



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST
Service suisse d'enquête de sécurité SESE
Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza SISI
Swiss Transportation Safety Investigation Board STSB

Schlussbericht

der Schweizerischen

Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST

über die Entgleisung eines ICE-Zuges

vom 29. November 2017

in Basel (BS)

Reg.-Nr. 2017112902

Allgemeine Hinweise zu diesem Bericht

Dieser Bericht wurde ausschliesslich zum Zweck der Verhütung von Unfällen und schweren Vorfällen beim Betrieb von Eisenbahnen, Seilbahnen und Schiffen erstellt. Gemäss Artikel 15 des Eisenbahngesetzes (EBG, SR 742.101) vom 20. Dezember 1957 (Stand am 1. Januar 2018) sind Schuld und Haftung nicht Gegenstand der Untersuchung.

Es ist daher auch nicht Zweck dieses Berichts, Schuld- und Haftungsfragen zu klären.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Überblick	5
Untersuchung	5
Kurzdarstellung	5
Ursache	6
Sicherheitsempfehlungen und Sicherheitshinweise	6
Glossar	7
1 Sachverhalt	8
1.1 Ort des Ereignisses	8
1.2 Vorgeschichte	8
1.3 Ablauf des Ereignisses	9
1.4 Schäden	10
1.4.1 Personen	10
1.4.2 Infrastruktur	10
1.4.3 Fahrzeuge	10
1.5 Beteiligte und betroffene Personen	11
1.5.1 Bahnpersonal	11
1.5.2 Reisende	11
1.6 Beteiligte und betroffene Unternehmen	11
1.6.1 Infrastrukturbetreiberin	11
1.6.2 Eisenbahnverkehrsunternehmung	11
1.6.3 Fahrzeughalter	11
1.7 Infrastruktur	11
1.7.1 Doppelkreuzungsweiche 317	11
1.8 Fahrzeuge ICE 1	15
1.8.1 Beschreibung	15
1.8.2 Feststellung an den Fahrzeugen	17
1.9 Kommunikation	21
1.10 Auswertung der Datenaufzeichnung	22
1.10.1 Fahrdatenschreiber Zug ICE 75	22
1.10.2 Stellwerkdaten	22
1.11 Besondere Untersuchungen	22
1.11.1 Wetter, Sichtverhältnisse, Schienenzustand	22
1.11.2 Laufdynamische Simulation	22
1.12 Spurkranzschmierung	28
1.13 Dynamische Messung des Klaffmasses einer baugleichen Doppelkreuzungsweiche	29
1.14 Regelungen zum Gleisbau und fahrtechnische Prüfung von Eisenbahnfahrzeugen	30

1.14.1	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung AB-EBV	30
1.14.2	Norm EN 14363.....	30
1.14.3	R I-50007, Technischer Netzzugang – Regelung Weichenfahrten	31
1.14.4	Regelung zu technischen Spezifikationen für die Interoperabilität – Spurkranzschmierung.....	31
1.15	Weiteres.....	32
1.15.1	Messungen und Literatur-Review über das Thema Reibungskoeffizient	32
1.15.2	Lauftechnische Simulation, Entgleisung ETR 610 in Luzern.....	33
1.15.3	Reibungskoeffizient der drehgestellseitigen Gleitplatten.....	33
2	Analyse	35
2.1	Technische Aspekte	35
2.1.1	Infrastruktur	35
2.1.2	Fahrzeuge	35
2.1.3	Spurkranzschmierung.....	36
2.1.4	Laufdynamische Simulation.....	38
2.2	Ablauf der Entgleisung.....	38
2.3	Betriebliche Aspekte	39
2.4	Risikofaktoren für die Entgleisung auf einer Weiche	39
3	Schlussfolgerungen.....	40
3.1	Befunde	40
3.1.1	Technische Aspekte	40
3.1.2	Organisatorische Aspekte	41
3.1.3	Betriebliche oder prozessuale Aspekte	41
3.2	Ursachen	41
4	Sicherheitsempfehlungen, Sicherheitshinweise und seit dem Unfall getroffene Massnahmen	42
4.1	Sicherheitsempfehlungen	42
4.1.1	Schmierung der Schienenfahrkante	42
4.2	Sicherheitshinweise	43
4.2.1	Einbau von neuen Weichenzungen.....	43
4.3	Seit dem Unfall getroffene Massnahmen.....	44

Zusammenfassung

Überblick

Verkehrsmittel Eisenbahn

Beteiligte Unternehmen

Eisenbahnverkehrsunternehmen	SBB AG, Personenverkehr (SBB-P), Bern
Infrastrukturbetreiberin	SBB AG, Infrastruktur (SBB-I), Bern
Weitere Unternehmen	DB Fernverkehr AG, Frankfurt am Main (DE)

Beteiligte Fahrzeuge ICE-Triebzug 187 DB Fernverkehr AG

Ort Basel SBB (BS)

Datum und Zeit 29. November 2017, 16:59 Uhr

Untersuchung

Am 29. November 2017 um 17:45 Uhr traf die Meldung über die Entgleisung eines ICE-Zuges in Basel SBB beim Untersuchungsdienst der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) ein. Es wurde eine Untersuchung eröffnet.

Für die Untersuchung standen zur Verfügung:

- Bestandsaufnahme auf der Unfallstelle;
- Fotos;
- Untersuchung an den Fahrzeugen und Drehgestellen;
- Laufdynamische Simulation;
- Reibwertuntersuchung an den drehgestellseitigen Gleitplatten;
- Fahrdaten des Zuges;
- Statische und dynamische Messungen an der Infrastruktur;
- Stellverkaufzeichnungen;
- Messungen und Literatur-Review über das Thema Reibungskoeffizient im Kontakt Rad/Schiene;
- Gleispläne.

Kurzdarstellung

Am 29. November 2017 um 16:59 Uhr entgleisten bei der Einfahrt in den Bahnhof Basel SBB drei Zwischenwagen eines ICE-Zuges. Es wurden keine Personen verletzt. Der Sachschaden an der Infrastruktur und an den Fahrzeugen war beträchtlich.

Ursache

Die Entgleisung des ICE 75 bei der Einfahrt in den Bahnhof Basel SBB auf der versteilten Doppelkreuzungsweiche 317 ist darauf zurückzuführen, dass infolge des grossen Klaffmasses durch das Wegkippen der Stockschiene im Bereich der Weichenzungen das erste linke Rad des Wagens 9 etwa 50 cm nach der Zungenspitze auf die Zungenoberkante auflief, die Spurführung verlor und nach zwei Metern entgleiste.

Im Rahmen der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass der ungenügende Schmierzustand der Schienenfahrkanten und der Weichenzungen massgeblich zum Risiko beitragen kann.

Sicherheitsempfehlungen und Sicherheitshinweise

Mit diesem Bericht wird keine neue Sicherheitsempfehlung ausgesprochen. Es wird verwiesen auf eine mit dem Schlussbericht Reg.-Nr. 2017032201 ausgesprochene Sicherheitsempfehlung.

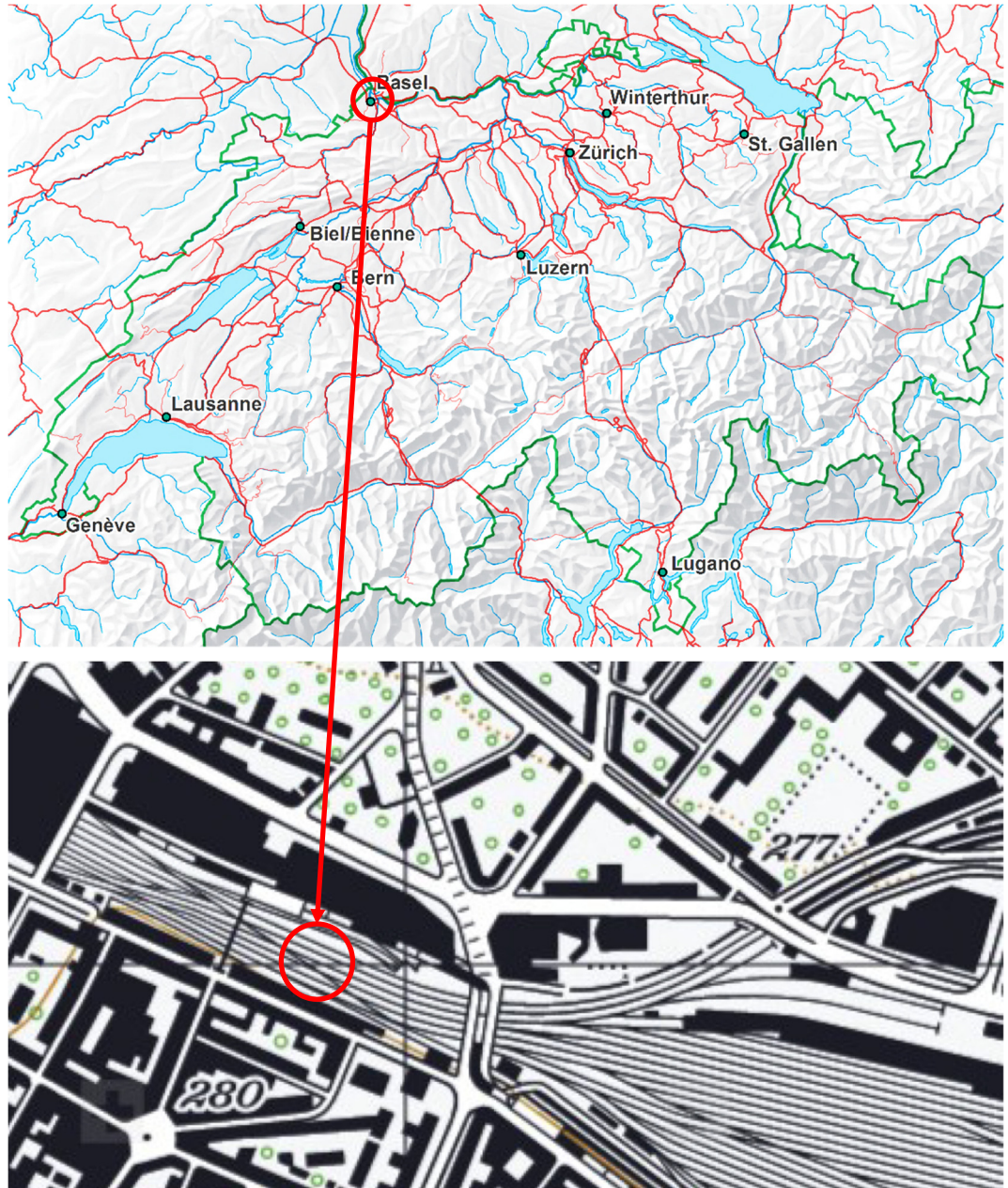
Mit diesem Bericht wird ein Sicherheitshinweis ausgesprochen.

Glossar

AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung vom 15. Dezember 1983, Stand am 1. Juli 2016 (SR 742.141.11)
Aufklettern	Hinaufdrücken eines Rades unter Reibschluss durch seitliche Spurführungskräfte
Auflaufen	Auflaufen der Spurkranzkuppe auf die Zungenoberkante
Aufsteigen	Hinauffahren eines Spurkranzes auf ein Hindernis in seinem Rollweg.
DB Systemtechnik	Kompetenzzentrum für Bahntechnik
EBV	Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung) vom 23. November 1983, Stand am 18. Oktober 2016 (SR 742.141.1)
EN 14363	Bahnanwendungen – Fahrtechnische Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen, Stand vom Oktober 2016
EN 15427	Bahnanwendungen – Behandlung der Reibung zwischen Rad und Schiene – Spurkranzschmierung, Stand vom Januar 2011. Die im diesem Bericht verwendete Terminologie für die Elemente Rad/Schiene ist in Anlage 4, Abbildung 36 aufgeführt.
EN 16028	Bahnanwendungen – Spurkranzschmierung – Prüfung der Schmierstoffe, Stand vom Februar 2013
FDV	Schweizerische Fahrdienstvorschriften (R 300.1-.15) vom 01.07.2015, Stand am 1. Juli 2016 (SR 742.173.001)
Gleitstücke	Gebildet aus Gleitplatten auf der Drehgestellwiege und Metallplatten am Wagenkasten
ORE C70	Bericht des Sachverständigenausschusses: Zusammenwirken von Fahrzeug, Oberbau und Sicherungstechnik bei der Überfahrt der Weichenzungen, Stand vom 05.1969
qR-Mass	Wert für die Flankensteilheit der Spurkränze von Eisenbahnradern
R I-50007	Regelwerk SBB, Technischer Netzzugang: Regelung Weichenfahrten Infrastruktur-Anforderung Interaktion Rad/Schiene, Stand vom 01.12.2013
R I-50151	Regelwerk SBB, Anleitung zum Gebrauch der Kontrolllehren für die Prüfung der Entgleisungssicherheit in Weichen, Stand vom 01.09.2015
R RTE 49410	Regelwerk Technik Eisenbahn, Spurkranzschmierung Eisenbahnfahrzeuge, Stand vom 20. Januar 2009
Tribometer	Gerät zum Messen von Reibung
TSI	Technische Spezifikation für die Interoperabilität
UIC 716	Maximal zulässige Abnutzungsprofile für Weichen, Stand vom 05.2004
Y/Q	Verhältnis zwischen Führungskraft und Radkraft für die Beurteilung der Wahrscheinlichkeit einer Entgleisung infolge des Aufkletterns eines Spurkranzes an der Schiene. Gemäss Norm EN 14363, Anhang B.2 auch als Entgleisungskoeffizient definiert. Grenzwert für die Sicherheit gegen Entgleisung

1 Sachverhalt

1.1 Ort des Ereignisses



Abbildungen 1 und 2: Ort des Unfalls im Bahnhof Basel SBB. (Quelle der Basiskarten: Bundesamt für Landestopografie).

1.2 Vorgeschichte

Die Zugkomposition ICE 75 fuhr am 29. November 2017 etwa um 10:07 Uhr in Hamburg Altona ab. Nach dem Halt in Basel SBB war die Weiterfahrt bis Chur geplant.

1.3 Ablauf des Ereignisses

Der ICE-Zug war mit ungefähr 500 Passagieren besetzt. Er fuhr um etwa 16:53 Uhr im Bahnhof Basel Badischer Bahnhof ab, um nach Basel SBB ins Gleis 5 zu gelangen. Bei der Einfahrt im Bahnhof Basel SBB entgleiste der neunte Wagen auf der Doppelkreuzungsweiche 317. Als Folge entgleiste danach auch der vorausrollende achte Wagen mit beiden Drehgestellen. Der nachlaufende, zehnte Wagen entgleiste mit dem ersten Drehgestell nach links. Durch die Entgleisung wurde die Zugkomposition nicht getrennt.

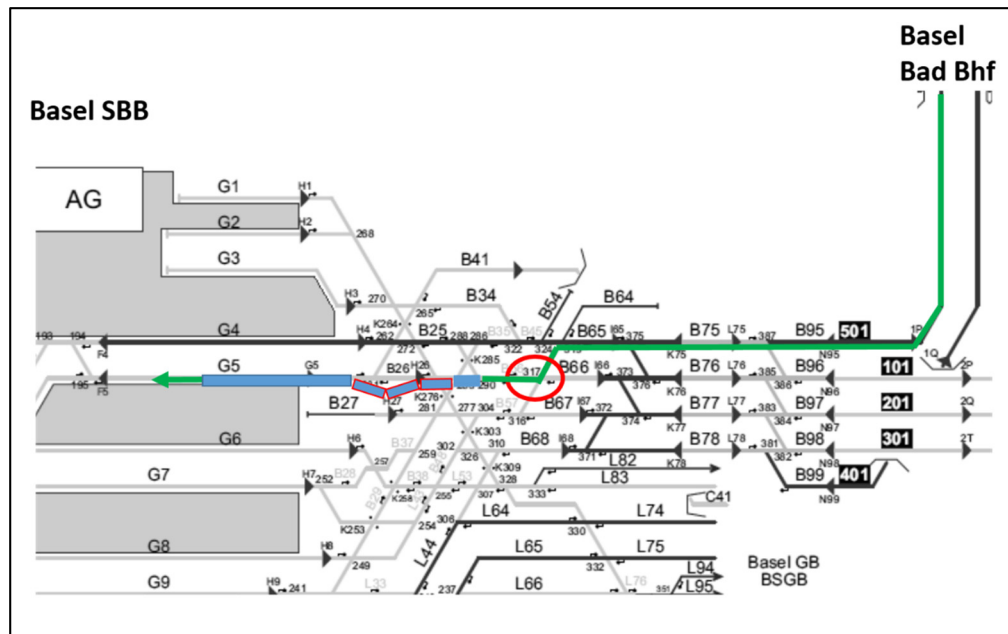


Abbildung 3: Die Fahrstrasse des ICE-Zuges 75 von Basel Badischer Bahnhof bis Basel SBB Gleis 5 ist grün eingezeichnet. Rot markiert ist die Entgleisungsstelle auf der Doppelkreuzungsweiche 317. Die blaue Markierung zeigt die Endlage des Zuges nach der Entgleisung, in der Mitte die drei entgleisten Wagen.



