

**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens  
**Herausgeber:** Association suisse des électriciens  
**Band:** 41 (1950)  
**Heft:** 22

**Artikel:** Neue Konstruktionsgrundsätze für den Bau von Kollektoren  
**Autor:** Andres, Max  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1058945>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 18.01.2025

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

## Neue Konstruktionsgrundsätze für den Bau von Kollektoren

Bemerkungen zum Aufsatz von F. L. Laub, Buenos Aires, im Bull. SEV Bd. 40(1949), Nr. 25, S. 988...1001.

Von Max Andres, Wettingen

621.313.047.2

*Die theoretischen Grundlagen für die mechanische Berechnung der Schwalbenschwanz-Kommutatoren der Gewölbedruckbauart werden beschrieben. Die Auffassung des Kommutators als elastisch vorgespanntes System unter Berücksichtigung der Reibung in den Einspannflächen erlaubt die exakte Erfassung des inneren Kräftespieles bei allen Betriebszuständen. Vollkommene Elastizität und Gleitsicherheit, als die entscheidenden Qualitäten eines Kommutators, werden damit rechnerischer Kontrolle zugänglich. Die Postulate von F. W. Laub, Buenos Aires, werden kritisch betrachtet. Es wird gezeigt, dass sie nur von untergeordneter Bedeutung sein können.*

*L'article ci-dessous rappelle quelles sont les bases utilisées pour le calcul mécanique des collecteurs à pression tangentielle, avec lamelles taillées en queue d'hirondelle.*

*Le fait de concevoir le collecteur comme étant un système élastique, en considérant le frottement dans les surfaces de pression permet de se faire une idée exacte du jeu des forces internes pour n'importe quel état de fonctionnement.*

*Par le calcul, il est possible de contrôler si l'on a bien une élasticité parfaite et une sécurité de glissement suffisante, qualités essentielles pour un collecteur.*

*Les propositions de F. W. Laub, Buenos Aires, sont discutées. Il est démontré qu'elles ne peuvent entrer en considération en tant que facteur de première importance.*

Es ist zu begrüßen, wenn das recht komplexe Problem der mechanischen Berechnung des Kommutators in zunehmendem Masse Ingenieure zu eingehenden Untersuchungen anzuregen vermag, hat doch dieser wichtige Bestandteil des Elektromaschinenbaues sich allzulange einer quantitativ befriedigenden rechnerischen Erfassung seines inneren Kräftespieles entziehen können. Während die Erforschung der elektromagnetischen Grundlagen für eine gute Kommutation vor Jahrzehnten schon zu einem gewissen Abschluss gelangte, sind umfassende Berechnungsgrundlagen für die Mechanik des Kommutators m. W. erst etwa 15 Jahre alt und noch keineswegs Allgemeingut der Konstrukteure geworden.

Es mag daher einleitend eine kurze Übersicht über diese neueren Berechnungs-Methoden nützlich sein, bevor die Vorschläge des zitierten Aufsatzes näher betrachtet werden.

Alle Berechnungs-Methoden, bei denen einzelne Teile unter vereinfachenden Voraussetzungen für sich allein betrachtet werden, haben im allgemeinen quantitativ versagt. Entscheidende Fortschritte sind erst erreicht worden, seit man dazu übergegangen ist, den Kommutator in seiner Gesamtheit als ein *elastisch vorgespanntes System* aufzufassen. Darin befinden sich die Schrauben und Pressringe als einspannende Teile mit den eingespannten Lamellen und Isolationen in einem Gleichgewichtszustand, der durch die Kräfte, welche die beiden Teile aufeinander nach dem Gesetz von Aktion und Reaktion übertragen, sowie durch die elastischen Dehnungen aller an der Einspannung beteiligten Elemente eindeutig bestimmt ist. Beim Schwalbenschwanz-Kommutator der Gewölbedruckbauart findet die gegenseitige Kraftübertragung nur in den beidseitigen inneren Konusflächen statt. Für den Zusammenhang von Kraft und elastischer Dehnung genügt die Annahme des Hooke'schen Gesetzes, auch für die Isolationen, wenn für diese der Elastizitätsmodul berücksichtigt wird, den sie nach fertiger Formierung angenommen haben.

