

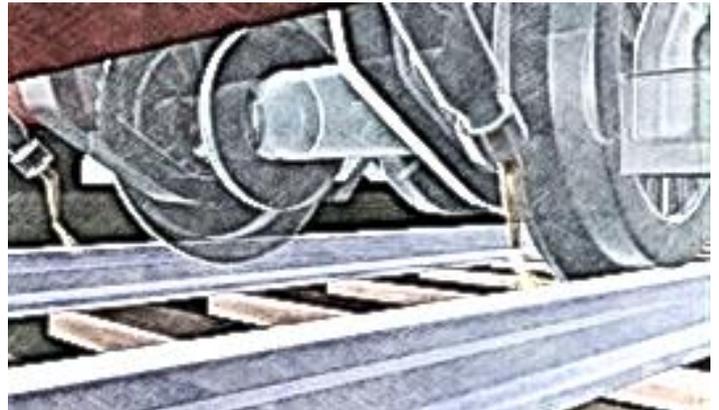
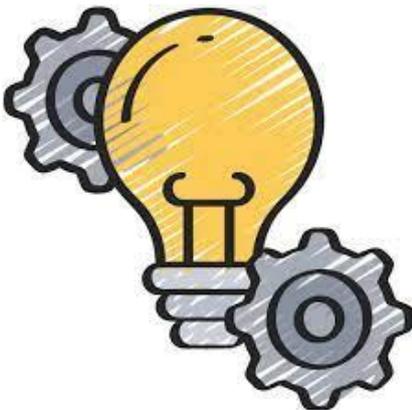
LO 8.2 Bedarfsgerechtes SKK/SKS

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur

Projekt: 2 SKS / SKK

Modul: 8 Bedarfsgerechtes Konditionieren / Schmieren

Smart SKK-SKS Versuchskonzept Betriebserprobung zb



ID:	RAILPlusSF-00045	LO in BAV Detailziel
Datum / Status:	25.11.2021 / Freigegeben	Seitenanzahl 31
Öffentlichkeitsgrad	Öffentlich	
Verfasser:	Michael Stalder / CE cideon engineering Schweiz AG	
Geprüft:	Joel Sturdy / Zentralbahn	
Freigegeben:	Nikolaus Ritter / Zentralbahn	

Zitierweise: Michael Stalder, RAILplus / CE cideon engineering AG: *Smart SKK-SKS Versuchskonzept Betriebserprobung zb* Technischer Bericht, RAILPlusSF-00045, 25.11.2024

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	01.11.2024	M. Stalder	Erster Entwurf
0.2	04.11.2024	M. Stalder	Entwurf für Review (ohne Management Summary)
0.3	06.11.2024	M. Stalder	Integration Management Summary
0.4	07.11.2024	J. Sturdy / S. Menth	1. Review inkl. Einarbeitung der Kommentare
0.5	08.11.2024	M. Stalder	Bereinigter Entwurf.
0.6	20.11.2024	N. Ritter / M. Stalder	Review PL / Bereinigter Entwurf Management Summary
0.9	25.11.2024	M. Stalder	Bericht redigiert und finalisiert.
1.0	25.11.2024	N. Ritter	Schlussbereinigung und Freigabe durch Projektleiter

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Datum	Verantwortlich
1.0	05.12.2024	Technical Board

Management Summary

Die Spurkranzschmierung (SKS) ist ein weit verbreitetes und erfolgreich eingesetztes System zur Verminderung von Spurkranz- und Schienenkopfflankenverschleiss in engen und sehr engen Bögen. Durch die Schmierung des Kontaktes wird der Reibwert vermindert, was im Bereich der Weiche zusätzlich die Entgleisungssicherheit erhöht.

Die Schienenkopfkonditionierung (SKK) ist ein neueres und weniger verbreitetes System zur Verminderung von Verschleiss und Lärm aus dem Rad-Schiene Kontakt auf der Lauffläche. Der Reibwert wird weniger stark vermindert, wodurch die Traktions- und Bremseigenschaften des Rollmaterials vertretbar reduziert und dennoch gewährleistet werden.

Beide Systeme werden heute mit einfachen Steuerungen betrieben. Die SKS wird kontinuierlich betrieben und schmiert den Spurkranz nach Weg und Zeit unabhängig davon, ob der Spurkranz an der Schienenkopfflanke anläuft oder nicht. Bei der SKK muss vorgängig bspw. durch RFID-Tags oder GPS fix definiert werden, auf welchen Abschnitten konditioniert werden soll. In beiden Fällen können die Systeme den Bedarf nicht selbst erkennen und es ist in der Regel ein Kompromiss, der eine gewisse Unter- bzw. Überschmierung beinhaltet. Es gibt nur eine Einstellung der Systeme auf den Fahrzeugen, die möglichst überall gut passt.

Eine Weiterentwicklung dieser Systeme ist nur mit zusätzlicher Sensorik zur Bedarfserkennung und einer zusätzlichen Intelligenz in Form eines Algorithmus möglich, der die Messdaten auf dem Fahrzeug selbst analysiert und entscheidet, ob eines oder beide Systeme an dieser Stelle eingesetzt werden oder nicht. Hierzu wurde bereits 2023 ein Konzept erstellt, welches die Grundlagen für eine Betriebserprobung des bedarfsgerechten Schmierens respektive Konditionierens beschreibt.

Für die Betriebserprobung wurde ein ADLER der Zentralbahn 2024 mit dem sogenannten «Smart-SKS-SKK» System ausgerüstet, getestet und ist bereit für die Betriebserprobung 2025 auf der Teststrecke zwischen Meiringen und Interlaken. Die «Smart-SKS-SKK» besteht aus Sensoren und einem Rechner auf dem Zug. Die Sensoren (Akustik, Beschleunigung), erkennen den Bedarf und leiten diesen an den Rechner weiter. Auf dem Rechner läuft ein Algorithmus, der aufgrund der Messdaten entscheidet, ob ein System SKS und/oder SKK angesteuert wird. Der Algorithmus orientiert sich dabei an Akustik- und Beschleunigungsgrenzwerten. Sobald diese überschritten werden, lösen die Systeme aus.

Die Systeme SKS und SKK selbst wurden ebenfalls optimiert. So ist es durch eine verbesserte Pumpe und zusätzlichen Ventilen möglich definierte Mengen vom SKS/SKK-Mittel zu fördern und dies Seitenselektiv. Da wo der Lärm oder der Verschleiss erzeugt wird. Dadurch werden die insgesamt ausgebrachten SKS/SKK-Mittel verringert, was zu einer geringeren Umweltbelastung und einer verbesserten Traktion führt. Die Systeme sind skalierbar und können daher auf individuelle Bedürfnisse von Strecken oder Bahnen zugeschnitten werden.

Erste Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen haben gezeigt, dass das Upgrade auf «Smart SKK-SKKS» bei entsprechenden Lärm-, Verschleiss-, Unter- und Überschmierungszuständen wirtschaftlich sein sollte. Die derzeit installierte Sensorik entspricht einem Maximum und ist noch nicht wirtschaftlich optimiert, dies erfolgt nach nachgewiesener Wirksamkeit und Funktionalität. Nebst den wirtschaftlichen Aspekten kann die Umweltbilanz durch Minderaustragung von SKS/SKK-Produkten reduziert werden. Die zusätzliche installierte Intelligenz liefert Daten, die auch anderweitig für Analysen vom Fahrbahn- und Fahrzeugzustand angezogen werden können und somit der Gesamtwirtschaftlichkeit der ganzen Bahn dienen.

Die Risikoanalyse gemäss RTE 49100 hat ergeben, dass das Upgrade auf «Smart SKK-SKS» keine wesentliche Änderung am Fahrzeug darstellt, da beide Systeme bereits eingesetzt werden und die Randbedingungen für den Einsatz festgehalten wurden.

In den nächsten Schritten werden die Messdaten analysiert und der Algorithmus trainiert. Wenn die Systeme zuverlässig und robust laufen, werden die verbauten Komponenten hinsichtlich Wirtschaftlichkeit optimiert und das für die Aufgabenerfüllung notwendige Minimum definiert. Ab dann ist ein Rollout von «Smart SKK-SKS» für interessierte Bahnen möglich.

Inhalt

1	Ausgangslage / Einleitung	6
1.1	Einleitung	6
1.2	Auszug aus bestehenden Lieferobjekten und Meilensteindokumenten:.....	6
1.3	Zusammenfassend die Vorteile des bedarfsgerechten Konditionierens / Schmierens:	9
2	Grundlegende physikalische Effekte & mögliche Gegenmassnahmen	10
2.1	Kurvenquietschen	10
2.1.1	<i>Effekt</i>	10
2.1.2	<i>Gegenmassnahmen</i>	10
2.1.3	<i>Messtechnische Erfassung des SKS-Bedarfs</i>	11
2.2	Slip-Stick-Schwingungen.....	11
2.2.1	<i>Effekt</i>	11
2.2.2	<i>Gegenmassnahmen</i>	12
2.2.3	<i>Messtechnische Erfassung des SKK-Bedarfs</i>	12
2.3	Klassifizierung von Effekten	12
3	Beschreibung Versuchsträger und Versuchstrecke	14
3.1	Übersicht Installation auf dem PoC-Fahrzeug [9]	14
3.2	Beschreibung der Teststrecke für die Betriebserprobung [10]	17
4	Ansteuerungskonzept «Smart SKK-SKS» [6]	19
4.1	Ansteuerung SKS.....	20
4.2	Ansteuerung SKK.....	23
5	Nächste Schritte – Ablauf der Betriebserprobung	24
5.1	Forschungsphase Datenakquise	24
5.2	Referenzmessungen	24
5.3	Entwicklung und Implementierung mathematisches Model.....	25
5.4	Closed-Loop Testfahrten	25
5.5	Betriebserprobung.....	25
6	Messungen / Überwachung zum Rad- / Schienenverschleiss.....	26
6.1	Messkonzept Betriebserprobung	27
7	Absicherungsdokumente / Risikobeurteilung nach RTE 49100.....	28
7.1	Sicherheitsanalyse nach D RTE 49100 [12]	29
8	Verzeichnisse	30
8.1	Referenzen	30
8.2	Abbildungen	30
8.3	Tabellen	30
9	Anhang.....	31

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung
ADLER	Alpiner d ynamischer l eichter e leganter R eisezug
AS	Aussenschiene (im Bogen)
CPU	Zentrale Verarbeitungseinheit (<i>central processing unit</i>)
FFT	fast Fourier transform
FINK	Flinke innovative N iederflur k omposition
GPS	Global positioning system
HF	Hochfrequent
IS	Innenschiene (im Bogen)
MGB	Matterhorn Gotthard Bahn
PoC	Proof of Concept
ROI	Return on Investment
SKK	Schienenkopfkonditionierung
SKS	Spurkranzschmierung
STFFT	Short-Time FFT
TF	Tieffrequent
tpf	transports publics fribourgeois
zb	Die Zentralbahn

Glossar

Wort	Beschreibung
ADLER	Der ABeh 150 ist ein Gelenktriebwagen der zb für Adhäsions- und Zahnradstrecke
FINK	Der ABeh 160 ist ein elektrischer Gelenktriebwagen der zb für ein gemischten Adhäsions- und Zahnradbetrieb.

1 Ausgangslage / Einleitung

1.1 Einleitung

Die Schienenkopfkonditionierung (SKK) sowie die Spurkranzschmierung (SKS) stellen bewährte Verfahren dar, welche den durch den Kontakt des Rades mit der Schiene erzeugten Verschleiss reduzieren und somit eine Verlängerung der Lebensdauer des Rollmaterials sowie der Infrastruktur bewirken. Des Weiteren reduzieren SKK und SKS den durch den Kontakt des Rades mit der Schiene erzeugten Lärmpegel, insbesondere in Kurven.

Die Ergebnisse der Betriebsversuche bei der MGB [1] & [2] & tpf [3] dienen als Grundlage für Ausarbeitung des Konzeptes des bedarfsgerechten Konditionieren. Die aus diesen Betriebserprobungen gewonnen Erkenntnisse zu den grundlegenden physikalischen Effekten für den Verschleiss an Rädern (Lauffläche) und Schienen (Schlupfwellenbildung) und dessen Gegenmassnahmen werden in diesem Dokument nochmals aufgearbeitet und in Bezug zum bedarfsgerechten Konditionieren und Schmieren gestellt.

