

Zeitschrift:	Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber:	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band:	89/90 (1927)
Heft:	23
Artikel:	Méthode purement optique de détermination des tensions intérieures se produisant dans les constructions
Autor:	Favre, Henry
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-41816

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: 21.02.2026

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

INHALT: Méthode purement optique. — Universal-Antrieb „Winterthur“ für elektrische Lokomotiven. — Wettbewerb für die Schweiz. Landesbibliothek in Bern. — Die meterspurigen Alpenbahnen der Schweiz. — Mitteilungen: Eine internationale Aussprache im Eisenbetonfach. Der Schweizer Verein Autostrasse Basel-italienische Grenze. Neues Pyrometer zur Messung von Oberflächen-Temperaturen. Zum Direktor der Wasserversorgung der Stadt Zürich. Eidgen. Technische Hochschule. Vortrag

über Betriebsführung. Britische Industriemesse für Bauwesen und verwandte Gebiete. Zentralamt für internationalen Eisenbahntransport. — Korrespondenz: Ein verhüter Balkoneinsturz. — Wettbewerbe: Neubau für die Ersparniskasse Biel. Strassen-Unterführungsprojekt bei der Station Küsnacht. Bezirkspital Thierstein und Altersheim Dorneck-Thierstein. — Literatur. — Vereinsnachrichten: Schweizer. Ing.- und Arch.-Verein. Basler Ing.- und Arch.-Verein. Zürcher Ing.- und Arch.-Verein.

Méthode purement optique
de détermination des tensions intérieures se produisant dans les constructions.

Par HENRY FAVRE, ingénieur E. P. Z., Zurich.

§ 1. INTRODUCTION.

Il est de première nécessité pour l'ingénieur de pouvoir déterminer le jeu des forces intérieures qui sollicitent ses constructions. La Théorie générale de l'élasticité, fondée sur le Principe de l'indépendance des effets des forces quant aux déformations, ne lui permet de résoudre qu'un nombre très restreint de problèmes. Des théories approchées, connues sous le nom de Résistance des matériaux, sont basées sur un trop grand nombre d'hypothèses incertaines pour inspirer confiance.

L'ingénieur a dès lors senti la nécessité d'utiliser l'expérience directe, soit pour remplacer l'intégration des équations différentielles auxquelles conduit la Théorie générale de l'élasticité, soit pour vérifier les hypothèses et les résultats des théories de la Résistance des matériaux.

M. Mesnager a donné en 1900 une méthode permettant de calculer les tensions intérieures se produisant dans des modèles transparents de constructions toutes les fois qu'il s'agit d'un état de sollicitation à deux dimensions.¹⁾ Il a également montré qu'en s'appuyant sur une remarque due à Maurice Lévy²⁾ il est facile de calculer les tensions intérieures de la construction elle-même lorsqu'on a préalablement déterminé celles qui se produisent dans un modèle de cette construction. La méthode de M. Mesnager a été appliquée depuis 1900 avec succès à la résolution d'un grand nombre de problèmes, par son auteur lui-même³⁾, et par d'autres ingénieurs.⁴⁾

Cette méthode consiste à déterminer, par des expériences faites sur un modèle transparent et isotrope de la construction :

1° A l'aide de la lumière polarisée,

a) la direction des tensions principales σ_1 et σ_2 en un nombre quelconque de points.

b) la valeur de la différence $(\sigma_1 - \sigma_2)$ en ces mêmes points.

2° A l'aide de mesures de déformation (dilatation latérale), la valeur de la somme $(\sigma_1 + \sigma_2)$ des tensions principales aux points envisagés.

Connaissant $(\sigma_1 - \sigma_2)$ et $(\sigma_1 + \sigma_2)$ on calcule facilement σ_1 et σ_2 .

Il ne nous est pas possible d'exposer ici en détail cette méthode et les belles applications qui en ont été faites. Nous renvoyons le lecteur aux articles de M. Mesnager dans les Annales des Ponts et Chaussées et La Technique Moderne, et à ceux de M. Coker dans l'Engineering (loc. cit.).⁵⁾

Ayant à organiser, sous la haute direction de M. le Prof. Dr. F. Tank, le nouveau „Laboratoire de détermina-

¹⁾ Mesnager. La déformation des solides. (Congrès international des méthodes d'essai des matériaux de construction, Paris, 1900, T. I, p. 149.)

