

Anlage zu Pflichtenheft

BTG_034_Hüllkurve_revA

Referenz: PH Kap. 4.4, 4.5, 4.10

Revision Log

Revision	Datum (DD-MM-YYYY)	Beschreibung der Änderungen
-	13.01.2021	Erstausgabe
A	29.10.2021	Pflichtenheftausgabe, keine Änderung

INHALT

0	Anforderung	3
1	Abkürzungsverzeichnis.....	4
2	Referenzen	4
3	Einleitung	5
4	Definitionen	5
5	Analyse der Ausschreibungsunterlagen	7
5.1	Lichtraumvorgabe	7
6	Theorie.....	10
6.1	Allgemeines	10
6.2	Statische Hüllkurve	10
6.3	Dynamische Zuschläge.....	11
6.3.1	Allgemeines.....	11
6.3.2	Verschiebung	11
6.3.3	Verlagerung.....	11
6.3.4	Stellung im Spurkanal	11
7	Berechnung Lichtraumbedarf (Horizontal)	13
7.1	MKS-Modell	13
7.2	Fahrzeugkontur.....	15
7.3	Statische Hüllkurve	17
7.4	Dynamische Zuschläge.....	20
7.4.1	Einleitung	20
7.4.2	Eingangsgrößen.....	21
7.4.3	Berechnung Mittelwagen WT3.....	22
7.4.4	Berechnung aufgesattelte Wagenteile WT1, WT2, WT4	28
7.4.5	Gesamter dynamischer Zuschlag	31
7.5	Lichtraumbedarf	32
7.6	Fahrzeugbegegnung	35
8	Bodenfreiheit.....	35
9	Zusammenfassung	36

0 ANFORDERUNG

Dieses Dokument bezieht sich auf die Anforderungen der Kapitel 4.4, 4.5 und 4.10 des **Pflichtenheftes**, nach welchen Angaben zum Lichtraumbedarf zu machen sind.

1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BA	Bogenanfang
BE	Bogenende
EW	Endwagen
FZ	Fahrzeug
GFT	Gemeinsame Fahrflächentangente
HK	Hüllkurve
KP	Konturpunkt
LDG	Laufdrehgestell
LUL	Lichtraumumgrenzungslinie
MKS	Mehrkörpersimulation
NF	Niederflur
SO	Schienenoberkante
TDG	Triebdrehgestell
WT	Wagenteil
k.A.	keine Angabe
nz	nicht zufällig
z	zufällig

2 REFERENZEN

- [1] Ausschreibungsunterlagen; **Pflichtenheft, aktuell gültige Version**
- [2] Ausschreibungsunterlagen; Anlage 5 Lichtraumprofil, 08.02.2016
- [3] Ausschreibungsunterlagen; Anlage 9 Hüllkurve NGT D8
- [4] Ausschreibungsunterlagen; Beantwortung der Bieterfrage 21, 29.10.2020
- [5] Technische Regeln für Straßenbahnen - Bemessung des lichten Raums von Bahnen (TRStrab Lichtraum). Ausgabe 01.12.1996 in der Fassung vom 25.03.2015

3 EINLEITUNG

Die vorliegende Dokumentation fasst den Lichtraumbedarf des angebotenen Fahrzeugs *Flexity* Magdeburg für den Worst Case zusammen. Der für die Praxis erwartete Licht-raumbedarf wird kleiner sein. Beim *Flexity* Magdeburg handelt es sich um ein vierteiliges Drehgestellfahrzeug mit einem Mittelwagen auf zwei Drehgestellen, einem nachlaufenden aufgesattelten Mittelwagen mit einem Drehgestell und zwei aufgesattelten Endwagen mit jeweils einem Drehgestell.

Ausgehend von den Rechenregeln der TRStrab Lichtraum [5] wurden die statische Hüllkurve und die dynamischen Zuschläge bestimmt. Der Lichtraumbedarf des Fahrzeugs ergibt sich dann als Summe der statischen Hüllkurve und der dynamischen Zuschläge.

Der vorhandene Lichtraum bzw. der zulässige Lichtraumbedarf des anzubietenden Fahrzeugs ist in Anlage 5 und 9 der Ausschreibungsunterlagen ([2], [3]) definiert, die zu berücksichtigenden Parameter des Gleises in Abschnitt 4 des **Pflichtenheftes** [1].

4 DEFINITIONEN

Bodenfreiheit

Die Bodenfreiheit beschreibt den kleinsten vertikalen Abstand zwischen dem betrachteten Punkt an der Unterseite des Fahrzeugs und der GFT. Der Schienenverschleiß und die Gleisverschiebung sind somit nicht berücksichtigt.

Bogengeometrische Ausragung

Die bogengeometrische Ausragung ist der radienabhängige Anteil der statischen Hüllkurve. Die Fahrzeugbreite ist nicht enthalten.

Dynamische Hüllkurve (Lichtraumbedarf)

Die dynamische Hüllkurve eines Fahrzeugs wird auch als Lichtraumbedarf bezeichnet. Sie entspricht der Summe der statischen Hüllkurve und der dynamischen Zuschläge.

Dynamischer Zuschlag

Der dynamische Zuschlag ist die Differenz zwischen dem Lichtraumbedarf des Fahrzeuges und der statischen Hüllkurve. Er beschreibt die Gesamtheit der möglichen, zusätzlichen Auslenkungen eines Schienenfahrzeuges aufgrund seiner Bewegung im Gleis unter Berücksichtigung der fahrzeug- und gleisseitigen Toleranzen, Spiele und der wirkenden Kräfte. Die fahrzeug- und gleistechnischen Einflussfaktoren werden in nicht zufällige und zufällige Faktoren unterteilt.

Gegenausschlag

Der Gegenausschlag beschreibt einen lokalen Extremwert der statischen Hüllkurve, der vor Ein- bzw. nach Ausfahrt in einen bzw. aus einem Gleisbogen im benachbarten Gleiselement in Richtung des Bogenmittelpunktes auftritt.

Lichtraumbedarf (Dynamische Hüllkurve)

Der Lichtraumbedarf eines Fahrzeugs wird auch als dynamische Hüllkurve bezeichnet. Er entspricht der Summe der statischen Hüllkurve und der dynamischen Zuschläge.

Lichtraumumgrenzung, Lichtraumumgrenzungslinie (LUL)

Die LUL beschreibt die Grenzlinie der vorhandenen Infrastruktur (z.B. Tunnel, Bordstein-kanten, Masten, ...). Laut [5] wird sie von festen und beweglichen Gegenständen freige-halten und begrenzt den vorhandenen Lichtraum.

Nicht zufällige Einflüsse

Nicht zufällige (nz) Einflüsse sind konstruktive oder betrieblich vorgegebene Spiele, Ver-schleiß und Federwege aufgrund statischer oder quasistatischer Belastungen. Es ist davon auszugehen, dass sie gleichzeitig in gleicher Richtung und in vollem Umfang auf-treten können.

Die Auswirkungen der nicht zufälligen (nicht zufallsbedingten) Faktoren werden arithme-tisch addiert.

Statische Hüllkurve

Die statische Hüllkurve als $f(R)$ beschreibt die senkrecht auf die GFT projizierte Bahn-kurve, die ein Fahrzeug unter Vernachlässigung der dynamischen Einflüsse während der Fahrt durch eine Gleisgeometrie erzeugt. So ergibt sich sowohl auf der Bogeninnen- als auch der Bogenaußenseite der maximale laterale Abstand zur Gleismitte, der senkrecht auf dieser steht.

Die statische Hüllkurve beschreibt die bogengeometrische Ausragung inklusive der hal-ben Fahrzeugbreite am untersuchten Fahrzeugquerschnitt (TRStrab Lichtraum [5] Kapi-tel 5.1.1).

Zufällige Einflüsse

Zufällige (z) Einflüsse sind Bautoleranzen und Federwege aufgrund dynamischer Belas-tungen infolge von Unstetigkeiten beim Fahrzeuglauf im Gleis und aufgrund von Wind-kräften. Mit hinreichender Sicherheit ist davon auszugehen, dass diese Einflüsse nicht gleichzeitig in gleicher Richtung und in vollem Umfang auftreten werden.

Die zufälligen (zufallsbedingten) Faktoren werden unter einer gemeinsamen Wurzel quadratisch addiert.

5 ANALYSE DER AUSSCHREIBUNGSUNTERLAGEN

In diesem Kapitel sind die lichtraumtechnisch wesentlichen Aussagen der Ausschreibungsunterlagen [1] - [4] zusammengefasst.

Tabelle 1: Einflussfaktoren Gleis

Spurweite	1435 mm
Min. horizontaler Bogenradius Rangierfahrt & Linienverkehr	18 m
Max. Schienenflankenverschleiß	15 mm
Max. vertikaler Schienenverschleiß	25 mm
Gleisquerverschiebung	30 mm
Gleisvertikalverschiebung	30 mm

5.1 Lichtraumvorgabe

Aus den Ausschreibungsunterlagen [1] - [4] ergeben sich die folgenden lichtraumtechnisch relevanten Forderungen:

- Nominale Fahrzeugbreite: 2400 mm
- Einhaltung der statischen Hüllkurve des NGT 8D (Fahrzeugbreite 2300 mm, tabellarisch in Anlage 9 [3] aufgeführt) plus 50 mm
- Einhaltung des Lichtraumumgrenzungsprofils in Anlage 5 [2]

Gemäß Fußnote 6) in Anlage 5 [2] ist das Lichtraumumgrenzungsprofil im Gleisbogen um die bogengeometrische Ausragung des Referenzfahrzeugs aufzuweiten. Vom Bieter wird als Referenzfahrzeug der NGT 8D herangezogen, dessen bogengeometrische Ausragungen sich aus der statischen Hüllkurve in Anlage 9 [3] ergeben. Dabei werden für die Aufweitung des Lichtraumumgrenzungsprofils die Beharrungswerte im Gleisbogen herangezogen.

