

EMPIRIE UND THEORIE BEI DER HISTORISCHEN BEMESSUNG VON BRÜCKENLAGERN

Zusammenfassung

Weitreichende Wirtschafts- und Bildungsreformen schufen im 19. Jahrhundert die Grundlagen für die rasche Entwicklung Deutschlands von einem rückständigen Agrarland zu einer führenden Industrienation. Die deutsche Brückenbaukunst erhob sich über ihr vormals unbedeutendes Niveau und setzte insbesondere hinsichtlich statisch-konstruktiver Kriterien neue Maßstäbe. Baustatische Methoden begannen, die bis dahin weitgehend empirischen Entwurfsansätze abzulösen.

Der Beitrag thematisiert den zunehmenden Einfluss mathematisch geschulter Ingenieure bei der wissenschaftlichen Durchdringung eines wichtigen konstruktiven Brückendetails – der Bemessung beweglicher Brückenlager aus Eisen und Stahl. Dabei steht die Dimensionierung der sensiblen Kontaktbereiche zwischen den Lagerwalzen und -platten im Mittelpunkt der Auseinandersetzung. Hierfür vertrauten die Brückenbauer lange Zeit einfachen, empirisch begründeten Formeln. Doch seit den 1860er Jahren erschienen unterschiedliche mathematisch-mechanisch hergeleitete Ansätze, um auch bei der Bemessung der Kontaktbereiche dem inzwischen gestiegenen Anspruch von Wissenschaftlichkeit gerecht zu werden.

Kern der Auseinandersetzung im Beitrag bildet die noch im 19. Jahrhundert zur mathematisch exakten Beschreibung von Kontaktvorgängen entwickelte Theorie des Physikers Heinrich Hertz. Der Beitrag zeichnet nach, wie sich seine Theorie für die Bemessung von Brückenlagern im 20. Jahrhundert durchsetzen konnte. Das Ergebnis war eine bemerkenswerte Verflechtung von Theorie und Empirie, die bis heute die Lagerbemessung prägt.

Abstract

In the 19th century, economic and educational reforms laid the basis to develop a backward and agrarian Germany to one of the leading industrial nations. The art of bridge building in Germany

rose from its relative insignificance to remarkable heights. Innovation took place in the field of structural calculation where theoretical approaches started to substitute primarily empirical ones.

This paper analyses the growing influence of mathematically trained engineers on the evolution of a crucial structural detail, that is the dimensioning of moveable bearings made from iron and steel. Discussion there focused on how to calculate the size of the highly sensitive contact areas between the rollers and the plates. Earlier, bridge builders had relied on simple formulae derived from experience, yet from the 1860's onwards, numerous scientific approaches proposed mathematical and mechanical criteria for this process.

From the late 19th century on, this discussion relied on the theory for a mathematically accurate description of contact processes put forth by physicist Heinrich Hertz. The paper details how his theory became a standard for dimensioning the contact areas of bearings in the 20th century. The process yielded a remarkable fusion of theory and empiricism that forms the base for sizing bridge bearings until this day.

Einführung

Die Diskussion über die Bedeutung von ›Empirie und Theorie‹, ›Wissen und Wissenschaft‹ beziehungsweise ›Theorie und Praxis‹ für den technischen Fortschritt prägt seit langem die technikwissenschaftliche Literatur. Einigkeit besteht inzwischen darüber, dass erst die Symbiose von Theorie und Praxis maßgeblich den technischen Fortschritt im industriellen Zeitalter ermöglicht hat. Unbestritten gilt Deutschlands Beitrag bei der Verwissenschaftlichung der Technik als maßgeblich. Mittlerweile wird der Theorie als Triebkraft bei der Erkenntnisgewinnung die Führungsrolle zugesprochen.¹

In diesem Umfeld konnte sich noch im 19. Jahrhundert die Baustatik im Bauingenieurwesen als Wissenschaftsdisziplin etablieren. Inzwischen bilden baustatische Methoden und Verfahren einen selbstverständlichen und leistungsfähigen Teil der Ingenieurpraxis. Mehr noch – mit der Digitalisierung der Arbeitswelt des Bauingenieurs nahm das Vertrauen in die Allmacht des theoretischen Apparates stetig zu und wurde zum Glaubensbekenntnis eines ganzen Berufsstandes. Nur selten kritisieren Gegenstimmen die Wirkkraft hochwissenschaftlicher Theorien und erinnern an den Nutzen der Empirie für die Ingenieurpraxis, wie Fritz Leonhardt: »Wir

¹ Vgl. Radkau, Joachim: *Technik in Deutschland – Vom 18. Jahrhundert bis zur Gegenwart*. Frankfurt a. M. 1989, S. 40–41.



Abb. 1 Typische Vertreter der drei Lagergenerationen; Links: Hölzernes Auflager Malxebrücke Luisenruh Peitz, um 1870; Mitte: Eisernes Rollenlager Flakenseebrücke Erkner, 1859; Rechts: Verformungslager Puschkinparkbrücke Cottbus, 1998

Ingenieure lernen in erster Linie aus Mißerfolgen«² oder Theodor Triantafyllidis: »Der Ingenieur lebt immer noch von der Erfahrung.«³

In diesem Spannungsfeld von Empirie und Theorie erörtert der Beitrag die historische Bemessung von Brückenlagern. Deren Entwicklungsgeschichte lässt drei Lagergenerationen erkennen, die sich vor allem durch die verwendeten Lagerwerkstoffe unterscheiden: die Generation der hölzernen Lager (bis circa 1880), die Generation der eisernen und stählernen Lager (circa 1850 bis 1950) sowie die Generation der Kunststofflager (ab circa 1940) (Abb. 1).⁴ Nachfolgend steht die zweite Generation – die der eisernen und stählernen Lager, deren Entwicklung in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wesentliche Impulse aus Deutschland erhielt – im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Kontaktproblem

Mit ihren Walzen, Bolzen und Zapfen als charakteristischen Elementen sollten die eisernen und stählernen Lager die Beweglichkeit des Tragwerks insbesondere zum spannungsfreien Ausgleich des jährlichen Temperaturgangs gewährleisten. Damit entstanden neue Problemfelder, wobei die Kontaktzone zwischen Wälzkörper und Lagerplatte im Brennpunkt stand. Kaum ein anderer Bereich der Mechanik dominierte im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts derart die Diskussion in den Fachzeitschriften für Bauingenieure und rief hierbei Theoretiker und Praktiker gleichermaßen auf den Plan. Ein neuer Forschungsgegenstand war geboren – das Kontaktproblem.

