

# UNTERSUCHUNGEN BETREFFEND DAS ELASTISCHE VERHALTEN VON STRAßENBAHNSCHIENEN: NUMERISCHE STUDIEN BASIEREND AUF EINER ERWEITERTEN STABTHEORIE UND NANOINDENTATIONSTESTS



## Einleitung

In vielen urbanen Gebieten sind Straßenbahnen zu einem wesentlichen Bestandteil des öffentlichen Verkehrs geworden und dadurch hohen Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Sicherheit unterworfen. Die infolge der Urbanisierung stetig steigenden Fahrgastzahlen gehen einher mit entsprechend kürzeren Intervallen und Straßenbahnen mit höheren Kapazitäten, was wiederum größere Achslasten bedingt. Diese Entwicklung wirkt sich nachteilig auf die Anzahl an Schienenbrüchen im Wiener Straßenbahnnetz aus, welche in den letzten Jahrzehnten einen Anstieg verzeichnet hat. Die Untersuchung des mechanischen Verhaltens von eingedeckten Straßenbahnschienen ist Gegenstand dieser Forschungsarbeit mit dem langfristigen Ziel Schienenbruch begünstigende Bedingungen abschätzen zu können.

## Modellierung der Schiene mit einem erweiterten Stabmodell

Nachdem die Querschnittsabmessungen von Schienen im Vergleich zu ihren Längen klein sind, insbesondere bei Betrachtung durchgehend verschweißter Schienen, hat sich die Stabtheorie als *das* Werkzeug zur Berechnung der Durchbiegungen und Spannungen von Schienen unter mechanischer Beanspruchung etabliert. Während die Stabtheorie vielfach auf Standard-Eisenbahnschienen angewendet worden ist, wurde die Modellierung von in Straßenbahnnetzen oftmals eingesetzten Rillenschienen bisher vernachlässigt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden schrittweise immer realistischere Bedingungen für die eingebettete Straßenbahnschiene in das zugrunde liegende Stabmodell implementiert. Zunächst wurde die Rillenschiene auf Querschnittsebene unter Heranziehung eines reduzierten elastostatischen Modells basierend auf den von Bernoulli und Saint-Venant eingeführten Stabkinematiken analysiert. Die zwei resultierenden Randwertprobleme wurden mit der zweidimensionalen Finiten Elemente (FE) Methode unter Anwendung des isoparametrischen Konzepts mit bilinearen Ansatzfunktionen gelöst. Die daraus erhaltenen Verwölbungsfunktionen für Biegung und Saint-Venant-Torsion ermöglichten die Ermittlung der zugehörigen Schubspannungen für einen praktisch relevanten Lastfall im Wiener Straßenbahnnetz und letztendlich der Von Mises-Spannungen. Die Maximalwerte letzterer,

welche in der Kehle unterhalb des Rillenschienenkopfes auftreten, stimmen gut mit einem tatsächlich aufgetretenen Versagensbild überein.

Anschließend wurde das Stabmodell, welches sich dadurch auszeichnet, dass es Axial-, Schub-, Biege- und Torsionsverformungen abbilden kann, in Längsrichtung formuliert. Zur Herleitung der im Stab herrschenden Gleichgewichts- und Randbedingungen, wurde das von Germain 1973 eingeführte Prinzip der virtuellen Leistung (PVL) erstmals auf Torsionsstäbe angewendet. Da sich Rillenschienen gegenüber Torsionsbeanspruchungen überaus nachgiebig verhalten, wurde der Fokus im Speziellen auf den Einfluss von Wölbkrafttorsion, welche bei behinderter Verwölbung auftritt, gelegt. Die in Folge entstehenden Normalspannungen bedingen zur Erfüllung der Gleichgewichtsbedingung zusätzliche Schubspannungen, wodurch sich ein weiteres Randwertproblem ergibt. Unter Heranziehung der aus den nunmehr drei Randwertproblemen erhaltenen Verwölbungen und daraus resultierenden Querschnittswerten, konnten die den Stab in Längsrichtung definierenden Gleichungen mit der eindimensionalen Finite Elemente (FE) Methode unter Anwendung kubischer und linearer Ansatzfunktionen gelöst werden. Modelliert wurde unter Anderem ein 1 m langer Stab mit Rillenschienenprofil, beansprucht durch eine exzentrisch zum Schubmittelpunkt wirkende Radlast, welche mittels vereinfachter Hertz-Theorie für Rad/Schiene-Kontakt auf eine rechteckförmige Fläche verteilt wurde. Die resultierenden Verschiebungs- und Spannungsverteilungen wurden mit jenen zufolge 3D-FE-Simulationen verglichen und validiert, wobei diese insbesondere in Querschnitten abseits von Lastangriff und Auflager gut übereinstimmen.

