Name: Erik Danneberg

Studium: Bauingenieurwesen

DIPLOMARBEIT

Thema:

Untersuchungen und Definition von Anforderungen zur Lichtraum-berechnung von Schienenbahnen

Technische Universität Dresden

Fakultät für Verkehrswissenschaften „F.List“

Institut für Verkehrsanlagen

Professur für Gestaltung von Bahnanlagen

Betreuer: Prof.Dr.-Ing. Wolfgang Fengler, TU Dresden
Dipl.Ing. Jens Stehle, TU Dresden

Praxisbetreuer: Dr.-Ing. Veit Appelt, EIBS GmbH
Dipl.Ing. Andreas Neukirch, DVB AG

Problemstellung:

Die Sicherheit im Bahnverkehr verlangt eine kollisionsfreie Fahrt in allen zulässigen Betriebszuständen. Um dies zu gewährleisten, ist ein entsprechender, zu jedem Gleis gehörender Raum von festen und beweglichen Gegenständen freizuhalten. Dieser als „lichter Raum“ bezeichnete Bereich wird in Abhängigkeit der horizontalen und vertikalen Fahrzeugbewegungen (Lichtraumbedarf der Fahrzeuge) bemessen und durch die Lichtraumumgrenzungslinie umschlossen.

Insbesondere im Personennahverkehr gewinnt die präzise Abstimmung des freizuhaltenden Raumes auf das tatsächliche Bewegungsverhalten der Fahrzeuge immer größere Bedeutung. Vor allem Verkehrsbe-triebe versprechen sich dadurch die Möglichkeit, breitere Fahrzeuge mit höherer Beförderungskapazität und damit erhöhter Wirtschaftlichkeit ohne größere Umbaumaßnahmen im Bestandsnetz einzusetzen.

Schwerpunkte der Bearbeitung:

- Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik zur Lichtraumberechnung nach EBO, BOStrab sowie nach den betriebsinternen Richtlinien der Dresdener Verkehrs-betriebe AG in Abhängigkeit von Fahrzeugpark, Fahrwerken sowie Gleisabständen.
- Untersuchung einer Auswahl von Software mit Moduln zur Lichtraum- bzw. Hüll-kurvenberechnung (Geo-Digital, VERBUND, ENFILE, ProVI).
- Anwendung der verfügbaren Software auf eine konkrete Trassierungssituation, Vergleich und Bewertung der Berechnungsergebnisse.
- Definition von Anforderungen an die Zielfunktionalität von Software zur Lichtraum-berechnung für BOStrab-Bahnen im Allgemeinen sowie für betriebsspezifische Anpassungen am Beispiel der DVB AG im Besonderen.

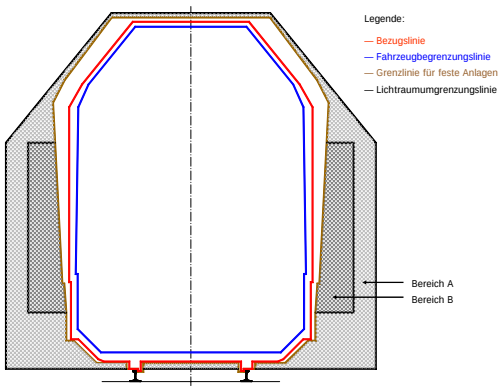
Thesen zur Diplomarbeit

- Die Abstimmung der freizuhaltenden lichten Räume auf das tatsächliche Bewegungsverhalten der Fahrzeuge ist durch statische Verfahren nicht möglich.
- Die Definition einer Bezugslinie nach kinematischer Verfahrensweise erlaubt ein unabhängiges Agieren der Fachbereiche Fahrzeug- und Baudienst (Fahrwegplanung, Fahrweginstandhaltung, Bauausführung)
- Gegenüber der statischen Verfahrensweise sind kinematische Verfahren zur Lichtraumberechnung durch einen erheblich höheren Berechnungsaufwand gekennzeichnet.
- Die bestehenden Richtlinien enthalten nur für Gleisbögen und Geraden explizite Lösungsansätze zur Ermittlung der Lichtraumumgrenzungslinie. Für Übergangsbögen und Bereiche von Achshauptpunkten ist die Berechnung der freizuhaltenden Räume ohne den Einsatz entsprechender Rechentechnik wirtschaftlich nicht sinnvoll.
- Existierende Softwarelösungen sind nicht in der Lage, die freizuhaltenden Räume nach kinematischen Verfahren zu berechnen.

