

Zeitschrift: Schweizer Pioniere der Wirtschaft und Technik
Herausgeber: Verein für wirtschaftshistorische Studien
Band: 66 (1995)

Artikel: Ludwig von Tetmajer Przerwa (1850-1905) : Gründer der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA, Pionier der Materialprüfung und-forschung
Autor: Zielinski, Jan
Kapitel: Von Formeln und Materialien
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1091172>

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: 24.04.2026

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

Von Formeln und Materialien

Die «Tetmajer-Gerade» und ihre wissenschaftlich-technische Bedeutung

von Hansjakob Schindler

Unter einer Zugkraft lässt sich ein schlanker Stab bis zur Erreichung der Zugfestigkeit des Materials belasten, während unter einer Druckkraft schon bei weit geringeren Lasten ein Versagen durch seitliches Ausknicken des Stabes möglich ist. Die mathematische Formulierung und exakte Lösung dieses wichtigen Stabilitätsproblems der Elastostatik gelang Anfang des 18. Jahrhunderts dem Basler Leonhard Euler. Beispielsweise für einen beidseitig gelenkig gehaltenen, durch eine zentrische axiale Druckkraft P belasteten Stab der Länge l_k (Fig. A) lautet die Eulersche Knickformel

$$(a) \quad \sigma_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot i^2}{l_k^2}$$

Hierin bezeichnet σ_k die Knickspannung, E den Elastizitätsmodul des Materials und i den Trägheitsradius, der den Biege­widerstand des Stabquerschnitts charakterisiert. Die Eulersche Knickformel ergibt sich aus der Integration der Differentialgleichung der linear-elastischen Biegelinie eines Stabes und gilt somit streng genommen nur für den hypothetischen Fall eines ideal elastischen Materials. Reale Werkstoffe verhalten sich jedoch nur in einem beschränkten Spannungsbereich $\sigma < \sigma_p$ rein linear-elastisch, das heisst dem Hooke'schen Gesetz $s=Ee$ entsprechend (Fig. B): Oberhalb der sogenannten Propor-

tionalitätsgrenze σ_p beginnt – bedingt durch mikroskopische und makroskopische Eigenspannungen sowie durch geometrische Imperfektionen – die Spannungs-Dehnungskurve zunehmend abzuflachen und sich damit von der idealen Hooke'schen Geraden zu entfernen, um schliesslich bei der Fliessspannung σ_0 praktisch horizontal zu verlaufen. Es liegt auf der Hand, dass sich dieses Materialverhalten in der Knickformel niederschlagen muss, sobald σ_k die Proportionalitätsgrenze σ_p übersteigt oder gemäss Gleichung (a), wenn der sogenannte Schlankheitsgrad des Stabes $\lambda=l_k/i$ eine gewisse Grenzschlankheit λ^* unterschreitet. Als Mathematiker interessierte sich Euler allerdings wenig für die entsprechenden materialbedingten Grenzen des elastischen Knickens. Erst Young um 1810 und einige Jahre später Navier bemerkten die entsprechenden prinzipiellen Unzulänglichkeiten der Eulerschen Knickformel. Für eine fundierte Korrektur fehlten den beiden jedoch die mathematischen und experimentellen Mittel. Eine vertiefte wissenschaftliche Behandlung dieser Thematik setzte, motiviert durch verschiedene Schadenfälle vor allem auf dem Gebiet des Stahlbrückenbaus, erst am Ende des 19. Jahrhunderts ein. Von grundlegender Bedeutung auf theoretischem Gebiet waren vor allem die Arbeiten von Engesser und Jasinski. Sie führten zur heute gesicherten Erkenntnis, dass im Bereich $\lambda < \lambda^*$ der E-Modul in der Eulerschen Knickformel (a) durch den sogenannten Tangentenmodul $d\sigma/d\varepsilon$, das heisst die Steigung

der spannungsabhängigen Steigung der Spannungs-Dehnungskurve, zu ersetzen ist.

