

## Projekt

# Optimierung Zahnstangeneinfahrten

## Vorstudie Summary Bericht

C. Katz  
Zentralbahn, Leiter Projekte  
11.12.2018



Adressaten: gemischte Adhäsions-/Zahnradbahnen, BAV, VöV, Projektbeteiligte

**Die Informationen in diesem Bericht sind vertraulich und nur zum Gebrauch der Adressaten bestimmt. Jegliche unautorisierte Vervielfältigung, Weiterleitung oder Publikation ist untersagt.**

## Management Summary

### Ausgangslage:

Auf dem Streckennetz der zb Zentralbahn AG (nachfolgend «zb») befinden sich 10 Zahnstangeneinfahrten (ZSE), deren Aufgabe es ist die Brems- und Triebzahnräder der Züge zuverlässig auf die Zahnstange zu synchronisieren. Sie bestehen in der Regel aus den 3 einzelnen Elementen Beschleunigungsbalken, Rollenbalken und Einfahrlamelle, welche jeweils unterschiedliche Aufgaben haben. Diese ZSE sind seit Jahren sehr unterhaltsintensiv und haben eine teilweise sehr kurze Lebensdauer. Die Entgleisung einer HGe Komposition in der ZSE Engelberg am 20.01.15 infolge eines gebrochenen Rollenbalkens hat zudem aufgezeigt, dass dieser Zustand auch ein Sicherheitsrisiko darstellen kann.

Daneben verursachen die Zahnstangeneinfahrten unerwünschte Fahrzeitverluste, da sie aus technischen Gründen in der Einfahrt heute nur mit 10 km/h befahren werden dürfen. Es besteht deshalb der Wunsch, die Einfahrtgeschwindigkeit auf 20 km/h zu erhöhen um die Fahrzeitverluste zu reduzieren.

### Ziel dieser Vorstudie

Aus diesen Gründen wurde eine Vorstudie mit folgenden 2 Zielen beauftragt:

- Ziel 1: Definition der benötigten konstruktiven und organisatorischen Massnahmen, um einen sicheren Betrieb bei den heutigen Geschwindigkeiten dauerhaft gewährleisten zu können.
- Ziel 2: Erarbeiten von 1-3 Lösungskonzepten, mit denen die erwünschte Fahrzeitverkürzung voraussichtlich erreicht werden kann.

Zum Erarbeiten der Studie wurde eine Arbeitsgruppe eingesetzt, welche sich aus Vertretern der Zentralbahn Infrastruktur, Zentralbahn Produktion & Rollmaterial sowie Vertretern der Industrie zusammensetzte. Die Finanzierung erfolgte durch Eigenmittel der Zentralbahn (~55%), Förder-Mittel des BAV (Forschungsprogramm Bahninfrastruktur 2017-2020, ~37%) sowie Eigenleistungen der Industriepartner (~8%).

### Technische Grundlagenuntersuchungen

Da grundlegendes Wissen zur Funktionsweise von Zahnstangeneinfahrten branchenweit teilweise fehlt, wurde ein grosses Augenmerk auf die Erarbeitung von elementaren Grundlagen gelegt. Die Arbeiten bauten dabei auf den 3 Säulen «Schadensanalysen», «Simulationen» sowie «Versuche / Messungen» auf. Deren wichtigsten Resultate lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Schadensanalysen: Die Analyse von insgesamt 15 Schadenfällen aus den letzten Jahren ergab, dass die aktuellen Einfahrten («ZSE 1.0») relevante Mängel aufweisen. Typische Mängel waren dabei ungenügend ausgestaltete Bauteilverbindungen, unterdimensionierte Bauteilpartien, systematische plastische Deformationen und Ermüdungsrisse sowie ungenügend konzipierte Inspektionen. Die Behebung dieser Mängel ist aus technischer Sicht zwingend. Aus den Schadensanalysen konnten zahlreiche konkrete Vorschläge abgeleitet werden, wie diese Schäden zukünftig durch konstruktive und organisatorische Massnahmen vermieden werden können («ZSE 1.1»). Ein Upgrade der heutigen ZSE 1.0 auf die verbesserte ZSE 1.1 oder ZSE 1.1+ ist als Nachrüstlösung mit überblickbarem Aufwand möglich.
  - Simulationen: Es wurden diverse begleitende Untersuchungen zum Zahneingriff, zum idealen Design der Verzahnungsgeometrie und zur Simulation der Belastungen an ZSE durchgeführt. Die dynamischen Simulationen haben aufgezeigt, dass Biegewellen eine zentrale Rolle beim strukturellen Verhalten von Rollenbalken spielen. Die Analysen an Lamellen haben zu einem Verfahren geführt, mit welchem die Synchronisationseigenschaften von Lamellen bereits auf dem Bildschirm beurteilt werden können. Die Analysen der Verschleiss Spuren schliesslich haben Erkenntnisse geliefert zu einer verbesserten Zahngeometrie an Lamellen.
-

- Versuche / Messungen: mit 2 Versuchsserien wurde eine Vielzahl von Einfahr- und Ausfahrvorgängen mit verschiedenen Fahrzeugen und verschiedenen Geschwindigkeiten durchgeführt. Die auftretenden Kräfte wurden messtechnisch erfasst. Mittels hochauflösenden Videoaufnahmen konnten die auftretenden Vorgänge zudem direkt beobachtet werden. Die wichtigsten Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:
  - Die Mechanik des Ausfahrvorgangs unterscheidet sich fundamental von derjenigen des Einfahrvorgangs und muss zukünftig berücksichtigt werden. Insbesondere führen Teilungsfehler dabei zur De-Synchronisation der Zahnräder. Sie sind ursächlich verantwortlich für Ermüdungsbrüche beim Rollenbalken und sollten zukünftig vermieden werden
  - Bei erhöhten Einfahrgeschwindigkeiten ist der Beschleunigung der Bremszahnräder grosse Aufmerksamkeit zu widmen
  - Die gemessenen Belastungen sind generell sehr hoch. Zahnstangeneinfahrten müssen als hochgradig ermüdungsbeanspruchte Bauteile angesehen werden und zukünftig entsprechend den hierfür geltenden Design-Regeln konstruiert werden. Eine Überwachung und Begrenzung der Einsatzdauer erscheint angezeigt.

Um die technische Machbarkeit einer Erhöhung der Einfahrgeschwindigkeit zu untersuchen, wurden Einfahrversuche bis zu  $v=20$  km/h durchgeführt. Diese zeigen, dass eine Einfahrgeschwindigkeit von  $v=20$  km/h unter folgenden Bedingungen technisch machbar ist:

1. Nur beim Einsatz von Fahrzeugen mit geeignetem Antriebskonzept (z.B. ABeh150/160)
2. Die heutigen ZSE der ersten Generation (ZSE 1.0) müssen durch Zahnstangeneinfahrten der zweiten Generation (ZSE 2.0) ersetzt werden. Design-Vorschläge hierfür wurden erarbeitet
3. Die Beschleunigung der Bremszahnräder ist bis dato noch nicht befriedigend gelöst, aber physikalisch grundsätzlich machbar. Eine Weiterentwicklung der Beschleunigungsbalken ist nötig (Haupt-Entwicklungsrisiko). Der zukünftige Beschleunigungsbalken wird zwangsläufig mehr Platz beanspruchen als der heutige.
4. Die korrekte Drehzahl der Triebzahnäder muss vom Fahrzeug vor dem Einfahrvorgang überprüft werden. Bei Abweichungen zum Sollzustand muss das Fahrzeug eine Zwangsbremse einleiten um Strukturschäden an Fahrzeug und Infrastruktur zu verhindern.

Insgesamt konnte durch die Untersuchungen die Entstehung aller Schäden geklärt werden und die Funktionsweise der Einfahrten verstanden werden. Die Höhe der Kräfte wurde quantifiziert und in einem Bericht erstmals zu berücksichtigende statische und Ermüdungs-Lastfälle postuliert. Die technische Machbarkeit einer erhöhten Einfahrgeschwindigkeit wurde geklärt. Es konnten konkrete Empfehlungen zum Design und dem Betrieb zukünftiger Zahnstangeneinfahrten erarbeitet werden.

### Lösungsansätze

Für den zukünftigen Betrieb der Zentralbahn am Brünig wurden folgende Lösungsvarianten untersucht:

1. Verlegen einer durchgehenden Zahnstange zwischen Lungern und Meiringen, um durch den Wegfall von 4 ZSE einen Fahrzeitgewinn zu erzielen und die Zuverlässigkeit zu steigern
2. Passive Zahnstangeneinfahrten (Weiterentwicklung der heutigen Technologie):
  - a. ZSE 1.1: Ertüchtigung der heutigen ZSE mit dem Ziel die wichtigsten Defizite mit minimalen Anpassungen zu eliminieren, bzw. um mit geringem Mehraufwand Verbesserungen auch beim Verschleiss zu erzielen (ZSE 1.1+)
  - b. ZSE 2.0: komplette Neuentwicklung einer V20 kompatiblen ZSE basierend auf dem heutigen Funktionsprinzip
3. Aktive Zahnstangeneinfahrten: Einsatz von sensorisch-aktuatorischen Systemen (Infrastrukturseitig oder Fahrzeugseitig)
4. Verzicht auf Zahnstangen durch Einsatz von Fahrzeugen bei denen alle Achsen angetrieben sind

Die Varianten wurden einer einfachen Bewertung unterzogen und bezüglich der Kriterien Kosten, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Fahrzeiteinsparung und Entwicklungsrisiken verglichen.

#### Empfehlung zum weiteren Vorgehen:

1. Einbau ZSE 1.1+: Auf dem gesamten Netz der Zentralbahn sollen die ZSE 1.0 auf Version 1.1+ aufgerüstet werden. Diese Massnahme dient dem Eliminieren der aktuell bekannten, potentiell sicherheitsrelevanten Schwachstellen und kann sowohl als Interims- als auch als dauerhafte Lösung eingesetzt werden. Sie ist aus technischer Sicht zwingend. Die Umsetzung soll möglichst zeitnah erfolgen. Die Einfahrtgeschwindigkeit bleibt auf  $v=10$  km/h beschränkt.
2. vertiefte Machbarkeitsstudie ZSE 2.0: in einer zweiten Phase soll eine vertiefte Machbarkeitsstudie für die ZSE 2.0 erstellt werden. Diese soll primär klären, wie eine wirtschaftlich tragbare Beschleunigungsvorrichtung aussehen könnte, die Kosten präziser abschätzen und eine Empfehlung zum weiteren Vorgehen zu Handen der GL abgeben.
3. Entwicklung und Implementierung ZSE 2.0 (optional): Im Falle eines positiven Entscheids würde voraussichtlich nach dem Bau eines Prototyp und einem Plangenehmigungsverfahren der Einbau einer einzelnen ZSE 2.0 erfolgen, welche in der Folge einer Betriebserprobung unterzogen würde. Die flächendeckende Einführung der Zahnstangeneinfahrten der 2. Generation würde erst nach erfolgreichem Abschluss der Betriebserprobung stattfinden.

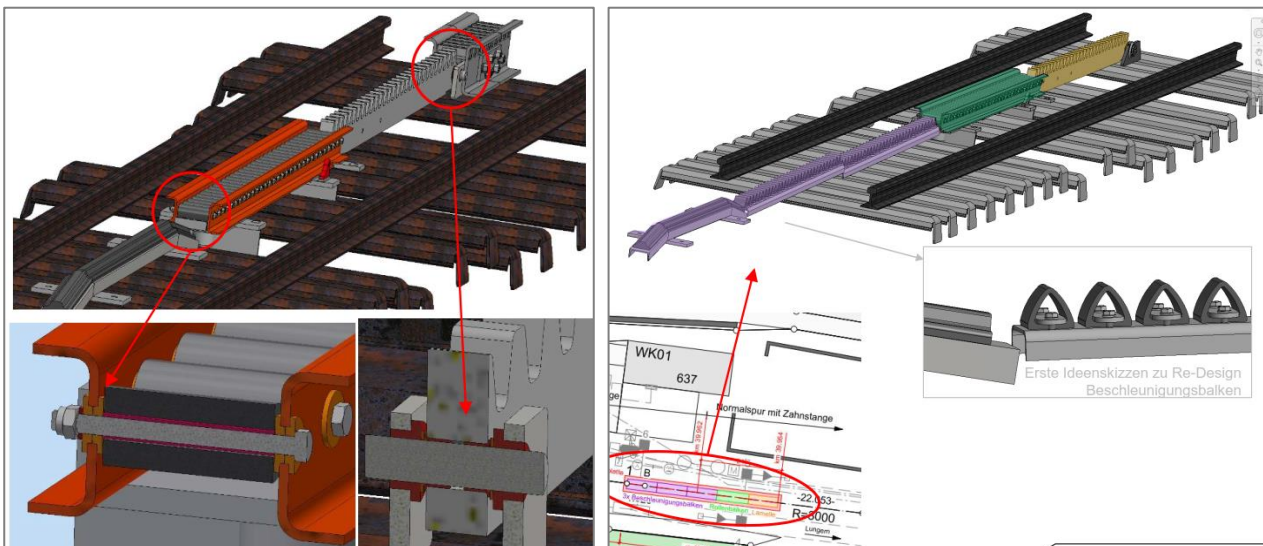


Abbildung 1: Entwürfe ZSE 1.1 (links, Änderungen gegenüber ZSE 1.0 rot) sowie ZSE 2.0 (rechts)

Für andere Bahnen empfehlen die Autoren, die in dieser Vorstudie erarbeiteten generellen Designempfehlungen zu berücksichtigen und entsprechende Massnahmen einzuleiten.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Management Summary</b>	<b>2</b>
<b>1. Ausgangslage</b>	<b>6</b>
1.1 Problemstellung	6
1.2 Projektziel	6
1.3 Vorgehensweise	7
<b>2. Zahnstangeneinfahrten – Konstruktion und Funktionsweise</b>	<b>8</b>
2.1 Aufgabe der ZS Einfahrt	8
2.2 Grundlegender Aufbau der ZS Einfahrten	8
2.3 Grundlegender Aufbau der Zahnradfahrzeuge	9
2.4 Interaktion Fahrzeug – ZS Einfahrt	9
<b>3. Technische Grundlagenuntersuchungen ZS Einfahrten</b>	<b>10</b>
3.1 Ausgangslage	10
3.2 Schadensanalysen	11
3.3 Versuche	13
3.4 Analytische Untersuchungen	19
3.5 Technische Machbarkeit Einfahrten mit $v=20$ km/h	23
3.6 Lastenanalysen	24
3.7 Zusammenfassung des aktuellen Wissenstands	26
<b>4. Fahrplantechnische Analysen</b>	<b>30</b>
<b>5. Lösungsansätze</b>	<b>32</b>
5.1 Durchgehende Zahnstange	32
5.2 Passive Systeme (Weiterentwicklung der heutigen Technologie)	33
5.3 Aktive Systeme	35
5.4 Verzicht auf Zahnstange	36
5.5 Variantenvergleich	37
<b>6. Empfehlung zum weiteren Vorgehen</b>	<b>39</b>
6.1 Designempfehlungen Zahnstangeneinfahrten (allgemein)	39
6.2 Empfehlung weiteres Vorgehen Zahnstangeneinfahrten (Zentralbahn)	40
6.3 Terminplan	41
6.4 Kosten- und Wirtschaftlichkeits-Abschätzungen	42
6.5 Zulassung	43
6.6 Geistiges Eigentum	43
6.7 Risiken / Chancen	44
<b>7. Referenzen</b>	<b>45</b>
<b>8. Anhänge</b>	<b>48</b>
8.1 Konstruktionsphilosophie zur Vermeidung von Ermüdungsschäden	48
8.2 Designempfehlungen Zahnstangeneinfahrten	49

---

## 1. Ausgangslage

### 1.1 Problemstellung

Auf dem Streckennetz der zb Zentralbahn AG (nachfolgend «zb») befinden sich 10 Zahnstangeneinfahrten. Diese bestehen in der Regel aus den 3 einzelnen Elementen Beschleunigungsbalken, Rollenbalken und Einfahrlamelle. Die Aufgabe der Zahnstangeneinfahrten ist es, die Brems- und Triebzahnräder der Züge zuverlässig auf die Zahnstange zu synchronisieren und ein sauberes Eingreifen der Zähne in der Zahnstange sicherzustellen.

Diese Zahnstangeneinfahrten sind seit Jahren sehr unterhaltsintensiv und haben eine teilweise sehr kurze Lebensdauer von bis zu lediglich einem Jahr. Die Entgleisung einer HGe Komposition in der Zahnstangeneinfahrt Engelberg am 20.01.15 infolge eines gebrochenen Rollenbalkens hat zudem aufgezeigt, dass dieser Zustand auch ein Sicherheitsrisiko darstellen kann.

Daneben verursachen die Zahnstangeneinfahrten unerwünschte Fahrzeitverluste, da sie aus technischen Gründen in der Einfahrt heute nur mit 10 km/h befahren werden dürfen. Die Ausfahrten finden mit Streckengeschwindigkeit (40 km/h bergwärts, 27 km/h talwärts) statt. Es besteht deshalb der Wunsch, die Einfahrtgeschwindigkeit auf 20 km/h zu erhöhen um die Fahrzeitverluste zu reduzieren.

Eine Erhöhung der Einfahrtgeschwindigkeit ist technisch komplex. Es gibt bis dato keine Bahn, welche mit einer so hohen Geschwindigkeit einfahren würde. Diesbezügliche Versuche der zb in der Vergangenheit mussten jeweils nach kürzester Zeit abgebrochen werden (nicht mehr handhabbarer Verschleiss und Entgleisungsgefahr). Aus diesem Grund wurde in jüngster Vergangenheit auch der Ansatz diskutiert, die Anzahl Zahnstangeneinfahrten zu reduzieren, indem länger durchgehende Abschnitte mit einer Zahnstange ausgestattet werden („durchgehende Zahnstange“).

Diese Vorstudie soll dazu dienen, Lösungen aufzuzeigen wie eine Fahrzeitreduktion erzielt werden kann, bei gleichzeitiger Reduktion des Verschleisses und Erhöhung der Sicherheit.

### 1.2 Projektziel

Folgende Ziele sollen mit dem Projekt „Optimierung Zahnstange“ erreicht werden:

- **Ziel 1 Betriebssicherheit (Erste Priorität):** Die Zahnstangeneinfahrten und deren Unterhalt sollen so optimiert werden, dass betriebsgefährdende Zustände nicht mehr vorkommen können. Diese Anforderung gilt für sämtliche Zahnstangeneinfahrten auf dem Netz der zb und sämtliche darauf verkehrenden Fahrzeuge und für den Ein- wie auch Ausfahrtvorgang.
- **Ziel 2 Fahrzeitverkürzung (Zweite Priorität):** Die Fahrzeit soll so weit verkürzt werden können, dass sich dadurch eine sinnvolle Optimierung des Fahrplanangebots ergibt. Da sich auf dem Engelberger-Ast keine relevante Fahrplanverbesserung erzielen lässt, soll nur die Fahrzeit am Brünig optimiert werden (Fokus: Verlegung der Kreuzung der IR's LU – IO vom Käppeli auf den Brünig). Die Fahrzeitreduktion kann auf neue Fahrzeuge (FINK, ADLER) beschränkt werden. Sie kann entweder durch eine Erhöhung der Einfahrtgeschwindigkeit, durch eine durchgehende Zahnstange, oder eine Kombination der beiden Massnahmen erreicht werden.

Beim vorliegenden Projekt handelt es sich um ein ehrgeiziges Vorhaben mit erheblicher Komplexität. Der genaue Lösungsweg ist aktuell nicht klar. Unabhängig vom gewählten Lösungsansatz wird es mehrere Jahre dauern, bis eine Lösung implementiert werden kann. Aus diesem Grund wird in einer ersten Phase nur das Ausarbeiten einer Vorstudie beauftragt. Mit dieser Vorstudie sollen folgende Zwischenziele erreicht werden:

- **Zwischenziel 1 (Erste Priorität):** Definition der benötigten konstruktiven und organisatorischen Massnahmen, um einen sicheren Betrieb bei den heutigen Geschwindigkeiten dauerhaft gewährleisten zu können. Die flächendeckende Umsetzung dieser Massnahmen erfolgt in einer späteren Projektphase und ist nicht Teil der Vorstudie.

- **Zwischenziel 2 (Zweite Priorität):** Erarbeiten von 1-3 Lösungskonzepten, mit denen die erwünschte Fahrzeitverkürzung voraussichtlich erreicht werden kann. Die flächendeckende Umsetzung dieser Massnahmen erfolgt in einer späteren Projektphase und ist nicht Teil der Vorstudie.

Weitere Einzelheiten sind im Projektierungsauftrag [3] festgehalten.

### 1.3 Vorgehensweise

In einer Frühphase der Untersuchungen im Jahr 2015 zeigte sich, dass diverse für das Verständnis der Zahnstangeneinfahrten benötigten Grundlagen branchenweit nicht vorhanden sind.

Die Zentralbahn entschied sich deshalb, in einer Arbeitsgruppe vorerst die nötigen Grundlagen zu erarbeiten, um anschliessend die Einfahrten bezüglich Einfahrtgeschwindigkeit, Unterhaltsaufwand, Lebensdauer und Sicherheit optimieren zu können.

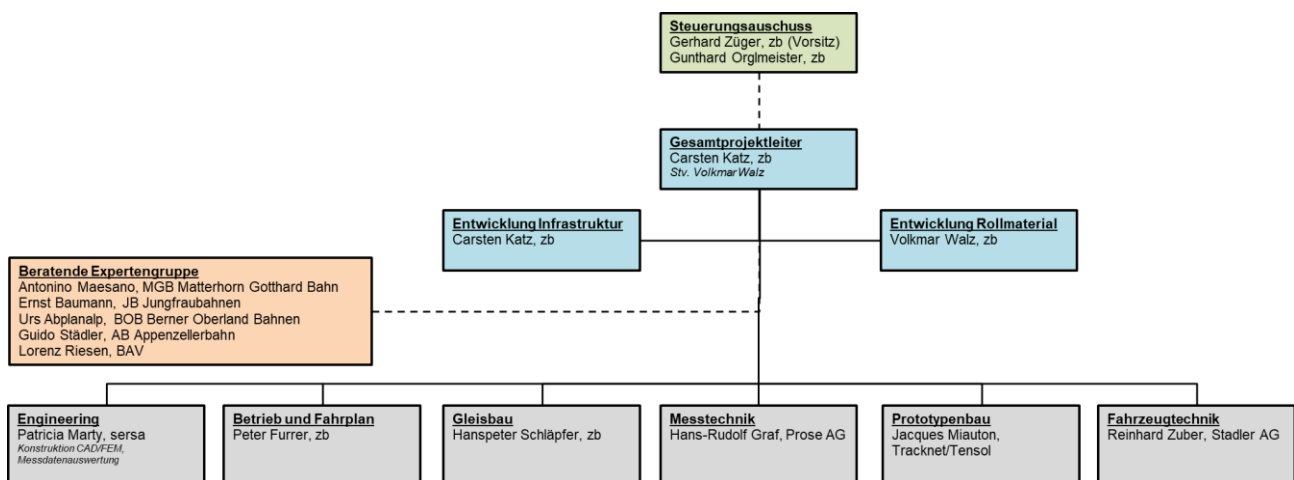


Abbildung 2: Projektorganisation mit Kernteam (blau) und Arbeitsgruppe (blau+grau)

Die Arbeiten basieren auf den 3 Säulen Schadensanalysen, Versuche und Simulationen. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf dem Erarbeiten der elementaren Grundlagen, und ist somit auch für andere gemischte Bahnen gültig. Einige wenige Aspekte der Studie sind Zentralbahn-spezifisch.

Die Resultate sollen einem breiten interessierten Publikum zugänglich gemacht werden und auch in die RTE 29700 einfließen.

Diese Vorstudie wurde durch Mittel der zb Zentralbahn, Beiträge von Tensol, Stadler, Prose und Sersa sowie durch BAV- Fördermittel [6] finanziert. Die Zentralbahn dankt allen Beteiligten für die grosszügige Unterstützung.

## 2. Zahnstangeneinfahrten – Konstruktion und Funktionsweise

### 2.1 Aufgabe der ZS Einfahrt

Zahnstangeneinfahrten haben die Aufgabe, die Zahnräder des Fahrzeugs in den korrekten Eingriff in der Zahnstange zu bringen. Die Aufgaben der einzelnen Elemente sind *Abbildung 3* erläutert:

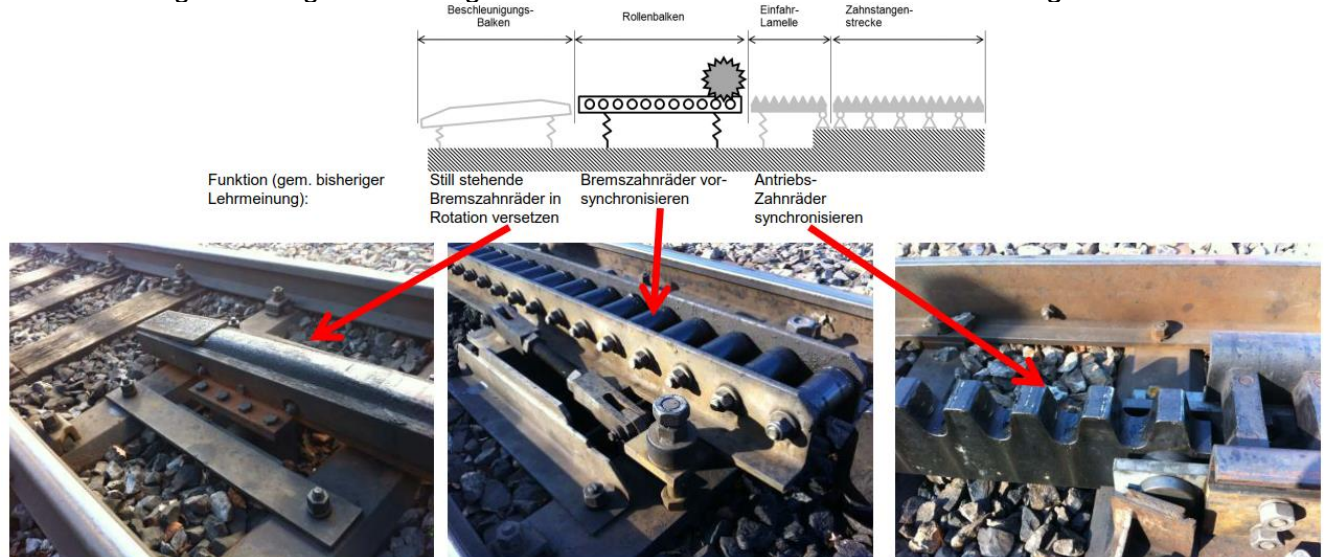


Abbildung 3: Grundsätzliche Funktionsweise von Zahnstangeneinfahrten

### 2.2 Grundlegender Aufbau der ZS Einfahrten

Auf dem Netz der Zentralbahn befinden sich insgesamt 10 Zahnstangeneinfahrten unterschiedlicher Bauart. Untenstehende Grafik verdeutlicht deren prinzipielle Funktionsweise und deren Einsatz im Zentralbahn Streckennetz. Die Lamellentypen MR und KAEP funktionieren nach demselben Prinzip, unterscheiden sich aber in konstruktiven Details. Ebenso verhält es sich mit den Rollenbalken Typ MR und GI.