Mit der Annahme des Optionsantrags «Bedarfsgerechtigkeit» durch das BAV wurde im Rahmen von RAILplus im Jahr 2023 eine Vorstudie [4] erstellt. Das Konzeptdesign umfasst die Identifizierung der wichtigsten Parameter, die Implementierung von Sensoren und des Applikationssystems sowie die Verwendung einer zentralen Steuereinheit, um dem System Intelligenz zu verleihen. Darüber hinaus wurde ein Benchmark über bestehende Lösungsansätze und Produkte durchgeführt, um diejenigen zu identifizieren, die sich für die Entwicklung einer intelligenten und kostengünstigen Lösung am besten eignen.

Eine Kernaussage dieses Dokuments ist, dass wenn man SKK und SKS auf dem gesamten Netz sicher, wirtschaftlich, umweltfreundlich und ohne Traktions- und Bremsverluste betreiben möchte, eine bedarfsgerechte SKK- und SKS-Ansteuerung erforderlich ist. Die Konditionierung des Schienenkopfes sowie die Schmierung der Spurkränze müssen zuverlässig und automatisiert erfolgen, um eine Unter- oder Überkonditionierung zu verhindern. Eine intelligente Gestaltung der SKS/SKK-Systeme sowie die Berücksichtigung einer Vielzahl von Einflussfaktoren (u. a. Rollmaterial, Trassierung, Umweltbedingungen, Lärm- bzw. Verschleisszustand) in einem Regelsystem sind unabdingbar, um die zuvor genannten Anforderungen zu erfüllen. Dies bedingt spezifische Anforderungen an die Sensorik, die Applikationssysteme, sowie die Leittechnik auf den Fahrzeugen und an den Strecken.

Eine bedarfsgerechte Konditionierung und Schmierung ist von entscheidender Bedeutung, da sie eine optimale Ausnutzung des Schmierstoffes gewährleistet und somit eine effizientere und wirtschaftlichere Lösung darstellt. Darüber hinaus trägt die Verringerung der Konditionierung dazu bei, die Sicherheit im Eisenbahnverkehr zu erhöhen, indem eine Beeinträchtigung des Traktions- und Bremsverhalten vermieden wird.

Im Folgenden (Kapitel 1.2) werden die wesentlichen Punkte und Empfehlungen für das Projekt "Smart SKK-SKS" aus den bereits erwähnten Betriebserprobungen und Designkonzepten zusammengefasst. Die bereitgestellten Informationen dienen dazu, das Verständnis für die Umsetzung des Konzepts "Bedarfsgerechtes Konditionieren und Schmieren" zu vertiefen und die zugrunde liegenden Beweggründe besser nachvollziehbar zu machen.

1.2 Auszug aus bestehenden Lieferobjekten und Meilensteindokumenten:

- Design Konzept (Meilenstein - LO 8.1: «RAILplusSF-9_Concept general Smart SKK SKS») [4]
- Betriebserprobung MGB (LO4a: «RAILplusSF-00038_Verlängerung Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch-Zermatt») [2]

Die Schienenkopfkonditionierung (SKK) sowie die Spurkranzschmierung (SKS) dienen der Minimierung des Verschleisses der Räder und Schienen sowie der Lärmreduzierung. Die Aktivierung beider Systeme erfolgt gegenwärtig mittels einer fest parametrisierten Steuerung, welche eine Berücksichtigung des tatsächlichen Bedarfs nicht gewährleistet.

Die im Rahmen der Betriebserprobungen bei der tpf und MGB durchgeführten Untersuchungen belegen, dass der Verschleiss erheblich reduziert wird. Dies führt zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des Eisenbahnsystems, da die Nutzungsdauer der Fahrzeuge und Infrastruktur verlängert wird.

Fazit und Empfehlung bezüglich Bedarfsgerechtes Konditionieren aus der Verlängerung der Betriebserprobung bei MGB:

- Aufgrund der aussergewöhnlich hohen Temperaturen während der Sommermonate des Jahres 2022 kam es zu einer raschen Bildung von Schlupfwellen, welche im Rahmen der Betriebserprobung durch Schleifen beseitigt wurden. Im Vergleich dazu sind diese im Sommer 2023 lediglich leicht angewachsen. Dies demonstriert, dass bei den Konditioniermitteln weitere Optimierungen im oberen Temperaturbereich erforderlich sind oder aber die Menge an Konditioniermittel in Abhängigkeit der Jahreszeit adaptiert werden muss. Es ist zu erwarten, dass sich derlei Anpassungen bei der Applikation im Rahmen einer bedarfsgerechten Konditionierung als nicht erforderlich erweisen.
- Die Analyse der Sprühmengen pro Pumpenhub des auf dem Fahrzeug installierten Konditioniersystems der MGB (REBS) zeigt eine signifikante Streuung. Zudem wurden Unterschiede zwischen der linken und rechten Fahrzeugseite festgestellt. In Anbetracht dessen ist eine Weiterentwicklung des Systems, insbesondere im Hinblick auf ein bedarfsgerechtes Konditionieren, erforderlich.
- Der Nachteil der kontinuierlichen Konditionierung bei jeder Zugdurchfahrt in allen dafür spezifizierten Kurven kann durch eine bedarfsgerechte Konditionierung kompensiert werden. Dazu ist es erforderlich, dass die Fahrzeuge die Notwendigkeit der Konditionierung erkennen, um das Optimum im System herauszuholen (bedarfsgerechtes Konditionieren). Dies muss insbesondere unter Berücksichtigung des temperaturabhängigen Verhaltens der Trägersubstanzen der Konditioniermittel (Viskosität) erfolgen.
- Im Rahmen der Streckenbegehungen konnte eine Tendenz zur Überschmierung an den Schienenflanken beobachtet werden, welche bereits im Vorjahr festgestellt wurde. Das Schmiermittel wird dadurch auf die Fahrflächen der bogenäusseren Schienenköpfe verdrängt, was zu einer Beeinträchtigung der Traktion führen kann. Eine bedarfsgerechte Spurkranzschmierung kann dabei Abhilfe schaffen.
- Ein intelligentes System, das die gemessenen physikalischen Daten berücksichtigt, welche die Reibung zwischen Rad und Schiene widerspiegeln, stellt den Bedarf fest und aktiviert das SKS- oder SKK-System proportional zum ermittelten Bedarf.

Im Rahmen des Projekts P2, Modul 8 "Bedarfsgerechtes Konditionieren und Schmieren", wurde ein Designkonzept [4] entwickelt, welches darauf abzielt, ein intelligentes System zu schaffen, welches gemessene physikalische Daten berücksichtigt, die für die Rad-Schiene-Reibung repräsentativ sind. Die Auswertung der Daten dient der Feststellung eines etwaigen Bedarfs, woraufhin das SKS- oder SKK-System aktiviert wird. Das Ziel dieses Dokuments besteht in der Definition der Rahmenbedingungen für das weitere Vorgehen bzw. die Betriebserprobung. Im Rahmen dessen wurden auf dem Markt bestehende Lösungsansätze zu den Themen Applikationssysteme, Sensorik und Intelligenz evaluiert.

Die durchgeführten Analysen zur Sensorik legen dar, dass die folgenden Daten für die Entwicklung eines Smart SKK/SKS von entscheidender Bedeutung sind:

- **Geschwindigkeits-/Positionssensor:** Die Kombination von Drehzahlgeber und GPS-Positionen stellt eine vielversprechende Möglichkeit dar, um verlässliche Daten bezüglich Geschwindigkeit und Position des Fahrzeugs auf der Strecke zu erlangen. In Bezug auf die Distanzgenauigkeit weist der Drehzahlgeber Schwächen auf, die durch Schlupf, Mikroschlupf und Abnutzung des Raddurchmessers bedingt sind. Durch eine Kopplung mit einem GPS könnte die Genauigkeit jedoch gewährleistet werden. Infolgedessen ermöglicht der Drehzahlgeber bei Ausfall des GPS-Signals, beispielsweise in einem Tunnel oder einer Galerie, die Berechnung der Fahrzeugposition. Die Implementierung dieser Sensoren stellt eine einfache und kostengünstige Lösung dar.
- **Verschleiss- und Lärmsensor:** Die Bewertung des Abnutzungszustandes sowie die Quantifizierung der Lärmbelastung, welche im Netz vorhanden sind, kann mittels Beschleunigungssensoren und Mikrofone erfolgen. Die Herausforderung besteht in der Verarbeitung und Analyse der von den Sensoren erzeugten grossen Datenmengen. Es existiert keine kostengünstige und gleichzeitig interessante Alternative zu den

genannten Sensoren. Des Weiteren ist eine Identifikation der Richtung der Kurven durch die Sensoren möglich, wodurch eine Definition der Position der inneren und äusseren Schiene vorgenommen werden kann.

- **Wettersensor:** Obwohl diese Daten für die Entwicklung eines Smart SKK/SKS nicht essenziell sind, lassen sie sich mit geringem Aufwand und zu geringen Kosten implementieren. Die späteren Erkenntnisse werden dazu beitragen, Verschleiss und Lärm besser zu verstehen.

Das Herzstück des Systems, die «Intelligenz», muss in der Lage sein, die wesentlichen Eingangsdaten auszuwerten, welche von verschiedenen Sensoren an Bord geliefert werden. Dazu zählen:

- Geschwindigkeit des Zuges
- Positionierung
- Luftfeuchtigkeit und Temperatur
- Vibrationen und Beschleunigungen
- Ton (vor allem aus dem Quietschen)
- Motorströme und Traktionsdaten (Schlupf)

Die Steuer- und Kontrolleinheit verarbeitet die Daten und bestimmt, wann das SKS/SKK-System aktiviert werden soll. Aus einer Vielzahl von Ausgabeparametern wird durch die Steuer- und Kontrolleinheit der optimale Wert ausgewählt, beispielsweise der Beginn der Aktivierung, die Dauer und die Anzahl der Sequenzen, die das Applikationssystem ausführen soll. Da diese Aktionen in Echtzeit erfolgen, ist eine besonders schnelle Datenverarbeitung erforderlich.

Das Sprühsystem zur Konditionierung des Schienenkopfes muss auf die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene gerichtet sein, um eine gleichmässige Verteilung über die gesamte Länge und Breite der Schiene zu gewährleisten (siehe Abbildung 1). Das Sprühsystem für die Spurkranzschmierung sollte demgegenüber auf die Innenseite des Spurkranzes des Rades gerichtet sein (siehe Abbildung 2). Dabei ist darauf zu achten, dass das Konditionierungs- bzw. Schmiermittel nicht auf andere Komponenten wie beispielsweise die Bremsen einwirkt.



Abbildung 1: Illustration SKK-System ¹



Abbildung 2: Illustration SKS-System ²

¹ Quelle: <https://www.railplus.ch/de/wissensmodule/implementierung-skk-fokus-verschleiss>

² Quelle: <https://evolution.skf.com/wheel-flange-lubrication-for-railway-systems-3/>

Auf dem Markt sind aktuell mehrere SKS/SKK-Systeme verschiedener Anbieter verfügbar. Im Rahmen des Designkonzepts erfolgt eine Vorstellung der Techniken sowie eine Beschreibung der jeweiligen Vor- und Nachteile.

Zusammengefasst lässt sich Folgendes feststellen:

- Die Präzision des Ergebnisses steht in direktem Zusammenhang mit der Länge der Sprühintervalle. Für die bedarfsgerechte Anwendung bedeutet dies, dass die Sprühzyklen so kurz wie möglich sein müssen, um eine präzise Abstimmung der Konditionierungsmittel-Menge zu ermöglichen.
- Ein wesentlicher Aspekt bei der Verwendung von Schmierstoffen mit hohem Feststoffgehalt ist das Mischen oder Rühren im Behälter. Eine Unterlassung dieser Massnahme birgt das Risiko einer Ablagerung der Feststoffpartikel am Boden des Behälters, was zu einem Ausfall der Anlage führen kann.
- Aufgrund der Geschwindigkeiten von Meterspur-Fahrzeugen werden Airless-Systeme nicht bevorzugt.
- 2-Leiter-Systeme reagieren schneller als 1-Leiter-Systeme, allerdings ist ihre Implementierung in den bestehenden Fahrzeugen seltenen umgesetzt.
- 1-Leitungssysteme sind bereits in vielen Fahrzeugen vorhanden und werden auch für die Spurkranzschmierung verwendet.
- Bei den sich in Betrieb befindlichen Fahrzeugen der RAILplus-Bahnen sind die 1-Leiter-Systeme von REBS, BEKA und Bijur Delimon am weitesten verbreitet. In der Regel sind die Fahrzeuge mindestens mit einem solchen SKS-System ausgestattet, sodass lediglich die Systeme für SKK neu implementiert werden müssen.

