

## 1 Allgemeine Angaben

Antragsteller 1 (Federführend)

Antragsteller 2

### 1.1 DFG-Geschäftszeichen

LO 568/8-1

RU 326/7-1

### 1.2 Antragsteller

Werner Lorenz, Prof. Dr.-Ing.; Univ.-Prof. (C3)  
01.02.1953, Deutscher

Werner Rücker, Dir. u. Prof. Dr.-Ing.  
01.04.1949, Deutscher

### 1.3 Institut/Lehrstuhl

Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg; Fakultät 2 – Architektur, Bauingenieurwesen und Stadtplanung, Lehrstuhl Bau-technikgeschichte und Tragwerkserhaltung

Tel: 0355 - 69 3031, Fax: 0355 - 69 3032

[werner.lorenz@tu-cottbus.de](mailto:werner.lorenz@tu-cottbus.de)

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung  
Fachbereich 7.2 – Ingenieurbau

Tel: 030 - 8104 1720, Fax: 030 - 8104 1727

[werner.ruecker@bam.de](mailto:werner.ruecker@bam.de)

### 1.4 Thema des Projekts

Realitätsnahe statisch-konstruktive Bewertung historischer Brückenlager

### 1.5 Berichtszeitraum, Förderungszeitraum insgesamt

Berichtszeitraum: 10/2009 – 05/2014; Förderungszeitraum insgesamt: 24 Monate

### 1.6 Publikationen aus dem Projekt

- Themenheft „Brückenlager im Bestand“ in der Fachzeitschrift STAHLBAU, Heft 12/2013 (Anlage 02) – unter anderem mit Beiträgen aus dem unmittelbaren Bearbeiterkreis des Projekts, auf die in den Einzelkapiteln verwiesen wird. Darüber hinaus Einzelveröffentlichungen:
- Mehdiانpour, M.; Eisenkolb, T.: Experimental Investigations on Sliding Friction of Historic Bridge Bearings. In: Jasienko, J. (Ed.): Proceedings of the 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Wroclaw, Oct 15-18, 2012, vol.3, S.2181-2188.
- Wetzka, V.: Historic Bridge Bearings – Identifying Material Characteristics: Compression Test. In: Jasienko, J. (Ed.): Proceedings of the 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Wroclaw, Oct 15-18, 2012, vol.3, S.2251-2257.
- Wetzka, V.: Historic Bridge Bearings – Material Research on Cast Steel. In: Carvais, R. et al. (Ed.): Nuts & Bolts of Construction History (Proceedings of the 4th International Congress on Construction History, Paris, July 3-7, 2012), Paris: Picard, 2012, vol.3, pp.243-252.
- Eisenkolb, T.; Mehdiانpour, M.; Bewertung historischer Brückenlager - Das Kontaktproblem - Teil 2. Stahlbau 81 (2012), S.510-518.
- Wetzka, V.; Eisenkolb, T.; Mehdiانpour, M.: Bewertung historischer Brückenlager - Das Kontaktproblem - Teil 1. Stahlbau 80 (2011), S.404-412.

## 2 Arbeits- und Ergebnisbericht

### 2.1 Ausgangsfragen und Zielsetzung des Projekts

Auf Grund des nach wie vor wachsenden Bedarfs an Bahn- und Straßenbrücken nehmen Baulasträger zunehmend Abstand davon, Brücken nach Ablauf ihrer prognostizierten Nutzungsdauer ohne zwingenden Grund durch Neubauten zu ersetzen. Der Erhalt der bestehenden Brückensubstanz ist neben der ingenieösen zugleich auch zu einer volkswirtschaftlichen Herausforderung geworden.

Im Zusammenhang mit der Sanierung oder Ertüchtigung von Brückenbauwerken werden Bauingenieure auch mit den historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern konfrontiert. Dabei sind folgende Fragestellungen von Interesse:

- Welche Erfahrungen gibt es mit den Lagern hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit?
- Welcher Werkstoff ist zu erwarten und mit welchen Eigenschaften?
- Wie ist die Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit sowie der Ermüdungszustand dieser Lager nach vielen Jahrzehnten – u.U. sogar nach über einem Jahrhundert – der Nutzung einzuschätzen?
- Wie können die zur Bewertung erforderlichen Werkstoffeigenschaften möglichst zerstörungsfrei vor Ort ermittelt werden?

Unter Berücksichtigung der im Forschungsantrag beschriebenen Fragestellungen wurden folgende grundlegende Forschungsziele abgeleitet:

- A Auswertung verfügbarer Daten zum Umgang mit historischen gusseisernen u. stählernen Brückenlagern
- B Ermittlung der für eine statisch-konstruktive Beurteilung relevanten Material- und Struktureigenschaften
- C Erarbeitung von Kriterien und Methoden zur Bewertung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit
- D Prinzipielle Einschätzung der Ermüdungssicherheit historischer Lager und ggf. Hinweis auf die Notwendigkeit weitergehender Untersuchungen
- E Erarbeitung geeigneter Methoden für vor-Ort-Untersuchungen der für die statisch-konstruktive Beurteilung relevanten Parameter
- F Ableitung von „Empfehlungen für die Praxis“.

### 2.2 Entwicklung der durchgeführten Arbeiten einschließlich Abweichungen vom ursprünglichen Konzept, ggf. wiss. Fehlschläge sowie Probleme in der Projektorganisation und -durchführung

Das ursprünglich beantragte Konzept bezog sich auf einen Arbeitszeitraum von 36 Monaten (Antragsteller 1) und 30 Monaten (Antragsteller 2). Der Antrag wurde positiv begutachtet, der Förderungszeitraum jedoch auf 24 Monate für beide Antragsteller begrenzt – verbunden mit der Empfehlung, den Forschungsschwerpunkt auf das Ziel der Ermittlung von Materialkennwerten zu fokussieren.<sup>1</sup>

Der reduzierte Bewilligungszeitraum und die geforderte Zuschärfung erforderten eine Revision des ursprünglichen Arbeitsprogramms. Lediglich Forschungsziel B wurde im beantragten Rahmen bearbeitet, der Umfang der Arbeiten in den übrigen Zielen A bis E reduzierte sich im Detail. Das Ziel F wurde aufgegeben. Wegen der Relevanz für die Ingenieurpraxis konzentrierte sich die Bearbeitung nun auf Brückenlager aus Stahlguss.

	Antragsteller 1 (BTU)	Antragsteller 2 (BAM)
	<b>Ziel A</b>	-
	<b>Ziel B</b>	<b>Ziel B</b>
Zuordnung der Forschungsziele	Ziel C	<b>Ziel C</b>
	<b>Ziel D</b>	Ziel D
	<b>Ziel E</b>	Ziel E
Bearbeitungszeitraum (Stelle)	12/2009 – 08/2012 (80%)	10/2009 – 09/2011 (100%)

Übersicht 1: Organisation der Arbeiten

<sup>1</sup> Bewilligungsschreiben vom 15.01.2009 zum GZ: LO 568/8-1, S. 4.

Auf Grund des Profils der für die Projektbearbeitung gewonnenen Mitarbeiter resultierte eine Zuordnung der Forschungsziele entsprechend Übersicht 1<sup>2</sup>. Ein im Februar 2012 gestellter Fortsetzungsantrag zur Bearbeitung weiterführender Fragestellungen wurde abgelehnt<sup>3</sup>. Gerade vor dem Hintergrund des gekürzten Förderzeitraums waren bis dato vereinzelt auch Fragestellungen aus den Projektzielen offen geblieben, deren Klärung durch die Bearbeiter nach Auslaufen der DFG-Förderung entsprechend der jeweiligen Möglichkeiten weiter betrieben wurde und noch wird:

- seitens der BTU: durch Entwicklung und Betreuung studentischer Abschlussarbeiten (vgl. 2.6) sowie durch Publikation von Ergebnissen – wie z.B. im Rahmen des STAHLBAU-Themenheftes (Anlage 02)
- seitens der BAM: durch BAM-seitige Vollzeit-Förderung (10/2011 – 12/2012) sowie durch Arbeiten zur Fertigstellung einer projektbezogenen Dissertation (Abgabe 1. Quartal 2015 vorgesehen).

Der im Vorfeld des Vorhabens mit den Berliner Verkehrsbetrieben (BVG) abgestimmte geordnete Ausbau von Brückenlagern der Hochbahnlinie U2<sup>4</sup> und deren sorgfältige Sicherung erwiesen sich als sehr gute Voraussetzung für die Bearbeitung des Vorhabens. Damit standen jeweils komplette(!) Brückenlager zur Verfügung, die vor allem hinsichtlich der Versuche zur Gebrauchstauglichkeit die Prüfung des Komplettsystems „Brückenlager“ ermöglichten. Nur bedingt erfolgreich waren die Bemühungen, die Untersuchungsmasse während des Vorhabens aufzufüttern. Zwar ist die Bereitschaft von Baufirmen zur Sicherung von Brückenlagerteilen während eines Abrissvorhabens grundsätzlich gegeben, die Bergung eines kompletten(!) Lagersystems erfordert allerdings technischen und zeitlichen Aufwand, der von den Firmen innerhalb eines gewöhnlich knapp kalkulierten Abrissvorhabens nicht mehr als Gefälligkeit geleistet werden kann. Wenn überhaupt, können einzig die Wälzkörper mit der unmittelbar darauf liegenden oberen Lagerplatte gesichert werden. Somit stammte das Gros der für das Vorhaben zur Verfügung stehenden Untersuchungsmasse an historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern aus der Hochbahnlinie U2 in Berlin-Prenzlauer Berg:

- 76 Stück Linien-Kipplager (Baujahr ca. 1910)
- 36 Stück Wälzlager auf 2, 3 oder 4 Rollen (Baujahr ca. 1910 sowie ca. 1927)
- 6 Stück Punktkipplager und 16 Stück Zylinderzapfenkipplager – fest (Baujahr ca. 1927)
- 20 x 3 Lagerwalzen ohne zugehörige Lagerplatten (Baujahr ca. 1907).

Die Untersuchungsmasse konnte ergänzt werden durch

- 2 Stück Pendellager aus dem Abriss der Wasserturmkurve Berlin-Ostkreuz (Baujahr 1930)
- 2 Stück Wälzlager auf 2 Rollen aus dem Abriss der Ringbahnbrücke Berlin-Schöneberg (Baujahr ca. 1930), jeweils nur unvollständig, sowie
- 2 Stück Einrollenlager aus dem Bahnhof Wiesbaden (Baujahr 1905) – vollständig.

Der zur Verfügung stehende zeitliche (auch finanzielle) Rahmen des Projekts ermöglichte nur die Untersuchung eines ausgewählten Teils der Lager, so dass noch genügend Untersuchungsmasse für die Klärung weiterführender Fragen zur Verfügung steht.

### **2.3 Darstellung der erreichten Ergebnisse und Diskussion im Hinblick auf den relevanten Forschungsstand, mögliche Anwendungsperspektiven und denkbare Folgeuntersuchungen**

Die folgende Darstellung fasst die wichtigsten Erkenntnisse des Forschungsvorhabens in komprimierter Form zusammen. Detaillierte Informationen und Ergebnisse finden sich in den unter Punkt 1.6 aufgeführten Publikationen, in den unter Punkt 2.6 aufgeführten Abschlussarbeiten bzw. in den Anlagen zum Bericht.

---

<sup>2</sup> Gegenüber dem Bearbeiter der BAM (100%-Stelle) begann das Arbeitsverhältnis des Bearbeiters der BTU zwei Monate später, wurde auf eigenen Wunsch auf eine 80%-Stelle reduziert und durch eine 2-monatige Elternzeit unterbrochen. Die daraus folgende Verlängerung des Förderzeitraums für den Antragsteller 1 erfolgte für die DFG kostenneutral.

<sup>3</sup> Mitteilungsschreiben der DFG vom 02.08.2012.

<sup>4</sup> Hintergründe in : Fischer, M.; Lorenz, W.; Stahlbau unter Denkmalschutz – Grundinstandsetzung von Viadukt und Bahnhöfen der Hochbahnlinie U2 in Berlin-Prenzlauer Berg. Stahlbau 80 (2011), S.419-427.

## Ziel A: Auswertung verfügbarer Daten zum Umgang mit historischen Brückenlagern

---

Die Zeitschriftenauswertung ergab vor allem die Erkenntnis, dass der Umgang mit historischer Lagertechnik kaum thematisiert wird. Hingegen konnte das Projekt von Erfahrungen aus der Sanierungspraxis und von Kontakten zur DB Netz AG als größtem Eigner an historischen Brücken profitieren. Interessant war vor allem die Feststellung, dass ein Großteil der Schäden an historischen Lagern auf mangelnde Wartung und nicht auf unzureichende Beanspruchbarkeit zurückzuführen ist.

### Entwicklung der Arbeiten

Des gekürzten Bewilligungszeitraumes wegen konzentrierten sich die Arbeiten auf das Arbeitspaket A1.

Für differenzierte Blickwinkel auf die Sanierungspraxis von Brückenlagern wurden folgende Zugänge gewählt:

- Zugang der planenden Ingenieure: Hierzu Auswertung von Fachzeitschriften,
- Zugang der Brückeneigner: Hierzu Umfrage bei der DB Netz AG,
- Zugang der Sanierungsfirmen: Hierzu Kontakt zur Firma OTHER-Montagen<sup>5</sup>.

### Ergebnisse/Erkenntnisse im Detail

#### *Auswertung Zeitschriften*

Als wichtige Erkenntnis der Auswertung der Fachzeitschriften lässt sich festhalten, dass in Beiträgen zum Umgang mit historischen Brücken die dazugehörige historische Lagertechnik bestenfalls am Rande thematisiert wird. Vor allem aber gab es keinen Hinweis auf tragfähigkeitsrelevante Schäden an historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern. Einschätzungen der Gebrauchstauglichkeit zeigten, wenn sie überhaupt geäußert wurden, die Unsicherheit der Planungsbeteiligten beim Umgang mit den historischen Lagern. Oft wurden allein „starke Korrosionsschäden“ und damit einhergehende „eingeschränkte Freiheitsgrade“ als ausschlaggebend für einen Lageraustausch benannt, ohne die Absicherung dieses Befundes darzustellen<sup>6</sup>. Die Auswertung ist ohne Erkenntnisgewinn bezüglich des methodischen Umgangs mit historischen Lagern geblieben (vgl. Anlage A1):

#### *Auswertung Umfrage bei der DB Netz AG zum bisherigen Umgang mit historischen Brückenlagern (Anlage A2):*

Die Umfrage führte zur Erkenntnis, dass ein Großteil der notwendigen Arbeiten an Bestandslagern durch Bewegungen des Unterbaus, Schäden an Pfeilerköpfen – oft aber auch durch mangelnde Wartung – bedingt ist (vgl. Anlage A3). Als wertvollstes Ergebnis jedoch ist der entstandene, wechselseitige Austausch mit Mitarbeitern der DB zu benennen, der einerseits zu Publikationen der bahninternen Erfahrungen beim Umgang mit Bestandslagern und andererseits zur Vorstellung ausgewählter Ergebnisse des Forschungsvorhabens vor den Fachingenieuren der DB führte. Hierzu sind im Einzelnen zu nennen:

- Gregorski, H.: Brückenlager im Bestand – Erfahrungen der DB Netz AG. Stahlbau 82 (2013), S.879-882.
- Riedel, Th. et al: Umgang mit Stahlgusslagern – am Beispiel der Sanierung des historischen Eisenbahnviadukts Angelroda. Stahlbau 82 (2013), S.924-926.
- Wetzki, V.: Stahlgussrollenlager – Typisierung, Eigenschaften, Schadensbilder. Vortrag auf dem Workshop „Fachlicher Erfahrungsaustausch Gewerk KIB“ der DB Netz AG, Leipzig, 16.10.2013.
- Wetzki, V.: Historische Brückenlager – Erfahrungen aus Theorie und Praxis. Vortrag auf der Fachtagung der Fachbeauftragten und Planungsingenieure für Konstrukt. Ingenieurbau der DB Netz AG, Erfurt, 11.09.13.

#### *Auswertung Erfahrung der Fachfirma OTHER-Montagen*

Von den in Nutzung befindlichen drei Lagerarten (moderne Kunststofflager, moderne stählerne Lager, historische stählerne Lager) sind aktuell die modernen Kunststofflager am austauschintensivsten. Darüber hinaus geben Edelstahlager immer wieder Anlass für einen Lageraustausch. Arbeiten an historischen stählernen Lagern finden kaum statt – und wenn, dann wird i.d.R. der komplette Austausch gegen moderne Lagertypen angestrebt, wobei der gute Zustand der Bestandslager die Notwendigkeit des teuren Austauschs oft in Frage stellt. Insgesamt werden die historischen stählernen Lager als sehr robuste Technik eingeschätzt.

---

<sup>5</sup> Die vor 11 Jahren gegründete Firma OTHER-Montagen bearbeitet deutschlandweit jährlich ca. 50 bis 60 Lagersanierungen – darunter ca. 30 größere Vorhaben, z.B. mit einem Komplett-Lageraustausch.

<sup>6</sup> Z.B. in Butz, C.: Sanierung und Austausch von Brückenlagern und .... Brückenbau 12/2010, S.21-24.

Von übergeordnetem Interesse war die Feststellung, dass ein beträchtlicher Teil aller Ausschreibungen zur Lageranierung „am Ziel vorbei“ formuliert ist, da den beauftragten Büros oder Verwaltungen die Kompetenz zum Thema „Brückenlager“ im Allgemeinen und zum Thema „Lageranierung“ im Speziellen oft fehlt. Aus dieser Unkenntnis heraus wird oft ein aufwendiger Lageraustausch „auf der sicheren Seite liegend“ einer technisch-pragmatischen Lösung (Reinigung, Begutachtung, ggf. Belassen der Bestandslager) vorgezogen.

#### Denkbare Folgeuntersuchungen

Erarbeitung eines „Leitfadens zum fachgerechten Umgang mit historischen Brückenlagern“ als Hilfestellung für ausschreibende Ingenieurbüros bzw. Verwaltungen (vgl. P. 2.4).

#### **Ziel B:**

#### **Ermittlung der für eine statisch-konstruktive Beurteilung relevanten Material- und Struktureigenschaften**

**Die Untersuchungen gewährten vertiefte Erkenntnisse zur werkstofflichen Qualität historischer Lager und bestätigten einen zumeist hohen Standard bei der zeitgenössischen Herstellung von Stahlgussbauteilen. Die Aufarbeitung der historischen Herstellungsverfahren erlaubt der Ingenieurpraxis bei der Begutachtung historischer Bauteile erste Rückschlüsse auf mögliche Werkstoffeigenschaften.**

#### Entwicklung der Arbeiten

##### *Arbeitspaket B1 – Charakteristika zeitgenössischer Lagerwerkstoffe*

Das Fehlen jeglicher Grundlagen zur Werkstoffqualität von historischem Stahlguss sowie ungenügende Kenntnisse über die Herstellung von Lagerkörpern aus Stahlguss führten bald zur Erkenntnis, die Grundlagenrecherche methodisch breiter aufstellen zu müssen, als in der Antragstellung ursprünglich vorgesehen. Insgesamt wurde folgendes Vorgehen gewählt:

- Geschichtlicher Zugang: Durch systematische Auswertung historischer Fachliteratur
- Fertigungstechnischer Zugang: Durch Nutzung von Erfahrungen „aus erster Hand“: Es gelang, Herrn Fritz Müller (Müller-Gusstechnik GmbH & Co.KG) als Ansprechpartner für das Vorhaben zu gewinnen<sup>7</sup>. Bei einem Treffen 2011 wurden intensiv fertigungstechnische Besonderheiten diskutiert.

##### *Arbeitspaket B.2, B.3 und B.4 – Materialtechnische Untersuchungen*

Ausgehend von der zur Verfügung stehenden Untersuchungsmasse wurden insgesamt zwei Untersuchungsschleifen konzipiert: Eine erste, breit angelegte Schleife an bauzeitlich und typologisch *gleichen* Lagern erkundete, in welcher Qualität und mit welcher Streuung der Eigenschaften um 1900 Stahlguss für Lager gefertigt wurde. Hierzu wurden aus 10 Lagern in Summe 40 Zugproben, 16 Kerbschlagbiegeproben, 10 Proben für die chemische sowie 5 Proben für die metallographische Analyse gefertigt und ausgewertet. Die zweite Schleife erweiterte die Erkenntnisse exemplarisch an typologisch und bauzeitlich *unterschiedlichen* Lagern. Hierzu wurden aus zwei Lagern jeweils 4 Zugproben, 10 Kerbschlagbiegeproben sowie Proben für die chemische und metallographische Analyse entnommen.