Abbildung 4: Endlage des Zuges nach der Entgleisung. Grüner Pfeil: Fahrtrichtung nach Gleis 5. Entgleiste Wagen Nr. 8 bis 10.

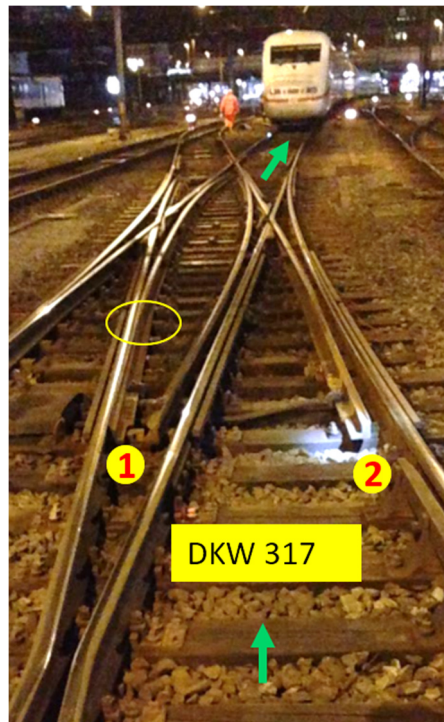


Abbildung 5: Doppelkreuzungsweiche 317.

Legende: Grüne Pfeile: Fahrstrassenrichtung Gleis 5;

Gelber Kreis: Entgleisungsstelle;

1: Weichenzunge RL;

2: Weichenzunge RR;

Die Stellung der Weiche entspricht nicht dem Zustand zum Zeitpunkt der Entgleisung.

1.4 Schäden

1.4.1 Personen

Es wurden keine Personen verletzt.

1.4.2 Infrastruktur

Im Bereich der Entgleisungsstelle wurden diverse Teile der Infrastruktur stark beschädigt.

1.4.3 Fahrzeuge

Die entgleisten Fahrzeuge wiesen beträchtlichen Sachschaden auf.

1.5 Beteiligte und betroffene Personen

1.5.1 Bahnpersonal

1.5.1.1 Lokführer

Person	Jahrgang 1984 Anstellung bei DB Fernverkehr Dienstort Frankfurt am Main (DE)
Berechtigung	Ausweis und EU-Bescheinigung vorhanden
Letzte Fähigkeitsprüfung	Periodische Prüfung im Mai 2013
Arbeitsbeginn am Ereignistag	13:41 Uhr
Arbeitszeit bis zum Ereignis	3:18 Std
Medizinische Feststellungen	Der Alkoholtest ergab 0.00 ‰.

Gestützt auf Artikel 40 der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen (VSZV; SR 742.161) vom 17. Dezember 2014 (Stand am 1. Februar 2015) machte der Lokführer gegenüber der SUST von seinem Aussageverweigerungsrecht Gebrauch.

1.5.2 Reisende

Im ICE-Zug 75 waren rund 500 Personen von der Entgleisung betroffen. Diese blieben unverletzt. Die ersten fünf Wagen befanden sich nach dem Stillstand bereits am Perron. Die Reisenden konnten den Zug durch diese Wagen verlassen.

1.6 Beteiligte und betroffene Unternehmen

1.6.1 Infrastrukturbetreiberin

SBB AG, Infrastruktur, Bern

1.6.2 Eisenbahnverkehrsunternehmung

SBB AG, Personenverkehr, Bern

1.6.3 Fahrzeughalter

DB Fernverkehr AG, Frankfurt am Main (DE)

1.7 Infrastruktur

1.7.1 Doppelkreuzungsweiche 317

1.7.1.1 Beschreibung der Doppelkreuzungsweiche 317

Die Doppelkreuzungsweiche (DKW) 317 ist eine sogenannte versteifte DKW, bei der in einem Strang der Bogenradius durch das Herzstück hindurch bis an das Weichenende verläuft. Die Spitze der Weichenzunge befindet sich 6.5 m hinter dem Beginn des Einfahrbogens mit einem Radius von 185 m.

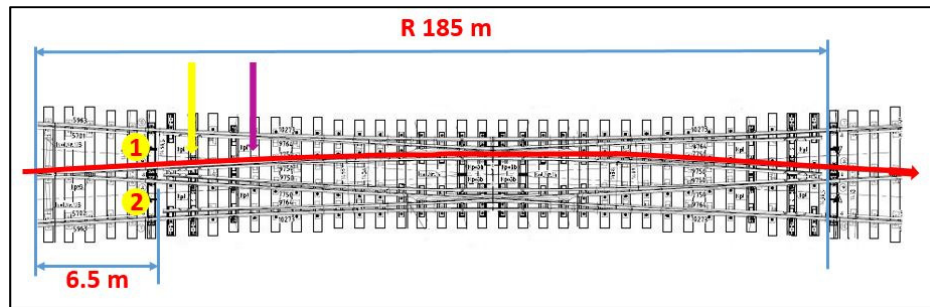


Abbildung 6: Doppelkreuzungsweiche 317.

Legende: 1: Weichenzunge RL;

2: Weichenzunge RR;

Gelber Pfeil: erste Entgleisungspuren ungefähr 50 cm hinter der Weichenspitze;

Violetter Pfeil: Abstiegsspur eines Rades zwischen Weichenzunge und Stockschiene.

Die Weichenzunge ist mit einem sogenannten Jüdel-Verschlussystem versehen. Bei diesem Verschlussystem werden die Zungen gegenseitig mit der mittig angeordneten Verschlussplatte verbunden. Eine feste Verbindung zwischen Stockschiene und Zunge besteht jedoch nicht.

Die Einhaltung des Grenzwertes für diesen Abstand wird mit der Lehre A (Abbildung 7) statisch überprüft.

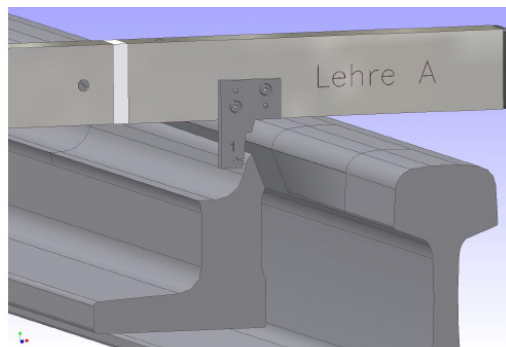


Abbildung 7: Kontrolllehre für die Entgleisungssicherheit bei Weichen

(Quelle SBB: I-50151, Anleitung zum Gebrauch der Kontrolllehren für die Prüfung der Entgleisungssicherheit in Weichen)

Wenn die Stockschiene sich unter Einwirkung von durch Spurführungskräften generierten Querkraften seitlich bewegt, kann sich zwischen Weichenzunge und Stockschiene ein horizontaler Abstand bilden. Dieser Abstand wird als «Klaffen» bezeichnet. Darunter wird der lotrechte Abstand zwischen der Zungenspitze und der Stockschiene verstanden.

Wenn die Weichenzunge an der Stockschiene anliegt, beträgt das Klaffmass¹ 0 mm (Abbildung 8). Wenn das Klaffmass kleiner als 3 mm ist, gilt die Weiche als entgleisungssicher.

¹ Das Klaffmass ist der Abstand zwischen der Weichenzunge und der Stockschiene auf der Höhe der Weichenzungenspitze (Definition: UIC-Kodex 716, Ziffer 3.2 Abbildungen 2a und 2b)

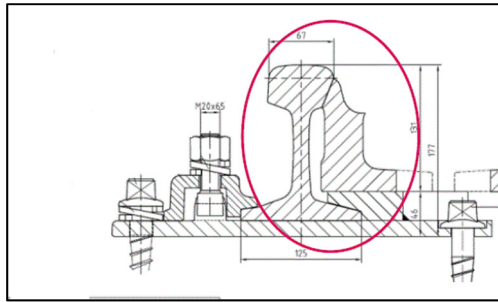


Abbildung 8: Die Weichenzunge liegt an der Stockschiene an (Klaffmass 0 mm)

Es gibt keine Vorgaben für das Klaffmass unter betrieblicher Belastung. Bis anhin wurde erfahrungsgemäss mit einem maximalen Klaffmass von 6.5 mm gerechnet.

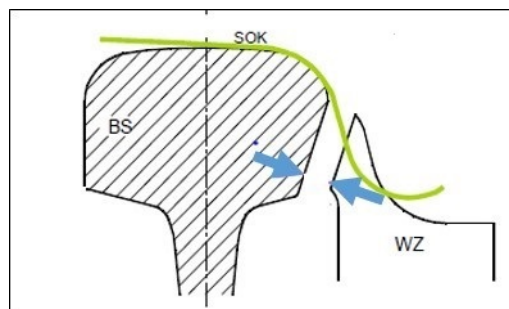


Abbildung 9: Die Weichenzunge liegt nicht an der Stockschiene an.

Legende: SOK: Schienenoberkante
BS: Stockschiene
WZ: Weichenzunge

Grün: Radprofil
Blaue Pfeile: Klaffmass

1.7.1.2 Einbau und letzte Instandhaltung

Die DKW 317 wurde im Jahr 2002 eingebaut.

Am 20. September 2017 wurden Instandhaltungsarbeiten an der DKW 317 durchgeführt. Unter anderem wurde die Weichenzunge RL ersetzt. Nach Abschluss der Arbeiten wurde die Weiche statisch vermessen und alle Masse wurden protokolliert. Alle Werte lagen innerhalb der Toleranz.

1.7.1.3 Messfahrt nach der Instandhaltung

Am 26. September 2017 wurde die Gleisgeometrie der DKW 317 mit dem selbstfahrenden Diagnosefahrzeug der SBB Infrastruktur überprüft. Alle Werte lagen innerhalb der Toleranz.

1.7.1.4 Feststellung

Bei der DKW 317 war am Profil der Stockschiene kein auffälliger Verschleiss zu erkennen. Das Weichenzungenprofil zeigte ebenfalls keine auffälligen Verschleisspuren. Die Stockschiene und die Weichenzunge wiesen keinen Schmierfilm auf.

Nach der Entgleisung wurde die Weiche statisch vermessen. Alle Werte lagen innerhalb der Toleranz.

1.7.1.4.1 Spuren

Ungefähr 50 cm nach der Zungenspitze RL (Anlage 2, Abbildung 35) wies die Zunge Auflaufspuren eines Rades über eine Distanz von ca. 1.6 m auf.

Ungefähr 2.1 m nach der Zungenspitze RL war auf der äusseren Seite der Weichenzunge eine Abrutschspur eines Rades zu sehen (Anlage 2, Abbildung 35).

An der Spitze der Weichenzunge RL war eine schwach ausgeprägte Schlagspur ersichtlich (Abbildung 11). Diese wurde vom linken Rad der Achse 2 des Wagens 9 erzeugt.

Die gegenüberliegende Weichenzunge RR (Abbildung 10) wies ebenfalls Aufstiegsspuren an der Oberkante der Zunge auf, die vom rechten Rad der ersten entgleisten Achse herrührten.

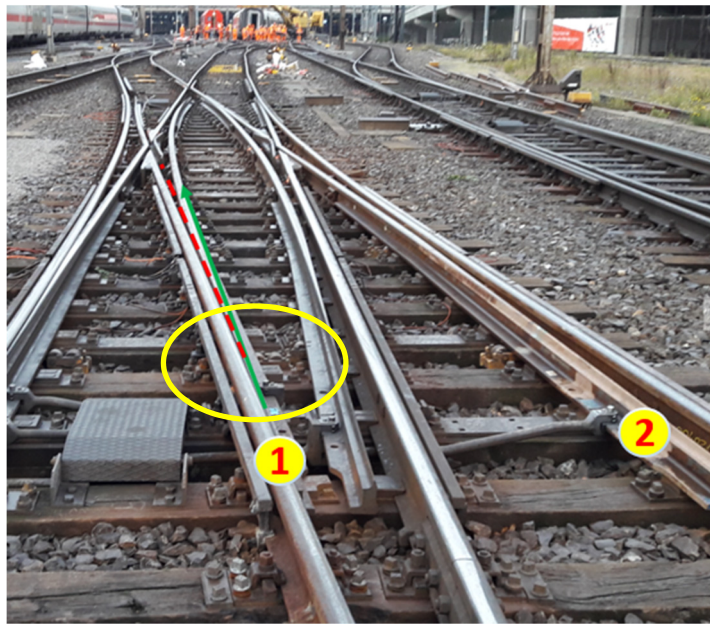


Abbildung 10: DKW 317.

Legende: 1: Weichenzunge RL
2: Weichenzunge RR
(gegenüberliegend)

Roter Strich: Entgleisungsspuren
Grüner Pfeil: normaler Fahrweg



Abbildung 11: Spitze der Weichenzunge RL mit kleiner Schlagspur. Der Schienenkopf der Stockschiene und die Weichenzunge wiesen keinen Schmierfilm auf.

Die Detailfotos der Spuren (Abbildung 10, gelber Kreis) sind in Anlage 2, Abbildung 35 vorhanden.

1.7.1.4.2 Videoaufzeichnung Weichenzunge 317

Die SBB Infrastruktur hat nach dem Unfall mit einer Hochgeschwindigkeitskamera Aufnahmen während acht Überfahrten eines baugleichen ICE-Zuges (4 Geschwindigkeitsstufen) durchgeführt.

Die Videoaufnahmen der Überfahrten zeigten in der vertikalen Richtung eine elastische Verformung der Stockschiene. Die Weichenzunge folgt dieser Bewegung verzögert bei Überfahrt des Rades. Ohne Radbelastung lag der obere Teil der Weichenzunge am Schienenkopf.

1.7.1.4.3 Einsenkungsmessung nach dem Ereignis

Am 30. November 2017 wurde durch die Firma infraMT im Auftrag der SBB Infrastruktur eine Einsenkungsmessung durchgeführt, um die Gleisgeometrie im Bereich der DKW 317 in belastetem (20 t Achslast) und unbelastetem Zustand zu überprüfen. Die Resultate bilden den Ist-Zustand zum Zeitpunkt des Unfalls ab.

Im Zungenspitzenbereich der DKW 317 betrug die Einsenkung beider Schienenstränge rund 4 mm. Die gemessenen Werte wurden als Parameter für die Simulation verwendet.

1.8 Fahrzeuge ICE 1

1.8.1 Beschreibung

1.8.1.1 Zugkomposition

Der ICE 1-Zug besteht aus zwei Triebköpfen und bis zu vierzehn Mittelwagen. Am Unfallzug waren elf Mittelwagen eingereiht.



Abbildung 12: Triebzug ICE 1 (Quelle: DB Fernverkehr)

Die Fahrzeuge sind über die Mittelpufferkupplung, welche die Zug- und Bremskräfte überträgt, verbunden. Die Wagenlänge über Kupplungsebene beträgt 26.4 m

Die Mittelwagen sind mit einem Laufdrehgestell Bauart Minden-Deutz MD 530 (Abbildung 13) ausgerüstet. Der Achsabstand beträgt 2.5 m. Das Radprofil ist vom Typ S1002.

Bei der ersten Achse des Zuges ist die Spurkranzschmierungsanlage montiert. Der ICE 1 Triebzug hat eine CH-Zulassung vor 01.01.1999. Deshalb wurden nicht alle nach heutigem Standard geltenden Typentests durchgeführt.

