



## FSV-aktuell STRASSE Februar 2023

Mitteilungen der Österreichischen Forschungsgesellschaft  
Straße • Schiene • Verkehr

### Editorial

Sehr geehrte Leserin,  
sehr geehrter Leser!

Die FSV ist schon seit Jahren dafür bekannt, dass sie die Entwicklung von jungem Personal für die Verkehrsforschung tatkräftig unterstützt.

Die Unterstützung erfolgt in drei Säulen. Uns ist bewusst, dass vor allem am Ende des Studiums in einer technischen Universität oder Fachhochschule Masterarbeiten bzw. Dissertationen erarbeitet werden müssen. Für Themen, die auch in der FSV von Bedeutung sind, können die Arbeiten zu Beginn in der FSV für eine Förderung eingereicht werden.

Hierfür gibt es auf der Homepage der FSV die entsprechenden Formulare und Informationen, wichtig ist uns, dass die Ergebnisse der Arbeiten in unseren Fachausschüssen angewendet werden können. Daher erfolgt bei uns die Prüfung auf die Anwendbarkeit in dem einen oder anderen Ausschuss. Da in den Ausschüssen die Richtlinien und Vorschriften des Straßenwesens oder Eisenbahnwesens erarbeitet werden, können gute studentische Arbeiten Inhalte der Richtlinien beeinflussen.

Die zweite Säule betrifft ebenso Masterarbeiten bzw. Dissertationen. In der FSV-Tagung „FSV-Preis“ werden einmal jährlich die besten eingereichten Arbeiten prämiert, dies soll die jungen Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen motivieren in der Verkehrsforschung zu bleiben. In der Tagung dürfen sich die Prämierten dem Fachpublikum präsentieren.

Zuletzt kann junges Personal vergünstigt in Schulungen und Infonachmittage der FSV teilnehmen, um sich selbst auch nach dem Studium gut weiterbilden zu können. Personen unter 32 Jahren bekommen einen Rabatt von 50 %, wenn sie sich bei den Veranstaltungen anmelden.

Die Forschung von morgen braucht die Förderung der jungen Experten und Expertinnen.

Dipl.-Ing. Martin Car  
Generalsekretär der FSV

### Beiträge vom FSV-PREIS 2022

Im Rahmen der FSV-Tagung „FSV-Preis 2022 – wir gehen neue Wege, die Jugend geht mit“ bekamen sechs Master-/Diplomarbeiten bzw. Dissertationen, die sich mit verkehrsrelevanten Themen beschäftigen, einen Preis verliehen. Die Verleihung der Preise erfolgte im November 2022. Aus den Einreichungen stellen wir heute zwei Arbeiten vor:

#### Agenten-basierte Modellierung von Radverkehr und von Bike Sharing

Verkehr verursacht besonders in den Städten Staus, Luftverschmutzung und Lärm. Dies sind Gründe, warum umweltfreundliche Lösungen gefordert werden. Radfahren ist eine davon. Zusätzlich können Bike-Sharing-Systeme das Radfahren auch in Kombination mit den öffentlichen Verkehrsmitteln weiter stärken.

Dennoch betrachten Verkehrsmodelle das Radfahren selten ganzheitlich und in Detail, das heißt belastbare Modelle im Radverkehr fehlen. Dementsprechend können kaum fundierte Erkenntnisse über die Radverkehrsverteilung im Netz und die Auswirkung von gesetzten Maßnahmen erzielt werden.

Diese Arbeit stellt einen Ansatz vor, wie man den Radverkehr realitätsnah routen und die gefundene Route bewerten kann. Zusätzlich wird Bike-Sharing als separater Modi oder intermodale Nutzung ergänzt. Dabei wird auf agentenbasierte Modellierung, im genaueren auf die open-source Software MATSim gesetzt. Es wurden alle Prozesse, die für eine realitätsnahe Abbildung des Radverkehrs und Bike-Sharing nötig sind erarbeitet und implementiert.

