Lichtraumnachweis für den Zulassungsprozess einer Magnetschwebebahn

Simon Fink, M.Sc., Max Bögl, Max-Bögl-Straße 1, 92369 Sengenthal
Bernhard Kurzeck, Dr., PROSE GmbH, Balanstraße 73 Geb. 7, 81541 München

1 Kurzbeschreibung

Klimaschutz und Verkehrswende stellen die Metropolen der Zukunft vor große Herausforderungen. Einen Betrag 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 ist auch die Entwicklung und der Zulassungsprozess eine große Herausforderung. Ein Baustein für die Zulassung eines sicheren Gesamtsystems ist das auszuweisende Lichtraumprofil. Vorhandene Richtlinien und Normen lassen sich dabei nur bedingt direkt anwenden. Durch Anlehnen an anerkannte Regelwerke und das Entwickeln eigener Verfahren kann ein passendes Lichtraumprofil ausgewiesen werden. Als Besonderheit und zusätzliche Anforderung gilt es, ohne aktive Bauteile an Fahrzeug und Fahrweg die TSI PRM für einen niveaugleichen Einstieg für mobilitätseingeschränkte Personen einzuhalten. Der Nachweis dafür und die Einhaltung der Profilfreiheit erfolgt in einer Kombination aus einem rechnerischen und zeichnerischen Verfahren. Darüber hinaus werden Versuche zur Plausibilisierung, Verifizierung und Validierung der Randbedingungen und der Berechnungsergebnisse durchgeführt.

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. Das Transport System Bögl setzt sich aus Fahrzeug, Fahrweg und Betriebsleittechnik zusammen.

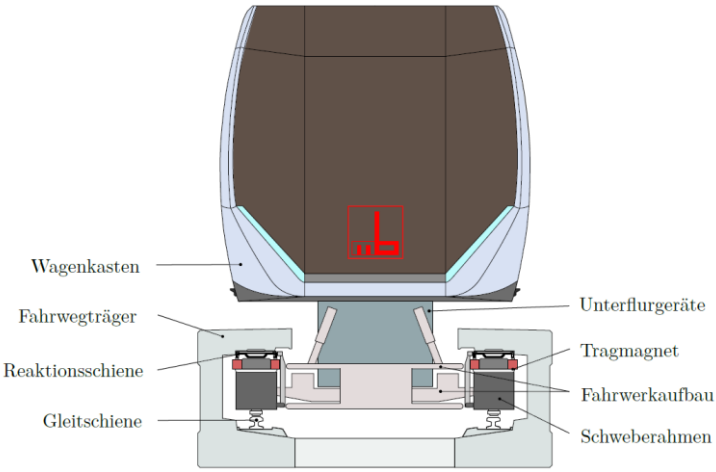

Abb. 1 – Schematischer Aufbau TSB

Schon zu Beginn der Entwicklung des Systems wird die Zulassung als eine wichtige Randbedingung zum Erfolg definiert. Aufgrund der Neuheit des Systems stellt dies eine große Herausforderung dar. Bei vielen Themengebieten, wie z.B. der Festigkeitsbewertung der Bauteile, Brandschutzbetrachtungen und Batterieanlage können die Normen aus der klassischen Rad-Schienen-Branche übernommen werden. Eine direkte Anwendung ist meist jedoch nicht möglich. Gleiches gilt für die Magnetschwebebahn Bau- und Betriebsordnung (MbBO), deren Vorgaben das TSB für Anwendungen in Deutschland rein rechtlich erfüllen muss. Einst für den Transrapid entworfen, eignet sich die MbBO nur bedingt für die Anwendung auf das TSB, welches im Gegensatz zum Transrapid im Nahverkehr eingesetzt werden soll und sowohl konstruktiv, als auch trassierungstechnisch ein komplett anderes Gesamtsystem darstellt. Da die MbBO keine konkrete Vorgehensweise für einen Lichtraumnachweis vorsieht, gilt es sich an die gängigen Verfahren für die Lichtraumberechnung von spurgebundenen Fahrzeugen anzulehnen. [2]

Dabei kann das TSB im urbanen Raum mit Horizontalradien von bis zu 45 m, Vertikalausrundungen von 300 m und Steigungen von 10%, ähnlich flexibel trassiert werden wie ein Straßenbahnsystem. Durch die Trassierungsmöglichkeiten mit diesen Grenzparametern, in Verbindung mit maximalen Verwindungen von 0,2°/m und 8° Querneigung, kann selbst in dicht besiedelten Räumen ein seitenbeschleunigungsfreier und dadurch hoher Fahrkomfort erzielt werden. Des Weiteren besteht der Fahrweg aus zeitlich andauernd maßhaltigen und toleranzarmen Betonträgern, wie sie beim konventionellen Schienenverkehr im Gleisoberbau mit Systemen der Festen Fahrbahn bekannt sind.

3 Definition des Vorgehens zur Lichtraumberechnung

Generell sind drei Verfahren für den Lichtraumnachweis eines neuartigen, spurgeführten Systems möglich: Zeichnerisches Verfahren, BOStrab Lichtraum Richtlinie und Vollbahnnorm EN 15273.

