

# Herausforderungen im Entwicklungsprozess des Transport System Bögl (TSB) mit dem Schwerpunkt Kollision

*Thomas Piehler, M.Sc., Max Bögl Stiftung & Co. KG, Sengenthal  
Jan Bohlen, M.Eng., EDAG Engineering GmbH, Ingolstadt  
Tilo Mey, CE cideon engineering GmbH & Co. KG, Bautzen*

## 1 Kurzbeschreibung

Klimaschutz und Verkehrswende stellen die Metropolen der Zukunft vor große Herausforderungen. Einen Beitrag zur Lösung leisten innovative, nachhaltige und flexible Mobilitätskonzepte wie das Transport System Bögl (TSB). Das TSB integriert sich flexibel und nahezu lautlos in neue und bestehende Verkehrsinfrastrukturen und ergänzt diese dort, wo konventionelle Systeme nicht wirtschaftlich einsetzbar sind. MAX BÖGL nutzt dazu die Magnetschwebetechnologie, die als zuverlässige und emissionsarme Form der Fortbewegung, bereits heute diesen Herausforderungen gerecht wird. [1]

Aufgrund der Neuartigkeit des Gesamtsystems TSB sind auch die Entwicklung und der Zulassungsprozess eine große Herausforderung. Um zu zeigen, dass MAX BÖGL dieser Herausforderung gerecht wird, werden – stellvertretend für den Prozess der Zulassung eines sicheren Gesamtsystems – definierte Kollisionsszenarien und deren Betrachtung hinsichtlich der Zulassung beschrieben. Es wird gezeigt, wie unter anderem mithilfe von Finite Elemente Analysen und Validierungsversuchen die Sicherheit des Fahrzeugs im Kollisionsfall nachgewiesen werden kann.

## 2 Einleitung

Beim TSB handelt es sich um ein Magnetschwebebahn-System, das für einen fahrerlosen und vollautomatischen Personennahverkehr vorgesehen ist. Es kann mit einer Maximalgeschwindigkeit von bis zu 150 km/h betrieben werden und setzt sich aus Fahrzeug, Infrastruktur und Betriebsleittechnik zusammen.

Schon zu Beginn der Entwicklung des Systems wird die Zulassung als eine wichtige Randbedingung zum Erfolg definiert. Bei vielen Themengebieten, wie z.B. der Festigkeitsbewertung der Bauteile, Brandschutzbetrachtungen und Ausführung von Batterieanlagen können größtenteils Normen aus dem Bahnbereich angewendet werden. Sofern eine Abweichung von diesen erforderlich ist, wird sich möglichst an die Herangehensweise und die Grenzwerte der Normen angelehnt. Dies wurde beispielsweise bei Messungen zu Lärmemissionen und zur elektromagnetischen Verträglichkeit im direkten Austausch mit Gutachtern so praktiziert.

Diesen Beispielen stehen jedoch auch Themengebiete gegenüber, welche in der verfügbaren Normenlage für das TSB nicht ausreichend definiert, nicht anwendbar oder sogar falsch beschrieben sind. Darunter fallen u.a. die Nachweise der sicheren Bremse des TSB, das Antrieb- und Schwebeverhalten und die Kollisionsszenarien. Anhand letzterer wird im Folgenden dargelegt, wie trotz der beschriebenen Umstände ein erfolgreicher Sicherheitsnachweis gelingen kann.

## 3 Definition der Kollisions- und Überfahrtszenarien

Nicht selten stellen Leichtbau und Sicherheit in der Fahrzeugtechnik einen Zielkonflikt dar. Beim TSB ist der Leichtbau ein äußerst wichtiger Aspekt des Gesamtsystems, da sich das TSB auf vorgefertigten, wahlweise aufgeständerten Trägern durch die Metropolen bewegen soll. Umso leichter die Fahrzeuge konstruiert werden, desto schlanker kann auch der Fahrweg produziert werden, was die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit des Systems erhöht. Durch diese Schwerpunktsetzung im Entwicklungsprozess ergeben sich bereits grundlegend andere Randbedingungen für Kollisionsszenarien, wie sie üblicherweise bei konventionellen Systemen vorgefunden werden.