**Routing im Radverkehr:** Zuerst wurden mittels verschiedenster spezifischer Literatur Erkenntnisse gesammelt, die das Radfahren und im Speziellen die Routenwahl eines Radfahrenden beeinflussen.

Diese Informationen wurden in weiterer Folge mittels zweier Umfragen, welche in Graz durchgeführt wurden, evaluiert. Es wurde geklärt in wie weit Literatur z. B. aus Asien, Amerika und Australien auf Österreich übertragbar sind. Die Routenwahl-Einflüsse wurden dann so in das Verkehrsmodell implementiert, dass auch mit verschiedener Verfügbarkeit von Daten ein ziel führendes und sinnvolles Routing erzeugt wird.

Aus den Attributgruppen Steigung, Sicherheit, Komfort, Umgebung, sowie einer weiteren frei zu definierenden Gruppe wird die Fahrradfreundlichkeit eines Streckensegments berechnet. Die Umfragen zeigten, dass für NutzerInnen verschiedene Attribute unterschiedlich wichtig sein können. Aus diesem Grund wurden im Modell NutzerInnen-Gruppen eingeführt. Nachdem für jede Strecke und jeden Nutzer ein Wert für die Radfreundlichkeit erzeugt wurde, wurde diese durch die Fahrgeschwindigkeit dividiert und ein Kantengewicht ermittelt.



Dipl.-Ing. Dr.  
Cornelia Hebenstreit, BSc

Als Kantengewicht einer Kante wird in der Graphentheorie eine der entsprechenden Kante zugeordnete reelle Zahl bezeichnet. Ein Graph besteht aus Knoten, die durch Kanten verbunden sind. In weiterer Folge wurde der Dijkstra-Algorithmus angewandt um die kürzeste Route (Route mit dem geringsten Kantengewicht und somit der höchsten Radfreundlichkeit) zu berechnen. Das Routing liefert plausible Routenverteilungen, diese Erkenntnis basiert auf dem Vergleich mit den Ergebnissen anderer Routingtools und Radverkehrs-Apps als auch Befragungen zu Radrouten aus Wien.

Bild 1 zeigt, dass Autos hauptsächlich auf Straßen mit hoher Kapazität gebündelt werden, bzw. die möglichst direkten Verbindungen nutzen, im Radverkehr werden verstärkt Radwege genutzt, da sie bessere Eigenschaften für das Radfahren aufweisen, während man im Modell zu Fuß rein den kürzesten Weg wählt. Da eine gewählte Route auch einen gewissen Nutzen erzeugt, musste auch die Nutzenfunktion des Modells im Radverkehr überarbeitet werden. Eine gleich schnelle Route auf radunfreundlichen Strecken erzeugt somit einen schlechteren Nutzen als eine gleich schnelle Route auf radfreundlichen Strecken, somit kann das Radfahren nun viel realistischer im Modell abgebildet werden. In der Realität werden z. B. Wege, die hauptsächlich über stark befahrene Hauptstraßen ohne Radinfrastruktur verlaufen, wenig frequentiert. Es gilt „Angebot schafft Nachfrage“.



Bild 1: Darstellung der Auslastung und Routenwahl nach den Verkehrsmitteln Auto, Fahrrad und zu Fuß

Das Radrouting und -scoring bildet somit nicht nur Wegelängen/-dauern, sondern auch deren Qualität ab und nutzt dafür verschiedenste Datengrundlagen.

