



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

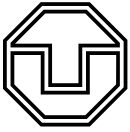
**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN**

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 43



Manfred Curbach, Heinz Opitz,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**9. SYMPOSIUM  
EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN  
VON BAUKONSTRUKTIONEN**



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

---

**FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN**

---

Manfred Curbach, Heinz Opitz,  
Silke Scheerer, Torsten Hampel (Hrsg.)

**9. SYMPOSIUM  
EXPERIMENTELLE  
UNTERSUCHUNGEN  
VON BAUKONSTRUKTIONEN**

Schriftenreihe  
Konstruktiver Ingenieurbau Dresden  
Heft 43

Herausgeber der Reihe

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach  
apl. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Graf  
Prof. Dr.-Ing. Peer Haller  
Prof. Dr.-Ing. habil. Ulrich Häußler-Combe  
Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kaliske  
Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine  
Prof. Dr.-Ing. Richard Stroetmann  
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Weller  
Prof. Dr.-Ing. Bernd W. Zastra

Institut für Massivbau  
Technische Universität Dresden

D - 01062 Dresden

Tel.: 49 351 / 4 63-3 65 68

Fax: 49 351 / 4 63-3 72 89

Redaktion: Silke Scheerer  
Korrekturen: Angela Heller  
Gestaltung: Ulrich van Stipriaan  
Titelfoto: Sabine Wellner, bearbeitet von Sven Hofmann

Diese Publikation gibt es auch Open Access auf [www.qucosa.de](http://www.qucosa.de).

Redaktionsschluss: 31. August 2017

Druck: addprint AG · Am Spitzberg 8a · 01728 Bannewitz  
Veröffentlicht: Dresden, 21. September 2017

ISSN 1613-6934

## Inhalt

Vorwort <i>Silke Scheerer, Torsten Hampel</i> .....	5
Willy Gehler als Protagonist der experimentellen Bauwerksuntersuchung <i>Oliver Steinbock</i> .....	7
Das Potenzial thermo-mechanischer Messungen für die Werkstoffcharakterisierung <i>Volker Wetzki, Franziska Pannasch</i> .....	23
Detektierung von Betonschäden an schwer zugänglichen Bauwerken mittels Thermografie <i>Helena Eisenkrein-Kreusch, Florian Bavendiek</i> .....	39
Messtechnische Bewertung des Zustandes des spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahles des U-Bahnhofs Poccistraße in München <i>Hermann Weiher, Katrin Runtemund, Christian Glomp</i> .....	49
Baubegleitende Zustandsüberwachung von Brücken <i>Max Käding, Marc Wenner, Steffen Marx</i> .....	63
Messtechnische und teilweise fotooptische Erfassung von Formänderungen an ertüchtigtem und nicht ertüchtigtem Bruchsteinmauerwerk unter Labor- und Praxisbedingungen <i>Sabine Koch, Axel Dominik, Jessica Klinkner, Clara-Maria Nocker, Domenika Baroness von Kruedener, Pascale Dominik</i> .....	75
Untersuchungen im Rahmen der geplanten Ertüchtigung zweier Pfeiler des St.-Marien-Doms Zwickau <i>Michael Kühn, Peter Schöps</i> .....	93
Bewertung der Restlebensdauer von Spannbetonbrücken durch Koppelfugenmonitoring an Praxisbeispielen <i>Dirk Sperling, Hauke Schmidt</i> .....	113
Ludwig-Erhard-Anlage Frankfurt a. M. – Belastungsversuche zum Nachweis der Tragfähigkeit historischer Rippendecken <i>Peter Braun, Gunter Hahn, Gerd Kappahn, Edyta Wünsch</i> .....	123
Durchführung von Belastungsversuchen an einbetonierten Ankerschienen in Spannbetonbindern <i>Marco Tschötschel, Bente Ebsen</i> .....	135
Der Löwenhof in Dortmund – Experimentelle Statik zum Erhalt historischer Eisenbetondecken <i>Martin Gersiek, Marc Gutermann, Friedhelm Löschmann, Marcus Patrias</i> .....	143

Sportstätten mit weitgespannten Hallendächern – Sicherstellung der Tragfähigkeit unter Schneelast durch bauwerksdiagnostische Untersuchungen, Nachrechnung, Belastungsuntersuchung und Monitoring <i>Robert Herold, Elke Reuschel, Peter Bauer</i> .....	157
Belastungsversuche an einer historischen Eisenbahn-Gewölbebrücke <i>Gregor Schacht, Jens Piehler, Erik Meichsner, Steffen Marx</i> .....	169
Erweiterte Strukturabbildung von Brücken mit adaptiven mathematischen Modellen zur Lösung aktueller noch ungelöster Probleme <i>Klaus Brandes, Petra Kubowitz, Werner Daum, Detlef Hofmann, Frank Basedau</i> .....	183
Messtechnische Bewertung der dynamischen Tragfähigkeitsreserven eines Probenbühnenbodens der Semperoper Dresden <i>Tino Kühn, Marcus Hering, Heiko Wachtel, Sabine Wellner</i> .....	189
Untersuchungen des Otto-Mohr-Laboratoriums an historischer Bausubstanz in und um Dresden <i>Sabine Wellner, Silke Scheerer, Torsten Hampel</i> .....	207
Übersicht KID-Hefte .....	215

## Messtechnische Bewertung des Zustandes des spannungsrissskorrosionsgefährdeten Spannstahles des U-Bahnhofs Poccistraße in München

Hermann Weiber<sup>1</sup>, Katrin Runtemund<sup>1</sup>, Christian Glomp<sup>2</sup>

**Zusammenfassung:** Im Münchner U-Bahnhof Poccistraße wurden in der Gewölbedecke gekrümmte Stabspannglieder aus vergütetem Spannstahl St 110/135 verwendet, die eine erhöhte Spannungsrisssgefahr des Spannstahles aufweisen.

Im Rahmen dieses Beitrages werden die durchgeführten Ultraschalluntersuchungen zur Detektion von Spanngliedbrüchen vorgestellt. Es wird hierbei insbesondere auf die wesentlichen, die Spannungsrisssgefahr begünstigenden Einflussfaktoren eingegangen und das Verfahren hinsichtlich seiner Eignung zur Bewertung des Zustandes des Spannstahles bewertet.

