

Verlängerung Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch - Zermatt

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur
Projekt: 2 SKS / SKK
Modul: 4a Verschleissreduktion durch SKK

Technischer Bericht



ID: RAILPlusSF-00038

Datum / Status: 21.03.2024 / Freigegeben

Seitenanzahl 182

Verfasser: R. Müller / Gleislauftechnikmüller
A. Seeberger / MGBahn

Geprüft: Michael Stalder / CE cideon engineering Schweiz AG

Freigegeben: Nikolaus Ritter / zb Zentralbahn AG

Zitierweise: R. Müller / A. Seeberger, Railplus: Schlussbericht zur Verlängerung Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch – Zermatt. Technischer Bericht, RAILPlusSF-00038, 28.03.2024

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	08.03.2024	A. Seeberger	Erster Entwurf
0.2	20.03.2024	R. Müller	Bereinigter Entwurf.
0.9	25.03.2024	M. Stalder	Bericht redigiert und finalisiert.
1.0	25.03.2024	N. Ritter	Schlussbereinigung und Freigabe durch Projektleiter
1.1	18.04.2024	A. Seeberger	Ergänzung Management Summary
2.0	08.05.2024	N. Ritter	Freigabe durch Projektleiter

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	28.03.2024
2.0	Management Board	13.06.2024

Öffentlichkeitsgrad

Öffentlich

Abkürzungsverzeichnis

Abk.	Abkürzung

Glossar

Wort	Beschreibung

Management Summary

Ausgangslage

Im Zusammenwirken Fahrzeug / Fahrweg sind in den letzten Jahren bei diversen Meterspurbahnen massive Verschleisserscheinungen sowohl bei den Fahrzeugen als auch bei der Infrastruktur zu Tage getreten. Diese Verschleisserscheinungen sind teilweise so gravierend, dass die Verfügbarkeit der Fahrzeuge aber auch der Infrastruktur nicht mehr sichergestellt werden kann. In der Vergangenheit und Gegenwart war die Matterhorn-Gotthard-Bahn (MGBahn) sehr stark von den Verschleisserscheinungen auf dem Streckenabschnitt Täsch – Zermatt betroffen. Diverse Versuche mit Schienenqualitäten, Radwerkstoffen und weiteren Veränderungen in der Parametrisierung Rad / Schiene brachten nur punktuelle Erfolge. Die Verkettung von mehreren Einflussfaktoren der Interaktion Fahrzeug – Fahrweg bzw. Rad – Schiene überlagern sich bei der MGBahn. Enge Kurvenradien, hohe Achslasten, starre Radsatzführungen bei den neuen, modernen Fahrzeugen und steife Fahrbahnen. Alles Parameter, welche bei den Fahrzeugen und bei der Fahrbahn nicht so einfach innert kurzer Zeit geändert werden können. Aus diesem Grund hat die Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug Fahrweg die MGBahn von Beginn an als optimales Forschungsobjekt betrachtet.

Nach umfangreichen Vorarbeiten fanden bei der MGBahn Betriebserprobungen mit on-board Schienenkopfkonditionierung vom Oktober 2021 bis Oktober 2022 auf der Strecke Täsch – Zermatt statt. Die Periode von einem Jahr wurde gewählt, damit die Reibungsverhältnisse Rad / Schiene über die vier Jahreszeiten berücksichtigt sind. Vor Beginn der Erprobungen auf der konditionierten Strecke wurden die vier Shuttle – Fahrzeuge 2051 bis 2054 mit einer on-board-Anlage zur Konditionierung der Fahrflächen Rad / Schiene ausgerüstet. Die Strecke wurde aus verschiedenen Perspektiven gründlich analysiert und in der Folge für die Steuerung der Anlagen streckenspezifisch hergerichtet (RFID-Tags). Die Schienen wurden geschliffen und alle Räder der Shuttle – Fahrzeuge reprofiliert, sowie die Ausgangsprofile an allen Rädern und bei den Schienen in drei repräsentativen Bögen messtechnisch erfasst. Zu dieser Betriebserprobung wurde ein umfassender Bericht mit Empfehlungen zum weiteren Vorgehen erstellt [1]. Im Fazit zu diesem Bericht wird unter Anderem festgehalten, dass für die Ausarbeitung von Empfehlungen zur Umsetzung der SKK in der Meterspurbranche weitere Optimierungen erforderlich sind. Es wurde empfohlen, das Verhalten des SKK-Systems bei der MGBahn für ein weiteres Jahr zu beobachten, was mit der Annahme des Optionsantrags durch das BAV und einer Kostenbeteiligung der MGBahn ermöglicht wurde. Damit konnten, unter erfolgreicher Einhaltung des Kostenrahmens seitens Systemführerschaft von 50'000 CHF, die bei der Erprobung 2021 / 2022 festgestellten Tendenzen auf ihre Reproduzierbarkeit geprüft werden. Dabei war zu berücksichtigen, dass insbesondere bei den Rädern in dieser Zeit noch keine Reprofilierung durchgeführt wurde und dass erst durch die dabei erfolgte Durchmesserreduktion eine abgesicherte Abschätzung zur Verlängerung der Lebensdauer der Räder als Folge von SKK möglich ist. Zudem zeigte sich, dass die Beobachtungszeit für den Verschleiss der Schienen mit einem Jahr zur Beurteilung der vorzusehenden Schleifintervalle zu kurz angesetzt worden war. Die Resultate des Betriebsversuches aus den extrem heissen Sommermonaten 2022 mussten insbesondere durch weitere Verschleissmessungen in den Sommermonaten 2023 konsolidiert werden. Die ortsfeste Anlage zum Monitoring der Rundheitsabweichungen der Räder und das fahrzeugseitige Monitoring zu Lärm und Schienenschädigungen waren für weitere 12 Monate zu betreiben.

Resultate aus der Verlängerung des Betriebsversuchs Täsch - Zermatt

Sicherheit, Bahnbetrieb

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass während der gesamten Betriebserprobung keine sicherheitsrelevanten Vorfälle aufgetreten sind.

Radverschleiss und Radprofile Fahrzeuge

Die Schienenkopfkonditionierung wirkte sich bei den ausgerüsteten Fahrzeugen umgehend positiv auf die Räder aus. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Spurkranzverschleiss (Spurkranzdicke und q_R -Mass) ist bei allen Fahrzeugen und an allen Rädern untergeordnet. Dies ist vor allem auf die effiziente Spurkranzschmierung zurückzuführen. Bei den Kontrollen der Radlaufflächen sind keine Tendenzen zur Bildung von Polygonen und mit zwei Ausnahme keine ergebnisbeeinträchtigender Rollkontaktermüdung erkennbar gewesen.
- Ohne Schädigungen an den Rädern werden bei den Triebradsätzen Indikatoren zwischen 15'000km und 20'000km erreicht. Allerdings sind die Streuungen beträchtlich. Bei den Laufradsätzen ist die Streuung noch grösser als bei den Triebradsätzen. Bei diesen liegen die Indikatoren zwischen 30'000km und 50'000km. Die Werte liegen im Trend bei den Triebradsätzen etwas tiefer und bei den Laufradsätzen in der gleichen Grössenordnung wie im Jahre 2021 / 2022. Insgesamt liegen die Werte mit Konditionierung deutlich höher als in der Zeit ohne Konditionierung.
- Bei einigen Radsätzen mussten vorwiegend wegen Flachstellen und bei einem Triebdrehgestell die vier Radsätze (Ausgleich Raddurchmesser) wegen Rollkontaktermüdung an einem der acht Räder reprofiliert werden (Radwerkstoff KVR600 wurde in den 1970-iger Jahren entwickelt). Alle anderen Radsätze wurden seit Beginn der ersten Betriebserprobung 2021 nie reprofiliert und zeigten Ende 2023 einen einwandfreien Zustand an den Radlaufflächen.
- Die Radprofile zeigen über die zweijährige Betriebserprobung eine langsame Veränderung in Richtung günstigeres Verhalten im Bogen ohne eine nennenswerte Verschlechterung des Indikators für die Fahrt auf geraden Strecken. Die Laufradsätze passen sich schneller an die bogenäusseren Schienen an als die Triebradsätze. Dies dürfte auf die unterschiedlichen Stahlqualitäten der Räder bei diesen beiden Laufwerksprinzipien zurückzuführen sein.
- Das nominelle Radprofil RTE 29500A/B ist als Flachläufer völlig ungeeignet für die Fahrt in Bögen unter Bogenradien von 700m. Dies zeigt sich insbesondere bei fortlaufenden Veränderungen dieses Radprofils und seiner Verschleissanpassung an die Fahrkanten der bogenäusseren Schiene. Es sollten daher möglichst rasch Betriebserprobungen mit sogenannten verschleissangepassten Radprofilen durchgeführt werden.

Verschleiss Schiene und Schienenprofile

Die Schienenkopfkonditionierung wirkte sich umgehend positiv auf die Schienen aus. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Schienenverschleiss tritt insgesamt vorwiegend in der vertikalen Richtung (W1) auf. Der Verschleiss an den gleismittigen Schienenflanken (W2) ist minim, was auf die gute Spurkranzschmierung zurückzuführen ist.
- Die Schienen wurden im Bereich der drei Bögen im Jahr 2019 durch neue Schienen ersetzt. In den Jahren 2021 / 2022 und 2023 fanden hintereinander zwei Betriebserprobungen mit SKK statt. Die Schienen wurden zwischen den beiden Erprobungen geschliffen. Wie jedoch den Messergebnissen entnommen werden kann, war der Abtrag durch das Schleifen Ende 2022 sehr gering, was daraus resultiert, dass während der ersten Betriebserprobung nur geringes Wachstum der Schlupfwellen stattgefunden hat. Damit dürfte der grösste Verschleiss bei W1 aus der Zeit zwischen 2019 und Ende 2021 und damit aus der Zeit vor der Schienenkopfkonditionierung stammen. Das bedeutet, dass der Verschleiss durch die SKK zu einer signifikanten Reduktion des Schienenverschleisses beigetragen hat.
- Das Wachstum der Schlupfwellen 12 Monate nach dem Schleifen ist in allen Bögen deutlich geringer als in der vorherigen Messperiode, in der ebenfalls SKK eingesetzt wurde. Damals nahm das Wachstum der Schlupfwellen in den heissen Sommermonaten 2022 deutlich zu. Dieses Verhalten ist im Sommer 2023 nicht beobachtet worden.

- Vergleichsweise zu den nominellen Schienen zeigen die Schienen bei längerem Betriebseinsatz Veränderungen, die sich günstiger auf den Radialstellungsindex auswirken. Um eine Einschätzung zur gegenseitigen Anpassung von Radprofilen aus dem Betriebseinsatz und von Schienenprofilen aus längerer Liegedauer nach dem Schleifen vornehmen zu können, ist die aus der Betriebserprobung verfügbare Stichprobe zu klein und bei den Schienen vor allem durch die Konditionierung beeinträchtigt.
- Die drei betrachteten speziell überwachten Bögen (zum Biel und Lüegelwang) zeigen ein ähnliches Verhalten sowohl hinsichtlich der Radialstellungsindizes als auch bei der Streuung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich bei allen drei Bögen praktisch ohne Seitenverschleiss eine signifikante Spurerweiterung eingestellt hat. Dies führt im Vergleich zur nominellen Schiene zu einem günstigeren Bogenlaufverhalten.
- Bei der Analyse der Bögen auf der gesamten Strecke zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den drei speziell überwachten Bögen. Vertiefte Untersuchungen und daraus resultierende Bewertung zu den Bögen und zu deren Schienenprofilen auf ganzen Streckennetzen werden im Rahmen des Projektes P3 im Jahr 2024 durchgeführt.

Monitoring Radunrundheiten

Die Messanlage im Gleis zur Detektion von Radunrundheiten (Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies) liefert seit Anfang März 2022 Messwerte zu Polygonen, Flachstellen und allfälligen anderen Schädigungen in der Umfangrichtung an den Radlaufflächen der Räder. Die Gleismessstelle ist kurz nach Täsch auf der Strecke nach Zermatt installiert. Die Ergebnisse zu den erfassten Rundheitsabweichungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Im Jahr 2023 sind an den Komet-, Shuttle- und Gelenksteuerwagen – Fahrzeugen insgesamt 54 Flachstellen aufgetreten. Im Jahr 2022 betrug die Anzahl an Flachstellen 39. Die Anzahl an Flachstellen hat damit um 15 zugenommen (+38%), wobei die Gründe hierfür nicht offensichtlich sind.
- Die Komet- und die Shuttle-Fahrzeuge weisen in etwa gleich viele Flachstellen auf (ca. 3 pro Fahrzeug in 2023). Lediglich an den Gelenksteuerwagen treten weniger Flachstellen auf (ca. 1,5 pro Fahrzeug in 2023).
- Bei den Shuttle- und Komet-Fahrzeugen treten die Flachstellen in etwa gleicher Häufigkeit an den Lauf- und Triebachsen auf.

Aufgrund dieser Ergebnisse sind Flachstellen bei den meisten Fahrzeugtypen der häufigste Grund für die Reprofilierung der Räder. Hier wäre damit weiteres Verbesserungspotential vorhanden.

Monitoring Schlupfwellenbildung und Kurvenkreischen

In den Sommermonaten Juli und August 2022 herrschten sehr hohe Tagestemperaturen. Dies führte dazu, dass sich die Beschleunigungswerte an den beiden mit Beschleunigungsaufnehmern ausgerüsteten Fahrzeugen (Komet 2026 und Shuttle 2052) erhöhten. Im Sommer 2023 wurden die ausserordentlich hohen Temperaturen des Vorjahres nicht mehr erreicht. Immerhin bewegten sich die Temperaturen in diesem Sommer in einer für diese Jahreszeit üblichen Grössenordnung. Aufgrund der Überwachung konnte festgestellt werden, dass sich der im Jahre 2022 festgestellte Effekt nicht wiederholte. Aufgrund von mittlerweile vorliegenden Prüfstandsversuchen zu dieser gemachten Erfahrung zeigt sich, dass die Leistungsfähigkeit der derzeit verwendeten Konditioniermittel bei erhöhten Schienentemperaturen eingeschränkt wird.

Das Kurvenkreischen konnte durch die Schienenkopfkonditionierung signifikant reduziert, aber nicht vollständig beseitigt werden. Bei den Fahrzeugen der MGBahn trat Kurvenkreischen vor allem bei den Triebradsätzen auf. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Triebradsätze im Gegensatz zu den Laufradsätzen nicht mit Radschallabsorbieren ausgerüstet sind. Anlässlich der Messungen am Gleis im Oktober 2023 in den Bögen von zum Biel war das Kreischen bei den Triebradsätzen während der Konditionierungsphase deutlich weniger ausgeprägt als während der Phase ohne Konditionierung. Das Kurvenkreischen trat dabei ausgeprägter bei der Bergfahrt der Fahrzeuge als bei deren Talfahrt auf.

Dies im Gegensatz zu den Ergebnissen aus den Plots zum Kurvenkreischen auf dem Monitoring – Fahrzeug:

- Bei Bergfahrt ist das Kurvenkreischen prominenter als bei der Talfahrt. Bei Bergfahrt tritt Kurvenkreischen auch in mehr Kurven auf.
- Im Sommer ist das Kurvenkreischen bei Bergfahrt intensiver als in den restlichen Jahreszeiten. Bei Talfahrt ist dieser Effekt nicht so gut sichtbar.
- Bei Talfahrt ist das Kurvenkreischen in der Nacht in den SKK – Bereichen intensiver als am Tag.

Grundlagen zu Erklärung der Schlupfwellenbildung am Gleis und zum Kurvenkreischen

Parallel zur Betriebserprobung bei der MGBahn wird bei den wissenschaftlichen Projektpartnern (ViF, AC²T und University of Sheffield) an der Entwicklung von Modellen zu verschiedenen Interaktionsthemen zu Verschleiss und Lärm gearbeitet. Die Betriebserprobung Täsch – Zermatt mit ihrer im Oktober 2023 nahezu zwei Jahre dauernden Erfolgsgeschichte wurde deshalb genutzt, um weitere Erkenntnisse zum Ausbau der Modellvorstellungen zu entwickeln. Dazu fanden wie nachstehend aufgeführt verschiedene Messungen am Gleis statt.