Lichtraumberechnung bei Eisenbahnen

Verfahrensweise:

Die Grundlage der kinematischen Verfahrensweise nach EBO (Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung) bildet die sogenannte Bezugslinie, die in ihren Abmessungen im Regelwerk verbindlich vorgeschrieben ist. Aus der Bezugslinie leitet sich einerseits die Fahrzeugbegrenzungslinie und andererseits die Grenzlinie für feste Anlagen ab. Die Fahrzeugbegrenzungslinie beschreibt die Umrisslinie, die bei der Konstruktion der Fahrzeuge von keinem Fahrzeugteil überschritten werden darf. Dagegen de-finiert die Grenzlinie für feste Anlagen diejenige Umrisslinie, in die keine festen Gegenstände (z.B. Fahrleitungsmasten) hineinragen dürfen.

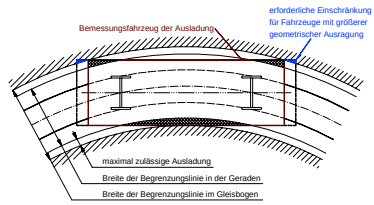


Beziehung zwischen Bezugslinie, Fahrzeugbegrenzungslinie, Grenzlinie für feste Anlagen und Regellichtraum, nach Eisenbahn-Bau-und Betriebsordnung 1967, Dienstsache 300, Ausgabe 1992

Fahrzeugbegrenzungslinie

Für die Berechnung der Fahrzeugabmessungen sind die Maße der Bezugslinie auf der Grundlage verbindlicher Regeln einzuschränken. Zu berücksichtigen sind:

- die horizontalen Verschiebungen auf Grund der Querspiele zwischen Fahrzeugaufbau und Radsätzen (z.B. Achslagerquerspiel) sowie die Stellung der Radsätze im Spurkanal
- die horizontalen Verschiebungen infolge der geometrischen Ausragung
- die Veränderung der Fahrzeughöhe infolge der Abnutzung (z.B. Radreifenverschleiß)
- die senkrechten Ausschläge auf Grund von Federwegen, hervorgerufen durch statische und dynamische Belastungen des Fahrzeuges
- die über 1° hinausgehende Unsymmetrie des Wagenkastens, die sich aus den Bau- und Einstellungstoleranzen des Fahrzeuges und der vorgesehenen Belastung ergibt
- die quasistatische Seitenneigung auf Grund eines Überhöhungsfehlbetrages bzw. Überhöhungsüberschusses von 50mm



In Gleisbögen ist zusätzlich die Ausladung zu berücksichtigen. Sie beschreibt das Maß, um welches Fahrzeugteile die horizontalen Abmessungen der Bezugslinie auf Grund der aufgeführten Einflüsse überschreiten dürfen. Die Ausladung berücksichtigt demnach den gegenüber geraden Gleisab-schnitten erhöhten Lichtraumbedarf der Fahrzeuge in Gleisbögen. Die Größe der Ausladung ist vom Bogenradius und von der Spurweite des Gleises abhängig und ist im Regelwerk verbindlich festgeschrieben.

Grenzlinie für feste Anlagen

Die Abmessungen der Grenzlinie für feste Anlagen ergeben sich aus den Maßen der Bezugslinie, erweitert um vorgeschriebene Einflüsse. Zu berücksichtigen sind:

- die Ausladung, in Abhängigkeit des Bogenradius und der Spurweite des Gleises
- die vertikalen Verschiebungen infolge der vertikalen geometrischen Ausragung und Abnutzung
- die quasistatische Seitenneigung auf Grund eines Überhöhungsfehlbetrages bzw. Überhöhungsüberschusses der 50mm übersteigt (vgl. Ermittlung der Fahrzeugbegrenzungslinie)
- die zufallsbedingten Verschiebungen aus:
  - den horizontalen und vertikalen Verschiebungen des Gleises aus der Soll-Lage
  - der geometrischen und dynamischen Wirkung eines Querhöhen- bzw. Überhöhungsfehlers
  - den Schwingungen infolge Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Gleis
  - der Unsymmetrie des Wagenkastens bis zu 1° (vgl. Fahrzeugbegrenzungslinie)