#### Ergebnisse/Erkenntnisse im Detail

##### *Arbeitspaket B1 – B4*

Im Projekt konnten wesentliche Erkenntnisse zur Herstellung und zu den Eigenschaften von historischem Stahlguss – insbesondere zu den spezifischen Frischverfahren – erarbeitet und der zeitgenössische Erkenntnisstand hinsichtlich der thermischen Nachbehandlung der Gussrohlinge aufgezeigt werden. Die Werkstoffuntersuchungen gewährten vertiefende Erkenntnisse zur werkstofflichen Qualität historischer Stahlgusslager, insbesondere zu typischen Festigkeiten und deren Streuungen sowie zu zeitgenössisch üblichen Rezepturen. Die Untersuchungen ergaben ein sehr breites Spektrum an mechanischen und metallographischen Eigenschaften; auffallend waren zum Teil hervorragende Werkstoffeigenschaften, denen vereinzelt jedoch signifikante Gefügeengänzen –

---

<sup>7</sup> Herr Müller war ca. 20 Jahre in der Fertigung des VEB Stahlgußkombinat Karl-Marx-Stadt tätig, sowohl in der Formerei und im Schmelzbetrieb als auch in der Putzerei und Gütekontrolle.

wie nahezu faustgroße Lunker – gegenüberstanden. Die im Vorfeld der Projektbearbeitung im Bereich der Kontaktzonen vermuteten Aufhärtungen konnten durch die Untersuchungen nicht in der erwarteten Größenordnung bestätigt werden. Ausgewählte Ergebnisse wurden einem internationalen Publikum vorgestellt sowie im genannten Themenheft veröffentlicht:

- Wetzka, V.; Dogru, D. M.: Historischer Stahl(form)guss - Herstellung. Stahlbau 82 (2013), S.898-902.
- Wetzka, V.: Historische Lager aus Stahlguss - Werkstoffuntersuchungen. Stahlbau 82 (2013), S.883-889.
- Balscheit, H.; Else, M.: Bewertung historischer Brückenlager - Härte- und Verformungsmessungen. Stahlbau 82 (2013), S.934-937.
- Wetzka, V.: Historic Bridge Bearings – Material Research on Cast Steel. In: Carvais, R. et al. (Ed.): Proc. 4th International Congress on Construction History, Paris, July 3-7, 2012. Paris: Picard, 2012, vol.3, pp.243-252.

Veröffentlichungen der Erkenntnisse aus Untersuchungen zur Werkstoffisotropie innerhalb der üblicherweise sehr massigen Brückenlagerteile sowie zu den mechanisch-technologischen Eigenschaften allgemeiner historischer Stahlgüsse (vgl. Anlage B1) stehen noch aus.

#### Denkbare Folgeuntersuchungen

Die Untersuchungen zeigten die unsicheren Arbeitsroutinen hinsichtlich einer optimalen thermischen Nachbehandlung der Guss-Rohlinge bis in das 20. Jahrhundert hinein auf. Wegen des unmittelbaren Einflusses dieser Nachbehandlung auf die Werkstoffduktilität sind hierzu vertiefende Untersuchungen angeraten. Darüber hinaus sind ergänzende Werkstoffanalysen an bauzeitlich und typologisch unterschiedlichen Lagern denkbar, um das Gesamtbild zur werkstofflichen Qualität historischer gussstählerner Lager zu erweitern.

#### **Ziel C: Erarbeitung von Kriterien/Methoden zur Bewertung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit**

---

**Die numerischen Untersuchungen zur Tragfähigkeit konzentrierten sich auf die Kontaktbereiche zwischen Wälzkörper und Lagerplatten. Für den Linienkontakt konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der Hertzschen Kontakt- und der v. Mises-Vergleichsspannung nachgewiesen werden. Beim Punktkontakt hingegen wichen die mit den Hertzschen Gleichungen berechneten Spannungen aufgrund von Idealisierungen erheblich vom Spannungsverlauf der tatsächlichen Lagergeometrie ab; hierfür konnte eine Korrekturmethode erarbeitet werden. Versuche zur Gleit- und Rollreibung ergaben bei funktionsfähigen Lagern Reibungszahlen im Bereich bzw. unterhalb normativer Angaben. Darüber hinaus konnten klare Korrelationen der Gleitreibungszahl mit der vorhandenen theoretischen Kontaktspannung sowie der Rollreibungszahl mit der Ebenheit der unteren Lagerplatte nachgewiesen werden.**

#### Entwicklung der Arbeiten

Einschränkungen infolge des gekürzten Bewilligungszeitraumes gab es im Detail wie folgt:

- Beschränkung der numerischen Untersuchungen auf linear-elastisches Werkstoffverhalten
- Eingrenzung der experimentellen Untersuchungen auf die für die Ingenieurpraxis relevanteren Stahlgusslager
- Streichung gesonderter experimenteller Untersuchungen zur maximalen Tragfähigkeit

Die theoretischen Untersuchungen zur Tragfähigkeit stützten sich im Wesentlichen auf umfangreiche parametrisierte Berechnungen unterschiedlicher FE-Modelle mit entsprechend hoher Dichte des FEM-Netzes im Kontaktbereich. Die Gebrauchstauglichkeit wurde experimentell untersucht und der Versuchsaufbau für die Gleit- und Rollreibungsversuche im Universalprüfstand der BAM errichtet (Anlage C1). Bei diesen Untersuchungen war die schwierige Handhabung der massiven Lagerbauteile in Kombination mit den begleitenden Untersuchungen (Vermessung der Oberflächentopographie und Messung der Oberflächenhärte) ein maßgebender Zeitfaktor.

#### Ergebnisse/Erkenntnisse im Detail

##### *Arbeitspakete C1 bis C3 – Geschichte, Grundlagen, Modellierung und Auswertung*

Die Auswertung der historischen Literatur zu Lagerbemessung und Kontaktmechanik kam zu dem Ergebnis, dass schon vor Mitte des 20. Jahrhunderts nachgewiesen wurde, dass der Spannungszustand im Bauteilinnern für den Beginn des Materialversagens maßgebend ist. Entsprechende analytische und numerische Untersu-

chungen im Rahmen des Forschungsvorhabens konnten zunächst für den Linienkontakt zweier Körper (Zylinder-Ebene) einen linearen Zusammenhang zwischen der Hertzschen Kontaktspannung und der v. Mises-Vergleichsspannung, die als ein Maß für die Beanspruchbarkeit angesehen werden kann, belegen. Weiterhin zeigten die Untersuchungen, dass bei üblichen Bauteilabmessungen und Belastungen die Forderung der Hertzschen Theorie nach einer im Verhältnis zu den übrigen Abmessungen kleinen Kontaktfläche eingehalten wird. Für den Punktkontakt zweier Körper (Kugel-Ebene/Schale) hingegen wurde gezeigt, dass diese Forderung an der realen Lagergeometrie zumeist nicht eingehalten wird. Hier entstehen erhebliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Analytik am Hertzschen Ersatzmodell und der Numerik am virtuellen „realen“ Lagermodell. Es konnte ein Verfahren zur Korrektur der an der Ersatzgeometrie analytisch ermittelten Spannungen erarbeitet werden.

#### *Arbeitspaket C4 – Untersuchungen zur Gebrauchstauglichkeit*

Die Versuche zur Ermittlung der Gleitreibungszahl wurden an insgesamt 23 Berührungskipp-Gleitlagern (Baujahr um 1910) durchgeführt. Interessanterweise nahmen die statistisch abgesicherten oberen (95%-Quantil) Gleitreibungszahlen bei steigender Kontaktspannung stetig ab. Dieser Zusammenhang konnte durch die Adhäsionstheorie der Reibung bestätigt und die Beziehung durch einen speziell für die untersuchten Lager ermittelten Parametersatz angegeben werden. Weiterhin zeigten Untersuchungen an ungereinigten Lagern, dass Rost und Schmutz zwischen den beiden Gleitpartnern eine Schmierung bewirkten und somit die Reibungszahlen reduzierten.

Gleichermaßen bedeutend für die Ingenieurpraxis waren die Erkenntnisse zur Rollreibung: Die 8 untersuchten Zylinderzapfen-Kipplager auf 4 Rollen (Baujahr um 1910) zeigten statistisch abgesicherte obere Rollreibungszahlen von ca. 2 bis 5% der vertikalen Auflast. Hierbei blieben die Reibungszahlen der einzelnen Lager über den gesamten Prüflastbereich bis hin zur 2,7-fachen Bemessungslast konstant. Es konnte jedoch ein Zusammenhang der Rollreibungszahlen mit dem durch Abrostungen entstandenen Unebenheitsmaß der unteren Lagerplatten nachgewiesen werden.

Aufschlussreich für alle Beteiligten erwies sich im Versuchstand das Verhalten von 2 ungereinigten Lagern mit festgerosteten Walzen und erheblichen Rost und Schmutzablagerungen: Die anfänglichen Rollreibungszahlen von bis zu 70% der vertikalen Auflast sanken auf ca. 10% ab, nachdem sich ein bis zwei der festgerosteten Walzen unter den hohen Belastungen im Versuchstand sukzessive gelöst hatten.

Weder bei den Gleit- noch bei den Wälzlagern konnten die im Vorfeld der Untersuchungen angenommenen Aufhärtungen der Kontaktbereiche in signifikanter Größe nachgewiesen werden. Die Vermessung der Lagerwalzen zeigte keine nennenswerten plastischen Verformungen infolge der Versuchsbelastung.

#### *Arbeitspaket C5 – Untersuchungen zur Tragfähigkeit*

Die Versuche zur Gebrauchstauglichkeit zeigten, dass bei Belastungen bis zur 1,5-fachen (Gleitlager) bzw. bis zur 2,7-fachen (Wälzlager) maximalen bauzeitlichen Bemessungslast weder die Gebrauchstauglichkeit noch die Tragfähigkeit der Lager eingeschränkt werden.

#### *Arbeitspakete C6 – Zusammenfassung und Auswertung der Ergebnisse aus den Forschungszielen B und C*

Die besondere Stärke der untersuchten Lager ist ihre einfache, robuste und funktionale Ausführung. Bauzeitlich profitierten sie von einem großen Erfahrungsschatz der Stahlgießer und der sukzessiven Weiterentwicklung industrieller Herstellungsverfahren. Um 1900 bereits waren Zugfestigkeiten von über 600 N/mm<sup>2</sup> zuverlässig herstellbar, wobei das Verhältnis Streckgrenze/Zugfestigkeit von Stahlguss etwa in der Größenordnung von 0,5 liegt. Gleichwohl verleitete die massige Bauteilgeometrie der Lager offenbar gelegentlich zu Nachlässigkeiten im Herstellungsprozess, kennzeichneten doch noch in den 1930er Jahren zum Teil unerwartet große Lunker das Werkstoffgefüge, obwohl die „Spielregeln“ zur Vermeidung solcher beim Guss hinlänglich bekannt waren.

In funktionsfähigem Zustand liegen die ermittelten Reibungszahlen unterhalb bzw. zumindest im Bereich heute gültiger normativer Angaben ( $\mu_{\text{Gleitreibung}}=1,0$ ;  $\mu_{\text{Rollreibung}}=0,05$ ). Ihr Schwachpunkt ist der aufgrund mangelnder Wartung oft schlechte Gebrauchstauglichkeitszustand. Eine Revitalisierung ist in-situ zwar aufwendig, grundsätzlich jedoch durchführbar und zielführend.

### *Arbeitspaket C7 – Formulierung von Bedingungen, unter denen sich die Erkenntnisse verallgemeinern lassen*

Da die erarbeiteten Methoden zur Spannungsermittlung und –korrektur auf den Hertzschen Gleichungen aufbauen, bleibt deren Möglichkeit zur Parametrisierung bzgl. der Geometrie- und Werkstoffparameter unterschiedlicher Kontaktpartner (Zylinder-Ebene, Kugel-Ebene, Kugel-Schale) erhalten.

Die Erkenntnisse der Gleitreibungsversuche wurden zur einfachen Übertragbarkeit auf andere, typologisch verwandte Lager kontaktspannungsabhängig dargestellt. Die grundsätzliche Übertragbarkeit ist jedoch anhand weiterer Untersuchungen mit unterschiedlich dimensionierten Lagern zu bestätigen. Für die Rollreibungszahlen ist der Einfluss der Walzenradien und –anzahl zur Verallgemeinerung der Erkenntnisse zu klären.

### *Arbeitspaket C8 – Benennung, Charakterisierung und Wichtung der relevanten Merkmale und Parameter*

Wesentliche Erkenntnisse wurden einem internationalen Publikum vorgestellt bzw. sukzessive veröffentlicht:

- Eisenkolb, T.; Mehdiانpour, M.: Bewertung historischer Brückenlager – Experimentelle Untersuchungen zur Rollreibung. Stahlbau 82 (2013), S.890-897.
- Mehdiانpour, M.; Eisenkolb, T.: Experimental Investigations on Sliding Friction of Historic Bridge Bearings. In: Jasienko, J. (Ed.): Proceedings of the 8th International Conference on Structural Analysis of Historical Constructions, Wroclaw, Oct 15-18, 2012, vol.3, S.2181-2188.
- Eisenkolb, T.; Mehdiانpour, M.: Bewertung historischer Brückenlager - Das Kontaktproblem - Teil 2. Stahlbau 81 (2012), S.510-518.
- Wetzck, V.; Eisenkolb, T.; Mehdiانpour, M.: Bewertung historischer Brückenlager - Das Kontaktproblem - Teil 1. Stahlbau 80 (2011), S.404-412.

Darüber hinaus werden diese sowie die Erkenntnisse weiterführender numerischer Untersuchungen mit elastisch-plastischem Werkstoffverhalten in der unter P.2.6 aufgeführten Dissertation zusammengeführt.

Für eine endgültige Benennung und Charakterisierung der relevanten Merkmale und Parameter sind weitere Untersuchungen mit unterschiedlichen elastisch-plastischen Werkstoffmodellen und daraus abgeleiteten Aussagen zu den Grenzzuständen sowie die experimentelle Ermittlung der unter C.7 genannten Einflüsse auf die Reibungszahlen erforderlich. Die Wichtung der relevanten Merkmale und Parameter muss dann anhand systematischer zuverlässigkeitstheoretischer Untersuchungen an typischen Überbausystemen erfolgen.

#### Denkbare Folgeuntersuchungen

- Numerische Untersuchungen mit:
  - verschiedenen experimentell ermittelten Werkstoffkennlinien im plastischen Bereich
  - unterschiedlichen Materialien innerhalb der Kontaktpaare (Lager- und Gleitplatte) sowie
  - Erweiterung der numerischen Kontaktmodellierung mit experimentell ermittelten Gleitreibungszahlen zur Berücksichtigung von Schubspannungen zwischen den Kontaktflächen
- Traglastversuche (in der 25 MN Großprüfmaschine der BAM)
- Untersuchung der Schubfestigkeit des Lagerwerkstoffes und Ableitung von Aussagen über den Verschleiß
- Gleit- und Rollreibungsversuche mit unterschiedlich dimensionierten Lagern

#### **Ziel D: Prinzipielle Einschätzung der Ermüdungssicherheit historischer Lager und ggf. Hinweis auf die Notwendigkeit weitergehender Untersuchungen**

---

Zur Einschätzung der Ermüdungssicherheit sind wichtige Grundlagen zusammengetragen worden. Zu nennen sind die Einflüsse der Bauteilgeometrie bzw. des Bauteilgefüges, der Einfluss des Spannungszustands, aber auch zeitabhängige Einflüsse. Eine akute Gefährdung der Lager lässt sich aus diesen Daten nicht ableiten, es wird jedoch empfohlen, das Problem vertiefend zu untersuchen.

## Entwicklung der Arbeiten

Die Arbeiten im Forschungsziel zielten auf die Bündelung aller ermüdungsrelevanten Erkenntnisse aus dem Vorhaben. Eine entsprechende Bilanz wurde erst zum Abschluss des Vorhabens gezogen.

## Ergebnisse/Erkenntnisse im Detail

### *Arbeitspaket D1 – Recherche der Grundlagen*

Die Recherche ergab, dass bisher weder die lagerspezifischen Grundlagen noch theoretische Bemessungsansätze oder sonstige Empfehlungen für eine Einschätzung der Ermüdungsfestigkeit zur Verfügung stehen.

### *Arbeitspaket D2 – Auswertung bisheriger Erkenntnisse*

- Bisherige Erfahrungen: Die Arbeiten zum Forschungsziel A haben keine Hinweise auf Schadensfälle an historischen gusseisernen und stählernen Brückenlagern infolge Materialermüdens gegeben.
- Einfluss der Geometrie: Aus gießereitechnischen Gründen weisen historische Lagerkörper eine bezüglich ihrer Ermüdungssicherheit vorteilhafte gedrungene, kompakte Grundgeometrie auf.
- Einfluss des Werkstoffs: Wegen des bis weit ins 20. Jahrhundert hinein unzuverlässigen Glühprozesses und der vorgefundenen Lunker in zum Teil beträchtlichen Größenordnungen muss hinsichtlich der Ermüdungssicherheit ein Gefährdungspotenzial durch Werkstoffeinflüsse festgehalten werden.
- Einfluss des Spannungszustandes: Im Bauteilinneren können lokal sehr hohe Spannungen auftreten. Es ist nicht auszuschließen, dass die ermüdungsrelevanten Spannungsschwingbreiten beachtenswerte Beträge erreichen. Strukturschwächen wie z.B. die genannten Lunker können zusätzliche Spannungsspitzen erzeugen und die zur Rissinitiierung notwendige Kerbe im Bauteilinneren darstellen.

### *Arbeitspaket D3 – Berücksichtigung weiterer Erkenntnisse auf das Ermüdungsverhalten*

- Zeitabhängige äußere Einflüsse: Seit dem 19. Jahrhundert sind die Verkehrslasten im Straßen- und Schienenverkehr gestiegen. Scheint bei den Achslasten das Limit inzwischen nahezu erreicht, so wird mit Bezug auf die Güterverkehrsmenge bis 2025 ein weiterer Zuwachs von bis zu 80% prognostiziert<sup>8</sup>. Zumindest für Brückenlager der Hauptstrecken bedeutet diese Entwicklung größere Lastspielzahlen.
- Zeitabhängige innere Einflüsse: Auf Grund der Herstellung der Lager als Formguss mit anschließendem – wenngleich unzuverlässigem – Glühvorgang können Einflüsse aus *Abschreckalterung* oder *Reckalterung* praktisch vernachlässigt werden. Zwar überwog das Frischen im Tiegel, der Guss aus dem Konverter kann aber nicht ausgeschlossen werden; insofern sind Einflüsse der selbstinduzierten *natürlichen Alterung* der windgefrischten Konverterstähle mit hohem Stickstoffanteil zu beachten. Die Zugabe von Aluminium als Desoxydationsmittel war auch in der Zwischenkriegszeit noch nicht selbstverständlich (Aluminium bindet überschüssigen Stickstoff zu Al-Nitrid ab und verringert die Neigung des Stahls zum natürlichen Altern. Ein Al-Gehalt von 0,02% scheint hierfür bereits ausreichend<sup>9</sup>). Der beschleunigende Einfluss hoher Sommertemperaturen auf die natürliche Alterung<sup>10</sup> kann vernachlässigt werden, da die i.d.R. verschatteten Einbaubedingungen der Lager keine Durchwärmung der Lagerkörper auf 50°C und mehr zulassen werden.

### *Arbeitspaket D4 – Schlussfolgerungen*

Insbesondere das bisherige Ausbleiben von Schadensfällen infolge Materialermüdens lässt eine akute Gefährdung der in Nutzung befindlichen Lager nicht erkennen. Oben genannte Punkte zeigen aber auch, dass den historischen Lagern eine Ermüdungssicherheit nicht pauschal und unbegrenzt bescheinigt werden kann.

## Denkbare Folgeuntersuchungen

Die Ergebnisse der vorliegenden Kerbschlagversuche lassen nur grobe Rückschlüsse auf die Zähigkeitseigenschaften der untersuchten Lagerwerkstoffe zu<sup>11</sup>. Als Grundlage für zuverlässigkeitstheoretische Betrachtungen sind Bruchmechanik-Versuche zur Quantifizierung der Zähigkeitseigenschaften angeraten.

---

<sup>8</sup> Naumann, J.: Brücken und Schwerverkehr – eine Bestandsaufnahme. Bauingenieur 85 (2010), S. 2.

<sup>9</sup> Brüttsch/Rüegger AG (Hrsg.): Herstellung des Gussgefüges. Technische Schriftenreihe 04, S. 8.

<sup>10</sup> Baer, W.: Zur Alterung von Thomasstählen. MP Materials Testing 49 (2007), S. 41.

<sup>11</sup> Sedlacek, G. et al: Verfahren zur Ermittlung der Sicherheit von alten Stahlbrücken... Bauingenieur 67 (1992), S.129-36.

## Ziel E: Erarbeitung geeigneter Methoden für Vor-Ort-Untersuchungen der für die statisch-konstruktive Beurteilung relevanten Parameter

---

Das grundsätzliche methodische Vorgehen bei einer Vor-Ort-Lageruntersuchung ist erarbeitet worden; die relevanten Verfahren zur Untersuchung der Werkstoff- und Gefügeeigenschaften wurden benannt und erprobt. Einzig die verlässliche Aufnahme der Wälzkörpergeometrie konnte nicht geklärt werden.