Nach den ersten, durch seinen Tod unterbrochenen Druckversuchen von Bauschinger wurden auf experimentellem Gebiet die Arbeiten von Tetmajer wegweisend. Tetmajer kam aufgrund seiner umfangreichen Knickversuche zum Schluss, dass zur Berechnung der Knickspannung für Stäbe mit geringem Schlankheitsgrad die Eulersche Hyperbel (a) durch eine die Punkte (λ^*, σ_p) und $(0, \sigma_0)$ verbindende Gerade zu ersetzen sei (Fig. C), was zu folgendem Knickgesetz führte:

(b)

$$\sigma_k(\lambda) = \sigma_0 - (\sigma_0 - \sigma_p) \cdot \frac{\lambda}{\lambda^*} \quad \text{für } \lambda < \lambda^*$$

$$\sigma_k(\lambda) = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2} \quad \text{für } \lambda > \lambda^*$$

Bei σ_0 , σ_p und λ^* handelt es sich um materialabhängige Parameter, deren Werte für die damals gebräuchlichen Konstruktionswerkstoffe Schweiss-

eisen, Stahl und Gusseisen von Tetmajer angegeben wurden. Diese 1886 publizierte und als «Tetmajer-Gerade» weltweit bekannt gewordene Modifikation des Eulerschen Knickgesetzes kam sogleich auch in der Praxis zur Anwendung. Wie im folgenden am Beispiel der Schweiz aufgezeigt, bildete sie bis zu den 70er Jahren unseres Jahrhunderts die Grundlage zur Bemessung von Druckstäben im Stahlbau.

Vorsehen mit einem (aus heutiger Sicht sehr vorsichtig anmutenden) Sicherheitsfaktor von etwa 4, fanden die Tetmajer-Geraden schon 1892, ein Jahr nach der Veröffentlichung seiner im Anschluss an den Brückeneinsturz von Münchenstein durchgeführten Versuche, Eingang in einer bundesrätlichen «Verordnung betreffend Berechnung und Prüfung der eisernen Brücken- und Dachkonstruktionen auf schweizerischen Eisenbahnen», einer damals verbindlichen Konstruktionsrichtlinie und Submissionsgrundlage für Eisenbahnbauten. In praktisch unveränderter, den verbesserten Stahlqualitäten mit einer etwas höheren zulässigen Beanspruchung

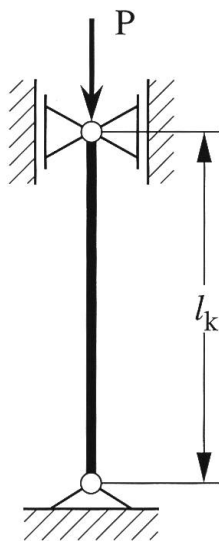


Fig. A:
Stab unter zentraler Druckkraft P

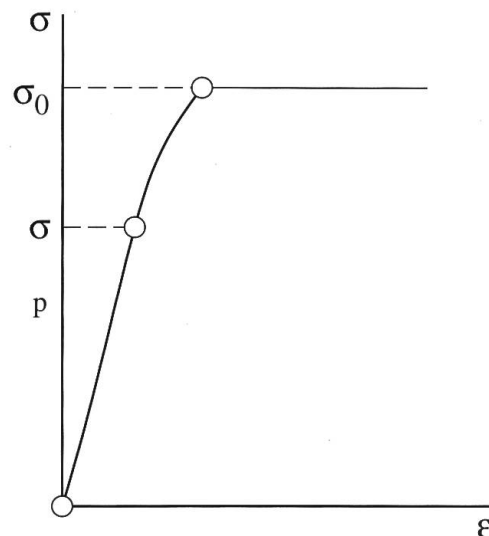


Fig. B:
Typisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines metallischen Werkstoffs

Mittheilungen
 der Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien
 am eidgen. Polytechnikum in Zürich.