Das Aufbereitungssystem ist ein erprobtes und auf dem Markt befindliches System, welches mit Druckluft arbeitet. Ein Zweileitungssystem ermöglicht eine bessere Reaktionsfähigkeit, wird aber nur selten in bestehende Fahrzeuge implementiert, während ein Einleitungssystem häufig bereits in bestehende Fahrzeuge eingebaut ist, so dass nur das Steuerungssystem und die Sensoren hinzugefügt werden müssen.

1.3 Zusammenfassend die Vorteile des bedarfsgerechten Konditionierens / Schmierens:

Der tatsächliche Bedarf wird erfasst, wodurch sowohl ein Unter- wie auch ein Überkonditionieren bzw. Schmieren verhindert wird. Die optimale Nutzung der Schmierstoffe erfolgt durch die Einstellung eines gewünschten Reibungskoeffizienten. Die Installation eines RFID-Tags ist nicht erforderlich, unabhängig von Fahrzeug und Fahrweg. Des Weiteren werden Verluste, die durch das GPS-Signal bedingt sind, beispielsweise auf Bergstrecken, berücksichtigt. Darüber hinaus werden zudem die linke und rechte Schiene, der Ort, das Wetter, die Jahreszeit sowie der Traktionsverlust einbezogen. Die Wirtschaftlichkeit wird durch die Reduzierung des Schmiermittelverbrauchs verbessert, was zu einer Verringerung der Umweltbelastung durch weniger ausgebrachten Schmierstoff führt. Infolge der geringeren Schmiermittelbelastung werden die Reinigungsintervalle für Fahrzeug und Gleis verlängert. Zudem werden Traktions- und Bremsverluste reduziert und Orte, an denen keine Schmierung zulässig ist, werden berücksichtigt, wodurch die Sicherheit erhöht wird.

2 Grundlegende physikalische Effekte & mögliche Gegenmassnahmen

Als Grundlage für die Entwicklung eines Konzepts zur bedarfsgerechten Konditionierung/Schmierung müssen zunächst die für den Verschleiss an Rädern (Polygonbildung) und Schienen (Schlupfwellenbildung) verantwortlichen physikalischen Effekte verstanden werden. Mit diesen Erkenntnissen über die auftretenden verschleiss- und lärmbegünstigenden physikalischen Effekte des Rad-Schiene-Kontaktes kann anschliessend gezielte Gegenmassnahmen zur Minderung definiert werden, die im Steuerungskonzept berücksichtigt werden.

2.1 Kurvenquietschen

2.1.1 Effekt

Beim Befahren von Gleisbögen kommt es zu einer Verschiebung der Achsen im Spurkanal in Richtung der bogenäusseren Schiene. Die konischen Räder sorgen für eine Rollradiendifferenz zwischen dem bogeninneren und dem bogenäusseren Rad, wodurch die Wegdifferenz der beiden Räder ausgeglichen wird. Im Idealfall kann so das Anlaufen der Spurkränze an der Fahrkante vermieden werden. Das konkrete Verhalten eines Antriebs ist von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, insbesondere von den Eigenschaften des Fahrwerks und des Oberbaus. In engen Bögen kann das Anlaufen der Spurkränze, insbesondere an den vorderen Achsen von Drehgestellen, nicht gänzlich vermieden werden. Auch bei rollendem Rad, d. h. ohne Ausübung von Längskräften, kommt es zu einer Relativbewegung zwischen der Innenseite des Schienenkopfs im Bereich der Fahrkante und dem Spurkranz.

Diese Relativbewegungen haben folgende Auswirkungen:

- Reibung, die zu Abnutzung und Verschleiss führt
- eine breitbandige mechanische Anregung von Rad und Schienen, wodurch diese in (Resonanz-) Schwingung versetzt werden können. Dies führt oft zur Abstrahlung von Kurvenquietschen und Makroschlupfpfeifen.

2.1.2 Gegenmassnahmen

Praktisch alle Triebfahrzeuge sind mit Anlagen zur Spurkranzschmierung ausgestattet. An den vorderen Achsen wird z.B. mittels Druckluft Schmiermittel auf die Spurkränze aufgesprüht. Die entsprechenden Düsen sind so ausgerichtet, dass das Schmiermittel nur auf den Spurkranz und nicht auf die Laufflächen gelangt. Das Ziel ist, dass der Spurkranz permanent mit einem Schmiermittel-Film versehen ist. Dadurch wird beim Anlaufen des Spurkranzes am nächsten Bogen eine rein metallische Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene verhindert. Dies reduziert den Reibungskoeffizienten zwischen den Oberflächen, den Verschleiss und die Anregung von Kurvenquietschen.

2.1.3 Messtechnische Erfassung des SKS-Bedarfs

Erfasste Effekte	Zweck	Methode / Signale
Bogenfahrt Linksbogen Bogenfahrt Rechtsbogen	<ul style="list-style-type: none"> • Plausibilisierung zur Verhinderung von Fehlansprechen • Bogenselektive Aktivierung • Gezielte Erneuerung des Schmierfilms nach Bogenfahrt 	Auswertung der gemessenen Querschleunigung (IMU) und der Fahrzeuggeschwindigkeit
Kurvenquietschen	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung des unmittelbaren SKS-Bedarfs 	Frequenzanalyse des gemessenen Schalldrucks, abgestimmt auf die Resonanzfrequenzen der Räder
Anlaufen des Spurkranzes	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung des SKS-Bedarfs, Anlaufen baut den Schmierfilm am Spurkranz ab 	Frequenzanalyse der gemessenen Beschleunigungen am Achslager

Tabelle 1: Messtechnische Erfassung des SKS-Bedarfs [5]

2.2 Slip-Stick-Schwingungen

2.2.1 Effekt

In engen Gleisbögen muss das äussere Rad einen weiteren Weg zurücklegen als das innere Rad. Im Gegensatz zu Autos haben Züge kein Differentialgetriebe. Die Räder sind über die Achse starr verbunden. Bei idealen Verhältnissen passen die Roll- und Bogenradien zueinander, weil sich die Achse im Spurkanal nach aussen verschiebt. Das innere und das äussere Rad rollen mit gleicher Winkelgeschwindigkeit, aber unterschiedlichen Wegen. Dadurch gleicht sich die Wegdifferenz (innen – aussen) aus und der Radsatz passiert den Bogen ohne Probleme.

In der Praxis ist das aus verschiedenen Gründen in engen Gleisbögen nicht so. (Vereinfachend ist die Situation nur für eine einzelne Achse, die in Längsrichtung starr aufgehängt ist, beschrieben). Wenn der Spurkranz des äusseren Rades an die Schienenflanke anläuft, kann sich die Achse nicht mehr frei in Querrichtung verschieben. Dadurch wird der Radsatz formschlüssig geführt und die Wegdifferenzen können nicht mehr ausgeglichen werden. Läuft der äussere Spurkranz dauerhaft an, ist der äussere Rollradius mehr oder weniger konstant. Der Rollradius des inneren Rades hängt davon ab, wo es gerade Kontakt mit der Schiene hat. Ist die Spur eng, dann ist der Rollradius gross. Ist die Spur hingegen weit, ist der Rollradius klein. Auch die Schienenneigung, der Schienenkopf und die Radprofile spielen eine Rolle. Ist der Rollradius des inneren Rades grösser als der ideale Wert, vollführt der Radsatz eine Wendebewegung nach aussen an. Der gleiche Effekt entsteht bei nicht radial eingestelltem Radsatz an den vorlaufenden Achsen in Drehgestellen, durch Querschlepp. Beides führt zu dauerhaftem Anlaufen des Spurkranzes an der bogenäusseren Schiene, verbunden mit Kurvenquietschen und Verschleiss.

Zusätzlich entstehen sogenannte "Slip-Stick-Schwingungen".

Bei ungünstiger Rollradiendifferenz im Gleisbogen drehen die Räder einer Achse selbst in rollendem Zustand (d.h. ohne Ausübung von Zug- oder Bremskraft) mit unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten. In der Radsatzwelle baut sich eine Torsion auf, die zu ansteigenden tangentialen Kräften in den Kontaktflächen zwischen Rad und Schiene führen. Überschreitet die Reibungskraft an einem Rad das Kraftschlussmaximum, rutscht das entsprechende Rad kurz durch («Slip»), und die Torsionsspannung in der Achswelle baut sich ab. Anschliessend haften beide Räder wieder («Stick»), drehen sich aber nach wie vor mit unterschiedlichen Winkelgeschwindigkeiten, was zu einem erneuten Anstieg der Torsion in der Achswelle und einem weiteren Slip-Vorgang führt. Dieser Zyklus wiederholt sich, bis die ungünstige Rollradiendifferenz verschwunden ist, d.h. in der Regel gegen Ende des engen Gleisbogens. Die Slip-Stick-Schwingungen im Bogen führen zu Verschleiss an den Schienen und den Radlaufflächen. Prinzipiell ähnlich verhält es sich mit anderen Schwingungsformen des Radsatzes, z.B. bei Beugeschwingungen der Radsatzwelle, welche durch Querkräfte im Radaufstandspunkt

angeregt werden und ebenfalls zu zyklischem Abbau der Kräfte führen, mit entsprechenden Slip- und Stick-Zuständen.

2.2.2 Gegenmassnahmen

Durch SKK werden Slip-Stick-Schwingungen stark reduziert oder komplett eliminiert. Durch das Besprühen des Schienenkopfs mit einer speziellen Konditionierungslösung wird der Reibungskoeffizient reduziert. Dadurch entsteht eine mehr oder weniger horizontale Kraftschlusskennlinie ohne "Spitze". Die Nichtlinearität verschwindet und der Grenzyklus zwischen "Slip" und "Stick" kann nicht mehr auftreten. Das Gleiche passiert auch bei nassen Schienen. Bei Regen ist der SKK-Bedarf deshalb massiv geringer.

2.2.3 Messtechnische Erfassung des SKK-Bedarfs

Erfasster Effekt	Zweck	Methode / Signale
Bogenfahrt Linksbogen Bogenfahrt Rechtsbogen	Plausibilisierung zur Verhinderung von Fehllansprechen Bogenselektive Aktivierung	Auswertung der gemessenen Querbesehleunigung (IMU) und der Fahrzeuggeschwindigkeit
Makroschlupfpeifen	Ermittlung SKK-Bedarf	Frequenzanalyse des gemessenen Schalldrucks.
Slip-Stick- Vorgänge Torsion	Ermittlung SKK-Bedarf	Auswertung der Drehzahlsignale oder Beschleunigung an den Achslagern
Slip-Stick-Vorgänge Lateral	Ermittlung SKK-Bedarf	Auswertung der Drehzahlsignale oder Beschleunigung an den Achslagern

Tabelle 2: Messtechnische Erfassung des SKK-Bedarfs [5]

2.3 Klassifizierung von Effekten

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die physikalischen Effekte im Rad-Schiene-Kontakt. Die Tabelle bildet die Grundlage für die Entwicklung der Algorithmen zur bedarfsgesteuerten Aktivierung von SKS und SKK. Alle Effekte treten ausschliesslich in Gleisbogen auf. Eine Ausnahme stellt das Makroschlupfpeifen dar, welches durch die Ausübung von Rad-Schiene-Schlupf bei aktiver Traktionsregelung entsteht. Dieses kann sowohl in der Geraden als auch in Bogen auftreten.