²⁾ Maurice Lévy. (Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, 2 Mai 1898.)

³⁾ Citons, parmi les nombreuses publications de ce savant, les trois plus importantes: Contribution à l'étude de la déformation élastique (Annales des Ponts et Chaussées, 1901, T. IV, p. 129). — Détermination complète sur un modèle réduit des tensions qui se produiront dans un ouvrage. (Annales des Ponts et Chaussées, 1913, T. IV, p. 135.) — Les Tensions intérieures rendues visibles. (La Technique Moderne, 15 Mars 1924.)

⁴⁾ En tout premier lieu M. Coker. Citons principalement ses articles parus dans l'Engineering les 6 Janvier, 21 et 28 Avril 1911, 25 Février 1916, 20 et 27 Février 1920, 7 Janvier 1921, 6 Janvier 1922, 19 Octobre 1923.

tion optique des tensions intérieures“ de l'Ecole Polytechnique de Zurich, nous croyons utile de signaler la méthode que nous mettons actuellement au point, cette méthode différente sensiblement de celle utilisée depuis 1900.

Nous établirons tout d'abord, par deux voies différentes, deux relations fondamentales concernant la biréfringence accidentelle des plaques planes transparentes soumises à un état de sollicitation à deux dimensions au point de vue des tensions (§ 2 et § 3). Nous exposerons ensuite la „Méthode purement optique“ (§ 4), en indiquant comment on résoud ses équations (§ 5), et comment on l'applique⁶⁾ (§ 6). Pour terminer nous donnerons une première application de la méthode (§ 7).

§ 2. DEUX RELATIONS FONDAMENTALES.

PREMIÈRE DÉMONSTRATION.

Considérons une plaque plane mince, d'épaisseur constante que nous choisissons pour l'instant égale à l'unité (figure 1). Nous supposons cette plaque faite d'une matière transparente, homogène et isotrope.

Soient:

E et ν les constantes élastiques de la matière en question (module d'Young et coefficient de Poisson).

n l'indice de réfraction⁷⁾ de cette matière lorsqu'elle n'est soumise à aucun effort.

Supposons tout d'abord que la plaque ne soit sollicitée par aucune force extérieure. Dans ces conditions, un rayon polarisé SOS' (fig. 1) arrivant en O sur la plaque sous une incidence nulle et vibrant parallèlement à la direction Δ traverse cette plaque sans modifier la direction de ses vibrations: à l'émergence, nous aurons donc encore un rayon polarisé $O'S'$ vibrant parallèlement à Δ/Δ' .

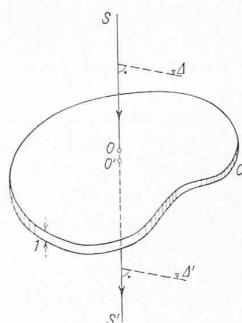


Fig. 1. Plaque non sollicitée
SOS' rayon polarisé traversant
la plaque sous une incidence
nulle et vibrant parallèlement
à Δ/Δ' .

Si maintenant nous appliquons à notre plaque sur son bord c un système de forces en équilibre $P_1 P_2 \dots P_n$ situées toutes dans le plan équidistant des deux faces, elle prendra un état de sollicitation parfaitement défini, et cet état sera à deux dimensions au point de vue des tensions⁸⁾ (figure 2). En chaque point tel que O tout élément de

⁵⁾ Il vient également de paraître sur cette méthode un excellent mémoire de M. Delanghe. (Génie Civil des 10, 17 et 24 Septembre 1927.) Voir aussi: Heymans, La Photo-élasticité. (Bulletin de la Société Belge des Ingénieurs et des Industriels, 1921, T. II, p. 99 à 214) — Louis Baes, La Photo-élasticité. (Conférence du 22 Novembre 1924 publiée à Bruxelles en 1925.) — Marcotte (Arts et Métiers, Février à Mai 1927)

⁶⁾ Cette méthode, comme celle de M. Mesnager, ne permet de résoudre que les problèmes d'élasticité à deux dimensions dans lesquels le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν sont constants.