4. Heft:

Methoden & Resultate
 der Prüfung der
Festigkeitsverhältnisse des Eisens und anderer Metalle.

Zusammengestellt von

L. Tetmajer

Ingenieur, Professor am eidgen. Polytechnikum, Vorsteher der Anstalt
 zur Prüfung von Baumaterialien, etc.

Selbst-Verlag der Eidg. Festigkeits-Anstalt.

ZÜRICH
 Druck von F. Lohbauer, Rämistrasse 12
 1890.

Rechnung tragenden Form erschien sie 1913 in der bundesrätlichen «Verordnung betreffend Berechnung und Untersuchung der eisernen Brücken und Hochbauten der der Aufsicht des Bundes unterstellten Transportanlagen», obschon in der Zwischenzeit mit den theoretischen Arbeiten von Engesser und v. Karman einige weitere wichtige Erkenntnisse zu verzeichnen waren. Auch noch in den früheren Ausgaben der SIA-Stahlbaunormen SIA 161 (Entwurf 1946, Ausgabe 1956 und 1974) wird das Knicken auf der Basis der Tetmajer-Geraden behandelt. Hier wurden die klassischen Ansätze insofern etwas modifiziert, als der Einfluss möglicher Exzentrizitäten des Lastangriffs mitberücksichtigt wurde. Erst in den neueren Ausgaben von SIA 161 (ab 1979) wurde die Tetmajer-Gerade von verfeinerten, die makroskopischen Eigenspannungen und geometrische Imperfektionen berücksichtigenden Knicknachweisen abgelöst.

Mitteilungen der Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien, 4. Heft, 1890

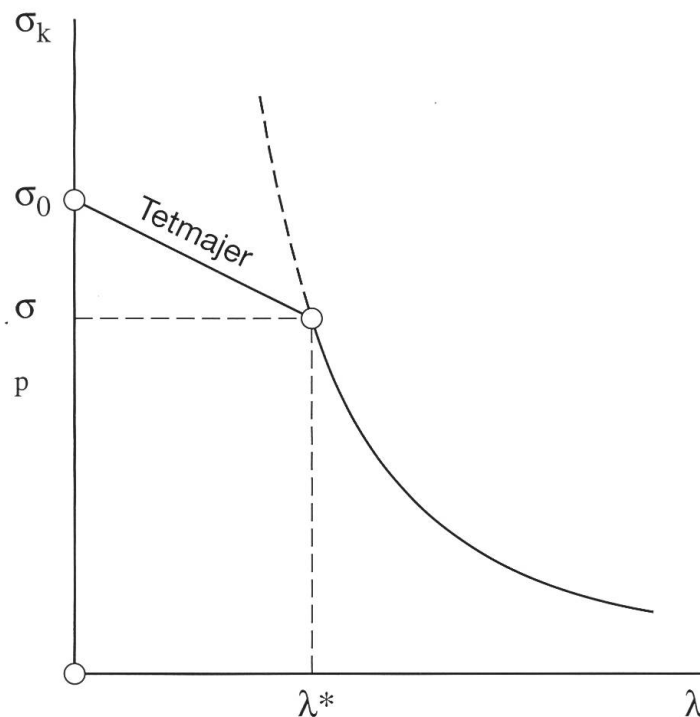


Fig.C:
 Eulersche Hyperbel mit Tetmajer-Geraden

DIE
BAUMECHANIK.

AUF GRUNDLAGE DER ERFAHRUNG

BEARBEITET

VON

L. TETMAJER

DIPL. INGENIEUR, PROFESSOR AM SCHWEIZ. POLYTECHNIKUM,
DIRECTOR DER EIDGEN. FESTIGKEITSANSTALT, etc.

DAS RECHT DER UEBERSETZUNG IN FREMDE SPRACHEN
BLEIBT VORBEHALTEN.



ZÜRICH.
DRUCK UND VERLAG VON ZÜRCHER UND FURRER.
1888.