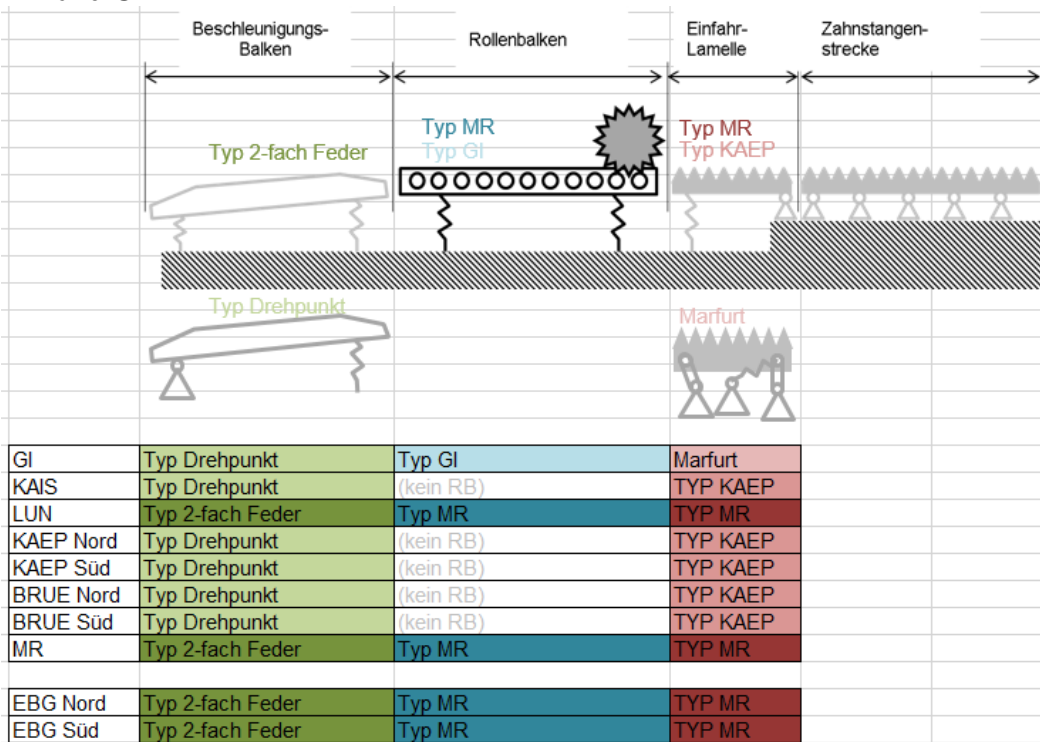


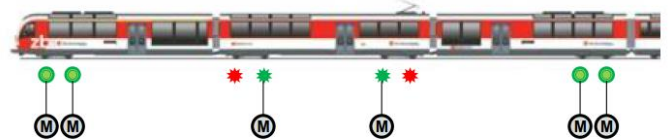
Abbildung 4: Typen von Zahnstangeneinfahrten und deren Einsatz auf dem Netz der Zentralbahn



## 2.3 Grundlegender Aufbau der Zahnradfahrzeuge

Im Wesentlichen verkehren auf dem Netz der zb zwei verschiedene Zugstypen im Zahnstangenbereich. Diese weisen komplett unterschiedliche Antriebskonzepte auf:

- ABeh 150/160:
  - Triebzahnräder und Adhäsionsantrieb getrennt
  - 2 Bremszahnräder pro Dreiteiler



- HGe:
  - Triebzahnräder und Adhäsionsantrieb gekoppelt
  - Bremszahnräder nur an Waggonen



Durch das unterschiedliche Antriebskonzept verhält sich der ABeh beim Ein- und Ausfahren in eine Zahnstangeneinfahrt komplett anders als eine HGe.

- = angetriebenes Adhäsionsrad
- ★ = Triebzahnrad (TZR)
- ★ = Bremszahnrad (BZR)
- Ⓜ = Antriebsmotor

Abbildung 5: Antriebskonzepte der wichtigsten bei der zb verkehrenden Zahnradfahrzeuge

Bei beiden oben erwähnten Fahrzeugtypen können Triebzahnräder zudem zum elektrischen Bremsen verwendet werden.

Die Ausführungen in dieser Vorstudie beziehen sich auf die beiden obenerwähnten Fahrzeugtypen. Da viele Meterspurbahnen ähnliche oder sogar fast baugleiche Fahrzeuge besitzen, sind viele Erkenntnisse dieser Studie auch auf andere Meterspurbahnen übertragbar.

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl weiterer Zahnrad-Antriebskonzepte, auf welche im Rahmen dieser Vorstudie nicht eingegangen wird.

## 2.4 Interaktion Fahrzeug – ZS Einfahrt

Die Interaktion zwischen Fahrzeug und Zahnstangeneinfahrt ist überaus komplex. Sie hängt von einer Vielzahl von Einflussparametern ab, wie z.B. (nicht abschliessende Aufzählung):

- Fahrzeug:
  - Lokbespannte Züge / Triebzüge
  - Triebzahnrad / Bremszahnrad
  - Verschiedene Zahnradgeometrien (Zahnformen, Zahnrad Durchmesser, ...)
  - Über- / Untergeschwindigkeit des Triebzahnrad
  - Koppelung Triebzahnrad an Adhäsionsrad starr / elastisch / entkoppelt
  - Zahnräder mit hoher / kleiner Rotationsträgheit
- Infrastruktur
  - Konventionelle Lamellen / Marfurt Lamellen
  - Einfahrten mit / ohne Rollenbalken
  - Einfahrten im Tal / am Berg
  - Lamellen mit positivem / negativem Teilungsfehler
  - Verschiedene Lamellen Zahngeometrien
  - Verschiedene Federhärten
  - Einfahrten im Neuzustand / verschlissenen Zustand
  - Einstellung der Beschleunigungselemente in der Höhe / Längslage
- Direkte Interaktion
  - Variable Relativposition Fahrzeug zu Infrastruktur durch Schienenverschleiss, Radverschleiss und höhenverstellbare Zahnräder
  - Reibungskoeffizient zwischen Rad und Schiene / Zahnrad und Einfahrelement / nass und trocken

- Überfahrt kraftlos / konstante Geschwindigkeit / beschleunigt / gebremst
- Betrieb
  - Einfahrtvorgang / Ausfahrtvorgang
  - Geschwindigkeit niedrig / hoch
  - Regelbetrieb / Sonderbedienung (z.B. Einfahrt mit ausgefallenem TZR Stromrichter)

Die Zusammenhänge zwischen diesen Parametern lassen sich nicht geschlossen analytisch darstellen. Die meisten Vorgänge zwischen Fahrzeug und Zahnstangeneinfahrt entziehen sich zudem der direkten visuellen Betrachtung, da sie durch das Fahrzeug bei der Überfahrt verdeckt werden und sich in Bruchteilen von Sekunden abspielen.

Die Vorstudie versucht diese Komplexität durch folgende Vorgehensweise überblickbar zu machen:

1. Die Untersuchungen werden mehrheitlich an einer einzigen, «typischen» Einfahrt durchgeführt. Diese Einfahrt wird dabei von mehreren Seiten beleuchtet (Rückblickend via Schadensanalysen, direkt via Messungen, und vorausblickend via Simulationen)
2. Daraufhin werden einzelne Parameter, wie z.B. die Einfahrtgeschwindigkeit, gezielt variiert, um den Einfluss auf das Systemverhalten studieren zu können.

Die so erhaltenen Erkenntnisse werden somit zwar nicht für alle denkbaren Kombinationen der obenerwähnten Parameter gültig sein, im Rahmen der heute auf den Netzen der Meterpurbahnen vorhandenen Situationen aber einen relativ breiten Bereich gut abbilden. Lediglich die Funktion von Marfurt Lamellen wird in dieser Studie nur in sehr geringem Umfang beleuchtet.

### **3. Technische Grundlagenuntersuchungen ZS Einfahrten**

#### **3.1 Ausgangslage**

Es ist davon auszugehen, dass bereits in früheren Jahren Untersuchungen zur Funktionsweise von Zahnstangeneinfahrten durchgeführt wurden. Die Mehrzahl der Untersuchungen der letzten Jahrzehnte dürfte dabei in die RTE 29700 [4] eingeflossen sein. Darüber hinaus sind den Autoren keine relevanten weiteren Quellen bekannt.

Die zb besitzt selber keine schriftlich dokumentierten Untersuchungen.

### 3.2 Schadensanalysen

In den letzten Jahren ist es bei der zb zu einer grösseren Anzahl Schäden an Zahnstangeneinfahrten gekommen. Diese Schäden wurden rückwirkend analysiert und in einem separaten Bericht zusammengefasst [7].

Eine Übersicht über die wichtigsten Schadensbilder zeigt untenstehende *Abbildung 6*:



*Abbildung 6: Wichtigste Schadensbilder an Zahnstangeneinfahrten der Zentralbahn. Die Bilder zeigen mit 1 Ausnahme Schadenfälle aus den Jahren 2015-2017.*

Die Schäden lassen sich zusammenfassend wie folgt beschreiben:

- Es sind über ein Dutzend relevante Schäden aus den letzten rund 5 Jahren bekannt. Dabei ist es zu einer Entgleisung gekommen. Mehrere Versagen sind als schwerwiegend einzustufen und haben nur durch glückliche Umstände nicht zu weiteren Fahrzeug- und/oder Personenschäden geführt.
- Die Schäden verteilen sich anzahlmässig je ca. hälftig auf den Rollenbalken und die Lamelle. Relevante Schäden am Beschleunigungsbalken sind nicht bekannt.
- Die Schäden weisen vielfach folgendes typisches Muster auf:
  - o Hochbeanspruchte Bauteilverbindungen (Augen-Bolzenverbindungen) sind nicht durch Büchsen geschützt. Dadurch wird die Bildung von Ermüdungsrissen stark beschleunigt.
  - o Das Design ist vielfach unausgewogen (nicht alle Bauteile mit gleicher Festigkeit konstruiert, hohe Spannungskonzentrationen, Teile der Konstruktion unterdimensioniert)
  - o Die Belastungen sind durchwegs hoch bis sehr hoch. Es treten systematisch plastische Deformationen unter Betriebslasten, sowie Ermüdungsbrüche auf.
  - o Die vorhandenen Inspektionen sind ungenügend konzipiert, sie sind nicht in der Lage Bauteilversagen rechtzeitig zu entdecken
  - o Es fehlen klare Vorgaben zum Rapportieren von Schadenfällen bei der Zentralbahn.

Der Umgang mit solchen Schäden sollte grundsätzlich überdacht werden und in folgenden Punkten verbessert werden:

- Einführung verbessertes Design, welches die bekannten Mängel behebt (siehe Empfehlungen zu den einzelnen Schadensfällen in [7] sowie in diesem Bericht ab S. 49 )
- Verbessertes Inspektions- und Wartungsprogramm, welches unbekannte Mängel entdecken kann
- Einführung einer Reporting-Pflicht für derartige Schäden
- Überwachung und Limitation der Einsatzdauer sicherheitsrelevanter Komponenten.

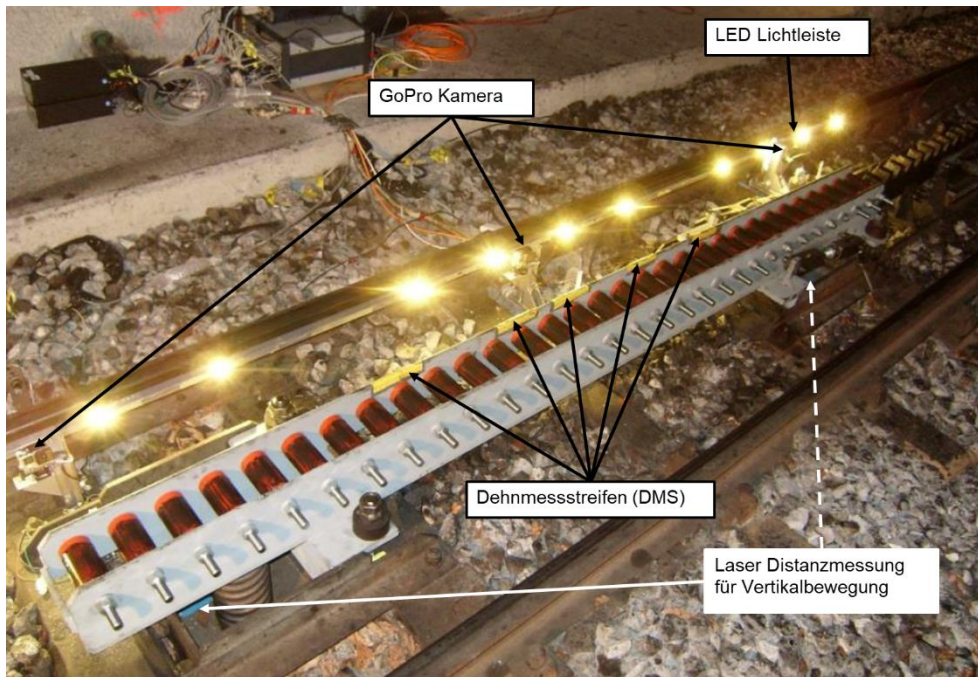
Neben obigen Schäden unterliegen die Einfahrelemente, insbesondere die Lamellen, auch signifikantem Verschleiss. Das Verschleissverhalten wird im Kap. 3.4.2 S. 20ff näher analysiert.



### 3.3 Versuche

#### 3.3.1 Messungen Rollenbalken Mai 16

Im Mai 2016 wurden in der Zahnstangeneinfahrt Engelberg Süd Messungen an einem instrumentierten Rollenbalken durchgeführt, mit dem Ziel die Entstehung der Ermüdungsrisse an Rollenbalken besser zu verstehen. Abgesehen von der Instrumentierung entsprach die Einfahrt der aktuell bei der zb verwendeten Standard-Einfahrt [53]. Gemessen wurden Einfahrten ( $v_{\text{Einfahrt}}=10\text{km/h}$ ) und Ausfahrten ( $v_{\text{Ausfahrt}} \sim 40\text{ km/h}$ ) von Regelzügen (28x Hge Pendel, 4x ABeh160). *Abbildung 7* zeigt den Versuchsaufbau.



*Abbildung 7: Versuchsaufbau zur Messung des Rollenbalken-Verhaltens*

Der Versuch ist detailliert in einem Bericht der Firma Prose dokumentiert [16]. Folgende Schlüssel-Erkenntnisse leitet die zb aus diesen Messungen ab:

1. Der Ausfahrtvorgang führt zu rund 4x höheren Spannungen als der Einfahrtvorgang, siehe *Abbildung 8*. Für die Ermüdungsschädigung des Rollenbalkens ist somit mehrheitlich der Ausfahrtvorgang relevant.
2. Selbst die in den Versuchen eingesetzte aktuellste (und bisher stabilste) Version des Rollenbalkens weist unzulässig hohe Spannungen auf. Die gemessenen Feldspannungen bei normalen Ausfahrten betragen  $+203 / -276\text{ N/mm}^2$  (Median von 16 Ausfahrten), die höchsten Werte liegen bei  $+302 / -307\text{ N/mm}^2$ . Die lokalen Spannungen werden unter Berücksichtigung der Spannungskonzentrationsfaktoren noch erheblich höher liegen. Zum Vergleich: die Streckgrenze des verwendeten Materials S355J2 (1.0577) liegt bei  $R_{p0.2}=355\text{ N/mm}^2$ . Bei einem derart hohen Spannungsniveau sind ohne Gegenmassnahmen weitere Ermüdungs-Risse in Rollenbalken zu erwarten.
3. Die Triebzahnräder von HGe und FINK werden bei der Ausfahrt systematisch de-synchronisiert und verursachen deshalb bei praktisch jeder Ausfahrt einen „Volltreffer“ auf dem Rollenbalken (siehe *Abbildung 9*). Dies ist die Hauptursache für die hohen Spannungen bei der Ausfahrt und somit eine der Hauptursachen für die Ermüdungsrisse im Rollenbalken. Die Ursache für die De-synchronisierung wird im Teilungsfehler der Lamelle gesehen.
4. Der Rollenbalken erfüllt seinen eigentlichen Zweck, nämlich das Synchronisieren der Bremszahnräder beim Einfahren, hervorragend und innerhalb kürzester Strecke.

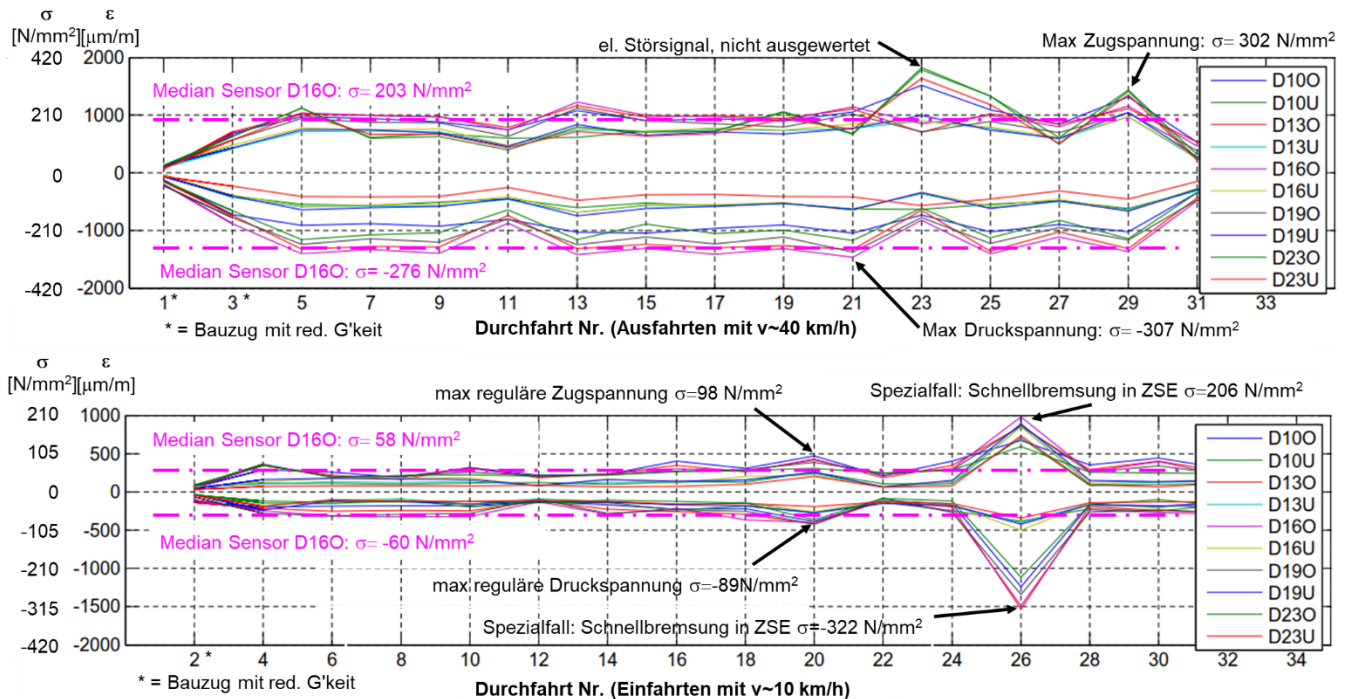


Abbildung 8: gemessene Spannungen im Rollenbalken bei Ein- und Ausfahrten. D16= DMS bei Rolle Nr. 16 Oben. Das Diagramm zeigt den Maximal und Minimalwert jeder Durchfahrt, ohne Berücksichtigung des Zahnradtyps



Abbildung 9: Video-Beweis des De-Synchronisiervorgangs bei der Ausfahrt: das Triebzahnrad der HGe läuft Kopf-auf-Kopf aus der Lamelle (links) aus und trifft systematisch die erste Rolle des Rollenbalkens (rechts). Die hiermit ausgelöste Biegewelle führt zu sehr hohen Spannungen und Ermüdungsschädigung im Rollenbalken.



### 3.3.2 Messungen Lamelle September / November 17

Basierend auf den Erkenntnissen vom Mai 2016 wurden im September und November 2017 Folgeversuche durchgeführt, in welchen neben dem Rollenbalken auch das Verhalten der Lamelle messtechnisch erfasst wurde. Der Versuch war in 4 je eintägige Tests aufgeteilt. Der Messaufbau ist aus untenstehender *Abbildung 10* ersichtlich. Der Versuch ist in einem Bericht der Firma Prose beschrieben [17] und von der zb in einem Bericht [15] sowie einer Präsentation [47] vertieft ausgewertet.

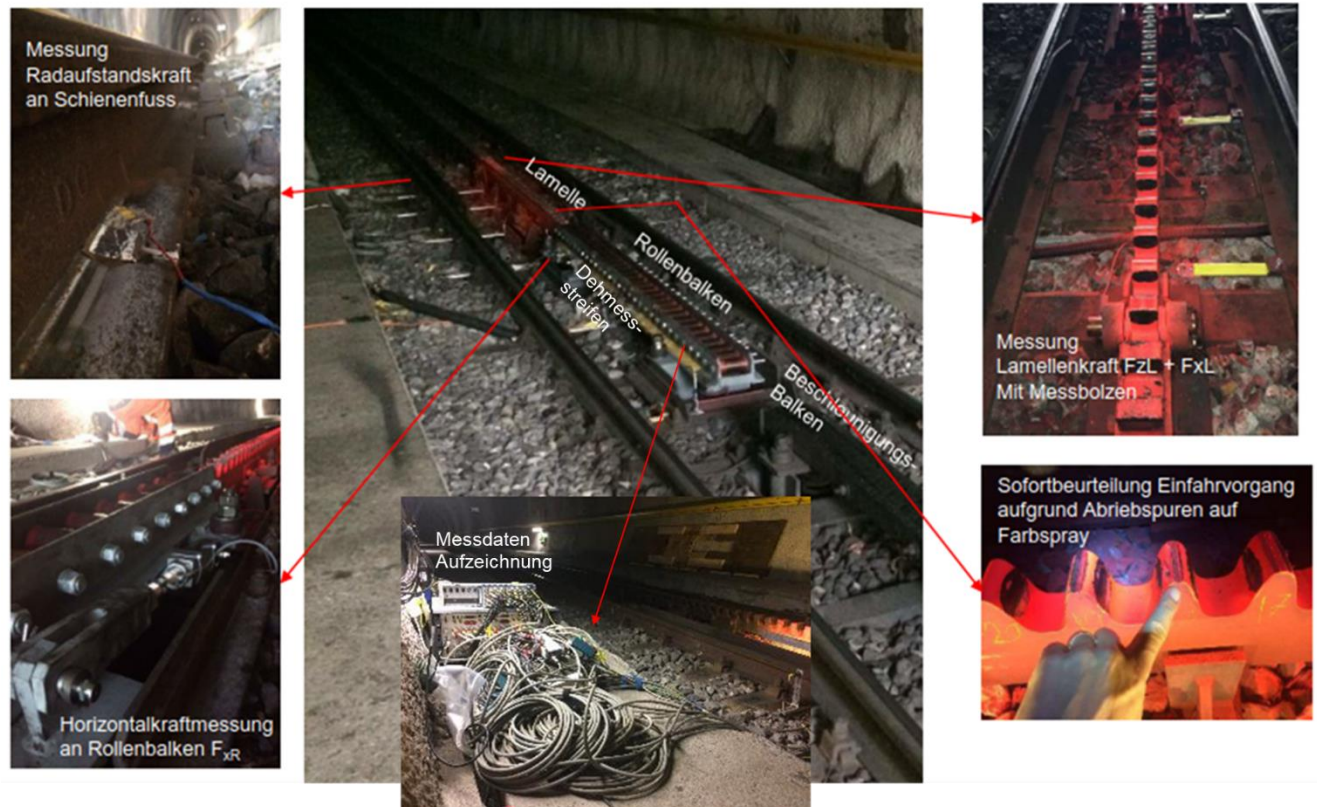


Abbildung 10: Versuchsaufbau Messungen Lamelle September / November 2017

### Test 1 und 2

Test 1 entsprach den Versuchen von Mai 2016, ergänzt mit zusätzlicher Instrumentierung und zusätzlichen Testfahrten mit ABeh 160 in Zugspausen. In Test 2 wurde die bisherige Standardlamelle ersetzt durch eine neue Lamelle P01 (ohne Teilungsfehler, mit optimierter Zahngeometrie).

Folgende Schlüssel-Erkenntnisse leitet die zb aus diesen Messungen ab:

1. Die Belastungen auf die Lamelle sind sehr hoch, insbesondere bei der HGe (siehe *Abbildung 11*, weitere Details siehe Kapitel 3.6 auf S. 24):
  - Aufgrund der gemessenen Vertikal-Kräfte muss davon ausgegangen werden, dass bei spätem Synchronisationserfolg während dem Einfahrtvorgang das Fahrzeug angehoben und die Adhäsionsräder entlastet werden. Lamellen müssen zukünftig auf diesen Lastfall dimensioniert werden. Zudem sind korrekt funktionierende Radlenker von elementarer Wichtigkeit.
  - Bei Einfahrten mit angebremsen Triebzahnradern entstehen ebenfalls sehr hohe Belastungen (siehe insbesondere Video [38] mit HGe)

2. Der Verzicht auf Teilungsfehler und der Einsatz optimierter Lamellen-Zahngeometrien verbessert das Gesamt-Systemverhalten signifikant:
- Das heutige De-Synchronisieren bei der Ausfahrt (Video [35]) wird weitgehend eliminiert (Video [39])
  - Die Belastungen auf Rollenbalken und Lamelle werden signifikant reduziert (siehe rote und lila Pfeile in *Abbildung 11*)
  - Das Einfahrverhalten (Finden der Zahnücke) wird verbessert
- Es wird deshalb empfohlen, auf Teilungsfehler in Lamellen zukünftig zu verzichten und optimierte Lamellen-Zahngeometrien gem. Kap. 3.4.2 einzusetzen.

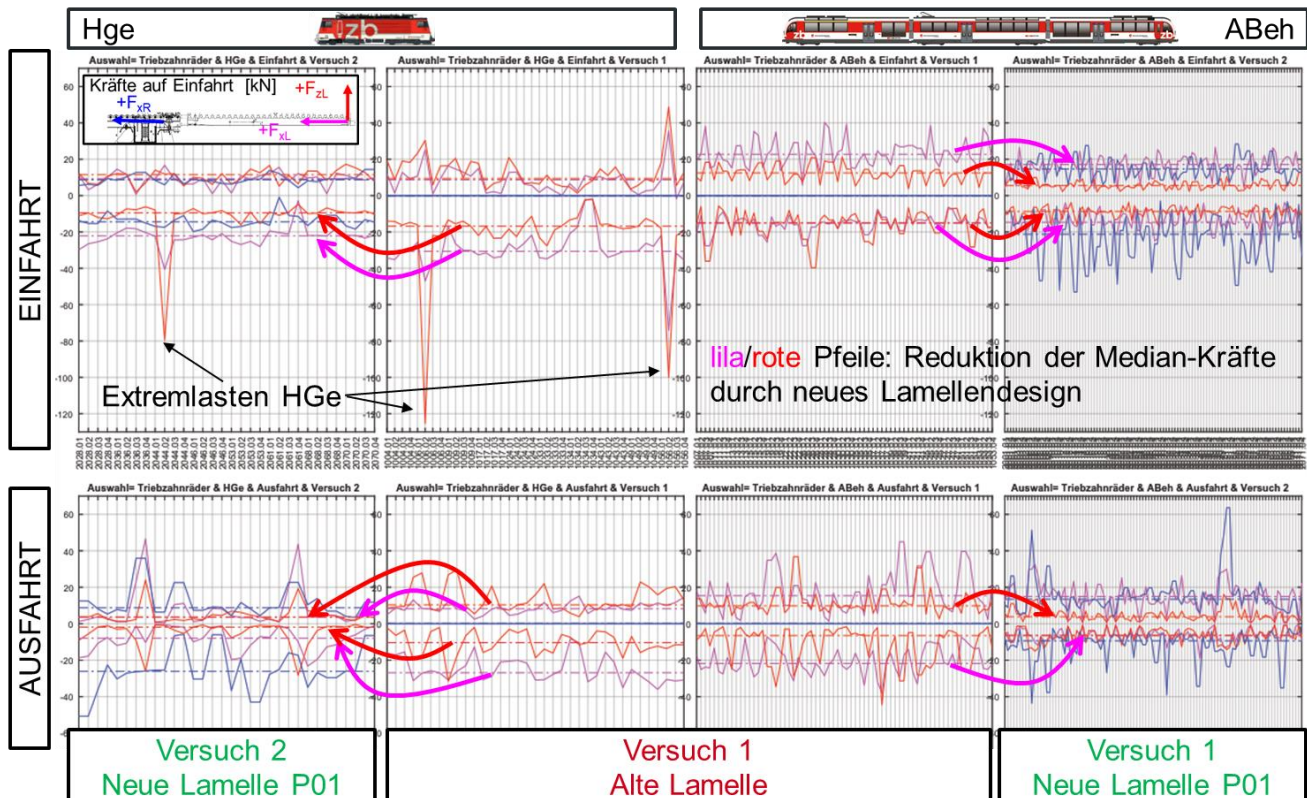


Abbildung 11: Übersicht über gemessene Maximal-/Minimal-Kräfte aller Testfahrten von Versuch 1 und 2. x-Achse = Versuchsnummer, y-Achse = gemessene Max/Min Kräfte in kN. Die strichpunktierten Linien sind die Mediane.