Die Technische Mechanik beschreibt als Kontaktproblem allgemein die Kraftübertragung im Berührungsbereich unterschiedlich gekrümmter Flächen. Die gesamte Auflagerkraft von

2 Leonhardt, Fritz: *Ingenieurbau – Bauingenieure gestalten die Umwelt*. Darmstadt 1974, S. 201–202.

3 Triantafyllidis, Theodor: *Eine Brücke zwischen Empirie und Wissen*. In: *Bautechnik* 78 (2001), H. 4, S. 235–238, hier S. 237.

4 Wetzl, Volker: *Brückenlager. 1850–1950*. Dissertation BTU Cottbus 2010.

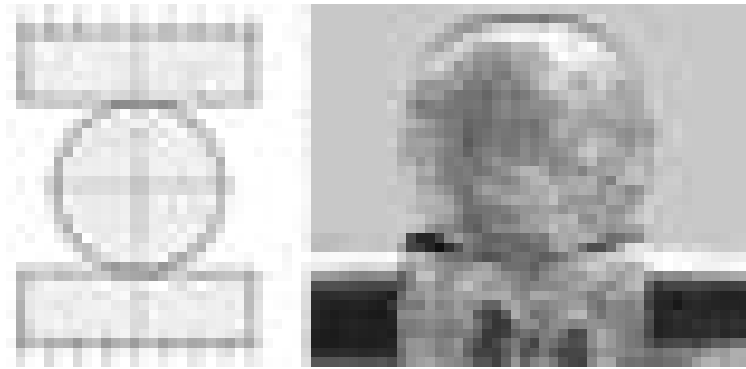


Abb. 2 Abplattungen einer Walze im Kontaktbereich am Hartbleimodell infolge Lasteinwirkung

Brücken muss jeweils durch einige wenige dieser minimierten Kontaktflächen in den Unterbau geleitet werden. In Abhängigkeit von der Last erweitert sich die Berührungsfläche, bis ein Kräftegleichgewicht erreicht ist. Im theoretischen Fall einer vollständigen Entlastung des Lagers bilden sich die Berührungsflächen zu Linie oder Punkt zurück – vorausgesetzt, die Spannungen in der Kontaktzone sind innerhalb des linear-elastischen Werkstoffbereichs geblieben. Bei der hier thematisierten historischen Lagertechnik kam es in der Regel zu örtlichen Plastizierungen, also Abplattungen, die es bei der Dimensionierung zu begrenzen galt (Abb. 2).

Empirischer Zugang

Zu den frühen Brücken mit Wälzlagern gehörten die Isarbrücke in Großhesselohe (1851–1857) sowie die Günzbrücke bei Günzburg von 1853, letztere mit der vielleicht ersten Anwendung von Walzenlagern im Brückenbau in Deutschland. An beiden Bauwerken war Ludwig Werder (1808–1885) beteiligt, der Friedrich August von Pauli (1802–1883) bei der technischen Ausgestaltung der Fischbauchträger beraten hatte.⁵ Vermutlich verantwortete Werder den Entwurf der Lager beider Brücken; die der Isarbrücke stammen nachweislich aus seiner Feder.⁶

Der zeitgenössische Brückenbau bot Werder hierfür zumindest eine erste Orientierung. Es waren zunächst die Lagersättel vor allem in Frankreich errichteter Hängebrücken des frühen 19. Jahrhunderts, die das Konstruktionsprinzip der späteren Balkenbrückenlager aus Eisen und Stahl vorwegnahmen. Zudem waren in England erste Balkenbrücken auf Walzen gelagert worden. Über viele der Ausführungen hatten zeitgenössische deutsche Fachzeitschriften ausführlich berichtet.

⁵ Dieterich, Robert: *Ludwig Werder*. In: Technikgeschichte 35 (1968), H. 2, S. 148–159, hier S. 154.

⁶ Rieppel, A[nton J. v.]: *Konstruktion neuerer deutscher Brückenbauten*. In: Zeitschrift für Architektur und Ingenieurwesen 44 (1898), H. 7 u. 8, S. 561–586, hier S. 566.



Abb. 3 Auflagerdetail mit (geometrisch nicht exaktem) Einrollenlager (um 1840), Walhalla bei Regensburg

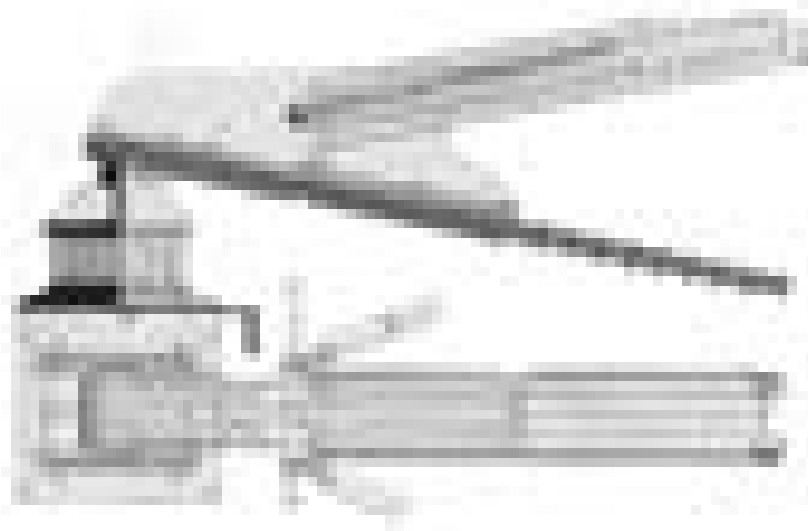


Abb. 4 Auflagerdetail mit Stelzenlager, Isarbrücke Großhesselohe (Lager um 1855)