⁷⁾ Nous supposerons, dans tout ce qui va suivre, qu'il s'agit de lumière monochromatique de longueur d'onde bien déterminée λ ; l'indice n se rapporte donc à cette longueur d'onde.

⁸⁾ Nous utilisons la théorie et le langage de Fresnel.

⁹⁾ Pour que cet état de sollicitation soit rigoureusement à deux dimensions au point de vue des tensions, il faut que chaque force P soit répartie uniformément le long d'une génératrice du cylindre constituant le bord c .

Appliquons cette théorie en nous basant sur le Cours de Physique de M. Bouasse (loc. cit.). Les premières notes qui suivent sont tirées de ce livre. Nous avons, pour la facilité de notre exposition, apporté quelques modifications aux notations et au texte.

„Hypothèse: la matière non sollicitée est isotrope. L'ellipsoïde des indices se réduit donc à la sphère:

$$v^2(x^2 + y^2 + z^2) = 1$$

v étant la vitesse de propagation de la lumière dans le milieu non déformé."

„Après déformation l'ellipsoïde est représenté, les axes de coordonnées étant convenablement choisis, par l'équation:

$$A^2 x^2 + B^2 y^2 + C^2 z^2 = 1$$

A, B, C étant les vitesses de propagation principales après déformation."

„La théorie de l'élasticité admet que les phénomènes dus à la déformation sont des fonctions linéaires des six quantités $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ qui définissent la déformation. Relativement à un système d'axes cartésiens x, y, z , et en appelant u, v, w les composantes du déplacement d'un Point $P(x, y, z)$ suivant ces axes, nous avons:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}; & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}; & \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}; & \gamma_{yz} &= \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \end{aligned}$$

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ sont les déformations linéaires spécifiques; $\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ les déformations angulaires."

„Pour les directions principales de déformation les γ disparaissent, appelons $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ les déformations linéaires spécifiques correspondantes. Par raison de symétrie, les axes de l'ellipsoïde des indices coïncident en chaque point avec les directions principales de déformation en ce point."

„Nous poserons, conformément à ces hypothèses:

$$A^2 - v^2 = a_{11} \varepsilon_1 + a_{12} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

et deux équations symétriques. A cause de la petitesse des coefficients a_{11} et a_{12} nous pouvons extraire la racine par approximation. Soit $a_{12} = 2 \frac{p}{v} v$, $a_{11} = 2 \frac{q}{v} v$, il vient:

$$A = v + q \varepsilon_1 + p (\varepsilon_2 + \varepsilon_3)$$

$$B = v + q \varepsilon_2 + p (\varepsilon_1 + \varepsilon_3)$$

$$C = v + q \varepsilon_3 + p (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$$

„Soient V la vitesse de la lumière dans le vide, n l'indice de réfraction de la matière non sollicitée, n_1, n_2, n_3 les indices principaux après la déformation.¹⁴⁾ Nous avons:

$$V = n v = n_1 A = n_2 B = n_3 C$$

$$\frac{V}{n_1} - \frac{V}{n} = \frac{n - n_1}{n n_1} V = q \varepsilon_1 + p (\varepsilon_2 + \varepsilon_3),$$

et à cause de la petitesse des coefficients p et q :

$$n - n_1 = n \left(\frac{q}{v} \varepsilon_1 + \frac{p}{v} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \right) \quad \dots \quad (4)$$

On obtient des formules symétriques pour n_2 et n_3 .

„Les quantités $\frac{q}{v} = \frac{a_{11}}{2 v^2}$ et $\frac{p}{v} = \frac{a_{12}}{2 v^2}$ sont des grandeurs numériques. Ce sont les paramètres qui règlent le phénomène."

„D'une manière générale, chaque élément d'un corps isotrope est transformé en biaxe. Les formules précédentes satisfont au principe de superposition formulé par Brewster: quand on impose au milieu des déformations consécutives puis simultanées, l'effet produit par ces dernières est la somme des effets résultant des impositions successives. Cela revient à dire que les formules qui donnent la variation des indices sont linéaires par rapport aux six quantités qui définissent la déformation."

