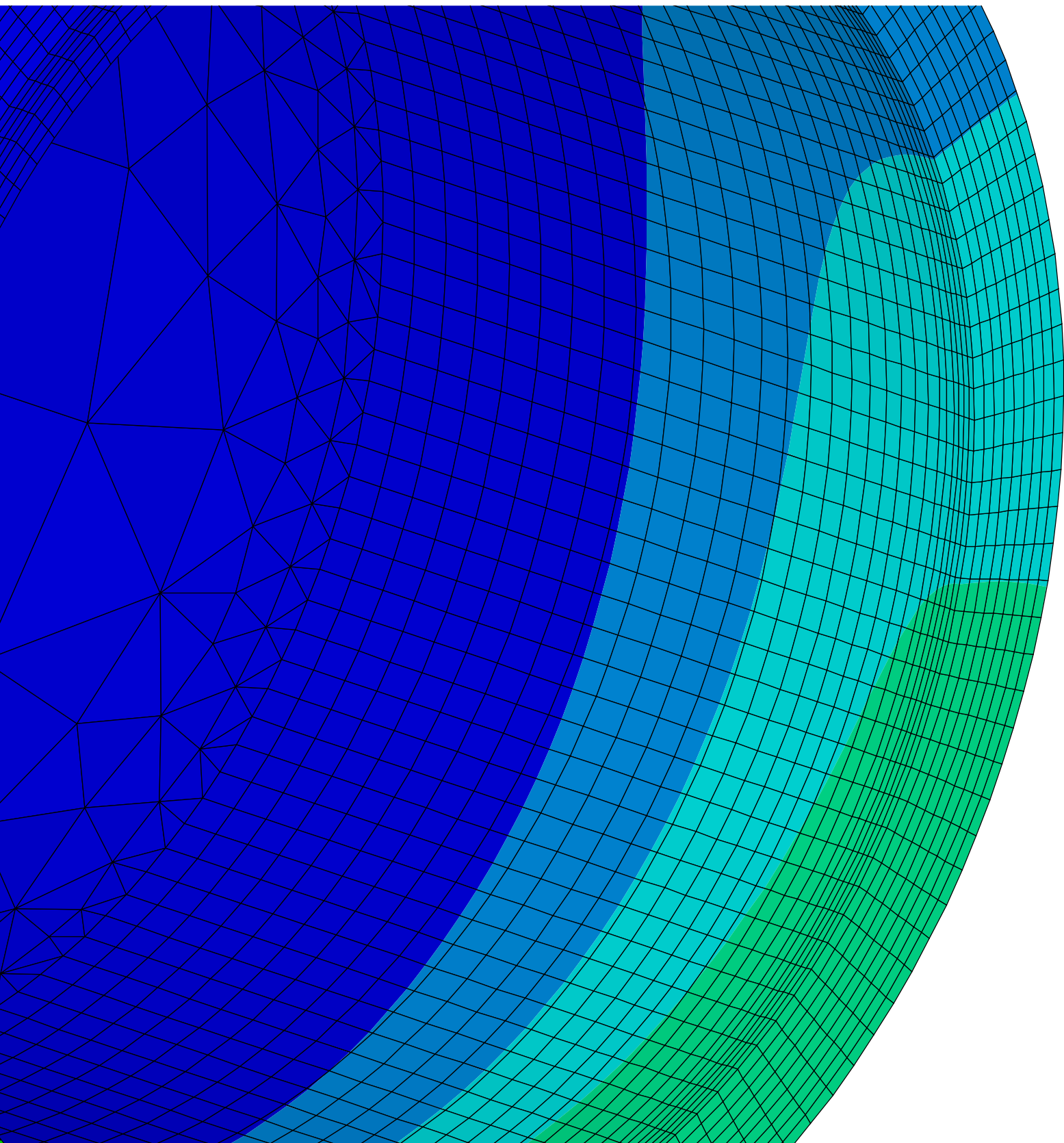




sous l'égide
de la Fondation de
Luxembourg

PRIX D'EXCELLENCE 2014 | 2015





PREFACE_

Lauréats Prix d'Excellence 2014

Chères lectrices, chers lecteurs,
Les thèmes de l'énergie, de la production de l'énergie et d'un approvisionnement fiable en énergie jouent un rôle de plus en plus prépondérant dans notre société. La Fondation Enovos, créée en 2010, tient compte de cette évolution et apporte une contribution importante et active tout en respectant des aspects économiques, écologiques et sociaux. Elle reflète le leitmotiv d'Enovos d'agir de façon responsable envers les générations présentes et futures, et ceci bien au-delà de son métier de base de fournisseur d'énergie.

En tant que lecteurs avertis de ce 12ème Hors-série de la Revue Technique, je n'ai nullement besoin de vous expliquer le facteur déterminant de l'expertise de l'ingénieur pour la croissance de nos entreprises et industries. Prenons l'exemple du secteur de l'énergie. Porté par la transition énergétique, ce secteur va nécessiter davantage d'ingénieurs dans les années à venir. Les maisons intelligentes de demain, la production décentralisée, l'amélioration énergétique des bâtiments ou encore l'éco mobilité ne sont que quelques défis auxquels la branche se voit confrontée. Et ce seront les ingénieurs qui aussi ici seront à la source du développement des solutions recherchées. C'est la raison

pour laquelle j'encourage toute initiative qui donne de la visibilité aux métiers d'ingénieur.

Dans ma double fonction de président de la Fondation Enovos et de l'Association da Vinci, j'ai donc été plus que content de contribuer à la naissance du « Prix d'excellence » de la Fondation Enovos. Cette initiative, qui a pour but de valoriser les études et carrières professionnelles de l'ingénieur, s'inscrit dans la lignée de l'engagement de la Fondation Enovos en faveur du progrès des sciences et des nouvelles technologies permettant d'améliorer la qualité de vie de manière durable.

Ensemble avec l'ANEIL (Association Nationale des Etudiants Ingénieurs Luxembourgeois a.s.b.l.), la Fondation Enovos récompense ainsi chaque année les meilleurs travaux de Master de jeunes ingénieurs avec un prix doté de 2.500 par lauréat. Dans cette brochure vous découvrirez les travaux de 12 lauréats primés en 2014 et 2015. Vous pourrez juger par vous-même de l'excellence et de l'intérêt de ces travaux. Bonne lecture à tous!

Marc Solvi
Président de la Fondation Enovos



Lauréats Prix d'Excellence 2015

La quatrième édition et la cinquième édition du «Prix d'Excellence» émis par la fondation Enovos, sous l'égide de la Fondation de Luxembourg et en collaboration avec l'Association da Vinci ainsi que l'Association Nationale des Etudiants Ingénieurs Luxembourgeois furent à deux grands succès.

Une des raisons principales de ce prix est de mettre en évidence le «métier d'ingénieur» au début du 21ème siècle.

En tant qu'ancienne importante nation industrielle, le Luxembourg a aujourd'hui besoin de promouvoir la formation de l'ingénieur. En effet, la désindustrialisation de ces dernières décennies a rendu l'ingénieur moins visible dans notre société.

De nos jours, on constate que cette désindustrialisation a rendu le marché du travail de notre pays plus vulnérable. L'industrie, créatrice de nombreux et de divers genres d'emplois a besoin d'ingénieurs pour encadrer et assurer la production ainsi que la gestion de l'entreprise.

Les jeunes faisant le choix de leurs études futures connaissent peu les possibilités que le métier d'ingénieur offre et ne prennent souvent pas en

compte cette formation. Le «Prix d'Excellence», qui a pour but de valoriser les études et carrières professionnelles de l'ingénieur, donne la possibilité de présenter les aspects très variés de la formation et des tâches dans le monde du travail de l'ingénieur.

Les travaux de fin d'études présentés lors de ces deux sessions représentent et visualisent une partie de la panoplie des domaines d'activités de l'ingénieur. La diversité est très grande.

Ceci va de la simulation entièrement réalisée sur ordinateur jusqu'au candidat dont une partie du travail de fin d'études se passe au laboratoire d'essais des matériaux, du travail de l'ingénieur classique comme l'ingénieur électronicien et agronome, l'ingénieur en mécanique ou en génie civil jusqu'au travail qui est associé à la médecine en passant par les nouvelles technologies, la biologie et les sciences de l'environnement.

Je voudrais remercier mes collègues Mrs. Thierry Flies, Olivier Georges, Laurent Heinen et Philippe Osch ainsi que M. Marc Schiltz du Fonds National de la Recherche pour leur engagement au sein du jury.

Michel Pundel
Président du jury

INDEX_

02_	PREFACE	Marc Solvi, Président de la Fondation Enovos
03_		Michel Pundel, Président du jury
06_	2014	UNTERSUCHUNGEN ZUM LANGZEITVERHALTEN VON WIB-BRÜCKENBAUWERKEN Gilles Nies
14_		WIDERSTANDSSCHWEISVERFAHREN Sandy Pelletier
18_		INTERFACING AND REAL TIME MONITORING OF AN ELECTRIC VEHICLE Raoul Schmitz
22_		AUFWANDSOPTIMIERTE KONZEPTION EINER ELEKTRIFIZIERTEN DREIRAD-VARIANTE UNTER RÜCKGRIFF AUF DIE ENTWICKLUNG EINES ZWEIRAD-PEDELECS FÜR DEN ZUSTELLBETRIEB Eric Gonderinger
24_		VERMINDERUNG DES LUFTSCHALLS AN EISENBAHNSTRECKEN Raoul Meisch
26_		ERMITTLUNG DER EIGENSPANNUNGEN AUS DEM SCHWEISSEN BEI EINSEITIG GESCHWEISSTEN STUMPFNAHTVERBINDUNGEN VON RUNDHOHLPROFILIEN Roberto Palumbo
28_	2015	AUSARBEITUNG EINES KONZEPTE ZUR BESTIMMUNG DER MESSUNSICHERHEIT EINES LASERTRIANGULATIONSPORTALS MITTELS COMPUTERTOMOGRAPHIE UND KOORDINATENMESSTECHNIK Joe Bartholmé
34_		TRANSPORTVERHALTEN VON NANOPARTIKELN IN WASSERGESÄTTIGTEN PORÖSEN MEDIEN – ENFLUSS VON REFRAKTÄRER ORGANISCHER MATERIE UND VISUALISIERUNG MITTELS MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE (MRT) Laure Cuny
38_		LADUNGSBEWEGUNGS- UND VERBRENNUNGSSIMULATION EINES GASMOTORS IM MAGERBETRIEB Michel Haag
42_		ENTWICKLUNG EINES VERFAHRENS ZUR BESTIMMUNG DER ZUGFESTIGKEIT VON GETRÄNKTER TEXTILER BEWEHRUNG UNTER TEMPERATUREINFLUSS Max Muller
46_		ENTWICKLUNG VON EMPIRISCHEN ALTERUNGSMODELLEN FÜR DEN EINSATZ IN ENERGIEMANAGEMENTSYSTEMEN Jerome Poos
48_		SIMULATION EINER RTM-PROZESSKETTE ZUR BEWERTUNG VON QUALITÄTSSICHERUNGSMASSNAHMEN Céline Reichel

_une initiative de



Prix d'Excellence 2014 mention excellent

UNTERSUCHUNGEN ZUM LANGZEITVERHALTEN VON WiB-BRÜCKENBAUWERKEN

Gilles Nies, M.Sc.

Die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Eisenbahnbrücken nehmen im Schienenverkehr insbesondere hinsichtlich des wirtschaftlichen Aspekts eine zentrale Rolle ein. Als bewährte und zudem beliebte Variante im Eisenbahnbrückenbau zählt die WiB-Bauweise (Walzträger in Beton). Dieser Bautyp hat sich im Laufe des letzten Jahr hunderts in Deutschland insbesondere im Bereich kleiner und mittlerer Spannweiten etabliert. Neben der einfach herstellbaren Konstruktion, zeichnet sich die Bauweise durch ihr hervorragendes Langzeitverhalten aus. Einige der aktuellen Bestandsbrücken sind bereits seit mehr als 100 Jahren in Betrieb.

Als Herausforderung bei der Bemessung der WiB-Brücken gilt die rechnerische Ermittlung des realitätsnahen Bauteilverhaltens (Eigenfrequenzen, Durchbiegungen, Beschleunigungen etc.) infolge dynamischer Beanspruchung durch überfahrende Züge. So weist der Vergleich von gerechneten und gemessenen Kennwerte infolge durchgeführter Messungen an Bestandsbrücken zum Teil hohe Abweichungen auf. Im Fokus dieser Arbeit steht die Betrachtung der reinen Bauteilebene.

Aus diesem Blickwinkel führt in erster Linie die durch die Rissbildung entstehende, starke Nichtlinearität des Betons, zu schwer kalkulierbaren Änderungen in der Systemsteifigkeit. So belegen weitergehende Untersuchungen zu der Verbundbauweise, dass sich der tatsächliche Trägerzustand meist zwischen dem Grenzzustand des Querschnitts mit in der Zugzone gerissenem (Zustand II) und ungerissenem Betonkörper (Zustand I) befindet. Zur Abschätzung des realen Tragverhaltens des Überbaus wurden in dieser Arbeit vorliegende Versuche an herunterskalierten WiB-Trägern einer realen Eisenbahnbrücke unter statischer und zyklischer Belastung verwendet. Dabei standen messtechnisch ermittelte Verformungs- und Dehnungsverläufe der Prüfkörper sowie die durch Ausschwingversuche bestimmten modalen Eigenschaften zur Verfügung. Abgebildet werden die experimentellen Ergebnisse anhand der Nachsimulation durch die Finite-Elemente-Software Abaqus.

Die resultierenden, numerischen Untersuchungen tragen zum besseren Verständnis des Bauteilverhaltens bei. Hierbei stehen in erster Linie die lastabhängige Betonschädigung und die Veränderung der modalen Eigenschaften bei zunehmender Lasterhöhung und zyklischer Zwischenschritte im Interessenfokus.

Abschließend werden mithilfe des kalibrierten FE-Modells Gesetzmäßigkeiten für den Zusammenhang zwischen Last und Verformung sowie für die Veränderung der modalen Eigenschaften abgeleitet. Mithilfe der gewonnenen Erkenntnisse wird zudem ein geeignetes Bemessungskonzept zur Abschätzung der tatsächlich auftretenden, lastbezogenen Rissentwicklung in Trägerlängsrichtung erstellt und an unterschiedlichen Laststellungen erprobt.

Als Ansatzpunkt dieses Konzepts wird, nach der Gegenüberstellung verschiedener Bemessungsverfahren, die Handrechnung nach aktueller Normung in Kombination mit einer aus den Ergebnissen der numerischen Untersuchung hergeleiteten Rissformel verwendet. Das Ziel des Bemessungskonzepts ist die exakte Erfassung der Schädigung und der resultierenden Steifigkeitsänderung eines realen WiB-Balkens.

Stahlverbundbau

Der Stahlverbundbau entwickelt sich in den letzten Jahrzehnten nicht nur in Deutschland aufgrund seiner positiven Eigenschaften zu einer der beliebtesten und meistverwendeten Bauarten für weit spannende Bauteile im Hoch-, Ingenieur- und Brückenbau. Die effiziente Kombination der Baustoffe Stahl und Stahlbeton ermöglicht die Herstellung einer wirtschaftlichen und hoch belastbaren, aber zugleich einfach herstellbaren Konstruktion. Die Grundvoraussetzung des Zusammenwirkens beider Baustoffe ist durch den fast identischen Wärmeausdehnungskoeffizienten gegeben.

Die Verknüpfung wird durch den Verbund, sprich der Kraftübertragung zwischen dem Stahl und dem Beton, gewährleistet. Dieser soll den Schlupf (Relativverschiebung) zwischen den Einzelelementen in dem Maße begrenzen, dass der Querschnitt als statisch zusammenwirkend betrachtet werden kann. In diesem Zustand liegen die Tragfähigkeit und die Steifigkeit des gemeinsam wirkenden Querschnitts deutlich über jener der einzelnen Komponenten.

WiB-Eisenbahnbrücken

Rund ein Viertel aller deutschen Bahnbrücken sind WiB-Bauwerke. Der Überbau besteht bei diesem Brückentyp aus Walzträgern, die teilweise einbetoniert sind. Demnach kann die Konstruktion der Stahlverbundbauweise zugeordnet werden. Der

Ursprung der WiB-Bauweise geht auf das späte 19. Jahrhundert zurück. Mehr als 100 Jahre später wird unter anderem bei Neubauten weiterhin auf die bewährte WiB-Bauweise gesetzt.

Die Gründe hierfür liegen vor allem in der einfachen und schnellen Montage (ähnlich eines Baukasten-systems), der wirtschaftlichen und robusten Konstruktionsform sowie einem geringen Unterhaltungsaufwand [TRA11]. Zudem können aufgrund der hohen Steifigkeiten bei niedriger Bauhöhe, die Verformungen gering gehalten werden [ILL09], was für die Zugüberfahrt eine wesentliche Eigenschaft ist.

Das Betonverhalten beeinflusst die Tragfähigkeit und Steifigkeit eines WiB-Trägers maßgebend. Dabei sind insbesondere die Rissbildung und der Rissfortschritt von zentraler Bedeutung, da der Querschnitt hierdurch geschwächt wird und sich vor allem auf das Gesamttragverhalten des Verbundbauteils auswirkt.



_Abb.1: Eisenbahnüberfahrt in Niderviller (Frankreich) [TRA11] [W2]

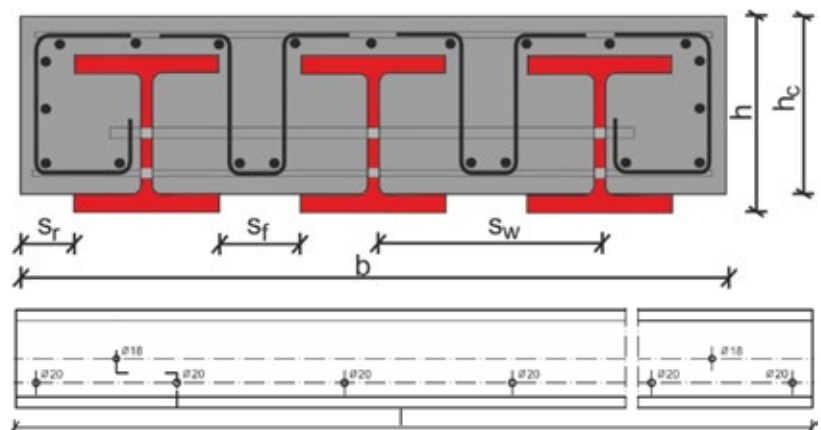
Experimentelle Untersuchungen

Durch angebrachte Monitoringsysteme an bestehenden Brücken werden die Bauwerksreaktionen auf dynamische Einwirkungen, Ermüdungserscheinung und Schädigungsentwicklung untersucht. In dieser Arbeit wurden keine in-situ Beobachtungen vorgenommen,

sondern praktische Versuche an zwei herunterskalierten, „nackten“ (also ohne Ausbauelemente versehenen) WiB-Trägern durchgeführt, um das Verhalten dieser auf der reinen Bauteilebene zu untersuchen. Dabei wurden unter anderem die Zusammenhänge zwischen einzelnen, gemessenen Größen (Dehnungen, Beschleunigungen) und der sich mit steigender Schädigung der Betonzugzone einstellenden Nulllinie aufgedeckt. Mit dieser Erkenntnis kann unter anderem bei zunehmendem Aufreißen des Betonquerschnitts auf die Verformungen und Steifigkeiten des Trägers geschlossen werden.

Prüf-körper	Länge l [m]	Breite b [cm]	Höhe h [cm]	Abstand Steg s_w [cm]	Beton-höhe h_c [cm]	Abstand Flansch s_f [cm]	Abstand freier Rand s_r [cm]
PK1, PK2	12,0	130,4	36,0	41,8	32,75	15,0	10,0

_Tab.1: Eigenschaften des untersuchten Versuchsbalkens



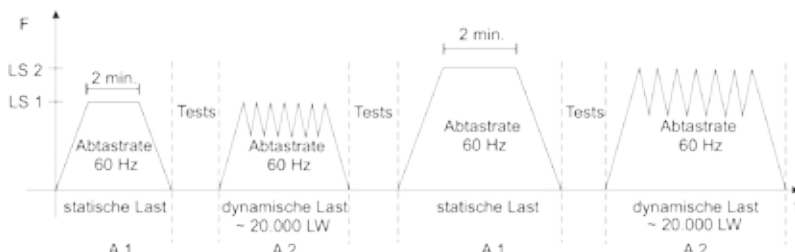
_Abb.2: oben: Querschnitt der Bewehrungsführung des untersuchten WiB-Trägers; unten: zugehöriger Längsschnitt des dafür mit Bohrlochern versehenen Stahlprofils

Das Ziel der Versuchsreihe ist die Untersuchung der Balken infolge statischer und dynamischer Belastung sowie die Beobachtung der Verformung unter zunehmender Beanspruchung. Dabei werden insgesamt vier Laststufen unterschieden, welche im statischen Zustand jeweils konstant und im dynamischen Zustand – unter zyklischer Belastung – als Maximalamplitude der sinusoidalen Schwingung auf den Träger wirken. Durch diese sukzessiv höher werdende Belastung erfährt das Element mit der Zeit ständig größere Schädigungen, welche durch ein engmaschiges Monitoring ziemlich genau verfolgt werden können. Als Schäden werden

überwiegend die Risse im Beton oder die Reduzierung der Verbundwirkung bezeichnet. Nach dem Abklingen der jeweiligen Last erfolgen Tests zur Bestimmung der modalen Eigenschaften (hier: Eigenfrequenz und Dämpfungswert) und des statischen und dynamischen Verhaltens. Bei der statischen Belastung wurde die Kraft pro Laststufe linear auf den Balken aufgebracht, etwa 2 Minuten lang konstant gehalten und schließlich wieder linear abgebaut. Der genaue Ablauf wird anschaulich in der untenstehenden Tabelle und nachfolgendem Diagramm verdeutlicht. Die zyklische Belastung erfolgte hochfrequent und beinhaltete ca. 20.000 Lastwechsel.

Laststufe	Kraft [kN] statisch	Kraft [kN] dynamisch	Tests	Statisch:	Rampe	100 kN mit 60 Hz
LS1	124	99 ± 25		Dynamisch:	Hammer	600 Hz
LS2	397	322 ± 75			Sandsack	600 Hz
LS3	744	595 ± 149			Schwingen	300 Hz
LS4	1.240	992 ± 248			Fallen	600 Hz
Bis Bruch	1.418	/				

_Tab.2: links: Darstellung des Versuchsablaufs; rechts: Auflistung der durchgeführten Tests nach jedem Lastschritt mit Darstellung der jeweiligen Abtastfrequenz

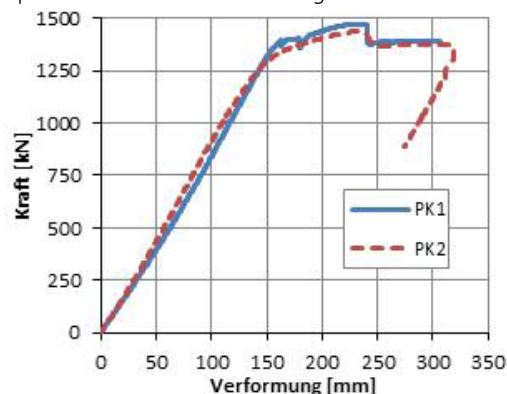


_Abb.3: Zeitliche Darstellung des Versuchsablaufs stellvertretend für die Laststufen 1 und 2

Nach der vierten Laststufe wurden beide Probekörper bis zum endgültigen Versagen belastet. Aufgrund des vorgegebenen, lastbezogenen Versuchsablaufs wurden die Träger in den Versuchen bis zum Erreichen der Bruchlast ausschließlich kraftgesteuert beansprucht. Anschließend wurden die Versuchskörper zur besseren Abbildung des abfallenden Asts weggesteuert belastet. Die kleineren gemessenen Werte für die maximale Bruchlast können durch die Schädigung des Trägers infolge Vorbelastungen erklärt werden.

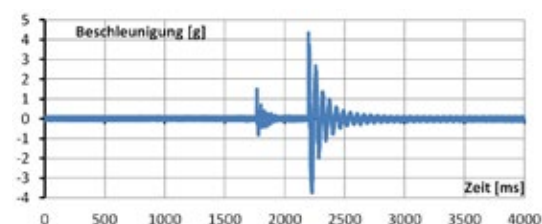
Gemessen werden neben den Dehnungen im Stahl auch die Verformungen der Träger. Die Abbildung des Kraft-Weg-Diagramms für die letzte Laststufe der

Verbundträger ist beispielhaft in Bild 4 dargestellt. Sie gibt neben der maximalen Traglast auch Aufschluss über den Verlauf der Verformungen. Die Werte werden für beide Probekörper abgelesen und dann zu repräsentativen Versuchswerten gemittelt.



_Abb.4: Ergebnisse der kraftgesteuerten Verformungsmessung der beiden Prüfkörper an der Unterkante des mittleren Stahlträgers in Trägermitte für die finale Laststufe

Neben den Kraft-Weg-Diagrammen zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der WiB-Träger, können die modalen Parameter durch das Aufstellen einer Beschleunigungs-Zeit-Darstellung nach Impulsanregung ermittelt werden. Hierbei werden die Signale nach der kurzen Energiezufuhr 600 Mal in der Sekunde in einem Zeitfenster von knapp 12 Sekunden abgetastet. Insgesamt holt dieses Verfahren im Mittel über 7.000 Werte pro Sensor ein, was im Idealfall zu einem harmonischen, sinusoidalen Verlauf führt.



_Abb.5: Beschleunigungs-Zeit-Verlauf als Antwort auf eine kurze Anregung durch Hammerschlag

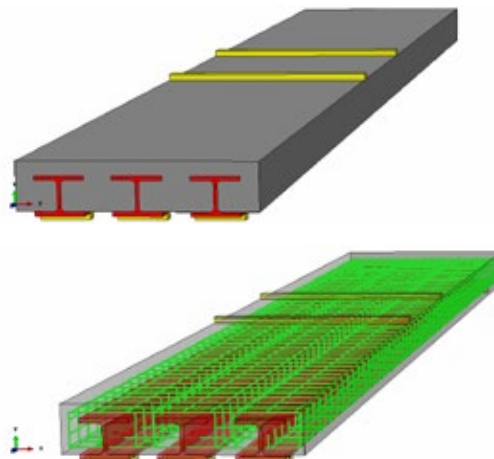
Des Weiteren wurden Rissbilder kontinuierlich fotografisch erfasst, auf denen der Träger vor allem in Feldmitte an der unteren Betonseite mit ansteigender

Last immer größere Risse aufweist. Bereits in der ersten Laststufe zeigten sich an dieser Stelle erste kleine Haarrisse. Diese wurden mit zunehmender Belastung größer und breiteten sich in Längsrichtung über die Trägerunterseite auf Höhe der Lasteinleittunkte aus. Unter der Bruchlast kam es zudem an der Oberkante des Trägers in Feldmitte zu einer Abplatzung der Betondeckschicht durch das Versagen der Druckzone infolge Festigkeitsüberschreitung.



_Abb.6: Rissbilder der Versuchsträger nach Erreichen der Bruchlast

Numerische Untersuchungen



_Abb.7: oben: Darstellung des modellierten WIB-Trägers mit der farblichen Hinterlegung der einzelnen Komponenten; unten: Abbildung der Bewehrungsführung

Die Methode der finiten Elemente ist ein bewährtes numerisches Verfahren, welches durch das Lösen von Differentialgleichungen das Verhalten eines beliebigen, realen Gegenstandes bezüglich seiner Verformungen und Kraftaufnahme widerspiegeln kann. Sie wurde in dieser Arbeit verwendet, um das reale Verhalten der Versuchskörper möglichst genau nachzubilden. Wichtig hierbei ist die Übertragung der bekannten Eigenschaften der Versuchsträger (u.a. Beton- und Stahlfestigkeiten) in das Modell. Um allerdings genauere Auswertungen zu erzielen, wird das FE-Modell im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse kalibriert. Aus diesem Grund wird die Einflussrelevanz ausgewählter Parameter auf das Systemtragverhalten analysiert und die gewonnenen Erkenntnisse in das FE-Modell übertragen.

Mit dem nunmehr kalibrierten Modell können die Versuchsergebnisse annähernd genau nachsimuliert werden. Das Resultat ist in Bild 8 dargestellt, wo die Last/Verformungs- und Last/Dehnungs-Kurven des Versuchsträgers und der FE-Simulation für das letzte Lastniveau (bis zur Bruchlast, mit Vorschädigung durch vorherige Lastzyklen LS1 – LS4) aufgetragen sind. Gemessen wurden die Werte in Trägermitte an der Unterkante des mittleren Stahlprofils. Insgesamt wurden zwei Simulationsmodelle mit den gleichen

Randbedingungen zum Vergleich herangezogen. Allgemein ist die Übereinstimmung der beiden Kurven mit den Versuchsergebnissen sehr zutreffend.

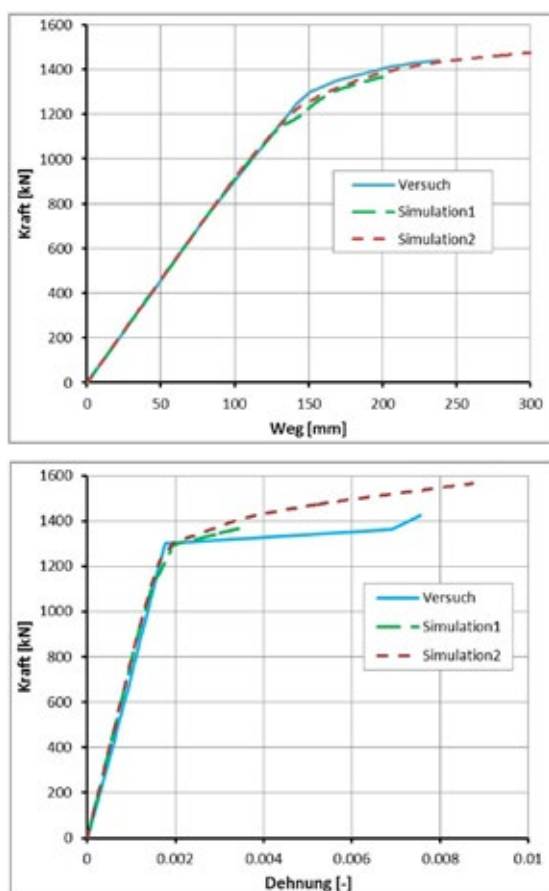


Abb.8: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Versuch und der Simulation durch eine Last-verformungs- (oben) und eine Last-dehnungs-Beziehung (unten)

Die Berücksichtigung der zyklischen Beanspruchung wird in den nachfolgenden Grafiken gezeigt. Es ist zu erkennen, dass die Steigung des letzten Kurvenverlaufs mit der Zwischenschaltung der zyklischen Belastung identisch zu der Variante ohne dynamische Lastschritte ist. Die Kräfteumlagerung vom Beton in den Stahl findet allerdings infolge erhöhter Betonvorschädigung eher statt, was sich im früheren Abzweigen des Asts erkennbar macht. Dadurch

erreicht der höher beanspruchte Träger ebenfalls früher die Streckgrenze, kann durch die Bildung plastischer Fließgelenke jedoch bis zum gleichen Lastniveau Kräfte abtragen.