Regellichtraum:

Die Ableitung der Grenzlinie für feste Anlagen erfolgt aus der Bezugslinie in Abhängigkeit der örtlich variierenden Gleis- und Trassierungspara-meter nach vorgeschriebenen Regeln. Daraus folgt, dass die Abmessungen dieser Linie örtlich unterschiedlich sind. Um trotzdem einen einheit-lichen Netzstandard zu erreichen, definiert die EBO zusätzlich einen so genannten Regellichtraum, dessen Abmessungen von Gleis- und Trassierungsparametern unabhängig sind. Er umfasst neben dem Mindestlichtraumbedarf der Fahrzeuge zusätzliche Räume, die für bauliche (Bereich A) und betriebliche (Bereich B) Zwecke zur Verfügung stehen. Darüber hinaus sind auch diese Räume von sonstigen festen Gegenständen freizuhalten. Während bei Streckenneu-bauten der Regellichtraum als einheitlich freizuhaltender Raum herzustellen ist, darf bei bestehenden Anlagen und Engstellen im Netz der Regellichtraum bis zur Grenzlinie für feste Anlagen ein-geschränkt werden.

Stochastischer Ansatz:

Werden zu den horizontalen Abmessungen der Bezugslinie alle aufgeführten Verschiebungen addiert, erhält man die Grenzlinie in so genannter Nennlage. Dabei wird angenommen, dass alle Einflüsse mit ihren Größtwerten gleichzeitig und gleichgerichtet am betrachteten Ort zusammen-treffen. Da die Wahr-scheinlichkeit dieses theoretischen Extremfalles sehr gering ist, wird bei der Beurteilung der Grenzlinie von der so genannten Grenzlage Gebrauch gemacht, wonach die Summe der zufallsbedingten Verschiebungen durch deren quadratischen Mittelwert mit einem 20%igen Sicherheitszuschlag ersetzt wird.

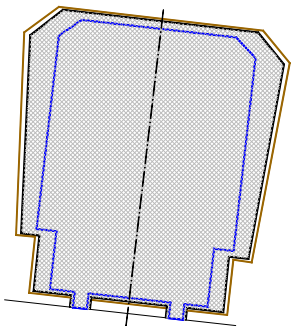
Lichtraumberechnung bei Straßenbahnen

Verfahrensweise:

Die gesetzliche Grundlage der Lichtraumberechnung bei Straßenbahnen bildet die BOStrab in der Fassung vom 11.12.1987. Im Gegensatz zum Regel-werk der Eisenbahn (EBO) beschränkt sich die BOStrab auf wesentliche Grundsatzforderungen. Zur Lichtraumumgrenzung bzw. Fahrzeugbegrenzung heißt es in §18(2) bzw. §34(1) allgemein:

> Die Umgrenzung des lichten Raumes sowie die lichtraumtechnisch maßgebenden Merkmale der Fahrzeuge und des Gleises müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass es in keinem zulässigen Betriebszustand zu gefährdenden Berührungen zwischen Fahrzeugen und Gegenständen sowie zwischen Fahrzeugen auf benachbarten Gleisen kommen kann.

Präzisere Angaben zur Lichtraumberechnung enthält die BOStrab-Lichtraum-Richtlinie. Nach dieser Richt-linie ergeben sich die Maße der Lichtraumum-grenzungslinie aus den vorhandenen Fahrzeugabmessungen, den horizontalen und vertikalen Fahrzeugbewegungen und gegebenenfalls einem Sicher-heitsabstand. Die Größe des Sicherheitsabstandes ist von der Genauigkeit der Berechnung bzw. der Genauigkeit der Eingangsparameter abhängig. Wenn bei der Berechnung der Fahrzeugbewegungen alle Eingangsparame-ter mit ihren tatsächlichen Werten berücksichtigt werden, kann auf einen Sicherheitsabstand verzichtet werden.