Tribometrische Charakterisierung von SKK

Die tribometrische Charakterisierung von SKK setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen, die miteinander verknüpft sind:

- Methodenentwicklung und Experimente für zukünftige R RTE für SKK,
- Methodenentwicklung und Experimente zur Bereitstellung von Eingangsdaten für Rad-Schiene-Kontaktmodelle.

Dabei kamen verschiedene Methoden zum besseren Verständnis und zur Quantifizierung des Auf- und Abbaus von Konditionierungsmittel auf der Schiene zur Anwendung (Reibwertmessung mit unterschiedlichen Tribometern, Scannung von Schienenoberflächen, Abdrücke zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit, Methoden zum qualitativen und quantitativen Nachweis von SKK auf den Schienenkontaktflächen Rad / Schiene, usw.). Zudem wurden Proben an den beiden Düsen am Fahrzeug entnommen, um die Sprühmenge der beiden Pumpen für linke und rechte Schiene zu ermitteln.

Grundlagen zur Erklärung der Schlupfwellenbildung

Bei der Formation von Schlupfwellen sind verschiedene Systemkomponenten beteiligt. Zum Verständnis von deren Zusammenwirken und deren Umsetzung in den Modellen wurden Inertanzmessungen an Schienen, Schwellen, Rädern und Radsätzen durchgeführt. Aus den Frequenzgängen des Oberbaus und der Radsätze konnten Resonanzfrequenzen dieser Systemkomponenten identifiziert werden. Einige davon befinden sich innerhalb des Frequenzbereichs, innerhalb dessen Eigenmodi vermutet werden, welche für die Formation der Schlupfwellen verantwortlich sind.

Grundlagen zur Erklärung des Kurvenkreischens

Beim Kurvenkreischen wird Schall am Rad nahe einer Mode des Rades abgestrahlt. Um die Moden des Trieb- und Laufrades zu ermitteln, wurden Messungen mittels Impulshammer in der Werkstatt durchgeführt, wobei ein Mode bei 5200Hz für das Kurvenkreischen und einer bei 1000Hz für die Schlupfwellen identifiziert wurden. Die Messungen am Gleis mittels Impulshammer wurden im Bogen zum Biel-Brücke durchgeführt. Diese Messungen in Verbindung mit einem Finite Elemente Modell des Gleises sind geeignet, um ein erstes Modell für die Ermittlung der Effekte zu ermitteln. Bei Messungen im Gleis konnte Kurvenkreischen an der Innenschiene bei einer Frequenz von 5140Hz identifiziert werden. Die ermittelten Daten sind sowohl für die Modelle beim Lärm als auch für diejenigen bei den Schlupfwellen verwendbar.

Wirtschaftlichkeit

Die Simulationen zur Wirtschaftlichkeitsberechnung der Betriebserprobung „SKK Täsch – Zermatt“ haben gezeigt, dass die SKK – Anlage unter den getroffenen Annahmen auf der Teststrecke in jedem simulierten Fall rentabel ist. Hierfür wurden zwei Fälle definiert, ein Fall mit SKK und ein Fall ohne SKK. Für diese beiden Fälle wurden wiederum drei verschiedene Simulationen mit jeweils unterschiedlichen Systemgrenzen durchgeführt.

Die Bewertung zeigt, dass auf der Teststrecke die Installation des SKK unabhängig vom analysierten Szenario rentabel ist:

- Betrachtet man nur die Auswirkungen auf die Drehgestelle, ist die Installation der SKK mit einer EA-Differenz von rund 140kCHF (zwischen 75kCHF/Jahr und 215kCHF/Jahr) rentabel.
- Wenn man die Auswirkungen auf die Drehgestelle und die Schienenwartung berücksichtigt, ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von etwa 165kCHF (zwischen 85kCHF/Jahr und 235kCHF/Jahr) rentabel.
- Unter Berücksichtigung aller systemischen Effekte ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von rund 270kCHF (zwischen 210kCHF/Jahr und 335kCHF/Jahr) rentabel.

Somit lässt sich festhalten, dass die SKK Anlage Täsch – Zermatt auch im wirtschaftlich ungünstigsten Fall (Einsparnisse von 140'000 CHF mit Investitionskosten von 120'000 CHF) innerhalb eines Jahres amortisiert wird bzw. wurde. Dabei wurde davon ausgegangen, dass nur in Bögen mit $R \leq 200m$ konditioniert werden muss.

Zudem wurde anhand einer Expertenmeinung eine Einschätzung zu einer möglichen Extrapolation bzw. zur Ausweitung der SKK auf das gesamte Netz der MGBahn gemacht (38'926 Meter Gleislänge mit $R \leq 200m$, 40 Triebdrehgestelle). Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Einführung von SKK auch auf dem gesamten Netz kosteneffizient sein wird, insbesondere wenn das Gesamtsystem (inkl. Infrastrukturkosten und sozioökonomischen Aspekten (Lärm)) berücksichtigt wird.

Fazit

Die erweiterte Betriebserprobung 2023 hat die Ergebnisse aus der ersten Erprobung 2021 / 2022 erhärtet, fehlendes Wissen erweitert und Synergien zu weiteren Forschungsarbeiten gefördert. Zudem entstanden dabei Daten und Erkenntnisse, die für Empfehlungen verwendet, zum Abgleich oder als Input für weitergehende Arbeiten auf Modellebene sowie für Untersuchungen auf Prüfständen dienen. Die aufgrund der durchgeführten Bremsversuche erarbeiteten Grundlagen und deren Umsetzung in die Praxis haben sich während der zweijährigen Betriebserprobung bewährt. Die Fahrsicherheit wurde zu keinem Zeitpunkt infrage gestellt und das Fahrpersonal hat sich mit der neuen Situation, beim Fahrverhalten aus dem veränderten Kontakt Rad / Schiene, vertraut gemacht.

Die bei der erweiterten Betriebserprobung erhärteten und die insgesamt erzielten Ergebnisse zeigen, dass kurz- und mittelfristig mit gezielter Anwendung der Schienenkopfkonditionierung der Kurz- und Langzeitverschleiss an Rad und Schiene auf Strecken mit Gefällen bis 25‰, was dem Gefälle im Adhäsionsbereich zwischen Täsch und Zermatt entspricht, signifikant gemindert werden kann.

Wegen der extrem heissen Sommermonate 2022 haben sich innert kürzester Zeit Schlupfwellen gebildet, die am Ende der Betriebserprobung durch Schleifen beseitigt wurden. Im Vergleich sind diese im Sommer 2023 nur leicht angewachsen. Dies zeigt, dass bei den Konditioniermitteln noch weitere Verbesserungen im oberen Temperaturbereich erforderlich sind oder aber die Menge an Konditioniermittel in Abhängigkeit der Jahreszeit angepasst werden muss. Es ist zu erwarten, dass sich solche Anpassungen bei der Applikation bei Anwendung von bedarfsgerechter Konditionierung nicht aufdrängen.

Einige Radsätze mussten, vorwiegend als Folge von Flachstellen reprofiliert werden. Da diese Schädigung, durch Vergleich mit anderen Fahrzeugen, bei den Shuttle nicht vermehrt aufgetreten ist, kann diesbezüglich ein Zusammenhang mit der Konditionierung ausgeschlossen werden. Um die Wirtschaftlichkeit bei den Fahrzeugen und beim Radsatzmaterial weiter zu verbessern wäre in diesem Bereich eine Optimierung sinnvoll. Insgesamt kann festgestellt werden, dass, mit zwei Ausnahmen, während der zweijährigen Betriebserprobung keine Reprofilierungen erforderlich waren. Aufgrund des

Laufflächenverschleiss und der geringen Zahl von allfälligen Schädigungen wären sehr hohe Reprofilierungslaufleistungen erzielbar.

Das Verstellen einer oder mehrerer Systemkomponenten mit Auswirkungen auf den Reibwert muss durch eine Verbesserung der Zuverlässigkeit des Gesamtsystems vermieden werden. So wurde bei den Versuchen auf der Strecke im Oktober 2023 während des Tages eine Erhöhung des Reibwertes beobachtet. Nachkontrollen haben ergeben, dass sich das Zeitrelais verstellt hatte, welches das Konditioniersystem während der Nachtzeit zur Vermeidung von Überkonditionierung abschaltet.

Die Probenahme der Konditioniermenge pro Sprühintervall zeigt sehr grosse Streuungen und regellose Unterschiede zwischen linker und rechter Seite.

Die Schienenkopfkonditionierung ist hoch wirtschaftlich. Der ROI liegt im Falle der MGBahn bei einem Jahr. Dies hat sich gegenüber dem Ersterprobung trotz einiger, nicht durch SKK verursachter Reprofilierungen nicht verändert. Die Reprofilierungsintervalle der Räder und die Schleifintervalle der Schienen könnten bei Beherrschung des Konditioniersystems gegenüber heute oder gegenüber der Zeit vor der Konditionierung noch deutlich erhöht werden.

Die Schallemission (Kurvenkreischen, Überrollung von Schlupfwellen) wird durch SKK deutlich vermindert und der Fahrkomfort verbessert.

Eine Beeinträchtigung der Umwelt durch das Konditioniermittel kann aufgrund von eingehenden Untersuchungen ausgeschlossen werden (siehe Bericht zu LO2.3 von Projekt P2, RAILPlusSF-00013).

Weiteres Vorgehen - Empfehlungen

Die Untersuchungen durch die wissenschaftlichen Partner liefern wertvolle praktische und theoretische Erkenntnisse hinsichtlich der durch die Konditionierung vermeidbaren Mechanismen zwischen Rad und Schiene, welche für die verschiedenen Formen von Verschleiss und Schallemissionen in verschiedenen Frequenzbereichen verantwortlich sind. Zudem liefern Versuche auf Prüfständen Erkenntnisse, welche durch Versuche auf der Strecke kaum ermittelt werden können, jedoch für die Entwicklung der Modelle unabdingbar sind. Diese Bestrebungen sind mit allen Mitteln zu unterstützen, da nur dadurch neues und dem Stand der Technik entsprechendes umsetzbares Wissen generiert werden kann. Try and Error ist hier sicherlich der falsche Weg und muss deshalb vermieden werden.

Die Weiterentwicklung von mit den derzeitigen und zukünftigen klimatischen Bedingungen verträglichen Konditioniermitteln muss vorangetrieben werden. Schon bei Schienentemperaturen von 60°C wird reduziert sich die Zyklenzahl der Überrollungen bis zu Anstieg des Reibwerte gegenüber derjenigen bei 25°C beträchtlich.

Beim auf dem Fahrzeug eingebauten Konditioniersystems bestehen grosse Streuungen bei den Sprühmengen pro Pumpenhub und zudem auch grosse Unterschiede zwischen linker und rechter Fahrzeugseite. Dieses System muss vor allem im Hinblick auf das bedarfsgerechte Konditionieren weiterentwickelt werden.

Dem Nachteil der kontinuierlichen Konditionierung bei jeder Zugsdurchfahrt in allen dafür spezifizierten Kurven ist mit einer bedarfsgerechten Konditionierung zu begegnen. Hierzu müssen die Fahrzeuge die Notwendigkeit der Konditionierung erkennen, um das Optimum im System herausholen zu können (bedarfsgerechtes Konditionieren). Dies vor allem auch unter Berücksichtigung des temperaturabhängigen Verhaltens der Trägersubstanzen der Konditioniermittel (Viskosität).

In einem weiteren Schritt ist der Nachweis zu erbringen, dass die Schienenkopfkonditionierung auch auf Strecken bis 70% erfolgreich eingesetzt werden kann. Dazu sind allenfalls auch haftwertvergrössernde Konditioniermittel in Betracht zu ziehen, damit geklärt werden kann, ob bei diesen Produkten ein positiver Verlauf des Kraftschlusses beim Übergang vom Mikro- auf den Makroschlupf stattfindet und das Kurvenkreischen dadurch vermindert bzw. beseitigt werden kann.

Inhalt

1	Ausgangslage	13
1.1	Ziele der Verlängerung der Betriebserprobung	13
1.2	Beschreibung Versuchsträger und Versuchstrecke	13
1.2.1	<i>Allgemeine Informationen</i>	13
1.2.2	<i>Fahrzeuge</i>	13
1.2.3	<i>Strecke</i>	14
2	Messungen / Überwachung und Resultate zum Radverschleiss	15
2.1	Messkonzept Verlängerung Betriebserprobung	15
2.1.1	<i>Terminplan für Messungen an Rad und Schiene</i>	15
2.1.2	<i>Auswertung der Messungen</i>	16
3	Messergebnisse zu den Rädern	17
3.1	Indikator für den Radverschleiss «Anzahl Kilometer pro 1mm Raddurchmesserreduktion» ..	17
3.2	Abrasiver Radverschleiss bezogen auf die Abmessungen am Spurkranz.....	19
3.2.1	<i>Trends bei den Abmessungen am Spurkranz</i>	19
3.2.2	<i>Fazit zu den Abmessungen am Spurkranz</i>	21
3.3	Radunrundheit beurteilt anhand Messanlage im Gleis [4].....	22
3.3.1	<i>Messanlage Wheel Monitoring System WMS</i>	22
3.3.2	<i>Polygonisierung (vgl. Anhang 12.6.1)</i>	25
3.3.3	<i>Flachstellen (vgl. Anhang 12.6.2)</i>	25
3.3.4	<i>Fazit / Kernaussagen zur Radunrundheit</i>	26
3.4	Zustand der Radlauflächen	30
3.4.1	<i>Reprofilierungen</i>	30
3.4.2	<i>Rollkontaktermüdung Rad 4R beim Shuttle 2051</i>	31
3.4.3	<i>Aufzeichnungen der Messanlage im Gleis zum Shuttle 2051</i>	32
3.4.4	<i>Fotodokumentation</i>	33
3.4.5	<i>Anmerkungen zum Zustand der Radlauflächen</i>	34
4	Messergebnisse zu den Schienen	35
4.1	Messung Rauheit der Schiene [6].....	35
4.1.1	<i>Entwicklung der Schienenrauheit [6]</i>	36
4.1.2	<i>Formation von Schlupfwellen [6]</i>	40
4.1.3	<i>Inertanzmessungen</i>	41
4.1.4	<i>Auswirkung der Schlupfwellen im Betrieb [6]</i>	46
4.1.5	<i>Vibration der Schiene zwischen den Schwellen</i>	47
4.1.6	<i>Schallemission</i>	48
4.1.7	<i>Anmerkungen zu den Auswirkungen der Schlupfwellen auf den Betrieb</i>	49
4.2	Abrasiver Schienenverschleiss.....	50
4.2.1	<i>Zum Biel – Portal, Rechtsbogen (Vollbogen km: 41'935.977 - 41'951.93)</i>	52
4.2.2	<i>Zum Biel – Brücke, Linksbogen (Vollbogen km: 42'053.3 - 42'024.7)</i>	54
4.2.3	<i>Lüegelwang, Linksbogen (Vollbogen km: 42'512.35 - 42'557.67)</i>	56
4.2.4	<i>Schlussfolgerungen zum Schienenverschleiss</i>	58
4.3	Reibwert / Tribometer Messungen.....	59
4.3.1	<i>Messpunkte und Messresultate</i>	59