### Test 3 und 4

In den Tests 3+4 wurde die Einfahrtgeschwindigkeit schrittweise bis auf  $v=20$  km/h erhöht, sowie der Sonderlastfall «Ausfall TZR-Antrieb» getestet. Aus Sicherheitsgründen wurden Versuche 3+4 nach einer eingehenden Risikobeurteilung [18] während der Nachtsperre und nur mit ABeh durchgeführt. Folgende Schlüssel-Erkenntnisse leitet die zb aus diesen Messungen ab:

1. Die Lasten nehmen mit der Geschwindigkeit etwa linear zu. Die Streuung der Werte ist dabei erheblich, was auf die zufällig verteilten Relativpositionen von Zahnrad zu Einfahrelement zurückzuführen ist (*Abbildung 12*)
2. Die Versuche wurden bei einer Nominalgeschwindigkeit von 18km/h (effektive Geschwindigkeit dabei bis zu 20 km/h) abgebrochen, da die Horizontalkräfte auf den Rollenbalken die vordefinierten Grenzwerte erreicht hatten (*Abbildung 12*). Die Videoanalysen zeigten, dass der Beschleunigungsbalken nicht in der Lage ist, die BZR auf Fahrzeuggeschwindigkeit zu beschleunigen. Die BZR prallten fast stillstehend auf den Rollenbalken, übersprangen



- systematisch Rollen des Rollenbalkens (*Abbildung 14*) und teilweise Zähne der Lamelle und wurden oft erst in der Lamelle synchronisiert (blauer Pfeil in *Abbildung 13*)
- Die Synchronisation der TZR hingegen funktionierte problemlos und erzeugte keine unzulässig hohen Lasten. Im Gegensatz zu den BZR fand auch keine Verlagerung des Synchronisationszeitpunkts in Richtung feste Zahnstange statt (roter Pfeil in *Abbildung 13*).
  - Einfahrten mit einem ausgefallenen Zahnradantrieb verursachen unproblematisch kleine Lasten, solange die in den Betriebsvorschriften definierte Einfahrtgeschwindigkeit von 5km/h eingehalten wird (*Abbildung 12*)
  - Um zu verhindern, dass ein Fahrzeug aus Versehen mit stillstehenden TZR einfährt, ist eine entsprechende Überwachung im Fahrzeug einzuführen (für  $v=10\text{km/h}$  empfohlen, für  $20\text{km/h}$  zwingend)

Basierend auf den vorliegenden Versuchen kann geschlossen werden, dass Einfahrten mit  $v=20\text{ km/h}$  technisch machbar sind, wenn die Beschleunigung der stillstehenden Bremszahnäder verbessert wird. Ein komplettes Re-Design des Beschleunigungsbalkens ist notwendige Voraussetzung für Einfahrten mit  $v=20\text{ km/h}$ . Darüber hinaus sind weitere Bedingungen gemäss Kap. 3.5 S. 23 zu erfüllen.

Die hohe Anzahl durchgeführter Versuche und die umfangreiche Instrumentierung ermöglichen es, erstmals Angaben zur Höhe der in ZSE auftretenden Kräfte zu machen. Details hierzu finden sich in untenstehender *Abbildung 12* und im Kapitel 3.6 auf S. 24.

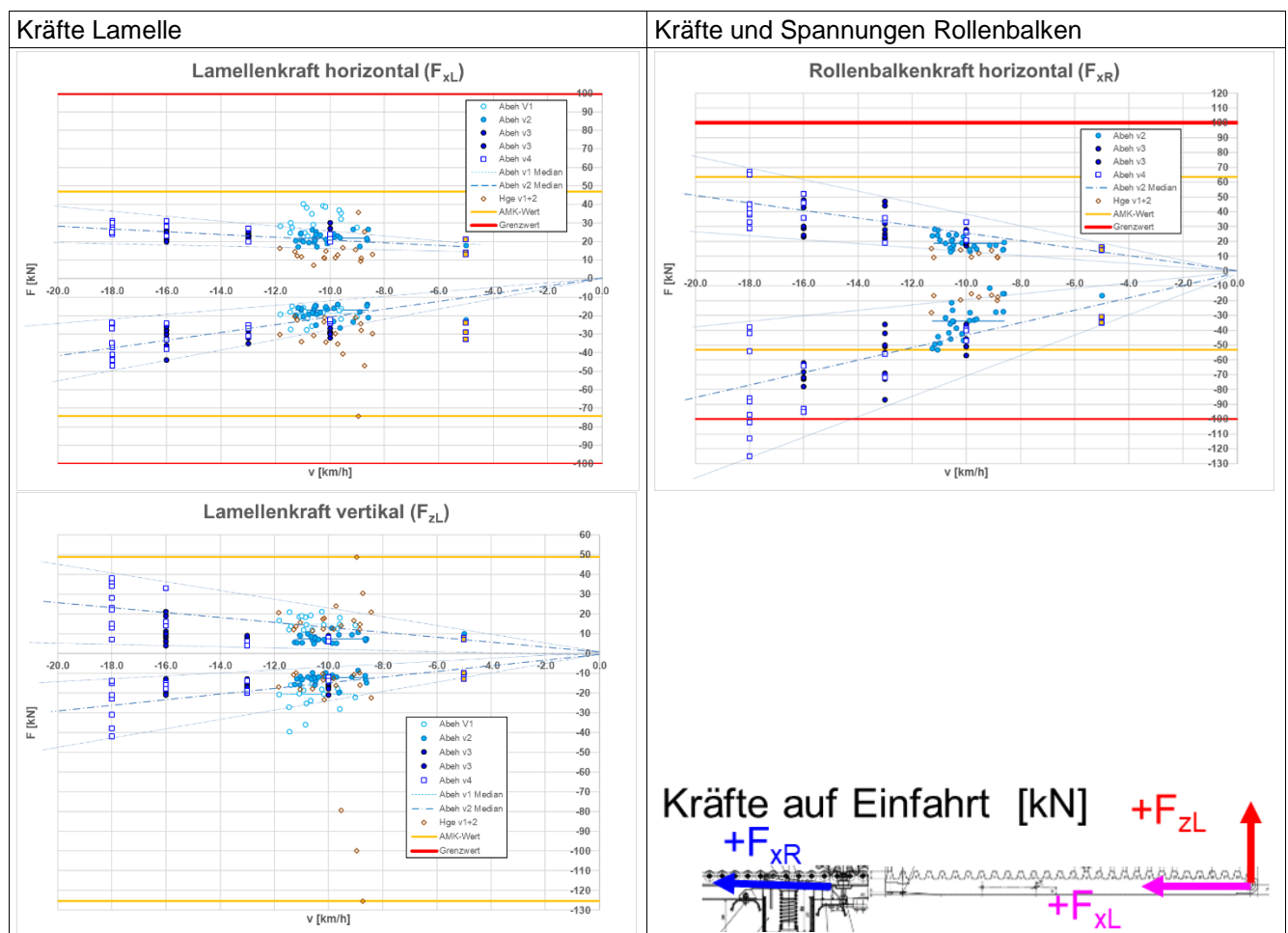


Abbildung 12: Übersicht über gemessene Maximal- und Minimalkräfte

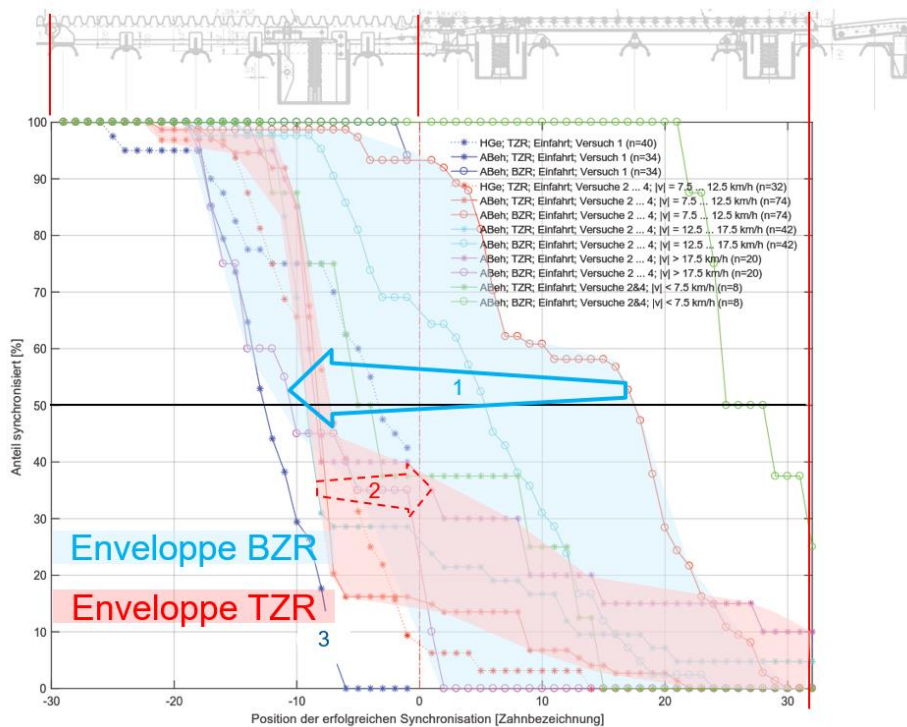


Abbildung 13: Ort des Synchronisationserfolgs für TZR / BZR bei verschiedenen Geschwindigkeiten

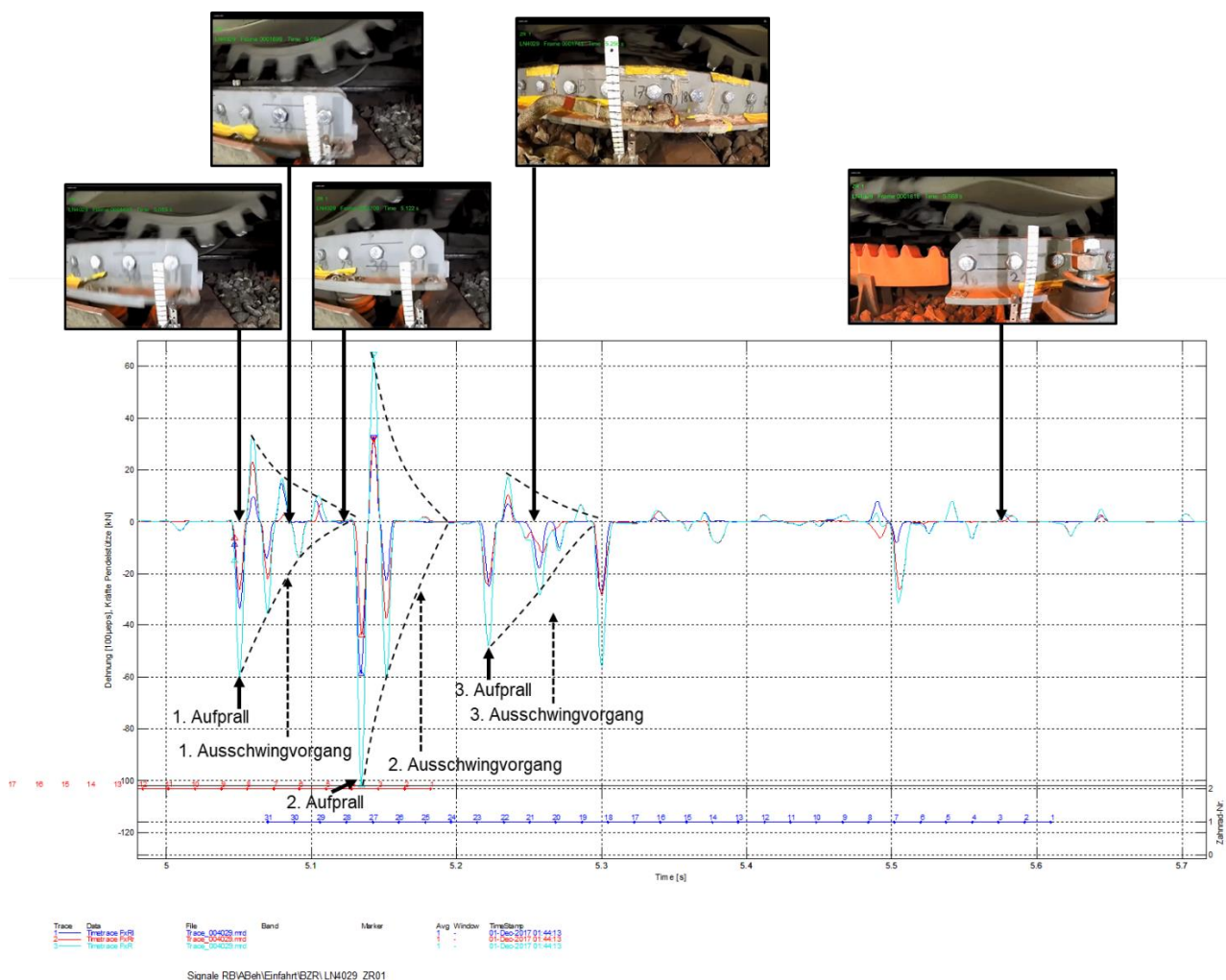


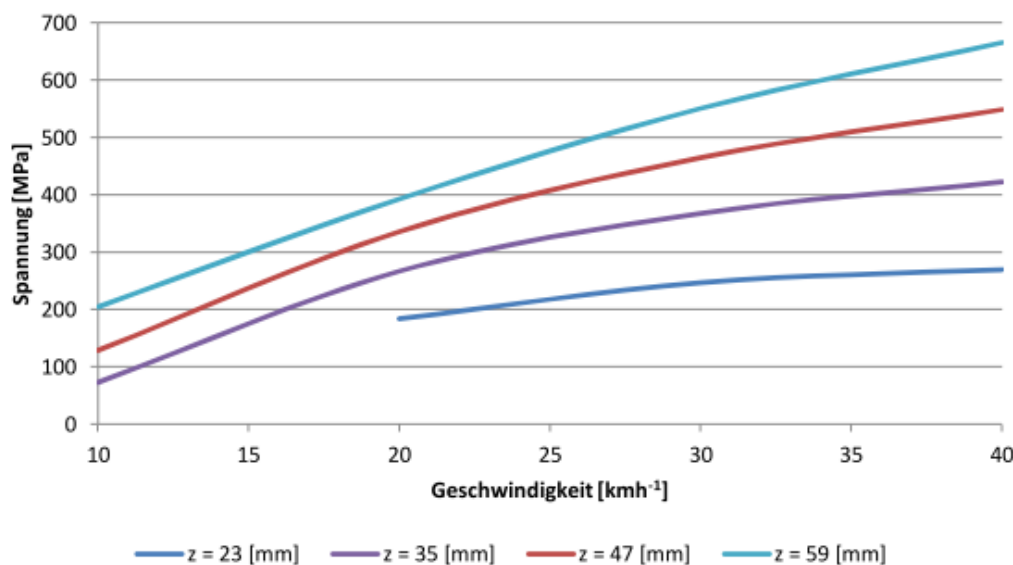
Abbildung 14: Exemplarische Interaktion BZR / Rollenbalken bei Einfahrt mit 20 km/h

### 3.4 Analytische Untersuchungen

#### 3.4.1 Studienarbeiten HSLU

2016 wurden an der HSLU drei Studienarbeiten [21][22][23] in Auftrag gegeben. Die wesentlichen Erkenntnisse sind untenstehend zusammengefasst.

In [21] wurde eine kinematische Analyse des Rollenbalkens durchgeführt. Mittels stark vereinfachter mechanischer Modelle (Modellierung Rollenbalken als 1-Massen-Schwinger) konnte der Einfluss von Ein-/Ausfahrgeschwindigkeit und geometrischer Überschneidung von Zahnrad und Rolle auf die Belastungen des Rollenbalkens abgeschätzt werden, siehe *Abbildung 15*. Neben dieser wichtigen Erkenntnis enthält die Arbeit auch fehlerhafte Aussagen, weshalb nicht weiter auf diese Arbeit eingegangen wird.



*Abbildung 15: Einfluss von Geschwindigkeit und Überlappung «z» zwischen Zahnrad / Rolle auf die Belastung des Rollenbalkens. Die Spannungswerte dienen nur zu Vergleichszwecke, aufgrund des stark vereinfachten mechanischen Modells entsprechen sie nicht der Realität.*

In [23] wurde eine kinematische Analyse der Lamelle durchgeführt. Die Arbeit beinhaltet relevante Denk-Fehler und wird hier deshalb nicht näher betrachtet.

In [22] wurde mittels dynamischer transienter FEM Simulation untersucht, wie sich Spannungen im Rollenbalken ausbreiten. Es wurde aufgrund der Versuche vom Mai 2016 (Kap. 3.3.1) angenommen, dass ein durch die Lamelle de-synchronisiertes Zahnrad mit Ausfahrgeschwindigkeit von 40 km/h auf die erste Rolle prallt. Die FEM-Analyse zeigt, dass dabei eine Biegewelle längs durch den Träger läuft und mehrfach reflektiert wird (siehe Animation [44]). Die höchsten Spannungen erzeugt die Biegewelle in demjenigen Bereich des Rollenbalkens, in welchem Ermüdungsbrüche aufgetreten sind. Dank dieses Modells konnte erklärt werden, weshalb die Ermüdungsbrüche nicht in der Mitte des Rollenbalkens [8] sondern zur Lamelle hin versetzt auftreten. Die Arbeit zeigt zudem die Komplexität einer exakten Festigkeitsanalyse des Rollenbalkens auf. Trotz grundsätzlich guter Übereinstimmung mit den Messresultaten von Mai 2016 (Kap 3.3.1) muss davon ausgegangen werden, dass sich die Spannungen mittels FEM höchstens mit einer Genauigkeit von +/-50% bestimmen lassen. FEM Berechnungen können somit höchstens verwendet werden, wenn sie auf Messresultate kalibriert werden, nicht aber als eigenständige Analysemethode.

B: Transiente Analyse flexible Körper  
 Vergleichsspannung  
 Typ: Vergleichsspannung (von Mises) - Oben/unten  
 Einheit: MPa  
 Zeit: 2.6e-002  
 07.06.2016 13:17

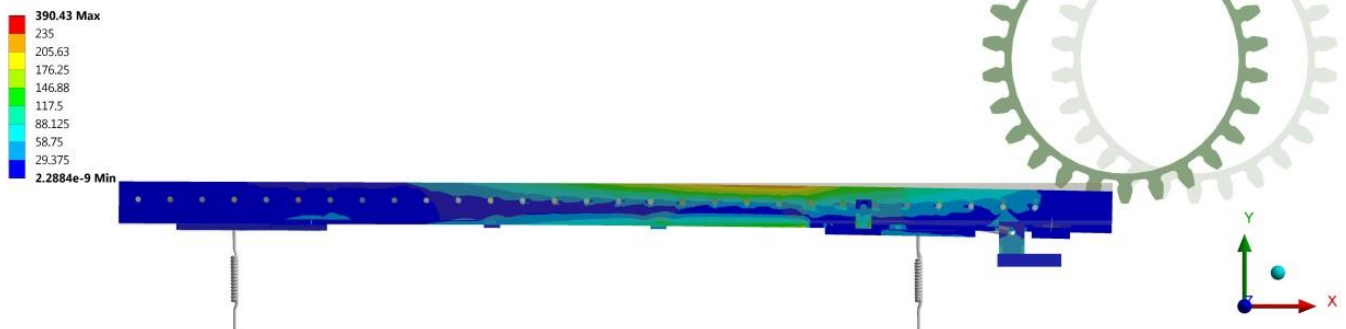


Abbildung 16: Biegewelle durch den Rollenbalken beim Aufprall auf die erste Rolle: das Zahnrad rollt aus der rechts des Rollenbalkens liegenden Lamelle nach links und trifft dabei auf die erste Rolle.

### 3.4.2 Analyse Zahnverschleiss Lamellen

Der Zahnverschleiss an drei verschiedenen Einfahrlamellen wurde aufgezeichnet und im CAD mit der Nominalkontur verglichen. Die Analysen sind detailliert in einem Bericht der Firma Sersa dokumentiert [24].

Die Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zahn-Verschleiss an Lamellenspitze (ca Zähne 1-11, *Abbildung 17*): Dieser Bereich weist heute entweder positive oder negative Teilungsfehler auf. Im vorliegenden Fall der Lamelle Käppeli (98mm Teilung) schleift das Fahrzeug beim Ausfahrvorgang unter aggressivem Kontaktwinkel wieder eine 100mm Teilung in die Lamelle. Dies bestätigt die Forderung nach Verzicht auf Teilungsfehler. Bei der Lamelle Engelberg findet aufgrund der 104mm Teilung ein grossflächiges Aufgleiten auf der anderen Zahnflanke statt, weshalb dort kaum Verschleiss feststellbar ist.

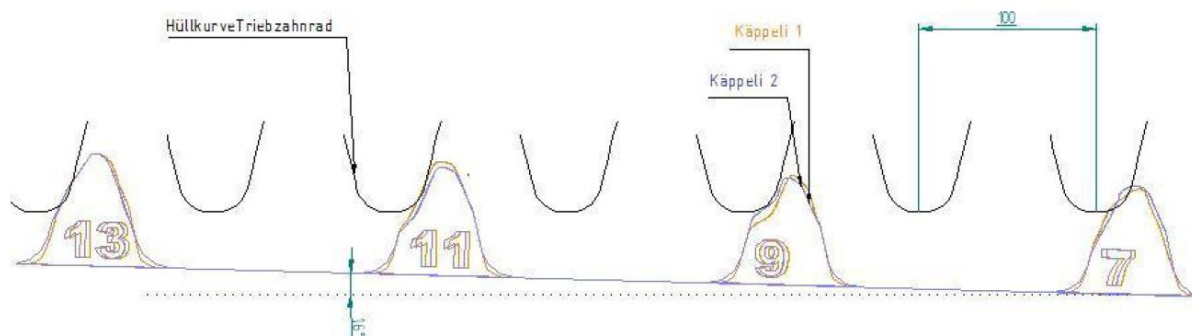


Abbildung 17: Zahnverschleiss nahe Lamellenspitze.

- Zahn-Verschleiss in der Mitte der Lamelle (ca Zähne 17-21, *Abbildung 18*): In diesem Bereich werden beim Einfahren verfrüht eingreifende Triebzahnräder synchronisiert. Da die Zähne grossflächig aufgleiten, ist der Verschleiss moderat. Alle Verschleissbilder sind in diesem Bereich ähnlich. Die eingeschliffene Teilung entsteht mit +1.3mm bis +2.0mm, welche der Synchronisation pro Zahn entspricht.



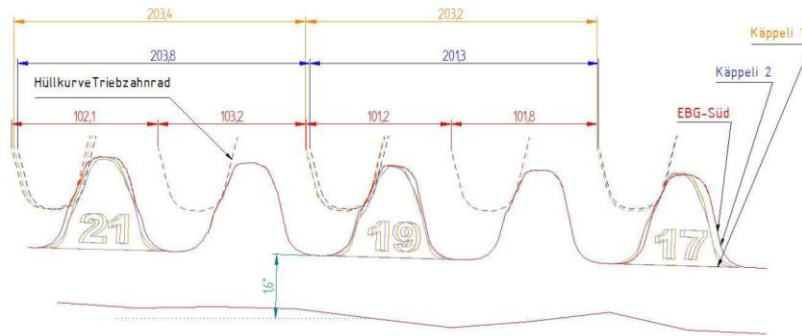


Abbildung 18: Zahnverschleiss Mitte der Lamelle

- Zahn-Verschleiss nahe Lamellendrehpunkt (ca Zähne 23-29, *Abbildung 19*): In diesem Bereich werden verspätet eingreifende Zähne synchronisiert. Aufgrund des aggressiven Kontaktwinkels ist hier starker Verschleiss feststellbar. Der Verschleiss an der Lamelle Engelberg erscheint optisch stärker, da die Zähne im Neuzustand wesentlich breiter sind. Die eingeschliffene Kontur an allen drei untersuchten Lamellen ist aber ähnlich. Die eingeschliffene Teilung entsteht mit -1.6mm bis -1.8mm, welche der Synchronisation pro Zahn entspricht.

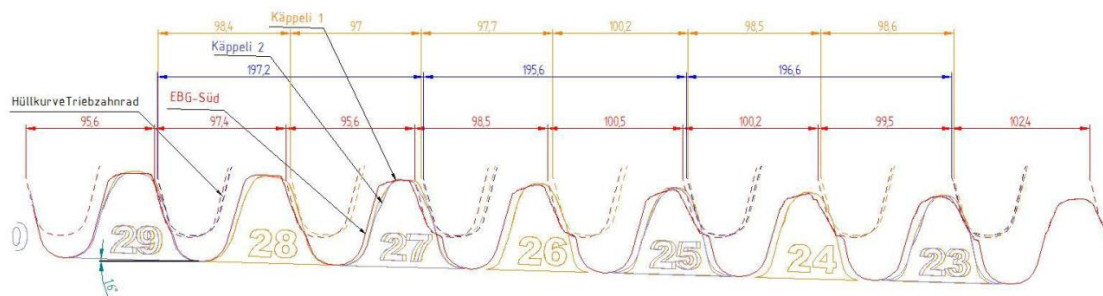


Abbildung 19: Zahnverschleiss nahe Lamellendrehpunkt.

- Die Verschleisskonturen der Einfahrten Kaeppli Süd und Kaeppli Nord sind praktisch deckungsgleich, obwohl die eine Einfahrt Talseitig und die andere Bergseitig der Zahnstange gelegen ist. Die Lage der Zahnstangeneinfahrt scheint also (zumindest beim Einsatz von Triebzügen wie ABeh 160) keinen relevanten Einfluss auf den Verschleiss zu haben. Ein unterschiedliches Design für talseitige und bergseitige Einfahrten, wie es gelegentlich postuliert wird, erscheint aus dieser Perspektive wenig sinnvoll.
- Der Autor stellt die These auf, dass die ideale Zahngeometrie für Lamellen derjenigen einer verschlissenen Lamelle entspricht. In der heutigen Unterhaltspraxis werden Lamellen genau dann ausgetauscht, wenn sich eigentlich eine günstige Zahngeometrie eingestellt hat. Zukünftige Lamellendesigns sollten sich deshalb am Verschleissbild orientieren.

### 3.4.3 Optimierte Zahngeometrie für Einfahrlamellen

Die Anforderungen an die Zahngeometrie einer Einfahrlamelle unterscheiden sich fundamental von denjenigen an eine feste Zahnstange, da das schnelle und zuverlässige Finden der Zahnücke im Vordergrund steht und nicht das verschleissarme Übertragen der Vortriebskräfte. Lamellen benötigen deshalb eine spezielle Zahngeometrie. Die von der zb 2017 hierfür entwickelte und getestete Lamelle, welche zu grossen Teilen dem Design einer Lamelle von VonRoll aus dem Jahr 1955 entspricht, besitzt folgende funktionsrelevanten konstruktiven Details:

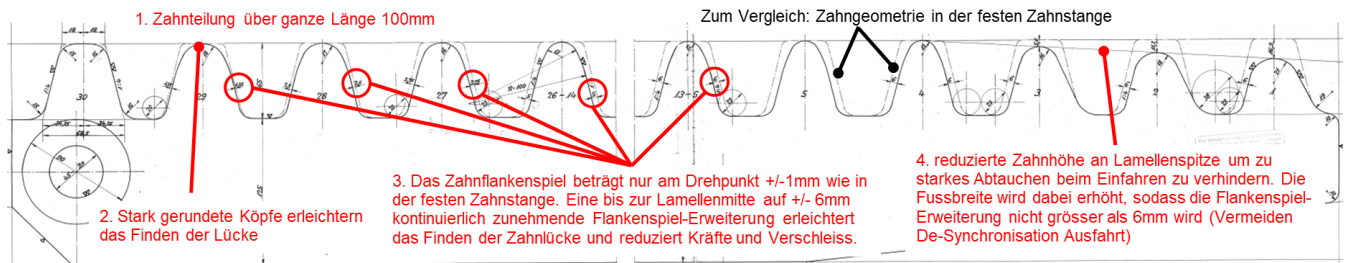


Abbildung 20: Optimierte Zahngeometrie für Einfahrlamellen

### 3.4.4 Analyse Synchronisationseigenschaften von Lamellen

Um die Synchronisationseigenschaften eines Lamellendesigns ohne aufwändige Versuche beurteilen zu können, wurde ein neues Instrument entwickelt: das Synchronisations-Diagramm. Dieses beschreibt, wieviel Winkelfehlstellung eines Zahnrads die Lamelle rein geometrisch noch korrigieren kann. Das Diagramm wird erstellt, indem bei gegebenem Lamellendesign im CAD untersucht wird, um wieviel sich ein in der Lamellen-Zahnücke befindlicher Zahnradzahn verdrehen lässt, ohne die Lamelle zu kontaktieren. Der Fehlstellungswinkel wird dabei in % ausgedrückt (0% entspricht perfekt mittigem Zahneingriff, 100% entspricht Kopf-auf-Kopf Situation). Die resultierenden Kurven besitzen typischerweise eine Trichter-Form, welche meist asymmetrisch ist.

In untenstehendem Beispiel ist das Design der Einfahrlamelle Engelberg dem Design der Prototypen Lamelle der zb («P01») gegenübergestellt. Man sieht, dass das Prototypendesign im oberen drehpunktnahen Bereich zu einer gleichmässigeren und gleichzeitig fehlertoleranteren Synchronisation führt.