**Summary: Valuation of the condition of prestressing steel sensitive to stress corrosion cracking of the subway station Poccistraße in Munich.** *At the Munich subway station Poccistraße, curved prestressing bars made of hot rolled prestressing steel St 110/135 were used in the barrel-vaulted ceiling, which later were found to be sensitive to stress corrosion cracking.*

*In the present contribution the ultrasonic testing of the prestressing bars for the detection of stress corrosion cracking are presented. In particular, the most important influencing factors which increase the risk of stress corrosion cracking are discussed and the method is evaluated with regard to its suitability for evaluating the state of the prestressing steel.*

### 1 Einleitung

#### 1.1 Das Bauwerk

Der U-Bahnhof Poccistraße liegt auf der Strecke der U1 zwischen den Bahnhöfen Goetheplatz und Implerstraße. Die beiden Tunnelröhren wurden im Schildvortrieb mit Stahlbetontübbings in den Jahren 1974/1975 errichtet. Im Bereich des Bahnhofs wurden die beiden Tunnelröhren mit insgesamt 31 Querstellen verbunden und auf 2 Stützenreihen abgestützt. Die Bahnhofssohle wurde in einer 115 cm starken Stahlbetonplatte hergestellt. Die im Scheitelpunkt 30 cm und im Randbereich 50 cm starken Tonnenschalen sind in Längsrichtung beschränkt vorgespannt (s. Bild 1).

#### 1.2 Spannungsrissskorrosionsgefährdung des Spannstahles

Für die Vorspannung der Gewölbedecke kamen für jede Tonnenschale 46 Spannglieder aus warmgewaltem, gestrecktem und angelassenem Spannstahl St 110/135 und das

---

1 Dr., matrices engineering GmbH, Nymphenburger Straße 20a, München

2 Stadtwerke München GmbH, Emmy-Noether-Straße 2, München

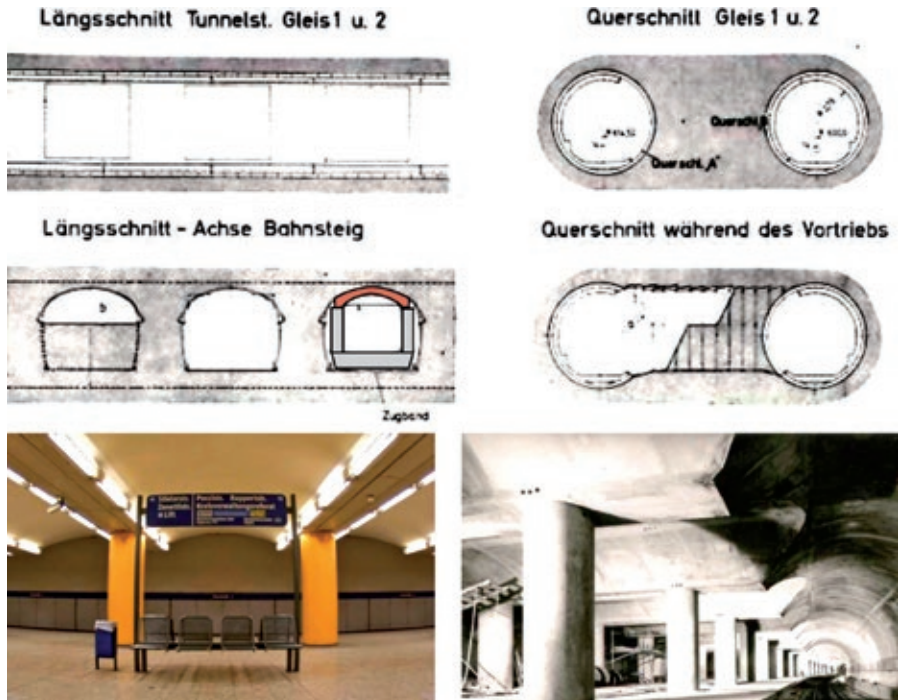


Bild 1: Herstellung des Bahnhofs Poccistraße Pläne: Auszüge aus der Bestandsstatik; Fotos unten: Christian Glomp; Grafik: Katrin Runtemund

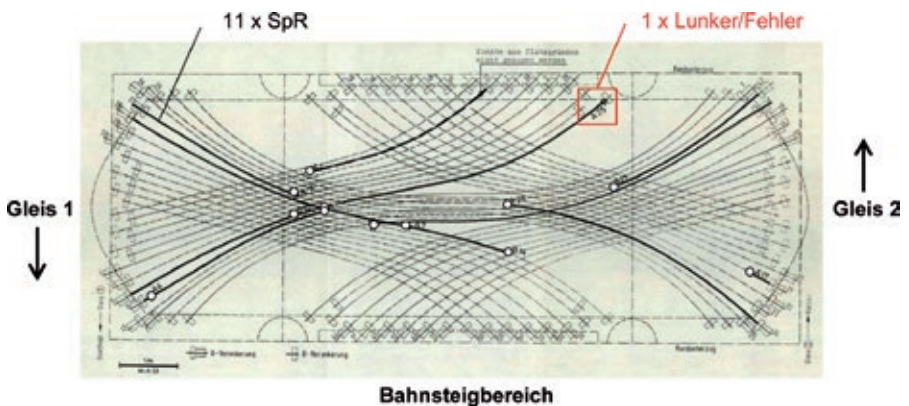


Bild 2: Draufsicht Deckengewölbe mit Verlauf der Spannglieder und Lage der bis 1978 festgestellten Brüche Plan: Auszug aus [1]; Grafik: Katrin Runtemund

Dywidag-Spannverfahren für Einzelspannglieder rund, glatt mit 36 mm Durchmesser gemäß Zulassungsbescheid [1], [2] zum Einsatz. In Bild 2 ist die Spanngliedgeometrie in der Draufsicht dargestellt.