Bei der Bestimmung der Kollisions- und Überfahrtszenarien müssen weitere Gegebenheiten des Gesamtsystems berücksichtigt werden, weshalb ein einfaches Zurückziehen auf die Normenlage hier nicht zum gewünschten Erfolg führen kann. Teilweise müssen für die Wahl der Randbedingungen im Zulassungsprozess daher schlüssige Begründungen geliefert werden. So kann beispielsweise durch die Trassierung und die Betriebsleittechnik eine Kollision mit einem anderen TSB-Fahrzeug oder systemfremden Fahrzeug (bspw. PKW) sicher ausgeschlossen werden. Da man wiederum einen Suizidenten nie sicher ausschließen kann, muss dieser Fall für die Sicherheit der Passagiere berücksichtigt werden. Sowohl im als auch auf dem Fahrweg werden zudem Steine in verschiedenen Größen betrachtet, welche mit dem Fahrzeug kollidieren könnten oder sicher überfahren werden müssen. Doch wie kann nun die maximale Größe solcher Steine definiert werden, wo doch in der Norm nichts zu finden ist? Hier hilft es beispielsweise einen Verweis auf den Weltrekord der Herren im Kugelstoßen mit 23,12 m bei einem 7,257 kg schweren Gewicht zu bemühen [2]. Dieser scheint hinreichend geeignet zu sein, um sicher auszuschließen, dass ein Dritter einen massiven Stein ähnlichen Gewichts auf einen mehrten Meter hohen aufgeständerten Fahrweg werfen kann.

Neben diesen argumentationslastigen Betrachtungen werden auch Kollisionsfälle definiert, die in einer FEM-Simulation – teilweise mit anschließender Validierung in einem Beschussversuch – nachgewiesen werden. Diese Fälle entsprechen

einerseits Kollision des Fahrzeugs mit einem repräsentativen Tier, welches auf einer Gleitschiene ruht und andererseits dem Beschuss der Frontscheibe in Anlehnung an die DIN EN 15152 [3] um die geforderte Penetrationsfestigkeit nachzuweisen. Für das TSB wird in Abstimmung mit EBA-anerkannten Gutachtern der Ansatz gewählt mit detaillierten Crash-Simulationen einen sicheren Nachweis für solche Szenarien zu liefern. Dieses Vorgehen und die daraus folgenden Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben

#### 4 Finite Element Analysen

In einem Finite Element Modell, siehe Abbildung 1, werden zunächst die relevanten Bauteile für die zuvor definierten Kollisionen modelliert. Im LS-Dyna-Modell werden validierte Materialkarten mit Materialversagen abgebildet. Das Ziel der Analysen ist es den Sicherheitsraum für die Fahrgäste bei allen Kollisionen sicherzustellen, die Spurführung zu gewährleisten und die mittlere Längsverzögerung im Fahrzeug unter 5g zu halten. Letzteres wird in Anlehnung an DIN EN 15227 [4] gefordert.

Bei der Kollision mit einem Suizidenten sind die Deformationen der Wagenkastenstruktur stark von der Trefferlage und Ausrichtung des Hydrokörpers abhängig. In einem Kollisionslastfall (Abb. 1) kommt es dabei zu einer dynamischen Intrusion der Wagenkastenstruktur in den Bereich der Innenverkleidung. Die Strukturintegrität bleibt in allen betrachteten Lastfällen erhalten.

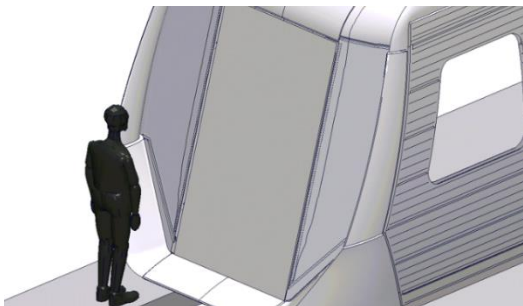


Abb. 1 Lastfall vor Simulationsbeginn;