Für den *Flexity* Magdeburg ergeben sich damit die Vorgabewerte für die statische Hüllkurve in Tabelle 2 und für den Lichtraumbedarf in Tabelle 3.

Tabelle 2: Einzuhaltende statische Hüllkurve

Bogenradius [m]	Statische Hüllkurve [mm] LHB NGT 8D + 50mm, b=2400mm				
	Innen			Außen	
	Max.	Be- harrung	Gegen- ausschla	Max.	Be- harrung
18	1449	1403	1337	1715	1533
20	1424	1382	1324	1637	1503
25	1379	1346	1300	1511	1446
30	1349	1321	1284	1460	1407
35	1327	1304	1272	1424	1379
40	1311	1291	1263	1396	1357
45	1299	1281	1256	1374	1340
50	1289	1273	1251	1357	1327
55	1281	1266	1246	1343	1316
60	1274	1261	1243	1331	1306
65	1268	1256	1239	1321	1298
70	1264	1252	1237	1312	1292
75	1259	1249	1234	1305	1286
80	1256	1246	1232	1298	1280
85	1252	1243	1230	1292	1276
90	1249	1241	1229	1288	1272
95	1247	1238	1227	1283	1268
100	1244	1237	1226	1279	1265
110	1241	1233	1223	1272	1259
120	1237	1230	1221	1266	1254
130	1234	1228	1220	1261	1250
140	1232	1226	1218	1256	1246
150	1230	1224	1217	1253	1243
200	1222	1218	1213	1239	1233
300	1215	1212	1209	1226	1222
400	1211	1209	1207	1220	1216
500	1209	1208	1205	1216	1213
600	1207	1206	1205	1213	1211
1000	1200	1200	1200	1200	1200

Tabelle 3: Einzuhaltende Lichtraumungrenzungslinie (LUL)

Bogenradius [m]	Lichtraumungrenzungslinie (LUL) für Fahrzeugbreite 2400 mm					
	Profil Anlage 5		Bogenaufweitung LHB NGT 8D		LUL	
	innen	außen	innen	außen	innen	außen
18	1525	1525	203	333	1728	1858
20	1525	1525	182	303	1707	1828
25	1525	1525	146	246	1671	1771
30	1525	1525	121	207	1646	1732
35	1525	1525	104	179	1629	1704
40	1525	1525	91	157	1616	1682
45	1525	1525	81	140	1606	1665
50	1525	1525	73	127	1598	1652
55	1525	1525	66	116	1591	1641
60	1525	1525	61	106	1586	1631
65	1525	1525	56	98	1581	1623
70	1525	1525	52	92	1577	1617
75	1525	1525	49	86	1574	1611
80	1525	1525	46	80	1571	1605
85	1525	1525	43	76	1568	1601
90	1525	1525	41	72	1566	1597
95	1525	1525	38	68	1563	1593
100	1525	1525	37	65	1562	1590
110	1525	1525	33	59	1558	1584
120	1525	1525	30	54	1555	1579
130	1525	1525	28	50	1553	1575
140	1525	1525	26	46	1551	1571
150	1525	1525	24	43	1549	1568
200	1525	1525	18	33	1543	1558
300	1525	1525	12	22	1537	1547
400	1525	1525	9	16	1534	1541
500	1525	1525	8	13	1533	1538
600	1525	1525	6	11	1531	1536
1000	1525	1525	0	0	1525	1525

6 THEORIE

6.1 Allgemeines

Der Algorithmus zur Berechnung bzw. Dimensionierung des lichten Raumes von Straßenbahnen wird in „Technische Regeln für Straßenbahnen; Bemessung des lichten Raumes von Straßenbahnen (TRStrab Lichtraum); Ausgabe 01.12.1996 in der Fassung vom 25.03.2015“ [5] beschrieben.

6.2 Statische Hüllkurve

Abbildung 1 zeigt den charakteristischen Verlauf der statischen Hüllkurve des beschriebenen Fahrzeugmodells aufgetragen über der Gleisstationierung. Das von links kommende Fahrzeug durchfährt zunächst einen 50 m langen Rechtsbogen ($s = 100 \dots 150$ m), folgt dann einer 50 m langen Gerade und durchfährt abschließend einen 50 m langen Linksbogen ($s = 200 \dots 250$ m). Übergangsbögen wurden nicht berücksichtigt, da sich so aus lichtraumtechnischer Sicht die Maximalwerte der bogengeometrischen Ausragung ergeben.

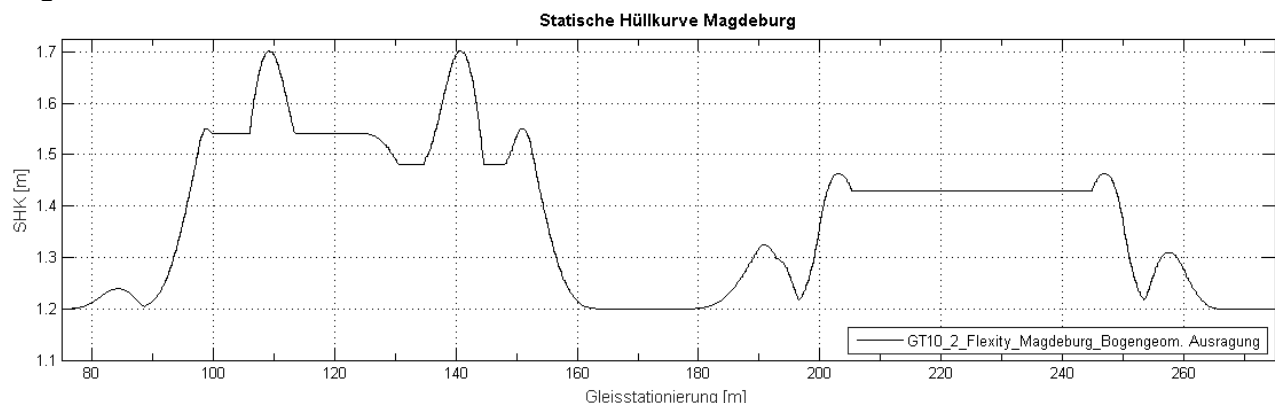


Abbildung 1: Charakteristische statische Hüllkurve des Flexity Magdeburg (Bsp. 18m-Bogen)

Die linke Seite des Diagramms beschreibt die statische Hüllkurve für die Bogenaußen-seite, anschließend folgt die bogeninnere Fahrzeugseite. Befindet sich das Fahrzeug vollständig im Bogen, treten sowohl bogenaußen- als auch bogeninnenseitig Beharrungswerte auf. Weiterhin treten bei aufgesattelten Wagenteilen bei Bogenein- bzw. -ausfahrt lokale Maxima im statischen Hüllkurvenverlauf auf.

Die folgenden Gleichungen beschreiben die Berechnung der bogengeometrischen Ausragung von Brückenfahrzeugen. Sie sind [5] entnommen und gelten für Brückenfahrzeuge, bei denen die Drehgestelle über denselben Radsatzabstand verfügen.

Bogenaußenseite

$$b_a = \sqrt{\left(\sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p^2}{4}} + b\right)^2 + x^2} - r \quad (\text{Gl. 1})$$

Bogeninnenseite

$$b_i = r - \sqrt{\left(\sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p^2}{4}} - b\right)^2 + x^2} \quad (\text{Gl. 2})$$

Diese Formeln können auch für Gelenkfahrzeuge genutzt werden, wenn sie in die einzelnen Module zerlegt werden. Zur Berechnung der Sänftenmodule werden die Gelenke als Anlenkpunkte im Sinne der Technischen Regeln [5] betrachtet. Für die hier dokumentierte Berechnung fand das MKS-Programm SIMPACK Anwendung.

6.3 Dynamische Zuschläge

6.3.1 Allgemeines

Der Algorithmus zur Berechnung der dynamischen Zuschläge wird in der BOStrab-Lichttraum-Richtlinie [5] beschrieben. Die dynamischen Zuschläge setzen sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

- Verschiebung
- Verlagerung
- Fahrzeugstellung im Spurkanal

6.3.2 Verschiebung

Als Verschiebung bezeichnet man die seitliche und vertikale Auslenkung parallel bzw. senkrecht zur GFT, die auf das Zusammenspiel von Kräften, Federwegen, Spielen, Toleranzen und Gleisdaten zurückzuführen ist. Die Gleisverschiebung und der zu berücksichtigende Gleisverschleiß, die einen wesentlichen Einfluss auf den dynamischen Zuschlag haben, sind von der Oberbauart und dem Gleisbogenradius abhängig.

6.3.3 Verlagerung

Nach den TRStrab Lichttraum [5] versteht man unter Verlagerung die seitliche und vertikale Auslenkung aufgrund der unterschiedlichen vertikalen Einfederung der linken und rechten Seite des Fahrzeuges, die durch eine Rotation um den Wankpol beschrieben werden kann.