4.3.2	<i>Feststellungen zu den Messergebnissen</i>	61
5	Berührung von Rad und Schiene (Rad- und Schienenprofile)	62
5.1	Nominelle Rad- und Schienenprofile	62
5.2	Entwicklung der Radprofile im Betriebseinsatz	63
5.3	Entwicklung der Schienenprofile im Betriebseinsatz	66
5.4	Einfluss der Radprofils auf den Radialstellungsindex auf ganzen Strecken	68
5.5	Einfluss der Bremssohle auf die Berührungsgeometrie	69
6	Lärm: Messungen / Überwachung und Resultate zur Schiene – Noise [10]	71
6.1	Messkampagne „Zum Biel Brücke“, Oktober 2023	71
6.1.1	<i>Messort</i>	71
6.1.2	<i>Voruntersuchungen</i>	72
6.2	Messungen.....	73
6.2.1	<i>Radsatz</i>	73
6.2.2	<i>Stationäre Messungen in der Kurve</i>	74
6.3	Messergebnisse	75
6.3.1	<i>Eigenfrequenzen und Inertanzen der Radsätze und Räder</i>	75
6.3.2	<i>Eigenfrequenzen und Inertanzen des Gleises</i>	76
6.4	Kurvenkreischen während der Vorbeifahrt.....	78
7	Messungen / Überwachung und Resultate Allgemein [11]	80
7.1	Schwingungen am Radsatzlager	80
7.1.1	<i>Messwerte Beschleunigungen – Allgemein</i>	80
7.1.2	<i>Fazit zu den Beschleunigungswerten – Schlupfwellen im Allgemeinen</i>	82
7.2	Messwerte zum Lärm	83
7.2.1	<i>Filter für Kurvenkreischen</i>	84
7.2.2	<i>Filter für Schlupfwellen</i>	84
7.2.3	<i>Resultate Kurvenkreischen</i>	84
7.3	Resultate Schlupfwellen bzw. Vibrationen im Wellenlängenbereich von 40 – 90mm	87
7.4	Diskussion der Resultate.....	89
7.4.1	<i>Veränderung ab Ende Januar 2022</i>	89
7.5	Starke Differenzen zwischen Berg- und Talfahrt.....	91
7.6	Zeitliche Veränderung des Kurvenkreischens.....	91
8	Tribometrische Charakterisierung von SKK [12]	92
8.1	Tribometrische Charakterisierung von SKK	93
8.2	Ergänzende analytische Methoden	95
8.2.1	<i>Profilometer zur Erfassung von Rad- und Schienengeometrien</i>	95
8.2.2	<i>Abdrücke zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit</i>	96
8.2.3	<i>Qualitativer und quantitativer Nachweis von SKK</i>	97
8.3	Ergebnisse zu den Feldversuchen	98
9	Gesamtwirtschaftlichkeit [13]	111
9.1	Ziel und Methode.....	111
9.2	Umfang	111
9.3	Getroffene Annahmen (vgl. Anhang 12.5)	112
9.3.1	<i>Auswirkungen auf die Fahrzeugwartung</i>	112
9.3.2	<i>Auswirkungen auf die Infrastruktur</i>	112

9.3.3	<i>Annahmen zu den Kosten</i>	112
9.3.4	<i>Annahmen des Modells</i>	112
9.4	Resultate	113
9.4.1	<i>Auf der Teststrecke Täsch-Zermatt</i>	113
9.4.2	<i>Auf dem MGBahn – Netz</i>	113
10	Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen	115
11	Verzeichnisse	125
11.1	Referenzen	125
11.2	Abbildungen	125
11.3	Tabellen	128
12	Anhang	129
12.1	Termine Messungen	129
12.2	Umfang Auswertungen und Zuständigkeit	130
12.3	Rauheit der Schiene - Messgerät APT RSA – Rail Surface Analyser	131
12.4	Tribometer Messungen	133
12.4.1	<i>Kalter Boden Gleis 2 (Radius 100 m) vor Relaisraum Streckenkilometer 41.080</i>	133
12.4.2	<i>Biel Kurve (110m) Streckenkilometer 42.050</i>	133
12.4.3	<i>Biel Gerade Streckenkilometer 42.100</i>	134
12.4.4	<i>Lüegelwang enge Kurve (95m) Streckenkilometer 42.550</i>	134
12.5	Gesamtwirtschaftlichkeit – Annahmen	135
12.5.1	<i>Investition</i>	135
12.5.2	<i>Auszug Simulation</i>	137
12.6	Radunrundheiten der Räder	138
12.6.1	<i>Polygone</i>	138
12.6.2	<i>Flachstellen</i>	159
12.7	Überdrehen der Fahrzeuge / Notizen UFD Messungen	180

1 Ausgangslage

Im Rahmen des Nationalen Forschungsprogramms Fahrzeug / Fahrweg Meterspur hat die Matterhorn Gotthard Bahn (MGBahn) vom Oktober 2021 bis Ende Oktober 2022 eine Betriebserprobung auf der Strecke Täsch-Zermatt mit Einsatz von Schienenkopfkonditionierung (SKK) gegen Verschleiss an Rad und Schiene durchgeführt.

Die Erkenntnisse dieser Betriebserprobung wurden detailliert im Bericht «Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch – Zermatt» [1] beschrieben. Wie in diesem Schlussbericht empfohlen wurde, konnte die Betriebserprobung um ein Jahr verlängert werden, um die festgestellten Tendenzen zu erhärten und insbesondere das Verhalten während der heissen Sommermonate genau zu beobachten. Die Erkenntnisse aus der Verlängerung der Betriebserprobung Täsch – Zermatt werden im vorliegenden Bericht beschrieben.

1.1 Ziele der Verlängerung der Betriebserprobung

Die einjährige Verlängerung der Betriebserprobung soll Erkenntnisse aus dem ersten Jahr Betriebserprobung ggf. bestätigen, vertiefen und ergänzen. Insbesondere soll:

- das Verhalten des SKK-Systems während hohen Temperaturen im Sommer beobachtet werden. Hier wird vermutet, dass durch die längere Sonneneinstrahlung und die höheren Temperaturen das SKK – Mittel sich schneller verflüchtigt als während des restlichen Jahres.
- durch die zusätzlichen Messdaten die Stichprobe vergrößert und damit die Erkenntnisse aus der Betriebserprobung 2021 - 2022 erhärtet werden.

1.2 Beschreibung Versuchsträger und Versuchstrecke

Die Beschreibung des Versuchsträgers und der Versuchstrecke können im Schlussbericht zur Betriebserprobung [1] detailliert nachgeschlagen werden. Im Rahmen des vorliegenden Berichts werden die wichtigsten Gegebenheiten kurz zusammengefasst.

1.2.1 Allgemeine Informationen

Aufgrund der engen Bögen und der hohen Streckenbelastung zwischen Täsch und Zermatt wurde dieser Streckenabschnitt als Teststrecke definiert. Anschliessend an die ursprüngliche Betriebserprobung ist die SKK-Anlage nun seit Oktober 2021 bis zum heutigen Zeitpunkt (März 2024) in Betrieb. Es gilt festzuhalten, dass die Einstellungen am SKK – System seit Beginn nicht verändert wurden.

1.2.2 Fahrzeuge

Für den SKK-Einsatz wurden die vier Shuttle Fahrzeuge BDeh 4/8 2051 – 2054 der MGBahn mit einem SKK on-board System ausgerüstet (vgl. Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK Täsch – Zermatt [1]). Das Fahrzeug BDeh 4/8 2054 wurde während der Verlängerung der Betriebserprobung nicht mehr messtechnisch weiterverfolgt, da dieses bei den kritischeren Triebbradsätzen mit den gleichen Radwerkstoffen ausgerüstet ist wie das Fahrzeug 2051 (KVR 600). Die dreiteiligen Triebzüge verfügen vier Zahnradtriebachsen verteilt auf zwei Drehgestelle. Die beiden Endwagen sind auf dem Mittelwagen aufgesattelt und verfügen über ein zweiachsiges Laufdrehgestell.

Die jeweiligen Informationen der Räder bzw. deren Materialien sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Shuttle - Fahrzeug Nr.:	2051	2052	2053
Material Triebräder (badagiert, \varnothing nominell = 796mm)	KVR600	B7T	B6Z
Material Laufräder (Monoblockrad, \varnothing nominell = 685mm)	ER7	ER7	ER7

Tabelle 1: Übersicht Ausrüstung bzw. Materialien der Fahrzeuge

1.2.3 Strecke

Für den SKK-Einsatz wurde die Strecke Täsch – Zermatt mit RFID-Tags ausgerüstet. Die Gegebenheiten der Strecke wie z.B. die Positionen der RFID – Tags sind unverändert und können im «Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK Täsch – Zermatt» [1] und in den darin aufgeführten Bezugsdokumenten nachgeschlagen werden.

Zudem liegen zu diesem Streckenabschnitt als Bestandteil der Datenbank feste Anlagen (DfA)-Liniennummer 117 nun sämtlich Daten der Trassierung und der fahrdynamischen Grössen bei RAILplus vor. Damit lassen sich die Schienendaten und die daraus resultierenden Indikatoren wie z.B. der Radialstellungsindex und die äquivalente Konizität aus der Berührung von Rad / Schiene in Abhängigkeit des Zustandes der Radprofile exakt der Trassierung zuordnen.

2 Messungen / Überwachung und Resultate zum Radverschleiss

Die Messungen der Rad- und Schienenprofile erfolgen durch die Calipri C42 Geräte mit den entsprechenden Lizenzen. Diese Messergebnisse dienen einerseits der Beurteilung der Entwicklung der geometrischen und der berührungsgeometrischen Interaktion Rad / Schiene sowie des Verschleisses an Rad und Schiene. Bei den Rädern wird zudem die Veränderung der Raddurchmesser erfasst, da diese bei der MGBahn als Indikator für die Beurteilung des Radverschleisses dienen (Anzahl gefahrene Kilometer pro 1mm Raddurchmesserreduktion). Die Durchmesser – Messung wird an der Unterflurdrehbank (UFD) durchgeführt, da bei dieser Messung kleinere Toleranzen anzunehmen sind als bei entsprechenden Messungen mit dem Calipri – Wheel. Die Messung der Radprofile erfolgt häufiger als die Messung der Schienenprofile. Dies aufgrund der Erfahrung, dass die Verschleissrate bei den Rädern grösser ist als bei den Schienen. Anders verhält sich das Intervall in den Sommermonaten August und September bei den Messungen an den Schienen. Dies aufgrund der Erfahrung aus dem grösseren Verschleiss in den sehr heissen Sommermonaten Juli und August 2022.

2.1 Messkonzept Verlängerung Betriebserprobung

2.1.1 Terminplan für Messungen an Rad und Schiene

In Tabelle 2 sind die Messungen und Termine an Rädern und Schienen aufgeführt. Im Rahmen der Zusammenarbeit mit Virtual Vehicle (ViF), AC2T und der Universität Sheffield innerhalb des K2 Projekts sind im Oktober 2023 weitere Messungen an einem Fahrzeug und an einem der drei überwachten Bögen durchgeführt worden. Eine detailliertere Übersicht zu den Terminen ist im Anhang zu finden (vgl. Kapitel 12.1).

Tätigkeit	Messintervall / Messzeitpunkt
Räder: Messungen mit UFD und Calipri	Alle zwei Monate
Räder: Messungen Radunrundheit mit stationärer Anlage	kontinuierlich
Schiene: Reibwertmessung	Monatlich, in Sommermonaten regelmässiger (falls möglich wöchentlich)
Schiene: Rauigkeit	KW 21, KW 31, KW 37
Schiene: Schienenprofil	KW 13, KW 21, KW 31, KW 37
Schiene: Überfahrt Sersa - Messwagen	KW 21, KW 37
Technode: Messung Vibrationen und Lärm anhand Messinstallation auf Fahrzeug	kontinuierlich

Tabelle 2: Terminplan Messungen an Rad und Schiene

2.1.2 Auswertung der Messungen

In Tabelle 3 sind Umfang der Auswertungen und die dafür zuständigen Stellen aufgeführt. Dabei handelt es sich Messungen, welche einerseits periodisch und andererseits kontinuierlich durchgeführt werden. Nicht aufgeführt sind in dieser Tabelle die Messungen aus den beiden K2-Projekten. Da diese Messungen im Zusammenhang mit der Betriebserprobung stehen und wichtige Informationen zur Modellerstellung für Simulationsrechnungen liefern, werden erste Ergebnisse daraus in diesem Bericht aufgeführt. Eine detailliertere Übersicht zu zur Auswertung ist im Anhang zu finden (vgl. Kapitel 12.2).

Tätigkeit	Umfang (Zuständigkeit)
Räder: Messungen mit UFD und Calipri	Messungen durchführen, Überwachung Laufleistung km/mm (MGBahn), Auswertung der Profile (Roland Müller)
Räder: Rundheitsabweichungen der Räder (Messstelle im Gleis bei Täsch)	Analyse über Verlängerung Betriebserprobung (Müller BBM)
Schiene: Reibwertmessung	Erfassung Reibwerte, Überwachung Entwicklung der Reibwerte (MGBahn)
Schiene: Rauigkeit	Erfassung Schlupfwellenbildung, Bericht zu erfassten Messungen, Vergleich zu vorher / Entwicklung (KPZ)
Schiene: Schienenprofil	Erfassung Profile mittels Calipri (MGBahn), Auswertung der Profile (Roland Müller)
Schiene: Überfahrt Sersa - Messwagen	Erfassung (Sersa), Auswertung bzw. Vergleich mit restlichen Messungen (Roland Müller)
Technode: Messung Vibrationen und Lärm anhand Messinstallation auf Fahrzeug	Weiterbetrieb Technode Messsystem wie bisher und Auswertung (This Wiederkehr)

Tabelle 3: Umfang und Auswertung der Messungen

3 Messergebnisse zu den Rädern

Um die Auswirkungen auf das Rad beurteilen zu können, werden die verschiedenen erfassten Werte zu den Rädern untersucht. Dazu gehören der abrasive Radverschleiss an den Fahrflächen und am Spurkranz, Rundheitsabweichungen oder Beschädigungen gemäss Fotodokumentation.

Definition Verschleiss an den Rädern

Als Verschleiss an den Rädern wird der Materialabtrag, an den mit der Schiene in Kontakt stehenden Fahrflächen der Räder bezeichnet. Dabei wird zwischen dem umlaufenden Verschleiss im Querprofil (Kurzzeitverhalten) und dem umlaufenden Verschleiss in Form von Rundheitsabweichungen (Langzeitverhalten) unterschieden. Im Weiteren wird der Reprofilierungsverschleiss als Folge von Schädigungen an den Fahrflächen betrachtet (singulär als Flachstellen oder lokale Ausbrüche, periodisch als Polygone, etc.). Man vergleiche hierzu die erfassten Reprofilierungen im Anhang 12.7.

Der Verschleiss an den Rädern wird auf vier unterschiedliche Weisen beurteilt:

- Indikator für den Radverschleiss in Form der Durchmesserreduktion in der Messkreisebene, ausgedrückt als Anzahl fahrbarer Laufleistung in Kilometern bei einer Reduktion des Raddurchmessers von 1mm (vgl. Kapitel 3.1).
- Veränderungen bei den Abmessungen am Spurkranz s_d und q_R für die geometrische Interaktion sowie von s_h als Mass für den abrasiven Laufflächenverschleiss (vgl. Kapitel 3.2).
- Rundheitsabweichungen an den Rädern in Form von Flachstellen und Polygonen (vgl. Kapitel 3.3).
- Der Zustand der Räder und weitere Schädigungen an den Rädern werden im Dossier der MGBahn in Form einer Fotodokumentation festgehalten (vgl. Kapitel 3.4).