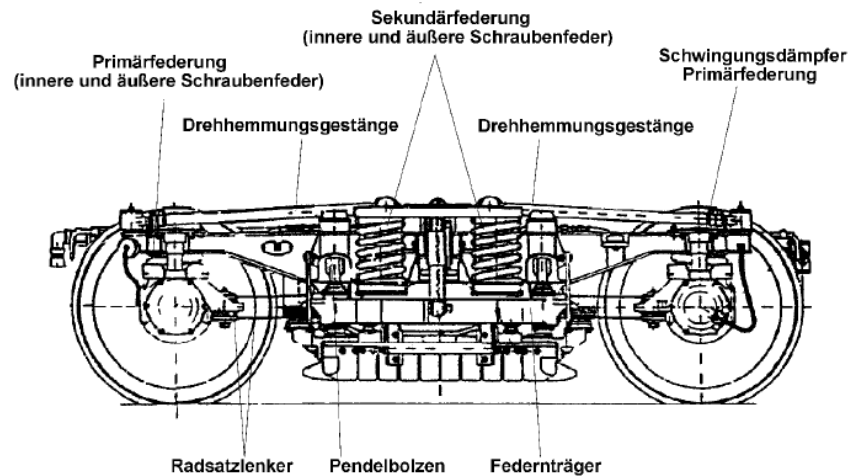


Abbildung 13: Typenzeichnung Drehgestell MD 530 (Quelle: DB Fernverkehr)

1.8.1.2 Drehgestell MD 530

Die Radsatzführung erfolgt an jedem Radsatzlager verschleissfrei über zwei übereinander eingebaute Radsatzlenker (Abbildung 14). Die Radführung ist daher relativ starr ausgeführt. Die Zahnplatten, die an den beiden Seiten der Radsatzlenker (Abbildung 15) eingebaut sind, ermöglichen eine Einstellung, die einen Schiefelauf der Radsätze verhindert.

Die Primärfederung besteht aus Schraubenfedersätzen mit parallel eingebauten hydraulischen Stossdämpfern. Die Sekundärfederung besteht aus zwei Schraubenfedersätzen.

Zur Vermeidung von instabilem Drehgestellauf bei höherer Geschwindigkeit sind die Drehgestelle mit einem mechanischen Reibdrehhemmungssystem ausgerüstet. Dazu sind drehgestellseitig Gleitplatten (siehe Ziffer 1.15.3) auf der Wiege (Abbildung 14) befestigt, die beim Ausdrehen des Drehgestells an Metallplatten am Wagenkasten reiben. Zusätzlich ist die Wiege in der Längsrichtung über vier Anlenkstangen und zwei Torsionsstangen elastisch mit dem Drehgestellrahmen verbunden. Das Ausdrehmoment zwischen Drehgestell und Wagenkasten wird durch den Reibwert der Gleitplatte bestimmt.

Im geraden Gleis beträgt das Wiegenquerspiel +/- 60 mm. Im Gleisbogen wird das Wiegenquerspiel gleisbogenabhängig durch das am Unterboden des Wagenkastens angebrachte Begrenzungsstück und durch die angeordnete Anschlagssrolle am Drehgestellrahmen kinematisch gesteuert.

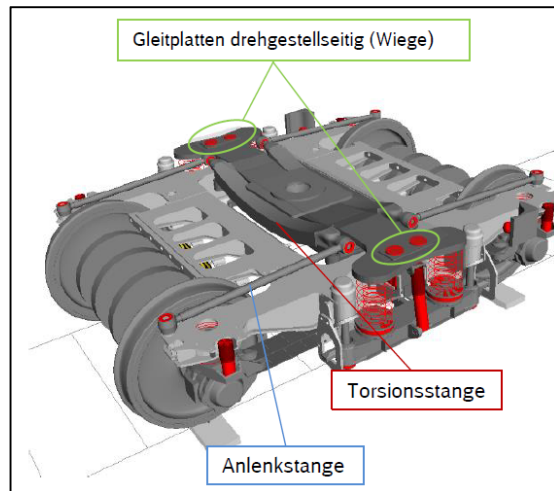


Abbildung 14: Modellierung des Drehgestells
(Quelle: DB Systemtechnik)

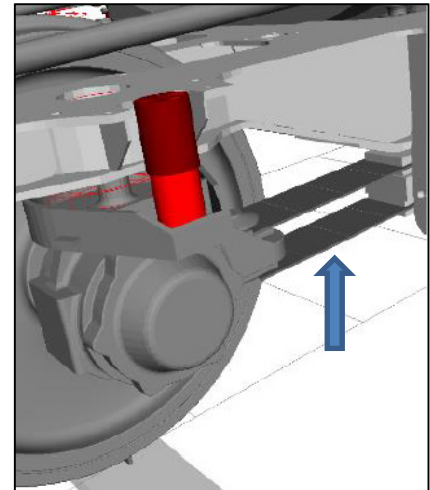


Abbildung 15: Detail Radsatzlenker (blauer Pfeil) mit Zahnplatten

1.8.2 Feststellung an den Fahrzeugen

1.8.2.1 Generelles

Zum besseren Verständnis wurden in diesem Bericht die Wagenachsen in Fahrtrichtung des ICE-Zuges nummeriert (Anlage 1, Abbildung 34). Aus diesem Grund sind Abweichungen von der Achsennummerierung in den Wartungsunterlagen möglich.

Alle Radsatzprofile wurden mittels eines Laser-Messgerätes erfasst.

1.8.2.2 Spurkranzschmierung

Obwohl die Behälter der Spurkranzschmieranlage der beiden Triebköpfe komplett mit Spurkranzfett gefüllt waren, trat bei Betätigung der Schmieranlage kein Fett aus den Spurkranzschmierdüsen aus. Alle Düsen waren verstopft. Die Spurkränze aller Fahrzeuge waren trocken.



Abbildung 16: Trockene Spurkranzschmierdüse. Roter Kreis: Spurkranzschmierdüse

1.8.2.3 Wagen 7

Der Wagen 7 ist nicht entgleist.

Die Achsen 3 und 4 wiesen eine starke Abnutzung im Bereich der Spurkranzkuppe auf. Das Verschleissbild entsprach demjenigen der Achse 1 des Wagens 9 (Abbildung 19). Das qR-Mass betrug 7.7. Seit der letzten Reprofilierung haben diese Achsen ca. 258 000 km zurückgelegt. Die Stahlgüte der Räder ist ER 9.

1.8.2.4 Wagen 8

Der Wagen 8 ist mit beiden Drehgestellen entgleist.

Alle vier Achsen wurden in der Nacht vom 28 auf den 29.11.2017 ausgetauscht. Daher waren alle Radprofile neu. Die Stahlgüte der Räder ist C64M.

1.8.2.5 Wagen 9

Der Wagen 9 ist mit beiden Drehgestellen entgleist.

1.8.2.5.1 Drehgestell 8885, vorderes, erstentgleistes Drehgestell

1.8.2.5.1.1 Radsätze

Die Laufleistung der Radsätze 1 betrug seit der Reprofilierung ca. 258 000 km. Der Radsatz 1 war verbogen. Dies ist als Folgeschaden zu betrachten.

Obwohl das qR-Mass den zulässigen Minimalwert von 6.5 mm nicht unterschritt, wiesen das linke und rechte Radprofil von Radsatz 1 im Bereich der Spurkranzkuppe eine starke Abnutzung (Abbildung 17) auf. Alle Räder wiesen keinen Hohl- lauf und fast keine seitlichen Auswölzungen auf. Der Laufflächenverschleiss war bei allen Rädern sehr gering.

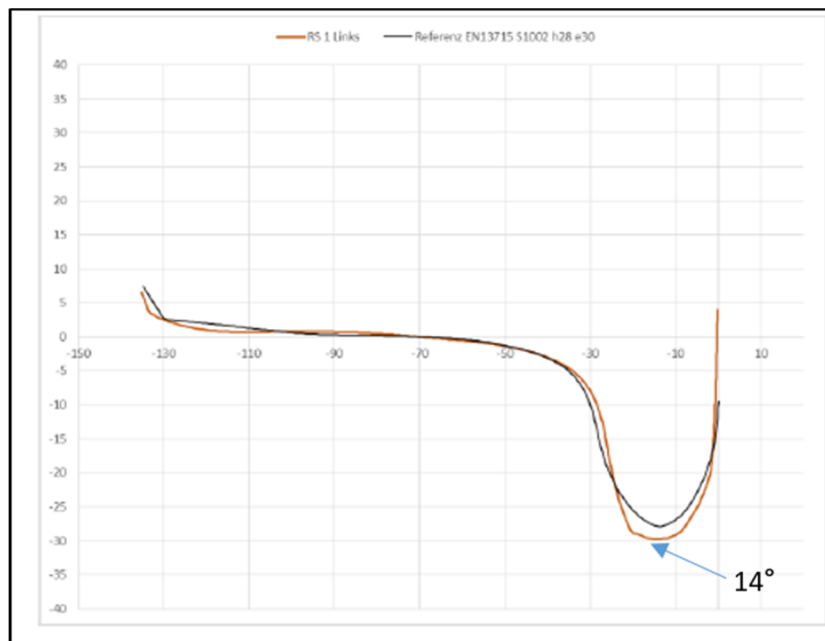


Abbildung 17: Radprofil Achse 1 links

Legende: Schwarz: neues Profil S1002

Braun: Verschlissenes Profil Achse 1, linkes Rad, Radprofilwinkel im Kontaktpunkt auf der Zunge 14 (erfasst durch Laserprofil-Messgerät Calipri)

Radprofil Achse 1 (Stahlgüte ER9)

Ausw [mm]	b [mm]	Hohl [mm]	qR [mm]	Sd [mm]	Sh [mm]
1,39 mm	135,57 mm	0,00 mm	7,38 mm	28,46 mm	29,76 mm
0,26 mm	134,25 mm	0,00 mm	7,44 mm	28,83 mm	29,61 mm

Radprofil Achse 2 (Stahlgüte ER8)

2,48 mm	136,75 mm	0,00 mm	7,87 mm	27,95 mm	28,31 mm
0,30 mm	135,00 mm	0,00 mm	9,42 mm	29,66 mm	28,26 mm

Tabelle 1: Tabelle der Spurkranzmasse Achse 1 und 2 (in den beiden Tabellen sind die Werte für die Räder links (in Fahrtrichtung betrachtet) jeweils oben und diejenigen für die Räder rechts unten eingetragen).

Das linke Rad der Achse 1 wies eine ähnliche Abnutzung auf wie das rechte im Bereich der Spurkranzkuppe (Abbildung 18).

1.8.2.5.1.2 Achse 1, Spuren

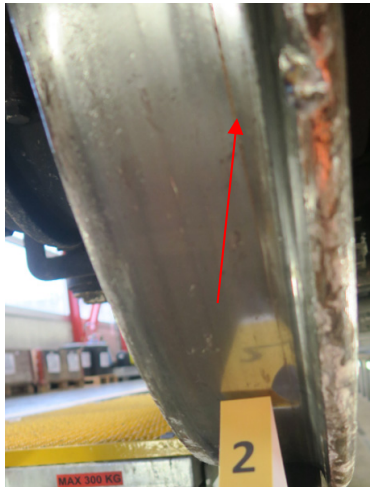


Abbildung 18: Achse 1, Rad rechts: Scharfkantige Spurkranzkuppe mit qR-Mass 7.44 mm; Spuren auf der Lauffläche des Rades, Länge 1.6 m, hinterlassen von der Weichenzunge RR (Abbildung 10).



Abbildung 19: Achse 1, Rad Links, scharfkantige Spurkranzkuppe, qR-Mass 7.38 mm (zuerst entgleistes Rad).



Abbildung 20: Achse1, Rad links; Abrutschspur auf der inneren Seite des Rades, herrührend davon, als das Rad zwischen Stockschiene und Weichenzunge RL wieder abgerutscht ist.

1.8.2.5.1.3 Achse 2, Spuren



Abbildung 21: Achse 2, Rad links; Spurkranz mit Anschlagspur (hinterlassen von der Spitze der Weichenzunge RL)

1.8.2.5.1.4 Primärfederung

Alle Spiralfedern wurden auf einem Prüfstand kontrolliert. Alle gemessenen Werte lagen innerhalb der Toleranz. Alle noch intakten Stossdämpfer wurden auf einem Prüfstand kontrolliert. Alle gemessenen Werte lagen innerhalb der Toleranz.

Die resultierenden Kennlinien wurden für die Simulation übernommen.

1.8.2.5.1.5 Sekundärfederung

Alle Spiralfedern wurden auf einem Prüfstand kontrolliert. Alle gemessenen Werte lagen innerhalb der Toleranz.

Alle noch intakten Stossdämpfer wurden auf einem Prüfstand kontrolliert. Alle gemessenen Werte lagen innerhalb der Toleranz.

Die resultierenden Kennlinien wurden für die Simulation übernommen.

1.8.2.5.1.6 Radsatzlenker

Die Position der Zahnplatten der vier Federblatt-Radsatzlenker wurde nach der Demontage visuell überprüft. Ein Montagefehler war nicht ersichtlich.

Der rechte Federblatt-Radsatzlenker der Achse 2 (Abbildung 15) war verbogen (eine Folge der Entgleisung).

1.8.2.5.2 Drehgestell 8890, hinteres Drehgestell

1.8.2.5.2.1 Radsätze

Die Radsätze 3 und 4 wurde am 24. November 2017 reprofiliert. Die Laufleistung seit der Reprofilierung betrug 6193 km. Daher entspricht das qR-Mass dem Neuzustand.

Radprofil Achse 3 (Stahlgüte ER8)

Ausw [mm]	b [mm]	Hohl [mm]	qR [mm]	Sd [mm]	Sh [mm]
0,82 mm	135,58 mm	0,00 mm	10,59 mm	31,47 mm	28,01 mm
0,00 mm	134,49 mm	0,00 mm	10,35 mm	31,64 mm	28,02 mm

Radprofil Achse 4 (Stahlgüte ER8)

0,87 mm	135,73 mm	0,00 mm	10,31 mm	31,45 mm	27,71 mm
0,00 mm	134,75 mm	0,00 mm	10,33 mm	31,17 mm	27,92 mm

Tabelle 2: Tabelle der Spurkranzmasse Achse 3 und 4 (in den beiden Tabellen sind die Werte für die Räder links (in Fahrtrichtung betrachtet) jeweils oben und diejenigen für die Räder rechts unten eingetragen)

1.8.2.5.2.2 Primärfederung

Alle Spiralfedern wurden auf einem Prüfstand kontrolliert. Alle gemessenen Werte lagen innerhalb der Toleranz.

Alle noch intakten Stossdämpfer wurden auf einem Prüfstand kontrolliert. Alle gemessenen Werte lagen innerhalb der Toleranz.

Die resultierenden Kennlinien wurden für die Simulation übernommen.

1.8.2.5.2.3 Sekundärfederung

Alle Spiralfedern wurden auf einem Prüfstand kontrolliert. Alle gemessenen Werte lagen innerhalb der Toleranz.

Alle noch intakten Stossdämpfer wurden auf einem Prüfstand kontrolliert. Alle gemessenen Werte lagen innerhalb der Toleranz.

Die resultierenden Kennlinien wurden für die Simulation übernommen.

1.8.2.5.2.4 Radsatzlenker

Die Position der Zahnplatten der vier Federblatt-Radsatzlenker wurde nach der Demontage visuell überprüft. Ein Montagefehler war nicht ersichtlich.

1.8.2.6 Wagen 10

Das erste Drehgestell (8857) ist mit beiden Achsen entgleist. Das qR-Mass der entgleisten Räder liegt zwischen 9.68 mm und 10.3 mm. Die Stahlgüte der Räder ist ER 9. Der Kilometerstand seit der letzte Reprofilierung betrug ca. 264 000 km.

1.9 Kommunikation

Nicht relevant.

1.10 Auswertung der Datenaufzeichnung

1.10.1 Fahrdatenschreiber Zug ICE 75

Zum Zeitpunkt der Entgleisung auf der Doppelkreuzungsweiche 317 war der Zug mit einer Geschwindigkeit von 31 km/h unterwegs.

1.10.2 Stellwerkdaten

Die Stellwerkprotokolle wurden ausgewertet. Um 16:58:56 Uhr wurde die Störung «Doppelkreuzungsweiche 317b aufgeschnitten» angezeigt.

Die Sicherungsanlage funktionierte bis zur Entgleisung störungsfrei und ohne Auffälligkeiten. Sie hatte keinen Einfluss auf den Ereignisablauf.

1.11 Besondere Untersuchungen

1.11.1 Wetter, Sichtverhältnisse, Schienenzustand

Trocken, Temperatur ungefähr 2 °C, Schienen trocken.

1.11.2 Laufdynamische Simulation

1.11.2.1 Definition der Entgleisungssicherheit – Koeffizient Y/Q

Die Entgleisungssicherheit kann als gewährleistet angesehen werden, wenn das Verhältnis von Führungskraft Y zu der gleichzeitig vorhandenen Radkraft Q kleiner als der Grenzwert von 1.2 bleibt (Anlage 3, Abbildung 36), der durch die Grösse des Reibungskoeffizienten μ zwischen Spurkranzflanke und Schienenfahrkante und des Neigungswinkels der Spurkranzflanke bestimmt wird (Abbildung 22).