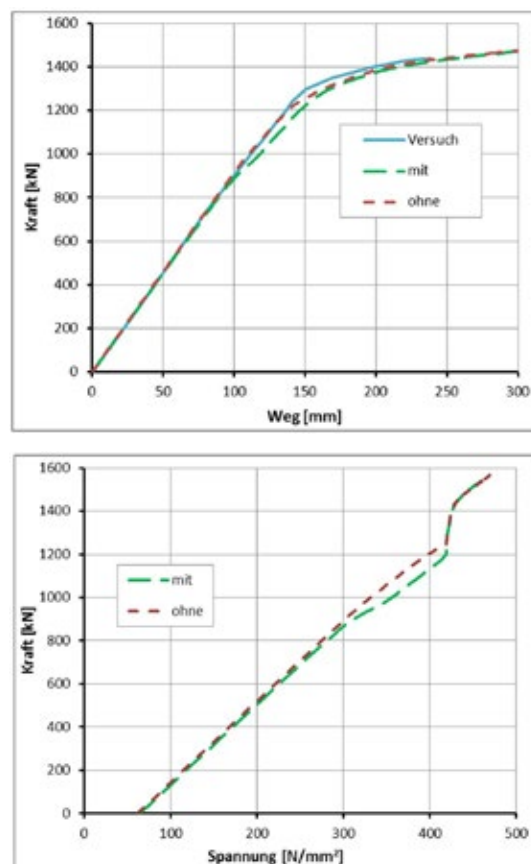


Abb.9: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem Versuch und der Simulation mit und ohne dynamische Zwischenschritte als Last-verformungs-Diagramm (oben) und Vergleich mit der kraftbezogenen Stahlspannung (unten)

Neben der korrekten Wiedergabe der mechanischen Kenngrößen, erlaubt das Finite-Elemente-Programm ebenfalls eine zuverlässige Abbildung der Rissbilder. Dazu kann es die Betonschädigung anhand eines farblichen Schemas darstellen, wobei jede Farbe einer bestimmten Rissweite entspricht. Der rote Bereich kommt einem vollständig geöffneten Riss gleich,

welcher keine Zugspannungen mehr übertragen kann. Der blaue Anteil steht für den ungerissenen Beton. In Bild 10 ist diese Sachlage durch die Abbildung der Risse am Viertelmodell (Mitte) im Vergleich zum geprüften Versuchsträger (rechts) bei Bruchlast gezeigt. Es ist erkennbar, dass die Betondruckzone in Trägermitte durch die starken Verformungen infolge zahlreicher Be- und Entlastungen, eingeschnürt und letztlich durch zu hohe Druckspannungen zerstört wird. Dieses sekundäre Biegedruckversagen führt im Versuch schlussendlich zum Abplatzen von Teilen der Betondruckzone.

zum Versuchsträger werden perfekt durch das FE-Modell abgedeckt. Der Vorteil des Modells liegt darin, dass es nach einmaliger Kalibrierung unterschiedlich abspielbare Lastszenarien ermöglicht. Damit kann die Antwort des WiB-Balkens für verschiedene Laststellungen annähernd genau abgeschätzt werden, ohne dabei neue Versuche zu fahren. Diesem Umstand wurde sich zum Schluss dieser Arbeit bedient, um eine Bemessungsformel zur Abschätzung der Risse herzuleiten.

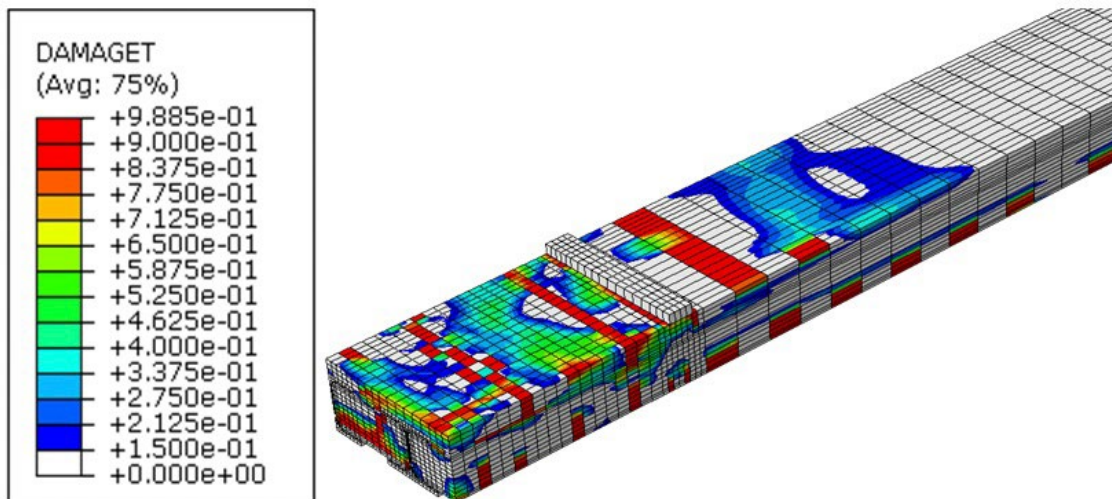


Abb.10: Vergleich des Rissbilds aus dem Versuch (unten) und der Simulation (oben rechts) bei Bruchlast und Farbskala zur Erläuterung des Rissverlaufs (oben links)

Die vorigen Untersuchungen zeigen, dass die Simulation sehr zutreffend mit den Versuchsergebnissen übereinstimmt. Auch die Resultate der Handrechnungen

Entwicklung eines Bemessungsmodells

Die Erstellung des Bemessungskonzepts erfolgt aus den gewonnen Erkenntnissen der Simulationsauswertung. Der Hintergrund des in dieser Arbeit hergeleiteten Bemessungsmodells ist die richtige Zustandserfassung des betrachteten Verbundquerschnitts für eine bestimmte Lasteinwirkung. Durch die Einführung einer Formel, welche den einwirkungsabhängigen Rissverlauf abdeckt, kann der Risszustand für jede Laststufe individuell berechnet werden. Dadurch ist eine jederzeit exakte Bestimmung der Trägersteifigkeit möglich.

Die herauszuarbeitende Bemessungsformel soll nicht nur den Risszustand in Trägermitte, sondern den über die gesamte Länge verteilten Rissverlauf berücksichtigen. Anhand dessen erlaubt die Formel, im Gegensatz zu den

üblichen Bemessungsverfahren, eine realitätsnähere Vorhersage der nichtlinearen Bauteilreaktion durch die kraftbezogene Erfassung der Systemsteifigkeit. Die restlichen Berechnungsschritte sind identisch zu denen der konventionellen Bemessung und hängen von der Bauteilgeometrie ab.

Da der Rissfortschritt die Steifigkeit des Betonkörpers erheblich beeinflusst, ändert sich dadurch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit das Verformungsverhalten des gesamten Verbundträgers. Zugleich reduziert die zunehmende Schädigung im Beton die maximale Traglast des WiB-Trägers im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Eine zuverlässige Erfassung der Rissentwicklung ist demzufolge für die Aussagekräftigkeit der kraftbezogenen Zustandserfassung in der Bemessung von hohem Nutzen. Diese praktische Lösung soll es dem Benutzer ermöglichen, die Rissentstehung durch einen geringstmöglichen Rechenaufwand zu erfassen.

Mit nachfolgender Grafik wird beispielsweise angedeutet, wie ein skaliertes Rissbild infolge numerischer Untersuchungen durch ein Polynom zweiten Grades in Abhängigkeit der Trägergeometrie annähernd genau abgedeckt werden kann. Diese Formel wird anschließend mit in die Berechnung eines Stahlverbundträgers nach Eurocode 4 einfließen und somit eine belastungsabhängige Erfassung des Träger-Ist-Zustands ermöglichen.

Auf die genaue Herleitung der Rissabdeckungsformel und deren Implementierung in ein Bemessungskonzept zur einwirkungsbezogenen Steifigkeitsänderung wird in dieser Zusammenfassung nicht eingegangen.

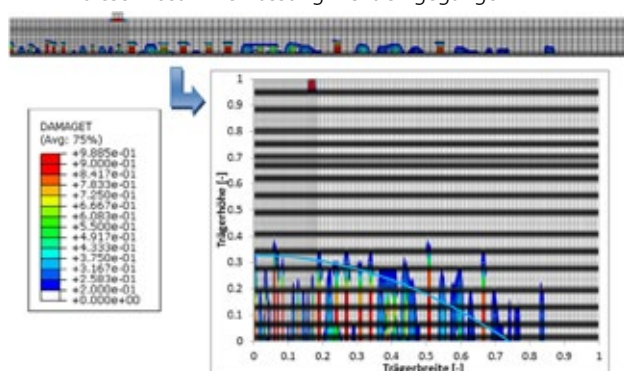


Abb.11: Darstellung des gerissenen WiB-Modells unter 80% der maximalen Tragfähigkeit unter Gleichlast (oben) und Umformung in ein skaliertes Rissbild (rechts) mit Schädigungsskala, welches abgedeckt werden kann

Zusammenfassung

Die FE-Simulation eignete sich in dieser Arbeit ausgezeichnet zur Nachbildung des Bauteilverhaltens. Unterschiedlichste Lastkombinationen und -stellungen wurden nahezu detailgetreu wiedergegeben. Neben der statischen Belastung wurden auch zyklische Einwirkungen auf das System aufgebracht. Konvergenzprobleme traten zumeist erst bei erhöhter Betonschädigung oder beim Überschreiten der statischen Bruchlast auf. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass es sich bei den numerischen Simulationen um Näherungslösungen handelt. Allgemein ist aufgrund der Vielzahl an Systemeinstellungen (Bauteilgeometrie, Baustoffe, Randbedingungen) eine parallele Versuchsdurchführung zur Kalibrierung der Simulation zu empfehlen.

Mit dem kalibrierten Simulationsmodell wurden folgende Punkte genauer untersucht:

- __die Beziehung zwischen Last und Verformung sowie Last und Schlupf,
- __die Veränderung der modalen Eigenschaften
- __die lastbezogene Entwicklung der Betonschädigung.

Hinsichtlich des Last-Verformungs-Verhältnisses wurde erwartungsgemäß gezeigt, dass der Träger bis zur Erstrissbildung im Beton ein lineares Verhalten aufweist und erst ab dem Auftreten erster Risse in den nichtlinearen Bereich kommt. Gleichzeitig wurde ein deutlicher Unterschied der Ergebnisse festgestellt, wenn die Betonzugfestigkeit in der Berechnung berücksichtigt wurde oder nicht. Überproportionale Verformungen traten mit dem Plastizieren des Stahls vor dem Systemversagen auf. Anhand der Schlupfmessung an den Trägerenden wurde zudem das Vorliegen eines starren Verbunds nachgewiesen.

Bei den modalen Eigenschaften wurden ausschließlich die Biegeeigenfrequenzen untersucht. Sie werden als Schädigungsindikatoren für die Beurteilung des Betonzustands verwendet, wobei abnehmende Werte auf eine Steifigkeitsminderung infolge erhöhter Rissbildung hindeuten. Während für die erste Biegeeigenfrequenz ein qualitativer Zusammenhang mit dem Schädigungsgrad festgestellt wurde, traf diese Beobachtung für höhere Moden nicht mehr zu. Ferner wurden teilweise deutliche Diskrepanzen in der Bestimmung der modalen Eigenschaften durch die Mess-, Rechen- und Simulations- Verfahren festgestellt.



Zudem weichen die messtechnisch ausgewerteten Werte von den analytisch und numerisch ermittelten Werten mit höheren Moden deutlich ab.

Die auftretende Rissbildung im Beton vergrößert sich naturgemäß mit zunehmender Einwirkung, wodurch die Systemsteifigkeit reduziert und das Tragverhalten weicher wird. Aus dieser Gesetzmäßigkeit wurde mithilfe des kalibrierten Simulationsmodells eine Rissformel für verschiedene Laststellungen entwickelt, die ein maximales Moment in Feldmitte erzeugen. Die Rissfunktion kann bildlich als Umhüllende des lastbezogenen Rissbereiches dargestellt werden.

Die gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Erstellung eines Bemessungsmodells für die Einstufung des einwirkungsbezogenen Steifigkeitszustands der WiB-Verbundträger benutzt. Mithilfe der entwickelten Rissformel wird die sich einstellende Betonschädigung ermittelt, welche wiederum als Grundlage für die Bemessung fungiert. Der weitere Rechenverlauf basiert auf den Kriterien der Verbundtheorie und ist identisch zum Verfahren nach Eurocode 4 [DIN94].

Mithilfe der in dieser Arbeit hergeleiteten Rissformel kann für WiB-Querschnitte mit ähnlichen Abmessungen und für Laststellungen, die ein maximales Moment in Feldmitte erzeugen, der Trägerzustand durch regelmäßiges Monitoring annähernd genau abgeschätzt werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sollten demnach – unter der Berücksichtigung weiterer Randbedingungen - auf vergleichbare, realitätsnahe Fälle übertragbar sein und somit durch eine entsprechende Überwachung den jeweils aktuellen Zustand einer Bestandsbrücke widerspiegeln.

Prima Aussichten!

**Du interessierst Dich für Technik?
Du willst wissen, wie die Dinge
wirklich laufen? Dann solltest Du
Ingenieurwissenschaften studieren.**

**Ob Hochhaus oder Handy, ob Windkraft
oder Windkanal:
Hinter jeder Innovation stehen
Ingenieure - und wir bilden sie aus.**

Wir bieten:

- zwei Bachelor-Studiengänge
- vier anschließende Master-Studiengänge
- ein flexibles Studienprogramm
- eine internationale Ausbildung
- individuelle Betreuung
- Industriekontakte
- ein Umfeld mit exzellenten Jobaussichten

Interessiert? Mehr Infos per Mail an
ingenieur@uni.lu

Universität Luxemburg - my University!

www.uni.lu

Tel. +352 46 66 44 - 6617/6222

Analyse und Optimierung der einflussreichsten Prozessparameter beim Widerstandsschweißen von Hartmetallzähnen auf Stahlbandsägen.

Prix d'Excellence 2014 mention très bien

WIDERSTANDSSCHWEISVERFAHREN

Sandy Pelletier

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit dem Widerstandsschweißen von Hartmetallzähnen auf Stahlbandsägen mittels einer Laborschweißanlage. Ziele der Diplomarbeit waren:

- _Einarbeitung in das Themengebiet „Schweißen von Hartmetall und Stahl“
- _Übertragung und Optimierung vorhandener Schweißparameter auf eine vordefinierte Versuchsgeometrie.
- _Variation unterschiedlicher Eingangsgrößen und Herstellung geschweisster Muster.
- _Herausarbeiten der zugrunde liegenden wesentlichen Einflussfaktoren
- _Herausarbeiten von Empfehlungen für weitere Verbesserungen der Prozesse und Bauteile

Bauteile

Stahlsägebänder: 2 verschiedene Materialzusammensetzungen und unterschiedliche Geometrieausführungen.

Hartmetallzähne: Gesinterte WC-Hartmetallzähne, Beschichtung : ca. 2-4 μm Nickelschicht
Dickenvariation: 1.65 - 4.00 mm, Zahnhöhe: 2mm

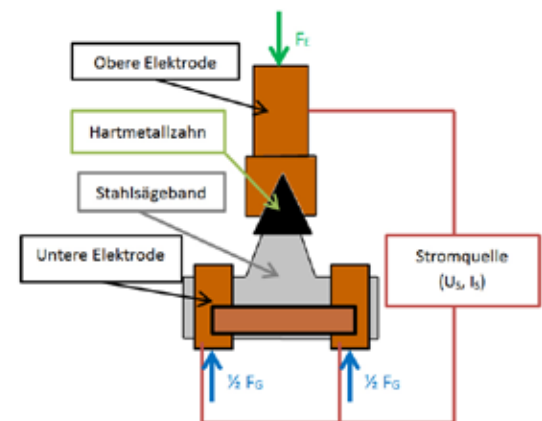


Schweißanlage:

Die Schweißanlage (ABB 1) wurde von dem Anlagenhersteller Miyachi in Kooperation mit CERATIZIT entwickelt und speziell für die Bedürfnisse von CERATIZIT gebaut. Es handelt sich bei der Anlage um ein Laborgerät (Prototypenanlage), welche von CERATIZIT eigens für Laborversuche im Jahr 2012 gekauft wurde.



_Abb. 1: Schweißanlage



_Abb. 1: Schematische Darstellung der beiden Elektroden in Kontaktsituation

In den beiden Bildern ist Links (ABB1) die komplette Schweißanlage zu sehen und Rechts (ABB2) eine schematische Zeichnung der beiden Elektroden, im Moment einer Schweißung, d. h. das Stahlsägeband ist in der unteren Elektrode eingeklemmt, der Hartmetallzahn sitzt auf dem Stahlsägeband und steht in Kontakt mit der oberen Elektrode. Es wird der Frage nachgegangen, welche Material- und Schweißparameter den größten Einfluss auf den Prozess besitzen. Ziel ist es neben der Determinierung der wichtigsten Prozessparameter einen Prozess zu finden, welcher unter zu definierenden Prozessparametern, mit einer vorgegebenen Sägeband- und Zahngeometrie stabil läuft. Die Prozessstabilität soll über die Auswertung der mitgeschriebenen Schweißparameter (ABB 3), die Metallurgie der geschweißten Muster sowie die Abscherwerte ermittelt werden. n.

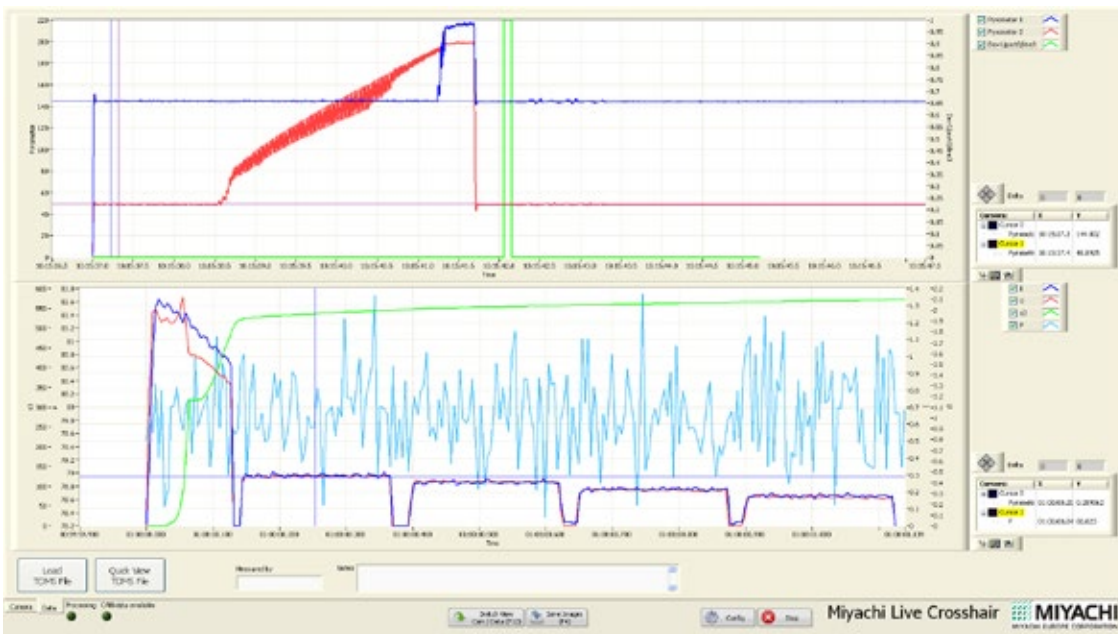


Abb. 1: Diagrammfenster, der Auswertesoftware, nach einem Schweißprozess. X-Achse: Zeit t; y-Achse: Elektrodenkraft FE [N] in Hellblau, Schweißstrom I [kA] in Dunkelblau, Spannung U [kV] in Rot und Einsinkweg s3 [µm] in Grün dargestellt

Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass der Fertigungszustand der Fügepartner vor dem Schweißprozess sich maßgeblich auf das Ergebnis auswirken kann.

Neben dem Sitzwinkel der Sägebänder sind auch die Bauteiloberflächen beider Fügepartner für die Kontaktherstellung und somit den Stromfluss entscheidend. In der Abbildung 4 ist ein Beispiel einer geschweißten Probe dargestellt, die ein gutes Schweißergebnis vorzeigt.

Der Hartmetallzahn sitzt mittig auf dem Stahlsägeband und ist gleichmäßig in das Sägeband eingebettet. Solche Schweißergebnisse sind nur mit geraden Sitzflächen und symmetrischen Sägebandsitzen herstellbar. Bereits kleinste Abweichungen in der Geometrie des Sitzes auf dem Sägeband führen zu schief sitzenden und ungleichmäßig eingebetteten Hartmetallzähnen.

Festgestellt werden konnte, dass das Fertigungsverfahren der Stahlsägebänder einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Schweißung hat.



Abbildung 4: Bild einer geschweißten Probe

In der Abbildung 5 ist ein Vergleich der Mittelwerte der Sitzwinkel γ (y-Achse) für die lasergeschnittenen oder erodierten Sägebänder aufgetragen. Hier konnten teilweise erhebliche Abweichung bei verschiedenen Sägebändertypen (x-Achse) festgestellt werden. Bei den Hartmetallzähnen konnte keine großen Abweichungen von der Fertigungsvorgabe festgestellt werden.

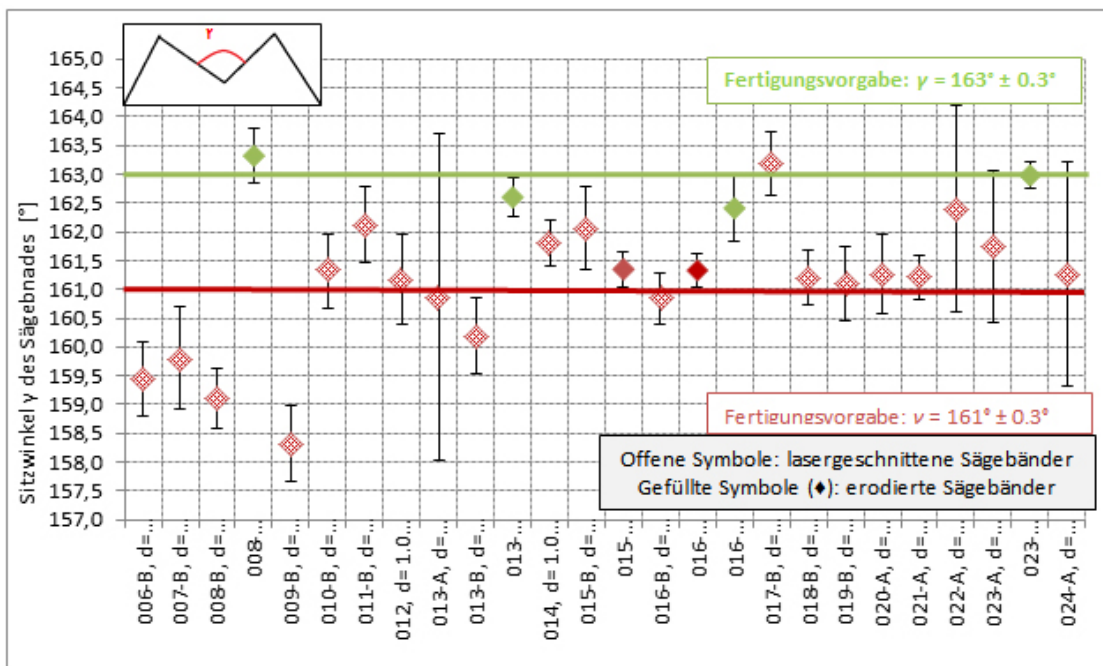


Abb. 5: Vergleich der Mittelwerte der Sitzwinkel γ der lasergeschnittenen und erodierten Sägebänder

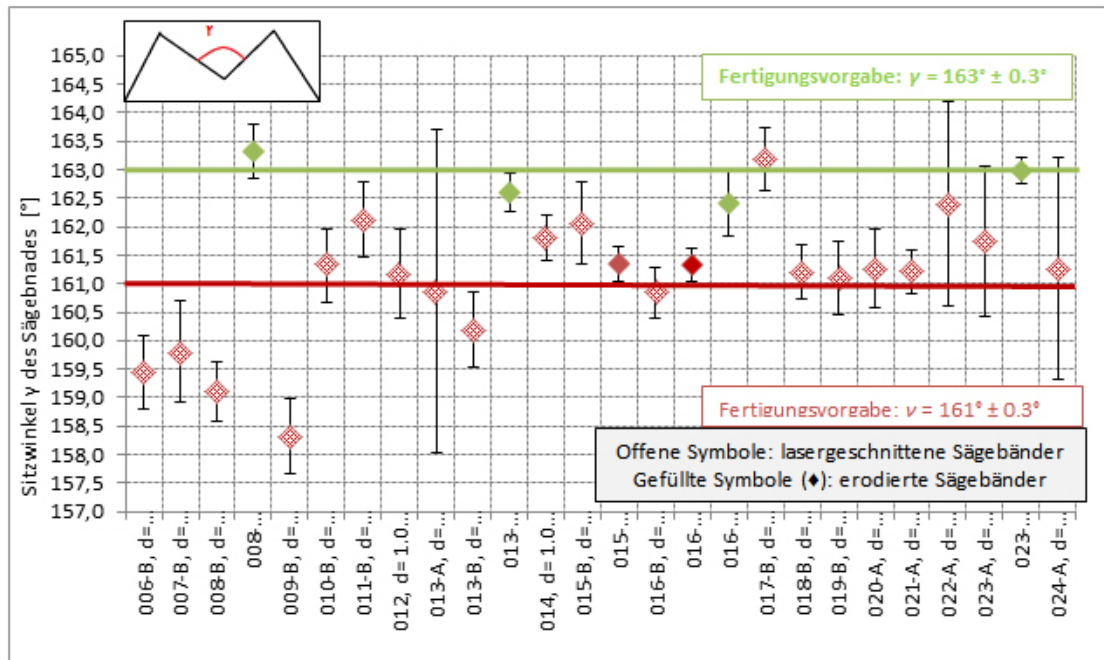


Abb. 6: Scherfestigkeit geprüft am Sägeband 016-B: Sägeband mit unterschiedliche Fertigungsverfahren hergestellt

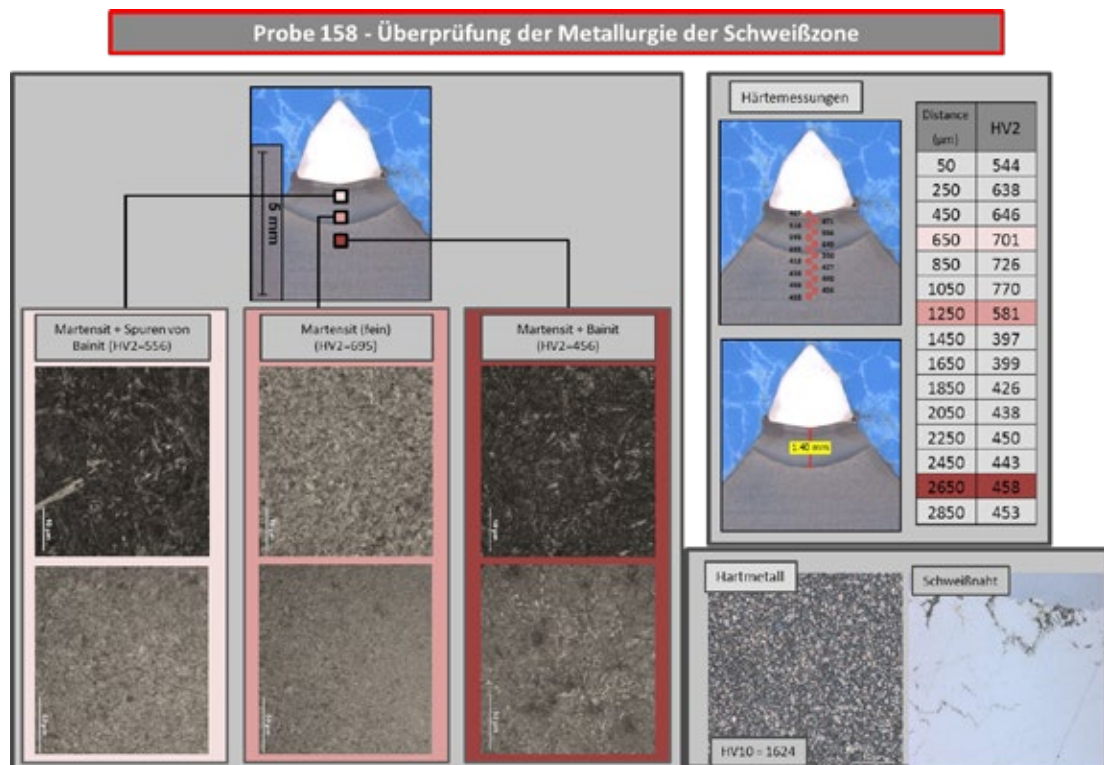


Abb. 7: Beispiel einer metallurgischen Untersuchung einer geschweißten Probe.

