

Leopold-Franzens-Universität Innsbruck

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Arbeitsbereich Stahlbau und Mischbautechnologie

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Lener

Technikerstraße 13 | A-6020 Innsbruck

Telefon +43 (0) 512 / 507 - 6881 | Fax +43 (0) 512 / 507 - 36901

E-Mail stahlbau@uibk.ac.at | Internet <http://www.uibk.ac.at/stahlbau>



Gesamtlebensdauer von Stahltragwerken unter Einbeziehung bruchmechanischer Konzepte

Lener G., Reiterer D., Hauser A.

Einleitung

Die Beurteilung der Nutzungsdauer bestehender Stahltragwerke wird durch die zunehmende Bedeutung der Bauwerkserhaltung und Bauwerksmodernisierung immer mehr in den Vordergrund rücken. Die Hauptursache der Schäden an bestehenden Stahlkonstruktionen unter zyklischer Beanspruchung ist in den meisten Fällen Materialermüdung. Dabei erstreckt sich die mögliche Nutzungsdauer von Bauteilen nicht nur auf die Lebensdauer bis zum technischen Anriss, sondern es kann aus wirtschaftlichen Gründen anschließend auch eine Rissfortschrittsphase mit berücksichtigt werden. Somit ergibt sich die Gesamtlebensdauer einer Konstruktion unter den Gesichtspunkten der Materialermüdung als Summe der Lebensdauer bis zum technischen Anriss und der Restlebensdauer, siehe Bild 1.

Mit Hilfe der klassischen Konzepte der Betriebsfestigkeit ist es möglich, Aussagen über die Lebensdauer bis zum technischen Anriss zu erhalten. Für die anschließende Restlebensdauer gelten die Gesetzmäßigkeiten des Makrorisswachstums, wofür zusätzlich bruchmechanische Konzepte angewendet werden.

Ziel der Durchführung einer Simulation der Gesamtlebensdauer ist es, einen Beitrag zur Beantwortung einiger baupraktischer Fragestellungen zu leisten, wie z.B. Optimierung von Inspektionsintervallen oder Festlegung der erforderlichen Instandhaltungs- und Instandsetzungsmaßnahmen. Ein möglicher Ablauf zur Beurteilung bestehender Stahltragwerke, vor allem bezogen auf Brückentragwerke, ist in [3] beschrieben.

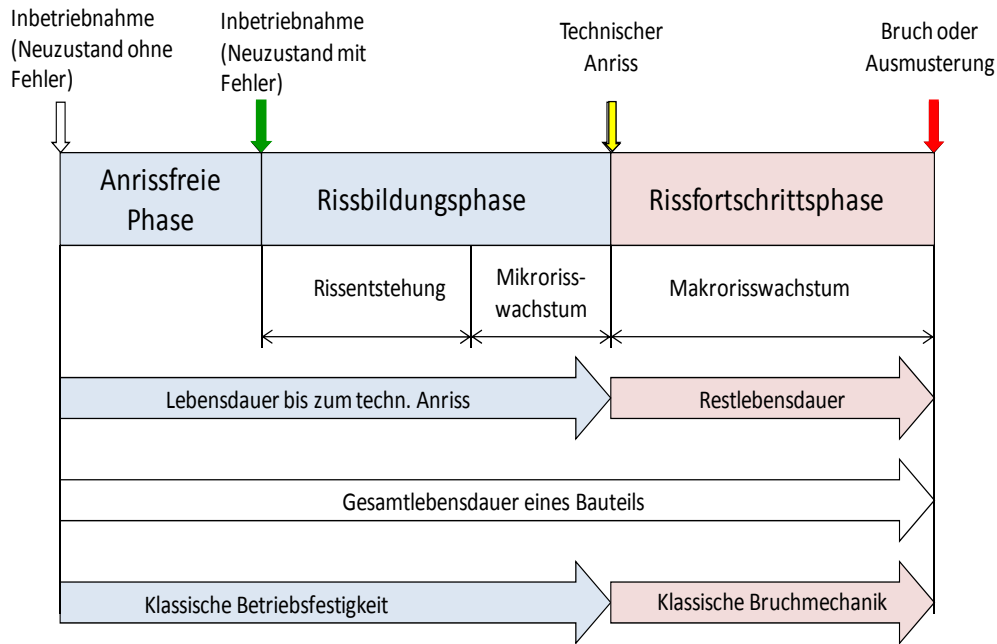


Bild 1: Gesamtlebensdauer eines Tragwerkes [1], [2]

Im vorliegenden Beitrag wird die Simulation mit Hilfe der FE-Methode vorgestellt, für welche Routinen erstellt wurden, die es ermöglichen:

- an der gesamten Struktur eine Betriebsfestigkeitsberechnung durchzuführen
- beliebig viele Risse in ein bestehendes globales FE-Modell einzufügen und deren Rissfortschritt zu simulieren
- die Betriebsfestigkeitsberechnung parallel mit der Rissfortschrittssimulation durchzuführen.