**Bike Sharing:** Nachdem das Radrouting und die Nutzenbewertung (Scoring) verbessert wurden, wurde auch Bike-Sharing im Modell implementiert. Diese Dissertation fokussiert dabei auf stationsgebundenes Bike-Sharing, wie das Wiener System CityBikeWien. Jede Station und jedes Fahrrad wurden als eigenständiges Objekt abgebildet, somit können Kapazitäten an Stationen berücksichtigt und einzelne Fahrräder nachverfolgt werden. Außerdem wurde eine Neuplanung der Routen- und Verkehrsmittelwahl während der laufenden Simulation ermöglicht, da Personen eventuell kein verfügbares Fahrrad an der gewünschten Startstation oder keine leere Radabstellbox an der Endstation vorfinden und somit während des begonnenen Weges erneute Wegewahlentscheidungen treffen müssen. Um solche Fälle gering zu halten, wurde eine Wahrscheinlichkeit hinterlegt, die definiert ob eine Person einen Bike-Sharing-Weg beginnt. Diese Wahrscheinlichkeit hängt von den verfügbaren Rädern an der Startstation und den leeren Radabstellboxen an der Endstation ab. Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit erfolgt zum Zeitpunkt der eigentlichen Wegewahlentscheidung, sie wird also beim Verlassen einer Aktivität durchgeführt. Im Modell wurden die einzelnen Vorgänge wie der Fußweg zum Fahrrad, Rad ausborgen, Strecke fahren, Rad zurückgeben, Fußweg bis zur nächsten

Aktivität, abgebildet. Zusätzlich wurden auch Strategien hinterlegt, was passiert, falls sich kein Fahrrad an der Station befindet oder nach Start des Weges keine verfügbaren Abstellplätze mehr auffindbar sind. Dabei können Personen an der Startstation im Modell z. B. eine andere Station wählen, auf die Öffis wechseln, zu Fuß gehen oder warten. Das Tool wurde sowohl für konventionelles als auch für E-Bike Sharing entwickelt. Für E-Bikes wurden zusätzlich Batterieparameter als Inputdaten hinterlegt. Dies ermöglicht die Abbildung der Ladevorgänge und des Entladens (Fahrtweiten), von verschiedenen E-Fahrradtypen.

Bild 2 zeigt die Prozesse, Eingangsdaten sowie Methoden. Auch eine Umverteilungsstrategie wurde hinterlegt. Damit eine komplett volle Station (hier können keine Fahrräder zurückgegeben werden) oder eine komplett leere Station (keine Fahrräder zum Ausborgen) während der Simulation nicht statisch bleibt, wurde eine vereinfachte Umverteilungsfunktion entwickelt, die prüft, ob eine solche Station existiert und ggf. eingreift, um die Räder neu zu verteilen.

**Intermodale Wege:** Zusätzlich wurde beim Bike-Sharing die Interaktion mit anderen Verkehrsmitteln als auch intermodale Wege ermöglicht. Der Fokus lag auf Bike-Sharing und dem öffentlichen Verkehr, sodass Bike-Sharing als Zubringer oder Abgang zu den Öffis genutzt werden kann. Es wurden Algorithmen und mathematische Methoden entwickelt, um sinnvolle Öffi- und Bike-Sharing-Stationen für den Verkehrsmittelwechsel auszuwählen. Dafür wurden