In der Abbildung 6 sind die ermittelten Scherfestigkeiten geschweißter Proben für verschiedene gefertigte Stahlsägebänder dargestellt. Hier kann festgestellt werden, dass die Schweißproben mit einem erodierten Stahlsägeband die höchsten Scherfestigkeiten aufzeigen, dies deutet auf die Wichtigkeit der Fertigungsverfahren und die Qualität der Stahlsägebänder.

Seitens der metallurgischen Beurteilung (ABB 7) der Schweißnaht und -verbindung ist das Vorhandensein oder Aufschmelzen der Nickelbeschichtung der Hartmetallzähne, sowie das gebildete rein martensitische oder martensitisch-bainitische Gefüge im Stahl unterhalb der Schweißnaht ein Indiz für Unterschiede im Prozessablauf und die Stabilität des Prozesses. Durch eine rekapitulierende Betrachtung und Darstellung aller gewonnen Erkenntnisse können verschiedene auftretende Effekte auf die Anfangskontaktbedingungen und

somit die Bauteilgeometrie und -oberfläche zurückgeführt werden.

Die Schweißproben wurden zum Teil metallurgisch untersucht, wie in Abbildung 7 dargestellt. Hier wurden die einzelnen Gefüge, wie auch die Härteverläufe im Stahlsägeband untersucht. Hierdurch konnten verschiedene Annahmen über die Härte- und Gefügeverläufe getroffen werden. Die Härteverläufe vom Hartmetall über die Schweißnaht bis in das Stahlsägeband wurden noch weiterführend untersucht.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass neben den bauteilseitigen Einflussgrößen, die Schweißparameter wie Stromstärke I , Spannung U , Einsinkweg s_3 und die Schweißzeit wichtige Einflussparameter auf den Schweißprozess sind.



Paul Wurth InCub - where your ideas can grow

In cooperation with Technoport®, Paul Wurth S.A. has launched an incubation programme for young innovative and technology-driven companies searching for support in the development and implementation of their entrepreneurial projects. These start-ups can not only benefit from physical space and infrastructure on the premises of Paul Wurth in Luxembourg-Hollerich, but also from their proximity to an experienced player with a long-standing tradition of innovation in order to receive technological support or market feedback.

Projects likely to join Paul Wurth InCub will preferentially be related to fields such as

- Environmental technologies in the metals industry
- Energy-related technologies and business models
- Industry 4.0
- Advanced logistics and transportation concepts
- Smart and healthy buildings.

For any information about the selection process, please contact:
incub@paulwurth.com

Paul Wurth S.A.

32, rue d'Alsace
L-1122 Luxembourg
Tel. +352 4970-1
paulwurth@paulwurth.com www.paulwurth.com

Subsidiaries: Brazil, Chile, Czech Republic, Germany, India, Italy, Japan, Korea, Mexico, P.R. China, Russia, South Africa, Taiwan, Ukraine, U.S.A., Vietnam



Prix d'Excellence 2014 mention très bien

INTERFACING AND REAL TIME MONITORING OF AN ELECTRIC VEHICLE_

Raoul Schmitz

In 2003, Toyota released the Prius, which is a hybrid car (electrical and internal combustion engine). It was the first real alternative to pure Internal Combustion Engine. This was the beginning of the expansion of the EV (Electrical Vehicle) market. Even though, success did not really break through yet, more and more money and time is now being invested on EVs. In an EV, there are only a few mechanical parts left, which means that most of them can be controlled by embedded systems. As the market of EVs is growing, new possibilities arise, and researchers and hobbyists started realizing bigger projects. The sales of EVs are stuttering because EVs have still some open challenges. One of the challenges is the small battery capacity that lasts in some cases only for around 150km. This thesis is about creating a communication interface between an EV and a handheld device. To this end, we use a Renault Twizy (Figure 1), an electric quadricycle from Renault. Renault is currently the company with the widest range of EVs in the market.

Target

The aim of this thesis is to create a communication link between a mobile device and an electric vehicle (EV), and develop applications to enhance the driving experience. This approach, allows reducing the cost of build-in equipment and provides the ability to fusion data received from the vehicle with sensors data from the mobile device (e.g. accelerometer, GPS, etc.). In addition, the network capabilities of the mobile device can be used to benefit from a wide range of Internet services. Using an OBD Bluetooth adapter and an Android tablet, we implemented a communication protocol to retrieve important vehicle data. In the next step, we implemented two Android applications to showcase various services.



_1 Setup

Adapters

The hardware we use provides a small subsystem (e.g. operating system) that is running between the car and the device that it is connected to. The communication between the adapter and the mobile device always works with AT commands. AT stands for attention, so the devices knows that it has to watch out for new commands. This means

if there is an AT in front of a command, then it is the adapter that executes the command. Otherwise if there is no AT and for example just a number like 080 the adapter things it is an OBD command and just leads the command straight to the car.

Applications for Supporting Eco Driving

The dashboard of our EV, is very basic. Things as energy going into or out of the engine can be seen as for the recuperation, where there is one arrow, and for the consumption three. However this does not take into account the profile of the terrain for example, such that driving uphill with a consumption gets always rated bad or driving downhill with a recuperation gets always rated good. The 62 at the lower part of the screen is the remaining driving range. For these reasons, we have created two applications, that shall assist the driver to adopt an eco friendly driving behavior.

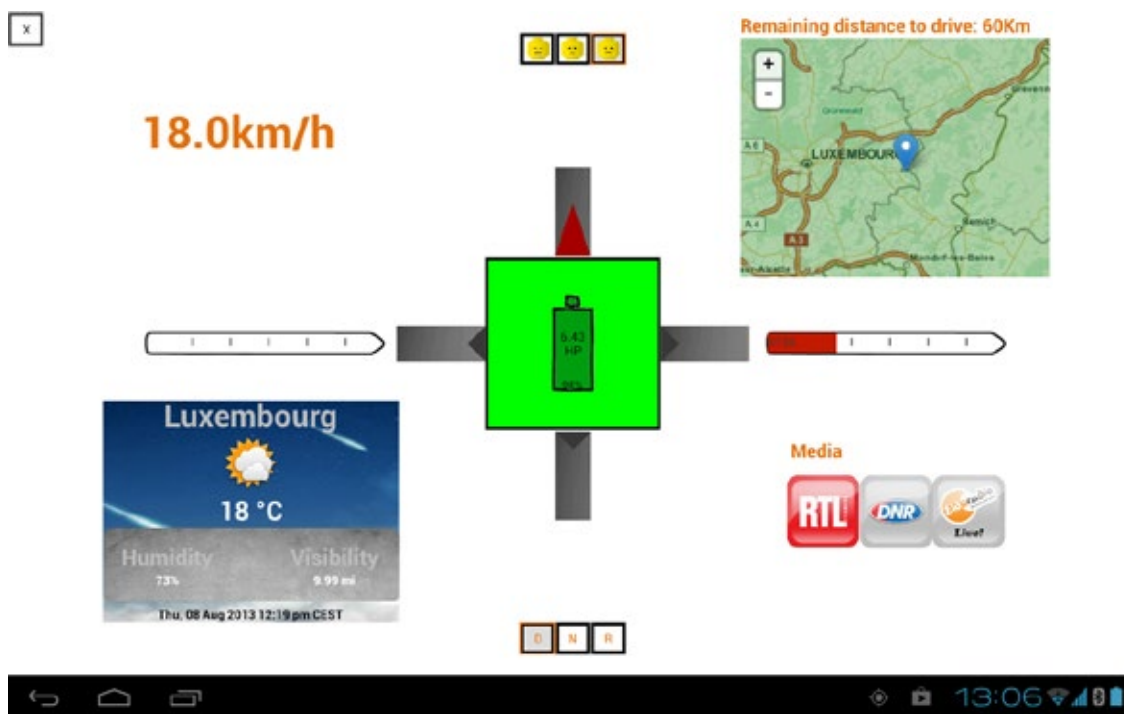
Augmented Dashboard

The first application, is about giving the driver more information, then the dashboard of the EV. This information, should also be more related to driving efficiency. A screenshot of the application's main interface can be seen in Figure 2.

Here a list of the implemented features:

- _Speed
- _A bar for Power Consumption and Recuperation
- _Specific Info on Battery (Temperature, Current, Voltage)
- _Google Maps with a Circle of the possible Driving Range
- _Gear (N/D/R)
- _Charge of the Battery
- _A basic Indicator for energy-efficient Driving
- _A Circle that shows the Acceleration and Direction of it
- _Weather
- _Radio
- _Mileage
- _Point of no Return

We get the exact power consumption and recuperation from the CAN bus. For this reason, we created two bars (see Figure 2). The arrows fill up depending on how much power is used. Moreover, the power that comes in (left arrow), is in green, and what goes out is in red (right arrow). This means, what is on the right arrow, is what we recuperate and contrary what is on the left is what we consume. In the left corner of the bar, if the power is greater than zero, then there is also the



_2 Augmented Dashboard GUI

exact amount of power presented. The accelerometer of our tablet gives feedback on cornering, breaking and acceleration. It assists the conductor, at driving more efficiently. For example fast and slow acceleration, should be presented according with negative or positive signs. Or if he is cornering with a high speed, he might loose a lot of energy, which is also bad. It is better, to let the car role out before he is turning.

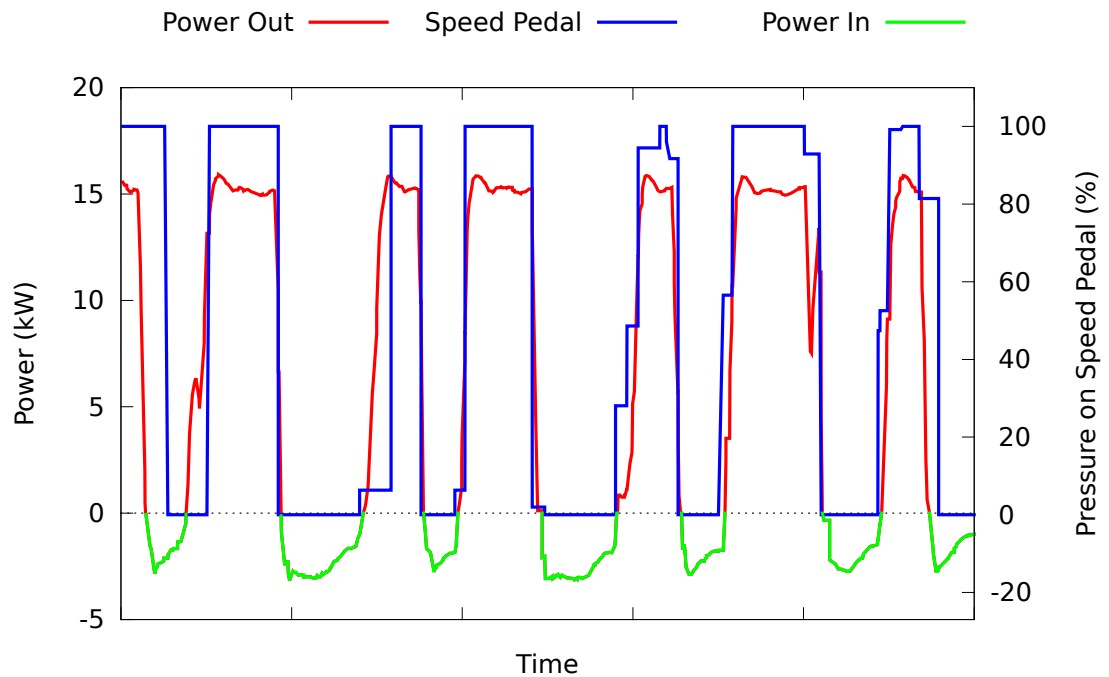
Like this it recuperates before and does not loose the energy in the corner with friction. Having that in mind, we added four arrows around the battery square. They are grey and are docked around the green middle square in Figure 2.

Now, whenever the driver is accelerating, cornering or breaking, the arrows change accordingly. When driving efficient, the arrows are small and green, and when driving inefficient, the arrows become large and red. The size and color depends on how much they trigger the accelerometer.

A screen with further information on the batteries, can be accessed by tipping at the battery logo in the middle of the main activity. This screen is shown for thirty seconds, then returns to the main screen. The reason for this, is that we do not want to distract the driver from looking at the street. The battery consists of seven modules with each 2 cells. From the CAN bus, we can retrieve the electric current of every single cell, and the sum of all of them. Moreover we get the temperature of every module.

Another feature, we embedded a map into the dashboard, in order to help the driver plan his trips. As the EV has a small battery charge, the map gives the driver a hint about his location and shows him, the remaining kilometers, and the corresponding reachability radius. This is presented on the map as a green circle, which has the radius of the remaining range. The range, is also indicated above the map.

We decided to include LuxTraffic [1] into the application, to get real-time traffic information. The developers of LuxTraffic



_3 Differences in deceleration

advertise it as: LuxTraffic is a crowdsourcing platform that relies on user-contributed data to provide traffic services⁴. Lastly, on the upper part, one can see three different smiley faces. Those are for giving the driver a feedback about how eco friendly he is driving.

Ecometer

Regarding the charging, there is behavior that improves or worsens the charging. In decelerating phases it makes a difference in charging whether we break or let the car roll out. For this we have made a test run of two rounds in the parking lot. Alternating between breaking and letting the car roll out before cornering.

The results can be seen in Figure 3. The phases where we let the car roll out, are the green lines that lasted longer, we can see the alternation between the longer and smaller recuperation phases. Letting the car roll out is more efficient, because if we break, we recuperate the same amount of energy as if we do not break, whereas if we let the car roll out, we extend the time where we recuperate. We can see this in Figure 3, the areas that are included by the green lines are bigger in longer recuperation phases. The driving style makes a difference in the range, especially for EVs this can improve a lot. Therefore we have created this second application. The EcoMeter is about giving the driver real values for his driving style. He should further see the current values of the input values we take into account for the eco value. And he should see whether the combination of all of them is currently good or bad. Or whether it was good or bad over the last twenty seconds. And finally at the end of a driver's run, he should get a summary of it. Requirements In order to compute the eco score, we decided to take into account, the current speed, the power and the road profile (e.g. uphill/downhill). Moreover, to give an accurate and instantaneous eco value, we need to get data continuously. As we determine the eco value with help of a Fuzzy System.

Fuzzy Control System

Fuzzy Logic is a nonlinear mapping of an input data vector into a scalar output [2]. It is a simple system for computing an exact output, if one has many input variables and by thus a big amount of possibilities. This is the reason why we use it for our purpose. We can enter the variables and the rules about efficiency and inefficiency, and receive afterwards one real value as output. For the Fuzzy System, we have to split the value range of all input variables into different groups. These groups are called membership functions, and all the membership functions of one variable is called a Fuzzy set.

As example, the speed ranges from 0 to 80km/h, and is classified into 4 membership functions, very slow (VS), slow (S), fast (F) and very fast(VF). VS is ranging from 0 to 30km/h or S is ranging from 25 to 50km/h. From these intersections of the ranges comes the fuzziness of the system. After this, we connect the membership functions with rules. The rules are needed to set the different input variables into a relation. Note that it can happen that more than one rule applies for a certain input, which is again an example for the fuzziness. In this case, the membership functions are added together, and as usual the defuzzification method is used. As an example, imagine a rule stating that one is driving at a high speed downhill, and being at a high recuperation, then our eco score is very good (VG).

Group Validation

Seven candidates have performed the experimental test runs. In a first run, they were asked to drive normally, i.e. as they would drive their own vehicle. Before the second run, they got told how the car works, what is recuperation and how to save most energy. The goal now was to adopt a more eco friendly driving style and compare the results. In Figure 5, we can see the improvement of the eco value from the first run to the second run. The eco values in the second run (green bar) are higher or equal as in the first run. It took one candidate less time in the second run, which is represented with a negative value.

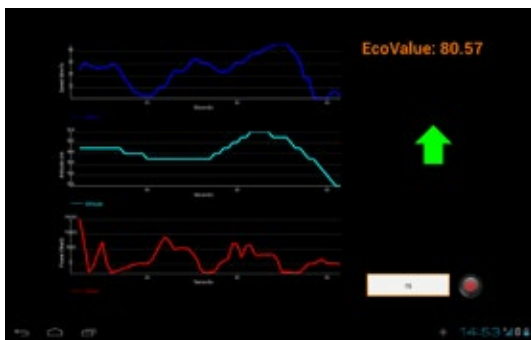
Discussion

As the final eco value, is the average of all the eco values of the run, it is nearly impossible to reach the most upper or lower values. With the results of the preliminary test, we can deduce, weak boundaries for all the parameters. Weak boundaries, because, due to traffic, different weather or other unknowns, other runs can still be better or worse. In the Table 5 we can see, that all candidates but one drove more eco friendly in the second run.

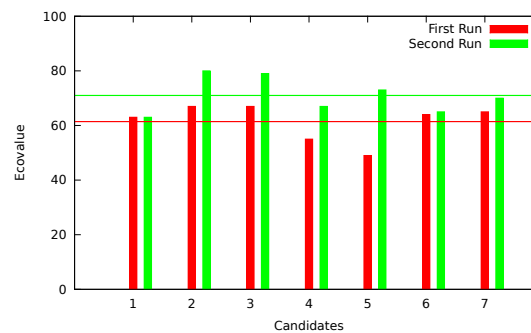
Between the two runs, the average power consumption has improved by 33.34% and the battery consumption has decreased by 24.9% from the inefficient run to the efficient. The eco value improved by 16.75%. The time has increased about three minutes, which represents 18.95 %. The results of the large validation show that the eco value correlates with the consumption.

Perspective

Concerning the Eco-Driving Application, we identified two directions of improvement. Firstly, the eco score is



_4 Ecometer GUI



_5 Power consumption of the candidates

computed regularly so the final eco score is the average of all the computed eco values during one run. The more values we have, the less our overall score changes. This approach has two drawbacks, the first one is that if we drive efficiently for a long time, and then inefficiently for a short time, this will lead to a rather good value. And the second problem is, that this system might over time, concentrate itself around the same values. As from the first problem, in long runs, the score can not easily diverge such that over longer times, there will be standard scores that one is likely to achieve. We could score differently by analyzing the driving more in detail. For example when the driver is driving efficient all the time, and suddenly inefficient, he gets scored worse the longer he continues this driving style. Secondly, in the future, it would be interesting, to do a long term study. We could do many runs for each driving style, and afterwards compute the average battery consumption for each. As a result, we could find the most efficient driving style.

Lastly, for our project, we used a Fuzzy Control System to compute the eco value. We could exchange the Fuzzy System by some machine learning systems like either a Support Vector Machine or a Neuro-Fuzzy System. They differ from the Fuzzy Control System, such that they have no numerical grading system and they have a learning mechanism.

Bibliography

- [1] A. Kovacheva, R. Frank, and T. Engel. Luxtraffic: A collaborative traffic sensing system. In Local Metropolitan Area Networks (LANMAN), 2013 19th IEEE Workshop on, pages 1–6, 2013.
- [2] J.M. Mendel. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. *Proceedings of the IEEE*, 83(3):345–377, 1995.

Prix d'Excellence 2014 mention bien

AUFWANDSOPTIMIERTE KONZEPTION EINER ELEKTRIFIZIERTEN DREIRAD-VARIANTE UNTER RÜCKGRIFF AUF DIE ENTWICKLUNG EINES ZWEIRAD-PEDELECS FÜR DEN ZUSTELLBETRIEB_

Eric Gonderinger, M.Sc., M.Sc. (RWTH Aachen)

In der heutigen Zeit kommt der Elektromobilität ein wichtiger Stellenwert zu. Neben den Entwicklungen im Bereich der zweiseitigen Elektrofahrzeuge haben sich weitere elektrische Fortbewegungsmittel wie beispielsweise das elektrisch unterstützte Fahrrad, oftmals auch als Pedelec bezeichnet, durchgesetzt, die sowohl im privaten als auch im gewerblichen Umfeld zum Einsatz. Ein wichtiges Anwendungsfeld stellt hierbei der Zustellbetrieb dar, in welchem elektrische Fahrräder eine Reduzierung der Umweltbelastung durch Lärm und Abgase sowie eine Steigerung von Reichweite, Ergonomie und Effizienz ermöglichen. Hierbei bestehen vielfältige Einsatzmöglichkeiten in belebten Stadtzentren mit hoher Bevölkerungsdichte, wo der Einsatz alternativer Transportmittel aufgrund der geringen Zahl an Parkmöglichkeiten, der zahlreichen Verkehrsstaus und der sich daraus ergebenden langen Fahrzeiten sowie des zunehmend stärkeren Umweltbewusstseins gefördert wird. Weiterhin bieten Lastenfahrräder, aufgrund ihrer niedrigen Betriebs- und Transportkosten, eine effiziente Möglichkeit den steigenden Fahrtkosten des motorisierten Verkehrs gegenzusteuern.

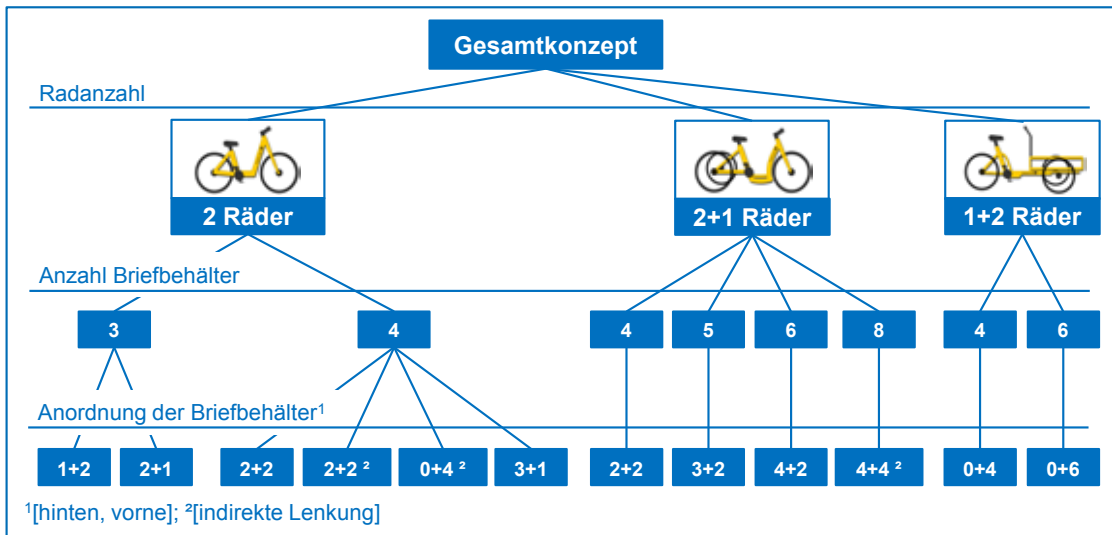
Im Rahmen eines Projektes des Werkzeugmaschinenlabors der RWTH Aachen (WZL) wurde, in Kooperation mit einem bekannten deutschen Logistikunternehmen, ein elektrisch unterstütztes Fahrrad für den Einsatz im Zustellbetrieb entwickelt. Das Hauptaugenmerk lag hierbei auf einer anforderungsgerechten Konzeption, Auslegung und Konstruktion, unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen des Zustellbetriebs: Ergonomie, Kosten, Sicherheit und Effizienz. Vor dem Hintergrund des steigenden Alters der Mitarbeiter des Betriebs wird insbesondere der Ergonomie eine hohe Wichtigkeit beigemessen. Die elektrische Unterstützung bietet hierbei eine Vielzahl an Vorteilen beim Einsatz in topographisch anspruchsvollen Zustellbezirken. Die kraftsparende und bequeme Fortbewegungsart führt zu einer deutlichen Entlastung der Zusteller und somit zu einer Steigerung der Mitarbeiterzufriedenheit.

Vor der Erarbeitung und Ausdetaillierung eines spezifischen Fahrradkonzepts für den Einsatz im Zustellbetrieb, wurden im Rahmen des beschriebenen Zweiradprojektes unterschiedliche Lösungsansätze generiert und anhand verschiedener Merkmale kategorisiert (siehe Abbildung 1). Da die Ausgestaltung und Detaillierung einer solch umfangreichen Menge an Varianten zeitlich wie auch

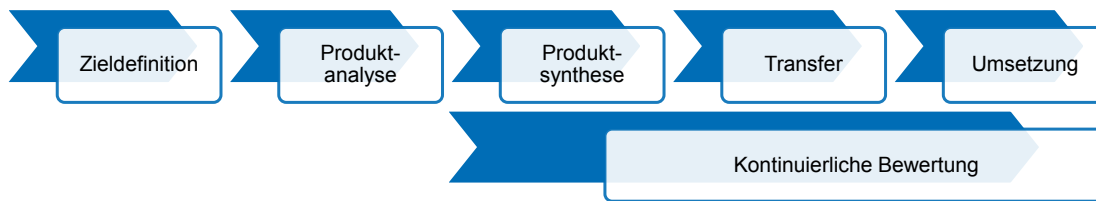
ökonomisch weder möglich noch sinnvoll gewesen wäre, wurde die Anzahl der unterschiedlichen Konzeptvarianten mit Hilfe einer Analyse der jeweiligen Vor- und Nachteile reduziert. Im Rahmen des Projekts wurde schließlich festgehalten, dass sowohl eine Zweirad- als auch eine Dreiradvariante mit zwei Rädern an der Hinterachse weiterverfolgt würden, da diese aufgrund abweichender Einsatzgebiete und Auslieferungsszenarien als ökonomisch sinnvollste Varianten im gewerblichen Umfeld angesehen werden können. Dreiräder, oftmals auch als Trikes bezeichnet, weisen nicht nur erhebliche Vorteile im Bereich der Handhabung und Stabilität auf, sondern ermöglichen auch einen erhöhten Stauraum durch Aufnahme zusätzlicher Briefbehälter auf.

Da eine vollständige Neuentwicklung des Dreiradkonzeptes einen erheblichen Kosten- und Aufwandsfaktor dargestellt hätte, wurde die dreirädrige Variante, durch Anknüpfung an ein vorhergehendes und eine zweirädrige Variante betreffendes Projekt, ausgearbeitet und in Form einer „Modellreihe“ entwickelt. Mittels einer umfassenden Literaturrecherche wurden hierzu bestehende Ansätze des Variantenmanagements und der Modularisierung als Ansatzpunkt zur Vermeidung und Beherrschung der Produkt- und Variantenvielfalt im Unternehmen identifiziert. Durch die Ausweitung der Überlegungen auf den Gestaltungsansatz der Modularisierung wurden zusätzliche Erkenntnisse zur Beherrschung der Produkt- und Teilevarianz gewonnen, die dann in Form unterschiedlicher Strategien der Produktgestaltung aufgearbeitet wurden. Durch den systematischen Vergleich der verschiedenen Ansätze mit Hilfe einer Bewertungsmatrix konnte das Theoriedefizit eines fehlenden Ansatzes zur aufwandsoptimierten Ableitung von Produktvarianten auf Basis von bestehenden Produkten nachgewiesen werden. Unter diesem Ansatzpunkt wurde die Konzeption einer neuartigen Methodik durchgeführt (siehe Abbildung 2), basierend auf den fünf Phasen Zieldefinition, Produktanalyse, Produktsynthese, Transfer und Umsetzung. Im Mittelpunkt der Betrachtungen stand hierbei die Ermittlung von produkt-übergreifenden Gleichteilen sowie Nutzungspotentialen von Know-How und Best Practices aus dem Entwicklungsprozess des zweirädrigen Vorgängerprodukts.

Aufbauend auf diesen theoretischen Erkenntnissen, wurde eine Evaluierung der erarbeiteten Methodik am Beispiel der Konzeption und Entwicklung eines elektrisch unterstützten



_Abb.1: Übersicht Gesamtkonzepte



_Abb.2: Allgemeine Vorgehensweise zur Ableitung von Produktvarianten

Zustellendreirads vorgenommen. Nach einer allgemeinen Zieldefinition, erfolgte eine umfassende Produktanalyse eines bestehenden Zustellzweirads. Neben der Ableitung und Darstellung des modularen Produktaufbaus und der Definition von technischen Systemen wurde der Fokus auf die dazugehörigen Entwicklungsprozesse gelegt.

In der sich anschließenden Produktsynthese wurde eine umfassende Anforderungsermittlung für das Zustelldreirad durchgeführt, die den Ausgangspunkt des Anforderungsabgleichs zwischen dem Zweirad und dem Dreirad ergibt. Anhand dieser Ergebnisse konnten anschließend die übertragbaren Gleichteile ermittelt werden.

Die Ausweitung der Untersuchungen auf prozesseitige Aspekte hat zudem die Identifikation von Nutzungspotentialen ermöglicht in Form von Know-How und Best-Practices, die dann als Basis für die Planung des Dreirad-Entwicklungsprozesses genutzt wurden. Anhand einer quantitativen Bewertung der identifizierten Gemeinsamkeiten, wurden schließlich die notwendigen Entwicklungsbedarfe bestimmt, die den Ausgangspunkt der weiteren Spezifikation darstellen. In der Umsetzungsphase wurden dann technische Konzepte für ausgewählte Teilsysteme des Dreirads ausgearbeitet und anhand ihrer spezifischen Vor- und Nachteile bewertet.

Hierbei wurde der Fokus auf die Bestimmung eines Dreirad-Gesamtkonzeptes gelegt, und zwar auf Basis der Anzahl und Anordnung der Briefbehälter, der Konzeption des hieraus resultierenden Transportsystems sowie der Entwicklung eines hybriden Antriebsstrangs, bestehend aus mechanischem und elektrischem Antriebssystem.

Wie die vorherigen Ausführungen belegen, folgt die hier beschriebene Arbeit einer systematischen Methodik, von der umfassenden Analyse des Vorgängerprojekts über die Identifikation von produkt- und prozesseitigen Gemeinsamkeiten bis hin zur Umsetzung der notwendigen Entwicklungsbedarfe. Infolge der Evaluierung am Beispiel der Entwicklung einer Dreiradvariante auf Basis eines elektrisch unterstützten Zustellpedelecs, wurde die Anwendbarkeit der Methodik, unter Beachtung der übergeordneten Projektziele (Ergonomie, Sicherheit, Kosten, Effizienz), nachgewiesen und bestätigt. Hieraus ergibt sich die Übertragbarkeit der Methodik auf weitere Anwendungsgebiete, wie beispielsweise den

Anlagenbau oder die Automobilindustrie, die auf ähnliche Produktarchitekturen wie die Fahrradindustrie zurückgreifen.