Nous allons maintenant appliquer la formule (4), donnée par la théorie de Neumann, au calcul de δ_1 et δ_2 .

Considérons comme précédemment une plaque plane mince faite d'une matière transparente, homogène et isotrope. Soient E et v les constantes élastiques, $n, \frac{p}{v}$ et $\frac{q}{v}$ les constantes optiques de la matière de la plaque. Soit encore e (et non plus 1) son épaisseur (figure 5).

Appliquons au bord c de notre plaque un système de forces en équilibre P_1, P_2, \dots, P_n situées toutes dans le plan équidistant des deux faces. Nous aurons alors un état de sollicitation à deux dimensions au point de vue des tensions.

A tout point tel que O correspondent deux directions orthogonales 1 et 2 qui sont celles des tensions principales σ_1 et σ_2 agissant en ce point.

Les directions principales de déformation en O sont les directions 1 et 2 (toutes deux parallèles aux faces de la plaque) et la direction 3 perpendiculaire à 1 et 2 .

Les déformations linéaires spécifiques relatives aux axes $1, 2, 3$ ont ici pour expression:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \frac{1}{E} (\sigma_1 - v \sigma_2); \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E} (\sigma_2 - v \sigma_1); \\ \varepsilon_3 &= -\frac{v}{E} (\sigma_1 + \sigma_2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Supposons qu'un rayon polarisé SO arrive sur la plaque en O sous une incidence nulle, en vibrant parallèlement à la direction 1 . Que la plaque soit sollicitée par le système P ou non, ce rayon la traversera sans modifier la direction de ses vibrations: le rayon émergent $O'S'$ vibrera encore parallèlement à la direction 1 . Seulement, par la mise en charge, le rayon $O'S'$ subit une variation de marche: soit δ_1 cette variation.

Pour calculer δ_1 considérons deux points D et D' situés de part et d'autre de la plaque sur le rayon $SOO'S'$ (figure 6). Soit l la distance géométrique DD' .

Le chemin optique L du rayon $SOO'S'$ relatif à l'espace géométrique DD' a pour expression, avant la mise en charge:

$$L = l + (n - 1)e \quad \dots \quad (6)$$

Par suite de la mise en charge, L varie de dL . Diférentions l'équation (6), en remarquant que seuls n et e varient.

$$dL = (n - 1) de + e dn.$$

Or $\delta_1 = -dL$. Nous avons donc:

$$\delta_1 = -[(n - 1) de + e dn] \quad \dots \quad (7)$$

Nous pouvons facilement calculer de et dn :

$$de = \varepsilon_3 e \text{ et en vertu de la formule (4):}$$

$$dn = n_1 - n = -n \left(\frac{q}{v} \varepsilon_1 + \frac{p}{v} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \right);$$

d'où, en substituant dans la formule (7):

$$\delta_1 = e \left[- (n - 1) \varepsilon_3 + n \left(\frac{q}{v} \varepsilon_1 + \frac{p}{v} (\varepsilon_2 + \varepsilon_3) \right) \right].$$

En introduisant les valeurs de $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ données par les équations (5), il vient:

$$\delta_1 = e \frac{1}{E} \left((n - 1)v + n \frac{q}{v} - 2n \frac{p}{v} \right) \sigma_1 + e \frac{1}{E} \left((n - 1)v + (1 - v) n \frac{p}{v} - n v \frac{q}{v} \right) \sigma_2 \quad \dots \quad (8)$$

Si le rayon incident SO , au lieu de vibrer parallèlement à 1 , vibre parallèlement à 2 , on obtient pour la variation de marche δ_2 du rayon $O'S'$ vibrant parallèlement à 2 :

$$\delta_2 = e \left[- (n - 1) \varepsilon_3 + n \left(\frac{q}{v} \varepsilon_2 + \frac{p}{v} (\varepsilon_1 + \varepsilon_3) \right) \right];$$

¹⁴⁾ $p, q, v, n, n_1, n_2, n_3$, etc. sont relatifs à une longueur d'onde déterminée λ .