### Entwicklung der Arbeiten

Aus Gründen der Laufzeitkürzung fokussierten die Untersuchungen auf historische Lager aus *Stahlguss*.

Für die Bearbeitung bildeten die Spezialisten der BAM-Abteilung „Zerstörungsfreie Prüfung“ einen wertvollen Anlaufpunkt, deren technische und personelle Ausstattung war größtenteils jedoch durch laufende Forschungsvorhaben gebunden. Um dennoch die gewünschte Prüftechnik mit geschultem Personal aus einer Hand nutzen zu können, wurde die Fa. Block Materialprüfungsgesellschaft mbH – ein in Berlin ansässiges und auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Materialprüfung kompetentes Unternehmen – hinzugezogen.

Die Untersuchungen zur Kalibrierung von Prüfverfahren sind nach dem Auslaufen der Förderung vorrangig durch studentische Abschlussarbeiten weitergeführt worden (vgl. 2.6). Die Bachelorarbeiten haben dabei die prinzipielle Anwendbarkeit ausgewählter Ansätze untersucht, bei Aussicht auf Erfolg bearbeiten Masterarbeiten den Ansatz vertiefend. Insbesondere die Arbeiten auf Masterniveau dauern an, diese sind vornehmlich von der Verfügbarkeit geeigneter Studenten abhängig. Während Ergebnisse vorangegangener Ziele bereits publiziert worden sind, steht die Veröffentlichung der Erkenntnisse aus Ziel E noch aus.

### Ergebnisse/Erkenntnisse im Detail

#### *Arbeitspaket E2 – Besonderheiten historischer stählerner Brückenlager*

Anlage E1 fasst die für eine Untersuchungsmethodik relevanten Besonderheiten zusammen, wobei hinsichtlich statisch-konstruktiver, materialtechnischer, metallurgischer und fertigungstechnischer Besonderheiten als auch mit Bezug auf die In-situ-Zugänglichkeit unterschieden wird.

#### *Arbeitspaket E3, E4 – Entwicklung Untersuchungsmethodik und –verfahren sowie Erprobung*

Anlage E2 stellt das methodische Vorgehen bei der Bauteilerkundung dar. Die Untersuchungsmethodik orientiert sich an der ICOMOS-Charta „Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage“<sup>12</sup> und verfolgt den Ansatz, mit zunehmendem Aufwand bei der Bauteilerkundung sukzessive die Unsicherheiten für die Bauteilbefundung zu reduzieren. Anlage E3 „Technische Inspektion“ erläutert den methodischen Ansatz sowie den verfahrenstechnischen Zugang zur Untersuchung der drei gewichtigen Bereiche *Werkstoff*, *Gefüge* und *Geometrie*. Die Zugänge zu *Werkstoff* und *Gefüge* wurden geprüft und konnten bereits in diversen Gutachten am konkreten Beispiel angewandt werden (vgl. 2.4). An dieser Stelle sei herausgestellt, dass im Rahmen einer In-situ-Untersuchung erst das Abschleifen einer 2 bis 3 Millimeter dicken, sehr inhomogenen Randschicht den Zugang zum den Bauteilkern repräsentierenden Werkstoff gewährt. Mit Bezug auf die Aufnahme der Bauteilgeometrie stellt der Zugang zu den Wälzkörpern ein bisher ungelöstes Problem dar, denn die Kontaktbereiche entziehen sich im Einbauzustand dem Zugang mittels bekannter Messverfahren.

Einzelne Ergebnisse von Ziel E sind bereits veröffentlicht worden:

- Wetzka, V.: Historic Bridge Bearings – Identifying Material Characteristics: Compression Test. In: Jasienko, J. (Ed.): Proc. 8th International Conference SAHC, Wroclaw, Oct 15-18, 2012, vol.3, S.2251-2257.

### Ausblick

In weiteren studentischen Abschlussarbeiten werden ausgewählte Prüfverfahren vornehmlich auf Masterniveau vertiefend untersucht. Die sukzessive Veröffentlichung der Erkenntnisse soll sich jeweils anschließen. In Anlehnung an des Themeft in der Zeitschrift STAHLBAU bietet sich hierfür ggf. die gebündelte Publikation in einem eigenen Themenheft zum Beispiel in der Fachzeitschrift MATERIAL TESTING an.

---

<sup>12</sup> International Council of Monuments and Sites (ICOMOS): Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage. Charter of Victoria Falls. 2003.

### Denkbare Folgeuntersuchungen

- Entwicklung eines separaten Forschungsantrags für die In-situ-Aufnahme der Wälzkörpergeometrie
- Untersuchungen zur Quantifizierung des Gesamtfehlers bei der zerstörungsfreien Werkstofferkundung
- Erweiterung der Untersuchungsmethodik auf Brückenlager aus Gusseisen.

### **2.4 Verwertungspotenzial**

Auf Grund der Vielzahl in Nutzung befindlicher historischer stählerner Brückenlager ist ein Bedarf an verlässlichen Bewertungsmethoden offensichtlich. Vorstellbar ist, ausgewählte Erkenntnisse des Vorhabens in relevante Normen oder Richtlinien einfließen zu lassen. Darüber hinaus sind aus dem Kreise der Bearbeiter bereits diverse Gutachten angefertigt worden, zumeist in Kooperation mit der Block Materialprüfungsgesellschaft mbH:

- Gleisbrücke in Böhlen: Begutachtung und Beschreibung der Lager des Einhängeträgers, 2014.
- Gerickestegs in Berlin: Gutachterliche Stellungnahme zum Zustand der Bestandslager, 2013.
- Kohlebahnbrücke bei Neuhausen: Gutachterliche Stellungnahme zum Zustand der Bestandslager, 2012.
- Talbrücke Müngsten: Gutachterliche Stellungnahme zum Zustand der Bestandslager, 2012.
- Brunnengalerie Hohen Neuendorf: Gutachterliche Stellungnahme zu Lagerwerkstoff und -gefüge, 2012.
- NME Brücke in Berlin: Gutachterliche Stellungnahme zum Zustand der Brückenlager, 2011.
- Brooksbrücke Hamburg: Gutachterliche Stellungnahme zum verwendeten Lagerwerkstoff, 2010.

Der volkswirtschaftliche Wert des im Ziel A vorgeschlagenen „Leitfaden zum fachgerechten Umgang mit historischen Brückenlagern“ ist unverkennbar. Damit stünde ausschreibenden Institutionen, Brückeneignern und ausführenden Firmen eine abgesicherte Grundlage für entsprechende Aufgaben zur Verfügung.

### **2.5 Wer hat zu den Ergebnissen des Projekts beigetragen (Projektmitarbeiter/innen usw.)**

Unter Leitung der Antragsteller haben in Cottbus und Berlin zu den Ergebnissen des Projekts beigetragen:

- Dr.-Ing. Volker Wetzka (BTU) und Dipl.-Ing. Tino Eisenkolb (BAM) als Bearbeiter
- Dr.-Ing. Milad Mehdianpour (BAM), projektbetreuender Wissenschaftler
- Wissenschaftliche und Technische Mitarbeiter des FB. 7.2 der BAM
- Technische Mitarbeiter des Lehrstuhls Metallkunde und Werkstofftechnik und der FMPA der BTU Cottbus
- sowie studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte der BTU und BAM.

Zudem haben das Projekt gefördert: Die Berliner Verkehrsbetriebe (BVG) - AöR - mit der Bereitstellung des Untersuchungsfundus sowie Mitarbeiter der Deutschen Bahn AG, der Firmen OTHER-Montagen und Block Materialprüfungsgesellschaft mbH sowie des ehem. VEB Stahlgießerei Karl-Marx-Stadt.

### **2.6 Qualifikation des wissenschaftlichen Nachwuchses im Zusammenhang mit dem Projekt**

In die Projektbearbeitung sind bisher verschiedenste Abschlussarbeiten thematisch eingegliedert worden:

- Eisenkolb, T.: Beitrag zur statisch-konstruktiven Bewertung historischer Brückenlager (Arbeitstitel). Dissertation TU Berlin (in Bearbeitung seit 2009, Abgabe 1. Quartal 2015).
- Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - Die Aussagekraft thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Masterarbeit BTU Cottbus – Senftenberg, 2014 (in Bearbeitung).
- Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014. (Anlage BA5)
- Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014. (Anlage BA4)
- Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013. (Anlage BA3)
- Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013. (Anlage BA6)
- Dogru, M.: Bewertung historischer Brückenlager – Herstellungsverfahren und Werkstoffeigenschaften von Stahlguss in Deutschland zwischen 1870 und 1950. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

- Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012. (Anlage BA2)
- Hocke, A.: Versagenshypothesen am Beispiel historischer Brückenlager aus Gusseisen und Stahl. Masterarbeit HTW Berlin, 2012.
- Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011. (Anlage BA1)

Erfreulicherweise konnten einige der im Projekt beschäftigten studentischen Mitarbeiter (nachfolgend fett gedruckt) das erwähnte Themenheft „Brückenlager im Bestand“ zur Publikation ihrer Erkenntnisse nutzen:

- Wetzck, V.; **Dogru, D. M.:** Historischer Stahl(form)guss - Herstellung. Stahlbau 82 (2013), S.898-902.
- **Balscheit, H.; Else, M.:** Bewertung historischer Brückenlager - Härte- und Verformungsmessungen. Stahlbau 82 (2013), S.934-937.

## 2.7 Ingenieurwissenschaftlicher Erkenntnisgewinn

Gegenüber dem Zeitpunkt der Antragstellung konnten im Projekt wichtige ingenieurwissenschaftliche Erkenntnisse erarbeitet werden. So wissen wir heute, ...

- dass die historische Lagertechnik mit ihrer robusten Bauart unverdientermaßen das Image eines Verschleißbauteils besitzt. Mängel oder Schäden an diesen Lagern – wenn solche auftreten – sind zumeist auf jahrzehntelang vernachlässigte Wartung und nicht auf die Lager selbst zurückzuführen.
- welches die typischen zeitgenössischen Herstellungsverfahren von Stahlguss waren und können im Falle einer anstehenden Bewertung historischer Lager allein aus deren bauzeitlichen Einordnung erste Rückschlüsse auf die vermutlichen werkstofflichen Eigenschaften ableiten. Hierbei beruhigt die Erkenntnis, dass bereits der ganz frühe Stahlguss von einer sehr guten werkstofflichen Qualität gekennzeichnet war.
- dass trotz aller bauzeitlichen Erfahrungen und Fortschritte beim Formguss von Stahl praktisch nie Lunker in signifikanter Größenordnung ausgeschlossen werden können.
- dass die Hertzsche Forderung einer im Vergleich zu den übrigen Abmessungen kleinen Kontaktfläche bei realistischen Belastungen in der Regel nur beim Linienkontakt eingehalten wird und hier ein linearer Zusammenhang zwischen Kontakt- und v. Mises-Vergleichsspannung (als allg. Beanspruchungskriterium) besteht.
- dass historische stählerne Lager bei regelmäßiger Wartung heute gültige normative Werte der Gleit- und Rollreibungszahlen erfüllen, wobei die Gleitreibungszahlen mit der Kontaktspannung und die Rollreibungszahlen mit dem Unebenheitsmaß der unteren Lagerplatte korrelieren. Rost- und Schmutzablagerungen können die gleitende Reibung sogar reduzieren.
- dass Erhöhungen der maximalen Traglast in gewissem Rahmen möglich sind, ohne die Gleit- bzw. Rollreibungszahlen negativ zu beeinflussen. Unter realistischen Belastungen entstehen weder signifikante plastische Verformungen noch Aufhärtungen der Kontaktbereiche.
- dass übliche Gegebenheiten in den Lagerbauteilen prinzipiell das Potenzial für Rissinitiierung und -wachstum aufweisen. Zwar ist bisher kein Ermüdungsversagen an historischen stählernen Lagern bekannt geworden, daraus darf jedoch keine unbegrenzte Ermüdungssicherheit abgeleitet werden – insbesondere vor dem Hintergrund einer etwaigen Zunahme des Verkehrsaufkommens.
- dass bei der In-situ-Werkstofferkundung zwingend eine zwei...drei Millimeter starke Randschicht partiell abgetragen werden muss, um an repräsentatives Kernmaterial zu gelangen. Bei dieser zerstörungssarmen Werkstofferkundung ist unter Einbindung einer Vielzahl unterschiedlicher Zugänge eine zuverlässige Benennung der Werkstoffeigenschaften möglich.
- dass eine Entnahme von Probenmaterial am eingebauten Lager nur eingeschränkt möglich ist und sich auf die zumeist mit Gefügeungängen durchsetzten, statisch unwirksamen Randbereiche begrenzen muss. Die Erkundung und Verortung nennenswerter Gefügeungängen (Lunker, Oberflächenrisse) ist mit herkömmlichen Prüfverfahren zumeist möglich, setzt jedoch erfahrenes Personal voraus.

### 3 Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit den seit Jahren anhaltenden Bemühungen um den Erhalt in Nutzung befindlicher historischer Brücken sind auch die historischen gusseisernen und stählernen Brückenlager ins Blickfeld der Ingenieure gerückt. Das Fehlen wichtiger Grundlagen für eine statisch-konstruktive Bewertung dieser Lager gab Anlass für das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderte Vorhaben „Realitätsnahe statisch-konstruktive Bewertung historischer Brückenlager“ (Geschäftszeichen LO 568/8-1; RU 326/7-1), welches ab 2009 bis 2012 in einer zweijährigen Laufzeit gemeinsam von der BTU Cottbus und der BAM Berlin bearbeitet wurde.

Gegenüber der Antragstellung wurde der Förderzeitraum auf zwei Jahre begrenzt. Der gekürzte Bewilligungszeitraum erforderte eine Revision des ursprünglichen Arbeitsprogramms, welches sich daraufhin thematisch auf die praxisrelevanteren *stählernen* Lager mit folgenden Bearbeitungszielen konzentrierte:

- Ziel A: Erfassung und Auswertung bisheriger Erfahrungen mit diesen Lagern
- Ziel B: Ermittlung der Eigenschaften des historischen Lagerwerkstoffs
- Ziel C: Erarbeitung von Grundlagen zur Bewertung der Grenzzustände
- Ziel D: Einschätzung der Ermüdungssicherheit der historischen Lager
- Ziel E: Erarbeitung geeigneter Methoden für die In-situ-Befundung der historischen Lager.

Bei der Aufarbeitung bisheriger Erfahrungen (Ziel A) blieb die Auswertung relevanter Fachzeitschriften ohne Erkenntnisgewinn. Hingegen konnte das Projekt von Erfahrungen aus der Sanierungspraxis und von Kontakten zur DB Netz AG als größtem Eigner an historischen Brücken profitieren. Interessant war vor allem die Feststellung, dass ein Großteil der Schäden an historischen Lagern auf mangelnde Wartung zurückzuführen ist.

Umfangreiche Untersuchungen (Ziel B) gewährten vertiefte Erkenntnisse zur werkstofflichen Qualität historischer Lager und bestätigten einen zumeist hohen Standard bei der zeitgenössischen Herstellung von Stahlgussbauteilen. Die Aufarbeitung der historischen Herstellungsverfahren erlaubt der Ingenieurpraxis bei der Begutachtung historischer Bauteile erste Rückschlüsse auf mögliche Werkstoffeigenschaften.

Die Untersuchung der zur Bewertung der Grenzzustände (Ziel C) erforderlichen Grundlagen fokussierte die Kontaktbereiche zwischen Wälzkörper und Lagerplatten. Hier konnte ein linearer Zusammenhang zwischen Hertzscher Kontakt- und v. Mises-Vergleichsspannung beim Linienkontakt nachgewiesen werden. Beim Punktkontakt wichen die mit den Hertzschen Gleichungen berechneten Spannungen aufgrund von Idealisierungen vom Spannungsverlauf der tatsächlichen Lagergeometrie ab. Hierfür konnte eine Korrekturmethode erarbeitet werden. Gleit- und Rollreibungsversuche ergaben bei funktionsfähigen Lagern Reibungszahlen im Bereich bzw. unterhalb normativer Angaben. Darüber hinaus konnten Korrelationen der Gleitreibungszahl mit der theoretischen Kontaktspannung sowie der Rollreibungszahl mit dem Ebenheitsmaß der unteren Lagerplatte nachgewiesen werden. Zur Einschätzung der Ermüdungssicherheit (Ziel D) sind wichtige Grundlagen zusammengetragen worden. Zu nennen sind die Einflüsse der Bauteilgeometrie bzw. des Bauteilgefüges, der Einfluss des Spannungszustands, aber auch zeitabhängige Einflüsse. Eine akute Gefährdung der Lager lässt sich aus diesen Daten nicht ableiten, es wird jedoch empfohlen, das Problem vertiefend zu untersuchen.

Das grundsätzliche methodische Vorgehen bei einer Vor-Ort-Lageruntersuchung ist erarbeitet worden (Ziel E); die relevanten Verfahren zur Untersuchung der Werkstoff- und Gefügeeigenschaften wurden benannt und erprobt. Einzig die verlässliche Aufnahme der Wälzkörpergeometrie konnte nicht geklärt werden. Hierzu ist ein eigenes Forschungsvorhaben angeraten, welches auf den vorliegenden Erkenntnissen aufbauen kann.

Wichtige Erkenntnisse des Vorhabens sind bereits auf internationalen Kongressen vorgestellt sowie in einschlägigen Fachzeitschriften publiziert worden, wobei das aus dem Vorhaben hervorgegangene Themenheft in der Fachzeitschrift STAHLBAU als gebündelte Darstellung hervorzuheben ist. Weitere Veröffentlichungen sind geplant. Herauszustellen ist auch die intensive Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses durch unmittelbare Einbindung in die Projektbearbeitung. Einige der Studierenden konnten ihre Erkenntnisse bis zur Publikationsreife entwickeln. Eine Dissertation zu spezifischen Projekthinhalten ist in der redaktionellen Endbearbeitung.

Bereits während der Projektbearbeitung konnten auf Anfrage aus der Ingenieurpraxis verschiedene Brückenlager gutachterlich untersucht und bewertet werden. Es besteht die begründete Aussicht, auf dieser Ebene den Erkenntnistransfer aus dem Projekt in die Ingenieurpraxis verstetigen zu können.

## Anlagenverzeichnis

---

- Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)
- Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“
- Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften
- Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen
- Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung
- Anlage B1: Materialkorridor
- Anlage C1: Versuchsstand
- Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager
- Anlage E2: Untersuchungsmethodik
- Anlage E3: Technische Inspektion
- Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011.
- Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.
- Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.
- Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)

**Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“**

Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften

Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen

Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung

Anlage B1: Materialkorridor

Anlage C1: Versuchsstand

Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager

Anlage E2: Untersuchungsmethodik

Anlage E3: Technische Inspektion

Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011.

Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.

Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.

Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.



- Brückenlager im Bestand – Erfahrungen der DB Netz AG
- Historische Lager aus Stahlguss – Werkstoffuntersuchungen
- Bewertung historischer Brückenlager – Rollreibung
- Historischer Stahl(form)guss – Herstellung
- Federgelenke – Anwendung im Hoch- und Brückenbau
- Brückenlager sprengen – Minenanlagen
- The bearings of the Hrdecky Bridge in Ljubljana
- Stahlgusslager des Eisenbahnviadukts Angelroda
- Stahlgusslager der Lechbrücke „Osramsteg“
- A U.S. Phenomenon: Tall, Slender Bridge Rocker Bearings
- Härte- und Verformungsmessungen an Brückenlagern
- Stahlhalle mit mehreren Kränen für Zug- und Schiffslogistik



Das Titelbild zeigt eine typische Auflagersituation historischer stählerner Brücken und verdeutlicht das Problemfeld, welches sich Bauingenieuren im Zusammenhang mit Arbeiten an Brücken im Bestand oft stellt: Der Überbau ist sanierungsbedürftig, der Unterbau in Teilen auch. An der sensiblen Schnittstelle befinden sich bauzeitliche Lager, die zumindest augenscheinlich noch intakt wirken. Wie aber sind diese Lager statisch-konstruktiv zu bewerten: Welches Material wurde verwendet? Können die Lager mit den aktuellen oder prognostizierten Lasten umgehen? Wie steht es um die Beweglichkeit der Lagerwalzen? Wie wurden die Lager am Unterbau befestigt? ... Viele Fragen, die oft unbeantwortet bleiben. Das vorliegende Heft widmet sich einigen der Fragen.