Die wohl bedeutendste Erweiterung des Stabmodells in Anbetracht der Einbausituation von Rillenschienen stellt die elastische Bettung, welche als zusätzliche Traktionskraft ins PVL eingeht, dar. Hierfür wurde ein neuer Ansatz gewählt, welcher im Gegensatz zur Winkler'schen Bettung nicht nur eine vertikale Verschiebung, sondern überdies eine Verdrehung des Stabes um den Schubmittelpunkt berücksichtigt. Daraus folgten neue Gleichgewichts- und Randbedingungen (mit zusätzlichen die elastische Bettung-repräsentierenden Termen), welche - zusammen mit den Randwertproblemen - mittels sequenzieller 1D- und 2D-FE-Analysen numerisch gelöst wurden. Dem Ausfall der elastischen Bettung beim Abheben der Schiene wird mittels eines iterativen Verfahrens Rechnung getragen. Die Untersuchung verschiedener Lastfälle mit variierenden Bettungsverhältnissen zeigte, dass bei einer konstanten elastischen Bettung ein geringerer Bettungsmodul, und bei einer elastischen Bettung mit einer Diskontinuität eine vor dieser wirkende Radlast, größere Vertikalverschiebungen und Von Mises-Spannungen zur Folge hat und vice versa.

### **Bestätigung der homogenen Verteilung der Elastizitätsmoduls**

Der Elastizitätsmodul stellt eine der wichtigsten Eingangsgrößen für das Stabmodell dar. Um dessen Verteilung über den Querschnitt zu untersuchen, wurden einerseits aus vier Straßenbahnschienenstücken (derselben Güte und desselben Profils, aber unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Vorgeschichte), welche aufgrund von irreparablen Brüchen in Schweißstößen aus dem Wiener Straßenbahnnetz ausgebaut werden mussten, je zwei Querschnitte, einer aus der Wärmeeinflusszone und einer abseits davon, und andererseits aus einer neuen Schiene ein Querschnitt extrahiert, und jeweils 6 Probekörper herausgeschnitten. Nachdem die Probekörper zum Erhalt einer glatten, ebenen Oberfläche geschliffen und poliert worden waren, wurden die Nanoindentationstests unter Verwendung einer Berkovich-Diamantspitze durchgeführt. Jeder Probekörper wurde hierbei mit 20 x 20 Eindrücken mit Eindringtiefen von 200 bis 250 nm versehen, wobei eine trapezförmige Belastungsgeschichte mit einer maximalen Eindringkraft von 6 mN angewendet wurde. Unter Heranziehung der von Oliver und Pharr 1992 eingeführten Methode wurden die Elastizitätsmoduln ermittelt und diese mit dem Konzept der statistischen Nanoindentationsanalyse für verschiedene Gruppen (alle Daten, Daten von Querschnitten aus der Wärmeeinflusszone, Daten von Querschnitten aus der wärmeunbeeinflussten Zone, Daten jeder Schiene etc.) ausgewertet. Es hat sich herausgestellt, dass trotz lokaler Unterschiede in den erhaltenen Steifigkeitswerten, welche auf die inhärenten Stahlphasen zurückzuführen sind, keine signifikanten Unterschiede bei den Mittelwerten der untersuchten Gruppen bestehen und die Annahme eines konstanten Elastizitätsmoduls von 210 GPa für das Stabmodell gültig ist.

### **Konklusion**

Das erweiterte Stabmodell repräsentiert eine präzise und effiziente Alternative zu den vereinfachten analytischen Gleichungen, die üblicherweise in der Ingenieurwissenschaft angewendet werden, und zu rechenintensiven 3D-FE-Analysen. Ein weiterer Vorteil besteht in der einfachen Adaptierbarkeit an mögliche zukünftige Erweiterungen, welche zum Beispiel die Berücksichtigung von Eigenspannungen, die während des Herstellungsprozesses induziert werden, oder von thermischen Spannungen aufgrund von Temperaturänderungen, welche im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls quantifiziert wurden, betreffen könnten.