Legende:

— Fahrzeugbegrenzungslinie
— Lichtraumumgrenzungslinie

Sicherheitsabstand

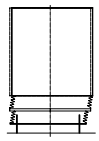
Fahrzeugbewegungen:

- Querverschiebungen
- Vertikale Verschiebungen
- Verlagerungen

Beziehung zwischen Fahrzeugbegrenzungslinie und Lichtraumumgrenzungslinie nach BOStrab-Lichtraum-Richtlinie, 1996

Zusammenfassung:

Die kinematische verfahrensweise nach BOStrab-Lichtraum-Richtlinie ermöglicht die Abstimmung der Lichtraumumgrenzungslinie auf das tatsächliche Bewegungsverhalten der Fahrzeuge und somit eine optimale Ausnutzung der vorhandenen Lichtraumverhältnisse. Nachteil dieses Verfahrens ist die Vermischung von fahrzeugtechnischen und gleistechnischen Einflussfaktoren, die ein unabhängiges Agieren von Fahrzeugkonstrukteur und Baudienst nach dem Vorbild der Eisenbahn, unmöglich macht. Vor allem der Baudienst wird bei der Ermittlung der freizuhaltenden Räume vor erhebliche Schwierigkeiten gestellt, da die in der Berechnung zu berücksichtigenden fahrzeugtechnischen Einflussfaktoren in der Praxis teilweise nicht bekannt sind. Unter Berücksichtigung der Langlebigkeit baulicher Anlagen gilt dies besonders für zukünftge Fahrzeuge.

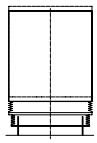


Querverschiebungen:

sind Fahrzeugbewegungen parallel zur Schienenebene

werden verursacht durch:

- bogengeometrische Ausragung
- Spurspiel (u.a. Spurkranz- und Schienenverschleiß)
- fahrzeugtechnische Einflussfaktoren
  - Querfederwege, Querspiele
  - Fahrzeugbautoleranzen
- gleistechnische Einflussfaktoren
  - elastische und plastische, horizontale Gleislageänderungen

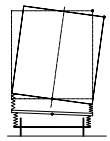


Vertikale Verschiebungen:

sind Fahrzeugbewegungen senkrecht zur Schienenebene

werden verursacht durch:

- vertikale geometrische Ausragung (Kuppen, Wannen)
- fahrzeugtechnische Einflussfaktoren
  - Fahrzeugbautoleranzen
  - statische und dynamisch Federwege
- gleistechnische Einflussfaktoren
  - Abnutzung der Schienen
  - vertikale Gleislageänderungen



Verlagerungen:

sind Neigungen der Wagenkästen auf Tragfederung (vertikale und horizontale Komponente)

werden verursacht durch:

- statische und dynamische Querkräfte
  - Hangabtriebskraft im überhöhten Gleis
  - Fliehkraft in Gleisbögen
  - Seitenwind und Seitenstoß
- fahrzeugtechnische Einflussfaktoren
  - Bau- und Einstellungstoleranzen des Wagens
  - unsymmetrische Besetzung/Belastung
- gleistechnische Einflussfaktoren
  - Abweichung der gegenseitigen Schienenhöhenlage

Aufgrund der genannten Nachteile wird das kinematische Verfahren nacch BOStrab-Lichtraum-Richtlinie in der Praxis bisher kaum angewendet. Die meisten Verkehrs-betriebe bevorzugen auch weiterhin die statische Berechnungsmethode und nehmen die Überdimensionierung der lichten Räume (Anpassung der freizuhaltenden Räume auf das tatsächliche Bewegungsverhalten der Fahrzeuge mit statischen Verfahren nicht möglich) in Kauf.

Bezugslinienverfahren:

Ziel der in dieser Arbeit vorgeschlagenen alternativen Vorgehensweise ist die örtlich individuelle Ermittlung der Lichtraumumgrenzungslinie. Die dabei berücksichtigten Einflussfaktoren orientieren sich an der BOStrab-Lichtraum-Richtlinie um weitestgehend die Rechtssicherheit zu gewährleisten, d.h. das vorgeschlagene Verfahren ist mit den Anweisungen der BOStrab-Lichtraum-Richtlinie konform. Weiterhin wurde besonderer Wert auf die umfassende Trennung der Aufgabenbereiche von Fahrzeugkonstruktion und Baudienst nach dem Vorbild der Eisenbahn gelegt.

