

Anlageninformation

Angaben zum Inhalt

Titel	Diskussion Neuberechnung Bremstabellen für die Meterspurbahnen in der Schweiz, Teilbericht 2
Dokument	18-54707-TT.TVE31-BAV-Bremstabellen
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	A400_AB-EBV_2020_GL_Bremse
Quellformat	Microsoft Office Word 2016
Seitenanzahl (inkl. Titelblatt)	20
Dateigrösse Quellformat	30 KB
Zuletzt gespeichert	Mittwoch, 18. November 2020

Weitere Angaben

Quelldatei	Begutachtung-Revisionsbericht-Teil2-v1.2-sig-PS-RK-SD.pdf



Bericht

Diskussion Neuberechnung Bremstabellen für die Meterspurbahnen in der Schweiz, Teilbericht 2

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

Inhaltsverzeichnis	Seite
1 Angaben zum Auftrag	3
2 Ausgangspunkt	4
3 Ergänzende Anmerkungen	4
4 Dokumentenanalyse	5
4.1 Inhaltliche Prüfung	5
4.1.1 Bremsvermögen P/G	5
4.1.2 Bremsbewertungsgeschwindigkeit	5
4.1.3 Bremsaufbauphase	5
4.1.4 Reibwertmodell	6
4.2 Nachrechnung Bremswegmodelle	10
4.2.1 Allgemeines	10
4.2.2 Runge-Kutta 4. Ordnung	10
4.2.3 BAV_origV2	12
5 Neue Bremstabellen	14
5.1 Thermischer Ausschlussbereich	14
5.1.1 Validierung	14
5.1.2 Modellwahl	15
5.1.3 Ergebnisse	15
5.2 Vorgaben	16
6 Zusammenfassung	17
7 Unterschriften	17
Anlage 1	18

Quellenverzeichnis/Literaturverzeichnis

- BAV122. (12.09.2017). *AB-EBV Revisionsrunde 2020, Teilprojekt Bremse Meterspur, Version 1.22*. Bundesamt für Verkehr, Abteilung Sicherheit, Sektion Fahrzeuge, Bern.
- BAV124. (05.04.2019). *AB-EBV Revisionsrunde 2020, Teilprojekt Bremse Meterspur, Version 1.24*. Bundesamt für Verkehr, Abteilung Sicherheit, Sektion Fahrzeug, Bern.
- BAV30. (2020). *AB-EBV Revisionsrunde 2020, Teilprojekt Bremse Meterspur, Version 3.0 für Veröffentlichung*. Bundesamt für Verkehr, Abteilung Sicherheit, Sektion Fahrzeuge, Bern.
- Müller/Spiess/Karbstein. (2016). *Bericht 16-23723: Bewertung der thermischen Bremsverträglichkeit im Rahmen der Einführung von ETCS Level 2 am Gotthard*. DB Systemtechnik GmbH, Minden.
- Wende, D. (1983). *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*. Springer Verlag.

1 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
Brems-, Kupplungs-, 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

2 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. Dies gilt auch und in besonderem Maße für die bremstechnische Ausstattung. 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 betriebsoptimierende Anpassung der Bremsbewertungsgeschwindigkeit genannt.

3 Ergänzende Anmerkungen

Berichtsteil 1 konzentriert sich auf die Version 1.22 des Revisionsberichts (BAV122, 12.09.2017). Im Laufe der Begutachtung kam es auch aufgrund der Begutachtungsergebnisse zu weiteren Änderungen, die sich in Version 1.24 und höher wiederfinden (BAV124, 05.04.2019) und (BAV30, 2020). Berichtsteil 2 begutachtet im Wesentlichen die Änderungen von Version 1.22 zu Version 1.24.

Der Revisionsbericht in der Version 1.24 als primärer Prüfgegenstand wird im Folgenden nur Revisionsbericht genannt (ohne Angabe einer Versionsbezeichnung).

4 Dokumentenanalyse

4.1 Inhaltliche Prüfung

4.1.1 Bremsvermögen P/G

Das Bremsvermögen wird im Revisionsbericht nun physikalisch sinnvoll als Verzögerung mit Einheit N/kg beschrieben, welche nach Ersetzen der Einheit N durch (kg m/s^2) auf die gewöhnlichere Einheit m/s^2 führt. Damit entfällt auch die Differenzierung zwischen der Erdbeschleunigung für den Einfluss der Streckenneigung mit $9,81 \text{ m/s}^2$ und der Erdbeschleunigung zur Ermittlung der Verzögerung $P/G/g$ mit $10,0 \text{ m/s}^2$.

4.1.2 Bremsbewertungsgeschwindigkeit

Die Festlegung der Bremsbewertungsgeschwindigkeit von 80 km/h lässt sich plausibel begründen. Unterstellt man, dass der Großteil der Fahrzeuge mit Scheibenbremsen oder Klotzbremsen mit Verbundstoffsohlen ausgerüstet ist und als Reibwertgrundlage die K-Sohlencharakteristik herangezogen wird, dann würde sich oberhalb der Bewertungsgeschwindigkeit ein sicherer Zustand ergeben, da die Scheibenbremse eine höhere Performance erwarten lässt als die K-Sohle. Unterhalb der Bewertungsgeschwindigkeit haben Scheibenbremsen geringfügig längere Bremswege als K-Sohlen (vgl. Tabelle 3).

Da es derzeit nur wenige Fahrzeuge mit Grauguss-Klotzbremse gibt, die schneller als 80 km/h verkehren, kann zum Wohle der Gesamtflotte ein gesondertes Verfahren eingeführt werden, das Anwendung findet, wenn ein Fahrzeug mit Grauguss-Klotzbremse mit Geschwindigkeiten größer 80 km/h betrieben wird. Nachteilig ist, dass diese Fahrzeuge unterhalb von 80 km/h Performanceverluste hinnehmen müssen. Der Anteil dieser Fahrzeuge an der Gesamtflotte sollte sich mit Blick auf die kontinuierlich an Bedeutung gewinnende Lärmsanierung weiter verringern, so dass dieser Ansatz sinnvoll ist.

Ferner kann der Performanceverlust minimiert werden, wenn diese Fahrzeuge eine kleinere Fahrzeughöchstgeschwindigkeit als 80 km/h haben und bei Fahrzeughöchstgeschwindigkeit bewertet werden.

4.1.3 Bremsaufbauphase

Die im Teilbericht 1 angesprochenen Abweichungen des ursprünglichen, geschwindigkeits-schrittbasierten Integrationsschemas (s. Abschnitt 2.3.1, (BAV30, 2020)) bei starken Gefällen und insbesondere bei kleinen Geschwindigkeiten gegenüber dem zeitschrittbasierten mit exponentieller Schwellphase werden durch eine pragmatische Modellerweiterung, im Revisionsbericht „BAV_orig2“ bezeichnet, minimiert:

Sie basiert auf der Einführung einer mittleren Verzögerung $\bar{a}_{Br}$, welche innerhalb der Bremsaufbauphase wirkt. Für das Maß dieser mittleren Verzögerung wird der Flächeninhalt unter der exponentiell verlaufenden Bremsaufbaukurve als Referenz gewählt. Die rechteckige Ersatzfläche mit konstantem Bremskraftverlauf zwischen den zwei Zeitpunkten des Bremsaufbaus $t=0$ und $t_1=3\tau$ muss denselben Flächeninhalt haben. Zum Zeitpunkt $t_1=3\tau$ wirkt die Verzögerung $a_{(v_{t1})}$. Die Referenzfläche wird um den Aspekt korrigiert, dass zum Zeitpunkt $t=3\tau$ erst 95% der Bremskraft erreicht sind.