6.3.4 Stellung im Spurkanal

Für die Berechnung des dynamischen Zuschlags müssen verschiedene Stellungen des Fahrzeuges im Spurkanal berücksichtigt werden. Für den Lichttraumbedarf auf der Bogenaußenseite sind Zick-Zack-Stellungen des Fahrzeugs maßgeblich, ausgehend von der Stellung des Mittelwagens im „richtigen“ oder „falschen“ Spießgang, bei denen die

Fahrzeugköpfe und Gelenkbereiche maximal nach bogenaußen gelenkt werden. Im Sinne der in diesem Dokument beschriebenen Worst-Case-Betrachtung befinden sich in diesen Stellungen die Drehgestelle abwechselnd in der äußeren und inneren Sehnenstellung. Die Eintrittswahrscheinlichkeit dieses Worst-Case-Szenarios ist gering, für die Drehgestelle wird eher eine Freilauf- oder Spießgangstellung erwartet.

Auf der Bogeninnenseite wird die innere Sehnenstellung des gesamten Fahrzeugs betrachtet. Diese stellt das Worst-Case-Szenario für ein im überhöhten Bogen stehendes Fahrzeug dar.

7 BERECHNUNG LICHTRAUMBEDARF (HORIZONTAL)

7.1 MKS-Modell

Für die Berechnung der statischen Hüllkurve kommt das MKS-Programm SIMPACK zur Anwendung. Es wird die Fahrt des angebotenen Fahrzeugs durch eine Schar verschiedener Gleisgeometrien kinematisch simuliert, wobei sich das modellierte Fahrzeug ohne dynamische Einflüsse entlang der Gleismittellinie bewegt. Für die eingegebenen Konturen der einzelnen Wagenkästen (im vorliegenden Fall Höhenschnitte an der breitesten Stelle des Fahrzeuges) werden insbesondere die bogengeometrischen Ausragungen über der Strecke (Schleppkurven) sowie der Kontur („Hundeknochen“) ermittelt. Durch Vereinigung der einzelnen Wagenkasten-Schleppkurven wird die gesamte statische Hüllkurve des Fahrzeugs auf der jeweiligen Gleisgeometrie bestimmt.

Abbildung 2 zeigt die Fahrzeugkonfiguration des Berechnungsmodells. Die Fahrzeugkontur ist als Konturfunktion hinterlegt, so dass sie in der Fahrzeugvisualisierung nicht erkennbar ist.

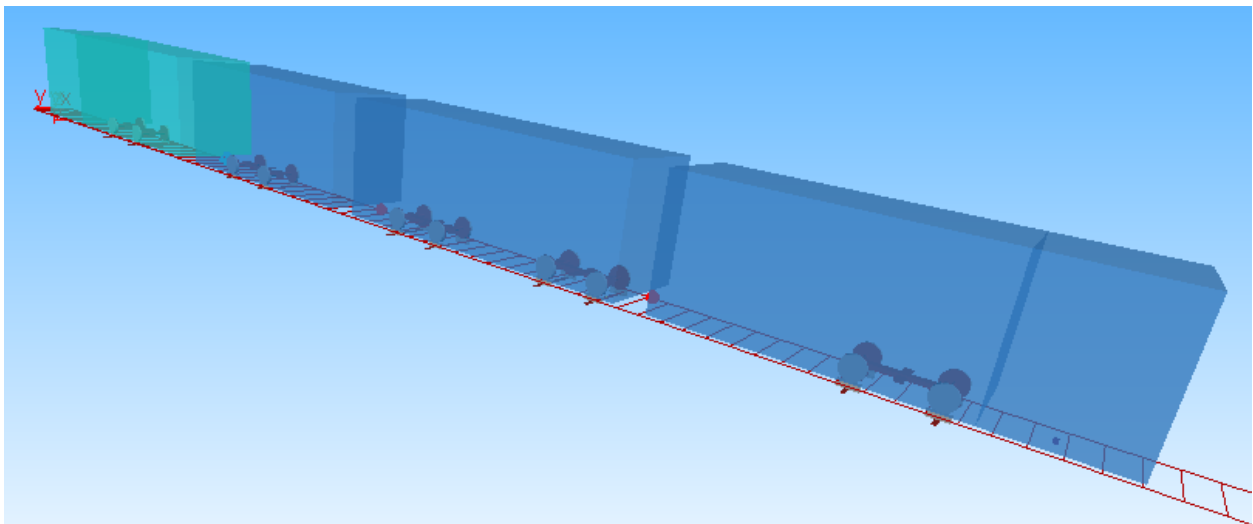


Abbildung 2: MKS-Modell – Fahrzeug

Abbildung 3 zeigt das modellierte Fahrzeug auf einem Gleis der untersuchten Bogenschar. Die einzelnen Elemente dieser Bogenschar unterscheiden sich nur im Radius. Die Bögen haben immer eine Länge von 50 m, sind mit einer 50 m langen Gerade verbunden und werden von 100 m langen Einlauf- bzw. Auslaufgeraden eingerahmt.

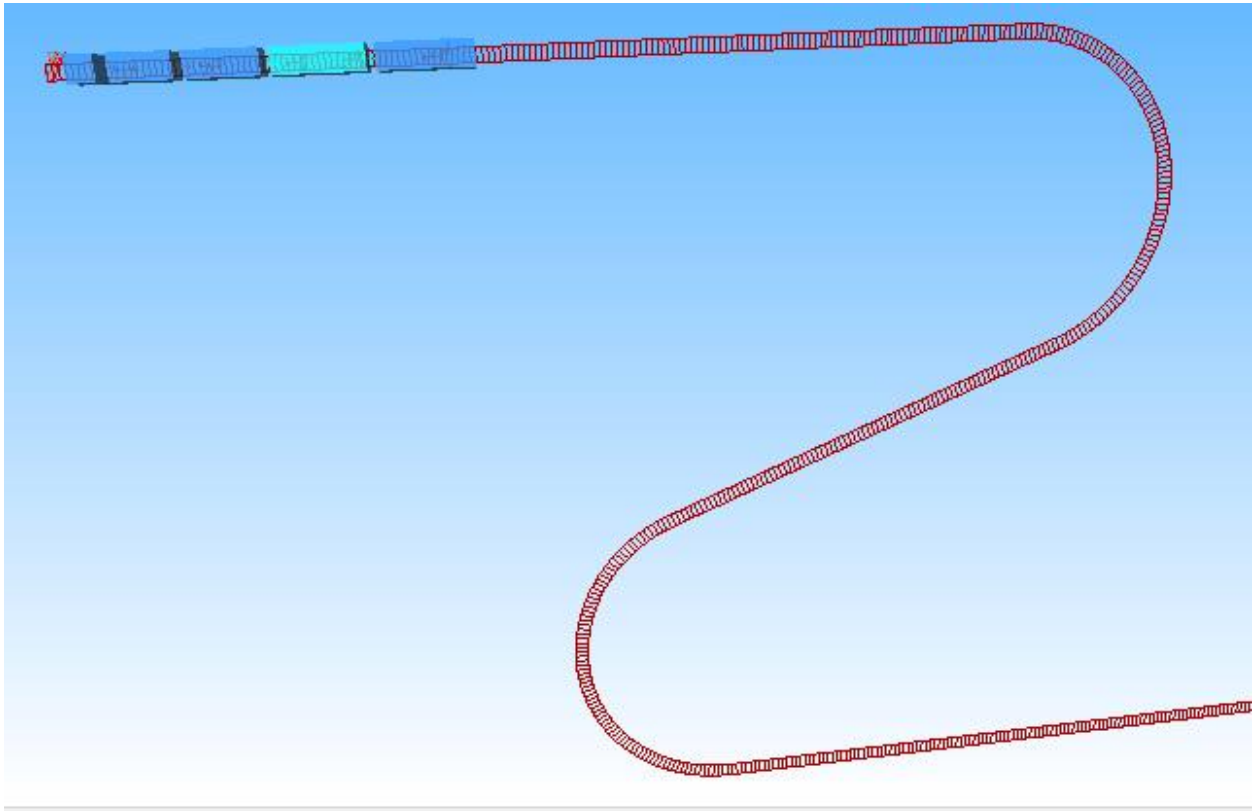


Abbildung 3: MKS-Modell Gleis und Fahrzeug

7.2 Fahrzeugkontur

Die Hauptabmessungen und die Kontur des Fahrzeuges sind nachfolgend in Abbildung 4 bis Abbildung 6 dargestellt.