(Titelbild: Eisenbahnbrücke über die Neiße bei Forst, Foto: Roland Wieczorek)

# Stahlbau 12

82. Jahrgang  
Dezember 2013, Heft 12  
ISSN 0038-9145 (print)  
ISSN 1437-1049 (online)

Wilhelm Ernst & Sohn  
Verlag für Architektur und technische  
Wissenschaften GmbH & Co. KG  
www.ernst-und-sohn.de



### Peer-reviewed journal

Stahlbau ist ab Jahrgang 2007 bei  
Thomson Reuters Web of Knowledge  
(ISI Web of Science) akkreditiert

**Impact-Faktor 2012: 0,256**

**Wiley  
Online  
Library**

www.wileyonlinelibrary.com, die Plattform  
für das Stahlbau Online-Abonnement

### Editorial

877 Volker Wetzki  
**Brückenlager im Bestand**

### Fachthemen

879 Heiko Gregorski  
**Brückenlager im Bestand – Erfahrungen der DB Netz AG**

883 Volker Wetzki  
**Historische Lager aus Stahlguss – Werkstoffuntersuchungen**

890 Tino Eisenkolb, Milad Mehdiانpour  
**Bewertung historischer Brückenlager –  
Experimentelle Untersuchungen zur Rollreibung**

898 Volker Wetzki, Duygu Melis Dogru  
**Historischer Stahl(form)guss – Herstellung**

903 Gregor Schacht, Nora Hoffmann, Steffen Marx  
**Federgelenke – Anwendung im Hoch- und Brückenbau**

911 Volker Mende  
**Brückenlager sprengen – Minenanlagen zur Zerstörung von Brückenpfeilern**

921 Lara Slivnik  
**The bearings of the Hradecky Bridge in Ljubljana**

### Berichte

924 Thomas Riedel, Rüdiger Schwarz, Gerhard Bretzke  
**Umgang mit Stahlgusslagern – am Beispiel der Sanierung des historischen  
Eisenbahnviadukts Angelroda**

927 Lutz Othar  
**Umgang mit Stahlgusslagern – am Beispiel der Sanierung der Lechbrücke, Augsburg**

931 Julie Mark Cohen  
**A U.S. phenomenon: Tall, Slender Bridge Rocker Bearings**

934 Hagen Balscheit, Marcus Else  
**Bewertung historischer Brückenlager – Härte- und Verformungsmessungen**

938 Rudolf Klarmann  
**Stahlhalle mit mehreren Kränen für Zug- und Schiffslogistik**

### Rubriken

882 Aktuell (s. a. S. 897, 923, 930, 937, 947)

943 Persönliches

944 Rezensionen

946 Firmen und Verbände

948 Termine

### Stellenmarkt

### Produkte & Objekte

A4 Brückenbau

A8 Brandschutz

A11 Industrie- und Gewerbebau

A17 Aktuell

## Brückenlager im Bestand



Volker Wetzka

Vor etwa 150 Jahren begann der Werkstoff Stahl dem Brückenbau neue Dimensionen zu eröffnen. Fortan konnten Spannweiten realisiert werden, von denen man nur wenige Jahre zuvor kaum zu träumen vermochte. Im Schatten dieser Entwicklung wurde auch die Brückenlagertechnik revolutioniert, denn die üblicherweise verwendeten hölzernen Auflagerschwellen genügten den neuen Anforderungen nicht mehr. Es reifte eine eigenständige Brückenlagertechnik – nun aus Gusseisen oder Stahl – mit einer ihr eigenen Konstruktionsprache heran: Mit Bolzen, Zapfen und Walzen hielten Elemente des Maschinenbaus Einzug in den Brückenbau. Die Entwicklung dieser eisernen und stählernen Lagergeneration wurde ganz wesentlich in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und von deutschen Ingenieuren geprägt. Um 1900 steuerte der Physiker *Heinrich Hertz* den noch heute gebräuchlichen Ansatz zur Bemessung der Kontaktspannungen bei.

Im 20. Jahrhundert kam es jedoch zu einem Bedeutungsverlust dieser Lagergeneration – zunächst für Forschung und Entwicklung, in der zweiten Jahreshälfte auch für die Anwendung. Die gusseisernen und stählernen Lager verschwanden sukzessive aus dem Ingenieurbau, den Fachbüchern, dem Normenwerk und schließlich aus der öffentlichen Wahrnehmung. Warum dann dieses Heft?

Für Bauingenieure sind die – nunmehr historischen – Lager zurück ins Blickfeld gerückt. Angesichts der zunehmenden Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen an bestehenden Brückenbauwerken muss auch der Zustand der vorhandenen Lager beurteilt werden, haben diese doch eine Schlüsselfunktion innerhalb der Tragwerke – funktional, konstruktiv und gestalterisch. Mangels verlässlicher Grundlagen bleiben hierbei viele Fragen unbeantwortet – zunächst ganz grundsätzliche, wie zur Tragfähigkeit oder Gebrauchstauglichkeit der Lager, aber auch spezielle Fragen, zum Beispiel zu den Möglichkeiten einer zerstörungsfreien In-situ-Untersuchung des Lagerwerkstoffs. Der Gedanke, die alten Lager einfach gegen neue zu tauschen, mag verlockend und vor allem einfach klingen, die Umsetzung ist oft genug aber schwierig und teuer.

Vor diesem Hintergrund etablierte sich um 2004 am Lehrstuhl Bautechnikgeschichte und Tragwerkserhaltung der BTU Cottbus ein Forschungsschwerpunkt, der sich zunächst den historischen Grundlagen der Lagerherstellung widmete. Diese Phase fand 2010 mit einer Dissertation „Brückenlager.1850–1950“ ihren Abschluss. Darauf aufbauend wurden gemeinsam mit der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin in einem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Vorhaben „Realitätsnahe statisch-konstruktive Bewertung historischer Brückenlager“ Erkenntnisse für die Ingenieurpraxis erarbeitet. Einige sind bereits veröffentlicht worden, weitere finden sich in vorliegendem Heft. Zusammen mit einer in der Schlussredaktion befindlichen – nun zweiten – Dissertation kann das Heft als Abschluss dieser Phase der Arbeiten zur historischen Lagertechnik gesehen werden.

Die Beiträge nähern sich den Brückenlagern im Bestand aus verschiedenen Blickwinkeln – aus dem der Brückeneigner sowie aus denen von Wissenschaft und Ingenieurpraxis. Sie thematisieren werkstoffliche Fragen sowie Aspekte der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Im Mittelpunkt stehen Lager aus Stahlguss, aber auch Lager aus Beton und Gusseisen werden diskutiert. Einigen Fallstudien zum heutigen, zivilen Umgang mit Bestandslagern wird ein Beitrag zum ge-

planten Umgang im Kriegsfall gegenübergestellt. Der Kontrast mag akademisch klingen – tatsächlich aber haben heute wohl die wenigsten Bauingenieure bei Arbeiten an Bestandsbrücken ihre ehemals vielleicht strategische Bedeutung sowie etwaige versteckte bauliche Anlagen „auf dem Plan“. Beiträge aus dem Ausland ergänzen das Heft, wobei der Bericht aus den USA die Bedeutung einer intakten Prozesskette für die Sicherheit von Tragwerken aufzeigt – beginnend bei der Planung bis hin zur Wartung und Bauwerksüberwachung.

Gab es in Amerika bereits ernsthafte Unfälle infolge Lagerversagens, so hatten wir in Deutschland bisher wohl Glück. Denn auch bei uns gab es Fehlentwicklungen! Erinnerung sei nur an die nach dem Zweiten Weltkrieg entwickelten Einrollenlager aus Edelstahl, von denen während ihrer Nutzung einige plötzlich auseinanderbrachen und die noch immer nicht gänzlich zurückgebaut worden sind. Auch bei uns werden Pflege und Wartung der Lager oft vernachlässigt, mit all den Auswirkungen auf Über- und Unterbau. Zudem reduziert sich die Ingenieurausbildung zum Thema „Lager“ überwiegend auf die Einführung einer Symbolik, die lediglich zwischen den Polen „fest“ und „beweglich“ unterscheidet, ohne die Umsetzung der Symbolik am realen Tragwerk zu thematisieren. Später im Ingenieuralltag wird diese Distanz durch die Wesensnähe der Lagertechnik zum Maschinenbau noch verstärkt. Wir müssen uns nicht wundern, dass Bauingenieur und Lager heute so schwer zueinander finden. Ungeachtet eventueller Berührungspunkte jedoch sind die historischen Lager als fester Bestandteil noch bestehender Brückenbauwerke ein wesentlicher Teil einer Erbmasse im Zuständigkeits- und Verantwortungsbereich der Bauingenieure – eine Annäherung ist unumgänglich. Eben hierbei möge dieses Heft helfen.

Mein Dank geht an die Redaktion des STAHLBAU für die Möglichkeit, den Brückenlagern im Bestand ein Themenheft widmen zu können und natürlich an alle Autoren für ihr Engagement bei der Erarbeitung ihrer Beiträge.



Dr.-Ing. *Volker Wetzke*  
BTU Cottbus-Senftenberg,  
Lehrstuhl Bautechnikgeschichte und Tragwerkserhaltung

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)

Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“

### **Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften**

Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen

Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung

Anlage B1: Materialkorridor

Anlage C1: Versuchsstand

Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager

Anlage E2: Untersuchungsmethodik

Anlage E3: Technische Inspektion

Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011.

Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.

Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.

Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## Anlage A1 - Zeitschriftenauswertung

### Fallstudien zu Brücken mit Baujahr vor 1950

Legende:

(x) Ohne Angaben zum methodischen Umgang mit den Bestandslagern

(1) Erhalt der bestehenden Lager

(2) Austausch durch Nachbauten

(3) Ersatz durch moderne Lagertechnik

(4) Differenzierter Umgang

(5) Andere Maßnahmen

(6) Methodisches Vorgehen bei Lageraustausch

Fallstudien zu Brücken mit Baujahr vor 1950	Lager thematisiert			
	nicht	am Rande	angemessen	explizit
Gottier, M.; Hirt, M.A.: Das Ermüdungsverhalten einer Eisenbahnbrücke. Bauingenieur 58 (1983), S.243-249.	x			
Preuss, K.; Baderschneider, H.; Mühsam, H.: Die Sanierung der Wittelsbacherbrücke in München. Bauingenieur 61 (1986), S.161-169.			(1)	
Hickethier, G. et al: Die Sanierung der Hackerbrücke in München. Bauingenieur 61 (1986), S. 295-303.				(3)
Lüesse, G.: Die Wiederherstellung der Elbbrücke Dömitz, Geschichte der früheren Brücke und Planung..... Bauingenieur 67 (1992), S.565-573.		(3)		
Hambach, Ph.; Wittenkämper, K.; Albrecht, A.: Hängebrücke Wehlen. Historie, Ertüchtigungsplanung,..... Bauingenieur 69 (1994), S.279-285.			(5)	
Beier, H. et al: Südbrücke über den Rhein in Köln. Eisenbahningenieur 46 (1995), S. 504-516			(2)	
Keller, A.; Brühweiler, E.; Hirt, M.A.: Künftige Nutzung einer 135jährigen genieteten Brücke für S-Bahnverkehr. Stahlbau 65 (1996), S.210-217.	x			
Schumann, R.: Instandsetzung von Stahlbrücken. Stahlbau 65 (1996), S.467-473			(3)	
Schlottke, W.; König, G.: Grundinstandsetzung der Weidammer Brücke. Stahlbau 65 (1996), S.495-501.			(2,3)	
Rahal, M.; Sprung, G.; Ziegler, Th.: Grundinstandsetzung der genieteten 100 Jahre alten Peißnitzbrücke in Halle. Stahlbau 69 (2000), S.756-763.	x			
Oberhofer, H.; Schindler, O.: Teilerneuerung der Donaubrücke in Kelheim(Maximiliansbrücke). Bau intern 9 (2003), S.181-184.		(3)		
Graße, W.; Schmachtenberg, R.; Geißler, K.: Zur Nachrechnung, Restnutzungsdauerberechnung und Ertüchtigungsuntersuchung der Eisenbahnhochbrücke über den Nord-Ostsee-Kanal in Rendsburg. Stahlbau 75 (2006), S.641-652.		x		
Herter, J. et al: 100 Jahre U-Bahn in Deutschland – Zur Ermüdungssicherheit eines Stahlviadukts der Linie 1 in Berlin. Stahlbau 71 (2002), S.97-107.	x			
Holzinger, H. et al: Erneuerung und Verstärkung von fünf eisernen Eisenbahnbrücken von 1889 (2002), S.568-573.			(3)	
Geißler, K.: Die Elbebrücke Blaues Wunder ... – Tragwerk und Maßnahmen zur weiteren sicheren Nutzung. Stahlbau 73 (2004), S.139-150.		x		
Brüning, J.: Bewertung der Weiterverwendung einer alten Stahlbrücke auf der Grundlage bruchmechanischer... Stahlbau 74(2005), S. 754-761	x			
Feldmann, M. et al: Zur Weiterverwendung der Eisenbahnhochbrücke Hochdonn über den Nord-Ostsee-Kanal. Stahlbau 75 (2006), S.145-160.		x		
Danzl, V. et al: Generalinstandsetzung der Salzachbrücke Laufen-Oberndorf. Stahlbau 76 (2007), S.372-380.		x		
Klähne, Th.: Bewertung einer alten genieteten Stahlbrücke – Die Bösebrücke in Berlin. Stahlbau 78 (2009), S.203-213.		x		
Albrecht, G.; Frießem, H.; Langen, Th.: Instandsetzung der historischen Kettenbrücke Nassau. Stahlbau 78 (2009), S.795-799.		x		
Fischer, M.; Lorenz, W.: Stahlbau unter Denkmalschutz – Grundinstandsetzung von Viadukt und Bahnhöfen der Hochbahnlinie U2 in Berlin-Prenzlauer Berg. Stahlbau 80 (2011), S.419-427.				(4)

Allgemeine (methodische) Beiträge zur Sanierung/Ertüchtigung historischer stählerner Brücken	Lager thematisiert			
	nicht	am Rande	angemessen	explizit
Legende: (x) Ohne Angaben zum methodischen Umgang mit den Bestandslagern (1) Erhalt der bestehenden Lager (2) Austausch durch Nachbauten (3) Ersatz durch moderne Lagertechnik (4) Differenzierter Umgang (5) Andere Maßnahmen (6) Methodisches Vorgehen bei Lageraustausch				
Wiedermann, F.: Historische Brücken werden verkehrsgerecht. Bauingenieur 60 (1985), S.136.	x			
Sedlacek, G. et al: Verfahren zur Ermittlung der Sicherheit von alten Stahlbrücken unter der Verwendung neuester Erkenntnisse der Werkstofftechnik. Bauingenieur 67 (1992), S.129-136.	x			
Brandes, K.: Experimentelle Absicherung von Untersuchungen zur Restnutzungsdauer älterer Stahlbrücken. Stahlbau 63 (1994), S.273- 278.	x			
Nather, F.: Dauerhaftigkeit von Stahl- und Stahlverbundbrücken. Stahlbau 63 (1994), S. 215-217.	x			
Geißler, K.: Restlebensdauerberechnung von Stahlbrücken unter Nutzung detaillierter Beanspruchungsverläufe. Stahlbau 64 (1995), S.79-88.	x			
Geißler, K.; Brandes, K.: Restnutzungsdaueranalyse stählerner Brücken. Bauingenieur 71 (1996), S.541-553.	x			
Sedlacek, G. et al: Die Tragsicherheit, die Ermüdungssicherheit und das Sprödbbruchproblem. Stahlbau 65 (1996), S. 407-414.	x			
Brandes, Kl. et al.: Messungen an älteren Stahlbrücken zur Zustandsanalyse und Ermüdungsbeurteilung. Stahlbau 65 (1996), S.421-428.		x		
Hirt, M.A.; Kunz, P.M.: Ermüdungssicherheit bestehender Brücken aus Stahl. Stahlbau 65 (1996), S.399-406.	x			
Bucak, O.; Mang, F.: Erfahrungen mit alten Stahlkonstruktionen. Stahlbau 67 (1998) S. 46-60.	x			
Quoos, V. et al: Zum Restnutzungsdauernachweis für stählerne Eisenbahnbrücken. Stahlbau 69 (2000), S. 10-24.	x			
Machelski, C.: Zur Abschätzung der Betriebssicherheit alter Brücken. Stahlbau 70 (2001), S.393-397.	x			
Vogel, T.: Zustandserfassung von Brücken bei deren Abbruch- Erkenntnisse für Neubau und Erhaltung. Bauingenieur 77(2002), S.559-567.		x		
Geißler, K.; Graße, W.; Brandes, Kl.: Bewertung bestehender Stahlbrücken. In: Kuhlmann, U.: Stahlbau-Kalender 2006. S.486-548.		x		
Kühn, B. et al: Beurteilung bestehender Stahltragwerke: Empfehlung zur Abschätzung der Restnutzungsdauer. Stahlbau 77 (2008), S. 595-607.		x		
Sedlacek, G.; Paschen, M.: Die Bedeutung einer qualifizierten Bauwerksprüfung. Stahlbau 78 (2009), S. 584-592.		x		
Brühwiler, E.; Hirt, M.A.: Umgang mit genieteten Bahnbrücken von hohem kulturellem Wert. Stahlbau 79 (2010), S.209-219.		x		
Zinke, T. et al: Nachhaltigkeitsbewertung von Brückenbauwerken. Stahlbau 79 (2010), S.448-455.	x			

Beiträge explizit zu Brückenlagern – Erhalt/Ersatz/Austausch/...	Lager thematisiert			
	nicht	am Rande	angemessen	explizit
Legende: (x) Ohne Angaben zum methodischen Umgang mit den Bestandslagern (1) Erhalt der bestehenden Lager      (2) Austausch durch Nachbauten      (3) Ersatz durch moderne Lagertechnik (4) Differenzierter Umgang      (5) Andere Maßnahmen      (6) Methodisches Vorgehen bei Lageraustausch				
<b>Bestandslager historisch</b>				
Lorenz, W.: Lagersanierung des Hochbahn-Viadukts der U-Bahn-Linie U2 in Berlin-Prenzlauer Berg. In: Beiträge zur Fachtagung Sonderkapitel aus dem Brücken- und Ingenieurbau. Tagungsbericht Berlin, 21. bis 22. Oktober 2003, S. 59-65.				(4)
Bornhövd, W.; Braun, J.; Tusche, J.: Sanierung und Neuanfertigung von Lagern für Denkmale. Brückenbau (2010) H.4, S.25-28.				(2)
<b>Bestandslager modern</b>				
Krumm, R.; Hahn, G.; Schenk, A.; Neumann, W.: Lagerauswechslung an der Talbrücke Brunsbecke (A45). Stahlbau 62 (1993), S.231-239.				(6)
Geier, R.; Grbic, Sl.; Vcelar, H.: Lageraustausch unter beengten Platzverhältnissen. Beton- und Stahlbetonbau 102 (2007), S.462-470.				(6)

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)

Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“

Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften

Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen

Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung

### **Anlage B1: Materialkorridor**

Anlage C1: Versuchsstand

Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager

Anlage E2: Untersuchungsmethodik

Anlage E3: Technische Inspektion

Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011.

Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.

Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.

Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## Anlage B1: Materialkorridor

---

Durch systematische Auswertung historischer Fachzeitschriften, wie zum Beispiel ...

- Stahl und Eisen: Jahrgänge 1880-1955
- Gießerei: Jahrgänge 1930-1950

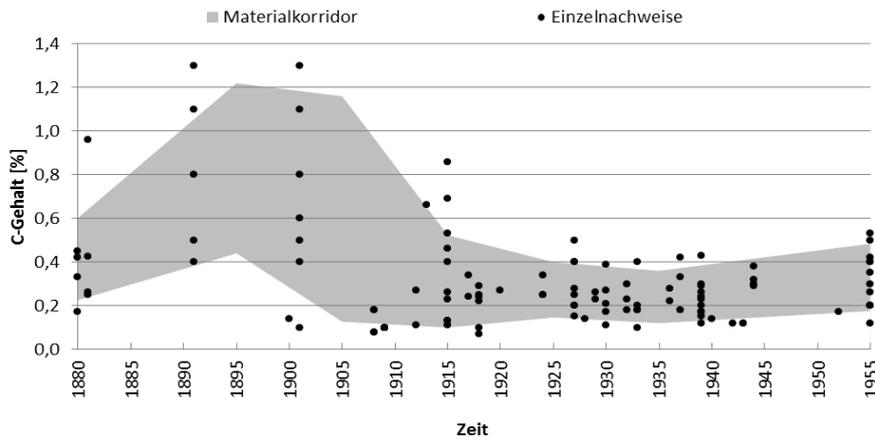
...wurden die „Materialkorridore“ für die Entwicklung wichtiger chemischer Bestandteile bzw. wichtiger mechanisch-technologischer Werkstoffeigenschaften im Untersuchungszeitraum herausgearbeitet.

Nachfolgende Diagramme zeigen mit der Entwicklung des C-Gehalts bzw. der Zugfestigkeit die wichtigsten Korridore für gewöhnlichen unlegierten Stahlguss auf, wie er vornehmlich für Zwecke des Maschinenbaus Verwendung fand. Interessant sind vor allem die hohen Kohlenstoffgehalte in der Zeit um 1900. Die Hintergründe hierfür blieben unklar, offenbar aber wurde die bessere Fließfähigkeit und das geringere Schwindmaß hochgeohlter Schmelzen vorteilhaft für die Herstellung filigraner Maschinenbauteile genutzt. Eine Hochkohlung zur Erzielung höherer Festigkeiten ist nicht auszuschließen, allerdings bildet Diagramm 3 hierzu keine belastbare Tendenz ab. Im frühen 20. Jahrhundert kamen zunehmend Legierungen aller Art für Stahlgüsse mit besonderen Eigenschaften zur Anwendung, so dass sich die Stahlgießereien für gewöhnlichen unlegierten Stahlguss auf zuverlässig herstellbare und duktile Stahlgüsse mittlerer Festigkeiten konzentrierten (Diagramm 1).