Am Beispiel der Entwicklung des elektrisch unterstützten Lastendreirads wird die Wichtigkeit der Modularisierung im Zusammenhang mit der erarbeiteten Methodik hervorgehoben. Im Kontext der Fahrradentwicklung stellt die Gruppe aus Rahmen und Gabel das zentrale Element, die sogenannte «Plattform», des Fahrrads dar, an der sämtliche Komponenten, d.h. die «Module», über standardisierte Schnittstellen befestigt werden. Die Austauschbarkeit der einzelnen Module durch andere Module mit der gleichen Funktion fördert eine produktübergreifende Verwendung von Gleich-, Norm- und Wiederholteilen, wodurch mit Hilfe einer relativ geringen Anzahl an Komponenten eine große Produktpalette erzeugt werden kann. Die Anwendung der Methodik ist somit in keiner Weise auf den Fall eines einzelnen Folgeprodukts beschränkt, sondern kann prinzipiell, durch punktweise Veränderungen auf den Mehrproduktfall ausgeweitet werden. Synergieeffekte auf Basis der Komponenten und Prozesse können somit bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung zur Planung des Produktprogramms genutzt werden.

Schienenverkehrslärm ist für Anlieger ein Ärgernis, welches jedoch durch technische Lösungen reduziert werden kann. Meistens werden hierzu über 2,0 m hohe Schallschutzwände (SSW) benutzt. Obwohl deren Wirksamkeit nicht grundsätzlich in Frage gestellt wird, sind sie bei Anliegern selten beliebt: Die Wände sind wenig ästhetisch und zerschneiden Landschafts- und Ortsbild. Dieser Artikel zeigt Alternativen zu den herkömmlichen Schallschutzwänden auf.

Prix d'Excellence 2015 mention bien

VERMINDERUNG DES LUFTSCHALLS AN EISENBAHNSTRECKEN

Raoul Meisch

Eisenbahnlärm lässt sich nach seiner Entstehungsart einteilen. Welches von diesen Geräuschen am meisten zum Tragen kommt, hängt von der gefahrenen Geschwindigkeit ab (vgl. Tab. 2).

Geschwindigkeitsbereich	$v < \text{ca. } 60 \text{ km/h}$	$\text{ca. } 60 \text{ km/h} < v < \text{ca. } 300 \text{ km/h}$	$v > \text{ca. } 300 \text{ km/h}$
Dominante Geräuschquelle	Antriebsgeräusche, Aggregatgeräusche	Rollgeräusch	Aerodynamische Geräusche
Geräuschquellen	Motoren, Getriebe, Lüfter, Stromrichter, Transformatoren oder Kompressoren	Schallabstrahlung der Räder und der Schiene.	Strömungsgeräusche (durch Wagenübergänge, Drehgestelle, Stromabnehmer, Dachaufbauten)

Tabelle 2: Dominante Geräuschquellen in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeiten [Krüger, et al., 2006, S. 432]

Auf der freien Strecke überwiegt, mit Ausnahme des Hochgeschwindigkeitsverkehrs (HGV), in der Regel das Rollgeräusch. Da das Hauptaugenmerk auf der luxemburgischen Eisenbahn liegt, wird eine Geschwindigkeit von 100 km/h angenommen und folglich der Fokus auf die Geräusche aus dem Rad-Schiene Kontakt gelegt.

Durch u.a. Verschleiß, Bremsen und Exzentrizitäten an den Radlagern bilden sich im Laufe der Zeit Unebenheiten auf Zugrädern und Schienen. Diese Rauheiten der Kontaktflächen von Schiene und Rad bilden den Hauptgrund der kontinuierlichen Schwingungsanregung von Rad und Schiene. Über Rad und Schiene übertragen sich die Vibrationen in die mit ihnen verbundenen Schwellen, Drehgestelle und den Wagenkasten, um schließlich an die umgebende Luft abgegeben zu werden und ein Schallfeld zu erzeugen. Untersuchungen zeigten jedoch, dass der Beitrag des Wagenkastens und der Drehgestelle gegenüber dem Rad-Schiene-Lärm vernachlässigbar sind (De Beer & Verheij, 2000). Die Federwirkung der Zwischenlagen verhindert weiterhin einen signifikanten Beitrag der Schwellen zum Vorbeifahrgeräusch. Folglich überwiegen Schiene und Rad bei der Schallabstrahlung wie in Abb. 16 dargestellt. [Thompson, Fodiman, & Mahé, 1996; Remington P., 1988]

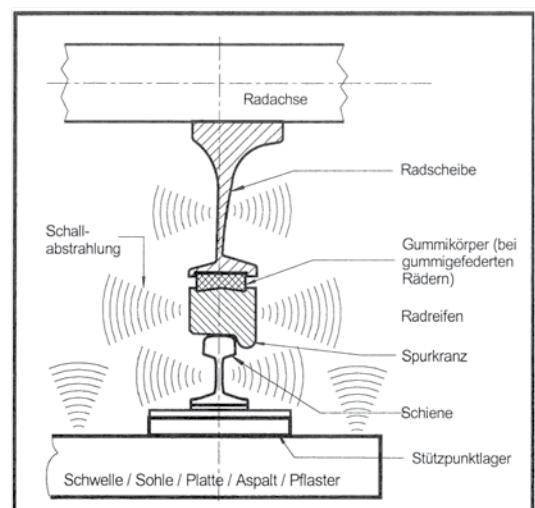


Abb. 16: Schallabstrahlung im Rad-Schiene-Bereich [Krüger, et al., 2006, S. 178]

Da die Hauptschallquelle begrenzt ist auf Schienen und Räder, erscheint effizienter Lärmschutz möglich durch die Verhinderung der Schallausbreitung. Dazu können Wände unterschiedlicher Größe und Anordnungen eingesetzt werden. „Konventionelle“ Schallschutzwände (SSW) bilden die am häufigsten eingesetzte Maßnahme gegen Eisenbahnlärm. Das Prinzip ist einfach: Wände einer Höhe zwischen 1,5 und 4 Metern über Schienenoberkante (zumeist 2,40 m üSOK) werden entlang des Gleises an der Grenze des Freilichtraums als Barriere für den Schall errichtet. So sind Pegelreduktionen von bis zu 15 dB möglich.

Vergleichbare Minderungen der Lärmbelastigung, ohne jedoch die zerschneidende Wirkung von hohen SSW, versprechen niedrige Schallschutzwände (nSSW) und Mini-Schallschutzwände (MSW). Beide funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie die SSW: Der Lärm wird durch ein Bauwerk an der Ausbreitung gehindert. Entscheidender Unterschied ist die Montage in unmittelbarer Nähe des Gleises und daher die, durch das Lichtraumprofil vorgegebene, geringere Höhe. Die in Abbildung 1 dargestellte geometrische Schallabstrahlung von Schiene und Rad über die verschiedenen Lärmschutzwände lässt eine vergleichbare Wirkung der Wände unterschiedlicher Höhe vermuten. Weiterhin wird angenommen, dass die örtlichen Gegebenheiten

erhöhten Einfluss auf die Wirksamkeit der nSSW haben, beispielsweise wenn das emittierende Gleis in Dammlage oberhalb des zu schützenden Immissionsorts liegt.

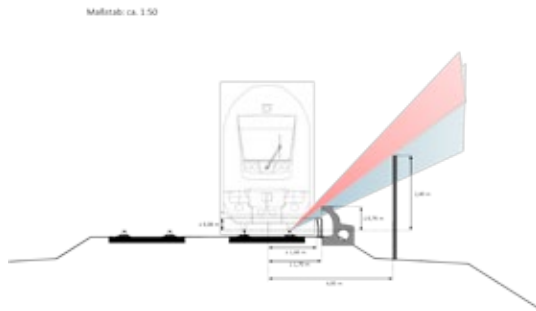


Abb. 1: Vergleich der Schallabstrahlung zwischen v.l.n.z. MSW, nSSW und SSW (Zugprofil: CFL)

Modellbildung

Um die Wirksamkeit der drei Schallschutzwandarten an einer existierenden Strecke miteinander zu vergleichen, wird mit Hilfe des Programms LMS Virtual.Lab ein Simulationsmodell erstellt (vgl. Abb. 2). Grundlagen des Modells sind der Abschnitt Schiffingen-Ost der Eisenbahnlinie Bettemburg-Esch/Alzette, Geometrie und Eigenschaften von existierenden Schallschutzmaßnahmen sowie gemessene Zugvorbeifahrgeräusche. Es wird ein Basismodell der Schallabstrahlung des Rad-Schiene-Paars erstellt und anhand der in situ gemessenen Schallpegel validiert. Auf diesem Basismodell aufbauend werden in vier Varianten die verschiedenen SSW mit einer „boundary elements method“-Berechnung der Schallausbreitung erprobt.



Abb. 2: Modellbildung

Variante 1: Herkömmliche Schallschutzwand

Die verwendete Wand ist senkrecht ohne Neigung und hat eine Höhe von 2,40 Metern üSOK. Entsprechend dem geltenden Lichtraumprofil weist sie einen Mindestabstand von 2,50 Metern zur Gleisachse auf. Zur Verbesserung der Schalldämpfung wird gleisseitig eine Holzbeton-Schall-Absorberschicht vorgesehen.

Variante 2: nSSW „C-Schale“

Die nSSW „C-Schale“ besteht aus einer zum Gleis hin geöffneten Schale mit gleisseitig angebrachten Holzbeton-Absorbern. Die nSSW erreicht eine Höhe von 74 cm üSOK.

Variante 3: nSSW „Brens Barrier“

„Brens Barrier“ ist eine 74 cm hohe, parabolisch zum Zug geneigte nSSW aus Betonfertigteilen. Gleiszugewandt ist zusätzlich eine absorbierende Schicht aus recyceltem Gummi aufgebracht.

Variante 4: Mini-Schallschutzwand

Um dem Lichtraumprofil der Strecke zu genügen erreicht die MSW eine maximale Höhe von 34 cm üSOK. Damit

kann sie weitere 10 cm näher an der Gleisachse errichtet werden als die nSSW. Das obere Viertel der Wand ist in Gleisrichtung abgeschrägt um Schallreflexionen ins Schotterbett zu leiten und Beugungseffekten an der oberen Kante entgegenzuwirken. Die MSW besteht aus einem hohlen Kunststoffkörper und einer an der gleiszugewandten Seite angebrachten Absorberschicht aus Holzbeton.

Einfluss verschiedener Fahrzeugarten

Es werden zwei verschiedene Schallquellen im Modell verwendet: Reisezug und Güterzug. Die Geometrie von Güterwagen unterscheidet sich jedoch erheblich je nach eingesetztem Wagen-Typ. Um den Einfluss deren unterschiedlicher Querschnittprofile zu untersuchen, werden zusätzlich zum Standard-Güterwagen (Schüttwagen) je ein Modell mit einem „Modalohr“-Taschenwagen und eins mit einem Kesselwagen erstellt. Als Abschirmvorrichtung wird eine niedrige Schallschutzwand der Variante 2 (C-Schale) mit Holzbeton-Absorberschicht in die Modelle eingefügt.

Ergebnisse und Fazit

Die nSSW zeigen mit einer Schallminderung von bis zu 14,0 dB(A) (Variante 3) sowie 8,2 dB(A) (Variante 2) im Norm-Immissionsort die beste Leistung der erprobten Schallschutzmaßnahmen. Sie schneiden deutlich besser ab als die herkömmliche SSW mit 5,4 dB(A) bzw. 3,6 dB(A) Lärminderung am Norm-Immissionsort (vgl. Abb. 3 & 4). Das Ziel, eine den SSW, akustisch mindestens gleichwertige Maßnahme zu finden, wird somit erreicht. Weiterhin erbringen die MSW Schallpegelminderungen bis zu 10,9 dB(A). An den meisten Immissionsorten (IO) bleibt die Lärminderung jedoch erheblich hinter diesem Wert zurück. Ihr Einsatz ist nur an auf Dämmen geführten Gleisen sinnvoll. Das im Vergleich zu den nSSW schlechtere Abschneiden der SSW und die in der Simulation errechneten Schallfelder deuten auf starke Reflektionen im Zwischenraum Wand-Wagenkörper hin. Im Gegensatz zu nSSW und MSW hat die erprobte SSW keine dem Gleis zugeneigte Form, Reflektionen könnten daher einfacher entweichen.

Bei Einsatz eines Taschenwagens anstatt des Schüttwagens werden niedrigere Gesamtpegel, sowie bei Einsatz eines Kesselwagens höhere Gesamtpegel gemessen (vgl. Abb. 5). Demzufolge beeinflussen veränderte Geometrien des Zuges das Schallpegelminderungspotenzial der nSSW. Die nSSW können daher nicht uneingeschränkt zum Einsatz an allen Strecken empfohlen werden. Bei ihrem Einsatz muss das auf der Strecke eingesetzte Wagenmaterial in Betracht gezogen werden.

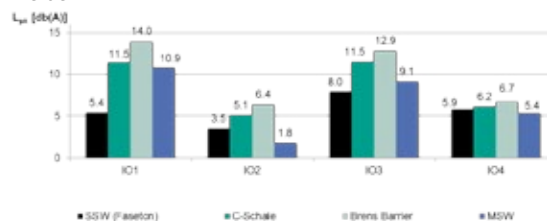


Abb. 3: Schallpegel-Minderung gegenüber Basismodell, Schallquelle Reisezug

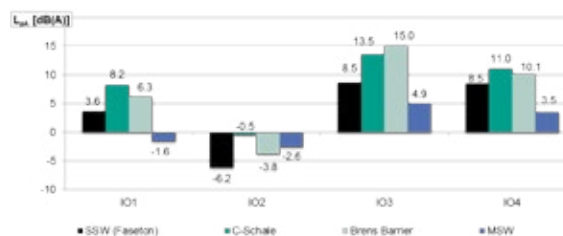


Abb. 4: Schallpegel-Minderung gegenüber Basismodell, Schallquelle Güterzug

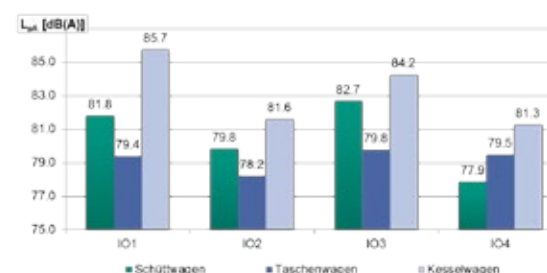


Abb. 5: Gesamtschalldruckpegel in Abhängigkeit des Güterzug-Typs

Die Vielfältigkeit der Möglichkeiten zur Fügung von Bauteilen ist eines der maßgeblichen Kriterien, die zur Flexibilität und zur vielseitigen Einsetzbarkeit des Stahlbaus beitragen. Insbesondere das Schweißen nimmt hierbei eine entscheidende Bedeutung zur Realisierung von Tragkonstruktionen und -strukturen. Das Fügen von Bauteilen mithilfe der Schweißtechnik ist allerdings immer auch als mögliche Gefahrenquelle aufgrund nicht sachgemäßer Ausführung zu betrachten. Dabei gelten Eigenspannungen und Verzug, die unweigerlich durch den Schweißprozess entstehen, als Qualitätsmangel und können die Funktionalität und die Tragfähigkeit eines Bauteils erheblich beeinträchtigen.

Prix d'Excellence 2014 mention bien

ERMITTLUNG DER EIGENSPANNUNGEN AUS DEM SCHWEISSEN BEI EINSEITIG GESCHWEISSTEN STUMPFNAHTVERBINDUNGEN VON RUNDHOHLPROFILEN

Roberto Palumbo

Ermüdung von Schweißverbindungen und experimentelle Methoden

In der Thematik der Ermüdung von Schweißverbindungen ist stets mit Eigenspannungen zu rechnen. Die Auswirkungen dieser Eigenspannungen sowie ihre Entwicklung über die gesamte Lebensdauer eines Bauteils sind zum Zeitpunkt dieser Arbeit noch Gegenstand der Forschung. Zur besseren Beurteilung der Auswirkung von Eigenspannungen bei einseitig geschweißten Rundhohlprofilverbindungen ist eine Auskunft über deren Verteilung und Höhe, besonders im Nahtbereich der Rohrrinnenseite, von großer Bedeutung. Dies rührt daher, dass an der Rohrrinnenseite mit hohen Zugeigenspannungen zu rechnen ist, welche die Entstehung eines Ermüdungsanrisses durch eine starke Kerbwirkung an der Nahtwurzel begünstigen.

In einer ersten Erörterung werden die gängigen experimentellen Methoden zur Bestimmung von Eigenspannungen vorgestellt. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit haben experimentelle Verfahren unterschiedliche Vor- und Nachteile, welche bei der Verfahrensauswahl näher betrachtet werden sollten. Generell können experimentelle Methoden in zwei Kategorien unterteilt werden: zerstörungsfreie Messmethoden und teilzerstörende/zerstörende Methoden. Hierzu muss abgewogen werden, ob eine Zerstörung oder Teilzerstörung des Bauteils hingenommen werden kann und ob eine Messung der Eigenspannungen über die Bauteildicke von Interesse ist. Allen Verfahren gemein, ob zerstörend oder zerstörungsfrei, ist bei der Messung der Eigenspannungen über die Bauteildicke der erhöhte Aufwand bei der Messung des Eigenspannungsverlaufes. So erfordert eine zerstörungsfreie Messmethode wie die Röntgenbeugung beispielsweise hochenergetische Röntgenstrahlen aus einem Teilchenbeschleuniger zur Messung der Eigenspannungen über die Bauteildicke. Bei den teilzerstörenden Messverfahren ist hingegen ein erhöhter Zeit- und Kalibrierungsbedarf notwendig.

Numerische Methoden

Neben den experimentellen Verfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen haben numerische Berechnungen mittels der Methode der Finiten Elemente (FEM) eine wichtige Stellung in dieser Thematik eingenommen und sind zu einem bewährten Werkzeug zur näherungsweisen Berechnung der Eigenspannungen herangewachsen. Letzteres ist jedoch durch die ausgeprägte Nichtlinearität der Berechnung und der starken Temperaturabhängigkeit der Werkstoffkennwerte nur durch eine Reihe von Annahmen zu approximieren.

Dennoch können dadurch prinzipielle Aussagen zur Eigenspannungsverteilung getroffen werden. Vorteilhaft bei den numerischen Verfahren ist die Möglichkeit gezielter Untersuchungen von schweißtechnischen, werkstofftechnischen und geometrischen Einflüssen auf die Eigenspannungsverteilung.

Zielsetzung und Methodik

Ziel dieser Arbeit ist es mit Hilfe des numerischen Programms ANSYS ein Modell zu erstellen, welches die Berechnung von Eigenspannungen aus dem Schweißen von stumpfnahtgeschweißten Rohren ermöglicht (Abbildung 1). Dabei soll mit Hilfe einer Parametrisierung des Modells in der Programmiersprache APDL die Möglichkeit geschaffen werden, verschiedene Rohrgeometrien und Schweißlagen zu simulieren. Weiterhin soll durch gezielte Untersuchungen den Einfluss unterschiedlicher geometrischer und werkstofftechnischer Faktoren auf die Eigenspannungsverteilung untersucht werden.

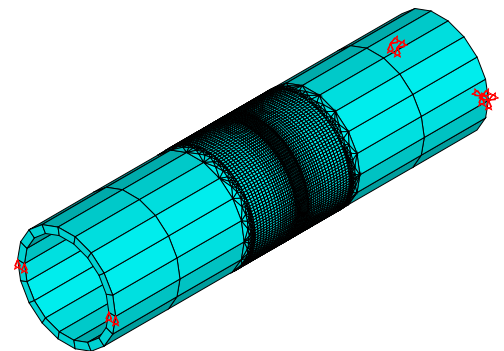


Abb. 1: Numerisches Modell

Hierzu werden zunächst die der Simulation zugrunde liegenden thermodynamischen und thermomechanischen Werkstoffkennwerte des Werkstoffes S355J2G3 und weitere Annahmen vorgestellt. Weiterhin wird der Berechnungsablauf des Temperaturfeldes, welches den Wärmeeintrag des Schweißbrenners simuliert, mit den zugehörigen thermodynamischen Randbedingungen erläutert. Nach einer Konvergenzstudie und der darauf aufbauenden Validierung der Temperaturfeldberechnung wird die weitere Berechnungsmethodik vorgestellt. Aufbauend auf der Berechnung des Temperaturfeldes (Abbildung 2), wird in der strukturmechanischen Berechnung das entkoppelt berechnete Temperaturfeld dem Modell

als Last aufgeprägt. Bei diesem Berechnungsschritt, beschreiben temperaturabhängige Materialkennwerte das mechanische Verhalten des Werkstoffes und ermöglichen so die Berechnung der Eigenspannungen aus der strukturellen Reaktion des Modells auf das Temperaturfeld.

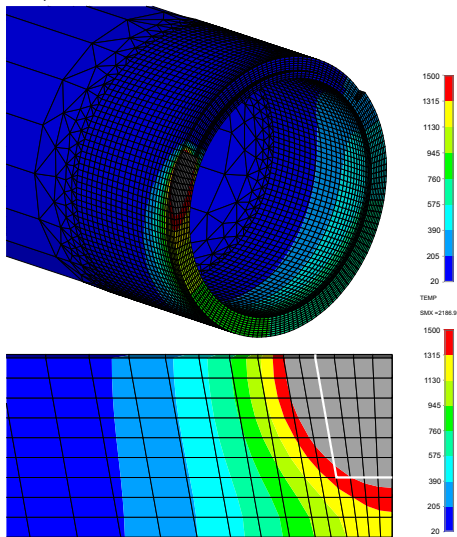


Abb.2: Temperaturfeld und Nahtquerschnitt (aufgeschmolzener Bereich in grau)

Untersuchungen

In einem ersten Schritt werden Untersuchungen zum Verfestigungsmodell des Werkstoffes und weiteren Parametern an einlagig geschweißten Modellen durchgeführt. Abschließend werden die Resultate der Untersuchungen der mehrlagigen Modelle vorgestellt. Dabei wird unter anderem die Möglichkeit einer vereinfachenden Maßnahme, der Gruppierung von Raupen, auf Plausibilität überprüft.

Die numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wahl des Verfestigungsmodells des Stahlwerkstoffes die Eigenspannungen im Nahtbereich stark beeinflusst. Dabei führen Berechnungen mit isotroper Verfestigung zu höheren Eigenspannungen als eine Berechnung mit kinematischer Verfestigung (Abbildung 3). Berechnungen mit idealplastischem Materialverhalten werden ebenfalls zum Vergleich herangezogen.

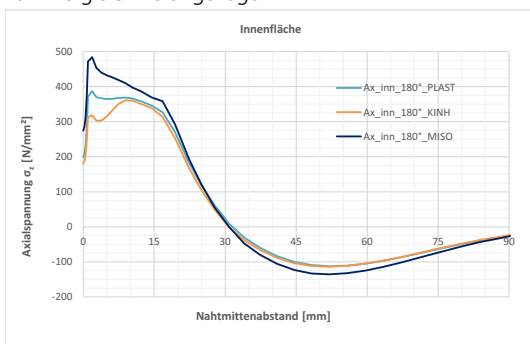


Abb.3: Einfluss des Verfestigungsmodells

Weitere Untersuchungen an einlagig geschweißten Modellen haben gezeigt, dass sich die Verteilung der Axialspannung über die Bauteildicke bei vorgegebenem Außenradius und zunehmender Wanddicke verändert. Bei geringen Bauteildicken resultiert der lineare Axialspannungsverlauf aus dem Biegeeffekt der Einschnürung der Umfangsnaht (Abbildung 4). Mit zunehmender Wanddicke und zunehmender Anzahl an Schweißlagen weicht der Verlauf allerdings von dieser linearen Charakteristik ab.

Bei der Modellierung von mehrlagigen Schweißnähten konnte auch festgestellt werden, dass die Resultate stark vom angesetzten Verfestigungsmodell abhängen. Ein erwartet höherer Einfluss als bei einlagigen Modellen konnte jedoch nicht festgestellt werden.

Durch die numerisch sehr aufwändige Berechnung von mehrlagigen Modellen (Berechnungszeit: 48h) wurde die Gruppierung von Schweißraupen (Berechnungszeit: 12h) als Vereinfachung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass durch diese Vereinfachung die Charakteristik

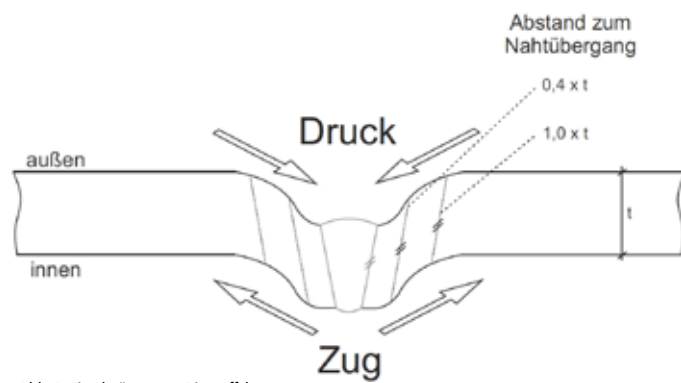


Abb.4: Einschnürung aus Biegeeffekt

der Eigenspannungsverläufe erhalten bleibt (Abbildung 5). Mit dieser simplifizierten Vorgehensweise kann somit eine prinzipielle Aussage über die Eigenspannungsverteilung von komplexeren Modellen getroffen werden. Voruntersuchungen an Plattenmodellen, die ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit erstellt wurden, können dabei als Grundlage dienen.

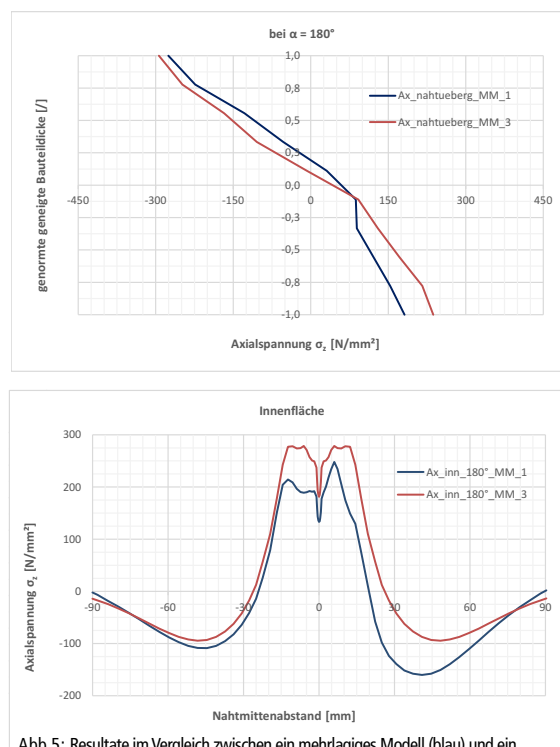


Abb.5: Resultate im Vergleich zwischen ein mehrlagiges Modell (blau) und ein vereinfachtes Modell (rot)

Ausblick

Die Effekte der Gefügeumwandlung des Stahlwerkstoffes auf die Eigenspannungsverteilung konnten im zeitlichen Rahmen dieser Diplomarbeit nicht untersucht werden. Eine Auswertung der t8/5-Zeiten aus der Berechnung des Temperaturfeldes der mehrlagigen Modelle deutet aber darauf hin, dass die Rückwandlung des Gefüges des angeschmolzenen Stahls in Temperaturbereichen abläuft welche eine starke Auswirkung auf die Eigenspannungsverteilung vermuten lassen.

Der momentane Stand der Technik bezüglich der numerischen Erfassung von Effekten der Gefügeumwandlung erlaubt lediglich die Berücksichtigung eines durchlaufenen Temperaturzyklus. Folglich kann bei Simulationen von mehrlagig geschweißten Modellen nur der letzte Temperaturzyklus für das Umwandlungsverhalten angesetzt werden. Ein kürzlich veröffentlichtes Modell der Universität Cottbus zur Beschreibung des Umwandlungsverhaltens bei mehrmals durchlaufenen Temperaturzyklen könnte Aufschluss darüber geben ob sich der vermeintlich sehr hohe numerische und experimentelle Aufwand einer solchen Implementierung lohnt.

Offen bleibt die Frage welches Verfestigungsmodell des Stahlwerkstoffes einer Simulation zugrunde gelegt werden soll. Hierzu wäre ein Abgleich der berechneten Eigenspannungen mit experimentellen Werten zielführend.

In Zeiten der zunehmend geforderten Energieeffizienz bieten innovative Leichtbaustrategien den Automobilherstellern das größte Einsparpotential. Der Einsatz von CFK beim Karosseriebau führt zu einer signifikanten Gewichtsreduktion, welche ihrerseits einen geringeren Kraftstoffverbrauch mit sich bringt.



Prix d'Excellence 2015 mention excellent

AUSARBEITUNG EINES KONZEPTEES ZUR BESTIMMUNG DER MESSUNGSICHERHEIT EINES LASERTRIANGULATIONS-PORTALS MITTELS COMPUTERTOMOGRAPHIE UND KOORDINATENMESSTECHNIK_

Joe Bartholmé

Einführung

Der Energiewechsel kann nur gelingen, wenn eine nachhaltige Energiepolitik in allen Branchen umgesetzt wird. Die Automobilindustrie bildet hierbei keine Ausnahme und so wurde 2009 die EG Verordnung Nr. 443 des europäischen Parlamentes zur Reduzierung der CO₂-Emissionen verabschiedet. Nach dieser soll bis zum Jahre 2020 der durchschnittliche europäische Kohlenstoffdioxid-Ausstoß auf 95 g/km gesenkt werden. Vor allem innovative Leichtbaustrategien bieten den Automobilherstellern wesentliches Potential, um energieeffizientere Fahrzeuge zu konstruieren. Eine signifikante Gewichtsreduktion geht Hand in Hand mit einer merklichen Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und somit auch einer Minimierung des Schadstoffausstoßes. Es gilt der Grundsatz, dass eine Gewichtsreduzierung von 100kg der Fahrzeugmasse eine Senkung von 8,8 g CO₂/km im NEFZ mit sich zieht (Timm 2008). Das größte Einsparpotential bietet hierbei, mit rund 40% des Gewichtes eines modernen Autos, die Karosserie. Wurden bereits vor Jahren Stahlstrukturen vermehrt durch leichtere Aluminiumprofile ersetzt, versuchen die Hersteller heutzutage vermehrt faserverstärkte Kunststoffe einzusetzen, die trotz erheblich geringerer Dichte klar die Festigkeitsanforderungen erfüllen. Besonders hervorzuheben sind hierbei die kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffe, welche gegenüber dem Aluminium 20% bis 40% des Gewichtes einsparen können (Ernst et al. 2012).