«Die Baumechanik / auf Grundlage der Erfahrung / bearbeitet von L. Tetmajer, Dipl. Ingenieur, Professor am Schweiz. Polytechnikum, Director der Eidg. Festigkeitsanstalt, etc. ... Zürich, 1888» Dieses seinem Vater gewidmete mehrteilige Fachbuch Tetmajers war ein über mehrere Jahrzehnte weit über die Schweiz hinaus verbreitetes Standardwerk für Bauingenieure und Konstrukteure

**Eisen und Flusseisen als
Konstruktionsmaterial**
von Ulrich Morf

Als Ludwig Tetmajer an der «Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien» am Schweizer Polytechnikum wirkte, war auch eine aktive Zeit für die Stahlhersteller und für die Walzwerke. Eine einschlägige Publikation der damaligen EMPA mit dem Titel «Methoden und Resultate der Prüfung von Eisen und Stahl und anderen Metallen» zeigt das damals in vielen Labors in Europa bearbeitete Forschungsgebiet der Stahleentwicklung, Bauteilforschung und Werkstoffprü-

fung. Ausgedehnte Versuchsreihen wurden mit den neuen Flussstählen nach dem Siemens-Martin- und Thomas-Verfahren durchgeführt in Gegenüberstellung mit den Blechen und Profilen aus dem sogenannten Schweisseisen. Schweisseisen oder «Puddleisen», nach dem 1824 in Deutschland eingeführten Puddle-Verfahren im Herdofen geschmolzen, wurde damals auch im Eisenbahnbau eingesetzt.

Bei den damaligen Fachdiskussionen der Werkstoffwissenschaftler (unter anderem Bauschinger, Tetmajer, Wöhler) kamen bereits Begriffe für das spezifische Arbeitsauf-



*Mitteilungen der
Materialprüfungs-
Anstalt, 8. Heft, 1896*

nahmevermögen zur Anwendung. Insbesondere die Versuche an Eisenbahnmaterial führten immer wieder zu europäischen Fachdisputen. So war die «Probeentnahme für Zerreissversuche» an Schienenmaterial vermutlich durch Tetmajer relativiert worden mit dem Satz «... zur Aufklärung der Widersprüche der Zerreissproben scheint es viel ratsamer, sachlich ungleich correcter die Schiene selbst hinsichtlich ihres Verhaltens gegen lebendige Kräfte, insbesondere Schlag- und Stosswirkung gründlich zu untersuchen». Bei der damaligen Konkurrenzlage zwischen den Stahlwerken waren auch Verarbeitbarkeits-

kriterien der neuen Generation von «nichthärtbaren» (=niedriggekohlten) Flussstählen zur Bewertung beigezogen worden wie Schweissbarkeit, Stanzbarkeit und Zähigkeit. Dabei hatte Tetmajer vermutlich bereits Visionen einer Spröbruchprüfung. In diesem Sinn ist auch die Gegenüberstellung der «Arbeitsdiagramme der Zerreissungsproben» am Flansch und Steg eines DNP-19-Profiles aus der erwähnten Publikation zu verstehen.

In der nachfolgenden Zusammenstellung wird mit den damaligen und heutigen Begriffen (in Klammern) die erweiterte Auswertung der Zugversuche mit den damaligen Qualitätskoeffizienten vorgestellt. Mit dieser Art der Charakterisierung hatte die Anstalt Tetmajers Tausende von Proben geprüft und Schweisseisen, Flussstähle, Roheisen, aber auch Geschützbronzes auf ihre Eignung begutachtet:

*Daten des Zugversuchs mit
Auswertung des Spannungs-
Dehnungs-Diagramms:*

- Zugfestigkeit β (Rm), Streckgrenze ρ (Re)
- Dehnung nach Bruch λ ($A = \Delta l/l$, am 100-mm-Stab)
- Form-Völligkeitskoeffizient η des Spannungs-Dehnungsdiagramms
- Kontraktion φ (%), auch Einschnürung an Bruchstelle genannt
- spezifische Arbeitskapazität
 $\alpha = \eta \cdot \beta \cdot (\Delta l/l)$