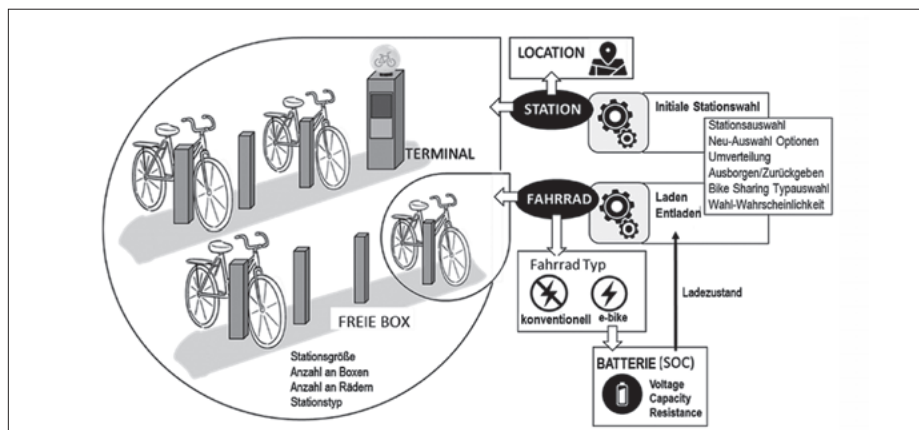


Bild 2: Prozesse, Input und Methoden von Bike-Sharing

z. B. Randbedingungen gesetzt, wie eine maximale Distanz des Teilweges mit dem Fahrrad. Daraus ergaben sich Wegekettens, die z. B. Öffis, Fußwege aber auch Bike-Sharing nutzen. Sensitivitäts- und Plausibilitätstests: Die in dieser Arbeit vorgestellten Weiterentwicklungen wurden anhand von Testbeispielen Sensitivitäts- und Plausibilitätstests unterzogen.

Schlussendlich wurden die Module Radverkehr und Bike-Sharing anhand eines realitätsnahen Beispiels getestet, d. h. Radfahren und Bike-Sharing wurden in einem multimodalen Verkehrsmodell für Wien (zu Fuß, Rad, Auto, Öffis) simuliert. Mit diesem Modell wurden die Auswirkungen des Radroutings und der neuen Nutzenfunktion anhand von Radschnellverbindungen evaluiert. Bike-Sharing konnte für CityBikeWien mit aktuellem Stationsstand getestet werden, wobei in weiterer Folge auch zusätzliche, hypothetische Stationen im Nord-Westen von Wien implementiert wurden um die Auswirkungen zu analysieren. Mittels Maßnahmensensitivitätstests konnten die Funktionsweise von Umverteilungsstrategien und die Wahrscheinlichkeit der Verkehrsmittelwahl überprüft werden. Grundsätzlich liefert das Modul für Fahrradrouting und Bike-Sharing plausible Ergebnisse. Diese Ergebnisse wurden durch mehrere Modellsensitivitätstests erzielt.

**Fazit/Ausblick:** Diese Arbeit macht es möglich, Attribute sowohl für NutzerInnengruppen als auch für die Infrastruktur aufzunehmen, die Auswirkungen sowohl auf Routing als auch den Nutzen im Radverkehr haben. Nicht nur Prioritäten in der Routenwahl (NutzerInnen-Gruppen), sondern auch Wunschgeschwindigkeiten (Einzelpersonen) wurden im Modell hinterlegt und ermöglichen eine personenabhängige Streckenführung und Nutzenbewertung, was den Radverkehr realistischer macht. Diese Parameter sollten detailliert geschätzt werden. Daher sind Erhebungsdaten vor allem zu den Routenwahlvorlieben erforderlich. In dieser Arbeit wurden diese Parameter aus den Grazer Befragungen angenähert.

Das Bike-Sharing-Modul stellt eine sehr detaillierte Version des stationsbasierten Bike-Sharings dar. Die Methoden funktionieren gut und liefern plausible und detaillierte Ergebnisse. Dennoch scheint es, dass weitere Anpassungen in Richtung Benutzerfreundlichkeit gut wären, insbesondere aufgrund der vorherrschenden langen Laufzeit einer Simulation. Dazu könnten einige Methoden für Anwendungsfälle, bei denen nur die ganzheitliche Betrachtung im Vordergrund steht, in der Detailtiefe reduziert werden, da hier in der Analyse ggf. keine Einzelobjekte von Bedarf sind.

Dipl.-Ing. Dr. Cornelia Hebenstreit, BSc  
cornelia.hebenstreit@tulln.gv.at

## Numerische Studien zur Untersuchung des elastischen Verhaltens von Straßenbahnschienen

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.