Die Zentrifugalkräfte und die Erwärmung verändern die Gleichgewichtslage des vorgespannten Systems nach diesen Prämissen in streng gesetzmässiger Weise, so dass die Kräfte im Betriebszustand berechnet werden können.

Der Einfluss der Zentrifugalkräfte auf die Pressringdeformation darf dabei nicht rein additiv berücksichtigt werden, da das vorgespannte System auf zusätzliche Kräfte weniger stark reagiert als seine einspannenden und eingespannten Teile für sich allein. Mit andern Worten: Der Elastizitätsmodul des vorgespannten Systems ist grösser als der seiner einzelnen Teile, so dass die Zunahme der Pressringspannung und die Abnahme des Gewölbedruckes geringer ausfallen, als bei der additiven Berücksichtigung der Zentrifugalkräfte.

Der Einfluss der Erwärmung wird dadurch erfasst, dass das elastische System mit dem um die natürliche Wärmeausdehnung aller Teile vergrösserten Einspannstrecken ein zweites Mal berechnet wird. Der Vergleich mit der für den kalten Zustand gültigen Berechnung liefert in theoretisch exakter Weise die durch die Erwärmung entstehende Veränderung aller Spannungen und Dehnungen.

Damit sind die Grundlagen für die richtige Dimensionierung aller Teile gelegt. Die Dimensionierung ist so vorzunehmen, dass bei den betriebsmässig auftretenden Maximalkräften die Spannungen nirgends die Proportionalitätsgrenze überschreiten. Die Veränderungen der Gleichgewichtslage sind beim fertig formierten Kommutator vollkommen reversibel. Die Kräftemittelpunkte in den beiden Übertragungsflächen beschreiben dabei (im Querschnitt betrachtet) einen Weg, der als natürlicher Atmungsweg des Kommutators bezeichnet werden kann. Er hat die Form eines Rhomboids, dessen Eckpunkte die Lage des Kräftemittelpunktes bei den vier Grenzzuständen des Kommutators bezeichnen: des kalten Stillstands, des kalten Laufs, des warmen Laufs und des warmen Stillstands.

Die elastischen Formänderungen der einzelnen Teile sind sehr klein; sie geben nur in ihrer vollständigen Summe das elastische Verhalten richtig wieder. Ob einzelne Teile als praktisch starr angesehen werden dürfen, entzieht sich der gefühlsmässigen Schätzung und kann nur nach genauer Berechnung beurteilt werden. Sicher ist, dass die elastische Ausbiegung der Pressringe auch bei kräftiger Dimensionierung nicht ohne beträchtliche Einbusse an Genauigkeit vernachlässigt werden kann, stellen doch die Pressringe zwei harte Membranen im elastischen System dar.

Das mechanisch stabile Verhalten des Schwalbenschwanz-Kommutators im ganzen Betriebsbereich ist aber durch die vollkommene Elastizität seiner aktiven Teile allein noch nicht gewährleistet. Das zweite, ebenso wichtige Kriterium hierfür ist die Gleitsicherheit. Die Zentrifugalkräfte in den Lamellen versuchen diese mit ihren Komponenten in Richtung der Konuserzeugenden nach aussen zu verschieben; sie erzeugen also eine mechanische Gleitendenz.

In der gleichen Richtung möchte die tangentielle Wärmeausdehnung der Lamellen diese gegenüber den Pressringen verschieben, während ihre axiale Wärmeausdehnung ein Gleiten nach innen zu erzwingen sucht. Es findet beim Gewölbedruck-Kommutator also eine für den Kommutator günstige Teil-Kompensation der beiden Gleitendenzen statt, welche durch die tangentielle und die axiale Wärmeausdehnung der Lamellen entsteht. Die resultierende thermische Gleitendenz hat die Richtung der überwiegenden partiellen Tendenz, hängt also bei gegebenem Konuswinkel vom Elastizitätsgrad des Kommutators für die tangentielle und axiale Richtung ab, mittelbar also auch vom Dickenverhältnis von Lamelle zu Lamellenisolation und vom Verhältnis des Kommutatordurchmessers zur Einspannlänge der Lamellen.