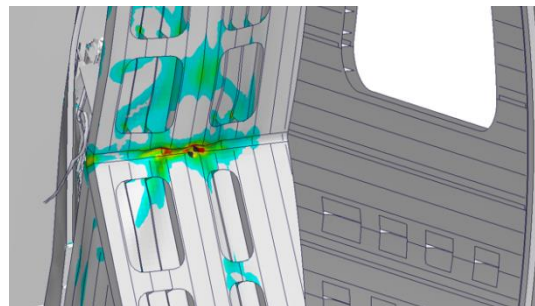


Abb. 2 Deformation der Wagenkastenstruktur

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Aluminium-Hohlkammer-Struktur des Rohwagenkastens alle Kollisionen mit einem Suizidenten übersteht und daher die Unversehrtheit der Passagiere sicherstellen kann. An die Frontscheibe stellt die Norm DIN EN 15152 [3] dagegen die Anforderung, dass sie einen Beschuss mit einem Aluminium-Projektile mit einer Masse von 1 kg und einer Geschwindigkeit von 310 km/h überstehen muss. Dem geeigneten Entwicklungsingenieur stellt sich nun jedoch die Frage, ob die Sicherheit der Passagiere auch gewährleistet sei, wenn das Projektil nicht in der Scheibe, sondern in der zuvor gegen einen Suizidenten geprüften Aluminiumstruktur einschlagen sollte.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird der von IMPETUS Afea AS speziell für hochgradig nichtlineare und hochdynamische Aufgabenstellungen entwickelte IMPETUS Afea Solver® (IMPETUS) verwendet. Dieser explizite FE-Solver ist besonders für die simulative Abbildung von Anspengungen und ballistischen Einwirkungen auf Strukturen und damit zur numerischen Abbildung großer strukturdynamischer Deformationen unter extremen Belastungszuständen geeignet [5]. In IMPETUS besteht die Möglichkeit, den Elementverbund entlang der Elementkanten durch Aufspaltung der Knoten aufzulösen, um ein Materialversagen in Form einer Rissausbreitung darzustellen. In Abbildung 3 ist eine simulierte Einschlagssequenz des Normprojektils in die Außenverkleidung und die Aluminium-Vorderwagenstruktur des TSB dargestellt.

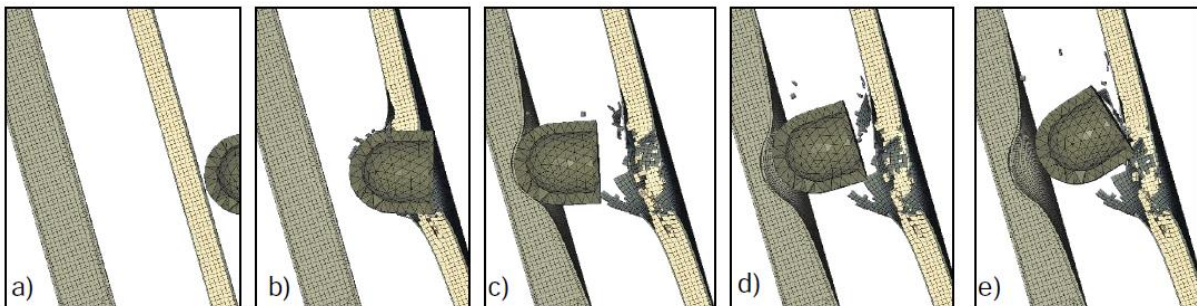


Abb. 3 Schnittbilder der Normprojektil Positionen zu verschiedenen Simulationszeitpunkten: a)  $t = 0$  ms; b)  $t = 1,5$  ms; c)  $t = 3$  ms; d)  $t = 4,5$  ms; e)  $t = 6$  ms

Da bei den FE-Ergebnissen teilweise eine Rissentstehung in der Aluminiumstruktur erkennbar war, wurde eine Validierung des Modells durch ein Versuchsprogramm unverzichtbar, welches im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

## 5 Validierung

In einem Versuchsprogramm wurden im Januar 2020 insgesamt acht Projektile auf unterschiedliche Probenkörper geschossen. Die Einschlagsgeschwindigkeit entsprach dabei entweder der Fahrzeuggeschwindigkeit von 150 km/h oder entsprechend der DIN EN 15152 [3] für die Penetrationsfestigkeit der Frontscheibe 310 km/h. Mit diesen Ergebnissen wird anschließend das Berechnungsmodell validiert. Anhand der daraus hervorgegangenen Ergebnisse wird das Simulationsmodell nach Auswahl eines geeigneten Material- und Schädigungsmodells für die Aluminiumstruktur durch die Nachstellung aller acht Beschussversuche validiert.

Dabei wurden die Einspann- und Randbedingungen realgetreu nachempfunden und die Aufbauten aller Versuche nachgebildet. Die Aluminiumstruktur aus AA6005-T6 wird durch ein entsprechendes Johnson-Cook Material- und Schädigungsmodell dieses Werkstoffs beschrieben, welches bereits gegen Beschussereignisse validiert wurde [5]. Die Validierungsergebnisse sind in Abbildung 4 auszugsweise dargestellt, wobei das Hauptaugenmerk auf dem Gesamtschädigungsbild der Aluminiumstruktur und der Eindringtiefe des Normprojektils liegt.