Qualitätskoeffizienten:

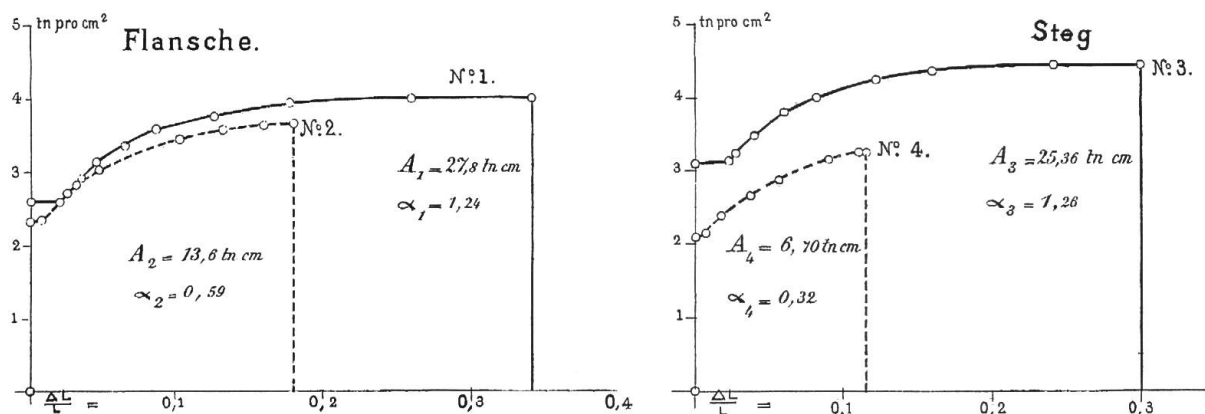
- Qualitätskoeffizient nach Tetmajer $c = \beta \cdot \lambda$ als Mass für das spezifische plastische Tragverhalten (verwand mit α siehe oben)
- Qualitätskoeffizient nach Wöhler $\beta + \varphi$ (in kg/mm^2 und %) als empirisches technologisches Qualitätsmerkmal

ARBEITSDIAGRAMME DER ZERREISSUNGSPROBEN

D. N. P. № 19.

Ungeschweißtes Material.

D. N. P. № 19.



«Arbeitsdiagramme der Zerreißungsproben»:

Erschienen als Tafel IV; Fig. No.1 und Fig.No.3 in: «Mittheilungen der Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien am eidg. Polytechnikum in Zürich»; Heft 3: Methoden und Resultate der Prüfung von Eisen und Stahl und anderer Metalle. Zusammengestellt von L. Tetmajer, Ingenieur, Professor am eidg. Polytechnikum, Vorstand der Anstalt zur Prüfung von Baumaterialien etc., Zürich (1886)

Die Qualitätskoeffizienten waren seinerzeit Neukreationen, deren Wert aber von den beiden Autoren bezüglich ihrer Wissenschaftlichkeit gegenseitig in Frage gestellt wurde. Der c-Koeffizient nach Tetmajer ist immerhin im Bezug zur spezifischen Arbeitskapazität.

Aluminium im Zeitraum 1880–1905

von Olivier Beffort

Obwohl mit 8,1 Prozent nach Silizium (28 Prozent) als zweithäufigstes Metall in der Erdkruste vorhanden, konnte Aluminium erstmals 1807 vom britischen Naturforscher Humphrey Davy nachgewiesen werden; es gelang ihm jedoch nicht, die neue Substanz zu isolieren. Er gab dem neuen Metall den Namen «aluminium», abgeleitet vom englischen «alum» (la-

teinisch «alumen» oder deutsch «Alaun», $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$), eine vermutlich bereits den Ägyptern und Chinesen bekannte natürliche Verbindung, aus welcher damals die Tonerde gewonnen wurde. Nach Humphrey's Entdeckung sollten jedoch noch gut 80 Jahre bis zur wirtschaftlichen industriellen Herstellung von Aluminium vergehen.