Bisher wurden faserverstärkte Kunststoffe (FVK) und vor allem kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) aufgrund ihres hohen Preises ausschließlich im Rennsport oder bei Premium-Sportwagen eingesetzt. Carbon-Bauteile kosten aktuell rund sechsmal mehr als gleichwertige Stahl-Bauteile. Um die Senkung des Preises und somit auch den Serieneinsatz zu ermöglichen, müssen neue Qualitätssicherungsmethoden ausgearbeitet werden. Vor allem schnelle, zuverlässige Messmethoden können den Unterschied machen, ob es gelingt, den CFK-Einsatz in die Serienfertigung zu integrieren oder nicht. Schlagwort hierbei ist die Inline-Messung: Hierbei werden Bauteile während laufender Produktion oder „in der Linie“ (= Inline) qualitativ bewertet, ohne die Fertigung zu beeinträchtigen oder gar anhalten zu müssen.

In der in diesem Artikel zusammengefassten Masterarbeit geht es darum, ein neues Konzept zur Bestimmung der Messunsicherheit eines vorhandenen Lasertriangulationsportals, welches als optisches Inline-

Messgerät zur Qualitätssicherung für Carbon-Preforms eingesetzt wird, auszuarbeiten. Dieses wurde im Rahmen von spezifischen Forschungsarbeiten am Institut für Produktionstechnik am KIT entwickelt und ist ausschließlich für die Qualitätssicherung von textilen Halbzeugen optimiert.

Bei der Ausarbeitung eines neuen Konzeptes müssen zuerst Prüfkörper entwickelt werden, welche geometrische Eigenschaften von typischen in der Karosserie verarbeiteten Bauteilen darstellen. Dieser erste Schritt besteht, neben der Dimensionierung und Formauslegung der Prüfkörper, vor allem in der Auswahl des zu verwendenden Materials. Die zu entwickelnde Methodik selbst muss so aufgebaut sein, dass sie eindeutig reproduzierbar ist. Wichtig sind hierbei die fundierte Nachforschung einzuhalten der Normen sowie die mögliche Einordnung in bereits bestehende Richtlinien.

Die Ermittlung der Messunsicherheit des LTS-Portals erfordert, neben Messungen des zu bewertenden Lasertriangulationssystems, präzise Vergleichswerte. Diese sollen mithilfe von hochauflösenden Aufnahmen eines Computertomographen (CT) an den gleichen Prüfkörpern erstellt werden. Ein zusätzlicher Schritt besteht darin, zu überprüfen, ob die CT-Ergebnisse tatsächlich als Referenz-Messungen angesehen werden können. Hierzu werden ausgewählte Prüfkörper, anhand eines präzise arbeitenden Koordinatenmessgeräts mit bekannter Messunsicherheit von 1,2µm taktil vermessen.

CFK

CFK gehört zu den faserverstärkten Kunststoffen (FVK), welche wiederum zu der Gattung der Verbundwerkstoffe gehören. Letztere sind Kompositwerkstoffe, die aus mindestens zwei verschiedenen, zusammengeführten Materialien besteht. Im Falle von CFK handelt es sich dabei um Kohlenstofffasern und eine Kunststoffmatrix. Die Eigenschaften der Carbon-Fasern, das verwendete Matrixmaterial und die Art und Weise, wie die beiden Materialien vereinigt werden, bestimmen die späteren Bauteileigenschaften. Carbon-Fasern weisen eine Reihe von Vorteilen auf, wie die hohe spezifische Festigkeit und Steifigkeit, ein hohes spezifisches E-Modul, ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit sowie einstellbare elektrische Eigenschaften bei gleichzeitiger geringer Wärmeausdehnung und kleiner Dichte (Je nach CFK-Art liegt die Dichte zwischen 1,4 und 1,8 g/cm³).

Die eingesetzte Kunststoffmatrix, die sogenannte Bettungsmasse, hat die Aufgabe die einzelnen Fasern zu fixieren, damit die auf ein Bauteil wirkenden Kräfte unter festgelegter geometrischer Anordnung in die Faserstränge eingeleitet werden können. Bei CFK werden Matrizen üblicherweise aus Epoxidharz, einem Duroplast hergestellt. Es gibt jedoch auch die Möglichkeit, die Matrix aus Thermoplasten wie Polyamid oder Polypropylen herzustellen (Flemming et al. 1995). Der Vorteil bei der Verwendung von thermoplastischen Matrizen liegt vor allem in der nachträglichen Umformbarkeit. Zudem lassen sich diese CFK-Bauteile schweißen.

Einzelne Fasern nehmen, wie in im vorherigen Abschnitt beschrieben, die wirkenden mechanischen Kräfte auf. Um dieser Aufgabe gewachsen zu sein, ist es nötig die extrem dünnen Fasern (Durchmesser von 5 bis 9 μm) zu bündeln. Gängig ist hierbei das Zusammenfassen von Filamenten in parallel angeordneten Strängen, den sogenannten Rovings. Andere Möglichkeiten bieten Garne oder Zwirne. Nachdem die losen Graphitfasern in Rovings gebündelt wurden, kann man diese wiederum in verschiedenen Strukturen anordnen. Die häufigsten Strukturen sind Gewebe und Gelege. Bei letzteren sind die Rovings parallel zueinander angeordnet, wodurch die Kohlenstofffasern ihr gesamtes Potential hinsichtlich Festigkeit und Steifigkeit in Faserrichtung ausüben können. Ein Gelege kann weiterhin aus einer oder mehreren Lagen von Faserbündeln bestehen. Je nachdem wie die Fasernlagen zueinander angeordnet sind, unterscheidet man zwischen unidirektionalen, biaxialen oder multiaxialen Gelegen. Gewebe sind durch eine rechtwinklige Verkreuzung von zwei Kohlenstofffasersystemen gekennzeichnet. Es werden drei verschiedene Arten unterschieden: Leinwand-, Körper- und Atlasbindung.

Grundsätzlich werden aktuell sieben unterschiedliche Herstellungsverfahren eingesetzt, wobei sich das Resin Transfer Moulding (RTM) Verfahren als eine der aussichtsreichsten Methoden für eine breitere Einführung von CFK im der Serienherstellung des Automobilbaus herausgestellt hat. Hierbei wird das drapierte Carbon-Halbzeug in das Formwerkzeug der RTM-Press eingelegt. Anschließend wird das Werkzeug geschlossen und es wird, unter durch die Presse erzeugtem Druck, Harz mit weiteren Reaktionskomponenten

injiziert. Durch Evakuierung der Presse wird der Vorgang beschleunigt. Das eingespritzte Harzgemisch durchdrängt die Kohlenstofffasern. Tritt keine Luft mehr aus den Überläufen an der Presse, sondern reines Matrixmaterial, werden diese geschlossen und das Bauteil kann aushärten. Abhängig vom verwendeten Matrixwerkstoff und dem Automatisierungsgrad können hierbei Zykluszeiten von wenigen Minuten erreicht werden (Eickenbusch und Krauss 2013; Fraunhofer ICT 2015).



Abb.1: Schematischer Ablauf des RTM-Verfahrens (Eickenbusch und Krauss 2013)

Als Preform werden Halbzeuge bezeichnet, bei denen die Endlosfasern aus Kohlenstoff in der späteren dreidimensionalen Bauteilgeometrieform richtig angeordnet werden. Das Drapieren ist der formgebende Teilprozess. Dieser stellt aufgrund der Nicht-Fließfähigkeit der textilen Halbzeuge eine besondere Herausforderung dar, da Faserverschiebungen oder Faltenbildungen zu vermeiden sind. Falten führen beim späteren Imprägnieren zu sogenannten Harznestern, welche es unbedingt zu vermeiden gilt, um die Funktionsfähigkeit des späteren Bauteils nicht zu beeinträchtigen.

Anschließend werden mehrere, textile Halbzeug-Lagen miteinander verbunden, was zur Stabilisierung der Preforms führt. Der gewählte Lagenaufbau dient dem Aufnehmen der multiaxialen Kräfteeinwirkungen auf das spätere Bauteil. Wie an früherer Stelle erwähnt wurde, können die Kohlenstofffasern nur in Faserrichtung ihr volles Potential ausschöpfen. Deshalb ist es entscheidend, dass Preforms gezielt mehrlagig aufgebaut werden (Fleischer und Wagner 2013).

Lasertriangulation

Die Lasertriangulation gehört zu den optischen, berührungsfreien Messverfahren. Das Prinzip der Dreiecksbildung ist ein altbewährtes Verfahren und wird seit langem in der Geodäsie zur Grundlagenvermessung eingesetzt. Den Einsatz in der optischen Messtechnik ermöglichte erst der technologische Fortschritt in den 1990er Jahren (Weckenmann 2012). Die Lasertriangulation gehört zu den aktiven Triangulationsmethoden, bei

welchen ein Laser als strukturierte Lichtquelle eingesetzt und das Profil von Untersuchungsobjekten nach dem Laserschnittverfahren gescannt wird. Eine Lichtlinie wird kontinuierlich in einer homogenen Bewegung über die dreidimensionale Oberfläche des Messobjektes geführt und deren Projektion von einem Sensor in einer Matrix-Kamera erfasst. Hierbei ist die Laserlinie nicht mehr flach, sondern gekrümmt. Dieser Lateralversatz entspricht der dreidimensionalen, beleuchteten Objektstruktur. Die meist verbreiteten Laser sind Helium-Neon-Laser, welche ebenfalls bei dem zu untersuchenden Inline-Portal eingesetzt werden.

Die Hauptherausforderungen bei der Lasertriangulation sind die Geometrie sowie der Materialeinfluss des Messobjektes. Bestimmte Formen können bei festen Laser-Sensor-Anordnungen nicht vollständig erfasst werden, sodass es zu Abschattungen in den Aufnahmen kommt. Die Oberflächenbeschaffenheit führt zu unerwünschter Diffusion, Reflektion oder Transmission. Vor allem die zu untersuchenden Kunststoffe gelten als sogenannte Volumenstreuer. Sie verfälschen Messergebnisse, indem ein Laserstrahl zu tief in ein Messobjekt eindringen kann, bevor er reflektiert und vom Sensor erfasst wird. Ebenso einflussreich sind die Oberflächenrauigkeit sowie -farbe. Ein Mindestkontrast sowie eine gewisse Rauigkeit müssen gewährleistet sein, damit die Lasertriangulation eingesetzt werden kann.

Bei dem zu bewertenden Portal werden zwei Lasertriangulationssysteme verwendet, damit komplexere Bauteile von zwei unterschiedlichen Blickwinkeln vollständig eingescannt werden können und so Abschattungen vermieden werden. Des Weiteren kommen CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) Sensoren zum Einsatz. Diese bieten gegenüber handelsüblichen CCD-Sensoren den Vorteil, dass sie, neben den zu den jeweiligen Pixeln gehörenden Halbleitern, Kondensatoren enthalten und eine deutlich höhere Bildrate besitzen.

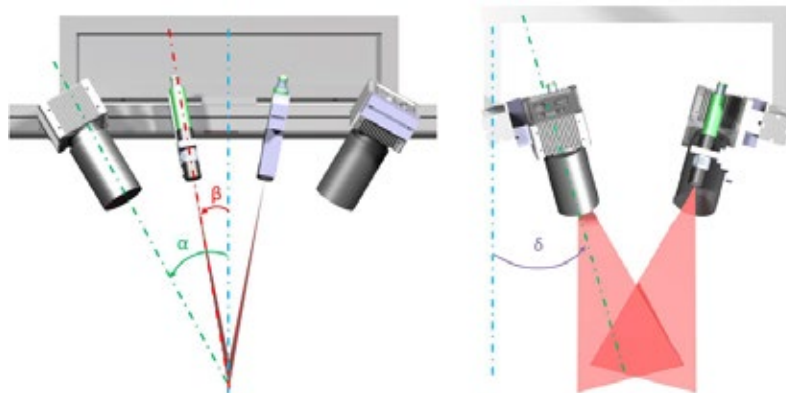


Abb.2: Prinzip der Lasertriangulation: Schematische Anordnung der Hauptkomponenten: α : Kamerawinkel; β : Laserwinkel; δ : Verkipfungswinkel.

Computertomographie

Die Computertomographie basiert auf der Fähigkeit, dass elektromagnetischen Wellen mit einer Wellenlänge zwischen $10^{-13} \leq \lambda \leq 10^{-8} \text{ m}$ Bauteile durchdringen können. In einem Vakuum werden freie Elektronen erzeugt, welche anschließend in einem elektrischen Feld zwischen metallischer Anode und Kathode beschleunigt werden. Bei hoher Spannung entsteht so hochfrequente, magnetische Strahlung, die sogenannte Röntgenstrahlung. Während der Durchstrahlung eines Messobjektes wird ein Teil der Röntgenstrahlung absorbiert.

Die Menge der Absorption hängt von der zu durchquerenden Strecke ab, wobei die Durchstrahlungsstärke bei zunehmender Distanz sinkt. Neben diesem rein quantitativen Verhältnis, spielt das zu vermessende Bauteilmaterial eine entscheidende Rolle. (Christoph und Neumann 2012) vergleichen diesen Prozess mit der „Erzeugung des Schattenbildes eines teilweise transparenten Objektes durch Beleuchtung mit einer punktförmigen Lichtquelle“. Hierbei hängt die Lichtdurchlässigkeit des beleuchteten Teils von deren optischer Dichte ab. Prinzipiell ist es bei zu vermessenden Prüfteilen im CT ähnlich.

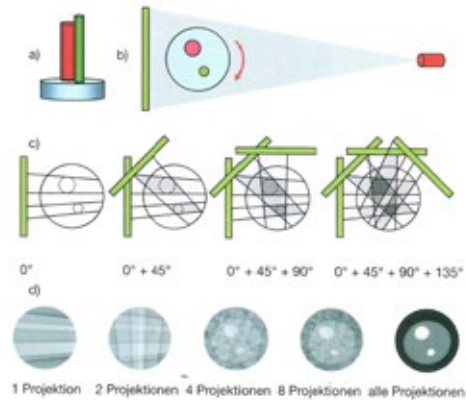


Abb.3: Rekonstruktion zu 3D-Volumen anhand von Einzelprojektionen (Christoph und Neumann 2012)

Durch den X-Strahl entstehen zweidimensionale Durchstrahlungsbilder, welche von einem matrixförmigen Sensor erfasst werden. Die so entstehenden Projektionsbilder werden normiert, logarithmiert und ihre zugehörige Kennlinie linearisiert. Der Grund der Linearisierung liegt in dem exponentiellen Abschwächungsverhalten der Röntgenstrahlung, wenn diese einen Prüfkörper durchdringt: Die X-Rays werden bei jedem Durchqueren von Material durch Absorption abgeschwächt. Wenn also die Strahlungsintensität bereits durch ein erstes Durchleuchten verringert wurde, wird diese bei jedem weiteren Erreichen von Volumelementen zusätzlich geschwächt. Nach der Datenvorverarbeitung enthalten die einzelnen Grauwerte der 2D-Aufnahmen nicht mehr die tatsächlichen μ -Koeffizienten, sondern die Summe der Abschwächungswerte des Messobjektes für den X-Strahl.

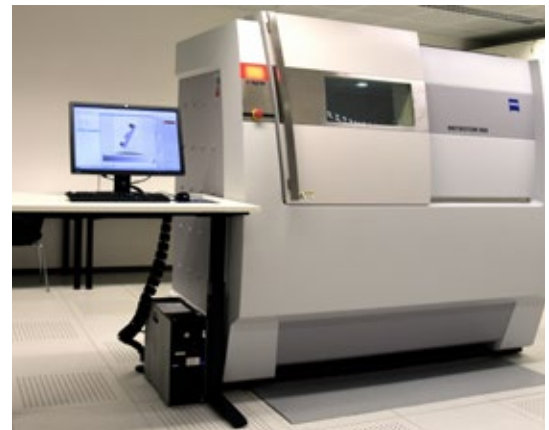


Abb.4: Eingesetzter Computertomograph

Die anschließende Volumenrekonstruktion benötigt die umgekehrten Summenwerte. Dies wird durch eine Faltung jeder einzelnen Sensorzeile mit einer die Intensität der Kanten erhöhenden Filterfunktion umgesetzt. Nach diesem Schritt enthält jeder Pixel der Einzelprojektionen die aufsummierte Voxel-Amplitude, die von einem zugeordneten X-Strahl erfasst wurde (Voxel = Volumetric Pixel). Die Rückprojektion läuft für sämtliche zweidimensionalen Bilder in Richtung des Brennflecks, unter Berücksichtigung der geometrischen Anordnung der wichtigen Gerätekomponten und der Drehstellung, ab. Durch Überlagerung wird so schrittweise das dreidimensionale Volumen konstruiert. Unter gleichbleibender Orientierung, wie die Projektionswerte einzeln erfasst wurden, werden diese auf die entlang des Röntgenstrahls liegenden Voxel aufsummiert (Christoph und Neumann 2012) und (Weckenmann 2012). Es existieren zahlreiche Einflussfaktoren auf das Messergebnis von CT-Aufnahmen. Da es bei dieser Arbeit darum geht, Abweichungen im Mikrometer-Bereich aufzudecken, wird ein Computertomograph mit einer Genauigkeit von rund $4 \mu\text{m}$ benutzt. Dieser CT befindet sich weiterhin in einem speziellen Messlabor, welches

konstante Temperatur- und Luftfeuchtigkeitswerte aufweist, um so schwankende Umgebungseinflüsse zu minimieren.

Koordinatenmesstechnik

Die Koordinatenmesstechnik ist eine universell einsetzbare Messmethode, bei der die zu prüfenden Bauteiloberflächen in einem festgelegten, räumlichen Koordinatensystem punktweise abgetastet werden. Anschließend werden diese zueinander in Bezug stehenden Punkte mathematisch miteinander verknüpft. Dies geschieht durch sogenannte Ausgleichsrechnungen nach Gauß oder Tschebyscheff, bei der ein „numerisches Bild“ des Flächenelementes als zugeordnetes Geometrieelement entsteht.

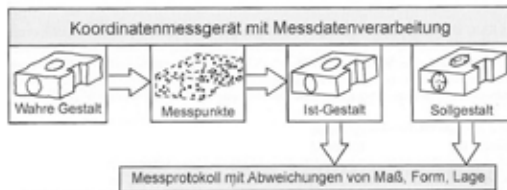


Abb.5: Prinzip des Antastens mittels KMG (Dutschke und Keferstein 2005)

Messkonzept

Die Bewertungsstrategie basiert auf dem Prinzip, unterschiedliche geometrische Formen, welche mit verschiedenen textilen Halbzeugen drapiert und eigens für dieses Konzept entwickelt wurden, mit dem LTS, dem CT und dem KMG zu vermessen und charakteristische Messpunkte durch statistische Auswertung zu qualifizieren.

Diese Referenzmaterialien spiegeln typische in der Karosserie vorkommende Geometrien wider: konvexe oder konkave Übergänge, senkrechte oder vertikale Kanten sowie einfache, plane Teilstücke. Als textile Halbzeuge werden zwei im Automobilbau vorkommende Gewebearten mit einer Rovingstärke von 245g/m² sowie 400g/m² analysiert.

Weiterhin wird ein Gelege mit einer Faserstärke von 400g/m² untersucht. Da die Reflektion von CFK stark von der Faserorientierung bezüglich der Scanrichtung des Lasertriangulationsportals abhängt, werden sämtliche textilen Halbzeuge mit einer Rovingorientierung von 0° und 45° bezüglich der X-Achse des Werkstück-Koordinatensystems angebracht um so den Reflektionseinfluss aufdecken zu können. Da Gelege im Gegensatz zu Gewebe asymmetrisch ist, werden diese Halbzeuge zudem um 90° versetzt, untersucht. Carbonfasern sind sehr fragil und können deshalb nicht taktil vermessen werden. Damit die Messunsicherheit des Computertomographen dennoch mithilfe von Referenzmessungen mit dem hochpräzise messenden Koordinatenmessgerät kontrolliert werden kann, werden zusätzlich zu den drapierten Referenzmaterialien, »blanke« Messgeometrien gefertigt. Diese werden ausschließlich mit dem KMG nach dem Scanverfahren taktil abgefahren und anschließend mit dem CT vermessen. Damit die daraus resultierenden Erkenntnisse qualitativ richtig verwendet werden können, werden alle Messungen eigens mit der für dieses Messkonzept ausgearbeiteten statistischen Auswertung in Einklang gebracht.

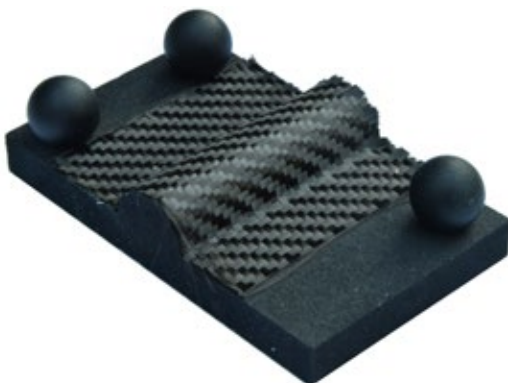


Abb.6: Referenzmaterial : konvexer Halbzylinder mit 3K-Gewebe

Neben den rein geometrischen Anforderungen müssen die sogenannten „Trägermaterialien“ auf welche die Halbzeuge drapiert werden, strikte optische Eigenschaften erfüllen, welche vom LTS-Portal vorausgesetzt werden (Bspw. Reflexions- und Transmissionsverhalten). Ein weiterer entscheidender Faktor ist die notwendige Durchstrahlungsmöglichkeit und der limitierende Baumraum des CT. Es gilt die Faustregel, dass das sogenannte Trägermaterial, auf welches das Carbon angebracht wird, eine geringere Dichte besitzen muss als CFK, um eine Strahlaufhärtung zu vermeiden. Letzteres steht in kontradiktorischem Verhältnis zur Forderung nach einem formstabilen Werkstoff, welcher eine präzise Fertigung ermöglicht, um überhaupt Messunsicherheiten im Mikrometer-Bereich reproduzierbar aufdecken zu können. Ein speziell aufgeschäumter Kunststoff ($\rho_{\text{TM}}=0,14\text{g/cm}^3$) erwies sich in Vorversuchen als beste Wahl.

Die Grundidee des neuen Messkonzeptes ist es, sämtliche Referenzmessungen (CT- und Koordinatenmessgerät-Messungen) in einer neuen Datenbank zu hinterlegen, sodass diese nicht mehr wiederholt werden müssen. Lediglich die Durchführung von neuen LTS-Portal Scans ist bei erneuter Bewertung des Portals erforderlich. Da jedes System (CT, KMG und LTS) etliche Parametereinstellungen erlaubt, wurden in einer ersten Instanz, neben der Entwicklung von Referenzmaterialien, verschiedene Parameterstudien nach dem teilfaktoriellen Prinzip Design of Experiments (DoE) durchgeführt. Allein der verwendete Computertomograph bietet Unmengen an einstellbaren Koeffizienten, wie beispielsweise Strom, Spannung, Integrationszeit, Bildmittelung, Binning, Voxelgröße (Voxel = dreidimensionaler Pixel), Brennfleck oder Anzahl von aufzunehmenden Projektionen. Lasertriangulationsportal und Koordinatenmessgerät bieten ähnliche Auswahlmöglichkeiten.

Nachdem die optimalen Einstellungen für jedes Material gefunden sind, können erste Versuche mit den neuen Referenzmaterialien durchgeführt werden. Die Hauptschwierigkeit ist dabei, die unterschiedlichen Messmethoden qualitativ vergleichen zu können. Neben unterschiedlicher Hardware, ist vor allem die mangelnde Vergleichbarkeit der jeweiligen Auswertesoftware der Messmethoden ein Problem. Abhilfe schaffen hierbei etliche graphische Manipulations- und eigens für diesen Zweck implementierte Umwandlungsoperationen, durch welche die Ergebnisse letztendlich qualitativ gegenübergestellt werden können.

Damit die Reproduzierbarkeit der neuen Methode auch den bestehenden Normen- und Richtlinien der International Organization for Standardization (ISO), des Deutschen Instituts für Normung (DIN) und des Verbandes der deutschen Automobilhersteller (VDA) standhält, basiert der theoretische Teil des entwickelten Konzepts auf den Ausarbeitungen von Kenntnissen von (Brabandt 2015) und (Brabandt und Lanza 2015), unter Berücksichtigung sämtlicher relevanten Normenwerke für optische Referenz- und Kalibriermessungen sowie für Qualitätssicherungsmethoden von Karosserien.

Unabhängig von der Geometrie oder dem zu prüfenden textilen Halbzeug werden pro Referenzkörper 25 Wiederholmessungen je Messgerät durchgeführt. Diese müssen nach (VDA Band 5.1) ununterbrochen unter konstant gleichbleibenden Bedingungen durchgeführt werden, um die spätere Auswertung nicht zu verfälschen.

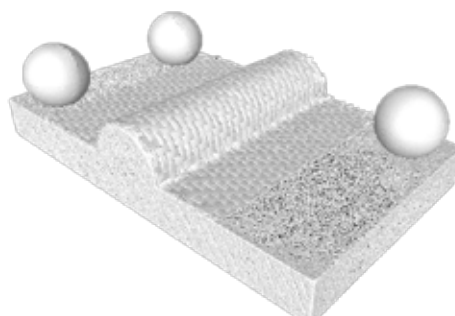
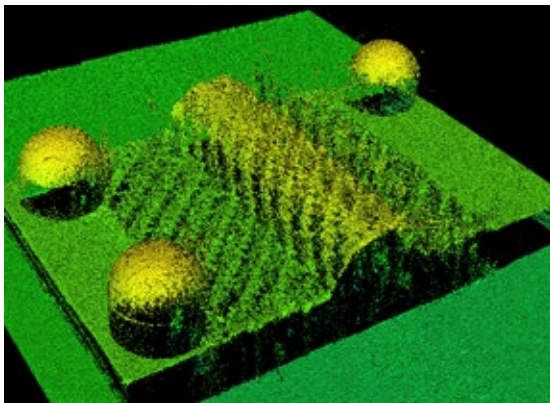


Abb.7: CT-Aufnahme des Referenzmaterials : konvexer Halbzylinder mit 3K-Gewebe



_Abb.8: LTS-Aufnahme des Referenzmaterials : konvexer Halbzylinder mit 3K-Gewebe

Auswertung

Wie im vorherigen Abschnitt bereits erklärt wurde, müssen sämtliche Messergebnisse einigen Manipulationen unterzogen werden, bevor sie gegenübergestellt werden können. Es werden unabhängig von der Geometrie zwei unterschiedliche Konzepte verfolgt. Zum einen werden gezielt geometrische Formen wie zum Beispiel Halbzylinder analysiert und hierbei Daten wie Durchmesser oder relative Schräglage bezüglich des durch an den Referenzmaterialien angebrachten Positionierkugeln aufgespannten kartesischen Koordinatensystems definiert. Die Standardform „Zylinder“ kann dabei teilautomatisch von der Auswertesoftware erkannt werden.

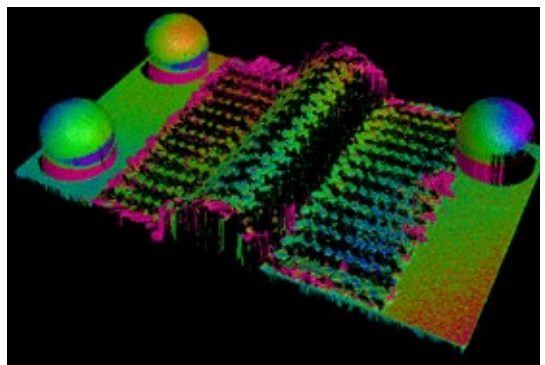
Hierfür werden an den wichtigsten Randzonen der Geometrie manuell Messpunkte gesetzt, bevor diese mit einem automatischen Rastergitter überzogen werden, welches nach dem Gauß'schen Ausgleichsverfahren berechnet wird. Letzteres wird mithilfe von automatisch gesetzten Antastpunkten mit einer Schrittweite von 10µm erstellt. Jedes Referenzmaterial, unabhängig von textilem Halbzeug oder geometrischer Form, wird nach diesem Vorgehen ausgewertet.

Sämtliche Messergebnisse für eine Prüfreihe (25 Messungen) werden anschließend pro Referenzmaterial durch Berechnung der kombinierten Messunsicherheit qualitativ bewertet. Hierbei werden die Kalibrierunsicherheit des Kalibrierkörpers (=Referenzmaterial) u_{CAL} , die Streuung der Lasertriangulationsergebnisse u_{EVR} , sowie die systematische Abweichung (=Bias) zwischen LTS und CT u_{BI} , berechnet.



_Abb.9: Berechnung der kombinierten Messunsicherheit

Zum anderen werden auch vollflächige Soll-Ist-Vergleiche durchgeführt, in denen die Scans des Lasertriangulationsportals den Aufnahmen des Computertomographen gegenüber gestellt werden, um so signifikante Abweichungszonen, sowohl systematische als auch zufällige, aufzudecken. Da es sich bei den „Soll“-Aufnahmen nicht um CAD-Modelle, sondern um reale, mit dem Computertomographen vermessene Modelle handelt, existieren keine fertigungsbedingten Abweichungsfehler bezüglich den LTS-Scans (= Ist-Modelle). Hierbei wird die kumulierte Abweichung der Oberfläche der Messobjekte berechnet.