Abkürzungen:

AS: Aussenschiene (im Bogen)

IS: Innenschiene (im Bogen)

TF Tieffrequent, hier < 400 Hz

HF Hochfrequent, hier > 2 kHz

Effekt	Ursache/Entstehungsmechanismus	Detektion	Massnahme
Flangeing (zip-zip-zip)	<ul style="list-style-type: none"> Anlaufen des Spurkranzes an der AS mit trockenen oder feuchten Kontaktflächen Periodisches vertikales Aufklettern und Abrutschen des Spurkranzes → intermittierendes Geräusch meistens am 1. Radsatz 	<ul style="list-style-type: none"> F-Band Schall 8 kHz 	<ul style="list-style-type: none"> Schmierung der Kontaktflächen Intervention SKS an der AS
Squeallig (tonales Kurvenkreischen)	<ul style="list-style-type: none"> Slip-Stick- / Reib-Schwingungen auf der IS 	<ul style="list-style-type: none"> F-Band Schall 2 - 5 kHz 	<ul style="list-style-type: none"> Intervention SKK an der IS
Verschleiss von Spurkranz und Schienenflanke	<ul style="list-style-type: none"> Reibarbeit / Scherung in der Kontaktfläche Rad-Schiene 	<ul style="list-style-type: none"> F-Band Achslager-Beschleunigung? 	<ul style="list-style-type: none"> Schmierung der Kontaktflächen Intervention SKS an der AS
Bildung von Schlupfwellen auf IS	<ul style="list-style-type: none"> Reibschwingungen, verursacht durch Biegung / Torsion der Triebachse. 	<ul style="list-style-type: none"> TF Anteile Beschleunigung / Radsatz-Drehzahl 50 – 200 Hz (?) 	<ul style="list-style-type: none"> Konditionierung der Kontaktflächen Intervention SKK an der IS

Tabelle 3: Klassifizierung von Effekten und Massnahmen [6]

Die Übersicht zeigt, dass die Anwendung der SKS nur an der Aussenschiene einen unmittelbaren Effekt hat, an der Innenschiene jedoch nicht, da dort keine Berührung Spurkranz-Schiene stattfindet.

SKK zeigt an der Innenschiene bei Squealing (Frequenzbereich Grössenordnung 5 kHz) und (tieffrequenten, mit Torsion/Biegung der Radsatzwelle verbundenen) Slip-Stick-Schwingungen Wirkung. SKK an der Aussenschiene kann unter Umständen ebenfalls Flangeing/trockenes Anlaufen des Spurkranzes mindern. Dies muss jedoch noch in Versuchen validiert werden.

3 Beschreibung Versuchsträger und Versuchstrecke

Zur Reduzierung des Verschleißes zwischen Rad und Schiene wird eine seitenselektive Schienenkopfkonditionierungsanlage (SKK) der Firma REBS an einen ADLER der Zentralbahn nachgerüstet. Des Weiteren wird das bestehende Spurkranzschmiersystem (SKS) so umgerüstet, dass eine ebenfalls seitenselektive Steuerung möglich ist.

Die Umsetzung einer bedarfsgerechten Konditionierung bzw. Schmierung erfolgt unter Zuhilfenahme eines bereits im Adler integrierten Rechners. Im Rahmen des zb-Projekts "Ferndiagnose" können Synergien genutzt werden. Im nächsten Schritt wird die Verbindung des Rechners mit dem Diagnosenetzwerk hergestellt, über welches der Austausch der gesammelten Sensordaten erfolgt. Die genannten Informationen werden in Echtzeit verarbeitet und parallel zur Ferndiagnose an einen Server übermittelt. Die gesammelten Sensordaten, welche Informationen zu Akustik, Beschleunigung sowie Fahrzeugdaten umfassen, dienen als Grundlage für die Entwicklung eines Algorithmus, welcher die Bedarfe von SKK und SKS ansteuert. In der nachfolgenden Abbildung 3 wird der systemische Aufbau des Vorhabens dargestellt.

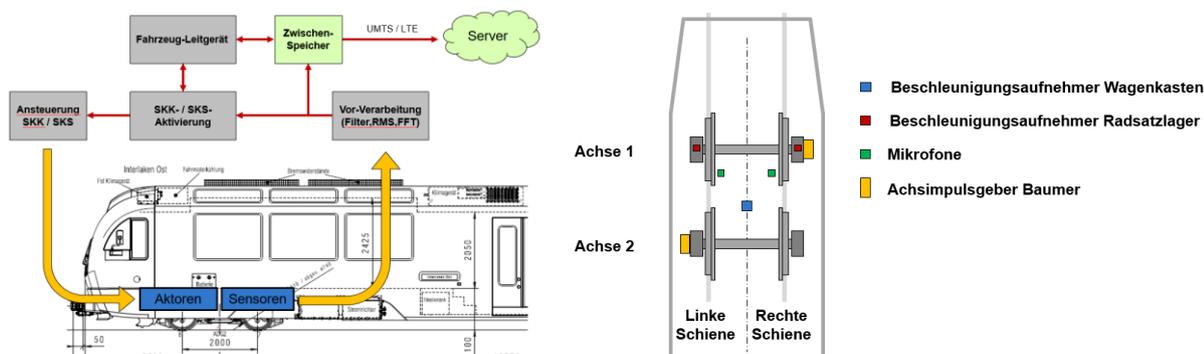


Abbildung 3: Systematische Darstellung PoC «Smart SKK-SKS»

3.1 Übersicht Installation auf dem PoC-Fahrzeug [9]

Das Versuchsfahrzeug ABeh 150 ist ein Gelenktriebwagen der Zentralbahn, der für Adhäsions- und Zahnradstrecken konzipiert wurde. Der ADLER (Alpiner dynamischer leichter eleganter Reisezug) wurde von der Firma Stadler Rail entwickelt und gebaut.

Die Abbildung 4 zeigt die Anordnung sowie die Platzierung des "Smart SKK-SKS Systems" bzw. der Applikationssysteme am Halbzug. Die Ausrüstung erfolgt an den ersten und letzten Adhäsionsdrehgestellen des Halbzuges. Die Anordnung der SKK-Sprühdüsen erfolgt in Laufrichtung vor dem vorderen Drehgestell des Halbzuges. Die SKS-Sprühdüsen sind in Laufrichtung an dem vorderen Drehgestell, hinter dem ersten Radsatz positioniert.

Dadurch ist es möglich, in Fahrtrichtung Meiringen vor dem ersten Radsatz zu konditionieren und an den ersten Radsatz zu schmieren. Sofern erforderlich (in Abhängigkeit vom Ansteuerungskonzept) besteht zudem die Möglichkeit, hinter dem achten Radsatz zu konditionieren und an den achten Radsatz zu schmieren.

Da lediglich ein Halbzug ausgerüstet wird, erfolgt in Fahrtrichtung Interlaken eine Konditionierung vor dem dreizehnten Radsatz sowie zusätzlich eine Konditionierung hinter dem zwanzigsten Radsatz.

In Fahrtrichtung Interlaken ist zu berücksichtigen, dass das hinterste SKK-Applikationssystem keinen direkten Einfluss auf den eigenen Zug ausübt. Die Sprühdüse ist folglich lediglich in dieser Fahrtrichtung hinter allen Radsätzen montiert und sprüht (in Abhängigkeit des Ansteuerungskonzepts) ohne Überrollung der eigenen Radsätze auf die Schiene. Diese Konstellation wird im Rahmen des Ansteuerungskonzepts berücksichtigt.

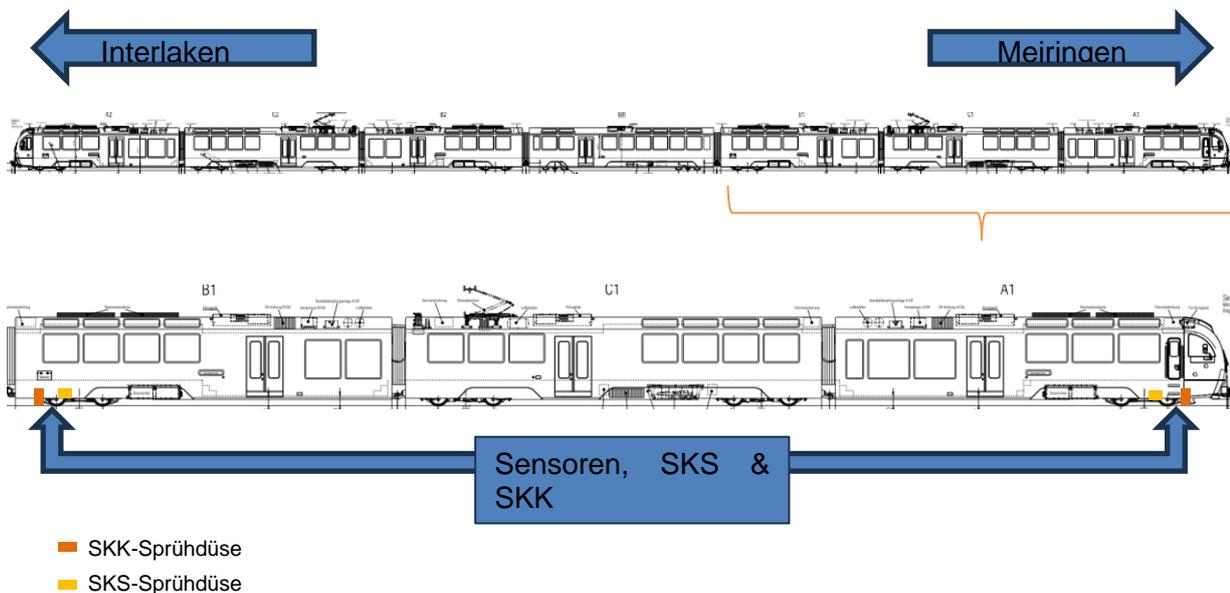


Abbildung 4: ADLER zwischen Meiringen und Interlaken sowie Anordnung der "Smart SKK-SKS" Systeme

Die Abbildung 5 veranschaulicht die Architektur der integrierten Steuerung/Regelungs-Komponenten des ADLER-Systems, welches als "Intelligenz" bezeichnet werden kann.

Die Anlage besteht aus folgenden Komponenten:

- Hauptrechner Ferndiagnose: Im Rahmen des Projekts "Ferndiagnose", welches bei der ZB parallel vorangetrieben wird, erfolgt der Einbau eines Syslogic-Rechners im Schaltschrank PS1 des C-Wagens. Der Rechner ist für die Durchführung von Ferndiagnosen vorgesehen. Die Funktion des Rechners besteht in der Sammlung von Diagnosedaten des Fahrzeugs, welche anschliessend an eine Landschaftsstelle übermittelt werden.

Im Rahmen der Betriebserprobung kann diese Synergie nutzbar gemacht werden. Dadurch ist es möglich, die Intelligenz für das bedarfsgerechte Konditionieren und Schmieren auf dem Rechner zu integrieren sowie Fahrzeuginformationen (GPS-Position, Traktionsdaten, Streckendaten etc.) durch das Parallelprojekt bereitzustellen. Die Übertragung sämtlicher Sensorinformationen, die für die Analyse und Verifikation des Bedarfs erforderlich sind, kann mittels der bereits vorhandenen Luftschnittstelle an einen Server erfolgen.

- «Smart SKK-SKS» Hauptschaltschrank: Die Installation eines "Smart SKK-SKS"-Hauptschaltschranks erfolgt unterhalb des Wagenkastens des ersten und letzten Drehgestells des Halbzugs. Die nachfolgend beschriebenen eingebauten Komponenten dienen der Aufnahme der Sensorsignale, gegebenenfalls deren Vorverarbeitung und der Weiterleitung an den Hauptrechner. Des Weiteren erfolgt die Ansteuerung der Applikationssysteme über Digitale IO.
 - o Ethernet Switch Selectron: Der Ethernet Switch übernimmt die Funktion eines zentralen Kommunikationsknotens, über den alle intelligenten Systeme miteinander vernetzt werden.
 - o Mess- und Kommunikationsknoten Syslogic: Im Rahmen der Implementierung erfolgt eine Sammlung sämtlicher am Fahrwerk verbauter Sensordaten in einem zusätzlich verbauten Rechner, eine etwaige Vorverarbeitung der Daten sowie eine Weiterleitung an den Hauptrechner
 - o Digitale I/O-Module Selectron: Die Selectron-CPU dient der Auslesung der Drehzahldaten der bestehenden Drehgeber. Die zeitnahe Verfügbarkeit der Informationen ermöglicht die Erkennung von Slip-Stick-Vorgängen. Zudem erfolgt die Ansteuerung der Magnetventile für die Applikationssysteme SKK und SKS über die digitalen Outputs.

- Wireless-Gateway Broadsens: Das Wireless-Gateway Broadsens erfüllt die Funktion, die von den Vibrationssensoren gesendeten Signale zu sammeln und an den Hauptrechner zu übergeben.
- Vibrationssensoren Broadsens: Die bei den Drehgestellen installierten Vibrationssensoren liefern verlässliche Daten bezüglich der Beschleunigung an den Achslagern. Die gewonnenen Informationen erlauben die Detektion von Slip-Stick-Vorgängen sowie von Anlaufprozessen des Spurkranzes.
- Mikrofone: Die an den Drehgestellen installierten Mikrofone dienen der Messung des Schalldrucks an den Rädern. Auf diese Weise lassen sich potenzielle Ursachen für Geräuschentwicklung, wie etwa Kurvenquietschen und Makroschlupfpeifen, identifizieren.