Aufgrund der hohen Anfälligkeit des verwendeten Spannstahls hinsichtlich wasserstoffinduzierter Spannungsrissskorrosion wurde die Zulassung für den verwendeten Spannstahl [1] etwa neun Monate nach Abschluss der Einpressarbeiten zurückgezogen.

Bereits während der Rohbauarbeiten wurde ein Spanngliedbruch infolge eines Materialfehlers (Lunker) festgestellt. In den folgenden zwei Jahren nach Abschluss der Rohbauarbeiten wurden insgesamt 9 weitere Spanngliedbrüche festgestellt, da sich der Mörtelverschlusspfropfen der Spannische (teilweise) löste bzw. das Spannstahlende aus der Spannische herausgetreten war. Zwei weitere Spannstahlbrüche wurden mithilfe von Ultraschallprüfungen der Spannglieder entdeckt.

Die detektierten Brüche wurden durchweg durch Spannungsrissskorrosion mit Wasserstoffversprödung des Spannstahles hervorgerufen. Die Ultraschallprüfungen waren Teil von umfangreichen Untersuchungen, die zur Beurteilung des Bauwerkszustandes und der Korrosionsgefahr durch das Materialprüfungsamt der TU München im Jahr 1977 durchgeführt wurden und mithilfe derer eine ausreichende Tragsicherheit des Bauwerks nachgewiesen werden konnte [3].

### 1.3 Sonderprüfung 2015/2016

Im Jahr 2011 wurde das Ankündungsverhalten des Tonnendachs im Bahnsteigbereich des Bahnhofs gemäß der Handlungsanweisung Spannungsrissskorrosion [4] rechnerisch durch die König und Heunisch Planungsgesellschaft mbH, Dortmund untersucht [5]. Das zugehörige Rissbild für die Regeltonnen ist in Bild 3 (rechts) dargestellt. Es konnte eine ausreichende Resttragfähigkeit aller Tonnenschalen nachgewiesen werden. Zur frühzeitigen Erkennung von Spanngliedbrüchen wurden Sonderprüfungen angeordnet, bei denen die Unterseite der Tonnenschale auf eine vermehrte Rissbildung hin zu untersuchen ist.

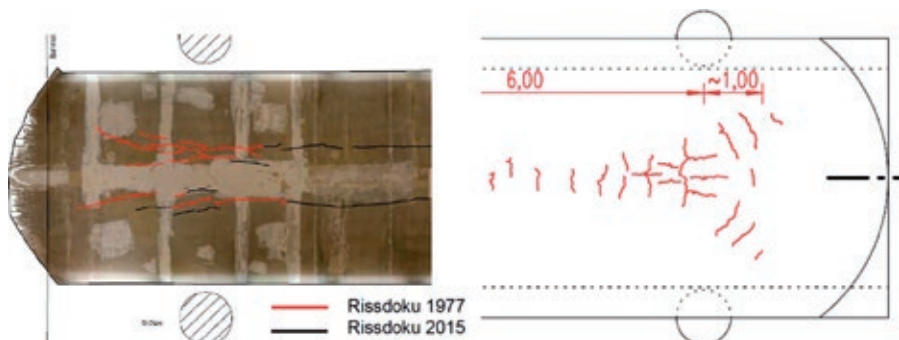


Bild 3: Rissbild bei der Sonderprüfung (links) und des Ankündungsverhaltens (rechts)  
Foto links: Christian Glomp; rechts: Auszug aus [2]; Grafik: Katrin Runtemund



Im Rahmen der Sonderprüfung wurde die Tapete der Tonnenschale entfernt. Es wurden hierbei schnell erste Risse sichtbar, wobei ein Teil dieser Risse bereits 1977 im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen angezeichnet worden war. Es zeigte sich, dass sich die Risse z. T. verlängert haben, weitere sind hinzugekommen (s. Bild 3, links). Um den zukünftigen Rissfortschritt zu dokumentieren, wurden die Risse mit einem Laserscan festgehalten.

Aufgrund der festgestellten Rissituation am Bauwerk stellte sich die Frage, ob letztere durch weitere Spanngliedbrüche bedingt waren. Zur Ursachenklärung wurden in der Folge Ultraschalluntersuchungen an zwei ausgewählten Tonnenschalen durchgeführt, die nachfolgend näher erläutert werden.

## 2 Ultraschallprüfungen

### 2.1 Verfahren und Zielsetzung

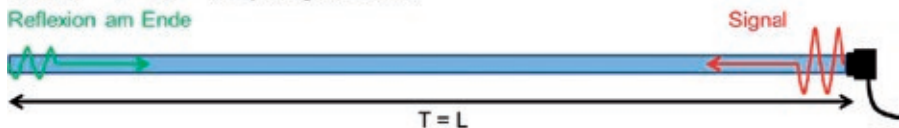
Bei der Ultraschallprüfung wird der Prüfkopf auf das Stabende aufgesetzt. In Bild 4 ist der Messaufbau exemplarisch dargestellt.

Mithilfe eines piezoelektrischen Schwingers werden Schallimpulse in den Prüfkörper eingeleitet. Letztere werden an der Stabendfläche (Bruchstelle oder Stabende) reflektiert. Durch Messung der Laufzeit zwischen ausgesendetem und dem reflektierten und wieder empfangenen Impuls kann über die materialspezifische Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schallsignals die Lage  $T$  (= Tiefe) der Stabendfläche ermittelt werden.