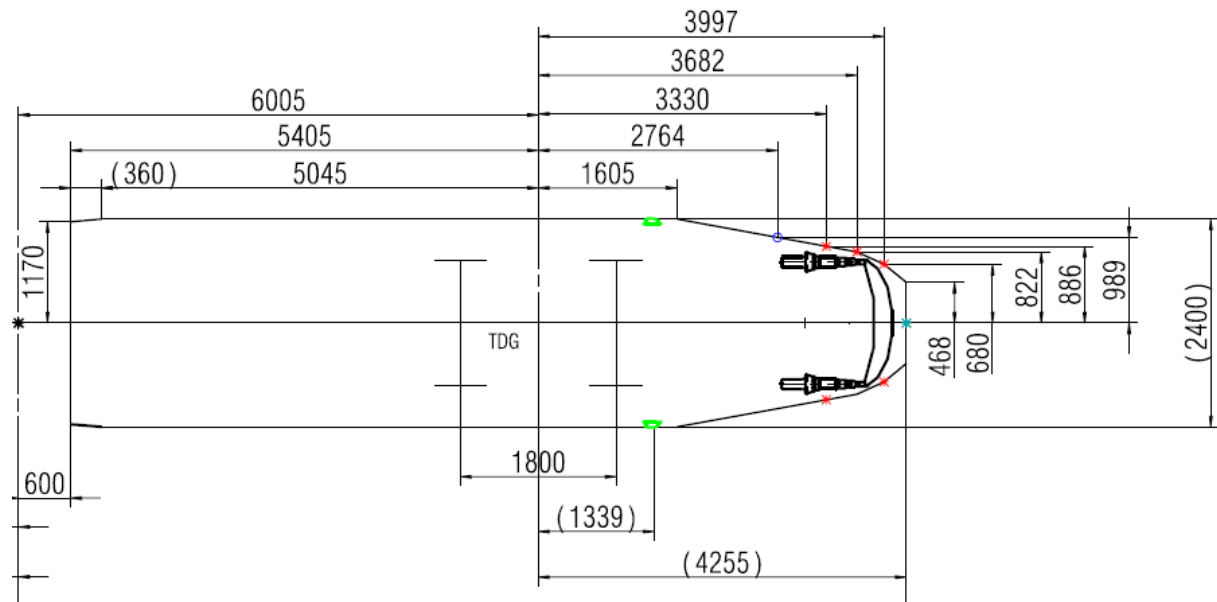


Abbildung 4: Endwagen WT1 und 2

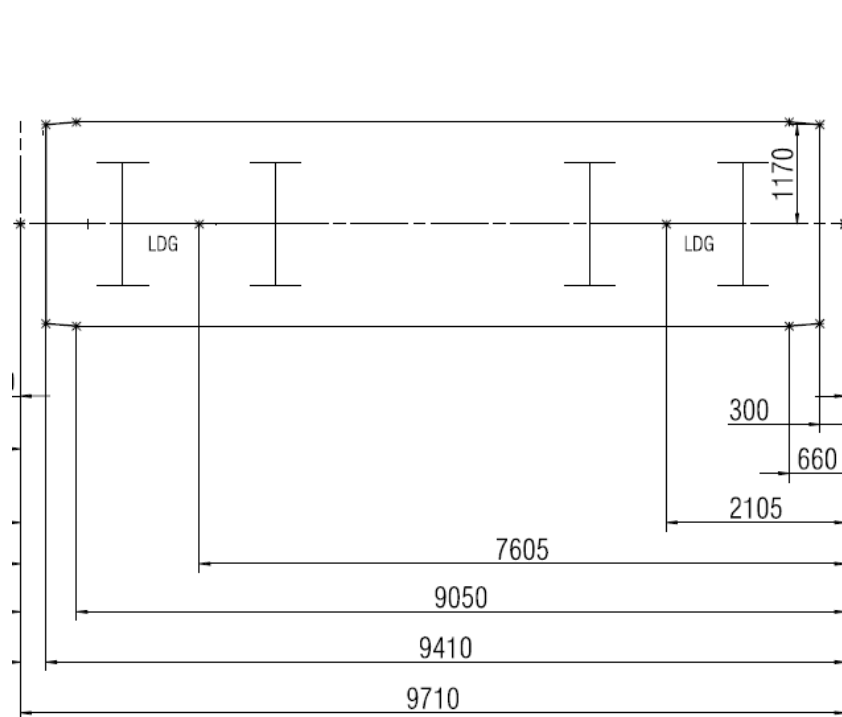


Abbildung 5: Mittelwagen WT3

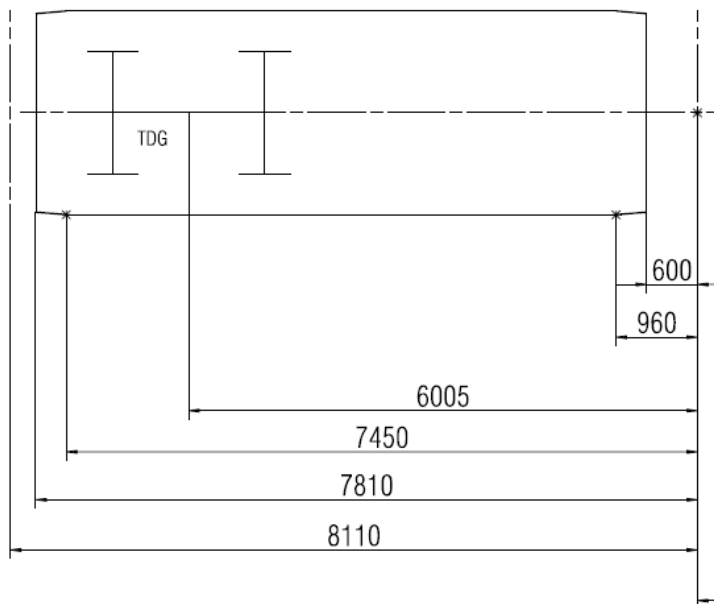


Abbildung 6: Mittelwagen WT4

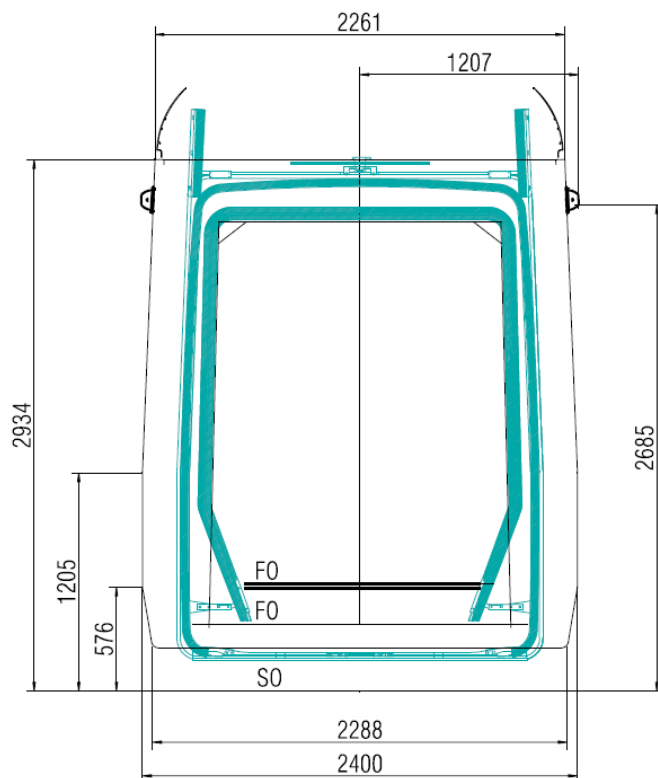


Abbildung 7: Fahrzeugquerschnitt

7.3 Statische Hüllkurve

Die charakteristischen Werte der statischen Hüllkurve des *Flexity* Magdeburg sind in Tabelle 4 aufgeführt. Dabei kennzeichnen die farblichen Markierungen die für die statische Hüllkurve maßgeblichen Konturpunkte für die Zuordnung der dazugehörigen dynamischen Zuschläge in Abschnitt 7.4.5. Die Legende befindet sich unterhalb der Tabelle.

In Tabelle 5 ist der Vergleich zwischen den charakteristischen Werten der statischen Hüllkurve des *Flexity* Magdeburg und des Bestandsfahrzeugs NGT 8D – theoretisch verbreitert um 50 mm je Seite – dargestellt, siehe auch Tabelle 2. Positive, blaue Werte bedeuten dabei, dass die statische Hüllkurve des *Flexity* Magdeburg geringere Werte aufweist. Er-sichtlich ist, dass die Vorgabe auf der Bogeninnenseite außer beim Gegenausschlag ge-ringfügig überschritten wird. Dies liegt in den längeren Drehgestellabständen im Mittel-wagen und den größeren gelenkseitigen Überhängen der aufgesattelten Wagenteile be-gründet. Da für die Bewertung der Befahrbarkeit der Infrastruktur durch ein Fahrzeug ausschließlich der Lichtraumbedarf des Fahrzeuges ausschlaggebend ist, und nicht die statische Hüllkurve, erfolgt die Bewertung erst in Kapitel 9.