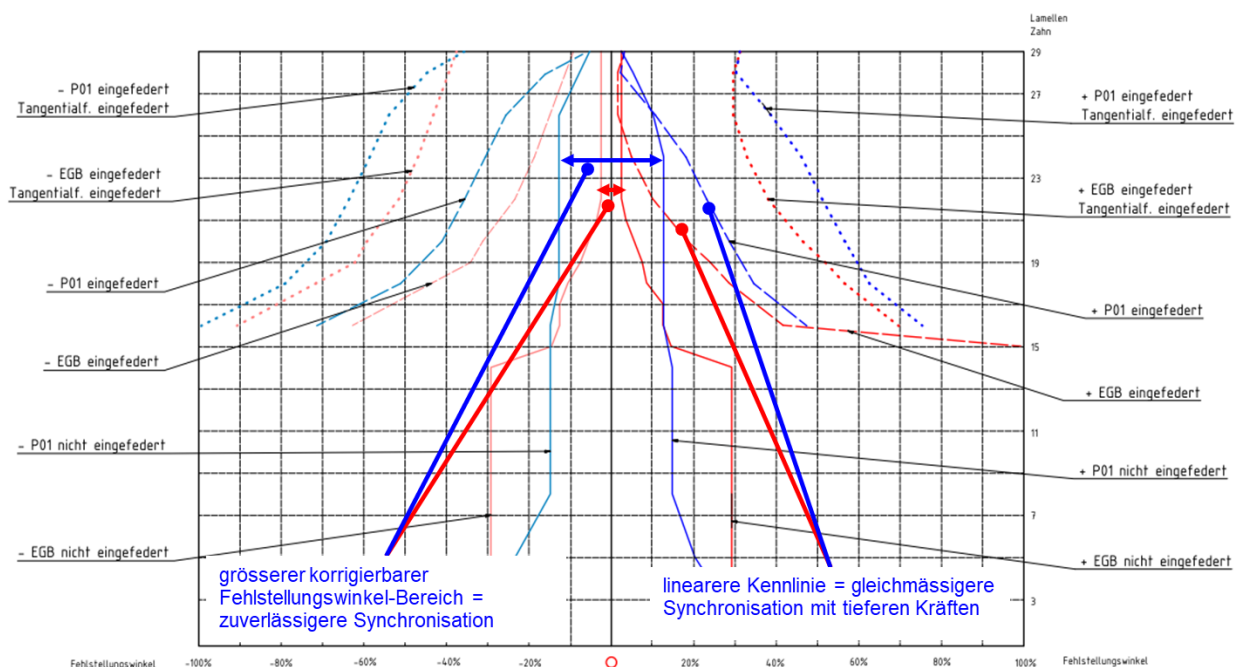


Abbildung 21: Synchronisationsdiagramm für Lamelle Typ Engelberg (EBG) und neue Prototypenlamelle zb (P01).

### 3.5 Technische Machbarkeit Einfahrten mit $v=20$ km/h

Basierend auf den durchgeführten Versuchen (Kap. 3.3.2 S. 15) erscheinen Einfahrten mit  $v=20$  km/h technisch machbar, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Grundvoraussetzung: Fahrzeuge mit leicht synchronisierbaren Triebzahnradern (wie z.B. ABeh 150/160). Fahrzeuge, bei welchen die Winkelstellung der Triebzahnrad direkt oder indirekt an die Winkelstellung der Laufräder gekoppelt ist (z.B. HGe), eignen sich aus heutiger Sicht nicht.
- Eine ausreichende Beschleunigung der Bremszahnrad muss sichergestellt werden, was in den durchgeführten Versuchen nicht der Fall war. Mehrere Ansätze sollen hierfür in einem Folgeprojekt näher betrachtet werden, das Problem ist aber bei genügend Platz technisch lösbar.
- Das Design von Rollenbalken und Lamelle muss optimiert werden. Die benötigten Änderungen sind aufgrund der durchgeführten Versuche bekannt bzw. teilweise bereits erprobt [54]
- Für Einfahrten mit  $v=20$  km/h dürfen keinesfalls Lamellen mit Teilungsfehler eingesetzt werden, da die Triebzahnrad aller Voraussicht nach nicht in der Lage wären, die durch den Teilungsfehler verursachte abrupte Änderung der Winkelgeschwindigkeit mitzumachen. Ein im Rollenbalken vorsynchronisiertes Triebzahnrad würde in der Lamelle wieder aus dem Takt gebracht und würde möglicherweise unsynchronisiert in die feste Zahnstange einfahren.
- Für  $v=20$  muss im Fahrzeug zwingend eine Überwachung eingeführt werden, welche sicherstellt dass das TZR bereits vor dem Beschleunigungsbalken auf die korrekte Drehzahl beschleunigt wurde. Sollte die Drehzahl aus irgendeinem Grund nicht erreicht sein, so muss das Fahrzeug vor der Zahnstangeneinfahrt zwangsgebremst werden, bevor es mit dem Rollenbalken oder der Lamelle in Kontakt kommt. Hierfür sind zur Positionsbestimmung des Fahrzeugs vermutlich Balisen im Gleis nötig. Diverse Detailfragestellungen sind dabei noch offen.

Die grösste Unsicherheit besteht momentan darin, wie die Bremszahnrad zukünftig beschleunigt werden. Grundsätzlich lässt sich dies bei genügender Länge der Einfahrt auch mit heutigen Designs von Beschleunigungsbalken lösen, effizientere Ansätze sollten aber aus wirtschaftlichen Gründen gesucht werden.

### 3.6 Lastenanalysen

Um zukünftige Systeme korrekt dimensionieren zu können, ist ein Lastensatz erforderlich. Den Autoren sind keine Quellen bekannt, welche die Art und Höhe der Belastungen von ZSE beschreiben würden. Da die Versuche von Kap 3.3.2 aufgezeigt haben, in welchen Situationen die höchsten Kräfte auftreten und wie hoch diese Kräfte sind, wurde basierend auf den gemessenen Maximalwerten erstmals ein Lastensatz für die quasistatische Dimensionierung erstellt. Dieser ist im Bericht [33] hergeleitet, im Bericht [32] zusammengefasst und unten auszugsweise wiedergegeben. Da der Bericht auf einer beschränkten Anzahl Daten, Fahrzeugen und Bauformen basiert, ist der Bericht als Postulat anzusehen und sollte von jeder Bahn vor Anwendung auf Gültigkeit überprüft werden.

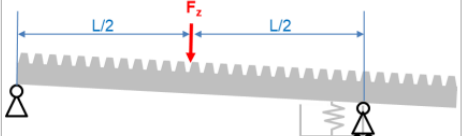
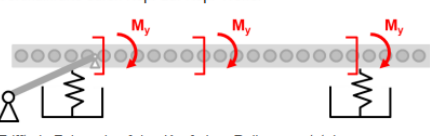
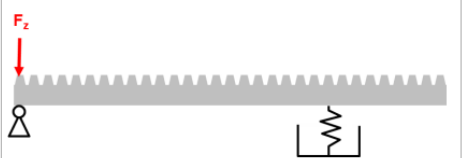
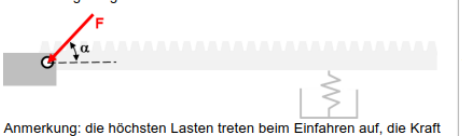
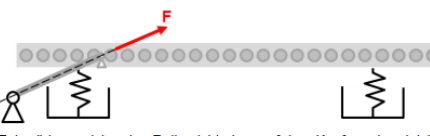
Quasi-statische Lastfälle Lamelle			Quasi-statische Lastfälle Rollenbalken		
LF Nr.	Beschrieb	Kraft auf Lamelle	LF Nr.	Beschrieb	Moment im Rollenbalken
L_1a	Kopf auf Kopf Fahrt mit maximaler Biegebeanspruchung der Lamelle  Anmerkung: die Spannweite L kann konstruktionsbedingt variieren und ist durch den Hersteller zu bestimmen. Die Höhe der Kraft entspricht etwa der gesamten Achslast des Fahrzeugs multipliziert mit einem Dynamikfaktor von $f_{dyn} \sim 1.2$ Dimensionierend für: Lamellenquerschnitt (Biegung)	$F_z = 185 \text{ kN}$	R_1	Vertikalkräfte durch Kopf-auf-Kopf-Treffer  Trifft ein Zahnrad auf den Kopf einer Rolle, so entstehen grosse Vertikalkräfte, welche zu einer Biegebeanspruchung des Längsträgers führen. Dieser Lastfall ist geprägt von starken dynamischen Effekten und lässt sich nicht quasistatisch mit einer klar definierten Lagerung abbilden. Es wird deshalb empfohlen, eine Dimensionierung mittels der gemessenen Biegemomente (Schnittmomente) vorzunehmen. Das angegebene maximale Schnittmoment kann an beliebiger Stelle zwischen den beiden Federn auftreten. Dimensionierend für: Längsträger	$M_y = \pm 25 \text{ kNm}$
L_1b	Kopf auf Kopf Fahrt mit maximaler Beanspruchung von Bolzen / Bolzenlagerung  Dimensionierend für: Bolzen und Bolzenlagerung	$F_z = 185 \text{ kN}$			
L_2	Synchronisationsvorgang mit maximaler Beanspruchung Lamellenlagerung  Anmerkung: die höchsten Lasten treten beim Einfahren auf, die Kraft weist dabei typischerweise einen Winkel von $30^\circ - 120^\circ$ auf. Aufgrund des dynamischen Schwingverhaltens und der nicht kraftlosen Ausfahrten können aber Kräfte von 60 kN in alle Richtungen ( $0^\circ$ bis $360^\circ$ ) auftreten. Im Rahmen des Festigkeitsnachweises sind die kritischsten Lastrichtungen zu bestimmen und nachzuweisen. Dimensionierend für: Lamellenlagerung, ev. Lamellenauge	$30^\circ < \alpha < 120^\circ$ : $+125 \text{ kN}$  Alle anderen $\alpha$ : $+60 \text{ kN}$	R_2	Horizontalkräfte infolge Synchronisationsvorgang  Zahnräder, welche eine Rolle nicht oben auf dem Kopf sondern leicht seitlich treffen, werden durch den Rollenbalken verdreht und somit synchronisiert. Dies führt zu hohen Horizontalkräften. Dieser Lastfall muss mit positivem und negativem Vorzeichen gerechnet werden, um das dynamische Schwingverhalten sowie Ein-/Ausfahrvorgänge zu berücksichtigen. Es wird vereinfachend angenommen, dass der Kraftvektor der auf die Rolle wirkenden Kraft exakt in der Achse der Pendelstütze liegt. Der angegebene Wert ist die totale Kraft, welche sich auf 2 Pendelstützen aufteilt. Eine ungleiche Lastverteilung von 2/3 zu 1/3 zwischen den beiden Stützen sollte angenommen werden, falls eine Ungleichmässigkeit konstruktiv nicht ausgeschlossen werden kann. Dimensionierend für: Rollenlagerung, Pendelstütze inkl. Befestigungen	Totale Kraft in beiden Pendelstützen $F = +65 / -95 \text{ kN}$  - = Druck + = Zug

Abbildung 22: Quasistatische Lastfälle für Grobdimensionierung von Lamellen und Rollenbalken. Details zur Anwendung der Lastfälle sind dem Bericht [32] zu entnehmen.



Darüber hinaus wurden die gemessenen Daten verwendet, um mittels Rainflow-Analyse approximative Ermüdungsspektren zu generieren. Die Herleitungen sind im Bericht [33] enthalten und untenstehend auszugsweise wiedergegeben. Diese Spektren können sowohl für eine Grobdimensionierung auf Ermüdung als auch für Abschätzungen von Lebensdauern (Skalieren von Erfahrungswerten mittels Spektrenvergleich) verwendet werden.

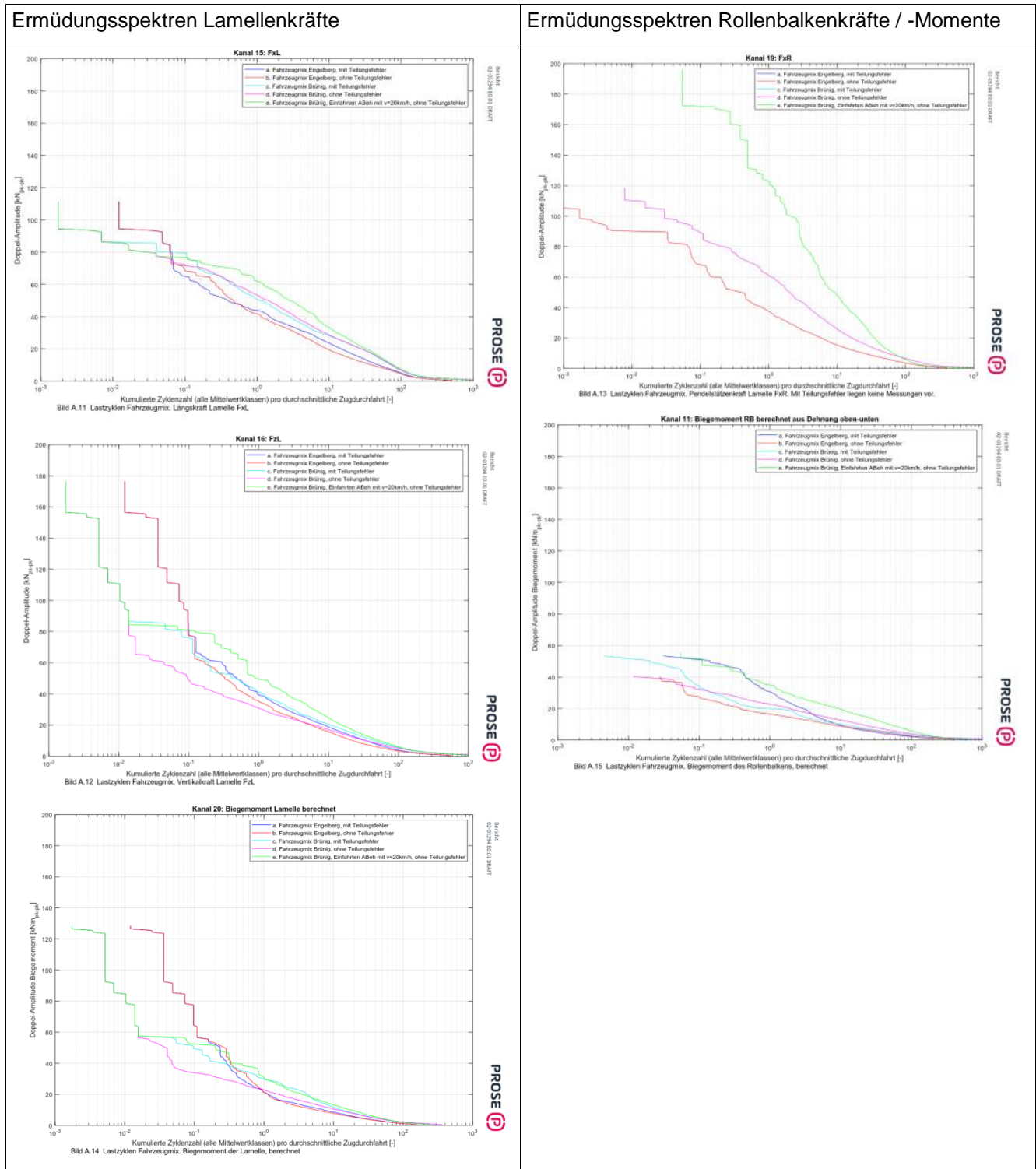


Abbildung 23: Ermüdungsspektren für Grobdimensionierung von Lamellen und Rollenbalken. Details zur Anwendung der Spektren sind dem Bericht [33] zu entnehmen.

### 3.7 Zusammenfassung des aktuellen Wissensstands

Basierend auf den drei vorgängig beschriebenen Ansätzen «Schadensanalysen», «Versuche» und «Simulationen» ergibt sich ein klares und konsistentes Bild des heutigen Stands der Zahnstangeneinfahrten:

#### Zahnstangeneinfahrten als Gesamtsystem

Grundsätzlich sind die Zahnstangeneinfahrten trotz der 3 physisch separierten Komponenten Beschleunigungsbalken, Rollenbalken und Lamelle als ein Gesamtsystem zu betrachten. Die in der RTE [4] erwähnte Funktionstrennung zwischen den 3 Elementen ist in der Praxis unscharf. So dient in der Realität ein Rollenbalken auch zur Beschleunigung eines Bremszahnrad oder zur Synchronisation eines Triebzahnrad. Die Leistungsfähigkeit des einen Elements bestimmt dabei, wieviel «Restarbeit» das nächste Element noch aufnehmen muss. Änderungen an einem Element können so Folgeänderungen an Nachbarelementen auslösen.

#### Ausfahrvorgang vs Einfahrvorgang

Die Mechanik des Ausfahrvorgangs unterscheidet sich fundamental von derjenigen des Einfahrvorgangs. Der Ausfahrvorgang wurde bis dato in der Literatur nicht beschrieben.

Beim Ausfahren sind alle Zahnräder anfänglich korrekt synchronisiert (d.h. im Eingriff). Bei den aktuellen Designs kommt es dabei regelmässig und systematisch zu einer De-synchronisation von Triebzahnradern während des Ausfahrvorgangs. Hierfür sind zwei Mechanismen von Bedeutung:

1. Teilungsfehler im Bereich der Lamelle führen dazu, dass die mit hoher Massenträgheit drehenden Triebzahnrad der fehlerhaften Teilung nicht folgen können und aus dem Takt geraten. Teilungsfehler können sowohl beabsichtigt sein (vergrösserte oder verkleinerte Teilung in Lamellen) als auch unbeabsichtigt (z.B. fehlerhafter Abstand von Lamelle und Rollenbalken). In beiden Fällen ergeben sich systematische «Volltreffer» auf den Rollenbalken. Da die Belastung des Rollenbalkens etwa linear mit der Geschwindigkeit zunimmt, führt ein Treffer bei einer Ausfahrt mit  $v=40$  km/h zu rund 4x höheren Spannungen als während einer Einfahrt mit  $v=10$  km/h. Die beobachteten Ermüdungsbrüche bei Rollenbalken sind denn auch ursächlich durch den Teilungsfehler der Lamellen verursacht.
2. Ein zu grosses Zahnflankenspiel, z.B. infolge von Zähnen mit stark reduzierter Kopfhöhe, ermöglichen es dem Triebzahnrad Übergeschwindigkeit aufzubauen und dadurch seine ursprünglich korrekte Winkelstellung zu verlieren. Auch dies führt zu der oben beschriebenen De-Synchronisation.

Im Gegensatz zu Triebzahnradern können Bremszahnrad aufgrund ihrer geringeren Massenträgheit der Teilungsänderung folgen und bleiben in der Regel bis ans Ende des Ausfahrvorgangs sauber im Eingriff.

Beim Einfahrvorgang verhalten sich Trieb- und Bremszahnrad ebenfalls stark unterschiedlich:

- Bremszahnrad stehen still und müssen durch den Beschleunigungsbalken auf Fahrzeuggeschwindigkeit beschleunigt werden. Dies funktioniert bei geringen Geschwindigkeiten ( $v < 10$  km/h) und neuwertigen Beschleunigungsbalken ausreichend gut. Mit verschlissenen Elementen und insbesondere mit zunehmenden Einfahrtgeschwindigkeiten funktioniert die Beschleunigung zunehmend schlechter, bis bei 20 km/h und verschlissenem Gummi keine relevante Beschleunigung der Bremszahnrad mehr stattfindet. Diese muss daraufhin vom Rollenbalken übernommen werden und verursacht dort unzulässig hohe Lasten.
- Triebzahnrad drehen aufgrund ihres Antriebs bereits mit der korrekten Geschwindigkeit. Je nach Antriebskonzept (siehe nächster Abschnitt) lassen sie sich durch den Rollenbalken oder die Lamelle verhältnismässig einfach in die korrekte Winkel-Stellung verdrehen. Bei Fahrzeugen mit kleinem TZR-Leerlaufdrehmoment und ohne Kupplung an die Adhäsionsrad (z.B. ABeh 150/160) funktioniert dies selbst bei  $v=20$  km/h relativ problemlos.

Der Zeitpunkt, zu dem alle Bremszahnräder korrekt im Eingriff sind, verlagert sich mit zunehmender Geschwindigkeit stark in Richtung feste Zahnstange. Bei Triebzahnradern ändert sich der Synchronisationszeitpunkt nicht wesentlich bzw. erfolgt sogar leicht früher.

Abdrücke von Triebzahnradern auf Zahn-Köpfen der Einfahrt wurden selbst bei Lamellen mit Teilungsfehler bis in die feste Zahnstange gefunden. Aufgrund der Form der Abdrücke wird vermutet, dass diese von einer HGe stammen. Ein Teilungsfehler ist deshalb nachweislich keine Garantie für eine 100%ig sichere Synchronisation vor dem Beginn der festen Zahnstange.

Antriebs- und Bremskräfte können zudem dazu führen, dass die Einfahrelemente ungewollt einfedern, da die Federn relativ weich ausgelegt sind. Bei korrektem Befahren ist dieser Mechanismus jedoch von untergeordneter Bedeutung.

#### Fahrzeugabhängigkeit

Aufgrund unterschiedlicher Antriebskonzepte und Zahnradgeometrien gibt es insbesondere beim Einfahrverhalten grosse Unterschiede zwischen verschiedenen Fahrzeugen.

Moderne Triebzüge, wie der ABeh 150/160, weisen aufgrund der Trennung des Adhäsions- und des Zahnradantriebs und der gut gerundeten Zahnköpfe ein verhältnismässig tolerantes Verhalten auf. Die Triebzahnräder finden oft schon innerhalb des Rollenbalkens oder spätestens in der ersten Hälfte der Lamelle die Zahnücke, dies auch bei höheren Geschwindigkeiten.

Ältere Fahrzeuge, wie die HGe, verhalten sich dagegen wesentlich «störrischer». Sie synchronisieren später, und es muss dringend davon abgeraten werden die Einfahrtgeschwindigkeit auf über  $v=10$  km/h anzuheben.

#### Statische Beanspruchung

Rollenbalken und Lamellen sind sehr hohen statischen Lasten ausgesetzt.

Abdrücke, globale plastische Deformationen sowie Messungen an Lamellen belegen, dass Fahrzeuge bei Kopf-auf-Kopf Fahrten vermutlich mit der gesamten Achslast auf der Lamelle aufliegen und dabei selber angehoben werden. Radlenker sind deshalb aus Gründen der Entgleisungssicherheit zwingend erforderlich.

Insbesondere ältere Fahrzeuge wie die HGe üben beim Synchronisationsvorgang grosse Horizontalkräfte auf die Einfahrt aus. Ebenfalls hohe Horizontallasten entstehen bei Einfahrten mit  $v>10$  km/h durch nicht ausreichend beschleunigte Bremszahnräder. Verhältnismässig geringe Lasten entstehen beim Einfahren mit einem de-aktivierten Antrieb bei  $v=5$  km/h.

#### Dynamische und Ermüdungs-Beanspruchung

Die zahlreichen Ermüdungsbrüche und die durchgeführten Spannungsmessungen belegen, dass Rollenbalken, Einfahrlamellen und deren Befestigungsstrukturen hochgradig ermüdungsbeansprucht sind.

Die hohe Beanspruchung ergibt sich durch die Kombination von sehr hohen äusseren Belastungen, eine sehr hohe Anzahl Lastwechsel und erhöhte Spannungen durch suboptimales Design:

- Durch eine hohe Dynamik, insbesondere bei Ausfahrten, grosse Stossbeanspruchungen in Folge von harten Endanschlägen und sehr hohe Massenträgheiten ist die äussere Belastung grundsätzlich sehr hoch.
  - Die Beanspruchung erfolgt oft in Form von Biege- oder Longitudinalwellen, welche an den Enden mehrfach reflektiert werden und so zu einer erhöhten Anzahl Lastwechsel führen. Auch Ausschwingvorgänge tragen dazu bei, dass die effektive Anzahl Lastwechsel weit höher ist, als aufgrund einer quasistatischen Betrachtungsweise zu erwarten wäre. Zudem kommen im Laufe eines Jahres bei fahrplanmässigem Betrieb und Zügen mit bis zu 10 Zahnradern eine grosse Anzahl Interaktionsvorgänge zustande.
-

- Das Strukturdesign der aktuellen Einfahrten ist suboptimal und trägt signifikant zu den beobachteten Strukturversagen bei (siehe nachfolgender Abschnitt Strukturdesign)

Eine geeignete Konstruktionsphilosophie bezüglich Ermüdung ist noch zu definieren (S. Kap. 8.1.)

#### Lasten

Bis dato existierten keine anerkannten Quellen, welche für eine Dimensionierung von Zahnstangeneinfahrten verwendet werden könnten. Aus den Versuchen bei der Zentralbahn wurde erstmals ein approximativer Lastensatz [32] hergeleitet, welcher als erster Anhaltspunkt für zukünftige Dimensionierungen bezüglich statischer Festigkeit und Ermüdungsfestigkeit verwendet werden kann.

#### Einflussgrößen auf das Synchronisationsverhalten

Folgende Einflussgrößen haben relevanten Einfluss auf das Synchronisationsverhalten eines Fahrzeugs bei der Einfahrt:

- Antriebskonzept des Fahrzeugs (siehe voriger Abschnitt)
- Zahngeometrie der Lamelle. Die Parameter Kopfradius, Zahnfußbreite, Zahnflankenspiel und Zahnhöhe müssen sich entlang der Lamelle kontinuierlich bis zur Zahngeometrie der festen Zahnstange entwickeln. Die Synchronisationseigenschaften lassen sich im Synchronisationsdiagramm analytisch beurteilen. Teilungsfehler sollten gemäss den aktuellen Erkenntnissen nicht mehr verwendet werden, da sie keinen relevanten Nutzen bringen, aber grosse negative Sekundäreffekte verursachen und für Einfahrten mit  $v > 10 \text{ km/h}$  sogar gefährlich sind.
- Der Rollenbalken trägt relevant zum Synchronisationserfolg bei und sollte bei zukünftigen Systemen grundsätzlich vorgesehen werden.
- Der Beschleunigungsbalken verhindert insbesondere bei Einfahrten  $> 10 \text{ km/h}$  zu hohe Belastungen auf Rollenbalken und Lamelle.
- Eigenfrequenz und Massenträgheit der Einfahrelemente: um eine hohe Synchronisationswirkung zu erzielen, sollten Rollenbalken und Lamelle eine ausreichende Massenträgheit besitzen. Insbesondere bei höheren Geschwindigkeiten ist zudem wichtig, dass die Elemente nach einem Kopf-Treffer möglichst schnell in die Ausgangsposition zurückkehren, d.h. eine hohe Eigenfrequenz der Starrkörperbewegung aufweisen. Die Eigenfrequenz sollte zukünftig eher höher als geringer gewählt werden.
- Triebkraftfreie Ein- und Ausfahrten reduzieren die Kräfte auf die Einfahrt und verbessern das Ein- als auch Ausfahrverhalten. Bei Lokbespannten Zügen ist dies etwas schwieriger realisierbar als bei Triebzügen, eine Platzierung der Einfahrt mehr als eine Zuglänge entfernt vom Gefällsbruch kann in solchen Fällen helfen das Verhalten zu verbessern. Bei Triebzügen ist dies aus heutiger Sicht nicht nötig.

Es erscheint aus heutiger Sicht eher unwahrscheinlich, dass es ausser den oben beschriebenen Mechanismen weitere Mechanismen von herausragender Bedeutung existieren.

#### Qualität des Strukturdesigns

Die aktuellen Einfahrten sind nicht gemäss den anerkannten Regeln der Technik für ermüdungsbeanspruchte Bauteile konstruiert. Die Bauteile sind oft unterdimensioniert, ungleichmässig dimensioniert, weisen sehr hohe Spannungskonzentrationen auf. Zudem sind ermüdungsbeanspruchte Oberflächen sehr oft direktem adhäsivem oder abrasivem Verschleiss ausgesetzt, was die Ermüdungsfestigkeit drastisch reduziert. Das Strukturdesign muss verbessert werden.

#### Inspektionen und Konfigurationskontrolle

Die aktuellen Inspektionen sind unzureichend konzipiert, da sie nachweislich diverse Schäden nicht rechtzeitig entdecken konnten. Die Inspektionskonzepte müssen deshalb verbessert werden; Abweichungen sollen früh erkannt und bis zum Erreichen eines Grenzwerts konsequent verfolgt



werden. Es ist zudem sicherzustellen, dass Defekte zukünftig konsequent rapportiert und analysiert werden.

Zudem muss eine Konfigurationskontrolle eingeführt werden, welche sicherstellt, dass:

- die richtigen Bauteile eingebaut werden (keine Eigenbauten, keine veralteten Bauteile)
- jederzeit bekannt ist wie lange die Bauteile im Einsatz waren
- sichergestellt ist, dass die Bauteile rechtzeitig vor dem Erreichen des Endes der Lebensdauer ausgebaut und verschrottet werden.

Dies bedingt eine Kennzeichnung der relevanten Bauteile mit Artikelnummer und Seriennummer.

