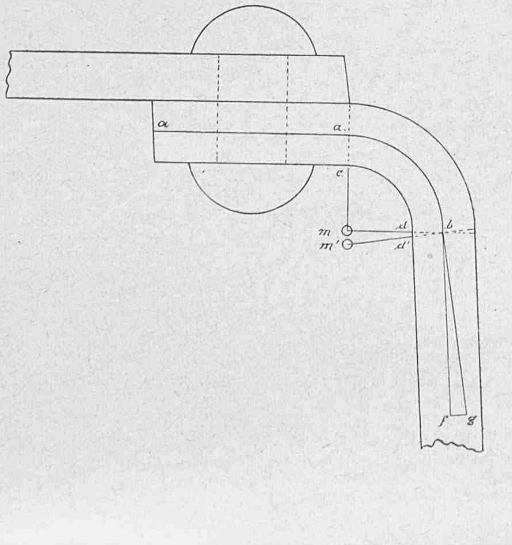
$$n = 6722.$$

Arbeitet dieser Kessel jährlich 250 Tage, so macht er im Jahr ebenso viele Spannungswechsel durch und kann dann 6722 : 250 = 27 Jahre aushalten, bis das Mantelblech erschöpft ist.

Begreiflich sind hiebei die Einflüsse durch Rosten, Verspannungen bei ungleicher Erwärmung der Blechteile etc. nicht in Anschlag gebracht. Der Kessel muss also schon früher entfernt werden.

Haltbarkeit des Mantels eines eingemauerten Dampfkessels. Die Arbeit beginne vormittags 6 Uhr und schliesse abends 7 Uhr, so ist der Kessel, da der Dampfdruck auch über die Mittagsstunde anhält, 13 Stunden in Spannung. Allein auch über die Betriebszeit hinaus hält die Spannung noch an, indem die stark erhitzten Teile des Mauerwerkes Wärme an den Kessel abgeben. Es möge die Spannung auf diese Weise noch 3 Stunden weiter dauern, so wird also $t_1 = 16$ und daher $t = 8$ Stunden. Der Kessel arbeite mit 6 Atm. Ueberdruck, dieser sinke über Nacht auf 3 Atm. Die Spannung des cylindrischen Mantels in der Querrichtung sei für 6 Atm. $s = 300\ kg$, so wird sie sinken auf $s_1 = 150\ kg$.

Fig. 2.



Hiernach erhält man für $A = 5$ folgende Anzahl Spannungswechsel

$$n = 7859.$$

Für 300 Arbeitstage giebt dies eine Dauer von 26,2 Jahren.

Schwächung des Materials in der Krümmung einer gebogenen Schiene. Es stelle Fig. 2 eine solche Schiene dar; die Radien am und bm schliessen die Biegung ein und es sei Bogen ab die Länge der neutralen Schicht und Bogen cd die Länge der Schicht auf der konkaven Seite. Die Schiene verlängere sich geradlienig in der Richtung aa^1 und bf.

Nun werde auf einmal der Winkel dieser zwei Geraden etwas vergrössert, indem bf in bg und Radius bm in bm^1 übergehe. Dadurch entstehen zwei ähnliche Dreiecke bdd^1 und bfg. Es sei Bogen $cd = L$; die Zunahme desselben $dd^1 = \Delta L$ und die halbe Schienendicke $bd = h$, so ist

$$\Delta L = h \cdot \frac{fg}{fb};$$

daher auch

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{h}{L} \cdot \frac{fg}{fb}.$$

Allein dieser Wert ist nach Gl. (2) $= \frac{s}{E}$, wenn mit s die specifische Spannung bezeichnet wird, welche die Länge um ΔL vergrössert; daher

$$s = E \frac{h}{L} \cdot \frac{fg}{fb}.$$

Nun erfolge die Bewegung aus bf in bg und umgekehrt in stetiger und regelmässiger Weise, so entstehen Spannungswechsel in bisherigem Sinne und das Bogenstück muss schliesslich zwischen c und d zerreissen und auf der konvexen, gegenüberliegenden Seite zerdrückt werden.

Anwendung auf den Boden eines Dampfkessels. Es sei abf, Fig. 2, dieser Boden. Während des Anheizens gehe die Linie bf auf eine Länge von 1000 mm am äussern Ende um $fg = 0{,}6\ mm$ auswärts; ferner sei $h : L = 1 : 4$, so entsteht die Spannung

$$s = 1\,800\,000 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{0{,}6}{1000} = 270\ kg.$$

Dazu komme noch eine Spannung $s_{11} = 150\ kg$, welche das Stück ab in der Längerichtung und zwar in der Nähe von a, wegen des Druckes auf den Boden auszuhalten hat, so wird die Gesamtspannung $270 + 150 = 420\ kg$. Die Zeit zum Anheizen und Abkühlen sei $t = 7$ und während der Dauer der Spannung $t_1 = 11$ Stunden. Nun sei noch $A = 6$, so wird nach Gl. (10)

$$n = 4116.$$

Arbeitet der Kessel, wie der weiter oben erwähnte Schiffskessel, 250 Tage im Jahr, so hält dieser Boden 4116 : 250 = 16,4 Jahre aus.

Man erkennt, dass ein Riss in der Gegend zwischen c und d, in der Nähe von c, entstehen wird, und zwar rings um den Boden herum, infolgedessen der Bruch schon vor 4116 Tagen des Gebrauches entstehen mus. Es folgt aber auch ferner, dass Kesselböden von grösserm Durchmesser versteift werden sollten, um selbst die kleinsten Ausbauchungen zu verhindern.

Es scheint uns nicht nötig, die Zahl der Beispiele einstweilen zu vermehren. Das kann immer noch geschehen, wenn der Grundgedanke dieser Arbeit Zustimmung findet.

Wettbewerb für ein Kantonsschulgebäude und Gewerbemuseum in Aarau.

III.

Indem wir unsere Berichterstattung über diesen Wettbewerb zum Abschluss bringen, lassen wir auf Seite 49, 50 und 51 unserer heutigen Nummer Darstellungen des zweiten Entwurfes von Architekt *Karl Moser* in Karlsruhe folgen, der mit dem dritten Preise ausgezeichnet worden ist.