

# Anlage A30

---

## Anlageninformation

### Angaben zum Inhalt

Titel	<b>Diskussion Neuberechnung Bremstabellen für die Meterspurbahnen in der Schweiz, Teilbericht 1</b>
Dokument	<b>18-54707-TT.TVE31-BAV-Bremstabellen</b>
Bezug zu	2020 AB-EBV Grundlagen Bremse Meterspur V3.00
Autor	Robert Karbstein Dr. Peter Spiess
Ausgabe	4. November 2020
Stand vom	4. November 2020

### Angaben zu der Quelldatei

Dateiname	A300_AB-EBV_2020_GL_Bremse
Quellformat	Microsoft Office Word 2016
Seitenanzahl (inkl. Titelblatt)	21
Dateigrösse Quellformat	30 KB
Zuletzt gespeichert	Mittwoch, 18. November 2020

### Weitere Angaben

Quelldatei	Begutachtung-Revisionsbericht-Teil1-v1.2-sig-PS-RK-SD.pdf



**DB Systemtechnik**

# Bericht

## **Diskussion Neuberechnung Bremstabellen für die Meterspurbahnen in der Schweiz, Teilbericht 1**

Dokument: 18-54707-TT.TVE31-BAV-Bremstabellen  
Datum: 04.11.2020

Fachabteilung: Bremse, Kupplung,  
Tür- und Einstiegssysteme



Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die im Bericht beschriebenen Sachverhalte. Dieser Bericht darf nicht ohne schriftliche Genehmigung des Auftraggebers veröffentlicht werden. Eine auszugsweise Vervielfältigung bedarf zusätzlich der Zustimmung des im Bericht genannten Auftragnehmers

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>Seite</b>
<b>1 Ausgangspunkt</b>	<b>4</b>
<b>2 Einleitende Anmerkungen</b>	<b>4</b>
<b>3 Dokumentenanalyse</b>	<b>5</b>
3.1 Prüfung	5
3.1.1 BAV-Reibwerte	5
3.1.2 Nachrechnung	6
3.1.3 Bewertungsgeschwindigkeit	9
3.2 Schutzziele	12
3.2.1 Vergleich Bremstabellen Schweiz und Bremsfelder Deutschland	12
3.2.2 Thermische Grenzen	17
3.2.3 Diskussion der Schutzziele	17
<b>4 Zusammenfassung</b>	<b>20</b>
<b>5 Unterschriften</b>	<b>20</b>

#### **Quellenverzeichnis/Literaturverzeichnis**

- BAV. (12.09.2017). *AB-EBV Revisionsrunde 2020, Teilprojekt Bremse Meterspur, Version 1.22*. Bundesamt für Verkehr, Abteilung Sicherheit, Sektion Fahrzeuge, Bern.
- BAV. (2020). *AB-EBV Revisionsrunde 2020, Teilprojekt Bremse Meterspur, Version 3.0 für Veröffentlichung*. Bundesamt für Verkehr, Abteilung Sicherheit, Sektion Fahrzeuge, Bern.
- CEN. (2015). *EN 14531-2:2015 Railway applications – Methods for calculation of stopping and slowing distances and immobilisation braking – Part 2: Step by step calculations for train sets or single vehicles*.

Angaben zum Auftrag

Aufgabenstellung:

Begutachtung des Berechnungsverfahrens von Bremstabellen für die Meterspur und Bestimmung thermisch kritischer Tabellenbereiche mit Hilfe von Simulationsrechnungen.

Auftraggeber:

Schweizerische Eidgenossenschaft  
Bundesamt für Verkehr BAV  
Abteilung Sicherheit, Sektion Fahrzeuge  
Mühlestrasse 6  
3063 Ittigen  
Ansprechpartner:  
Daniel Kiener  
Tel. +41 58 463 13 46  
E-Mail: Daniel.Kiener@bav.admin.ch

Auftragnehmer:

DB Systemtechnik GmbH  
Bremsen, Kupplung, Tür- und Einstiegssysteme  
Pionierstr. 10  
32423 Minden  
Herr Robert Karbstein  
Tel. +49 571 393 2368  
Fax. +49 571 393 1256  
E-Mail Robert.Karbstein@deutschebahn.com

Verteiler des Berichtes:

- BAV, Hansruedi Schmocker
- BAV, Daniel Kiener
- BAV, Johannes Erhart
- DB Systemtechnik, Helmut Möller
- DB Systemtechnik, Dr. Stefan Dörsch

## 1 Ausgangspunkt

Das Schweizer Bundesamt für Verkehr entwickelt derzeit ein Verfahren für die Festlegung von Bremstabellen für Meterspur-Bahnen. Der Grund hierfür liegt primär darin, dass sich der Fahrzeugpool der Betreiber von Meterspurbahnen in den letzten Jahrzehnten signifikant verändert hat. Bei den Reibmaterialien sind vor allem Verbundstoffbremsklotzsohlen zu nennen, die zunehmend den historischen Graugussbremsklotz mit seinen lärmbedingt ungünstigen Eigenschaften verdrängen.

Ferner verkehren im Personenverkehr vermehrt Triebzüge, welche mit modernen Bremskonzepten ausgestattet sind, die ein verschleißminderndes Zusammenspiel von Scheibenbremse und elektrodynamischer Bremse ermöglichen.

Diese vorgenannten Gegebenheiten führen dazu, dass die bestehenden Bremstabellen die Bedürfnisse der Betreiber nicht mehr zufriedenstellend abbilden. Als wesentliche Punkte beim Änderungsbedarf seien hier die notwendige Ausweitung der Bremstabellen auf den Geschwindigkeitsbereich bis 120 km/h, die Berücksichtigung von Verbundstoffsohlen und die damit verbundene möglichst betrieboptimierende Anpassung der Bremsbewertungsgeschwindigkeit genannt.

## 2 Einleitende Anmerkungen

Nachfolgend prüft und begutachtet die DB Systemtechnik GmbH das im Revisionsbericht (BAV, 12.09.2017), (BAV, 2020) beschriebene Verfahren. Dieser Bericht als Prüfgegenstand wird im Folgenden nur noch Revisionsbericht genannt.

Um dem Entstehungsprozess des Revisionsberichts besser Rechnung zu tragen, wurden zum einen zwei Teilberichte erstellt und zum anderen unterschiedliche Versionsstände referenziert. Im vorliegenden Teilbericht liegt der Schwerpunkt der Begutachtung auf einer frühen Version des Revisionsberichts (BAV, 12.09.2017).

Im weiteren Projektverlauf unterstützt die DB Systemtechnik bei der Simulation und Definition thermisch limitierender Grenzbereiche. Erste Ergebnisse, die die Notwendigkeit der Integration thermischer Aspekte als weiteres Schutzziel der Bremstabellen aufzeigen, werden im Abschnitt 3.2.2 dieses Berichts erläutert.

Wenn in nachfolgenden Abschnitten von „Ergebnissen, einem Verfahren oder einer Methode“ die Rede ist, so beziehen sich diese Begriffe auf die Berechnungen der DB Systemtechnik GmbH unter Anwendung von MATLAB<sup>1</sup> und weiterer, validierter und zum Teil UIC-zertifizierter Werkzeuge. Zur besseren Abgrenzung werden die Begriffe „BAV-Ergebnisse, BAV-Verfahren und BAV-Methode“ eingeführt, welche sich algorithmisch auf die Vorgaben des Revisionsberichts, Abschnitt 2, beziehen.

Bei der Nachrechnung der Ergebnisse des Revisionsberichts wurde nicht die Geschwindigkeitsintegration gemäß Anhang A6 des BAV-Berichts verwendet, sondern eine feinschrittige Integrationsfunktion. Die Berechnung von Bremswegen erfolgt ansonsten in Analogie zum genannten Revisionsbericht.

Ferner wurden die Stützstellen der Grauguss-Reibwertdefinition aus Tabelle 2.2.1-1 durch ein Polynom 5. Grades approximiert und als kontinuierliche Funktion für die Integration zu Verfügung gestellt (vgl. Abbildung 1).

Bei den Berechnungen wurden sowohl Einzelfahrzeuge als auch Züge der Länge 200m betrachtet, um beim Vergleich mit den Ergebnissen des BAV ggf. auftretende, zuglängenabhängige Effekte identifizieren zu können.