**Fall 1:  $T = L$  → Spannglied intakt**

Reflexion am Ende



**Fall 2:  $T < L$  → Bruch**

Reflexion am Bruch

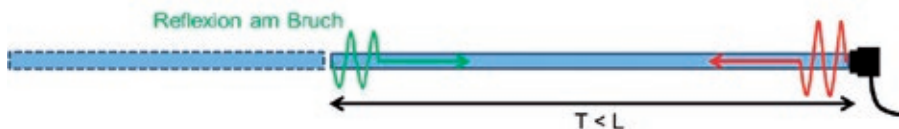


Bild 4: Ultraschallprüfverfahren

Fotos: Christian Glomp, Grafik: Katrin Runtemund

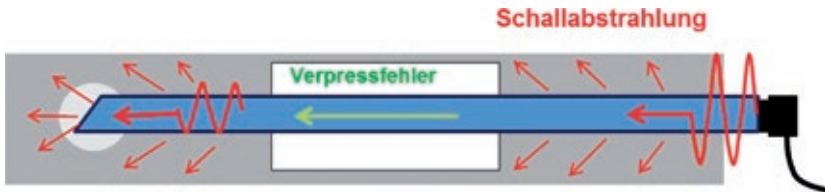


Bild 5: Schallabstrahlung bei verpressten Spanngliedern

Grafik: Katrin Runtemund

Durch Mehrfachreflexionen entstehen weitere Echos mit doppelter, dreifacher usw. Laufzeit. Ein solcher hin- und herlaufender Ultraschallpuls wird zwar zunehmend gedämpft, ist aber mit verringerter Amplitude dennoch in den folgenden empfangenen Echosignalen deutlich sichtbar. Das erzeugte Schallfeld im Prüfobjekt ist von der Prüffrequenz, der Schallgeschwindigkeit und der Schwingergröße abhängig.

Durch den Kontakt des Stabes mit dem umgebenden Verpressmörtel kommt es zu einer Schallabstrahlung in den angrenzenden Mörtel und damit – je nach Injektionsgrad – zu einer mehr oder weniger großen Dämpfung des Signals. So ist der Energieverlust des Ultraschallsignals bei einem gut verpressten Spannglied (oder bei wassergefülltem Hüllrohr) deutlich höher als bei einem Spannglied mit Verpressfehlern (s. Bild 5).

Die Amplitude des reflektierten Schallsignals und damit die Reichweite des Messgerätes sind im Wesentlichen abhängig von folgenden Faktoren:

- Ankopplung des Prüfkopfes an den Stab (Oberflächenbeschaffenheit),
- Neigung und Einbettung der reflektierenden Endfläche (Oberflächenbeschaffenheit, Neigung der Endflächen),
- Verpresszustand des Spanngliedes,
- Spanngliedgeometrie (Länge, Krümmung).

Insgesamt kann die Prüfung somit drei Ergebnisse liefern:

- Fall 1:  $T = L$ :** Bei einem intakten Spannglied wird das Schallsignal am Stabende reflektiert, d. h. die Lage der Reflexionsfläche entspricht der Stablänge  $L$ .
- Fall 2:  $T < L$ :** Bei einem Bruch wird das Schallsignal an der Bruchfläche reflektiert. Somit ist die erfasste Entfernung der Reflexionsfläche kürzer als die Spanngliedlänge.
- Fall 3: kein Echo:** Sofern das Spanngliedende oder der Bruch außerhalb der Reichweite des Signals liegen, kommt es zum Signalverlust. Eine Aussage über den Zustand des Spanngliedes ist in diesem Fall nur für den Bereich der Reichweite des Signals möglich, sofern letztere bekannt ist.

Bereits bei den früheren Untersuchungen durch das Materialprüfungsamt wurde festgestellt, dass insbesondere bei den langen Spanngliedern  $L > 10,0$  m, d. h. bei etwa 22 % der Spannglieder, aufgrund der beschränkten Reichweite des Verfahrens kein Echo empfangen werden konnte. Es stellte sich somit die Frage, inwieweit das Verfahren insbesondere bei den langen Spanngliedern geeignet ist, Brüche zuverlässig zu detektieren.

## 2.2 Messumfang und Zielsetzung

Ziel der Ultraschalluntersuchungen war es, eine Aussage zur Bruchentwicklung seit 1977 infolge Spannungsrissskorrosion zu treffen. Ferner sollte die Eignung des Verfahrens geprüft werden. Hierbei interessierte insbesondere, inwieweit mit einer Dunkelziffer an unerkannten Brüchen zu rechnen ist. Des Weiteren sollten die kritischen Bereiche mit erhöhter Auftretenswahrscheinlichkeit von Brüchen sowie die Einflussfaktoren, die das Auftreten von Brüchen infolge Spannungsrissskorrosion begünstigen, ermittelt werden.

Hierzu wurden zum einen Voruntersuchungen unter definierten Randbedingungen an einem gekrümmten Stab und zum anderen Ultraschalluntersuchungen der Spannglieder an zwei ausgewählten Tonnenschalen am Bauwerk durchgeführt.

### 2.2.1 Voruntersuchungen

Zur Abschätzung der maximal erzielbaren Reichweite des Messgerätes wurden Probemesungen an einem unverpressten, gekrümmten Stab mit einer für das Bauwerk charakteristischen Geometrie unter definierten Randbedingungen durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden zur Abschätzung der maximal erzielbaren Reichweite die Stabenden optimal, d. h. eben sowie lotrecht zur Stabachse, vorbereitet. Unter diesen Bedingungen konnten insgesamt drei Reflexionen erfasst werden, was einer max. Reichweite von ca. 11,4 m entspricht (s. Bild 6).

Da die Spannglieder bei den Messungen am Bauwerk nur einseitig von der Spannseite zugänglich sind (Spannanker) und somit das gegenüberliegende Spannglied nicht inspiziert werden konnte, wurde der Einfluss einer etwaigen Neigung des Stabendes gegenüber der Stabachse am Festanker untersucht.