Tabelle 4: Statische Hüllkurve

Bogen- radius [m]	Statische Hüllkurve Flexity Magdeburg								
	Höhe 1205 mm über SO; Fahrzeugbreite 2400 mm								
	Bogeninnen				Bogenaußen				
	Globales Maximum	Gegen- ausschlag	Lokales Maximum BA / BE	Be- harrung	Globales Maximum	Gegen- ausschlag	Lokales Maximum am BA / BE	Lokales Maximum im Bogen	Be- harrung
18	1463	1324	1463	1429	1701	1239	1551	1701	1542
20	1437	1312	1437	1406	1621	1235	1517	1621	1475
25	1389	1290	1389	1364	1472	1228	1455	1472	1401
30	1357	1275	1357	1337	1413	1224	1413	1401	1365
35	1335	1264	1335	1317	1383	1220	1383	1372	1339
40	1318	1256	1318	1303	1360	1218	1360	1351	1319
45	1305	1250	1305	1291	1342	1216	1342	1334	1303
50	1294	1245	1294	1282	1328	1214	1328	1321	1290
55	1286	1241	1286	1275	1317	1213	1317	1310	1282
60	1278	1238	1278	1268	1307	1212	1307	1301	1275
65	1272	1235	1272	1263	1299	1211	1299	1293	1270
70	1267	1232	1267	1259	1292	1210	1292	1287	1265
75	1263	1230	1263	1255	1286	1210	1286	1281	1261
80	1259	1228	1259	1251	1280	1209	1280	1276	1257
85	1255	1227	1255	1248	1276	1208	1276	1272	1254
90	1252	1225	1252	1246	1271	1208	1271	1268	1251
95	1250	1224	1250	1243	1268	1208	1268	1264	1248
100	1247	1223	1247	1241	1264	1207	1264	1261	1246
110	1243	1221	1243	1237	1259	1207	1259	1255	1242
120	1239	1219	1239	1234	1254	1206	1254	1251	1238
130	1236	1217	1236	1232	1250	1206	1250	1247	1235
140	1234	1216	1234	1229	1246	1205	1246	1244	1233
150	1231	1215	1231	1227	1243	1205	1243	1241	1231
200	1224	1211	1224	1221	1232	1204	1232	1230	1223
300	1216	1208	1216	1214	1221	1202	1221	1220	1216
400	1212	1206	1212	1210	1216	1202	1216	1215	1212
500	1209	1205	1209	1208	1213	1201	1213	1212	1209
600	1208	1204	1208	1207	1211	1201	1211	1210	1208
1000	1205	1202	1205	1204	1206	1201	1206	1206	1205

WT 1/2 Kopf 3682 ab DG	
WT 2 Kopf -1605 ab DG	
WT 1/4 EP-Einzug -5045 ab DG	
WT 3 EP 4555 mm ab Mitte	
WT 3 Beginn EP-Einzug 4195 mm ab Mitte	
WT 3 Mitte DZ-Abstand	
WT 1/2/4 Mitte Gelenküberhang	
WT 2 Beginn EP-Einzug 5045 ab DG	
(WT 1 Kopf 1605 ab DG)	

Tabelle 5: Vergleich der statischen Hüllkurve zur Vorgabe

Bogen- radius [m]	Vergleich statische Hüllkurve Flexity Magdeburg zu NGT 8D Magdeburg (+50 mm)							
	Bogeninnen				Bogenaußen			
	Globales Maximum	Gegen- ausschlag	Lokales Maximum BA / BE	Be- harrung	Globales Maximum	Lokales Maximum am BA / BE	Lokales Maximum im Bogen	Be- harrung
18	-14	13	-14	-26	14	164	14	-9
20	-13	12	-13	-24	16	120	16	28
25	-10	10	-10	-18	39	56	39	45
30	-8	9	-8	-16	47	47	59	42
35	-8	8	-8	-13	41	41	52	40
40	-7	7	-7	-12	36	36	45	38
45	-6	6	-6	-10	32	32	40	37
50	-5	6	-5	-9	29	29	36	37
55	-5	5	-5	-9	26	26	33	34
60	-4	5	-4	-7	24	24	30	31
65	-4	4	-4	-7	22	22	28	28
70	-3	5	-3	-7	20	20	25	27
75	-4	4	-4	-6	19	19	24	25
80	-3	4	-3	-5	18	18	22	23
85	-3	3	-3	-5	16	16	20	22
90	-3	4	-3	-5	17	17	20	21
95	-3	3	-3	-5	15	15	19	20
100	-3	3	-3	-4	15	15	18	19
110	-2	2	-2	-4	13	13	17	17
120	-2	2	-2	-4	12	12	15	16
130	-2	3	-2	-4	11	11	14	15
140	-2	2	-2	-3	10	10	12	13
150	-1	2	-1	-3	10	10	12	12
200	-2	2	-2	-3	7	7	9	10
300	-1	1	-1	-2	5	5	6	6
400	-1	1	-1	-1	4	4	5	4
500	0	0	0	0	3	3	4	4
600	-1	1	-1	-1	2	2	3	3
1000	-5	-2	-5	-4	-6	-6	-6	-5

7.4 Dynamische Zuschläge

7.4.1 Einleitung

Kapitel 7.4 enthält eine untersetzte, detaillierte Darstellung der dynamischen Zuschläge für das Fahrzeug auf querverschieblich gelagertem Gleis. Die Rechenregeln der TRStrab Lichtraum [5] finden Anwendung. Über die Verschiebung der Anlenkpunkte wird die Stellung des Fahrzeugs im Spurkanal dargestellt und die Eintrittswahrscheinlichkeit des gleichzeitigen Auftretens der ungünstigsten Einflüsse zur ungünstigen Seite wird mittels der zufälligen und nicht zufälligen Anteile berücksichtigt.

Die fahrzeugseitigen Eingangsparameter basieren auf Auslegungswerten und praktischen Erfahrungen (z.B. Messungen und Versuchsfahrten).

Der gesamte dynamische Zuschlag setzt sich aus den folgenden Anteilen zusammen:

1. zufälliger Anteil der Querverschiebung
2. nicht zufälliger Anteile der Querverschiebung
3. Stellung im Spurkanal
4. Wanken

Die Berechnung der dynamischen Zuschläge für den *Flexity* Magdeburg erfolgt ausgehend vom Mittelwagen WT3. Da dieser über zwei Drehgestelle verfügt, sind die dynamischen Zuschläge an dessen Gelenkpunkten bestimmt. Diese wiederum fungieren als Anlenkpunkte für die benachbarten aufgesattelten Wagenteile, usw.

7.4.2 Eingangsgrößen

Tabelle 6 fasst die Eingangsgrößen zusammen, die der Berechnung der dynamischen Zuschläge zugrunde liegen. Die dynamischen Zuschläge nach TRStrab Lichtraum [5] sind unter anderem vom Gleisbogenradius und der Lage des betrachteten Querschnittes abhängig.

Tabelle 6: Eingangsgrößen

Einflussgröße	Wert	Quelle
Gleisquerverschiebung	30 mm (Tabelle 1)	Pflichtenheft Abschnitt 4.7 [1] (verschieblich gelagertes Gleis)
Dyn. Sekundärfederweg	LDG: 13 mm TDG: 18 mm	Bombardier
Fahrzeugtoleranz	5 mm	Bombardier
Stat. Sekundärfederweg	10 mm	Bombardier
Primärfederweg	5 mm	Bombardier
Flankenverschleiß	f(R) bzw. Tabelle 1	TRStrab Lichtraum [5] bzw. Pflichtenheft Abschnitt 4.7 [1]
Spurkranzverschleiß	4 mm	Bombardier
Nominales Spurspiel	5 mm	Bombardier
Wankpolhöhe	220 mm	Bombardier (Typtest ähnliches Fahrzeug)
Wankwinkel	1,9 °	Bombardier (Typtest ähnliches Fahrzeug)
Diverse fahrzeugseitige Spiele	2 mm	Bombardier – z.B. Achslager, Drehzapfen

Aufgrund der Festlegungen für den Parameter Gleisquerverschiebung im Pflichtenheft-Abschnitt 4.7 [1] entfällt für diesen Parameter die Abhängigkeit vom Bogenradius nach TRStrab Lichtraum [5]. Beim Schienenflankenverschleiß wird die vom Bogenradius abhängige Verteilung nach TRStrab Lichtraum [5] für den Fall „Spurerweiterung beginnt an der Außenschiene“ angesetzt, jedoch wird der Verschleiß auf 15 mm je Schiene begrenzt entsprechend der Festlegung im Pflichtenheft-Abschnitt 4.7 [1].

7.4.3 Berechnung Mittelwagen WT3

Zufälliger Anteil der Querverschiebung:

$$y_{zuf} = \sqrt{\sum_{i=1}^n y_{zi}^2}$$

Tabelle 7: Zufällige Einflüsse

Zufällige Einflüsse y_{zuf}					
Gleis- querver- schie- bung	Dynam. Quer- feder- weg	Fahr- zeug- tole- ranz	Gesamt- ver- schie- bung		
y_{GV}	y_{DF}	y_{TF}	y_{zuf}		
30,0	13,0	5,0	33,1	y_{GV}	Gleisquerverschiebung, ver- schieblich gelagertes Gleis
				y_{DF}	Dynamischer Anteil des Querfe- derwegs der Sekundärfeder
				y_{TF}	Verschiedene Fahrzeugtoleran- zen
				y_{zuf}	Gesamte zufällige Querverschie- bung

Nicht zufälliger Anteil der Querverschiebung:

$$y_{nzuf} = \sum_{i=1}^n y_{zi}$$

Tabelle 8: Nicht zufällige Einflüsse

Nicht zufälliger Anteil				
Stat. Anteil Quer- feder- weg	Diverse Spiele	Gesamt- ver- schie- bung		
y_{FS}	y_{QS}	y_{nzuf}		
10,0	2,0	12,0	y_{FS}	Statischer Anteil des Querfe- derwegs der Sekundärfeder
			y_{QS}	Summe diverser Querspiele
			y_{nzuf}	Gesamte nicht zufällige Quer- verschiebung

Spurspiel (für Stellung im Spurkanal):

Tabelle 9: Berechnung Spurspiel (für Stellung im Spurkanal)