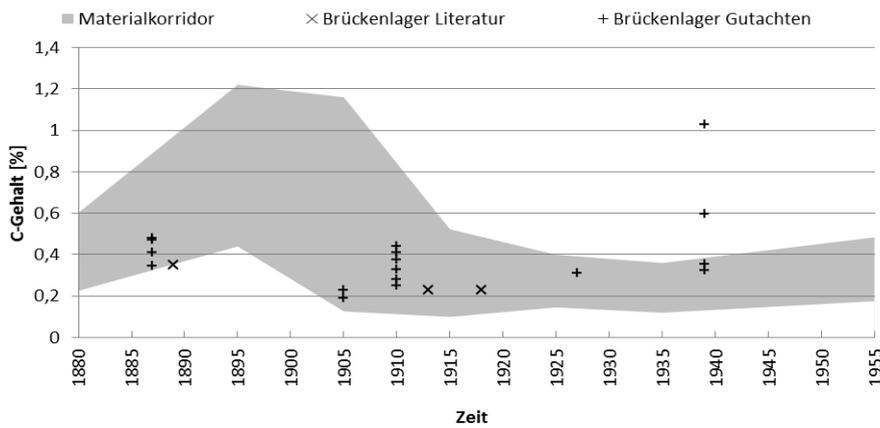
Die Einzelnachweise für den C-Gehalt von Lagerteilen fügten sich zumeist gut in den C-Gehalt-Korridor ein; auffallend jedoch waren die Ergebnisse an Lagerwalzen eines um 1937 gegossenen Lagers, welche vergleichsweise hohe C-Gehalte aufwiesen (vgl. Diagramm 2). Anders als bei den filigranen und dynamisch beanspruchten Stahlgüssen im Maschinenbau waren hochgeohlte Stahlgüsse für massige Bauteile, z.B. Lagerbauteilen, offenbar noch lange Zeit zur Erzielung hoher Festigkeiten üblich. Diese Tendenz gilt es, durch weitere Untersuchungen zu verifizieren.

Gegenüber dem C-Korridor erscheint der Korridor für die Entwicklung der Zugfestigkeiten weitgehend ausgeglichen (Diagramm 3). Die großen Streuungen in der Zeit vor und nach 1900 verdichteten sich im fortschreitenden 20. Jahrhundert hin zu den Festigkeiten, die später in DIN 1681 „Stahlguß für allgemeine Verwendungszwecke“ den Rahmen für die unlegierten Stahlgussorten GS-38 bis GS-60 vorgeben sollten. Die Ergebnisse von Analysen an Brückenlagerteilen fügten sich einerseits gut in den Korridor ein. Andererseits zeigten sie auch, dass die Stahlgießer offenbar die metallurgischen Möglichkeiten zur Erzielung guter Stahlgüsse ausschöpften, ist doch die Herausbildung einer Standard-Qualität – z.B. GS-52 – für Lagerbauteile nicht erkennbar (Diagramm 4).

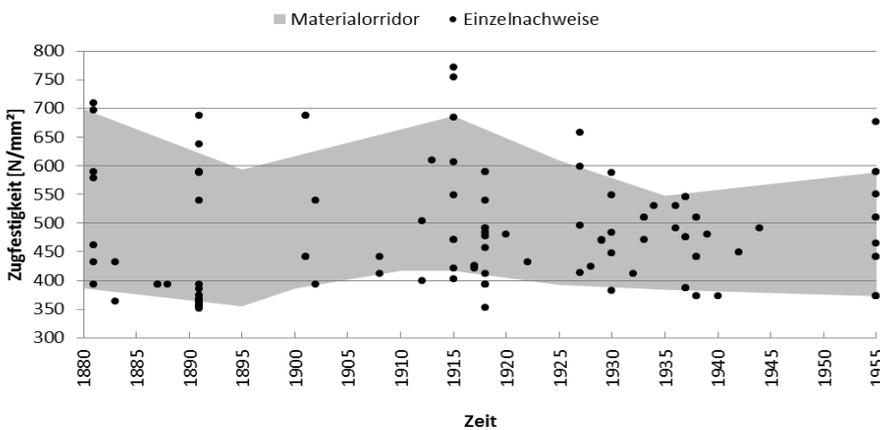
Insgesamt vermitteln die erarbeiteten Übersichten einen guten Überblick zu den im Untersuchungszeitraum üblichen Werkstoffqualitäten für unlegierten Stahlguss und stellen eine wertvolle Arbeitsgrundlage für die Ingenieurpraxis dar. Sind zum Beispiel im Falle einer Lagerbegutachtung bzw. –untersuchung wichtige mechanische Eigenschaften des Lagerwerkstoffs zu ermitteln, so ermöglicht allein die bauzeitliche Einordnung des Lagers in die gegebenen Übersichten die Ableitung einer Erwartungshaltung für den Werkstoff als zentralen Baustein für die weitere Werkstoffcharakterisierung – vgl. Anlagen E.



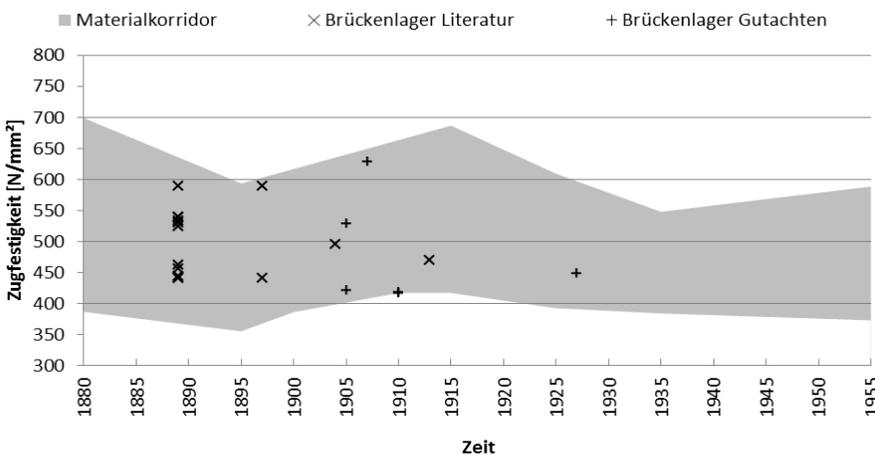
**Diagramm 1**  
Entwicklung C-Gehalt für  
allgemeine Stahlgusser-  
zeugnisse



**Diagramm 2**  
Verortung des C-Gehalts  
aus Brückenlager-Analysen  
im C-Gehalt-Materialkorridor



**Diagramm 3**  
Entwicklung Zugfestigkeit  
für allgemeine Stahlgusser-  
zeugnisse



**Diagramm 4**  
Verortung der Zugfestigkeit  
von Brückenlager-Analysen  
im Zugfestigkeits-Korridor

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)

Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“

Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften

Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen

Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung

Anlage B1: Materialkorridor

### **Anlage C1: Versuchsstand**

Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager

Anlage E2: Untersuchungsmethodik

Anlage E3: Technische Inspektion

Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011.

Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.

Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.

Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## Anlage C1: Versuchsstand

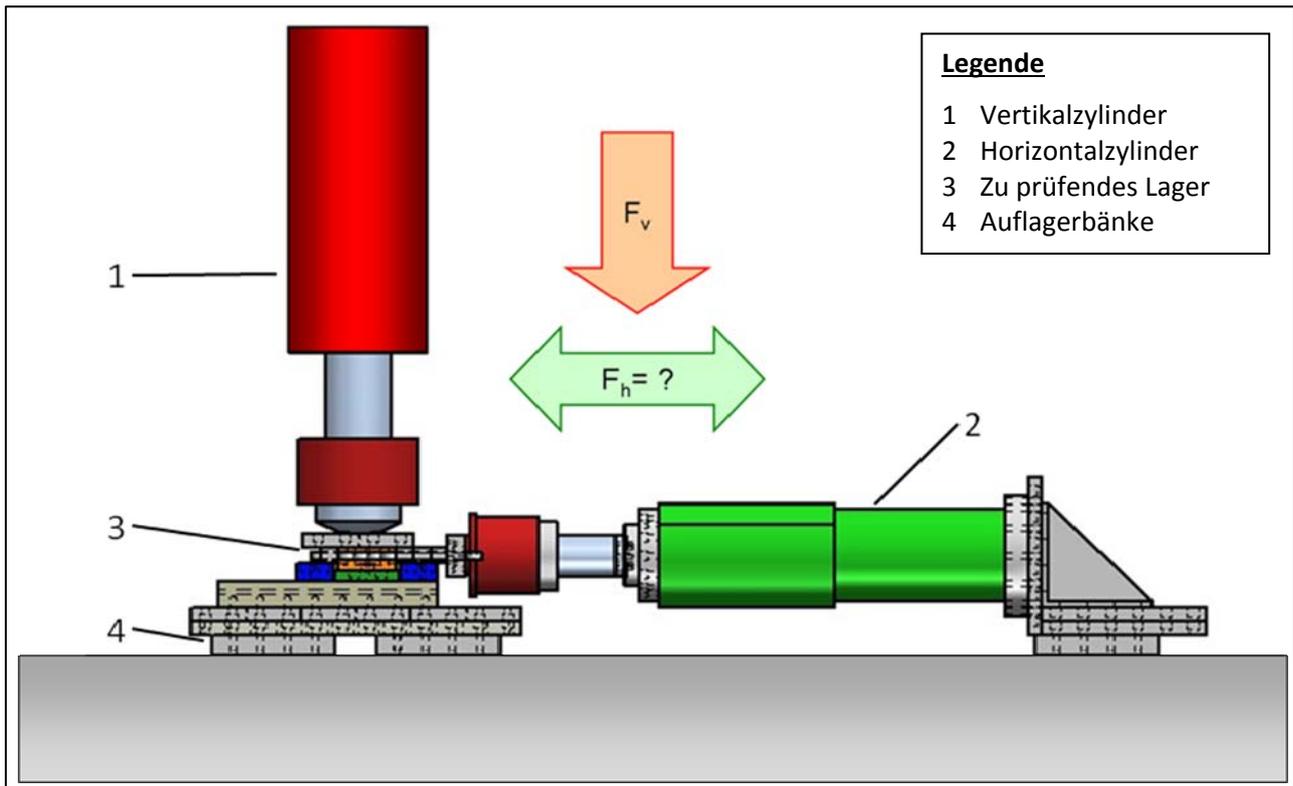


Abb 1: Prinzipdarstellung

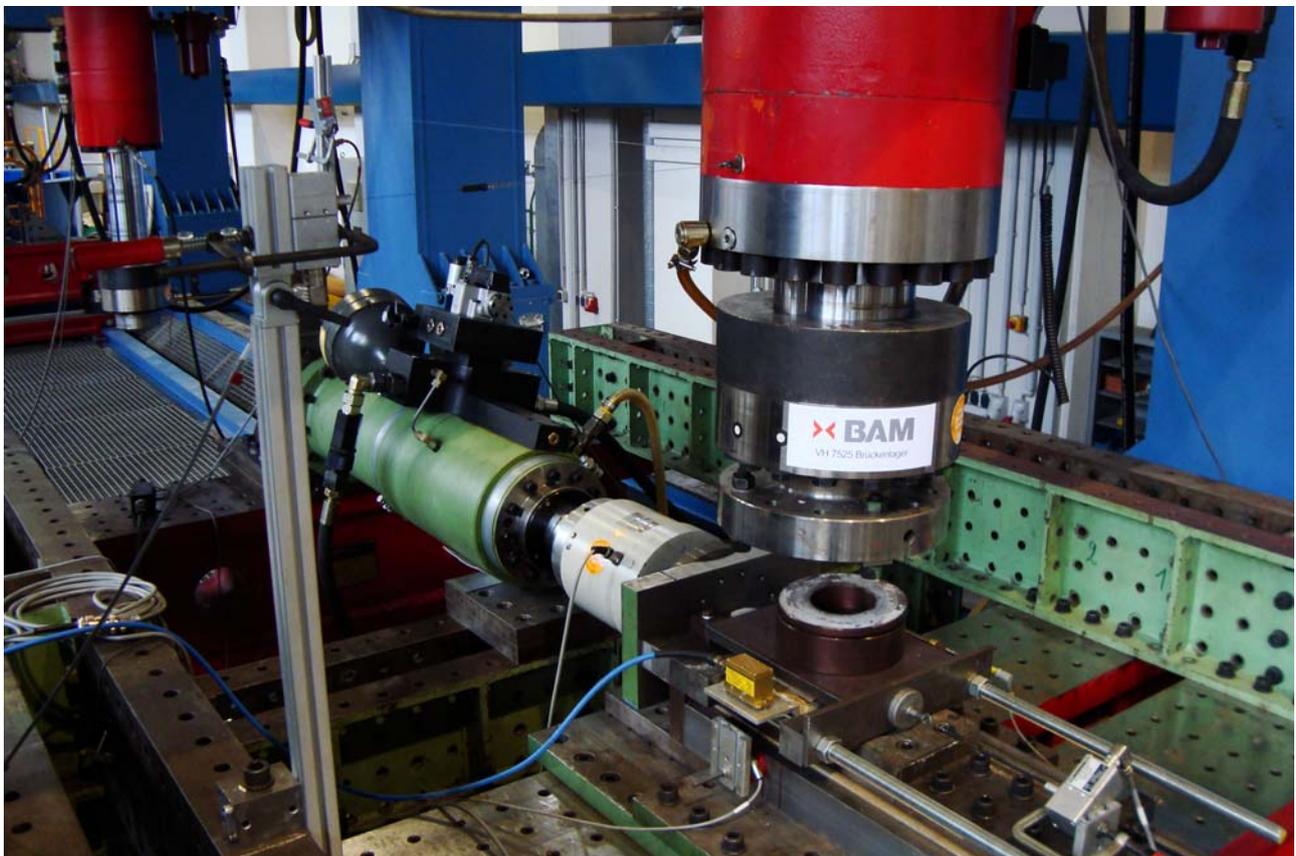


Abb. 2: Versuchsstand an der BAM Berlin

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)

Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“

Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften

Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen

Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung

Anlage B1: Materialkorridor

Anlage C1: Versuchsstand

### **Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager**

Anlage E2: Untersuchungsmethodik

Anlage E3: Technische Inspektion

Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011.

Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.

Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.

Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager

---

- **Zugänglichkeit in-situ**

In den meisten Fällen sind zwei, oft auch drei Lagerseiten für Untersuchungszwecke hinlänglich zugänglich.

- **Statisch-konstruktive Besonderheiten**

Der Unterschied zu „gewöhnlichen“ Bauteilen des Bauwesens besteht darin, Lasten durch minimierte Kontaktflächen abzuleiten und die beteiligten Partner dabei kinematisch zu verbinden. Bei der Bauteiluntersuchung rücken somit neben Fragen zur Tragfähigkeit auch Aspekte der Gebrauchstauglichkeit in den Fokus.

- **Materialtechnische Besonderheiten**

Die historischen Lager wurden durch zwei Werkstoffe geprägt – Gusseisen und Stahl, letzteres in gegossener oder geschmiedeter Form. Zwar gibt die Geometrie der Lagerteile dem geschulten Auge bereits Hinweise auf den Grundwerkstoff, für die Bauteiluntersuchung folgen dennoch zwei grundsätzliche Fragestellungen zur:

- Werkstoffidentifikation: Welcher Grundwerkstoff liegt vor?
- Werkstoffcharakterisierung: Welche mechanischen Eigenschaften besitzt der Werkstoff?

- **Metallurgische Besonderheiten**

Bei den Stahlgusslagern handelt es sich im Normalfall um unlegierten Stahlguss mit Kohlenstoff als Festigkeit bestimmendes Element. Mit typischen C-Gehalten zwischen 0,2 und 0,6% entsteht ein untereutkoides – durch Ferrit und Perlit gekennzeichnetes – Werkstoffgefüge, wobei der C-Gehalt die prozentuale Verteilung der Ferrit/Perlit-Anteile bestimmt. Reste Widmannstättenschen Gefüges geben Hinweise auf einen nicht Zweck entsprechenden Glühvorgang mit unzureichender Glühtemperatur, um das Eiskristall-ähnliche, spröde Widmannstättensche Gefüge vollständig in eine duktile ferritisch-perlitische Struktur umzuwandeln.

Früh war die beruhigende Wirkung von Mangan und Silizium, ab ca. 1890 auch von Aluminium, auf die Schmelze bekannt, woraus die hohen Werte bei der Analyse resultieren (Mn mit bis zu 1%). Die oft in Spuren vorhandenen Elemente, wie Nickel, Chrom, Kupfer, u.a. waren in geringer Konzentration natürlicher Bestandteil des Erzes. Unerwartet hohe Werte, wie sie beispielsweise für Chrom (>0,2%) an Lagern ermittelt wurden, sind im Regelfall auf „unreine“ Schrottbeigaben zur Schmelze zurück zu führen, beeinflussen jedoch das Endprodukt. Im Falle von Chrom erhöhen sich Zug- und Verschleißfestigkeit, Rostbeständigkeit und Kerbschlagzähigkeit.<sup>1</sup> Für die Bauteiluntersuchung ist es somit ratsam, die chemische Analyse über das für unlegierten Stahlguss typische Spektrum (C, Si, Mn, P, S) auf die wesentlichen Legierungselemente auszuweiten<sup>2</sup>.

- **Fertigungstechnische Besonderheiten**

Die hauptsächlichen Probleme beim Gießen von Stahl entstanden aus der hohen Schmelztemperatur sowie dem hohen Schwindmaß und der Bildung von Gasblasen, Lunkern und Rissen beim Erstarrungsprozess<sup>3</sup>. Untersuchungen an Lagern der Hochbahnlinie U2 in Berlin zeigten, dass das Problem der Lunker- und Blasenbildung auch die Lagerherstellung betraf<sup>4</sup>. Dabei versuchte man offenbar, die Fertigung zunehmend so zu steuern, dass sich die unvermeidbaren Unstetigkeiten auf die Randbereiche beschränkten<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup> Pötter, H.: Stahlguss. Berlin: Verlag Technik, S.47f.

<sup>2</sup> Wie Kupfer, Chrom, Nickel, Vanadium, Wolfram, Titan und Molybdän.

<sup>3</sup> Stahlgussstücke aus den 1860er-Jahren waren noch mit Gasblasen durchsetzt, und ungeachtet metallurgischer Fortschritte wurde noch im 20. Jahrhundert das Problem der Lunker und Gasblasen in der Fachliteratur diskutiert; siehe z.B. in: Knipp, E.: Gasblasen in Gußstücken unter ...Berücksichtigung von Stahlguß. Gießerei 22 (1935), S.505-511.

<sup>4</sup> Wiewecke, F.: Untersuchungsbericht Nr. 1031 a/04 zu den Lagern der Hochbahnlinie U2, 09/2004, (unveröffentlicht).

<sup>5</sup> So durften z.B. in der DDR noch in den 1980er-Jahren nach TGL-Vorschrift die weniger belasteten Bereiche von Stahlgussbrückenlagern bis zu 50% des Gesamtquerschnitts mit Lunkern o.ä. durchsetzt sein. Vgl. TGL 24 552/01: Punktkipplager – Technische Bedingungen, 01/1987, P.3.7.

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)

Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“

Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften

Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen

Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung

Anlage B1: Materialkorridor

Anlage C1: Versuchsstand

Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager

### **Anlage E2: Untersuchungsmethodik**

Anlage E3: Technische Inspektion

Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011.