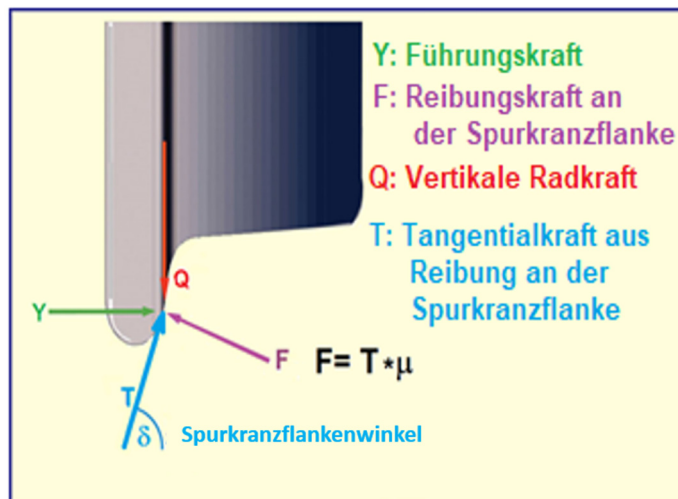


Abbildung 22: Kräfte an der Spurkranzflanke (vereinfachte Darstellung EN 14363)

1.11.2.2 Simulationen

Die DB Systemtechnik wurde beauftragt, laufdynamische Simulationen durchzuführen und ausgehend davon:

- die Rad/Schiene-Kräfte bezüglich der Einhaltung der Grenzwerte zu bewerten,
- die Tendenz und Größenordnung hinsichtlich der Radanhebung infolge Aufkletterns zu bestimmen und

- die Interaktion Rad/Schiene unter Berücksichtigung der realen Fahrzeugparameter und der realen Radprofile aufzuzeigen.

Dazu wurden verschiedene Berechnungen zur Simulation der Weichendurchfahrt mit den folgenden Randbedingungen durchgeführt:

- Erhöhung des Klaffmasses zwischen Zunge und Stockschiene;
- nomineller und erhöhter Reibwert zwischen Rad und Schiene;
- nominelles und erhöhtes Ausdrehmoment zwischen Wagenkasten und Drehgestell;
- Durchfahrt der Entgleisungsstelle mit neuem und verschlissenem Radprofil.

Für die Simulation wurden die beiden vollständig entgleisten Wagen 8 und 9 mit der Mehrkörpersimulationssoftware SIMPACK 2018.1 modelliert.

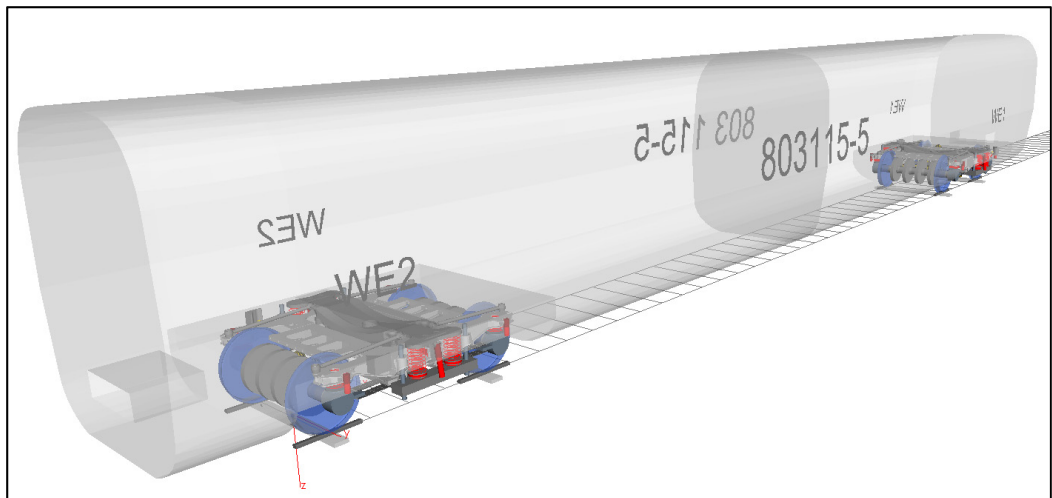


Abbildung 23: Modellierung Wagen und Drehgestelle

1.11.2.3 Randbedingungen für den Rad/Schiene-Kontakt

1.11.2.3.1 Reibwert

Zum Zeitpunkt der Entgleisung war die Schiene trocken. Die den Kraftschluss zwischen Rad und Schiene beschreibende Zustandsgrösse ist der Reibwert. Dieser wurde mit dem Wert 0.4 angenommen. Messungen haben gezeigt, dass auch höhere Werte für die trockene Schiene möglich sind. Daher wurde zusätzlich mit dem höheren Reibwert von 0.5 gerechnet, um die Sensitivität des Reibwerts auf das Entgleisungsrisiko zu untersuchen.

1.11.2.3.2 Radprofil

Neben dem Reibwert wirkt sich die Profilform der beiden Kontaktpartner Rad und Schiene massgeblich auf die Spurführung aus. In der Simulation wurden für beide Wagen 8 und 9 die realen Radprofile verwendet.

1.11.2.3.3 Schienenprofil

Da das Profil der Stockschiene keinen Verschleiss aufwies, wurde das Nennprofil der Schiene 54E2 (SBB IV) für die Simulation verwendet.

1.11.2.4 Aufbau des Simulationsmodells mit elastischem Körper der Weichenzunge und der Stockschiene

Im Simulationsmodell wurde die halbe Zunge als vollelastischer Körper mit sechs Freiheitsgraden bis zur festen Einspannung im Doppelherzstück eingebunden. Die

vertikalen Anschläge zwischen Gleitstuhl und Zunge sowie die lateralen Anschläge zwischen Zunge und Stockschiene wurden als reibungsbehaftete Anschläge berücksichtigt.

Für die Reibwerte der Anschlagflächen lagen keine Daten vor, daher wurden Annahmen auf Basis der Norm DIN EN 1993 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – getroffen. Bei dem lateralen Anschlag wurde von einem ungeschmierten (Reibwert 0.4) Kontakt zwischen Stockschiene und Weichenzunge ausgegangen. Beim vertikalen Anschlag wurde ein geringerer Reibwert von 0.25 angesetzt.

Die Spurweite basiert auf den Ergebnissen der Gleislagemessungen vom 10. Januar 2018. Für die simulierte Strecke wurde eine konstante Spurweite von 1442 mm verwendet.

Im Ausgangszustand liegt die Weichenzunge direkt an der Stockschiene an, das Klaffmass ist somit 0 mm.

In Rahmen der Simulation wurden Sensitivitätsrechnungen mit unterschiedlichen Randbedingungen durchgeführt, mit dem Ziel, die einzelnen Grössen hinsichtlich ihres Einflusses auf das Entgleisungsrisiko zu bewerten. Dazu wurde für verschiedene Randbedingungen das Zungenklaffen schrittweise erhöht, bis es zur Entgleisung (keine Spurführung) kam. Für die Simulation wurde das linke Rad des ersten vorlaufenden Radsatzes ausgewertet.

Zusätzlich wurde die Berührgeometrie Rad–Weichenzunge auf Basis von ORE C70 (Zusammenwirken von Fahrzeug, Oberbau und Sicherungstechnik bei der Überfahrt der Weichenzungen) rein geometrisch untersucht.

1.11.2.5 Ausgangslage – Varianten

Bei der Simulation wurden 12 Varianten berechnet, 6 davon wurden im Bericht der DB-Systemtechnik AG beschrieben. Nachfolgend werden daraus nur die relevanten Varianten aufgeführt.

Die Variante 0 wurde mit nominellen Werten für die Reibwerte zwischen Rad und Schiene sowie der Gleitstücke gerechnet. Der Reibwert von 0.4 zwischen Rad und Schiene gilt für trockene Bedingungen. Für den Reibwert der Gleitstücke (Ausdrehwiderstand zwischen Wagenkasten und Drehgestell) wurde ein Wert von 0.18 verwendet. Das Klaffmass von 3 mm beruht auf Auswertungen der Videoaufzeichnungen und von Bildern nach dem Unfall.

Die Variante 1 (Klaffen 11 mm) wurde mit nominellen Reibwerten für die trockene Schiene von 0.4 und 0.18 für die Gleitstücke gerechnet.

Dagegen wurden bei der Variante 3 (Klaffen 10 mm) die erhöhten Reibwerte von 0.5 zwischen Rad und Schiene und 0.26 für die Gleitstücke verwendet.

Die Variante 5 (Klaffen 12 mm) umfasst eine Simulation mit einem neuen Radprofil.

1.11.2.5.1 Ergebnisse Variante 0

Die höchsten Radführungskräfte Y treten ca. 6 m nach dem Bogenanfang am Radsatz 1 auf. Dies ist dahingehend kritisch, dass im Bogen vor der Weichenzunge die Weichenzunge ca. 6.5 m nach Bogenanfang beginnt und dadurch die höchsten Y -Kräfte im Bereich der Weichenzungenspitze wirken.

Der Entgleisungskoeffizient Y/Q hat mit 1.18 sein Maximum ca. 1.2 m nach Zungenanfang erreicht und liegt damit geringfügig unter dem Grenzwert von 1.2.

Die höchste Radanhebung (Dz) mit 2.4 mm tritt an den Rädern des Radsatzes 1 auf. Die Norm EN 14363 gibt einen Grenzwert von 5 mm vor, der hier nicht überschritten wurde.

Gemäss Abbildung 24 liegt der Kontaktpunkt beim Erstkontakt des Rades mit der Zunge im oberen Endbereich der Spurkranzflanke mit einem Radprofilwinkel von 60° . Nach ca. 1.5 m hinter dem Zungenanfang wandert der Kontaktpunkt wieder in Richtung Hohlkehle/Lauffläche mit einem Profilwinkel von $\geq 70^\circ$.

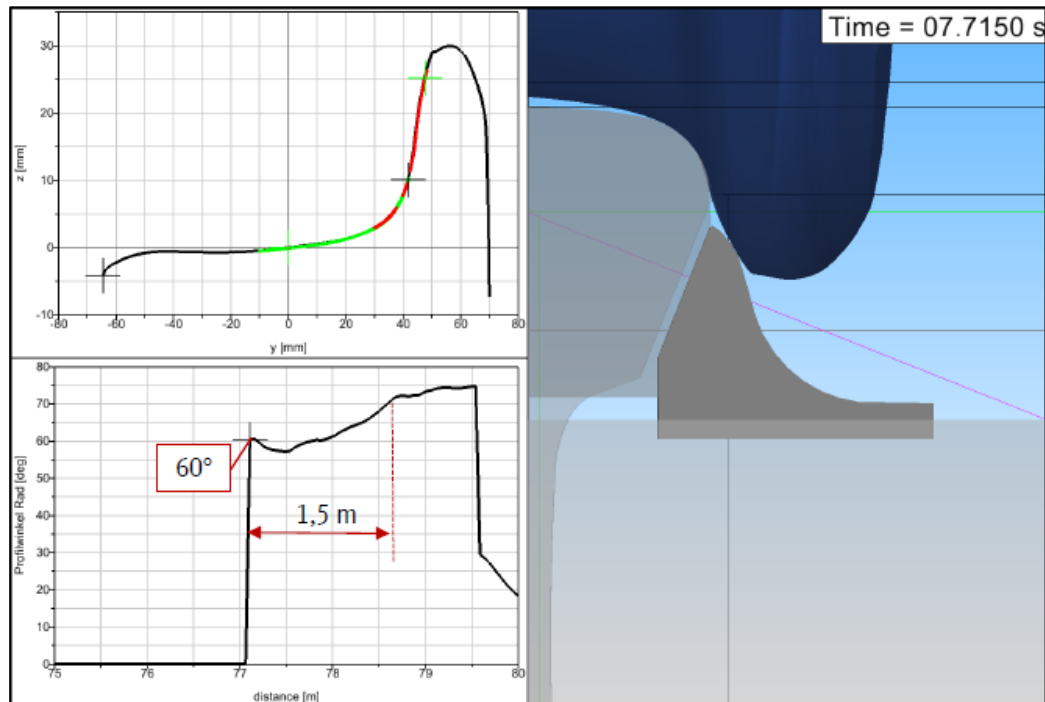


Abbildung 24: Auszug aus der Simulation: Variante 0: verschlissenes Radprofil; Reibwert Rad/Schienenfahrkante 0.4; Reibwert Gleitstücke 0.18; Klaffmass 3 mm.

1.11.2.5.2 Ergebnisse Variante 1

Auch bei der Variante 1 treten die höchsten Querkraften Y zwischen Rad und Schiene am Weichenzungenanfang auf. Nach dem Auffahren auf die Weichenzunge kommt es bei Variante 1 zur Entgleisung des Rades, erkennbar in einer Abnahme der Querkraft Y und deutlicher Zunahme der Radanhebung um 17 mm, die damit den Grenzwert von 5 mm bei Weitem überschreitet.

Die Auswertung der Kontaktpunktlage auf dem linken Rad des Radsatzes 1 (Abbildung 25) ergibt bei einem Klaffen der Zunge von 11 mm, dass das Rad oberhalb der Braue angefahren wird. Im Kontaktpunkt oberhalb der Braue liegt der Profilwinkel auf dem Rad 12 bei 5° . Ausgehend von diesem Punkt ist der maximale Profilwinkel bis zur Spurkranzkuppe 14° , wodurch eine Spurführung des Rades nicht mehr vorhanden und eine Entgleisung die Folge ist.

Nach ca. 2 m klettert das Rad zwischen Zunge und Stockschiene ab.

Der berechnete Entgleiskoeffizient steigt maximal auf 0.9 an. Er liegt unterhalb des Grenzwertes von 1.2 im unkritischen Bereich.

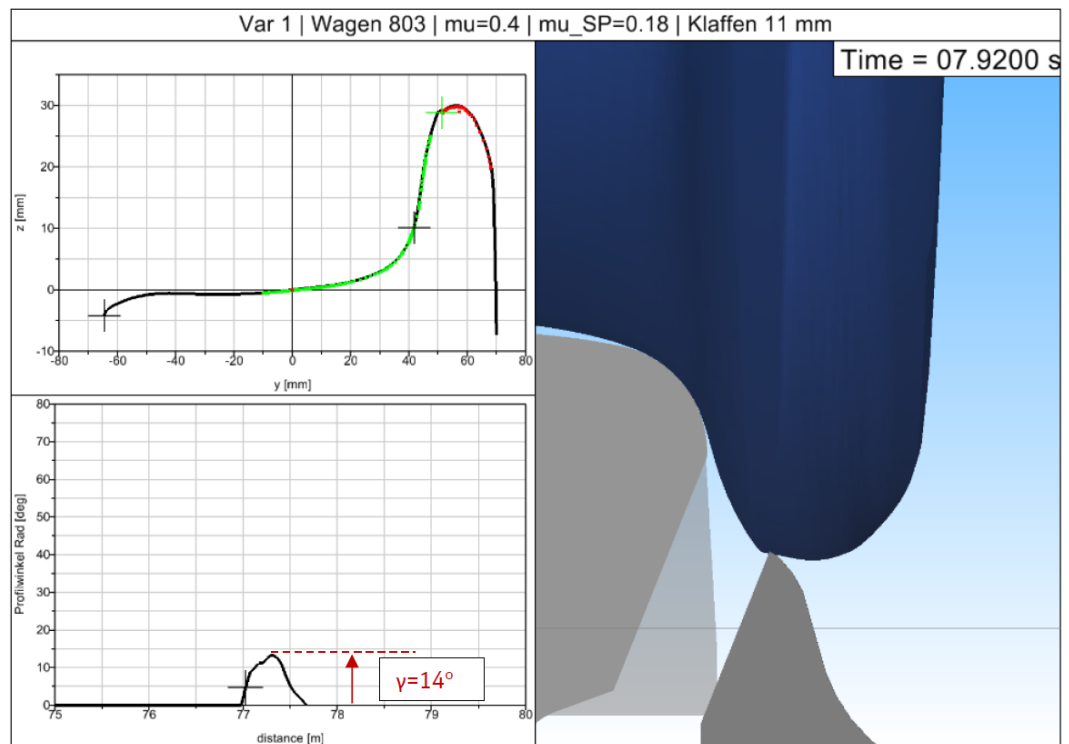


Abbildung 25: Auszug aus der Simulation: Variante 1: verschlissenes Radprofil; Reibwert Rad/Schienenfahrkante 0.4; Reibwert Gleitstücke 0.18; Klaffmass 11 mm.