Als Ludwig von Tetmajer 1880 die EMPA gründete, wurde Aluminium noch nach einem 1854 von Henry Sainte-Claire Deville (im Auftrag von Napoleon III.) entwickelten kostspieligen chemischen Verfahren hergestellt. Um 1857 betrug die Produktion des ausschliesslich in Frankreich hergestellten Aluminiums (Reinheit etwa 97 Prozent) etwa 2 kg/Tag bei einem Preis von 300 Fr./kg; 30 Jahre später war die Produktion auf mehrere Jahrestonnen gestiegen, und der Preis auf 70 Fr./kg gesunken. Nicht zuletzt

Landesausstellungs-Ausgabe 1896.

Mitteilungen
der Materialprüfungs-Anstalt
am schweiz. Polytechnikum in Zürich.

IX. Heft.

Methoden und Resultate
der Untersuchung
des Aluminiums und seiner Abkömmlinge.

Zusammengestellt von

Prof. **L. Tetmajer**

Direktor der Materialprüfungs-Anstalt am schweiz. Polytechnikum, etc.

Selbst-Verlag der Anstalt.

ZÜRICH

Druck von F. LOHBAUER, Rämistrasse 12
1900.

*Mitteilungen der
Materialprüfungs-
Anstalt, 9. Heft, 1900*

wegen seines hohen Preises und der knappen Verfügbarkeit blieb dem Aluminium der Durchbruch vorläufig verwehrt; in Reinform oder als Aluminiumbronze war es aber als exklusiver Werkstoff vom damaligen Adel sehr geschätzt.

Erst die 1886 gleichzeitig vom Franzosen Paul Héroult und Amerikaner Charles Hall zum Patent angemeldete Erfindung, die Schmelzflusselektrolyse, sollte die wirtschaftliche industrielle Gewinnung von Aluminium aus Tonerde (Al_2O_3) ermöglichen. Voraussetzung dazu waren jedoch die zwanzig Jahre zuvor von Werner von Siemens erfundene Dynamomaschine, welche im grosstechnischen

Massstab elektrischen Strom lieferte, sowie das 1887 von Karl Bayer patentierte Verfahren zur Befreiung des Bauxits von jeglichen Oxyden und Silikaten, woraus die Tonerde wirtschaftlich gewonnen werden konnte.

Während Charles Hall in Amerika das Interesse von sechs Industriellen für die Gründung 1888 der «Pittsburgh Reduction Company» gewinnen konnte (ab 1907 in ALCOA umgetauft, heute weltweit grösster Aluminiumhersteller), suchte Paul Héroult in Frankreich vergeblich nach Investoren für die industrielle Verwertung seiner Erfindung. So kam es, dass Héroult schliesslich ausgerechnet mit den schweizerischen Unternehmern G. Neher, G.L. Naville und P. Huber-Werdmüller Kontakte knüpfte, was 1887 zur Gründung der «Schweizerischen Metallurgischen Gesellschaft» führte. Besser hätten sich die vier Pioniere wohl kaum ergänzen können: Héroult sollte nach seinem Patent die Aluminiumöfen bauen, Neher stellte die Infrastruktur seines ehemaligen Eisenwerkes am Rheinfall zur Verfügung, Escher-Wyss & Co., unter der Leitung von Naville, lieferte die Turbinen für die Dynamomaschinen, die ihrerseits in der Maschinenfabrik Oerlikon gebaut wurden, damals unter der Leitung von Werdmüller, so dass bereits ein Jahr später, 1888, die erste nach dem Prinzip der Schmelzflusselektrolyse arbeitende Aluminiumhütte der Welt in Neuhausen am Rheinfall in Betrieb genommen werden konnte. Noch im gleichen Jahr erfolgte unter Beteiligung der «Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft» (AEG) die Gründung der «Aluminium Industrie AG» (AIAG), seit 1963 «Schweizerische Aluminium AG» (Aluisse).