3.1 Indikator für den Radverschleiss «Anzahl Kilometer pro 1mm Raddurchmesserreduktion»

Die folgenden drei Abbildungen zeigen den Indikator für die Leistungsfähigkeit der Räder anhand der Anzahl zurückgelegter Laufkilometer pro 1mm Raddurchmesserreduktion als Indikator für die Beurteilung des Radverschleisses in der Messkreisebene. Oben in den Abbildungen sind jeweils die Werte abgebildet, die über die gesamte Beobachtungszeit anhand der Messung mit dem Calipri – Rail ermittelt wurden. Sie stellen den Indikator pro Rad je Radsatz über die gesamte Erprobungszeit dar. Unten ist jeweils der Wert pro Messung, gemessen auf der Unterflurdrehbank, dargestellt. Im den jeweils oberen Diagrammen sind alle Räder der Triebradsätze und der Laufradsätze aufgeführt. Die grün hinterlegten Radsätze 1, 2, 7 und 8 sind die Laufradsätze und die rot hinterlegten Radsätze 3, 4, 5 und 6 sind die Triebradsätze. Die Werte der Einzelmessungen streuen stark. Dies ist einerseits bei den Calipri – Messungen auf die Messgenauigkeit zurückzuführen, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Verschleissabträge bei kurzen Messintervallen sehr gering sind. Andererseits waren während der Betriebserprobung wegen Laufflächenschäden Reprofilierungen erforderlich. In den meisten Fällen erfolgten diese aufgrund von Flachstellen. In einem Fall waren Schäden als Folge von RCF und in einem zweiten solche als Folge von Muldenbildung in der Hohlkehle durch Einwirkung der Bremssohlen die Gründe für die Reprofilierung. Dies hat insbesondere zu massiven Einbrüchen des Indikators bei den Triebradsätzen geführt (Shuttle 2051 in Abbildung 1 und Shuttle 2053 in Abbildung 3). Beim Shuttle 2053 mussten die Durchmesser aller Triebradsätze (elektrisch gekoppelt und unterliegt daher der Einhaltung einer minimalen Durchmesserdifferenz zwischen den vier Triebradsätzen) wegen Ausbrüchen und Kerbe beim Spurkranz als Folge des Einwirkens des Bremsklotzes bei AA5R um rund 6mm verringert werden. Dies erklärt die massive Reduktion des Indikators auf Werte zwischen 5000km und 10'000km.

Ohne Schädigungen an den Rädern werden bei den Triebradsätzen Indikatoren zwischen 15'000km und 20'000km erreicht. Allerdings sind die Streuungen beträchtlich. Bei den Laufradsätzen ist die Streuung noch grösser als bei den Triebradsätzen. Bei diesen liegen die Indikatoren zwischen

30'000km und 50'000km. Die Werte liegen im Trend bei den Triebradsätzen etwas tiefer und bei den Laufradsätzen in der gleichen Grössenordnung wie im Jahre 2022. Insgesamt liegen die Werte mit Konditionierung deutlich höher als in der Zeit ohne Konditionierung. Wie weiter unten bei den Ergebnissen aus der Detektionsanlage im Gleis gezeigt wird, sind die Schädigungen an den Fahrflächen der Räder als Folge von Flachstellen nicht auf die Konditionierung zurückzuführen.

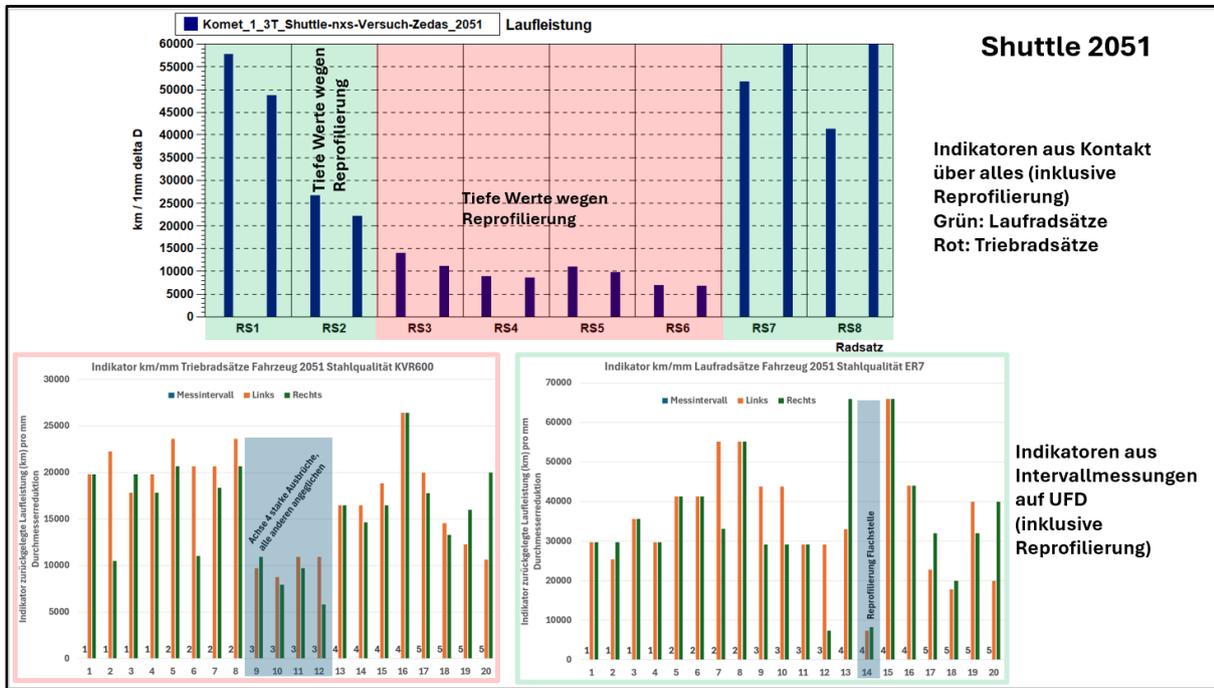


Abbildung 1: Indikator Anzahl km pro 1mm Durchmesserreduktion Shuttle 2051

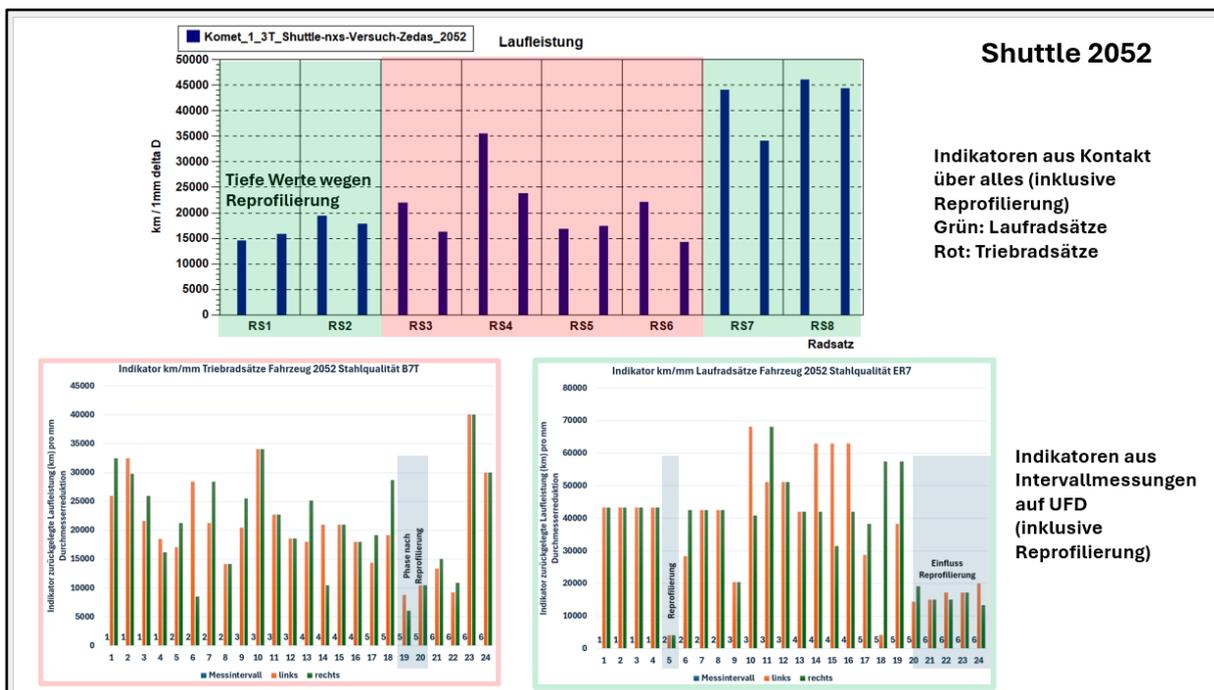


Abbildung 2: Indikator Anzahl km pro 1mm Durchmesserreduktion Shuttle 2051

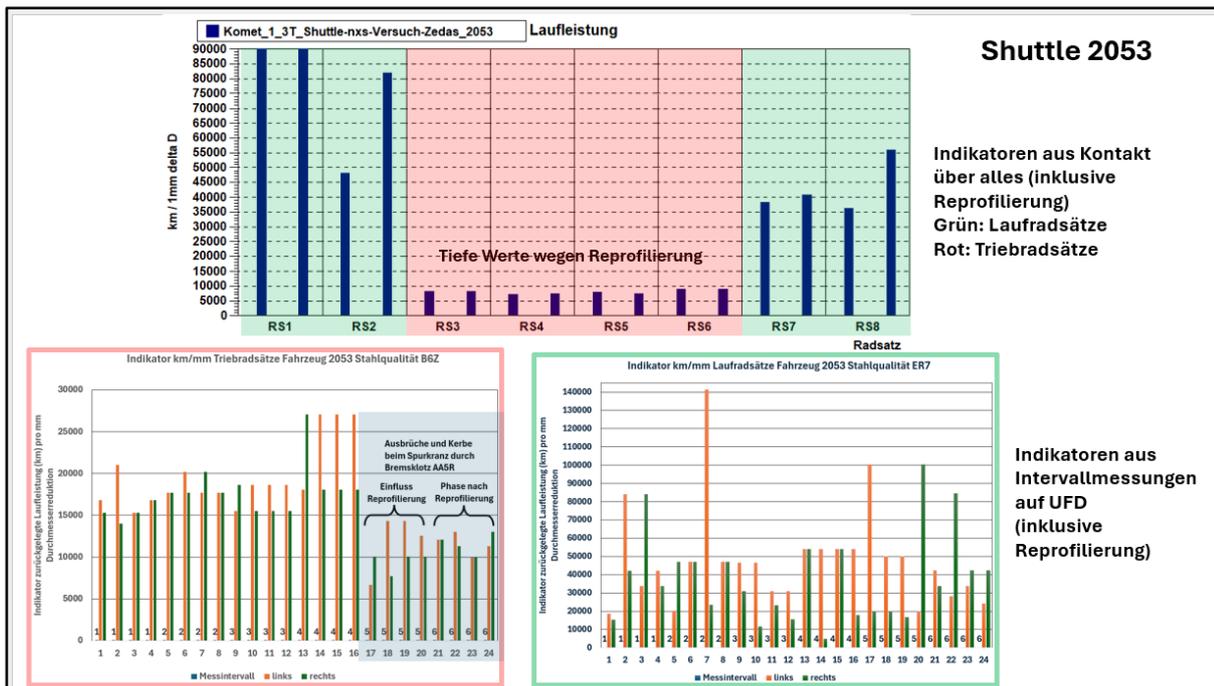


Abbildung 3 : Indikator Anzahl km pro 1mm Durchmesserreduktion Shuttle 2053

3.2 Abrasiver Radverschleiss bezogen auf die Abmessungen am Spurkranz

Beim abrasiven Verschleiss bezogen auf den Spurkranz werden die Veränderungen bei den Abmessungen des Spurkranzes analysiert. Es sind die die Spurkranzdicke s_h , das q_R -Mass und die Spurkranzhöhe s_h . Die Ergebnisse für die drei Shuttle Triebzüge sind in Abbildung 4 bis Abbildung 6 dargestellt. In den Abbildungen ist jeweils oben das linke und unten das rechte Rad dargestellt. Die Räder der Radsätze (hier als Achse bezeichnet) sind jeweils farblich unterschieden. Die Achsen 1, 2, 7 und 8 sind die die Laufradsätze und die Achsen 3, 4, 5 und 6 sind die Triebradsätze. Auf der horizontalen Diagrammachse ist jeweils der km-Stand des Fahrzeugs und auf der vertikalen der Messwert in mm aufgeführt.

3.2.1 Trends bei den Abmessungen am Spurkranz

Vom Trend her betrachtet zeigen jeweils alle Radsätze der drei Triebzüge ein ähnliches Verhalten. Spurkranzdicke s_h und q_R -Mass zeigen über die Laufleistung einen sehr flachen und im Trend leicht ansteigenden Verlauf. Das bedeutet, dass die Abnutzung am Spurkranz nahezu vernachlässigbar bzw. äusserst gering ist. Dies ist aus den Gesichtspunkten des Spurkranzes auf eine sehr gut funktionierende Spurkranzschmierung zurückzuführen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass insbesondere in den konditionierten Bereichen die auf den Spurkranz einwirkende Kraft (Reibkraft am Spurkranz) durch Reduktion der als Folge des verringerten Reibwertes an der Fahrfläche gegenüber den nicht konditionierten Bereichen verringert ist. Der leicht ansteigende Trend bei den Abmessungen an den Spurkranzflanken deutet auf ein Dickenwachstum der Spurkränze hin. Dabei besteht das Risiko, dass der Maximalwert für die nach RTE 29500 [2] für den Radsatz Typ A maximal zulässige Spurkranzdicke von 27mm bei grösseren Laufleistungen überschritten. Ob sich dieser Trend bei den moderneren Triebzügen bei der MGBahn in der gleichen Art auch im dem übrigen Einsatzbereich einstellt, ist zu überprüfen. Wenn ja, sollte über eine nominelle Spurkranzschwächung nachgedacht werden. Wie weiter unten gezeigt wird, würde sich diese Massnahme auch auf den Radialstellungsindex günstiger auswirken (vgl. Kapitel 5).

Bei den Spurkranzhöhen ist mit zunehmender Laufleistung naturgemäss eine ansteigende Tendenz zu beobachten. Diese ist trotz Konditionierung bei den Triebradsätze deutlich höher als bei den Laufradsätzen. Beim Verschleiss in den Bögen besteht gemäss Untersuchungen im Projekt P5 [3] ein direkter Zusammenhang zwischen dem Produkt aus Radsatzlast, Radstand und dem Verschleiss. Allein schon aus diesem Grund in Kombination mit der Traktions- und dynamischen Bremskraft ist

an den Fahrflächen bei den Triebbradsätzen ein deutlich grösserer Verschleiss zu erwarten als bei den Laufradsätzen. Deshalb ist der Verlauf der Spurkranzhöhe über der Laufleistung bei den Triebbradsätzen höher als bei den Laufradsätzen. Die Kraftschlusskräfte werden zwar durch den geringeren Reibwert als Folge der Konditionierung für beide Laufwerkstypen deutlich reduziert. Da jedoch noch immer aus Gründen der Brems- und Traktionstechnik in der Lauffläche ein grösserer Reibwert erforderlich ist als am Spurkranz bleibt hier ein gewisses Mass an verschleisserzeugender Kraftschlusskraft aus dem Bogenlauf übrig.

Beim Verlauf der Spurkranzhöhen in Abbildung 4 bis Abbildung 6 ist bei allen Fahrzeugen aufgrund der zum Teil brüsk abnehmenden Spurkranzhöhen ersichtlich, dass während der Betriebserprobung einige Male reprofiliert werden musste. Dies war auf Flachstellen und auf umlaufende Schädigungen an den Fahrflächen zurückzuführen. Dies untermauert nochmals die obigen Feststellungen zur signifikanten Reduktion des Verschleissindikators aus dem Abtrag des Raddurchmessers in der Messkreisebene, wenn die Reprofilierungen als Folge von Schäden irgendwelcher Art durchgeführt werden müssen. Wie aus den Abbildungen ersichtlich ist kann deshalb der über die maximal zulässige Spurkranzhöhe bei Weitem nicht ausgenutzt werden.