_Abb.10: Soll-Ist-Vegleich einer CT- und einer LTS-Aufnahme

Ergebnisse und Bewertung

Die Streuung des Lasertriangulationsportals stellt sich, unabhängig vom analysierten Referenzmaterial, als der jeweils dominierende Faktor heraus, welcher die Messunsicherheit stark erhöht. Erstere variiert sehr stark je nach verwendetem CFK ($80,847\mu\text{m} < u_{EVR} < 153,798\mu\text{m}$). Dennoch bewährt sich die Entscheidung, den Computertomographen als Kalibriergerät einzusetzen,

hierbei liegt die maximale Kalbrierunsicherheit bei unter $4\text{ }\mu\text{m}$. Die Fähigkeit des Lasertriangulationsportals liegt mit einer kombinierten Messunsicherheit von beispielsweise $112\text{ }\mu\text{m}$ für 3K-Gewebe (auf konvexem Halbzylinder drapiert), welches eine in der Automobilindustrie sehr verbreitete Form ist, auf einem guten Niveau. Dennoch ist einiges an Verbesserungspotential im Laufe der Auswertung und Analyse der Ergebnisse aufgedeckt worden. Vor allem die Soll-Ist-Vergleiche zeigen, dass im Worst-Case Szenario (senkrechte Flanken von Prüfkörpern) zum Teil lückenhafte Scans erstellt werden. Gleiches gilt, wenn die Rovings senkrecht zur Scanrichtung liegen.

Abschließend lässt sich festhalten, dass sich das LTS-Portal nach jahrelanger Forschung am Institut für Produktionstechnik als potentielle, innovative Inline-Qualitätsstation einstufen lässt, wobei klares Augenmerk auf die Sensibilität der optischen Eigenschaften des Prüfmaterials CFK gelegt werden muss. Diese stellt die wohl wichtigste Stellschraube bei der Feinjustierung dar. Die im Rahmen dieser Arbeit entstandene Bewertungsmethode lässt sich jederzeit neu durchführen, ohne dass die zeitintensiven Referenzmessungen mit KMG und CT neu durchgeführt und ausgewertet werden müssen.

Literaturverzeichnis

- Brabandt, D. (2015), Konzept zur Bestimmung der Messunsicherheit für Preforms. Karlsruhe – wbk.
- Brabandt, D. & Lanza, G. (2015), Evaluating the uncertainty of inline-measurements in the production of carbon fiber preforms by computed tomography, Paris.
- Christoph, R. & Neumann, H. J. (2012), Röntgentomografie in der industriellen Messtechnik, Süddeutscher Verlag onpact GmbH, München. ISBN: 978-3-86236-032-3.
- Dutschke, W. & Keferstein, C. P. (2005), Fertigungsmesstechnik. Teubner Verlag, Wiesbaden. ISBN: 3-519-46322-9.
- Eickenbusch, H. & Krauss, O. (2013), Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau.
- Ernst, C.-S.; Eckstein, L. & Olschewski, I. (2012), Abschlussbericht Co2-Reduzierungspotenziale bei Pkw bis 2020.
- Fleischer, J. & Wagner, H. (2013), Automatische Herstellung von Preforms für schalenförmige CFK-Bauteile durch Anwendung einer featurebasierten Technologieplanung. 19. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde.
- Flemming, M.; Ziegmann, G. & Roth, S. (1995), Faserverbundbauweisen. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-63352-2.
- Fraunhofer ICT (2015), Thermoset and thermoplastic process technologies for high-volume production of carbon-fiber-reinforced automotive parts, Fraunhofer Institut für Chemische Technologie.
- Timm, H. (2008), Karosseriewerkstoffe der Zukunft, Aachen.
- Weckenmann, A. (2012), Koordinatenmesstechnik. Carl Hanser Verlag, München, Wien. ISBN: 978-3-446-40739-8.

Prix d'Excellence 2015 mention très bien

TRANSPORTVERHALTEN VON NANOPARTIKELN IN WASSERGESÄTTIGTEN PORÖSEN MEDIEN – ENFLUSS VON REFRAKTÄRER ORGANISCHER MATERIE UND VISUALISIERUNG MITTELS MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE (MRT)_

Laure Cuny

Der verstärkte Einsatz von synthetischen Nanopartikeln, wie z. B. die Verwendung von eisenbasierten Partikeln in der Umwelt oder im menschlichen Organismus führt unweigerlich zur Frage nach ihrer Freisetzung und folglich nach ihrer Mobilität in natürlichen wässrigen Systemen. Ein tieferes Verständnis des Transportverhaltens dieser Nanopartikel in wässrigen porösen Medien ist daher unabdingbar.

Motivation und Zielsetzung

Die Nanotechnologie hat in den letzten Jahrzehnten eine rasante Entwicklung erlebt, und Nanomaterialien wie zum Beispiel Nanopartikel (NP) werden zunehmend in den verschiedensten Produkten eingesetzt. Aufgrund ihres sehr großen Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnisses weisen NP oft fundamental andere Eigenschaften als entsprechende makroskalige Materialien auf, was sie für Industrie, Forschung, Medizin und Technik so interessant macht.

Ein besonderes Augenmerk liegt derzeit auf superparamagnetischen Eisenoxid-NP (superparamagnetic iron oxide nanoparticles, SPION), die verstärkt im biomedizinischen Bereich ihre Anwendung finden. Über Abwässer aus Industrie und Haushalt wird der vermehrte Einsatz von SPION unweigerlich zu ihrem Eintrag in Gewässer und Böden führen. Zudem haben Eisenoxid-NP ihr Potential zur Sanierung von verunreinigten Grundwasserleitern gezeigt, so dass in Zukunft auch mit einem beabsichtigten Eintrag der NP in die Umwelt zu rechnen ist.

Um mögliche Risiken und den Nutzen der SPION gezielter abwägen zu können, ist es unabdinglich, ein tieferes Verständnis über ihr Transportverhalten in natürlichen Systemen zu entwickeln. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Frage nach der Auswirkung von natürlicher organischer Materie (NOM) auf das Transportverhalten der Partikel von großer Relevanz, da NOM in aquatischen Systemen und in Böden ubiquitär ist. Dieser Frage sollte in der vorliegenden Arbeit nachgegangen werden. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war der Vergleich des Transportverhaltens verschiedener SPION, die sich hinsichtlich ihrer Primärpartikelgröße und Oberflächenfunktionalisierung unterscheiden.

Die Untersuchung des Transportverhaltens von Partikeln in wassergesättigten porösen Medien (hier: Quarzsand) erfolgt in der Regel mittels Säulenversuchen. Ein gängiges Verfahren ist hierbei die Analyse von Durchbruchkurven, bei denen die eluierten Partikel am Säulenausgang

detektiert werden. Allerdings liefert dieser Ansatz nur wenig Information über eventuelle Inhomogenitäten des porösen Mediums und über die tatsächliche räumliche Verteilung der Partikel. Magnetresonanztomographie (MRT) zeigt hier ein vielversprechendes Potential als alternative, nicht-invasive Untersuchungsmethode, da sie durch Visualisierung des Partikeltransports innerhalb des porösen Mediums wertvolle Zusatzinformationen zu liefern vermag. Beide Ansätze wurden in dieser Arbeit angewendet; ein Hauptaugenmerk lag darauf, die Anwendbarkeit und Leistungsfähigkeit der MRT für die aufgeführten Fragestellungen zu untersuchen. Dies sollte zu einem besseren Verständnis des Transportverhaltens von NP in porösen Medien und der dabei relevanten Prozesse beitragen.

Ergebnisse und Diskussion

Vier verschiedene SPION wurden in dieser Arbeit hinsichtlich ihres Transportverhaltens in Reinstwasser (Milli-Q) und in Gegenwart von NOM, hier in Form von Huminsäure (humic acid, HA), untersucht (Tabelle 1).

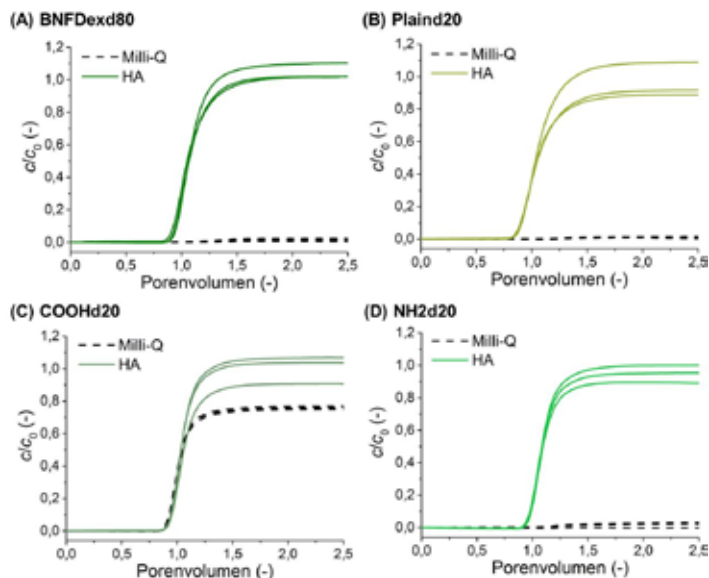
Die Aufnahme von Durchbruchkurven verdeutlichte, dass sich die Oberflächenbeschaffenheit von ansonsten identischen SPION entscheidend auf ihr Transportverhalten in porösen Medien auswirkt (Abbildung 1). Je nach Funktionalisierung (keine, -COOH oder -NH₂) variierte die Mobilität der Partikel in Milli-Q von vollständigem Rückhalt bis hin zu nahezu vollständigem Durchbruch. Da sich bisherige Arbeiten in der Literatur meist nur auf das Kernmaterial der untersuchten NP beschränken, wird ersichtlich, wie wichtig eine Basischarakterisierung der verwendeten Partikel für die Interpretation der Ergebnisse und Vorhersage des Partikelverhaltens ist.

Eine Erklärung für das unterschiedliche Transportverhalten lieferte das bei gleichem pH-Wert unterschiedliche Zetapotential (ZP) der Partikel, das einen Rückschluss auf die Partikelladung erlaubt (Tabelle 1). Partikel mit einem ZP nahe Null unterliegen keiner elektrischen Abstoßung zu den negativ geladenen Sandkörnern des porösen Mediums und können sich folglich irreversibel anlagern, was ihren vollständigen Rückhalt erklärt.

Ein negatives ZP wie im Fall der COOH-funktionalisierten SPION führt hingegen zu einer starken elektrischen Repulsion zwischen den NP und den Sandkörnern, so dass ein nahezu vollständiger Durchbruch der NP erfolgt. Etwas anders liegt der Fall bei den NH₂-funktionalisierten SPION:

Tabelle 1: Hauptparameter der verwendeten SPION

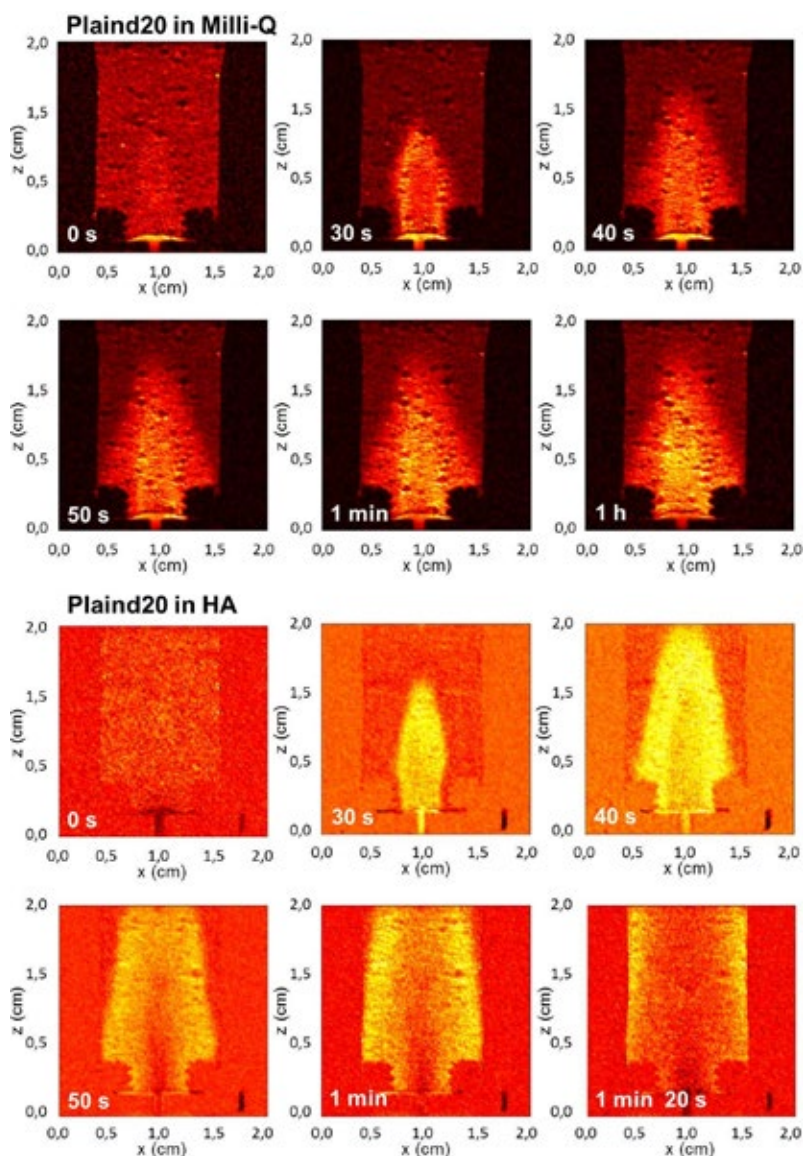
SPION	Produktname	Oberflächen-funktionalisierung	Partikel-durchmesser d_p (nm)	Zetapotential ZP in Milli-Q (mV)	Zetapotential ZP in HA (mV)
BNFDexd80	BNF-Dextran	-	80	5 ± 5	-35 ± 6
Plaind20	nanomag®-D-sprio	-	20	-1 ± 3	-14 ± 6
COOHd20	nanomag®-D-sprio	-COOH	20	-22 ± 8	-30 ± 10
NH2d20	nanomag®-D-sprio	-NH ₂	20	-13 ± 8	-14 ± 9



_1 Kumulative Durchbruchkurven der SPION Suspensionen in Milli-Q (gestrichelte Linien, $n = 3$) und in HA (durchgezogene Linien, $n = 3$), dargestellt als normierte Partikelkonzentration im Eluenten über dem normierten Porenvolumen der Transportsäule. Mit Ausnahme von COOHd20 wurden die SPION in Milli-Q vollständig zurückgehalten. Die Anwesenheit von HA führte hingegen bei allen SPION zu einem nahezu vollständigen Durchbruch.

Hier zeigt sich zwar ein negatives ZP für die injizierte Konzentration, es konnte jedoch gezeigt werden, dass sich für diese Partikelsuspension der pH-Wert und folglich das ZP mit zunehmender Verdünnung veränderte, was einen erheblichen Einfluss auf das Transportverhalten hatte. Da Partikelsuspensionen während ihres Transports immer einer Verdünnung durch räumlich unterschiedliche Fließgeschwindigkeiten sowie Diffusion unterliegen, darf dieser Aspekt des Partikelverhaltens nicht vernachlässigt werden. Die Relevanz der eingesetzten

Partikelkonzentration wurde in bisher veröffentlichten Arbeiten kaum betrachtet, da die Eigenschaften der NP nicht in Abhängigkeit ihrer Konzentration untersucht wurden. Der erhebliche Einfluss von NOM in Form von HA auf die Mobilität der NP konnte im Detail aufgezeigt werden. Aus der Adsorption von NOM an die Partikeloberfläche der SPION resultierte eine signifikante Verringerung des ZP der Partikel, was ihr Mobilitätsverhalten drastisch erhöhte, zum Teil von vollständigem Rückhalt zu nahezu komplettem Durchbruch (Tabelle 1, Abbildung 1).

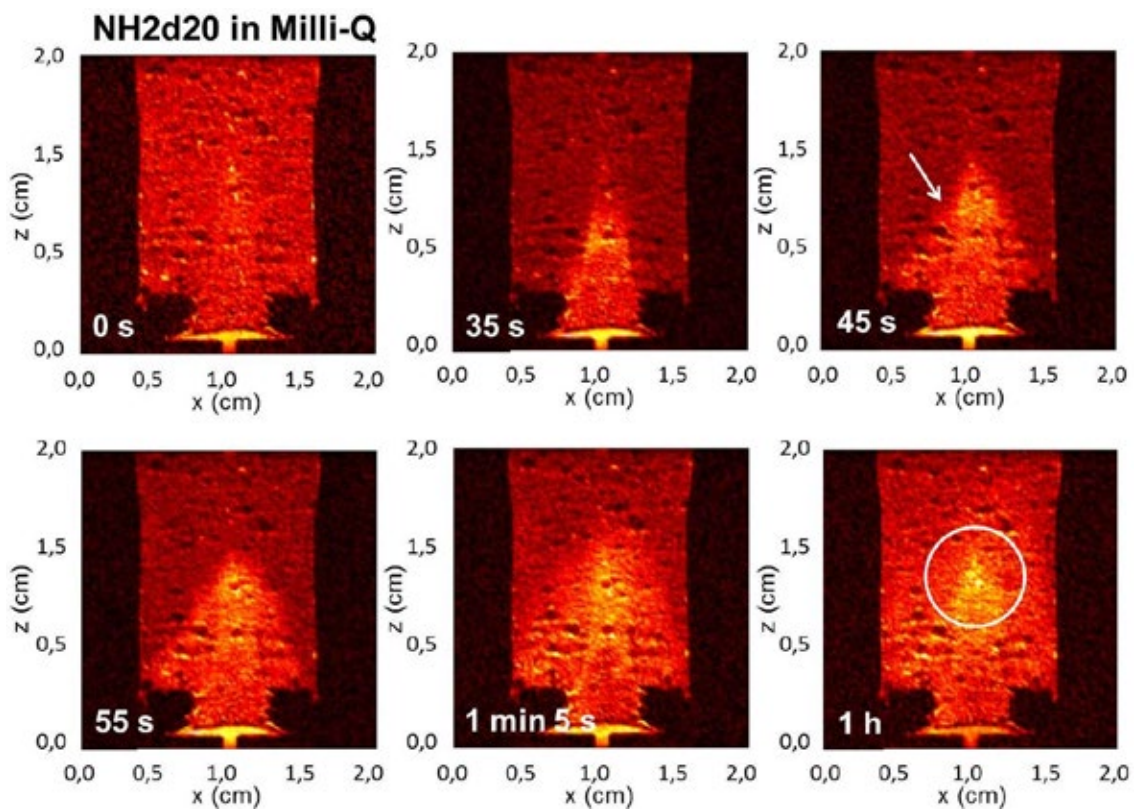


2 MRT-Bilder von Plaiind20 in Milli-Q (obere zwei Reihen) und in HA (untere zwei Reihen) am Säuleneingang. Die NP sind als heller kegelförmiger Bereich erkennbar. In Anwesenheit von HA wurden die SPION vollständig durch die Säule transportiert, wohingegen die Abwesenheit von HA deren Anlagerung an das Säulenmaterial zur Folge hatte.

Durch die Anwendung der MRT konnten die Ergebnisse der Durchbruchkurven nicht nur bestätigt werden, sondern es wurden zudem wichtige Zusatzinformationen bezüglich des Partikeltransports geliefert, da eine detaillierte Visualisierung der SPION innerhalb des porösen Mediums ermöglicht wurde. Der positive Effekt von NOM auf die Mobilität der SPION, hier beispielhaft dargestellt anhand von Plaiind20, konnte durch MRT visualisiert werden (Abbildung 2). Zusätzlich konnte die räumliche Verteilung der SPION am Säuleneingang dargestellt werden, sowie der genaue Ort des Partikelrückhalts beziehungsweise der genaue Transportpfad der Partikel innerhalb der Säule. Des Weiteren erlaubte MRT eine Darstellung der (In) Homogenitäten des Mediums, dargestellt in Abbildung 3. Die Verformung des kegelförmigen Profils der NP erlaubt Rückschlüsse auf die Packungsgüte des Säulenmaterials, die bei reinen Durchbruchkurven nicht ersichtlich ist.

Während der Erarbeitung der zur Visualisierung notwendigen Parameter wurde der große Einfluss des porösen Mediums auf den Bildkontrast erkannt. Es muss daher bedacht werden, dass Kalibrierungen zur Konzentrationsermittlung der Partikel sowie die Optimierung der Visualisierungsparameter immer in Gegenwart des relevanten Mediums zu erfolgen haben. Dies wird in einer Mehrzahl der bisher beschriebenen MRT-Versuche nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Ergebnisse dieser Arbeit zu neuen Erkenntnissen im Transportverhalten von SPION, insbesondere durch die detaillierten MRT-Bilder, geführt haben. In zukünftigen Arbeiten sollten die entsprechenden Auswirkungen von Fulvinsäure, NOM anderer Herkunft sowie der Ionenstärke auf das Transportverhalten der SPION untersucht werden. Die Erstellung einer Konzentrationskartierung für die MRT-Bilder würde sich ebenfalls empfehlen, um eine quantitative Auswertung des Transportverhalten der SPION zu ermöglichen.



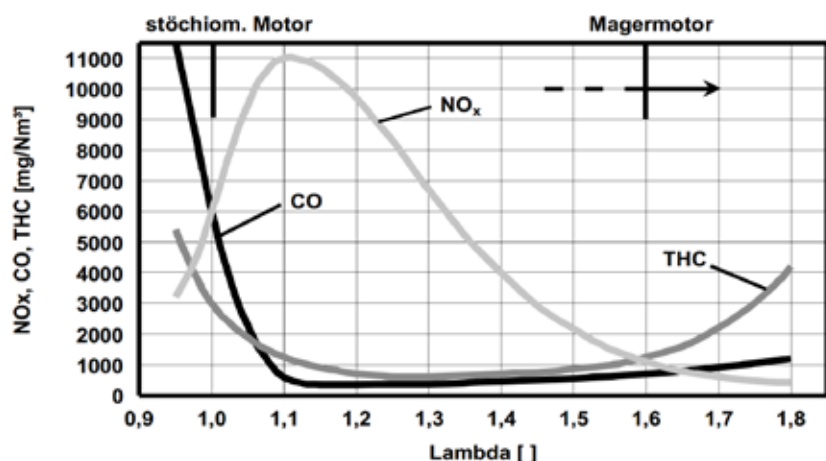
_3 MRT-Bilder von NH2d20 in Milli-Q am Säuleneingang. Die NP sind als heller kegelförmiger Bereich erkennbar, sowie einer Akkumulation ca. 1 cm vom Säuleneingang entfernt. Der Pfeil zeigt Inhomogenitäten des Säulenmaterials an, der Kreis hebt die lokale Akkumulation der SPION hervor.

Im Rahmen eines Forschungsprojektes am Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren der TU München soll zur Untersuchung der Ursachen des Methanschlupfes bei Großgasmotoren Konzepte zur Beeinflussung der Ladungsbewegung mit Hilfe von CFD-Simulationen entwickelt werden. Die Strömungs- und Verbrennungssimulationen werden anhand eines am Lehrstuhl noch wenig etablierten Softwarepaketes der Firma CD-adapco durchgeführt.

Prix d'Excellence 2015 mention très bien

LADUNGSBEWEGUNGS- UND VERBRENNUNGSSIMULATION EINES GASMOTORS IM MAGERBETRIEB

Michel Haag



Typischer Verlauf des Schadstoffanteils über dem Verbrennungsluftverhältnis im Abgas

© Dr. Günther Herdin

In den vergangenen Jahrzehnten wurde wegen des weltweiten Klimawandels immer mehr Wert auf den reduzierten Ausstoß von Treibhausgasen gelegt. 1997 wurde in Kyoto ein Abkommen beschlossen um die anthropologischen Treibhausgase zu reduzieren. Um die teilweise ehrgeizigen Ziele im Bereich des Umweltschutzes zu erreichen, müssen Alternativen zu den etablierten Energiesystemen gefunden werden. Im Bereich der Motorentechnik bietet die Verwendung von Gasmotoren einige Vorteile.

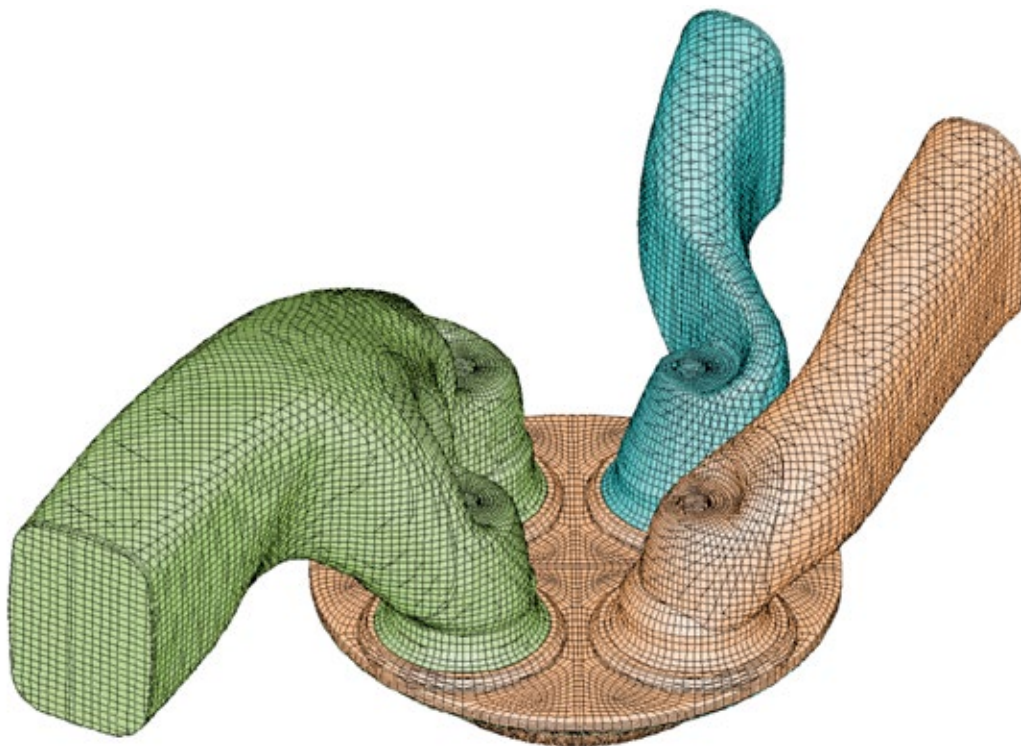
Die ersten Gasmotoren wurden bereits vor über 150 Jahren gebaut. Damals wurde der Brennstoff aus vergaster Kohle oder Öl gewonnen. Heutzutage kommt vor allem Erdgas zum Einsatz. Erdgas, das hauptsächlich aus Methan besteht, kann gegenüber allen anderen Kohlenwasserstoffverbindungen das niedrigste C/H-Verhältnis vorweisen. Noch besser bezüglich den CO₂-Emissionen, ist die Verbrennung von Biogasen. Diese werden aus Klärschlamm, Vergasung von biologischen Stoffen oder Ähnlichem gewonnen. Bei der Verwendung von Gasen aus biologischen Primärquellen gilt die Verbrennung als CO₂-neutral.

Die verfasste Masterarbeit befasst sich mit der Strömungs- und Verbrennungssimulation eines mageren Großgasmotors. Die numerische Strömungsmechanik ist eine relativ junge Forschungsmethode. Da Strömungssimulationen sehr hohe Rechenkapazitäten benötigen, kamen diese erst in den vergangenen Jahrzehnten vermehrt zum Einsatz. Dies ist der

raschen Entwicklung der Computer in diesem Zeitraum zu verdanken. Mit der Kenntnis, wie sich die Ladung im Zylinder bewegt können Ansätze entwickelt werden um die Ladungsbewegung hinsichtlich einer sicheren und schadstoffarmen Verbrennung zu optimieren. Die Ladungsbewegung auf experimentelle Art und Weise zu bestimmen ist nur bedingt möglich. Die massive Bauart des Motorblocks und die hohen Temperaturen und Drücke im Brennraum erschweren den Zugang eines optischen Messsystems unter realen Bedingungen.

Die Motorgeometrie die für diese Arbeit verwendet wurde basiert auf dem MTU 4000 Gasmotor. Dieser wurde für den stationären Betrieb entwickelt. In Kombination mit einer Wärmeauskopplung, kommt der MTU 4000 in Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen für Wohnkomplexe, Schwimmbäder oder auch industrielle Anlagen zum Einsatz. Als Brennstoff können neben Erdgas zukünftig auch nicht fossile Gase wie Biogas oder Klärgas genutzt werden. Bei der 20-zylindrigen Ausführung erreicht der Gasmotor einen elektrischen Wirkungsgrad von 44,1% und einen Brennstoffnutzungsgrad von 84% bei einer Leistung von 2530 kWel. Am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der TU München befindet sich ein einzylindriger Forschungsmotor der auf dem MTU 4000 basiert. Dank verschiedener Testreihen am Prüfstand konnten die Messungen (Druck-, Temperatur- oder Brennverlauf) mit den Simulationsergebnissen verglichen werden.