Vor allem aber konnte Werder auf eigene Erfahrungen zurückgreifen. In leitender Stellung war er mit dem Bau des eisernen Dachstuhls der Walhalla (1830–1842) betraut gewesen, deren Dachwerk auf Einrollenlagern ruht (Abb. 3).⁷ Auch dank seiner Intuition als Maschinenbauer entwarf er für die Isarbrücke schließlich ein Wälzlager, dessen Konstruktionsprinzipien diese Lagergeneration prägten und die fortan nahezu unverändert bleiben sollten. Werders rein empirischer Zugang ist auch in seinem Ansatz zur Dimensionierung der Walzen erkennbar (Abb. 4):

»Man wendete Stelzen, also Stücke von Walzen an, weil offenbar der Druck, dem man eine Walze aussetzen darf, mit dem Durchmesser derselben zunimmt, daher man durch größere Höhe an der Gesamtlänge der Stelzen und dadurch zugleich an der Größe der Auflagerplatten spart. [...] Der Druck per Längeneinheit wurde proportional dem Radius r gesetzt und für die gußeisernen Stelzen zu 12 r Kgr. per lfd. Centimeter genommen [...]; innerhalb der Grenzen, in denen sich r bewegt, ist diese Annahme gewiß statthaft.«⁸

Es bleibt offen, ob Johann Wilhelm Schwedler (1823–1892) diesen Ansatz kannte. Verglichen aber mit Werders vorsichtigen Formulierungen lieferte Schwedler nur kurze Zeit später konkrete Zahlenwerte: »Der Druck einer ebenen Gußeisenfläche auf eine Gußeisenrolle kann pro Zoll Durchmesser und pro Zoll Länge derselben 1 Ctr. betragen, ohne dass die Elasticität des Materials alterirt wird.«⁹ Schwedler gab keine Auskunft zum Ursprung seiner Angaben, aber es ist gut möglich, dass er sich an realisierten Bauwerken orientierte.

Schwedlers Vorschlag fand große Verbreitung, wurde bald jedoch nachgebessert. Ein Beitrag zur 1871 errichteten Donaubrücke in Maria-Ort verwies explizit auf Versuche, wonach eine gusseiserne Walze 30 bis 50 kg/cm² ihrer Horizontalprojektion trägt¹⁰ – ein deutlicher Unterschied zu Schwedler, der die gleiche Auflast nur pro Quadratzoll als zulässig erachtete. Ergänzend zum bisherigen empirischen Vorgehen war mit den genannten Versuchen nun ein wissenschaftlicher Zugang gewählt worden, um die Bemessung gusseiserner Walzen auf eine solide Grundlage zu stellen.

7 Lorenz, Werner; Rohde, Annegret: *Building with Iron in Nineteenth Century Bavaria – The Walhalla Roof Truss and its architect, Leo van Klenze*. In: *Construction History Journal* 17 (2001), S. 55–74; Veihelmann, Karen: *Der eiserne Dachstuhl der Walhalla – ein herausragendes Zeugnis des frühen Stahlbaus*. In: *Stahlbau* 82 (2013), H. 7, S. 494–501; Dieterich 1968 (Anm. 5), S. 150.

8 [Gerber, Heinrich G.]: *Das Pauli'sche Trägersystem und seine Anwendung*. Nürnberg 1859, S. 15.

9 Schwedler, J[ohann] W.: *Der eiserne Überbau der Brabe-Brücke bei Czersk*. In: *Zeitschrift für Bauwesen* 11 (1861), H. 4, S. 580–602, hier S. 600.

10 Baldermann, O[?].: *Die Eisenbahnbrücke über die Donau bei Maria-Ort*. In: *Allgemeine Bauzeitung* 38 (1873), S. 193–205, hier S. 201.

Empirie begegnet Theorie

Ab circa 1870 änderten sich zwei wichtige Randbedingungen. Zum einen begann Stahlguss dem altbewährten Eisenguss seine letzte Domäne im Brückenbau streitig zu machen.¹¹ Zum anderen rief das Kontaktproblem die Theoretiker auf den Plan. Dank der ein halbes Jahrhundert zuvor eingeleiteten Reform des höheren technischen Schulwesens stand eine gut ausgebildete Generation von Ingenieuren bereit, sich den neuen Herausforderungen im Eisenbrückenbau zu widmen. Zudem war das Zusammengehen von Ingenieurpraxis und -theorie für Deutschland eine wirtschaftliche Notwendigkeit geworden, wie Ferdinand Redtenbacher (1809–1863) bereits 1858 mit Blick auf die Übermacht England unterstrichen hatte: »Wir auf dem Kontinent haben weder die Geldkräfte noch diesen Umfang an Erfahrungen in der Ausführung aller Spezialitäten, um den rein empirischen Weg ausschließlich verfolgen zu können, und sind daher gezwungen, durch intelligente Kraft und wissenschaftliche Einsicht das mangelnde Geld und eingeschränkte Erfahrung zu ersetzen oder zu unterstützen.«¹²

Mit konkretem Bezug auf das Kontaktproblem erschienen im letzten Drittel des 19. Jahrhunderts verschiedene theoretische Ansätze, etwa von namhaften Persönlichkeiten wie Emil Winkler (1835–1888), Claus Köpcke (1831–1911) oder Carl von Bach (1847–1931). Ausgehend von Annahmen zu Verformungen der Kontaktpartner im Berührungspunkt leiteten sie Formeln ab, welche Rückschlüsse auf eine zulässige Belastung ermöglichten. Allen Formeln war gemein, dass sie Werkstoffkonstanten als Unbekannte enthielten, da für sie insbesondere in den Anfangsjahren belastbare Kennwerte noch fehlten.