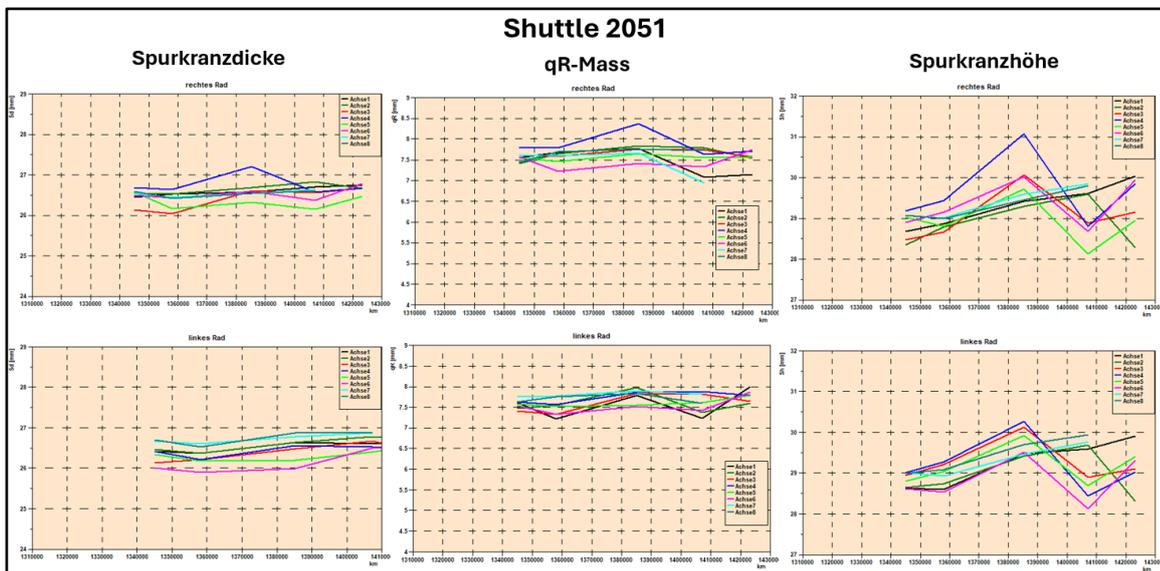


Abbildung 4: Abmessungen am Spurkranz beim Shuttle 2051

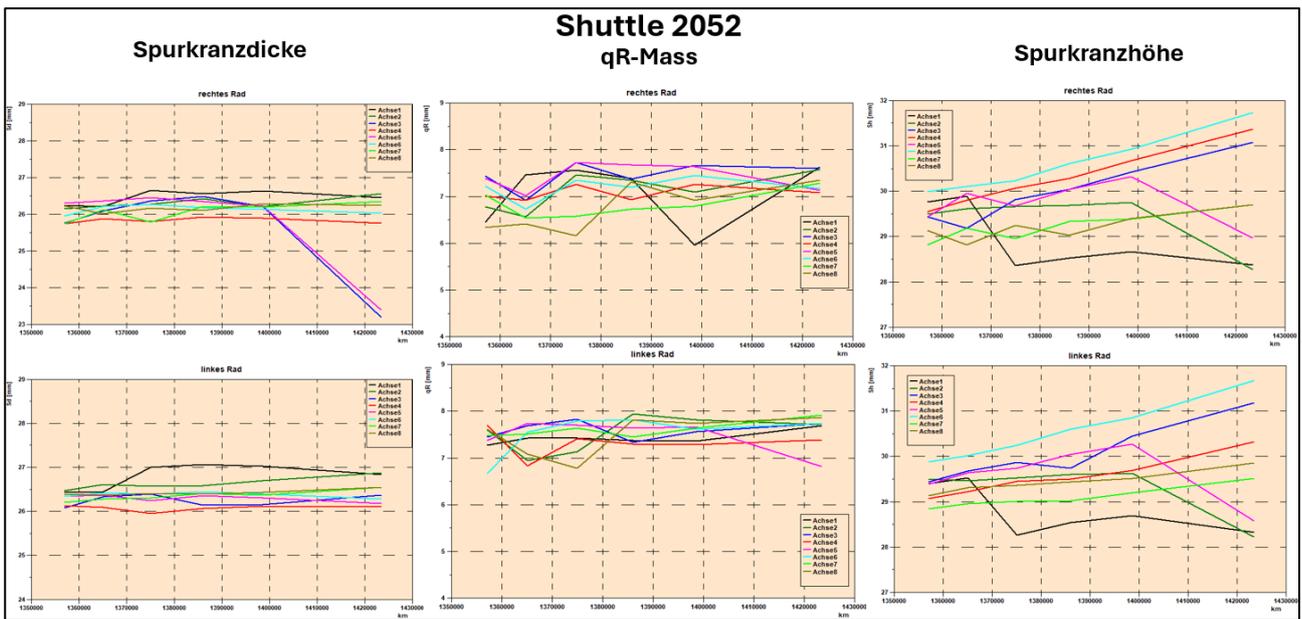


Abbildung 5: Abmessungen am Spurkranz beim Shuttle 2051

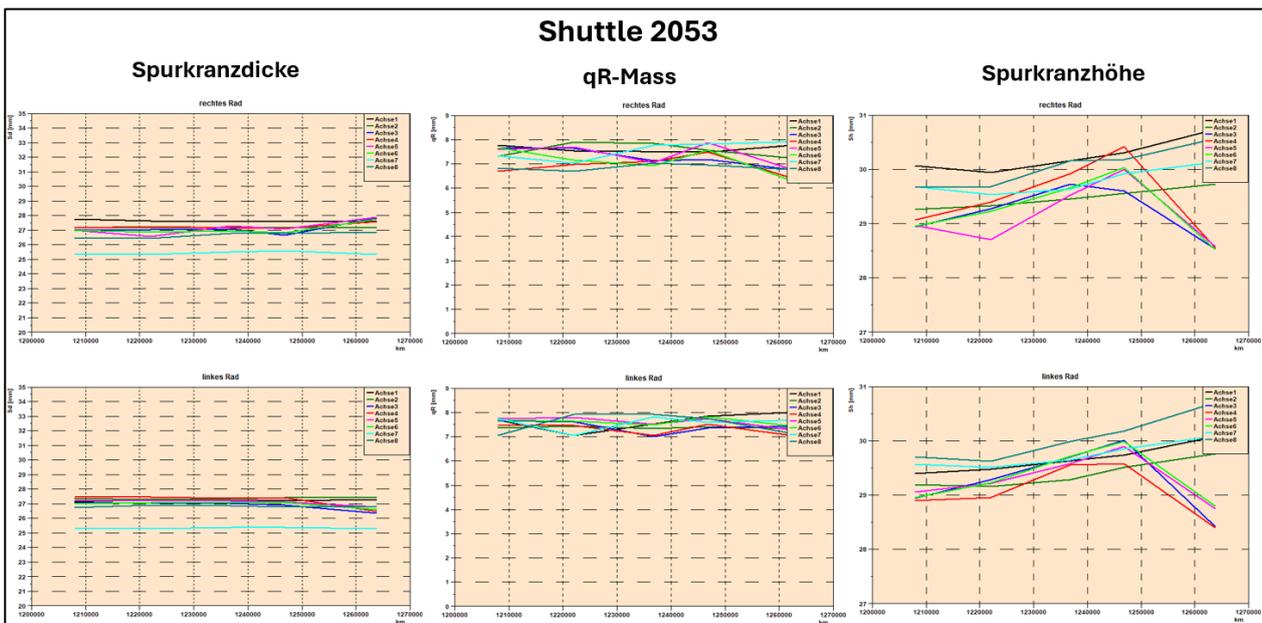


Abbildung 6: Abmessungen am Spurkranz beim Shuttle 2053

3.2.2 Fazit zu den Abmessungen am Spurkranz

Die Spurkranzdicken und die qR-Masse bleiben im Betriebseinsatz entweder nahezu auf dem nominellen Wert oder nehmen leicht zu. Dies dürfte auf die gute Spurkranzschmierung (SKK) zurückzuführen sein. Ob dies auch durch die geringeren Spurführungskräfte zurückzuführen ist muss durch weitergehende rechnerische Untersuchungen sowie durch Auswertung an Fahrzeugflotten abgeklärt werden, welche vorwiegend auf dem übrigen Netz der MGB verkehren. Falls sich dieser Trend erhärtet, so wäre eine Spurkranzschwächung ins Auge zu fassen. Wie bei der Berührungsgeometrie gezeigt wird, hätte dies auch positive Auswirkungen auf den Radialstellungsindex in engen Bögen.

Bei den Triebradsätzen ist ein steilerer Anstieg der Spurkranzhöhen bei den Triebradsätzen gegenüber den Laufradsätzen festzustellen. Dies ist einerseits auf die höhere Radsatzlast in Verbindung mit dem grösseren Radstand und andererseits auf die Traktionskräfte zurückzuführen. Zwischen den verschiedenen Stahlqualitäten bei den Radreifen ist dabei kein Unterschied festzustellen. Beim KVR 600 (Shuttle 2051) ist jedoch eine Schädigung durch Rollkontaktermüdung aufgetreten.

Insgesamt ist festzustellen, dass Reprofilierungen als Folge des Erreichens der maximalen Spurkranzhöhen sowohl bei den Trieb- als auch bei den Laufradsätzen auch nach zweijähriger Betriebszeit nicht erforderlich waren. Das bedeutet aber auch, dass der Verschleissvorrat durch die zulässige Spurkranzhöhe bei den Shuttle derzeit nicht ausgenutzt wird. Bei einem Verschleissindikator von 1mm/20'000km wäre eine sehr hohe Reprofilierungslaufleistung möglich.

3.3 Radunrundheit beurteilt anhand Messanlage im Gleis [4]

Rundheitsabweichungen an den Rädern können unterschiedliche Formen haben. Diese können singulär und damit lokal an einer Stelle des Radumfangs, periodisch über den Radumfang oder stochastisch in Form eines Gemisches aus lokalen und periodischen auftreten. In engen Bögen treten oft insbesondere bei höheren Achslasten periodische Rundheitsabweichungen auf, welche als «Polygone» bezeichnet werden. Da diese durch Kraftschlusskräfte verursacht werden wird davon ausgegangen, dass diese durch die Konditionierung des Rad-Schiene – Kontaktes nicht mehr auftreten. Durch die Verminderung des Kraftschlussbeiwertes durch die Konditionierung besteht die Befürchtung, dass vermehrt Flachstellen auftreten. Um diese beiden Schädigungsarten an den Fahrflächen der Räder zu detektieren, wurde oberhalb und in unmittelbarer Nähe des Bahnhofs Täsch eine Detektionsanlage im Gleis installiert. Diese ist dank «künstlicher Intelligenz» nicht nur in der Lage Schäden zu detektieren, sondern kann darüber hinaus aufgrund der gemessenen Signalform unterscheiden, ob es sich dabei um eine Flachstelle oder um eine Polygonisierung handelt. Während der Betriebsprobung wurden die Shuttle-Triebzüge hinsichtlich des Auftretens dieser beiden Schädigungsformen durch den Anlagenhersteller speziell überwacht. Zudem wurde aus Vergleichsgründen auch der Regelverkehr in die Überwachung einbezogen.

3.3.1 Messanlage Wheel Monitoring System WMS

Die Messanlage zur Radunrundheit (Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies [4], [5]) liefert seit Anfang März 2022 Messwerte zu Polygonen, Flachstellen und allfälligen anderen Schädigungen in der Umfangrichtung an den Radlaufflächen der Räder. Die Gleismessstelle ist kurz nach Täsch auf der Strecke nach Zermatt installiert.



Abbildung 7: Installation des Wheel Monitoring Systems WMS bei der Matterhorn Gotthard Bahn bei Täsch.

Die Gleismessstelle identifiziert ankommende Züge bzw. Fahrzeuge mittels eines Fahrzeugidentifikationssystems. Hierzu wurde das bei der Rhätischen Bahn verwendete Fahrzeugidentifikationssystem implementiert. Im Gleis wurden zwei RFID-Antennen installiert, welche die bei der MGBahn und der Rhätischen Bahn installierten RFID-Tags lesen und damit die Fahrzeuge identifizieren.

Im Gleis integrierte Sensoren erfassen die Schwingungen. Das WMS berechnet aus den Signalen die Schädigungen der Lauffläche. Die Schädigung wird über zwei Indikatoren beschrieben:

- Polygonindikator. Dieser kennzeichnet den Grad der Polygonisierung. Der Wellenlängenbereich der Polygonisierung wurde auf 4 cm – 40 cm festgelegt.
- Flachstellenindikator. Dieser erfasst singuläre Defekte, wie z.B. Flachstellen.

Zur Beurteilung der Schädigung wird für die Indikatoren eine Skala von 0 bis 100 verwendet. Werte unter 20 sind im Allgemeinen unkritisch, Werte zwischen 20 und 40 bedürfen einer Beobachtung des Fahrzeugs, Werte über 40 deuten auf eine signifikante Schädigung hin (Abbildung 8). Diese Skalierung gilt sowohl für die Polygone als auch für die Flachstellen.

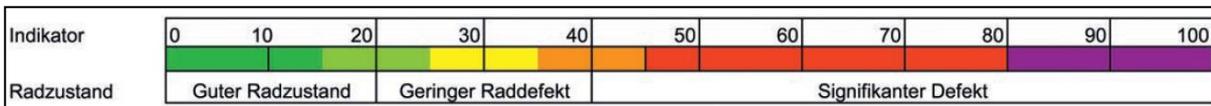


Abbildung 8: Radzustand und zugehörige WMS-Indikatorwerte (WMS = Wheel-Monitoring-System)

Des WMS kann durch eine Vergleichsmessung mit dem Radmessgerät m|wheel kalibriert werden. Dabei werden die Indikatorwerte des WMS genauer eingestellt. Mittels der Kalibrierung können auch Betriebsgrenzwerte bei der MGBahn, ab welchen ein Abdrehen der Räder erfolgen soll, genauer festgelegt werden. Diese Kalibrierung ist bislang nicht erfolgt. Nichtsdestotrotz liefert das WMS auch im nichtkalibrierten Zustand verlässliche Ergebnisse.

Polygone werden in der Regel durch Reprofilierung beseitigt. In extremen Fällen wird ein Radsatztausch durchgeführt. Mit Hilfe der Anlage in Täsch soll überprüft werden, ob sich

- durch die Konditionierung an den Shuttle - Fahrzeugen, als Folge des reduzierten Reibwertes Rad / Schiene, vermehrt Flachstellen gebildet haben.
- die Entstehung und das Wachstum der Polygone vermindert haben.

Die folgenden Abbildungen zeigen exemplarisch die Polygonindikatoren und Flachstellenindikatoren des Shuttles 2051 für ausgewählte Achsen. Orange Punkte kennzeichnen den Zustand der Räder auf der rechten Fahrzeugseite, blaue Punkte den Zustand der Räder auf der linken Fahrzeugseite. Die Software erlaubt die individuelle Ansicht des Zustandes einzelner Räder der Fahrzeuge.

Das rechte Rad an Achse 4 des Shuttle 2051 zeigt eine beginnende Polygonisierung, welche ab ca. Mitte Juni 2022 erkennbar ist und bis zu einem Wert von 25 bis März 2023 anwächst. Am 22. März erfolgte ein Überdrehen der Räder der Achse (erkennbar an der roten vertikalen Linie). Die Polygonisierung wurde dadurch reduziert, bildet sich aber schnell wieder neu. Eine Ursache für die schnelle Neubildung kann eine nicht vollständige Entfernung des Polygons beim Überdrehen sein. Das Polygon wächst bis zu einem Wert von ca. 20 bis zum September 2023 an. Am 21.9.2023 wurde ein neues Drehgestell eingebaut. Die Polygonisierung war damit beseitigt und bildete sich bis zum Ende des Untersuchungszeitraumes auch nicht mehr neu.

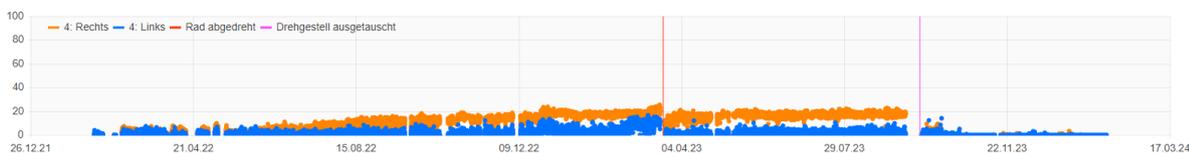


Abbildung 9: Polygonindikator Achse 4 des Shuttles 2051 von März bis Ende 2023.