---

<sup>1</sup> mathematisch naturwissenschaftliche Entwicklungsumgebung, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com)

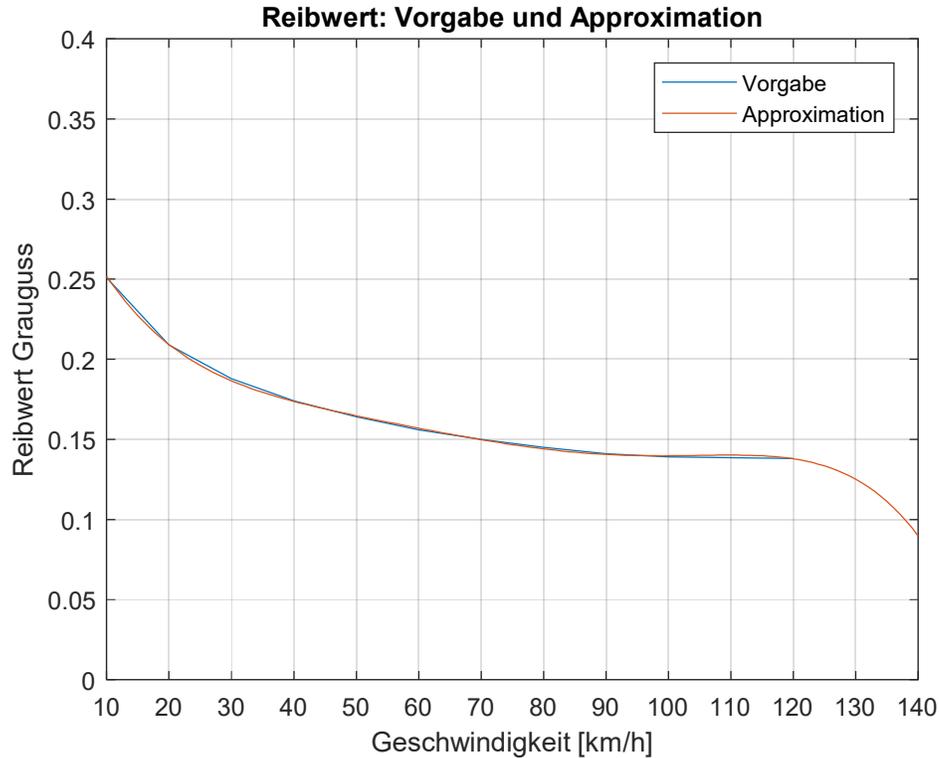


Abbildung 1: Approximation des Reibwertes für Grauguss-Bremssohlen für den Bereich. Gültig für den Geschwindigkeitsbereich bis 120 km/h

### 3 Dokumentenanalyse

#### 3.1 Prüfung

##### 3.1.1 BAV-Reibwerte

Für den Vergleich der im Revisionsbericht angesetzten Reibwertvorgabe für Grauguss wurde das etablierte Karwatzki-Modell herangezogen. Die Gradienten von BAV-Reibwertverlauf und Karwatzki-Modell sind vergleichbar. Somit kann eine qualitativ gute Übereinstimmung festgestellt werden. Abbildung 2 belegt dies durch einen Vergleich mit Prüfstandsaufzeichnungen sowie einer TrainDy-Simulation<sup>2</sup>. In der Simulation sind die Reibwerte niedriger, was mitunter daran liegt, dass die in TrainDy implementierte, detaillierter Beschreibung der Reibwerte von der Klotzkraft und dem Klotztyp (Bg oder Bgu) abhängig ist. Aufgrund dieser Abhängigkeit von der Klotzkraft, ist ein zu geringer Reibwert über eine entsprechend höhere Klotzkraft kompensierbar, um den erforderlichen Bremsweg nicht zu überschreiten.

Etwas anders sieht es bei der K-Sohle aus. Hier ist die BAV-Vorgabe deutlich flacher als der gemessene Reibwert eines homologierten Vertreters der K-Sohle, hier der Cosid810. Aufgrund der Tatsache, dass das Reibverhalten der Verbundstoffsohlen deutlich mehr Variabilität aufweist als das der Grauguss-Sohlen, ist eine konservative Annahme, das heißt ein flacher Verlauf sinnvoll (vgl. Abschnitt 3.1.3, in dem dies näher begründet wird).

<sup>2</sup> Von der UIC weiterentwickelte und gepflegte Software zur Simulation der Längsdynamik von Zügen.

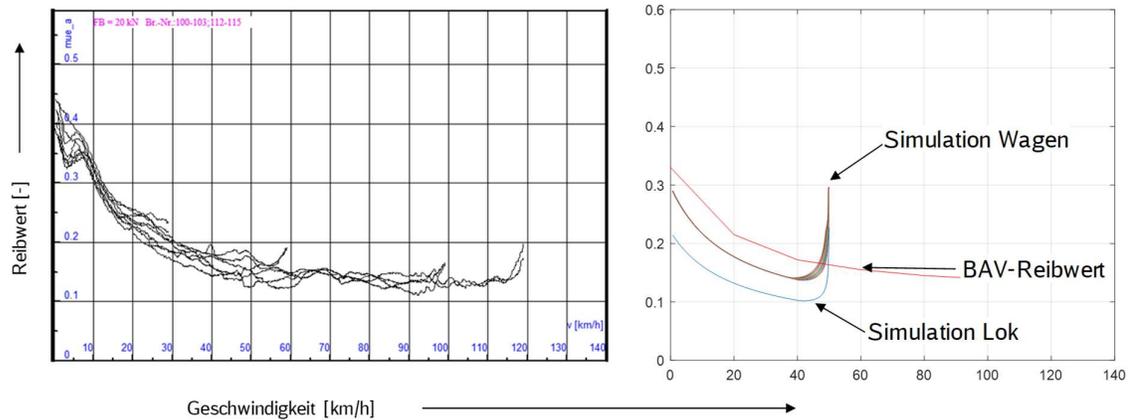


Abbildung 2: Grauguss-Reibwerte bei Flächenpressungen von ca. 55 N/cm<sup>2</sup> am Prüfstand bei unterschiedlichen Bremsausgangsgeschwindigkeiten  $v_0$  (links) und in der TrainDy-Simulation mit  $v_0 = 50$  km/h (rechts). Die hohen Reibwerte zu Beginn der Bremsung sind in der geringen Anpresskraft zu Beginn der Bremsentwicklungszeit begründet, welche im hinterlegten Modell wiederum zu hohen Reibwerten führt.

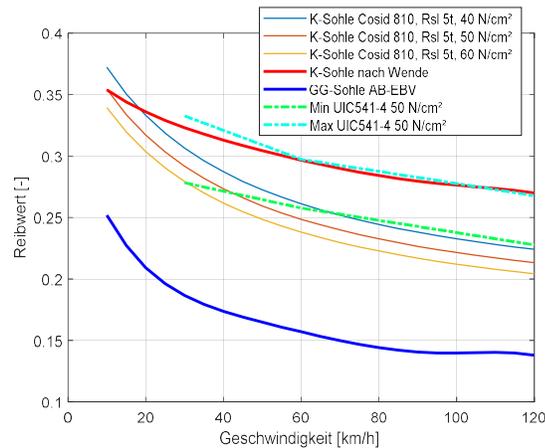


Abbildung 3: K-Sohlen-Reibwerte für Cosid 810 bei unterschiedlichen Flächenpressungen aus Fahrzeugversuchen (SBB-Reibwertmodell), Grauguss und K-Sohle (nach Prof. Wende) gemäß BAV-Vorgabe.

### 3.1.2 Nachrechnung

Die Tabelle 1 zeigt mit einem Geschwindigkeitsschrittverfahren gemäß Revisionsbericht errechnete Bremswege des Einzelwagens. Tabelle 2 zeigt im Vergleich dazu Bremswege eines identischen Modellzuges, errechnet im Zeitschrittverfahren mit einer genaueren Abbildung des Bremskraftaufbaus. Tabelle 3 vergleicht die relative Abweichung der genannten Tabellen voneinander.

Bei den Bremsungen aus niedriger Bremsausgangsgeschwindigkeit treten Unterschiede bei den Bremswegen auf, die auf die unterschiedlichen Integrationsverfahren zurückzuführen sind. Bei einer rechnerischen Ermittlung des Bremswegs aus 10 km/h analog BAV-Methode besteht die Geschwindigkeitsintegration aus zwei Schritten, wohingegen die hier verwendete Integration zahlreiche Integrationschritte verwendet.

Von den Abweichungen im Bereich kleiner Bremsausgangsgeschwindigkeiten abgesehen, besteht jedoch eine insgesamt gute Übereinstimmung zwischen den BAV-Ergebnissen (Geschwindigkeitsschritt-Verfahren) und den Ergebnissen der DB Systemtechnik (Zeitschrittverfahren).

Es zeigen sich im Bereich großer Gefälle Abweichungen im Vergleich zu Berechnungen mit einem realeren Bremsaufbauverhalten. Daher wird die Anwendung der im Revisionsbericht angegebenen Exponentialfunktion für den Bremskraftaufbau des Bremssystems empfohlen.

Die in Tabelle 1 errechneten Bremswege für ein Fahrzeug mit  $\lambda = 100$  Bremshundertsteln basieren auf der im Revisionsbericht beschriebenen Geschwindigkeitsintegration und kleineren Modifikationen gemäß Abschnitt 2. Setzt man zwei verschiedene Werte für die Fallbeschleunigung  $g$ , 9.81 und 10  $m/s^2$ , dann ergeben sich aus einer Bremsausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h Bremswege von ca. 94.3m und 95.8m respektive. Das bedeutet, dass das Bremsverhältnis P/G unter Anwendung einer exakteren Fallbeschleunigung neu justiert werden müsste, um auf die festgelegten 96m Bremsweg zu kommen.