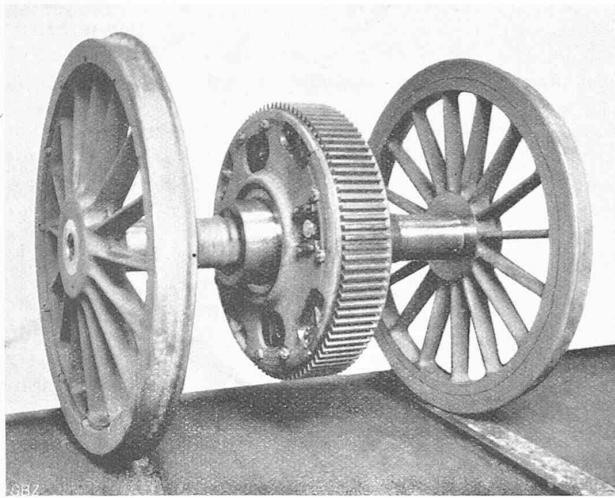


Abb. 4. Triebadsatz mit als Kupplungs-Gehäuse ausgestaltetem Zahnrad.

d'où, en introduisant comme précédemment $\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3$ données par (5):

$$\delta_2 = e \frac{1}{E} \left((n-1) r + (1-r) n \frac{p}{v} - n r \frac{q}{v} \right) \sigma_1 + e \frac{1}{E} \left((n-1) r + n \frac{q}{v} - 2 n r \frac{p}{v} \right) \sigma_2 . \quad (9)$$

Enfin si le rayon SO arrive en O sur la plaque en vibrant parallèlement à une direction A qui ne coïncide ni avec 1 ni avec 2, le rayon émergent $O'S'$ sera, avant mise en charge un rayon polarisé vibrant parallèlement à A , après mise en charge un rayon composé de deux vibrations de support $O'S'$ dont l'une vibre parallèlement à 1 et l'autre parallèlement à 2. Les différences de marche δ_1 et δ_2 de ces deux vibrations relatives à la vibration du rayon $O'S'$ avant mise en charge, sont données par les formules (8) et (9).

Posons

$$\frac{1}{E} \left((n-1) r + n \frac{q}{v} - 2 n r \frac{p}{v} \right) = a ,$$

$$\frac{1}{E} \left((n-1) r + (1-r) n \frac{p}{v} - n r \frac{q}{v} \right) = b ;$$

nous avons finalement:

$$\begin{cases} \delta_1 = a e \sigma_1 + b e \sigma_2 & \dots \dots \dots (1') \\ \delta_2 = b e \sigma_1 + a e \sigma_2 & \dots \dots \dots (2') \end{cases}$$

où a et b sont des constantes dépendant de la matière de la plaque et de la longueur d'onde utilisée.

Les relations (1') et (2') sont exactement les mêmes que les relations (1) et (2) trouvées au § 2. (à suivre)

Universal-Antrieb „Winterthur“ für elektrische Lokomotiven.

Von Ing. J. BUCHLI, Winterthur.

Vor kurzer Zeit brachte die Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik (SLM) den mechanischen Teil einer elektrischen Lokomotive zur Ablieferung, die in ihrem konstruktiven Aufbau verschiedene Neuerungen besitzt, und auch in bezug auf die hohen Anforderungen, die der Betrieb an sie stellt, interessant ist. Die Lokomotive (Abbildungen 1 und 2), über die hier bereits kurz berichtet worden ist¹⁾, ist für die Strecke Bombay-Paona-Igatpuri der Great Indian Peninsula Railway bestimmt, die mit 1500 Volt Gleichstrom betrieben wird; sie muss bei den Abnahmever suchen die Geschwindigkeit von 137 km/h erreichen, eine Bedingung, die bis heute von keiner elektrischen Schnellzuglokomotive gefordert wurde, und die besonders an die mechanische Gestaltung der Maschine ausserordentliche Anforderungen stellt.

¹⁾ Vgl. Band 89, Seite 174 (26. März 1927).