Am 22.3.2023 wurde die Achse überdreht und am 21.9. wurde ein neues Drehgestell eingebaut.

An den Rädern der Achsen 7 und 8 des Shuttle 2054 traten Anfang Juni 2023 Flachstellen auf, welche sich im weiteren Zeitverlauf begannen zu glätten (Ausrundung der Räder bzw. der Flachstellen mit deren damit verbundenen Glättung). Ende Dezember kam es zu weiteren Flachstellen an den beiden Achsen, welche durch ein Überdrehen der Achsen am 15.2.2023 beseitigt wurden.

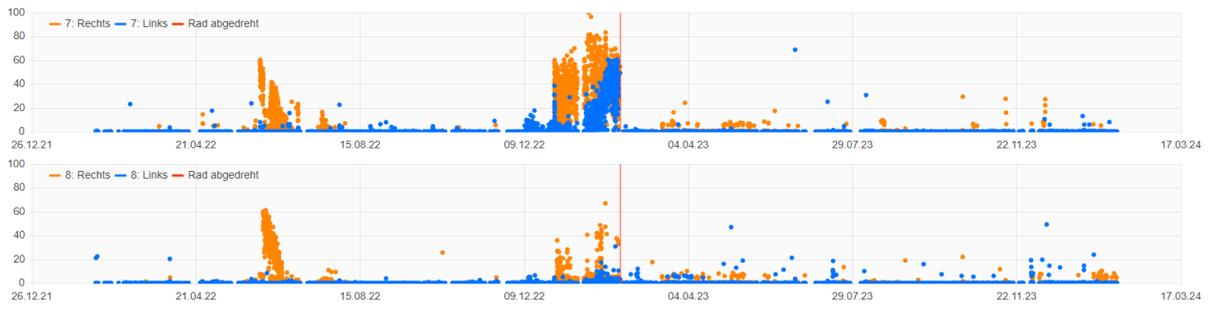


Abbildung 10: Flachstellenindikator Achse 5 und 6 des Shuttles 2054 von März 2022 bis Ende 2023. Am 15.2.2023 wurden beide Achsen überdreht

3.3.2 Polygonisierung (vgl. Anhang 12.6.1)

Die Polygonisierung der

- Shuttle Fahrzeuge (2051 - 2054)
- Komet-Fahrzeuge (2011 – 2014 und 2021 - 2028)
- Gelenksteuerwagen (nicht angetrieben) (2131 - 2134)

wurde ausgewertet. Die Ergebnisse sind für alle Fahrzeuge im Anhang angegeben.

Insgesamt weisen einige Räder aller Fahrzeugtypen im Untersuchungszeitraum leichte Polygone mit Werten von bis zu 20 auf. Es liegt jedoch keine ausgeprägte Polygonisierung vor (Werte>40).

3.3.3 Flachstellen (vgl. Anhang 12.6.2)

Für den Zeitraum 2022, 2023 und speziell die Monate Oktober / November 2023 wurden die aufgetretenen Flachstellen gezählt. Hierbei wurden nur signifikante Flachstellen (hohe Indikatorwerte > 40 über mehrere Messungen hinweg) gewertet. Die ermittelte Anzahl an Flachstellen ist für die verschiedenen Fahrzeugtypen in den folgenden Tabellen angegeben.

Anzahl Flachstellen Komet-Fahrzeuge (2011 – 2014)	Jahr 2022	Jahr 2023	Okt.-Nov. 2023
2011	3	0	0
2012	5	3	1
2013	0	4	0
2014	4	4	0
Anzahl Flachstellen insgesamt	12	11	1
Durchschnittliche Anzahl Flachstellen pro Fahrzeug	3	2,75	0,25

Tabelle 4: Anzahl der Flachstellen an den Komet-Fahrzeugen (2011 – 2014) im Jahr 2022, 2023 und speziell den Monaten Oktober/November 2023

Anzahl Flachstellen Komet-Fahrzeuge (2021 – 2028)	Jahr 2022	Jahr 2023	Okt.-Nov. 2023
2021	0	3	1
2022	3	4	0
2023	2	4	0
2024	2	3	2
2025	1	3	0
2026	1	1	0
2027	1	2	0
2028	4	5	0
Anzahl Flachstellen insgesamt	14	25	3
Durchschnittliche Anzahl Flachstellen pro Fahrzeug	1,75	3,125	0,375

Tabelle 5: Anzahl der Flachstellen an den Komet-Fahrzeugen (2021 – 2028) im Jahr 2022, 2023 und speziell den Monaten Oktober/November 2023

Anzahl Flachstellen Shuttle Fahrzeuge (2051 - 2054)	Jahr 2022	Jahr 2023	Okt.-Nov. 2023
2051	4	4	1
2052	0	2	0
2053	0	3	1
2054	4	3	0
Anzahl Flachstellen insgesamt	8	12	2
Durchschnittliche Anzahl Flachstellen pro Fahrzeug	2	3	0,5

Tabelle 6: Anzahl der Flachstellen an den Shuttle Fahrzeugen (2051 – 2054) im Jahr 2022, 2023 und speziell den Monaten Oktober/November 2023

Anzahl Flachstellen Gelenksteuerwagen (2131 - 2134)	Jahr 2022	Jahr 2023	Okt.-Nov. 2023
2131	0	1	0
2132	1	0	0
2133	2	4	0
2134	2	1	0
Anzahl Flachstellen insgesamt	5	6	0
Durchschnittliche Anzahl Flachstellen pro Fahrzeug	1,25	1,5	0

Tabelle 7: Anzahl der Flachstellen an den Gelenksteuerwagen (2131 - 2134) im Jahr 2022, 2023 und speziell den Monaten Oktober/November 2023

3.3.4 Fazit / Kernaussagen zur Radunrundheit

Die Auswertung der Tabellen ergibt:

- Im Jahr 2023 sind an den Komet-, Shuttle- und Gelenksteuerwagen – Fahrzeugen insgesamt 54 Flachstellen aufgetreten. Im Jahr 2022 betrug die Anzahl an Flachstellen 39. Die Anzahl an Flachstellen hat damit um 15 zugenommen (+38%).
- Die Zunahme der Flachstellen ist vor allem auf die Zunahme bei den Komet-Fahrzeugen 2021-2028 und den Shuttle-Fahrzeugen zurückzuführen.
- Die Komet- und die Shuttle-Fahrzeuge weisen in etwa gleich viele Flachstellen auf (ca. 3 pro Fahrzeug in 2023). Lediglich an den Gelenksteuerwagen treten weniger Flachstellen auf (ca. 1,5 pro Fahrzeug in 2023).
- Bei den Shuttle Fahrzeugen treten die Flachstellen in etwa gleicher Häufigkeit an den Lauf- und Triebachsen auf.
- Bei den regelmässig gemessenen Komet-Fahrzeugen treten die Flachstellen in etwa gleicher Häufigkeit an den Lauf- und Triebachsen auf.
- Die Anzahl an Flachstellen pro Monat war 2023 in den Monaten Oktober und November etwas geringer als in den anderen Monaten. In diesen Monaten wurden erhöhte Reibbeiwerte festgestellt.

Weitere Erkenntnisse sind:

- Flachstellen treten bei den Komet-Fahrzeugen in den Monaten November und Dezember häufiger auf als in den anderen Monaten (siehe als Beispiel Abbildung 11).
- Bei den dreiteiligen Komet-Fahrzeugen traten im Jahr 2022 und 2023 insgesamt 23 Flachstellen auf, davon 8 in den Monaten November und Dezember (35%).
- Bei den vierteiligen Komet-Fahrzeugen waren dies bei insgesamt 39 Flachstellen im Jahr 2022 und im Jahr 2023 16 in den Monaten November und Dezember (41%).
- Bei den Shuttle- und Gelenksteuerwagen-Fahrzeugen ist keine Häufung in den Monaten November und Dezember erkennbar.

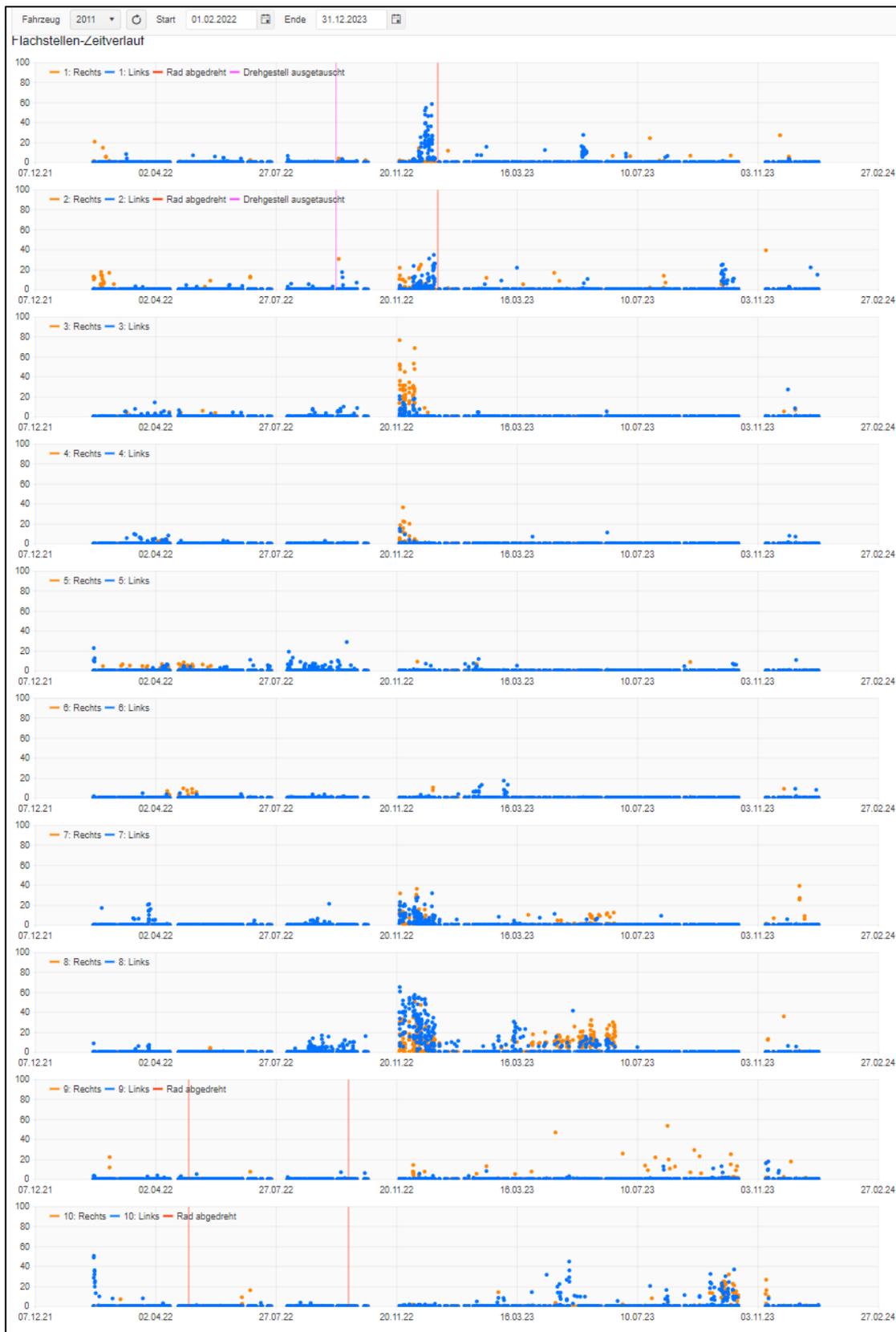


Abbildung 11: Flachstellenindikator des Komet 2021 von März 2022 bis Ende 2023. Flachstellen treten hier überwiegend in den Monaten November und Dezember auf.

Flachstellen werden aktuell ab einem Indikatorwert von 60 und bei Mitteilungen des Fahrpersonals durch Reprofilierung beseitigt. Dies führt jedoch auch dazu, dass Fahrzeuge mit signifikanten Flachstellen über längere Zeiträume noch im Betriebseinsatz verbleiben können (auch aus Kapazitätsgründen der Unterflurdrehbank) und damit die Fahrzeuge mit ihren Komponenten im unabgedeferten Laufwerksbereich sowie die Infrastruktur belasten.

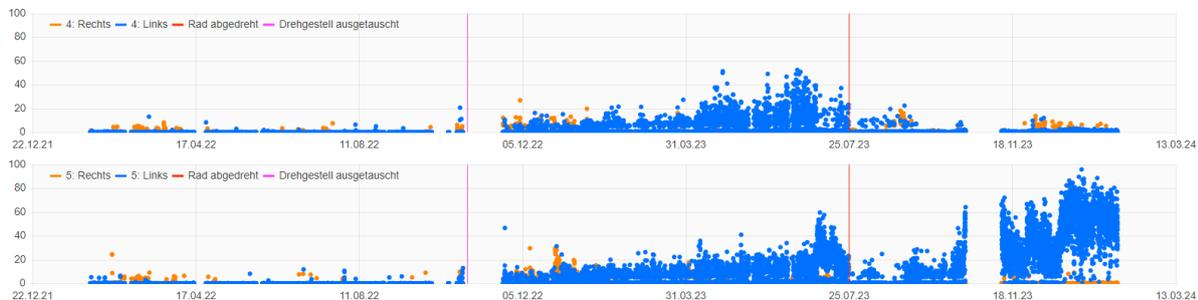


Abbildung 12: Flachstellenindikator Achse 4 und 5 des Shuttles 2053 von März 2022 bis Ende 2023. An beiden Achsen liegen deutliche Flachstellen über einen längeren Zeitraum vor.

Müller BBM Rail Technologies empfiehlt den Indikator – Wert, ab dem ein Rad abgedreht wird auf 40 zu senken und die Räder zeitnah zu überdrehen, um die Fahrzeuge und die Infrastruktur zu schonen. Kleine Flachstellen bleiben dann zwar erhalten, diese verursachen eine geringere Belastung der Infrastruktur und der Fahrzeuge und glätten sich i.d.R. innerhalb eines überschaubaren Zeitraums selbst wieder. Ein Indikatorwert von 40 stellt im Allgemeinen einen guten Kompromiss zwischen der Schädigung infolge der Flachstelle und dem Wartungsaufwand dar.

3.4 Zustand der Radlaufflächen

Die Radlaufflächen wurden bei jeder Radprofilmessung visuell beurteilt. Dabei wurde jedes Rad fotografisch festgehalten und in einer Datenbank abgelegt. Zusätzlich wurden allfällige Fehler im Betriebseinsatz, mit dem in Täsch im Gleis montierten Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies, erfasst (siehe Kapitel 3.3). Wenn Fehler an den Radlaufflächen durch Reprofilierung auf der UFD beseitigt wurden, so wurde dies in den Aufzeichnungen zu den Radprofilmessungen und zu den Reprofilierungsdaten erfasst.

3.4.1 Reprofilierungen

Die Tabelle 8 enthält alle Reprofilierungen, die dabei betroffenen Radsätze und die diesen zugrunde liegenden Ursachen. Die grössten Durchmesserreduktionen ergeben sich dann, wenn Schäden wie beim Shuttle 2051 und 2053 vorlagen. Im Vergleich zu Durchmesserreduktionen wie sie bei grösseren Radsatzlasten in der Normalspur beobachtet werden sind diese hier deutlich beschiedener. Bei den Shuttle 2051 und 2053 haben jeweils Fehler an einem Triebradsatz dazu geführt, dass alle Triebradsätze wegen des Ausgleichs der Raddurchmesser reprofiliert werden mussten. Dies ist eine Folge der durch den elektrischen Antriebsstrang miteinander verbundenen Radsätze. Wie in der Abbildung 1 und Abbildung 3 beobachtet werden kann, hatte dies einen signifikanten Einbruch beim Leistungsindikator Radverschleiss bei den Triebradsätzen zur Folge. Der Shuttle 2052 war zweimal durch Flachstellen betroffen. Das eine Mal beim Triebradsatz Nr. 5 und das zweite Mal beim ersten Laufdrehgestellt. Erstaunlich ist die zum Teil geringe Durchmesserreduktion bei der Beseitigung der Flachstelle.