Die Erfassung der gesamten globalen Struktur mit dem FE-Modell ermöglicht es:

- Spannungen in komplexen Bereichen, wie z.B. in Knotenpunkten, besser abzubilden als mit Stabmodellen
- eine gegenseitige Beeinflussung und Spannungsumlagerung durch das Fortschreiten der Risse zu berücksichtigen
- eine parallele Rissfortschrittsberechnung und Betriebsfestigkeitsberechnung durchzuführen (Gesamtlebensdauer).

Stahltragwerke bestehen sehr häufig aus dünnwandigen Blechkonstruktionen, und die Spannungen in solchen Konstruktionen lassen sich sehr gut über räumliche Schalenmodelle berechnen. Die erstellten Routinen zur Berechnung der Gesamtlebensdauer beschränken sich daher auf räumliche Schalenmodelle und isotrope Werkstoffe.

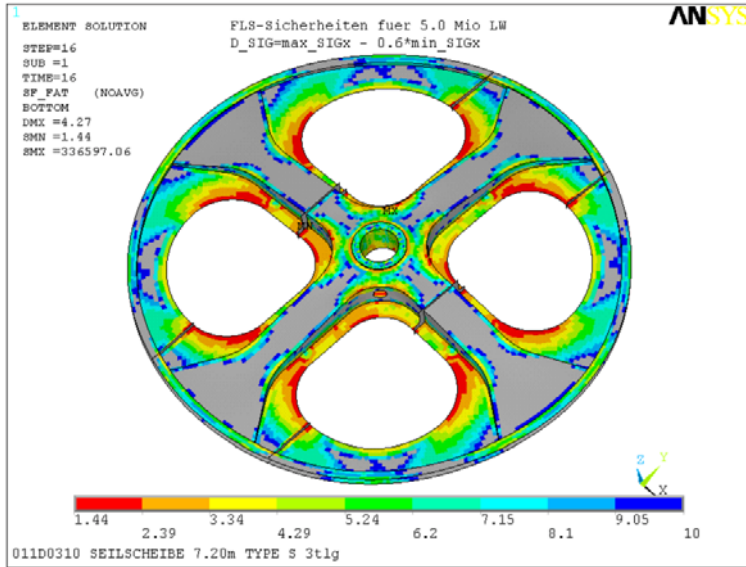
Betriebsfestigkeit - Lebensdauer bis zum technischen Anriss

Mit Hilfe einer Betriebsfestigkeitsberechnung kann die ertragbare Lastwechselzahl bis zum Auftreten eines technischen Anrisses ermittelt oder die vorhandene Sicherheit unter Vorgabe einer definierten Betriebszeit berechnet werden. Letztere Methode wird vor allem beim Ermüdungsnachweis eines Neubaus verwendet, während in Hinblick auf die Simulation der Gesamtlebensdauer bei bestehenden Bauteilen die restlichen Lastwechsel bis zum Auftreten des technischen Anrisses von Interesse sind. Zudem können kritische Punkte der Struktur, in denen das Auftreten eines Ermüdungsschadens zu erwarten ist, identifiziert werden. Auch ermöglicht die Betriebsfestigkeitsberechnung eine Interpretation der Ursachen für vorhandene oder zu erwartende Ermüdungsschäden und kann z.B. bei der Ausarbeitung von Sanierungsmaßnahmen hilfreich sein.

Nach EC3 [5] beruht die Beurteilung der Ermüdungsfestigkeit auf der Auswertung der Spannungsschwingbreiten unter Vernachlässigung des Mittelspannungseinflusses.

Zur Ermittlung der maximalen Spannungsschwingbreiten wurden auf der Methode der kritischen Schnittebene basierende Auswerteroutinen programmiert, welche eine räumliche Betrachtung zulassen. Die Ermittlung der ertragbaren Belastungszyklen erfolgt nach linearer Schadensakkumulation (Plamgren - Miner). Mit Kenntnis der maßgebenden Spannungsschwingbreiten und Zuordnung der Konstruktionsdetails zu Kerbfällen in jedem finite Element werden die ertragbaren Spannungsschwingspiele oder die vorhandenen Sicherheiten gegen Ermüdung berechnet.