Heutzutage kommen die meisten Großgasmotoren im homogenen Magerbetrieb ($\lambda > 1,6$) zum Einsatz. Magerbetrieb bedeutet, dass mehr Sauerstoff im Brennraum vorhanden ist als zur Verbrennung des gesamten Brennstoffes benötigt wird. In der Abbildung ist der Verlauf von Stickoxiden (NO_x), Kohlenmonoxid (CO) und unverbrannten Kohlenwasserstoffen (THC) im Abgas über dem Verbrennungsluftverhältnis dargestellt. Oberhalb eines Verbrennungsluftverhältnisses von $\lambda = 1$ sinken die THC- und de CO-Emissionen deutlich, da ab diesem Punkt ausreichend Sauerstoff für die vollständige Oxidierung des Brennstoffes zu Verfügung steht. Die NO_x Anteile im Abgas sinken erst bei höherem λ , weil hier die Temperatur wegen des hohen Luftüberschusses im Brennraum gering genug ist um die NO_x-Produktion zu hemmen. Ein Nachteil der Abmagerung des Brenngemisches ist der Anstieg der THC bei hohen λ . Zum einen ist die durch einen höheren Quench-Effekt



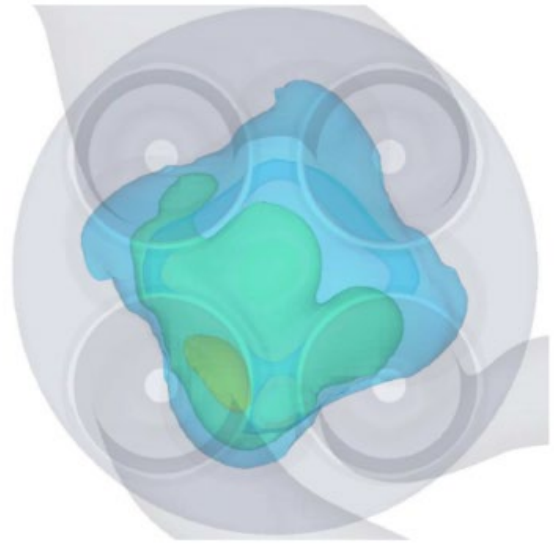
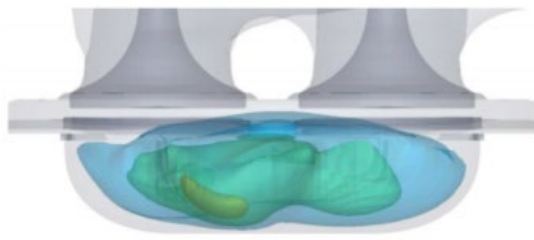
_Fertiges Volumennetz aus ES-ICE

aufgrund der niedrigen Verbrennungstemperatur bedingt. Der Quench-Effekt beschreibt im Allgemeinen das Flammlöschen. Dies geschieht hauptsächlich an den Brennraumwänden, da hier der Energieentzug größer als die Wärmefreisetzung der Flamme ist und die Flamme dadurch erlischt. Zum anderen sinkt die Zündwilligkeit des Gemisches mit steigendem λ , was zu häufigen Zündaussetzern führt. Dabei gelangt eine ganze Ladung unverbrannten Brennstoffes ins Abgas.

Die Ladungsbewegung im Zylinder hat einen großen Einfluss auf die Verbrennung. Die Strömungszustände während des Zündzeitpunktes sollen so sein, dass eine schnelle und sichere Verbrennung stattfindet. Zu hohe Strömungsgeschwindigkeiten können jedoch zum Ausblasen des Zündkerns führen. Der Zylinderkopf des MTU 4000 verfügt über einen Drall- und einen

Füllkanal. Ersterer erzeugt eine Drallströmung um die Zylinderachse. Hinzu kommt noch die kreissymmetrische Form der ω -Kolbenmulde. Diese stabilisiert die Drallströmung und beschleunigt die Tangentialströmung während des Kompressionshubes. Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten sind problematisch für eine sichere Zündung. Deswegen ist es hinsichtlich einer guten Verbrennung von Vorteil, den Drall vor dem Zündzeitpunkt (ZZP) zu zerstören. Während dem sich der Drall abbaut, wird turbulente kinetische Energie (TKE) produziert. Die turbulenten Strömungsbedingungen haben einen positiven Einfluss auf eine schnelle Verbrennung. Die TKE ist ein Qualitätsmaß für gute Verbrennungsbedingungen. Diese Größe ist nur rechnerisch und nicht experimentell ermittelbar.

Die Erstellung eines Rechenmodells für die numerische Strömungssimulation, auch CFD (computational fluid



_TKE-Iso-Flächen für die Trifoli-Mulde

dynamics) genannt, gliedert sich in mehrere Einzelschritte. Zuerst wird mit einer CAD-Software der Bereich der vom Fluid durchströmt wird, also der negative Volumenabdruck des Brennraumes erzeugt. Anschließend wird dieses Volumen tesseliert. Dabei wird ein feines aus Dreiecken bestehendes Oberflächennetz des Körpers erzeugt. Dieses Oberflächennetz stellt den Ausgangspunkt für die Netzgenerierung dar. Danach wird das Oberflächennetz verfeinert und in verschiedene Schlüsselkomponenten wie z.B. Ventile, Ein-, Auslasskanäle, etc. unterteilt. Hierfür wurde das CFD-Programm STAR-CCM+ des Softwareherstellers CD-adapco verwendet. Das fertige Oberflächennetz wird anschließend in ES-ICE importiert. ES-ICE ist für die Generierung des Netzes vor und während der Berechnung zuständig.

Beim Rechnernetz handelt es sich um ein strukturiertes Netz das im Großteil aus Hexaeder besteht. Die Form und Lage der einzelnen Zellen ist für die spätere Berechnung wichtig. Über verschiedene „Cell-Checks“ können bestimmte geometrische Zelleigenschaften geprüft werden die zu schlechtem numerischem Verhalten führen können. Sehr flache und lange Zellen oder Zellen mit spitzen Winkel sind zu vermeiden. Anders als bei anderen Anwendungsgebieten der CFD, ändert sich das Netz bei der Berechnung von Verbrennungsmotoren ständig. Dies ist auch erforderlich, da sich die Position des Kolbens und damit auch das Brennraumvolumen ständig ändern. Bei der Netzerzeugung geht das Programm so vor, dass z.B. während der Expansionsphase sämtliche Zellen soweit gestreckt werden bis ein bestimmter Wert erreicht wird.

Daraufhin werden die Zellen wieder gestaucht und eine zusätzliche Zellenreihe wird eingefügt. Der kritische Bereich ist der Ventilspalt zu dem Zeitpunkt an dem das Einlassventil gerade öffnet. Hier ist der Ventilspalt minimal klein, trotzdem müssen sich mindestens drei Zellen (zwei Wandzellen und eine Zelle in Mitte) im Spalt befinden. Dieses Problem wird dadurch umgangen, dass der Ventilspalt erst ab einem bestimmten Ventilhub (hier 0,1mm) durchströmt werden darf. Durch die verzögerte Einlasszeit muss ein Modellfehler in der Berechnung in Kauf genommen werden. Nachdem das Rechnernetz erstellt ist muss die Simulation noch konfiguriert werden. Hierbei muss eine Vielzahl von verschiedenen Parameter sowie die Anfangs- und Randbedingungen eingegeben werden. Für die Temperatur- und Druckrandbedingungen an den Ein- und Auslässen wurden die Werte aus den Prüfstandmessungen

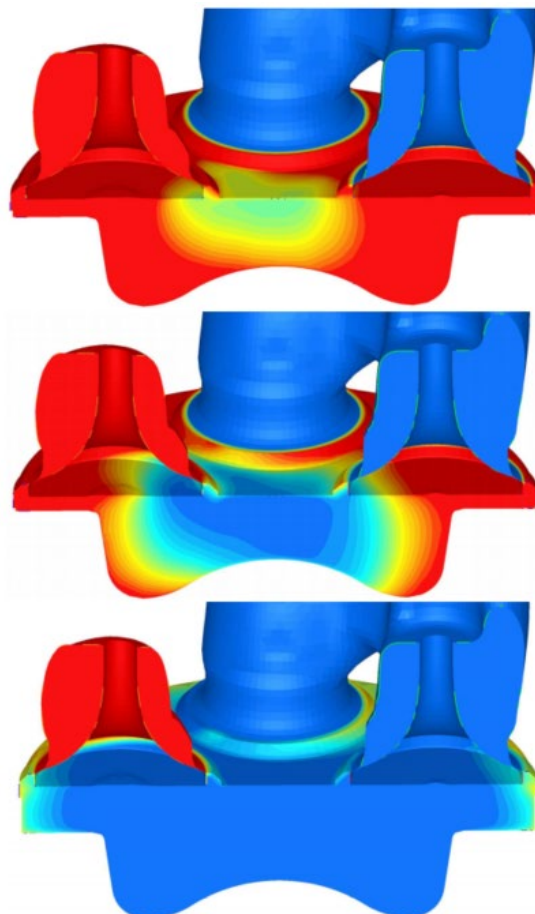
verwendet. Sobald das Modell bedatet ist, kann die Berechnung gestartet werden. Die Berechnung wird vom pro-STAR Solver durchgeführt. Hierbei werden die Reynoldsgemittelten Navier-Stokes Gleichungen (RANS) gelöst. Diese bestehen aus der Massen-, der Energie- und der drei Impulserhaltungsgleichungen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Simulationen mit verschiedenen Konfigurationen durchgeführt. Für jede Änderung in der Geometrie muss ein neues Netz erstellt werden. Für die verschiedenen Konfigurationen mit verschiedenen Netzfeinheiten liegen insgesamt sechs rechenfähige Netze vor. Mit diesen Netzen ist es möglich durch Änderung der Randbedingungen und Steuerzeiten verschiedene Betriebspunkte zu simulieren. Die Netzfeinheit kann bedeutend für die Qualität der Auswertung sein. Rechnernetze mit einer hohen Anzahl an Zellen sind generell gut geeignet für die 3-D Auswertung. So können Bereiche mit starker Konturänderung, wie die Ventilbereiche oder der Kolben, detaillierter untersucht werden. Es ist jedoch stets darauf zu achten, dass sich der numerische Fehler bei der Netzverfeinerung nicht vergrößert. Es wurden vier Netze mit verschiedenen Feinheitenstufen erstellt. Die Anzahl der Zellen liegt zwischen 372.000 Zellen und 1.617.000 Zellen. Je feiner das Netz ist, desto höher ist die Rechenzeit. Dies macht auch Sinn, da bei mehreren Rechenzellen auch entsprechend mehr Gleichungen gelöst werden müssen. Es haben sich Rechenzeiten zwischen 11,7 und 49,4 Stunden um 370° Kurbelwinkel zu simulieren (Ein ganzer Zyklus ist in 720° Kurbelwinkel unterteilt) ergeben. Diese langen Rechenzeiten sind ein großer Nachteil von CFD-Rechnungen. Deswegen muss stets ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Qualität der Ergebnisse getroffen werden. Neben der Netzfeinheit wurden auch noch andere Parameter wie die Zeitschrittweite untersucht, da dieser Wert einen großen Einfluss auf die Rechendauer hat.

Um gute Simulationsergebnisse zu erlangen, ist es wichtig, dass der Brennverlauf stimmt, dieser hat einen großen Einfluss auf den Druck- und den Temperaturverlauf. Um den Brennverlauf möglichst gut an den aus den Prüfstandmessungen anzupassen stehen mehrere Einstellparameter die aus dem Verbrennungsmodelle (ECFM-3Z) stammen zur Verfügung. Am Ende ist es gelungen den Brennverlauf bestmöglich einzustellen, dadurch konnten gute Druck- und Temperaturverläufe abgebildet werden die mit denen

aus den Prüfstandmessungen übereinstimmen. Sobald die verschiedenen Verläufe übereinstimmen, können die 3-D Ergebnisse ausgewertet werden. Unter anderem kann betrachtet werden wie sich die Flamme im Zylinder ausbreitet. Daraus kann analysiert werden ob sich die Flamme gleichmäßig in alle Richtungen verteilt oder auch an welchen Stellen die Flamme erlischt wodurch an diesen Stellen vermehrt Verbrennungsschadstoffe produziert. Ein weiterer Faktor der interessant für die Verbrennung ist, ist das Niveau der TKE kurz vor dem Zündzeitpunkt. Der Anteil und die Verteilung der TKE wurden für verschiedene Ventilsteuerzeiten und für verschiedene Kolbengeometrien genauer analysiert. In der Abbildung ist die Verteilung der TKE kurz vor dem Zündzeitpunkt anhand von Flächen mit konstanten TKE Werten dargestellt. Für diese Konfiguration wurde eine sog. Trifuli-Kolbenmulde verwendet. Dabei handelt es sich um eine Mulde die extra so geformt ist, um den Drall in der Kompressionsphase zu reduzieren und dadurch mehr TKE aufzubauen. Im Vergleich zum Standardkolben ist die TKE deutlich höher. Es ist jedoch zu erkennen, dass das TKE-Maximum nicht im Zentrum des Kolbens liegt, was nicht optimal für die Verbrennung ist.

Insgesamt konnten mit den Simulationsmodellen sehr gute Ergebnisse erzielt werden, vor allem bei der 1-D Auswertung. Man muss sich jedoch stets im Klaren sein, dass alle bei CFD-Simulationen verwendeten Modelle gewisse Fehler aufweisen. Auch die Abbildung der Geometrie entspricht nicht exakt die der Realität, da an einigen Stellen Vereinfachungen getroffen worden sind um das Rechnetz an die Motorgeometrie anpassen zu können. Trotz der Fehlerquellen ist die CFD Simulation unverzichtbar, wenn es darum geht verschiedene Strömungsgrößen wie den Drall oder die TKE abzubilden. Aufbauend auf den gewonnen Ergebnissen kann jetzt die Verbrennung detaillierter modelliert werden wobei es auch interessant ist zu prüfen inwiefern Biogas als Brennstoff verwendet werden kann. Zudem können verschiedenen Zündverfahren wie eine Vorkammerzündung in die bestehenden Modelle adaptiert werden.



_Darstellung der Flammenausbreitung anhand der Brennstoffmasse zu verschiedenen Zeitpunkten

Neben der üblichen Stahlbewehrung im Betonbau gewinnen textile Bewehrungen in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung. Durch die Unempfindlichkeit gegenüber Korrosion benötigen textilbewehrte Bauteile nur wenige Millimeter Betondeckung, um die Verbundspannung einzuleiten. Zudem können im Vergleich zum Stahlbetonbau sehr hohe Spannungen bei vergleichsweise kleinen Bewehrungsquerschnitten erreicht werden. So lassen sich mit Textilbeton leichte, dünne, filigrane und sogar dauerhafte Bauteile herstellen.

Prix d'Excellence 2015 mention très bien

ENTWICKLUNG EINES VERFAHRENS ZUR BESTIMMUNG DER ZUGFESTIGKEIT VON GETRÄNKTER TEXTILER BEWEHRUNG UNTER TEMPERATUREINFLUSS

Max Muller, M. Sc.

Einleitung

Heutzutage kommt der Verbundwerkstoff Textilbeton im Neubau von Fassadenplatten, Sandwichelementen, im Fußgängerbrückenbau aber auch für die Verstärkung und die Instandsetzung bestehender Gebäude vor. Dabei werden in der Baubranche hauptsächlich Bewehrung aus AR-Glas oder Carbon verwendet.

Im Gegensatz zu Carbon weist AR-Glas über die Lebensdauer einen Festigkeitsverlust auf. Die Unbeständigkeit von AR-Glas im alkalischen Milieu führt zu Glaskorrosion, welche durch eine Tränkung der Fasern größtenteils reduziert werden kann. Zusätzlich dient eine Tränkung der Fasern mit Epoxidharz oder Styrol-Butadien-Kautschuk dazu, zwei- bis dreimal höhere Tragfähigkeiten als bei ungetränkten Textilien zu erreichen. Gleichzeitig lassen sich so robuste und formstabile Bewehrungsstrukturen herstellen, die für die Bewehrung komplexer Bauteilformen, wie beispielsweise gegliederte Querschnitte oder Rahmenecken, von Vorteil sind.

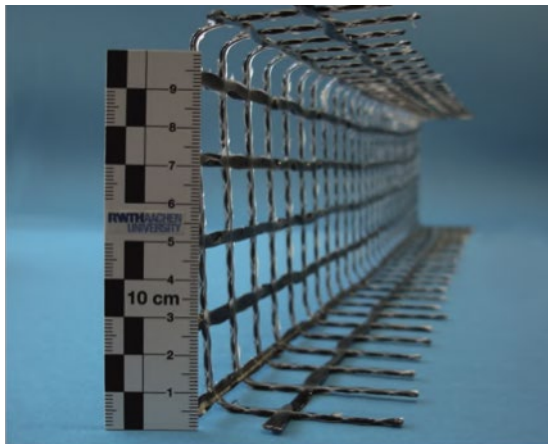


Abb. 1: Getränkte Carbonfaser-Formbewehrung: Halbe I-Träger Bewehrung © Kulas, C

Ziel von mehreren Forschungsprojekten der RWTH Aachen, insbesondere dem Institut für Bauforschung (IBAC), ist es, tragende Bauteile mit räumlichen Bewehrungsprofilen zu erzeugen. Eine solche Bewehrung eignet sich durch ihre robuste und formstabile Form besonders gut als praxismgerechte Betonbewehrung.

Problemstellung und Vorgehensweise

Je nach Anwendung als Außenbauteil sind Textilbetonbauteile einer direkten Sonneneinstrahlung

ausgesetzt so wie beispielsweise Textilbeton-Fassadenplatten. Bei hellen Platten sorgt diese Einstrahlung für eine Oberflächentemperatur von ca. 60°C bei dunkeln sogar ungefähr 80°C. Aufgrund der sehr geringen Betondeckungen von Textilbeton führen diese Temperaturen zu einer nahezu identischen Erwärmung der Bewehrung. Strukturbedingt sind die mechanischen Eigenschaften von Polymeren stark von der Umgebungstemperatur abhängig. Bei Überschreiten der Glasübergangstemperatur ändern sich beispielsweise diese Eigenschaften, was für die Tragfähigkeit von getränkten Textilien eine entscheidende Rolle spielt.

Obwohl für ungetränkte Fasern bei Raumtemperatur gute Aussagen über die maximale Zugtragfähigkeit gemacht werden können, lassen sich diese Verfahren nicht so einfach auf polymergetränkte Textilien übertragen. Dies liegt zum einen daran, dass aufgrund eines mangelhaften Verbundes zur Verankerung ein Versagen der textilen Bewehrung häufig nicht erreicht wird oder durch die Einspannung die sehr querdrukempfindlichen Fasern an dieser Stelle versagen. Im Gegensatz zu AR-Glas können Carbonfasern sehr hohe Spannungen aufnehmen, was bei gleicher Mantelfläche die Verankerung stärker belastet. Weil dieses Problem teilweise bereits bei 20°C Raumtemperatur vorkommt, gilt es ein bis mindestens 80°C (maximale Temperatur im Gebrauchszustand) temperaturbeständiges Verfahren zur Prüfung des Materialverhaltens in Bezug auf die Zugfestigkeit zu entwickeln, welches später auch als gängiges Prüfverfahren in der Industrie benutzt werden kann.

Aufgrund der derzeit noch unzufriedenstellenden Krafteinleitung und der fehlenden Kenntnis über die Zugtragfähigkeitseigenschaften für getränkte Textilien bei Temperatureinwirkung wurde im Rahmen dieser Arbeit der Normaltemperatureinfluss auf die Zugfestigkeit von getränkten textilen Bewehrungselementen für Textilbetonbauteile näher untersucht.

Zuerst erfolgte die Entwicklung eines geeigneten Prüfverfahrens zur Verankerung polymergetränkter Carbonfasern im Zugversuch unter Temperatureinfluss. Anschließend folgten mit diesem Verfahren einaxiale Kurzzeitzugversuche unter Temperatureinwirkung. Dabei wurden die Versuche stationär durchgeführt. Also bei konstanter Temperatur und weggesteuerter Verformung wurde der Roving (Faserstrang) bis zum Bruch belastet. Um eine Aussage über den Festigkeitsverlust der

Zugfestigkeit unter Temperaturen im Gebrauchszustand machen zu können, wurden die Versuche in 20 °C-Schritten von -15°C bis 80°C durchgeführt. Darüber hinaus wurden für weitere Erkenntnisse über die Polymertränkung zusätzlich noch Versuche bis teilweise +145°C gefahren.

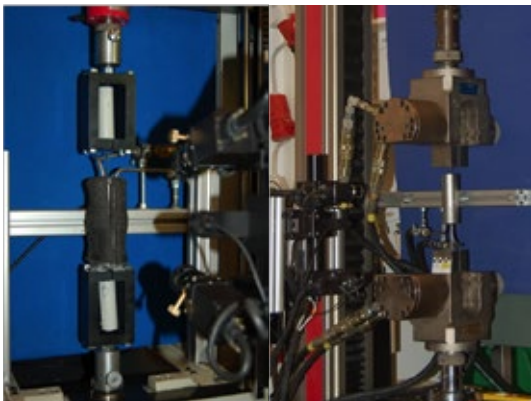
Mit den Prüfmethoden wurden dann die zwei der heutzutage meistverwendeten Tränkungs polymeren in der Baubranche geprüft und gegenübergestellt: ein lösungsmittelhaltiges (Epoxidharz (EP)) und ein lösungsmittelfreies (Styrol-Butadien-Kautschuk (SBR)) Tränkungs polymer. Die Basis Carbon-Bewehrung war dabei immer dieselbe. Die Versuche wurden sowohl in Kett- (parallel zur Produktionsrichtung der Textilherstellmaschine) als auch in Schussrichtung (quer zur Produktionsrichtung) der Textilien geprüft. Dabei wurden in dieser Arbeit hauptsächlich folgende Ziele verfolgt:

- _Ermittlung und Auswertung der Spannungs-Dehnungs-Linien der Textilien
- _Quantifizierung des Temperatureinflusses auf die Zugfestigkeit
- _Bestimmung des Einflusses des Tränkungs materials und der Herstellrichtung auf den Festigkeitsverlust
- _Vergleich mit vorhandenen Ergebnissen von ungetränkten Carbon-Bewehrungen

Versuchsaufbau

Im Laufe der Untersuchungen wurden hauptsächlich zwei Versuchsaufbauten entwickelt mit der die Ermittlung von Zug-Spannungs-Dehnungs-Linien von getränkten textiler Carbon-Bewehrung bis zu ca. 150°C reproduzierbar möglich ist:

- _Eingegossene Rovingenden für Rovings mit einer Epoxidharztränkung (Abbildung 2 links). Hierbei werden die beiden Rovingenden in ein weiteres Verankerungskleber eingeklebt. So kann die Kraft durch Haftung im Verankerungsharz und einer Stahlkonstruktion an die Prüfmaschine weitergeleitet werden.
- _Hydraulische geregelte Klemmbacken für Rovings mit einer Styrol-Butadien-Kautschuk Tränkung (Abbildung 2 rechts). Dabei werden die Enden zwischen ein Dichtungsmaterial und anschließend unter Querdruck von Hydraulikklemmbacken zur Prüfmaschine verankert.



_Abb.2: Zwei entwickelte Versuchsaufbauten: bestehend aus Verankerungskonstruktion, Temperierrohr mit Klimagerät, Prüfmaschine und optischem Messsystem.

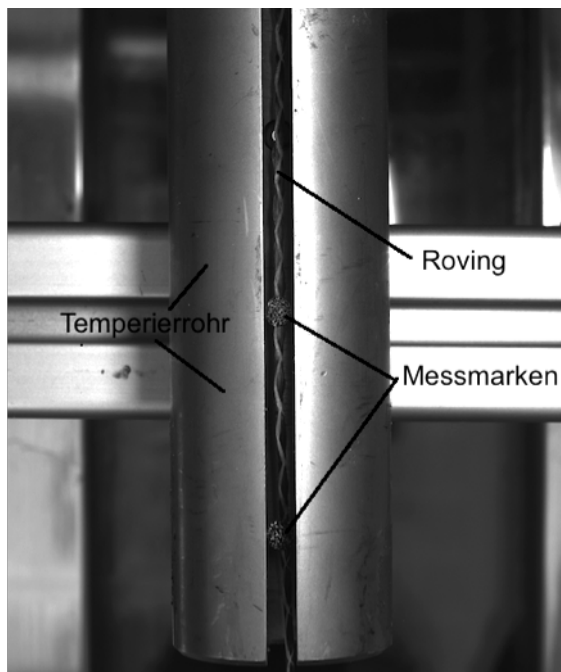
Aufgrund unterschiedlicher Oberflächenstrukturen von SBR- und EP-getränkten-Bewehrungen konnte die Verankerung für SBR-getränkte Rovings nicht wie bei der EP-Tränkung mit eingegossenen Rovings erfolgen. Deshalb wurden für SBR-getränkte Rovings die beiden Enden zwischen ein zwei mm-dickes Dichtungsmaterial geklemmt, welches wiederum über hydraulisch geregelte Klemmbacken festgeklammert wurde. Die Hydraulikklemmen werden dabei über einen Kompressor gesteuert. Durch den gewünschten Öl-Druck lässt sich die gewünschte Klemmbackenkraft einstellen. Trotz der vorher erwähnten Querdruckempfindlichkeit der Fasern führte diese Prüfmethode zu zufriedenstellenden Ergebnissen, bei dem kein Herausziehen aus der Verankerung festgestellt werden konnte und ein Versagen auf der freien Länge eintrat.

Das am Institut für Bauforschung (ibac) entwickelte sogenannte Durchlauftermperierrohr ist eine Hülse mit einem Schlitz auf der Seite, welches mit einem Temperieraggregat verbunden ist. Von hier aus strömt mit Hilfe einer Pumpe eine Sole durch gedämmte Schläuche zum Temperierrohr und wieder zurück. Die Regelung der Temperatur findet extern mit einem Temperaturfühler in der Innenseite des Temperierrohres statt. Durch diese temperaturregulierbare Hülse wird der Roving durchgeführt und der Heiz- oder Kühllast ausgesetzt.

Eine weitere Herausforderung neben der Krafteinleitungszone ist die Messung der exakten Dehnung des Rovings durch zusätzliche Messtechnik. Der Maschinenweg misst neben der Rovingverformung auch noch die Verformung der Lasteinleitungsbestandteile. Dieser Effekt und die Dehnung in der Verankerungshülse sorgen für größere Werte als die reale Textildehnung. Die Befestigung von konventionellen Dehnungsmessstreifen oder induktiven Wegaufnehmern ist durch die hohe Querdruckempfindlichkeit der Fasern nicht realisierbar. Aus diesem Grund wurde ein optisches Messsystem, welches berührungslos die Verformung misst, benutzt. Der Vorteil dieser digitalen Nahbereichsphotogrammetrie gegenüber den traditionellen Methoden ist, dass durch das berührungslose Messen kein Einfluss auf das Messobjekt besteht, was bei den herkömmlichen Dehnungsmessmethoden nicht unbedingt gegeben ist.

Das Messverfahren funktioniert durch zwei Kameras, die zwei Referenzpunkte am Probekörper im Raum (3Dimensional) erfassen und dann während der Prüfung die relative Verschiebung dieser Punkte messen. Durch die 3D-Messung kann die genaue Entfernung der Kameras zum Messobjekt bestimmt werden. Da der Roving nie im exakt gleichen Abstand zum Messgerät steht, kann dies durch das Messsystem erfasst werden. Eine 3D-Messung liefert somit eine höhere Messgenauigkeit als beispielsweise eine 2D-Messung mit nur einer Kamera. Mit Hilfe der Ausgangslänge lässt sich so die Dehnung der getränkten Carbonfasern erfassen. Damit die Kameras die Referenzpunkte gut erfassen, muss ein stochastisches Messfeld am Prüfkörper sichtbar sein. Da die Rovings zu dünn sind, um ein solches Messfeld aufzusprühen, wurden im Abstand von 50 mm kleine runden Messmarken mit stochastischem Muster am Roving mit einem temperaturbeständigen schnell härtenden Kleber festgeklebt.

Durch das Messen beider Kameras durch den Schlitz, konnte die genaue Dehnung an der temperaturbelasteten Stelle innerhalb des Durchlauftermperierrohres bestimmt werden. Das Messbild der Kamera ist in der Abbildung 3 dargestellt.



_Abb.3: Bild des Optischen Messsystems mit Sicht durch den Schlitz in die Innenseite des Temperierrohres

Nach dem Einbau in die Prüfvorrichtung (hydraulische Klemmhalterung oder Stahlhalterung für eingegossene Rovingenden) wurden alle Proben erst nach mindestens 15 Minuten geprüft. So konnten sich die getränkten Filamente an die vorgegebene Temperatur anpassen, und es konnte von einer konstanten Textiltemperatur im Bereich des Dehnmessfeldes ausgegangen werden. Mit einem Infrarotmessgerät wurde die Oberflächentemperatur im Inneren des Durchlauftermperierrohres kontrolliert. Bei zu großen Abweichungen zur gewählten Solltemperatur wurde die Temperatur der Sole über das Klimagerät angepasst.

Ergebnisse

Die geprüften Rovings wiesen bei allen Versuchen ein nahezu linearelastisches Materialverhalten bis zum Bruch auf (siehe Abbildung 4). Die EP-getränkten Rovings brechen dabei mit Emission von Schall in Form eines lauten Knalls. Die Bruchstelle ist klar am Roving zu erkennen und verläuft nahezu senkrecht zur Faserrichtung. Bei der SBR-getränkten-Bewehrung bewirkte der Bruch ein Aufspreizen der Filamente quer zur Faserrichtung.

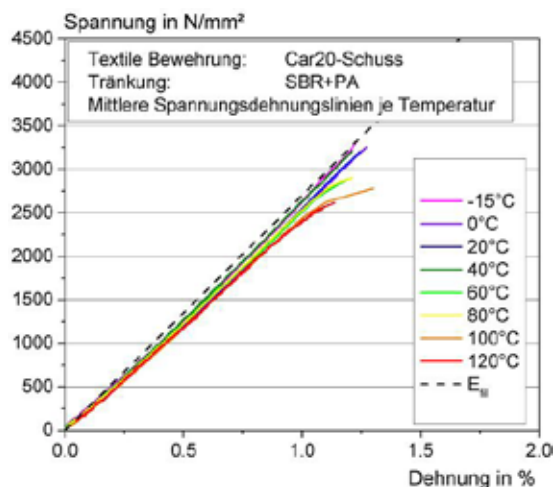


Abb. 4: Spannungs-Dehnungs-Linie in Abhängigkeit der Prüftemperatur bis 120°C: SBR+PA Tränkung; Darstellung des Mittelwertes (n=5)

Im Allgemeinen wurde bei allen getränkten Carbonrovings unabhängig vom Tränkungspolymer und der Herstellrichtung mit steigender Heizlast ein zugtragfähigkeitsmindernder Einfluss festgestellt. Weiter versagten nahezu alle Prüfkörper unabhängig

der Temperatur auf ihrer freien Länge. Versuche mit Versagen im Bereich der Einspannung infolge eines Verbundversagens zwischen dem getränkten Roving und der Verankerung gingen nicht in die Wertung mit ein.

Die wesentlichen Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

– Sowohl SBR +PA als auch EP-getränkte Rovings weisen in Schussrichtung bei Raumtemperatur eine Zugbruchspannung von ca. 3000N/mm² auf.