Interessant ist der Umgang mit dieser Unbekannten, spiegelt er doch unterschiedliche Zielstellungen der Verfasser wider. Winkler beließ es um 1870 nicht bei der Herleitung einer Formel. Um die unbekannte Werkstoffkonstante abzuleiten, nutzte er die Praxis als Reallabor und kalibrierte seine Theorie an gebauten Brücken. Unter Berücksichtigung weiterer Annahmen vereinfachte er seinen Ansatz auf für die Praxis einfach handhabbare Formeln.¹³

Andere hingegen beließen es bei der Herleitung komplizierter Formeln.¹⁴ Beweggrund waren zumeist Statusambitionen, um vor dem Hintergrund »[...] einer von der Universität gesetzten Norm von Wissenschaftlichkeit [...] die Verwissenschaftlichung der Technik voranzutreiben

11 Mehrtens, [Georg]: *Notizen über die Herstellung eiserner Brücken*. In: Deutsche Bauzeitung 16 (1882), H. 22/63, S. 125–128, 185–187, 210–213, 234–237, 292–294, 315–319, 341–343, 363–366, 369–370, hier S. 212.

12 Treue, Wilhelm: *Das Verhältnis der Universitäten und Technischen Hochschulen zueinander und ihre Bedeutung für die Wirtschaft* (Forschungen zur Sozial- und Wirtschaftsgeschichte, Bd. 6). Stuttgart 1964, S. 223–237, hier S. 227.

13 Winkler, E[mil]: *Die Gitterträger und Lager gerader Träger eiserner Brücken*. Wien 1872, S. 255–256.

14 Vgl. z. B. Grashof, F[rantz]: *Theorie der Elasticität und Festigkeit*. Berlin 1878, S. 49–51; Willmann, L[eo] v.: *Beitrag zur Berechnung der Rollvorrichtungen*. In: Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure 30 (1886), H. 42, S. 914–917.

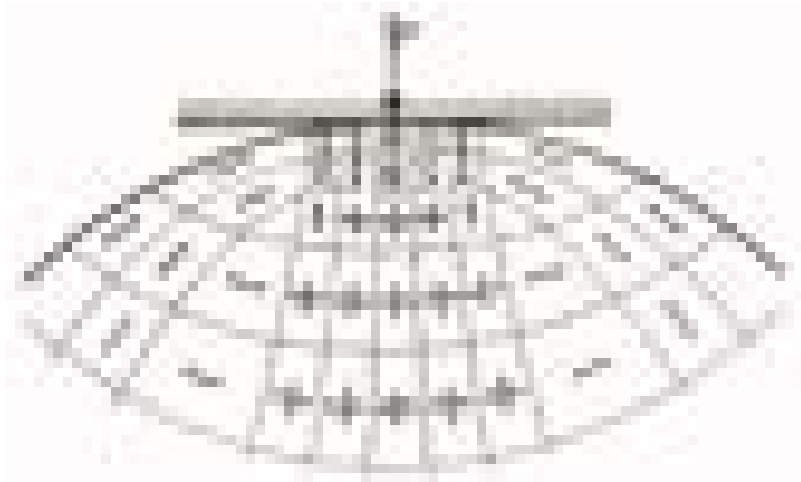


Abb. 5 Spannungsverteilung im Kontaktbereich nach Hertz

und die Empirie zurückzudrängen«. ¹⁵ Insofern genoss ein aufwändiges mathematisches Korsett einen höheren Stellenwert als die Aufbereitung und Vereinfachung eines Berechnungsansatzes für die Ingenieurpraxis. Letzteres barg die Gefahr, als Empiriker in der ›untersten Schublade‹ eines aufsteigenden Standes gebildeter Ingenieure zu landen. ¹⁶

Theorie nach Hertz

In dieses Spannungsfeld hinein wurde die noch heute benutzte ›Theorie nach Hertz‹ geboren. Die vom Physiker Heinrich Hertz (1857–1894) um 1880 entwickelte, exakte Lösung zur Beschreibung der Vorgänge im Kontaktbereich analysiert den Spannungs- und Verformungszustand im unmittelbaren Kontaktbereich zweier Körper, wie er etwa beim Stoß zweier Billardkugeln auftritt. Die Theorie basiert vor allem auf folgenden Annahmen (Abb. 5):

- Die Berührungsflächen sind im Verhältnis zu ihren Oberflächen unendlich klein.
- Der Druck wird senkrecht zu den Kontaktflächen übertragen.
- Die Baustoffe beider Körper müssen homogen und isotrop sein.
- Die Proportionalitätsgrenze wird im Kontaktbereich nicht überschritten.

¹⁵ Vgl. Manegold, Karl Heinz.: *Das Verhältnis von Naturwissenschaft und Technik im 19. Jahrhundert im Spiegel der Wissenschaftsorganisation*. In: Treue, Wilhelm; Mauel, Kurt (Hrsg.): *Naturwissenschaft, Technik und Wirtschaft im 19. Jahrhundert*. Göttingen 1976, S. 253–283, hier S. 268.

¹⁶ Radkau 1989 (Anm. 1), S. 158–160.

Für den praktischen Anwendungsfall einer Lagerbemessung trafen diese Annahmen nur eingeschränkt zu. Hertz selbst erkannte schon mögliche Diskrepanzen zwischen Theorie und Praxis, da »die wirklichen Körper den Vorstellungen der Homogenität [...] sehr wenig entsprechen; es ist ja bekannt genug, daß die Festigkeitsverhältnisse in der Nähe der Oberfläche, auf welche es uns hier ankommt, häufig ganz andere sind, als diejenigen im Innern der Körper«. ¹⁷

Er publizierte seine Theorie erstmals im *Journal für die reine und angewandte Mathematik*. ¹⁸ Hertz, der vor seinem Wechsel zur Physik ein Bauingenieurstudium abgebrochen hatte, ¹⁹ erkannte bereits während seiner Arbeit am Thema dessen Nutzen auch für bautechnische Zwecke. ²⁰ Mit dem konkreten Hinweis auf die praktische Relevanz seiner Erkenntnisse publizierte Hertz sie nochmals – nun in den *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes*, einem der Ingenieurpraxis deutlich näher stehenden Forum. Diese Veröffentlichung fand jedoch nicht die erhoffte Beachtung – auch hier fehlte die konkrete Aufarbeitung und Vereinfachung der Formeln für die Ingenieurpraxis.