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 er-

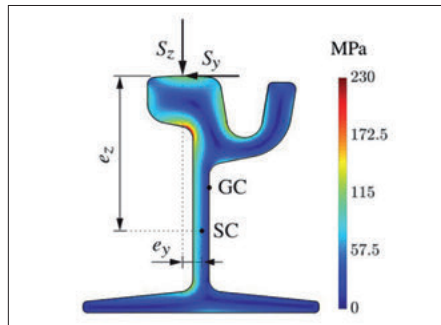


Bild 3: Verteilung der Von-Mises-Spannung in der Rillenschiene des Profils 60R1 für Biegung und Saint-Venant-Torsion zufolge der Radlast  $S_z = 59,7$  kN und der Zentrifugalkraft  $S_y = 16,9$  kN; GC ... Schwerpunkt, SC ... Schubmittelpunkt [1]

haltenen 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, siehe Bild 3.

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 [2] 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 (repräsentierend Biegung, Saint-Venant-Torsion und Wölbkrafttorsion) erhaltenen Verwölbungsfunktionen und daraus resultierenden Querschnittswerten (wie die Koordinaten des Schubmittelpunkts und die Flächenträgheitsmomente), 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-Meter langer Stab mit Rillenschienenquerschnitt, beansprucht durch eine exzentrisch zum Schubmittelpunkt wirkende Radlast, welche mittels vereinfachter Hertztheorie für Rad/Schiene-Kontakt auf eine rechteckförmige Kontaktfläche verteilt wurde. Die resultierenden Verschiebungs- und Spannungsverteilungen wurden mit jenen zufolge 3D-FE-Si-

mulationen verglichen und validiert, wobei diese insbesondere in Querschnitten abseits von Lastangriff und Lagerung gut übereinstimmen, siehe Bild 4.

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 folgen neue Gleichgewichts- und Randbedingungen (mit zusätzlichen die elastische Bettungsrepräsentierenden Termen), welche – zusammen mit den Randwertproblemen – mittels sequenzieller 1D- und 2D-FE-Analysen numerisch gelöst wurden. Dem Ausfall der elastischen Bettung bei einem Abheben der Schiene wird mittels eines iterativen Verfahrens Rechnung getragen. Die Untersuchung verschiedener Lastfälle bei einer Straßenbahnschiene mit variierenden Bettungsverhältnissen zeigte, dass bei einer konstanten elastischen Bettung ein geringerer Bettungsmodul, und bei einer elastischen Bettung mit einer sprunghaften Änderung des Bettungsmoduls, eine vor dieser Diskontinuität angreifende Radlast, größere Vertikalverschiebungen und Von-Mises-Spannungen zur Folge hat und vice versa, siehe Bild 5.

Anschließend wurde die Verteilung des Elastizitätsmoduls über den Rillenschienenquerschnitt untersucht, da dieser eine der wichtigsten Eingangsgrößen für das Stabmodell darstellt. Hierfür wurden einerseits aus vier Straßenbahnschienenstücken (derselben Güte und desselben Profils, aber unterschiedlichen Alters und verschiedener 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 sechs 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  $20 \times 20$  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 [5] eingeführten Methode wurden die Elas-



Dipl.-Ing. Dr. Patricia Kuttke, BSc

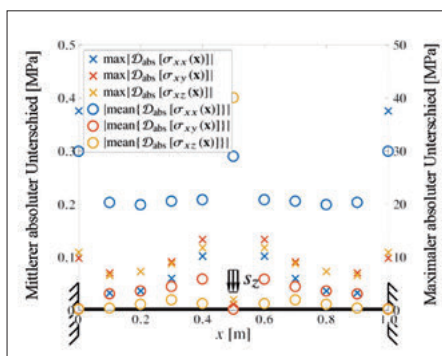


Bild 4: Absoluter mittlerer und maximaler Unterschied  $\text{mean} |D_{\text{abs}}|$  bzw.  $\text{max} |D_{\text{abs}}|$  in den Spannungs-komponenten  $\sigma_{xx}(x)$ ,  $\sigma_{xy}(x)$  und  $\sigma_{xz}(x)$  entlang der  $x$ -Achse, erhalten mittels sequenzieller 1D-/2D- und 3D-FE-Analyse für den beidseitig eingespannten Stab mit Rillenschienenquerschnitt [3]