1.11.2.5.3 Ergebnisse Variante 3

Im Vergleich zur Variante 1 sind die Querkräfte Y mit 60 kN bei der Variante 3, bedingt durch das höhere Ausdrehmoment (Reibwert Gleitstücke 0.26 anstatt 0.18), um fast 10 kN größer. Das Klaffmass der Zunge, bei dem es zu einer Entgleisung kommt, ist mit 10 mm gegenüber Variante 1 mit 11 mm etwas geringer. Verglichen mit Variante 1 hebt das linke Rad bei Variante 3 mit 18 mm ähnlich hoch ab. Allerdings bewirkt das erhöhte Ausdrehmoment, dass der Entgleisungskoeffizient infolge einer schnelleren Radentlastung beim Abklettern zwischen Zunge und Stockschiene sprunghaft ansteigt. Das Rad klettert auch hier, ca. 2 m nach Zungenanfang, ab.

Die Kontaktpunktlage und der Radprofilwinkel zeigen, dass bei der untersuchten Profilverpaarung der unverschlissenen Zunge mit dem verschlissenen Radprofil ab 10 mm Zungenklaffen keine sichere Spurführung durch die Weichenzunge gewährleistet ist (Abbildung 26).

Bei 10 mm Zungenklaffen beträgt der Radprofilwinkel im Kontaktpunkt auf der Zunge beim Auflaufen maximal 14 °.

Im Gegensatz dazu erfolgt das Auflaufen des ersten linken Rades auf die 9 mm klaffende Zunge unterhalb der Braue am Spurkranz bei einem Radprofilwinkel von 40 °.

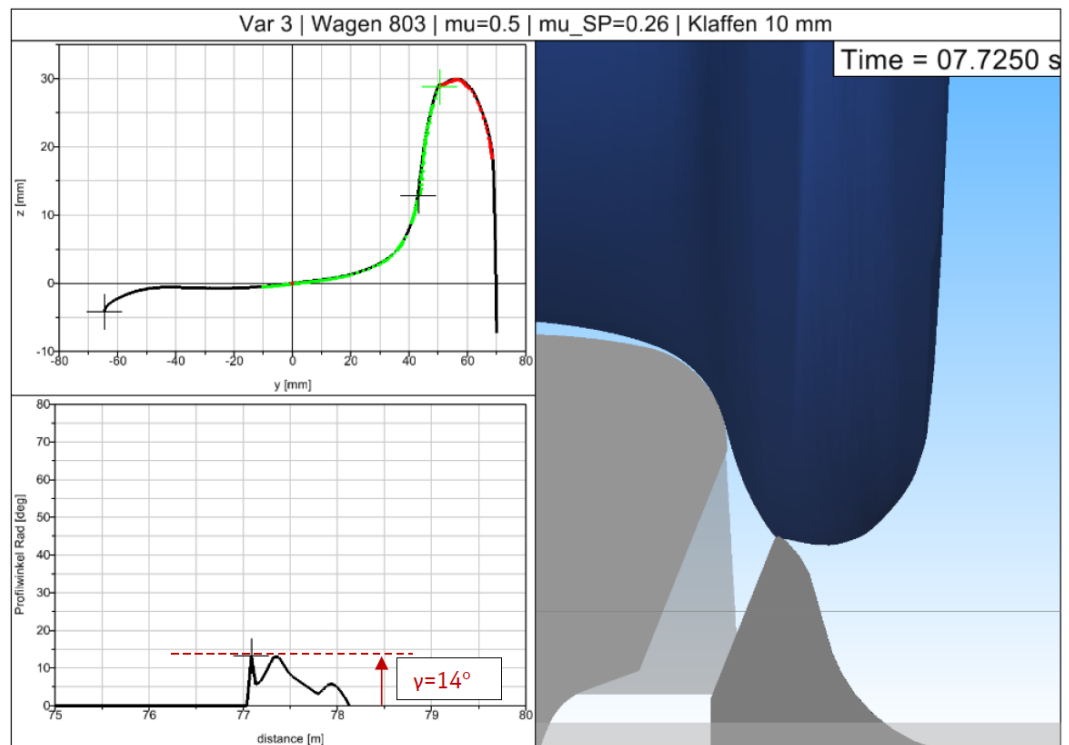


Abbildung 26: Auszug aus der Simulation: Variante 3: verschlissenes Radprofil; Reibwert Rad/Schienenfahrkante 0.5; Reibwert Gleitstücke 0.26; Klaffmass 10 mm.

1.11.2.5.4 Ergebnisse Variante 5

Bei einem Klaffmass ab 12 mm kommt es auch bei neuem Radprofil zu einer Entgleisung. Aufgrund des grösseren qR-Masses ist der Profiwinkel im Kontaktpunkt (33°) beim Auffahren auf die Zunge im Vergleich zum Verschleissprofil grösser.

Die Querkräfte zwischen Rad und Schiene zeigen einen ähnlichen Verlauf wie bei den anderen Varianten mit Radverschleissprofil. Unterschiede sind dagegen beim Entgleisungskoeffizienten und noch deutlicher bei der Radanhebung zu erkennen. Im Vergleich steigt das Rad mit einem neuen Radprofil nicht so schnell auf und gleitet erst später, nach 4.6 m, zwischen Zungen- und Stockschiene ab.

Bei 11 mm Zungenklaffen ist beim Erstkontakt zwischen Rad und Zunge der Winkel ca. 35° . In der Folge entgleist das Rad nicht und die Zunge wird durch das Rad in Richtung der Stockschiene gedrückt (Abbildung 27).

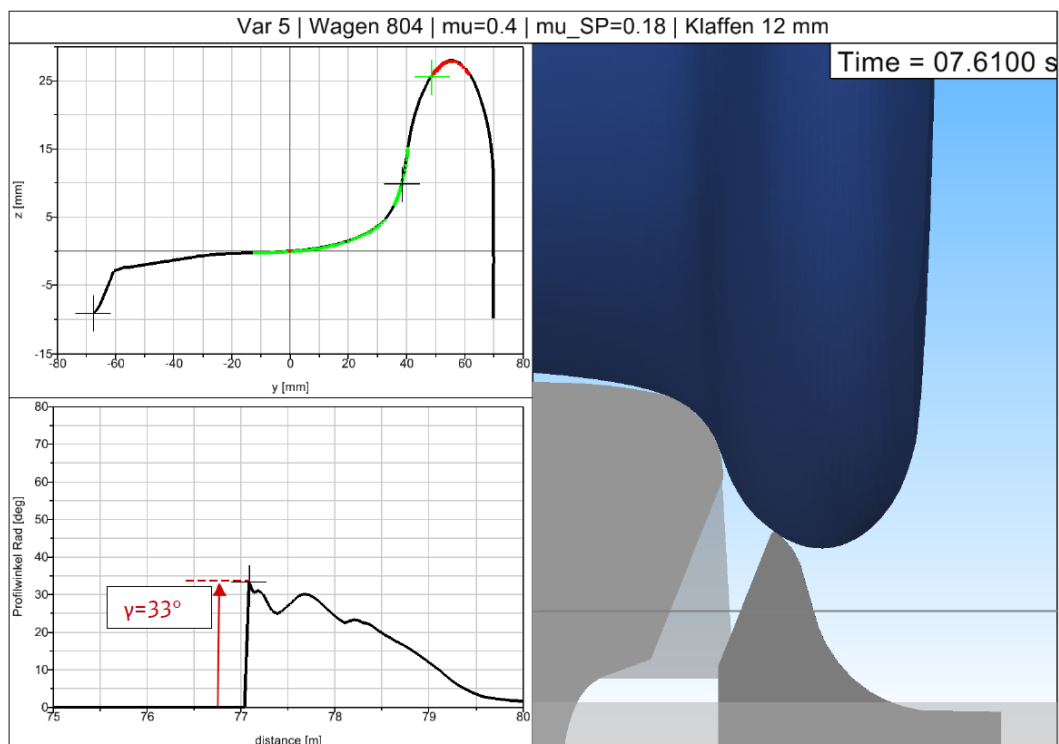


Abbildung 27: Auszug aus der Simulation: Variante 5: neues Radprofil; Reibwert Rad/Schienenfahrkante 0.4; Reibwert Gleitstücke 0.18; Klaffmass 12 mm.

1.11.2.5.5 Zusammenfassung der verschiedenen Varianten

In der Simulation wurden verschiedene Varianten mit unterschiedlichen Randbedingungen berechnet. In der nachstehenden Tabelle 3 wird nur eine Zusammenfassung der wichtigsten Varianten aufgeführt.

Variante	Reibwert Rad/Schiene [-]	Reibwert Gleitstücke [-]	Klaffmass [mm]	Radprofil	Entgleist in der Simula- tion
0	0.4	0.18	3	Verschlissen	Nein
1	0.4	0.18	11	Verschlissen	Ja
3	0.5	0.26	10	Verschlissen	Ja
5	0.4	0.18	12	Neu	Ja

Tabelle 3: Tabelle der Varianten mit den unterschiedlichen Randbedingungen.

1.12 Spurkranzschmierung

Um den Reibwert (μ) Spurkranzflanke/Schienenfahrkante für den gesamten Zug gering zu halten, hat die Spurkranzschmieranlage des Fahrzeugs sicherzustellen, dass eine geeignete Menge Schmierstoff an die Spurkranzflanke der Räder definierter Radsätze gelangt und über diese an die Fahrkante der Schiene übertragen wird.

Die Abbildung 37 in der Anlage 4 enthält die Terminologie der Bereiche der Rad- und Schienenprofile, welche mittels Schmierung die Entgleisungssicherheit gewährleisten müssen.

Aufgaben der Spurkranzschmierung im vorstehenden Zusammenhang sind:

- Verminderung der Reibungskräfte zwischen Spurkranzflanke und Schienenflanke;
- Verschleissminderung an Spurkranz und Schiene;
- Erhöhung der Entgleisungssicherheit (erschwert das Aufklettern des Rades).

Bei Fahrten auf dem Schweizer Normalspurnetz muss das Spurkranzschmierungssystem zwischen 10 km/h und 105 km/h aktiv sein (siehe Kapitel 1.14.2.4, RTE 49410 Spurkranzschmierung Eisenbahnfahrzeuge Normalspur).



Abbildung 28: Beispiel einer Spurkranzschmierdüse



Abbildung 29: Schmierfilm an der Spurkranzflanke



Abbildung 30: Beispiel eines auf die Schienenfahrkante übertragenen Schmierfilms. In der Mitte; Daumenabdruck zur Kontrolle des vorhandenen Schmierfilms.

1.13 Dynamische Messung des Klaffmasses einer baugleichen Doppelkreuzungsweiche

In Zusammenhang mit der SUST-Untersuchung über die Entgleisung von einem Eurocity-Zug Typ ETR 610 in Luzern am 22. März 2017 auf einer typengleichen Doppelkreuzungsweiche wurden durch die SBB-Infrastruktur verschiedene Messungen des Klaffmasses unter dynamischer Belastung durchgeführt.

Die Veränderung der Lage der Stockschiene wurde bei Überfahrten verschiedener Fahrzeugtypen gemessen (Tabelle 4). Dabei zeigte sich ein Klaffen zwischen Stockschiene und Weichenzungenspitze zwischen 6.1 mm und 10 mm.

Fahrzeugtyp	Ø Geschwindigkeit [km/h]	Klaffen [mm]
ETR 610	30.5	8.5
ETR 610	34.2	7.5
ETR 610	30.9	9.2
ETR 610	28.,4	6.1
ETR 610	28.8	8.3
GTW	41.6	8.5
Flirt	27.0	9.5
EW IV / EC	39.5	8.9
EW IV / EC	33.6	10.0
ICN	36.2	9.2

Tabelle 4: Klaffen zwischen Stockschiene und Weichenzungenspitze bei Überfahrten verschiedener Fahrzeugtypen (Messungen SBB-Infrastruktur).

1.14 Regelungen zum Gleisbau und fahrtechnische Prüfung von Eisenbahnfahrzeugen

1.14.1 Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung AB-EBV

1.14.1.1 Definition der Trassierungselemente AB-EBV Artikel 17 Ziffer 5.2

Bezüglich des Mindestradius gelten im Hinblick auf eine freizügige Verwendung des Rollmaterials für Kreisbogen ohne Übergangsbogen folgende Grenzwerte:

Für Zuggleise:

- Grenzwert im Normalfall: 185 m
- über die Ablenkung von überhöhten Weichen: 150 m

1.14.1.2 Gleisbau und Gleismaterial AB-EBV Artikel 31 Ziffer 2.1

Für die interoperablen Strecken der schweizerischen Eisenbahninfrastruktur wird eine maximale quasistatische Führungskraft am Rad (Y_{qst})_{max} von 70 kN angenommen.

1.14.1.3 Fahrzeuge, Grundlegende Anforderungen AB-EBV Artikel 47.1

Die Fahrzeuge sind auf den Oberbau, die Bauwerke und die Betriebsverhältnisse abzustimmen.

1.14.2 Norm EN 14363

Die Norm EN 14363 Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen, Fahrverhalten und stationäre Versuche, definiert die Gleisbogenradien wie folgt:

- grosse Bogenradien $R > 600$ m
- kleine Bogenradien $400 \text{ m} \leq R \leq 600$ m
- sehr kleine Bogenradien $250 \text{ m} \leq R \leq 400$ m

Der Nachweis der Fahrsicherheit in einer Bogenkreuzung darf auch durch Simulationen in einem Vollbogen ohne Kreuzung unter Verwendung eines validierten Modells geführt werden.

Für die durchgeführte Simulation wurden folgende Grenzwerte angenommen:

- Radanhebung (Dz) max. 5 mm
- Entgleisungskoeffizient (Y/Q) kleiner/gleich 1.2 (Anlage 3, Abbildung 36)

Für die Prüfung und Beurteilung von Weichenfahrten hinsichtlich der Bedürfnisse des schweizerischen Eisenbahnnetzes ist die Norm EN 14363 nicht ausreichend. Die Methodik der Prüfung ist geregelt, aber die Grenzwerte sind nicht definiert. Für den Netzzugang der SBB ist das Regelwerk SBB I-50007 (Technischer Netzzugang, Regelung Weichenfahrten, Kapitel 1.14.1.2.1) verbindlich.

1.14.3 R I-50007, Technischer Netzzugang – Regelung Weichenfahrten

Die Regelung der SBB, R I-50007, nennt die Anforderungen für die Befahrbarkeit von Weichen auf dem normalspurigen Schienennetz der SBB Infrastruktur in Anlehnung an die Europäische Norm EN 14363.

Die Trassierung des normalspurigen Schienennetzes der SBB und auch anderer Infrastrukturbetreiber in der Schweiz ist durch die Verwendung von engen Radien und kurzen Zwischengeraden im Vergleich zu anderen europäischen Ländern fahrtechnisch sehr anspruchsvoll.

Ziel dieser Regelung ist es, den Nachweis zu erbringen, dass die neuen Fahrzeuge die gestellten Anforderungen hinsichtlich Fahrsicherheit und Fahrwegbeanspruchung des Schienennetzes der SBB erfüllen.

1.14.4 Regelung zu technischen Spezifikationen für die Interoperabilität – Spurkranzschmierung

1.14.4.1 Generell

Die Schweiz hat mit der Revision der Eisenbahnverordnung im Jahr 2013 die Vorschriften für Normalspurbahnen an die EU-Vorgaben angepasst. Gemäss der europäischen Richtlinie 2008/57/EG müssen die Staaten bei Abweichungen des nationalen Regelwerkes von der entsprechenden technischen Spezifikation für die Interoperabilität (TSI) verbindliche notifizierte nationale technische Vorschriften (NNTV²) festlegen.

1.14.4.2 Technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems «Fahrzeuge, Lokomotiven und Personenwagen» des Eisenbahnsystems

Die TSI schreiben zum Thema Spurkranz- oder Schienenschmierung Folgendes vor:

Kapitel 7.5.3.1. Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung, Spurkranz- oder Schienenschmierung.

Im Rahmen des Entwurfsstadiums dieser TSI wurde beschlossen, dass die «Spurkranz- oder Schienenschmierung» keinen Eckwert darstellt (kein Bezug zu grundlegenden Anforderungen gemäss der Richtlinie 2008/57/EG).

Dennoch hat sich herausgestellt, dass die Akteure im Eisenbahnsektor (IB, EVU, NSB) Unterstützung von der Agentur benötigen, um von der aktuellen Praxis zu einem Ansatz zu kommen, der für Transparenz sorgt und ungerechtfertigte Hürden für den Betrieb der Fahrzeuge im Schienennetz der EU vermeidet.