Durch Einführung des Faktors $f_{3\tau}$ wird die Flächengleichheit erreicht:

$$\bar{a}_{Br(t \leq t_1)} = a_{(v_{t1})} \cdot f_{3\tau}$$

In der Konsequenz verändert sich die Startgeschwindigkeit zu Integrationsbeginn bzw. die Geschwindigkeit zum Ende des Bremsaufbaus $t_1=3\tau$. Diese Modellerweiterung hat jedoch zur Folge, dass der Faktor $f_{3\tau}$ neigungsabhängig zu definieren ist, was die Praktikabilität des entwickelten Modells „BAV_orig2“ zur Diskussion stellt. Da ein symbolisches Lösungsverfahren für die Bremswegberechnung bislang nicht gefunden werden konnte, ist eine numerische Integration unumgänglich. Vor diesem Hintergrund ist die Empfehlung, auf ein zeitgesteuertes Integrationsverfahren umzustellen, welches zum einen heutzutage relativ leicht rechnergestützt

umgesetzt werden kann und welches zum anderen eine einfache Abbildung der Bremsaufbauphase impliziert.

Der nachfolgende Abschnitt beleuchtet zusätzlich die Plausibilität des für den Bremskraftaufbau festgelegten Wertes $t_1 = 3\tau = 2,6 \text{ s}$.

Aufgrund der Nichtverfügbarkeit einer in sich geschlossenen, mathematisch-symbolischen Lösung wird im Revisionsbericht als Referenz zusätzlich das Modell „Phys(t)“ definiert, welches eine numerische Alternative zur symbolischen Lösung darstellen soll. Zum einen wird die Bremsaufbauphase als zeitabhängiger, exponentiell ansteigender Bremskraftverlauf modelliert und zum anderen wird auf das etablierte Integrationsverfahren nach Runge-Kutta mit einer Genauigkeit 4. Ordnung umgestellt. Damit lassen sich alle in den unterschiedlichen Versionsständen des Revisionsberichts behandelten Integrationsverfahren anhand des Runge-Kutta-Verfahrens bewerten.

4.1.4 Reibwertmodell

4.1.4.1 Reibwerte

Die diskretisierte Form des Grauguss-Reibwertes in Tabelle 2.2-1 des Revisionsberichts (BAV30, 2020) wird alternativ mittels Polynom 6. Ordnung beschrieben. Die Parameterwerte für die unterschiedlichen Reibwertcharakteristiken für Grauguss und Verbundstoff bei Bremssohlen und Verbundstoff bei Scheibenbremsbelägen wurden Anlage A12 der Revisionsberichts entnommen. Damit liegt ein eindeutiges Schema für die Ermittlung von Zwischenwerten vor.

4.1.4.2 Klotzbremsen

Wie im Teilbericht 1 verdeutlicht, haben Fahrzeuge mit Verbundstoffsohlen einen geringeren Reibwertanstieg beim Bremsen. Mit Beibehaltung der bisherigen Bremsbewertungsgeschwindigkeit von 50 km/h würden Fahrzeuge mit Verbundstoffsohlen unterhalb der Bremsbewertungsgeschwindigkeit einen längeren Bremsweg haben als Fahrzeuge mit Graugusssohle und oberhalb der Bremsbewertungsgeschwindigkeit genau umgekehrt.

In der Konsequenz ist es daher sinnvoll, zum einen als Bewertungscharakteristik der K-Sohlen-Charakteristik zu folgen und zum anderen eine Bewertungsgeschwindigkeit festzulegen, die den Großteil aller Fahrzeuge sicher berücksichtigt und den Performanceverlust geringhält. Abbildung 4.3.3-2 des Revisionsberichts (BAV30, 2020) verdeutlicht den Performanceverlust vieler aktuell verkehrender, graugussgebremster Fahrzeuge bei einer Bewertungsgeschwindigkeit von 120 km/h. Dies legt die Festlegung einer geringeren Bremsbewertungsgeschwindigkeit unterhalb 120 km/h nahe oder der Fahrzeughöchstgeschwindigkeit als abweichende Bremsbewertungsgeschwindigkeit, wenn diese kleiner als die Standard-Bremsbewertungsgeschwindigkeit ist.

4.1.4.3 Scheibenbremsen

Die leistungsfähigere Scheibenbremse zeichnet sich durch mehr Variabilität im Reibwertspektrum aus. Diese Variabilität resultiert vor allem aus dem verwendeten Reibmaterial. Die wesentlichen Vertreter sind organische Beläge und thermisch hoch belastbare Sinterbeläge. Daher wurde zunächst der Extremfall eines über der Geschwindigkeit konstanten Reibwerts betrachtet.

In diesem Fall zeigen sich die in Tabelle 1 angegebenen, absoluten Bremswegunterschiede gegenüber einem entsprechenden Zug mit K-Sohlen, die unterhalb der im Rahmen von Branchensworkshops neu in Betracht gezogenen Bewertungsgeschwindigkeit von 80 km/h liegen und besonders im Gefälle kritisch sind. Oberhalb der Bremsbewertungsgeschwindigkeit weist die Scheibenbremse mit nahezu konstantem Reibwert hingegen eine bessere Performance auf als die K-Sohle.

Für die Vergleichbarkeit der Bremswege wird als Grundlage der Berechnungen für beide Reibmaterialien ein und dieselbe Bremstabelle herangezogen, deren gefordertes Bremsvermögen auf der K-Sohlencharakteristik fußt.

Würde man diese Bremswegunterschiede akzeptieren, dann müssten sie mit Hilfe versteckter Reserven der heutigen Bremswegsicherheit begründet werden können. Selbst wenn dies möglich sein sollte, ist diese Vorgehensweise nicht zu empfehlen, da sie die Intransparenz eines Sicherheitssystems fördert. Wie im Eisenbahnbetrieb häufig der Fall, sind oft gerade die Bremswegsicherheitsmargen nicht vollständig erklärbar bzw. historisch gewachsen und als Erfahrungswert zu verstehen. Die Nachvollziehbarkeit von Systemparametern ist in jedem Fall anzustreben, da sie zukünftige Anpassungen plausibel und effizient macht.

Geschwindigkeit [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	2	5	8	11	14	16	18	19	19	19	17	15	11	7	2	-4	-10	-15	-21	-26	-31	-36	-41
5	3	6	9	13	17	19	21	22	22	22	20	17	13	8	2	-5	-12	-18	-24	-30	-35	-40	-45
10	4	7	11	16	19	22	25	26	26	25	23	20	15	9	1	-7	-15	-21	-28	-33	-39	-44	-49
15	4	8	13	17	22	26	29	30	31	30	27	23	17	9	1	-9	-17	-25	-31	-37	-43	-48	-53
20	5	10	15	20	25	30	31	33	33	32	29	24	18	9	-1	-11	-20	-28	-35	-41	-47	-52	-57
25	6	11	18	23	29	32	36	38	38	36	33	27	20	10	-2	-13	-23	-31	-39	-45	-51	-56	-61
30	7	13	20	26	33	36	40	43	40	39	35	28	20	9	-3	-15	-26	-35	-42	-49	-54	-60	-65
35	8	15	23	29	34	41	45	45	45	43	36	30	20	9	-5	-19	-29	-38	-46	-53	-58	-64	-69
40	9	16	26	33	39	45	47	50	47	45	40	32	22	8	-7	-21	-32	-41	-49	-57	-62	-68	-73
45	10	18	27	37	43	47	53	52	52	49	41	33	22	7	-9	-24	-35	-45	-53	-61	-66	-72	-77
50	12	21	30	38	48	52	54	57	54	51	42	33	21	6	-12	-27	-38	-48	-57	-65	-70	-76	-81
55	13	23	33	42	49	54	56	55	55	49	43	32	20	5	-13	-29	-41	-52	-60	-69	-74	-80	-85
60	15	26	36	46	50	55	57	57	53	47	41	32	18	3	-15	-32	-47	-55	-64	-73	-78	-84	-89
65	16	28	37	47	51	56	55	55	54	48	40	30	18	2	-16	-37	-50	-61	-68	-77	-82	-88	-93
70	18	29	38	45	52	54	56	56	52	46	40	29	16	1	-18	-40	-53	-64	-72	-81	-86	-92	-97
75	19	29	38	45	53	55	57	53	50	47	38	27	15	0	-19	-41	-57	-68	-75	-84	-90	-96	-102
80	21	30	39	46	51	56	55	54	51	45	37	27	14	-1	-20	-42	-60	-72	-79	-88	-94	-100	-103

