



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 den Zahnradbruch

vom 6. März 2021

auf der Strecke Brünig–Giswil (OW)

Reg.-Nr. 2021030602

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 vom 20. Dezember 1957 (EBG), Stand am 1. Januar 2022 (SR 742.101), sind Schuld und Haftung nicht Gegenstand der Untersuchung.

Der alleinige Zweck der Untersuchung eines Unfalls oder eines schweren Vorfalls ist die Verhütung von Unfällen oder schweren Vorfällen. Es ist ausdrücklich nicht Zweck der Sicherheitsuntersuchung und dieses Berichts, Schuld oder Haftung festzustellen. Wird dieser Bericht zu anderen Zwecken als zur Unfallverhütung verwendet, ist diesem Umstand Rechnung zu tragen.

Alle Personenbezeichnungen in diesem Bericht sind in der männlichen Form gehalten und gelten für die die Funktion ausübende Person, ungeachtet ihres Geschlechts.

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	9
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
1.6 Beteiligte und betroffene Unternehmen	11
1.6.1 Infrastrukturbetreiberin	11
1.6.2 Eisenbahnverkehrsunternehmen	11
1.6.3 Fahrzeughalter	11
1.7 Zahnradsystem	11
1.7.1 Grundlagen	11
1.7.2 Zahnstangeneinfahrt der Zentralbahn	11
1.7.3 Funktionsbeschreibung der Einfahrlamelle – Herausforderung	12
1.8 Infrastruktur	13
1.8.1 Bahnanlage	13
1.9 Fahrzeuge	16
1.9.1 Übersicht	16
1.9.2 Triebmodul	19
1.10 Auswertung der Datenaufzeichnung	21
1.10.1 Fahrdaten	21
1.11 Besondere Untersuchungen	22
1.11.1 Vorfall im Jahr 2020 – Triebzahnradriss	22
1.11.2 Finite-Elemente-Methode (FEM) Analyse – Beanspruchung am Zahnrad	23
1.11.3 Metallurgische Untersuchung am Zahnrad	25
1.11.4 Videoaufnahmen Ein- und Ausfahrten in Lungern	27

1.11.5	Messungen an der Zahnstangeneinfahrt in Lungern.....	28
1.11.6	Messungen am Fahrzeug – Desynchronisation von Triebzahnradern	30
1.12	Literatur Review – Konstruktion von Zahnradern	31
1.13	Einfahrlamelle – Konzeption und Design zb	31
1.14	Regelungen und Funktionsbeschreibungen	32
1.14.1	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV)	32
1.14.2	D RTE 29700 «Systemtechnik Zahnradbahnen»	32
1.15	Zahnrad – Optimierung der Federkammer als Folge des Zahnradrisses	33
2	Analyse	34
2.1	Technische Aspekte	34
2.1.1	Beobachtungen bei den Zahnstangenein- und -ausfahrten in Giswil und Lungern	34
2.1.2	Gebrochenes Triebzahnrad.....	34
2.1.3	Eingriffsdauer – Veränderung der Eingriffsverhältnisse im Laufe der Zeit – Teilkreis – Beanspruchung des Triebzahnrades	35
2.1.4	Kopftreffer bei der Zahnstangenausfahrt – Einfluss auf die Beanspruchung des Tangentialfedersystems und des Triebzahnkranzes	37
2.2	Betriebliche oder prozessuale Aspekte	41
3	Schlussfolgerungen.....	42
3.1	Befunde	42
3.1.1	Technische Aspekte	42
3.2	Ursachen	43
4	Sicherheitsempfehlungen, Sicherheitshinweise und seit dem schweren Vorfall getroffene Massnahmen.....	45
4.1	Sicherheitsempfehlungen	45
4.1.1	Deckungsgrad Teilkreis/Teillinie – Eingriffsverhältnisse Adler- und Fink-Triebzüge.....	45
4.1.2	Einfahrlamelle.....	46
4.1.3	Dimensionierung und Sicherheitsfaktor von Triebzahnradern.....	46
4.2	Sicherheitshinweise	47
4.3	Seit dem schweren Vorfall getroffene Massnahmen	47

Zusammenfassung

Überblick

Verkehrsmittel Eisenbahn

Beteiligte Unternehmen

Eisenbahnverkehrsunternehmen Zentralbahn (zb) AG, Stansstad

Infrastrukturbetreiberin Zentralbahn (zb) AG, Stansstad

Beteiligte Fahrzeuge Triebzug ABeh 150-104 zb

Ort Strecke Brünig-Hasliberg–Giswil (OW)

Datum und Zeit 6. März 2021, ca. 09:50 Uhr

Untersuchung

Am 8. März 2021 verständigte die Zentralbahn (zb) via E-Mail die Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST) über einen Zahnradbruch am 6. März 2021 während der Talfahrt vom Brünig-Hasliberg nach Giswil. Am 11. März 2021 untersuchte die SUST das defekte Zahnrad in Stansstad. Es wurde eine Untersuchung eröffnet.

Für die Untersuchung standen zur Verfügung:

- Bestandsaufnahme Rollmaterial und Infrastruktur;
- Fotos;
- Metallurgische Untersuchung;
- Dynamische Messungen an der Einfahrlamelle;
- FEM Analyse Triebzahnrad;
- Berechnungen;
- Videoaufnahmen;
- Fahrdaten des Zuges;
- Technische Unterlagen Rollmaterial und Infrastruktur;
- Kartenmaterial;
- Technische Literatur.

Kurzdarstellung

Am 6. März 2021, gegen 09:50 Uhr, brach auf der Strecke zwischen Brünig-Hasliberg und Giswil ein Triebzahnrad eines siebenteiligen Zahnrad- und Adhäsionstriebzuges Adler der Zentralbahn.

Ursache

Der Bruch des Triebzahnrades eines Adler-Triebzuges bei der Talfahrt am Brünig am 6. März 2021 ist auf eine Rissinitiierung in der Federkammer zurückzuführen, verursacht durch die Überbeanspruchung des Tangentialfedersystems, die zu einer mechanischen Beschädigung der Federkammerwand führte und für die das Triebzahnrad nicht ausgelegt war.

Zum Ereignis haben beigetragen:

- Wiederkehrende Anschläge der Federsättel, die zu hohen Kräfteinlenkungen in das Triebzahnrad führten.
- Ungenügende Sicherheitsreserve bei der Triebzahnraddimensionierung.

Folgende Faktoren, die teilweise im Zusammenhang mit einer ungenügenden Kompatibilität zwischen Zahnstangenlamelle und Triebzahnrad stehen, begünstigten das Entstehen von Kopftreffern:

- Nicht genügender Deckungsgrad zwischen Teilkreis des Zahnrades der Adler- und Fink-Triebzüge und der Teillinie der Zahnstange, der zu ungünstigen Eingriffsverhältnissen auf der Lamelle bei der Zahnstangenausfahrt führte.
- Lamelle mit festem Drehpunkt am Bolzen, die den vertikalen Hub der Lamelle bei einem Kopftreffer bei Ausfahrten im Bereich der Zähne 20 und 29 erheblich einschränkt.
- Abgerundete Form der Zähne der Zahnstangenlamelle kumuliert mit ungünstigen Eingriffsverhältnissen, die unter bestimmten Umständen zu Einhacken bzw. Meisseln der scharfen Triebzähne am Ende der Lamelle führen.
- Eine fehlerhafte Software, die gelegentlich zum Wiederaufbau von Zugkraft bei der Zahnstangenausfahrt führte.

Sicherheitsempfehlungen und Sicherheitshinweise

Mit diesem Bericht werden 3 Sicherheitsempfehlungen ausgesprochen.

Glossar

Vorgaben

AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung vom 15. Dezember 1983, Stand am 1. November 2020 (SR 742.141.11)
EBV	Verordnung über Bau und Betrieb der Eisenbahnen (Eisenbahnverordnung) vom 23. November 1983, Stand am 1. November 2020 (SR 742.141.1)
FDV	Schweizerische Fahrdienstvorschriften (R 300.1–.15) vom 2. November 2015, Stand am 1. Juli 2020 (SR 742.173.001)
D RTE 29700	Systemtechnik Zahnradbahnen, Dokumentation, Ausgabe vom 31.03.2010

Begriffe

Aufkanten (Meisseln)	Einhacken scharfer Triebzahnrad Kopfkanten im oberen Teil der Zahnstangen Zähne (Lamellenzähne).
Aussereingriffkommen	Zahn-Paar, das nicht mehr im Eingriff ist.
Aufsteigen, Aufklettern	Das Zahnrad gleitet nicht in die Zahnücke ein, sondern kantet ein und steigt auf die Zahnstangenzähne auf.
BAV	Bundesamt für Verkehr
Bz	Bremszahnrad
Einfluss Zahnreibung	Beim Beginn des Eingriffs addiert sich die Reibungskraft zum geometrisch bedingten Zahnauftrieb.
Eindringdauer	Ermittelter Wert «l» abhängig von Raddurchmesser. Er dient zur Beurteilung der Eingriffsverhältnisse.
Eingriffsdauer «e»	Überdeckungsgrad-Wert «e», abhängig von Raddurchmesser und Abstand Zahnkopf – Zahnfuß, dient zur Beurteilung der Eingriffsverhältnisse.
Eingriffslinie	Bei neuer korrekter Verzahnung wandert der Berührungspunkt der Zähne auf der Eingriffslinie, die auf einer Geraden senkrecht zur Zahnflanke verläuft und durch den Punkt P_R auf dem Teilkreis geht.
Eingriffsverhältnis	Verlauf Eingriffsdauer und Eindringdauer bei Radabnutzung.
FxL	Horizontale Krafteinwirkung am Bolzen der Lamelle.
FzL	Vertikale Krafteinwirkung am Bolzen der Lamelle.
Kopf auf Kopf/Kopftreffer	Die Zahnradzähne laufen auf den Zahnköpfen der Zahnstange oder Lamelle, bis sie wieder eine Lücke finden.
Sicherheitskritische Komponenten	Sicherheitskritische Komponenten sind Komponenten, bei denen im Falle eines funktionellen Ausfalls unmittelbar mit der realistischen Gefahr eines schweren Unfalls ¹ zu rechnen ist.
SOK	Schienenoberkante
Tz	Triebzahnrad
Zahnauftrieb	Kräftepiel zwischen Zahnstange und Zahnrad.

¹ Definition gemäss Art. 3, Abs. 12 der Richtlinie (EU) 2016/798 über die Eisenbahnsicherheit.

1 Sachverhalt

1.1 Ort des Ereignisses

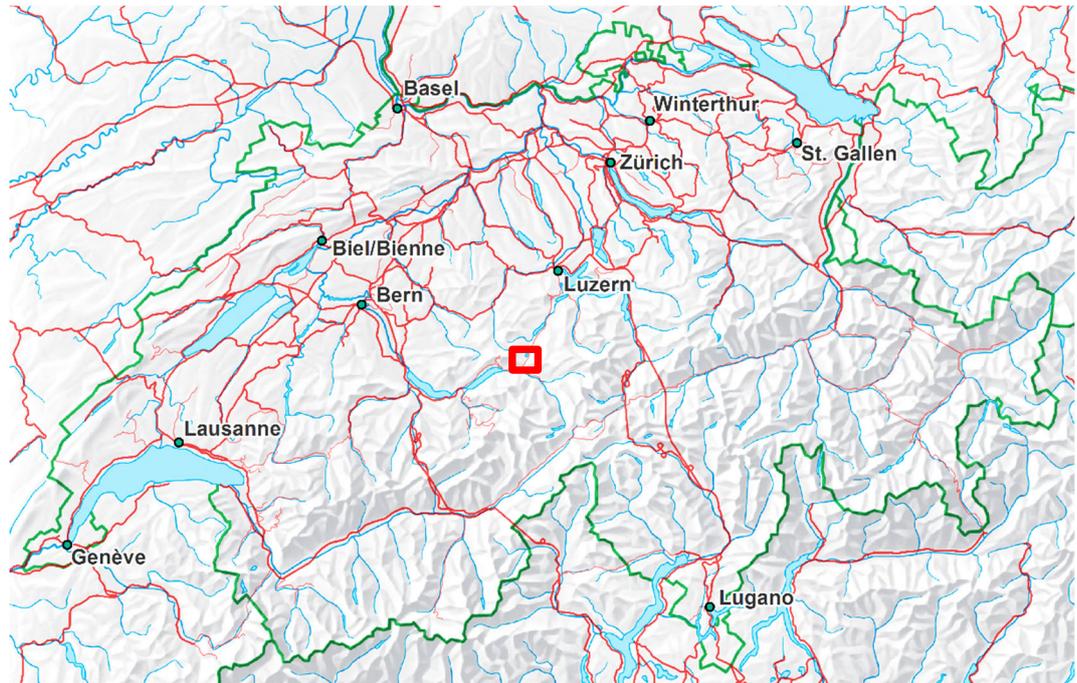


Abbildung 1: Übersichtskarten zum Ort des Ereignisses.

Quelle der Karte: Bundesamt für Landestopografie.

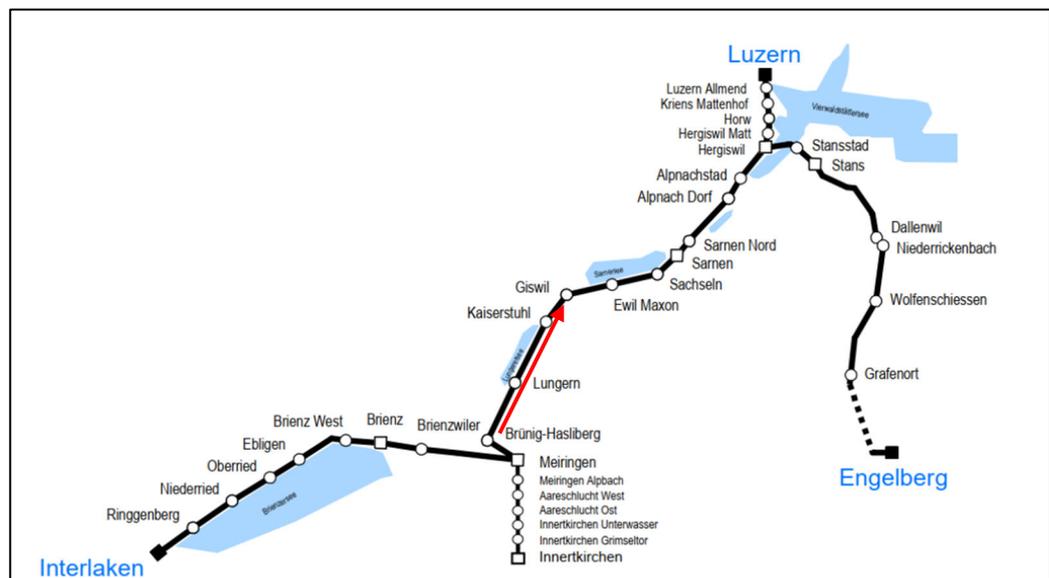


Abbildung 2: Netzkarte Zentralbahn (Quelle: zb).

Roter Pfeil: Talferfahrt Brünig-Hasliberg–Giswil.

1.2 Vorgeschichte

Der Zug 2919 der Zentralbahn (zb), bestehend aus dem 7-teiligen, elektrischen Triebzug Adler 150-104, verkehrte am 6. März 2021 von Interlaken in Richtung Luzern.

1.3 Ablauf des Ereignisses

Bei der Talfahrt von Brünig-Hasliberg in Richtung Giswil (Abbildung 2) verspürte der Lokführer (Lf) Längsbewegungen in seinem Zug. Nach dem Bahnhof Kaiserstuhl zeigte das Fahrzeugleitsystem eine Störung beim Stromrichter 1 an. Der Lf reduzierte die Geschwindigkeit auf 20 km/h.

In Giswil hielt der Lf an und führte, in Absprache mit dem Piketteam der zb, einen «Fahrzeug Reset» durch. Danach verlief die Fahrt bis zum Bahnhof Luzern normal. In Luzern meldete das Zugpersonal, dass die Fahrt in den Zahnstangenabschnitten unruhig war.

Ein ab Giswil bergwärts fahrender Lf sichtete Teile von Zahnrädern auf dem Gleisbett und verständigte die Leitstelle. Die Infrastrukturmitarbeiter der zb rückten unmittelbar aus. Dabei wurden zwischen Giswil und Brünig-Hasliberg zahlreiche Fahrzeugteile gefunden und Beschädigungen an der Zahnstange festgestellt.

Eine Untersuchung am Triebzug 150-104 zeigte, dass die Hälfte des Triebzahnrades des Zahnradrehgestelles 1 fehlte.



Abbildung 3: Eingesammelte Teile des gebrochenen Zahnrades sowie dessen Verschallung.

1.4 Schäden

1.4.1 Personen

Keine

1.4.2 Infrastruktur

Die Infrastrukturmitarbeiter der zb stellten bei der Gleisbegehung auf den Zahnstangenabschnitten zwischen Brünig-Hasliberg und Giswil Folgendes fest:

Die ersten Spuren an der Zahnstange finden sich kurz unterhalb der Zahnstangeneinfahrt Brünig-Hasliberg (Seite Giswil). Es handelt sich hierbei um Beschädigungen am Kopf der bergseitigen Zahnflanken. Weniger Meter unterhalb des Einfahrsignals Brünig-Hasliberg (km 39.841) wurde das erste abgebrochene Zahnradsegment gefunden.

Etwas weiter talwärts findet sich der erste, starke Kopftreffer. Der Zahn der Riggenbachzahnstange ist nach unten in Talrichtung verbogen und tordiert und weist eine sehr tiefe (ca. 8 mm) Einschlagsspur am Kopf auf. Unterhalb dieser ersten Schadenstelle bestehen in regelmässigen Abständen von 21–22 Zähnen weitere Kopftreffer (Abbildung 4).



Abbildung 4: Beschädigung der Zahnstange auf der Strecke. Fahrrichtung talwärts (Quelle: zb).

Abbildung 5: Zahnradteile (Quelle: zb).

1.4.3 Fahrzeuge

Das Triebzahnrad des Zahnradrehgestells 1 wurde zerstört und Teile des Antriebs sowie des Drehgestells wurden beschädigt.

1.5 Beteiligte und betroffene Personen

1.5.1 Bahnpersonal

1.5.1.1 Lokführer Zentralbahn

Person	Lokführer Jahrgang 1969
Berechtigung	BAV-Ausweis vorhanden

1.6 Beteiligte und betroffene Unternehmen

1.6.1 Infrastrukturbetreiberin

Zentralbahn (zb) AG, Stansstad

1.6.2 Eisenbahnverkehrsunternehmen

Zentralbahn (zb) AG, Stansstad

1.6.3 Fahrzeughalter

Zentralbahn (zb) AG, Stansstad

1.7 Zahnradsystem

1.7.1 Grundlagen

Das Zahnradsystem besteht fahrzeugseitig aus Trieb- und Bremszahnradern und infrastrukturseitig aus Zahnstangenstrecken. Für Bahnen mit gemischtem Adhäsions- und Zahnradbetrieb sind spezielle Einfahrssysteme notwendig. In der Schweiz und auch im Ausland sind verschiedene Ausführungen vorhanden.

Zahnradantriebe sind komplex und erfordern genaue Konstruktions- und Funktionsgrundsätze. Dies gilt auch für die Antriebe und die Schnittstellen Zahnrad-Zahnstange der Zahnradbahnen. Die Zahnstange ist im Prinzip ein Zahnrad mit unendlich grossem Teilkreisdurchmesser.

Die Evolventenverzahnung ist eine Verzahnungsart für Zahnräder. Diese Verzahnungsart ist tolerant gegenüber kleinen Änderungen der Zahnradachsendistanz als Folge der Radabnutzung. Die Flanken der Zahnstangenzähne entsprechen einer Geraden mit Steigung 1:4 oder 14.05° , vom Zahnkopf her gesehen.

1.7.2 Zahnstangeneinfahrt der Zentralbahn

Um das Einfädeln der Zahnräder in die Zahnstange zu ermöglichen, wurde infrastrukturseitig bei der Zentralbahn eine bestehende Konstruktion ergänzt und weiterentwickelt.

Kurze Beschreibung der Teile und ihrer Funktionen:

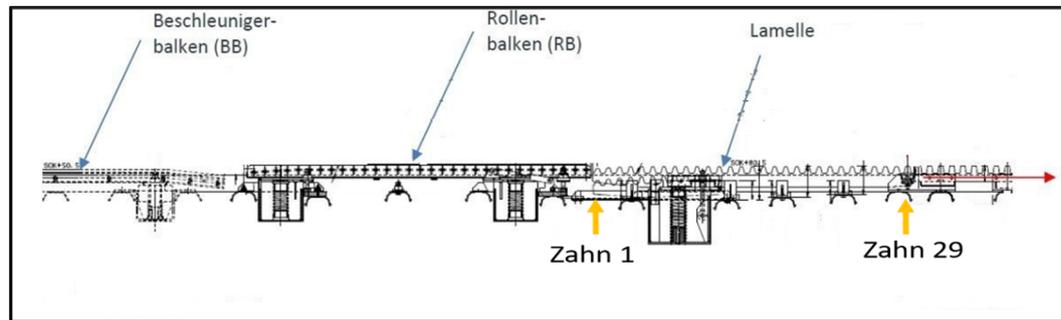


Abbildung 6: Zahnstangeneinfahrt. Roter Pfeil: Einfahrt in die feste Zahnstange (Quelle: zb).