Zu diesem Zweck hat die Agentur vorgeschlagen, gemeinsam mit dem Eisenbahnsektor eine Studie in Auftrag zu geben, in der die wesentlichen technischen und

² NNTV: Nationale Anforderungen, die von den Anforderungen einer TSI abweichen oder sie ergänzen.

wirtschaftlichen Aspekte dieser Funktion — unter Berücksichtigung der aktuellen Situation — geklärt werden sollen:

Einige Infrastrukturbetreiber fordern die Schmierung, andere verbieten sie.

Die Schmierung kann durch eine von den Infrastrukturbetreibern entwickelte ortsfeste Vorrichtung oder durch ein fahrzeugseitiges Gerät erfolgen, das vom Eisenbahnunternehmen gestellt wird. Im Eisenbahnsektor wurden verschiedene Wege zur Schmierung untersucht.

In der Zwischenzeit können die Mitgliedstaaten weiterhin nationale Regelungen anwenden, um diesen Aspekt der Fahrzeug-Fahrweg-Schnittstelle abzudecken. Diese Regelungen sind entweder durch Notifizierung bei der Kommission gemäss Artikel 17 der Richtlinie 2008/57/EG oder durch das Infrastrukturregister gemäss Artikel 35 jener Richtlinie zur Verfügung zu stellen.

1.14.4.3 Notifizierte Nationale Technische Vorschriften

Die Notifizierten Nationalen Technischen Vorschriften (NNTV) ID: CH-TSI LOC&PAS-007, Juni 2015, verlangen die Ausrüstung von Lokomotiven und Triebzügen mit einem Spurkranzschmierungssystem.

Die Prüfgrundlage für die Konformitätsbescheinigung referenziert auf dem Reglement R RTE 49410, Spurkranzschmierung der Schienenfahrzeuge.

1.14.4.4 Spurkranzschmierung der Schienenfahrzeuge, R RTE 49410

Auf dem Normalspurnetz der Schweiz sind keine gleisseitigen stationären Vorrichtungen zur Schmierung der Fahrkante in Betrieb. Die Fahrzeugvorrichtung soll sicherstellen (Rollmaterialanforderung für Netzzugang), dass eine geeignete Menge Schmierstoff an den Spurkranz der Räder gelangt und über diese an die Fahrkante der Schiene übertragen wird.

Die Regelung RTE 49410 definiert, welchen Beitrag die Fahrzeuge, die das Schweizer Normalspur-Schienennetz befahren, zur Fahrkantenschmierung zu leisten haben.

Für die Verwendung von Spurkranzschmierungssystemen auf den Fahrzeugen und die Eigenschaften der Schmiermittel gelten die Normen EN 15427 und EN 16028.

1.15 Weiteres

1.15.1 Messungen und Literatur-Review über das Thema Reibungskoeffizient

Der im Zusammenhang mit der Untersuchung von RAIB³ über die Entgleisung eines Zuges in Ordsall Lane Junction, Saltford, am 23. Januar 2013 publizierte Bericht hebt die folgenden Punkte zum Thema Reibungskoeffizient hervor:

Sinngemäß übersetzter Auszug aus dem RAIB-Bericht:

Testdaten des British Rail Research Tribometer Trains:

[...Es ist ersichtlich, dass die gemessenen maximalen Werte des Reibungskoeffizienten bis zu 0.6 betragen. Diese auf dem UK-Netz erhobenen Messdaten sind vergleichbar mit den Reibungswerten von 0.32 bis 0.55, die in der Simulationsarbeit verwendet werden.]

³ RAIB: Rail Accident Investigation Branch (UK)

In Rahmen dieser Untersuchung wurden Messungen und eine Literatur-Review⁴, die der SUST vorliegen, durchgeführt.

Im Jahr 2012 wurde der Reibungskoeffizient auf der Strecke unter Verwendung eines handbetätigten Tribometers während fünf Perioden eines Jahres durchgeführt. Es wurden Reibungskoeffizienten von bis zu 0.7 gemessen. Es war auch zu erkennen, dass der Reibungskoeffizient über das ganze Jahr und mit unterschiedlichen Wetterbedingungen variiert.

Ein Literatur-Review bestätigt, dass ein Reibungskoeffizient von 0.55 und mehr möglich ist, wenn der Kontakt Rad–Schiene trocken ist.

1.15.2 Lauftechnische Simulation, Entgleisung ETR 610 in Luzern

In Zusammenhang mit der SUST-Untersuchung über die Entgleisung eines ETR 610-Zuges in Luzern am 22. März 2017 wurde ebenfalls eine Simulation in Auftrag gegeben.

Die Resultate der Simulation betreffend das Thema Reibungskoeffizient während der Durchfahrt auf einer baugleichen Doppelkreuzungsweiche zeigten, dass, wenn der Reibungskoeffizient bis zu einem Wert von 0.6 erhöht wird, eine Situation auftritt, in der das Rad angehoben wird und der Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene in Richtung Spurkranzflanke/Schienenfahrkante wandert.

Als beitragender Faktor für die Entgleisung wurde unter anderem Folgendes ermittelt:

«Der mangelnde Schmierfilm auf der Spurkranz- bzw. Schienenfahrkante, was eine Erhöhung des Reibwerts und eine erhöhte Radanhebung vor Erreichen der Weichenzungenspitze zur Folge hatte».

1.15.3 Reibungskoeffizient der drehgestellseitigen Gleitplatten

Im Jahr 2005 wurden im Rahmen von Redesigns an einem Musterwagen ICE 1 ein Gutachten zum Nachweis der Sicherheit gegen Entgleisen beim Befahren von Gleisverwindungen und Messungen des Ausdrehmoments am Ausdrehprüfstand (im unbeladenen und beladenen Zustand) der DB Systemtechnik in Minden durchgeführt.

Auf Basis des gemessenen Ausdrehmoments und der Wagenkastenmasse wurde ein Reibungskoeffizient der Gleitstücke von 0.18 ermittelt.

Im April 2018 wurden erneut ähnliche Messungen des Ausdrehmoments eines ICE 1-Wagens (leer und beladen) von DB Systemtechnik in Minden durchgeführt.

Auf Basis des gemessenen Ausdrehmoments und der Wagenkastenmasse wurde ein Reibungskoeffizient der Gleitstücke von 0.26 ermittelt.

Diese beiden Reibungskoeffizienten wurden in der Simulation berücksichtigt.

DB Systemtechnik kommt zum Schluss, dass der Hersteller der verbauten seitlichen Gleitstücke zwischen Wagenkasten und Drehgestell nicht als qualifizierter Hersteller auf der Stückliste aufgeführt ist.

Die DB Fernverkehr hat im Mai 2018 eine Untersuchung für die Ermittlung der Reibwerte von unterschiedlichen Gleitplattenlieferanten (Einzelkomponentenversuche) in Auftrag gegeben.

⁴ Variety of literature sources were considered, including a revision draft of European Standard EN14363 (dated June 2013), which reports friction measurements made by British Rail, and a guidance note published by the RSSB: GM/GN2642, 'Guidance on wheel/rail low adhesion'.

Im Rahmen der Versuche wurden die momentan eingesetzten Gleitplatten (Abbildung 31) des Herstellers Nünchritz mit nachgefertigten Bauteilen des Alzulieferers Morgan (ehemals Morganite) verglichen.

Die Versuche wurden auf einem Prüfstand (Abbildung 32) mit Gleitplatten im neuwertigen und gebrauchten Zustand (gereinigt) durchgeführt.



Abbildung 31: Detail einer Gleitplatte
(Einbau Ort auf DG, siehe Abbildung 14)

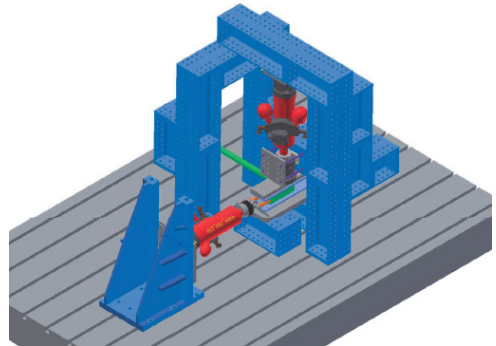


Abbildung 32: Prüfstand für Gleitplatten

Die Resultate der Versuche zeigten keine signifikanten Abweichungen im Verhalten der Gleitplatten bezüglich des Reibungskoeffizienten zwischen den beiden Herstellern.

Für den Nachweis der Entgleisungssicherheit muss gemäss Norm EN 14363 eine Prüfung des Fahrzeugs auf einem Ausdrehprüfstand im unbeladenen und beladenen Zustand erfolgen.

Die Ermittlung der Reibungskoeffizienten wurde nur mit einer Gleitplatte durchgeführt. Ein Einzelkomponentenversuch genügt den Anforderungen für die Ermittlung des Ausdrehwiderstandes eines kompletten Drehgestelles im eingebauten Zustand nicht.

2 Analyse

2.1 Technische Aspekte

2.1.1 Infrastruktur

2.1.1.1 Doppelkreuzungsweiche 317

Die nach der Entgleisung mittels dynamischer Last durchgeführten Einsenkungsmessungen des Fahrwegs im Bereich des Zungenanfangs der DKW 317 zeigen eine maximale Einsenkung von 3.8 mm rechts und 4.2 mm links. Diese Einsenkungen sind hinsichtlich der Gleisverwindung unkritisch.

Die Doppelkreuzungsweiche war in einem guten Zustand. Alle Rippenplatten waren fest angezogen. Die Zungenvorrichtung RL wurde ca. zwei Monate vor der Entgleisung ersetzt. Alle Masse entsprachen daher einem Neuzustand. Die Fahrkanten der Stockschiene und die Flanken der Weichenzunge waren trocken, was zu einem erhöhten Reibungskoeffizient Spurkranzflanke/Schienenfahrkante führte.

Beim Jüdel-Verschlusssystem ist die Weichenzunge nicht fest mit der Stockschiene verbunden. Daher konnten die einwirkenden horizontalen Führungskräfte ein Wegkippen der Stockschiene nach bogenaussen bewirken, ohne dass die Weichenzunge dieser Bewegung in der Querrichtung formschlüssig folgte. Als Folge davon stellte sich ein Klaffen von bis zu 10 mm zwischen der Stockschiene und der Weichenzunge ein.

Die dynamischen Messungen bei der Überfahrt einer baugleichen Doppelkreuzungsweiche zeigten, dass die Fahrgeschwindigkeit im zulässigen Geschwindigkeitsbereich wenig Einfluss auf das Klaffen zwischen der Stockschiene und der Weichenzunge hatte.

2.1.2 Fahrzeuge

2.1.2.1 Verschlossene Spurkränze

Die verschlissenen Spurkränze der Achsen 3 und 4 von Wagen 7 sowie des ersten linken Rades von Wagen 9 wiesen eine Braue an der Spurkranzkuppe auf. Das qR-Mass lag innerhalb der zulässigen Toleranz. Obwohl die Laufleistung der Räder seit der letzten Reprofilierung ca. 258 000 km betrug, wiesen deren Laufflächen keinen Hohllauf und fast keine seitlichen Auswölungen auf.

Alle Zahnplatten der Radsatzlenker waren korrekt eingebaut. Daher kann eine ungünstige Schiefelage der Radsätze, die zu einer Abnutzung der Spurkränze führte, ausgeschlossen werden.

Unter normalen Bedingungen findet auf der Strecke kein Kontakt zwischen der Schiene und der Spurkranzkuppe statt (Abbildung 33).

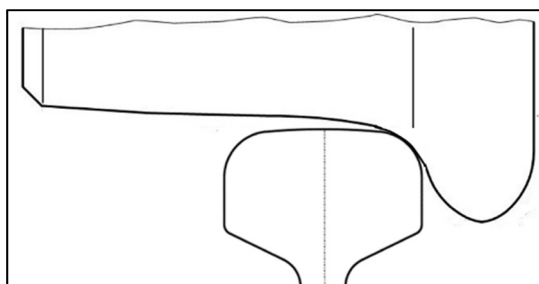


Abbildung 33: Rad/Schiene-Kontakt.

Die auf dem ganzen Umfang der Spurkranzflanke vorhandene Formänderung entstand mit der Zeit infolge einer Materialverdrängung. Dies deutet auf einen unüblichen Kontakt zwischen der Spurkranzflanke und der Schiene sowie Elementen der Weichen hin (Abbildung 17 und Abbildung 19).

Alle anderen Schäden an den Drehgestellkomponenten sind als Folge der Entgleisung zu betrachten.

Die unterschiedliche Stahlgüte der Räder hatte keinen Einfluss auf die Entgleisung.

2.1.2.2 Einfluss des Ausdrehwiderstandes des Drehgestelles auf die bogenäussere Schiene

Das Ausdrehmoment zwischen Drehgestell und Wagenkasten wird bei den ICE 1-Fahrzeugen im Unterschied zu modernen Hochgeschwindigkeitsdrehgestellen nicht über die Schlingerdämpfer und die Sekundärfederung erzeugt, sondern über ein Reibdrehhemmungssystem. Dazu sind drehgestellseitig Gleitplatten auf der Wiege befestigt, die beim Ausdrehen des Drehgestells auf Metallplatten am Wagenkasten reiben. Die Höhe des Ausdrehmoments ist durch den Reibwert der Gleitstücke gegeben. Je höher der Reibwert der Gleitplatten ist, desto höher ist das Ausdrehmoment.

Ein erhöhter Ausdrehwiderstand eines Drehgestells erzeugt während des Ausdrehens des Drehgestells unter dem Wagenkasten beim Befahren eines Bogens oder einer Weichenstrasse erhöhte horizontale Führungskräfte Rad/Schiene. Auf einer verstellten Weiche resultiert aus der bogenäusseren Führungskraft ein Wegbiegen der Stockschiene. Wenn die Weichenzunge in der Querrichtung nicht formschlüssig mit der Stockschiene verbunden ist, wirkt sich dies negativ auf das Klaffen der Zunge aus.

Da in diesem Fall das Klaffen der Doppelkreuzungsweiche 317 über dem zulässigen Betriebsgrenzwert lag, hatte die durch den höheren Reibwert der Gleitstücke resultierende Y-Querkraft keinen signifikanten Einfluss auf die Entgleisungssicherheit.

2.1.3 Spurkranzschmierung

2.1.3.1 Einfluss der Spurkranzschmierung auf die Radanhebung

In engen Kurven oder im Zungenbereich der in Ablenkung befahrenen Weichen führen die gegen den Schienenkopf wirkende Führungskraft (Abbildung 22) und die Reibkraft am Spurkranz zu einer leichten Anhebung der Radlaufläche vom Schienenkopf.

Je höher der Reibungskoeffizient Rad/Schiene und derjenige im Kontaktbereich von Spurkranzflanke und Schienenfahrkante ist, umso stärker ist die dadurch erzeugte Radanhebung. Mit zunehmender Radanhebung übernimmt der Spurkranz des Rades die Spurführung. Liegen in diesem Berührbereich ein hoher Reibwert und ein grosser Anlaufwinkel Rad/Schiene vor, so klettert das Rad an der Schienenfahrkante hoch. Daher hat der Reibwert Rad/Schiene einen wesentlichen Einfluss auf die Entgleisungssicherheit. Bei trockenem Wetter liegt im Vergleich zu allen anderen Witterungsbedingungen grundsätzlich ein hoher Reibwert Rad/Schiene vor, der sich ungünstig auf die Entgleisungssicherheit auswirkt. Zum Zeitpunkt der Entgleisung war es trocken.

Für die Simulation wurden Reibungskoeffizienten bis 0.5 angewendet, da im Ausland durchgeführte Versuche Werte bis 0.7 ergaben.

Wenn der Quotient aus der Führungskraft Y und der Radaufstandskraft Q (Entgleisungskoeffizient Y/Q) den Grenzwert von 1.2 überschreitet, besteht die Gefahr einer Entgleisung. Der Quotient hängt vom Spurkranzwinkel und dem Reibungskoeffizienten μ an der Spurkranzflanke ab. Die Entgleisungsgefahr durch Aufklettern eines Rades vergrößert sich mit zunehmendem Reibungskoeffizienten.

2.1.3.2 Einfluss der Spurkranzschmierung auf die Entgleisungssicherheit

Der Entgleisungskoeffizient Y/Q (Grenzwert für beginnendes Aufklettern des Spurkranzes) hängt vom Spurkranzflankenwinkel, dem Anlaufwinkel zwischen Rad und Schiene und dem Reibungskoeffizienten an der Spurkranzflanke ab.