Bild 2 zeigt beispielhaft die Verteilung der berechneten Sicherheiten einer spannungsarm geglähten Seilbahnseilscheibe, in Bild 3 wird die Simulation der Betriebsfestigkeit eines Brückenquerträgers mit den tatsächlich aufgetretenen Schäden verglichen.



$$\gamma_{Mf} = \frac{\gamma_{Ff} \cdot \lambda \cdot \Delta\sigma}{\Delta\sigma_D}$$

$$\Delta\tau \leq 0.15 \cdot \Delta\sigma$$

Bild 2: Verteilung der Sicherheiten gegen das Auftreten des technischen Anrisses für 5×10^6 Lastwechsel

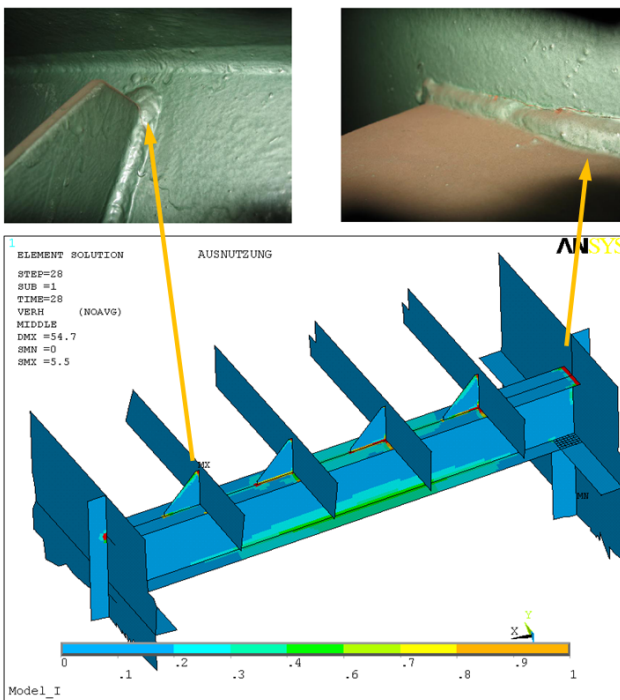


Bild 3: Berechneter Ausnutzungsgrad und festgestellte Schäden am einem Brückenquerträger

Rissfortschrittssimulation - Restlebensdauer

In der Regel ist mit dem Auftreten eines Anrisses die Grenztragfähigkeit eines Stahltragwerkes noch nicht erreicht. Zur Ermittlung der Restlebensdauer bedarf es einer Simulation des Rissfortschrittes mit den auf das Bauteil einwirkenden Lasten. Dabei stellt die Ermittlung der Rissfortschrittsrate und der Rissrichtung einen zentralen Punkt dar und wird mit Hilfe bruchmechanischer Konzepte durchgeführt. Zudem muss die Rissverlängerung mit dem entsprechenden Rissablenkungswinkel in die bestehende Struktur bzw. in das bestehende FE-Modell integriert werden. Es wurden Routinen programmiert, die einen automatischen Ablauf der einzelnen Simulationsschritte ermöglichen. Grundlage für die bruchmechanische Rissfortschrittsrechnung bilden dabei die Spannungsintensitätsfaktoren an der Risspitze bzw. deren Schwingbreiten. In Abhängigkeit von den vorhandenen Materialparametern kann zwischen verschiedenen Rissfortschrittskonzepten gewählt werden. Mit den entwickelten Routinen lassen sich Effekte wie Riss schließen oder die Mittelspannungsabhängigkeit bei der Rissfortschrittsrate berücksichtigen. Eine nähere Beschreibung kann aus [4], [6] entnommen werden.