- Beschleunigerbalken: Für den Antrieb der nicht drehenden Bremszahnräder.
- Rollenbalken (Synchronisiereinheit): Verstärkte Konstruktion für das Synchronisieren der Bremszahnräder und mehrheitlich auch der separat angetriebenen Triebzahnräder der Adler- und Fink-Triebzüge ABeh 150/160.
- Einfahrlamelle, Länge 2890 mm mit 29 Zähnen: Für das Einfahren und Eingreifen in die Zahnstange für Achsantriebe mit gemeinsamen, in der Einfahrphase verkuppelten Adhäsions- und Zahnradantriebe (Lokomotiven), sowie für die separaten Zahnradantriebe der ABeh 150/160, falls sie vorgängig noch nicht synchronisiert wurden.
- Feste Zahnstange (roter Pfeil) als breite Lamelle ausgeführt für den Übergang in die Leiterzahnstange vom Typ Riggerbach und Anlenkung der Einfahrlamelle mit einem Bolzen.

1.7.3 Funktionsbeschreibung der Einfahrlamelle – Herausforderung

Das Grundprinzip dieser Einfahrlamelle wurde 1930 für verkuppelte Antriebe Adhäsion und Zahnrad der elektrischen Lokomotiven der Visp-Zermatt Bahn entwickelt. Die Lamelle ist einseitig gefedert und mit einem Bolzen an der festen Zahnstange verbunden. Die Höhe der Zähne nahm gegen die feste Zahnstange hin kontinuierlich zu und die Zahnteilung änderte sich von Über- oder Untermass (Teilungsfehler) zu Normalmass.

Auch musste die Federung (Abbildung 41) relativ schwach sein, um auch mit leichten Fahrzeugen einfahren zu können. Eine erste Verbesserung wurde erreicht mit der Anordnung eines gefederten Beschleunigungsbalkens vor der Lamelle. Dies, um die nicht drehenden Bremszahnräder anzutreiben und um Schläge und vorzeitige Abnützungen der Lamelle und Bremszahnräder zu vermeiden. Eine weitere Verbesserung war die Entwicklung eines ebenfalls gefederten Rollenbalkens zwischen Beschleunigungsbalken und Einfahrlamelle. Dies ermöglichte die genaue Synchronisation der Bremszahnräder und nicht starr verkuppelter Zahnradantriebe. Somit konnten die schwachen Lamellenfedern verstärkt werden, was der Lamelle eine verbesserte Stabilität brachte.

Das Problem bestand schon immer beim Ausfahren mit erhöhter Geschwindigkeit. Insbesondere bei Teilungsfehlern und abweichenden Zahnformen gerieten die Triebzahnräder in Aussereingriff und ratterten über die Lamelle, was grossen Lärm und schnellen Verschleiss verursachte.

Der Verschleiss fand vor allem an der Lamelle statt, da die Achsantriebe der SLM sehr robust waren und solchen Beanspruchungen ohne wesentlichen Schaden

standhielten. Dies war einer der Hauptgründe für die Entwicklung und erfolgreiche Anwendung neuer Einfahrlamellensysteme ohne Teilungsfehler, welche die Entstehung von Kopftreffern vermieden.

1.8 Infrastruktur

1.8.1 Bahnanlage

1.8.1.1 Beschreibung

Auf dem Netz der Zentralbahn sind zehn Zahnstangenein- bzw. -ausfahrten installiert (Abbildung 7).

Die Entgleisung einer HGe-Lokomotive auf der Zahnstangeneinfahrt in Engelberg am 20. Januar 2015 infolge eines gebrochenen Rollenbalkens bildete den Auslöser für ein Projekt zur Optimierung der Zahnstangeneinfahrten auf dem Netz der zb.

Ende 2018 wurde entschieden, alle Einfahrten auf dem Netz der zb auf einen neuen, von der zb ausgearbeiteten Standard umzubauen.

Mit einem vereinfachten Nachweis-Verfahren erteilte das BAV im September 2019 die Erlaubnis, die Einfahrten auf den neuen Standard umzubauen.

Im Dezember 2019 wurde die Einfahrt Meiringen als Pilotinstallation umgebaut und überwacht. Zwischen April und September 2020 wurden die anderen neun Einfahrten auf den neusten Standard umgebaut.

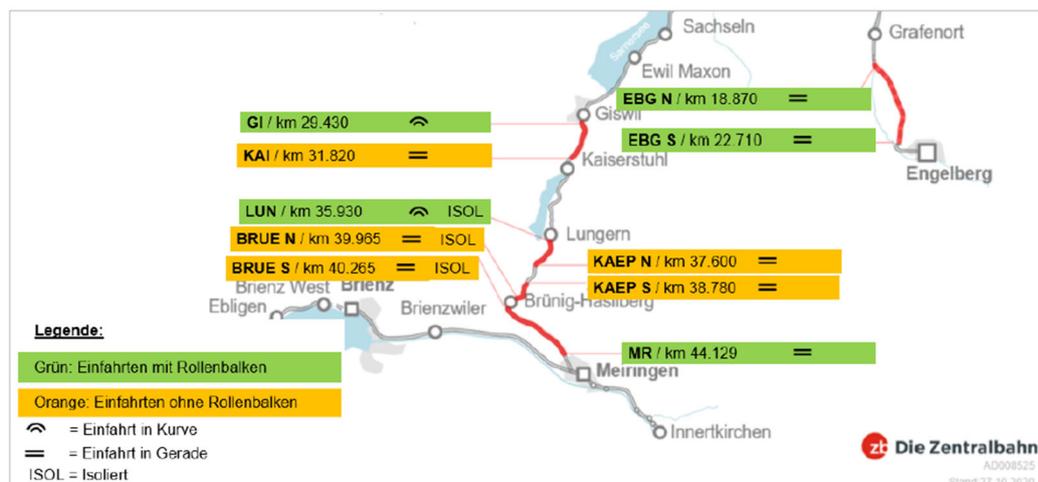


Abbildung 7: Zahnstangeneinfahrten auf dem Netz der zb. Rot Zahnstangenstrecken (Quelle: zb).

1.8.1.2 Feststellung

Am 11. März 2021 und am 22. April 2021 besichtigte und dokumentierte die SUST den Zustand der Lamellen in Giswil und Lungern.

Am 18. Mai 2021 besichtigte die SUST alle Zahnstangenein- und -ausfahrten der Brüniglinie.

Insbesondere die zwei Ein- und Ausfahrten in Giswil und Lungern, die in einer Kurve und in einer Steigung eingebaut sind, wiesen starke Beschädigungen an der Lamelle auf.

1.8.1.3 Zahnstangeneinfahrt Giswil

Die Einfahrlamelle in Giswil wurde am 5. Januar 2021 ersetzt, nachdem ein schadhafes Zahnrad diese stark beschädigt hatte. Bei der Besichtigung am 11. März 2021 (Abbildungen 8 und 9) wies die Einfahrlamelle nach einer zweimonatigen Betriebszeit starke Abnutzungsspuren im oberen Bereich der Zähne auf.

Die ersten Marken in Ausfahrriechtung sind ab den Zähnen 26–25 auf der Bergseite der Zähne sichtbar. Dann nimmt die Abnutzung der Zähne talseitig zu. Ab Zahn 20 wiesen die Zahnköpfe starke Beschädigungen und Abnutzungen auf (Abbildung 9).

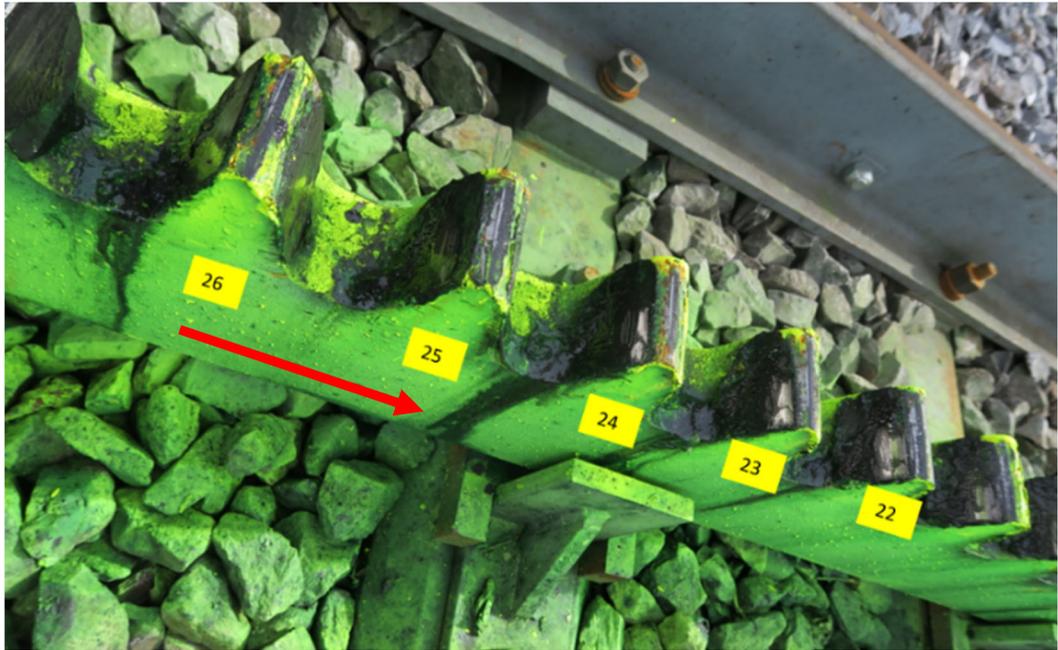


Abbildung 8: Übersicht Einfahrlamelle Giswil Zähne 26–22. Roter Pfeil: Fahrriechtung talwärts.

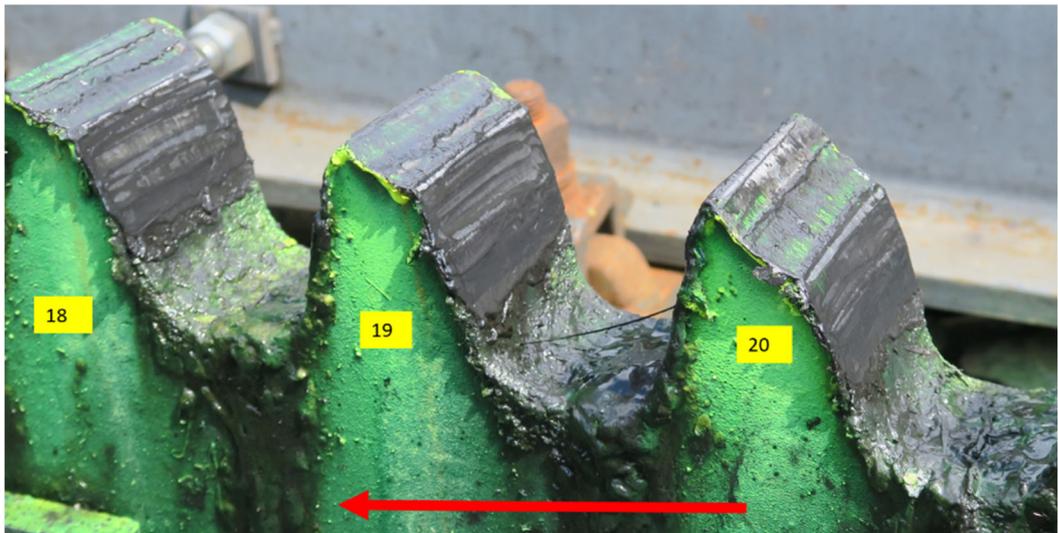


Abbildung 9: Einfahrlamelle Giswil. Details Abnutzung der Zahnköpfe 20–18. Roter Pfeil: Fahrriechtung talwärts.



Abbildung 10: Einfahrlamelle Giswil. Details Abnutzung der Zahnköpfe 23–20. Meissel­spuren am Zahnkopf. Roter Pfeil: Fahr­richtung talwärts.

1.8.1.4 Zahnstangeneinfahrt Lungern

Die erste Marke ist auf der Bergseite des Zahnes 26 sichtbar. Die Zähne 25–23 wiesen starke Abnutzung am Zahnkopf auf (Abbildung 11). Dann nimmt die Abnutzung an der Talseite der Zähne zu.

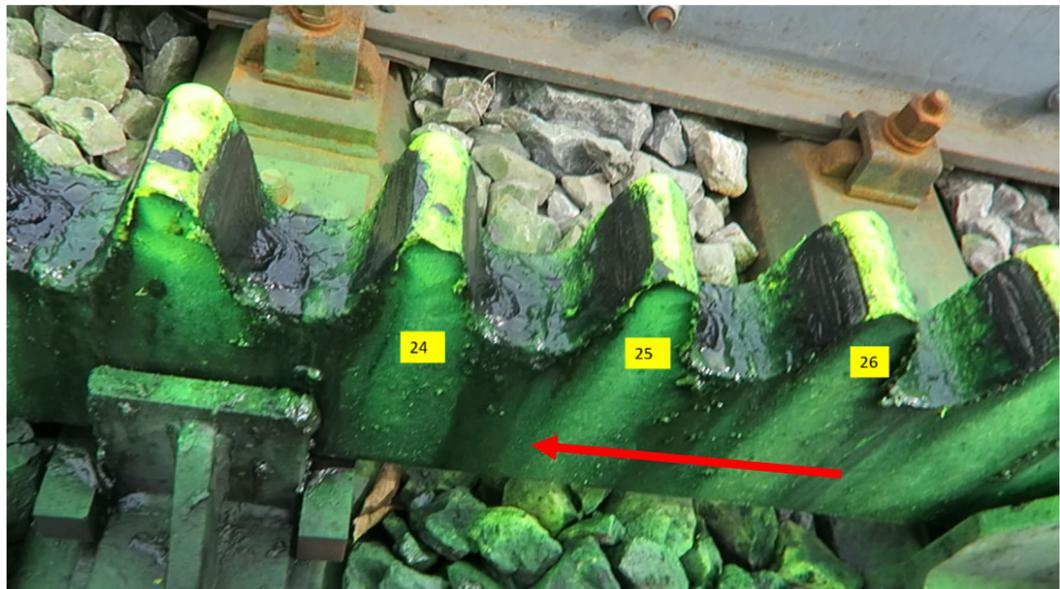


Abbildung 11: Einfahrlamelle Lungern mit Spuren an den Zähnen 26–24. Die Lamelle wies eine Betriebszeit von ca. 4 Monaten auf. Roter Pfeil: Fahr­richtung talwärts.

Die Eingriffstiefe des Zahnrades in die Lamelle ist gering (Abbildung 12). In der Ruhelage der Lamelle ist noch ein beträchtliches Spiel (ca. 30 mm) zwischen Zahnkopf des Zahnrades und Zahngrund der Lamelle vorhanden.

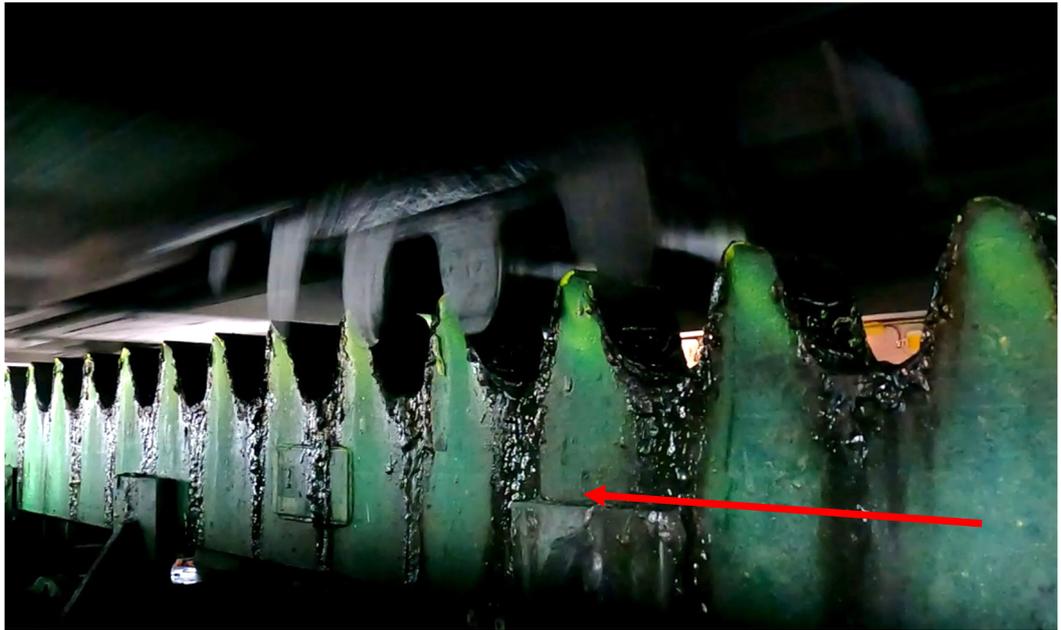


Abbildung 12: Zahneingriff mit der Lamelle in Ruhelage. Roter Pfeil: Fahrrichtung talwärts.

1.9 Fahrzeuge

1.9.1 Übersicht

1.9.1.1 Adler- und Fink-Triebzüge

Die siebenteiligen Adler-Triebzüge ABeh 150 (Abbildung 14) bestehen aus zwei Triebmodulen (A-C-B) mit je einem Führerraum und einem dazwischen eingereihten Bistrowagen (WR). Die Triebwagenzüge können auch in Vielfachtraktion (Abbildung 13) mit einem dreiteiligen Fink-Triebzug ABeh 160 eingesetzt werden (Abbildung 16).

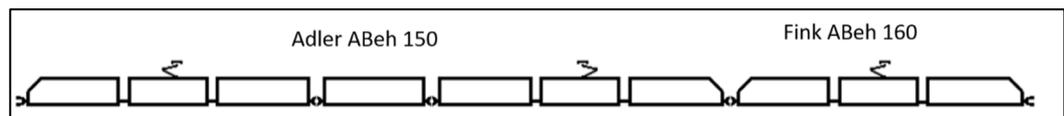


Abbildung 13: Adler- und Fink-Triebzug in Vielfachtraktion.

1.9.1.2 Adler-Triebzug

Ein sieben teiliger Adler-Triebzug verfügt über vier Adhäsionstriebdrehgestelle, vier Zahnradtriebdrehgestelle (1 Triebzahnrad und 1 Bremszahnrad pro Drehgestell), und zwei Laufdrehgestelle mit Bremszahnrad (Abbildung 15).



Abbildung 14: Adler-Triebzug (Quelle: zb).

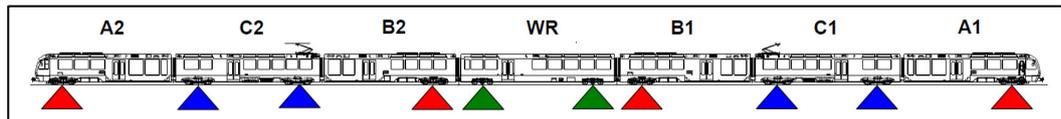


Abbildung 15: Adler-Triebzug Konfiguration Drehgestell (Quelle: Stadler).

Rotes Dreieck: Adhäsionstriebdrehgestell

Blaues Dreieck: Zahnradtriebdrehgestell

Grünes Dreieck: Laufdrehgestell mit Bremszahnrad.

Wichtige technische Merkmale des Adler-Triebzuges:

- Der Achsabstand im Zahnrad Triebdrehgestell beträgt 2380 mm.
- Höchstgeschwindigkeit auf der Zahnstange (gemäss den betrieblichen Anforderungen für das Fahrzeug):
 - 40 km/h bergwärts
 - 27.5 km/h talwärts bei 120 ‰ Gefälle
 - 29.5 km/h talwärts bei 105 ‰ Gefälle
 - Maximale Einfahrgeschwindigkeit in den Zahnstangenabschnitt: 10 km/h (mit ausgeschaltetem Stromrichter 5 km/h)

Die Synchronisation der Zahnradantriebe mit der Fahrgeschwindigkeit des Zuges erfolgt über die Ist-Geschwindigkeit der Fahrzeuge und ist für die Einfahrten mit einer leicht überhöhten Drehzahl geregelt.

1.9.1.3 Fink-Triebzug

Der Fink-Triebzug ABeh 160 (Abbildung 16) umfasst ein einziges Triebmodul. Er verfügt über zwei Adhäsionstriebdrehgestelle und zwei Zahnradtrieb-drehgestelle (Abbildung 17).