Erst nachdem Jakob Johann von Weyrauch (1845–1917) im Jahr 1894 – dem Todesjahr von Hertz – die Nützlichkeit von dessen Theorie für die Praxis unterstrichen hatte, begann sich diese allmählich für die Bemessung von Brückenlagern durchzusetzen. In seinem Beitrag zog Weyrauch zunächst die kritische Bilanz, »dass die bisherige Berechnung der Brückenaufleger einer wissenschaftlichen Grundlage überhaupt entbehrt. Die Auflager haben gehalten – das ist das einzige, was für sie spricht«. ²¹ Danach verwies er auf das Potenzial der im Bauingenieurwesen bis dato unbekannt gebliebenen Theorie von Hertz und fasste deren Erkenntnisse zusammen.

Anschließend ging Weyrauch aber den entscheidenden Schritt weiter, um die Akzeptanz der Theorie in der Praxis überhaupt zu ermöglichen: Er kalibrierte die Formeln an bis dato gebräuchlichen Formeln zur Dimensionierung von Walzenlagern. Einigermaßen erstaunt stellte er hierbei fest, dass – zumindest rechnerisch – die seinerzeit bekannte Stauch- beziehungsweise Quetschgrenze von Stahl im Kontaktbereich gelegentlich wohl überschritten wurde, ohne dass die Lager dabei offenbar Schaden nahmen. Weyrauch lieferte zwar eine plausible Erklärung, musste aber eingestehen, dass noch keine Kenntnisse zur wirklichen Spannungsverteilung im Kontaktfall vorlägen, und verwies auf die staatlichen Materialprüfungsanstalten, die sich dieses Problems wohl dankbar annehmen würden. ²²

17 Hertz, H[einrich]: *Über die Berührung fester elastischer Körper und über die Härte*. In: *Verhandlungen des Vereins zur Beförderung des Gewerbefleißes* 61 (1882), Nov., S. 449–463, hier S. 462.

18 Hertz, Heinrich: *Über die Berührung fester elastischer Körper*. In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 92 (1882), S. 156–171.

19 Eckert, Michael: *Heinrich Hertz*. Hamburg 2010, S. 32–33.

20 Hertz 1882 (Anm. 18), S. 156.

21 Weyrauch, [Jacob J.]: *Ueber die Berechnung der Brücken-Auflager*. In: *Zeitschrift des Architekten- und Ingenieurvereins zu Hannover* 40 (1894), H. 2, S. 131–143, hier S. 135.

22 Ebd., S. 141. Weyrauchs Empfehlung wäre nur wenige Jahre zuvor schwer vorstellbar gewesen. Aber man hatte inzwischen lernen müssen, dass sich bestimmte praktische Fragestellungen einer schlüssigen mathematischen Beschreibung entzogen. So wertete das sich anpassende ingenieurwissenschaftliche Umfeld den Versuch als Mittel zur Erkenntnisgewinnung wieder auf. Das zeigte sich auch in der Gründung von Materialprüfanstalten.

Theorie versus Empirie

Trotz der Empfehlung zur Anwendung war die Theorie nach Hertz noch längst nicht in der Ingenieurpraxis angekommen. Vor allem gab es Zweifel hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit. Hertz selbst hatte ja bereits auf Widersprüche zwischen Theorie und Praxis hingewiesen, und Weyrauch betonte, dass kleinere Plastizierungen im Kontaktbereich bei üblichen Lagerabmessungen²³ wahrscheinlich wären, womit er – bewusst oder unbewusst – den Anwendungsfall ›Brückenlager‹ dem Definitionsbereich der Hertzschen Theorie entzog.

Zudem kamen erste Zweifel aus den Laboren. Ewald Rasch (1871–1927) zum Beispiel resümierte 1899 nach Versuchen an Gussstahlkugeln mit kleinen Durchmessern: »Man kann sich des Bedauerns nicht erwehren, dass sich die bewunderungswürdig tiefe Hertz'sche Arbeit auf [...] hinfälligen Voraussetzungen aufbaut.«²⁴ Seine Erkenntnisse konnte er durch spätere Versuche an größeren Kugeln bestätigen und stellte den Hertzschen Formeln selbstbewusst eigene Gleichungen gegenüber, welche »die Formänderungen und Materialbeanspruchungen bei Rollenlagern u. dgl. [...] sehr viel genauer als die Hertzschen Gleichungen ergeben müssten.«²⁵

Die um 1900 vorherrschende Unsicherheit hinsichtlich der Lagerbemessung zeigte sich auch in der Fachliteratur. Schon 1902 verwies einerseits die *Hütte* – nach Kurrer das erfolgreichste Ingenieurhandbuch seiner Art²⁶ – zur Bemessung von Lagerwalzen kommentarlos auf Hertz.²⁷ Nur wenig später ließ der Altmeister des deutschen Brückenbaus, Gottwald Schaper (1873–1942), in der Erstauflage von *Eiserne Brücken* keinen Zweifel: »Eine einwandfreie Berechnung [von Berührungslagerungen] ist nur nach den Hertzschen Formeln durchzuführen.«²⁸

Andere jedoch formulierten ihre Zweifel, wie Luigi Vianello (1862–1907): »Über die Spannungen, welche bei elastischen gegeneinander gedrückten Körpern eintreten, ist man heutzutage noch im unklaren.«²⁹ Als praktisch tätiger Ingenieur veröffentlichte er 1905 in seinem Buch *Der Eisenbau* für die Bemessung von Lagerwalzen eine simple Faustformel und verortete diese im Spannungsfeld von Theorie und Empirie: »Die Anwendung führt zu Ergebnissen, die im Einklang mit guten Ausführungen stehen, sich aber wissenschaftlich nicht rechtfertigen lassen.«³⁰

23 Ebd.

24 Rasch, E[wald F.W.]: *Prüfung von Gussstahlkugeln*. In: Zeitschrift für Werkzeugmaschinen und Werkzeuge (1899), H. 19, S. 301–303, H. 20, S. 319–320, hier S. 320.

25 Rasch, E[wald F.W.]: *Über die Berechnung der an Kugel- und Rollenlagern auftretenden Materialspannungen*. In: Eisenbau 6 (1915), H. 1, S. 1–8, hier S. 8.