Tabelle 1: Absolute Bremswegdifferenz in [m] zwischen konstant verlaufendem Reibwert und K-Sohle in Abhängigkeit von Bremsausgangsgeschwindigkeit und vorherrschender Neigung

Bei relativer Betrachtung sind gleichfalls hohe Bremswegdifferenzen festzustellen (vgl. Tabelle 2)

Geschwindigkeit [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	15	15	13	12	10	9	8	6	5	4	3	2	2	1	0	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	
5	19	18	16	14	12	11	9	8	6	5	4	3	2	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5	
10	23	21	19	17	14	12	11	9	7	6	4	3	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-5	
15	26	24	22	19	17	14	12	10	8	6	5	4	2	1	0	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5	-5	
20	30	27	25	22	19	16	13	11	9	7	5	4	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-5	-5	-6	
25	35	31	28	24	21	18	15	12	10	8	6	4	3	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-5	-6	-6	
30	39	35	31	27	24	20	17	14	11	8	6	4	3	1	0	-2	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-7	
35	44	39	35	30	25	22	18	15	12	9	7	5	3	1	-1	-2	-3	-4	-5	-5	-6	-6	-7	
40	49	44	39	33	28	24	20	16	13	10	7	5	3	1	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-6	-7	-7	
45	54	48	41	37	31	25	21	17	14	11	8	5	3	1	-1	-2	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-8	
50	61	53	46	39	34	28	22	18	14	11	8	5	3	1	-1	-3	-4	-5	-6	-6	-7	-8	-8	
55	67	58	50	42	35	29	24	19	15	11	8	5	3	1	-1	-3	-4	-5	-6	-7	-7	-8	-9	
60	74	64	54	46	37	30	25	19	15	11	8	5	3	0	-2	-3	-5	-6	-7	-7	-8	-8	-9	
65	80	70	57	48	38	32	25	20	16	12	8	5	3	0	-2	-4	-5	-6	-7	-8	-8	-9	-9	
70	89	72	59	48	40	32	26	20	16	12	8	5	3	0	-2	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-9	-10	
75	91	75	61	49	41	33	26	20	16	12	8	5	2	0	-2	-4	-6	-7	-8	-8	-9	-10	-10	
80	100	77	63	51	41	34	26	21	16	12	8	5	2	0	-2	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-10	-10	

Tabelle 2: Relative Bremswegdifferenz in [%] zwischen konstant verlaufendem Reibwert und K-Sohle in Abhängigkeit von Bremsausgangsgeschwindigkeit und vorherrschender Neigung

Typische Reibwertverläufe von Scheibenbremsen weisen unabhängig von der Reibpaarung im Geschwindigkeitsbereich $v < 80$ km/h im Allgemeinen einen im Bremsverlauf ansteigenden Reibwert auf.

Es wird unterstellt, dass sich die realen Reibwertverläufe von Scheibenbremsen tendenziell eher am Verlauf der K-Sohle als an einem konstanten Reibwert orientieren. Zur weiteren Überprüfung dieser Annahme wurden Vergleiche mit realen Versuchen durchgeführt. Abbildung 1 vergleicht Ergebnisse verschiedener Berechnungsmodelle mit Ergebnissen realer Versuche. Letztere zeigen einen deutlich flacheren Anstieg der mittleren Verzögerung als es das BAV-Modell mit konstantem Reibwert tut. Auch gibt es keine akzeptable Übereinstimmung zwischen BAV-Modell und UIC-TrainDy-Simulationen.

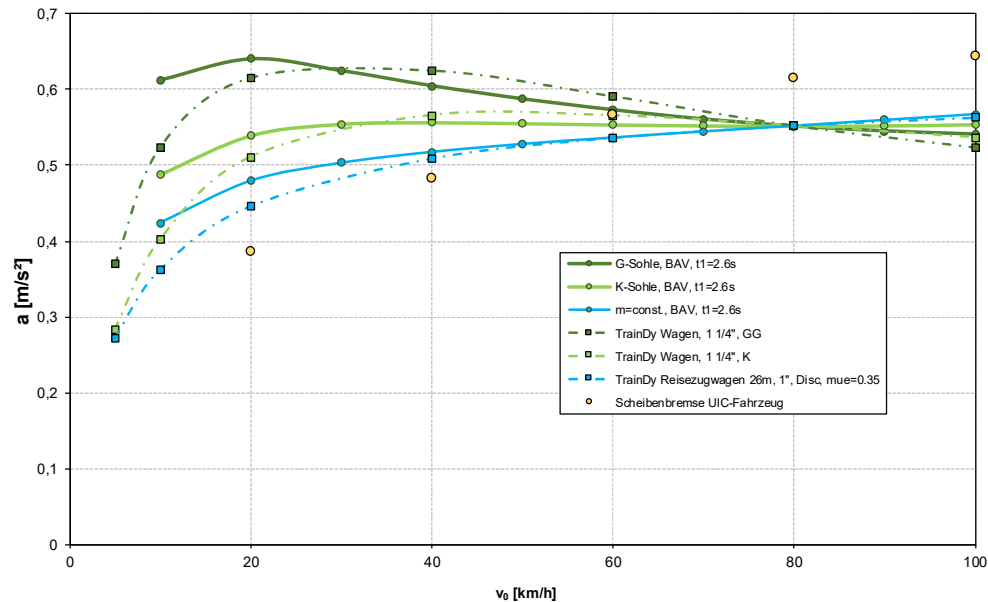


Abbildung 1: Vergleich mittlerer Verzögerungen von BAV-Modell mit $t_1 = 2.6\text{s}$, UIC-TrainDy-Simulationen Einzelfahrzeug mit konstantem Reibwert und Versuchsdaten eines scheibengebremsen Reisezuges mit 400m Länge (gelbe Punkte).

Da der konstante Reibverlauf den flachsten Verlauf ergeben muss (was relativ innerhalb der Kurvenschar des BAV-Modells oder des UIC-TrainDy-Modells auch der Fall ist), ist ein weiterer, im unteren Geschwindigkeitsbereich dominierender Parameter, nämlich der der Bremszylinderfüllzeit, anzugleichen. Die Bremszylinderfüllzeit des BAV-Modells wurde daher in Abbildung 2 von $t_1 = 2.6\text{s}$ auf $t_1 = 4.0\text{s}$ heraufgesetzt, wodurch für den konstanten Reibwert eine gute Annäherung an die UIC-TrainDy-Simulation und das BAV-Modell erreicht werden kann. Dass die Werte aus dem Realversuch nach wie vor flacher sind, liegt an der Tatsache, dass es sich hierbei nicht um Einzelwagen, sondern um einen Reisezug mit 400m Länge handelt, dessen effektive Füllzeit bei ca. 7 Sekunden liegt.

Insgesamt zeigt das BAV-Modell mit entsprechend angepassten Parametern und seinen Reibwertcharakteristiken nach Wende (Wende, 1983) ein mit den realen Versuchen gut übereinstimmendes Bild.