Abbildung 16: Fink-Triebzug (Quelle: zb).

Die Hauptmerkmale eines Fink-Triebzuges entsprechen denen eines Adler-Moduls.

Die Länge über Kupplung eines 3-teiligen Fink-Triebzuges beträgt 54 m.

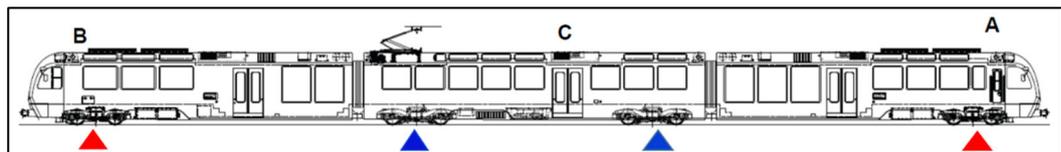


Abbildung 17: Fink-Triebzug – Konfiguration Drehgestell (Quelle: Stadler).
Rotes Dreieck: Adhäsion Triebdrehgestell;
Blaues Dreieck: Zahnrad Triebdrehgestell.

1.9.2 Triebmodul

1.9.2.1 Kurzbeschreibung

Jeweils drei mit einem Gelenk miteinander verbundene Wagenkästen bilden ein Triebmodul mit einer vollständigen Traktionsausrüstung (Abbildung 18). Diese ist ab dem Stromrichter (SR) redundant aufgebaut.

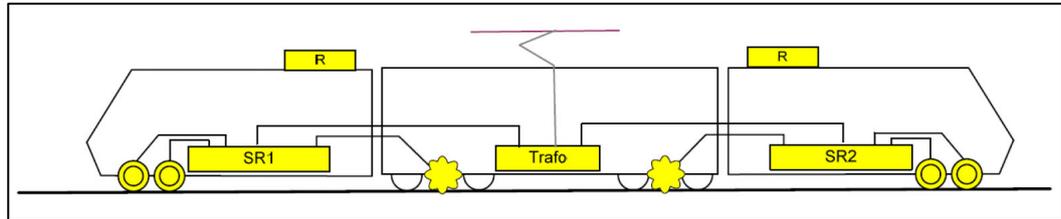


Abbildung 18: Fahrzeugkonfiguration elektrischer Antrieb (Quelle: Stadler).

Die elektrische und die elektropneumatische Bremse werden durch einen Bremsrechner gesteuert. Prioritär wird die elektrische Bremse eingesetzt. Nach Bedarf wird zusätzlich die elektropneumatische Bremse automatisch angesteuert.

1.9.2.2 Triebzahnrad

Im Unterschied zu den bis anhin angewendeten, kombinierten Antrieben für den Zahnrad- und Adhäsionsbetrieb (Abbildung 19) ermöglicht der nun separate Antrieb der Triebzahnräder sechs Nachstellungen der Höhenlage des Triebzahnrades nach einer gewissen Abnutzung der Raddurchmesser, damit der Radverschleiss kompensiert werden kann (Abbildung 20).

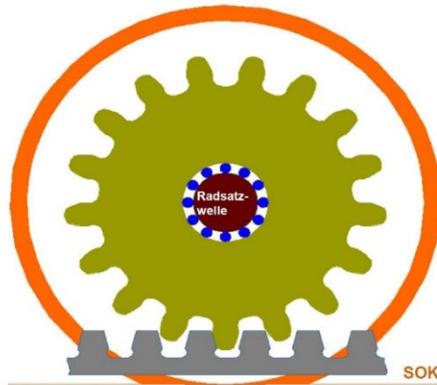


Abbildung 19: Triebzahnrad fest auf der Achse gelagert.

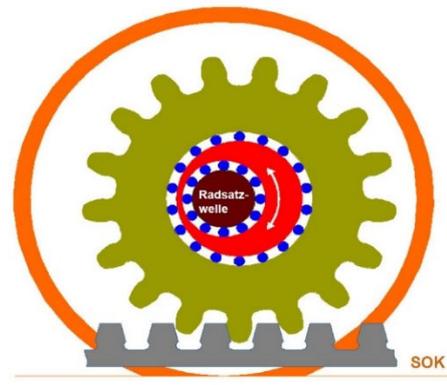


Abbildung 20: Verstellbares Triebzahnrad.

Dies wird mit einer Exzenterlösung bei der Lagerung der Triebzahnräder auf der Radachse ermöglicht. Die Raddurchmesser betragen maximal 820 mm bis minimal 750 mm. Nach 10 mm Abnutzung im Raddurchmesser wird nachgestellt. Dies erfolgt bis zur vollen Abnutzung sechs Mal. Ziel dieser Lösung ist, eine längere Abnutzungsdauer der Räder zu gewährleisten und den Einfluss der Eingriffstiefe auf maximal 5 mm im Radius zu beschränken.

Der innere Durchmesser des Triebzahnrad ist, bedingt durch die Exzenterlösung und infolge des Kranzquerschnitts an der engsten Stelle, geringer als der Durchmesser, respektive der Kranzquerschnitt, bei direkt auf der Achse fest gelagerter Triebzahnrad², z. B. die der Lokomotiven HGe 4/4 II (Anlage 2, Abbildung 46).

Der Querschnitt eines fest auf der Achse gelagerten Triebzahnrad (Lokomotive HGe II) ist um 155 % grösser als der Querschnitt eines verstellbaren Triebzahnrad (Anlage 2, Abbildung 46).

1.9.2.3 Eingriffsdauer Adler- und Fink-Triebzüge, Lokomotive HGe II, Teilkreis

Gemäss den Regeln der Technik, den Vorschriften der AB-EBV und den Vorgaben der D RTE 29700 sollte die Eingriffsdauer $e \geq 1.15$ betragen. Der Teilkreis des Zahnrad und die Teillinie der Zahnstange (Abbildungen 38 und 39 sowie Anlage 6, Abbildungen 51–54) müssen sich bei halb abgenutzten Radbandagen und Nennhöhe der Zahnstange decken und dies auf der Normhöhe der Teillinie, die bei der zb auf 62.5 mm über SOK definiert ist.

Adler- und Fink-Triebzüge

Bei neuen Bandagen oder Nachstellung mittels Exzenter beträgt die Eingriffsdauer $e = 1.01$. Bei abgenutztem Rad, respektive vor dem Nachstellen beträgt sie $e = 1.22$.

Der Teilkreis des Zahnrad liegt bei halb abgenutzten Bandagen bei 74.3 mm über SOK.

Lokomotive HGe II

Bei neuen Bandagen beträgt die Eingriffsdauer einer Lokomotive HGe 4/4 II $e = 1.38$ und bei abgenutzten Bandagen $e = 1.46$.

Der Teilkreis des Zahnrad liegt bei halb abgenutzten Bandagen bei 62.7 mm über SOK.

1.9.2.4 Tangentialfederung (Anlage 1, Abbildung 44)

Die Funktion der Tangentialfederung wird im Regelwerk D RTE 29700 Systemtechnik Zahnradbahnen, Kapitel Aufgaben der Tangentialfederung an Triebfahrzeugen, wie folgt beschrieben:

Der Zahneingriff Triebzahnrad/Zahnstange unterscheidet sich aus verschiedenen Gründen vom idealen Zustand eines konventionellen Zahnradgetriebes:

- *Teilungsfehler in der Zahnstange, montagebedingt und infolge von Wärme-dehnung im Oberbau.*
- *Abnützungen am Zahnrad und an der Zahnstange, welche Ungleichförmigkeiten im Antrieb verursachen (Verzahnungs-Kinematik).*
- ...

Weitere Aufgaben der Tangentialfederung:

- *Abfederung des Antriebs bei Zahnstangen-Ein- und Ausfahrten und beim Ansprechen der Rutschkupplung.*
- *Herstellen einer gewissen, wenn auch schwer definierbaren Elastizität für starrverkuppelte Antriebe.*

² Fest gelagertes Triebzahnrad: Entwicklung der ehemaligen SLM (Schweizerische Lokomotiv- und Maschinenfabrik).

1.9.2.4.1 Verstellbares Triebzahnrad bei Adler- und Fink-Triebzügen

Die Adler- und Fink-Triebzüge haben pro Zahnrad sechs Tangentialfedern. Das System ermöglicht ein maximales Tangentialspiel von 11.5 mm.

1.9.2.4.2 Lokomotive – fest gelagertes Triebzahnrad

Die Lokomotiven vom Typ HGe 4/4 II Lokomotiven haben acht Federkammern und ein maximales Tangentialspiel von 23 mm.

1.9.2.5 Feststellung Triebzahnrad

Triebzahnrad nutzen sich im Verlauf der Nutzungsdauer an den Zahnflanken ab. Dadurch verringert sich der Radius am Zahnkopf (Abbildung 21 und Anlage 4, Abbildung 49) und es kann eine scharfe Kante entstehen (Abbildung 22). Bei einem weiteren Triebzahnrad (Triebzahnrad 3, Kapitel 1.11.3.4) wiesen alle Zähne scharfe Kanten auf. Das Zahnrad wies eine Laufleistung (Adhäsion und Zahnrad) von ca. 800 000 km auf. Die Flanken der Zähne waren noch nicht komplett abgenutzt.

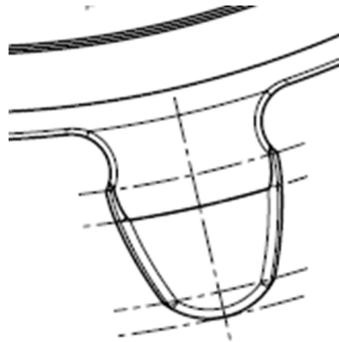


Abbildung 21: Zahn mit Evolvente und Radius von 17 mm am Zahnkopf (Neuzustand).

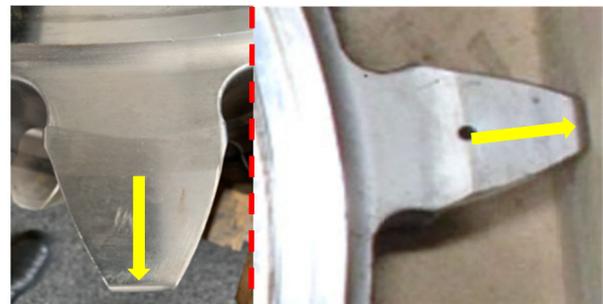


Abbildung 22: Fotos des Triebzahnrades 3 bevor die metallurgische Untersuchung stattfand: Scharfe Kanten am Zahnkopf anstelle eines Radius von 17 mm.

1.10 Auswertung der Datenaufzeichnung

1.10.1 Fahrdaten

1.10.1.1 Fahrdaten des Zuges

Die Fahrdaten des Zuges 2919 vom 6. März 2021 wurden geprüft. Alle Vorgaben an Parameter wie Geschwindigkeit, Betriebsartumschaltung, Bremsvorgänge wurden einwandfrei eingehalten.

Nach der Zahnstangeneinfahrt in Kaiserstuhl wurde zweimal aus einer Geschwindigkeit von 26 km/h auf 20 km/h reduziert. Danach fuhr der Zug konstant mit 20 km/h bis Giswil.

1.10.1.2 Auswertung von verschiedenen Fahrten (mehrere Fahrzeuge)

Die Fahrdaten verschiedener Fahrzeuge bei unterschiedlichen Zahnstangenein- und -ausfahrten wurden stichprobenmässig geprüft. Sämtliche Einfahrten wurden mit Geschwindigkeiten von maximal 10 km/h gefahren. Die Betriebsartumschaltung wurde sowohl bei den Ein- wie bei den Ausfahrten immer kurz nach der Zugbeeinflussungs-Balise vorgenommen.

Ein spezielles Augenmerk wurde auf den Einsatz der Bremsen bei der Ausfahrt in Lungern und Giswil gelegt. Es wurde kein ungewöhnlicher Einsatz der Bremsen während des Ausfahrtvorgangs festgestellt.

1.11 Besondere Untersuchungen

Die ersten Feststellungen am defekten Triebzahnrad sowie weitere Kontrollen an verschiedenen, identischen Fahrzeugen ergaben, dass die Zähne starke Abnutzungsspuren sowie bläuliche Verfärbungen der Zahnköpfe aufwiesen. Dies weist auf eine starke Erwärmung hin, die nur bei Kopftreffer mit einem Zahnstangenelement entstehen kann.

Die Inspektion der Zahnstangenabschnitte zeigte, dass nur die Einfahrlamellen Verformungen an den Zahnspitzen aufwiesen. Die Verformungen sowie die sichtbaren Erwärmungsspuren an den Zahnradern der Adler- und Fink-Fahrzeuge deuten auf eine hohe Energieübertragung hin. Zusätzliche Untersuchungen waren notwendig, um festzustellen, unter welchen Bedingungen diese Schäden auftreten konnten. Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln dargelegt.

1.11.1 Vorfall im Jahr 2020 – Triebzahnradriss

Im Januar 2020 wurde während den regulären Instandhaltungsarbeiten ein Riss an einem Zahnrad eines Triebzuges festgestellt (Abbildungen 23 und 24).

Das Zahnrad (Jahrgang 2013) wies eine Laufleistung von ca. 883 000 km auf.

Der Aufbau und die Bezeichnungen der Teile des Tangentialfederungssystems sind in der Anlage 1, Abbildung 44 ersichtlich.

Das Zahnrad wurde von der zb ausgebaut und einer metallurgischen Untersuchung unterzogen. Die Ergebnisse der metallurgischen Untersuchung zeigen Folgendes:

- Der Triebzahnkranz weist einen Bruch im Bereich des Zahngrunds auf (Abbildungen 23 und 24).
- Der Bruch beginnt an der Innenseite des Triebzahnkranzes (Federkammer) ausgehend von einer mechanischen Beschädigung (Abbildungen 25 und 26).



Abbildung 23: Riss am Zahnrad
(Quelle: zb).



Abbildung 24: Detail des Risses
(Quelle: zb).



Abbildung 25: Detail der Federkammer (Quelle: zb).



Abbildung 26: Übersicht über die Bruchfläche mit Rastlinien. Der Bruchausgangsbereich ist rot markiert (Quelle: zb).

Der Federsattel des Tangentialfedersystems (Anlage 1, Abbildung 44) war deformiert (Abbildung 27).



Abbildung 27: Deformierter Federsattel (Quelle: zb).

1.11.2 Finite-Elemente-Methode (FEM) Analyse – Beanspruchung am Zahnrad

1.11.2.1 Generell

Das Ergebnis eines Ermüdungsfestigkeitsnachweises ist der prozentuale Auslastungsgrad eines Bauteils. Ein Auslastungsgrad von 100 % (respektive 1.0) bedeutet eine ideale Ausnutzung des Bauteils. Eine Belastung, die grösser als 100 % (> 1.0) ist, weist auf eine Überlastung hin.

1.11.2.2 Finite-Elemente-Methode (FEM) Analyse

Um die Beanspruchungen am Zahnrad zu ermitteln, führte Stadler verschiedene Analysen sowie einen Ermüdungsfestigkeitsnachweis, quasistatische Berechnungen des Zahnrades und des Federsattels sowie transiente Berechnungen durch.

Nachstehend sind nur die wichtigsten Erkenntnisse ausgeführt:

1.11.2.2.1 Ermüdungsfestigkeitsnachweis

Die Berechnung für den Ermüdungsfestigkeitsnachweis des Triebzahnrades wurde mit den folgenden Lastannahmen durchgeführt:

Beharrung 40 kN – Anfahrzugkraft 75 kN

Der Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit den obigen Lastannahmen (Beharrung und Anfahrzugkraft) führt nicht zu einer überhöhten Belastung des Triebzahnrades. Die Berechnung zeigt, dass eine maximale Ermüdungsauslastung von 0.68 erreicht wird und somit weit unter dem Wert von 1.0 liegt (Abbildung 28).

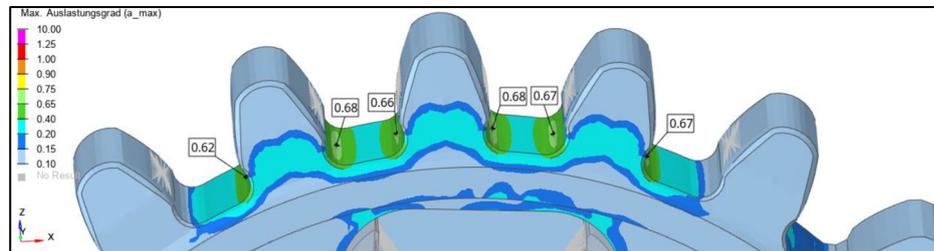


Abbildung 28: Ermüdungsauslastung eines Triebzahnrades (Quelle: Stadler).

1.11.2.2.2 Quasistatische Berechnung des Zahnrades und des Federsattels

Die quasistatische Berechnung vom System Triebzahnrad–Zahnstange wurde unter Berücksichtigung der Charakteristik des Tangentialfedersystems durchgeführt.

Für diese Berechnung wurde der technisch richtige Teilkreiswert, der bei der z_b mit 62.5 mm definiert ist, angenommen.

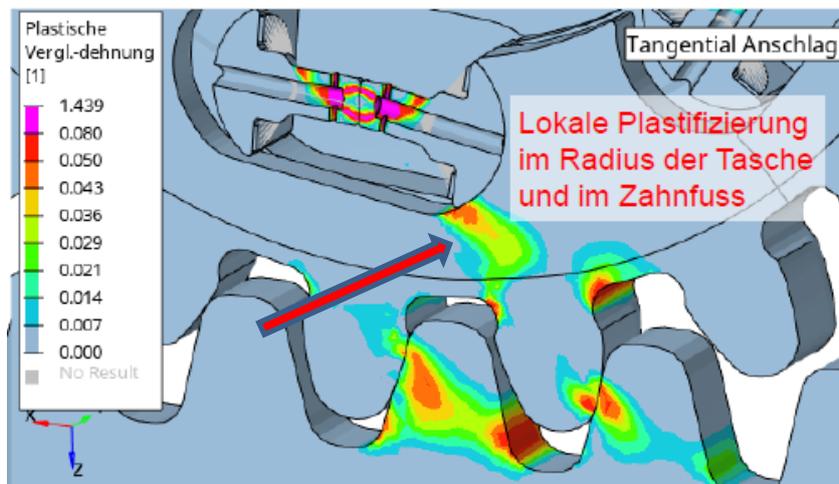


Abbildung 29: Quasistatische Berechnung. Roter Pfeil: Beanspruchung der Federkammer bis zum Zahnfuss (Quelle: Stadler).

Der Federsattelweg von 11.5 mm und die Federkraft von 24.7 kN entsprechen dem Punkt, an dem der Federsattel an den Anschlag kommt (Abbildung 29).

Die Berechnung zeigt, dass ab dem Anschlag bis zu einer Kraft von ca. 70 kN die Deformation des Federsattels linear ist und bis zu einer Kraft von ca. 240 kN weiter linear zunimmt. Ab 240 kN beginnt die plastische Deformation des Federsattels und der Federkammer (Abbildung 30).

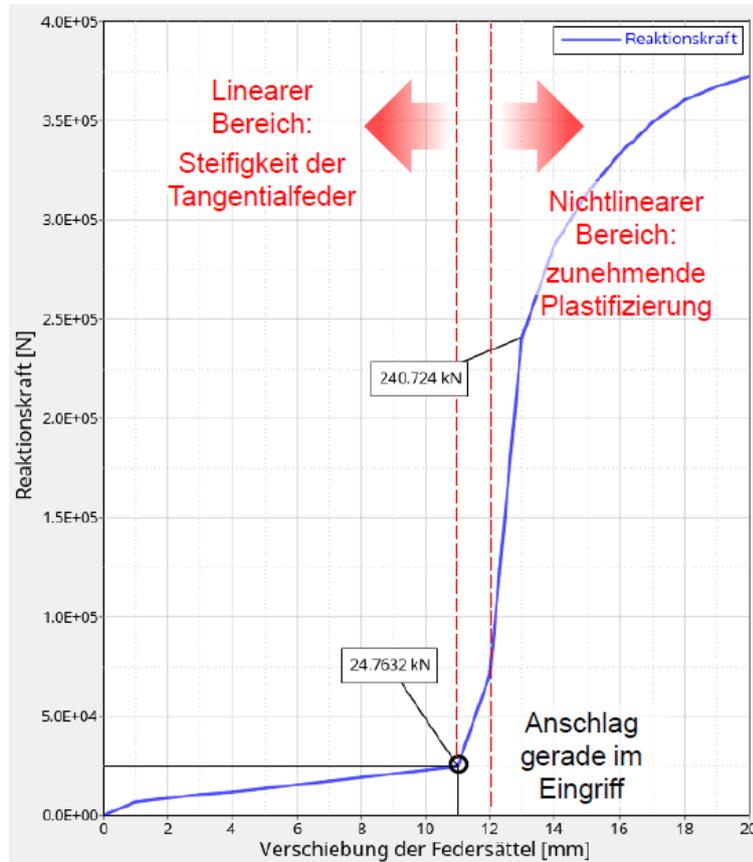


Abbildung 30: Graphik Kraft-Federsattelweg (Quelle: Stadler).