Die Berechnung von Tabelle 2 ersetzt den Geschwindigkeitsschritt durch einen variablen Zeitschritt (adaptive Zeitschrittsteuerung) und berücksichtigt einen allmählichen Bremskraftaufbau gemäß Abbildung 2.1.2-1 des Revisionsberichts. Dadurch ist es möglich, dass die Geschwindigkeit während der Bremsaufbauphase im Gefälle weiter zunimmt.

i [%]	v [km/h]											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	5,1	16,1	34,1	60,1	94,3	137,3	189,1	249,9	319,5	397,2	482,3	574,2
5	5,2	16,4	35,1	61,9	97,6	142,4	196,5	260,1	333,0	414,6	503,7	599,9
10	5,2	16,8	36,1	64,0	101,1	147,9	204,7	271,4	348,0	433,6	527,2	628,3
15	5,3	17,2	37,1	66,2	105,0	154,0	213,6	283,8	364,4	454,7	553,3	659,7
20	5,4	17,6	38,3	68,6	109,2	160,7	223,4	297,4	382,6	478,0	582,2	694,5
25	5,5	18,0	39,5	71,2	113,8	168,1	234,3	312,7	403,0	504,1	614,6	733,5
30	5,5	18,5	40,9	74,1	118,9	176,3	246,5	329,7	425,8	533,4	651,0	777,5
35	5,6	19,0	42,4	77,2	124,6	185,4	260,1	348,8	451,5	566,7	692,2	827,3
40	5,7	19,6	44,0	80,7	130,9	195,7	275,5	370,5	480,8	604,6	739,4	884,3
45	5,8	20,2	45,8	84,6	138,0	207,3	293,0	395,4	514,5	648,3	793,9	950,2
50	6,0	20,9	47,9	89,0	146,1	220,5	313,1	424,2	553,7	699,3	857,6	1027,2
55	6,1	21,6	50,1	93,9	155,2	235,7	336,4	457,8	599,7	759,5	933,0	1118,5
60	6,2	22,5	52,6	99,5	165,8	253,5	363,9	497,6	654,7	831,7	1023,7	1228,5
65	6,4	23,4	55,4	106,0	178,1	274,4	396,6	545,7	721,7	920,1	1135,0	1363,5
70	6,5	24,4	58,6	113,4	192,6	299,5	436,5	604,9	804,9	1030,9	1274,9	1533,4

Tabelle 1: In Anlehnung an den Revisionsbericht berechnete Bremswege mit Geschwindigkeitsintegration,  $g = 9.81$   $m/s^2$ , Fahrzeug mit  $\lambda = 100\%$ , Bremsaufbauphase als äquivalente Totzeit, Schrittweite  $\Delta v = 5$  km/h.

i [%]	v [km/h]											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	4,0	14,2	31,7	56,9	90,2	132,0	182,7	242,7	311,6	388,5	472,2	562,5
5	4,1	14,7	32,8	59,1	93,9	137,6	190,7	253,6	326,0	406,8	494,5	589,3
10	4,3	15,3	34,1	61,5	97,9	143,7	199,5	265,7	341,9	426,8	519,1	618,7
15	4,4	15,8	35,5	64,1	102,2	150,3	209,1	278,9	359,3	449,0	546,3	651,2
20	4,6	16,4	36,9	67,0	107,0	157,7	219,7	293,5	378,7	473,6	576,4	687,4
25	4,8	17,1	38,5	70,1	112,3	165,8	231,4	309,7	400,2	501,0	610,2	727,8
30	4,9	17,8	40,3	73,5	118,0	174,7	244,5	327,9	424,4	531,9	648,1	773,3
35	5,2	18,6	42,2	77,2	124,5	184,7	259,1	348,4	451,7	566,8	691,1	824,9
40	5,4	19,4	44,3	81,4	131,6	195,9	275,6	371,6	482,8	606,7	740,2	883,9
45	5,6	20,3	46,6	86,0	139,6	208,6	294,4	398,1	518,6	652,7	797,0	952,0
50	5,9	21,3	49,2	91,3	148,7	223,1	316,0	428,8	560,2	706,4	863,2	1031,6
55	6,1	22,4	52,0	97,1	159,1	239,7	341,1	464,7	609,2	769,7	941,5	1125,8
60	6,4	23,6	55,3	103,8	171,1	259,1	370,6	507,3	667,6	845,8	1035,7	1239,2
65	6,8	25,0	58,9	111,6	185,0	281,9	405,7	558,7	738,9	938,8	1151,1	1378,3
70	7,1	26,5	63,1	120,5	201,4	309,2	448,4	622,0	827,5	1055,4	1296,0	1553,1

Tabelle 2: In Anlehnung an den Revisionsbericht berechnete Bremswege mit Zeitintegration und exponentieller Bremsaufbauphase,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ , Fahrzeug mit  $\lambda = 100\%$ , adaptive Schrittweitensteuerung  $\Delta t \neq \text{const}$ .

i [%]	v [km/h]											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	-21,6	-11,8	-7,0	-5,3	-4,3	-3,9	-3,4	-2,9	-2,5	-2,2	-2,1	-2,0
5	-21,2	-10,4	-6,6	-4,5	-3,8	-3,4	-3,0	-2,5	-2,1	-1,9	-1,8	-1,8
10	-17,3	-8,9	-5,5	-3,9	-3,2	-2,8	-2,5	-2,1	-1,8	-1,6	-1,5	-1,5
15	-17,0	-8,1	-4,3	-3,2	-2,7	-2,4	-2,1	-1,7	-1,4	-1,3	-1,3	-1,3
20	-14,8	-6,8	-3,7	-2,3	-2,0	-1,9	-1,7	-1,3	-1,0	-0,9	-1,0	-1,0
25	-12,7	-5,0	-2,5	-1,5	-1,3	-1,4	-1,2	-1,0	-0,7	-0,6	-0,7	-0,8
30	-10,9	-3,8	-1,5	-0,8	-0,8	-0,9	-0,8	-0,5	-0,3	-0,3	-0,4	-0,5
35	-7,1	-2,1	-0,5	0,0	-0,1	-0,4	-0,4	-0,1	0,0	0,0	-0,2	-0,3
40	-5,3	-1,0	0,7	0,9	0,5	0,1	0,0	0,3	0,4	0,3	0,1	0,0
45	-3,4	0,5	1,7	1,7	1,2	0,6	0,5	0,7	0,8	0,7	0,4	0,2
50	-1,7	1,9	2,7	2,6	1,8	1,2	0,9	1,1	1,2	1,0	0,7	0,4
55	0,0	3,7	3,8	3,4	2,5	1,7	1,4	1,5	1,6	1,3	0,9	0,7
60	3,2	4,9	5,1	4,3	3,2	2,2	1,8	1,9	2,0	1,7	1,2	0,9
65	6,2	6,8	6,3	5,3	3,9	2,7	2,3	2,4	2,4	2,0	1,4	1,1
70	9,2	8,6	7,7	6,3	4,6	3,2	2,7	2,8	2,8	2,4	1,7	1,3

Tabelle 3: Tabellenvergleich der relativen Wegabweichung [%] des Einzelwagens: (Wert Tabelle 2 - Wert Tabelle 1) / Wert Tabelle 1

Der Vergleich der Bremswege in Tabelle 3 weist für das Einzelfahrzeug moderate Abweichungen aus, wenn man sich bewusst macht, dass die absolute Bremswegabweichung bei den hohen Relativwerten jedoch gering ist, da letztere bei geringen Bremsausgangsgeschwindigkeiten auftreten.

Auch bei Betrachtung eines in der Ebene bremsenden Zuges mit 200m Länge zeigt sich kein wesentlich verändertes Bild. In Tabelle 4 werden die Bremswege, die mit beiden Verfahren errechnet wurden, für den Einzelwagen<sup>3</sup> und für einen 200m Zug angegeben. Für den 200m-Zug ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen BAV-Modell und TrainDy-Simulation bei einer plausiblen Füllzeit von  $t_1=3,8\text{s}$ .

<sup>3</sup> TrainDy fordert stets die Definition einer Lok. Daher wurde eine Dummy-Lok mit einer vernachlässigbaren Masse und einer HL-Länge von 3m eingeführt und an diese der betrachtete Wagen angehängt.

Einzelwagen	Soll $\lambda$			Ist $\lambda$ (TrainDy-Simulation)		
$v_0$ [km/h]	50	100	150	50	100	150
20	26,7	16,3	12,8	26,8	17,6	14,0
50	174,0	95,8	69,1	167,1	96,0	68,2
100	741,0	404,0	283,0	732,0	399,5	268,5

200m-Zug	Soll $\lambda$			Ist $\lambda$ (TrainDy-Simulation)		
$v_0$	50	100	150	50	100	150
20	29,2	18,9	15,4	29,2	19,6	16,3
50	180,1	102,3	75,5	177,1	102,0	76,6
100	754,2	417,0	296,4	773,4	417,2	296,0

Tabelle 4: Vergleich Bremswege [m] für den Einzelwagen (oben) und für einen 200m langen Zug (unten). HL-Querschnitt 1 ¼ Zoll (UIC Güterwagen). Sollwerte errechnet analog Tabelle 1 mit  $g = 10 \text{ m/s}^2$  (v-Integration mit  $\Delta v=5\text{km/h}$ ).

i [%]	v [km/h]											
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	-28,1	-15,3	-9,4	-6,9	-5,6	-4,9	-4,3	-3,7	-3,2	-2,9	-2,7	-2,6
5	-26,2	-13,0	-8,1	-5,9	-4,8	-4,1	-3,6	-3,1	-2,7	-2,4	-2,3	-2,3
10	-24,2	-11,7	-6,9	-4,7	-3,8	-3,5	-3,0	-2,5	-2,1	-1,9	-1,9	-1,9
15	-22,4	-10,0	-5,5	-3,7	-3,0	-2,7	-2,3	-1,9	-1,6	-1,5	-1,5	-1,5
20	-19,4	-8,3	-4,2	-2,7	-2,1	-1,9	-1,7	-1,3	-1,1	-1,0	-1,1	-1,1
25	-16,2	-6,7	-2,7	-1,5	-1,2	-1,2	-1,0	-0,7	-0,5	-0,5	-0,7	-0,8
30	-14,5	-4,7	-1,3	-0,4	-0,2	-0,4	-0,3	-0,1	0,0	0,0	-0,2	-0,4
35	-11,4	-2,3	0,2	0,9	0,7	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5	0,2	0,0
40	-8,5	-0,4	1,8	2,1	1,7	1,2	1,0	1,1	1,2	1,0	0,6	0,4
45	-4,2	2,1	3,5	3,5	2,7	2,1	1,8	1,8	1,8	1,5	1,0	0,8
50	-2,7	4,1	5,1	4,8	3,8	2,9	2,5	2,4	2,4	2,0	1,5	1,1
55	1,3	6,4	7,0	6,2	4,9	3,7	3,2	3,1	3,0	2,5	1,9	1,5
60	5,2	8,9	8,9	7,6	6,0	4,6	4,0	3,8	3,6	3,1	2,3	1,9
65	9,0	11,6	10,8	9,1	7,1	5,5	4,8	4,6	4,3	3,6	2,7	2,2
70	13,8	14,3	12,8	10,7	8,4	6,4	5,6	5,4	5,0	4,2	3,1	2,6