Beim Shuttle 2051 führten umlaufende Ausbrüche beim Rad 4R zur Reprofilierung und beim Shuttle 2053 Folgeschädigungen durch Muldenbildung wegen des Eingriffs der Bremssohle im Bereich der Hohlkehle beim Radprofil.

Fahrzeug Shuttle Nr.	Datum Reprofilierung	Betroffene Radsätze	Ursache	Reduktion Rad-Durchmesser [mm]	
2051	22.03.2024	Radsatz 4, restliche Triebradsätze ausgeglichen	Starke Ausbrüche an Rädern von Radsatz 4	RS 3L 1.70	RS 3R 2.40
				RS 4L 4.80	RS 4R 3.30
				RS 5L 2.90	RS 5R 3.30
				RS 6L 3.90	RS 6R 3.60
2052	26.06.2023	Radsatz 5	Flachstelle	RS 5L 0.30	RS 5R 0.50
2052	14.08.2023	DG 1 (RS1 und RS2)	Flachstelle	RS 1L 0.70	RS 1R 0.60
				RS 2L 2.40	RS 2R 1.90
2053	25.07.2024	Radsatz 5, restliche Triebradsätze ausgeglichen	Ausbrüche und Kerbe beim Spurkranz durch Bremsklotz RS 5R	RS 3L 3.50	RS 3R 3.90
				RS 4L 5.50	RS 4R 4.10
				RS 5L 4.20	RS 5R 3.50
				RS 6L 3.70	RS 6R 3.40

Tabelle 8: Zusammenstellung der Reprofilierungen

3.4.2 Rollkontaktermüdung Rad 4R beim Shuttle 2051

In Abbildung 13 sind auf der linken Seite zwei Bilder mit jeweils unterschiedlichen Grössen der Ausbrüche im Bereich der Messkreisebene beim Rad 4R des Shuttle 2051 dargestellt. Es handelt sich zwar um umlaufende Rollkontaktermüdung jedoch lokal mit unterschiedlicher Ausprägung. Auf der rechten Seite sind die Risse während des Reprofilierungsvorgangs im stärker geschädigten Bereich noch sichtbar. Die Reprofilierung erfolgte am 22.03.2023.

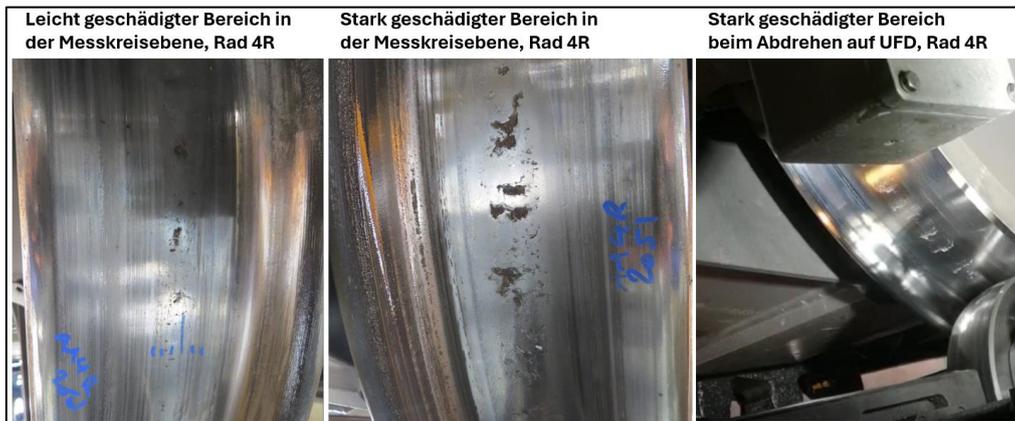


Abbildung 13: Rollkontaktermüdung bei Rad 4R vom Shuttle 2051

Die Abbildung 14 zeigt die für den Bogenlauf massgebenden berührungsgeometrischen Indikatoren des Shuttle 2051 vor der Reprofilierung vom 22.03.2023. Der asymmetrische Verlauf der Δr -Funktion deutet auf eine Differenz der Durchmesser der beiden Räder desselben Radsatzes hin. Aufgrund der Messung der Durchmesser mit dem Calipri – Wheel beträgt dieser 1.4mm. Aufgrund der unterschiedlichen Spurkranzhöhen 1.6mm. Der Radialstellungsindex erfüllt die Anforderungen für den Streckenabschnitt Täschsand bis Zermatt für beide Räder des Radsatzes nicht. Für den Abschnitt Täschsand – Täsch wird dieser nur durch das linke Rad erfüllt. In der Regel wird bei Durchmesserunterschieden das Rad mit dem kleineren Durchmesser geschädigt.

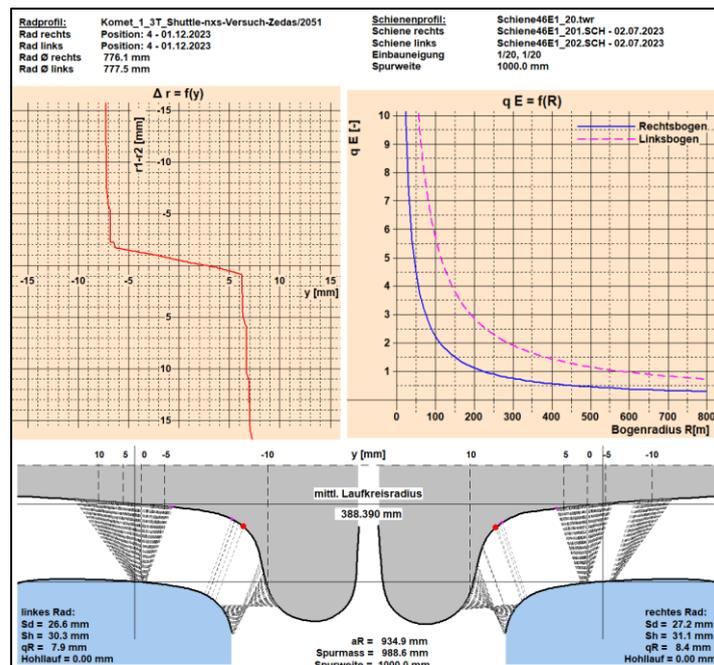


Abbildung 14: Berührgeometrie Radsatz 4 von Shuttle 2051 vor der Reprofilierung

3.4.3 Aufzeichnungen der Messanlage im Gleis zum Shuttle 2051

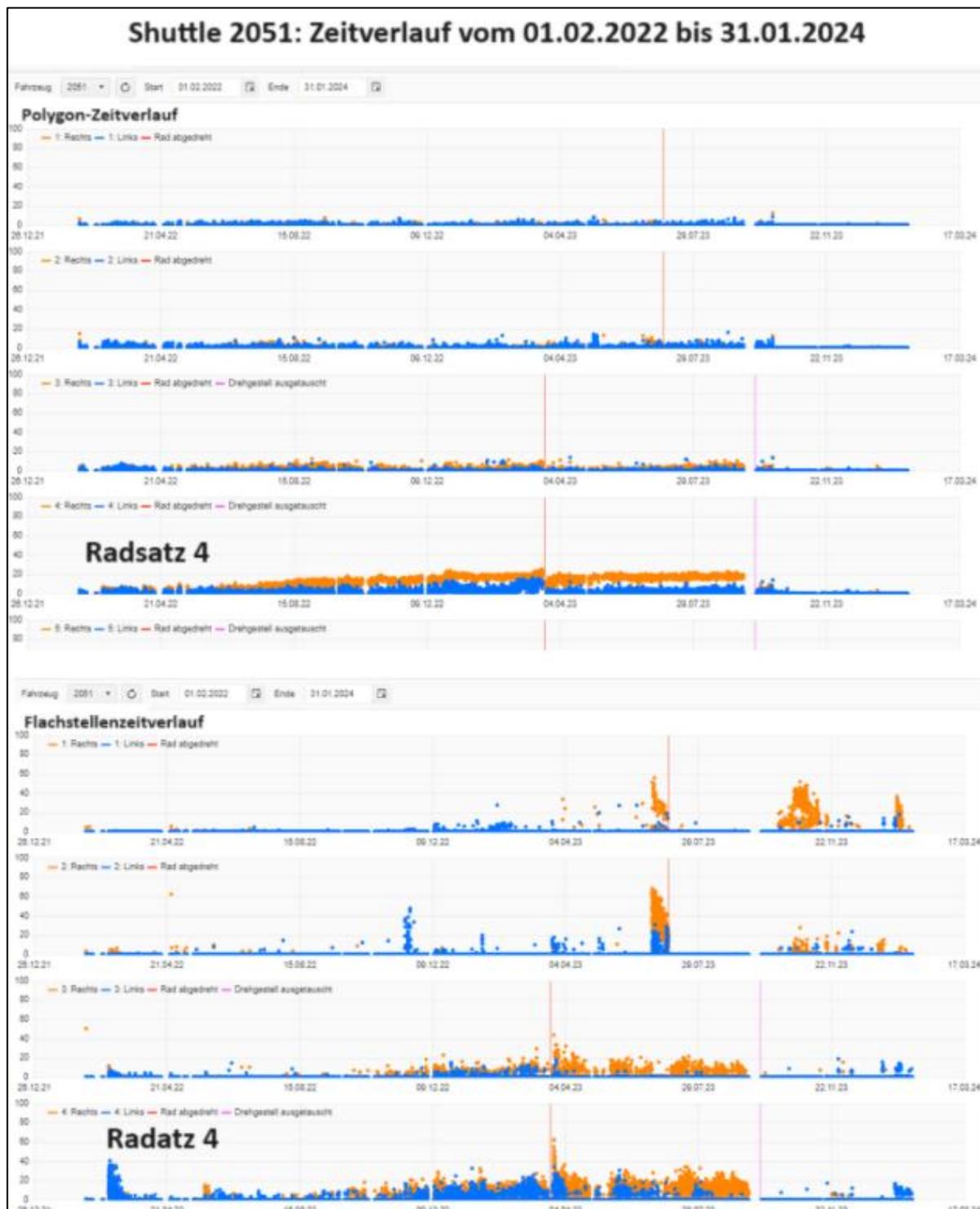


Abbildung 15: Aufzeichnungen Flachstellen und Polygone der Messstelle Wheel Monitoring System WMS Müller BBM an den Radsätzen 1 bis 4 des Shuttle 2051

Die Abbildung 15 enthält die Aufzeichnungen an den Radsätzen 1 bis 4 der Überfahrten des Shuttle 2051 im Zeitraum vom 01.02.2022 bis zum 30.01.2024. Oben in der Abbildung ist der Zeitverlauf der Polygone und unten derjenige der Flachstellen dargestellt. Bei der orangen Punktewolke handelt es sich um die jeweils rechten und bei der blauen um die jeweils linken Räder.

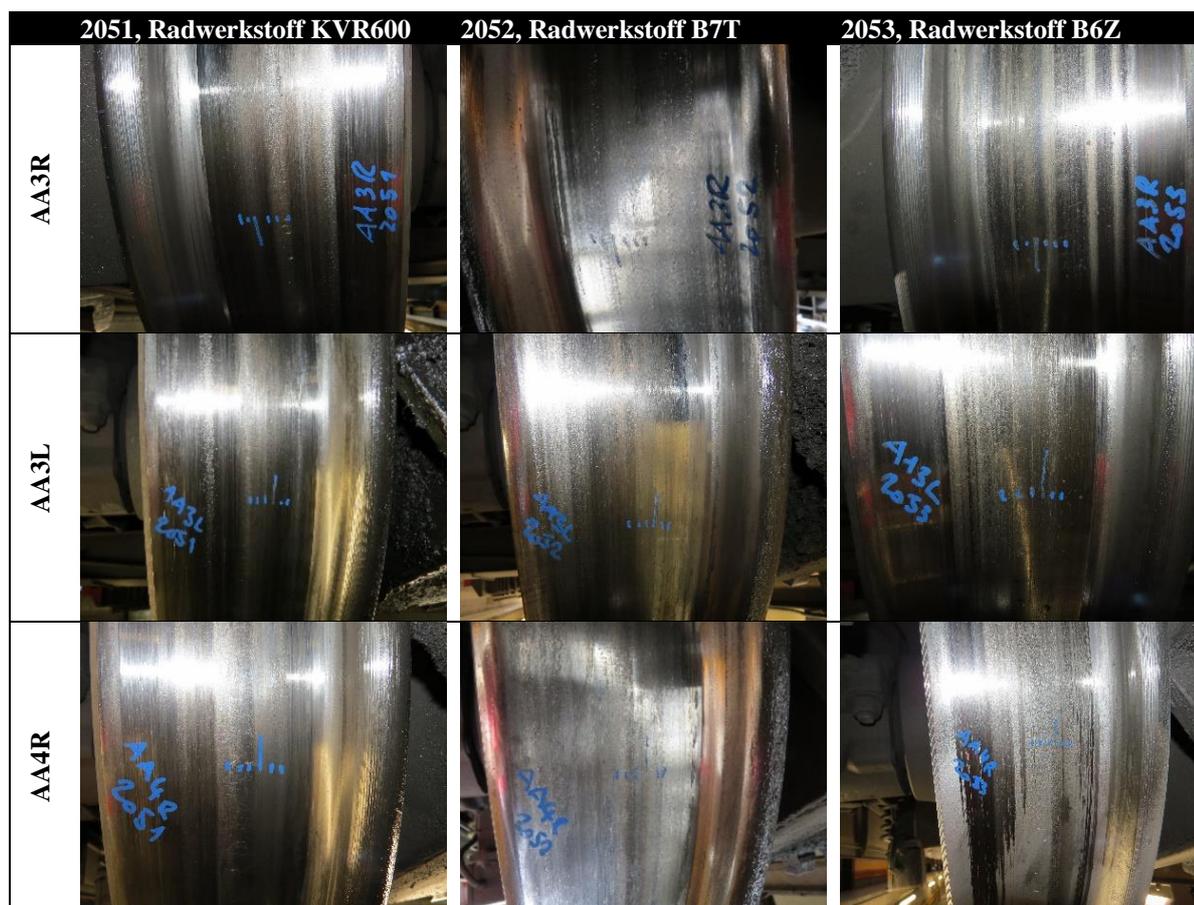
Beim Rad 4R zeigten sich bei den Polygonen schon lange vor dem 22.03.2023 (Zeitpunkt der Reprofilierung) ein Ansteigen der Werte. Nach der Reprofilierung wurden diese zwar reduziert, aber nicht beseitigt. Dafür stellten sich nach dem Reprofilieren sowohl beim dritten als auch beim vierten Rad rechts erhöhte Werte ein. Da der Durchmesser des Rades 4R nach der Reprofilierung (773.7mm) schon nahe am Betriebsgrenzmass lag wurde offensichtlich eine Sparreprofilierung durchgeführt.

Offensichtlich wurde die umlaufende Rollkontaktermüdung als Polygon gedeutet. Da nur die Klassen «Flachstellen» und «Polygone» zur Identifikation der Schadensart zur Verfügung stehen, wurde diese im vorliegenden Falle in Abwesenheit einer Flachstelle den Polygonen zugeordnet. Im vorstehenden Fall wurde damit die umlaufende Rollkontaktermüdung einem Polygon zugeordnet. Dieser Mangel ist auf eine mangelhafte Zusammenarbeit und einen fehlenden Erfahrungsrückfluss zwischen dem Hersteller der Anlage und dem Bahnbetreiber zurückzuführen.

Das System sollte für die zukünftigen Anwendungen entsprechend der Klassifizierung der Rundheitsabweichungen im Lieferobjekt 3.2.1-3 des Projektes P3 erweitert werden.