1.11.2.3 Ergebnisse der Beanspruchung am Zahnrad

Die gross gewählte Toleranz der Tangentialfeder ermöglicht zwar die Entstehung einer Kerbe im kritischsten Querschnitt des Zahnkranzes, aber für die Ermüdungslasten wird das Triebzahnrad weiterhin als ermüdungsfest beurteilt.

Die Triebzahnräder sind für den normalen Betrieb dauerhaft dimensioniert.

1.11.3 Metallurgische Untersuchung am Zahnrad

1.11.3.1 Untersuchungsprogramm

Das gebrochene Triebzahnrad 1 vom Adler-Triebzug 150-104 mit den dazugehörigen Tangentialfedern und Federsättel wurde einer Schadensanalyse unterzogen. Dazu wurden noch drei weitere gebrauchte und intakte Triebzahnräder der Rissprüfung unterzogen.

Am gebrochenen Triebzahnrad 1 wurden die mechanischen Eigenschaften bestimmt, die fraktografische Beurteilung der Bruchflächen visuell und mittels Rasterelektronenmikroskop sowie die mechanische Prüfung der Federeigenschaften der sechs Tangentialfedern durchgeführt.

Am Triebzahnrad 2 (Rissanzeige in den Zahnflanken und Delle in einer Federkammer) wurden eine Magnetrisssprüfung sowie eine fraktografische Beurteilung einer Bruchfläche visuell und mittels Rasterelektronenmikroskop durchgeführt.

Die zwei intakten Triebzahnräder (3 und 4) wurden visuell begutachtet und einer Magnetrisssprüfung unterzogen.

1.11.3.2 Triebzahnrad 1

Der Riss begann mittig an der Wand der Federkammer im Übergang vom Radius in den geraden [tangentialen] Teil und breitete sich radial nach aussen in Richtung Zahnkranz aus (Abbildung 31).

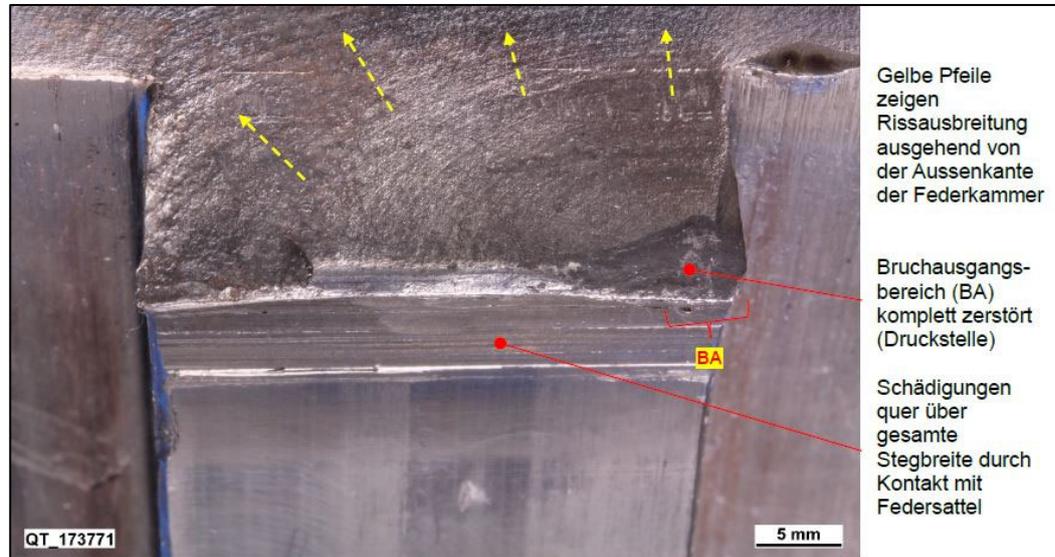


Abbildung 31: Rissausbreitung ausgehend von der Federkammer.

Der Rissausgang befindet sich in einem Bereich, in dem durch die Bauteilauslegung bedingt ein sehr geringer Abstand zwischen der Kammerwand und dem Ende der Tangentialfeder besteht.

Der genaue Bruchausgang lässt sich auf Grund von Sekundärbeschädigungen nicht mehr feststellen, aber es liegen in diesem Bereich Verschleisspuren vor, die auf eine Schädigung der Kammerwand durch die Federsattelkante hinweisen.

Im metallografischen Schliff zeigen sich im besagten Kontaktbereich starke plastische Verformungen und Materialüberlappungen, welche durch ihre spannungskonzentrierende Kerbwirkung als schwingrissinitiierende Oberflächenfehler wirken können.

Die Schwingbruchfläche ist sehr glatt und fein strukturiert und der Restbruchanteil sehr gering, was auf eine niedrige Nennbelastung bei einer hohen Anzahl Lastspiele deutet (high-cycle fatigue / HCF). Demzufolge entstand dieser Bruch im Regelbetrieb relativ langsam über eine längere Zeitspanne.

Die visuelle Begutachtung des Triebzahnrades zeigte in einer der Federkammern mittig an der Wand im Übergang vom Radius in den geraden Teil eine mechanische Verletzung. Diese befindet sich in einem Bereich, in dem durch die Bauteilauslegung bedingt ein sehr geringer Abstand zwischen der Kammerwand und dem Ende der Tangentialfeder vorliegt.

1.11.3.3 Triebzahnrad 2

Die am Triebzahnrad 2 durchgeführte Magnetpulverprüfung zeigte Rissanzeigen in mehreren Zahnflanken (Anlage 3, Abbildung 47).

Die visuelle Begutachtung des Triebzahnrades zeigte in einer der Federkammern mittig an der Wand im Übergang vom Radius in den geraden Teil eine mechanische Verletzung (Abbildungen 32 und 33).



Abbildung 32: Triebzahnrad 2, Delle in Federkammer.

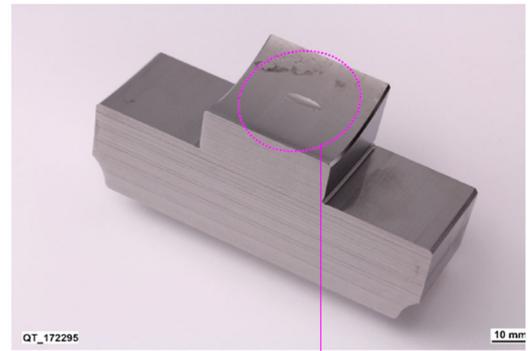


Abbildung 33: Abgetrennter Schadenbereich.

Im metallografischen Schliff zeigten sich im besagten Kontaktbereich starke plastische Verformungen und Materialüberlappungen, welche durch ihre spannungskonzentrierende Kerbwirkung als schwingrissinitiiierende Oberflächenfehler wirken können.

1.11.3.4 Triebzahnräder 3 und 4

Die visuelle Begutachtung zeigte vereinzelt beginnende Oberflächenverletzungen in den Federkammern im Bereich der Federenden und der schmalen Kante der Federsättel. Die Magnetpulverprüfung zeigten keine Rissanzeichen.

1.11.4 Videoaufnahmen Ein- und Ausfahrten in Lungern

Am 17. Mai 2021 zeichnete die SUST in Lungern mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera das Verhalten der Einfahrlamelle bei Ein- und Ausfahrten von Regalzügen auf.

Die verschiedenen Aufnahmen ergaben Folgendes:

Einige Ein- und Ausfahrten führten ohne Kraft zu leichten Bewegungen der Lamelle. Diese verliefen sanft.

In der Ruhelage der Lamelle ist ein auffällig grosses Spiel zwischen Zahnkopf des Zahnrades und Zahngrund der Lamelle sichtbar (Abbildung 34).



Abbildung 34: Zahneingriff eines Triebzahnrades mit der Lamelle in der Ruhelage. Roter Pfeil: Fahrrichtung talwärts.

Bei einer Ausfahrt kam es, wenige Zähne nach dem Bolzen, zu einer Desynchronisation des Triebzahnrades. Beim Zahn 25 kam es zum Kontakt im oberen Bereich des Zahnes (Abbildung 35).

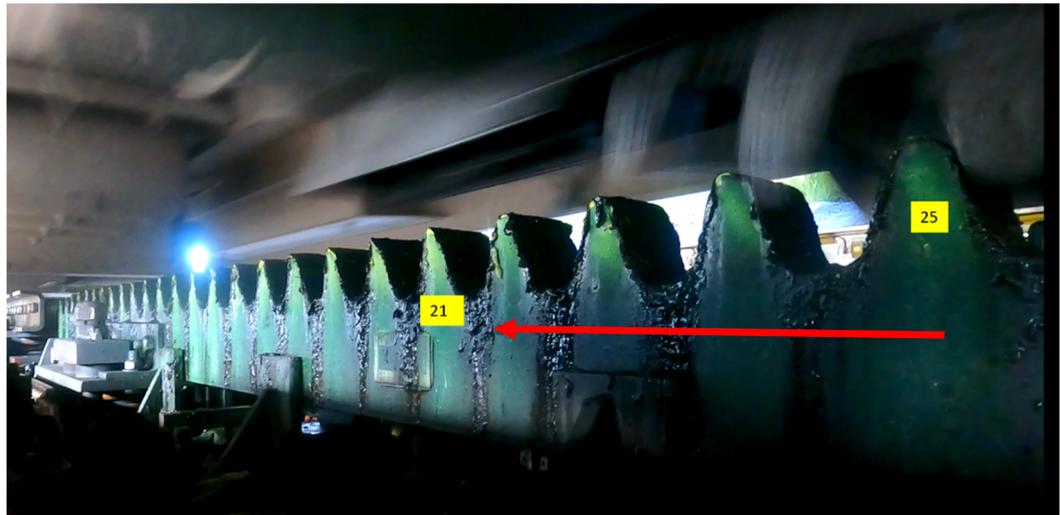


Abbildung 35: Aufnahme einer Ausfahrt: Triebzahnrad schlägt im oberen Bereich des Zahnes 25 auf. Roter Pfeil: Fahrrichtung talwärts.

Die Lamelle wurde stark nach unten gedrückt. Beim Zahn 21 lief das Triebzahnrad auf dem Kopf des Zahnes auf (sogenannter voller Kopftreffer) (Abbildung 36).

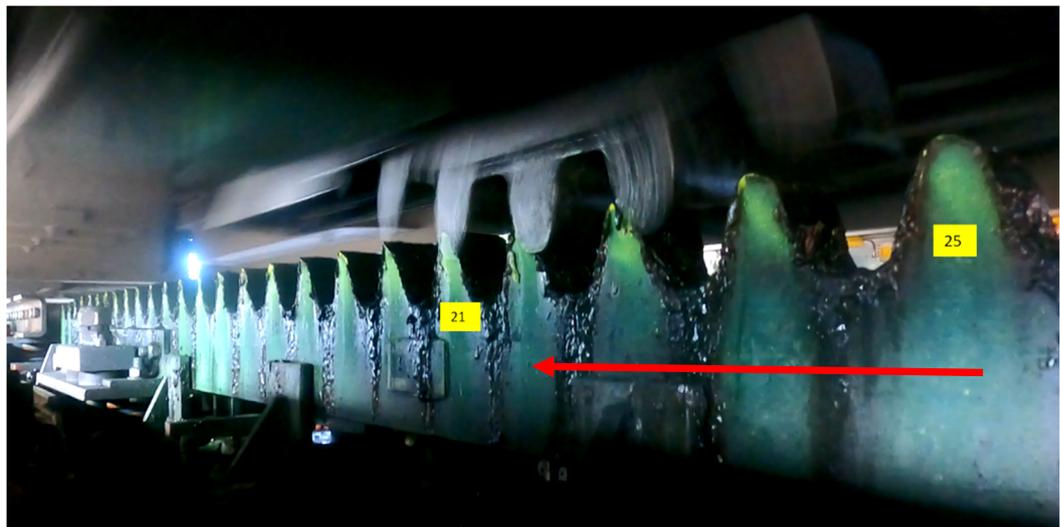


Abbildung 36: Aufnahme einer Ausfahrt: Triebzahnrad schlägt Kopf auf Kopf auf dem Zahn 21. Roter Pfeil: Fahrrichtung talwärts.

Danach gab es über mehrere Zähne keinen Kontakt mehr zwischen dem Zahnkopf des Zahnrades und der Lamelle, bis diese sich schlagartig wieder nach oben bewegte. Im Bereich der Zähne 5 und 6 ereigneten sich dann wieder Kopftreffer.

1.11.5 Messungen an der Zahnstangeneinfahrt in Lungern

Um die dynamischen Kräfte bei der Ein- und Ausfahrt der Zahnstange zu bestimmen, wurden dynamische Messungen durchgeführt. Dafür wurde die Einfahrlamelle in Lungern mit diversen Messelementen (Kraftmessung, Beschleunigungssensor, Videoaufnahme) ausgerüstet.

Die Messsignale wurden synchron über die Zeit aufgezeichnet. Die Geschwindigkeit sowie die Position des Zuges (Radsatzpositionen) wurden mittels Lichtschranken bestimmt. Die Videoaufnahmen wurden mit den Messsignalen synchronisiert. Aus den Messsignalen kann festgestellt werden, bei welchen Zahnrad Durchfahrten erhöhte Belastungen auftreten.

Die Zähne der Lamelle wurden mit Farbe überstrichen, um die Lage der Kontaktpunkte (Zahnrad-Lamelle) nach jeder Durchfahrt zu identifizieren.

Am Tag der Messung (18. Mai 2021) wurden 18 Durchfahrten von Adler- und Fink-Triebzügen aufgezeichnet. Die meisten Ein- und Ausfahrten führten zu sanften Bewegungen der Lamelle.

Die folgenden Ein- und Ausfahrten verliefen anders:

1.11.5.1 Einfahrt Lungern, Nr. 16 (LN 16) (Anlage 9, Abbildung 61)

Bei dieser Einfahrt wird das Triebzahnrad Nr. 8 durch den Rollenbalken ungenügend synchronisiert und schlägt bereits bei Zahn 1 «Kopf auf Kopf». Die Lamelle schlägt bereits nach unten, bevor die Mitte des Zahnrades direkt über dem Zahn ist. Die Reaktionskraft am Bolzen ist $F_{zL} > 0$. Die Lamelle «fliegt» nach unten, kommt wieder nach oben und kollidiert wieder Kopf auf Kopf. Anschliessend läuft das Zahnrad relativ lange Kopf auf Kopf und findet erst im Bereich von Zahn 13 die Zahnlücke.

Dabei drückt das Zahnrad die Lamelle talwärts in Richtung Luzern. Wenn das Zahnrad im Bereich der Zähne 1 bis ca. 10 die Lamelle nach unten schlägt, entsteht beim Bolzen eine Kraft nach oben, u. a. auch infolge von Massenträgheit und Biegeelastizität in der Lamelle.

Anschliessend dreht das Zahnrad tendenziell eher zu langsam und drückt im Bereich der Zähne 18 und 28 auf die talseitige Zahnflanke und die Lamelle in Richtung Brünig ($\rightarrow F_{xL}$ positiv) und infolge Flankenwinkel die Lamelle etwas hinunter ($\rightarrow F_{zL}$ leicht negativ).

Bei dieser Einfahrt wurde eine Kraft in vertikaler Richtung (F_{zL}) von 84 kN erreicht (Anlage 7, Abbildung 59, Anlage 9, Abbildung 61).

Aus den Messsignalen konnte die entstehende Kraftspitze bei asynchroner Einfahrt (10 km/h) (Kopf auf Kopf) ermittelt werden: Im Moment des Aufpralls wird die Lamelle bei Zahn 1 mit ca. 3000 m/s² nach unten beschleunigt. Die Masse der Lamelle beträgt ca. 200 kg, wobei nur ca. 1/3 davon für die Massenträgheit bezüglich Rotation um den Drehpunkt wirksam ist. Aus der beobachteten Beschleunigung und der wirksamen Massenträgheit kann die Kraftspitze auf 200 kN geschätzt werden.

1.11.5.2 Ausfahrt Lungern, Nr. 13 (LN 13) (Anlage 8, Abbildung 60)

Bei dieser Ausfahrt passierte zuerst nichts Auffälliges. Erst als sich die Zahnradmitte zwischen den Lamellenzähnen 22 und 21 befindet und der Zahneingriff bei Zahn 20 beginnt, kollidiert das Zahnrad mit der bergseitigen Flanke und drückt den Zahn mit 40 kN talwärts in Richtung Luzern (F_{xL} wird negativ).

Durch den Flankenwinkel wird die Lamelle auch etwas nach unten gedrückt (F_{zL} ist negativ), ausser einem kleinen positiven Ausschlag. Dies wiederholt sich beim Eingriff bei den Zähnen 19 und 18, wodurch die Lamelle nach unten ausweicht. Auch bei weiteren Zähnen wird die Lamelle nach unten gedrückt; so ist auch bei Zahn 14 erkennbar, wie nach dem Zahnrad durchgang bei einer grösseren Fläche die Farbe fehlt.

Auffällig ist die Kollision bei den Zähnen 6 und 5, die quasi oben am Kopf getroffen werden. Dabei wird die Lamelle so stark nach unten geschlagen, dass zwischen den Zahnköpfen von Rad und Lamelle ein Spiel besteht. Anschliessend schwingt die Lamelle infolge der Federkraft wieder nach oben bis an den Anschlag, prallt zurück und schwingt mit ein paar Zyklen aus. Bei dieser Ausfahrt wurde in Richtung Luzern (FxL negativ) eine maximale Kraft von -83 kN erreicht (Anlage 7, Abbildung 59, Anlage 8, Abbildung 60).

1.11.5.3 Weitere Beobachtung

Bei Verzahnungen wird normalerweise mittels Evolventenverzahnung eine synchrone Bewegung zwischen den Verzahnungspartnern erzielt, so dass die Drehgeschwindigkeiten beider Verzahnungspartner theoretisch exakt gleichmässig sind. Die Zahnformen der Lamelle entsprechen nicht einer Evolventenverzahnung, so dass bei der Einfahrt die Zahnücke nicht zuverlässig gefunden wird. Allerdings hat dies zur Folge, dass eine gleichmässige Drehbewegung des Zahnrades nicht durch den Formschluss zwischen Lamelle und Zahnrad sichergestellt ist. Wenn nun die Verzahnung an einer Flanke anliegt, entstehen beim Eingriff des nächsten Zahns Schläge im Bewegungsablauf des Zahnrades. Beim Lamellendesign vor dem Umbau 2020 wurde eine gleichmässige Drehbewegung durch die verschobene Zahnteilung sogar verunmöglicht.

Der Zahneingriff des Zahnrades in die Lamelle ist wenig tief. In der Ruhelage der Lamelle ist beträchtliches Spiel (ca. 30 mm) zwischen Zahnkopf des Zahnrades und Zahngrund der Lamelle vorhanden. Diese geringe Eingriffstiefe fördert das Zustandekommen einer Desynchronisation.

1.11.6 Messungen am Fahrzeug – Desynchronisation von Triebzahnradern

Nach der Feststellung, dass bei der Zahnstangenein- und -ausfahrt ab und zu Desynchronisationen der Triebzahnradern entstehen können, wurden auf Anordnung der SUST Messungen an der Leit- und Antriebstechnik von verschiedenen Adler- und Fink-Triebzügen durch den Hersteller und die zb durchgeführt.

Die Messungen ergaben Folgendes:

Nach dem Befahren der Umschaltbalise vor der Zahnstangenausfahrt wird distanzabhängig die Zugkraft der Zahnradmotoren bis gegen Null reduziert (Abbildung 37, roter Kreis). Dann wird wieder unvermittelt eine Zugkraft (bis ca. 7 kN) aufgebaut, obwohl sich die Triebzahnradern noch auf der Lamelle befanden. Dies führt zu einem Durchdrehen des Triebzahnradern auf der Lamelle.