In der Schweiz ist die Trassierung des normalspurigen Schienennetzes fahrtechnisch sehr anspruchsvoll, da noch an vielen Orten Gleisbogenradien und Ablenkungsradien in Weichen kleiner als 250 m anzutreffen sind (Grenzfall AB-EBV 185 m). Daher leistet das Spurkranzschmierungssystem einen wichtigen Beitrag zur Entgleisungssicherheit.

Im Betrieb können Radprofile infolge von Spurkranzverschleiss verschiedene Spurkranzflankenwinkel aufweisen. Durch die Fahrzeuginstandhaltung wird sichergestellt, dass das qR-Mass noch innerhalb des zulässigen Minimalwertes von 6.5 mm verbleibt. Der einzig verbleibende und beeinflussbare Parameter, der einen Einfluss auf die Entgleisungssicherheit hat, ist der Reibungskoeffizient zwischen Spurkranzflanke und Schienenfahrkante.

Aufgrund des derzeit in der Schweiz praktizierten mobilen Schmierystems – die Spurkranzschmierung wird nur von den Triebfahrzeugen/Triebwagen und einzelnen Steuerwagen sichergestellt – tragen die Eisenbahnverkehrsunternehmen die Verantwortung für den Schmierzustand des Schienennetzes.

Wenn eine Infrastrukturbetreiberin feststellt, dass der Schmierzustand von Streckenabschnitten unzureichend ist, hat sie keine Möglichkeiten, direkt zu reagieren. Dagegen hat die Infrastrukturbetreiberin die Möglichkeit, den Schmierzustand direkt zu beeinflussen, indem sie die Schmierung durch stationäre Schmieranlagen sicherstellt.

Die heutigen Betriebskonzepte haben zur Folge, dass viele Fahrzeuge im internationalen Verkehr eingesetzt sind. Durch die länderspezifische Topologie – grosse Kurvenradien und hohe Streckengeschwindigkeiten – wird das Spurkranzschmierungssystem, das geschwindigkeitsabhängig gesteuert wird, sehr selten aktiviert. Aufgrund der grossen Bogenradien leistet es auch keinen Beitrag mehr zur Entgleisungssicherheit. Daher ist die Präsenz eines regelmässigen Fettfilms auf dem Spurkranz nicht mehr gewährleistet. Nach einer langen Fahrt bei einer hohen Geschwindigkeit > 105 km/h ist kaum mehr ein Schmierfilm am Spurkranz vorhanden.

Die heutigen Anforderungen an die Spurkranzschmierungssysteme (Rollmaterialanforderung für den Netzzugang in der Schweiz) sind so ausgelegt, dass nur die fahrzeugseitigen Vorrichtungen sicherstellen müssen, dass eine geeignete Menge Schmierstoff an den Spurkranz der Räder gelangt und über diese an die Fahrkante der Schiene übertragen wird. Aufgrund der oben erwähnten Erläuterungen lässt sich ableiten, dass dieses System seine Anforderungen nicht mehr korrekt erfüllen kann. Die Resultate der Untersuchung der ETR 610-Entgleisung in Luzern zeigten, dass trotz funktionierender Spurkranzschmierungsanlage die Spurkränze ungenügend geschmiert waren.

Bei einer ungenügenden Schmierung kann in der Realität der Reibwert Spurkranzflanke/Schienenfahrkante höher sein als der in der DB Systemtechnik Simulation konservativ angewendete Reibwert von bis zu 0.5, insbesondere bei trockenen Wetterbedingungen.

2.1.4 Laufdynamische Simulation

Bedingt durch das Ausdrehmoment zwischen Wagenkasten und Drehgestell läuft das linke Rad des ersten vorlaufenden Radsatzes des Wagens 9 im Vergleich zu den anderen Rädern am stärksten an der Zunge an. Ab einem Klaffmass der Zunge von 10 mm, mit einem Reibwert μ Spurkranzflanke/Schienenfahrkante von 0.5 und einem Reibwert μ Gleitplatte von 0.26 kommt es mit den verschlissenen Radprofilen des Wagens 9 zum Auflaufen des ersten linken Rades auf der Weichenzunge, wodurch in der Folge das Rad entgleist.

Mit erhöhter Y-Kraft wandert der Kontaktpunkt in der Radlaufläche des bogenäusseren führenden Rades (Radführung an der Stockschiene) in Richtung der Spurkranzflanke, da das Rad stärker nach bogenaussen gedrückt wird.

Das verschlissene Radprofil des Wagens 9, mit geringerem qR-Mass, entgleist dabei eher als das Rad mit einem neuen Profil, welches erst bei höherem Klaffmass ab ≥ 12 mm einen kritischen Zustand erreicht. Der Grund hierfür ist, dass sich durch den Verschleiss am Spurkranz des Rades der Kontaktpunkt der Weichenzungenspitze in Richtung der Spurkranzkuppe verschiebt und dort oberhalb der Braue kleinere Radprofilwinkel antrifft. Beim Kontakt des verschlissenen Rades des Wagens 9 mit der mit 10 mm klaffenden Zunge ist der Radprofilwinkel $< 14^\circ$ und die Spurführung dadurch nicht mehr gewährleistet (Abbildung 25).

Das neue Radprofil (Abbildung 27) hat dagegen bei 12 mm Klaffen der Zunge einen Radprofilwinkel von $\geq 35^\circ$ im Kontaktpunkt mit der Weichenzungenspitze und ist daher weniger entgleisungsgefährdet.

Entscheidenden Einfluss auf das Entgleisungsrisiko hat der Radprofilwinkel an der Spurkranzkuppe beim Kontakt des Rades mit der Zungenspitze. Ist dieser zum Zeitpunkt des Auflaufens auf der Weichenzunge zu niedrig, kommt es zur Entgleisung.

Abschliessend betrachtet kann es aus Sicht der Simulation nur dann zu einer Entgleisung kommen, wenn ein ausreichend grosses Klaffen der Zunge mit ≥ 10 mm und ein Verschleiss der Spurkranzflanke im Bereich von qR-Mass ≤ 8 mm vorliegt.

2.2 Ablauf der Entgleisung

Die höchsten Radführungskräfte Y traten rund 6 m nach dem Bogenanfang jeweils am Radsatz 1 eines jeden Fahrzeuges auf. Die Weichenzunge liegt im Gleisbogen rund 6.5 m nach dem Bogenanfang. Sie liegt daher genau in einem Bereich, in dem die höchsten Radführungskräfte wirkten. An dieser Stelle trat auch eine übermässige Radanhebung wegen erhöhtem Reibwert zwischen Spurkranzflanke/Schienenfahrkante auf.

Infolge der dynamischen Querkräfte und dem daraus resultierenden grossen Klaffmass zwischen Stockschiene und Weichenzunge lief das erste linke Rad des Wagens 9, etwa 50 cm, nach der Weichenzungenspitze auf die Oberkante der Zunge der Doppelkreuzungsweiche 317 auf. Ungefähr 2.1 m nach der Spitze der Weichenzunge kletterte das Rad zwischen der Weichenzunge und der Stockschiene ab. Anschliessend drückte das entgleiste Rad die Weichenzunge von der Stockschiene weg, was zu einer weiteren Erhöhung des Klaffmasses führte. Das linke Rad der zweiten Achse fuhr in der Folge auf die Weichenzunge auf und entgleiste ebenfalls.

Die Variante 3 in der Simulation (Abbildung 26) zeigt, dass die Zunge vom ersten Rad nicht seitlich angefahren wird, sondern das Rad auf die Zunge auffährt, bis es nach einer Distanz von rund 2 m wieder absteigt. Das stimmt mit den vor Ort gefundenen Spuren überein.

Entscheidenden Einfluss auf das Entgleisungsrisiko hat der Profilwinkel des Rades beim Kontakt mit der Zungenspitze. Ist dieser zum Zeitpunkt des Auflaufens auf die Weichenzunge zu niedrig, kommt es zur Entgleisung.

2.3 Betriebliche Aspekte

Im Bereich der Doppelkreuzungsweiche 317 ist die Geschwindigkeit auf maximal 40 km/h festgelegt. Zum Entgleisungszeitpunkt fuhr der Zug mit einer Geschwindigkeit von 31 km/h. Die dynamischen Messungen bei der Überfahrt einer Doppelkreuzungsweiche zeigten, dass die Fahrgeschwindigkeit im zulässigen Geschwindigkeitsbereich, insbesondere zwischen 30 und 40 km/h, wenig Einfluss auf das Klaffen zwischen der Stockschiene und der Weichenzunge hatte.

2.4 Risikofaktoren für die Entgleisung auf einer Weiche

Abgesehen von Entgleisungen, die auf einen Elementbruch an der Infrastruktur (Schiene oder Weichenzunge) oder an einem Fahrzeug (Radsatzwelle oder Radscheibe) zurückzuführen sind, kann eine Kombination von folgenden Faktoren das Risiko einer Entgleisung auf einer Weiche erhöhen:

- der Bogenradius der Weiche; je kleiner der Bogenradius, desto grösser wird die auf den Schienenkopf einwirkende horizontale Y-Führungskraft;
- die Bauart des Weichenverschlusses (fehlender Formschluss Weichenzunge/Stockschiene);
- ein erhöhter Reibungskoeffizient Spurkranzflanke/Schienenfahrkante;
- die Kontaktgeometrie zwischen Spurkranzprofil und Schienen- bzw. Weichenzungenprofil;
- ein erhöhtes Ausdrehmoment zwischen Drehgestell und Wagenkasten;
- die dynamischen Effekte im Zugverband (Längsdruckkräfte).

Ein einzelner Faktor, der knapp innerhalb dem Toleranzbereich liegt, ist in der Regel nicht kritisch. Kumulieren sich aber mehrere derartige Faktoren, so kann sich daraus eine kritische Situation ergeben. Die Konvergenz dieser nachteiligen Faktoren kann eine Entgleisung ermöglichen.

3 Schlussfolgerungen

3.1 Befunde

3.1.1 Technische Aspekte

3.1.1.1 Fahrzeuge

- Die Spurkranzschmieranlage des ICE war nicht funktionsfähig, alle Spurkranzflanken der Räder waren trocken.
- Die Anbindung der Radsätze an das Drehgestell mithilfe der Radsatzlenker zeigte keine Auffälligkeiten.
- Das zuerst entgleiste linke Rad des Wagens 9 zeigte einen starken Spurkranzverschleiss mit der Bildung einer Braue am Übergang Spurkranzflanke/-kuppe. Dadurch stellte sich in Anbetracht des erhöhten Klaffmasses eine ungünstige Berührungsgeometrie zwischen der Spurkranzkuppe und der Weichenzungenspitze ein.
- Obwohl der Spurkranz beim Rad links der ersten Achse beim Wagen 9 stark verschlissen war, lag das qR-Mass innerhalb des zulässigen Toleranzbereichs.
- Der höhere Reibwert der Gleitstücke hatte keinen signifikanten Einfluss auf den Ausdrehwiderstand des ersten entgleisten Drehgestelles.

3.1.1.2 Infrastruktur

- Die Gleislage zeigte keine Auffälligkeiten.
- Beim Jüdel-Verschlusssystem ist die Weichenzunge nicht formschlüssig mit der Stockschiene verbunden.
- Bei der Überfahrt über die versteifte Doppelkreuzungsweiche entstand ein unerwartet grosses Klaffen zwischen der Stockschiene und der Weichenzungenspitze.
- Die Schienenfahrkante und die Schienenflanke der Stockschiene im Bogen vor der Weichenzunge wiesen keinen Schmierfilm auf.
- Die Weichenzunge RL der Doppelkreuzungsweiche 317 war in neuem Zustand und wies keinen Schmierfilm auf.
- Die Trassierung des normalspurigen Schienennetzes ist wegen enger Bogenradien fahrtechnisch sehr anspruchsvoll.

3.1.1.3 Simulation

Die Ergebnisse der Simulation zeigen:

- Die höchsten Radführungskräfte traten am ersten Radsatz im Bereich der Weichenzungenspitze auf. Der Entgleiskoeffizient Y/Q hatte mit einem Wert von 1.18 sein Maximum ungefähr 1.2 m nach Zungenanfang erreicht und lag damit geringfügig unter dem Grenzwert von 1.2.
- Die Einflussgrössen, die das Risiko für eine Entgleisung entscheidend beeinflussen, sind die Rad/Schiene-Kräfte sowie die Berührungspunkte zwischen Rad- und Schienenprofil.

- Es kam zur Entgleisung, weil ein ausreichend grosses Klaffen der Zunge mit ≥ 10 mm zusammen mit einem grösseren Verschleiss der Spurkranzflanke ($qR\text{-Mass} \leq 8$ mm) vorlag.
- Mit einem neuen Radprofil betrug das Klaffmass, bei dem es zu einer Entgleisung kam, 12 mm.

3.1.1.4 Rad/Schiene-Kontakt und Reibungskoeffizient

- Infolge einer ungenügenden Schmierung war der Reibwert Spurkranzflanke/Schienenfahrkante höher als der in der Norm EN 14363 definierte Grenzwert für die Entgleisungssicherheit.
- Der Reibungskoeffizient Rad/Schiene variiert während des ganzen Jahres und mit unterschiedlichen Wetterbedingungen. Ein erhöhter Reibungskoeffizient Rad/Schiene hat erhöhte Führungskräfte zur Folge.
- Messungen mit einem Tribometer haben gezeigt, dass der Reibungskoeffizient Spurkranzflanke/Schienenfahrkante Werte bis 0.7 erreichen kann.
- In engen Kurven oder im ablenkenden Strang einer Weiche führt die gegen den Schienenkopf wirkende Führungskraft und die Reibkraft/Tangentialkraft an der Spurkranzflanke zu einer leichten Anhebung der Radlaufläche vom Schienenkopf.
- Ein erhöhter Reibungskoeffizient Spurkranzflanke/Schienenfahrkante begünstigt die Radanhebung bei Bogenfahrt.

3.1.2 Organisatorische Aspekte

Die Kontrolle der Gleisgeometrie wurde nebst der vorgeschriebenen statischen Vermessung der DKW 317 direkt nach der Instandhaltung mittels dem selbstfahrenden Diagnosefahrzeug der SBB Infrastruktur rund zwei Monate vor der Entgleisung durchgeführt. Alle Werte lagen innerhalb der Toleranzen.

3.1.3 Betriebliche oder prozessuale Aspekte

Die Fahrstrasse des ICE 75 war bis ins Gleis 5 in Basel SBB eingestellt. Die Sicherungsanlage funktionierte bis zur Entgleisung einwandfrei.

3.2 Ursachen

Die Entgleisung des ICE 75 bei der Einfahrt in den Bahnhof Basel SBB auf der verstellten Doppelkreuzungsweiche 317 ist darauf zurückzuführen, dass infolge des grossen Klaffmasses durch das Wegkippen der Stockschiene im Bereich der Weichenzungen das erste linke Rad des Wagens 9 etwa 50 cm nach der Zungenspitze auf die Zungenoberkante auflief, die Spurführung verlor und nach zwei Metern entgleiste.

Im Rahmen der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass der ungenügende Schmierzustand der Schienenfahrkanten und der Weichenzungen massgeblich zum Risiko beitragen kann.

4 Sicherheitsempfehlungen, Sicherheitshinweise und seit dem Unfall getroffene Massnahmen

4.1 Sicherheitsempfehlungen

Die schweizerische Gesetzgebung sieht in der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen (VSZV) vom 17. Dezember 2014, Stand am 1. Februar 2015 (SR 742.161) bezüglich Sicherheitsempfehlungen folgende Regelung vor:

Art. 48 Sicherheitsempfehlungen

¹ Die SUST richtet die Sicherheitsempfehlungen an das zuständige Bundesamt und setzt das zuständige Departement über die Empfehlungen in Kenntnis. Bei dringlichen Sicherheitsproblemen informiert sie umgehend das zuständige Departement. Sie kann zu den Umsetzungsberichten des Bundesamts zuhanden des zuständigen Departements Stellung nehmen.

² Die Bundesämter unterrichten die SUST und das zuständige Departement periodisch über die Umsetzung der Empfehlungen oder über die Gründe, weshalb sie auf Massnahmen verzichten.

³ Das zuständige Departement kann Aufträge zur Umsetzung von Empfehlungen an das zuständige Bundesamt richten.

Gleichwohl sind jede Stelle, jeder Betrieb und jede Einzelperson eingeladen, im Sinne der ausgesprochenen Sicherheitsempfehlungen eine Verbesserung der Sicherheit im öffentlichen Verkehr anzustreben.

Die SUST veröffentlicht die Antworten des zuständigen Bundesamtes unter www.sust.admin.ch und erlaubt so einen Überblick über den aktuellen Stand der Umsetzung der entsprechenden Sicherheitsempfehlung.