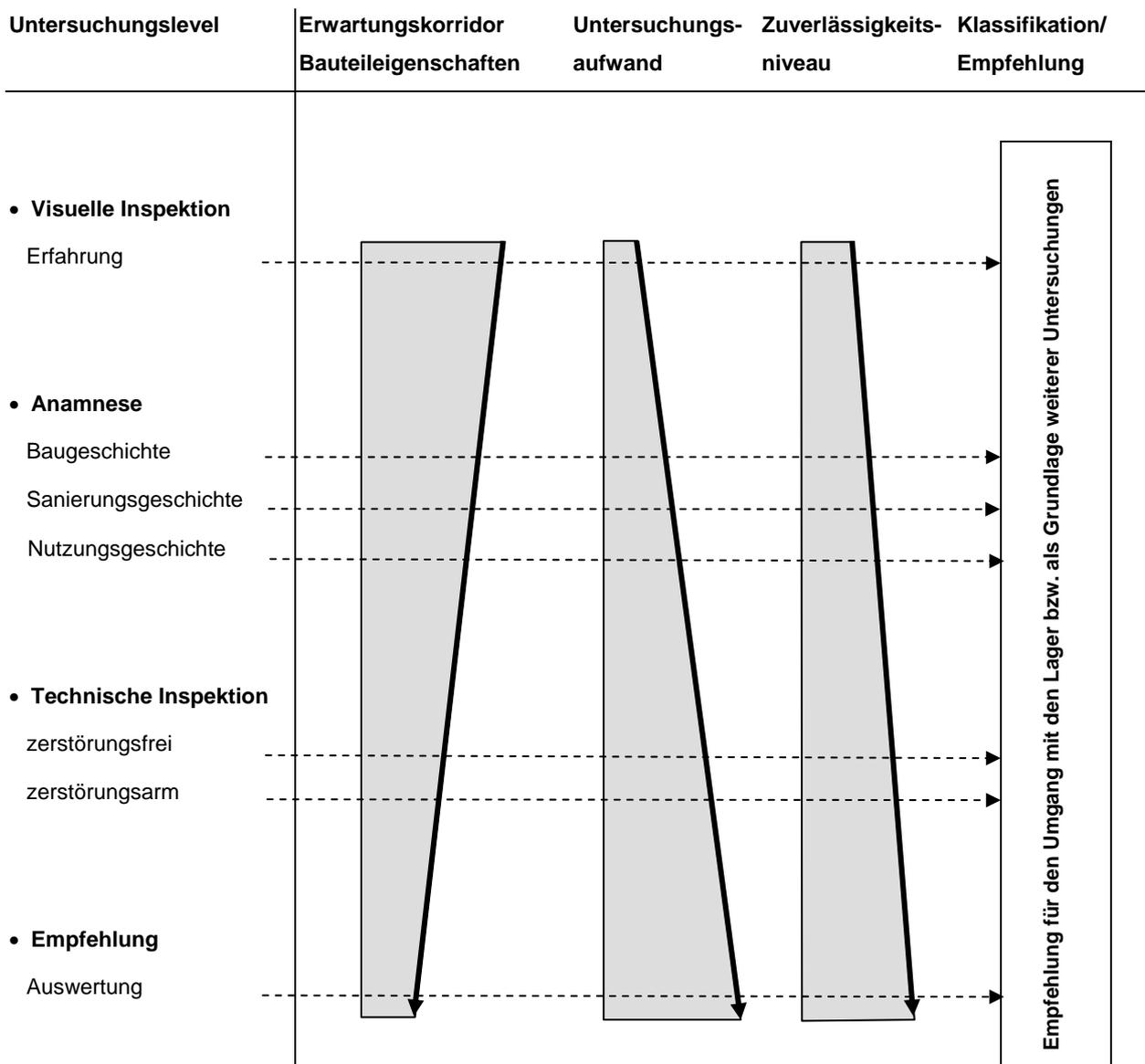
Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.

Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.

Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.



**Erläuterung des schrittweisen Vorgehens**

**1. Schritt: Visuelle Inspektion als Basis für das weitere Vorgehen:**

Die Inaugenscheinnahme der zu untersuchenden Lager gleich zu Beginn einer Befundung entscheidet ganz wesentlich über das weitere Vorgehen, wobei mögliche Einflüsse aus dem Überbau bzw. Unterbau auf die Lager zu berücksichtigen sind. In seltenen Fällen kann es erforderlich sein, auf Grund eines desolaten Allgemeinzustands der Bestandslager direkt deren Ersatz oder Austausch zu empfehlen. Prinzipiell jedoch dient die Visuelle Inspektion der logistischen und inhaltlichen Vorbereitung der Technischen Inspektion.

**2. Schritt: Recherchen zur Bauwerks- und Lagergeschichte als Grundlage der Bauteilbefundung und um die Notwendigkeit und den Umfang einer Technischen Inspektion zu konkretisieren:**

Die Auswertung vorhandener Unterlagen ermöglicht gegebenenfalls Informationen zur Bau-, Sanierungs- und Nutzungsgeschichte des Bauwerks und der Lager – zunächst für deren bauzeitliche Einordnung und für Ausführungen zum Werkstoff, darüber hinaus für Hinweise auf ein evtl. Mängel- bzw. Schadenspotenzial der Bauteile. Informationen zur Nutzungs- bzw. Belastungsgeschichte lassen in Kombination mit Erkenntnissen zur Sanierungsgeschichte möglicherweise Rückschlüsse auf die vorhandenen Werkstoffeigenschaften zu.

### 3. Schritt: Technische Inspektion zur Ergänzung offener Informationen:

Für die Inspektion der drei gewichtigen Bereiche „Werkstoff“, „Gefüge“ und „Geometrie“ ergeben sich nachfolgende, prinzipielle Untersuchungsziele, welche im Detail dem konkreten Auftrag anzupassen sind. Die Untersuchungen im Rahmen der Technischen Inspektion gehen i.d.R. mit einem hohen logistischen und/oder technischen Aufwand einher, insofern ist der Aufwand auf das jeweils erforderliche Maß einzugrenzen. Nicht in jedem Fall wird es z.B. erforderlich sein, umfangreiche Werkstoffuntersuchungen anzustellen:

Bereich	Ziel	Ermittlung
<b>Werkstoff</b>	Identifizierung	Grundwerkstoff
	Charakterisierung	Mechanisch-technologische Eigenschaften
<b>Gefüge</b>	Allgemeine Informationen	Gefügeengänzen
	Detailinformationen	Metallographische Eigenschaften
<b>Geometrie</b>	Allgemeine Informationen	Bauteilabmessungen
	Detailinformationen	Geometrische Imperfektionen

Abhängig von der geforderten Genauigkeit können die Erkenntnisse schrittweise verdichtet werden:

- Stufe 1: Ausschließlich zerstörungsfreie Ermittlung erforderlicher Kenngrößen in-situ am Lagerbauteil.
  - Stufe 2: Zerstörungssarme Verifizierung der zerstörungsfrei ermittelten Werte an Bauteilproben im Labor.
- Anlage E3 „Technische Inspektion“ erläutert den verfahrenstechnischen Zugang bei der Ermittlung der genannten Untersuchungsziele.

### 4. Schritt: Auswertung durch Zusammenführen aller Erkenntnisse und Ableitung von z.B.

- Empfehlungen für den Verbleib, Ersatz oder Austausch aller oder vereinzelter Lager bzw. Lagerteile,
- Sanierungsvorschlägen zum Erhalt bzw. zur Wiederherstellung der Betriebssicherheit,
- Klassifizierungen des Werkstoffs (Einordnung in Festigkeitsklassen) auf Grundlage einer ganzheitlichen Einschätzung unter Einbeziehung des optischen Zustands bis hin zur Berücksichtigung eines evtl. Alterungspotenzials.

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)

Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“

Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften

Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen

Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung

Anlage B1: Materialkorridor

Anlage C1: Versuchsstand

Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager

Anlage E2: Untersuchungsmethodik

### **Anlage E3: Technische Inspektion**

Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011.

Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.

Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.

Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

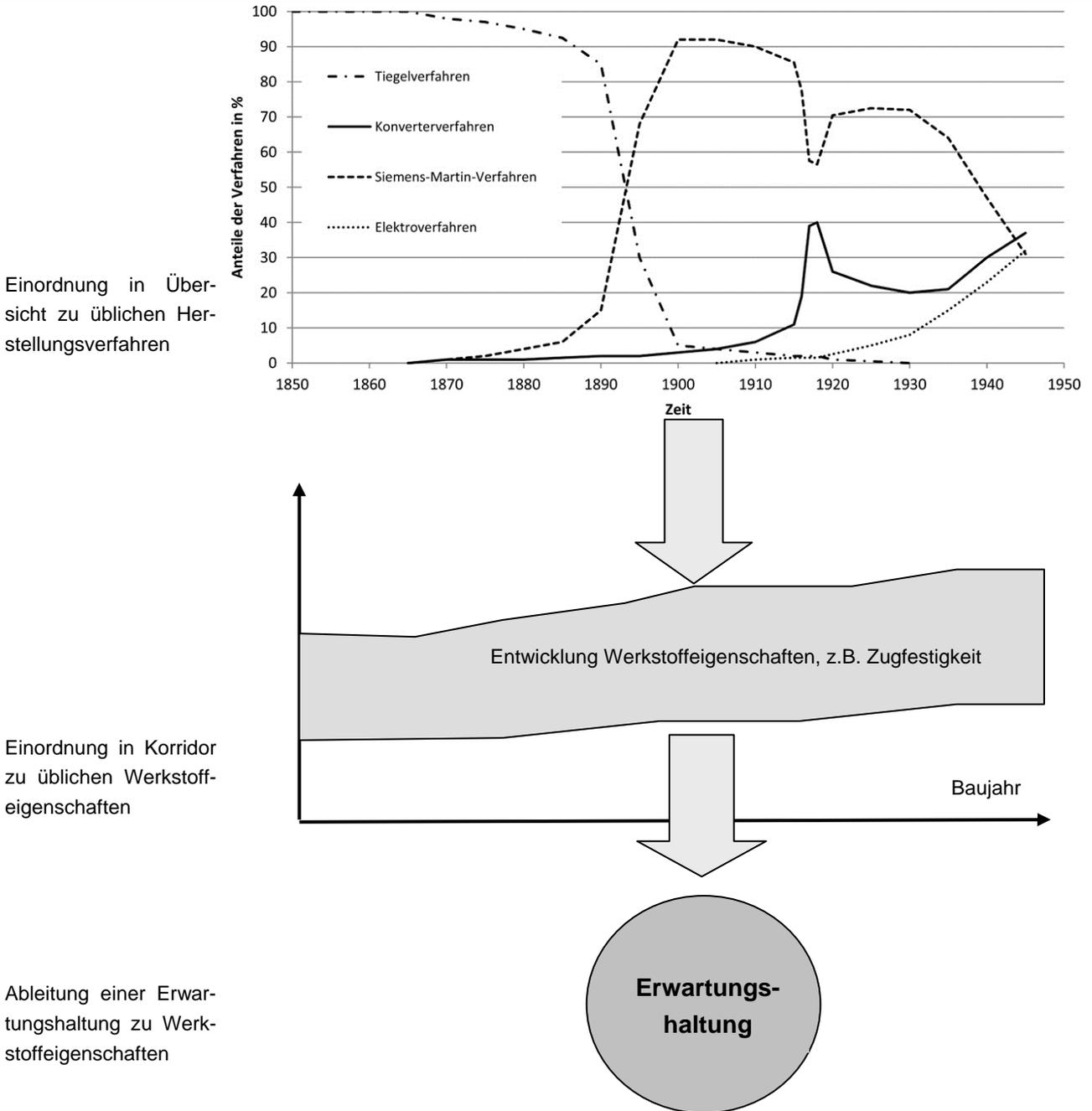
Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

**Anlage E3: Technische Inspektion**

• **Grundlage**

Grundlage für die Technische Inspektion bildet eine aus der Anamnese abgeleitete Erwartungshaltung zum Werkstoff durch die bauzeitliche Einordnung in Übersichten zu typischen Herstellungsverfahren sowie wesentlichen Materialkorridoren. (Übersicht 1)



Übersicht 1: Geschichtlicher Zugang zur Ableitung einer Erwartungshaltung

• **Werkstoffuntersuchung**

Die *Identifizierung* des Werkstoffs (Gusseisen/Stahl) kann auf der verfahrenstechnischen Seite durch Messung der Schallgeschwindigkeit erfolgen. Hierbei unterscheidet sich die Leitfähigkeit von historischem Gusseisen mit Lamellengraphit (ca. 4600 m/s) sehr deutlich von der von Stahl (ca. 5900 m/s), was eine zuverlässige Identifizierung trotz störender Einflüsse wie Schallschwächung und -streuung ermöglicht.

Die *Charakterisierung* des Werkstoffs erfolgt wahlweise auf der zerstörungsfreien bzw. –armen Untersuchungsebene (Übersicht 2), wobei die gewählten Verfahren unterschiedliche Eigenschaften von Stahlguss (mechanische, physikalische, chemische, metallographische) nutzen und sich somit unabhängig voneinander dem Werkstoff nähern (Übersicht 3). Da alle vier Zugänge Rückschluss auf die Werkstoffeigenschaften zulassen, entsteht bei Deckungsgleiche der Ergebnisse und Bestätigung der Erwartungshaltung eine mehrfach abgesicherte und zuverlässige Charakterisierung des untersuchten Werkstoffs.



Übersicht 2: Verfahrenstechnischer Zugang zur Verifizierung der Erwartungshaltung

Zugang	Vorgehen	Untersuchungsverfahren	Erkenntnispotenzial
Mechanisch	Zerstörungsfrei	Härtemessung	über Härte zur Zugfestigkeit
	Zerstörungsarm	Miniatur-Zug-/Druckprobe	zusätzlich Aussagen zu E-Modul und Streckgrenze
Chemisch	Zerstörungsfrei	Funken-spektroskopie	über C-Gehalt zur Zugfestigkeit sowie über N-Gehalt zum Herstellungsverfahren
	Zerstörungsarm	Verbrennungsmethode oder nass-chemische Analyse	Verifizierung der zf-Prüfung, weil genauer
Physikalisch	Zerstörungsfrei	Ultraschallmessung	über Schallgeschwindigkeit zum E-Modul
	Zerstörungsarm	Induktionsmessung	über magnetische Induktion zur Zugfestigkeit
Metallographisch	Zerstörungsfrei	Replica-Gefügeabdruck	über C-Gehalt zu Zugfestigkeit und Duktilität
	Zerstörungsarm	Labor-Gefügeanalyse	Wie zf-Prüfung, aber genauer

Übersicht 3: Untersuchungsverfahren und Erkenntnispotenzial

- **Gefügeuntersuchung**

Für allgemeine Gefügeinformationen bietet die ambulante Bauteilmetallographie nahezu uneingeschränkt die Möglichkeit zur Herstellung eines Gefügeabdrucks an eingebauten Lagerteilen. Zur Ermittlung struktureller Imperfektionen haben sich seit vielen Jahrzehnten die schalltechnischen Verfahren etabliert.

Zugang	Vorgehen	Untersuchungsverfahren	Erkenntnispotenzial
Metallographisch	Zerstörungsfrei	Replica-Gefügeabdruck	zu Sekundärgefüge und Glühzustand
Physikalisch	Zerstörungsfrei	Ultraschallmessung	zu inneren Strukturfehlern (Lunker)
		Magnetpulververfahren	zu äußeren Strukturfehlern (Risse)

Übersicht 4: Zugänge zur Gefügeuntersuchung und Untersuchungsverfahren

- **Geometrieuntersuchung**

Für die allgemeine Aufnahme der Bauteilmaße stehen die üblichen Messverfahren (Gliedermaßstab, Messschieber, u.a.) mit ihren spezifischen Vor- und Nachteilen zur Verfügung. Untersuchungen zum Erfassen geometrischer Imperfektionen – hier insbesondere die Aufnahme der Bauteilgeometrie in den Kontaktzonen – blieben erfolglos. Insbesondere bei den frühen Wälzlagern (mit mehreren Walzen kleineren Durchmessers anstatt weniger Walzen größeren Durchmessers) bereitet die messtechnische Inspektion der Kontaktbereiche große Schwierigkeiten.

## Anlagenverzeichnis

---

Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)

Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“

Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften

Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen

Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung

Anlage B1: Materialkorridor

Anlage C1: Versuchsstand

Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager

Anlage E2: Untersuchungsmethodik

Anlage E3: Technische Inspektion

**Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU, 2011.**

Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.

Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.

Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## **Anlage BA1:**

### **Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2011.**

---

#### **Methodik**

Es wurde eine Probeserie von kleinen Zylinderstiften (Länge 40 mm und Durchmesser 5 mm) aus denselben Lagerkörpern gefertigt, für die bereits Ergebnisse aus Härtemessungen und aus der chemischen Analyse vorlagen, die nun für Vergleichszwecke genutzt werden konnten. Die Untersuchungen fanden mit einem Impedanz-Messgerät statt.

Erste Versuchsmessungen prüften den Einfluss der Messfrequenz und der aufgetragenen Spannung auf die Messergebnisse, wobei ein Frequenzbereich von 100 Hz bis 100 kHz bezüglich der Frequenz sowie von 50 mV bis 1 V betreffs der Spannung untersucht wurde. Wie im Vorfeld erwartet worden war, ergaben kleine Frequenzen und kleine Spannungen sehr zuverlässige Messergebnisse, wohingegen Wirbelströme bei zunehmender Frequenz sowie Werkstoffmagnetisierungen bei höheren Spannungen die Messergebnisse verfälschten. Die finalen Messungen fanden schließlich – auch unter Berücksichtigung des veranschlagten Gerätemessfehlers – bei einer Frequenz von 100 Hz sowie bei 100 mV statt.

#### **Erkenntnisse**

Nachfolgende Diagramme zeigen ausgewählte Ergebnisse der Messungen. Der angegebene Fehlerbereich beinhaltet im Sinne eines „worst case“-Szenarios sowohl den Fehlereinfluss aus der Messeinrichtung als auch Einflüsse aus unterschiedlicher Messtemperatur und unterschiedlicher Prüfrichtung der Probe.

Bezugnehmend auf die bereits 1959 veröffentlichte Analyse von KOLORZ und LÖBERG<sup>1</sup> werden hier die Beziehungen der Induktivität zum Kohlenstoffanteil und zur Brinellhärte dargestellt, wobei die von KOLORZ und LÖBERG aufgezeigten Abhängigkeiten durchweg bestätigt werden konnten.

Berücksichtigt man den maßgebenden Einfluss des Kohlenstoffanteils auf die Festigkeit von unlegiertem Stahlguss, so nimmt die Induktivität mit zunehmender Festigkeit ab – vgl. Diagramm 1. Noch offensichtlicher wird der direkte Zusammenhang zwischen mechanischen und magnetischen Werkstoffeigenschaften im Diagramm 2. Erwartungsgemäß sinkt auch hier die gemessene Induktivität mit zunehmender Werkstoffhärte, die Abhängigkeit ist jedoch nahezu linear (Diagramm 2).

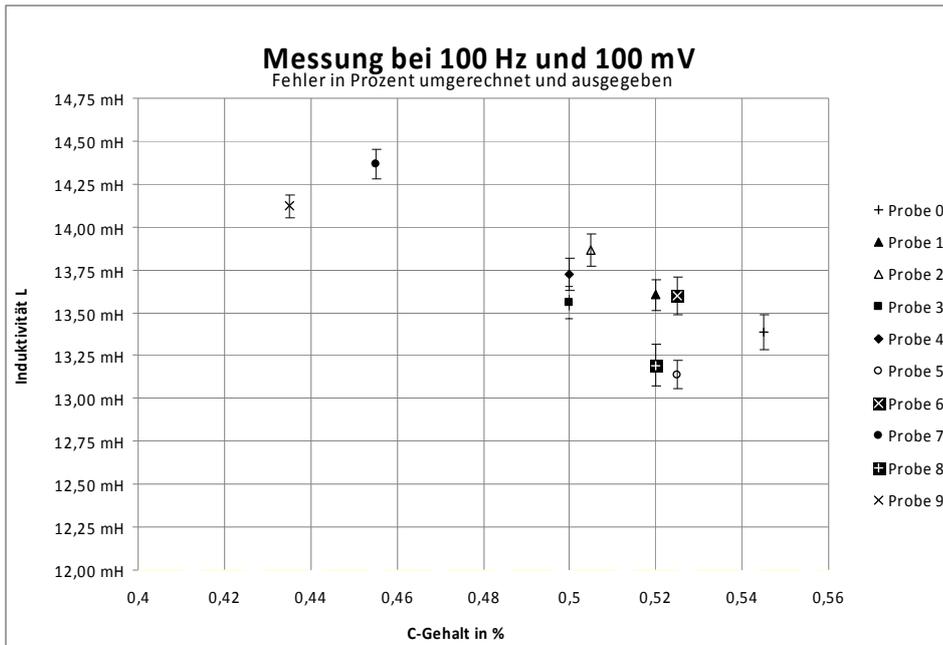
#### **Ausblick**

Sowohl der Kohlenstoffanteil als auch die Werkstoffhärte stehen in unmittelbarer Korrelation zu den mechanisch-technologischen Werkstoffeigenschaften. Sollten sich die Ergebnisse dieser Fallstudie durch weitere Messungen bestätigen, bestünde die Möglichkeit, den zu beurteilenden Lagerwerkstoff allein mittels Kleinstproben – noch dazu mit einem vergleichsweise einfachen Versuchsaufbau – zu charakterisieren.

Unabhängig vom projektbezogenen Nutzen dieser Vorgehensweise deutet sich hier ein Verwertungspotenzial an, das weit über die Beurteilung von historischem Lagermaterial hinaus die Materialprüfung in Zukunft beeinflussen dürfte.