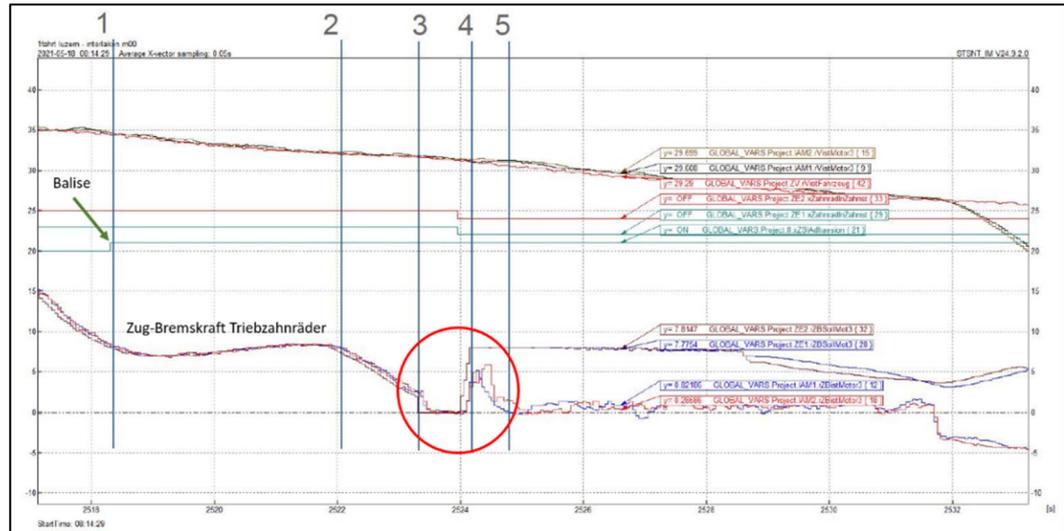


Abbildung 37: Aufzeichnung einer Ausfahrt (roter Kreis): Nach einer Reduktion bis gegen Null wurde blitzartig wieder eine Zugkraft auf dem Triebzahnrad aufgebaut (Quelle: Stadler).

In Rahmen einer Optimierung wurde die Software der Fahrzeugleittechnik im Jahr 2019 angepasst. Es konnte nicht eindeutig festgestellt werden, ob das Problem des Wiederaufbaus der Zugkraft mit der Anpassung der Software auftrat.

1.12 Literatur Review – Konstruktion von Zahnradern

Jahrzehntlang beruhte die Konstruktion der Triebzahnräder auf der Basis von SLM-Entwicklungen. Es wurden Betriebserfahrungen mit einbezogen und dementsprechend robuste Ausführungen realisiert, die auch Extremsituationen schadlos überstanden.

In einem frühen Artikel über Zahnradbahnen aus der "Schweizer Bauzeitung"³ finden sich Beispiele, in denen Sicherheitsfaktoren von 10 erwähnt werden.

1.13 Einfahrlamelle – Konzeption und Design zb

Die eingebauten Lamellen sind 2899 mm lang. Sie verfügen über 29 Zähne mit verschiedenen Formen. Die Zahnformen der Lamelle wurden für das «Finden der Zahnücke» bei Einfahrten optimiert. Die Zahnformen sind gerundet und weichen von der normalen Zahnform für eine Evolventenverzahnung ab. Zwischen den Zähnen 24 bis 29 wiesen die Zähne unterschiedliche Kopfradien und Flankenwinkel auf (Anlage 4, Abbildung 48), die folglich den Eingriffswinkel beeinflussen.

³ Schweizerische Bauzeitung: Die Vitznau-Rigi-Bahn-Lokomotiven, Bisherige Erfahrungen und Resultate, Autor: E. Strub

1.14 Regelungen und Funktionsbeschreibungen

1.14.1 Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV)

Die Ziff. 1.6.1 der AB-EBV zu Art. 54, Abschn. 2.1. der EBV, (Fahrzeuge – nicht operable Fahrzeuge – Zahnradbahnen) schreibt Folgendes für die Eingriffsdauer vor:

Um den lückenfreien Eingriff zu gewährleisten, sollte die Eingriffsdauer "e" jedes Zahnkranzes mindestens 1,15 betragen.

Für die Bestimmung von "e" werden unabgenützte Zahnprofile vorausgesetzt. Der vorgeschriebene Wert 1,15 der Eingriffsdauer enthält daher eine Reserve von 0,15 für die Abnutzung.

Ein Sicherheitsfaktor für die Dimensionierung von Triebzahnradern ist in der AB-EBV nicht definiert.

1.14.2 D RTE 29700 «Systemtechnik Zahnradbahnen»

Die D RTE 29700 «Systemtechnik Zahnradbahnen» schreibt Folgendes (Auszüge) vor:

Kapitel 1.1.7 Zahnradbahn, Höhe der Teillinie

Die Höhe der Teillinie bei der zb ist auf 62.5 mm über SOK definiert.

Kapitel 3.3 Konstruktion und Dimensionierung der Triebzahnradern

Die Dimensionierung der Zahndicke bzw. der Zahnfußfestigkeit erfolgt auf Grund der maximalen Zahnbelastung und der Betriebsbelastung sowie nach den entsprechenden Regeln der Technik und den Vorschriften in der Eisenbahnverordnung.

Kapitel 5.1.3 Zulässiger Verschleiss an den Verzahnungen

Für eine einwandfreie Funktion und geringe Abnutzung der Zahnradern wichtig sind der richtige Eingriffswinkel, die korrekte Höhenlage der Zahnstange und keine Teilungsfehler in den Zahnstangenstössen.

...

Formänderungen an der Flanke ergeben Ungleichförmigkeiten im Eingriff und damit Vibrationen und Lärm sowie stark erhöhten Verschleiss an der Zahnstange.

Kapitel 5.2.2 Zahneingriff Triebzahnradern, Konsequenz für den Betrieb und den Verschleiss

Ein nicht lückenfreier Eingriff bzw. eine Eingriffsdauer < 1 hat einen sehr negativen Einfluss auf den Betrieb (Vibrationen, Lärm, Komfort) und den Verschleiss.

Am Maschinen-Element Zahnstange/Zahnrad wird die Verzahnung in solchen Fällen hauptsächlich wegen Kaltverformung zerstört. Neben erheblicher Abnutzung entstehen auch falsche geometrische Zahnformen (Flankenwinkel). Dies wiederum führt zu kaum vorstellbaren dynamischen Zusatzkräften und dadurch zu einer Verkürzung der Lebensdauer der Antriebselemente und des Zahnstangen-Oberbaus. ...

Wichtig ist, dass die Zahnstange und die Zahnradern die ursprüngliche korrekte geometrische Zahnform beibehalten.

Um das zu erreichen, müssen zudem folgende Bedingungen erfüllt sein:

- *Der Teilkreis des Zahnrads und die Teillinie der Zahnstange müssen sich bei halb abgenützten Tragrädern und Nennhöhe der Zahnstange decken.*

Kapitel 6.2.2.1 Bauarten, Einfahrlamelle mit Gelenk und einseitiger Federung

Eine Zahnstangenlamelle von etwa 2,5 m Länge ist einseitig mit einem Gelenk fest mit dem Zahnstangenende verbunden. Beim Einsatz von Triebfahrzeugen mit Einzelachsenantrieben sollte die Einfahrlamelle kürzer sein als der kleinste Abstand benachbarter Zahnräder.

1.15 Zahnrad – Optimierung der Federkammer als Folge des Zahnradrisses

Nach der Analyse des ersten Zahnradbruches im Jahr 2020 hat der Hersteller eine Optimierung der Federkammer vorgenommen, um eine Berührung der Tangentialfeder mit der Kammerwand zu vermeiden. Diese Anpassung gilt für Neubestellungen von Triebzahnradern.

2 Analyse

2.1 Technische Aspekte

2.1.1 Beobachtungen bei den Zahnstangenein- und -ausfahrten in Giswil und Lungern

Nur die zwei Ein- und Ausfahrten in Giswil und Lungern, die in einer Kurve und in einer Steigung eingebaut sind, wiesen starke Beschädigungen an der Lamelle auf. Alle anderen acht Ein- und Ausfahrten der Brüniglinie wiesen keine aussergewöhnlichen Abnutzungen auf.

In Giswil und Lungern wurden Zahnstangenausfahrten mit und ohne «Aussergriffkommen» des Triebzahnades beobachtet. Bei den Beobachtungen wurden meistens starke Absenkungen der Einfahrlammelle beim letzten Triebzahnrad des Zuges in Fahrrichtung festgestellt.

Bei den Adler- und Fink-Triebzügen ist das Triebzahnrad nicht mit dem Adhäsionsantrieb verkuppelt. Die Einfahrten in einen Zahnstangenabschnitt erfolgen wie seit je her mit einer maximalen Geschwindigkeit von 10 km/h. Trotzdem kann ein Aufklettern auf die Lamellenzähne nicht ausgeschlossen werden. Die Konstruktionen bei der Infrastruktur (Absenkung, Einfederung am Anfang der Lamelle) und bei den Adler- und Fink-Fahrzeugen sind für solche extremen Fälle bei den Einfahrten berechnet und konstruiert.

Die Zahnstangenausfahrten erfolgen mit einer Geschwindigkeit von zirka 30 km/h. Falls noch Bremskräfte auf den Zahnradantrieb wirken, sei es durch Abbremsungen oder rotierende Massen, werden Kräfte auf die bergseitigen Flanken der Lamellenzähne ausgeübt. Dies kann zu einem Absenken der einseitig gelagerten Lamelle führen. Da sich die Lamelle auf der Seite Bolzen nicht genügend senken kann, entstehen bei bestimmten geometrischen Konfigurationen falsche Eingriffsverhältnisse. Dadurch wird ein Einhacken/Meisseln und Aufklettern der Triebzähne auf die Lamellenzähne (Abbildungen 9 und 10) möglich und es wirken sehr hohe dynamische Kräfte.

2.1.2 Gebrochenes Triebzahnrad

Das gebrochene Triebzahnrad 1 wies eine Laufleistung von ca. 883 000 km auf, was bezogen auf die Zahnstangenabschnitte eine geschätzte Laufleistung (Faktor 1/10) von ca. 88 000 km ergibt. Dieses Zahnrad war noch nicht am Ende seiner theoretischen Lebensdauer, da der zulässige Verschleiss pro Zahnflanke von 6 mm nicht komplett aufgebraucht wurde. Die Zähne wiesen scharfe Kopfkanten auf.

Das gebrochene Triebzahnrad 1 (Abbildung 31) zeigte in einer der Federkammern mittig an der Wand im Übergang vom Radius in den geraden Teil eine mechanische Verletzung (Kerbe) auf. Der Rissausgang befindet sich in diesem Bereich. Die Oberflächenschädigung der Federkammer wurde durch die Überbeanspruchung des Tangentialfedersystems verursacht.

2.1.3 Eingriffsdauer – Veränderung der Eingriffsverhältnisse im Laufe der Zeit – Teilkreis – Beanspruchung des Triebzahnrades

Die Eingriffsverhältnisse sind von verschiedenen Faktoren abhängig, namentlich:

- der Verzahnungstiefe, die je nach Verschleiss der Räder variiert;
- der Form der Zähne des Triebzahnrades, an denen sich bei starker Abnutzung der Zahnflanken am Kopfteil eine scharfe Kante bildet;
- der Form der Zähne der Lamelle, deren Verschleiss den Winkel oben am Zahn verändern kann;
- der Veränderung der Form und des Flankenwinkels zwischen zwei Zähnen der Lamelle, die zu einer Bewegung des Tangentialfedersystems führen kann;
- den Bau- und Montagetoleranzen.

Ein weiterer, Parameter, der einen wesentlichen Einfluss auf die Eingriffsverhältnisse hat, ist der Teilkreis des Zahnrades.

Gemäss D RTE 29700, Ziffer 5.2.2, Zahneingriff Triebzahnräder, müssen der Teilkreis des Zahnrades und die Teillinie der Zahnstange bei halb abgenutzten Rädern und Nennhöhe der Zahnstange decken.

Für das Netz der zb ist die Höhe der Teillinie über SOK mit 62.5 mm vorgegeben.

Bei der Lokomotive HGe II beträgt der Teilkreis bei halb abgenutzten Bandagen 62.7 mm und entspricht somit den Vorgaben (Abbildung 39).

Dagegen beträgt bei den Adler- und Fink-Triebzügen der Teilkreis bei halb abgenutzten Bandagen 74.3 mm. Die Vorgaben bezüglich Deckungsgrad sind nicht erfüllt (Abbildung 38) bzw. die Regeln der Technik nicht eingehalten.

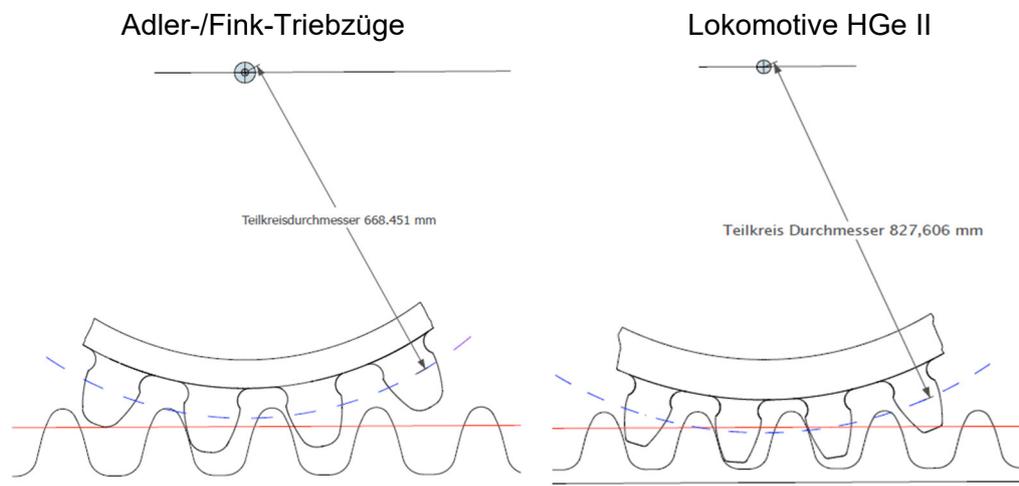


Abbildung 38 und 39: Schematische Darstellung der Teilkreise bei einem Adler- und Fink-Triebzug und einer Lokomotive HGe II, jeweils bei horizontaler Lamelle und abgenutzten Raddurchmessern. Rot: Teillinie. Blau: Teilkreis.

Bei den Adler- und Fink-Triebzügen erfolgt die Nachstellung der Triebzahnradhöhe bereits nach 5 mm Radabnutzung im Radius. Das hat den Nachteil, dass sich bei abgenutztem Raddurchmesser die Eingriffsverhältnisse nicht verbessern (Anlage 6, Abbildungen 53 und 54).

Unter diesen Bedingungen werden die Eingriffsverhältnisse der Adler- und Fink-Triebzüge ungünstig (Abbildung 38). Bei der Einfederung der Lamelle verschiebt

sich der Kontaktpunkt (Zahnlamelle–Zahn des Triebzahnrad) weiter nach oben bis in den Radius der Zahnlamelle. In diesem Bereich wird der Solleingriffswinkel von 14° deutlich überschritten. Die Wahrscheinlichkeit des Aufkletterns und Ausereingriffkommen eines Zahnes wird signifikant erhöht (Abbildung 40).

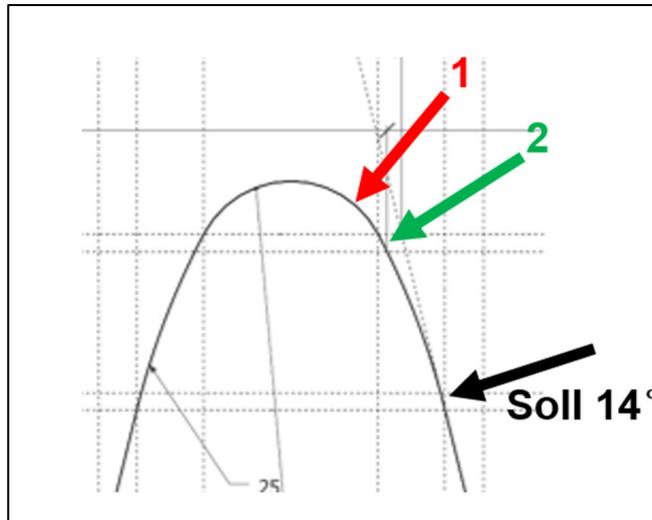


Abbildung 40: Einfluss des Eingriffskontaktpunktes auf den Eingriffswinkel bei abgerundeten Lamellenzähnen.

Der rote und der grüne Pfeil zeigen den Einfluss einer Verschiebung der Eingriffstiefe um 2 mm (von 2 nach 1) auf den Eingriffswinkel. In diesem oberen Bereich liegt der Eingriffswinkel bei ca. 40° . Die Eingriffslinie (Anlage 1, Abbildung 45), die zur Zahnflanke eine Gerade bilden sollte, ist stark verzerrt.

Die Zahnräder sind sicherheitskritische Komponenten. Ihre Dimensionierung und ihre Herstellung sind komplex. Die Eingriffsdauer ist ein wichtiger Parameter des Zahnradsystems. Wenn diese variiert (< 1), führen falsche Eingriffssituationen zur Beschädigung des Zahnrades und der Zahnstange (siehe Kommentar zur Eisenbahnverordnung, Anlage 10, Abbildung 62).

Die unterschiedlichen Kopfradien und Flankenwinkel der Zähne 24 bis 29 (Anlage 4, Abbildung 48), kumuliert mit einer zu geringen Eingriffsdauer (Anlage 6, Abbildungen 53 und 54), führen bei der Ausfahrt in Lungern und Giswil zu einer Abweichung vom optimalen Eingriffswinkel von 14° . Der sich einstellende ca. 40° steile Flankenwinkel (Abbildung 40) erhöht den Verschleiss der Lamelle signifikant.

So steile Eingriffswinkel schaffen die ungünstigen Bedingungen für das Auftreten von starken Abnutzungen der Zahnflanken am Kopfteil und die Entstehung von scharfen Kanten am Zahnkopf des Triebzahnrad.

Für die optimale Funktionsweise zwischen Zahnstange und Triebzahnrad und um eine überdurchschnittliche Abnutzung der Zahnräder zu vermeiden, sind eine genügende Eingriffsdauer und ein korrekter Eingriffswinkel entscheidend.

Im Fall einer Ausfahrt stellt eine ungenügende Eingriffsdauer alleine kein Sicherheitsrisiko dar. Sie begünstigt aber das Aufklettern. Zudem wird auf Dauer die Tangentialfederung mit Kräften beansprucht, für die sie nicht dimensioniert ist.

Die Videoaufnahmen sowie die Beobachtungen bei den dynamischen Messungen in Lungern belegen ebenfalls, dass der Zahneingriff des Triebzahnrades der Adler- und Fink-Triebzüge in der Lamelle zu wenig tief ist.

2.1.4 Kopftreffer bei der Zahnstangenausfahrt – Einfluss auf die Beanspruchung des Tangentialfedersystems und des Triebzahnkranzes

2.1.4.1 Geometrische Betrachtung

Um die Eingriffsverhältnisse möglichst genau zu analysieren, wurde die exakte Geometrie der Komponenten der Zahnstangenlamelle sowie des Triebzahnkranks zeichnerisch dargestellt.

Dazu mussten zwei verschiedene Bereiche definiert werden:

- Der Bereich am Anfang der Lamelle (Zahn 1);
- Der Bereich am Ende der Lamelle (Zahn 29).

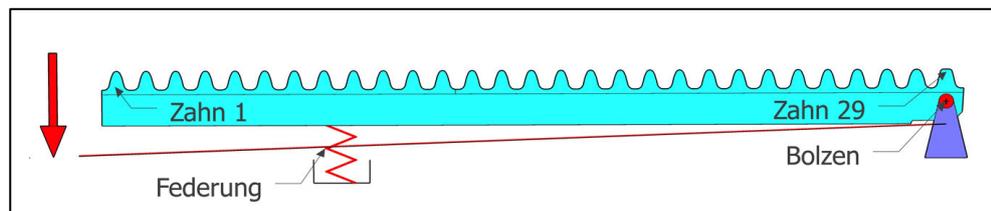


Abbildung 41: Schematische Darstellung der Einfahrlamelle. Rote Linie: Mögliche Absenkung der Lamelle von maximal 110 mm an der Spitze (Zahn 1).

Der Bereich am Ende der Lamelle (Zahn 29) ist durch seine Nähe zum Drehpunkt der Lamelle charakterisiert. Bei einem Zahn auf Zahn Lauf (Kopftreffer) in diesem Bereich ist der Hub der Lamelle praktisch Null. In welchem Bereich der Lamelle (Zähne 29–18) die ersten Kopftreffer erfolgen, ist abhängig vom Durchmesser des Triebzahnkranks, der Höheneinstellung des Triebzahnkranks am Fahrzeug, der Abnutzung der Raddurchmesser, der Höhe der Lamelle in Bezug auf SOK sowie der Wirkkräfte auf die bergseitigen Zahnflanken der Lamelle.

Ab den Zähnen 17–19 (je nach Geometrie) bis zum Anfang der Lamelle (Zahn 1) kann die Lamelle infolge des freien Spiels ausreichend nach unten gedrückt werden. Es finden keine unabgefederten Kopftreffer statt und somit auch keine Radsatzabhebung.

Da bei einem Kontakt nahe am Bolzen, die Lamelle sich nicht ausreichend absenken kann, muss das Zahnrad diese geometrische Konfiguration mit zwei möglichen Bewegungen ausgleichen.