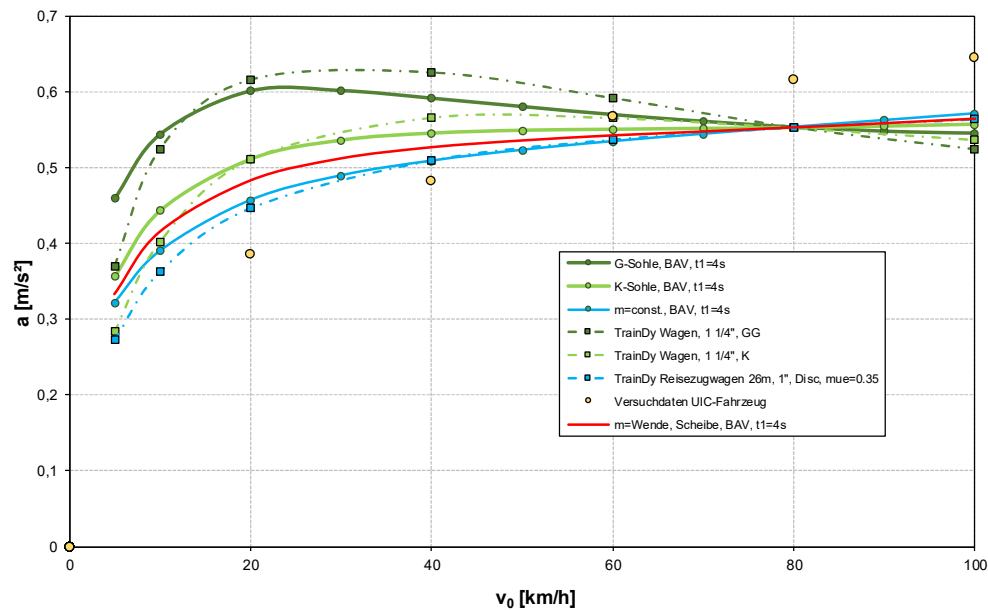


Abbildung 2: Vergleich mittlerer Verzögerungen von BAV-Modell mit $t_1 = 4,0s$, UIC-TrainDy-Simulationen Einzelfahrzeug mit konstantem Reibwert und Versuchsdaten eines scheibengebremsten Reisezuges mit 400m Länge (gelbe Punkte) und Charakteristik Brems Scheibe nach Wende.

Sofern der Betrieb von Zügen mit einer UIC-Bremscharakteristik auf Meterspurbahnen nicht sicher ausgeschlossen werden kann, ist eine Anpassung des Wertes für die Bremszylinderfüllzeit t_1 des BAV-Modells anzuraten. Diese Anpassung der Bremszylinderfüllzeit hat allerdings nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse in Tabelle 1.

Der Revisionsbericht nimmt Bezug auf die Reibwertdefinition nach Prof. D. Wende (Wende, 1983), welche auf den roten Verlauf in Abbildung 2 führt. Mit diesem Reibwertverlauf ergeben sich im Vergleich zu Tabelle 1 geringere Abweichungen, wie nachfolgender Tabelle 3 entnommen werden kann.

i [%]	Geschwindigkeit [km/h]																			
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105
0	1	2	4	5	7	8	9	9	9	9	8	7	6	3	1	-2	-5	-8	-12	-15
5	2	3	5	6	8	9	10	10	10	10	9	8	6	4	1	-3	-7	-10	-13	-17
10	2	3	5	7	9	10	12	12	12	12	11	9	7	4	0	-4	-8	-12	-16	-19
15	2	4	6	8	10	12	13	14	14	14	12	10	7	4	-1	-5	-10	-14	-18	-21
20	2	4	7	9	11	13	14	15	15	14	13	11	8	3	-2	-7	-11	-16	-20	-23
25	3	5	8	10	13	14	16	17	17	16	14	12	8	3	-3	-8	-13	-18	-22	-26
30	3	6	9	11	14	16	18	19	18	17	15	12	8	3	-4	-10	-15	-20	-24	-28
35	4	6	10	13	15	17	19	19	19	18	15	12	8	2	-5	-12	-17	-22	-26	-30
40	4	7	11	14	16	19	20	21	20	19	16	13	8	1	-7	-13	-19	-24	-28	-33
45	4	8	11	15	18	20	22	22	22	20	17	13	7	0	-8	-15	-21	-26	-30	-35
50	5	8	12	16	19	21	22	24	22	21	17	12	7	-1	-10	-17	-23	-28	-33	-38
55	5	9	13	17	20	22	23	23	22	20	17	12	6	-2	-11	-19	-25	-30	-35	-40
60	6	10	14	18	20	22	23	23	21	19	16	11	5	-2	-12	-20	-28	-32	-37	-42
65	6	11	14	18	20	22	22	22	22	19	15	11	5	-3	-12	-23	-30	-36	-39	-45
70	7	11	15	17	21	21	22	22	21	18	15	10	4	-4	-14	-25	-32	-38	-42	-47
75	7	11	15	18	21	22	23	21	20	18	14	9	3	-5	-14	-26	-34	-40	-44	-49
80	8	11	15	18	20	22	22	21	20	17	14	9	3	-5	-15	-26	-36	-42	-46	-52

Tabelle 3: Absolute Bremswegdifferenz in [m] zwischen Scheibenbremse nach Wende (Wende, 1983) und K-Sohle in Abhängigkeit von Bremsausgangsgeschwindigkeit und vorherrschender Neigung

Grundsätzlich ist zum Erhalt einer besseren Performance der finalen Bremstabelle auch eine Aufsplittung der Reibwertgrundlage denkbar. Das bedeutet, dass unterhalb der Bewertungsgeschwindigkeit die Scheibenbremscharakteristik als Grundlage für die Berechnung von Bremstabellen verwendet werden kann und oberhalb der Bewertungsgeschwindigkeit die Charakteristik der K-Sohle. Dieses Prinzip wird im Übrigen bei der deutschen Bremstafelkonstruktion

angewandt, wobei oberhalb der Bewertungsgeschwindigkeit¹ die Graugusscharakteristik Grundlage ist und nicht die K-Sohlencharakteristik.

4.2 Nachrechnung Bremswegmodelle

4.2.1 Allgemeines

Durch den Wechsel auf eine höhere Bremsbewertungsgeschwindigkeit können bestehende Inkonsistenzen aufgelöst werden. Der bislang gültige Bewertungspunkt ($v_0 = 50 \text{ km/h}$, $\lambda = 100\%$), der in der Ebene einen Bremsweg von rund 96m fordert, wird bei der numerischen Integration nur mit einem Geschwindigkeitsschritt von 5 km/h erreicht. Ein kleinerer Geschwindigkeitsschritt, welcher naturgemäß mit einer Erhöhung der Berechnungsgenauigkeit einhergehen sollte, führt jedoch auf einen signifikant kleineren Bremsweg als 96m.

Um derartig mathematisch-numerische Missstände zu umgehen, sollte der neu gewählte Bewertungspunkt mit einem genaueren Berechnungsverfahren errechnet werden. Bestimmt man den zur veränderten Bremsbewertungsgeschwindigkeit kompatiblen Referenzbremsweg mit Hilfe des aktuell gültigen Integrationsverfahren ($\Delta v = 5 \text{ km/h}$), dann müsste bei Übergang auf ein genaueres Integrationsverfahren das Bremsvermögen P/G/10 neu eingestellt werden. Der historische Wert von 7,254 könnte dann nicht mehr aufrechterhalten werden. Sinnvoller scheint, um auch dem Bestandschutz gerecht zu werden, den neuen Referenzbremsweg bei Bewertungsgeschwindigkeit 80 km/h auch mit dem bisherigen Modell bzw. Integrationsverfahren zu berechnen. Das entspricht in der Ebene einem Bremsweg von 254,2m.

Da künftig die K-Sohlencharakteristik die Bremstabellenberechnung mitbestimmen soll, bietet sich jedoch eine Justierung des Wertes für die Abbremsung P/G der K-Sohle an.

Hinsichtlich eines genaueren Integrationsverfahrens werden im Revisionsbericht zwei Verfahren beschrieben. Das ist zum einen ein explizites Zeitintegrationsverfahren 4. Ordnung nach Runge-Kutta und zum anderen eine Erweiterung bzw. Optimierung der heute bestehenden Geschwindigkeitsintegration.

Nachfolgend wird der Revisionsbericht im Hinblick auf die Nachvollziehbarkeit und Korrektheit der beschriebenen Rechenschritte überprüft.

4.2.2 Runge-Kutta 4. Ordnung

Die Überprüfung der Berechnungswerte wird sowohl mit dem im Revisionsbericht vorgestellten, zeitgesteuerten Runge-Kutta-Verfahren als auch einem adaptiven Integrationsverfahren von MATLAB² vorgenommen. Wie der Tabelle 4 entnommen werden kann, entsprechen die Bremswege bis auf wenige Ausnahmen den Werten der Tabelle 3.3-1 im Revisionsbericht (BAV30, 2020). Somit enthält der Revisionsbericht alle Angaben zur Nachrechnung der dort veröffentlichten Bremswege.