Hierzu wurde bei der Prüfung die Neigung des Stabendes schrittweise von 0°, 3°, 6°, 9° auf 15° erhöht (Bild 7). Der ermittelte Abstand T der Reflexionsfläche ist in Prozent der Stablänge tabellarisch dargestellt und soll die Messgenauigkeiten verdeutlichen. Es zeigt sich, dass

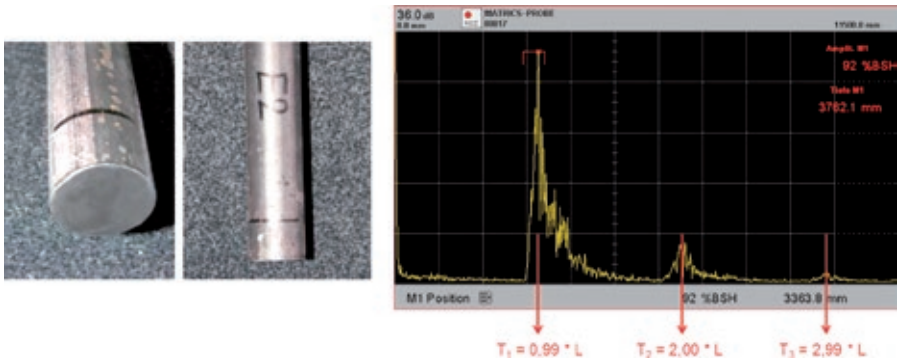


Bild 6: Ermittlung der maximalen Reichweite

Grafik: Katrin Runtemund

	Echo 1	Echo 2	Echo 3
Länge in [mm]	3800	7600	11400
Erfasste Tiefe in % der Länge			
Neigung in [Grad]	T / L	T / 2*L	T / 3*L
0	99%	100%	100%
3	98%	99%	100%
6	99%	99%	k. Echo
9	109%	109%	k. Echo
15	116%	k. Echo	k. Echo

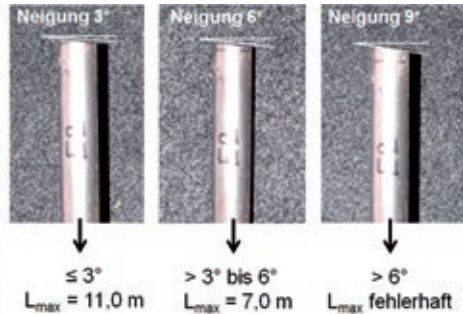


Bild 7: Einfluss der Neigung der Stabendflächen auf die Reichweite

Grafik: Katrin Runtemund

die Amplituden des reflektierten Signals mit zunehmender Neigung deutlich abnehmen. So ist das dritte Echo nur für Neigungen  $\leq 3^\circ$  erfassbar. Bei einer Neigung zwischen 3 bis  $6^\circ$  sind nur noch zwei Echos erfassbar, was einer Reichweite von ca. 7,6 m entspricht.

Bei Neigungen  $> 9^\circ$  kommt es zu einer Streuung des Signals, so dass bereits beim ersten Echo der Peak nicht mehr eindeutig ablesbar ist; die Entfernung zum Stabende ist somit nicht eindeutig detektierbar.

### 2.2.2 Untersuchungen am Bauwerk

Die Untersuchungen am Bauwerk wurden im Zeitraum November/Dezember 2015 durchgeführt. Es wurden Messungen an insgesamt zwei der 31 Tonnenschalen durchgeführt. Hierzu wurden die Spannischen der A-Verankerungen (Spannanker) freigelegt und die Stabendflächen in einen ebenen und zur Achse lotrechten Zustand versetzt (s. Bild 8). Nur bei zwei der getesteten 46 Spannglieder je Schale waren beide Stabenden zugänglich, die übrigen Spannglieder konnten nur von einer Seite geprüft werden.



Bild 8: Messung am Bauwerk (links), Ankopplungsfläche (rechts)

Fotos: Christian Glomp

Die Tonnenschale A7 (bzw. Tonne „Verpressfehler“) wurde ausgewählt, da der Spannstahl aufgrund der z. T. langen Zeitdauer zwischen Vorspannen und Verpressen (z. T. > 150 Tage), des laut der Untersuchungen des Materialprüfungsamtes schlechten Verpresszustandes sowie der bereits vorhandenen zwei alten Brüche ein höheres Bruchrisiko des Spannstahles aufweist.

Die Schale B26 (bzw. Tonne „Riss“) wurde aufgrund des auffälligen Rissbildes (Querriss in Gewölbemitte, Schrägrisse im Bereich der Stützenachse) gewählt, welches gemäß der Untersuchung zum Ankündigungsverhalten auf einen Spanngliedausfall hindeutete.

### **3      Ultraschallprüfung am Bauwerk**

#### **3.1     Ergebnis der Messung**

In Bild 9 ist das Ergebnis der Ultraschallprüfung an den Tonnen A7 („Verpressfehler“) und B26 („Riss“) dargestellt. Sofern ein Echo empfangen wurde, wurde die ermittelte Tiefe der Endfläche/Bruch farblich als rote/blau Linie mit entsprechender Länge gekennzeichnet. Ein Bruch wurde als weißer Punkt markiert.

Bei der Tonne „Verpressfehler“ konnte insgesamt bei 18 der 44 geprüften Spannglieder ein Echo detektiert werden. Hierbei sind vier der erfassten Echos auf Brüche der Spannglieder und 14 auf die Reflektion am Spanngliedende zurückzuführen. Bei einem der gebrochenen Spannglieder ergab die Ultraschallprüfung eine Reflektion bei 6,5 m, was in etwa der Spanngliedlänge von 6,65 m entspricht. Aufgrund des Hervorstehens der Mutter wurde der Stab dennoch als gebrochen beurteilt. Bei 13 der erfassten Echos und bei allen detektierten Brüchen liegen Verpressfehler vor.

Bei der Tonne „Riss“ konnte lediglich bei 13 der geprüften 46 Spannglieder ein Echo detektiert werden. Nur zwei der insgesamt 44 getesteten Spannglieder weisen Verpressfehler auf. Bei beiden Spanngliedern konnte ein Signal erfasst werden, wovon eines auf einen Bruch zurückzuführen ist.

Es zeigte sich, dass das Bruchrisiko infolge Spannungsrissskorrosion ganz Wesentlich vom Verpresszustand der Spannglieder abhängt.

#### **3.2     Auswertung der Ergebnisse**

##### *3.2.1 Ermittlung der Reichweite*

Aufgrund der großen Anzahl an Messungen, bei denen kein Echosignal empfangen werden konnte, wurden Untersuchungen angestellt, um die Reichweite der Ultraschallprüfung am Bauwerk abzuschätzen. Ziel war es, einen Bereich anzugeben, in dem bei einer „Nullmessung“ (kein Echo) das Spannglied als nicht gebrochen angenommen und somit als „teilentakt“ über die ermittelte Länge bewertet werden kann.