- Das Triebzahnrad kann entlang der Zahnflanke der Lamellenzähne nach unten gleiten. Die Federungen des Triebzahnkranks (die sechs Tangentialfedern) werden in Fahrtgegenrichtung des Zuges zusammengedrückt. Bei genügender Federkraft und -hub, tritt der mechanische Anschlag der Federsättel nicht in Funktion. In solchen Fällen entstehen in den Federkammern keine unzulässigen Stöße.
- Das Triebzahnrad kann nicht oder ungenügend an der Zahnflanke entlang gleiten. Dies kann der Fall sein, wenn ein abgenutztes Triebzahnrad anstelle eines Radius eine bereits scharfe Kante am Kopfkreis aufweist und mit dieser in den Bereich der stark gerundeten Lamellenzähne auftritt (Anlage 5, Abbildung 50). In diesem Fall schlägt das Triebzahnrad auf den Lamellenzahn auf und kann sich in den Zahn der Lamelle meißeln (Abbildung 10). Dieser Berührungspunkt stellt einen Drehpunkt dar, um den das Triebzahnrad zu drehen beginnt, wodurch sich der Radsatz anhebt.

Der Exzentereffekt vergrössert den nötigen Anhebungsweg der Triebachse. Infolge des relativ kurzen Anschlagweges der Federsättel erfolgt der Anschlag bevor die Achse den höchsten Punkt erreicht hat (Abbildung 42).

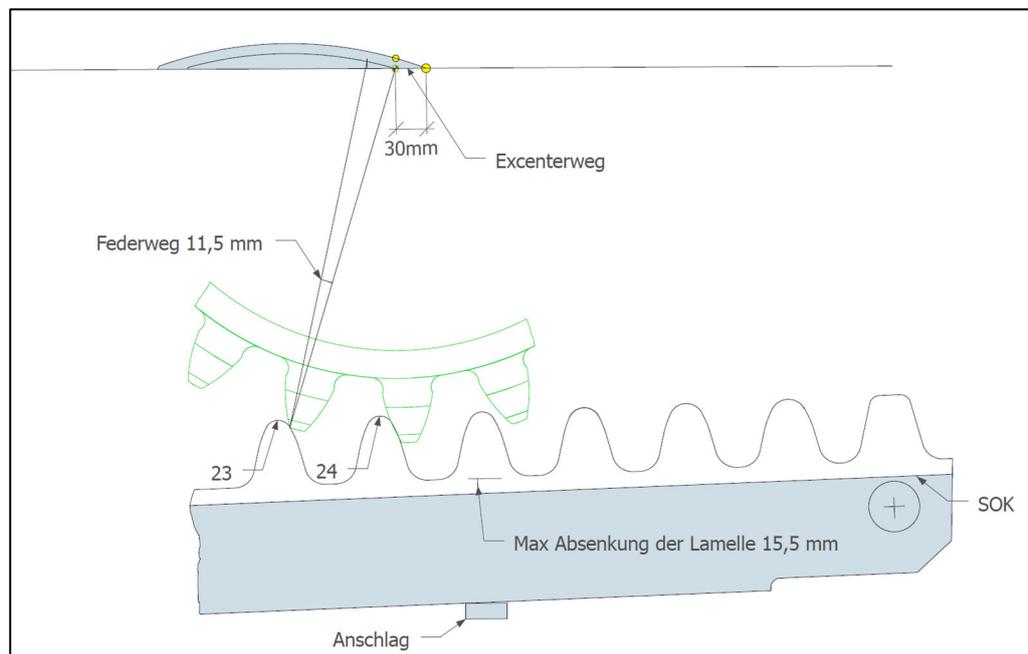


Abbildung 42: Kontakt Zahn 23, Lamelle am Anschlag, Anhebung der Achse.

2.1.4.2 Wirkende Kräfte

Nach der geometrischen Betrachtung wurden die bei der Ausfahrt und einem Kopftreffer im Bereich des Zahns 23 wirkenden Kräfte im Tangentialfedersystem der Triebzahnäder des Adler- und Fink-Triebzuges berechnet.

Die Berechnungen wurden mit Ausfahrtgeschwindigkeiten von 30 km/h und 15 km/h durchgeführt und beziehen sich auf einen Federsattel.

Als Vergleich wurden die Tangentialkräfte der Lokomotive HGe II ebenfalls berechnet.

Berechnungsgrundlagen:

Anhand der Zeichnungen können der horizontale und der vertikale Hub der Triebzahnradachse bei einem Stoss sowie die Drehbewegung auf einem Lamellenzahn beim Kopftreffer eruiert werden.

Die Bewegung der Achse kann geometrisch dargestellt werden. Mit den gemessenen Distanzen und den bekannten Geschwindigkeiten des Zuges können die Zeit, respektive die Beschleunigungen berechnet werden.

Mit der Formel⁴ $F = m \times a$ kann die Kraft berechnet werden. Die Tangentialkomponenten, die im Federsattelsystem wirken, können geometrisch bestimmt werden.

⁴ F: Kraft; m: ungedeferte Masse; a: vertikale Beschleunigung.

Für die Adler- und Fink-Triebzüge wurde als ungefederte Masse ein Wert von 3.5 Tonnen angenommen und für die Lokomotive HGe II ein Wert von 4.5 Tonnen.

Folgende Szenarien wurden berechnet:

Adler- und Fink-Triebzug									HGe II
Bedingungen	Rad Ø 760 mm (a)		Rad Ø 820 mm (b)		Rad Ø 750 mm (a)		Rad Ø 810 mm (b)		Rad Ø Max. (Zahn 20)
Geschwindigkeit km/h	30	15	30	15	30	15	30	15	30
Tangentialkraft pro Federsattel in kN	167	42	240	60	256	64	373	93	36

Abbildung 43: Tabelle der Berechnung der Kräfte [kN] im Tangentialfedersystem.

Legende:

- (a) Für Raddurchmesser 760 bis 750 mm ist der Exzenter auf Stufe 7 eingestellt. Für diese Einstellung liegen das Rad und die Zahnradachse vertikal auf der gleichen Achse, aber sind horizontal 30 mm voneinander verschoben.
- (b) Für Raddurchmesser 820 bis 810 mm ist der Exzenter auf Stufe 1 eingestellt. Für diese Einstellung liegen das Rad und die Zahnradachse horizontal auf der gleichen Höhe, aber sind 30 mm voneinander verschoben.

Aus den Berechnungen und den geometrischen Betrachtungen wird Folgendes ersichtlich:

Adler- und Fink-Triebzüge

Bei einer Ausfahrt mit 30 km/h, einem Raddurchmesser von 760 mm und einem dynamischen Anschlag des Triebzahnrades mit dem Lamellenzahn 23, liegt die Beanspruchung des Tangentialfedersystems (Kammer im Triebzahnkranz und Federsattelanschläge) bei 167 kN.

Bei einer Ausfahrt mit 30 km/h, einem Raddurchmesser von 810 mm und einem dynamischen Anschlag des Triebzahnrades mit dem Lamellenzahn 23, liegt die Beanspruchung des Tangentialfedersystems (Kammer im Triebzahnkranz und Federsattelanschläge) bei 373 kN. Die max. Tangentialkraft vor Anschlag von 24.7 kN (Abbildung 30) wird bei weitem überschritten und die herrschenden Kräfte liegen im Bereich der plastischen Verformung der Elemente (ab 240 kN).

Lokomotive HGe II

Aufgrund einer optimalen Eingriffsdauer (Übereinstimmung Teilkreis und Teillinie bei halber Abnutzung der Raddurchmesser) und einer anderen Dimensionierung des Tangentialfedersystems (acht Federsättel pro Triebzahnrad, ein Federsattelweg von 23 mm) ist geringes Aufklettern erst ab den Lamellenzähnen 19 bzw. 20 möglich.

Die Beanspruchung der Tangentialfeder der Lokomotive HGe II liegt bei max. 36 kN (Tabelle, Abbildung 43) und somit deutlich unterhalb der maximalen Tangentialkraft, die sie aufnehmen kann.

2.1.4.3 Bewertung der Resultate

Durch die sehr robuste und starre Bauweise der Einfahrlamelle und ihrem eingeschränkten vertikalen Hub nahe beim Drehpunkt können bei bestimmten geometrischen Konfigurationen sehr starke Stösse und hohe Kräfte entstehen, die auch auf die Triebzahnräder einwirken.

Die in Giswil und Lungern festgestellten Spuren und Verschleisse an den Zähnen der Zahnstangenlamellen sowie die mit den dynamischen Messungen erfassten Kräfte zeigen deutlich, dass unter bestimmten Umständen Kopftreffer auftreten, die aufgrund der sehr hohen Beschleunigungen, insbesondere bei einer Ausfahrgeschwindigkeit von 30 km/h, äusserst starke dynamische Kräfte erzeugen.

Wie die Herstellerberechnung darlegt (Kapitel 1.11.2), sind die Federsättel ab einer Tangentialkraft von 24 kN im Anschlag (Abbildung 30). Ab da erfolgt zuerst eine lineare, ab 240 kN eine exponentielle Deformation des Federsattels sowie Plastifizierung der Federkammerwand. Genau in diesem Bereich befand sich der Rissausgang des gebrochenen Triebzahnrades 1.

Die Beschädigung der Federkammern der noch intakten Triebzahnräder 2 und 3 zeigen ebenfalls, dass die maximale Tangentialkraft überschritten wurde und die Federsättel auch bei diesen Triebzahnradern mehrmals an den Anschlag gekommen sind.

Daher werden unter gewissen Umständen (unter anderem ungünstige Eingriffswinkel auf der Lamelle bei einem Kontakt mit einem Zahn nahe am Bolzen) die Tangentialfederung der Adler- und Fink-Triebzüge höher beansprucht, als dies die Berechnung des Herstellers vorsah. Eine Überbeanspruchung des Tangentialfederungssystems führt zur Deformation des Federsattels, zu einer mechanischen Verletzung der Federkammer und schafft die Voraussetzungen für eine Rissinitiierung eines Adler- oder Fink-Triebzahnrades.

2.1.4.4 Dimensionierung der Triebzahnräder

Bei reinen Zahnradbahnen sind die Zahnräder immer im Eingriff (keine Ein- und Ausfahrten). Eine Überbeanspruchung im Bereich einer Einfahrlamelle ist deshalb ausgeschlossen.

Im Gegensatz dazu kann ein Aussereingriffkommen während den Zahnstangenein- und sogar bei Zahnstangeausfahrten bei Bahnen mit gemischtem Adhäsions- und Zahnradbetrieb nicht ausgeschlossen werden.

Unter nominalen Betriebsbedingungen (Anfahrzugkraft 70 kN – Beharrung 40 kN pro Triebzahnrad) werden die Triebzahnräder der Adler- und Fink-Triebzüge mit 70 % ihrer maximalen Belastung beansprucht und somit wird der kritische Bereich der Federkammer, wo die Rissinitiierung stattfand, nicht überbeansprucht. Unter diesen Bedingungen sind die Zahnräder ermüdungsfest und es ist noch eine Sicherheitsmarge von 30 % bzw. ein Reservefaktor von 0.3 vorhanden.

Im Gegensatz dazu wird bei einer Ausfahrt mit ca. 30 km/h bei Aussereingriffkommen, die bei der Dimensionierung bestimmte maximale Tangentialkraft von 24.7 kN pro Federsattel überschritten (Tabelle, Abbildung 43). Dabei werden die Federsättel bis zum Anschlag komprimiert und das Tangentialfedersystem überbeansprucht. Die Triebzahnräder der Adler- und Fink-Triebzüge sind, unter Berücksichtigung ihrer Dimensionierung und den vorhandenen Sicherheitsmargen, nicht in der Lage, das Aufsteigen auf Lamellen, wie die hier vorhandenen, zu bewältigen.

Seit Jahrzehnten wurden Triebzahnräder (fest auf der Achse gelagert) auf der Basis der ehemaligen SLM-Entwicklung produziert. Dank der massiveren Zahnkranzquerschnitte waren sie für normale Betriebsfälle eher überdimensioniert. Mit ihrer Robustheit waren sie in der Lage, auch aussergewöhnliche Beanspruchungen, wie Kopftreffer und Aufklettern, zu ertragen, ohne beschädigt zu werden. In älterer Literatur wird für die Konstruktion von Zahnradern ein Sicherheitsfaktor von 10 angegeben.

Die Neuerungen im Antriebskonzept mit verstellbaren Triebzahnradern der neuen Adler- und Fink-Triebzüge führten zu Reduktionen in den Triebzahnkranzdimensionierungen.

Weder die AB-EBV noch die D RTE 29700 «Systemtechnik Zahnradbahnen» definieren einen Sicherheitsfaktor für die Dimensionierung von Triebzahnradern.

2.1.4.5 Zwei Zahnräder gleichzeitig auf der Lamelle

Der Abstand des Triebzahnrades und des Bremszahnrades im Zahnradrehgestell des Adler- und Fink-Triebzuges beträgt 2380 mm. Da die Lamelle 2890 mm lang ist, befinden sich gleichzeitig zwei Zahnräder auf der Lamelle, was beim Einsatz von Triebfahrzeugen mit Einzelachsenantrieben, gemäss D RTE 29700, Ziffer 6.2.2.1, nicht der Fall sein sollte. Eine gleichzeitige Durchfahrt von mehreren Zahnradern auf der Lamelle kann zu Störungen des Eingriffs führen, z. B. bei Bremsungen oder schwerlaufendem Bremszahnrad.

2.2 Betriebliche oder prozessuale Aspekte

Die durch die SUST durchgeführten verschiedenen Auswertungen der Fahrdaten ergaben keine Hinweise auf ungewöhnlichen Einsatz der Bremsen während des Ausfahrtvorgangs.

3 Schlussfolgerungen

3.1 Befunde

3.1.1 Technische Aspekte

3.1.1.1 Infrastrukturseitig – Einfahrlamelle

- Die starre Konstruktion der Lamelle und die Position ihrer Anschläge verringern bei einer Ausfahrt die Möglichkeit der Biegung oder der Verformung der Lamelle erheblich, wodurch die Dämpfung praktisch auf Null reduziert wird.
- Der feste Drehpunkt der Lamelle schränkt den vertikalen Hub der Lamelle im Bereich zwischen den Zähnen 20 und 29 erheblich ein.
- Konstruktionsbedingt (eingeschränkter vertikaler Hub der Lamelle nahe am Bolzen) können bei bestimmten geometrischen Konfigurationen bei Ausfahrten auf der Lamelle sehr starke Stösse und hohe Kräfte entstehen, die auch auf die Triebzahnräder einwirken. Unter gewissen geometrischen Bedingungen (Kopftreffer nahen am Bolzen) können die Triebachsen der Adler- und Fink-Triebzüge angehoben werden.
- Die festgestellten Spuren an der Lamelle (Abbildungen 8–11) zeigen, dass aufgrund der geringen Verzahnungstiefe der Adler- und Fink-Triebzüge im Bereich der Zähne 23–25, Einhacken/Meisseln und Kopftreffer entstehen können.
- Die abgerundete Form der Zähne der Zahnstangenlamelle (Anlage 4, Abbildung 48), kumuliert mit ungünstigen Eingriffsverhältnissen (Anlage 6, Abbildungen 53 und 54), führen bei der Ausfahrt unter bestimmten Umständen zu Einhacken bzw. Meisseln der scharfen Triebzähne in den oberen Teil der Lamellenzähne (Abbildung 10). Mit der Zeit entsteht an dieser Stelle ein Auflagebereich, der das Aufklettern des Triebzahnrades auf die Lamellenzähne begünstigt.
- Bei Bahnen mit gemischtem Adhäsions- und Zahnradbetrieb kann ein Ausseringriffkommen während den Zahnstangenein- und sogar bei den Zahnstangenausfahrten nicht ausgeschlossen werden.

3.1.1.2 Fahrzeugseitig

- Ein Fehler in der Fahrzeugsoftware der Adler- und Fink-Triebzüge führte ab und zu zum Wiederaufbau der Zugkraft (Abbildung 37) bei der Zahnstangenausfahrt.
- Bei den Adler- und Fink-Triebzügen befinden sich gleichzeitig zwei Zahnräder auf der Lamelle, was gemäss D RTE 29700, Ziffer 6.2.2.1, nicht der Fall sein sollte. Eine gleichzeitige Durchfahrt mehrerer Zahnräder auf der Lamelle kann bei Bremsungen oder schwerlaufendem Bremszahnrad zu Störungen des Eingriffs führen.
- Bei den Adler- und Fink-Triebzügen liegt der Teilkreis bei halb abgenutzten Bandagen 74.3 mm über SOK. Somit ist der korrekte Deckungsgrad «Teilkreis des Zahnrades/Teillinie der Zahnstange», die für zb mit 62.5 mm definiert ist, nicht gegeben (Anlage 6, Abbildungen 53 und 54). Daher sind die Regeln der Technik (D RTE 29700, Ziffer 5.2.2, Zahneingriff Triebzahnräder) nicht eingehalten.

- Durch den Verschleiss der Zähne des Triebzahnades verändern sich deren korrekte Evolventenflanken. Die Zähne werden spitzer und scharfkantiger (Anlage 4, Abbildung 49) und beeinflussen schliesslich negativ die Eingriffsverhältnisse, was zu Aufkanten und Aufklettern führen kann.
- Wie die Ergebnisse zeigen, hat die Nachstellung der Triebzahnradhöhe den Nachteil, dass sich bei abgenutzten Raddurchmessern die Eingriffsverhältnisse (Eingriffstiefe) nicht verbessern (Anlage 6, Abbildungen 53 und 54).
- Ungünstige Eingriffsverhältnisse auf der Lamelle alleine bilden bei der Ausfahrt kein Sicherheitsrisiko, begünstigen aber die Aufsteigegefahr (Anlage 10, Abbildung 62).
- Die Adler- und Fink-Triebzüge weisen nur sechs Tangentialfedern (Federsattelweg 11.5 mm) und nicht deren acht auf, wie das bei anderen Lokomotiven (Federwegsattel 23 mm) mit ähnlichen Betriebslastfällen üblich ist. Es werden deshalb stärkere tangentiale Kräfte auf die Federsättel ausgeübt.
- Die verstellbaren Triebzahnäder der Adler- und Fink-Triebzüge sind querschnittmässig zwischen dem Fusskreis und dem äusseren Radius der Federsattelkammer erheblich schmaler als die bis dahin fest auf der Achse gelagerten Triebzahnäder (Anlage 2, Abbildung 46). Die vom Hersteller vorgenommene Berechnung mit der Finite-Elemente-Methode zeigt, dass die Triebzahnäder für die normalen Betriebsbedingungen dauerhaft dimensioniert sind (Abbildung 29), jedoch genau in diesem Bereich bereits bei normalen Betriebslastfällen grössere Belastungen auftreten.
- Bei einem Aussereingriffkommen bei einer Ausfahrt mit ca. 30 km/h auf der Lamelle werden die Federsättel bis zum Anschlag komprimiert und das Tangentialfedersystem überbeansprucht.
- Die Tangentialkräfte, die die Limite des Tangentialfederungssystems übersteigen (Anschlag), führen zu hoher Beanspruchung in der Federkammer (Abbildung 29).
- Mechanische Verletzungen der Federkammern (Abbildungen 32 und 33) können zu einer Rissinitiierung (Abbildung 31) in einem Triebzahnrad führen.
- Die Triebzahnäder der Adler- und Fink-Triebzüge sind unter Berücksichtigung ihrer Dimensionierung und den vorhandenen Sicherheitsmargen nicht in der Lage, ungefederte Kräfte, die bei einer Zahnstangenausfahrt durch das Aufsteigen und Aufschlagen auf der Lamelle generiert werden, zu übernehmen.

3.2 Ursachen

Der Bruch des Triebzahnades eines Adler-Triebzuges bei der Talfahrt am Brünig am 6. März 2021 ist auf eine Rissinitiierung in der Federkammer zurückzuführen, verursacht durch die Überbeanspruchung des Tangentialfedersystems, die zu einer mechanischen Beschädigung der Federkammerwand führte und für die das Triebzahnrad nicht ausgelegt war.

Zum Ereignis haben beigetragen:

- Wiederkehrende Anschläge der Federsättel, die zu hohen Kräfteinlenkungen in das Triebzahnrad führten.
- Ungenügende Sicherheitsreserve bei der Triebzahnraddimensionierung.

Folgende Faktoren, die teilweise im Zusammenhang mit einer ungenügenden Kompatibilität zwischen Zahnstangenlamelle und Triebzahnrad stehen, begünstigten das Entstehen von Kopftreffern:

- Nicht genügender Deckungsgrad zwischen Teilkreis des Zahnrades der Adler- und Fink-Triebzüge und der Teillinie der Zahnstange, die zu ungünstigen Eingriffsverhältnissen auf der Lamelle bei der Zahnstangenausfahrt führte.
- Lamelle mit festem Drehpunkt am Bolzen, die den vertikalen Hub der Lamelle bei einem Kopftreffer bei Ausfahrten im Bereich der Zähne 20 und 29 erheblich einschränkt.
- Abgerundete Form der Zähne der Zahnstangenlamelle kumuliert mit ungünstigen Eingriffsverhältnissen, die unter bestimmten Umständen zu Einhacken bzw. Meisseln der scharfen Triebzähne am Ende der Lamelle führen.
- Eine fehlerhafte Software, die gelegentlich zum Wiederaufbau von Zugkraft bei der Zahnstangenausfahrt führte.