Tabelle 5: Tabellenvergleich der relativen Wegabweichung [%] des 200m-Zuges: (Wert Tabelle 2 - Wert Tabelle 1) / Wert Tabelle 1,  $g = 10 \text{ m/s}^2$ , v-Integration mit  $\Delta v=5\text{km/h}$

Aufgrund der ggf. fahrzeitrelevanten Abweichungen der Bremswege bei kleinen Bremsausgangsgeschwindigkeiten in der Ebene sowie aufgrund der Tatsache, dass das Geschwindigkeitsschrittverfahren bei starken Gefällen zu optimistisch ist, wird die Einführung eines exponentiellen Bremskraftaufbaus empfohlen.

### 3.1.3 Bewertungsgeschwindigkeit

Exemplarisch wurden Bremswegsimulationen mit TrainDy<sup>4</sup> durchgeführt, um sicher zu stellen, dass sich die im Revisionsbericht dokumentierten Ergebnisse in Bezug auf unterschiedliche Reibwertcharakteristiken auch bei Anwendung komplexer Rechenmodelle, die eine gute Übereinstimmung mit der realen Physik haben, in ihrer Tendenz und damit in ihrer Grundaussage stimmig sind.

Den in der Simulation verwendeten Reibwertmodellen liegen umfassende Versuchsprogramme zugrunde und im Minimum berücksichtigen sie die Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der dynamischen Klotzkraft (und damit implizit der Flächenpressung) der Bremssohle.

<sup>4</sup> Von der UIC weiterentwickelte und gepflegte Software zur Simulation der Längsdynamik von Zügen.

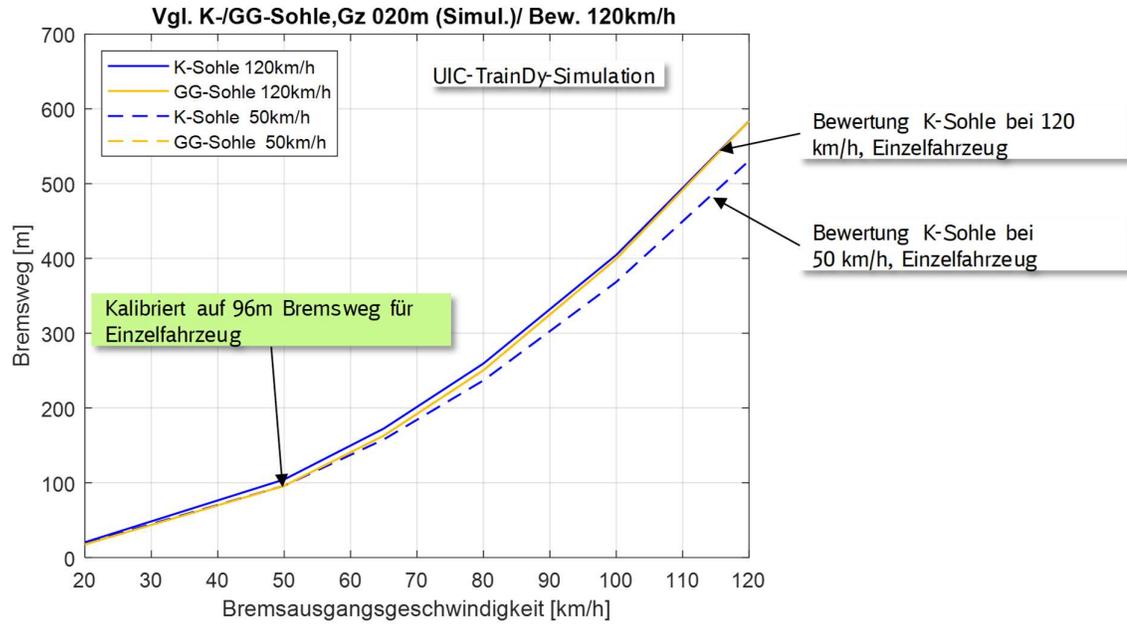


Abbildung 4: Vergleich der Reibwertcharakteristiken von K- und GG-Sohlen in der Simulation bei unterschiedlichen Bewertungsgeschwindigkeiten im Hinblick auf die Länge des Bremsweges für ein Einzelfahrzeug. Reibwertbasis: Grauguss und K-Sohle mit BAV-Reibwertvorgabe aus Revisionsbericht.

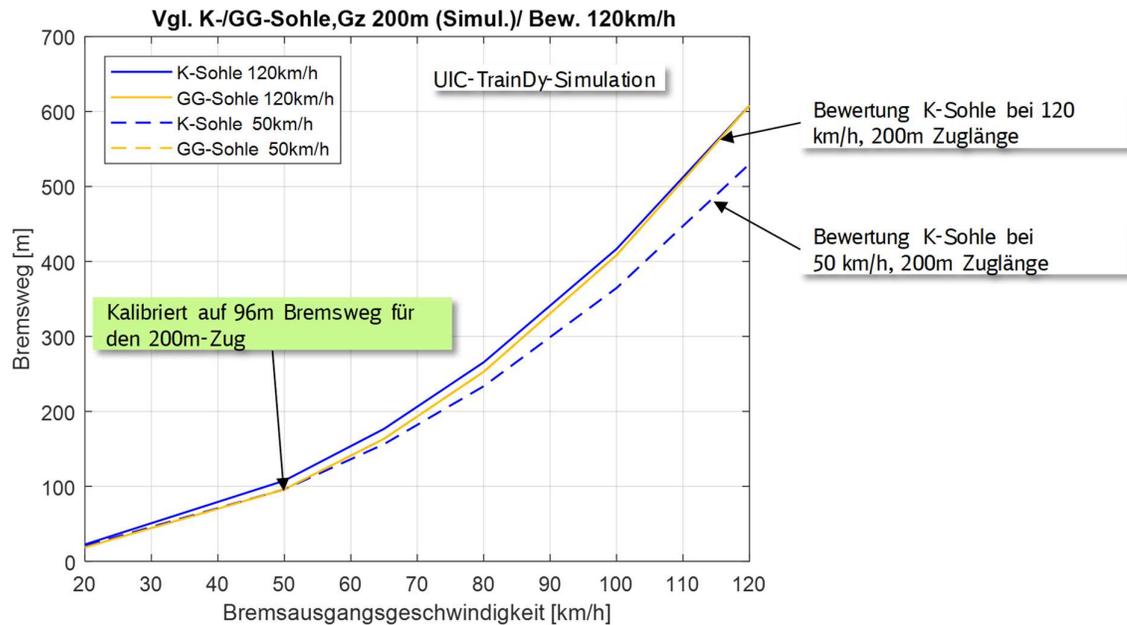


Abbildung 5: Vergleich der Reibwertcharakteristiken von K- und GG-Sohlen in der Simulation bei unterschiedlichen Bewertungsgeschwindigkeiten im Hinblick auf die Länge des Bremsweges für einen 200m-Zug. Reibwertbasis: Grauguss mit verbreitetem Karwatzki-Modell, K-Sohle mit SBB-Reibwertmodell (hier konkret: Cosid 810).

Abbildung 4 und Abbildung 5 zeigen den Bremsweg in Abhängigkeit von der Bremsausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  für das Einzelfahrzeug bzw. einen 200m langen Zug.

Zunächst sei der Blick auf die Referenz gerichtet, welche eine Art Urmaß darstellt: ein rein mit Grauguss-Sohlen ausgerüstetes Fahrzeug mit einem Bremsvermögen von 100 Bremshundertsteln als Bremswegreferenz. Für dieses Fahrzeug ergibt sich Stand heute ein Bremsweg von 96m aus einer Geschwindigkeit von  $v_0 = 50\text{km/h}$ . Das gleiche Fahrzeug legt in

der Simulation bei einer Geschwindigkeit aus  $v_0=120\text{km/h}$  einen Bremsweg von rund 580m zurück.

Als logische Konsequenz liegt der orangefarbene Verlauf des Grauguss-Fahrzeugs, welches bei  $v_0 = 50\text{km/h}$  bewertet wurde, genau auf dem des Grauguss-Fahrzeugs, welches bei 120 km/h bewertet wurde, da es sich um ein und das gleiche Fahrzeug handelt, das hier die Referenz darstellt.

Anders bei der zu vergleichenden K-Sohle, denn die im Vergleich zum Grauguss veränderte Reibwertcharakteristik der K-Sohle weist einen höheren Reibwert bei hohen Geschwindigkeiten aus und einen geringeren Reibwert bei niedrigen Geschwindigkeiten aus. Somit ergeben sich unterschiedliche Verläufe für die mit K-Sohlen gebremsten Fahrzeuge, je nachdem welche Bewertungsgeschwindigkeit gewählt wurde.