4.1.1 Schmierung der Schienenfahrkante

4.1.1.1 Sicherheitsdefizit

Der Quotient aus Führungs- und Radaufstandskraft (Y/Q) eines bogenäusseren Rades wird als Beurteilungsgrösse für die Wahrscheinlichkeit des Eintretens einer Entgleisung im System ORE C70 benutzt. Dieser Quotient hängt vom Spurkranzwinkel und dem Reibungskoeffizienten μ an der Spurkranzflanke ab. Die Entgleisungswahrscheinlichkeit durch Aufklettern eines Rades wird mit zunehmendem Reibungskoeffizienten erhöht.

Im Betrieb können Spurkranzprofile infolge von Spurkranzverschleiss verschiedene Spurkranzflankenwinkel aufweisen; dabei kann das qR-Mass noch innerhalb der zulässigen Toleranz von 6.5 liegen. Der Reibungskoeffizient Spurkranzflanke/Schienenfahrkante hat einen wesentlichen Einfluss auf die Entgleisungssicherheit und ist ein einfach zu beeinflussender Faktor.

Die Trassierung des normalspurigen Schienennetzes ist wegen enger Bogenradien fahrtechnisch sehr anspruchsvoll. Nebst der Verminderung der Reibungskräfte zwischen Spurkranzflanke und Schienenflanke dient die Spurkranzschmierung auch der Verschleissminderung an Spurkranz und Schiene und trägt damit auch zu reduzierten Lebenszykluskosten bei. Durch diesen verminderten Materialabtrag und die daraus resultierende Berührungsgeometrie wird zudem ein Verschleissvorrat geschaffen, welcher sich günstig auf die Entgleisungssicherheit auswirkt.

Mit dem heutigen Betriebskonzept kann nicht sichergestellt werden, dass allein durch die fahrzeugseitigen Spurkranzschmiervorrichtungen eine für alle Verkehre netzweit ausreichende Menge Schmierstoff an die Fahrkante der Schiene übertragen wird. Mit diesem Konzept tragen die Eisenbahnverkehrsunternehmen die Verantwortung für den Schmierzustand des Schienennetzes.

4.1.1.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 140

Das im vorliegenden Fall erhobene Sicherheitsdefizit wurde im Schlussbericht Reg.-Nr. 2017032201 über die Entgleisung eines Eurocity-Zuges vom 22. März 2017 in Luzern bereits aufgegriffen und mit der Sicherheitsempfehlung Nr. 140 behandelt. Aus diesem Grund verzichtet die SUST auf das Aussprechen einer weiteren Sicherheitsempfehlung.

Die mit dem Schlussbericht Reg.-Nr. 2017032201 an das BAV ausgesprochene Sicherheitsempfehlung Nr. 140 lautet:

Das BAV sollte Massnahmen und Vorgaben prüfen, die sicherstellen, dass in Bereichen mit fahrdynamisch anspruchsvoller Gleisgeometrie jederzeit die Schmierung der Schienenflanke sichergestellt ist.

4.2 Sicherheitshinweise

Als Reaktion auf während der Untersuchung festgestellte Sicherheitsdefizite kann die SUST Sicherheitshinweise veröffentlichen. Sicherheitshinweise werden formuliert, wenn eine Sicherheitsempfehlung nicht angezeigt erscheint, formell nicht möglich ist oder wenn durch die freiere Form eines Sicherheitshinweises eine grössere Wirkung absehbar ist. Sicherheitshinweise der SUST haben ihre Rechtsgrundlage in Artikel 56 der VSZV:

Art. 56 Informationen zur Unfallverhütung

Die SUST kann allgemeine sachdienliche Informationen zur Unfallverhütung veröffentlichen.

4.2.1 Einbau von neuen Weichenzungen

4.2.1.1 Sicherheitsdefizit

Die neuen Zungenvorrichtungen werden im Rohzustand eingebaut. Die Kontaktfläche der Zunge wies keinen Fettfilm auf. Eine erste manuelle Schmierung der Zunge fand nicht statt.

4.2.1.2 Sicherheitshinweis Nr. 21

Zielgruppe: Infrastrukturbetreiber

Nach dem Einbau einer neuen Zungenvorrichtung sollte eine erste Schmierungscharge manuell auf der Zunge angebracht werden, bis von den Spurkränzen der Räder ein genügend grosser Fettfilm auf die Zungenvorrichtung übertragen wurde.

4.3 Seit dem Unfall getroffene Massnahmen

Die der SUST bekannten Massnahmen werden im Folgenden kommentarlos aufgeführt.

Die SBB Infrastruktur hat die folgenden Massnahmen getroffen:

- Die vier Doppelkreuzungsweichen mit Bogeneinlauf, welche regelmässig von Personenzügen befahren werden, werden mittels neuer Trassierungsgeometrie ohne Bogeneinlauf ersetzt. Dies ist für zwei Weichen in Luzern bereits umgesetzt und für zwei Weichen in Basel für 2019 geplant.
- Es wurden schweizweit zusätzliche Kontrollen auf Anfahrspuren bei versteilten Kreuzungsweichen und einfachen Weichen mit Bogeneinlauf durchgeführt, um kritische Weichen zu erkennen und entsprechende Massnahmen bis spätestens Mitte 2019 umzusetzen.
- Es wird eine verbesserte Abstützung der Stockschiene erprobt.
- Es wird ein Messverfahren entwickelt, das dynamische Messungen des Klaffmasses während der Überfahrt erlaubt.

Dieser Schlussbericht wurde von der Kommission der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) genehmigt (Art. 10 Bst. h der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen vom 17. Dezember 2014).

Bern, 3. September 2019

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle

Anlage 1

Darstellung der Wagen 7 bis 10 in der ICE-Komposition

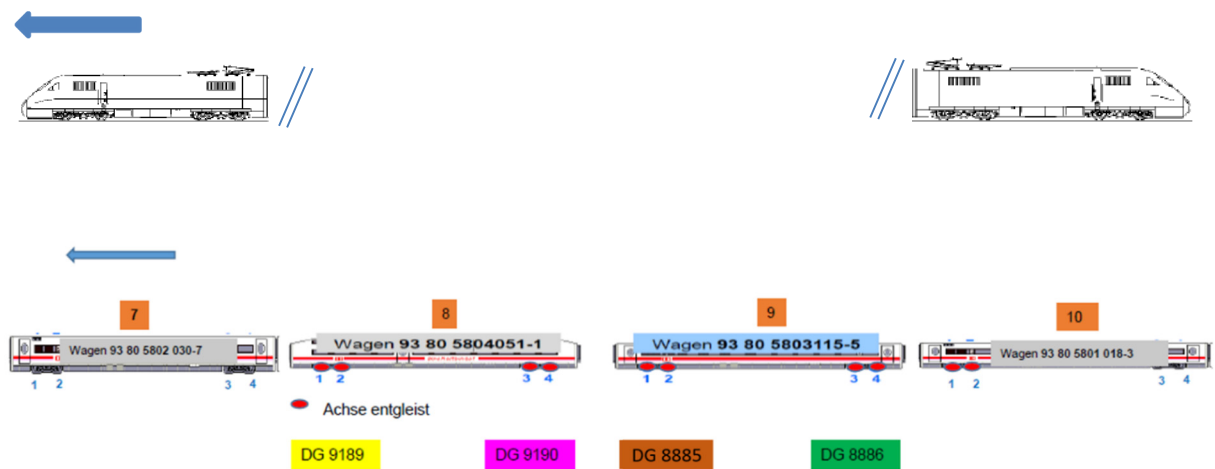


Abbildung 34: Entgleiste Wagen und Nummerierung der Achsen
DG + Nr.: Identifikation der Drehgestelle

Anlage 2

Doppelkreuzungsweiche 317, Zungenvorrichtung RL, Spuren

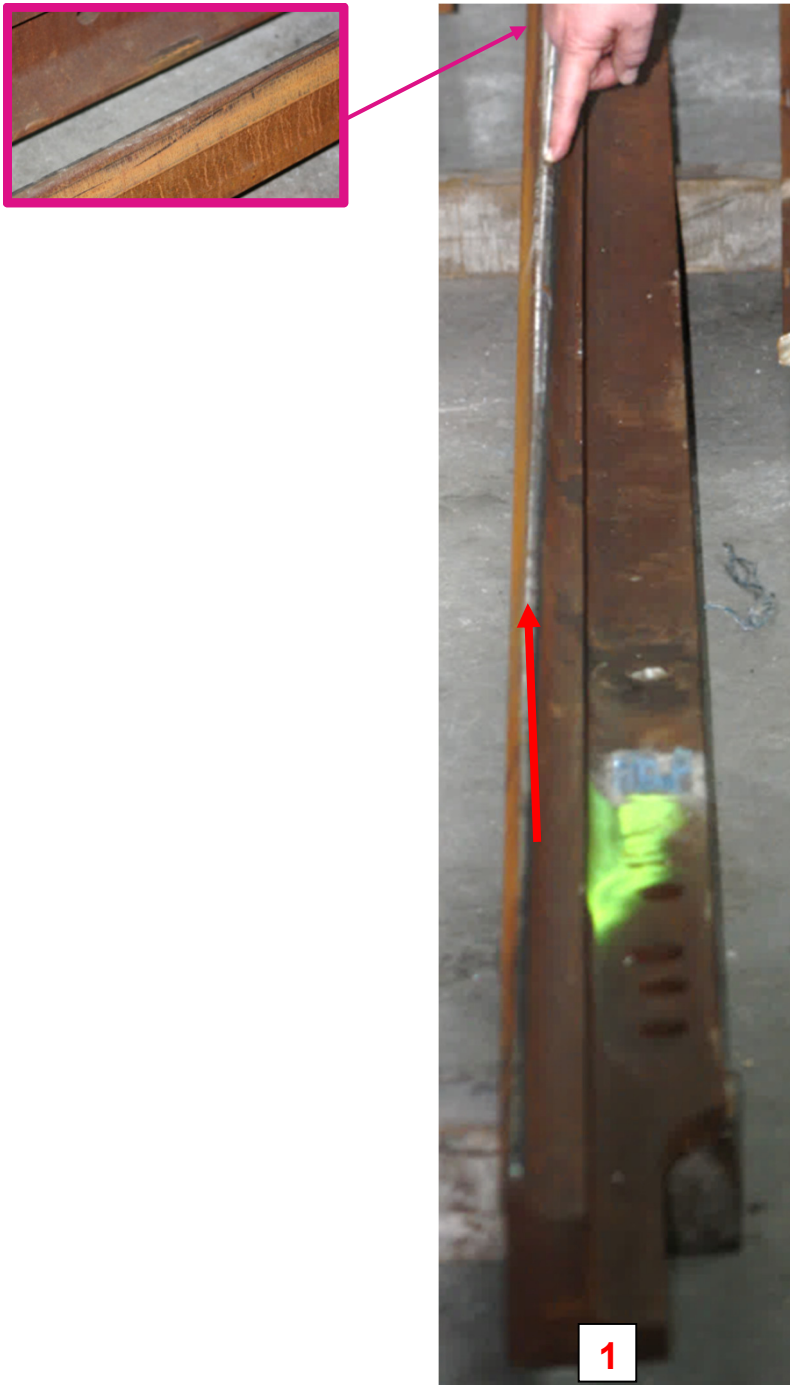


Abbildung 35: Weichenzunge RL

Legende: 1: Weichenzunge RL

Roter Pfeil: Spuren vom Auflaufen der Spurkranzkuppe auf der Weichenzunge ab ca. 50 cm nach der Spitze.

Detail links: hinterlassene Abkletterspur des Rades ca. 2.1 m nach der Spitze der Weichenzunge.

Anlage 3

Grenzwert Entgleisungskoeffizient Y/Q für verschiedene Spurkranzwinkel und Reibwerte

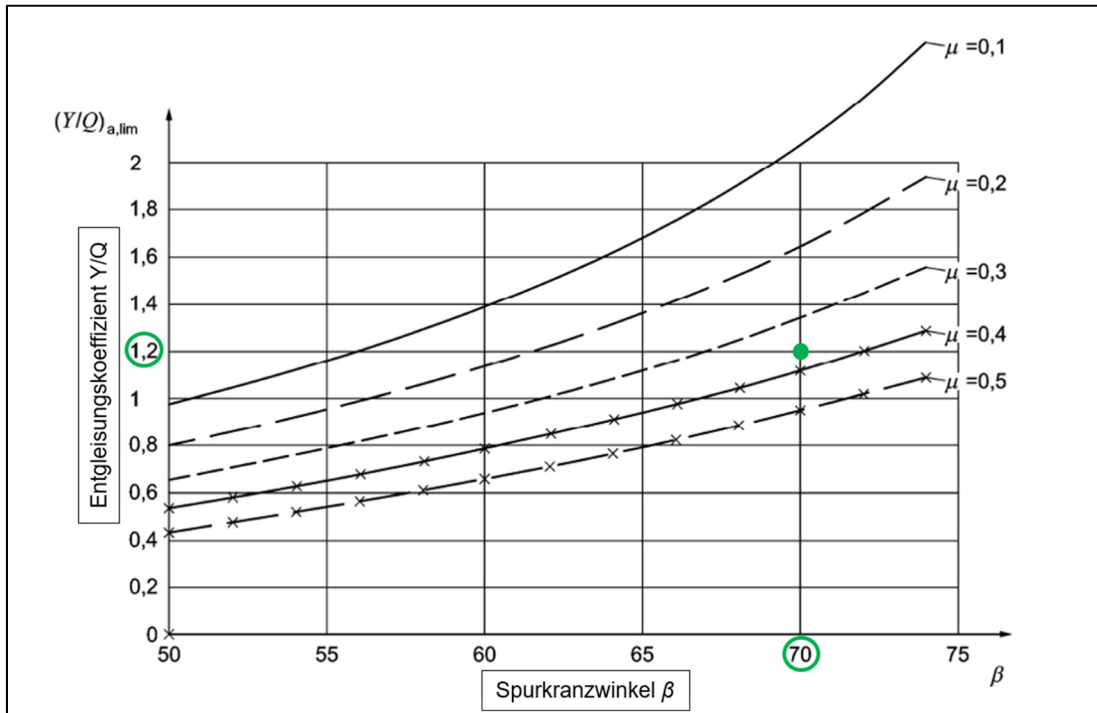


Abbildung 36: Grenzwert Entgleisungskoeffizient Y/Q für verschiedene Spurkranzwinkel β und Reibwerte μ (Quelle: EN 14363).

Anlage 4

Terminologie der Elemente Rad/Schiene und Bereiche für Schmierung

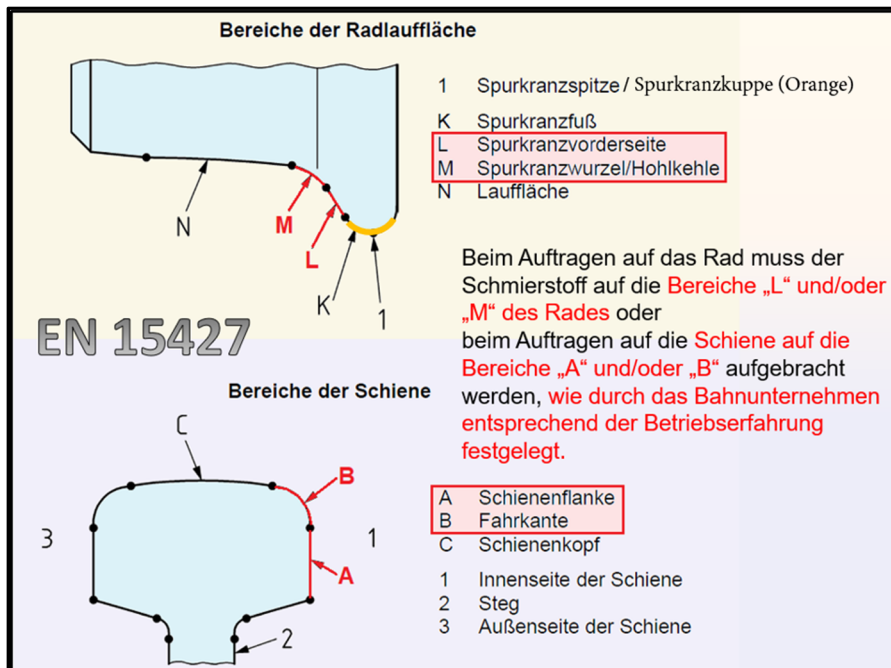


Abbildung 37: Terminologie der Elemente Rad/Schiene.