In Bild 10 sind die empfangenen Echos für die Tonnenschalen A7 „Verpressfehler“ (in rot) und B26 „Riss“ (in blau) in Abhängigkeit der Spanngliednummer angegeben. Zur Kennzeichnung der Lage der A-Verankerungen wurden ferner die Kürzel B1, B2 für die Bahnsteig- und G1, G2 für die Gleisseite verwendet (vgl. Bild 2). Sofern die Tiefe des Echos aufgrund der gegenüber dem Rauschen sehr geringen Amplitude nur geschätzt werden konnte, sind die Spann-

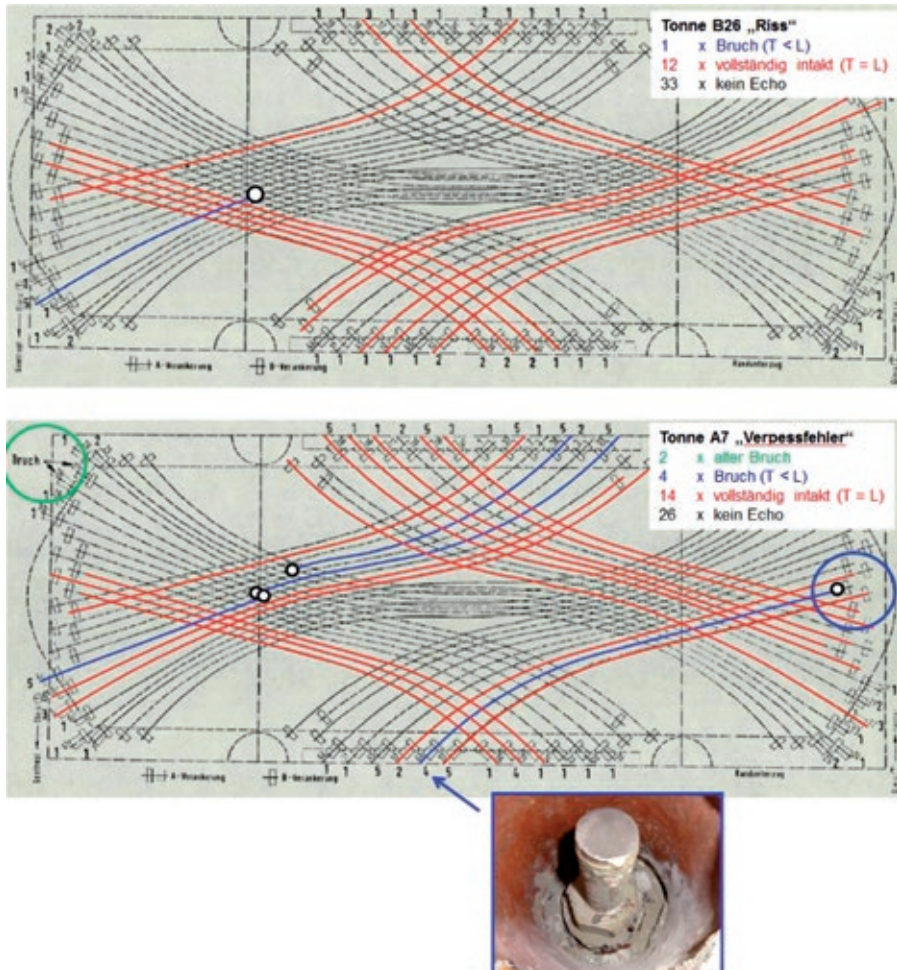


Bild 9: Ergebnis der Ultraschallprüfung; Auszug aus [1]

Foto: Christian Glomp; Grafik: Katrin Runtemund

gliednummern mit einem Rahmen gekennzeichnet. Die Sortierung erfolgte mit zunehmender Spannliedlänge.

Aufgrund der größeren Reichweite des Sendesignals bei Verpressfehlern sind die im Rahmen der Untersuchungen des Materialprüfungsamtes ermittelten Verpressfehlerlängen in Prozent der Spannliedlänge angegeben.

Bei den ungebrochenen Spangliedern mit erheblichen Verpressfehlern (20–60 %) konnte bei Stäben mit Längen von bis zu 9,40 m (Nr. 5 / A7) ein Echo empfangen werden. Wie bereits bei den Ultraschallprüfungen im Jahre 1977 dokumentiert, wurde bei der Messung der langen Spanglieder (L > 10 m) kein Echo empfangen.

Beim Großteil der untersuchten Spanglieder ohne Verpressfehler wurde bei Stäben mit Längen ≤ 7,40 m ein Echo empfangen. Die tatsächliche Reichweite des Ultraschallsignals liegt somit deutlich unter der im Rahmen der Probemessung am unverpressten Stab ermittelten Tiefe von 11,40 m. Es handelt sich hierbei um Stäbe mit Verankerung im Bahnsteigbereich mit vergleichbarer Geometrie/Krümmung. Der z. T. aufgetretene Signalverlust ist aller Voraussicht auf die Ausbildung des Stabendes (Neigung, Einbettung) zurückzuführen.

Insgesamt ist festzustellen, dass insbesondere für die langen Spanglieder aufgrund der Unsicherheiten bei der Ermittlung des tatsächlichen Verpresszustandes die Ausbildung des Stabendes an der B-Verankerung (Neigung, Oberflächenbeschaffenheit, Einbettung) bzw. der nur geringen Anzahl an untersuchten Spangliedern eine pauschale Abschätzung der Reichweite des Schallsignals – und damit des Bereichs, in dem Brüche bei einer Nullmessung ausgeschlossen werden können – nur eingeschränkt möglich ist.

Insgesamt deuten die Messungen jedoch darauf hin, dass Brüche bis zu einer Entfernung von etwa 7,0 m erfassbar sind. Zur Berücksichtigung der oben genannten Einflussfaktoren wurde angenommen, dass insbesondere bei gut verpressten Spangliedern bei einer Nullmessung ein Bruch bis zu einer Tiefe von 6,0 m von der A-Verankerung erfasst werden kann.