Allerdings wurden anfänglich Aluminiumbronze-Legierungen (20 Prozent Al) hergestellt, die damals als be-

sonders zukunftsstrchtig galten. Im Jahre 1888 wurde Professor Tetmajer an der EMPA in Zürich beauftragt, diese Legierungen bezüglich Festigkeitseigenschaften und Verbesserungsmöglichkeiten zu untersuchen und neue Anwendungen dafür zu finden. Die schweren Aluminiumbronze-Legierungen fanden jedoch nicht den erwarteten Absatz, und sie wichen bis Mitte der 90er Jahre progressiv dem leichten Reinaluminium. 1892 betrug die Aluminiumproduktion in Neuhausen 2 Tonnen pro Monat bei einem Preis von 6.25 Fr./kg. Doch die Kapazität war zu gering; nach Ausbau der Anlagen in Neuhausen wurden die Aluminiumhütten in Badisch-Rheinfelden (1898) und in Lend/A (1899) in Betrieb genommen, und im Jahre 1900 stieg die Produktion der AIAG auf über 2'000 t/Jahr, etwa ein Drittel der damaligen Weltproduktion (heute etwa 20 Millionen Tonnen im Jahr); der Preis war auf 2.50 Fr./kg gesunken. 1908 lief in der vierten Aluminiumhütte der AIAG in Chippis/VS die Produktion an; die Kapazität von anfänglich 2'000 t/Jahr wurde bis 1918 auf 12'500 t/Jahr erweitert. Bereits bei der Planung ihrer vier Hütten erwarb die AIAG jeweils die Wassernutzungsrechte und baute ihre eigenen Kraftwerke, um sich den nötigen elektrischen Strom für die Elektrolyse zu sichern.

Mit der Verfügbarkeit und dem tieferen Preis kamen auch die ersten Anwendungen. Obwohl sich diese anfänglich auf Haushaltsutensilien wie Geschirr und Besteck sowie auf Militarausrustungen beschränkten, fand das Aluminium bald Eingang im Bauwesen; 1890 baute Escher Wyss in Zürich das erste Aluminiumboot,

1893 wurde in London die aus Aluminium gefertigte und heute noch gut erhaltene Eros-Statue aufgestellt, 1896 folgte die Bedachung der St.-Joa-chims-Kirche in Rom, und in Amerika wurde 1898 die erste Aluminium-Freileitung gebaut. Des Weiteren kam es bereits um die Jahrhundertwende zu zahlreichen Umsetzungen im Automobilbau.

Aufgrund seiner bescheidenen Festigkeit im Reinzustand fand Aluminium bis anhin kaum Anwendung für Strukturbauteile. Bald wurde jedoch erkannt, dass die Festigkeit von Aluminium durch Zulegieren bestimmter Elemente gesteigert werden konnte; die Aluminium-Magnesium-Knetlegierung «Magnalium» wurde 1898 in Europa entwickelt (aufgrund diverser Probleme sollten jedoch noch über 40 Jahre bis zur industriellen Nutzung von AlMg-Legierungen vergehen), und die aushärtbare Aluminium-Kupfer-Magnesium-Mangan-Knetlegierung «Duralumin» wurde 1906 von A.Wilm in Deutschland entdeckt. Die dafür verantwortlichen Hartungsmechanismen, im ersten Fall die Mischkristall- und Versetzungshartung und im zweiten Fall die Ausscheidungshärtung, blieben damals noch unbekannt. Die «Duralumin»-Legierung fand bereits kurze Zeit nach ihrer Entdeckung Anwendungen in der Luftfahrt; die Gerippe der Zepeline wurden aus dieser Legierung gefertigt (1914). Damit hatte der Werkstoff Aluminium, knapp ein Vierteljahrhundert nach Beginn seiner industriellen Gewinnung und am Vorabend des Ersten Weltkrieges, die Eroberung von Himmel und Weltraum angetreten.¹¹⁴