Die gestrichelte blaue Kurve in Abbildung 4 repräsentiert ein Fahrzeug mit K-Sohlen, das bei  $v_0 = 50\text{km/h}$  bewertet wurde. Aufgrund eben genannter Reibwertveränderung ergeben sich für höhere Geschwindigkeiten signifikant kürzere Bremswege, so dass Verbundstoffbeläge bei einem Festhalten an der heutigen Bremsbewertungsgeschwindigkeit deutliche Performanceverluste hinnehmen müssten.

Anders bei einer Bewertung von 120 km/h. Hier wären die größten Abweichungen bei relativer Betrachtung im unteren Geschwindigkeitsbereich zu finden. Aufgrund der absolut gesehenen, geringen Bremswegabweichung würde sich dies jedoch im Allgemeinen nicht wesentlich auf die Performance des Gesamtsystems auswirken, wenn man eine einheitliche Bremstabelle für alle Zugarten bereitstellen würde. Obige Betrachtungen decken sich mit den Erkenntnissen des Revisionsberichts.

Bei Fahrzeugen mit einer Höchstgeschwindigkeit kleiner 120 km/h lassen sich Performanceverluste weiter vermindern, indem man dann die Fahrzeughöchstgeschwindigkeit als Bewertungsgeschwindigkeit heranzieht.

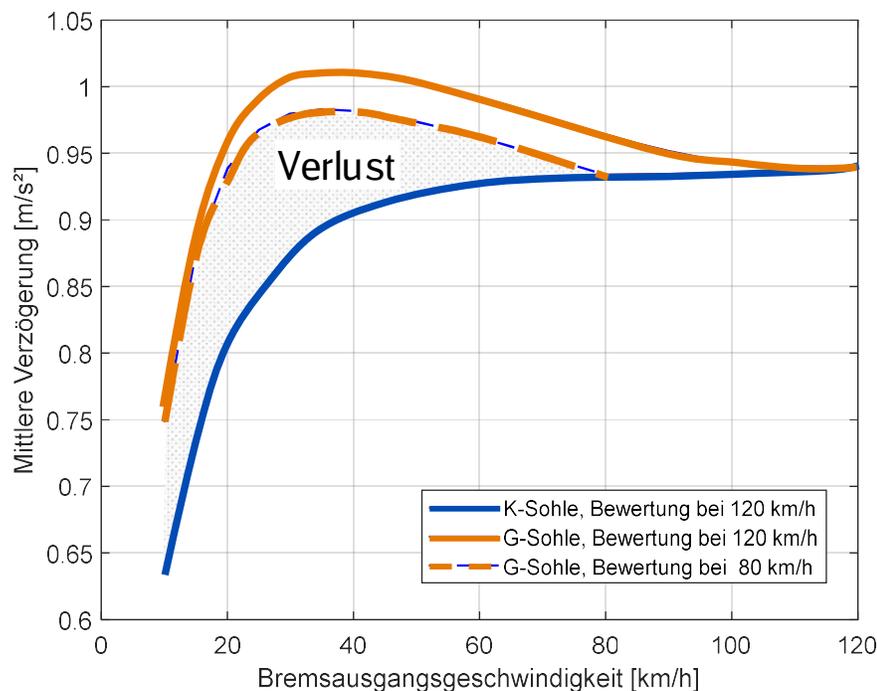


Abbildung 6: Vergleich der weggemittelten Verzögerungen bei Grauguss und K-Sohle abhängig von den beiden Bremsbewertungsgeschwindigkeiten 80 und 120 km/h

Wie in Abbildung 6 zu sehen, verringert sich der Unterschied zwischen der mittleren Verzögerung eines grauguss-gebremsten Fahrzeugs und der eines K-Sohlen-gebremsten Fahrzeugs

mit kleinerer Bewertungsgeschwindigkeit (also einer Bewertungsgeschwindigkeit kleiner 120 km/h).

## 3.2 Schutzziele

### 3.2.1 Vergleich Bremstabellen Schweiz und Bremstafeln Deutschland

#### 3.2.1.1 Kalibrierung

Im Rahmen der Bremswegberechnung mit dem zweistufigen Bremsmodell und einem Zeitschrittverfahren erforderte die Kalibrierung auf den Referenzpunkt (96m Bremsweg bei  $\lambda=100$  und  $v_0 = 50$  km/h) die Einführung eines Korrekturfaktors von 0.98 für das Bremsvermögen P/G. Grund dafür war die unterschiedliche Genauigkeit der im Revisionsbericht und von der DB Systemtechnik verwendeten Integrationsverfahren. Mit Einführung des exponentiellen Bremskraftaufbaus konnte dieser Faktor wieder auf 1 gesetzt werden.

Bei einer numerischen Integration ist das Ergebnis stets von der Schrittweite abhängig. Die relative Abweichung der Ergebnisse aufgrund einer Verdopplung der Schrittweite sollte einen bestimmten Grenzwert nicht überschreiten. In Anlehnung an (CEN, 2015) wird ein Grenzwert von 0.1% empfohlen. Die im Revisionsbericht angezogene Schrittweite von 5 km/h genügt dieser Empfehlung nicht.

#### 3.2.1.2 Abweichung berechnete Brh

Nachfolgende Diagramme zeigen die Abweichung der mit Zeitschrittverfahren und Korrekturfaktor errechneten Bremsstafeln von denen bestehender Schweizer Bremstabellen bzw. deutscher Bremstafeln. Diese Abweichungen bzw. Differenzen sind ein Maß für die den Tabellenwerken innewohnende Sicherheit, deren zugrunde liegenden Ursachen bzw. Gründe (Schutzziele und ggf. betriebliche Gründe) nicht vollumfänglich bekannt sind. Beide Tabellenwerke gelten jedoch aufgrund langjähriger Betriebserfahrung als sicher.

Die erforderlichen Bremsstafeln wurden auf Basis der aufgearbeiteten Bremsgrundlagen im Revisionsbericht, Abschnitt 2, bestimmt.

Nach Berechnung der Bremsstafeln wurden die neu berechneten Werte von den bestehenden Tabellenwerten abgezogen. Ein positiver Wert bedeutet somit, dass die bestehende Bremstafel bzw. -tafel einen höheren Wert, mit anderen Worten, eine höhere Reserve fordert, als zur Einhaltung des zur Verfügung stehenden Anhaltewegs erforderlich.

Die Berechnung erforderlicher Bremsstafeln geht zum Teil von einem unverminderten Bremsvermögen aus.

Bei den deutschen Bremstafeln fließen verminderte Bremskräfte und andere Unwägbarkeiten (wie z. B. eine außergewöhnliche Zuladung oder Kraftschlussminderungen) über eine Sicherheitsmarge ein. Das bedeutet, dass die auf den Vorsignalabstand bezogenen Bremstafeln die erforderlichen Bremsstafeln angeben, die für die Einhaltung eines um 10% verkürzten Vorsignalabstand notwendig sind. Für die Schweizer Bremstabellen IIA und III ist eine Vergleichbarkeit gegeben, da sie von einem unverminderten Bremsvermögen ausgehen. Bremstafel IV hingegen unterstellt eine Verminderung der Bremskräfte aufgrund von Streuungen der brems-technischen Fahrzeugeigenschaften, die mit einer verminderten Fahrzeugverzögerung von 16,58% einhergeht.

In Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigt sich, dass die Bildung der Sicherheiten für die einzelnen Tabellenwerke unterschiedlichen Randbedingungen unterliegt.

Während sich die Bremstafeln primär an der Einhaltung des Vorsignalabstandes orientieren, fungieren die Schweizer Bremstabellen eher als eine Art Minimalanforderung, die sich hauptsächlich aus den Anforderungen einer minimalen Effektivverzögerung ergeben und unabhängig von der Vorsignaldistanz Gültigkeit haben.