¹ UIC Bremsbewertungsgeschwindigkeit 120 km/h

² Verbreitete mathematisch-naturwissenschaftliche Entwicklungsumgebung (www.mathworks.com)

s [m]	a [%]														
v ₀	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	22	13	9	8	6	6	5	5	4	4	4	4	3	3	3
20	95	53	37	30	25	21	19	17	16	14	13	13	12	11	11
30	228	126	88	69	57	49	43	38	35	32	30	28	26	25	23
40	422	234	164	127	104	89	78	70	63	58	53	50	46	44	41
50	674	378	265	205	168	143	125	111	100	91	84	78	73	69	65
60	980	556	391	303	248	211	184	163	147	134	123	115	107	100	95
70		767	542	421	345	293	255	227	204	186	171	158	148	138	130
80			717	558	458	389	339	301	271	247	227	210	196	183	173
90			914	714	587	499	435	386	348	317	291	269	251	235	221
100				885	730	622	542	482	434	395	362	335	312	292	275
110					885	756	660	586	528	481	442	409	381	356	335
120						900	787	700	631	575	528	489	455	426	401

Tabelle 4: Bremswege in der Ebene bei Grauguss-Charakteristik mit Runge-Kutta-Integration in Abhängigkeit von Bremsausgangsgeschwindigkeit und Bremsvermögen (Brems Hundertstel)

Da der angesetzte Zeitschritt mit $\Delta t = 0,01$ s für sich gesehen sehr klein ist und allein dadurch eine hohe Genauigkeit erwarten lässt, wird empfohlen, ein weniger aufwändiges und anschaulich besser verständliches Integrationsmodell 2. Ordnung zu wählen, welches als Verfahren nach Heun in Anlage 1 beschrieben wird. Dieses könnte ferner auch das aktuell vorgeschlagene Berechnungsmodell „BAV_orig2“ ersetzen, da es in der Umsetzung nicht komplexer ist und relativ anschaulich bleibt. Im Prinzip werden bei der numerischen Integration nach Heun, wie in Abbildung 3 dargestellt, kleine Trapezflächen A_H aufsummiert, die jeweils einem Weginkrement Δs entsprechen. Diese Vorgehensweise führt abhängig vom Zeitschritt Δt zu geringfügig ungenaueren Ergebnissen als sie das Verfahren 4. Ordnung nach Runge-Kutta hervorbringt.

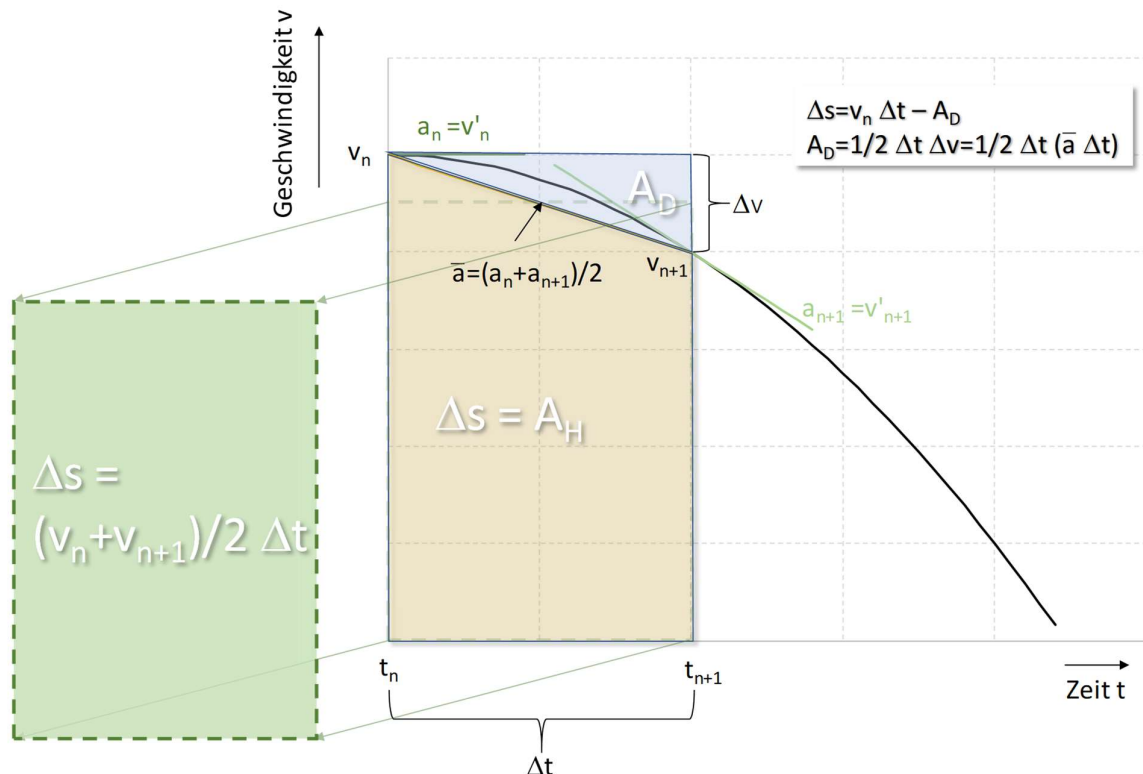


Abbildung 3: Vergleich mittlere Verzögerungen von BAV-Modell mit $t_1 = 2.6$ s, UIC-TrainDy-Simulationen Einzelfahrzeug mit konstantem Reibwert

Da die Verzögerungsverläufe (entgegen obiger Abbildung) eine positive Krümmung haben (konvexe Verläufe), ist davon auszugehen, dass der von der Verzögerungskurve eingefasste

Flächeninhalt aufgrund der numerisch gebildeten Trapezflächen zu groß ist und damit die Geschwindigkeit zu hoch und in der Folge der Bremsweg tendenziell zu lang berechnet wird.

Der nachfolgende Vergleich in Tabelle 5 und Tabelle 6 gibt die Bremswegdifferenz in Millimeter in Abhängigkeit von der Größe des Zeitschritts zwischen einem sehr genauen, adaptiven Zeitschrittverfahren (Zugriff via Matlab-Bibliothek) und dem Verfahren zweiter Ordnung nach Heun an.

s [mm]	μ [%]														
v ₀	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	-0,010	-0,009	-0,007	-0,005	0,000	-0,007	0,001	-0,005	0,000	0,003	0,014	0,004	0,012	0,018	0,004
20	-0,022	-0,024	-0,022	-0,021	-0,017	-0,016	-0,016	-0,008	-0,017	-0,008	0,000	-0,010	-0,001	0,008	0,009
30	-0,032	-0,033	-0,032	-0,033	-0,032	-0,027	-0,025	-0,028	-0,027	-0,022	-0,029	-0,019	-0,010	-0,016	-0,004
40	-0,042	-0,045	-0,045	-0,047	-0,040	-0,043	-0,042	-0,033	-0,033	-0,031	-0,029	-0,032	-0,031	-0,019	-0,034
50	-0,052	-0,056	-0,057	-0,059	-0,054	-0,059	-0,060	-0,054	-0,046	-0,043	-0,045	-0,046	-0,041	-0,033	-0,032
60	-0,059	-0,067	-0,068	-0,072	-0,075	-0,072	-0,064	-0,063	-0,059	-0,063	-0,064	-0,054	-0,059	-0,067	-0,046
70	-0,064	-0,075	-0,084	-0,083	-0,079	-0,078	-0,081	-0,077	-0,076	-0,074	-0,085	-0,072	-0,066	-0,061	-0,071
80	-0,069	-0,083	-0,088	-0,090	-0,089	-0,094	-0,089	-0,096	-0,092	-0,091	-0,082	-0,088	-0,077	-0,091	-0,088
90	-0,072	-0,090	-0,099	-0,101	-0,099	-0,099	-0,099	-0,105	-0,103	-0,104	-0,106	-0,098	-0,090	-0,101	-0,097
100	-0,074	-0,094	-0,102	-0,109	-0,110	-0,109	-0,117	-0,112	-0,107	-0,107	-0,111	-0,105	-0,111	-0,118	-0,098
110	-0,075	-0,097	-0,109	-0,113	-0,119	-0,117	-0,118	-0,119	-0,122	-0,123	-0,113	-0,124	-0,126	-0,108	-0,115
120	-0,075	-0,101	-0,114	-0,120	-0,123	-0,132	-0,131	-0,126	-0,134	-0,140	-0,124	-0,137	-0,125	-0,118	-0,116