Dabei sprechen mehrere Gründe dafür, den Lichtraumnachweis für das TSB über die EN 15273 zu führen. Zum einen ähnelt das kinematische Verhalten des TSB-Fahrzeugs einem Eisenbahnfahrzeug mit Drehgestellen, zum anderen

ermöglicht das Verfahren nach EN 15273 ein schlankes Standard-Lichtraumprofil für gerade Strecken, welches im Bogen infrastrukturseitig aufgeweitet wird. Ein weiterer Vorteil der Anwendung der Rechenvorschriften nach EN 15273 ist, dass zur Ermittlung der Fahrzeugumgrenzung bzw. des kinematischen Raumbedarfs gegenüber der Infrastruktur alle relevanten Einflüsse berücksichtigt werden. [3]

Dies erleichtert auch eine nachfolgende Anerkennung des Nachweises vor dem Eisenbahn-Bundesamt (EBA) zur Zulassung, da dieser sich auf anerkannte Richtlinien stützt. Zusätzlich können systemeigene Parameter in den Berechnungen berücksichtigt werden, die so bei herkömmlichen Schienenfahrzeugen nicht vorhanden sind. Eine Besonderheit des TSB ist die Spurführung, bei dem der Fahrweg das Fahrwerk umschließt. Dieses Alleinstellungsmerkmal macht es notwendig den Bereich unterhalb der Fahrwegtischöffnung mittels eines eigens entwickelten, zeichnerischen Verfahrens gegenüber der Fahrwegkonstruktion nachzuweisen. Dies geschieht auf Basis einer kinematischen Betrachtung des Fahrwerks.

4 Lichtraumprofil und -nachweis

Die EN 15273 sieht eine verbindliche Bezugslinie vor, von der sich eine Fahrzeugbegrenzungslinie und eine Grenzlinie fester Anlagen mittels entsprechender Einschränkungen ableiten lassen. Trotz des abweichenden Aufbaus des TSB gegenüber einem Schienenfahrzeug, lassen sich annähernd die gleichen kinematischen Zusammenhänge finden. Auch bahntechnisch gängige Parameter wie z. B. der Neigungskoeffizient können mittels MKS-Simulation und Versuchen ermittelt werden [4]. Dennoch gilt es systemeigene Besonderheiten für das TSB in Parametern zu definieren. So kann sich das Fahrzeug z. B. theoretisch um seine Längsachse innerhalb des umgreifenden Fahrwegs drehen und bringt damit eine Verlagerung mit sich, die im Lichtraumnachweis berücksichtigt werden muss. Eine weitere Besonderheit stellt die Aluminium-Leichtbaukonstruktion des TSB Wagenkastens dar. Mittels FEM-Untersuchungen sind die maximal zu erwartenden elastischen Verformungen der Wagenkastenkontur zu ermitteln und in den nachzuweisenden Wagenkastenquerschnitt mit einzurechnen.

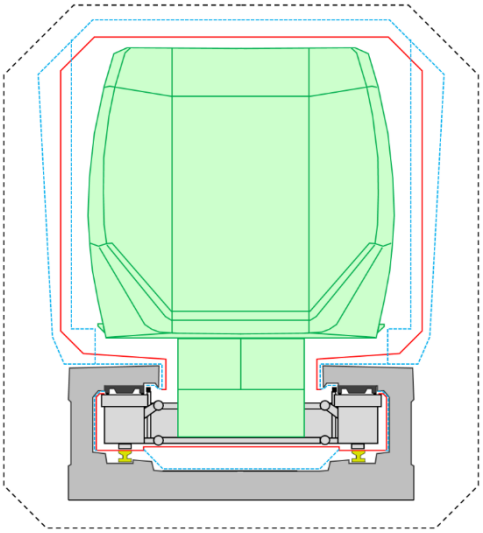

Abb. 2 – Lichtraumprofil TSB

Besonderes Augenmerk ist dabei auch auf den Nachweis des Bahnsteigspalts zu legen. Das TSB Fahrzeug besitzt im Bereich der Einstiege außen fest angebrachte Zustiegsleisten. Diese haben den Zweck, den horizontalen und vertikalen Bahnsteigspalt soweit zu reduzieren, dass die Vorgaben der TSI PRM Verordnung für einen niveaugleichen Einstieg für mobilitätseingeschränkte Personen eingehalten werden können. [5]