## 4. Fahrplantechnische Analysen

Die Einfahrten in die Zahnstange erfolgen heute mit  $v=10$  km/h. Zusammen mit den immer grösseren Zugslängen (aktuell bis rund 180m) ergibt sich hieraus ein signifikanter Zeitverlust. Es besteht seit längerem der Wunsch, diese Zeitverluste zu reduzieren. Dies liesse sich erreichen über ein Erhöhen der Einfahrtgeschwindigkeit von  $v=10$  auf neu  $v=20$  km/h, oder über eine Reduktion der Anzahl Zahnstangeneinfahrten durch eine durchgehende Zahnstange über längere Bereiche. Um den Nutzen solcher Beschleunigungsmassnahmen quantifizieren zu können, wurde eine Studie [26] in Auftrag gegeben, welche in [30] und [31] präzisiert wurde. Eine Reihe von Szenarien ( $v20$ , durchgehende Zahnstange in verschiedenen Bereichen, Kombinationen davon) wurde berechnet. Die Resultate sind in *Abbildung 24* und *Abbildung 25* zusammengefasst. Folgende Schlüsselerkenntnisse leitet die zb aus diesen Berechnungen ab:

- Um signifikante Verbesserungen im öV Angebot am Brünig zu erreichen, muss die IR Kreuzung vom Käppeli auf den Brünig verlegt werden können. Dies bedingt eine Fahrzeiterparnis von 3-4 Minuten pro Richtung. Dies ist nur möglich mit folgenden Szenarien:
  - Szenario 9: Erhöhung der Einfahrtgeschwindigkeit auf  $v=20$  km/h und Reduktion Fahrzeiterparnis
  - Szenario 10: Durchgehende Zahnstange zwischen Lungern und Meiringen, verbunden mit einer Wendezeitreduktion in Meiringen von 6 auf 4 Minuten
  - Szenario 8: Kombination der beiden obigen Massnahmen
- Mit diesen drei Szenarien würde das öV Angebot verbessert, insbesondere könnten Vollknoten am Brünig und in Brienz geschaffen und die heute sehr knappen Anschlüsse an die MIB verbessert werden. Allerdings profitiert nur eine geringe Anzahl der zb Fahrgäste (<4%) von diesem verbesserten Angebot, siehe *Abbildung 25*.
- Alle drei Szenarien bedingen sekundäre Infrastrukturausbauten in zweistelliger Millionenhöhe für Personenunterführungen auf dem Brünig und in Brienz sowie eine neue Kreuzungsstelle Niederried. Diese Sekundärkosten kommen zu den eigentlichen Investitionskosten für die Beschleunigung hinzu.
- In allen drei Fällen würde die Fahrplanstabilität gegenüber heute reduziert, da das neue Fahrplanangebot nur in Kombination mit Kurzwenden bzw. Reduktion von Fahrzeiterparnis gefahren werden könnte.
- Anstatt die Fahrzeiterparnis von  $V20$  für ein neues Fahrplankonzept einzusetzen, könnte sie alternativ auch verwendet werden zur Erhöhung der Fahrplanstabilität (neues Szenario 11). Der Bahnkunde erhielte bei dieser Variante zwar keine besseren Anschlüsse am Brünig, dafür aber pünktlichere Züge auf dem Gesamtnetz

Fall	Länge ZS neu	neue ZS Weichen	Investitionskosten			Fahrzeit- reduktion ***	Inv. Kosten pro sec FZ	Kenn- zahl
			Beschleu- nigung	Sekundär- Inv. **	Total			
	[m]	[Stk.]	[MCHF]	[MCHF]	[MCHF]	[s]	[CHF/s]	[%]
1 DZS Lungern	3'120	4	17.1	12.0	29.1	72	404'000	1092%
2 DZS Käppeli	1'440	2	7.9	12.0	19.9	110	181'000	489%
3 DZS Brünig	430	2	5.0	12.0	17.0	131	130'000	351%
6 DZS Käppeli + Brünig	1'870	4	12.7	12.0	24.7	241	102'000	276%
7 DZS Lungern + Käppeli + Brünig	4'560	8	29.8	12.0	41.8	313	134'000	362%
8 DZS Käppeli + Brünig + $V20$	1'870	4	15.7	12.0	27.7	446	62'000	168%
9 $V20$	-	0	3.0	12.0	15.0	405	37'000	100%
10 Fall 6 + Kurzwenden MR	1'870	4	12.7	12.0	24.7	481	51'000	138%
11 $V20$ (nur Erhöhung Fahrplanstabilität)	-	0	3.0	-	3.0	405	7'000	19%

\* DZS = durchgehende Zahnstange

\*\* = exkl. Ohnehin-Kosten Kreuzungsstelle NR (AS2030)

\*\*\* = Fahrzeitreduktion in beiden Fahrrichtungen kumuliert

*Abbildung 24: Übersicht über Fahrzeiterparnis und Investitionskosten, basierend auf [26] und aktualisiert mit Resultaten von [28]. Die Kosten enthalten nur die Investitionskosten, aber keine veränderten Betriebskosten.*

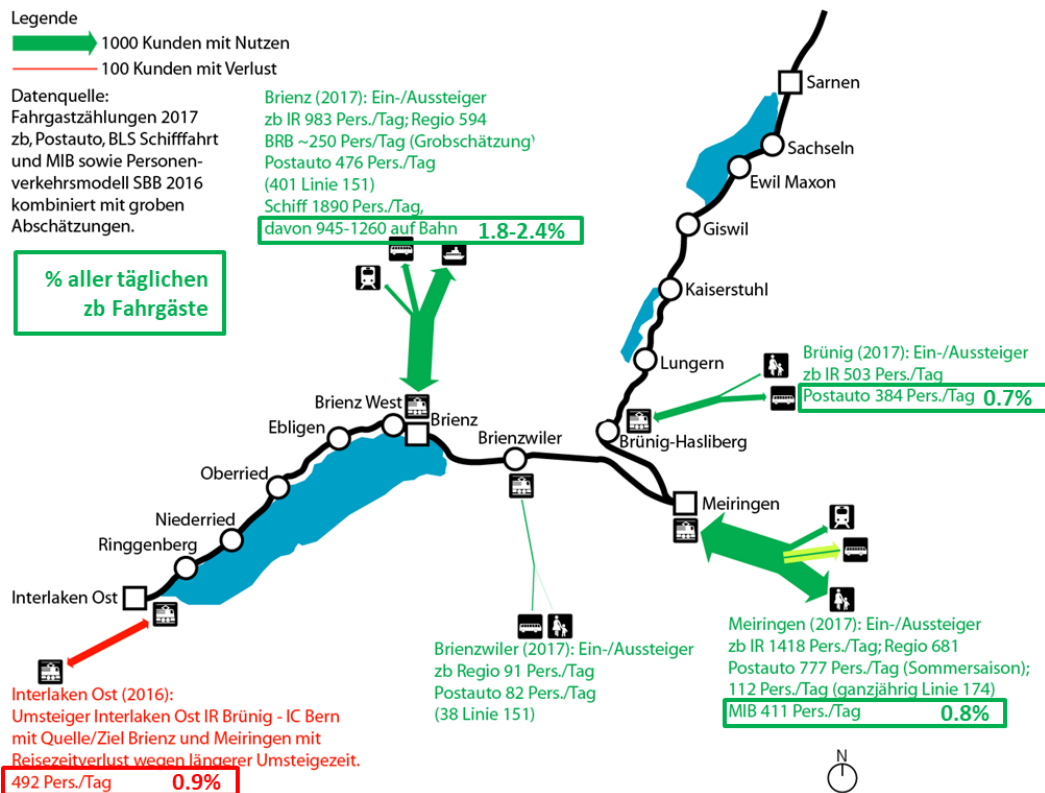


Abbildung 25: Kunden mit Nutzen infolge neuem Fahrplanangebot durch beschleunigte Einfahrten [30]

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass ein optimiertes Fahrplanangebot durch beschleunigte Einfahrten möglich ist. Dieses ist jedoch mit erheblichen Kosten verbunden und bringt einer verhältnismässig kleinen Anzahl Kunden einen Nutzen.

Grössere Bedeutung könnte die Beschleunigung allenfalls im langfristigen Kontext (>>10 Jahre) erhalten. In Verbindung mit weiteren Optimierungen, wie sie z.B. in [27] skizziert sind, könnten die beschleunigten Einfahrt ein wichtiges Element im Gesamtsystem darstellen. Ein verbessertes Gesamtgefüge würde insbesondere von den Transport-Partnern und auch den Bestellern (primär Kanton Bern) begrüsst.

## 5. Lösungsansätze

Es existieren verschiedene Lösungsansätze, wie das Überwinden von Steilpassagen bei gemischten Adhäsions- / Zahnradbahnen möglichst sicher, zuverlässig und schnell bewerkstelligt werden kann. Die folgenden Kapitel beleuchten die wichtigsten Ansätze und bewerten sie am Ende aus Sicht Zentralbahn.

Bei allen betrachteten Varianten werden lediglich die Kosten für die Beschleunigungsmassnahmen selber ausgewiesen. Sekundärkosten, welche durch ein geändertes Fahrplankonzept auf anderen Teilen des Streckennetzes ausgelöst werden wie z.B. PU BRUE, PU BRZ oder Kreuzungsstelle NR, sind in diesen Kostenschätzungen nicht enthalten. Die Kostenschätzungen weisen eine Genauigkeit von rund +/- 30 bis +/- 50% auf.

### 5.1 Durchgehende Zahnstange

Die Fahrzeit liesse sich verkürzen und die betrieblichen Risiken durch Zahnstangeneinfahrten vermindern, wenn die Anzahl Zahnstangeneinfahrten reduziert würde. Dies bedingt das Verlegen einer durchgehenden Zahnstange in Abschnitten, welche heute per Adhäsion befahren werden. Basierend auf den Fahrzeituntersuchungen in [26] wurde eine Machbarkeitsstudie [28] erstellt, wie der Abschnitt zwischen den Zahnstangeneinfahrten Kaeppli bzw Brünig mit je einer durchgehenden Zahnstange versehen werden könnte.

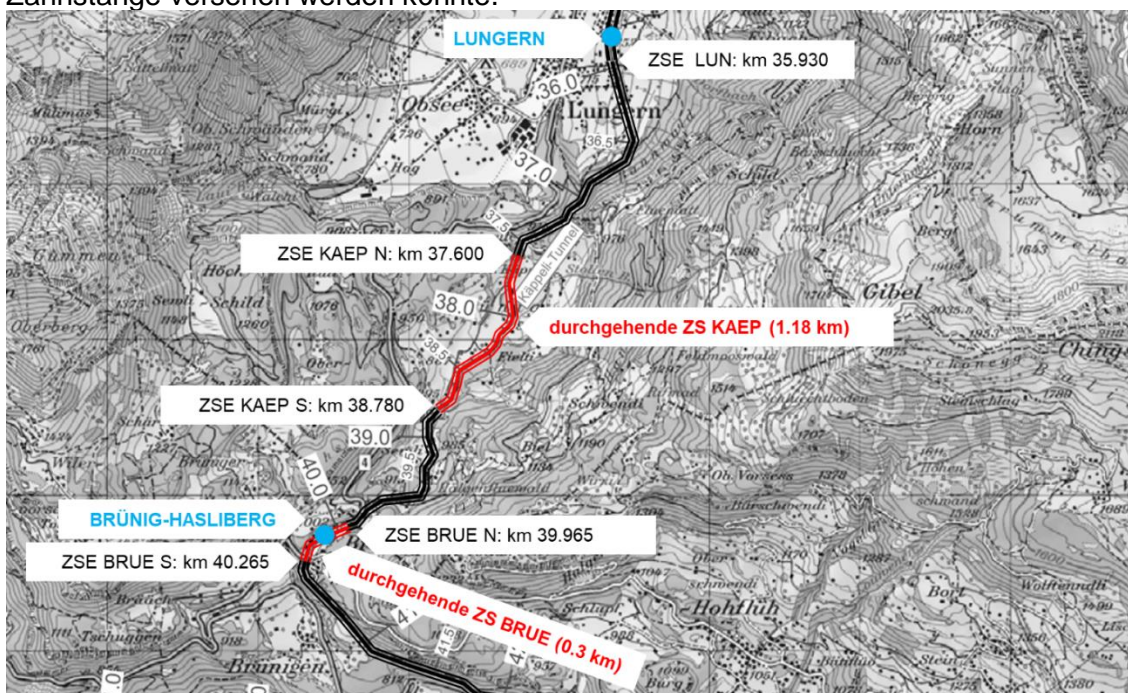


Abbildung 26: Situationsplan «durchgehende Zahnstange»

Die Erkenntnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Horizontale Linienführung müsste nur minimal (im Bereich wenige cm) angepasst werden. Sekundärkosten wie neue Ingenieurbauwerke, Felsabtrag oder Dammverbreiterungen wären nicht zu erwarten. Lediglich auf dem Brünig wäre aufgrund der neuen Zahnstangenweiche eine Anpassung der Perronkante nötig
- Durch die Anpassung der Überhöhungen wären Anpassungen an der Fahrleitung nötig
- Es wären Anpassungen am ZSI nötig
- Die technische Machbarkeit ist grundsätzlich gegeben

Die Investitions-Kosten für diese Variante belaufen sich auf ca 7.9 MCHF (KAEP), 5.0 MCHF (BRUE) bzw. 12.7 MCHF (gleichzeitige Realisierung KAEP und BRUE).



Da die umzubauenden Gleise noch einen Restbuchwert besitzen, müssen zusätzlich Kosten für Anlagenabgänge berücksichtigt werden. Unter der Annahme, dass das Projekt im Jahr 2022 realisiert würde belaufen sich diese Anlagenabgänge auf Total 1.2 MCHF.

Zudem fallen Kosten in der Höhe von rund 0.2 MCHF für die Ertüchtigung der verbleibenden Zahnstangeneinfahrten in GI, MR, EBG Mettlen und EBG Boden (siehe Kapitel 5.2.1) an.

Die gesamten Kosten dieser Variante belaufen sich somit auf rund **14.1 MCHF**

## 5.2 Passive Systeme (Weiterentwicklung der heutigen Technologie)

Die in dieser Vorstudie beschriebenen Versuche und Analysen haben aufgezeigt, dass die heutigen Zahnstangeneinfahrten sowohl bezüglich Sicherheit / Zuverlässigkeit als auch bezüglich zulässiger Einfahrtgeschwindigkeiten noch erhebliches Verbesserungspotential besitzen. Bezeichnet man die heutigen Zahnstangeneinfahrten (ZSE) der ersten Generation als «ZSE 1.0», so sind zwei weitere Entwicklungsstufen «ZSE 1.1» und «ZSE 2.0» denkbar, welchen nachfolgend beschrieben werden.

### 5.2.1 Zahnstangeneinfahrt ZSE 1.1

Die ZSE 1.1 ist eine *punktueller* Weiterentwicklung der ZSE 1.0, welche ca 95% der ZSE 1.0 unverändert übernimmt und nur die wichtigsten Defizite der ZSE 1.0 behebt.

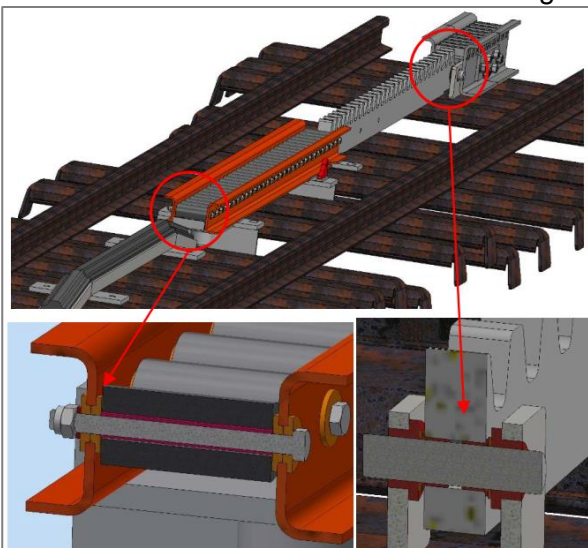


Abbildung 27: ZSE 1.1 Änderungen gegenüber ZSE 1.0 rot

Sie lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Praktisch unverändertes Beibehalten der nicht beweglichen Konstruktionsteile im Oberbau und Beibehalten aller Funktionsmasse. Somit gäbe es nach wie vor Einfahrten mit und ohne Rollenbalken.
- Punktuelle Verbesserung der beweglichen Bauteile (Rollenbalken, Lamellen) in folgenden Aspekten:
  - o Systematischer Einbau von Gleitbüchsen an Drehpunkten
  - o Verstärkung einzelner Teile der Konstruktion, wie z.B. des Längsträgers und der Pendelstützenbefestigung des Rollenbalkens oder Verzicht auf den Einsatz an der Lamellenspitze
- Einführung eines Konfigurationsmanagements
- Einführung eines verbesserten Wartungs- und Inspektionsprogramms

Folgendes würde mit einer solchen ZSE 1.1 erreicht:

- Sie würde ein Sicherheitsniveau erlauben, welches den aktuellsten Erkenntnissen entspricht. Die Wahrscheinlichkeit eines strukturellen Totalversagens würde stark reduziert
- Sie liesse sich mit verhältnismässig geringem Aufwand innert kurzer Zeit realisieren (Retrofit).
- Sie sollte grundsätzlich nur als Interims-Lösung eingesetzt werden.

Folgendes würde mit einer solchen ZSE 1.1 nicht erreicht:

- Keine relevanten Verbesserungen beim Verschleiss
- Noch immer eine relativ kurze Lebensdauer (regelmässiger, frühzeitiger Wechsel der beweglichen Elemente zwingend nötig, insbesondere da Teilungsfehler der Lamelle als einer der wichtigsten Schädigungsmechanismen nicht eliminiert)
- Einfahrten weiterhin nur mit 10 km/h

Die Investitions-Kosten für diese Variante belaufen sich auf ca **0.4 MCHF**

### 5.2.2 Zahnstangeneinfahrt ZSE 1.1+

Die ZSE 1.1+ entspricht grundsätzlich der ZSE 1.1. Zusätzlich zur ZSE 1.1 wird mit ihr auch der Teilungsfehler eliminiert sowie eine Reihe kleiner, mit geringem Aufwand realisierbarer Änderungen zur Verschleissminderung eingeführt. Sie ist im Detail in [55] spezifiziert. Sie eignet sich sowohl als Interims als auch als dauerhafte Lösung.

Die Investitions-Kosten für diese Variante belaufen sich auf ca **0.6 MCHF**

### 5.2.3 Zahnstangeneinfahrt ZSE 2.0

Die ZSE 2.0 ist eine *komplette* Weiterentwicklung der ZSE 1.0, welche nur noch ca 5% der ZSE 1.0 unverändert übernimmt und sämtliche bekannte Defizite der ZSE 1.0 behebt, dabei aber das grundsätzliche Funktionsprinzip beibehält.

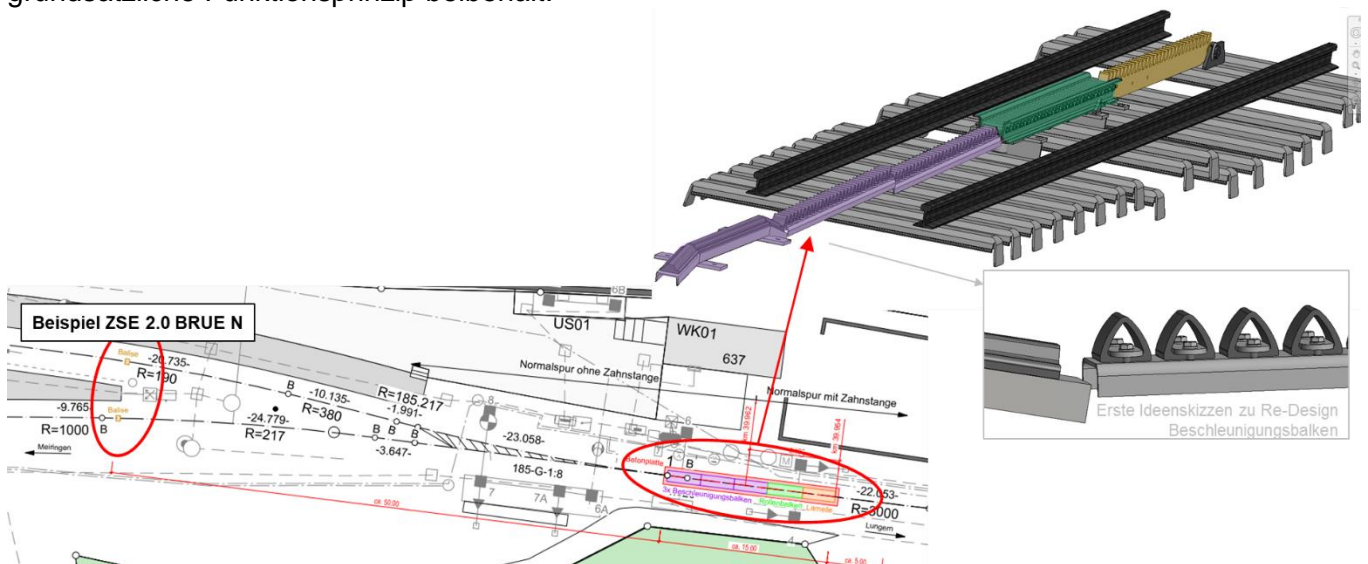


Abbildung 28: ZSE 2.0

Sie lässt sich wie folgt charakterisieren:

- Komplettes Re-Design sowohl der nicht beweglichen Konstruktionsteile im Oberbau als auch der beweglichen Bauteile

- Sämtliche Einfahrten würde neu jeweils alle 3 Einfahrelemente Beschleunigungsbalken, Rollenbalken und Lamelle enthalten. Es kommt dabei weiterhin eine konventionelle Lamelle zum Einsatz, die Marfurt-Lamelle in Giswil würde durch eine konventionelle Lamelle ersetzt<sup>1</sup>.
- Überwachung der korrekten Triebzahnradrehzahl zwischen Fahrzeug und Infrastruktur
- Einführung eines Konfigurationsmanagements
- Einführung eines verbesserten Wartungs- und Inspektionsprogramms

Folgendes würde mit einer solchen ZSE 2.0 erreicht:

- bestmögliches Sicherheitsniveau
- Einfahrten mit  $v=20$  km/h möglich
- bezüglich Verschleiss optimiert
- maximal mögliche Lebensdauer

Bis auf das genaue Design des Beschleunigungsbalkens, welches noch festgelegt werden muss, sind die für die ZSE 2.0 benötigten Änderungen bekannt. Ein Entwicklungs-Restrisiko beim Beschleunigungsbalken besteht.

Die ZSE 2.0 wird zwangsläufig mehr Platz beanspruchen als die heutigen Lösungen. Unter der vereinfachenden Annahme, dass eine Zahnstangeneinfahrt zukünftig eine Länge von 15m aufweist (1xLamelle, 1x Rollenbalken und 3x Beschleunigungsbalken à je 3m), wurden für alle Standorte am Brünig Situationspläne erstellt ([45] bis [52], Detaillierungsgrad: Vorstudie). Diese zeigen auf, dass der benötigte Bauraum voraussichtlich bei allen Einfahrten zur Verfügung steht. Zu klären bleibt, ob eine Montage auf einem Grubengleis überall geologisch möglich ist, insbesondere bei den Einfahrten KAEP S, BRUE S und BRUE N erscheint dies aus heutiger Sicht fraglich.

Die Investitions-Kosten für diese Variante belaufen sich auf ca **3 MCHF**

## 5.3 Aktive Systeme

### 5.3.1 Infrastruktur

Es wäre denkbar, zukünftig aktuatorische System auf der Infrastrukturseite einzusetzen, wie zum Beispiel:

- Einfahrelemente, welche sich bei der Ausfahrt aktiv absenken, um den grossen Belastungen bei der Ausfahrt auszuweichen, oder
- Einfahrelemente, welche sich mit dem Fahrzeug mitbewegen um den Synchronisationsvorgang zu erleichtern, oder
- Einfahrelemente, welche stillstehende Bremszahnräder aktiv in Rotation versetzen (z.B. analog den Beschleunigungsrädern in einer kuppelbaren Gondelbahn).

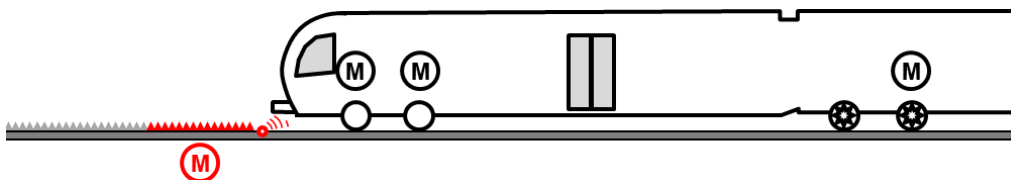


Abbildung 29: Prinzipskizze aktives System Infrastrukturseitig

<sup>1</sup> Grundsätzlich ist auch die Weiterentwicklung der Marfurt-Lamelle denkbar. Da eine v20 compatible konventionelle Lamelle im Rahmen der Versuche im Dezember 2017 bereits entwickelt wurde und ihre v20-Tauglichkeit bereits bewiesen hat, erscheint eine Weiterentwicklung der Marfurt-Lamelle für die Zwecke der zb Zentralbahn AG wenig zielführend. Aufgrund der grösseren Bewegung, in Verbindung mit der hohen Masse und den Öldruckdämpfern würde eine v20 compatible Marfurt-Lamelle zudem grössere Entwicklungsrisiken enthalten, höhere Anschaffungs- und Betriebskosten verursachen und keinen Mehrwert bieten.

Solche Systeme müssten in jedem Fall (auch im Störfall) zuverlässig funktionieren, benötigen eine Energieversorgung und eine «Kommunikation» mit dem Fahrzeug. Das Gesamtsystem würde dadurch erheblich komplexer, teurer und möglicherweise fehleranfälliger.

Die Investitions-Kosten für diese Variante lassen sich aufgrund der noch nicht bekannten Lösung nicht exakt quantifizieren. Aus einem Vergleich mit der Variante ZSE 2.0 lässt sich aber abschätzen, dass die Kosten vermutlich **> 5 MCHF** betragen würden.

### 5.3.2 Fahrzeug

Es wäre denkbar, zukünftig auf der Fahrzeugseite aktive Systeme einzusetzen, wie zum Beispiel:

- Eine Sensorik, welche die Zahnstangenteilung bereits vor der Einfahrt erkennt und die Winkelstellung des Triebzahnrad aktiv so steuert, dass von Anfang an ein perfekter Zahneingriff sichergestellt ist
- Ein aktiver Antrieb für Bremszahnräder

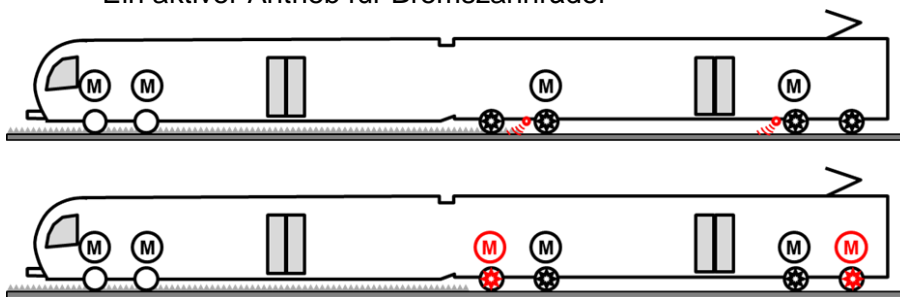


Abbildung 30: Prinzipskizze aktives System Fahrzeugseitig

Ähnlich einem aktiven Infrastrukturseitigen System würde auch dieses System eine erhöhte Komplexität verursachen. Auch im Störfall müsste das System funktionieren.

Die Investitions-Kosten für diese Variante werden auf **>5 MCHF** geschätzt.

## 5.4 Verzicht auf Zahnstange

Nach dem Jahr 2030 müssen bei der zb neue Fahrzeuge beschafft werden. Auf einen Zahnradantrieb könnte möglicherweise komplett verzichtet werden, wenn alle Adhäsionsachsen angetrieben werden. Dies würde die aktuellen Schwierigkeiten mit der Zahnstange eliminieren und zudem mittelfristig den Netzübergreifenden Einsatz von Fahrzeugen der zb, der MGB und der RhB ermöglichen. Auch würden sich Vorteile in der Beschaffung ergeben. Dieser Ansatz ist nicht Teil dieser Vorstudie, sondern wird in einer separaten Arbeitsgruppe verfolgt.

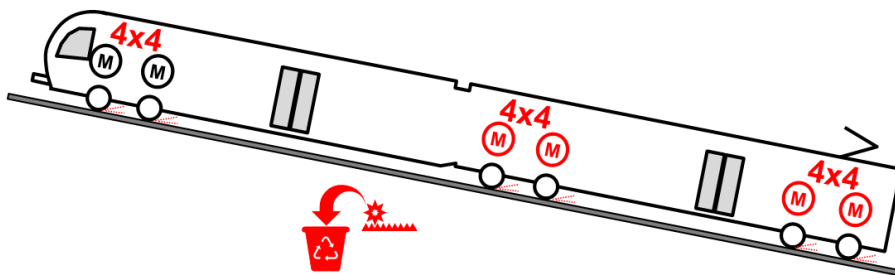


Abbildung 31: Prinzipskizze zahnradloser Bergtriebzug

Die Investitions-Kosten für diese Variante werden auf **>> 50 MCHF** geschätzt.