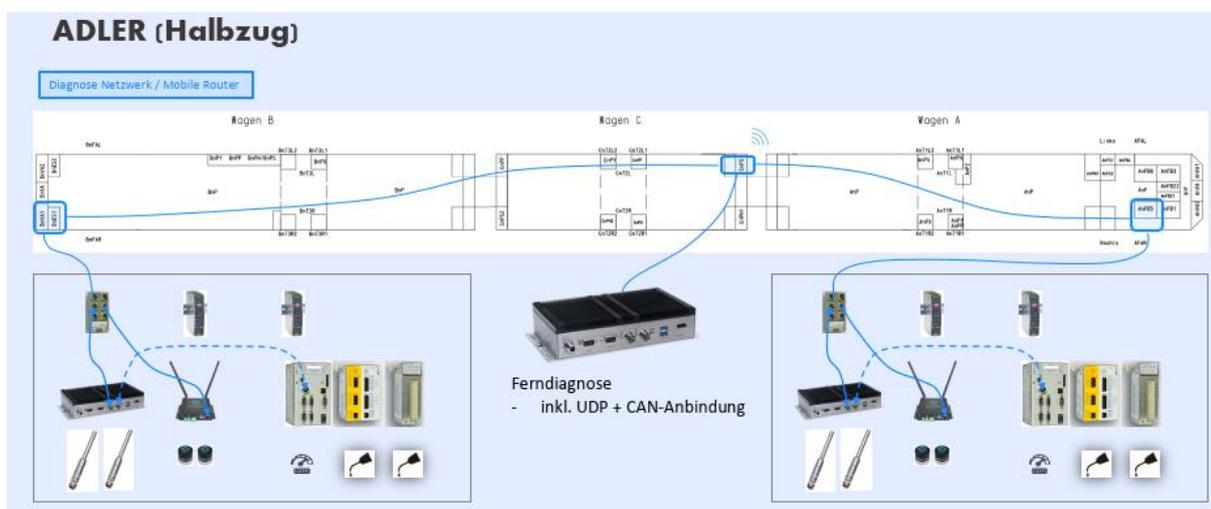


Abbildung 5: Architektur «Smart SKK-SKS»

Im Kapitel 4 erfolgt eine detaillierte Darstellung des Zusammenwirkens von Intelligenz und Ansteuerung der Applikationssysteme.

3.2 Beschreibung der Teststrecke für die Betriebserprobung [10]

Das Streckennetz der Zentralbahn umfasst die Strecken Luzern – Engelberg, Luzern – Interlaken Ost und Meiringen – Innertkirchen.

Die Strecke nach Innertkirchen ist aufgrund der Oberleitungsspannung und Rollmaterial nicht interessant als Teststrecke.

Eine Einteilung des restlichen Streckennetzes ist anhand der möglichen Fahrzeugflotte für den Testbetrieb in zwei Bereiche möglich:

1. Auf dem Abschnitt Luzern – Engelberg verkehren hauptsächlich die HGe-Pendel bis nach Engelberg und im S-Bahn Bereich von Luzern bis Wolfenschiessen die Triebzüge SPATZ und FINK. Im S-Bahn Bereich ist die Fahrzeugflotte sehr inhomogen und kein Fahrzeug fährt verlässlich über ein Jahr regelmässig auf der identischen Strecke. Die Umsetzung an einem HGe-Pendel mit den einzelnen Wagen ist aufgrund der Kommunikation über die Fahrzeuge technisch zu aufwendig. Daher ist die Strecke nach Engelberg nicht für die Betriebserprobung geeignet.
2. Der Abschnitt Luzern – Meiringen kann in drei Bereiche unterteilt werden. Über den Brünig-Pass von Giswil bis Meiringen verkehren nur die Express-Züge. Zwischen Luzern und Giswil gibt es zusätzlich S-Bahn Betrieb mit bis zu acht Zugfahrten pro Stunde. Von Meiringen bis Interlaken Ost verkehrt ebenfalls eine S-Bahn.

Die ADLER Triebzüge sind die einzigen Züge die über ein ganzes Jahr gesehen regelmässig auf der gleichen Strecke verkehren. Diese werden ausschliesslich als Expresszüge über den Brünig eingesetzt. Somit sind nur diese Züge geeignet für eine Betriebserprobung. Die Strecke über den Brünig mit den steilen Zahnradabschnitten wird ausgeschlossen. Als Teststrecke wird somit Meiringen – Interlaken Ost definiert, da ein umgebauter Zug einen höheren Impact auf dieser Strecke hat als in Richtung Luzern, wo massiv mehr Züge verkehren. Die Strecke bietet hauptsächlich sehr kurvenreiche Abschnitte (Brienz – Interlaken) aber auch gerade Abschnitte (Meiringen – Brienz) und deckt somit viele Faktoren ab.

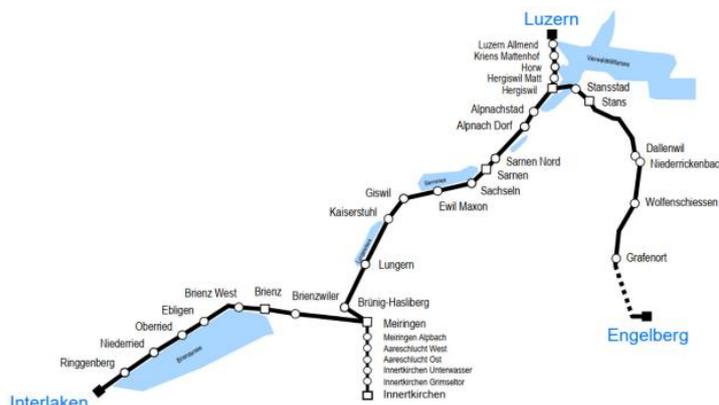


Abbildung 6: Streckennetz der zb

Aktuell wird in fünf Kurven auf dem Streckennetz der Zentralbahn der Schienenkopf konditioniert, nur eine davon befindet sich auf der für uns relevanten Teststrecke (149-m-Bogen in Brienz). Die Auslösung erfolgt derzeit mittels RFID-Tags im Gleis (nur auf FINK-Zügen). Das bedarfsgerechte SKK-System kann in allen anderen Kurven verifiziert werden.

Die Spurkranzschmierung ist auf allen Zügen immer in Betrieb. Wie viel Schmierstoff aufgetragen wird, hängt davon ab, wie viele Züge auf einer Strecke fahren. Auf dem S-Bahn-Netz fahren die meisten Züge, deshalb wird hier am meisten Schmierstoff aufgetragen. Das macht es schwer, den Einfluss eines einzelnen mit «Smart SKK-SKS» ausgerüsteten Zuges auf das System zu überprüfen.

Am besten kann das "Smart SKK-SKS" auf den kurvenreichen Strecken am Brienzersee überprüft werden.

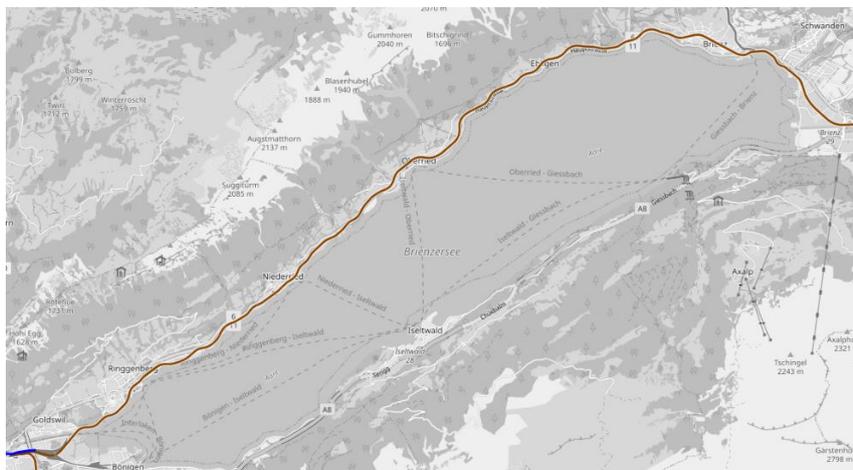


Abbildung 7: Smart SKK-SKS Teststrecke am Brienzsee

In Abbildung 7 ist ein Teil der Teststrecke der Betriebserprobung für das Smart SKK-SKS dargestellt. Das Smart SKK-SKS-System ist lediglich in dem definierten Geofencing-Bereich (Meiringen – Interlaken Ost) aktiv. Das bedeutet, dass das SKK- und SKS-System während der Betriebserprobung bedarfsgerecht angesteuert wird. Eine bedarfsgerechte Konditionierung und Schmierung erfolgt ausschliesslich innerhalb der definierten Teststrecke. Auf dem restlichen Streckenabschnitt erfolgt keine Schienenkopfkonditionierung. Das Spurkranzschmiersystem wird gemäss der Weg-Zeit-Funktion angesteuert. Das erforderliche Signal zur Auslösung wird von der Leittechnik übermittelt, sodass gewährleistet ist, dass der Zug auf der gesamten Strecke (ausserhalb der Teststrecke) wie bisher funktioniert.

Auf die einzelnen Besonderheiten der Teststrecke, den Trassierungselementen und die Bedingungen zur Ansteuerung von SKK und SKS wird im Dokument «Anlage 02_Teststrecke der Smart SKK-SKS» [10] eingegangen.

4 Ansteuerungskonzept «Smart SKK-SKS» [6]

Die Effektivität und der Erfolg der bedarfsgesteuerten Konditionierung/Schmierung hängen massgeblich davon ab, ob die physikalischen Effekte und die implementierten Massnahmen korrelieren. (siehe Kapitel 2.3)

Die bedarfsgesteuerte SKK/SKS zielt darauf ab, die Konditionierung bzw. Schmierung an kritischen Stellen und unter kritischen Bedingungen zu optimieren. Dies umfasst die Bereiche Flangeing, Squealing und Reibschwingungen. Somit erübrigt sich eine "feste Programmierung" der Kritikalität der Streckenabschnitte bei einer einwandfrei funktionierenden bedarfsgesteuerten Konditionierung/Schmierung. Die Ausrichtung am Bedarf resultiert in einer selektiven Aktivierung der Applikationssysteme auf unkritischen Streckenabschnitten, welche nicht oder nur selten erfolgt, sowie auf kritischen Abschnitten, welche häufiger und gezielt an kritischen Stellen, insbesondere engen Bogen, aktiviert wird.

Unter der Voraussetzung einer zuverlässigen Funktionalität erfolgt bei jedem Durchfahren der entsprechenden Stelle, d. h. bei Bedarf SKK oder SKS, die Aktivierung des erforderlichen Applikationssystems am korrekten Ort (linke Schiene, rechte Schiene oder beidseitig).

Als Resultat wird an der Schiene ein Schmier- bzw. Konditionierfilm aufgebaut. Der Aufbau erfolgt folglich bis zum Erreichen einer ausreichenden Stärke des Schmier-/Konditionierfilms, sodass die physikalischen Effekte nicht mehr auftreten. In der Folge wird das erforderliche Applikationssystem nicht mehr aktiviert, der Schmier-/Konditionierfilm baut sich wieder ab, bis der physikalische Effekt von neuem detektiert und wiederum geschmiert bzw. konditioniert wird.

In der Theorie sollte sich ein stabiler Zyklus ergeben, bei dem sich das Schmier-/Konditionierniveau einstellt, bei dem sich das Ausmass des physikalischen Effektes gerade an der Ansprechschwelle des erforderlichen Applikationssystems bewegt.

Allgemeines Prinzip:

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden Algorithmen beschrieben, die in Echtzeit arbeiten müssen. Dies bedingt, dass sie nach einem bestimmten Prinzip funktionieren müssen. Dies wird im Folgenden anhand eines Beispiels dargestellt:

- Detektieren → Bestimmung Amplituden der charakteristischen Frequenzbänder
- Plausibilisieren → mit Bogenradius, um Fehlansprechen in Geraden oder weiten Bogen zu vermeiden
- Applizieren → Selektiv an der Innen- oder Aussenschiene. Die Eingriffsschwellen werden dynamisch kalibriert an den in den Geraden auftretenden Pegeln.
- Kontrollieren → Wirkung beurteilen durch Loggen der Schmierintervalle und der Amplituden.