Bogen- radius [m]	Halbes Spurspiel								
	Schienen- flanken- verschleiß außen	Spur- kranz- ver- schleiß	Primär- feder- weg	Halbes nomi- nales Spur- spiel	Summe bogen- außen	Schienen- flanken- verschleiß innen	Summe bogen- innen		
	$y_{sv,a}$	y_{spv}	y_{fp}	$y_{sp,nom}$	$y_{sp,s,a}$	$y_{sv,i}$	$y_{sp,s,i}$		
18	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	7,5	-19,0	$y_{sv,a}$	Schienen- flanken- verschleiß bogenäu- ßere Schiene
20	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	7,5	-19,0	$y_{sv,i}$	Schienen- flanken- verschleiß bogenin- nere Schiene
25	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	7,5	-19,0		
30	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	7,5	-19,0		
35	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	7,5	-19,0	y_{spv}	Spurkranz- flan- kenver- schleiß je Rad
40	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	7,5	-19,0		
45	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	6,7	-18,2		
50	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	6,0	-17,5		
55	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	5,5	-17,0	y_{fp}	Statischer Anteil des Querfeder- wegs der Primärfeder
60	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	5,0	-16,5		
65	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	4,6	-16,1		
70	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	4,3	-15,8		
75	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	4,0	-15,5		
80	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	3,8	-15,3		
85	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	3,5	-15,0		
90	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	3,3	-14,8		
95	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	3,2	-14,7	$y_{sp,nom}$	halbes no- minales Spurspiel
100	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	3,0	-14,5		
110	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	2,7	-14,2		
120	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	2,5	-14,0	$y_{sp,\Sigma,\alpha}$	Gesamtes halbes Spurspiel bogenauß- ten
130	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	2,3	-13,8		
140	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	2,1	-13,6		
150	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	2,0	-13,5		
200	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	1,5	-13,0		
300	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	1,0	-12,5	$y_{sp,\Sigma,\alpha}$	Gesamtes halbes Spurspiel bogenin- nen
400	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	0,8	-12,3		
500	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	0,6	-12,1		
600	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	0,5	-12,0		
1000	15,0	4,0	5,0	2,5	26,5	0,0	-11,5		

Stellung des Fahrzeuges im Spurkanal:

Aufgrund der Spießgangstellung des Fahrzeugs kommt es zu einer zusätzlichen Auslenkung $y'(x)$, wobei x den Abstand zur Mitte zwischen den Drehgestellen (Anlenkpunkte) beschreibt:

$$y'(x) = (y_{Sp,\Sigma,a} + y_{Sp,\Sigma,i}) \cdot \frac{x - a_{DG}/2}{a_{DG}}$$

Tabelle 10: Einfluss der Fahrzeugstellung im Spurkanal – WT3

Bogen- radius [m]	Halbes Spurspiel		Einfluss $y'(x)$ aufgrund der Spießgangstellung des Fahrzeugs im Spurkanal am Mittelwagen im Bereich der Überhänge x ab Mitte DG					
	Summe bogen- außen $y_{Sp,S,a}$	Summe bogen- innen $y_{Sp,S,i}$	-4855	-4555	-4195	4195	4555	4855
18	26,5	-19,0	-62,9	-60,4	-57,5	12,0	14,9	17,4
20	26,5	-19,0	-62,9	-60,4	-57,5	12,0	14,9	17,4
25	26,5	-19,0	-62,9	-60,4	-57,5	12,0	14,9	17,4
30	26,5	-19,0	-62,9	-60,4	-57,5	12,0	14,9	17,4
35	26,5	-19,0	-62,9	-60,4	-57,5	12,0	14,9	17,4
40	26,5	-19,0	-62,9	-60,4	-57,5	12,0	14,9	17,4
45	26,5	-18,2	-61,8	-59,3	-56,4	11,7	14,7	17,1
50	26,5	-17,5	-60,8	-58,4	-55,6	11,6	14,4	16,8
55	26,5	-17,0	-60,1	-57,7	-54,9	11,4	14,3	16,6
60	26,5	-16,5	-59,5	-57,1	-54,3	11,3	14,1	16,5
65	26,5	-16,1	-58,9	-56,6	-53,8	11,2	14,0	16,3
70	26,5	-15,8	-58,5	-56,2	-53,4	11,1	13,9	16,2
75	26,5	-15,5	-58,1	-55,8	-53,0	11,0	13,8	16,1
80	26,5	-15,3	-57,7	-55,5	-52,7	11,0	13,7	16,0
85	26,5	-15,0	-57,4	-55,2	-52,4	10,9	13,6	15,9
90	26,5	-14,8	-57,2	-54,9	-52,2	10,9	13,6	15,8
95	26,5	-14,7	-56,9	-54,7	-52,0	10,8	13,5	15,8
100	26,5	-14,5	-56,7	-54,5	-51,8	10,8	13,5	15,7
110	26,5	-14,2	-56,3	-54,1	-51,4	10,7	13,4	15,6
120	26,5	-14,0	-56,0	-53,8	-51,1	10,6	13,3	15,5
130	26,5	-13,8	-55,7	-53,5	-50,9	10,6	13,2	15,4
140	26,5	-13,6	-55,5	-53,3	-50,7	10,5	13,2	15,4
150	26,5	-13,5	-55,3	-53,1	-50,5	10,5	13,1	15,3
200	26,5	-13,0	-54,6	-52,5	-49,9	10,4	13,0	15,1
300	26,5	-12,5	-53,9	-51,8	-49,2	10,2	12,8	14,9
400	26,5	-12,3	-53,6	-51,5	-48,9	10,2	12,7	14,8
500	26,5	-12,1	-53,4	-51,3	-48,7	10,1	12,7	14,8
600	26,5	-12,0	-53,2	-51,1	-48,6	10,1	12,6	14,7
1000	26,5	-11,5	-52,5	-50,5	-48,0	10,0	12,5	14,5

Verlagerung (Wanken):

Tabelle 11: Wankeinfluss

Wankeinfluss (nz) bei h ü. SOK		y_{wank}	Zusätzliche Querauslenkung aufgrund des Wankens
Höhe Fenster- brüstung	Höhe Dach- kante	$h(x)$	Höhe des betrachteten Punktes über SOK
1205	2934	h_c	Wankpolhöhe
32,7	90,0	η_{fzg}	gesamter Wankwinkel (beide Federstufen)

Zusammenfassung (Addition) der einzelnen Anteile – Bogenaußen – WT3

Um die Anzahl der dynamischen Zuschläge zu reduzieren und somit die Übersichtlichkeit zu erhöhen, wurden die einzelnen Einflüsse so zusammengefasst, dass Maximalwerte entstehen, auch wenn die einzelnen Anteile in der Praxis nicht gemeinsam an einer Stelle auftreten können. So werden z.B. auch am Fahrzeugkopf die Wankeinflüsse der Seitenwandbrüstung und der Dachkante angesetzt. Es ist zu beachten, dass bei der Darstellung des Lichtraumbedarfs für die Höhe der Dachkante der Seitenwandeneinzug zu berücksichtigen ist.

Der gesamte dynamische Zuschlag ergibt sich mit folgender Formel:

$$y_{dyn_zuschlag}(x, z) = y_{zuf}(x) + y_{nzuf}(x) + y_{quer}(x) + y'(x) + y_{Wank}(z)$$

Tabelle 12: Gesamte dynamische Zuschläge – Bogenaußen – WT3

Bogen- radius [m]	Gesamter dynamischer Zuschlag h = 1205 bei x ab DZ WT1						Gesamter dynamischer Zuschlag h = 2934 bei x ab DZ WT1					
	-4855	-4555	-4195	4195	4555	4855	-4855	-4555	-4195	4195	4555	4855
18	42	44	47	117	120	122	99	102	105	174	177	179
20	42	44	47	117	120	122	99	102	105	174	177	179
25	42	44	47	117	120	122	99	102	105	174	177	179
30	42	44	47	117	120	122	99	102	105	174	177	179
35	42	44	47	117	120	122	99	102	105	174	177	179
40	42	44	47	117	120	122	99	102	105	174	177	179
45	43	45	48	116	119	122	100	103	106	174	177	179
50	44	46	49	116	119	122	101	104	107	174	177	179
55	45	47	50	116	119	121	102	104	107	173	176	179
60	45	48	50	116	119	121	103	105	108	173	176	179
65	46	48	51	116	119	121	103	105	108	173	176	178
70	46	49	51	116	119	121	104	106	109	173	176	178
75	47	49	52	116	119	121	104	106	109	173	176	178
80	47	49	52	116	118	121	104	107	109	173	176	178
85	47	50	52	116	118	121	105	107	110	173	176	178
90	48	50	53	116	118	121	105	107	110	173	176	178
95	48	50	53	116	118	120	105	107	110	173	176	178
100	48	50	53	116	118	120	105	108	110	173	176	178
110	48	51	53	115	118	120	106	108	111	173	175	178
120	49	51	54	115	118	120	106	108	111	173	175	178
130	49	51	54	115	118	120	106	109	111	173	175	178
140	49	51	54	115	118	120	107	109	111	173	175	177
150	49	52	54	115	118	120	107	109	112	173	175	177
200	50	52	55	115	118	120	107	110	112	172	175	177
300	51	53	55	115	118	120	108	110	113	172	175	177
400	51	53	56	115	117	120	108	111	113	172	175	177
500	51	53	56	115	117	120	109	111	113	172	175	177
600	52	54	56	115	117	119	109	111	113	172	175	177
1000	52	54	57	115	117	119	110	112	114	172	175	177