Mittels der berechneten Fahrzeugverschiebungen wird, wie im Lichtraumnachweis üblich, die Bezugslinie des Lichtraumprofils zur Fahrzeugbegrenzungslinie eingeschränkt. Gegenüber dieser Linie kann der Wagenkastenquerschnitt auf Überschneidungen geprüft und der Nachweis geführt werden. Zusätzlich wird für einen Abgleich im CAD aus den Fahrzeugbegrenzungslinien entlang der Fahrzeuglängsachse eine Hüllkurvengeometrie erzeugt. Damit kann bereits im Konstruktionsprozess ein Abgleich gegenüber der Einhaltung des Lichtraumprofils erreicht werden. Dieser Abgleich beschränkt sich auf den Wagenkasten und daran befestigte Anbauteile und Unterflurgeräte, die auch in den Bereich der Fahrwegöffnung eingreifen. Für das Fahrwerk im Fahrweg gilt es einen zeichnerischen, kinematischen Abgleich zu führen. Dabei wird das Fahrwerk mit seiner umgrenzenden Geometrie in definierten Spießgangstellungen positioniert. In diesen Extremlagen wird dann der Abstand zu der definierten Bezugslinie unterhalb des Fahrwegs ausgewertet und so der Nachweis der Profilfreiheit innerhalb des Fahrwegs geführt.

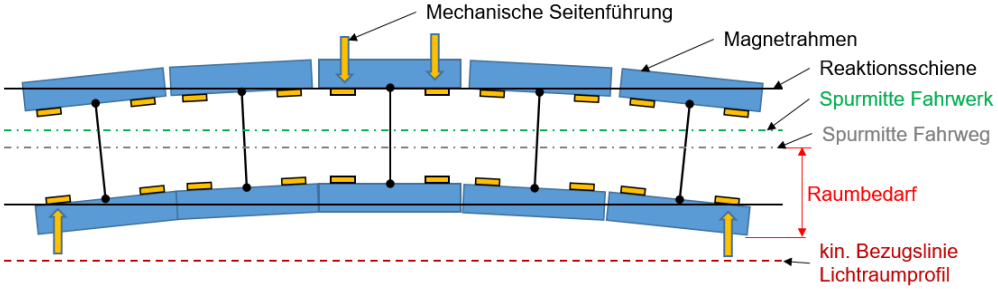

Abb. 3 – Draufsicht des TSB Fahrwerks in gegenphasigem Spießgang der Fahrwerkshälften

5 Prüfung und Versuche zur Lichtraumberechnung

Neben der rein theoretischen und mathematischen Nachweisführung werden beim TSB im Rahmen der Lichtraumuntersuchungen verschiedene praktische Versuche durchgeführt, um die getroffenen Annahmen zu bestätigen. Dabei gilt es den Neigungskoeffizienten als wichtigen Parameter der Lichtraumberechnung mit 0,07 zu validieren, da sich dieser weit unterhalb des Bereichs von herkömmlichen Schienenfahrzeugen von 0,3 - 0,5 bewegt. Ein weiterer Versuch sieht vor, die Spießganguntersuchung des Fahrwerks nachzustellen, um das Fahrwerk gegenüber der Spurmitte zu vermessen und die theoretischen Berechnungen zu bestätigen. Ebenso wird der Bahnsteigspalt in verschiedenen Betriebssituationen vermessen und damit der niveaugleiche Einstieg nach TSI PRM nachgewiesen. Ein anderer Versuch sieht vor, die Berechnungen und Annahmen zur Fahrwegtischöffnung zu verifizieren. Dabei ist ein Versuchsfahrzeug mit Styroporklötzen im Bereich des Eintauchens in den Fahrweg ausgestattet. Die Aufbauhöhe der Styroporklötze richtet sich dabei nach den berechneten Einschränkungen aus dem Lichtraumnachweis. Bei Fahrten über die Teststrecke zeigten sich dabei durch die absichtliche Übermaßfertigung, wie gewünscht, leichte Schleifspuren.

Abb. 4 – Messung Neigungskoeffizient

Abb. 5 – Bahnsteigspalt

Abb. 6 – Schleifspuren an Styroporanbau

6 Zusammenfassung

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die getroffenen Annahmen im Lichtraumnachweis richtig gewählt wurden. Diese bestätigen damit auch die Vorgehensweise der zugrunde gelegten Berechnungen aus der EN 15273. Die Summe aller erbrachten Leistungen mündete zusammenfassend in einem positiven Gutachten zum Lichtraumnachweis des TSB und ist ein weiterer Schlüsselbaustein zur Zulassung des Gesamtsystems.

7 Literatur

[1] Transport System Bögl: „TSB – more mobility“, https://transportsystemboegl.com/, Zugriff: 27.05.2021

[2] MbBO: Magnetschwebebahnverordnung, BGBl Teil I Nr. 64, Bonn, 1997

[3] EN 15273-1: Bahnanwendungen – Begrenzungslinien – Teil 1: Allgemeines – Gemeinsame Vorschriften für Infrastruktur und Fahrzeuge, Fassung 2013+A1:2016, Berlin, 2017

[4] Kurzeck Bernhard, Fink Simon: „Novel Automated Urban Maglev Transport System: A Validated Multibody Simulation”, Advances in Dynamics of Vehicles on Road and Tracks, 2020, S. 599-608

[5] EUV1300: Technische Spezifikationen für die Interoperabilität bezüglich der Zugänglichkeit […], 2014

[6] UIC505-5: Merkblatt Begrenzungslinie, Neigungskoeffizient, Paris, 2010