Die mechanische und die thermische Gleitendenz müssen unabhängig voneinander unterdrückt werden, weil sie auch unabhängig voneinander auftreten können: Die mechanische Gleitendenz allein beim Lauf im kalten Zustand, die thermische allein beim Stillstand des warmen Kommutators. Beim warmen Lauf, d. h. bei normalem Betrieb, überlagern sich beide Gleitendenzen, wobei jedoch nur dann eine verstärkte Gleitgefahr entsteht, wenn die resultierende thermische Tendenz nach aussen, also mit der mechanischen gleichsinnig gerichtet ist.

Das Gleiten muss im fertigen Kommutator durch die Haftreibung in den Konusflächen unterdrückt werden, bei gegebenem Haftreibungskoeffizienten also durch ausreichenden Normaldruck. Die im Konus wirksamen resultierenden Einspannkkräfte, die im kalten Stillstand als mit dem Normaldruck identisch angenommen werden können, dürfen zwar durch die Rotation und die Erwärmung verändert werden, ihre Richtungsänderung gegenüber der Normalen auf die Konusfläche muss aber innerhalb des Reibungswinkels verlaufen. Wird dieser überschritten, so muss der Normaldruck vergrössert werden.

Aus Sicherheitsgründen soll der Haftreibungskoeffizient nicht grösser als etwa 0,15...0,2 angenommen werden, um auch dem Umstand Rechnung zu tragen, dass je nach Glimmer-Qualität und Bindemittel der Manchetten früher ein Gleiten innerhalb des geschichteten Isolationsmaterials eintreten kann, als an den metallischen Trennflächen.

Natürlich entsteht ein Gleiten im Konus bei der Einspannung des Lamellenverbandes zwischen die Pressringe. Dieses muss durch einen Axialdruck erzwungen werden, welcher um die axialen Komponenten aller Reibungskräfte grösser ist, als die

Axialkomponente des Normaldruckes, der dem Kommutator aufgeprägt werden soll.

Das Kriterium der Gleitsicherheit bestimmt also die minimale Grösse der Vorspannung, welche der Kommutator bei seiner Herstellung erhalten muss, und die den Ausgangswert bildet für die beschriebene Kontrolle der Elastizität nach der Methode des vorgespannten Systems.

Damit sind die Grundlagen definiert, welche bei der mechanischen Berechnung eines Kommutators zu beachten sind, ohne dass auf Einzelheiten eingegangen wurde.

Betrachten wir im Lichte dieser Forderungen die Vorschläge von *Laub*, so ist unverkennbar, dass er ihm wichtig scheinende Einzelprobleme einer sehr eingehenden Betrachtung unterzog, dabei aber andere, die quantitativ weit wichtiger sind, übergang. Er gelangt so, trotz qualitativ meist richtigen Überlegungen, zu einer Überschätzung seiner Postulate für die Mechanik des Kommutators. Das gilt zunächst für den Einfluss eines Keilwinkelfehlers des Lamellenprofils auf die radiale Verteilung des Gewölbedruckes.

Laub berechnet in seinem Zahlenbeispiel für ein Übermass der inneren Profildicke von 0,0001 cm die Gewölbedruckung am Innenrand der Lamellen zu  $p_i = 95,58 \text{ kg/cm}^2$  bei einem Gewölbedruck am Aussenrand von  $p_e = 2 \text{ kg/cm}^2$ . Diese Berechnung verstösst in dreierlei Hinsicht gegen den wirklichen Sachverhalt:

1. Die angenommenen Pressungen sind viel zu klein. Sie würden niemals ausreichen, um die Gleitsicherheit zu gewährleisten. Dazu wäre schätzungsweise ein mittlerer Gewölbedruck von mindestens  $250 \text{ kg/cm}^2$  erforderlich, wenn es sich um einen relativ langsamlaufenden Kommutator handelt, worauf die angegebenen Dimensionen hindeuten. Moderne Gewölbedruckkommutatoren dieser Grösse, die heute für Bahnmotoren gebaut werden, haben spezifische Tangentialpressungen von  $500 \text{ kg/cm}^2$  und mehr bei Umfangsgeschwindigkeiten von  $40 \text{ m/s}$  und höher.