In Hinblick auf die Funktionalität der bedarfsgerechten SKS ist festzuhalten, dass deren Aktivierung ausschliesslich am in Fahrrichtung vorlaufenden Drehgestell erfolgt. Dies ist dadurch begründet, dass an den betreffenden Drehgestellen lediglich eine Achse mit SKS-Düsen ausgerüstet ist. Da nur die Achse, welche sich in Fahrrichtung vorne befindet, an der Aussenschiene anläuft, ist es auch nur dort sinnvoll, am bogenäusseren Rad zu schmieren.

Die Aktivierung der SKK erfolgt ebenfalls nur am vorlaufenden Drehgestell. Sie erfolgt bedarfsgesteuert bei Detektion von Squealing oder Reibschwingungen an der Innenschiene. Infolge der unvermeidlichen Verzögerung zwischen dem Auftreten, der Detektion und dem Bekämpfen von Squealing/Reibschwingungen entsteht ein kurzer Gleisabschnitt, in dem diese Effekte auftreten, jedoch die SKK noch nicht konditioniert. Die fehlende Konditionierung des vorlaufenden Drehgestells kann durch eine weggesteuerte Aktivierung der SKK am nachlaufenden SKK/SKS-Drehgestell nachgeholt werden, sodass eine durchgehende Konditionierung für die nachfolgenden Fahrzeuge gewährleistet ist.

4.1 Ansteuerung SKS

Das nachfolgende Blockdiagramm (Abbildung 8) veranschaulicht das Prinzip der potenziellen Lösung, nach welcher die Spurkranzschmierung SKS aktiviert wird.

In Bezug auf die Eigenschaften der Strecke kann ein präventiver Eingriff (grün) vorgenommen werden. Aufgrund der bekannten Position des Fahrzeugs sowie der verfügbaren Streckendaten ist eine vorausschauende Aktivierung der SKS möglich. Die Häufigkeit der Aktivierung ist dabei von der Anzahl und dem Abstand enger Bögen abhängig.

Die Funktionalität des Systems ist jedoch nicht auf den präventiven Eingriff angewiesen. Das System arbeitet primär über den zweiten Pfad des akuten Eingriffs ("interventioneller" Eingriff (rot)). Sobald eine Kurvenquietschen oder ein trockenes Anlaufen der Spurkränze festgestellt wird, erfolgt eine sofortige Aktivierung der SKS. Um ein Fehlansprechen zu verhindern, besteht die Möglichkeit, dieses Kriterium mit dem aktuellen Bogenradius zu verknüpfen. Dadurch kann die Eingriffsschwelle sensibler eingestellt werden, ohne dass ein häufiges Fehlansprechen riskiert wird.

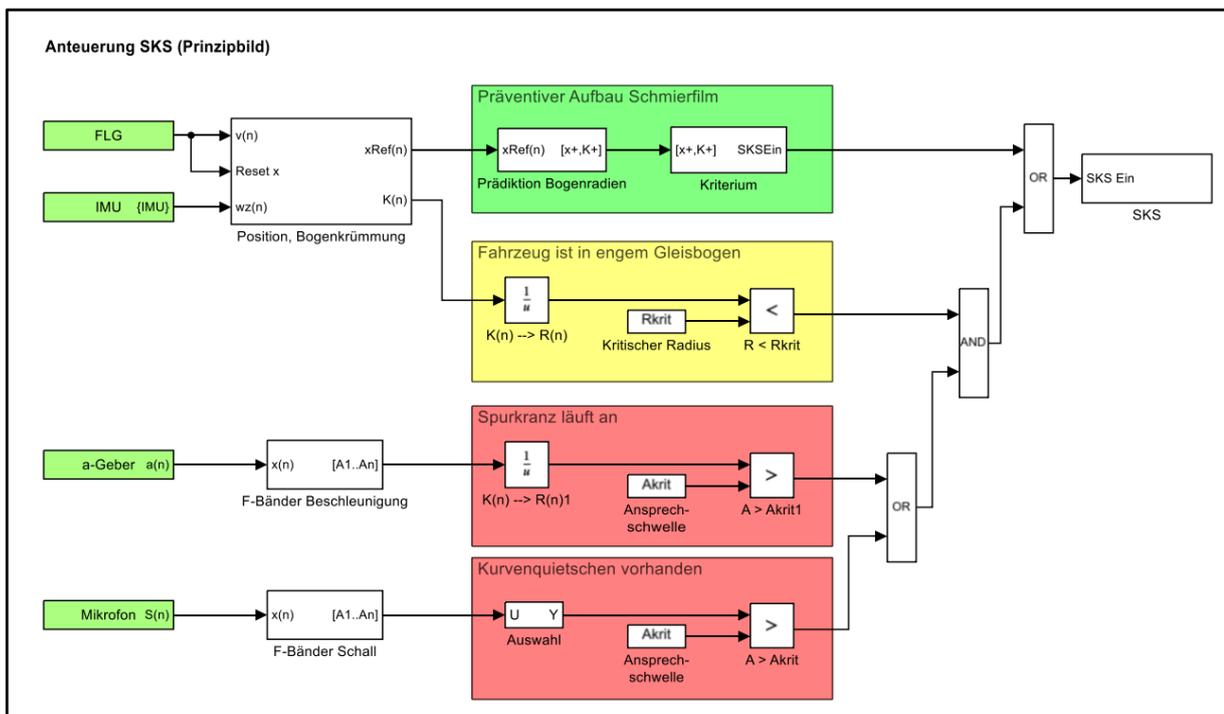


Abbildung 8: High Level Architektur "Ansteuerung SKS"

Die SKS auf dem Versuchsträger kann wie folgt angesteuert werden:

- Selektiv linke / rechte Seite
- Die Zeitspanne kann nach Bedarf gewählt werden. Dabei sollte die effektive Zeitspanne so bemessen werden, dass ein etwaiger Mangel an Schmierung, d. h. ein trockener Kontakt zwischen Spurkranz und Schienenflanke, erkannt wird.

In Bezug auf das Ansteuerkonzept werden die genannten Möglichkeiten entsprechend berücksichtigt. Die SKS wirkt präventiv gegen "Flangeing" und Verschleiss an Spurkranz und Schienenflanken. Beide Phänomene treten ausschliesslich bei unzureichender Schmierung in Bögen und an der Aussenschiene auf. Aus diesem Grund wird lediglich die bogenäussere SKS aktiviert. Die Aktivierung der SKS erfolgt zeitlich begrenzt, solange die entsprechenden Kriterien für das Erkennen von "Flangeing" erfüllt sind.

Im ersten Schritt wird die "interventionelle" Aktivierung der SKS thematisiert. Die folgende Abbildung zeigt das Umsetzungskonzept dieses Lösungsansatzes, der aus mehreren Funktionsblöcken (die Nummerierung mit Grossbuchstaben befindet sich im Diagramm) besteht.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Funktionsblöcke ist im Dokument [6] beschrieben

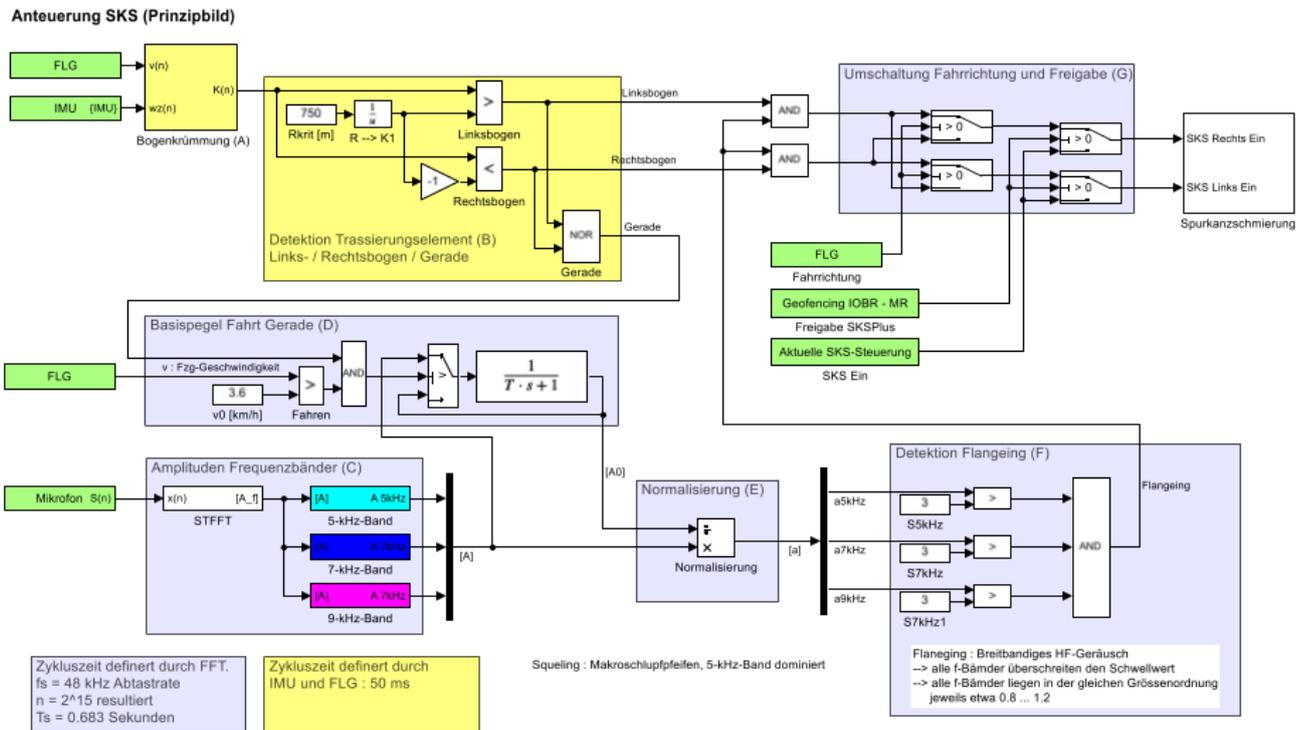


Abbildung 9: «Interventionelle» Aktivierung der SKS

(A) Berechnung der Bogenkrümmung

Die Berechnung der aktuellen Bogenkrümmung K erfolgt unter Berücksichtigung der Fahrgeschwindigkeit v (in m/s) sowie der Winkelgeschwindigkeit des Wagenkastens um die Fahrzeug-Vertikalachse wz (in rad/s).

(B) Detektion Trassierungselement (Links- / Rechtsbogen, Gerade)

Im Zuge der seitenselektiven Ansteuerung der SKS sowie der Ermittlung des Basis-Geräuschpegels in unkritischen Abschnitten ist zunächst festzustellen, ob sich das Fahrzeug in einem Links- oder Rechtsbogen oder aber in einer Geraden befindet. Die Bestimmung erfolgt anhand der Kriterien der in Echtzeit berechneten Bogenkrümmung.

(C) Berechnung Amplituden Frequenzbänder

Dieser Teil berechnet die Amplituden der charakteristischen Frequenzbänder. Er besteht aus zwei Teilen.

1. Einer gefensterte Fourier-Analyse (STFFT, «Short-Time FFT») berechnet das Amplitudendichtespektrum des Schallsignals für ein Zeitfenster mit den letzten n Messwerten. Vor der Anwendung der STFFT muss auf die n Messwerte ein Hanning-Fenster der Länge n appliziert werden.
2. Durch Auswahl von Frequenz-Anteile aus dem Spektrum wird die Amplitude der verschiedenen Frequenzbänder berechnet. (\rightarrow Signal $[A]$, Dimension 3, bei drei Frequenzbändern)

(D) Basispegel auf Geraden

Bei einer Fahrt in der Geraden kann davon ausgegangen werden, dass weder Flangeing noch Squealing auftritt. Allerdings sind die üblichen Geräusche, die mit einer Zugfahrt einhergehen, zu erwarten. Der so ermittelte Schall-Basispegel bzw. das natürliche Grundrauschen kann als Referenz für die Detektion von Squealing und Flangeing verwendet werden. Eine deutliche Überschreitung des Basispegels, beispielsweise um den Faktor 3, lässt den Schluss zu, dass Squealing bzw. Flangeing vorliegt.

Das beschriebene Vorgehen bietet den Vorteil, dass etwaige Veränderungen der Empfindlichkeit des Mikrofons, beispielsweise durch Verschmutzung, durch Anpassung des dynamischen Basispegels berücksichtigt werden. Zudem werden etwaige Einflüsse von Umgebungsbedingungen, wie beispielsweise einer Schneeschicht, automatisch ausgeglichen, indem der Grundpegel den aktuellen akustischen Gegebenheiten nachgeführt wird.