Tabelle 5: Absolute Bremswegdifferenz (adaptiv – Heun) für Bremsungen in der Ebene in Millimeter bei K-Sohle zwischen adaptivem Zeitschrittverfahren und Verfahren nach Heun mit Zeitschritt $\Delta t = 0.01s$.

s [mm]	μ [%]														
v ₀	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	-2,0	-1,9	-1,7	-1,8	-1,2	-1,0	-1,1	-0,7	-0,7	-0,3	0,0	-0,9	0,6	-0,2	-1,0
20	-4,2	-4,5	-4,5	-4,1	-4,5	-3,6	-3,8	-3,7	-2,9	-2,6	-2,3	-3,8	-3,2	-1,6	-1,5
30	-6,2	-6,6	-6,7	-6,5	-6,2	-6,9	-6,3	-5,6	-6,7	-5,3	-6,6	-5,0	-4,9	-4,2	-5,8
40	-8,0	-9,0	-8,9	-8,8	-8,7	-9,1	-9,0	-8,1	-7,9	-9,1	-7,5	-7,9	-8,3	-7,8	-6,8
50	-9,6	-10,8	-11,1	-11,1	-11,2	-11,2	-10,9	-11,0	-10,4	-10,2	-9,9	-9,9	-9,4	-10,3	-10,6
60	-10,9	-12,8	-13,1	-13,2	-13,4	-14,1	-13,5	-12,9	-12,7	-12,8	-14,0	-13,1	-11,9	-11,9	-11,9
70	-11,9	-14,2	-15,0	-15,3	-16,0	-15,8	-15,3	-15,4	-15,1	-14,9	-15,8	-15,0	-14,4	-15,8	-14,2
80	-12,7	-15,6	-16,8	-17,6	-17,7	-17,4	-17,9	-17,7	-18,5	-18,1	-18,4	-18,1	-18,1	-18,4	-16,2
90	-13,3	-16,7	-18,3	-19,3	-19,8	-19,4	-19,7	-19,9	-19,4	-19,6	-19,4	-19,7	-19,0	-19,9	-19,2
100	-13,7	-17,8	-19,4	-21,0	-20,9	-21,2	-21,4	-22,1	-22,7	-21,5	-21,4	-21,2	-21,4	-21,2	-21,9
110	-14,0	-18,7	-21,0	-22,3	-22,6	-23,8	-23,2	-24,3	-23,4	-24,8	-24,8	-24,6	-25,2	-23,1	-24,2
120	-14,1	-19,2	-21,6	-23,4	-24,0	-25,4	-25,0	-25,1	-25,4	-25,3	-25,6	-25,5	-25,6	-26,2	-26,0

Tabelle 6: Absolute Bremswegdifferenz (adaptiv – Heun) für Bremsungen in der Ebene in Millimeter bei K-Sohle zwischen adaptivem Zeitschrittverfahren und Verfahren nach Heun mit Zeitschritt $\Delta t = 0.1s$.

Wie man Tabelle 6 entnehmen kann, geht eine Erhöhung des Berechnungszeitschritts um den Faktor 10 auf 0.1 s nur mit einer geringen Genauigkeitseinbuße im Bereich weniger Zentimeter einher und ist daher ohne weiteres vertretbar.

4.2.3 BAV_origV2

Um einerseits möglichst gut an die exakte Lösung der Bremswegberechnung heranzukommen und andererseits den anfangs in 4.2.1 genannten Missstand einer schrittweitenabhängigen Bremswegreferenz zu umgehen, wurde im Rahmen der Modellerweiterung der Geschwindigkeitsschritt auf 1 km/h verringert.

Damit ist ein Integrationsschema für die Berechnung von Bremstabellen vorgegeben, welches eine akzeptable Genauigkeit aufweist und nach wie vor zum Beispiel mit Hilfe einer Excel-Tabelle berechnet werden kann.

Tabelle 7 zeigt den Bremswegunterschied, der sich aus den im Abschnitt 4.2 beschriebenen Integrationsverfahren ergibt. Es besteht eine mäßige Genauigkeit hinsichtlich des Vergleichs mit Tabelle 3.3.4-1 des Revisionsberichts. Der Vergleich mit der K-Charakteristik zeigt jedoch deutliche Differenzen (vgl. Tabelle 8 mit Tabelle 3.3.5-1 Revisionsbericht). Dieser Umstand zeigt

auf, dass es sich um eine komplexe Berechnungsvorschrift handelt, die offensichtlich bei der Reproduktion der Ergebnisse Stolpersteine³ beinhaltet.

s [m]	μ [%]														
v ₀	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	-0,20	-0,10	-0,10	-0,10	-0,20	-0,10	-0,20	-0,20	-0,30	-0,40	-0,50	-0,70	-0,80	-1,00	-1,20
20	-0,40	-0,40	-0,30	-0,30	-0,30	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,20	-0,10	-0,10	-0,10	-0,20	-0,20
30	-0,70	-0,60	-0,60	-0,50	-0,50	-0,50	-0,40	-0,40	-0,30	-0,30	-0,30	-0,40	-0,30	-0,30	-0,20
40	-0,90	-0,90	-0,80	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70	-0,70	-0,60	-0,50	-0,60	-0,50	-0,50	-0,50	-0,50
50	-1,20	-1,10	-1,00	-0,90	-0,90	-0,90	-0,90	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,70	-0,70	-0,70
60	-1,50	-1,30	-1,30	-1,20	-1,10	-1,10	-1,10	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-0,90	-0,90
70		-1,70	-1,60	-1,50	-1,40	-1,30	-1,30	-1,30	-1,30	-1,30	-1,20	-1,20	-1,10	-1,10	-1,10
80			-1,90	-1,80	-1,70	-1,70	-1,60	-1,60	-1,60	-1,60	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50
90			-2,20	-2,20	-2,10	-2,00	-2,00	-1,90	-1,90	-1,90	-1,90	-1,80	-1,80	-1,80	-1,80
100				-2,50	-2,30	-2,30	-2,30	-2,20	-2,20	-2,20	-2,10	-2,20	-2,10	-2,10	-2,10
110					-2,70	-2,70	-2,60	-2,60	-2,60	-2,50	-2,50	-2,50	-2,50	-2,40	-2,40
120						-3,10	-3,10	-3,00	-3,00	-3,00	-2,90	-2,90	-2,90	-2,90	-2,90

Tabelle 7: Bremswegunterschied in Meter der GG-Charakteristik zwischen BAV_origV2 und Runge-Kutta-Integration

s [m]	μ [%]														
v ₀	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
10	-0,20	-0,20	-0,30	-0,20	-0,30	-0,30	-0,30	-0,30	-0,40	-0,40	-0,50	-0,50	-0,60	-0,60	-0,70
20	-0,40	-0,50	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,40	-0,50	-0,40	-0,50	-0,50	-0,60	-0,50	-0,60
30	-0,70	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60	-0,60
40	-0,90	-0,80	-0,90	-0,90	-0,80	-0,90	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80	-0,80
50	-1,30	-1,10	-1,10	-1,00	-1,10	-1,00	-1,00	-1,10	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00	-1,00
60		-1,40	-1,40	-1,30	-1,30	-1,30	-1,30	-1,20	-1,20	-1,30	-1,20	-1,20	-1,20	-1,20	-1,20
70		-1,70	-1,60	-1,60	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50	-1,50	-1,40	-1,50	-1,40
80			-1,90	-1,90	-1,80	-1,70	-1,70	-1,80	-1,80	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70	-1,70
90			-2,20	-2,20	-2,10	-2,10	-2,10	-2,00	-1,90	-2,00	-2,00	-1,90	-1,90	-2,00	-2,00
100				-2,50	-2,40	-2,30	-2,30	-2,30	-2,20	-2,20	-2,20	-2,20	-2,20	-2,20	-2,20
110					-2,70	-2,70	-2,60	-2,60	-2,50	-2,50	-2,50	-2,40	-2,50	-2,40	-2,40
120						-2,90	-2,90	-2,80	-2,90	-2,80	-2,80	-2,70	-2,70	-2,70	-2,70

Tabelle 8: Bremswegunterschied in Meter der K-Charakteristik zwischen BAV_origV2 und Runge-Kutta-Integration

³ Die Reibwerte im Revisionsbericht sind in 10 km/h-Schritten definiert. Eine Vorschrift zur Bestimmung von Zwischenwerten lag zum Zeitpunkt der Prüfung nicht vor.