2. Die Elastizität der Lamellenisolationen ist auch zu klein in die Berechnung gestellt. Der Elastizitätsmodul von Mikanit, der für Kommutatoren Verwendung findet, ist rund zehnmal kleiner, was die auf Grund von Messungen ermittelte Kurve nach Fig. 1 zeigt.

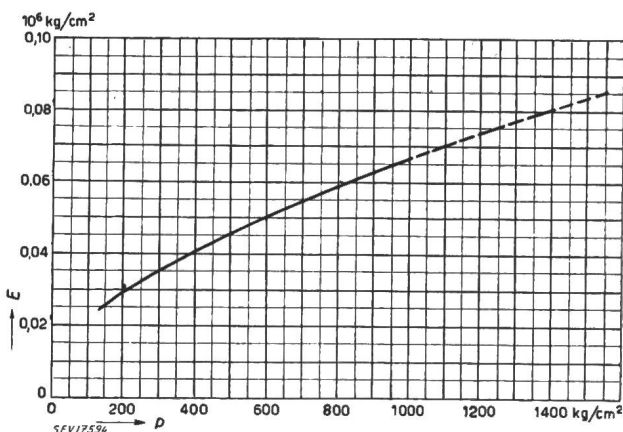


Fig. 1  
Elastizitätsmodul  $E$  von Amberit in Funktion der spezifischen Pressung  $p$  nach einer Vorpressung mit  $400 \text{ kg/cm}^2$  bei  $160 \text{ }^\circ\text{C}$

3. Kleine Abweichungen des Keilwinkels der Lamellen werden durch das angewandte Herstellungsverfahren weitgehend egalisiert. Der Lamellenverband wird dabei in kräftigen Spannringen erwärmt, kalt nachgespannt und das Ver-

fahren mehrmals wiederholt, so dass an den Stellen höheren Druckes auch eine grössere plastische Verformung des Mikankits stattfindet. Da dieser Formierungsprozess vor der Bearbeitung der Lamellen erfolgt, können Pressungen angewandt werden, welche im «Seasoning»-Verfahren mit Rücksicht auf die Schrauben und Pressringe unzulässig wären.

Setzt man die realen Werte in die Berechnung ein, so ergibt sich für den unveränderten Profilverfänger von  $\Delta = 0,0001$  cm:

Für  $p_e = 250$  kg/cm<sup>2</sup>;  $E_{mik} = 0,045 \cdot 10^6$  kg/cm<sup>2</sup>

$$K = \frac{1,21}{0,045} = 26,9$$

$$p_i = \frac{250 (1,1625 + 26,9) + 1,21 \cdot 10^6 \cdot 0,0001}{(1,021 + 26,9)} = 255 \text{ kg/cm}^2$$

Das Verhältnis der beiden spezifischen Pressungen am inneren und am äusseren Rande der Lamellen wird also

$$\frac{p_i}{p_e} = \frac{255}{250} = 1,02 \quad \text{statt} \quad \frac{95,58}{2} = 47,8$$

Für das nach den Britischen Normen maximal zulässige Übermass  $\Delta = 0,00254$  cm ergibt sich erst ein Druckverhältnis von

$$\frac{p_i}{p_e} = \frac{360}{250} = 1,44$$

Der egalisierenden Wirkung der unter Ziff. 3 genannten Vorbehandlung des Lamellenverbandes ist dabei noch gar nicht Rechnung getragen. Sie vermindert diese theoretischen Druckunterschiede längs der Lamellenhöhe auf praktisch belanglose Werte.

Wenn auch einer möglichst genauen Einhaltung des Keilwinkels durch die Kupferziehwerke alle Beachtung geschenkt werden muss, so haben doch die normenmässig tolerierten Abweichungen bei weitem nicht die grosse Bedeutung, welche ihnen *Laub* glaubt beimessen zu müssen, weil er mit viel zu kleiner Vorspannung und zu harten Zwischenisolationen rechnet. Jedenfalls erscheint ein Nachschleifen der Lamellenflanken auf die geforderte Genauigkeit, welche diejenige weit übertrifft, die vernünftigerweise von den Isolationen selber verlangt werden kann, nicht gerechtfertigt. Aus den gleichen Erwägungen ist die Berücksichtigung der geringfügigen Temperaturunterschiede innerhalb der Lamellen bei der Berechnung der Druckverteilung nur von untergeordneter Bedeutung.