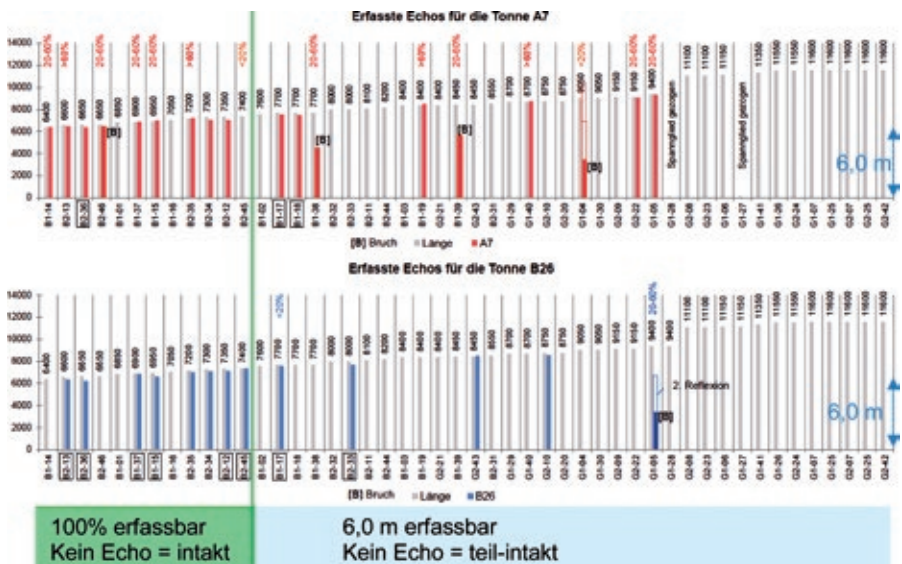


Bild 10: Erfasste Echos in Abhängigkeit der Spangliedlänge

Grafik: Katrin Runtemund

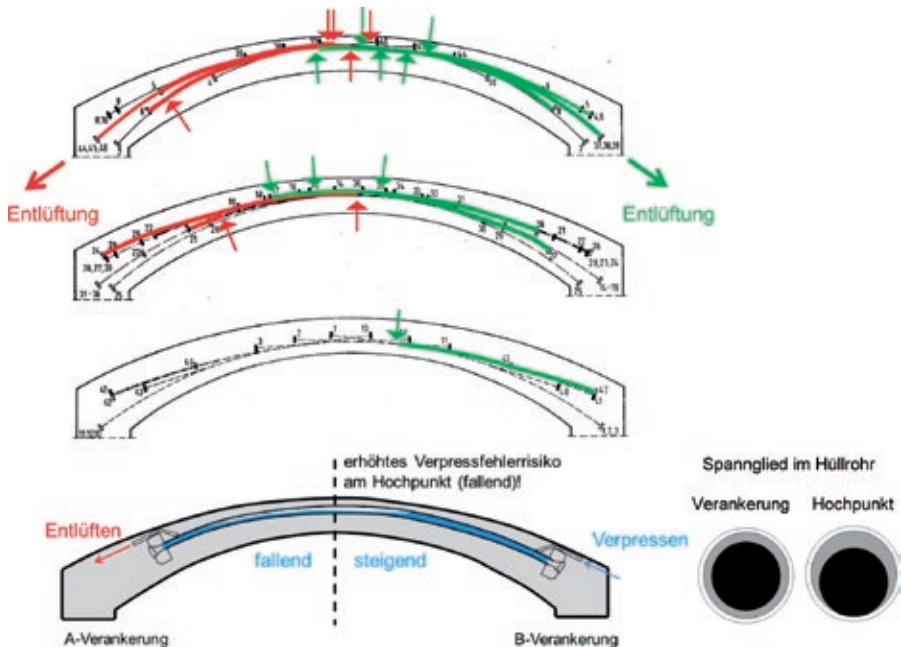


Bild 11: Lage der Brüche im Querschnitt; Verpressfehlerrisiko  
 obere Teilbilder: Auszug aus [1]; Grafik: Katrin Runtemund

### 3.2.2 Kritische Bereiche

In Bild 11 ist die Lage der korrosionsbedingten Spannstahlbrüche getrennt für die obere, mittlere und untere Spanngliedlage bezüglich der A-Verankerung (Entlüftungsseite) dargestellt. Es zeigt sich, dass die Brüche überwiegend im Bereich der Hochpunkte auf der Entlüftungsseite (abfallende Seite), d. h. in Bereichen, in denen Verpressfehler aufgrund des Verpressens vom Tiefpunkt aus mit einer erhöhten Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind, aufgetreten sind. Begünstigt wird dies insbesondere auch durch den gegenüber dem Spannglieddurchmesser von 36 mm kleinen Hüllrohrinnendurchmesser von nur 45 mm.

### 3.2.3 Bewertung des Verfahrens

In Bild 12 ist zur Übersicht die Lage der alten und neu detektierten Brüche aller Tonenschalen als weißer Punkt dargestellt. Die Reichweite des Signals ist in Prozent der Länge jeweils hinsichtlich Länge und Geometrie für vergleichbare Spanngliedgruppen angegeben und der erfassbare Messbereich grün hinterlegt dargestellt. In diesem Bereich können Brüche bei einer Nullmessung (kein Echo) mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.



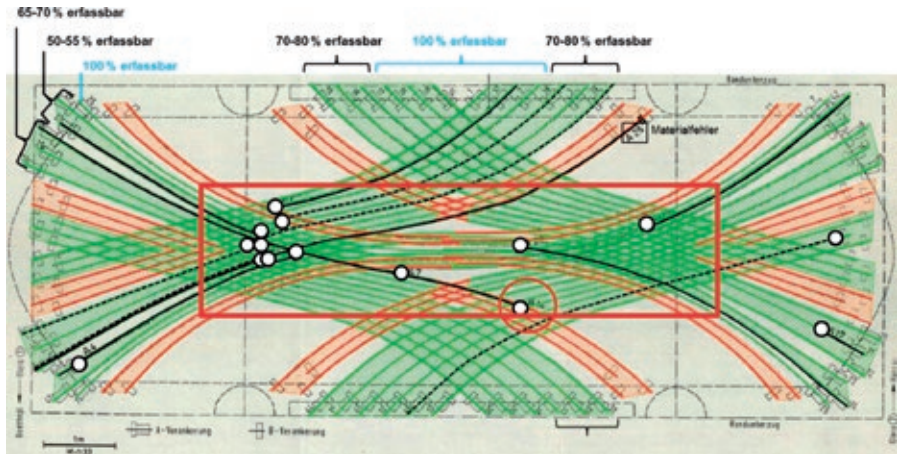


Bild 12: Bereiche innerhalb/außerhalb der Reichweite (grün/rot) der Ultraschallprüfung, Lage der Spangliedbrüche (weiße Punkte) sowie kritischer Bereich (roter Rahmen)  
Plan: Auszug aus [1]; Grafik: Katrin Runtemund