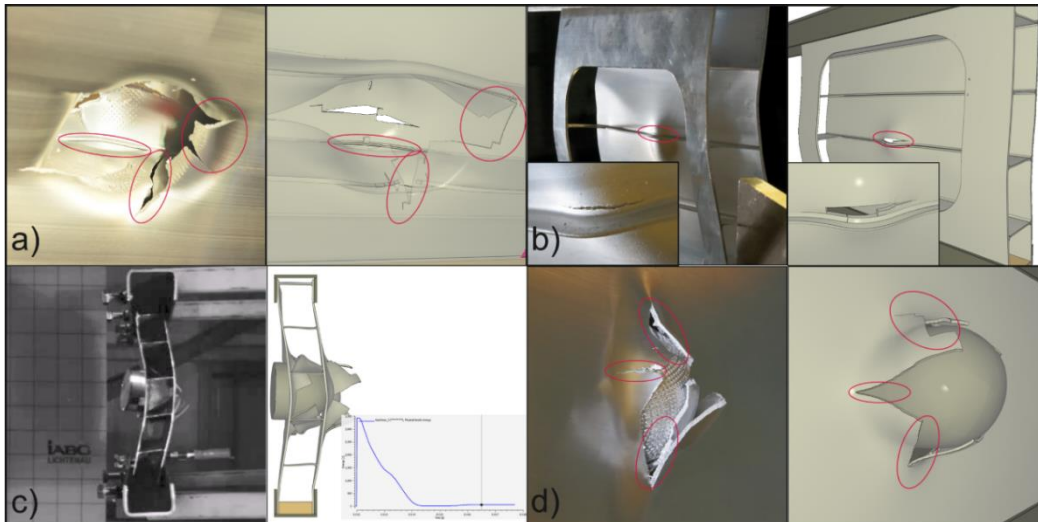


Abb. 4 Auszug aus der Validierung der Beschusstests in unterschiedlichen Konfigurationen: a)  $v = 319,3$  km/h Vorderseite; b)  $v = 140,6$  km/h mit Gewichtsoptimierung; c)  $v = 323,1$  km/h Profilansicht mit Geschwindigkeitsverlauf; d)  $v = 318,3$  km/h Rückseite

Infolge der Validierung konnte in kürzester Zeit eine sehr gute Übereinstimmung von Versuch und Simulation erreicht werden. Basierend auf den Versuchs- und Simulationsergebnissen erfüllt die ohne Ausfräsungen zur Gewichtseinsparung ausgeführte Aluminiumstruktur, siehe Abb. 2, die Penetrationsfestigkeit in Anlehnung an die DIN EN 15152 und kann dementsprechend die Sicherheit der Passagiere im TSB bis zu einer Einschlagsgeschwindigkeit des Normprojektils von 310km/h sicherstellen.

Auch für gewichtsoptimierte Profile konnten abweichend von den Anforderungen der DIN EN 15152 sowohl im Versuch als auch in der Simulation bis zu einer Geschwindigkeit von ca. 200 km/h erfüllt werden, sodass die für den Einsatz des TSB ohne Begegnungsverkehr zu erreichende Penetrationsgeschwindigkeit von 150 km/h deutlich übertroffen wurde.

## 6 Schlussfolgerung

Aufgrund des hohen Stellenwerts des Leichtbaus bei der Entwicklung des TSB-Fahrzeugs können die üblichen Normen aus der Bahn-Branche nicht immer sinnvoll angewendet werden. Daraus ergibt sich die anspruchsvolle Aufgabe für Hersteller solch innovativer Systeme die Normen und deren Anwendung stets zu hinterfragen. Anhand der Kollisionsthematik konnte dargestellt werden, dass bei der Entwicklung des TSB-Fahrzeugs die Sicherheit auch mit validierten Detailsimulationen der zu betrachtenden Einschlagsszenarien zuverlässig und wirtschaftlich nachgewiesen werden kann.

## 7 Literatur

- [1] Transport System Bögl: „TSB – more mobility“, <https://transportsystemboegl.com/>, Zugriff: 27.05.2021
- [2] Shot Put Men, <https://worldathletics.org/records/all-time-toplists/throws/shot-put/outdoor/men/senior>, Zugriff: 27.05.2021
- [3] DIN EN15152, Bahnanwendungen – Frontscheiben für Schienenfahrzeuge, 2019-10
- [4] DIN EN 15227, Bahnanwendungen – Anforderungen an die Kollisionssicherheit von Schienenfahrzeugen, 2020-06
- [5] F.R. Bjerke, L. M. Hansen: Experimental and Numerical Study on the Perforation of Empty and Sand-filled Aluminium Panels, June (2015)