Zusammenfassung (Addition) der einzelnen Anteile – Bogeninnen – WT3

Auf der Bogeninnenseite ergibt sich der größte (theoretische) dynamische Zuschlag, wenn das Fahrzeug mit allen Drehgestellen maximal zur Bogeninnenseite verschoben ist. Dieser Lastfall könnte eintreten, wenn das Fahrzeug im maximal überhöhten Gleis steht. Es sind die nachfolgenden Anteile zu berücksichtigen, die bereits im voranstehenden Text beschrieben sind:

- zufälliger Anteil der Querverschiebung y_{zuf}
- nicht zufälliger Anteil der Querverschiebung y_{nzuf}
- Gesamtes halbes Spurspiel $y_{Sp,\Sigma}$
- Einfluss der Stellung im Spurkanal y'
- Wankanteil y_{wank}

$$y_{dyn_zuschlag}(x) = (y_{zuf}(x) + y_{nzuf}(x) + y_{Sp,\Sigma} + y'(x) + y_{wank}(x, z)) \quad \text{mit } y'(x) = 0$$

Auf der Bogeninnenseite ist mit folgenden dynamischen Zuschlägen zu rechnen:

Tabelle 13: Gesamte dynamische Zuschläge – Bogeninnen – WT3

Bogen- radius [m]	Höhe Fenster- brüstung h = 1205	Höhe Dach- kante h = 2934
18	-97,0	-155,0
20	-97,0	-155,0
25	-97,0	-155,0
30	-97,0	-155,0
35	-97,0	-155,0
40	-97,0	-155,0
45	-96,0	-154,0
50	-96,0	-153,0
55	-95,0	-153,0
60	-95,0	-152,0
65	-94,0	-152,0
70	-94,0	-151,0
75	-94,0	-151,0
80	-93,0	-151,0
85	-93,0	-151,0
90	-93,0	-150,0
95	-93,0	-150,0
100	-93,0	-150,0
110	-92,0	-150,0
120	-92,0	-150,0
130	-92,0	-149,0
140	-92,0	-149,0
150	-92,0	-149,0
200	-91,0	-149,0
300	-91,0	-148,0
400	-90,0	-148,0
500	-90,0	-148,0
600	-90,0	-148,0
1000	-90,0	-147,0

7.4.4 Berechnung aufgesattelte Wagenteile WT1, WT2, WT4

Unter Nutzung der dynamischen Zuschläge an den Gelenkpunkten des Mittelwagens WT3 lassen sich die dynamischen Zuschläge an den aufgesattelten Wagenteilen analog zur Berechnung in Abschnitt 7.4.3 ermitteln. Dabei sind die an den Triebdrehgestellen (TDG) größeren Sekundärfederwege (siehe Tabelle 6) zu berücksichtigen.

Zusammenfassung (Addition) der einzelnen Anteile – Bogenaußen – WT1, 2, 4

Für die Ermittlung des Lichtraumbedarfs des Gesamtfahrzeugs *Flexity* Magdeburg sind auf der Bogenaußenseite insbesondere die dynamischen Zuschläge in den Kopfbereichen der WT1 (Tabelle 14) und WT2 (Tabelle 15) erforderlich.

Tabelle 14: Gesamte dynamische Zuschläge – Bogenaußen – WT1

Bogen- radius [m]	Gesamter dynamischer Zuschlag h = 1205 bei x ab DZ WT1						Gesamter dynamischer Zuschlag h = 2934 bei x ab DZ WT1					
	1605	2764	3330	3682	3997	4255	1605	2764	3330	3682	3997	4255
18	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
19	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
20	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
22	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
24	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
25	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
26	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
28	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
30	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
35	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
40	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	208	211
45	124	136	143	146	150	152	181	194	200	204	207	210
50	124	136	142	146	149	152	181	193	199	203	206	209
55	124	136	142	145	149	151	181	193	199	203	206	209
60	124	135	141	145	148	151	181	193	199	202	205	208
65	123	135	141	145	148	150	181	193	198	202	205	208
70	123	135	141	144	147	150	181	192	198	202	205	207
75	123	135	140	144	147	150	180	192	198	201	205	207
80	123	135	140	144	147	150	180	192	198	201	204	207
85	123	134	140	144	147	149	180	192	197	201	204	207
90	123	134	140	143	147	149	180	192	197	201	204	206
95	123	134	140	143	146	149	180	192	197	201	204	206
100	123	134	140	143	146	149	180	191	197	200	204	206
110	123	134	139	143	146	149	180	191	197	200	203	206
120	123	134	139	143	146	148	180	191	197	200	203	206
130	123	134	139	143	146	148	180	191	197	200	203	205
140	122	134	139	142	145	148	180	191	196	200	203	205
150	122	134	139	142	145	148	180	191	196	200	203	205
200	122	133	139	142	145	147	180	191	196	199	202	205
300	122	133	138	141	144	147	179	190	196	199	202	204
400	122	133	138	141	144	147	179	190	195	199	202	204
500	122	133	138	141	144	146	179	190	195	198	201	204
600	122	133	138	141	144	146	179	190	195	198	201	204
1000	122	132	137	141	143	146	179	190	195	198	201	203

Tabelle 15: Gesamte dynamische Zuschläge – Bogenaußen – WT2

Bogen- radius [m]	Gesamter dynamischer Zuschlag h = 1205 bei x ab DZ WT2						Gesamter dynamischer Zuschlag h = 2934 bei x ab DZ WT2					
	1605	2764	3330	3682	3997	4255	1605	2764	3330	3682	3997	4255
18	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
19	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
20	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
22	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
24	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
25	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
26	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
28	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
30	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
35	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
40	125	138	144	148	151	154	182	195	201	205	209	212
45	125	137	143	147	151	153	182	194	201	205	208	211
50	124	137	143	147	150	153	182	194	200	204	207	210
55	124	136	142	146	149	152	181	194	200	203	207	209
60	124	136	142	146	149	152	181	193	199	203	206	209
65	124	136	142	145	149	151	181	193	199	203	206	209
70	124	136	141	145	148	151	181	193	199	202	206	208
75	123	135	141	145	148	151	181	193	198	202	205	208
80	123	135	141	145	148	150	181	193	198	202	205	208
85	123	135	141	144	148	150	181	192	198	202	205	207
90	123	135	141	144	147	150	181	192	198	201	205	207
95	123	135	140	144	147	150	180	192	198	201	204	207
100	123	135	140	144	147	150	180	192	198	201	204	207
110	123	134	140	144	147	149	180	192	197	201	204	207
120	123	134	140	143	146	149	180	192	197	201	204	206
130	123	134	140	143	146	149	180	192	197	201	204	206
140	123	134	140	143	146	149	180	191	197	200	203	206
150	123	134	139	143	146	149	180	191	197	200	203	206
200	122	134	139	142	146	148	180	191	196	200	203	205
300	122	133	139	142	145	147	180	191	196	199	202	205
400	122	133	138	142	145	147	180	190	196	199	202	205
500	122	133	138	142	145	147	179	190	196	199	202	204
600	122	133	138	142	145	147	179	190	196	199	202	204
1000	122	133	138	141	144	146	179	190	195	198	201	204

Zusammenfassung (Addition) der einzelnen Anteile – Bogeninnen – WT1, 2, 4

Für die in Abschnitt 7.4.3 beschriebene innere Sehnenstellung des *Flexity* Magdeburg ergeben sich für die mit Triebdrehgestellen ausgerüsteten Wagenteile die dynamischen Zuschläge auf der Bogeninnenseite in Tabelle 16.

Tabelle 16: Gesamte dynamische Zuschläge – Bogeninnen – WT1, 2, 4

Bogen- radius [m]	Höhe Fenster- brüstung h = 1205	Höhe Dach- kante h = 2934
18	-100,0	-157,0
19	-100,0	-157,0
20	-100,0	-157,0
22	-100,0	-157,0
24	-100,0	-157,0
25	-100,0	-157,0
26	-100,0	-157,0
28	-100,0	-157,0
30	-100,0	-157,0
35	-100,0	-157,0
40	-100,0	-157,0
45	-99,0	-156,0
50	-98,0	-155,0
55	-97,0	-155,0
60	-97,0	-154,0
65	-97,0	-154,0
70	-96,0	-154,0
75	-96,0	-153,0
80	-96,0	-153,0
85	-96,0	-153,0
90	-95,0	-153,0
95	-95,0	-152,0
100	-95,0	-152,0
110	-95,0	-152,0
120	-95,0	-152,0
130	-94,0	-152,0
140	-94,0	-151,0
150	-94,0	-151,0
200	-94,0	-151,0
300	-93,0	-150,0
400	-93,0	-150,0
500	-93,0	-150,0
600	-93,0	-150,0
1000	-92,0	-149,0

7.4.5 Gesamter dynamischer Zuschlag

Aus den Ergebnissen in den vorherigen Abschnitten ergeben sich für die Konturpunkte, welche die statische Hüllkurve bestimmen, siehe Tabelle 4, die folgenden dynamischen Zuschläge für die Höhe 1205 mm über SO (Fensterbrüstung, breiteste Stelle am Fahrzeug). Die Farbkodierung in Tabelle 17 entspricht jener in Tabelle 4.