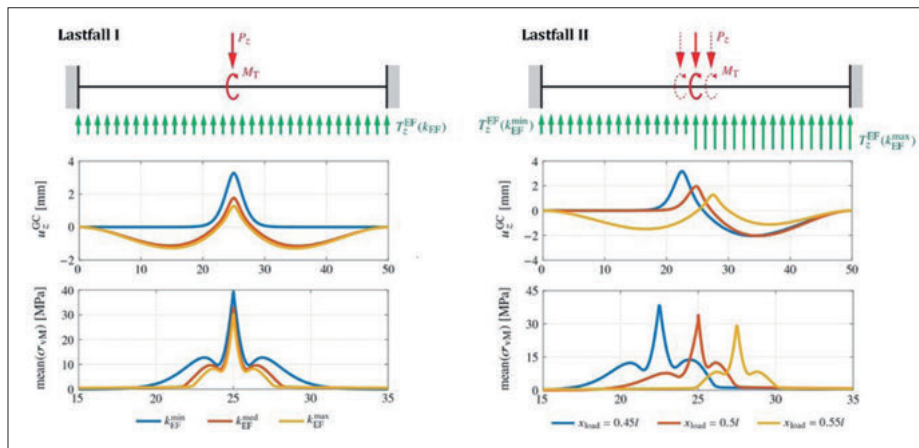


Bild 5: Vertikale Schwerpunktsverschiebungskomponente  $u_z^{GC}$  und mittlere Von Mises-Spannung  $mean(\sigma_{vM})$  für eine beidseitig eingespannte, elastisch gebettete Rillenschiene zufolge Radlast  $P_z$  und Torsionsmoment  $M_T$  (jeweils verteilt auf eine rechteckförmige Kontaktfläche): Lastfall I – konstante Bettung, Lastfall 2 – Bettungssprung;  $k_{EF}$  ... Bettungsmodul,  $x_{load}$  ... Kraftangriffspunkt,  $T_z^{EF}$  ... Traktionskraft repräsentierend die elastische Bettung [4]

tizitätsmodule, siehe Bild 6, ermittelt und diese mit dem Konzept der statistischen Nanoindentationsanalyse für verschiedene Untergruppen (Daten aller Querschnitte, Daten von Querschnitten aus der Wärmeinflusszone, Daten von Querschnitten aus der wärmeunbeeinflussten Zone, Daten von jeder Schiene etc.) ausgewertet. Es hat sich herausgestellt, dass trotz lokaler Unterschiede in den aus den Nanoindentationstests erhaltenen Steifigkeitswerten, welche auf die inhärenten Stahlphasen zurückzuführen sind, keine signifikanten Unterschiede bei den Mittelwerten ( $246 \pm 26,1$  GPa) der untersuchten Untergruppen bestehen. Der Mittelwert der ebenfalls durchgeführten Ultraschalltests beträgt jedoch ( $213,6 \pm 3,9$  GPa), was mit dem üblicherweise in der Literatur zu findenden Wert für den Elastizitätsmodul übereinstimmt. Mit einem mikromechanischen Modell konnte gezeigt werden, dass die Existenz von Rissen und Materialfehlern eine Reduktion der Steifigkeit bei Übergang von der Nanoindentationsskala zur Ultraschall-Skala bedingt. Folglich ist die Annahme eines konstanten Elastizitätsmoduls von 210 GPa für das Stabmodell gültig.