5 Neue Bremstabellen

5.1 Thermischer Ausschlussbereich

5.1.1 Validierung

Ein für den Vollbahnbereich validiertes Finite-Volumen-Modell für Berechnung der Erwärmung von Rädern (Müller/Spiess/Karbstein, 2016) wurde für die Prognose der Radtemperaturen herangezogen. Zuvor wurde es vorsorglich auf die Verwendbarkeit im Meterspurbereich mit deutlich kleineren Rädern überprüft. Exemplarisch zeigt Abbildung 4 die gelungene Absicherung durch den Vergleich von Prüfstandsversuchen und Simulation. Es wurden weitere Versuche erfolgreich nachgebildet. Das kleinste Rad hatte einen Laufkreisdurchmesser von 645mm (vgl. Dauerbremsung Abbildung 5).

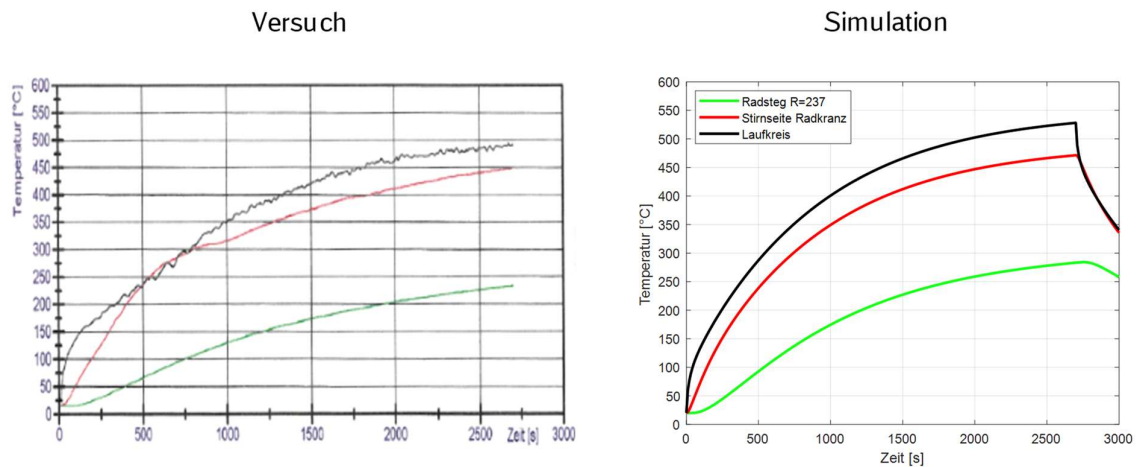


Abbildung 4: Vergleich Temperaturentwicklung Güterwagenvollrad (Laufkreisdurchmesser 680mm) bei 30kW Dauerbremsleistung: links Versuch, rechts Simulation

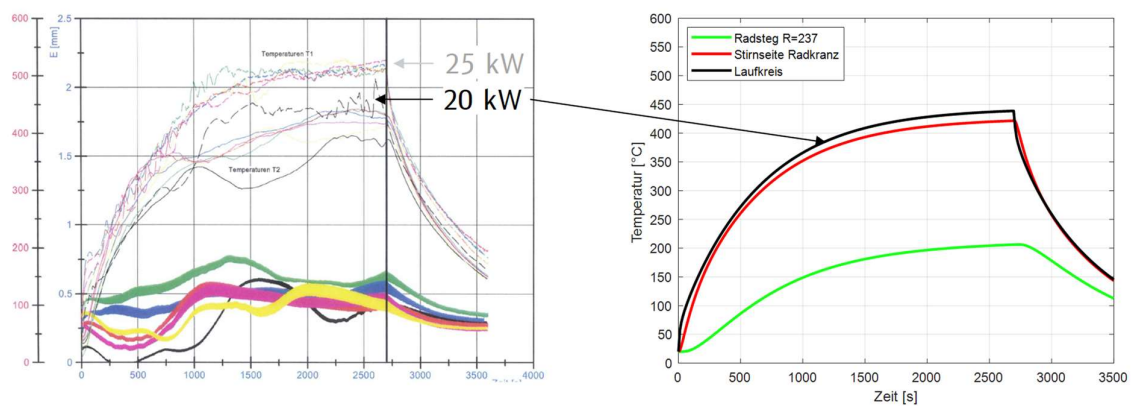


Abbildung 5: Vergleich Temperaturentwicklung Meterspurrad (Laufkreisdurchmesser 645mm) bei 20kW Dauerbremsleistung: links Versuch, rechts Simulation

Neben den Dauerbremsungen wurde auch ein dynamisches Fahrprofil, welches auf dem Reibungsprüfstand nachgestellt wurde, in der Simulation nachgerechnet (vgl. Abbildung 6).

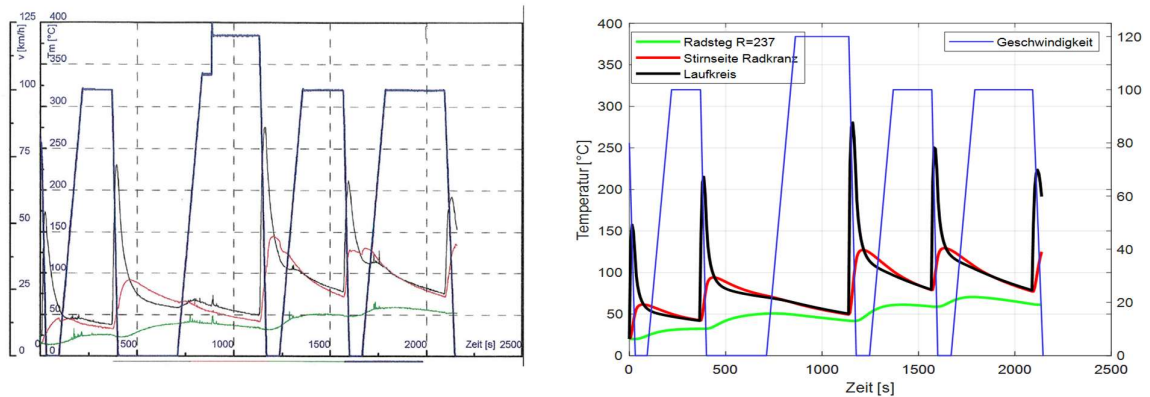


Abbildung 6: Vergleich Temperaturentwicklung dynamisches Fahrprofil, Nachstellung am Prüfstand: Meterspurrad (Laufkreisdurchmesser 645mm); links Versuch, rechts Simulation

5.1.2 Modellwahl

Dem Wunsch nach einer einfacheren Berechnung der Temperaturen als der in Abschnitt 5.1.1 vorgestellten kann nicht entsprochen werden. Ein nulldimensionales Modell bildet eine mittlere Temperatur über den Radkranz aus und damit eine zu geringe Temperatur. Anders verhält es sich beim eindimensionalen Modell. Aufgrund der modellbedingt nicht vorhandenen Konvektion an den Flanken des Radkranzes entwickeln sich zu hohe Temperaturen. Auch der Wärmeabfluss in den Radsteg wird nicht berücksichtigt bzw. ist nicht trivial modellierbar.