## 5.5 Variantenvergleich

Eine qualitative Gegenüberstellung der Varianten ist aus untenstehendem Netz-Diagramm ersichtlich. Beurteilt wurden folgende Kriterien:

- Kosten (Entwicklungskosten, Baukosten und Unterhaltskosten ergeben Gesamtkosten)
- Sicherheit + Zuverlässigkeit
- Fahrplanstabilität
- Besseres öV Angebot
- Entwicklungsrisiken

Dabei wurde folgende Bewertungsskala angewandt:

- = sehr unvorteilhaft
- = unvorteilhaft
- 0 = neutral
- + = vorteilhaft
- ++ = sehr vorteilhaft

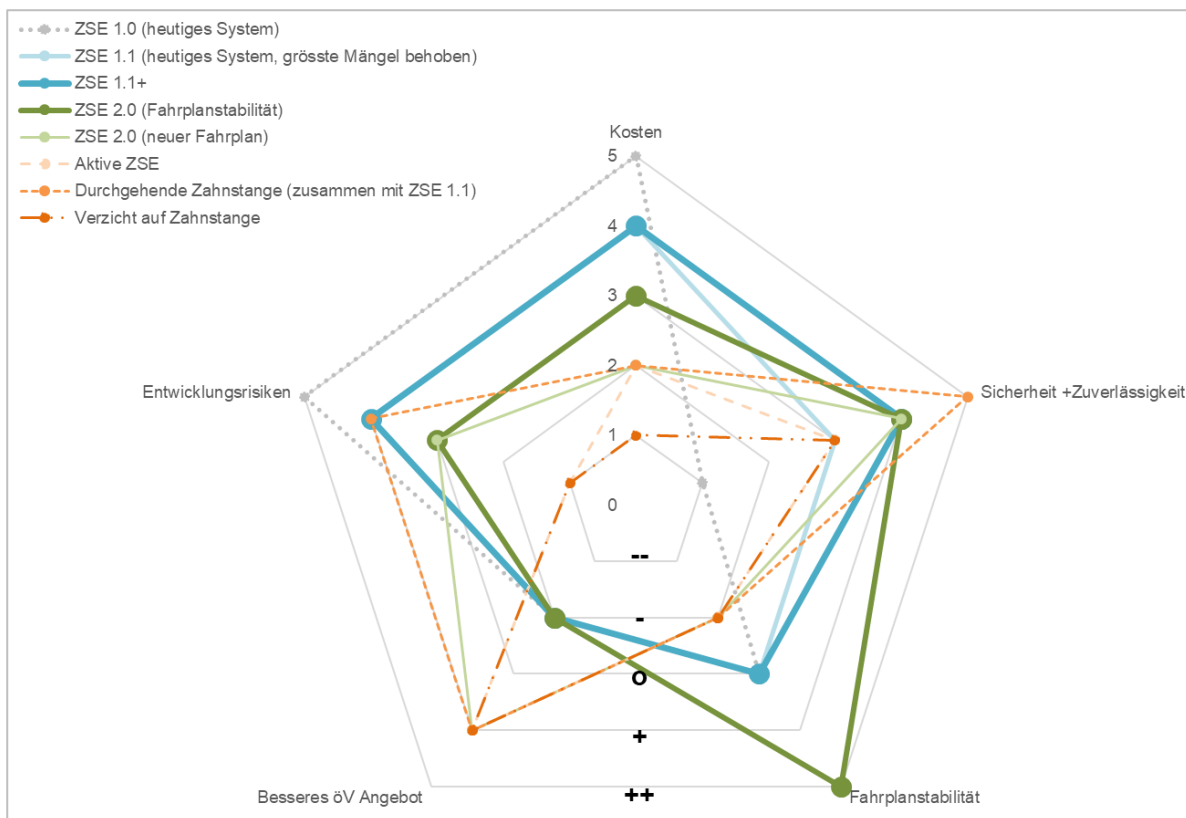


Abbildung 32: Variantenvergleich

Die Varianten werden wie folgt bewertet:

- ZSE 1.0 (Status Quo): vor dem Hintergrund der aktuellen Erkenntnisse muss das Sicherheitsniveau des Status Quo als nicht ausreichend betrachtet werden. Die Beibehaltung des Status Quo als Lösungsvariante scheidet somit aus.

- ZSE 1.1 und ZSE 1.1+:
    - Da der Status Quo als Lösungsvariante ausscheidet, ist das Umsetzen einer dieser beiden Varianten zumindest als Interimslösung zwingend, und zwar unabhängig der gewählten Langfristlösung.
    - Die ZSE 1.1+ verursacht etwas höhere Investitionskosten als ZSE 1.1, verursacht aber aufgrund geringerer Belastung und konstruktiver Verschleissoptimierung weniger Betriebskosten und dürfte somit tendenziell bessere LCC Kosten aufweisen. Da sie sich im Gegensatz zur ZSE 1.1 auch als dauerhafte Lösung eignet, ist die ZSE 1.1+ als Primärlösung umzusetzen.
  - ZSE 2.0:
    - Mit neuem Fahrplanangebot: Falls ein verbessertes Angebot am Brünig gewünscht wird, sollte hierfür die Variante ZSE 2.0 gewählt werden. Sie ist erheblich günstiger als die Variante «durchgehende Zahnstange». Sie erscheint aus heutiger Sicht als technisch machbar, sie beinhaltet aber Entwicklungsrisiken. Die Kosten sind gemessen an der Anzahl Fahrgäste, welche vom verbesserten Angebot profitieren, hoch. Die Fahrplanstabilität würde gegenüber heute reduziert. Diese Variante ist deshalb zum heutigen Zeitpunkt nicht zielführend.
    - Zur Fahrplanstabilisierung: Diese Variante ermöglicht einen Kundennutzen (Fahrplanstabilität) bei moderaten Kosten. Es wird empfohlen, diese Variante weiterzuverfolgen und eine vertiefte Machbarkeitsstudie zu erstellen, um die aktuell unklaren Punkte (Konstruktion Beschleunigungsbalken, Kosten) zu klären und sich die Option auf eine Weiterentwicklung am Brünig offen zu halten.
  - Aktive Systeme
    - Infrastrukturseitig: Die vorliegenden Grundlagenuntersuchungen am heutigen passiven System haben gezeigt, dass sich dieses mit relativ einfachen Mitteln erheblich verbessern lässt. Ein Konzeptwechsel auf aktive Infrastruktursysteme erscheint aus heutiger Sicht als nicht zielführend. Sowohl die Kosten als auch die Risiken lägen höher als bei einer Weiterentwicklung der passiven Systeme.
    - Fahrzeugseitig:
      - Triebzahnräder: Die Versuche vom Dezember 2017 haben gezeigt, dass weitere Anpassungen bei den ABeh 150/160 nicht nötig sind, da diese bereits heute v20 kompatibel sind (in Verbindung mit ZSE 2.0).
      - Ein aktiver Antrieb von Bremszahnradern wäre als Rückfallebene denkbar, falls die Optimierung des Beschleunigungsbalkens im Rahmen der ZSE 2.0 fehlschlagen sollte. Aus Kostengründen wird dieser Ansatz aber aktuell nicht weiterverfolgt.
- Gesamthaft gesehen erscheint ein Weiterverfolgen des Ansatzes der aktiven Systeme als nicht zielführend.
- Durchgehende Zahnstange: Mit dieser Variante wäre eine Beschleunigung am Brünig mit relativ geringen Risiken möglich. Parallel dazu wäre der gleichzeitige dauerhafte Einsatz der ZSE 1.1+ in reduziertem Umfang<sup>2</sup> zwingend. Diese Variante verursacht dauerhafte betriebliche Mehraufwändungen (Kurzwenden in MR) und wesentlich höhere Investitionskosten als die Variante ZSE 2.0. Aus diesem Grund wird die Variante «durchgehende Zahnstange» nicht empfohlen.
  - Keine Zahnstange: Diese Variante wird ausserhalb des Projekts Optimierung Zahnstange in einem separaten Projekt auf Studien-Level weiterverfolgt. Sie wird frühestens 2035+ einsetzbar sein und beinhaltet aktuell grössere Entwicklungsrisiken und bedingt Investitionen in vermutlich dreistelligem Millionenbetrag. Sie stellt in der heutigen Situation deshalb keine unmittelbare Alternative dar.

---

<sup>2</sup> ZSE gäbe es weiterhin, aber nur noch in GI, MR, EBG Mettlen und EBG Boden

## 6. Empfehlung zum weiteren Vorgehen

### 6.1 Designempfehlungen Zahnstangeneinfahrten (allgemein)

Basierend auf den vorliegenden Untersuchungen kann eine längere Liste von Designempfehlungen ausgesprochen werden, welche weitgehend allgemeingültig sein und somit auch für andere Bahnen gelten dürfte.

Die vollständige Liste der Empfehlungen findet sich im Anhang ab Seite 48. Die Empfehlungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Allgemeine Designempfehlungen:
    - a. Konstruktionsphilosophie: Alle Elemente von Zahnstangeneinfahrten sind *hochgradig* ermüdungsbeansprucht und müssen zwingend gemäss gängigen Designregeln für ermüdungskritische Bauteile konstruiert werden. Welche Konstruktionsphilosophie dabei am sinnvollsten verwendet wird ist aktuell unklar. Tendenziell erscheint eine Auslegung auf Zeitfestigkeit gemäss dem «Safe life» Konzept (mit Verschrottung der Bauteile nach Ablauf der sicheren Lebensdauer, s. Kap. 8.1) am sinnvollsten. Daneben sind die üblichen Nachweise gegen Fließen und Gewaltbruch zu führen.
    - b. Lasten: Aus den Versuchen bei der Zentralbahn wurde erstmals ein approximativer Lastensatz hergeleitet, welcher als erster Anhaltspunkt für zukünftige Dimensionierungen verwendet werden kann. Parallel dazu sollte Reverse-Engineering und adäquate Sicherheitsfaktoren verwendet werden.
    - c. Aufgrund extremer Vibrationen ist der Schraubensicherung grösste Aufmerksamkeit zu widmen. Stossbeanspruchungen sollten vom Design her möglichst vermieden werden
    - d. Verschleiss ist bei Zahnstangeneinfahrten unvermeidbar. Eine konstruktive Trennung zwischen verschleissbeanspruchten und ermüdungsbeanspruchten Flächen ist aber zukünftig sicherzustellen. Dies impliziert insbesondere den konsequenten Einsatz von Büchsen bei Bauteilverbindungen.
  2. Designempfehlungen Rollenbalken:
    - a. Der Rollenbalken ist gemäss anerkannten Regeln für ermüdungsbeanspruchte Bauteile und den Empfehlungen in [54][55] umzukonstruieren.
  3. Designempfehlungen Lamellen:
    - a. Teilungsfehler sollten zukünftig vermieden werden. Sie bieten keine Gewähr für eine zuverlässige Synchronisation vor der festen Zahnstange, verursachen aber insbesondere beim Ausfahren stark negative Effekte und sind ursächlich verantwortlich für Ermüdungsbrüche bei Rollenbalken. Für erhöhte Einfahrtgeschwindigkeiten sind sie vollkommen ungeeignet.
    - b. Lamellen sind so zu konstruieren, dass sie die komplette Achslast des schwersten Fahrzeugs tragen können, ohne permanent zu deformieren. Radlenker sind zwingend nötig, da Fahrzeuge in der Einfahrt angehoben werden können.
    - c. Lamellen benötigen eine spezielle Zahngeometrie (schmale Zähne mit stark gerundeten Köpfen, kontinuierlich abnehmendes Zahn-Flankenspiel, etc.), welche sich grundlegend von der Zahngeometrie in der festen Zahnstange unterscheidet.
  4. Designempfehlungen Beschleunigungsbalken
    - a. Für Geschwindigkeiten bis  $v = 10 \text{ km/h}$  ist das Design der heutigen Beschleunigungsbalken ausreichend. Für höhere Geschwindigkeiten ist das Design nicht ohne weiteres geeignet. Die geeignetste Lösung ist aktuell noch unklar und muss in einem Folgeprojekt geklärt werden.
  5. Re-Design Fahrzeuge
-

- a. Bei Einfahrten mit  $v > 10$  km/h muss im Fahrzeug eine Überwachung eingeführt werden, welche das korrekte Beschleunigen des Triebzahnrad vor dem Einfahrtvorgang sicherstellt und notfalls das Fahrzeug abbremst. Hierfür sind auch Infrastrukturseitig Massnahmen zur Positionsbestimmung des Fahrzeugs nötig

#### 6. Weitere Empfehlungen:

- a. Konfigurationskontrolle: Aufgrund der Sicherheitsrelevanz muss zukünftig eine saubere Konfigurationskontrolle bei Zahnstangeneinfahrten eingeführt werden. Sicherheitsrelevante Bauteile müssen über eine Seriennummer identifizierbar und deren Einsatzdauer über entsprechende Wartungsdokumentationen kontrollierbar sein.
- b. Unterhaltsprogramm: es muss zukünftig ein Inspektions- und Wartungsprogramm eingeführt werden, welches in der Lage ist alle relevanten Defekte zu verhindern oder rechtzeitig zu entdecken. Allenfalls wäre hierfür eine FMEA-Analyse hilfreich.
- c. Reporting-Pflicht: Relevante Schäden an Zahnstangeneinfahrten müssen zukünftig sowohl Firmenintern als auch an den Hersteller und in schwerwiegenden Fällen zudem an die SUST gemeldet und untersucht werden.

**Die Zentralbahn empfiehlt allen Bahnen, welche Zahnstangeneinfahrten ähnlicher Bauart besitzen, ihre Zahnstangeneinfahrten und ihre Prozesse zum Betrieb der Zahnstangeneinfahrten gemäss den Empfehlungen dieses Berichts zu überprüfen und wo nötig anzupassen.**

## 6.2 Empfehlung weiteres Vorgehen Zahnstangeneinfahrten (Zentralbahn)

Für das weitere Vorgehen wird folgendes vorgeschlagen:

4. **Phase 0 - Abschluss dieser Vorstudie:** Genehmigung der Vorstudie und des weiteren Vorgehens durch die GL der Zentralbahn. Zudem sollen die Resultate dieser Studie der Begleitgruppe des Projekts, der Fachpresse und der Fachgruppe Zahnradbergbahnen des VöV (Autoren der RTE 29700) zugänglich gemacht werden.
5. **Phase 1 - Einbau ZSE 1.1+:** Auf dem gesamten Netz der Zentralbahn sollen die ZSE 1.0 auf Version 1.1+ aufgerüstet werden, inklusive Einführung Konfigurationsmanagement und Unterhaltsprogramm. Diese Massnahme dient dem Eliminieren der aktuell bekannten, potentiell sicherheitsrelevanten Schwachstellen und kann sowohl als Interims- als auch als dauerhafte Lösung eingesetzt werden. Sie ist aus technischer Sicht zwingend. Die Umsetzung soll möglichst zeitnah erfolgen. Die Einfahrtgeschwindigkeit bleibt auf  $v = 10$  km/h beschränkt.
6. **Phase 2 – vertiefte Machbarkeitsstudie ZSE 2.0:** in einer zweiten Phase soll eine vertiefte Machbarkeitsstudie für die ZSE 2.0 erstellt werden. Diese soll primär klären, wie eine wirtschaftlich tragbare Beschleunigungsvorrichtung aussehen könnte, die Kosten präziser abschätzen und eine Empfehlung zum weiteren Vorgehen zu Handen der GL abgeben.
7. **Phase 3 – Entwicklung und Implementierung ZSE 2.0 (optional):** Im Falle eines positiven Entscheids der GL würde voraussichtlich vorerst eine einzelne Einfahrt als Prototyp entwickelt. Nach einem Plangenehmigungsverfahren könnte der erste Einbau einer ZSE 2.0 erfolgen, welche in der Folge einer Betriebserprobung unterzogen würde. Die Einfahrtgeschwindigkeit würde dabei stufenweise bis auf  $v = 20$  km/h erhöht werden.
8. **Phase 4 – Flächendeckende Implementierung ZSE 2.1 (optional):** Die flächendeckende Einführung der Zahnstangeneinfahrten der 2. Generation würde erst nach erfolgreichem Abschluss der Betriebserprobung des Prototypen der ZSE 2.0 stattfinden und würde voraussichtlich moderate Anpassungen enthalten, weshalb sie als ZSE 2.1 bezeichnet wird.

Ein möglicher Terminplan ist auf der nächsten Seite skizziert. Dieser bildet den Idealfall ab.



### 6.3 Terminplan

		2018	2019	2020	2021	2022	2023	2023	2023	2023
		1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
<b>Phase 0</b>	<b>Abschluss Vorstudie</b>									
<b>Phase 1</b>	<b>Entwicklung ZSE 1.0 → ZSE 1.1+</b>									
	Konstruktionsänderungen (Fertigungszeichnungen)									
	Herstellen Nullserie Lamelle und RB (EBG süd)									
	Test / Betriebserprobung und ev. Messung									
	ev. kleine Designanpassung / Serialisierung									
	Herstellen restliche Lamellen / Rollenbalken									
	Umbau Zahnstangenantrieb restliches Netz									
<b>Phase 2</b>	<b>Vertiefte Machbarkeitsstudie ZSE 2.0</b>									
	Planerbeschaffung									
	Studie Funktionsprinzipien									
	Vertiefte Prüfung Vorzugsvarianten									
	Design und Herstellung Prototyp									
	Einfahrversuche Prototyp und Versuchsauswertung									
	Detaillkostenabschätzungen und Wirtschaftlichkeit									
	Schlussbericht									
<b>Phase 3</b>	<b>Entwicklung, Bau &amp; Betriebserprobung ZSE 2.0</b>									
	Entwicklung ZSE 2.0									
	Erstellen PGV ZSE 2.0									
	PGV Verfahren									
	Teilerfertigung ZSE 2.0									
	Einbau ZSE 2.0 inkl. Messtechnik in MR									
	Regelbetrieb bei v=10									
	Regelbetrieb bei v=14									
	Regelbetrieb bei v=17									
	Regelbetrieb bei v=20									
	Monitoring Regelbetrieb									
<b>Phase 4</b>	<b>Weiterentwicklung und Bau ZSE 2.0 zu ZSE 2.1</b>									
	Optimierung ZSE 2.0 zu 2.1									
	Erstellen PGV ZSE 2.1									
	PGV Verfahren									
	Teilerfertigung ZSE 2.1									
	Bau ZSE GIBRUE									
<b>Sekundär</b>	<b>Infrastrukturausbauten (optional, je n. Var.)</b>									
	PU BRUE									
	PU BRZ									
	Kreuzungsstelle NR									

Abbildung 33: möglicher Terminplan für weiteres Vorgehen

## 6.4 Kosten- und Wirtschaftlichkeits-Abschätzungen

Für das vorgeschlagene Vorgehen wurde eine Grobkostenschätzung erstellt. Die Kostenschätzung ist angesichts des noch nicht in allen Details bekannten Lösungswegs mit grösseren Unsicherheiten behaftet, die geschätzte Genauigkeit beträgt +/-50%. Eine Präzisierung der Kostenschätzung in der folgenden Phase ist nötig.

PSP-Element	Positions-Beschrieb	KV durch:	NAI	EL	KV [CHF]	WV/Offerte [CHF]	IST [CHF]	OBLIGO [CHF]	Korrektur [CHF]	EKP [CHF]	\$	vor 2018	2018	Annuitäten (auf Basis EKP)	2019	2020	2021	2022	2023
0.4-2	Phase 1 - Umbau ZSE 1.0 auf 1.1				430'800	-	-	-	-	430'800									
0.4-21	Projektleitung zb		x		29'000	-	-	-	-	29'000									
0.4-22	Projektbegleitung Externe				19'000	-	-	-	-	19'000									
0.4-23	Entwicklung und Konstruktion				50'000	-	-	-	-	50'000									
0.4-24	Herstellung und Einbau ZSE 1.1 (Fremdleistungen)				255'000	-	-	-	-	255'000									
0.4-25	Herstellung und Einbau ZSE 1.1 (Eigenleistungen)		x		77'800	-	-	-	-	77'800									
0.4-3	Reserve / Unvorhergesehenes				100'000	-	-	-	-	100'000									
0.4-51	Reserve				100'000	-	-	-	-	100'000									
	<b>Total NAI (exkl. MwSt.)</b>				0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>Total Eigenleistungen (exkl. MwSt.)</b>				106'800	0	0	0	0	106'800		0	10'000	72'800	0	0	0	0	0
	<b>Total Fremdleistungen (exkl. MwSt.)</b>				424'000	0	0	0	0	424'000		0	27'000	397'000	0	0	0	0	0
	<b>TOTALSUMME (exkl. MwSt.)</b>				530'800	0	0	0	0	530'800		0	37'000	469'800	0	0	0	0	0

Abbildung 34: Grobkostenschätzung ZSE 1.1+

PSP-Element	Positions-Beschrieb	KV [CHF]	WV/Offerte [CHF]	IST [CHF]	OBLIGO [CHF]	Korrektur [CHF]	EKP [CHF]	\$	vor 2020	2020	Annuitäten (auf Basis EKP)	2021	2022	2023	2024	2025
0.4-2	Phase 2 - Vertiefte Machbarkeitsstudie	259'400	-	-	-	-	259'400		68'400	191'000						
0.4-21	Projektleitung zb	49'000	-	-	-	-	49'000		19'000	30'000						
0.4-22	Projektbegleitung Externe	22'000	-	-	-	-	22'000		11'000	11'000						
0.4-23	Vorstudie Beschleunigungsbalken	168'400	-	-	-	-	168'400		38'400	130'000						
0.4-25	Herstellung und Einbau ZSE 1.1 (Eigenleistu)	20'000	-	-	-	-	20'000		-	20'000						
0.4-3	Phase 3 Entwicklung / Bau ZSE 2.0	578'090	-	-	-	-	578'090		-	-	36'050	32'570	122'610	386'860		
0.4-31	Projektleitung zb	49'000	-	-	-	-	49'000		-	-	20'000	5'000	12'000	12'000		
0.4-32	Projektbegleitung Externe	64'200	-	-	-	-	64'200		-	-	16'050	16'050	16'050	16'050		
0.4-34	Entwicklung ZSE 2.0	46'080	-	-	-	-	46'080		-	-	-	11'520	34'560			
0.4-35	Herstellung und Einbau ZSE 2.0 (Fremdleist)	258'810	-	-	-	-	258'810		-	-	-	-	60'000	198'810		
0.4-36	Herstellung und Einbau ZSE 2.0 (Eigenleistu)	80'000	-	-	-	-	80'000		-	-	-	-	-	80'000		
0.4-37	Betriebserprobung (Fremdleistungen)	80'000	-	-	-	-	80'000		-	-	-	-	-	80'000		
0.4-4	Phase 4 - Entwicklung/Implementierung	1'411'600	-	-	-	-	1'411'600		-	-	-	-	-	-	1'411'600	
0.4-41	Projektleitung zb	55'000	-	-	-	-	55'000		-	-	-	-	-	-	55'000	
0.4-42	Projektbegleitung Externe	39'800	-	-	-	-	39'800		-	-	-	-	-	-	39'800	
0.4-43	Entwicklung ZSE 2.1	86'800	-	-	-	-	86'800		-	-	-	-	-	-	86'800	
0.4-44	Herstellung und Einbau ZSE 2.1 (Fremdleist)	1'050'000	-	-	-	-	1'050'000		-	-	-	-	-	-	1'050'000	
0.4-45	Herstellung und Einbau ZSE 2.1 (Eigenleistu)	180'000	-	-	-	-	180'000		-	-	-	-	-	-	180'000	
0.4-5	Reserve / Unvorhergesehenes	750'000	-	-	-	-	750'000		-	-	150'000	150'000	150'000	150'000	150'000	
0.4-51	Reserve	750'000	-	-	-	-	750'000		-	-	150'000	150'000	150'000	150'000	150'000	
	<b>Total NAI (exkl. MwSt.)</b>	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0	0
	<b>Total Eigenleistungen (exkl. MwSt.)</b>	433'000	0	0	0	0	433'000		19'000	50'000	20'000	5'000	12'000	92'000	235'000	
	<b>Total Fremdleistungen (exkl. MwSt.)</b>	2'566'090	0	0	0	0	2'566'090		49'400	141'000	166'050	177'570	260'610	444'860	1'326'600	
	<b>TOTALSUMME (exkl. MwSt.)</b>	2'999'090	0	0	0	0	2'999'090		68'400	191'000	186'050	182'570	272'610	536'860	1'561'600	

Abbildung 35: Grobkostenschätzung ZSE 2.0

Die Wirtschaftlichkeit der näher in Betracht gezogenen Varianten zeigt nachstehende *Abbildung 36*. Neben den in den vorigen Kapiteln präsentierten Investitionskosten sind auch die Unterschiede in den Betriebskosten grob abgeschätzt. Die Basis hierfür bilden die heutigen jährlichen direkten Unterhaltskosten der ZSE 1.0 von 66'000 CHF jährlich (durchschnittliche Istkosten 2016 /2017):

- Bei der ZSE 1.1 würde sich dieser Betrag nicht verändern, da keine Optimierungen bezüglich Verschleiss vorgenommen würden.
- Bei der ZSE 1.1+ würden sich diese Kosten um geschätzt 30% reduzieren.
- Bei den Varianten ZSE 2.0 würde zwar der Verschleiss ähnlich reduziert. Da sich gleichzeitig die Anzahl Einfahrelemente ungefähr verdoppeln würde und schneller eingefahren wird, wird geschätzt, dass die Betriebskosten netto gegenüber heute um 50% steigen würden. Dazu kämen Unterhaltskosten für zusätzliche PU, aber auch Einsparungen bei den zb Partnern, insbesondere Postauto AG [30]. Diese fallen aber geringer aus als zu Beginn der Vorstudie angenommen.
- Abschreibungen sind bei allen Varianten nicht berücksichtigt worden.

Aus den Abschätzungen ist ersichtlich, dass die Variante ZSE 1.1+ die beste Wirtschaftlichkeit aufweist. Würde man einen allfälligen Kundennutzen monetarisieren, könnten auch die ZSE 2.0 Varianten eine gute Wirtschaftlichkeit aufweisen.

Szenarienbeschreibung		Verzicht auf V20 (Behebung der relevantesten Mängel)	Verzicht auf V20 (Behebung der relevantesten Mängel + einfache Optimierungen)	Verbesserte Fahrplanstabilität durch V20	Verbessertes Fahrplanangebot durch V20
	Design der Zahnstangeneinfahrt	ZSE 1.1	ZSE 1.1+	ZSE 2.0	
	Einfahrtsgeschwindigkeit	v=10 km/h		v=20 km/h	
	Fahrplan-verbesserung	-	-	-	Neuer Fahrplan: Verlegung der Kreuzung KAEP -> BRUE Verlegung der Kreuzung BRW -> BRZ
	Sekundär Infrastrukturinvestitionen	-	-	-	Neue PU (oder PÜ) in BRUE ~6 MCHF Neue PU (oder PÜ) in BRZ ~6 MCHF Kreuzungsstelle NR 0 MCHF (Ohnehinkosten AS2030)
Kosten [CHF]					
	Investitionskosten zb exkl. NR (Annahme: Ohnehin-Kosten AS 2030)	400'000	600'000	3'300'000	15'300'000
	Betriebskosten zb ZSE / Jahr	66'000	46'200	99'000	99'000
	Betriebskosten zb PU / PÜ pro Jahr	-	-	-	12'000
	Einsparung Betriebskosten Partner / Jahr	-	-	-	-145'000
	Gesamtkosten 40 Jahre zb (ohne Kapitalisierungskosten, 40 Jahre = Abschreibedauer Publikumsanlagen)	3'040'000	2'448'000	7'260'000	19'740'000
	Gesamtkosten 40 Jahre Gesamt ÖV (ohne Kapitalisierungskosten, 40 Jahre = Abschreibedauer Publikumsanlagen)	3'040'000	2'448'000	7'260'000	13'940'000
	Mehraufwand ER 40 Jahre	792'000	-	2'112'000	2'112'000

Abbildung 36: Einfache Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

## 6.5 Zulassung

Für Zahnstangeneinfahrten gibt es kein Typenzulassungsverfahren. Aus diesem Grund ist geplant, die neuen Einfahrten wie folgt zulassen zu lassen:

1. Einführung ZSE 1.1+: es handelt sich hierbei um ein punktueller Verbesserung des heutigen Systems. Das grundlegende Design des Systems bleibt unverändert. Gemäss Auffassung der Zentralbahn besteht in Anlehnung an VPVE Art. 1a (Anhang, lit. b/d) hierfür keine PGV Pflicht.
2. Allfällige Einführung ZSE 2.0: es handelt sich um ein komplett überarbeitetes System. Eine allfällige Zulassung müsste mittels vereinfachtem PGV gem. EBG Art. 18 i erfolgen.

## 6.6 Geistiges Eigentum

Diese Vorstudie wurde in der Absicht erstellt, Zahnstangeneinfahrten sicherer und wirtschaftlicher zu machen. Die Zentralbahn beabsichtigt nicht, sich durch die Weiterentwicklung der Technologie einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Bahnen zu verschaffen. Die Studie wurde mehrheitlich mit öffentlichen Mitteln (Zentralbahn, BAV Fördermittel) finanziert, und die Resultate werden der Fachwelt zugänglich gemacht.