Zusammenfassend stellt das hier präsentierte erweiterte Stabmodell eine präzise und effiziente Alternative zu den vereinfachten analytischen

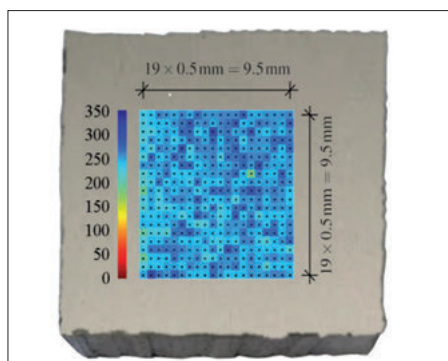


Bild 6: Repräsentative Verteilung des Elastizitätsmoduls über einen Probekörper zufolge Nanoindentationstests [6]

Gleichungen, die üblicherweise in der Ingenieurwissenschaft angewendet werden, und zu rechenintensiven 3D-FE-Analysen dar. 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.

Dipl.-Ing. Dr. Patricia Kuttke, BSc

Literatur

- [1] P. Hasslinger, A. Kurfürst, T. Hammer, E. Fischmeister, Ch. Hellmich, St. Scheiner [2019]: Shear stress concentrations in tramway rails: Results from beam theory-based cross-sectional 2D Finite Element analyses, Engineering Structures 195, 579–590.
- [2] P. Germain [1973]: The method of virtual power in continuum mechanics. Part 2: Micro-structure, SIAM Journal on Applied Mathematics Applied Mathematics 25(3): 556–575.
- [3] P. Kuttke, A. Kurfürst, St. Scheiner, Ch. Hellmich [2021]: Sequential 1D/2D Finite Element analyses of tramway rails under bending and restrained torsion, based on the principle of virtual power, Mechanics of Advanced Materials and Structures 28, 1147–1169.
- [4] P. Kuttke, Ch. Hellmich, St. Scheiner [2020]: A principle of virtual power-based beam model reveals discontinuities in elastic support as potential sources of stress peaks in tramway rails. Acta Mech 231, 4641–4663.
- [5] W. Oliver, G. Pharr [1992]: An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, Journal of Materials Research 7, 1564–1583.
- [6] V. Jagsch, P. Kuttke, O. Lahayne, L. Zelaya-Lainez, Ch. Hellmich, St. Scheiner [2020]: Multiscale and multitechnique investigation of the elasticity of grooved rail steel, Construction and Building Materials 238, 117768.

Kommende Veranstaltungen und Seminare

FSV-Tagung

FSV-Verkehrstag 2023 mit Fachaussstellung  
22.6.2023  
Vienna Marriott Hotel, 1010 Wien

FSV-Infonachmittag

Pflasterstein- und Pflasterplattendecken, Randeinfassungen  
28.2.2023  
FSV, 1040 Wien und Webinar

FSV-Seminar

Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur Version 6 – Basisseminar  
8.–9.3.2023  
FSV, 1040 Wien

FSV-Schulung

Brückeninspektoren – Basislehrgang  
27.–29.3.2023  
FSV, 1040 Wien

Nähere Informationen zu diesen und weiteren Veranstaltungen und eine Online-Anmelde-möglichkeit finden Sie auf unserer Homepage [www.fsv.at](http://www.fsv.at).

In der nächsten Ausgabe ...

... erwartet Sie ein Bericht über mesoskopische Verkehrsmodelle.

FSV-aktuell Straße:

„Österreich-Teil“ und offizielles Organ des Bereichs Straße der Österreichischen Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr (FSV)

FSV-Geschäftsstelle:

A-1040 Wien, Karlsgasse 5  
Tel.: +43 1 58 55 567  
Fax: +43 1 58 55 567-99  
E-Mail: [office@fsv.at](mailto:office@fsv.at)  
<http://www.fsv.at>

Schriftleitung:

DI (FH) DI Ehrenfried Lepuschitz (Kommentare, Anregungen, Beitragsideen usw. erwünscht!)

Weitere Informationen und Bestellmöglichkeit der Publikationen der FSV auf [www.fsv.at](http://www.fsv.at).

Bei Bestellungen im EU-Raum bitte Ihre UID bekannt geben (in Deutschland = DE + 9 Ziffern).

Abonnementpreis

der Zeitschriften Straßenverkehrstechnik sowie Straße und Autobahn für FSV-Mitglieder ermäßigt!