Wahrscheinlichkeitsansatz:

Mit der kinematischen Verfahrensweise wurde auch die Zulässigkeit der Wahrscheinlichkeitsrechnung bei der Ermittlung der Lichtraumumgrenzungslinie eingeführt. In Anlahnung an das Verfahren der Eisenbahn wird dabei das zeitliche und örtliche Zusammentreffen gleichgerichteter Größtwerte von Einflussfaktoren berücksichtigt. Da die Wahrscheinlihkeiten des gleichzeitigen Zusammentreffens von Einflussfaktoren nicht bekannt sind, wird in der BOStrab-Lichtraum-Richtlinie pauschal zwischen zufallsbedingten (zE) und nicht zufallsbedingten Einflussfaktoren (nzE) unterschieden.

Nicht zufallsbedingt sind konstruktiv vorgegebene oder betrieblich bedingte Einflussfaktoren. Diese können in zulässigen Betriebszuständen gleichzeitig und in gleicher Richtung auftreten. Aus Sicherheitsgründen wird auf die Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit verzichtet. Demnach werden bei der Berechnung des Lichtraumbedarfs die Auswirkungen der nicht zufallsbedingten Einflussfaktoren arithmetisch addiert.

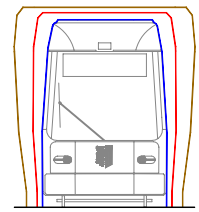
$$\sum_{i=1}^{n}(nzE) = nzE_{(1)} + nzE_{(2)} + nzE_{(3)} + \ldots + nzE_{(n)}$$

Zufallsbedingt sind Einflussfaktoren, die theoretisch unerwünscht sind, jedoch aus Gründen der Wirtschaftlichkeit bis zu bestimmten Grenzwerten zugelassen werden (z.B. Bautoleranzen). Da diese Faktoren zufällig auftreten, kann ein gleichzeitiges und gleichgerichtetes Auftreten mit ausreichender Sicherheit ausgeschlossen werden. Deshalb werden die Auswirkungen der zufallsbedingten Einflussfaktoren unter einer gemeinsamen Wurzel quadratisch addiert.

$$\sum_{i=1}^{n}(zE) = \sqrt{zE^2_{(1)} + zE^2_{(2)} + zE^2_{(3)} + \ldots + zE^2_{(n)}}$$

Verfahrensweise:

Analog zur kinematischen Vorgehensweise der Eisenbahn bildet eine Bezugslinie die Grundlage des vorgeschlagenen Verfahrens, die zugleich die Grenze der Aufgabenbereiche von Fahrzeugkon-strukteur und Baudienst markiert. Im Gegensatz zur Eisenbahn beziehen sich die Abmessungen der Bezugslinie nicht auf anlagentechnische Maßvorgaben, sondern auf bestimmte, festzulegende Bemessungsfahrzeuge. Unter Berücksichtigung der Langlebigkeit baulicher Anlagen müssen die Bemessungsfahrzeuge nicht nur heutigen Anforderungen genügen, sondern auch geplante Neuanschaffungen von Fahrzeugen berücksichtigen.



Zur Ermittlung der Lichtraumumgrenzungslinie hat der Baudienst die Abmessungen der Bezugslinie auf Grundlage definierter Eigenschaften des Bemessungsfahrzeuges um folgende Einflüsse zu erweitern:

- Vertikale -, Querverschiebungen und Verlagerungen auf Grund gleistechnischer Einflussfaktoren
- Verlagerungen infolge eines Überhöhungs-überschusses bzw. -fehlbetrages

Zusätzlich sind vom Baudienst Verbreiterungen der Bezugslinie in Gleisbögen zu berücksichtigen. Diese repräsentieren die bogengeometrische Ausragung und Querverschiebungen auf Grund des Spurspiels

Für ein bestimmtes Streckennetz ergeben sich die Abmessungen der Bezugslinie aus den Maßvorgaben des jeweiligen Bemessungsfahrzeuges im geraden Gleis und folgenden Einflüssen:

- Vertikale- , Querverschiebungen und Verlagerungen auf Grund fahrzeugtechnischer Einflussfaktoren
- Verlagerungen durch Seitenwind und Seitenstoß

Demnach umschließt die Bezugslinie den von Gleis- und Trassierungsparametern unabhängigen Anteil des Lichtraumbedarfs aller im Streckennetz eingesetzten Fahrzeuge.