(E) Normalisierung der Amplituden

Die Amplituden der Frequenzbänder werden durch die Basispegel dividiert, welche in Block (D) bestimmt werden. Die normalisierten Werte liegen in geraden Streckenabschnitten im Bereich von 1, während sie in Gleisbögen bei Werten > 1 liegen, sofern die Amplituden der Frequenzbänder ansteigen.

(F) Detektion Flangeing

Die SKS wird gegen Flangeing aktiviert, und zwar an der Aussenschiene.

Die Auswertung der vorliegenden Messdaten (vgl. Kapitel 4 im Dokument [6]) zeigt, dass in vielen engen Gleisbögen ein breitbandiges, hochfrequentes Geräusch entsteht.

Nach derzeitigem Stand der Erkenntnisse wird Flangeing dann angenommen, wenn in sämtlichen drei definierten Frequenzbändern die kritische Schwelle überschritten wird. Die SKS wird dann aktiviert, wenn das genannte Kriterium erfüllt ist und sich das Fahrzeug in einem Gleisbogen befindet.

(G) Berücksichtigung Fahrrichtung, SKK-Freigabe durch Geofencing

Bei der Detektion der Bogenkrümmung in Block (A) ist zu beachten, dass sich diese immer auf die Fahrrichtung des Zuges bezieht. Bei Aktivierung der bogenäusseren SKS ist daher eine Berücksichtigung der Fahrrichtung erforderlich (Umschaltung linke/rechte Fahrzeugseite).

Des Weiteren darf die hier beschriebene bedarfsgesteuerte Konditionierung ausschliesslich auf bestimmten Streckenabschnitten aktiviert werden (Meiringen – Interlaken). Diesbezüglich erfolgt eine Umschaltung in der Ansteuerung der Spurkranzschmierung. Ausserhalb der Versuchsstrecke kommen die SKS-Ansteuersignale aus der aktuellen SKS-Steuerung zum Einsatz. Im Bereich der Versuchsstrecke werden die hier beschriebenen Signale verwendet.

4.2 Ansteuerung SKK

Aus aktueller Perspektive scheint die Prävention bei der Ansteuerung der Schienenkopfkonditionierung SKK eine untergeordnete Rolle zu spielen, da die Reaktion auf aktuell auftretende Slip-Stick-Schwingungen von grösserer Bedeutung ist.

Die Bogenradien können in Echtzeit berechnet werden, auch ohne Korrelation von IMU-Signalen mit den Streckendaten. Dadurch ist eine selektive Aktivierung in engen Bögen möglich. Dies führt zu einer Eliminierung des Bedarfs an RFID-Tags.

Die Algorithmen für die bedarfsgesteuerte Aktivierung der SKK setzen voraus, dass Squealing und Reibschwingungen zuverlässig detektiert werden. Nach aktuellem Erkenntnisstand kann Squealing durch die Analyse des Schallsignals detektiert werden, wobei die Überwachung der 7- und 9-kHz-Frequenzbänder erfolgt. Die Detektion der Reibschwingungen, welche die Ursache für die Ausbildung von Schlupfwellen und Radpolygonen darstellen, basiert auf der Auswertung von Beschleunigungen und/oder Radsatzdrehzahlen im Frequenzbereich unterhalb von 500 Hz. Dies entspricht der Auswertung von Shuttle-Zügen der MGB. Die Entwicklung der Algorithmen ist erst möglich, sobald entsprechende Messdaten vom Versuchsfahrzeug vorliegen.

Die Grundstruktur der Ansteuerung ist identisch mit derjenigen der SKS (vgl. Abbildung 9). Zusätzlich zu den Schallsignalen werden voraussichtlich auch die Frequenzbänder aus den Beschleunigungssignalen extrahiert und überwacht.

5 Nächste Schritte – Ablauf der Betriebserprobung

Sobald die Messausrüstung auf dem Adler-Versuchsträger in Betrieb ist, erfolgt die Speicherung der Messdaten auf einem Datenserver, wobei eine Aufteilung auf einzelne Streckenabschnitte erfolgt. Die Datenstruktur zielt darauf ab, eine strukturierte Ablage der Daten zu gewährleisten, um eine unmittelbare Verwendung für die Auswertung und Analyse zu ermöglichen. Die Organisation der Messdaten ist in der Dokumentation [7] beschrieben.

Im Anschluss erfolgt eine Analyse der Daten mit den zuvor beschriebenen Funktionen. Ziel ist die Extrahierung von Frequenzbändern, die für die schädigenden oder störenden Systemschwingungen (wie Quietschen, Pfeifen oder Slip-Stick-Schwingungen) charakteristisch sind.

In der Folge werden die Amplituden einer statistischen Auswertung unterzogen, wobei Korrelationen mit relevanten Streckenparametern (Bogenkrümmungen) sowie Betriebszuständen (Fahrgeschwindigkeit) ermittelt werden.

Für jeden gesuchten physikalischen Effekt soll ein «akustischer Fingerabdruck» ermittelt werden. Dazu wird folgend vorgegangen:

- Ermittlung von Signal-Charakteristiken («Amplitude»), die mit dem Auftreten der entsprechenden Effekte korrelieren (z.B. ein charakteristischer Frequenzanteil, der mit einem zeitdiskreten Filter bestimmt wird).
- Bestimmung einer kritischen Schwelle dieses Signal-Charakteristikums. Dazu müssen die «Amplituden» aller Effekte über viele Betriebsfahrten berechnet, über die Strecke aufgetragen und statistisch ausgewertet werden (Mittelwerte, Varianz, Reproduzierbarkeit).

Daraus werden dann die Kriterien für die Ansteuerung SKS und SKK abgeleitet.

- Wenn die Amplituden die Effekte korrekt nachbilden, sollte z.B. in engen Gleisbogen mit Kurvenquietschen die zugehörigen Amplituden hoch sein, und in der Geraden tief. Die Ansprechschwelle der SKS muss dann so zwischen die Kurven- und Geradenwerte gelegt werden, dass SKS-Fehlansprechen möglichst nicht vorkommt, aber bei störendem Kurvenquietsch die SKS zuverlässig aktiviert wird. Die Detektion der Bogenfahrt kann bei sensibel eingestellter Ansprechschwelle ein Fehlansprechen in der Geraden verhindern.

Die Algorithmen zur Ermittlung der diversen Amplituden und Schwellwerte werden dann in die Steuerung der SKS- und SKK-Anlage einprogrammiert und anschliessend in der Praxis getestet. Dazu wird wie folgt vorgegangen:

5.1 Forschungsphase Datenakquise

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung erfolgt zunächst eine Datenerhebungsphase, in welcher das mit Messtechnik ausgestattete Versuchsfahrzeug im Regelbetrieb auf der Teststrecke Sensordaten aufzeichnet. Das Ziel dieser Forschungsphase besteht in der Erstellung eines sogenannten Fingerabdrucks der Sensorsignale, welcher sich auf die physikalischen Effekte bezieht. Im Anschluss erfolgt eine Bereitstellung der Daten für die Auswertung. Das Vorgehen ist in diesem Kapitel einleitend beschrieben. In erster Linie geht es darum, ein besseres Verständnis der einzelnen in Kapitel 2 beschriebenen Effekte zu erlangen.

5.2 Referenzmessungen

Parallel zur Forschungsphase erfolgen ausgewählte Referenzmessungen. Die Zielsetzung dieser Messungen besteht in der Erfassung des Systemverhaltens (Lärm, Beschleunigungen und Reibschwingungen) unter Berücksichtigung verschiedener Schmier- und Konditionierungszustände. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen der Erkennung des Schmierzustandes an der Bogen-Aussenfläche (Mangel-, Über-Schmierung, ausreichende Schmierung) respektive des Auftretens von Reibschwingungen an der Innenschiene.

Mit dem Versuchsfahrzeug "Smart SKK-SKS" werden kritische Gleisbögen mit Streckengeschwindigkeit befahren, wobei die auftretenden Schall- und Beschleunigungssignale aufgezeichnet werden. Die Versuche sind in verschiedene Sequenzen unterteilt, wobei ein gewünschter Schmier- bzw. Konditionierungszustand durch einen manuellen Einsatz des SKS- bzw. SKK-Applikationssystems angesteuert wird. Eine detaillierte Beschreibung eines solchen Versuchs ist dem Dokument [8] zu entnehmen.

5.3 Entwicklung und Implementierung mathematisches Model

Basierend auf den Erkenntnissen der Forschungsphase sowie der Referenzmessungen erfolgt eine detaillierte Darstellung des mathematischen Modells zur Erkennung des SKK- und SKS-Bedarfs unter Einbeziehung des in Kapitel 4 beschriebenen Ansteuerungskonzepts. Die daraus resultierenden Konzepte werden anschliessend implementiert. Vor dem ersten Closed-Loop zur Ansteuerung der Applikationssysteme erfolgt eine Simulation des Algorithmus, um dessen Funktionalität zu überprüfen. Dies bedeutet, dass vorerst kein SKK- und SKS-Mittel nach dem Konzept der bedarfsgerechten Ausbringung appliziert wird. Die ermittelte Ansteuerung kann zunächst auf einer Bedienoberfläche grafisch einer Streckenposition zugewiesen und dargestellt werden. Dies ermöglicht die Aufzeichnung der theoretischen Auslöseschwellen sowie den Vergleich der Auslösezeitpunkte des SKS-Systems, sowohl in seiner standardmässigen als auch in seiner bedarfsgerechten Ausführung.

5.4 Closed-Loop Testfahrten

Die Testdurchläufe des "Smart SKK-SKS"-Systems sind in zwei Phasen unterteilt. Der erste Schritt der Testdurchführung umfasst die Prüfung der bedarfsgerechten Ansteuerung von SKS. Im Anschluss an eine erfolgreiche Testphase sowie eine Verifikation der Wirkung von SKS erfolgt im zweiten Schritt eine Prüfung des bedarfsgerechten SKK. Die Testdurchführung erfolgt zu Beginn der Untersuchungen in Begleitung. Dies bedeutet, dass das Testteam auf dem Versuchsfahrzeug mitfährt und die Versuche begleitet. Folglich kann das "Smart SKK-SKS" zu jedem Zeitpunkt deaktiviert und das Fahrzeug in einen Standardzustand versetzt werden, wobei lediglich die herkömmliche Spurkranzschmierung aktiv bleibt. Nach erfolgreich durchgeführten Tests hinsichtlich SKS und SKK ist vorgesehen, dass der Versuchsträger im Regelbetrieb auf der Teststrecke eine bedarfsgerechte, unbegleitete Konditionierung und Schmierung durchführt.

5.5 Betriebserprobung

Nach erfolgreicher Absolvierung sämtlicher Vorabtests sowie der Optimierung des Regelalgorithmus wird mit der Betriebserprobung begonnen. Das Ziel dieser Betriebserprobung besteht darin, das "Smart SKK-SKS"-System in sämtlichen Jahreszeiten zu testen, um dessen Funktionalität und Wirkung umfassend zu evaluieren. Im Rahmen der Betriebserprobung erfolgt eine Überwachung des Rad- und Schienenverschleisses (vgl. Kapitel 6).

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wird schliesslich ein Abschlussbericht erstellt, in dem die Ergebnisse technisch und wirtschaftlich bewertet und Empfehlungen ausgesprochen werden. Im Rahmen der Betriebserprobung soll aufgezeigt werden, inwiefern sich der Rad- und Schienenverschleiss mit dem "Smart SKK-SKS" verändert. In der Folge kann eine ökonomische Evaluierung vorgenommen werden, sodass Empfehlungen für die Implementierung von "Smart SKK-SKS" an die Bahnen abgegeben werden können.

6 Messungen / Überwachung zum Rad- / Schienenverschleiss

Die Auswertung der Auswirkungen von "Smart SKK-SKS" auf das Rad und die Schiene erfordert eine Untersuchung der verschiedenen erfassten Werte im Verlauf der Betriebserprobung. Zu den erfassten Werten zählt unter anderem der abrasive Verschleiss der Radlauflächen, welcher sowohl die Lauflächen als auch die Spurkränze der Trieb- und Laufräder umfasst. Des Weiteren werden das Verhalten der Radprofile, die Lauflächenfehler an den Rädern über den Radumfang (Polygone), die Schienenrauheit bzw. die Entwicklung von Schlupfwellen, die Reibwerte sowie der abrasive Schienenverschleiss untersucht.