4 Sicherheitsempfehlungen, Sicherheitshinweise und seit dem schweren Vorfall getroffene Massnahmen

4.1 Sicherheitsempfehlungen

Die schweizerische Gesetzgebung sieht in der Verordnung über die Sicherheitsuntersuchung von Zwischenfällen im Verkehrswesen vom 17. Dezember 2014 (VSZV), 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 Deckungsgrad Teilkreis/Teillinie – Eingriffsverhältnisse Adler- und Fink-Triebzüge

4.1.1.1 Sicherheitsdefizit

Bei den Adler- und Fink-Triebzügen ist der Deckungsgrad «Teilkreis des Zahnrades/Teillinie der Zahnstange», die für das Netz der zb mit 62.5 mm definiert ist, nicht gegeben. Somit sind die Regeln der Technik (D RTE 29700, Ziffer 5.2.2, Zahneingriff Triebzahnräder) nicht eingehalten.

Für eine einwandfreie Funktion und geringe Abnutzung der Zahnräder sowie für die Vermeidung einer Aufsteigegefahr sind korrekte Eingriffsverhältnisse, bestehend aus Eingriffswinkel, Höhenlage der Zahnstange und Deckungsgrad «Teilkreis des Zahnrades/Teillinie der Zahnstange», eine sicherheitsrelevante Anforderung.

4.1.1.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 176

Die SUST empfiehlt dem Bundesamt für Verkehr (BAV), die geometrischen Verhältnisse des verstellbaren Triebzahnradsystems, das auf den Adler- und Fink-Triebzügen eingebaut ist, anpassen zu lassen.

4.1.2 Einfahrlamelle

4.1.2.1 Sicherheitsdefizit

Bei Bahnen mit gemischtem Adhäsions- und Zahnradbetrieb kann ein Aussereingriffkommen während den Zahnstangenein- und bei Zahnstangeausfahrten nicht ausgeschlossen werden. Die bei der zb eingesetzte Lamelle ist in der Lage, ein Aussereingriffkommen während einer Einfahrt zu bewältigen, da sie dafür konzipiert wurde (Federung, Abbildung 41).

Dagegen können mit dem eingesetzten Lamellendesign (konstruktionsbedingt eingeschränkter vertikaler Hub der Lamelle nahe am Bolzen) bei Zahnstangeausfahrten ungefederte Kopftreffer auftreten (Anlage 7, Abbildung 55–58), die aufgrund der sehr hohen Beschleunigungen, insbesondere bei einer Ausfahrtschwindigkeit von 30 km/h, sehr hohe dynamische Kräfte erzeugen.

Der Abstand des Triebzahnrades und des Bremszahnades der Adler- und Fink-Triebzüge ist kleiner als die Länge der Lamelle. Daher befinden sich gleichzeitig zwei Zahnräder auf der Lamelle, was gemäss den Regeln der Technik (D RTE 29700, Ziffer 6.2.2.1) nicht der Fall sein sollte. Eine gleichzeitige Durchfahrt mehrerer Zahnräder auf der Lamelle kann bei Bremsungen oder schwerlaufendem Bremszahnrad zu Störungen des Eingriffs führen.

4.1.2.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 177

Die SUST empfiehlt dem Bundesamt für Verkehr (BAV), das Konzept der heutigen eingebauten Lamellen der Zentralbahn dahingehend zu überprüfen und ggf. anpassen zu lassen, dass ...

- ... bei den Ausfahrten kein ungefederter Kopf auf Kopf-Treffer entstehen kann;
- ... die gleichzeitige Präsenz von zwei Zahnradern auf der Lamelle verhindert wird.

4.1.3 Dimensionierung und Sicherheitsfaktor von Triebzahnradern

4.1.3.1 Sicherheitsdefizit

Bei Bahnen mit gemischtem Adhäsions- und Zahnradbetrieb kann ein Aussereingriffkommen bei Zahnstangenein- respektive Zahnstangeausfahrten nicht ausgeschlossen werden. Die Triebzahnräder respektive die Tangentialfederung der Adler- und Fink-Triebzüge sind unter Berücksichtigung ihrer heutigen Dimensionierung und den vorhandenen Sicherheitsmargen für optimale Eingriffsverhältnisse dimensioniert.

Bei einem Aussereingriffkommen auf der Lamelle werden hohe dynamische Kräfte erreicht, für die die Konstruktion der heutigen verstellbaren Triebzahnräder der Adler- und Fink-Triebzüge nicht vorgesehen und berechnet sind.

Über die Dimensionierung eines Triebzahnades schreibt die D RTE 29700, Systemtechnik Zahnradbahnen, Folgendes vor:

Die Zahndicke bzw. die Zahnfußfestigkeit erfolgt auf Grund der maximalen Zahnbelastung und der Betriebsbelastung sowie nach den entsprechenden Regeln der Technik und den Vorschriften in der Eisenbahnverordnung.

Die Triebzahnräder sind sicherheitskritische Komponenten und eines der wichtigsten Elemente einer Zahnradbahn. Ein Sicherheitsfaktor für die Dimensionierung des Triebzahnrades ist in den AB-EBV nicht definiert.

4.1.3.2 Sicherheitsempfehlung Nr. 178

Die SUST empfiehlt dem Bundesamt für Verkehr (BAV), in den Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV) einen Sicherheitsfaktor für die Dimensionierung von Triebzahnradern festzulegen.

4.2 Sicherheitshinweise

Keine

4.3 Seit dem schweren Vorfall getroffene Massnahmen

Die der SUST bekannten Massnahmen werden im Folgenden kommentarlos aufgeführt.

Die Zentralbahn und Stadler haben die folgenden Massnahmen getroffen:

Kurzfristige Massnahmen

- Es wurden Schwingungsmessungen von allen Triebzahnradern in eingebautem Zustand durchgeführt, um einer potentiellen Rissentwicklung im Bereich der Federkammern zu detektieren.
- Die Geschwindigkeit bei der Zahnstangenausfahrt wurde temporär auf 20 km/h reduziert.
- Die Fehler in der Software (Wiederaufbau der Zugkraft auf der Lamelle) wurde behoben.
- Die Initiierung der Synchronisation der Triebzahnräder bei der Zahnstangeneinfahrt (automatisch durch die Balise) wurde in der Software implementiert. Die neue Softwareversion wurde im Dezember 2021 auf allen Fahrzeugen implementiert.

Mittelfristige Massnahmen

Die Triebzahnräder werden im Rahmen der Revision der Zahnradantriebe laufend durch neue (mit Optimierung der Federkammer) Triebzahnräder ersetzt (getroffene Massnahmen nach den Rissen von 2020). Bis Ende 2024 werden alle Triebzahnräder der Triebzüge ABeh 150/160 (erste Generation, Inbetriebnahme 2013) ersetzt sein.

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, 13. Dezember 2022

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle

Anlage 1

Triebzahnrad – Tangentialfederung und Begriffe

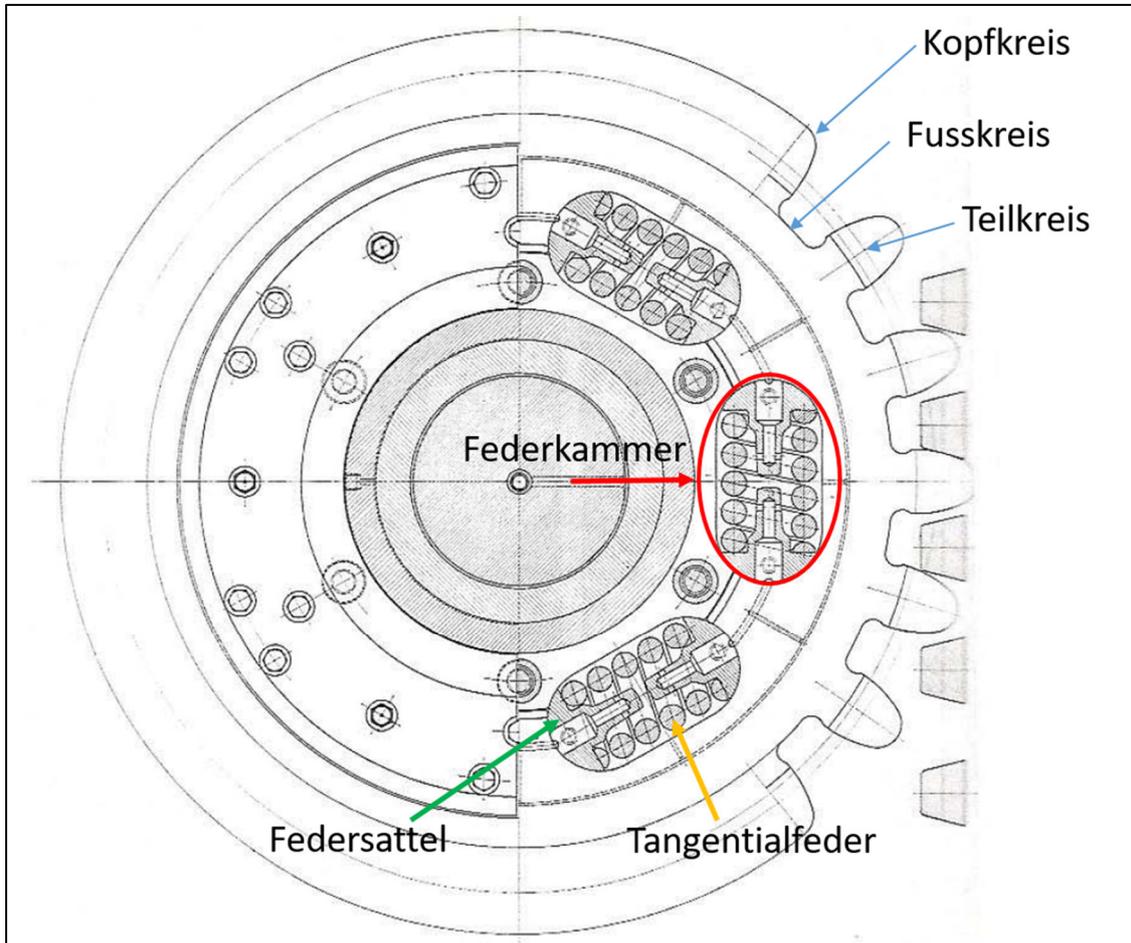


Abbildung 44: Zahnrad und Tangentialfederung – Beschreibung der Teile (Quelle: D RTE 29700).

Begriffe Eingriffslinie – Zahnkräfte

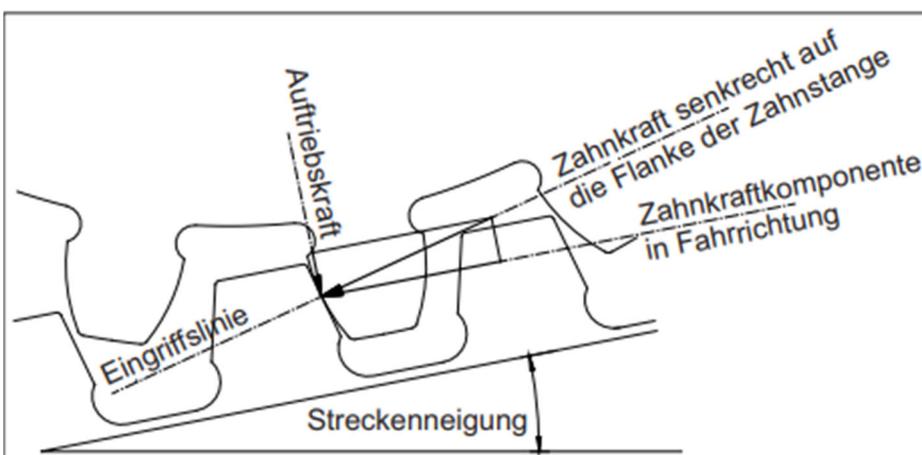


Abbildung 45: Auszug D RTE 29700 – Zahnkräfte, Kapitel 3.2.1.

Anlage 2

Querschnittvergleich verstellbares Triebzahnrad Adler-/Fink-Triebzug vs. Lokomotive HGe 4/4 II

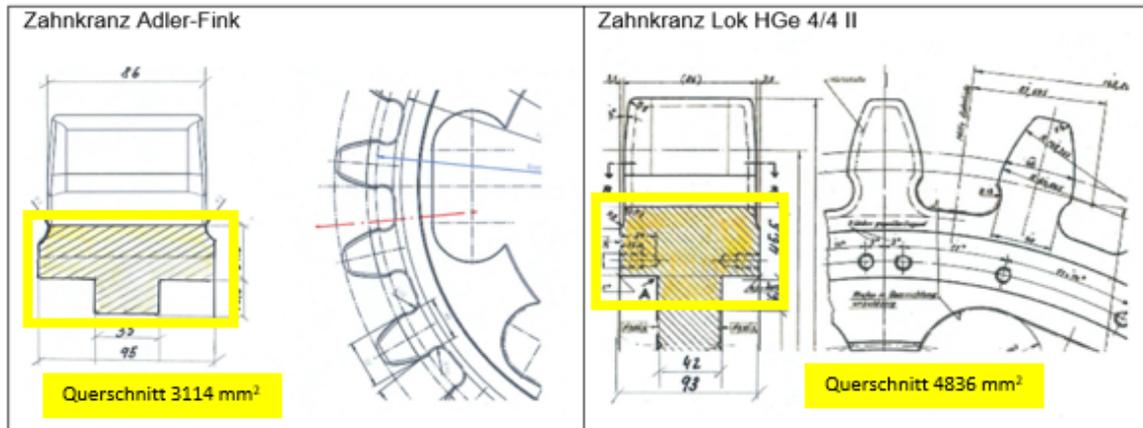


Abbildung 46: Ausschnitt Zahnradzeichnungen (Quelle: zb).

Anlage 3

Metallurgische Untersuchung des Triebzahnrades 2



Abbildung 47: Triebzahnrad 2 – Riss an der Zahnflanke.

Anlage 4

Einfahrlamelle, Form der Zähne 24–26, und Triebzahnrad, Zahnform

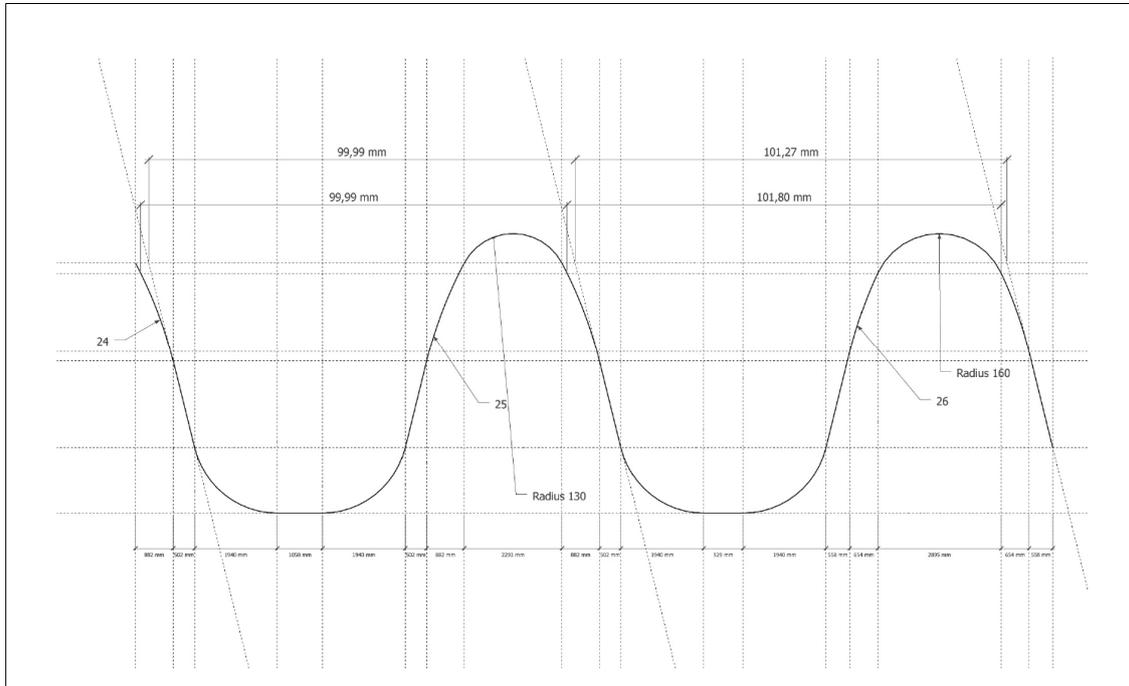


Abbildung 48: Einfahrlamelle zb: Form der Zähne 24–26 mit den verschiedenen Radien.

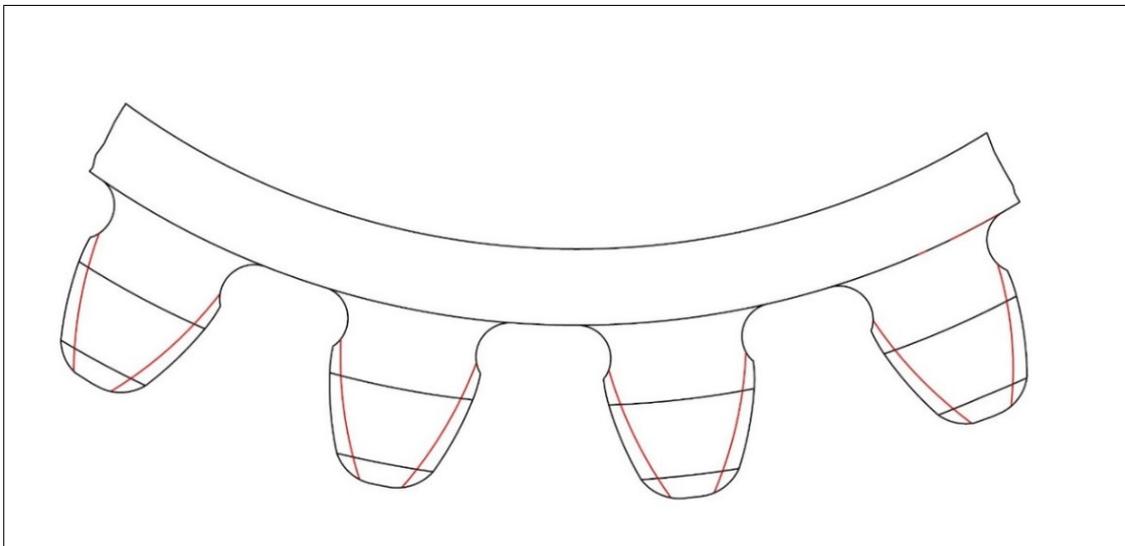


Abbildung 49: Triebzahnrad – Zahnformen.

Schwarz: Neues Zahnrad mit 17 mm Radius am Zahnkopf;

Rot: Abgenutzt mit scharfkantigem Zahnkopf (die Form entsprach der effektiven Form des gebrochenen Triebzahnrades).

Anlage 5

Geometrie Lamelle – Triebzahnrad – Meisseln

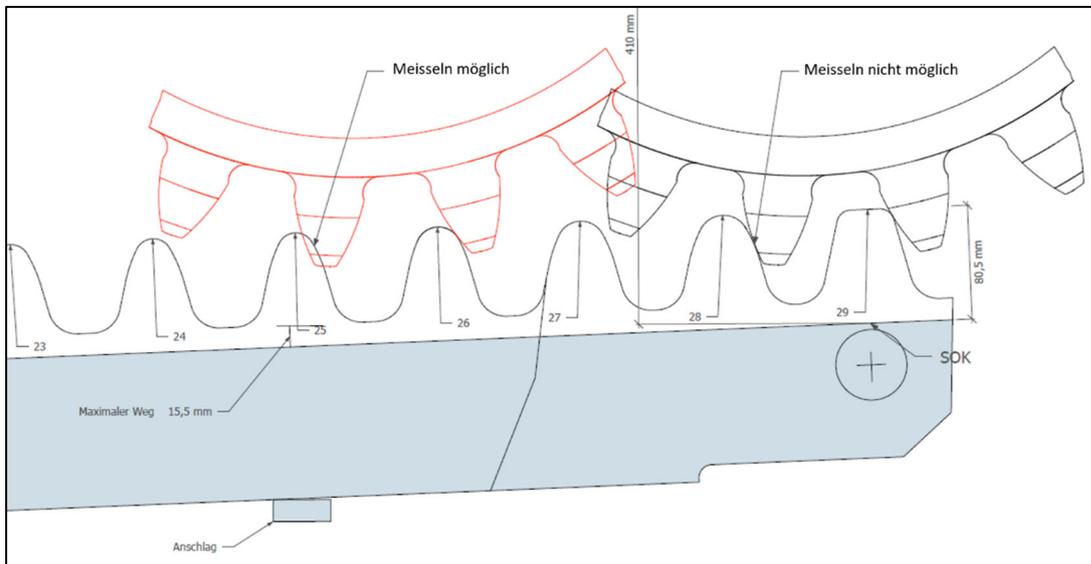


Abbildung 50: Lamelle am Anschlag, Rad neu.