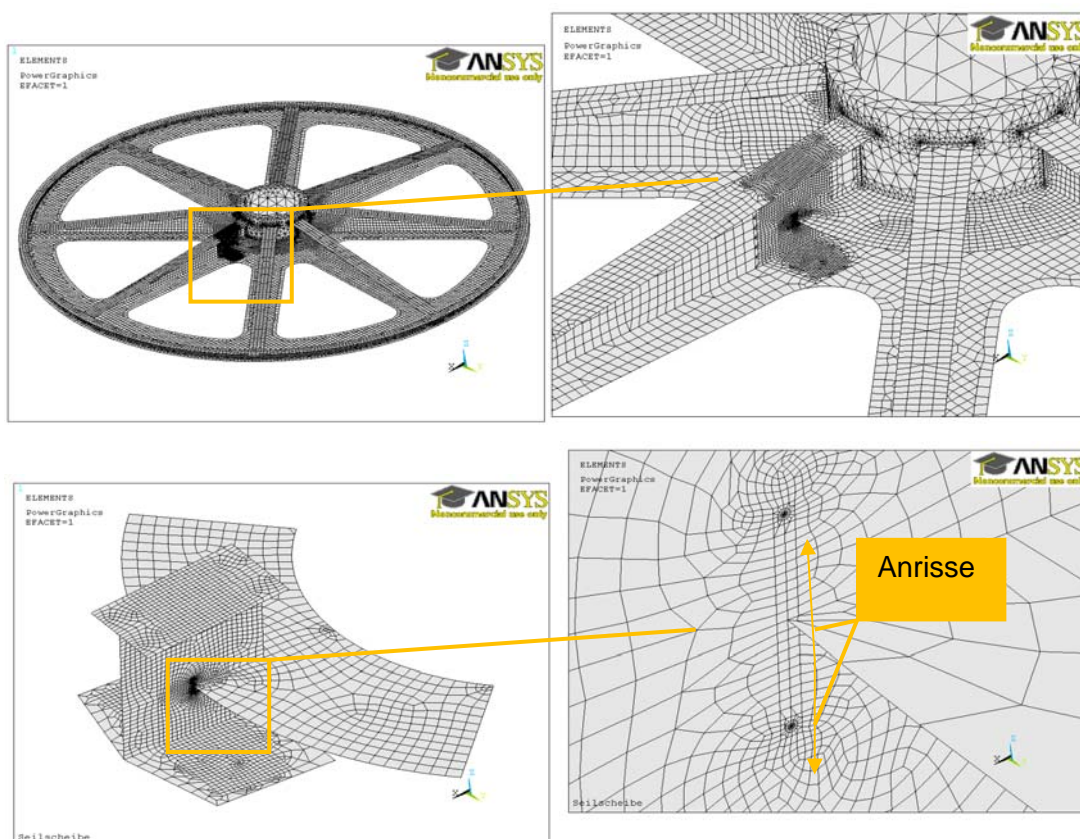


Bild 4: FE-Netz der globalen Struktur sowie der Rissflächenbereich mit Anriss

Betrachtet wird bei der Restlebensdauerermittlung die Phase stabilen Risswachstums bis zum Erreichen eines vorgegebenen Grenzzustandes. Als Grenzzustand kann das Erreichen der Risszähigkeit K_{IC} oder die Überschreitung der plastischen Grenzlast des rissebehafteten Tragwerkes definiert werden. Für die Simulation der Restlebensdauer können die im Zuge von Inspektionen tatsächlich festgestellten oder fiktive Risse in die Struktur eingefügt werden und anschließend die Lebensdauer bis zum Erreichen des Grenzzustandes ermittelt werden. Es kann auch der Rissfortschritt für ein bestimmtes Zeitintervall, z.B. für die Dauer zwischen zwei Bauwerksinspektionen, berechnet werden, um damit Aussagen über ein sicheres Betriebszeitintervall zu treffen. Ist während der Rissfortschrittsphase das Auftreten zusätzlicher Risse zu erwarten, kann dies durch eine parallele Berechnung der Betriebsfestigkeit und des Rissfortschrittes abgebildet werden.

Parallele Betriebsfestigkeits- und Rissfortschrittsberechnung

Für das rissfreie Bauteil erfolgt eine Betriebsfestigkeitsberechnung nach linearer Schadensakkumulation. Dazu werden die ertragbaren Schwingspiele berechnet, für die sich im Tragwerk an der bezüglich Betriebsfestigkeit höchst beanspruchten Stelle die Schädigung $D_d = 1,0$ ergibt. An dieser Stelle wird im FE-Modell ein Riss eingebaut und der Bereich um die Rissspitze neu vernetzt. Im nächsten Schritt erfolgt eine Rissfortschrittsberechnung mit einem vorgegebenen Rissinkrement. Nach Bestimmung der kumulierten Lastwechsel erfolgt anschließend eine neuerliche Betriebsfestigkeitsberechnung, in welcher überprüft wird, ob eventuell an weiteren Stellen im Tragwerk die Schädigung $D_d = 1,0$ erreicht wurde. Trifft dies zu, wird an diesen Stellen ebenfalls ein Riss eingebaut. Diese Schleife wird solange durchlaufen, bis die zuvor definierte Grenztragfähigkeit des Tragwerkes erreicht wird. Bild 5 zeigt die Vorgehensweise exemplarisch an einem Brückendeck zum Zeitpunkt nach dem Einbau eines zweiten Risses.