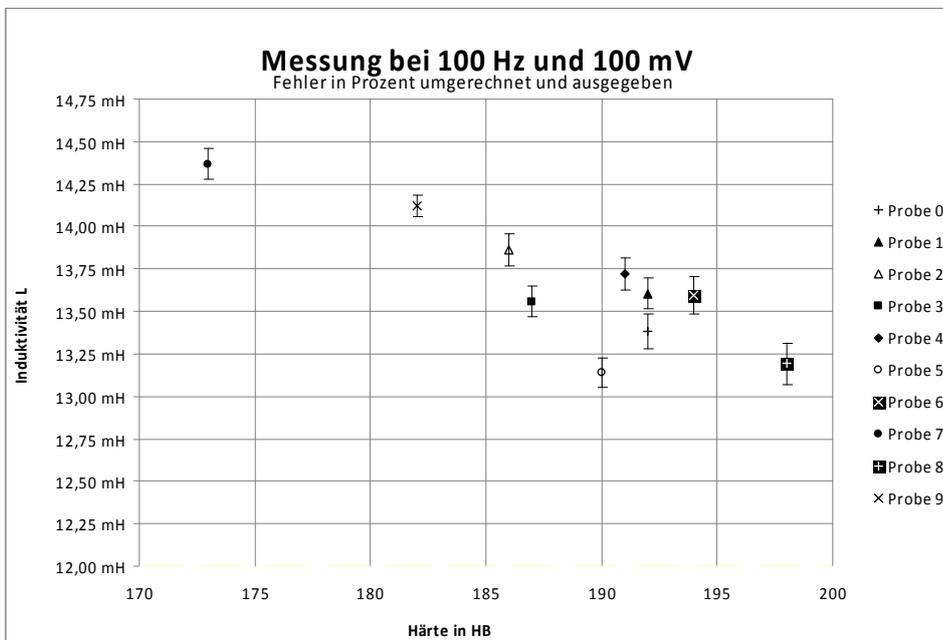
---

<sup>1</sup> Kolorz, A.; Löberg, K.: Mathematisch-statistische Untersuchungen über die Beziehungen der magnetischen Induktion von unlegiertem Stahlguß zur chemischen Analyse und zur Brinellhärte. Giesserei 46 (1959), S.187-190.



**Diagramm 1**

Abhängigkeit der Induktivität vom C-Gehalt des Werkstoffs



**Diagramm 2**

Abhängigkeit der Induktivität von der Brinellhärte des Werkstoffs

## Anlagenverzeichnis

---

- Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)
- Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“
- Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften
- Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen
- Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung
- Anlage B1: Materialkorridor
- Anlage C1: Versuchsstand
- Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager
- Anlage E2: Untersuchungsmethodik
- Anlage E3: Technische Inspektion
- Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU, 2011.
- Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.**
- Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.
- Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## **Anlage BA2:**

### **Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.**

---

#### **Methodik**

Bei den Untersuchungen wurden insgesamt 21 Miniaturzugproben (Länge 40 mm und Durchmesser 4 mm) aus insgesamt 10 verschiedenen historischen Brückenlagern geprüft. Als Referenzwerte standen die Ergebnisse aus gewöhnlichen Zugversuchen mit Standard-Flach- und Miniatur-Rund-Zugproben zur Verfügung.

#### **Erkenntnisse**

Diagramme 1 und 2 zeigen ausgewählte Ergebnisse der Messungen und verdeutlichen die interessanten Messpunkte durch die Linien A bis C. Interessant war zunächst die Feststellung, dass sich der unterschiedliche Spannungszustand im geprüften Werkstoff während des Zugversuchs sehr gut durch eine thermo-elektrische Messung abbilden lässt. Vor allem aber überzeugte die Abbildung der Spannung und Temperatur über der Zeit – hier im Diagramm 2, wo sich das beginnende Werkstofffließen durch eine plötzliche Temperaturerhöhung (Linie C) sehr markant abbildet.

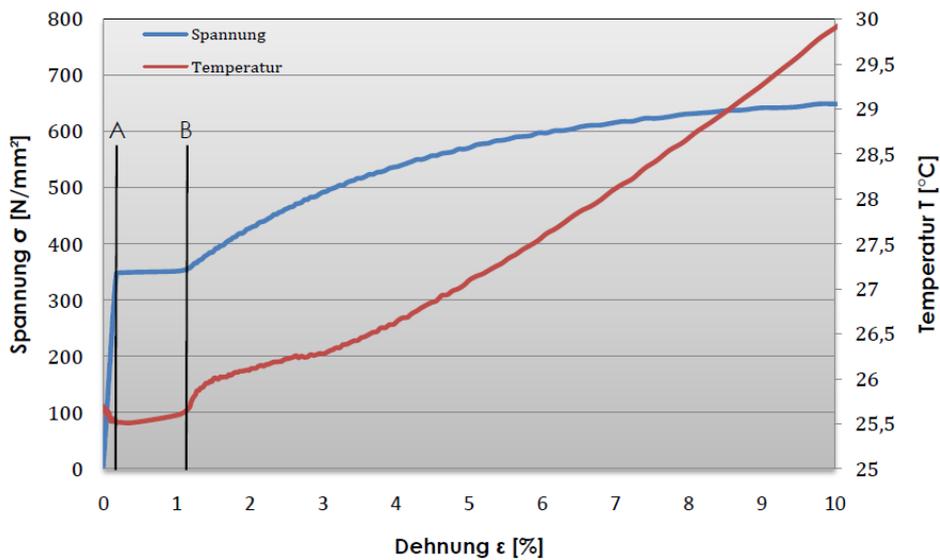
Bei einem Großteil der untersuchten Proben konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Messergebnisse zu den Referenzproben festgestellt werden (Tabelle 1). Einige Proben hingegen wichen deutlich von den Referenzwerten ab, was vermutlich aber auf einen unzuverlässigen Kontakt zwischen Probe und Thermofühler im Rahmen dieser Fallstudie zurückzuführen ist.

#### **Ausblick**

Aktuell wird dieser vielversprechende Ansatz im Rahmen einer Masterarbeit mit verbessertem Versuchsaufbau, geänderter Probengeometrie und erweitertem Werkstoffspektrum vertiefend untersucht in:

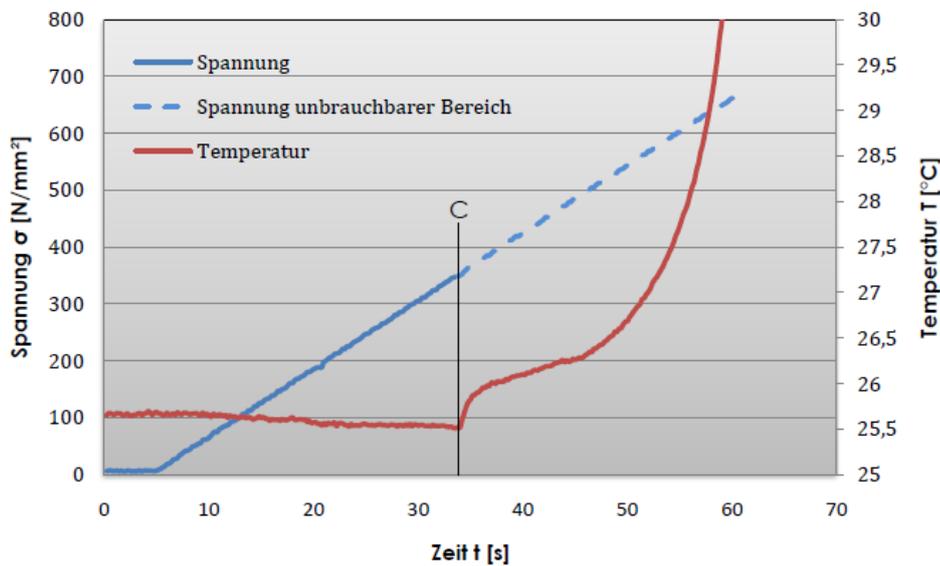
Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - Die Aussagekraft thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Masterarbeit BTU Cottbus - Senftenberg (in Bearbeitung).

Abweichend zum Versuchsaufbau in der Bachelorarbeit wird nun auch die Entwicklung der Werkstofftemperatur durch insgesamt 3 Temperaturfühler im definierten Abstand voneinander synchron aufgezeichnet, um Aussagen zum Messfehler durch den Abstand der Bruchfläche vom Thermofühler zu bekommen. Bei erfolgreichem Ausgang der Untersuchungen wird sich die Geometrie der Miniaturzugprobe vermutlich noch einmal signifikant verkürzen lassen, was insbesondere für die In-situ-Probenentnahme an Brückenlagern von ausschlaggebender Bedeutung ist.



**Diagramm 1**

Spannungs-Temperatur-Dehnungs-Diagramm (hier der Probe 2\_1)



**Diagramm 2**

Spannungs-Temperatur-Zeit-Diagramm (hier der Probe 2\_1)

Lager	BAM		Abweichung der Flachprobe zur Rundprobe [%]	BTU Miniaturprobe Arbeitslinie (Spannung)	Abweichung zur Flachprobe [%]	Abweichung zur Rundprobe [%]
	Flachproben $\frac{\sigma}{\text{mm}^2}$	Rundproben $\frac{\sigma}{\text{mm}^2}$				
0	283	283	-0,2	275	3	3
1	277	271	2,2	263	6	3
2	342	338	1,2	326	5	4
3	345	333	3,6	303	14	10
4	346	338	2,4	312	11	8
5	284	279	1,8	316	-10	-12
6	273	268	1,9	299	-9	-10
7	308	302	2,0	309	0	-2
8	281	273	2,7	298	-6	-8
9	308	299	3,0	262	17	14

**Tabelle 1**

Gegenüberstellung von Mess- und Referenzwerten

## Anlagenverzeichnis

---

- Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)
- Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“
- Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften
- Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen
- Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung
- Anlage B1: Materialkorridor
- Anlage C1: Versuchsstand
- Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager
- Anlage E2: Untersuchungsmethodik
- Anlage E3: Technische Inspektion
- Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU, 2011.
- Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.
- Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.**
- Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## Anlage BA3:

### Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.

---

#### Methodik

Aufbauend auf einer intensiven Literaturrecherche zu historischen und aktuellen Ansätzen zur Durchführung eines Druckversuchs an stählernen Materialien wurden aus vier verschiedenen Lagerwerkstoffen insgesamt 50 zylindrische Miniatur-Druckproben mit einem Durchmesser von 10 mm, jedoch mit unterschiedlichen Probenlängen analysiert. Als Referenzwerte standen die Ergebnisse aus gewöhnlichen Zugversuchen mit Standard-Flachzugproben zur Verfügung. Hinsichtlich der mechanisch-technologischen Kennwerte stand allein die Ermittlung der Streckgrenze im Fokus, darüber hinaus die Optimierung der Probengeometrie. Vorversuche im Rahmen einer Fallstudie hatten bereits ergeben, dass sich die in der Norm 50106 „Prüfung metallischer Werkstoffe - Druckversuch“ für Lagerwerkstoffe empfohlene Probengeometrie nicht eignet und das die Druckfestigkeit als Kennwert im Druckversuch praktisch nicht ermittelt werden kann.

#### Erkenntnisse

Diagramme 1 bis 3 zeigen ausgewählte Ergebnisse der Untersuchungen exemplarisch am Lagerwerkstoff 1. Letztlich erwies sich eine Probenlänge von 25 mm als für die Versuche am günstigsten, wobei vor allem die Messergebnisse im Vergleich mit den Referenzproben überzeugten (Tabelle 1). Demgegenüber erwies sich das Handling der 20 mm-Proben im Versuchsstand als schwierig, während die 30 mm-Proben teilweise zum Knicken neigten.

Die großen Abweichungen der Ergebnisse in Tabelle 1 für den Lagerwerkstoff 3 konnten aus dem Versuch heraus nicht erklärt werden und gehen vermutlich auf Nachlässigkeiten bei der Probenfertigung zurück. (Proben vertauscht)

#### Ausblick

Auf Grund der vielversprechenden Ergebnisse soll auch das Potenzial der Miniatur-Druckproben zur Charakterisierung von Stahlguss im Rahmen einer weiteren studentischen Abschlussarbeit – diesmal auf Masterniveau und mit einer breiteren Werkstoffauswahl – weiter ausgelotet werden.

Lager	Probenlänge [mm]	Druckversuch		Zugversuch		Abweichung Druckversuch zum Zugversuch [%]
		Mittelwert Quetschgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert Streckgrenze [N/mm <sup>2</sup> ]	Standardabweichung [N/mm <sup>2</sup> ]	
1	25	221,3	8,5	223	7,3	0,8
	30	228,8	6,3			2,5
2	20	197,5	11,9	201,3	1,5	1,9
	25	196,3	2,5			2,5
	30	192,5	8,7			4,4
3	20	273,8	11,1	303,5	11	9,8
	25	251,7	12,9			17,1
	30	260	18,3			14,3
4	20	220	4,1	217,7	0,6	1
	25	222,5	6,5			2,2
	30	228,8	8,5			5

**Tabelle 1**  
Vergleich Ergebnisse Zug- und Druckversuch

Lagerstoff 1

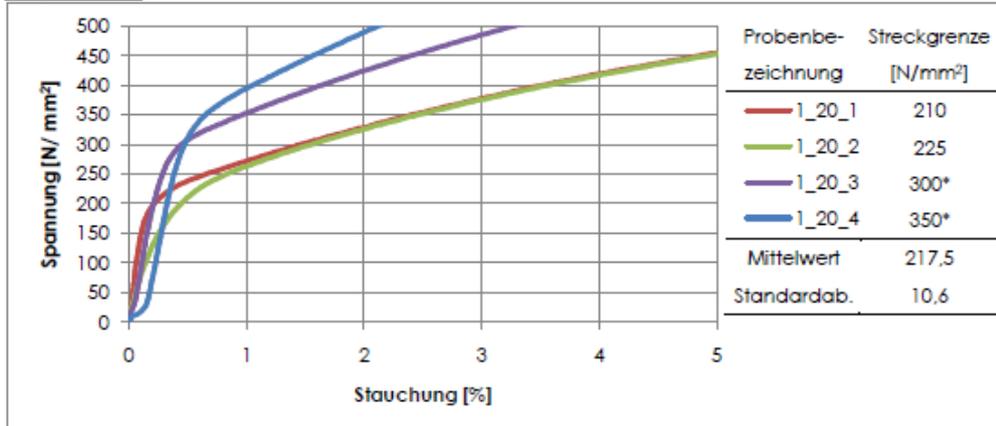


Diagramm 1

Diagramm 1: Spannungs-Stauchungs-Diagramm: Lagerstoff 1, Probenlänge 20 mm; erstellt aus [39]

\* Werte entfallen bei der Berechnung des Mittelwertes sowie der Standardabweichung

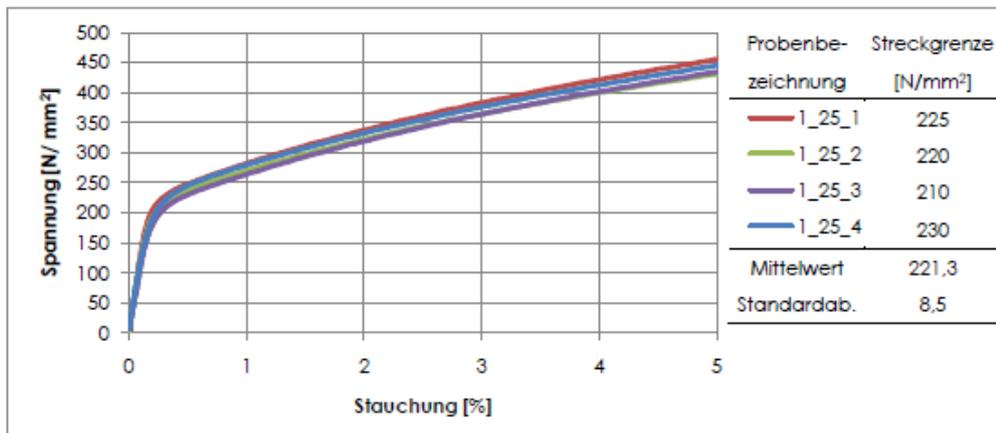


Diagramm 2

Diagramm 2: Spannungs-Stauchungs-Diagramm: Lagerstoff 1, Probenlänge 25 mm; erstellt aus [39]

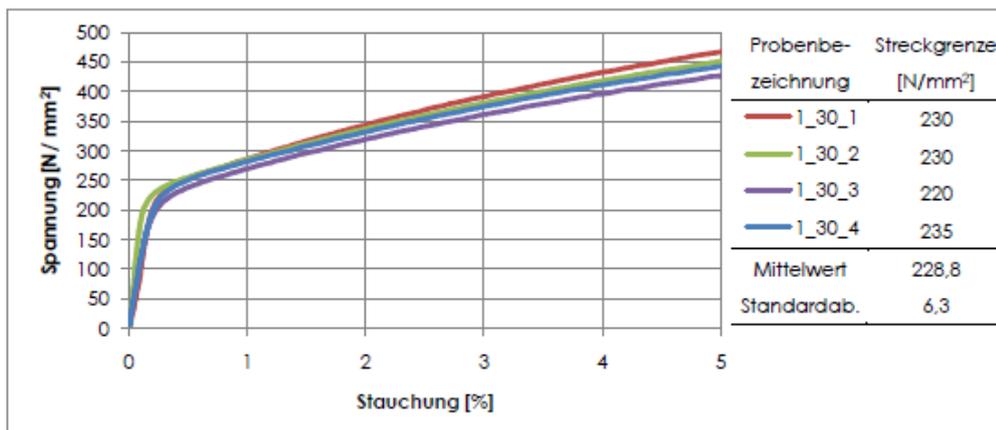


Diagramm 3

Diagramm 3: Spannungs-Stauchungs-Diagramm: Lagerstoff 1, Probenlänge 30 mm; erstellt aus [39]

## Anlagenverzeichnis

---

- Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)
- Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“
- Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften
- Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen
- Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung
- Anlage B1: Materialkorridor
- Anlage C1: Versuchsstand
- Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager
- Anlage E2: Untersuchungsmethodik
- Anlage E3: Technische Inspektion
- Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU, 2011.
- Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.
- Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.
- Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU, 2014.**
- Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## Anlage BA4:

Renger, Th.: **Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung.** Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.

---

### Methodik

Im Rahmen einer intensiven Literaturrecherche wurden bauzeitlich übliche Formeln zur Berechnung der Druckfestigkeit allein auf Grundlage der chemischen Zusammensetzung recherchiert. An Hand zur Verfügung stehender Referenzwerte aus dem Projekt wurde die Genauigkeit der Ansätze überprüft und das Potenzial zur Kalibrierung dieser in erster Näherung ausgelotet.

### Erkenntnisse

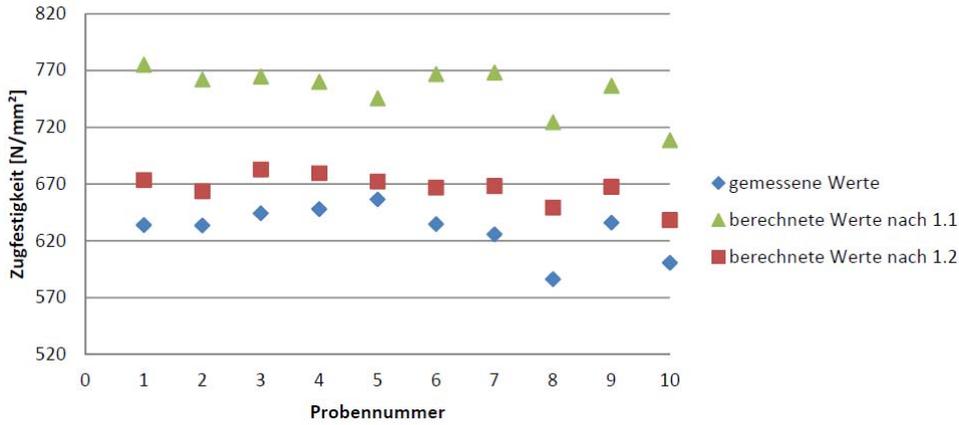
Die Literaturrecherche ergab insgesamt 4 Formeln unterschiedlicher Autoren (Diagramm 1 bis 4), die alle ihre spezifischen Abweichungen zu den Referenzwerten aufwiesen. Die Darstellung lässt aber schon das Potenzial erkennen, dass durch Justierung der Formeln an geeigneten Stellen vermutlich eine gute Kalibrierung derselben erreicht werden kann. Im Rahmen eines iterativen Auswahlverfahrens erwies sich letztlich die Formel nach Osann für die Zwecke des Vorhabens am geeignetsten und konnte im Rahmen dieser Fallstudienuntersuchungen bereits in erster Näherung kalibriert werden – vgl. nachfolgende Tabelle.