Definition Verschleiss an den Rädern

Unter Verschleiss an den Rädern wird der Materialabtrag, an den mit der Schiene in Kontakt stehenden Fahrflächen der Räder verstanden. In diesem Kontext wird zwischen dem Verschleiss im Querprofil, welcher sich in Kurzzeitverhalten manifestiert, und dem Verschleiss in Form von Rundheitsabweichungen, welcher sich in Langzeitverhalten äussert, differenziert. Im Folgenden wird der Reprofilierungsverschleiss als Folge von Schädigungen an den Fahrflächen betrachtet. Dabei kann dieser sowohl singulär als Flachstellen oder lokale Ausbrüche als auch periodisch als Polygone auftreten.

Definition Verschleiss an den Schienen

Unter Verschleiss an den Schienen wird der Materialabtrag, an den mit der Schiene in Kontakt stehenden Fahrflächen der Schiene selbst verstanden. In diesem Kontext wird zwischen zwei Arten von Verschleiss unterschieden: dem kontinuierlichen Verschleiss in der Gleislängsrichtung im Querprofil, auch als Kurzzeitverhalten bezeichnet, sowie den Schlupfwellen, insbesondere auf den Fahrflächen der bogeninneren Schienen, auch als Langzeitverhalten bezeichnet. Im Folgenden wird der Verschleiss als Folge von Schädigungen an den Fahrflächen betrachtet, wobei insbesondere Schleuderstellen, Risse (sogenannte "Headchecks" oder lokale Ausbrüche) zu nennen sind. Die Beseitigung von Schlupfwellen und kleineren Rissen in einem Frühstadium erfolgt durch Schienenschleifen, was als Verschleissabtrag betrachtet werden kann. Dies erfolgt nach demselben Prinzip wie die Reprofilierung bei den Rädern.

Die Messungen der Rad- und Schienenprofile werden mit den Calipri C42-Geräten und den dazugehörigen Lizenzen durchgeführt. Die erfassten Messwerte dienen einerseits der Beurteilung der Entwicklung der geometrischen und der berührungsgemetrischen Interaktion zwischen Rad und Schiene sowie der Analyse des Verschleisses an Rad und Schiene. Des Weiteren wird bei den Rädern die Veränderung der Raddurchmesser erfasst. Die Messung der Radprofile erfolgt in der Regel häufiger als die Messung der Schienenprofile. Dies lässt sich auf die höhere Verschleissrate der Räder im Vergleich zu den Schienen zurückführen. Ein anderes Vorgehen wird bei den Messungen an den Schienen in den Sommermonaten August und September angewendet. Dies lässt sich auf die Erfahrung aus dem, im Vergleich zu den übrigen Sommermonaten, deutlich höheren Verschleiss in den sehr heissen Sommermonaten Juli und August 2022 zurückführen. [1], [2]

6.1 Messkonzept Betriebserprobung

In Tabelle 4 sind die angedachten Messungen und Termine an Rädern und Schienen aufgeführt

Tätigkeit	Messintervall / Umfang
Räder: Messungen mit UFD und Calipri	Min. alle zwei Monate / Messungen durchführen, Überwachung Laufleistung, Auswertung der Profile
Räder: Messungen Radunrundheit mit stationärer Anlage	Kontinuierlich / Messungen durchführen, Überwachung Laufleistung, Auswertung der Profile
Schiene: Reibwertmessung	Monatlich, in Sommermonaten regelmässiger (falls möglich wöchentlich) / Erfassung Reibwerte, Überwachung Entwicklung der Reibwerte
Schiene: Rauigkeit	Beginn - / Mitte - / Ende - Betriebserprobung / Erfassung Schlupfwellenbildung, Bericht zu erfassten Messungen, Vergleich zu vorher / Entwicklung
Schiene: Schienenprofil	Ca. Alle 2.5 Monate / Erfassung Profile mittels Calipri, Auswertung der Profile
Schiene: Überfahrt Sersa - Messwagen	Anfangs und Ende Betriebserprobung / Erfassung, Auswertung bzw. Vergleich mit restlichen Messungen
Messung Vibrationen und Lärm anhand Messinstallation auf Fahrzeug	kontinuierlich

Tabelle 4: Terminplan Messungen an Rad und Schiene

7 Absicherungsdokumente / Risikobeurteilung nach RTE 49100

Im Vorfeld der Betriebserprobungen wurden umfassende Abklärungen, Untersuchungen und Versuche durchgeführt, um die Zulassung zu gewährleisten und das Risiko adäquat beurteilen zu können. Eine Zusammenfassung der genannten Untersuchungen ist im Dokument [11] beschrieben.

In diesem Kontext wurde sowohl die Infrastruktur als auch die Interaktion von Fahrzeug und Fahrweg berücksichtigt. Die Beurteilung erfolgte auf Basis der Schweizer Gesetze und Richtlinien (EBV, AB-EBV, EBG etc.) sowie der für die Änderungen relevanten Normen, Verordnungen und UIC-Merkblätter.

Das für die Betriebserprobung vorgesehene Fahrzeug verfügt über eine Zulassung durch das BAV. Im Rahmen der Betriebserprobung erfolgte eine Untersuchung, ob die durch die bedarfsgerechte Konditionierung/Schmierung vorzunehmenden Änderungen betrieblicher, technischer bzw. organisatorischer Art sicherheitsrelevant sind und als signifikant einzustufen sind. Dabei wurden die Vorgaben der Durchführungsverordnung CSM 402/2013 sowie des Regelwerks zur Nachweisführung bei Änderungen an Eisenbahnfahrzeugen D RTE 49100 herangezogen.

Die für die Erteilung einer Betriebsbewilligung für eine Betriebserprobung von mit "Smart SKK-SKS" ausgerüstetem Fahrzeug des Typs ADLER ABeh 150 auf dem Streckenabschnitt Meiringen–Interlaken erstellten Dokumente sind in Abbildung 10 aufgeführt.



Abbildung 10: Zusammenstellung der Dokumente für die Zulassung der Betriebserprobung

In Bezug auf den Streckenabschnitt Meiringen – Interlaken ist zu berücksichtigen, dass die Konditionierung der Schienenfahrflächen eine Beeinträchtigung des Reibwerts zwischen Rad und Schiene zur Folge hat. Folglich ist sicherzustellen, dass die neben den ADLER-Zügen auf diesem Streckenabschnitt verkehrenden Fahrzeuge bzw. Triebzüge nicht beeinträchtigt werden. Dieser Sachverhalt wurde bei der Risikobeurteilung gemäss Anlage 7 berücksichtigt [12].

7.1 Sicherheitsanalyse nach D RTE 49100 [12]

Im Rahmen der BAV-Richtlinie "Zulassung Eisenbahnfahrzeuge (Typenzulassung/Betriebsbewilligung)" sind für die vorstehende Sicherheitsanalyse insbesondere die folgenden Definitionen von Relevanz:

- **Wesentliche Änderung:** Eine sicherheitsrelevante Änderung an einem Fahrzeug, für welche eine neue Betriebsbewilligung nach Art. 8 Abs. 1b EBV erforderlich ist.
- **Änderung mit hoher Sicherheitsrelevanz:** Eine Änderung, welche wesentlich ist und auf Grund ihrer hohen Sicherheitsrelevanz durch Sachverständige zu beurteilen ist (Art. 8a Abs. 4 EBV).
- **Signifikante Änderung:** Eine Änderung von hoher Sicherheitsrelevanz und hoher Komplexität oder Innovation. Typischerweise ist eine derartige Änderung ausserhalb des Stands der Technik und der Normen. Sie benötigt deshalb ein Risikomanagementverfahren und eine Beurteilung durch eine Risikobewertungsstelle (Art. 8c EBV).

Eine aus Fachleuten verschiedener Disziplinen zusammengesetzte Arbeitsgruppe (RAILplus, zb & externe Gutachter) hat auf Basis der in den angezogenen Anlagen im Dokument [11] dargelegten Beschreibungen die folgenden Tätigkeiten durchgeführt:

- Studium der Beschreibung und Spezifikation der geplanten Änderungen.
- Impactanalyse → Welche Teilsysteme und Funktionen des Fahrzeugs sind betroffen?
- Sicherheitsanalyse nach D RTE 49100-V1 → Welche Risiken entstehen mit den Veränderungen am Fahrzeug und mit welchen Massnahmen wird den Risiken entgegengewirkt?

In den Bereichen Bremstechnik und Naturgefahren/Gewässerschutz wurden anerkannte Sachverständige beigezogen (vgl. Anlagen 6 und 9 im Dokument [11]). Die entsprechenden Gefährdungen werden durch die in den Gutachten geforderten Massnahmen auf ein zulässiges Restrisiko gemindert, welches der Risikomatrix entspricht.

Nach einer abschliessenden Beurteilung des Projektes unter Berücksichtigung der RTE 49100 konnte festgehalten werden, dass das System "**Smart SKK-SKS**" als "**Nicht wesentliche Änderung**" eingestuft werden kann. Folglich ist eine Realisierung der Änderung ohne neue Betriebsbewilligung zulässig. Sämtliche Anpassungen und Modifikationen wurden sorgfältig dokumentiert und bei der Zentralbahn hinterlegt.

8 Verzeichnisse

8.1 Referenzen

- [1] Roland Müller / Aaron Seeberger, Railplus: Schlussbericht über den SKK-Betriebsversuch auf der Strecke Täsch - Zermatt. Technischer Bericht, RAILPlusSF-90004, 20.10.2022
- [2] R. Müller / A. Seeberger, Railplus: Schlussbericht zur Verlängerung Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch - Zermatt. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00038, 28.03.2024
- [3] Lysandre Pasquier, RAILplus / TPF : Essais en service SKK aux TPF, Rapport technique, RAILPlusSF-00032, 28.3.2024
- [4] X. Tabin / T. Pinna, RAILplus / TMR SA: Concept général Smart SKK / SKS Rapport technique, RAILPlusSF-9, 28.3.2024
- [5] Stefan Menth, emkamatik: Railplus-PoC-SKKS-SKS-Grundlagen. Bericht, Dokument 24-1029, 28.5.2024
- [6] Stefan Menth, emkamatik: Railplus-PoC-SKKS-SKS-Ansteuerung. Bericht, Dokument 24-1039, 22.10.2024
- [7] Stefan Menth, emkamatik: Railplus-PoC-SKKS-SKS-Architektur. Bericht, Dokument 24-1030, 06.06.2024
- [8] Stefan Menth, emkamatik: Railplus-PoC-SKKS-SKS-Referenzmessungen. Bericht, Dokument 24-1043, 15.10.2024
- [9] Michael Stalder / Joel Sturdy, Railplus / zb: Anlage 01_Smart SKK-SKS zb auf Adler. Technischer Bericht, 28.08.2024
- [10] Michael Stalder / Joel Sturdy, Railplus / zb: Anlage 02_Teststrecke der Smart SKK-SKS. Technischer Bericht, 28.08.2024
- [11] Michael Stalder / Joel Sturdy, Railplus / zb: Dachdokument_Zulassung Betriebserprobung Smart SKK SKS zb. Technischer Bericht, 28.08.2024
- [12] Michael Stalder / Joel Sturdy, Railplus / zb: Anlage 07_Beurteilung_Aenderung_RTE49100-_SmartSKK-SKS_zb_2024. Technischer Bericht, 29.08.2024
- [13]

8.2 Abbildungen

Abbildung 1: Illustration SKK-System	8
Abbildung 2: Illustration SKS-System	8
Abbildung 3: Systematische Darstellung PoC «Smart SKK-SKS».....	14
Abbildung 4: ADLER zwischen Meiringen und Interlaken sowie Anordnung der "Smart SKK-SKS" Systeme.....	15
Abbildung 5: Architektur «Smart SKK-SKS»	16
Abbildung 6: Streckennetz der zb	17
Abbildung 7: Smart SKK-SKS Teststrecke am Brienersee	18
Abbildung 8: High Level Architektur "Ansteuerung SKS"	20
Abbildung 9: «Interventionelle» Aktivierung der SKS	21
Abbildung 10: Zusammenstellung der Dokumente für die Zulassung der Betriebserprobung	28

8.3 Tabellen

Tabelle 1: Messtechnische Erfassung des SKS-Bedarfs [5].....	11
Tabelle 2: Messtechnische Erfassung des SKK-Bedarfs [5].....	12
Tabelle 3: Klassifizierung von Effekten und Massnahmen [6].....	13
Tabelle 4: Terminplan Messungen an Rad und Schiene	27

9 Anhang