Vergleich Bremstabellen Ist-Calc

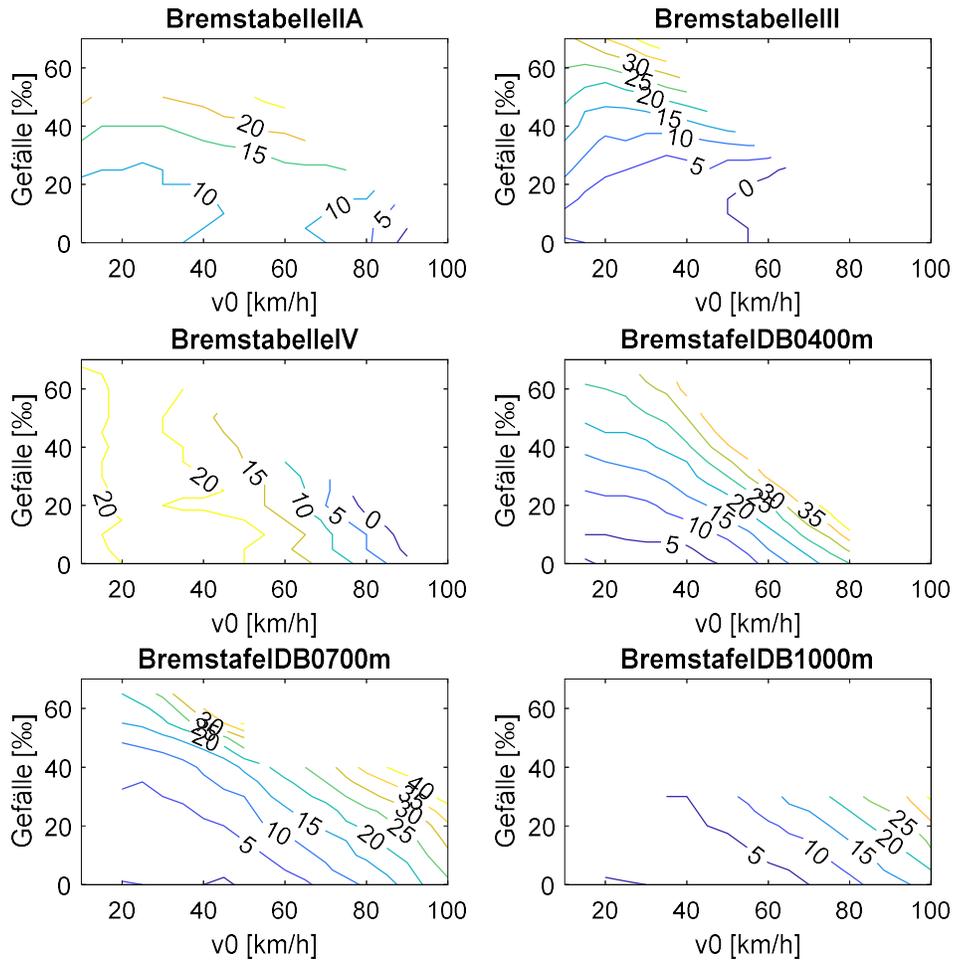


Abbildung 7: Höhenlinien der Differenz zwischen **absoluten** Bremshundertstelwerten der aktuell existierenden Bremstabellen bzw. Bremstafeln und den gemäß Revisionsbericht errechneten Bremshundertstel.

### Vergleich Bremstabellen (Ist-Calc)/Ist\*100

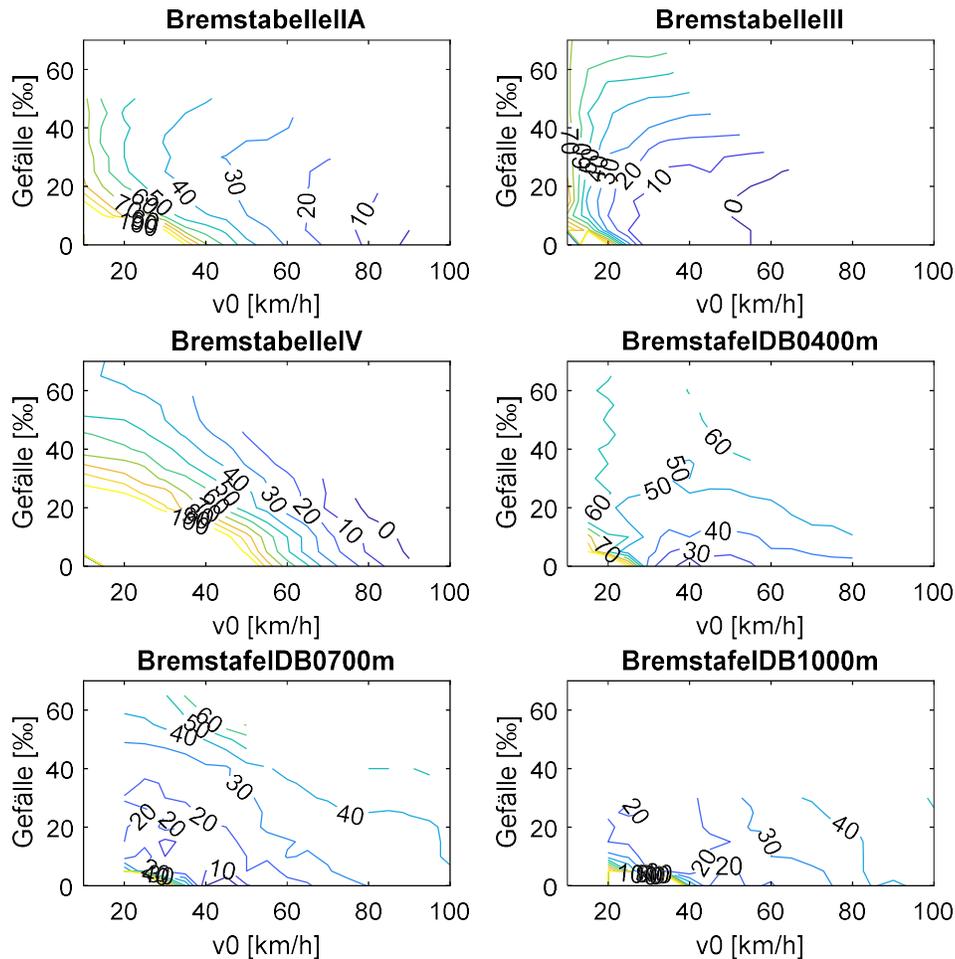


Abbildung 8: Höhenlinien der Differenz zwischen den **relativen** Werten der aktuell existierenden Bremstabellen bzw. Bremstafeln und den gemäß Revisionsbericht errechneten Bremswertsteln. Berechnungsergebnis in %:  $(\text{Bremswertsteln\_Bremstabelle} - \text{Berechnete\_Bremswertsteln}) / \text{Bremswertsteln\_Bremstabelle} * 100$ .

Die Schweizer Tabellen weisen hinsichtlich der Abhängigkeit der Sicherheit vom Gefälle ein uneinheitliches Bild auf (s. insb. Abbildung 7). Mit zunehmender Bremsausgangsgeschwindigkeit nimmt die Sicherheit eher ab (vgl. Abbildung 8).

Die Höhenlinien der deutschen Bremstafeln zeigen bei absoluter Betrachtung eine tendenziell diagonale Ausrichtung, das bedeutet, dass die Bremswegesicherheit sowohl mit steigendem Gefälle als auch mit steigender Bremsausgangsgeschwindigkeit zunimmt, wobei bei niedrigen Geschwindigkeiten und kleinen Gefällen die Bremswegesicherheit besonders betont ist.

Ein grundlegender Unterschied zwischen Bremstabellen und Bremstafeln ist die entgegengesetzte Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Während sich bei den Bremstabellen mit fallender Geschwindigkeit eine ansteigende Sicherheit feststellen lässt, so stellt sich dies bei den Bremstafeln tendenziell entgegengesetzt dar.

Ein Anstieg der Sicherheit mit zunehmendem Gefälle ist allen Bremstabellenwerken gemein.

### 3.2.1.3 Vergleich der Effektivverzögerung $p_e$

Bei der Nachrechnung der Effektivverzögerung der Abbildungen 5.3.6-1 bis 5.3.6-3 in (BAV, 2020) fällt auf, dass sich die dokumentierten Ergebnisse nur erzielen lassen, wenn die durch das Bremssystem erzeugte Fahrzeugverzögerung bei allen Bremstabellen mit einem Abschlag von 16,58 % als Berücksichtigung von möglichen Streuungen beaufschlagt wird.

Die Minimalverzögerungen der deutschen Tabellen in Abbildung 9 wurden zum Zwecke der Vergleichbarkeit gleichfalls mit einer Streuung von 16,58% beaufschlagt. Sie somit sind geringer als bei den Schweizer Bremstabellen. Bei der 400 und 700m-Bremstafel steigen die Minimalverzögerungen jedoch mit zunehmendem Gefälle an. Hier besteht eine Analogie zu Bremstabelle III.

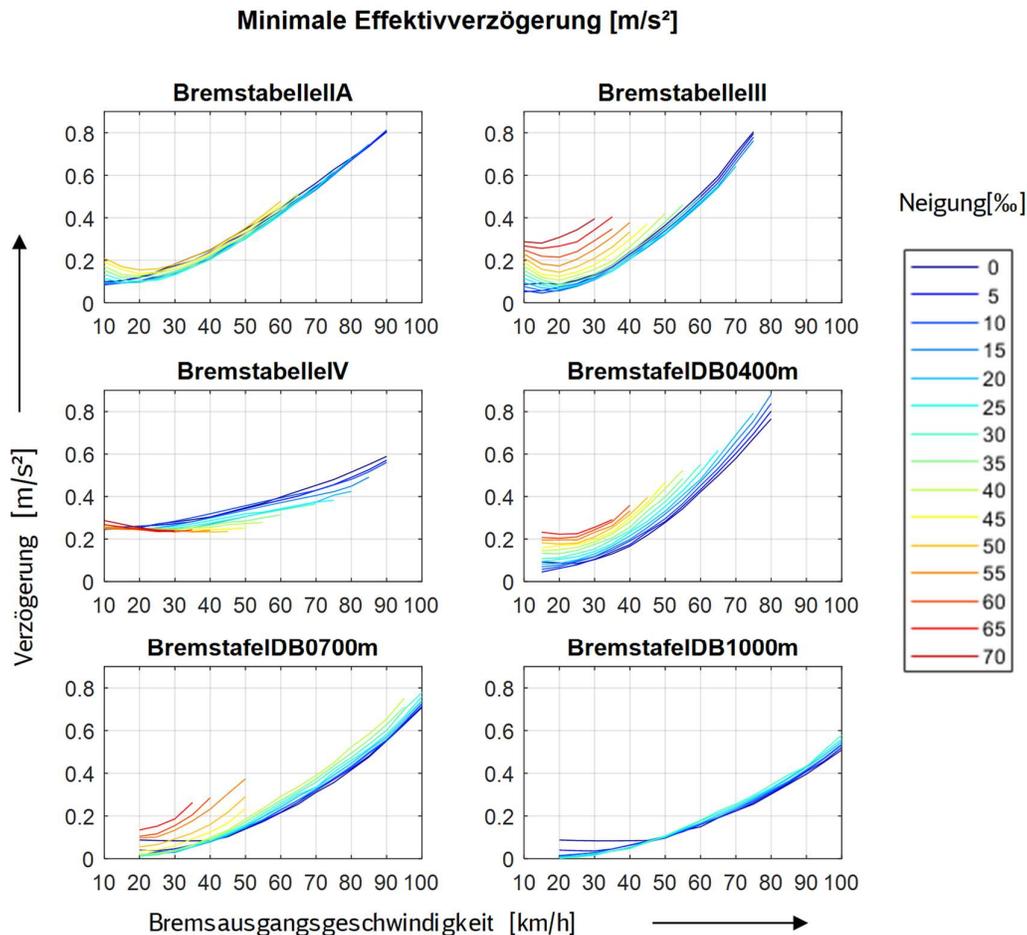


Abbildung 9: Vergleich der Effektivverzögerung [m/s<sup>2</sup>] (Ordinate) in Abhängigkeit von der Momentangeschwindigkeit [km/h] (Abszisse).