Betrachtet man die Gesamtlänge aller 46 Spannglieder einer Tonne von etwa 400 m, so sind mithilfe der Ultraschallprüfung somit etwa 76 % der Gesamtlänge erfassbar. Vergleicht man die Lage der bisherigen Brüche, zeigt sich ferner, dass 15 (93 %) der 16 Brüche im Bereich der Reichweite liegen.

Der kritische Bereich der Hochpunkte, in denen Verpressfehler mit einer größeren Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind, ist in Bild 12 mit einem roten Rahmen markiert. Es zeigt sich, dass der kritische Bereich zu 100 % erfasst wird.

Das Verfahren ist somit gut geeignet um Brüche in den Risikobereichen zu erfassen.

#### 4 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Beitrag werden die zur Bewertung des Zustandes der Spannglieder der Gewölbedecke des Münchner U-Bahnhofs Poccistraße durchgeführten Untersuchungen beschrieben und ausgewertet. Ziel der Messungen war es, die Eignung und Aussagekraft des Ultraschallverfahrens hinsichtlich der Detektierbarkeit von Spangliedbrüchen zu prüfen und den Spangliedzustand neu zu bewerten.

Hierzu wurden Ultraschallprüfungen der Spannglieder an zwei der 31 Tonnenschalen durchgeführt, wobei die Schale A7 aufgrund des schlechten Verpresszustandes der Spannglieder und die Schale B26 aufgrund des auffälligen Rissbildes ausgewählt wurden.

Mithilfe der Untersuchungen wurde eine Spangliedlänge von 6,0 m ermittelt, bis zu der zuverlässig Brüche detektiert werden können. Damit können die Spannglieder eingeteilt

werden in „Bruch“, „intakt“ und „teilintakt“. Bei letzterem kann keine Aussage über den Zustand des Spanngliedteils getroffen werden, der jenseits der Reichweite von ca. 6 m liegt. Damit konnten insgesamt 76 % Spanngliedlänge je Gewölbetonne messtechnisch erfasst werden.

In Tabelle 1 sind die Ergebnisse der Ultraschallprüfung zusammengefasst. Es wurden insgesamt fünf Spanngliedbrüche, davon vier (+zwei alte Brüche) in der Tonnenschale A7 und ein Bruch in der Schale B26 detektiert. 100 % der Brüche traten bei Spanngliedern mit nachgewiesenen Verpressfehlern (Hohlräume) auf. Hohlstellen bilden sich bei gekrümmten Spanngliedern vorwiegend im Bereich des Hochpunkts und dabei bevorzugt auf der in Verpressrichtung abfallenden Seite aus. In diesen Bereichen traten auch insgesamt 15 (davon fünf neu) von 16 (davon fünf neu) Spanngliedbrüche auf. Diese Bereiche konnten zu 100 % durch die Messungen erfasst werden.

Tabelle 1: Ergebnis der Ultraschallprüfung

Ort	Messung		Zustand der Spannglieder		
	Echos	Kein Echo	intakt	Bruch	teilintakt
Tonne B26 „Risse“	13	33	19	<b>1</b>	26
Tonne A7 „Verpressfehler“	18	26	19	<b>6</b>	21

Das Verfahren ist somit geeignet, um Brüche infolge Spannungsrissskorrosion insbesondere in den Risikobereichen zu detektieren.

Es zeigte sich, dass das Bruchrisiko infolge Spannungsrissskorrosion ganz Wesentlich vom Verpresszustand der Spannglieder abhängt. Es kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass im Laufe der Zeit innerhalb jedes unverpressten Spanngliedabschnitts ein Spannstahlbruch eingetreten ist.

Aufgrund der fehlenden Kenntnis über den Verpresszustand des Spanngliedes im Bereich des Bruches lässt sich nicht beurteilen, ob eine (Teil-)Rückverankerung der Spannkraft bei einem Bruch erfolgte. Es wurde daher empfohlen mindestens alle gebrochenen Spannglieder sowie alle Spannglieder mit Verpressfehlern, sofern sie nicht durch Messung als intakt eingestuft wurden, bei der statischen Nachweisführung als ausgefallen zu bewerten.

## Literatur

- [1] Zulassungsbescheid Z-12.1-I.1: Zulassungsbescheid für warmgewalzten, gestreckten und angelassenen Spannstahl St 110/135. 1.9.1975.
- [2] Zulassungsbescheid Z- I/11-1.13.1-19: Dywidag-Spannverfahren mit Einzelspanngliedern. 1.1.1974.
- [3] Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Universität München: U-Bahnhof Poccistraße (Los 21) – Untersuchungen aufgrund von Spannstahlbrüchen. Untersuchungsbericht Nr. 440/Mü/Rau/K (Labor Nr. 192/11 vom 2.11.1977.

- [4] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (Hrsg.): Handlungsanweisung zur Überprüfung und Beurteilung von älteren Brückenbauwerken, die mit vergütetem, spannungsrisskorrosionsgefährdetem Spannstahl erstellt wurden. Ausgabe 6/2011.
- [5] König und Heunisch, Planungsgesellschaft mbH Dortmund: Rechnerische Beurteilung des Ankündigungsverhaltens der Tonnenschalen im U-Bahnhof Poccistraße, die mit dem spannungsrisskorrosionsempfindlichen Spannstahl St 110/135 hergestellt wurden. Vorabzug, 28.2.2012.