26 Kurrer, Karl-Eugen: *Der Enzyklopädist der Technischen Mechanik des 19. Jahrhunderts – Zum 200. Geburtstag von Julius Weisbach (1806–1871)*. In: Bautechnik 83 (2006), S. 868–875, hier S. 871.

27 Akademischer Verein ›Hütte‹ (Hg.): *Des Ingenieurs Taschenbuch*. 18. Aufl., Abt. II. Berlin 1902, S. 342.

28 Schaper, G[ottwalt]: *Eiserne Brücken – Ein Lehr- und Nachschlagebuch*. Berlin 1908, S. 351. Das Buch entwickelte sich in mehreren Auflagen zum Standardwerk im Stahlbau in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts.

29 Vianello, Luigi: *Der Eisenbau – Ein Handbuch für den Brückenbauer und den Eisenkonstrukteur*. München/Berlin 1905, S. 476.

30 Ebd., S. 476.

Die Ingenieurpraxis ließ sich von den akademischen Diskussionen vorerst kaum verunsichern und gebrauchte laut *Eisen im Hochbau* von 1923 offenbar noch in den Zwischenkriegsjahren erprobte Faustformeln: »Größtenteils werden Rollen aus Flußstahlguß verwendet, deren Durchmesser nach der in der Praxis gebräuchlichen Formel $\sigma \cdot l \cdot n \cdot d \geq A$ bestimmt wird.«³¹ Demnach ist zu vermuten, dass die Lager einer Vielzahl der bis in die Zwischenkriegszeit hinein errichteten Brücken noch mit den herkömmlichen Faustformeln bemessen worden sind.

Gleichwohl eroberte etwa gleichzeitig die Theorie nach Hertz die Ingenieurpraxis. Argumente hierfür gab es genug. So bescheinigte eine 1919 veröffentlichte Dissertation zur Spannungsverteilung in Auflagern und Gelenken den Hertzschen Gleichungen »zweifelloso die beste Annäherung an die Wirklichkeit«.³² Zudem stellte die wirtschaftliche Lagerbemessung nach Hertz den Stahlbaufirmen einen Wettbewerbsvorteil in Aussicht. Fördernd wirkte sicher auch die im 20. Jahrhundert vollends ins öffentliche Bewusstsein rückende wissenschaftliche Reputation des früh verstorbenen Heinrich Hertz, konnte man doch nach ihm bemessene Lager als »wissenschaftlich« etikettieren. Vor allem aber änderte sich ab etwa 1920 das bauaufsichtliche Umfeld, denn sowohl die neuen Reichsbahnvorschriften wie auch die Arbeiten zur Normung von Brückenlagern bezogen sich auf Hertz. Allein vor diesem Hintergrund musste sich die Ingenieurpraxis über kurz oder lang von den Faustformeln trennen.

Theorie benötigt Empirie

Schließlich jedoch verhalf insbesondere die Empirie der Hertzschen Theorie zum Durchbruch. Die Möglichkeit, über die Wahl der zulässigen Spannungen den theoretischen Apparat fortwährend an Erfahrungen der Praxis zu kalibrieren, gestattete im vorliegenden Fall die Verstetigung einer Theorie, deren Definitionsbereich jenseits des Anwendungsfalls lag.

Weyrauch empfahl 1894 noch sehr vorsichtig die in Tabelle 1 aufgeführten Spannungen: »[...] würde man sehr mäßig rechnen, wenn man vorläufig etwa setzen wollte [...]«.³³ Als bald aber schon wurden deutlich höhere Spannungen als zulässig empfunden. Mit der Einführung der Bahnvorschriften B. E. 1925 erreichten sie einen Stand, der bis zur grundlegenden Umstellung des Sicherheitskonzepts im späten 20. Jahrhundert weitgehend konstant bleiben sollte.

Der praktisch tätige Ingenieur wunderte sich im Anwendungsfall vermutlich sehr darüber, hatte er doch im Studium gelernt, bei der Bemessung von Stahlbauteilen tunlichst einen Sicherheitsabstand gegenüber der Fließgrenze einzuhalten (circa 2,3 t/cm² mit Bezug auf Tab. 1). Sicherlich nicht jedem Ingenieur war klar, dass es sich bei den berechneten und zulässigen Hertzschen Spannungen nur um fiktive Rechenwerte handelte. Daran hat sich prinzipiell bis heute nichts geändert. Die 2011 erschienene *Nachrechnungsrichtlinie* zum Beispiel weist für

31 Stahlwerksverband (Hg.): *Eisen im Hochbau*. 6. Aufl. Berlin 1923, S. 535.

32 Kollmar, Alfred: *Auflager und Gelenke*. Berlin 1919, S. 53.

33 Weyrauch 1894 (Anm. 21), S. 142.

Jahr	Name	Gusseisen	Stahlguss	Flusseisen/stahl	Schmiede stahl
1894	Weyrauch	2,0...3,0	3,0...4,8	2,0...3,0	
1908	Schaper	max 4,0 ³⁾ max 3,5 ⁴⁾	max 6,5 ³⁾ max 6,0 ⁴⁾	max 5,0 ³⁾ max 4,5 ⁴⁾	–
1911	Bernhard	max 4,0 ¹⁾ max 3,0 ²⁾	max 7,0 ¹⁾ max 5,25 ²⁾	–	–
1922	Schaper	max 4,0 ³⁾ max 3,0 ⁴⁾	max 6,5 ³⁾ max 5,5 ⁴⁾	max 5,0 ³⁾ max 4,0 ⁴⁾	max 7,5 ³⁾ max 6,5 ⁴⁾
1922	B. E. (vorläufige Fassung)	max 4,0 ³⁾ max 3,0 ⁴⁾	max 6,5 ³⁾ max 5,5 ⁴⁾	max 5,0 ³⁾ max 4,0 ⁴⁾	max 7,5 ³⁾ max 6,5 ⁴⁾
1923	Erlass Reichsminister	max 5,0 ³⁾ max 4,0 ⁴⁾	max 8,5 ³⁾ max 7,5 ⁴⁾	max 6,5 ³⁾ max 5,5 ⁴⁾	max 9,5 ³⁾ max 8,5 ⁴⁾
1925	B. E.(1. Ausg.) (Deutsche Reichs- bahn)	max 5,0 ³⁾ LF H max 4,0 ⁴⁾ LF H max 6,0 ³⁾ LF HZ max 5,0 ⁴⁾ LF HZ	max 8,5 ³⁾ LF H max 7,5 ⁴⁾ LF H max 10 ³⁾ LF HZ max 9,0 ⁴⁾ LF HZ	max 6,5 ³⁾ LF H max 5,5 ⁴⁾ LF H max 8,0 ³⁾ LF HZ max 7,0 ⁴⁾ LF HZ	max 9,5 ³⁾ LF H max 8,5 ⁴⁾ LF H max 12 ³⁾ LF HZ max 11 ⁴⁾ LF HZ
1931	DIN 1073 (Straßenbrücken)	wie B. E.von 1925			
1937	DIN 1050 (Hochbau)	wie B. E.von 1925			
1953	DIN 1050	wie B. E.von 1925			
1981	DIN 18800 – 1	max 5,0 ⁵⁾ LF H max 6,0 ⁵⁾ LF HZ	max 8,5 ⁵⁾ LF H max 10,5 ⁵⁾ LF HZ	max 6,5 ⁵⁾ LF H max 8,0 ⁵⁾ LF HZ	max 8,0 ⁵⁾ LF H max 10 ⁵⁾ LF HZ