### 3.2.1.4 Vergleich der Bremswegsensitivität

Die Bremswegsensitivität der Schweizer Bremstabellen gemäß der Abbildungen 5.3.7-1 bis 5.3.7-3 in (BAV, 2020) weist eine gewisse Variabilität auf, da Bremstabelle IV im Gegensatz zu den Bremstabellen II und III durchweg geringe Bremswegsensitivitäten beinhaltet. Bremstabelle III und die 400 und 700m Bremstafel zeigen ähnliche Verläufe. Die deutschen Bremstafeln fallen mit größerer Bremswegsensitivität im Bereich kleiner Bremsausgangsgeschwindigkeiten auf.

Alle Vergleiche zeigen jedoch, dass für hohe Gefälle geringe Bremswegsensitivitäten vorliegen bzw. dass die Bremswegsensitivität mit zunehmendem Gefälle deutlich abnimmt, was für Verzögerungsreserven in höherem Gefälle spricht. Alle Bremstabellen, auch Bremstabelle IV, wurden

ohne Streufaktor von 16,58% errechnet, was plausibel erscheint, da die Ermittlung der Bremswegsensitivität auf einer relativen Auswertung von Bremswegen basiert.

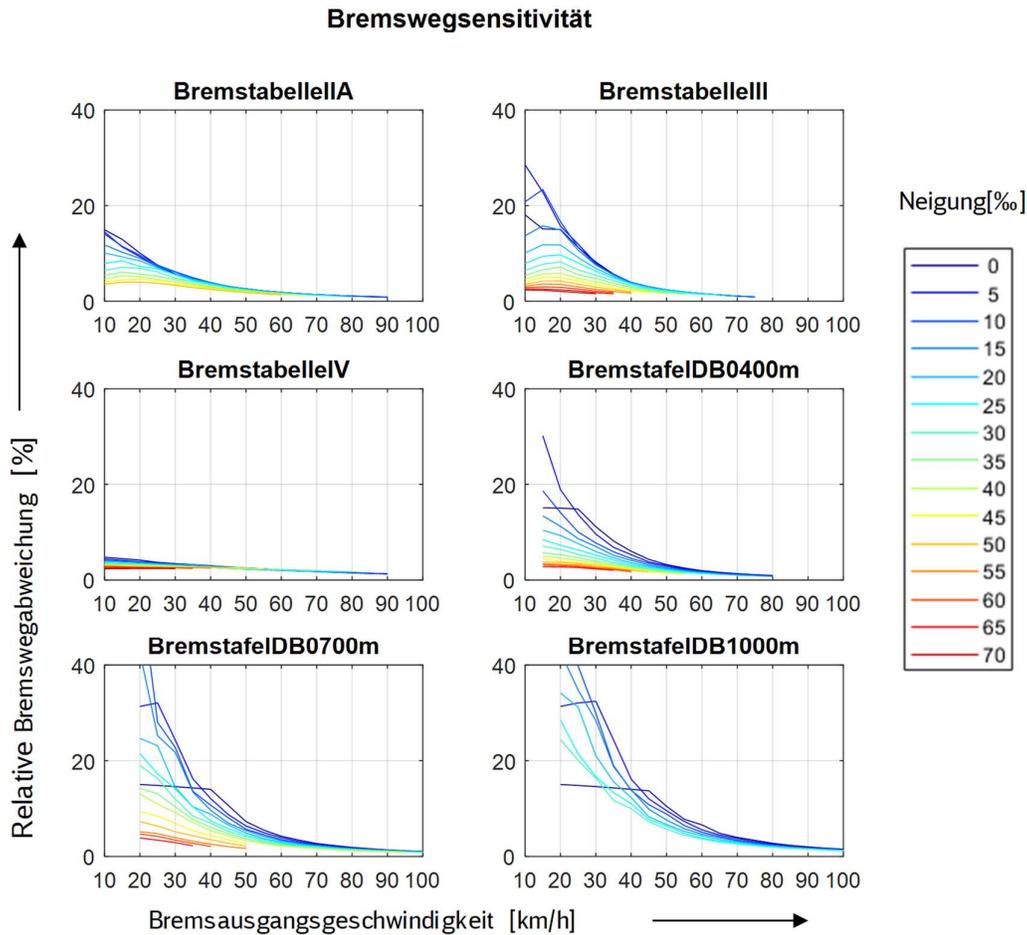


Abbildung 10: Vergleich der Bremswegsensitivität [%] (Ordinate) in Abhängigkeit von der Bremsausgangsgeschwindigkeit [km/h] (Abszisse).

### 3.2.1.5 Zusammenfassung

Der Vergleich Schweizer und deutscher Reserven/Sicherheiten (Abweichung der gemäß Revisionsbericht errechneten, erforderlichen Bremsstufen von den in den Bremstabellen bzw. -tafeln definierten Werten) dokumentiert unterschiedliche historische Entwicklungen.

Dennoch lassen sich wesentliche Gemeinsamkeiten finden. So ist allen Tabellen ein Anstieg der Effektivverzögerung mit zunehmendem Gefälle gemein. Dies könnte mit einer möglichen Verringerung des Reibwerts aufgrund thermischer Aspekte korrelieren. Auch wenn das sogenannte „Fading“, das Einbrechen des Reibwerts aufgrund hoher Energieaufnahme bei hoher Rad- oder Bremsscheibentemperatur (Beispiel: langanhaltende Beharrungsbremmung), nicht in den Tabellenwerken berücksichtigt ist, so ergibt sich durch die ansteigende Effektivverzögerung implizit eine Robustheit gegenüber derartigen Störungen und anderen Störeinflüssen.

Analog lässt sich auch für die Bremswegsensitivität ein geringerer Wert mit zunehmendem Gefälle feststellen. Dies lässt sich anschaulich damit begründen, dass eine unerwartete Minderung der Bremskräfte nicht mit der Aufhebung einer für das Anhalten hinreichenden Bremswirkung verbunden sein darf. Wobei die deutschen Bremsstufen die Bremswegsensitivität im unteren Geschwindigkeitsbereich und bei geringen Gefällen anscheinend nicht bewusst beschränken.

Bremstabelle IV hat eine Sonderstellung inne, da sie in den hier betrachteten Analysen am deutlichsten abweicht. Diese Tatsache gibt Grund zur Annahme, dass die Erstellung der Bremstabellen sich einerseits an generellen Schutzziele, aber andererseits auch an spezifischen, betrieblich-technischen Bedürfnissen orientierte, die nicht mehr eindeutig rückverfolgbar sind.

Da die Konstruktionsprinzipien der heute geltenden Bremstabellen nicht vollumfänglich bekannt sind, lassen sich die Bremstabellen auch nicht exakt nachrechnen. Das Vorhaben, eine allgemeingültige Bremstabellenberechnung zu konzipieren, bringt erhebliche Vorteile. So ließen sich zukünftige Anforderungen im Sinne von Erweiterungen des Gültigkeitsbereichs oder im Sinne von Anpassungen z. B. aus Performance-Gründen besser integrieren. Im optimalen Fall lässt sich gar eine Konsistenz zwischen Bremstabellen für Normal- und Meterspur herstellen.

Offen bleibt, warum in den deutschen Bremstabellen eine Zunahme der Sicherheiten mit steigender Geschwindigkeit existiert und auf welchen Grund dies zurückzuführen ist.

### 3.2.2 Thermische Grenzen

Die Grenzen der thermischen Belastung bei Dauerbremsungen sind gut bekannt. Hier ist im Wesentlichen der Energieeintrag in das Rad bzw. die Bremskomponenten durch die Veränderung der potentiellen Energie während einer Gefällefahrt der limitierende Faktor.

Anders sieht es bei Schnellbremsungen im Gefälle aus. Je nach Zahl der zu tolerierenden, aufeinanderfolgenden Schnellbremsungen ergeben sich mehr oder weniger große Bereiche in den Bremstabellen, die betrieblich nicht umsetzbar sind.

### 3.2.3 Diskussion der Schutzziele

Aus dem Vergleich der Bremstabellen bzw. Bremstabellen im vorherigen Abschnitt 3.2.1 lässt sich, wenn auch in unterschiedlicher Ausprägung, die Umsetzung der im Revisionsbericht formulierten Schutzziele in den Tabellenwerken erkennen.