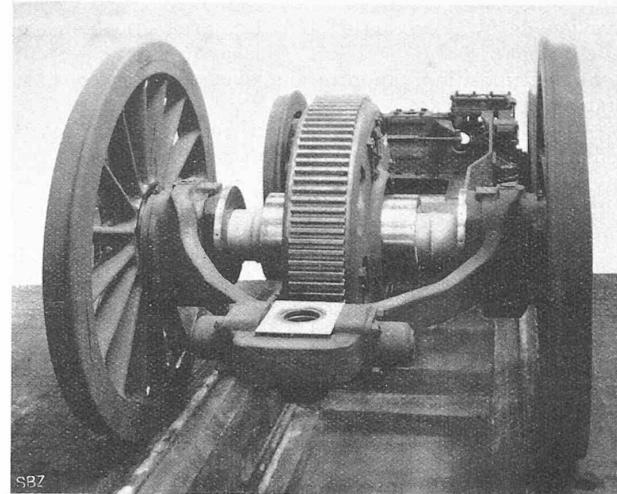


Abb. 6. Sogenanntes „Java“-Drehgestell.

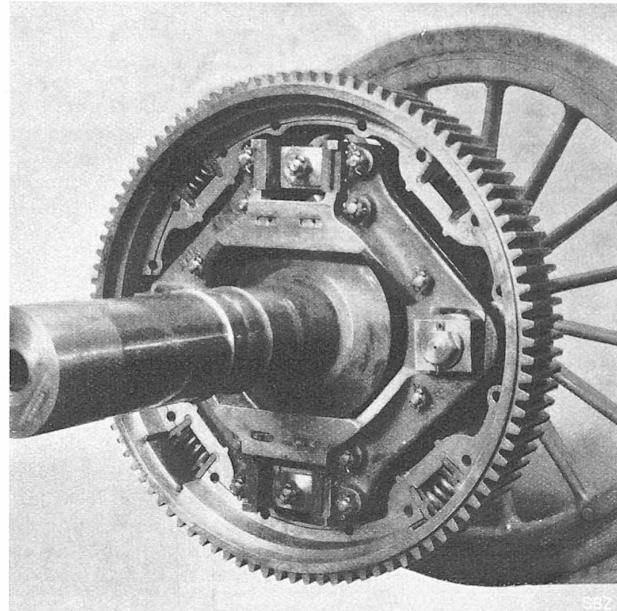


Abb. 5. Blick in das Innere der Kreuzkupplung der S. L. M.

Für den Schnellzugsdienst sind vorgängig der Be schaffung einer grösseren Anzahl drei Probekomotiven in Auftrag gegeben worden. Es ist kein Zufall, dass daran drei Schweizerfirmen direkt oder indirekt beteiligt sind, denn die Elektrifizierung der S. B. B. hat der schweizerischen Maschinenindustrie Gelegenheit gegeben, in reicher Masse Erfahrungen im Bau von elektrischen Fahrzeugen zu sammeln, sodass sie als Lieferanten von Qualitätserzeugnissen ihre Stellung im internationalen Wettbewerb weiter befestigen konnten.

Ein Produkt dieser reichen Erfahrung ist der *Universal-Antrieb „Winterthur“*, mit dem die eingangs erwähnte Schnellzuglokomotive ausgerüstet ist.

Der Einzelachs antrieb als solcher nimmt, dank seiner anerkannten Vorteile, wenigstens bei Personen- und Schnellzuglokomotiven, eine dominierende Stellung ein. Es bestehen verschiedene Systeme solcher Antriebe, die sich durchaus bewährten, aber weitere Verbesserungen nicht ausschliessen. Der Universal-Antrieb „Winterthur“ wurde gebaut mit dem Zweck, die günstigen Eigenschaften des Systems beizubehalten, unter Aufhebung der Schwächen der bestehenden Ausführungen und unter Hinzufügung weiterer Vorteile besonders betriebstechnischer Natur. Er ist durch zwei hauptsächliche Merkmale gekennzeichnet: durch die koaxiale Lage der Motoren über den Triebräder sym-