1) Einrollenlager, 2) mehr als eine Rolle, 3) Ein- und Zweirollenlager, 4) mehr als 2 Rollen
5) Bei mehr als 2 Rollen Ermäßigung auf 85%

Tab. 1: Entwicklung der zulässigen Spannungen für die Hertzsche Theorie [t/cm^2]; (Wetzck 2010 (Anm. 4), S. 134)

einen typischen stählernen Lagerwerkstoff GS 52 einen charakteristischen Wert für die Hertzsche Pressung von 1250 N/mm^2 aus³⁴ – mehr als das Doppelte der Zugfestigkeit! Der Wert wird legitimiert durch inzwischen einhundert Jahre Erfahrung als Rückgrat eines praxisfernen Bemessungstorsos.

Kontaktproblem – Lösung in Sicht?

150 Jahre nach den frühen Untersuchungen von Werder, Schwedler, Winkler und anderen erscheint das Kontaktproblem heute nach wie vor buchstäblich als »Problem«. Natürlich gab es zwischenzeitlich hinreichend Bemühungen um Aufklärung.³⁵ Längst ist die Bedeutung des hydrostatischen Spannungszustands im Kontaktbereich als Ursache für die enorme Tragfähigkeit der Walzen bekannt, und bereits 1940 belegte Franz Karas (1906–1946?)³⁶ den Zusammenhang zwischen Mises-Vergleichsspannung und Hertz-Kontaktspannung auch theoretisch.³⁷ In der Bauingenieurpraxis sind diese Erkenntnisse nie angekommen; die Forschungen konzentrierten sich nach dem Zweiten Weltkrieg zunehmend auf die Kunststofflager.

Im Zusammenhang mit dem zunehmenden Interesse am Erhalt beziehungsweise an der Lebenszeitverlängerung bestehender Brücken sind die nunmehr historischen eisernen und stählernen Lager aber wieder ins Blickfeld der Ingenieure gerückt, denn sie besitzen Schlüsselfunktionen in den Tragwerken – funktional, konstruktiv und gestalterisch. Folgerichtig gilt es, auch die historischen Lager als einen wesentlichen Teil des Tragwerks zu erhalten. Alternativen gibt es kaum. Ein Ersatz durch neue Kunststofflager führt unter Umständen zu strukturellen Imperfektionen – vor allem aber ist er teuer. Die Kosten belaufen sich in Abhängigkeit der örtlichen und technischen Gegebenheiten auf circa 20 000–70 000 Euro pro Lager.³⁸ Zudem führt ein Lageraustausch gegebenenfalls zur Minderung des Denkmalwerts der Gesamtstruktur, und auch ein Nachbau mit neuen Materialien kann aus denkmalpflegerischer Sicht bestenfalls als Notlösung bezeichnet werden.

Das Fehlen verlässlicher Bewertungsgrundlagen gab Anlass für ein 2009–2012 gemeinsam von der BTU Cottbus und der BAM Berlin bearbeitetes und von der DFG finanziertes Forschungsvorhaben. Neben theoretischen und experimentellen Untersuchungen stand die Erarbeitung einer In-situ-Untersuchungsmethodik im Mittelpunkt des Vorhabens. Ausgewählte

34 Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hg.): *Richtlinie zum Nachrechnen von Straßenbrücken im Bestand*. 05/2011, S. 45.

35 Für eine Zusammenstellung siehe: Wetzki, Volker; Eisenkolb, Tino; Mehdiانpour, Milad: *Bewertung historischer Brückenlager – Das Kontaktproblem – Teil 1*. In: *Stahlbau* 80 (2011), H. 6, S. 404–412.

36 Das Sterbejahr konnte nicht verlässlich ermittelt werden; vgl. ebd., Verweis 13.

37 Karas, Franz: *Werkstoffanstrengung beim Druck achsenparalleler Walzen nach den gebräuchlichen Festigkeitshypothesen*. In: *Forschungen auf dem Gebiete des Ingenieurwesens* 11 (1940), H. 6, S. 334–339.

38 Gregorski, Heiko: *Brückenlager im Bestand – Erfahrungen der DB Netz AG*. *Stahlbau* 82 (2013), H. 12, S. 879–882, hier S. 881.