#### 3.2.3.1 Einhaltung des Anhaltewegs

Außer Bremstabelle IV beinhalten die Bremstabellen keinen Aufschlag der Bremsstrecke zur Kompensation eventuell unbekannter, ungeplanter (überhöhte Nutzlast, unerkannter Bremsausfall, Belag-Charge mit Abweichung vom Nominalreibungswert, usw.) oder anderer verzögerungsmindernder Faktoren (z. B. Nässe, Kraftschlussminderung, ...).

Ein hinreichendes Bremsvermögen lässt sich durch die Einhaltung eines maximal zur Verfügung stehenden Anhaltewegs gemäß Revisionsbericht rechnerisch bestimmen.

#### 3.2.3.2 minimale Effektivverzögerung

Die Festsetzung der Höhe der im Revisionsbericht definierten minimalen Effektivverzögerung  $p_e$  kann entweder anhand von Vergleichen mit den bestehenden, als sicher geltenden Bremstabellen oder durch das Ansetzen einer sicheren Randbedingung erfolgen. Dies gilt vor allem für die Progression der Effektivverzögerung in Abhängigkeit von der Größe des Gefälles. Die im Revisions-Zwischenbericht (BAV, 12.09.2017) vorgegebene Progression ergibt sich aus nachfolgender Randbedingung:

$$F_B = S_{pei} \cdot F_H$$

Das bedeutet, dass die Bremskraft  $F_B$  eines Fahrzeugs in Analogie zur Berechnung der statischen Haltekraft (beim Abstellen eines Zuges im Gefälle) stets so groß wie die um einen Sicherheitsfaktor  $S_{pei}$  erhöhte Hangabtriebskraft  $F_H$  sein muss.

Splittet man die Bremskraft  $F_B$  in einen Gleichgewichtsanteil auf, der für das Gleichgewicht zwischen Bremskraft und Hangabtriebskraft sorgt, und in einen Verzögerungsanteil  $F_v$ , der eine Verminderung der Geschwindigkeit ermöglicht, dann liegt es auf der Hand, dass der Gleichgewichtsanteil mit größer werdendem Gefälle proportional zur Hangabtriebskraft steigen muss.

Eine Zunahme des Verzögerungsanteils  $F_v$ , was mit steigendem Gefälle einer effektiven Zunahme der Verzögerung über Grund entspricht, lässt sich hingegen nicht unmittelbar schließen.

Diese Annahme setzt nämlich eine vom Gefälle abhängige Verringerung der Bremskraft voraus. Je nach betrieblicher Gegebenheit sind jedoch entsprechende Anwendungsfälle konstruierbar. Beispielsweise dann, wenn auf eine längere Beharrungsfahrt im Gefälle eine Schnellbremsung folgt und sich dadurch Fading-Effekte des Reibwertes ausprägen.

### **3.2.3.3 Bremswegsensitivität**

Die Bremswegsensitivität, welche gemäß Revisionsbericht als relative Bremswegverlängerung aufgrund eines um ein Bremshundertstel geminderten Bremsvermögens definiert wird, limitiert in der Bremstabelle den Bereich kleiner Geschwindigkeiten bei gleichzeitig kleinem Gefälle. Im Prinzip sind jedoch Bremswegeinhalten und minimale Effektivverzögerung die entscheidenden Vorgaben für die konkrete Ausgestaltung einer Bremstabelle, so dass die Anforderung an die Bremswegsensitivität implizit erfüllt wird.

### **3.2.3.4 Thermische Grenzbereiche**

Einerseits sind drei aufeinanderfolgende Schnellbremsungen thermisch gesehen für die Bremskomponenten vor allem bei hohen Geschwindigkeiten sehr anspruchsvoll. Andererseits ist die Auftretenswahrscheinlichkeit von drei Schnellbremsungen in direkter Folge im Vollbahnbereich unabhängig von Signalsystem und Zugfolge extrem gering; diese Aussage dürfte im Sinne einer Expertenschätzung auch für den Meterspurbereich gelten

Beim thermischen Schutzziel ist daher zu beachten, dass sich die betrieblichen Anforderungen an realen Gegebenheiten orientieren. Andernfalls werden wahrscheinlichkeitstheoretische Aspekte mit technischen Aspekten vermischt.

Bei starken Gefällen ist zu prüfen, ob die maximalen Rampenlängen überhaupt mehr als ein oder zwei aufeinanderfolgende Schnellbremsungen zulassen. Kombiniert man den Fall eines signalbedingten Halts mittels Schnellbremsung mit einer anschließenden Zwangsbremmung aufgrund mangelnder Wachsamkeit, dann ist dieses Szenario im Sinne einer Expertenschätzung mit einer nicht zu vernachlässigenden Wahrscheinlichkeit zu belegen.

Die nachfolgenden Untersuchungen basieren auf zwei aufeinanderfolgenden Schnellbremsungen. Zunächst wird ein für den Vollbahnbereich kalibriertes Modell verwendet, um einen ersten Eindruck im Hinblick auf die auftretenden Radtemperaturen zu bekommen<sup>5</sup>. Als Maß für den Beginn des Bereichs einer kritischen Raderwärmung wird eine Laufflächentemperatur von 500°C angesetzt. Als Simulationsmodell wird ein Finite-Volumen-Modell mit vereinfachter Geometrie verwendet, um die rechnerische Temperaturentbreitung sowohl radial als auch über der Radkranzbreite zu ermöglichen

---

<sup>5</sup> Es ist nicht zu erwarten, dass die empfohlene Validierung des Modells unter Verwendung eines modellierten Meterspur-Rades zu signifikant anderen Erkenntnissen führt, da das Modell neben den aus physikalischer Sicht erforderlichen thermodynamischen Parametern mit realen Stoffwerten keine zusätzlichen Kalibrierungsfaktoren o. ä. enthält.

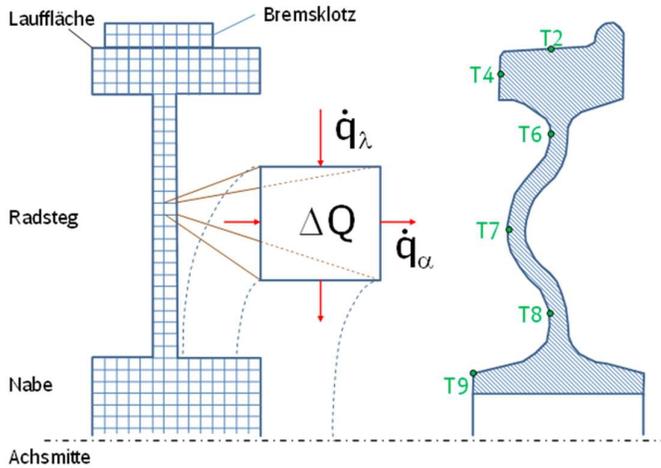


Abbildung 11: Vereinfachte, zweidimensionale Modellierung des rotationssymmetrischen Rades für das zur Anwendung kommende Finite-Volumen-Modell.

Die so ermittelten Lauffächentemperaturen bei einer maximalen Radsatzlast von 16t, abhängig von Gefälle und Bremsausgangsgeschwindigkeit, ermöglichen die Identifikation der Bremstabellenbereiche, welche aus thermischen Gründen betrieblich nicht nutzbar sind.

	v [km/h]																							
i [%]	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	
0	17	21	24	26	28	30	33	36	39	43	47	51	55	60	65	70								
5	21	26	28	30	32	35	38	41	44	47	50	54	58	63	68	74								
10	25	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	64	68	73	79								
15	28	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60	63	66	70	76									
20	32	38	40	42	44	47	50	53	56	59	62	65	70	73										
25	35	42	45	48	51	54	57	60	62	65	68	71	73											
30	39	46	49	52	55	58	61	64	67	70	73	76												
35	43	50	54	56	59	62	65	67	70	73														
40	46	55	58	61	64	66	69	71	73															
45	50	59	62	65	68	70	72	74																
50	53	63	67	70	72	74	76																	
55	57	68	72	75	77	80																		
60	60	72	76	79	83																			
65	65	76	80	84																				
70	70	81	85	89																				

Neu erschlossener Bereich (exemplarisch)

Kein Betrieb

Tabelle 6: Lauffächentemperaturen bei zwei aufeinanderfolgenden Schnellbremsungen für ein Meterspur-Rad mit einem Durchmesser der Messkreisebene von  $D_a=700\text{mm}$ . Radbreite 100mm. Radkranz-Innendurchmesser  $D_i=640\text{mm}$ .

#### 4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Teilbericht werden die Ergebnisse der Prüfung der Berechnungsvorschriften und Annahmen des Revisionsberichts in den Fassungen (BAV, 12.09.2017) und (BAV, 2020) durch die DB Systemtechnik GmbH diskutiert.

Die Ergebnisse wurden rechnerisch unter Verwendung unterschiedlicher Algorithmen plausibilisiert. Es zeigte sich eine insgesamt gute Übereinstimmung der Werte zwischen BAV und DB Systemtechnik.

Folgende Anpassungen werden empfohlen:

- Die Einführung einer exponentiell ansteigenden Bremskraft.
- Um die Verwendung einer für Grauguss- und Verbundstoffsohlen einheitlichen Bremstabelle zu ermöglichen, ist eine Anhebung der Bremsbewertungsgeschwindigkeit zielführend.

#### 5 Unterschriften



Digital unterschrieben  
von Stefan H Dörsch  
Datum: 2020.11.06  
07:39:36 +01'00'

Dr. Stefan Dörsch  
Leiter TT.TVE 31



Dr. Peter Spiess  
TT.TVE 4



Digital  
unterschrieben von  
Robert Karbstein  
Datum: 2020.11.04  
16:57:24 +01'00'

Robert Karbstein  
TT.TVE 31(1)