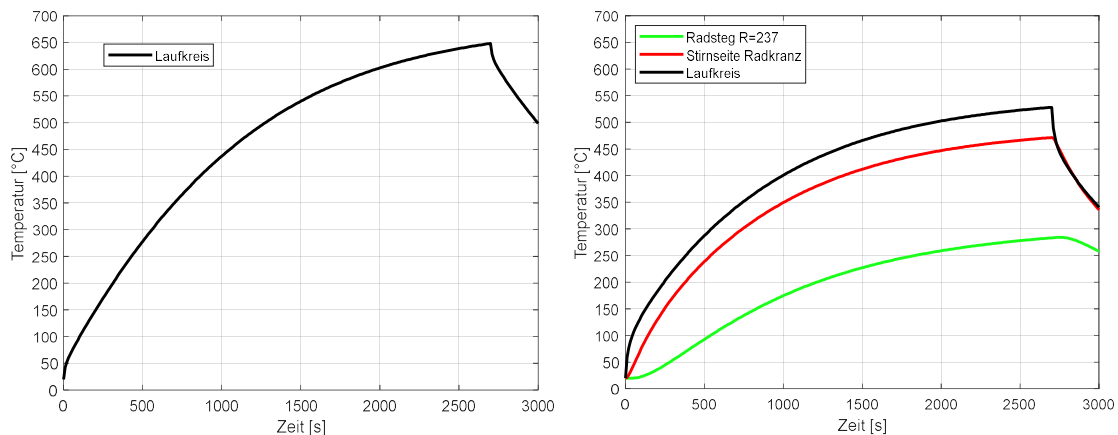


Abbildung 7: Vergleich Temperaturentwicklung Güterwagenvollrad (Laufkreisdurchmesser 680mm) bei 30kW Dauerbremsleistung: links 1-dimensionales, rechts 2-dimensionales Modell mit Finiten Volumenelementen

5.1.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die mit dem Finite-Volumen-Modell berechneten Grenzbereiche der Bremstabellen dargestellt, die mit einer Laufflächentemperatur des Rades von mehr als 500°C einhergehen. Dieser Grenzwert wurde gewählt, da er einerseits Ausdruck einer im Betrieb eher seltenen und hohen thermischen Beanspruchung des Rades ist, jedoch andererseits bei diesem Temperaturniveau sowohl bei Schnellbremsungen als auch Dauerbremsungen Schäden am Rad unabhängig von der Radgeometrie (gängiger Radgeometrie) unwahrscheinlich sind. Die Akzeptanz höherer Grenztemperaturen erfordert aufwändige Eigenspannungsanalysen basierend auf der jeweiligen Radgeometrie. Ferner ergeben sich mit diesem Grenzwert geringere Restriktionen als bei den bislang angewandten Bremstabellen.

Als Lastkollektiv werden zwei aufeinanderfolgende Schnellbremsungen angesetzt. Die Berechnung der zeitabhängigen Bremsleistung erfolgt auf Basis des im Revisionsbericht beschriebenen Runge-Kutta-Verfahrens mit exponentiell ansteigender Bremskraft. Grundlage der Berechnung ist ferner die Bremstabelle für die jeweils zugrunde gelegte Reibcharakteristik, gültig für die Bewertungsgeschwindigkeit von 80 km/h. Ergebniswert ist stets der höchste berechnete Temperaturwert im Szenario.

Unabhängig von der Reibcharakteristik zeigt sich in Tabelle 9 und Tabelle 10 stets ein annähernd gleicher kritischer Bereich. Dies ist insofern plausibel, als dass sich das geforderte Bremsvermögen in diesem Bereich aus dem Bremswegkriterium ergibt. Dadurch bleibt die Summe aus zu dissipierender kinetischer und potentieller Energie annähernd konstant. Offensichtlich wird die Laufflächentemperatur in diesem Kontext mehr durch die insgesamt eingebrachte Bremsenergie bestimmt als durch Unterschiede in den Verläufen der Bremsleistung über der Zeit.

[°C]		Bremsausgangsgeschwindigkeit [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																									
5																									
10																									
15																									
20																								517	
25																							514	554	
30																						509	550	592	
35																					506	544	585	629	
40																				504	541	580	621	664	
45																			502	538	576	616	657	701	
50																		500	535	571	610	650	693	738	
55																		533	568	605	644	686	729	774	
60																	530	565	602	639	679	721	765	811	
65																530	564	596	634	672	713	755	800	847	
70															514	560	594	631	667	705	748	791	835	883	
75														545	589	624	662	699	740	782	825	871	919		
80														517	572	623	654	693	733	773	815	860	906	955	
85														541	593	652	689	724	765	805	848	894	941	990	
90																									
95																									
100																									
105																									
110																									
115																									
120																									

Tabelle 9: Temperaturen Radlauffläche bei konstantem Reibwert $\mu = \text{const.}$

[°C]		Bremsausgangsgeschwindigkeit [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																								
5																								
10																								
15																								518
20																							513	555
25																						510	550	592
30																					507	546	586	629
35																				506	542	582	623	666
40																			505	541	578	618	659	703
45																			505	539	576	614	654	696
50																			506	538	573	610	649	690
55																			504	538	571	607	645	685
60																			531	570	607	641	680	720
65																			512	557	606	640	677	714
70																			535	586	638	673	711	749
75																			506	558	611	665	706	745
80																			525	580	635	692	739	779
85																								
90																								
95																								
100																								
105																								
110																								
115																								
120																								

Tabelle 10: Temperaturen Radlauffläche bei K-Sohlenreibwert

5.2 Vorgaben

Folgende Vorgaben sind für die betrieblich sichere Anwendung der Bremstabellen zu kommunizieren:

- Die gesamte Bremskraft eines Fahrzeugs ist an allen Achsen in gleicher Höhe bereitzustellen.
- Die maximale Achslast liegt bei 16t.
- Die Bremstabellen gelten für Einzelfahrzeuge mit einer Länge von bis zu 30 Metern.

- Die thermisch bedingten Ausschlussbereiche gelten für klotzgebremste Fahrzeuge. Scheibenbremsen können den Ausschlussbereich nutzen, wenn die thermische Eignung der Bremskomponenten bzw. des implementierten Bremskonzepts nachgewiesen wird.

6 Zusammenfassung

Im vorliegenden Teilbericht werden die Ergebnisse der Prüfung der Berechnungsvorschriften und Annahmen des Revisionsberichts in der Version 1.24 (BAV124, 05.04.2019) durch die DB Systemtechnik GmbH diskutiert.

Im Fokus lagen die Nachvollziehbarkeit und die Plausibilisierung der Änderungen und Erweiterungen beim Übergang von Version 1.22 auf 1.24.

Zusätzlich werden Berechnungsergebnisse für die Festlegung thermischer Ausschlussbereiche der Bremstabellen vorgestellt. Dabei kann konstatiert werden, dass die neuen Bremstabellen für die Meterspur grundsätzlich, also auch im Gefälle, höhere Fahrgeschwindigkeiten als bisher erlauben.

Aufgrund der Betrachtungen in Abschnitt 4.1.4.3 wird die Übernahme der Reibwertcharakteristik der Scheibenbremse als Berechnungsgrundlage für Bremstabellenwerte unterhalb der Bewertungsgeschwindigkeit empfohlen.

Aufgrund der Komplexität des numerischen Verfahrens wird empfohlen, den Betreibern ein Berechnungswerkzeug zur Verfügung zu stellen.

7 Unterschriften



Digital unterschrieben
von Stefan H Dörsch
Datum: 2020.11.06
07:38:29 +01'00'

Dr. Stefan Dörsch
Leiter TT.TVE 31



Dr. Peter Spiess
TT.TVE 4



Digital
unterschrieben von
Robert Karbstein
Datum: 2020.11.04
16:56:41 +01'00'

Robert Karbstein
TT.TVE 31(1)

Anlage 1

Bremswegberechnung mittels numerischem Integrationsverfahren 2. Ordnung nach Heun