Aus diesen Gründen bilden die in dieser Vorstudie beschriebenen Erkenntnisse einen neuen Teil des Stands der Technik.

Die hier beschriebenen konstruktiven Merkmale sind somit Gemeingut und deshalb nicht patentierbar.

## 6.7 Risiken / Chancen

Die Chancen und Risiken des vorgeschlagenen Vorgehens werden wie folgt eingeschätzt:

Nr.	Risiko	Massnahme zur Risikoreduktion	Bewertung Rest-Risiko
1	ZSE 1.1+: Einführung unerwarteter Funktions-Risiken	Nutzen des Wissens dieser Studie, insb. mit Prototypenlamelle P01. Schrittweises Einführen der neuen Einfahrt mit Betriebsmonitoring der ersten nachgerüsteten Einfahrt	sehr gering
1	ZSE 2.0 Entwicklungsrisiko: Entwicklung / Bau ZSE 2.0 braucht mehr Geld	Stufenweises Vorgehen <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entwicklungsversuch Beschleunigungsbalken</li> <li>- Danach Bau von nur 1 Piloteinfahrt</li> </ul> Flächendeckender Einbau erst nach erfolgreicher Betriebserprobung	Mittel
	ZSE 2.0 Entwicklungsrisiko: Zulassungsfähigkeit ZSE 2.0 nicht gegeben	Vorgängige Absprache mit BAV	Mittel
	ZSE 2.0 Entwicklungsrisiko: technische Machbarkeit ZSE 2.0 falsch eingeschätzt	Klären der grössten Rest-Unsicherheiten mit Entwicklungsversuch Beschleunigungsbalken und Detailstudie TZR Überwachung	gering
	ZSE 2.0 Entwicklungsrisiko: Entwicklung / Bau ZSE 2.0 braucht mehr Zeit	Neues Fahrplankonzept erst fix einplanen, wenn zeitgerechte Umsetzbarkeit gesichert ist	Gering
	ZSE 2.0 Einführung neuer Betriebsrisiken durch V20	Stufenweises Vorgehen	Gering
	ZSE 2.0: Höhere Betriebs- und Unterhaltskosten als heute infolge mehr Bauteilen und höherer Beanspruchung	Teilweise Kompensation durch eine gegenüber heute verbesserte Konstruktion.	Hoch

Tabelle 1: Risiken

Nr.	Chancen	Bewertung Chance
1	ZSE 1.1+ Eliminierung von Betriebsrisiken durch ZSE 1.1+ bei gleichzeitiger Reduktion Betriebskosten oder zumindest Kostenneutralität	gross
2	ZSE 2.0 Erhöhung der Fahrplanstabilität	Mittel
3	ZSE 2.0 Schaffen eines verbesserten Fahrplanangebots	Gering-Mittel

Tabelle 2: Chancen



## 7. Referenzen

### Summary:

- [1] Vorstudie Optimierung Zahnstange, Summary Bericht, C. Katz, Zentralbahn, 11.12.2018 (=dieser Bericht)
- [2] Optimierung Zahnstangeneinfahrten, Schlusspräsentation Vorstudie, V. Walz / C. Katz, Zentralbahn, 12.11.2018

### A Grundlagen:

- [3] Projektierungsauftrag „Optimierung Zahnstange“, I-PJ, C. Katz, 15.03.2017
- [4] RTE 29700 Systemtechnik Zahnradbahnen, VöV, 31.03.2010
- [5] Sicherheitsnachweis Zahnstangen, C+S Ingenieure AG, 08.07.2011
- [6] Verfügung des BAV vom 24.01.2018 zum Gesuch der zb Zentralbahn AG vom 26.07.2017 betreffend Vorstudie zur Optimierung von Zahnstangeneinfahrten

### B Schadensanalysen:

- [7] Schadensanalysen Zahnstangeneinfahrten, Summary Bericht, C. Katz, Zentralbahn, 28.09.2018
- [8] Zahnstangeneinfahrt Engelberg - Rollenbalkenbruch 20.01.2015, Interner Untersuchungsbericht, C. Katz, Zentralbahn, 17.12.15
- [9] Prüfbericht Schadensuntersuchung Rollenbalken, 01.03.2015, IWT Nr. 17009699, IWT Institut für Werkstofftechnologie AG
- [10] Entgleisung 2965 Tunnel Engelberg, Zahnstangeneinfahrt km 22.623 von Dienstag 20.01.2015 in Engelberg OW, Martin Roth, Zentralbahn 29.01.2018
- [11] Bruch Rollenbalken Zahnstangeneinfahrt Engelberg – Stand per 21.12.15, Standbericht der Zentralbahn zu Händen SUST, 21.12.2015
- [12] Versagensanalyse Bolzen Lamelle Zahnstangeneinfahrt BRUE, C. Katz / V. Walz Zentralbahn, 09.12.2017
- [13] Zahnstangeneinfahrt Engelberg, Verschleissanalyse Lamelle Mai 2016, interner Untersuchungsbericht C. Katz, Zentralbahn, 25.08.16
- [14] Zentralbahn – LSE Zahnstangeneinfahrt, Rollenbalkenbruch 25.03.2011, J. Miauton, TrackNet

### C Versuche

- [15] Einfahrversuche mit optimierter Lamelle Sept / Dez 2017, Summary Report, C. Katz, Zentralbahn, März 2018
- [16] Zahnstangeneinfahrt Vorversuche, Messbericht 02-01049, Prose AG, 07.06.2016 (Rollenbalken)
- [17] Zahnstangeneinfahrt Engelberg, Messungen 2017, Report 02-01221, Prose AG, 22.06.2018
- [18] Versuche Einfahrlamelle Tunnel Engelberg November 2017 – Risikobeurteilung, Katz / Zuber / Miauton / Walz / Marty, 28.11.2017
- [19] Einfahrversuche Zahnstange mit  $v=20\text{km/h}$ , Auswertung Versuche 3+4 vom Dez 2017, Präsentation C. Katz, Zentralbahn, 28.02.18 (rev. 07.03.18)

### D Simulationen

- [20] Bachelor und PAIND - Arbeiten HSLU 2016 – Summary Bericht, Entwurf, C. Katz, (Auswertung von [21][22][23])
  - [21] Zahnstangeneinfahrt – Analyse Rollenbalken, Bachelor Diplomarbeit, J. Sturdy & R. Scherer, HSLU 10.06.2016
  - [22] Dynamische Simulation eines Rollenbalkens, Bachelor Diplomarbeit, D. Baeriswyl, HSLU 10.06.2016
  - [23] Zahnstangeneinfahrt – Analyse Einfahrlamelle, PAIND Industriearbeit, L. Auf der Maur, HSLU 22.12. 2016
  - [24] Optimierung Zahnstangeneinfahrt, Verschleissbilder & Zahneingriff, W. Bachmann Sersa, 29.05.2018
-

- [25] ZB Zahnstangeneinfahrt 20 km/h, J. Miauton, TrackNet, 05.03.2013

## E Fahrplan

- [26] Zahnstangen-Bericht, Massnahmen auf der Brünig-Bergstrecke zur Optimierung des Angebots auf dem Brünig, in Meiringen und in Brienz, Schlussbericht, MRS, 10.05.2016
- [27] Bericht 90' Revolution, Version 2.0, 20.07.2017, Fankhauser / Jantschgi  
SBB/Login/Zentralbahn
- [28] Durchgehende Zahnstange am Brünig, Studienbericht, Nr. 15148-B01, C+S Ingenieure, März 2018
- [29] STEP Ausbauschritt 2030, Angebotskonzept 2030, Module und Bewertungsgrundlagen für BAV, Zentralbahn / MRS, 25.02.2016
- [30] Zahnstangeneinfahrten am Brünig, Vorgehensweise Mängelbehebung / Geschwindigkeits-erhöhung, VR Infovorlage, C. Katz / P. Furrer Zentralbahn, 05.11.2018
- [31] Nutzen von Zahnstangeneinfahrten V20, Präsentation, MRS, 19.09.2018

## F Lasten

- [32] Lasten für Zahnstangeneinfahrten ZSE 1.1+, Summary Bericht, C. Katz, Zentralbahn, 10.12.2018
- [33] Zahnstangeneinfahrt Engelberg, Auswertung Lastfälle, Report 02-01294, H.R. Graf, Prose AG, 04.12.2018

## G Videos

- [34] LN1014\_ZR01 (typische Ausfahrt ABeh BZR mit Teilungsfehler)
- [35] LN1014\_ZR03 (typische Ausfahrt ABeh TZR mit Teilungsfehler)
- [36] LN1022\_ZR01 (typische Einfahrt BZR ABeh mit v=10 km/h)
- [37] LN1022\_ZR02 (typische Einfahrt TZR ABeh mit v=10 km/h)
- [38] LN1056\_ZR02 (extreme Einfahrt TZR HGe mit v=10 km/h)
- [39] LN2011\_ZR02 (Ausfahrt ABeh TZR ohne Teilungsfehler)
- [40] LN2044\_V2 (Kopf auf Kopf Fahrt Hge bei Zeitstempel 8:42)
- [41] LN4027\_ZR03 (Einfahrt ABeh TZR mit v=18 km/h)
- [42] LN4027\_ZR01 (Einfahrt ABeh BZR mit v=18 km/h)
- [43] LN4043\_ZR02 (Einfahrt ABeh TZR mit deaktiviertem Antrieb mit v=5 km/h)
- [44] Animation Biegevelle Rollenbalken: FEM\_Verifikation\_Messkampagne.avi

## H Pläne

- [45] Situationsplan Käppeli, ZSE Nord, Plan Nr. 15148 p01, C+S Ingenieure AG, März 2018
- [46] Situationsplan Käppeli, ZSE Süd, Plan Nr. 15148 p01, C+S Ingenieure AG, März 2018
- [47] Situationsplan Brünig, ZSE Nord, Plan Nr. 15148 p02, C+S Ingenieure AG, März 2018
- [48] Situationsplan Brünig, ZSE Süd, Plan Nr. 15148 p02, C+S Ingenieure AG, März 2018
- [49] Situationsplan Giswil, Plan Nr. 15148 p03, C+S Ingenieure AG, März 2018
- [50] Situationsplan Kaiserstuhl, Plan Nr. 15148 p04, C+S Ingenieure AG, März 2018
- [51] Situationsplan Lungern, Plan Nr. 15148 p05, C+S Ingenieure AG, März 2018
- [52] Situationsplan Meiringen, Plan Nr. 15148 p06, C+S Ingenieure AG, März 2018
- [53] ZSE Engelberg: Tensol Nr. 60.00762 (Einfahrlamelle), 60.00599 c (Rollenbalken), 60.00612 B (Beschleunigungsbalken)

## J Design

- [54] Re-Design Zahnstangeneinfahrten, Empfehlungen basierend auf den Untersuchungen der zb 2015-2017, C. Katz / V. Walz, 28.02.18 rev. 03.10.2018
- [55] Zahnstangeneinfahrten ZSE 1.1+, Anforderungen und Empfehlungen zb Zentralbahn AG für die Nachrüstung der Einfahrten, C. Katz / V. Walz, Zentralbahn, 05.09.2018
-

## Änderungsstand des Dokumentes

Version	am	von	Beschreibung
0.0	20.07.16	C. Katz	Dokument erstellt
0.9	18.11.18	C. Katz	99% Entwurf für Vernehmlassung in ArGr
1.0	12.12.2018	C. Katz	Erstausgabe

## 8. Anhänge

### 8.1 Konstruktionsphilosophie zur Vermeidung von Ermüdungsschäden

Grundsätzlich gibt es folgende 4 Konstruktionsphilosophien zur Vermeidung von Ermüdungsschäden:

1. Dauerfestigkeit: Das Bauteil wird so dimensioniert, dass die Spannungen unterhalb der Dauerfestigkeitsschwelle des Materials liegen. Das Bauteil hat dadurch eine theoretisch unbegrenzte Lebensdauer.
2. Betriebsfestigkeit – Safe Life Ansatz: Das Bauteil wird so dimensioniert, dass das Auftreten eines Ermüdungsversagens innerhalb eines bestimmten Zeitraums sehr unwahrscheinlich ist. Nach Erreichen der sicheren Lebensdauer («safe life»), welche über Versuche und/oder Berechnungen bestimmt wird, muss das Bauteil ausser Betrieb genommen und verschrottet werden.
3. Betriebsfestigkeit – Fail Safe Ansatz: Das Bauteil wird so konstruiert, dass die tragende Struktur redundant ist. Fällt ein Lastpfad infolge Ermüdungsschaden aus, so kann der zweite Lastpfad die Lasten übernehmen.
4. Betriebsfestigkeit – Damage Tolerance Ansatz: Das Bauteil wird konstruiert unter der Annahme, dass es bereits ab Werk an kritischen Stellen Anrisse einer definierten Grösse hat. Mittels bruchmechanischer Methoden wird das Wachstum der Risse berechnet und daraus Inspektionsintervalle abgeleitet, welche sicherstellen, dass die Risse nie die kritische Grösse erreichen. Das Bauteil hat dadurch eine theoretisch unbegrenzte Lebensdauer, welche allerdings aus Widespread-Fatigue-Damage-Überlegungen trotzdem oft eingegrenzt wird.

Aus Sicht des Autors eignen diese Konstruktionsphilosophien für Zahnstangeneinfahrten wie folgt:

1. Dauerfestigkeit: Dieser Ansatz kann ausgeschlossen werden. Um die Spannungen auf ein genügendes Niveau senken zu können, müsste die Konstruktion massiv verstärkt werden. Dies würde zu einer grossen Erhöhung der Systemmasse führen, was angesichts der hohen Dynamik nicht erwünscht bzw. nicht möglich ist.
2. Safe-life: aus heutiger Sicht erscheint dieser Ansatz am zielführendsten. Dies impliziert folgendes:
  - a. Die sichere Lebensdauer ist zu bestimmen. Hier könnte unter Umständen ein empirischer Ansatz in Kombination mit einfachen Berechnungen wie z.B. Spektrenvergleichen verwendet werden
  - b. Die Bauteile müssen einzeln identifizierbar sein, ihre Einsatzdauer muss lückenlos aufgezeichnet werden und sie müssen nach Erreichen der sicheren Lebensdauer verschrottet werden. Eine Begutachtung vor der Verschrottung könnte helfen, das Verständnis für das Bauteil weiter zu verbessern.
  - c. Da im Gegensatz zum Damage-Tolerance Ansatz von fehlerfreien Bauteilen ausgegangen wird, ist ein Inspektionsplan erforderlich, welcher sicherstellt, dass keine unerwünschten Beschädigungen vorliegen.
3. Fail Safe: Auch dieser Ansatz würde mit grösster Wahrscheinlichkeit zu einer unzulässigen Masse-Zunahme führen. Zudem ist der Bauraum sehr beschränkt und redundante Strukturen lassen sich nur schwer realisieren. Dieser Ansatz wird als ungeeignet erachtet.
4. Damage Tolerance: Dieser Ansatz ist in anderen Branchen, insbesondere der Luftfahrt, der Stand der Technik. Folgende Gründe sprechen tendenziell gegen einen Einsatz an Zahnstangeneinfahrten:
  - a. Die Datenbasis für eine zuverlässige Berechnung des Ermüdungsspektrums ist ungenügend
  - b. Das Spannungsniveau ist sehr hoch, die resultierenden kritischen Rissgrössen sind entsprechend sehr klein. Es ist fraglich, ob diese Risse selbst mit hochauflösenden nicht-zerstörenden Prüfverfahren zuverlässig erkannt werden könnten.
  - c. Die im Bahnwesen eingesetzten Gleisbauspezialisten besitzen nicht die für diese Philosophie benötigten Spezialkenntnisse. Auch sind die Prozesse im Gleisbau in ihrer aktuellen Form hierfür nicht geeignet.

Es ist die Aufgabe des Herstellers, eine geeignete Konstruktionsphilosophie festzulegen.

---



## 8.2 Designempfehlungen Zahnstangeneinfahrten

(entspricht der vollständigen Präsentation [55]. Weitergehende Empfehlungen für v20 siehe [54].)

### Zahnstangeneinfahrten «ZSE 1.1+»

Anforderungen und Empfehlungen zb Zentralbahn AG für die Nachrüstung der Einfahrten

C. Katz / V. Walz, 05.09.18

#### Inhaltsverzeichnis

##### Überblick

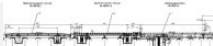


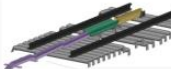
##### Seite

1. Einleitung
2. Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen
3. Re-Design Rollenbalken
4. Re-Design Lamelle
5. Re-Design Beschleunigungsbalken
6. Re-Design FINK / ADLER
7. Weitere Anforderungen

## Einleitung

### Ausgangslage und Lösungsvarianten

Aus der jüngeren Vergangenheit sind diverse Versagen und Designschwächen an Zahnstangeneinfahrten bekannt. Gewisse dieser Schwächen sind sicherheitsrelevant und müssen kurzfristig behoben werden. Eine definitive Behebung *aller* Mängel ist hingegen erst mittelfristig mit einem kompletten Re-Design möglich. Folgende Vorgehensweisen sind denkbar:

Generation der Zahnstangen-Einfahrt	Beschrieb	Bild	Kennzeichnung
ZSE 1.0	Die aktuell (2017) installierte Generation der Zahnstangeneinfahrten (ZSE) wird als ZSE 1.0 bezeichnet.		
ZSE 1.1	Die ZSE 1.1 entsprechen zu rund 95% der ZSE 1.0, sind aber verbessert in den unmittelbar sicherheitsrelevanten Aspekten (gekennzeichnet mit dem Ausrufezeichen). Dieses Konzept ist eine reine Übergangslösung, welche den späteren flächendeckenden Einsatz einer neuen Generation von Einfahrten (ZSE 2.0) voraussetzt.		
ZSE 1.1+	Die ZSE 1.1+ entsprechen der ZSE 1.1, sind aber zudem in weiteren Details optimiert. Sie entsprechen zu rund 90% der ZSE 1.0, sind aber im Gegensatz zu ZSE 1.1 auch als dauerhafte Lösung einsetzbar.	-	
ZSE 2.0	Die ZSE 2.0 sind eine komplette Überarbeitung der 1. Generation und sind grundsätzlich v20 tauglich. Praktisch alle Bauteile sind von Grund auf neu entwickelt.		

Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 3

## Einleitung

### Von der Zentralbahn gewählter Lösungsweg

- Die zb verfolgt aktuell die Stossrichtung **ZSE 1.1+**
- Diese Präsentation gibt einen Überblick über alle Designänderungen, welche für die ZSE 1.1+ nötig sind. Diese wurden wie folgt ausgewählt:
  1. Alle Änderungen, die sicherheitsrelevant sind (gekennzeichnet mit Ausrufezeichen)
  2. Alle Änderungen die nötig sind, um Metall- auf Metall Kontakt an Lagerstellen zu eliminieren
  3. Alle Änderungen die nötig sind, um Kollisionen beweglicher Teile zu verhindern
  4. Alle Änderungen die nötig sind, um globale plastische Deformationen unter normalen Betriebslasten zu verhindern

Als Prämisse galt dabei, dass primär einfach austauschbare Bauteile geändert werden sollen. Der feste Oberbau (Schwellen, Schienenbefestigung, Federkästen, Schotterbett, etc.) soll vorerst möglichst nicht verändert werden.
- Eine Reihe weiterer Designänderungen, welche im Rahmen der Vorstudie im April 18 vorgeschlagen wurden, werden für die ZSE 1.1+ nicht eingeführt, da sie nicht ohne ein komplettes Re-Design des Gesamtsystems möglich sind. Aus diesem Grund besitzt die Nummerierung der Massnahmen in dieser Präsentation Lücken.
- Diese Präsentation stellt den aktuellen Wissenstand der zb dar und beschreibt die Minimalanforderungen, welche mit dem Re-Design ZSE 1.1+ erreicht werden sollen. Es ist letztlich die Verantwortung des Herstellers, die zuverlässige und sichere Funktion der Einfahrten zu gewährleisten (Produkteverantwortung)

Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 4

## Inhaltsverzeichnis

### Überblick

Seite

1. Einleitung
2. Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen
3. Re-Design Rollenbalken
4. Re-Design Lamelle
5. Re-Design Beschleunigungsbalken
6. Re-Design FINK / ADLER
7. Weitere Anforderungen

## Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen

### Dimensionierung

- Im Rahmen des Projekts wurden erste Messungen zur Höhe der auftretenden Lasten gemacht (siehe Bericht Prose). Im Rahmen einer Grobdimensionierung sollten diese Werte von Hersteller beim Re-Design berücksichtigt werden.
- Nichtsdestotrotz kann für das Design nicht ausschliesslich auf den obigen provisorischen Lastensatz abgestützt werden. Es müssen zwangsläufig auch Reverse-Engineering Methoden angewandt werden («was versagt hat war unterdimensioniert, was gehalten hat war gut dimensioniert»)
- Adäquate Sicherheitsfaktoren sind gemäss den gängigen Normen und Vorschriften zu berücksichtigen

## Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen

### Ermüdung

- Alle Elemente von Zahnstangeneinfahrten sind *hochgradig ermüdungsbeansprucht* und müssen deshalb zwingend gemäss gängigen Designregeln für ermüdungskritische Bauteile konstruiert werden, wie z.B. (nicht abschliessend):
  - Hohe «geometrische» Festigkeit nötig
  - Hohe Materialfestigkeit nötig
  - Reduktion von Spannungskonzentrationen jeglicher Art (Löcher, Scharfe Kanten, Steifigkeitssprünge, ...)
  - Hohe Ausführungsqualität (insbesondere Schweissnähte)
  - Ermüdungsbeanspruchte Flächen dürfen nicht gleichzeitig Verschleissflächen sein
  - Etc.
- Sinnvolles Strukturfestigkeitskonzept für Rollenbalken und Lamellen ist durch Hersteller festzulegen. Sicht zb:
  - Konzept «Dauerfestigkeit» (unlimitierte Einsatzdauer): angesichts der extrem hohen Belastungen nicht machbar → nein
  - Konzept «Damage Tolerance» (Einsatz solange Inspektionen ok): in der Luftfahrt state of the art, im Bahnwesen vorerst nicht realistisch da Engineering- und NDT-Expertise nicht vorhanden → nein
  - Konzept «Fail Safe»: konstruktiv aufwändig, keine Garantie für Sicherheit → nein
  - Konzept «Safe life» (Einsatz mit Zeitlimit, danach Austausch und Verschrottung): am ehesten
    - Auswertung bisherige Standzeit bei zb
    - Zurückrechnen versagte Bauteile (Reverse Engineering)
    - Spektrum grob abschätzen (Anzahl überfahren, Fahrzeugtypen EBG / Brünig)
    - Ev. zwei Lebensdauern (geringere Lebensdauer auf EBG Ast)

## Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen

### Vibrationen und Verschleiss

- Aufgrund extremer Vibrationen ist der Schraubensicherung grösste Aufmerksamkeit zu schenken
- Stossbeanspruchungen sollten nach Möglichkeit reduziert werden
- Verschleiss wird sich nie eliminieren lassen, aber:
  - es müssen aber Verschleissgrenzen definiert werden
  - Verschleiss darf nicht zum Verlust der Strukturfestigkeit führen



## Inhaltsverzeichnis

### Überblick

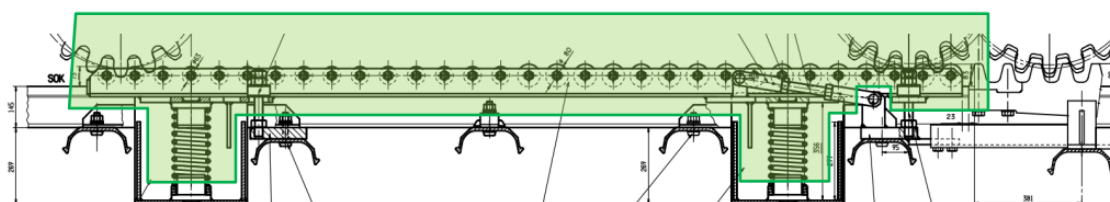
Seite

1. Einleitung
2. Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen
3. Re-Design Rollenbalken
4. Re-Design Lamelle
5. Re-Design Beschleunigungsbalken
6. Re-Design FINK / ADLER
7. Weitere Anforderungen

## Re-Design Rollenbalken


### Grundsatz

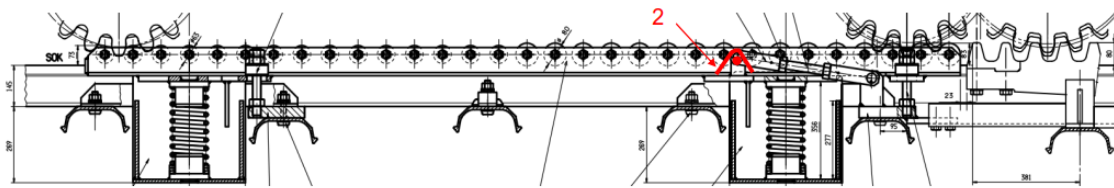
Nr.	Designänderung	Begründung	
-	Randbedingung	Änderungen sollten nur im grünen Perimeter vorgenommen werden, der Rest sollte wo möglich unverändert bleiben	



## Re-Design Rollenbalken

### Balkenstruktur

Nr.	Designänderung	Begründung	
2	Verstärktes Auge Pendelstütze	Das Auge der Pendelstütze ist unterdimensioniert und muss verstärkt werden (div. an- und abgerissene Augen bekannt, systematisches Problem). Gegenstück auf Schwelle ebenfalls zu prüfen. 	