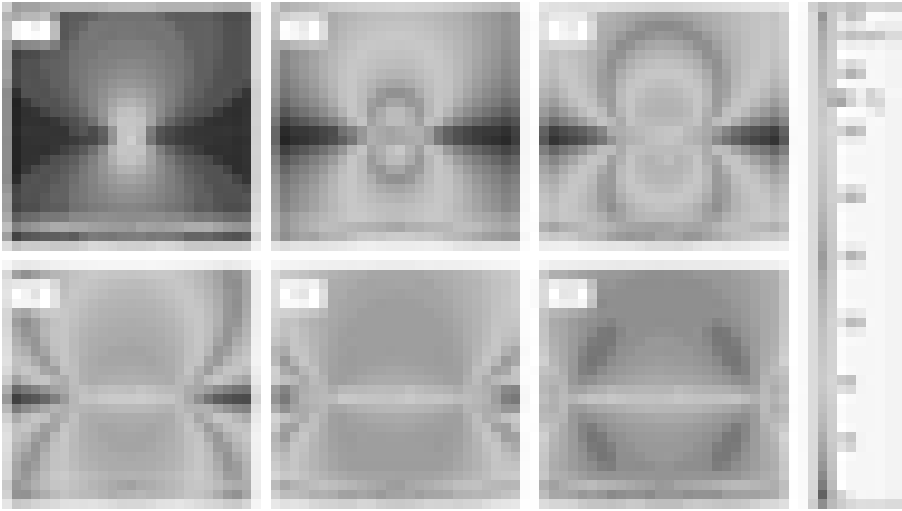


Abb. 6 Vergleichsspannungen im Kontakt Walze/Platte

Ergebnisse sind inzwischen veröffentlicht worden.³⁹ Vor allem aber hat sich eine Dissertation erneut dem Kontaktproblem gewidmet, um auch unter Nutzung moderner Simulationstools die enorme Tragfähigkeit der historischen Lager zu begründen.⁴⁰ Aus theoretischer Sicht scheint diese nun abschließend erklärt (Abb. 6).

Resümee

Vor dem Hintergrund unseres heutigen Selbstverständnisses von der Vorreiterrolle der Theorie muss die skizzierte Bemessungshistorie von Brückenlagern als leidige Ausnahme erscheinen. Bei genauer Betrachtung hingegen hinkt die Theorie der Praxis oft genug hinterher. Die Tragfähigkeit gusseiserner Rundstützen zum Beispiel konnte erst theoretisch verlässlich erklärt werden, nachdem diese Stützen längst außer Mode waren.⁴¹ Und jenseits der Ingenieurwissenschaften blieb zum Beispiel das Vermögen der Hummeln zu fliegen theoretisch lange ein Mysterium. Den Tieren war das egal – sie wussten, sie können fliegen. So wussten auch die Ingenieure vor

39 S. Lorenz, Werner; Rücker, Werner: *Realitätsnahe statisch-konstruktive Bewertung historischer Brückenlager*. DFG-Abschlussbericht (LO 568/8–1; RU 326/7–1). www-docs.tu-cottbus.de/bautechnikgeschichte/public/141216_Abschlussbericht_DFG_Homepage.pdf.

40 Eisenkolb, Tino: *Beitrag zur statisch-konstruktiven Bewertung historischer Brückenlager* (Arbeitstitel). Dissertation TU Berlin.

41 Käpplein, Rudolf: *Rechnerische Tragfähigkeitsnachweise für gusseiserne Hohlstützen*. In: *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke* (Jahrbuch 1990 des Sonderforschungsbereichs 315, Universität Karlsruhe). Karlsruhe 1990, S. 249–265.

100 Jahren, dass die von ihnen konstruierten Lager halten würden. Das ›Warum‹ war nebensächlich; das Kontaktproblem war vornehmlich ein akademisches Problem!

Für baupraktische Zwecke ist das Kontaktproblem sicher von untergeordneter Bedeutung. Gleichwohl steht es beispielhaft für die Schwierigkeiten beim Transfer theoretischer Erkenntnisse in die Ingenieurpraxis. Die Ursachen sind vielschichtig. Zum einen ist das Beharrungsvermögen der Büros enorm, an liebgewonnenen Bemessungsroutinen festzuhalten. Außerdem dürfen wir die Existenz wirtschaftlicher Interessen nicht unterschätzen. In den Zwischenkriegsjahren mag die Aussicht auf einen Wettbewerbsvorteil einen wichtigen Anreiz gegeben haben, Hertz als Standard in die Regelwerke aufzunehmen. Heute, 100 Jahre später, lässt sich durch Rückgriff auf Hertz ganz bewusst die Nicht-Tragfähigkeit historischer Lager für die inzwischen gestiegenen Verkehrslasten nachweisen und so der erforderliche Austausch der Lager legitimieren. Das aktuelle Regelwerk spielt also wirtschaftlichen Interessen in die Hände. So bleibt abzuwarten, ob und wann Erkenntnisse aus dem oben genannten Forschungsvorhaben Teil der Regelwerke werden.

Die Auseinandersetzung mit der Geschichte der Lagerbemessung verdeutlicht, wie wichtig es ist, sich in der bautechnikgeschichtlichen Forschung auch mit Details zu beschäftigen. Oft offenbaren sich erst in den Details einer Konstruktion die tatsächlichen bauzeitlichen Probleme und das Ringen um deren angemessene Lösung.

Zweifellos sind die beachtlichen ingenieurtechnischen Leistungen im Bauwesen insbesondere des 20. Jahrhunderts auch den immer leistungsfähigeren baustatischen Methoden und Verfahren zu verdanken. Demgegenüber verdeutlichen die hier skizzierten Erkenntnisse die Bedeutung der ›Erfahrung‹ für den Ingenieuralltag – eine Bedeutung, die vielschichtiger kaum sein kann: Als ›Empirie‹ bildet sie neben ›Theorie‹ und ›Versuch‹ einen wichtigen und gleichberechtigten Nachweispol. Als ›tacit-knowledge‹ bietet sie Sicherheit in einer Berufswelt, in der Regelwerke immer komplexer, Fachbücher immer teurer und Baustatiken immer dicker, aber kaum besser werden. Und als ›Know-how‹ bietet Erfahrung den schnellen Zugriff auf gute Lösungen, wobei die zunehmende Bautätigkeit im Bestand das Know-how um eine zeitliche Dimension ergänzt. Genau hier ist eine solide bautechnikgeschichtliche Lehre in der Bauingenieurausbildung sehr wertvoll. Auch deshalb kann und muss sich die noch junge Gesellschaft für Bautechnikgeschichte dafür einsetzen, eine solche fest in den Curricula des Bauingenieurwesens an deutschen Hochschulen zu verankern.