Anlage 6

Teillinie – Eingriffstiefe Lokomotive HGe II vs. Adler-/Fink-Triebzug

Lokomotive HGe II

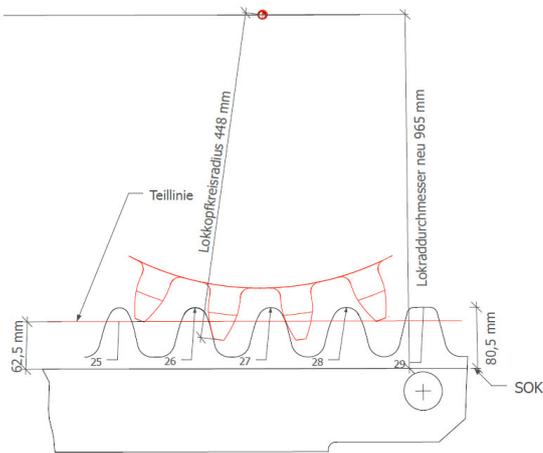


Abbildung 51: Rad neu.

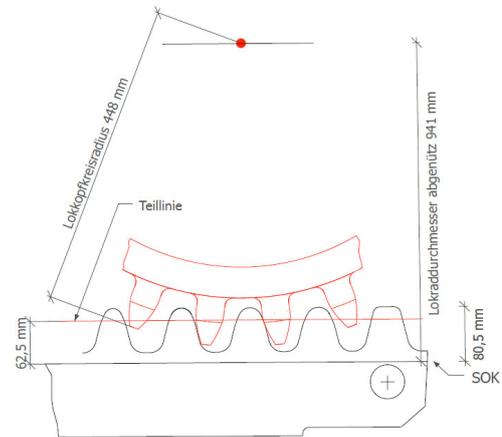


Abbildung 52: Rad abgenutzt.

Adler-/Fink-Triebzug

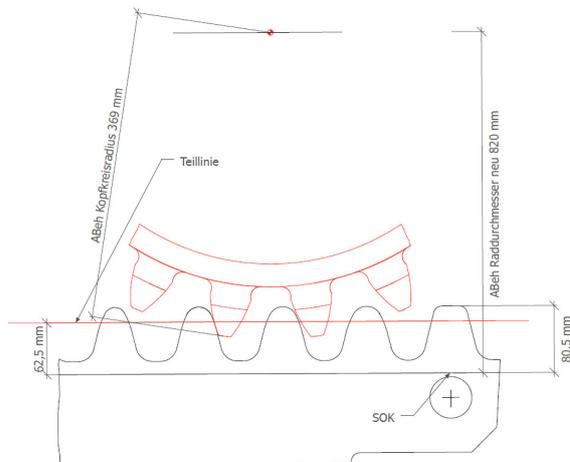


Abbildung 53: Rad neu.

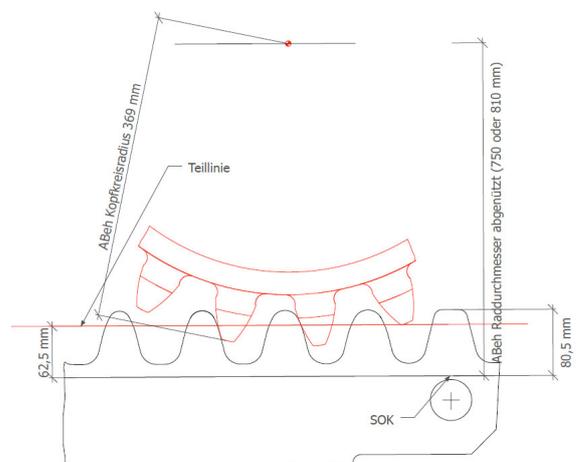


Abbildung 54: Rad abgenutzt.

Anlage 7

Zahnstangeneinfahrt: Zeichnungen, Illustrationen und Messwertetabelle

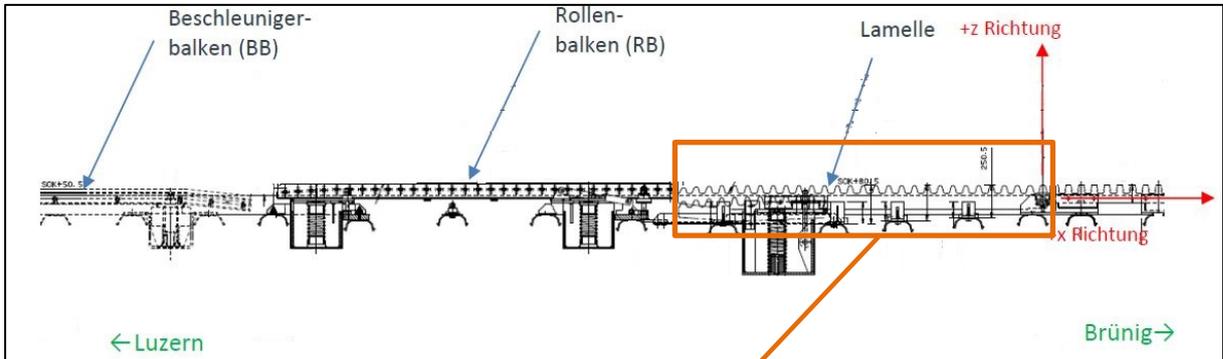


Abbildung 55: Gesamtübersicht Zahnstangeneinfahrt.

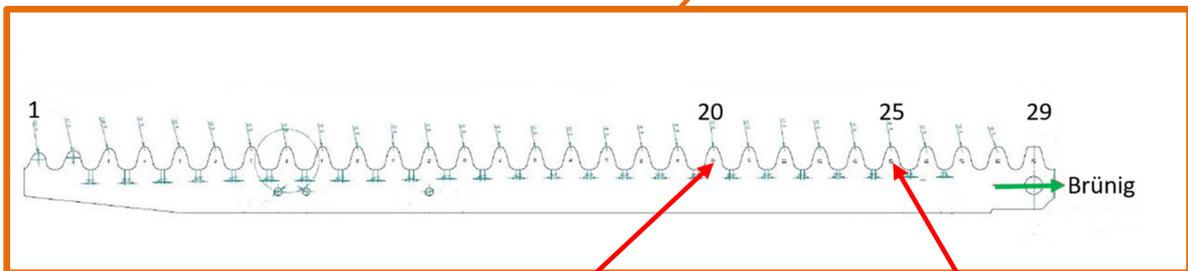


Abbildung 56: Lamelle



Abbildung 57: Videoauszug; Ausfahrt vom 18. Mai 2021 (Messtag).



Abbildung 58: Videoauszug; Ausfahrt vom 17. Mai 2021.

LN	v [km/h]	Az01		Az02		Az03		Az04		Z01		FzL		FxL	
		min [m/s ²]	max [m/s ²]	min [mm]	max [mm]	min [kN]	max [kN]	min [kN]	max [kN]						
13	-28.4	-1742	1573	-5410	2576	-4247	4594	-5185	2626	-37.1	11.0	-55.0	63.3	-83.6	60.9
16	11.3	-2057	1960	-2245	1837	-4493	5021	-1628	4266	-44.1	5.3	-49.7	84.7	-52.6	51.9
25	9.03	-936	891	-983	924	-2027	2553	-821	1590	-26.2	3.5	-27.7	36.5	-35.1	53.0
27	10.83	-1472	1733	-2686	1347	-4288	4853	-1286	2041	-31.4	3.5	-32.7	84.6	-45.1	66.7
30	10.43	-698		-5251	3084	-1093	2289	-5658	2816	-13.6	3.0	-26.2	17.1	-43.2	57.2

Abbildung 59: LN 13: Messwerte der Bewegung der Lamelle und der Kräfte bei der Ausfahrt. LN 16, 25, 27, 30 sind Einfahrten.

Anlage 8

Illustrationen und Messwerte bei der Ausfahrt LN 13

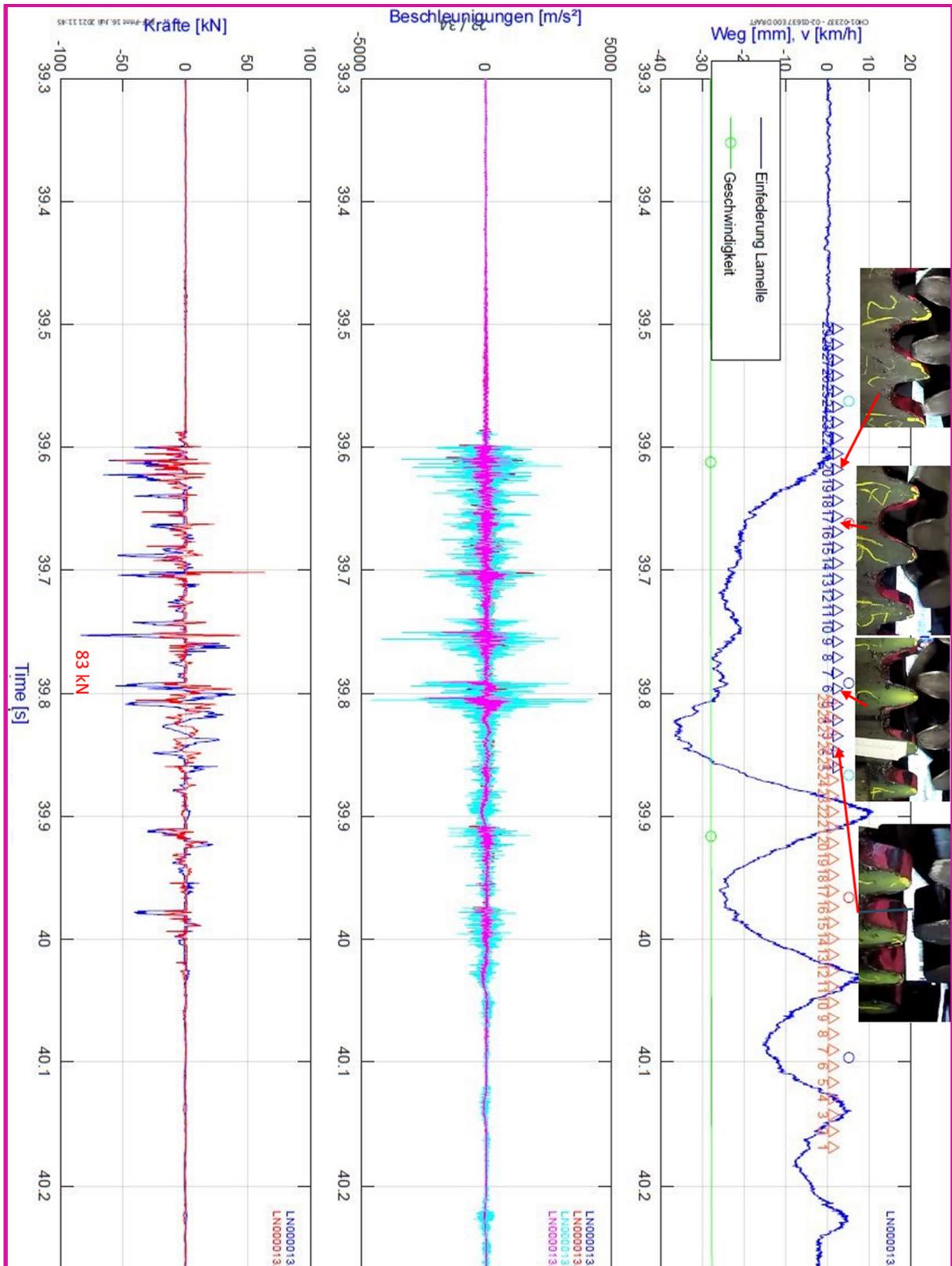


Abbildung 60: LN 13: Messwerte und Position des Zahnrades bei der Ausfahrt.

Anlage 9

Illustrationen und Messwerte bei der Einfahrt LN 16

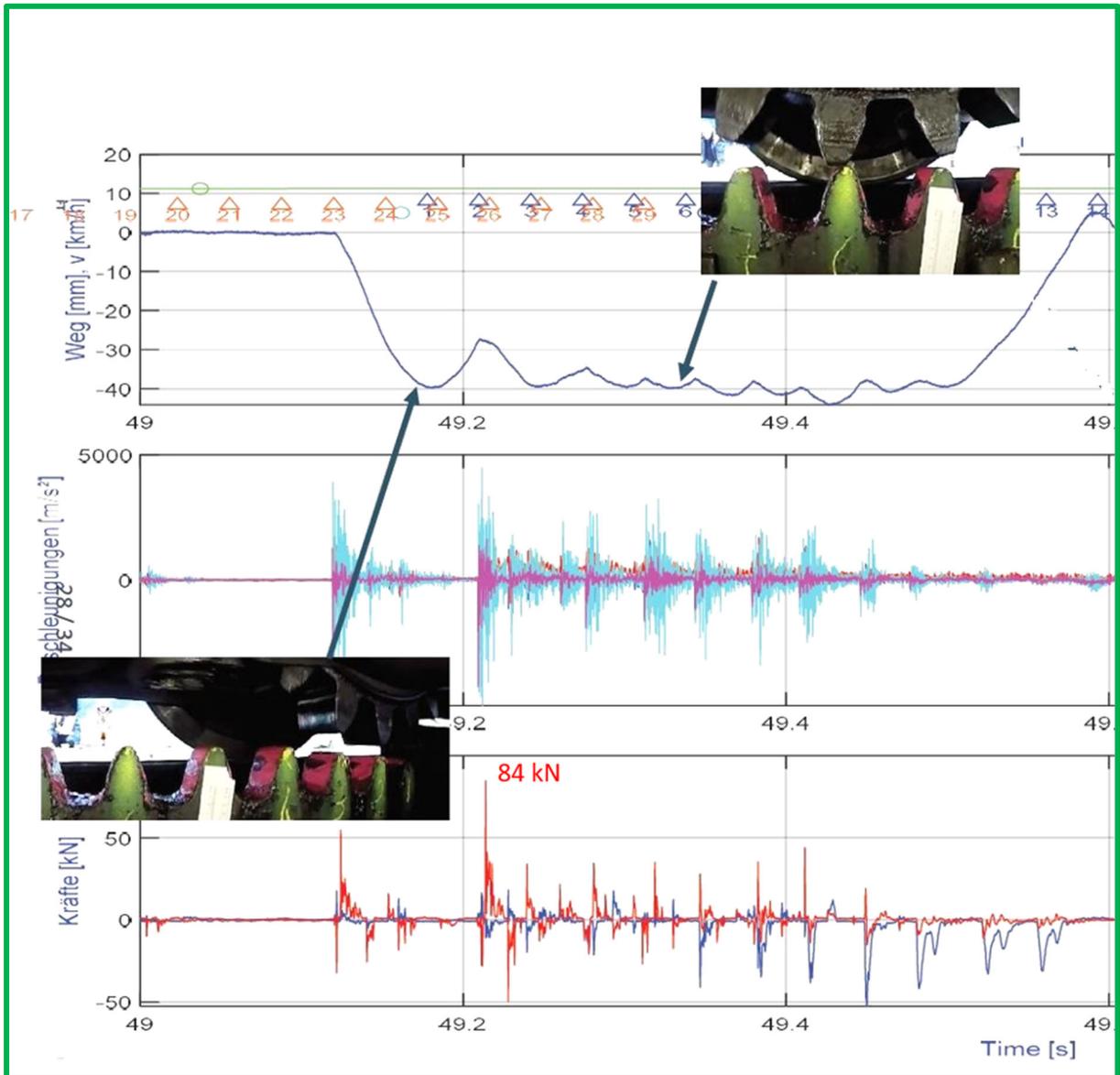


Abbildung 61: LN 16: Messwerte und Position des Zahnrades bei der Einfahrt.

Anlage 10

Kommentar zur Eisenbahnverordnung, BAV Homepage

Zur Eisenbahnverordnung als Ganzes, zu einzelnen und der Eisenbahnverordnung geregelten Problembereichen sowie zu einzelnen Ausführungsbestimmungen sind Richtlinien und Kommentare verfasst worden. Diese Richtlinien und Kommentare geben zusätzliche Informationen und Erläuterungen.

Kommentare sind in der Regel als historische Dokumente zu betrachten, die wichtige Hintergrundinformationen zu einer bestimmten, datierten Revision enthalten. Diese können jedoch für das bessere Verständnis der sich nach wie vor in Kraft befindenden AB-EBV-Bestimmungen aufschlussreich sein.

Kommentar Nr. 11 der Eisenbahnverordnung

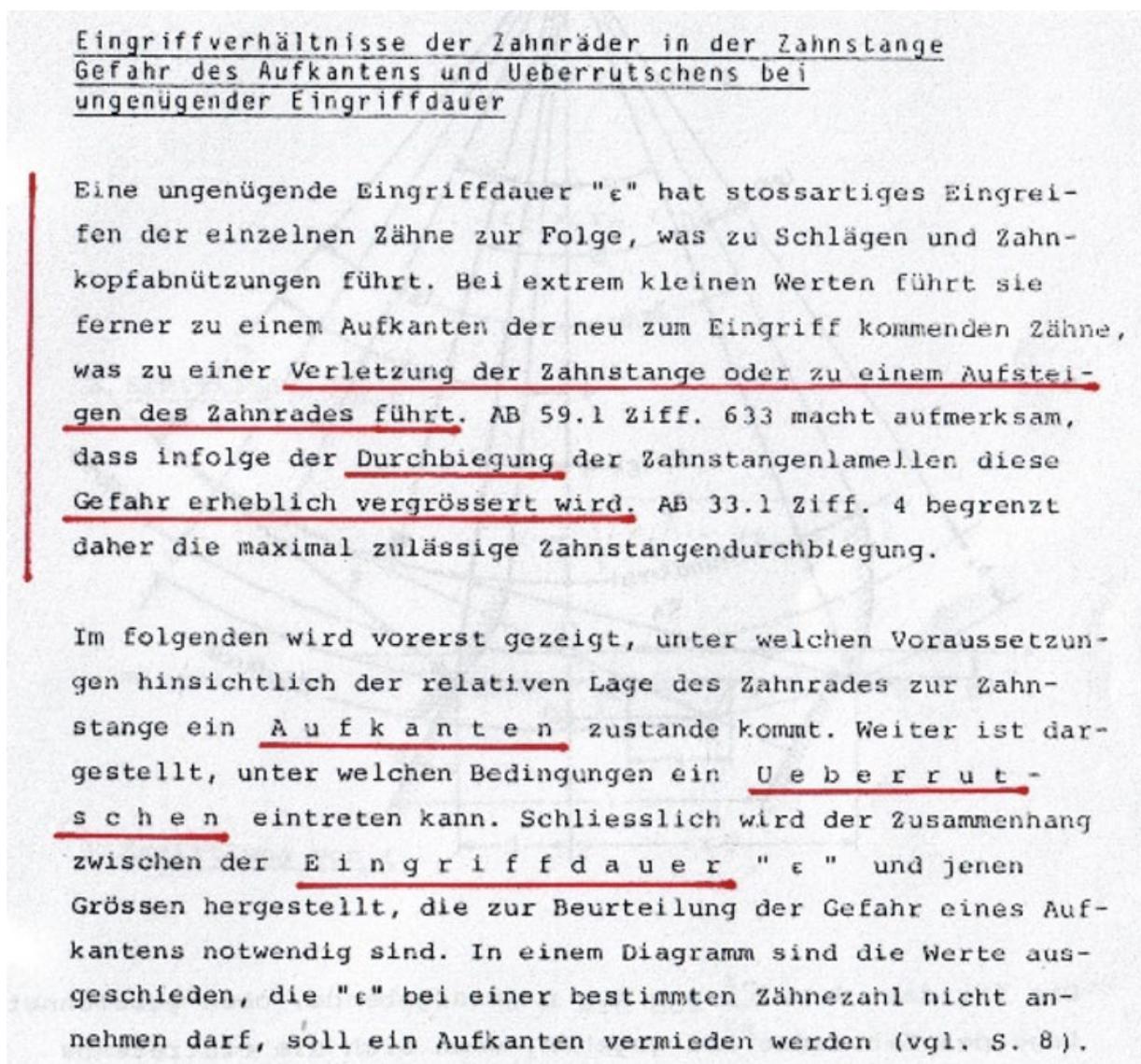


Abbildung 62: Auszug Kommentar Nr. 11 der Eisenbahnverordnung, Stand 1984: Eingriffsverhältnisse der Zahnräder in der Zahnstange (Quelle: BAV).