 SBB CFF FFS

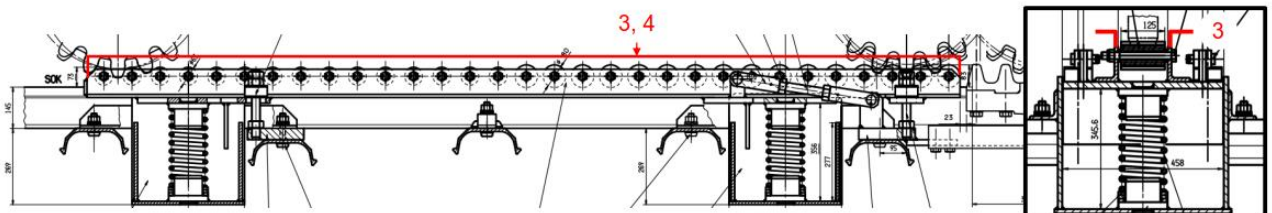
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 11

## Re-Design Rollenbalken

### Balkenstruktur

Nr.	Designänderung	Begründung	
3	Höhere Profilstärke durch Wechsel von L- auf C-Profil	Das bis dato verwendete L-Profil weist ein ungenügendes Gewicht-Flächenträgheitsmoment-Verhältnis auf (zahlreiche Ermüdungsrisse und Brüche sind bekannt). Die Festigkeit kann durch ein C-Profil massiv erhöht werden. Gleichzeitig erhöht sich dadurch der aktuell ungenügende Randabstand der Bolzen-Bohrung. Das LRP ist zu beachten und darf aufgrund der SPATZ Problematik nicht voll ausgenutzt werden (Details werden durch zb bereitgestellt) 	
4	Höhere Materialfestigkeit	Beim aktuell verwendeten Material handelt es sich um einen niedrigfesten und wenig dauerschwingfesten Baustahl (zahlreiche Ermüdungsrisse und Brüche sind bekannt). Es sollte ein gut schweisbarer Stahl mit einer höheren Streckgrenze, Bruchgrenze und Ermüdungsfestigkeit eingesetzt werden (aber keine ultrahochfesten Materialien) (Vorschlag: Hauptkomponenten Min S355J0)	



 SBB CFF FFS

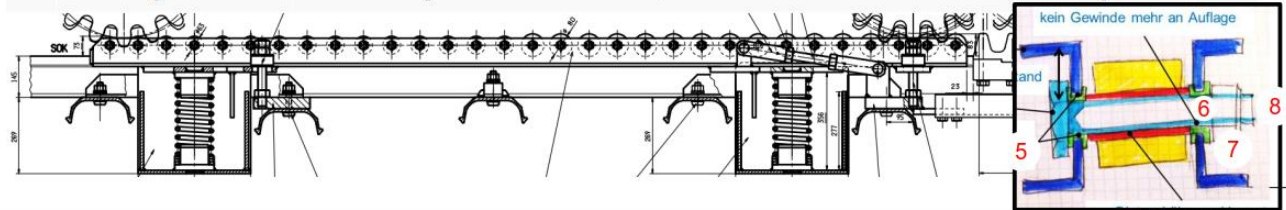
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 12

## Re-Design Rollenbalken

### Rollenlagerung

Nr.	Designänderung	Begründung	
5	Einpressen geflanschter Büchsen in Bolzenlagerung des Längsträgers	Der Längsträger ist hochgradig ermüdungsbeansprucht und erfährt eine grosse Anzahl Lastwechsel bei sehr hohen Spannungen weit oberhalb der Dauerfestigkeit. Presssitz-Büchsen verhindern, dass die Bohrungsoberfläche ausschlägt oder anderweitig beschädigt wird und führen so zu einer erheblichen Lebensdauerverlängerung (hochqualitative Bohrungsoberfläche bleibt erhalten).	
6	Bolzenauflagefläche	Das Gewinde des Bolzens liegt heute in der Bohrung und schädigt diese unnötig. Das Gewinde muss zukünftig ausserhalb der geflanschten Büchse liegen.	
7	Bolzensicherung / Rollenwechsel	Die Sicherung des Bolzens muss so erfolgen, dass er nicht verloren gehen kann, gleichzeitig aber ein einfaches Wechseln einzelner Rollen möglich ist ohne alle benachbarten Rollen lösen zu müssen. Allfälliges Spiel darf nicht zu Schäden am Rollenbalken führen.	
8	Bolzenlänge	Die Bolzenlänge muss so bemessen sein, dass keine Kollision mit der Pendelstütze mehr möglich ist	



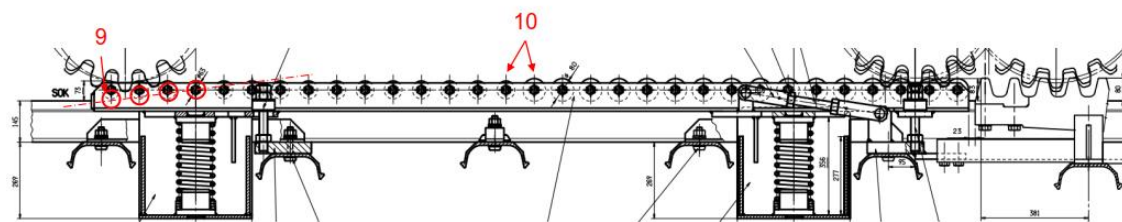
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 13

## Re-Design Rollenbalken

### Rollenlagerung

Nr.	Designänderung	Begründung	
9	Absenkung Bolzenachse erste ca 4 Bolzen	Die Achsen des ersten Bolzens sollte ca 30mm unter der Achse der restlichen Bolzen liegen, die darauffolgenden Bolzen jeweils ca 7.5mm höher. Dadurch wird der Aufprall eines nicht perfekt beschleunigten oder positionierten Zahnrad reduziert, und der Balken ist schneller wieder in der Lage Synchronisationsarbeit zu leisten. Nur auf Seite Beschleunigungsbalken, nicht Lamellenseitig!	
10	$D_{\text{Rolle}} = 63\text{mm}$	Die Rollen mit 63mm Durchmesser synchronisieren sehr gut, 80mm Rollen nicht mehr verwenden	



SBB CFF FFS

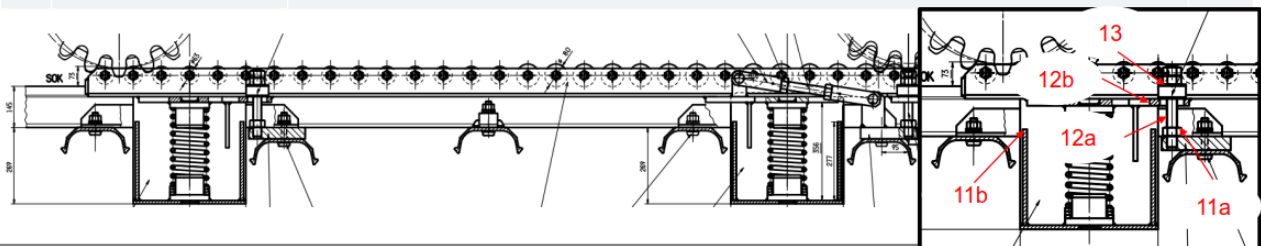
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 14

## Re-Design Rollenbalken

### Balkenlagerung

Nr.	Designänderung	Begründung
11	Klar definierter, weicher Endanschlag	Das Aufprallen des Balkens auf den Muttern des Stehbolzens (11a) sowie auf dem Federkasten (11b) verursacht sehr hohe Lastspitzen (Biegespannungen) im Längsträger. Ein klar definierter, (ev. gummigefederter) Anschlag beim Stehbolzen soll diese Belastungen reduzieren. Der freie Federweg soll unverändert bleiben. Eine Kollision mit dem Federkasten 11b soll zukünftig nicht mehr möglich sein.
12	Glatte Stehbolzen	Der Stehbolzen (12a) besteht heute aus einem Stück Gewindestange und führt zu massivem abrasivem Verschleiss an der Quertraverse (12b). Im Minimum muss der Stehbolzen neu eine glatte Oberfläche aufweisen. Es ist zu prüfen, ob eine Gleitbüchse zur Führung eingesetzt werden kann



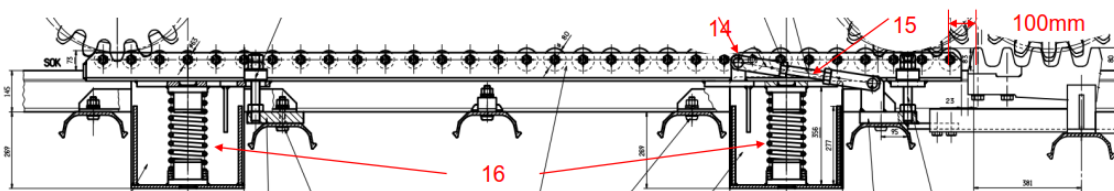
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 15

## Re-Design Rollenbalken

### Balkenlagerung

Nr.	Designänderung	Begründung
14	Lastverteilung zwischen beiden Pendelstützen	Das Tragverhalten der beiden Pendelstützen ist sehr ungleichmässig, oft trägt eine Stütze doppelt so viel Last wie die andere (z.B. Messung 4029 z01 Dez 17). Bester Lösungsansatz noch zu evaluieren (Gummibuchsen, Spielfreie Lagerung oder entsprechende Dimensionierung sodass eine Stütze die gesamte statische und Ermüdungslast übernehmen kann)
15	Verstellung Axialposition	Durch ein links-rechts-Gewinde könnte das exakte axiale Einstellen des Rollenbalkens vereinfacht werden (Option). Der Abstand zum ersten Zahn der Lamelle muss 100mm betragen und geprüft werden.
16	Federvorspannung	Mit unterschiedlich harten / vorgespannten Federn kann das Synchronisationsverhalten beeinflusst werden. Ein Einsatz anderer, tendenziell härterer Feder soll in Zukunft möglich sein (Optional)



SBB CFF FFS


Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

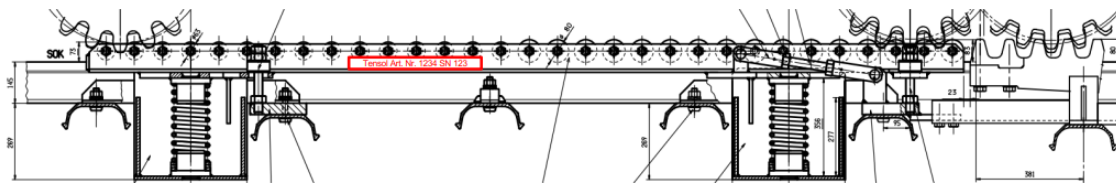
05.09.2018 | 16



## Re-Design Rollenbalken

### Balkenlagerung

Nr.	Designänderung	Begründung	
19	Bauteilkennzeichnung	Eingeprägte Artikel- und Seriennummer für Kontrolle Einsatzdauer und Dokumentation Inspektionen	
20	Masse	Die Masse des Rollenbalkens sollte nicht wesentlich erhöht werden, da sich dadurch die Trägheitskräfte, die Eigenfrequenz und das gesamte Synchronisationsverhalten ändern. Die (zu erwartende) Gewichtszunahme sollte unter ca 10% liegen.	



**SBB CFF FFS**

Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 17

## Inhaltsverzeichnis

### Überblick

Seite

1. Einleitung
2. Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen
3. Re-Design Rollenbalken
4. Re-Design Lamelle
5. Re-Design Beschleunigungsbalken
6. Re-Design FINK / ADLER
7. Weitere Anforderungen


**SBB CFF FFS**

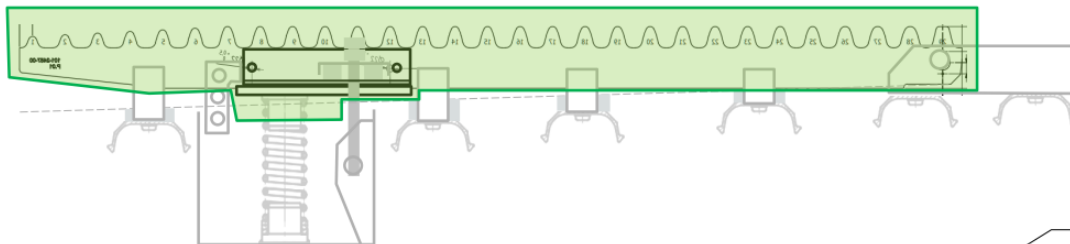
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 18

## Re-Design Lamelle

### Grundsatz

Nr.	Designänderung	Begründung	
-	Randbedingung	Änderungen sollten nur im grünen Perimeter vorgenommen werden, der Rest sollte wo möglich unverändert bleiben	


 SBB CFF FFS

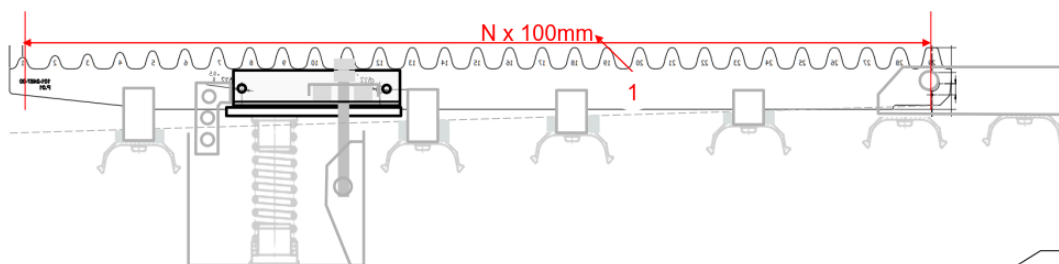
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 19

## Re-Design Lamelle

### Systemmasse

Nr.	Designänderung	Begründung	
1	Verzicht auf Teilungsfehler	Teilungsfehler (+ wie -) führen beim Ein- und Ausfahrvorgang zur De-synchronisation von korrekt synchronisierten Zahnradern und sind zu einem erheblichen Anteil verantwortlich für die Ermüdungsprobleme des Rollenbalkens (siehe Versuche 2016). Die Versuche 1 und 2 im Sept 17 haben gezeigt, dass sowohl das Ein- als auch das Ausfahrverhalten ohne Teilungsfehler massiv verbessert wird.	


 SBB CFF FFS

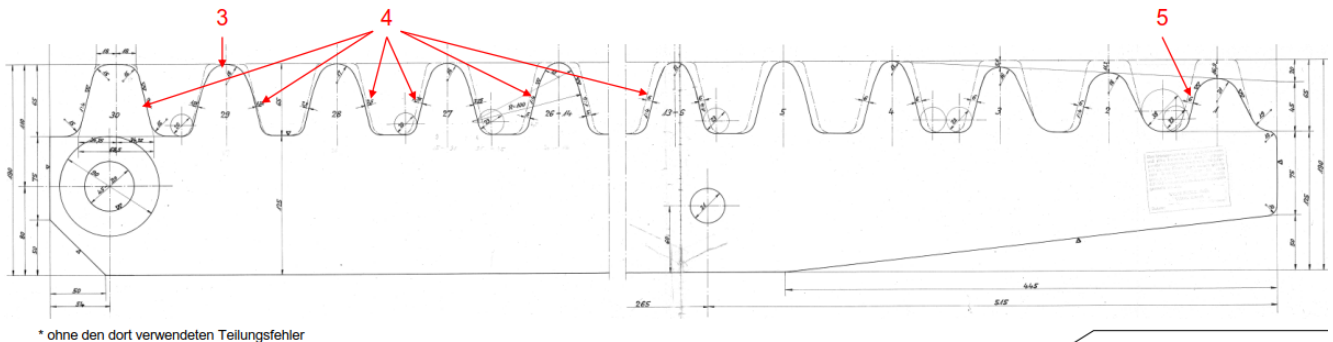
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 20

## Re-Design Lamelle

### Zahngeometrie

Nr.	Designänderung	Begründung
<p>Die Anforderungen an die Zahngeometrie in einer Lamelle unterscheiden sich fundamental von denjenigen auf der freien Strecke. Für eine Lamelle sollte keinesfalls die Zahngeometrie einer Streckenzahnstange verwendet werden, da dies zu schlechten Synchronisationseigenschaften und unnötigem Verschleiss führt (siehe Verschleissanalyse Sersa)</p> <p>Idealgeometrie: VonRoll Zchg. 214548 vom 03.08.1955 (!)*, unten abgebildet und nachfolgend in den Grundzügen beschrieben:</p>		



\* ohne den dort verwendeten Teilungsfehler


**SBB CFF FFS**


Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 21

## Re-Design Lamelle

### Zahngeometrie

Nr.	Designänderung	Begründung
3	Runde Zahnköpfe	Ein gerundeter Zahnkopf möglichst ohne horizontales Plateau erleichtert das Finden der Zahnücke und minimiert die Gefahr einer Kopf-auf-Kopf-Fahrt
4	Kontinuierlich abnehmendes Flankenspiel	Das Flankenspiel sollte von ca 6mm an der Spitze kontinuierlich bis auf 0mm am Drehpunkt abnehmen. Der hierdurch entstehende «Einfahr-Trichter» (siehe Synchronisationsdiagramm) sorgt für ein gleichmässiges Erzwingen der korrekten Zahnradposition. Es ergeben sich dadurch sehr schlanke Zähne, was aber festigkeitsmässig unkritisch ist (proven by service experience).
5	Spezielle Zahngeometrie Lamellenspitze	Eine reduzierte Kopfhöhe an der Spitze reduziert die Belastungen bei Volltreffern beim Einfahren und verhindert dass die Lamelle zu tief / lange abtaucht. Das Flankenspiel darf dabei nicht > ca 6mm werden, da das ZR eine zu grosse Rotationsfreiheit erhalten würde. Dies würde sowohl beim Ein- als auch beim Ausfahren zum De-synchronisieren des vom Rollenbalken bzw der festen Zahnstange bereits synchronisierten Zahnrads führen (siehe div. Videos). Die Zähne an der Lamellenspitze erhalten dadurch eine komplett eigenständige Geometrie, welche <i>nicht</i> einer Translation eines normalen Zahns in minus Z-Richtung entspricht. Die Geometrie des zb Prototyp P01 war diesbezüglich nicht optimal gewählt, wir gehen wieder zurück auf die Originalgeometrie von 1955, welche abgesehen von der 98mm Teilung aus heutiger Sicht optimal erscheint.


**SBB CFF FFS**

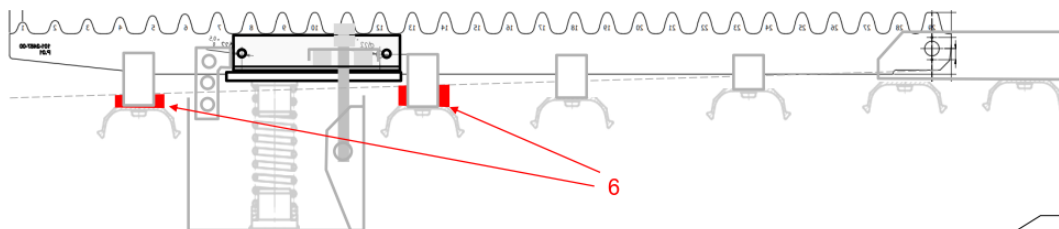
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 22

## Re-Design Lamelle

### Lagerung

Nr.	Designänderung	Begründung	
6	Kontinuierliche Bettung Lamelle	Die Lamellen auf dem gesamten zb Netz sind nach wenigen Wochen im Betrieb plastisch deformiert. Es wird vermutet dass dies durch Kopf-auf-Kopf Fahrt im Bereich von Zahn 20 verursacht wird, in Verbindung mit einer freien Spannweite von rund 2000mm. Eine Verstärkung des Lamellenquerschnitts ist nicht praktikabel oder Einsatz eines höherfesten Materials ist vermutlich nicht zielführend. Es ist zu prüfen, ob mit einfachen Mitteln die Belastung reduziert werden kann, z.B. durch Reduktion der freien Spannweite. Dies könnte zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass auf die Schwellen aufgeschweisste Anschlagpunkte das Biegemoment reduzieren. Der genaue konstruktive Weg ist durch den Hersteller zu klären.	






**SBB CFF FFS**

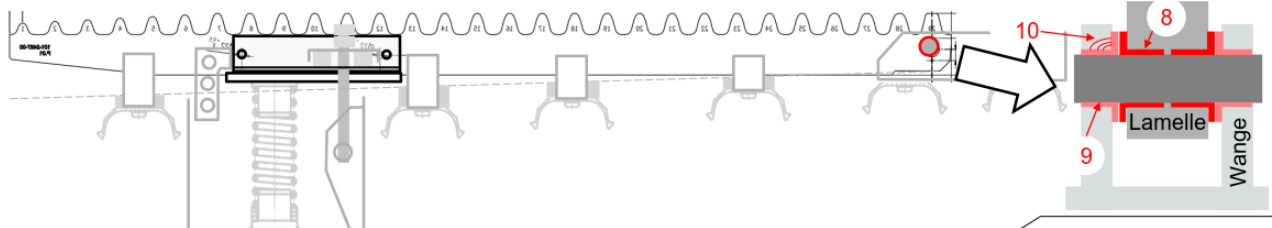
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 23

## Re-Design Lamelle

### Lagerung

Nr.	Designänderung	Begründung	
8	Büchse in Lamellenbohrung	Das Bolzenversagen bei der Lamelle Brünig vom Dez 2017 (Ermüdungsbruch) dürfte u.a. dadurch verursacht worden sein, dass die Lamelle ohne Gleitbüchse direkt auf dem ermüdungsbeanspruchten Bolzen läuft. Eine in die Lamelle eingepresste geflanschte Büchse, die weicher ist als der Bolzen, verhindert die Zerrüttung der Bolzenoberfläche und vereinfacht zudem den Bolzenausbau zu Kontroll-/ Wartungszwecken, da sich keine Brauen auf dem Bolzen mehr bilden können. Kein Schmiernippel.	
9	Büchse in Wangenbohrung	Um ein Ermüdungsversagen an der Wange gemäss obigem Schädigungsmechanismus zu verhindern, sollte auch in der Bohrung der Wange eine entsprechende geflanschte Büchse eingepresst werden.	
10	Dimensionierung Wangenbohrung	Der Randabstand der Bohrung in der Wange (Variante Riggerbach) ist sehr klein, das Auge ist möglicherweise unterdimensioniert. Entweder Ermüdungsnachweis erbringen oder Umkonstruktion.	



**SBB CFF FFS**

Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

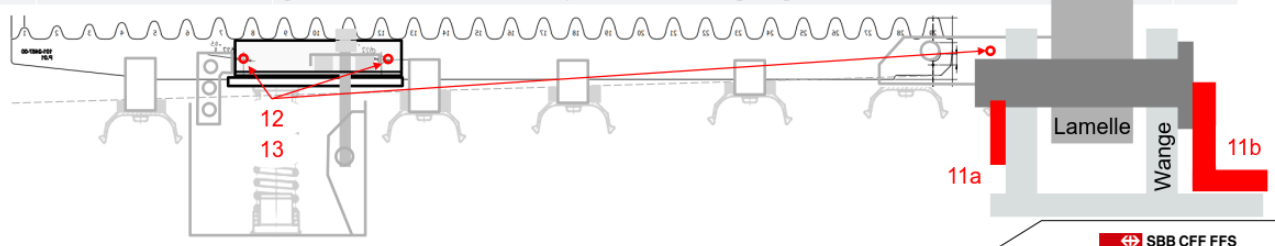
05.09.2018 | 24



## Re-Design Lamelle

### Lagerung

Nr.	Designänderung	Begründung	
11	Bolzensicherung	Die Bolzensicherung mit Flachnut und Plättchen (11a) ist unpraktisch, da der Bolzen mit Rohrzange in die richtige Winkelposition gedreht werden muss. Die Bolzensicherung mit vorgestelltem Winkel (11b) ist ebenso wenig funktionell. → Vorschlag für einfache Lösung: Plättchen 11a plus <i>umlaufende</i> Nut	
12	Verstärkte Längswinkel-Befestigung	Die Befestigungslöcher des Längswinkels schlagen aus, da Flächenpressung zu hoch (Winkel dünn) und Gewinde des Bolzens in Laibungsfläche der Bohrung. Führt dazu, dass Lamelle im ausgefederten Zustand zu hoch steht (Kontakt Fzg-Zahn / Zahngrund Lamelle. Ev. LRP Verletzung?). Genaue Lösung ist noch zu erarbeiten, z.B. Zapfen zur Aufnahme Schubkraft und Bolzen nur noch für Zugkraft.	
13	Schraubensicherung	Die Schrauben am Befestigungswinkel und auch an der festen Zahnstange lockern sich (u.a. gebrochene Nord-Lock Scheiben). Bessere Sicherung nötig.	




SBB CFF FFS

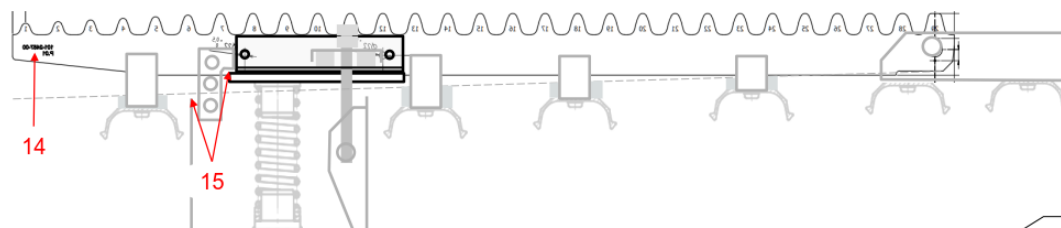
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 25

## Re-Design Lamelle

### Lagerung, Diverses

Nr.	Designänderung	Begründung	
14	Bauteilkennzeichnung	Eingeprägte Artikel- und Seriennummer für Kontrolle Einsatzdauer und Dokumentation Inspektionen	
15	Kollisionsfreiheit	Kollisionen zwischen Lamelle und Federkasten bzw. Widerhaken konstruktiv zu verhindern.	




SBB CFF FFS

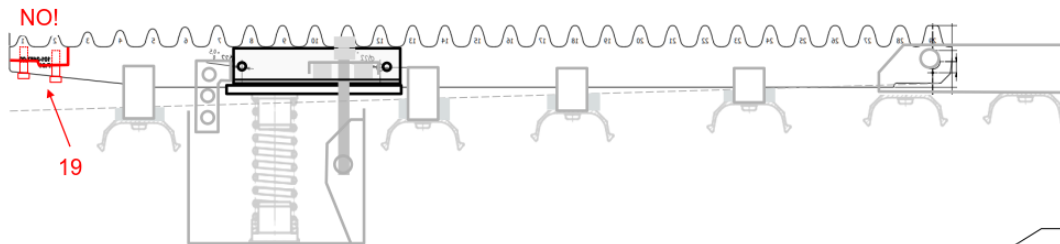
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 26

## Re-Design Lamelle

### Zahneinsatz

Nr.	Designänderung	Begründung	
19	Verzicht auf Zahneinsatz	Die Zahneinsätze stellen eine starke Schwächung der Lamelle dar (Brüche bekannt). Mit dem geplanten Verzicht auf Teilungsfehler wird der Verschleiss an den ersten Zähnen zurückgehen, ein Zahneinsatz ist daher nicht mehr nötig. Zusätzlich wird die Herstellung der Lamelle dadurch erheblich günstiger.	


 SBB CFF FFS

Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 27

## Inhaltsverzeichnis

### Überblick

Seite

1. Einleitung
2. Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen
3. Re-Design Rollenbalken
4. Re-Design Lamelle
5. Re-Design Beschleunigungsbalken
6. Re-Design FINK / ADLER
7. Weitere Anforderungen

 SBB CFF FFS

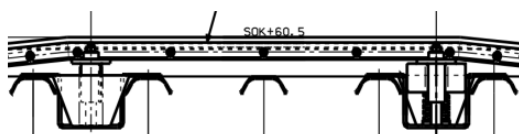
Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 28

## Re-Design Beschleunigungsbalken

### Grundsatz

Nr.	Designänderung	Begründung	
	Für die ZSE 1.1+ sind keine Anpassungen am Beschleunigungsbalken vorgesehen.		



## Inhaltsverzeichnis

### Überblick

### Seite

1. Einleitung
2. Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen
3. Re-Design Rollenbalken
4. Re-Design Lamelle
5. Re-Design Beschleunigungsbalken
6. Re-Design FINK / ADLER
7. Weitere Anforderungen

## Re-Design FINK / ADLER

### Anforderungen ans Triebfahrzeug

Nr.	Designänderung	Begründung	
	Die Überwachung der Drehzahl des Triebzahnrad wurde bereits beauftragt.		

Nachtrag zu obiger Folie 23.11.18: Die Fahrzeuge sind hierfür bereits vorbereitet und getestet. Nur Siemens müsste die Konfiguration noch anpassen um die Funktion auf dem Fahrzeug zu aktivieren (Verantwortung zb)

## Inhaltsverzeichnis

### Überblick





### Seite

1. Einleitung
2. Allgemeine Design-Empfehlungen und Anforderungen
3. Re-Design Rollenbalken
4. Re-Design Lamelle
5. Re-Design Beschleunigungsbalken
6. Re-Design FINK / ADLER
7. Weitere Anforderungen



## Weitere Anforderungen

### Konfigurationskontrolle

- Viele Elemente von Zahnstangeneinfahrten sind sicherheitsrelevant und müssen aufgrund der hohen Beanspruchung kontrolliert / rückverfolgt werden können. Eine Einteilung in Sicherheitsklassen\* sollte vorgenommen werden, um diese Kontrolle mit vertretbarem Aufwand sicherstellen zu können. 
- Um den Einsatz im Betrieb langfristig sicher gewährleisten zu können, muss ein Konfigurationsmanagement eingeführt werden: 
  - Erstellen Montagezeichnungen für I-UH mit klaren Anweisungen / Kontrollmassen
  - Einführung einer Stückliste (ev. Rüstliste)
  - Einführen einer Seriennummernpflicht für sicherheitsrelevante Bauteile
  - Physische Kennzeichnung der Bauteile mit Artikelnummer / Seriennummer
  - Definition klarer Inspektionskriterien
  - Definition eines klaren Prozesses für Designänderungen
  - Definition von klaren Prüfanforderungen (NDT) während Fertigungsprozess
- Meldepflicht einführen für Bauteilversagen (Aufgabe zb) 
- Die zb erwartet einen vollständigen, aktuellen Satz Pläne aller Einfahrten, inkl. Prüfmasse, Anzugsmomente etc. auf Deutsch 

\* Beispielsweise:

- Klasse 1: Bauteile deren Versagen zu einer Entgleisung und/oder Personenschäden führen können → Chargen- oder Seriennummernpflicht, erhöhte QS Anforderungen, gezielte Kontrollen/Prüfung
- Klasse 2: Bauteile deren Versagen zu einem erhöhten Risiko oder reduzierter Funktion führt, aber eine sichere Befahrung noch gewährleisten
- Klasse 3: Nicht Sicherheitsrelevante Bauteile → nicht rückverfolgbar, normale QS Anforderungen, globale Sichtkontrolle





 SBB CFF FFS

Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 33

## Weitere Anforderungen

### Unterhaltsprogramm

- Basierend auf den Erkenntnissen dieser Vorstudie muss ein Inspektions- und Wartungsprogramm erstellt werden 
- Das Inspektionsprogramm muss u.a. enthalten 
  - Kontrolle verschleissbeanspruchter Punkte (inkl. Angaben zu zulässigem Verschleiss)
  - Kontrolle ermüdungskritischer Punkte
  - Kontrolle funktionsrelevanter Masse
  - Allgemeine Sichtkontrolle
  - Die Intervalle sind so auszulegen, dass Toleranzüberschreitungen erkannt werden bevor sie eintreten
  - Weiteres nach Wissenstand Hersteller
- Das Wartungsprogramm muss u.a. enthalten 
  - Berichtigung nicht erfüllter Inspektionspunkte
  - Der Bolzen der Lamelle muss regelmässig demontiert, kontrolliert und gefettet werden (siehe Versagensanalyse Bolzen Brünig Dez 17).
  - Weiteres nach Wissenstand Hersteller
- Dokumentation: die durchgeführten Inspektions- und Wartungsarbeiten müssen protokolliert werden (Aufgabe zb) 

 SBB CFF FFS

Anforderungen und Empfehlungen der zb für ZSE 1.1+

05.09.2018 | 34