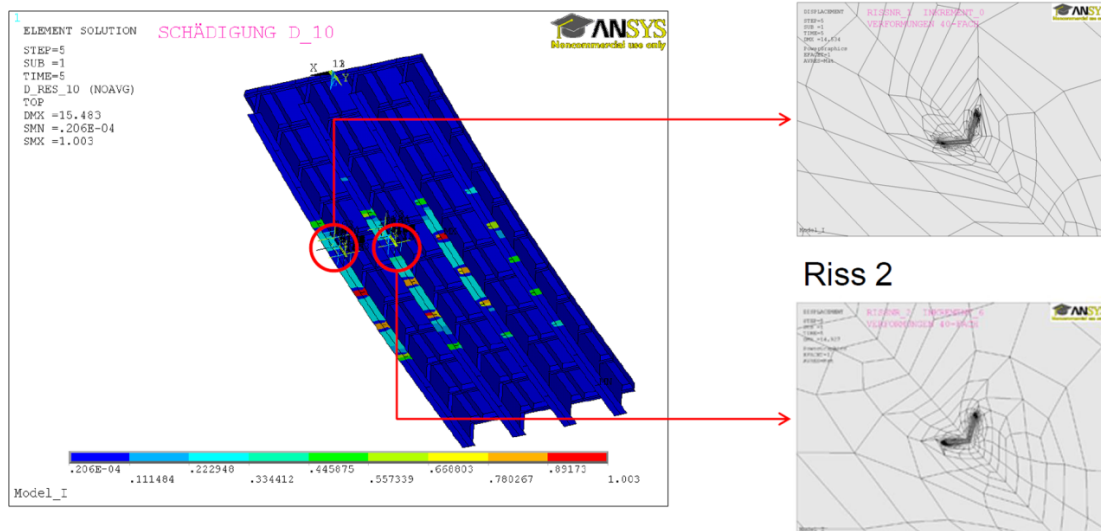


Bild 5: Parallele Betriebsfestigkeits- und Rissfortschrittsberechnung

Ausblick

Bei der Berechnung der Gesamtlebensdauer haben die stochastisch verteilten Eingabegrößen (Belastungsgrößen, Werkstoffkennwerte) und Vereinfachungen in der Modellbildung großen Einfluss auf die Ergebnisse der Simulation. Es ist daher geplant, die am Institut entwickelten Simulationmethoden unter Einsatz probabilistischer Verfahren, Sensitivitätsanalysen und Abgleich mit experimentellen Versuchen in ihrer Genauigkeit zu erhöhen.

Diese Untersuchungen liefern Kenndaten für den optimalen Prüfumfang bei Schweißkonstruktionen bzw. für die Festlegung von optimalen Inspektionsintervallen und geben Hinweise zur sinnvollen Einstufung der Konstruktionen in die Ausführungsklassen nach EN 1090.

Literatur

- [1] . Sander M.: Sicherheit und Betriebsfestigkeit von Maschinen und Anlagen, Konzepte und Methoden zur Lebensdauervorhersage, Springer Verlag, Berlin 2008
- [2] Gudehus H.; Zenner H.: Leitfaden für eine Betriebsfestigkeitsrechnung, Stahleisen Verlag, Düsseldorf, 2000.

- [3] Kühn B., Lukic M., Nussbaumer A., Günther H-P., Helmerich R., Herion S., Kolstein M.H., Walbridge S., Androic B., Dijkstra O., Bucak Ö: Assesment of Existing Steel Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life, JRC43401, JRC-ECCS, First Edition, 02.2008.
- [4] FKM – Richtlinie: Bruchmechanischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile, VDMA Verlag GmbH, 2006.
- [5] EN 1993-1-9: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 9: Ermüdung. Europäisches Komitee für Normung (CEN), Brüssel, Mai 2005.
- [6] Qian J., Fatemi A., Mixed Mode fatigue crack growth: A literature survey, Engineering Fracture Mechanics, Vol.55, No.6, S.969-990,1996.

Autoren dieses Beitrages

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.Gerhard Lener

Dipl.-Ing. Daniel Reiterer

Dipl.-Ing. Andreas Hauser

alle Universität Innsbruck, Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften

Arbeitsbereich Stahlbau und Mischbautechnologie

Technikerstrasse 13