Tabelle 12: Klassifizierung nach Mess- und Rechenwerten

Probe Nr.	gemessener Wert	Klassifizierung nach DIN EN 10293	kalibrierter Wert	Klassifizierung nach DIN EN 10293
1	634	GE 300	604,06	GE 300
2	644,25	GE 300	603,95	GE 300
3	586,25	GE 240	576,90	GE 240
4	414	GE 200	376,06	unter GE 200
5	449	GE 200	449,00	GE 200

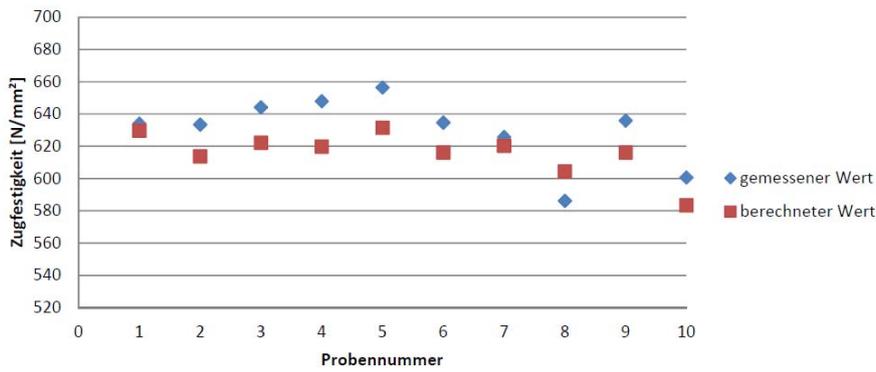
### Ausblick

Auf Grund der vielversprechenden Ergebnisse soll auch das Potenzial der chemischen Analyse zur Charakterisierung von Stahlguss im Rahmen einer weiteren studentischen Abschlussarbeit – diesmal auf Masterniveau und mit einer breiteren Werkstoffauswahl – weiter ausgelotet werden.



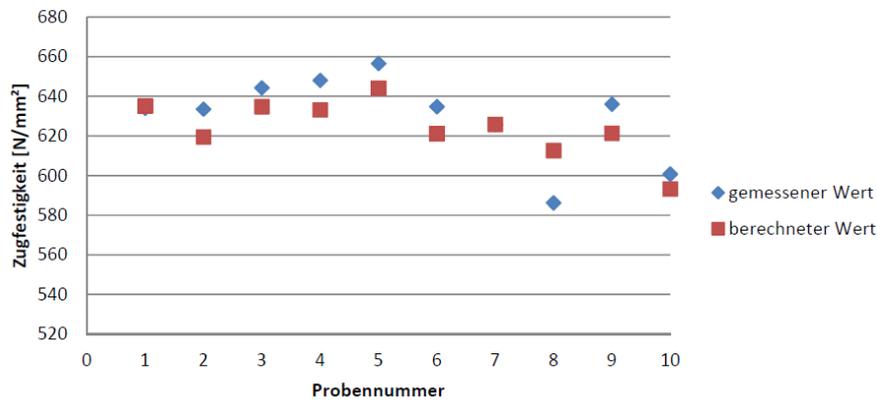
**Diagramm 1**

Formal nach Campbell für sauer und basisch zugestellte Öfen



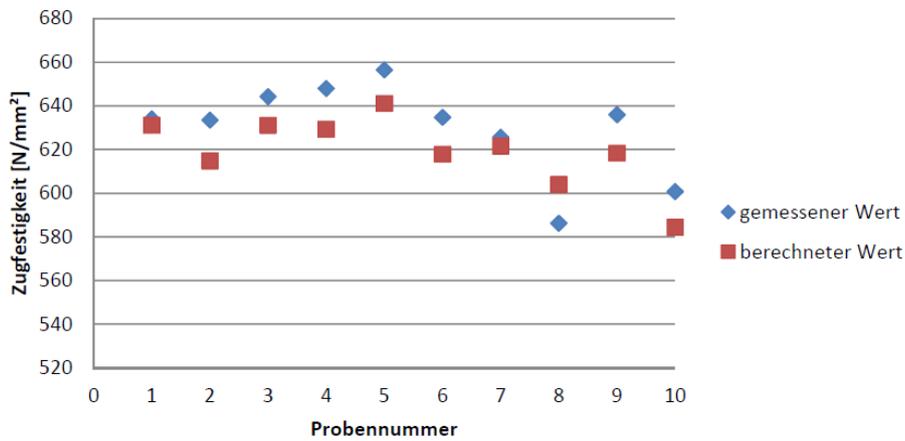
**Diagramm 2**

Formel nach Jüptner



**Diagramm 3**

Peiner Formel



**Diagramm 4**

Formal nach Osann

## Anlagenverzeichnis

---

- Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)
- Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“
- Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften
- Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen
- Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung
- Anlage B1: Materialkorridor
- Anlage C1: Versuchsstand
- Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager
- Anlage E2: Untersuchungsmethodik
- Anlage E3: Technische Inspektion
- Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU, 2011.
- Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.
- Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.
- Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.**
- Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.

## Anlage BA5:

**Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.**

---

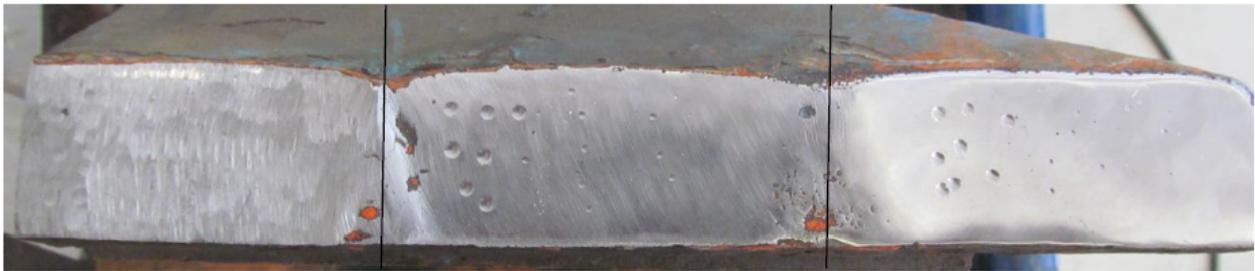
### Methodik

Aufbauend auf den Erkenntnissen einer intensiven Literaturrecherche zur Geschichte sowie zu den Verfahren bzw. Möglichkeiten der Härtemessung an stählernen Bauteilen wurden ausgewählte Lagerkörper untersucht. Neben der Genauigkeit ausgewählter Härtemessverfahren standen hierbei die Anforderungen an die Oberflächenbearbeitung in Vorbereitung der Härtemessung im Fokus der Untersuchungen. Als Referenzmasse standen Ergebnisse aus gewöhnlichen Zugversuchen sowie eine stationäre Härtemessung nach Brinell zur Verfügung.

Die Arbeit wurde vom Lehrstuhl Bautechnikgeschichte und Tragwerkserhaltung der BTU gemeinsam mit der Block Materialprüfungsgesellschaft mbH Berlin betreut.

### Erkenntnisse

Mit Bezug auf die Anforderungen an die Oberflächenvorbereitung wurden drei Varianten untersucht - beginnend beim einfachen Abschleifen der verzünderten und entkohlten Randschicht (Prüfstelle 1) bis hin zur DIN-konformen, feingeschliffenen Oberfläche (Prüfstelle 3) – vgl. nachfolgende Abbildung 1.



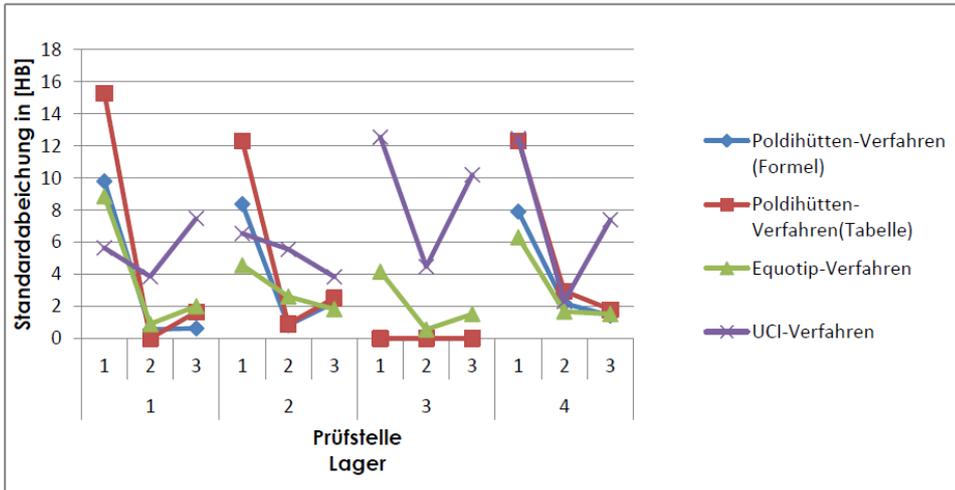
**Abb. 1: Darstellung unterschiedlich fein aufgearbeiteter Prüfstellen 1 bis 3 (von links nach rechts)**

Erwartungsgemäß zeigten sich bei Prüfstelle 1 die größten Streuungen bei den Messungen (Diagramm 1). Etwas überraschend hingegen war die Erkenntnis, dass die Streuungen der Messwerte bei der nur mäßig aufgearbeiteten Prüfstelle 2 zum Teil am geringsten ausfielen.

Hinsichtlich der eingesetzten Härtemessverfahren überzeugte das Equotip-Verfahren, welches über alle 4 untersuchten Lagerwerkstoffe betrachtet zu den genauesten Ergebnissen führte (Diagramm 2). Auch hier ließ sich feststellen, dass die aufwendig vorbereitete Prüfstelle 3 nicht zwangsläufig auch zu den genauesten Härtemessungen führt.

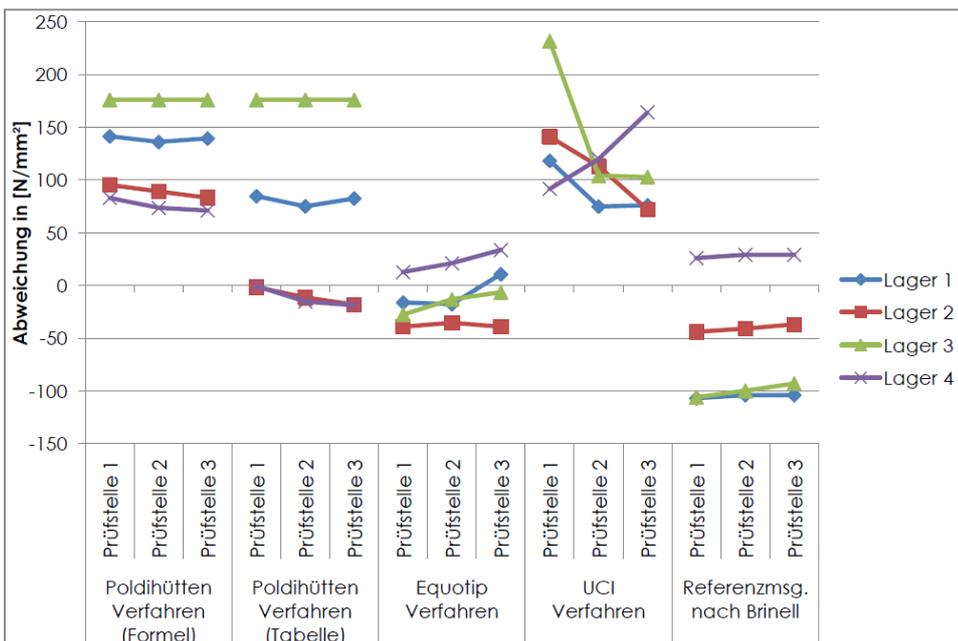
### Ausblick

Auf Grund der vielversprechenden Ergebnisse soll die Aussagekraft des Equotip-Verfahrens im Rahmen einer Masterarbeit an einem breiten Werkstoffspektrum geprüft werden.



**Diagramm 1**

Standardabweichungen der Einzelmessungen



**Diagramm 2**

Abweichung der aus den Härtemessungen abgeleiteten von den im Zugversuch ermittelten Festigkeiten

## Anlagenverzeichnis

---

- Anlage 01: Antrag Sachbeihilfe August 2008 (ohne Anlagen)
- Anlage 02: Themenheft „Brückenlager im Bestand“
- Anlage A1: Auswertung Fachzeitschriften
- Anlage A2: Umfrage DB Netz AG – Fragebogen
- Anlage A3: Umfrage DB Netz AG – Auswertung
- Anlage B1: Materialkorridor
- Anlage C1: Versuchsstand
- Anlage E1: Besonderheiten historischer Lager
- Anlage E2: Untersuchungsmethodik
- Anlage E3: Technische Inspektion
- Anlage BA1: Kleinfeldt, H.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial magnetisch-induktiver Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU, 2011.
- Anlage BA2: Pannasch, Fr.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial thermo-elektrischer Messungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2012.
- Anlage BA3: Pahlow, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Miniaturdruckproben für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2013.
- Anlage BA4: Renger, Th.: Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial der chemischen In-situ-Analyse für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA5: Brechel, Chr. Bewertung historischer Brückenlager - das Potenzial von Härtemessungen für die Materialcharakterisierung. Bachelorarbeit BTU Cottbus-Senftenberg, 2014.
- Anlage BA6: Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.**

## **Anlage BA6:**

### **Miene, Cl.: Bewertung historischer Brückenlager – Isotropieuntersuchungen an einem beweglichen Stahlgusslager von etwa 1939. Bachelorarbeit BTU Cottbus, 2013.**

---

#### **Methodik**

Für die Untersuchungen im Rahmen der Arbeit wurde ein historisches Linienkipplager von 1939 gewählt. Im Mittelpunkt stand die Analyse der oberen Lagerplatte aus Stahlguss. Die Untersuchung umfasste 62 Zugproben sowie 5 Schliifpräparate zum Werkstoffgefüge sowie die chemische Analyse einer Werkstoffprobe mit insgesamt 13 Messstellen. Die ergänzende Analyse der Lagerwalzen mit nur wenigen Zugproben diente der Überprüfung, inwiefern die durch die Lagerplatte gewonnenen Aussagen verallgemeinert werden können.

#### **Erkenntnisse**

Die Auswertung der Zugproben der Lagerplatte ergab, dass Bruchdehnung und Gleichmaßdehnung zum Kern hin zunahm, während 0,2 % - Dehngrenze und Zugfestigkeit zum Bauteilrand hin zunahm. Somit konnte ein Verteilungsmuster ausgemacht werden, was bei der für Stahlguss üblichen Annahme isotropen Materials in dieser Form nicht erkennbar sein sollte (Diagramm 1). Bei den chemischen Elementen wiederum traten bei der aus beruhigtem Stahl bestehenden Lagerplatte keine größeren Konzentrationsunterschiede auf. Die Werte der einzelnen Messungen schwankten, verhielten sich jedoch nicht auffällig (Diagramm 2). Auf mikroskopischer Ebene waren lokal keine nennenswerten Unterschiede erkennbar. Global jedoch unterschieden sich Kern- und Randbereich hinsichtlich der Kornfeinheit – vermutlich auf Grund einer unzureichenden Wärmebehandlung. Auf makroskopischer Ebene auffallend und bemerkenswert war der aufgefundene Lunker in beachtenswerter Größenordnung, wie er in Diagramm 2 sichtbar ist.

Unter Berücksichtigung der Analyse der Walzen lässt sich für historische Stahlgussstücke verallgemeinern, dass Zugfestigkeit und 0,2 % - Dehngrenze nach innen kleiner werden.

Insgesamt also variierten die Werkstoffeigenschaften in Abhängigkeit von Rand- und Kernbereich des untersuchten Bauteils. Für In-situ-Bauteilbefundungen an historischen Brückenlagern lässt sich demnach festhalten, dass sich aus Ergebnissen zerstörungsfreier Untersuchungen an der Bauteiloberfläche nicht uneingeschränkt die Werkstoffeigenschaften des Bauteilkerns ableiten lassen.

#### **Ausblick**

Wegen der Relevanz der Erkenntnisse für die Begutachtung von Stahlgussbauteilen sollen die Ergebnisse an weiteren Lagerbauteilen verifiziert werden.

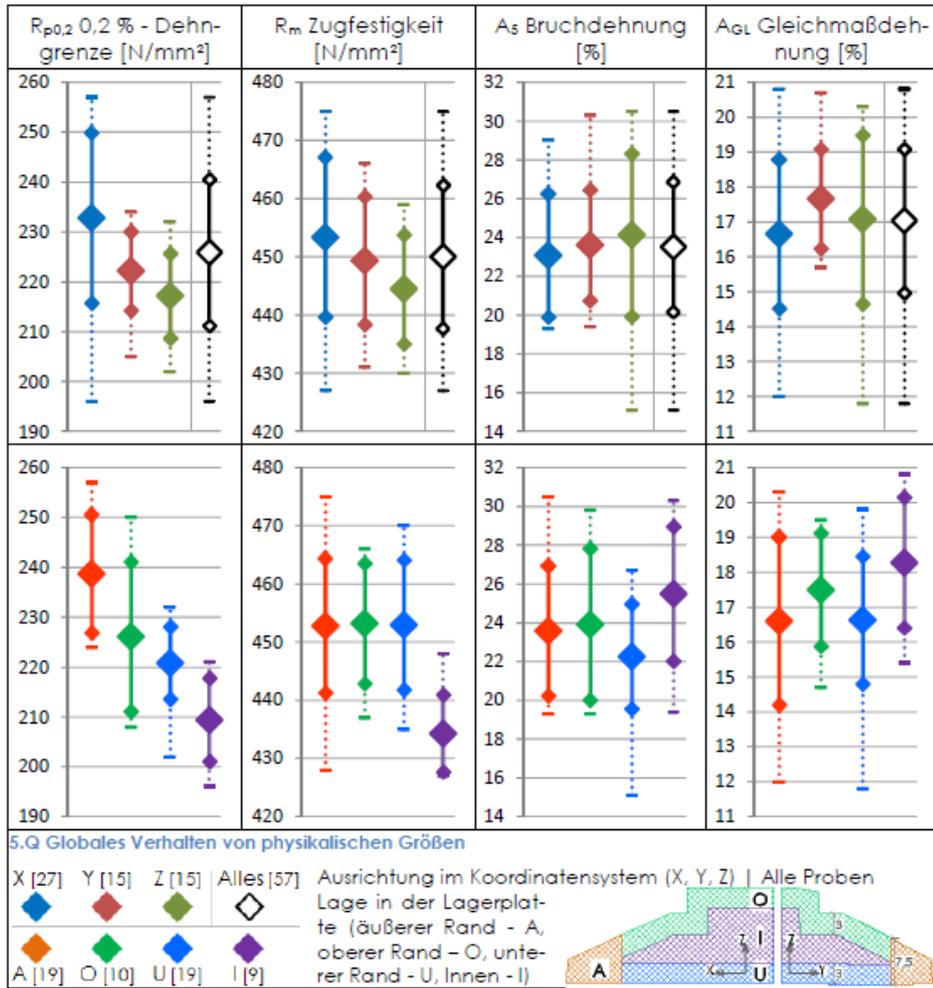


Diagramm 1

Vergleich der gemessenen mechanisch-technolog. Kennwerte

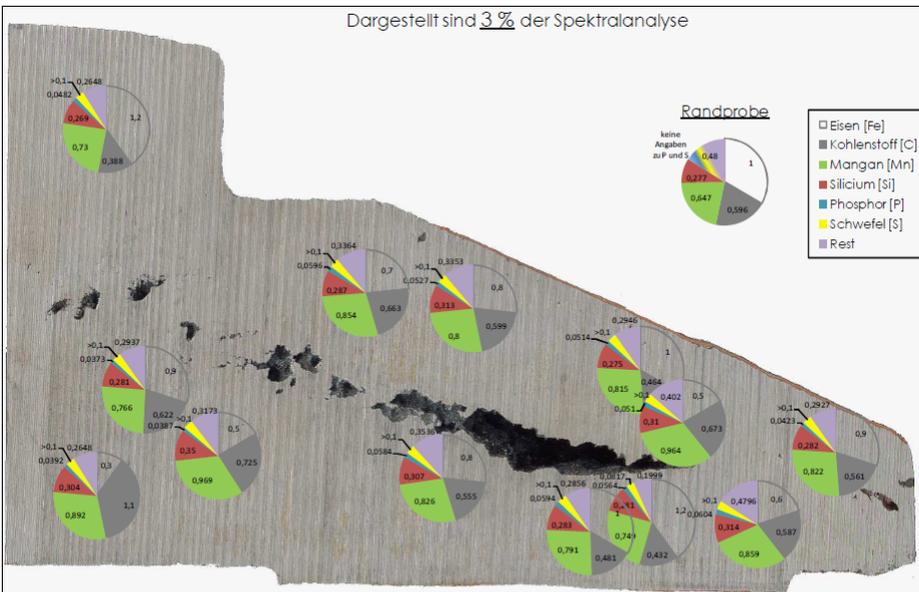


Diagramm 2

Vergleich der chemischen Analyse

5.1 Darstellung Spektralanalyse

Dargestellt sind 3% der SpA. Alle Proben enthalten mindestens 97% Eisen, die nicht mit dargestellt werden. Jedes Kreisdiagramm entspricht den restlichen 3% je einer Probe und befindet sich mit dem Zentrum am Ort derselben. Eine Angabe von z.B. 0,3% Eisen bedeutet einen Eisenanteil von  $97\% + 0,3\% = 97,3\%$ .