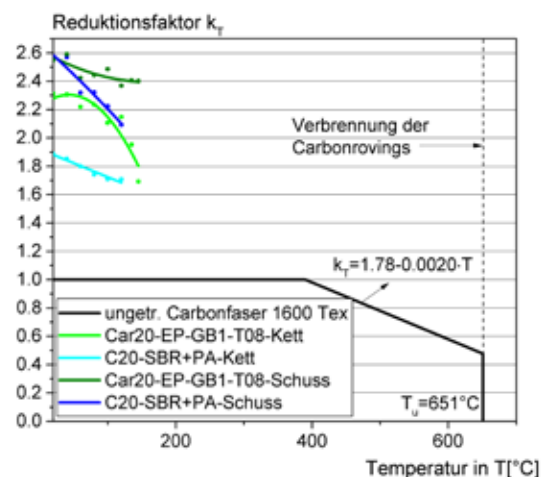


Abb. 5: Verhältnisfaktor in Bezug auf ungetränkte Carbonrovings ($f_{RT}=1250 \text{ N/mm}^2$) mit Ergebnissen der stationären Zugversuche dieser Arbeit und instantanen Zugversuchen (25 K/min)

– Bei EP-getränkten-Bewehrungen ist bei maximalen Temperaturen im Gebrauchszustand (+80°C), unabhängig der Herstellrichtung, kein signifikanter Festigkeitsverlust zu beobachten (lediglich 5 % zur Raumtemperatur).

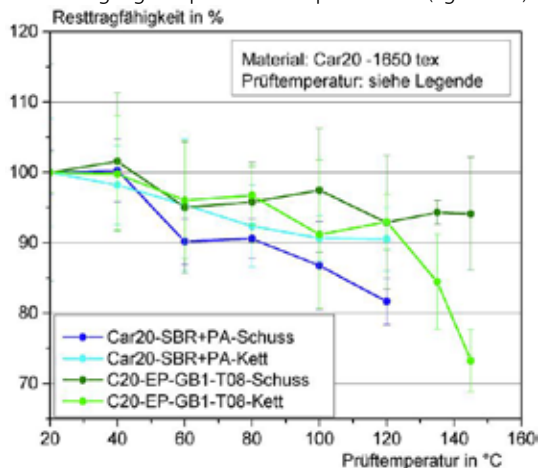
– Bei SBR+PA-Tränkungen wird bereits ab einer Temperatur von 60°C ein geringer Festigkeitsverlust festgestellt, welcher linear mit steigender Temperatur zunimmt. Diese Rovings weisen bei 80°C in ca. 10 % Festigkeitsverlust in Bezug auf die Raumtemperaturtagfähigkeit auf.

Allgemein kann festgehalten werden, dass sich bei Temperaturen der Gebrauchstauglichkeit die mechanischen Eigenschaften der geprüften getränkten Carbon-Bewehrung unter Berücksichtigung der Streuung bei Raumtemperatur nur unwesentlich ändern.

Weiter wurden noch weitere stationäre Zugversuche bei höheren Temperaturen bis 145°C gefahren. Hier können die folgenden Erkenntnisse abgeleitet werden:

_Bei EP-getränkten Textilien kommt es bei Überschreitung des Glasübergangspunktes bei ca. 120°C zu einer signifikanten Reduktion der Zugtragfähigkeit (73 % Resttragfähigkeit bei 145°C)

_Bei Temperatursteigerung bis 120°C bleibt bei einer Tränkung mit SBR die Festigkeitsverlustrate konstant unabhängig der Temperatur. Dies liegt unter anderem daran, dass SBR so gut wie immer über der Glasübergangstemperatur beansprucht wird ($T_g < -20^\circ\text{C}$).



_Abb. 6: Bruchspannungen im positiven Temperaturbereich: relative Werte bezogen auf die Tragfähigkeit bei RT (Resttragfähigkeit); Darstellung des MW und der Standardabweichung (n=5)

Trotz Abnahme der Zugfestigkeit liegen die Tragfähigkeitswerte der getränkten Rovings noch über denen des gleichen ungetränkten Textils. Ein Festigkeitsverlust der getränkten Rovings bis auf Werte der ungetränkten Bewehrung konnte somit in dem geprüften Temperaturbereich nicht bestimmt werden.

Ausblick

Die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit beschränkten sich auf Zugversuche bis maximal 145°C. Für weitere Aussagen über den Festigkeitsverlust über den geprüften Temperaturbereich hinaus und um den Einfluss des Glasübergangspunktes der EP-Tränkung deutlicher beurteilen zu können, sind weitere Zugversuche im Hochtemperaturofen notwendig. So

kann das Zugtragverhalten der Fasern über den komplette Temperaturbereich bis zur vollständigen Verbrennung der Carbonfasern erfasst werden (siehe Abbildung 6). Beide in dieser Arbeit entwickelten Prüfverfahren eignen sich für einen Einsatz im Hochtemperaturofen.

Neben den in dieser Arbeit durchgeführten stationären Zugversuchen müssen aber auch mittels instationärer Versuche (konstante Spannung bei steigender Temperatur) die bisher fehlenden systematischen Untersuchungen an polymergetränkten Textilien, welche die Grundlage für das Brandverhalten bilden, weiter erforscht werden. Durch diese Versuche lässt sich die Tragfähigkeit sowie die instationäre spannungsbedingte Temperaturdehnung ermitteln, welche durch Addition zur den lastinduzierten Dehnungen die Verformungen im Brandfall wiedergeben.

Weiter wurde durch Vorversuche an SBR-getränkten Carbontextilien festgestellt, dass im Gegensatz zu EP-getränkten Textilien die maximale Verbundspannung zwischen Verankerungsharz und Fasern unter der Rovingbruchspannung lag, was zu einem Herausziehen der Rovings aus der Verankerung führte. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Verbund der SBR-getränkten Rovings zur Betonmatrix im Verbundbauteil geringer ist als bei gleichen Carbonrovings mit EP-Tränkung. Hierzu sollten sogenannte „Pull-Out-Versuche“ (Auszugsversuche) an Betonkörpern durchgeführt werden. Das eine Rovingende kann dabei mit den in dieser Arbeit entwickelten Verankerrungen realisiert werden. Weitere Vorversuche am ibac zeigten, dass die Wahrscheinlichkeit eines „Herausziehen“ aus einem Verankerungspolymer bei höheren Temperaturen steigt.

Inwiefern dies mit dem gewählten Verankerungspolymer oder der Textiltränkung selbst zusammenhängt, müsste bei Auszugversuchen aus Betonprobekörpern bei erhöhten Temperaturen bestimmt werden. So könnte der Einfluss einer Erweichung des Tränkungspolymer durch erhöhte Temperaturen auf den Verbund zwischen Fasern und Betonmatrix bestimmt werden.

Prix d'Excellence 2015 mention bien

ENTWICKLUNG VON EMPIRISCHEN ALTERUNGSMODELLEN FÜR DEN EINSATZ IN ENERGIEMANAGEMENTSYSTEMEN

Jerome Poos, RWTH Aachen University

Auf dem Weg in eine Zukunft mit einem hohen Anteil an volatiler erneuerbarer Energie im Strommix werden Energiespeichertechnologien einen entscheidenden Beitrag leisten. Es wird prognostiziert, dass ungefähr die Hälfte des Anstiegs der globalen Stromerzeugung bis zum Jahr 2035 auf erneuerbaren Energien basiert.

Doch auch bereits heute übersteigen die dargebotsabhängigen Energiequellen zu Spitzenzeiten den Energiebedarf in Deutschland. Daher muss einerseits die Last der Erzeugung angepasst werden und andererseits entstehen neue Herausforderungen bezüglich der Netzstabilität. Effizient eingesetzte Speicher in Verbindung mit einem geschickten Energiemanagementsystem können dazu beitragen diese Probleme zu lösen. Die Veränderungen im Energiemarkt ermöglichen es, dass bisher unwirtschaftliche Energiespeicher eine zunehmend wichtigere Rolle in Bezug auf die Bereitstellung von Regelleistung einnehmen. Die politischen, ökologischen und auch wirtschaftlichen Ziele einer regenerativen Energieversorgung werden daher maßgeblich von der Weiterentwicklung der Energiespeicher bestimmt.

Die elektrochemischen Batteriespeicher weisen ein hohes Zukunftspotenzial für eine dezentrale Energieversorgung auf. Zu den zum jetzigen Zeitpunkt kommerziell erhältlichen elektrochemischen Speichern gehören in erster Linie die Blei-Säure, die Nickel-Cadmium und die Lithium-basierten Batteriesysteme. Allen voran wird der Lithium-Ionen-Technologie ein großer Stellenwert zugesprochen.

Ein Beispiel für den erfolgreichen Einsatz der Lithium-Ionen-Technologie ist die Unterhaltungs- und Mobilelektronik. Als Energiespeicher in einer Vielzahl von Geräten sind die Lithium-basierten Batterien nicht mehr wegzudenken. Der Einsatz dieser Technologie in zahlreichen anderen Anwendungsgebieten, zum Beispiel der Elektromobilität oder im Bereich stationärer Speichersysteme, steigt rasant. Aufgrund ihrer Eigenschaften können die Lithium-Ionen-Batteriespeicher auch kosteneffizient im Stromsektor als Kurzzeitspeicher zum Einsatz kommen. Die Speicher können unterschiedliche Systemdienstleistungen erbringen und somit zu einer flexiblen und sicheren Energieversorgung beitragen.

Um den Leistungsfluss zu regeln, wird ein Energiemanagementsystem benötigt. Das zentrale Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines ganzheitlichen Lithium-Ionen-Batteriemodells für den Einsatz in einem

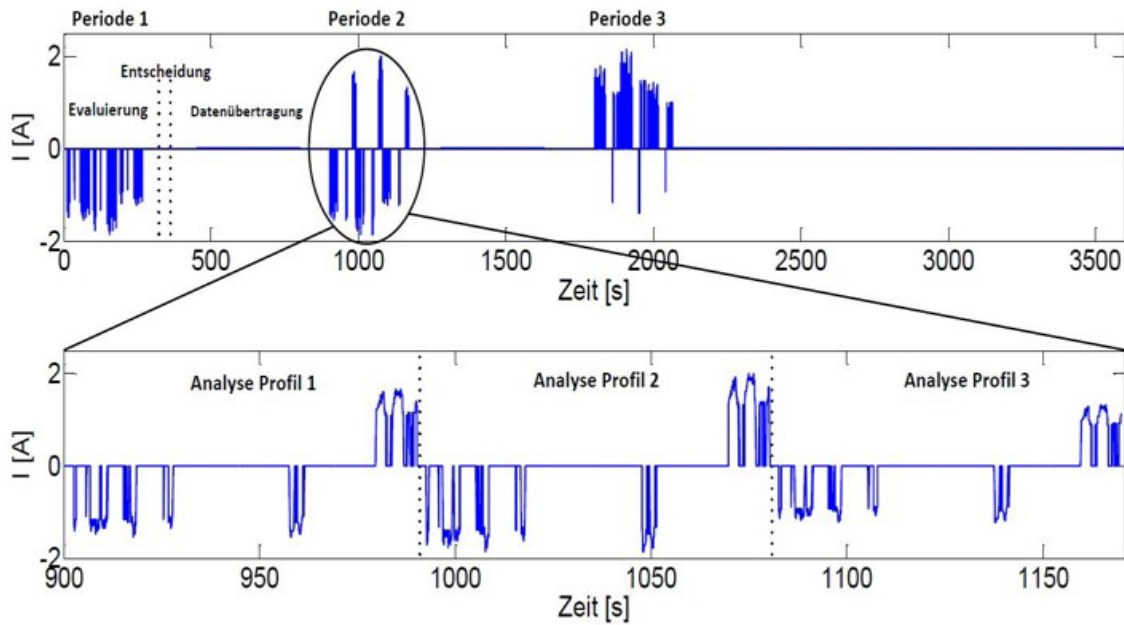
Energiemanagementsystem. Die Herausforderung besteht darin, das Energiemanagementsystem so zu realisieren, dass die Betriebsstrategie unter Berücksichtigung der Alterungseffekte optimiert werden kann. Um Aussagen über die Funktionsfähigkeit und die Lebensdauer in Abhängigkeit von der Zelltechnologie, der Anwendung und den Betriebsbedingungen zu treffen, sind Batteriemodelle unverzichtbar.

Ein voll funktionsfähiges Modell, bestehend aus einem thermischen-, einem elektrischen und einem Alterungsmodell, wird in der Simulationsumgebung von Matlab/Simulink implementiert. Zur Entwicklung der Modelle müssen ausführliche Informationen zu der Verhaltensweise der Batterie gewonnen und die physikalisch-chemischen Effekte verstanden werden.

Es können sehr unterschiedliche, in der Komplexität stark variierende Ansätze zur Erstellung eines Batteriemodells verfolgt werden. Der Bezug zur jeweiligen Anwendung darf dabei nicht verloren gehen. Die Modelle sollten nur so komplex gestaltet werden, dass der Modellierungsaufwand, bestehend aus dem Parametrierungs- und dem Rechenaufwand, in einem guten Verhältnis zur gewünschten Genauigkeit steht.

Neben der reinen Implementierung ist die Übertragung auf einen Mikrocontroller für den Einsatz auf Systemebene von großer Bedeutung. Dadurch kommen weitere Randbedingungen auf der Anwendungsseite hinzu. Eine Randbedingung ist beispielsweise der begrenzte Speicherplatz auf dem Mikrocontroller. Eine weitere Einschränkung wird dadurch hervorgerufen, dass die Reaktionszeit für eine Entscheidung des Energiemanagementsystems im Bereich von einigen Sekunden liegt. Dies bedeutet, dass die Rechenzeit möglichst gering sein muss. Es muss ein optimaler Ansatz gefunden werden, welcher unter Berücksichtigung aller Anforderungen und Randbedingungen hinreichend genaue Ergebnisse liefert. Zur Validierung der Funktionsweise des Modells werden Energiemanagementstrategien hinsichtlich des Einsatzes des Batteriespeichers im Regelenergiemarkt getestet.

Mit Hilfe des in dieser Arbeit entwickelten EMS können in Echtzeit Entscheidungen in Bezug auf eine optimale Betriebsstrategie der Batterie getroffen werden. Mehrere beliebige Stromprofile werden vorgegeben und der Einfluss auf die Alterung wird vorhergesagt.



Die jeweils hervorgerufene Kapazitätsabnahme und die Innenwiderstandszunahme werden durch das Modell berechnet.

Durch den Vergleich der prognostizierten Gesundheitszustände wird das Profil mit den geringsten Alterungsauswirkungen ermittelt. Die genannten Schritte werden mit einer gewissen Vorlaufzeit vor der realen Beanspruchung der Batterie abgeschlossen. Die erhaltenen Informationen werden vom EMS ausgewertet und das am geringsten schädigende Stromprofil kann zum gewünschten Zeitpunkt an die Batteriezelle weitergegeben werden. Es wurde gezeigt, dass das Modell die Voraussetzungen zur Übertragung auf einen Mikrocontroller erfüllt und somit zum Einsatz in einer Anwendung auf Hardwareebene geeignet ist.

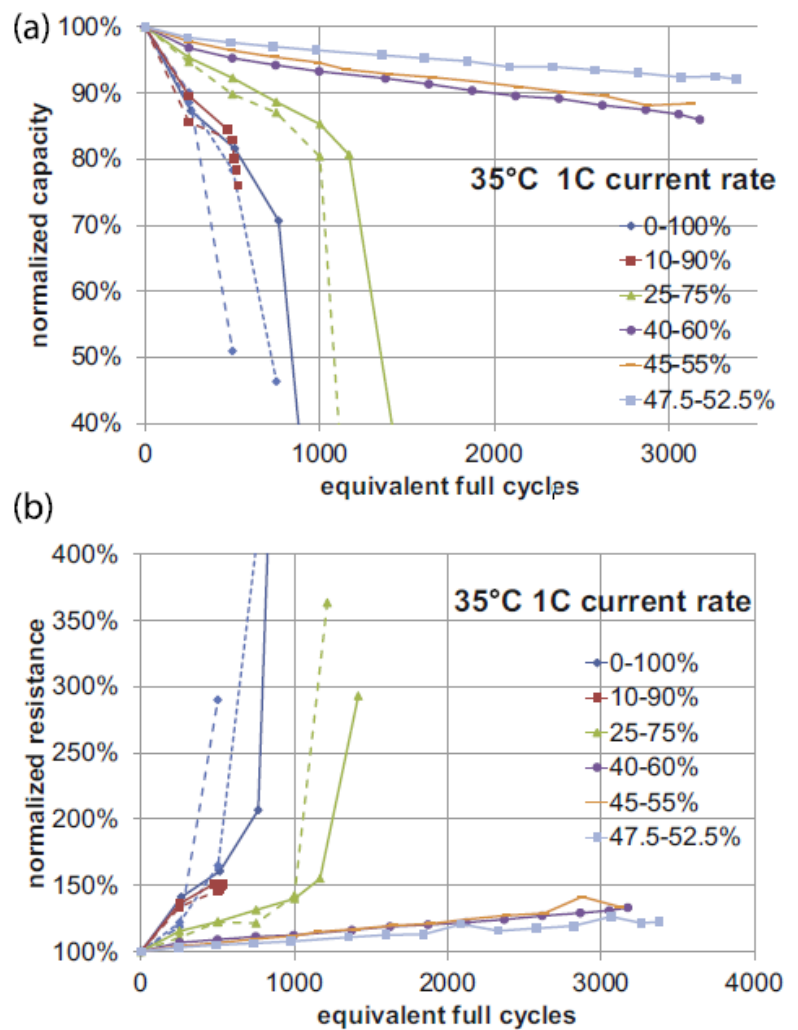


Fig. 12. (a) Normalized capacity vs. equivalent full cycles and (b) normalized resistance vs. equivalent full cycles for cells cycled with 1 C at a cell temperature of 35 °C. Different cycle depths around a mean SOC of 50% are compared. Data of the single cells is shown.

Prix d'Excellence 2015 mention bien

SIMULATION EINER RTM-PROZESSKETTE ZUR BEWERTUNG VON QUALITÄTSSICHERUNGSMASSNAHMEN_

Céline Reichel

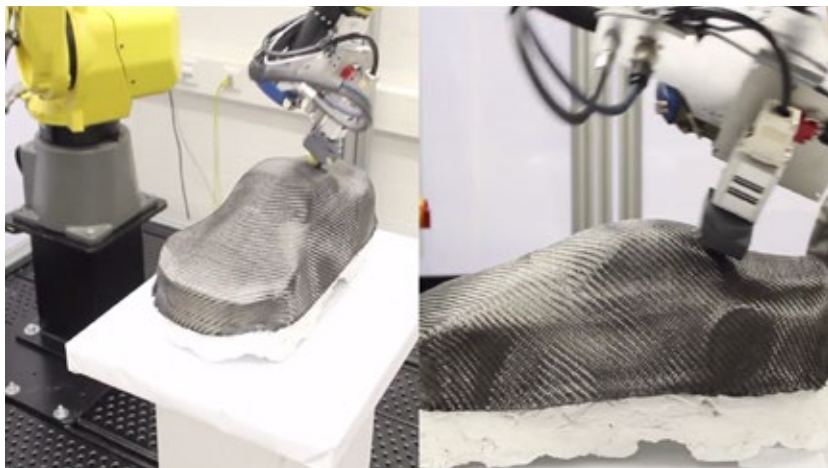


Abb.1: Abtastprozess eines robotergeführten Wirbelstrommessgerätes an einem dreidimensionalen Preform (SURAGUS GmbH 2014)

Die hochautomatisierte Produktion von kohlestofffaser-verstärkten Kunststoffen (CFK) stellt eine Herausforderung an die fertigungsintegrierte Qualitätssicherung in der Prozesskette dar. Während der Fertigung können Defekte wie beispielsweise Faserverschiebungen oder Porosität auftreten, die zur späteren Bauteilschwächung führen können. Diese Fehlstellen gilt es umfassend und frühestmöglich in der Prozesskette zu detektieren.

Die faserverstärkten Kunststoffe (FVK) oder auch Faserverbundwerkstoffe (FVW) oder Composites genannt, gehören zur Kategorie der Verbundstoffe. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie zu einem gewissen Prozentsatz aus Fasern bestehen, die für die Verstärkung des Werkstoffs sorgen, und zum anderen aus einer die Fasern umhüllenden Matrix bestehen. Das Fasermaterial kann aus Glas-, Kohlenstoff-, Aramid- oder Naturfasern bestehen. Für eine Großserienanwendung eignen sich jedoch nur Glas- oder Kohlenstofffaser.

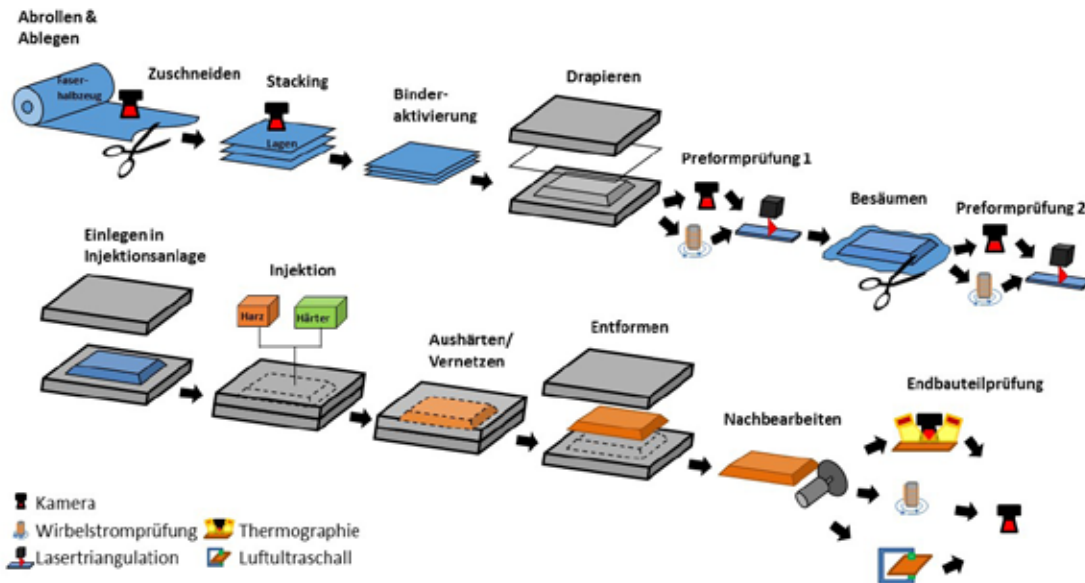
Das RTM (Resin Transfer Molding)-Verfahren, ein Harzinjektionsverfahren, bietet aktuell das größte Potential zur großserienreifen Fertigung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen mit hohem Faservolumengehalt. Als Harzinjektionsverfahren werden alle Verfahren bezeichnet, bei denen die Verstärkungsmatten aus Fasern im trockenen Zustand in eine Form eingelegt werden, diese Form

verschlossen und Matrixwerkstoff eingespritzt wird. Die Abbildung 2 zeigt eine detaillierte Darstellung des Gesamt-RTM-Prozesses mitsamt seiner Einzelprozesse und der Herstellung des Preforms. Allerdings existieren in der Forschung und Industrie etliche Variationen des Prozesses bei denen einige Schritte entfallen, andere hinzukommen, oder vertauscht sind.

Um eine Großserienfertigung des RTM-Prozesses sicherzustellen ist die Implementierung von angepassten Qualitätssicherungsstrategien erforderlich. Um diese Qualitätssicherungsstrategie zu ermitteln, wurde im Rahmen der Arbeit ein Konzept in vier Schritten untersucht. Erstens wurden anhand einer Literaturrecherche alle Fehlerarten und deren Entstehungszeitpunkt ermittelt, die während der Fertigung von CFK-Bauteilen auftreten können. In einem zweiten Schritt wurden die Messverfahren ermittelt, die diese Fehlerarten entdecken können. Unter anderen wurden dabei thermische, radiographische, elektromagnetische, akustische oder optische Verfahren betrachtet (Abbildung 1). Die Ergebnisse dieser beiden Schritte wurden in einem Fehlerkatalog zusammengefasst und einander zugeordnet.

Somit enthält der Fehlerkatalog Informationen darüber wann im Produktionsprozess ein Fehler auftauchen kann, welche Messtechnik geeignet ist um den Defekt zu erkennen und wo in der Produktionslinie diese Messtechnik integriert werden kann. Immer mit dem Ziel einen Defekt so früh wie möglich zu entdecken. Des Weiteren sind in dem Fehlerkatalog alle Fehlerarten nach ihrer Dimension in 2D- oder 3D-Fehler eingeteilt. Dabei wurde eine eigene Definition aufgestellt: 2D sind alle Textilfehler und Halbzeugfehler wie Gaps, fehlende Faserbündel, Fuzzballs, die sich auf oder in der Oberfläche befinden. Als 3D wurden alle Fehler eingeteilt, die sich im Inneren des Bauteils nach der Infiltration befinden und außerdem die Fehler welche mit einer 3D-Technik wie dem Lasertriangulationsverfahren gemessen werden müssen (z.B. Falten und Geometrieabweichungen).

Aus den Erkenntnissen des Fehlerursprungs und deren Prüfmöglichkeiten wurde als dritter Schritt ein Konzept einer RTM-Fertigungslinie mit integrierten Qualitätssicherungsstationen entwickelt, die eine vollständige und unmittelbare Fehlerentdeckung durch die bestgeeignetste Messtechnik garantiert. Messtechniken die zu langsam prüfen oder nicht in dem



_Abb.2: RTM-Prozesskette mit integrierten Qualitätssicherungsstationen

Stadium des Halbzeugs den Fehler entdecken können, wurden ausgeschlossen. So wurde eine RTM-Prozesskette mit fertigungsnahen Prüftechniken entwickelt, die eine vollständige und unmittelbare Fehlerentdeckung nach ihrem Auftreten garantiert. (Abbildung 2)

Im letzten Schritt wurde diese Prozesskette in Plant Simulation, einer Software zur Simulation, Verifikation und Validation von Modellen einer Produktionskette, implementiert. In diesem interaktiven Modell erhält der Nutzer die Möglichkeit für einen Simulationslauf einzelne Messstationen ein- oder auszuschalten. Er kann bestimmen welche Messtechniken zum Einsatz kommen und die Bauteilmaße, die Lagenanzahl der Fasermatten und die zu produzierende Stückzahl festlegen. Dadurch konnte eine Sensitivitätsanalyse der verschiedenen Parameter durchgeführt werden. Die aus den Simulationen gewonnenen Prozesskennwerte wurden anschließend analysiert und bewertet.

Die Ergebnisse geben einen Hinweis darauf welche Messtechniken und deren Anordnung sich für welche Art von Konstruktionsbauteil für eine effiziente Produktion mit hoher Auslastung der Maschinen am besten eignen und inwiefern die integrierte Qualitätssicherung die Prozesszeiten beeinflusst. Es konnte gezeigt werden, dass bei kleinen Bauteilen die Anlage zur Harzinjektion und Aushärtung immer die Taktzeit des gesamten Produktionsprozesses bestimmt und somit den Bottleneckprozess in der Fertigungslinie bildet. Bei größeren Bauteilen muss eine größere Fläche auf Fehler geprüft werden. Dadurch steigen die Taktzeiten der Qualitätssicherungsstationen und diese werden zum Bottleneck. Durch Optimierung des Prozesses und der parallelen Anordnung von mehreren Injektionsanlagen und der Wahl einer schnellen Messtechnik für die Bauteilprüfung, konnte eine Taktzeit des gesamten Fertigungsprozesses von rund fünf Minuten erreicht werden.

Mit Blick auf eine wirtschaftliche Serienfertigung, wurde das entwickelte Modell flexibel und erweiterbar gestaltet, sodass andere Prüfstrategien und der Einsatz von statistischer Qualitätssicherung leicht integriert werden können. Um die Herstellung von CFK-Bauteilen in den kommenden Jahren serienreif zu machen besteht weiterer Forschungsbedarf, besonders im Bereich der Automatisierung des Fertigungs- und Qualitätssicherungsprozesses. Die Nachfrage aus der Industrie besteht.



Le Fonds National de la Recherche Luxembourg (FNR) est le principal acteur de soutien des activités de recherche au Luxembourg. Notre vision est d'établir le Luxembourg comme une société de connaissance axée sur les domaines des sciences, de la recherche et de l'innovation, afin de contribuer à assurer la diversité économique et la future prospérité du pays. Nous visons à mettre en place un système de recherche durable et de renommée internationale qui engendrera des retombées significatives sur le plan sociétal et dans les secteurs économiques stratégiques pour le Luxembourg. C'est pour nourrir cette vision que le FNR investit des fonds publics dans des projets de recherche issus de diverses branches scientifiques, tout en privilégiant les domaines de recherche identifiés comme étant prioritaires pour le pays. Par ailleurs, le FNR soutient et coordonne des activités ayant pour but de renforcer les liens entre les sciences et la société et de sensibiliser le public aux thématiques scientifiques ainsi qu'à la recherche.

HORS SERIES DE LA REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

- #001 Inauguration Forum da Vinci
- #002 40 years of DELPHI in Luxembourg
- #003 100+1 Administration des bâtiments publics
- #004 Ouvrages d'art - ponts - Administration des ponts et chaussées
- #005 Deuxième Ecole européenne et Centre polyvalent de l'enfance
- #006 Concours Construction Belvédère
- #007 Ouvrages d'art - routiers + fluviaux - Administration des ponts et chaussées
- #008 Château d'eau - Ville de Luxembourg
- #009 Prix d'excellence 2012 - Fondation de Luxembourg
- #010 Prix d'excellence 2013 - Fondation de Luxembourg
- #011 Bâtiment administratif pour l'Administration de la nature et des forêts, bâtiment à énergie positive
- #012 Prix d'excellence 2014 | 2015 - Fondation de Luxembourg

REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE

www.revue-technique.lu

éditée par

da Vinci a.s.b.l.

ASSOCIATION OF ENGINEERS | ARCHITECTS | SCIENTISTS | INDUSTRIALS

Responsable Revue Technique Sonja Reichert

tel 45 13 54 23

email s.reichert@revue-technique.lu

Graphisme Jan Heinze

Impression 5.000 exemplaires

Imprimerie Hengen Print & more

14, rue Robert Stumper L- 1018 Luxembourg

revue imprimée sur du papier_



HORS SERIE **REVUE TECHNIQUE** **LUXEMBOURGEOISE**

HORS SERIE DE LA REVUE TECHNIQUE LUXEMBOURGEOISE # 012