Wie schon angedeutet, stellen die Pressringe relativ elastische Glieder im elastisch vorgespannten System dar, weil es Biegungs-Beanspruchungen sind, die ihre Formänderung verursachen. Diese sind in der Regel von einer Grösse, die neben den reinen Zug- und Druckdeformationen der Schraubenbolzen und Lamellen nicht vernachlässigt werden darf.

Der innere, meist mit der Kommutatorbüchse zusammengewassene Pressring ist ähnlich einem festen Flansch, der äussere dagegen ähnlich einem losen Flansch zu berechnen, wobei aber auch den Kräften Rechnung zu tragen ist, welche in der Ver-

setzung übertragen werden und sich der Ausbiegung zu widersetzen suchen.

Es ist nicht zu leugnen, dass die Einbeziehung der Pressringausbiegung die mechanische Berechnung etwas kompliziert, namentlich auch dadurch, dass sie das elastische Kräftespiel in der radialen und in der axialen Dehnungsrichtung miteinander verknüpft, das bei vollkommen steifen Pressringen unabhängig voneinander betrachtet werden könnte, solange die Gleitbedingung des Kommutators als erfüllt angesehen werden kann.

Indem der Autor die Pressringausbiegung vernachlässigt und für die Manchetten wieder einen rund zehnmal zu grossen Elastizitätsmodul einsetzt, gelangt er auf zu grosse Werte für die Bolzenbeanspruchung angesichts der kleinen zugrunde gelegten Vorspannung, welche andererseits die Ursache ist, dass er einen ungehörlich grossen Einfluss der Wärmeausdehnung der Lamellen auf den Spannungszustand errechnet. Es ist klar, dass eine grosse Vorspannung nicht nur die Gleitsicherheit verbessert, sondern auch den Einfluss sowohl der Zentrifugalkräfte, als auch der Erwärmung herabsetzt und damit den Atmungsweg des Kommutators verkleinert, was als günstig zu betrachten ist.

So ist auch der Vorschlag von *Laub*, die Bolzen aus Bronze auszuführen, um eine grössere Wärmedilatation zu erreichen, nicht ausreichend begründet. Denn die Berücksichtigung aller elastischen Formänderungen bei genügender Vorspannung gemäss den Grundsätzen, die dargelegt worden sind, führt auch hier auf Spannungsverhältnisse, welche noch gut mit Stahlbolzen zu beherrschen sind, was auch die Erfahrung bestätigt.

Adresse des Autors:

Max Andres, dipl. Ingenieur, Rebbergstr. 58, Wettingen (AG).

## «Neue Konstruktionsgrundsätze für den Bau von Kollektoren»

Von *F. L. Laub*, Buenos Aires

[Bull. SEV Bd. 40 (1949), Nr. 25, S. 988...1001]

### Berichtigung

Im erwähnten Aufsatz haben sich einige Druckfehler eingeschlichen, die wir hier berichtigen; der aufmerksame Leser wird dies bereits bei der Lektüre getan haben.

1. Seite 991 lautet Gleichung (3) richtig:

$$\tau_K - \tau'_K = 2 h_0 \operatorname{tg} \frac{\gamma_0}{2}$$

2. Seite 995, Spalte links, zweitletzter Abschnitt, heisst die erste Ungleichung richtig:

$$(\Delta t - k \Delta t) \leq \frac{2616 \cdot 0,0001 \cdot 45}{(1,1625 + 1,021)}$$

3. Seite 996, Spalte links, in der vierten Formel von oben, lautet der erste Klammerausdruck richtig:

$$(1 + \alpha \Delta t)$$

4. Seite 998 muss Fig. 7 um 180° gedreht werden.

5. Seite 1000, Spalte rechts, lautet die etwa in der Mitte (nach dem Wort «Tabellenangaben») stehende Gleichung richtig:

$$\Sigma M = K \operatorname{tg} \beta (p_i + p_e) (b_e - b_i) \frac{l}{2} = 32\,229 \text{ kg}$$