Tabelle 17: Gesamter dynamischer Zuschlag, Höhe 1205 mm über SO

Bogen- radius [m]	Dynamischer Zuschlag Flexity Magdeburg Höhe 1205 mm über SO						
	Bogeninnen			Bogenaußen			
	Gegen- ausschlag	Lokales Maximum BA / BE	Be- harrung	Gegen- ausschlag	Lokales Maximum am BA / BE	Lokales Maximum im Bogen	Be- harrung
18	100	100	97	125	129	148	148
20	100	100	97	125	129	148	148
25	100	100	97	125	129	148	120
30	100	100	97	125	129	129	120
35	100	100	97	125	129	129	120
40	100	100	97	125	129	129	120
45	99	99	96	125	129	129	119
50	98	98	96	124	129	129	119
55	97	97	95	124	128	128	116
60	97	97	95	124	128	128	116
65	97	97	94	124	128	128	116
70	96	96	94	124	128	128	116
75	96	96	94	123	128	128	116
80	96	96	93	123	128	128	116
85	96	96	93	123	127	127	116
90	95	95	93	123	127	127	116
95	95	95	93	123	127	127	116
100	95	95	93	123	127	127	116
110	95	95	92	123	127	127	115
120	95	95	92	123	127	127	115
130	94	94	92	123	127	127	115
140	94	94	92	123	127	127	115
150	94	94	92	123	127	127	115
200	94	94	91	122	126	126	115
300	93	93	91	122	126	126	115
400	93	93	90	122	126	126	115
500	93	93	90	122	126	126	115
600	93	93	90	122	126	126	115
1000	92	92	90	122	126	126	115

Aufgrund des bei dieser Fahrzeugfamilie auftretenden Wankwinkels von $1,9^\circ$ wird der mit größer werdender Höhe über SO wachsende dynamische Zuschlag durch den Seiteneinbau von $2,3^\circ$ oberhalb von 1205 mm überkompensiert, wodurch zusätzlicher Spielraum für Anbauteile wie Blinker und Kameras entsteht. Deswegen wird in diesem Dokument auf das Ausweisen der dynamischen Zuschläge für weitere Fahrzeughöhen verzichtet.

7.5 Lichtraumbedarf

Tabelle 18 zeigt den Lichtraumbedarf des *Flexity* Magdeburg und Tabelle 19 den Vergleich mit dem vorhandenen Lichtraum. Die farblichen Markierungen korrespondieren wieder mit der Zuordnung der maßgeblichen Konturpunkte für die statische Hüllkurve in Tabelle 4. Die Tabellen zeigen die Werte in Höhe der Fensterbrüstung bei 1205 mm über SO. Wie zuvor beschrieben, ist der Dacheinbau größer als der Wankeneinfluss, sodass der maximale Lichtraumbedarf in Höhe der Fensterbrüstung zu erwarten ist.

Es ist festzustellen, dass der für den jeweiligen Worst-Case-Lastfall ermittelte Lichtraumbedarf sowohl auf der Bogenaußen- als auch der Bogeninnenseite deutlich kleiner als der vorhandene Lichtraum ist. Deswegen wird auf eine spezielle Bewertung von Anbauteilen, wie in Kapitel 4.10 des **Pflichtenheftes** [1] gefordert, verzichtet.

Tabelle 18: Lichtraumbedarf

Bogen- radius [m]	Lichtraumbedarf Flexity Magdeburg Höhe 1205 mm über SO								
	Bogeninnen				Bogenaußen				
	Globales Maximum	Gegen- ausschlag	Lokales Maximum BA / BE	Be- harrung	Globales Maximum	Gegen- ausschlag	Lokales Maximum am BA / BE	Lokales Maximum im Bogen	Be- harrung
18	1563	1424	1563	1526	1849	1364	1680	1849	1690
20	1537	1412	1537	1503	1769	1360	1646	1769	1623
25	1489	1390	1489	1461	1620	1353	1584	1620	1521
30	1457	1375	1457	1434	1542	1349	1542	1530	1485
35	1435	1364	1435	1414	1512	1345	1512	1502	1459
40	1418	1356	1418	1400	1489	1343	1489	1480	1439
45	1404	1349	1404	1387	1471	1341	1471	1463	1422
50	1392	1343	1392	1378	1457	1338	1457	1450	1409
55	1383	1338	1383	1370	1445	1337	1445	1438	1398
60	1375	1335	1375	1363	1435	1336	1435	1429	1391
65	1369	1332	1369	1357	1427	1335	1427	1421	1386
70	1363	1328	1363	1353	1420	1334	1420	1415	1381
75	1359	1326	1359	1349	1413	1333	1413	1409	1377
80	1355	1324	1355	1344	1408	1332	1408	1404	1373
85	1351	1323	1351	1341	1403	1331	1403	1399	1370
90	1347	1320	1347	1339	1399	1331	1399	1395	1367
95	1345	1319	1345	1336	1395	1331	1395	1391	1364
100	1342	1318	1342	1334	1392	1330	1392	1388	1362
110	1338	1316	1338	1329	1386	1330	1386	1382	1357
120	1334	1314	1334	1326	1381	1329	1381	1378	1353
130	1330	1311	1330	1324	1376	1329	1376	1374	1350
140	1328	1310	1328	1321	1373	1328	1373	1370	1348
150	1325	1309	1325	1319	1370	1328	1370	1367	1346
200	1318	1305	1318	1312	1359	1326	1359	1357	1338
300	1309	1301	1309	1305	1348	1324	1348	1347	1331
400	1305	1299	1305	1300	1342	1324	1342	1341	1327
500	1302	1298	1302	1298	1339	1323	1339	1338	1324
600	1301	1297	1301	1297	1337	1323	1337	1336	1323
1000	1297	1294	1297	1294	1332	1323	1332	1332	1320

Tabelle 19: Vergleich Lichtraumbedarf - Vorhandener Lichtraum

Bogen- radius [m]	Vergleich bogengeometrische Ausragung Flexity Magdeburg zu NGT 8D Magdeburg (+50 mm)						
	Bogeninnen			Bogenaußen			
	Gegen- ausschlag *)	Lokales Maximum BA / BE	Be- harrung	Gegen- ausschlag *)	Lokales Maximum am BA / BE	Lokales Maximum im Bogen	Be- harrung
18	101	165	202	161	178	9	168
20	113	170	204	165	182	59	205
25	135	182	210	172	187	151	250
30	150	189	212	176	190	202	247
35	161	194	215	180	192	202	245
40	169	198	216	182	193	202	243
45	176	202	219	184	194	202	243
50	182	206	220	187	195	202	243
55	187	208	221	188	196	203	243
60	190	211	223	189	196	202	240
65	193	212	224	190	196	202	237
70	197	214	224	191	197	202	236
75	199	215	225	192	198	202	234
80	201	216	227	193	197	201	232
85	202	217	227	194	198	202	231
90	205	219	227	194	198	202	230
95	206	218	227	194	198	202	229
100	207	220	228	195	198	202	228
110	209	220	229	195	198	202	227
120	211	221	229	196	198	201	226
130	214	223	229	196	199	201	225
140	215	223	230	197	198	201	223
150	216	224	230	197	198	201	222
200	220	225	231	199	199	201	220
300	224	228	232	201	199	200	216
400	226	229	234	201	199	200	214
500	227	231	235	202	199	200	214
600	228	230	234	202	199	200	213
1000	231	228	231	202	193	193	205
*) Vergleich gegen Geradenwert der LUL							

7.6 Fahrzeugbegegnung

Eine gezielte Bewertung der Fahrzeugbegegnung, wie in der Beantwortung der Bieterfrage 21 [4] gefordert, ist mangels der Angabe des Gleismittenabstandes in den Ausschreibungsunterlagen nicht möglich. Der große Spielraum zur Lichtraumvorgabe, siehe Tabelle 19, lässt aber keine Probleme hinsichtlich der Fahrzeugbegegnung erwarten, zumal gemäß TRStrab Lichtraum [5] für den Bewertungsfall „mehrgleisige Strecke mit benachbarten Gleisen“ die Einflussfaktoren auf die dynamischen Zuschläge abgemildert werden dürfen.

8 BODENFREIHEIT

Die in Abschnitt 4.10 des **Pflichtenheftes** [1] geforderten Bodenfreiheiten entsprechen üblichen Werten und werden durch die Fahrzeugfamilie des *Flexity* Magdeburg eingehalten. Die Forderung wird zugesagt.

9 ZUSAMMENFASSUNG

Im vorliegenden Dokument wird gezeigt, dass die Lichtraumvorgabe durch das angebotene Fahrzeug *Flexity* Magdeburg eingehalten wird. Es besteht genügend Spielraum für Anbauteile. Eine direkte Bewertung der Fahrzeugbegegnung ist aufgrund der Datenlage nicht möglich. Die geforderte Bodenfreiheit wird eingehalten.

Zur Vorgabe der statischen Hüllkurve ergeben sich durch den *Flexity* Magdeburg Überschreitungen bis zu 26 mm in engen Bogenradien auf der Bogeninnenseite, verursacht durch die im Vergleich zum Referenzfahrzeug längeren Drehgestellabstände. Im Hinblick auf die Spielräume zur Lichtraumvorgabe ist dies unproblematisch.

Das Straßenbahnnetz in Magdeburg ist folglich durch den angebotenen *Flexity* Magdeburg befahrbar.