3.4.4 Fotodokumentation

Die visuellen Kontrollen ergaben insgesamt ein gutes Bild der Fahrflächen der Shuttle – Fahrzeuge. Zur Veranschaulichung ist in Tabelle 9 die jeweils aktuelle Fotodokumentation je Shuttle und Triebtrieb aufgeführt. Hier zum Nachweis, dass kaum sichtbare Schädigungen vorhanden sind. Insgesamt waren die Radlaufflächen aufgrund der durch die MGB erstellten Fotodokumentation während der gesamten Verlängerung der Betriebserprobung in einem einwandfreien Zustand.



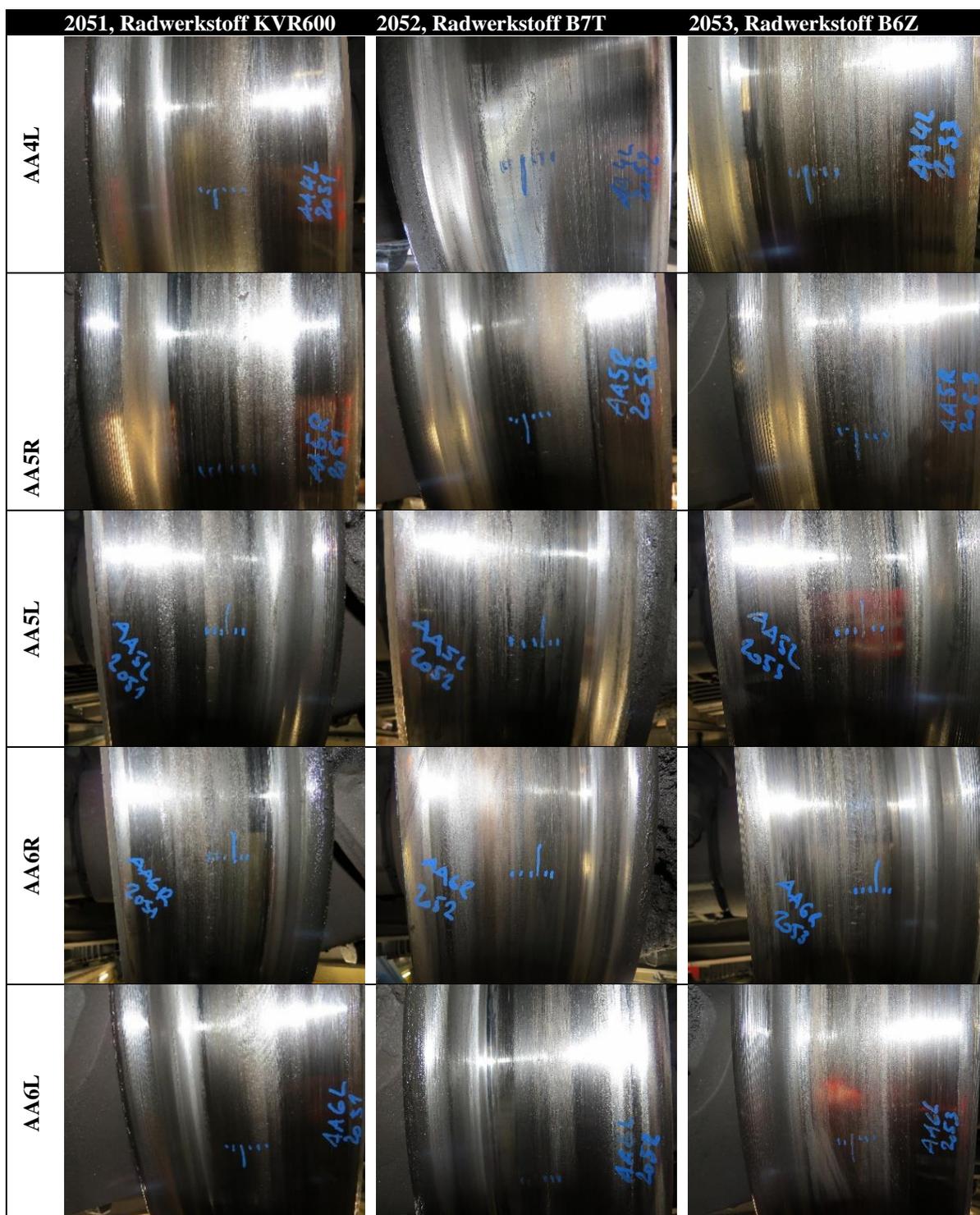


Tabelle 9: Fotodokumentation der Shuttle Triebräder nach längerer Laufleistung

3.4.5 Anmerkungen zum Zustand der Radlaufflächen

Die Radlaufflächen zeigen überwiegend einen sehr guten Zustand. Bei den Radwerkstoffen B6Z und B7T sind keine Schädigungen aufgrund von Rollkontaktermüdung aufgetreten. Beim Fahrzeug 2051 mit dem Radwerkstoff KVR600 ist beim Rad 4R rund 114'000km seit der letzten Reprofilierung RCF aufgetreten. Aufgrund der beiden blanken Stellen über den Radumfang, welche auf die Interaktion mit den Bremssohlen zurückzuführen sind, bildet sich im dazwischen liegenden Radlaufflächenbereich eine leichte Mulde aus. Diese verfügt über eine grössere Rauigkeit als die durch die Bremssohlen interagierten Bereiche.

4 Messergebnisse zu den Schienen

Um die Auswirkungen auf die Schiene beurteilen zu können, werden die verschiedenen erfassten Werte zu den Schienen untersucht. Dazu gehören die Rauheit der Schiene (vgl. Kapitel 4.1), der abrasive Schienenverschleiss (vgl. Kapitel 0) und Reibwertmessungen (vgl. Kapitel 0).

Definition Verschleiss an den Schienen

Als Verschleiss an den Schienen wird der Materialabtrag, an den mit der Schiene in Kontakt stehenden Fahrflächen der Schienen bezeichnet. Dabei wird zwischen dem kontinuierlichen Verschleiss in der Gleislängsrichtung im Querprofil (Kurzzeitverhalten) und den Schlupfwellen insbesondere auf den Fahrflächen der bogeninneren Schienen (Langzeitverhalten) unterschieden. Im Weiteren wird der Verschleiss als Folge von Schädigungen an den Fahrflächen betrachtet (singulär als Schleuderstellen, Rissen (Headchecks oder lokalen Ausbrüchen). Die Beseitigung von Schlupfwellen und kleineren Rissen in einem Frühstadium erfolgt durch Schienenschleifen was ähnlich wie die Reprofilierung bei den Rädern ebenfalls als Verschleissabtrag betrachtet werden kann. Bei tieferen Schädigungen werden jedoch die Schienen ausgewechselt und durch sogenannte Coupons ersetzt.

Im Gegensatz zu den Rädern, bei welchen sich der Verschleiss aus einem Gemisch aus verschiedenen Trassierungsbereichen zusammensetzt, ist der Verschleiss bei den Schienen neben der Streckenbelastung (in der Regel als Bruttotonnen pro Jahr charakterisiert) und den Interaktionseigenschaften der Fahrzeuge (Spurführung, Traktion) insbesondere von den Gegebenheiten der Trassierung abhängig. Wie die Erfahrung bei der MGBahn gezeigt hat, zeigt die verwendete Schienenhärte einen signifikanten Einfluss auf die Bildung von Schlupfwellen insbesondere in den Bögen mit kleinen Bogenhalbmessern. Die besonderes überwachten Bögen bei der Betriebserprobung mit SKK verfügen über eine Schienenhärte von 350HB.

Neben dem Schienenersatz bei Erreichen der Grenzwerte der die Schienenfestigkeit beeinträchtigenden Grössen W1, W2 und W3 sowie von grösseren lokalen Schädigungen entstehen vor allem grössere Aufwendungen durch die Beseitigung der Schlupfwellen durch das Schienenschleifen. Diese treten vor allem an den bogeninneren Schienen in den Bögen mit kleineren Bogenhalbmessern auf. In der Zeit vor Anwendung der SKK mussten die Schienen auf dem Streckenabschnitt Täsch-Zermatt mit den sehr kleinen Bogenhalbmesser als Folge von übermässiger Schlupfwellenbildung zwei Mal jährlich geschliffen werden.

4.1 Messung Rauheit der Schiene [6]

Die drei Bögen oberhalb Kalter Boden, in welchen die Rauheitsmessungen durchgeführt wurden, verfügen über sehr kleine Bogenhalbmesser mit Radien im Bereich von 100m und liegen im nicht aktiv konditionierten Streckenabschnitt.

Es wird grundsätzlich zwischen Streckenbereichen im aktiv konditionierten Bereich und solchen im verschleppten Bereich unterschieden. Das Verschleppen findet sowohl bei der Talfahrt als auch bei der Bergfahrt statt. Alle Messstellen befinden sich im verschleppten Bereich. Bei Zum Biel (Brücke und Portal) liegen die Messstellen deutlich weiter vom aktiv konditionierten Bereich entfernt als in Lügelwang (vgl. Abbildung 34 und Tabelle 10). Trotz dieses Sachverhaltes unterscheiden sich an den drei Messstellen die mit dem Tribometer erfassten Reibwerte in der Regel kaum voneinander (siehe Kapitel 0).

Die Messung der Schienenrauheit erfolgt mit einem geeigneten Messgerät (Beschreibung siehe Anhang 12.3). Dieses wird per Hand durch den Bogen geschoben und misst dabei mit drei Messaufnehmern die vertikale Variation des Schienenkopfes relativ zu einer gleitenden Referenz. Dadurch wird die Rauheit auf drei Spuren mit einem Abstand von 5mm zueinander gemessen. Eine Auswertung der Messdaten erfolgt gemäss EN 15610 [7].

Die Schienenrauheitsmessungen erfolgen in den folgenden Bögen:

Ort	SKK	Radius	Von [km]	Bis [km]
Zum Biel Portal	Ja	110	41.951	41.941
Zum Biel Brücke	Ja	110	42.053	42.025
Lüegelwang	Ja	95	42.556	42.5197

Tabelle 10, Ausgewählte Bögen für Schienenrauheitsmessungen

4.1.1 Entwicklung der Schienenrauheit [6]

Die betrachteten Bögen wurden zuletzt im Oktober 2022 geschliffen. Im Jahr 2023 fanden die Schienenrauheitsmessungen zu den in Tabelle 11 definierten Zeitpunkten statt.

Bezeichnung in Legende	Datum	Beschreibung	Bemerkung
T1	25.05.2023	8 Monate nach dem Schleifen	
T2	03.08.2023	10 Monate nach dem Schleifen	
T3	30.08.2023	11 Monate nach dem Schleifen	
T4	22.09.2023	12 Monate nach dem Schleifen	

Tabelle 11 : Zeitpunkte der Schienenrauheitsmessungen im Jahr 2023

Um einen Vergleich zwischen dem Schlupfwellenwachstum in dieser und den vorherigen Messperioden herzustellen werden weitere Messungen herangezogen. Dafür werden die finalen Rauheitsmessungen vor dem Schienenschleifen im Jahr 2018 und 2022 betrachtet. Erstere dient zum Vergleich des Schlupfwellenwachstums vor dem Einsatz von SKK und zweitere als Vergleich des Wachstums zu der vorherigen Messperiode, in der bereits SKK eingesetzt wurde. Weitere Informationen zu den Messungen sind in der folgenden Tabelle 12 zusammengefasst.

Bezeichnung in Legende	Datum	Beschreibung	Bemerkung
Ohne SKK - 2018	23.05.2018	8 Monate nach dem Schleifen	
Mit SKK - 2022	27.09.2022	12 Monate nach dem Schleifen	

Tabelle 12: Zeitpunkte der Schienenrauheitsmessung vor 2023

Gemäss EN 15610 wird die Rauheit der Schiene als Pegel der akustischen Rauheit L_r in dB angegeben und in einem Terzbandspektrum als Funktion der Wellenlänge λ dargestellt. Diese wird aus dem Spektrum der akustischen Rauheit, mit einem Bezugswert der Rauheit von 1 μm , berechnet. In den betrachteten Bögen wurde zu den in Tabelle 11 angegebenen Zeitpunkten mehrere Messungen durchgeführt. Die in den folgenden Diagrammen dargestellten Messungen beziehen sich auf die erste Messung der mittleren Spur des Messgeräts (mittlerer Sensor im Fahrspiegel) an dem bogeninneren und bogenäusseren Schienen. In den Legenden wird neben der Bezeichnung der Messungen (T1-T4) ebenfalls angegeben ob SKK eingesetzt wurde und wie viele Monate nach dem letzten Schleifen die Messung durchgeführt wurde (8M = 8 Monate nach dem Schleifen). Bei der Auswertung ist zu erkennen, dass sich die Rauheit der Schiene aus einer Vielzahl von Wellenlängen zusammensetzt. Von Interesse sind jedoch nur jene, welche sich durch die Grössenordnung ihrer Amplitude am ehesten über der EN ISO 3095 Grenzkurve liegen und in dieser Messperiode am stärksten gewachsen sind. Diese werden in den betrachteten Bögen identifiziert und von nun an als dominante Wellenlängen bezeichnet.

4.1.1.1 Zum Biel Portal

Schlupfwellenmessungen an der bogeninneren Schiene, siehe Abbildung 16, zeigen 12 Monate nach dem letzten Schleifen Schlupfwellen in einem Wellenlängenbereich von 50-63mm. Diese liegen erst knapp über der EN ISO 3095 Grenzkurve und weisen damit ein langsames Wachstum verglichen mit den vergangenen Messperioden auf. Weiters ist zu erkennen, dass die Schlupfwellen mit einer Länge von 50mm genauso ausgeprägt sind wie mit 63mm. Dies führt den Trend der vorherigen Messperiode fort, bei der ebenfalls eine Änderung der dominanten Wellenlängen seit dem Einsatz von SKK zu einem niedrigeren Wellenlängenbereich festgestellt wurde.

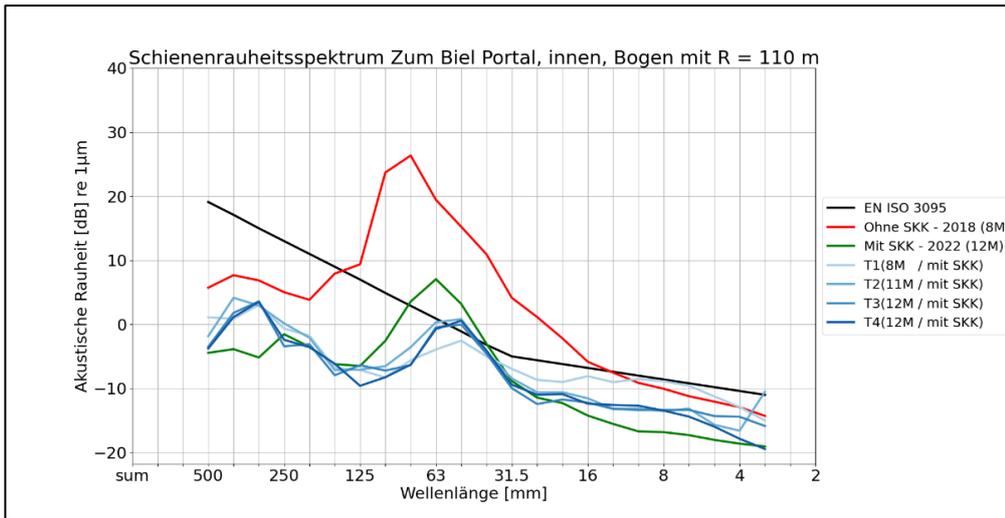


Abbildung 16: Schienenrauheitsspektren «Zum Biel Portal», bogeninnen

Mit dem Einsatz von SKK ist kein Schlupfwellenwachstum an der bogenäusseren Schiene erkennbar. Diese kann, entsprechend der Auswertung in Abbildung 17, als glatt bezeichnet werden.

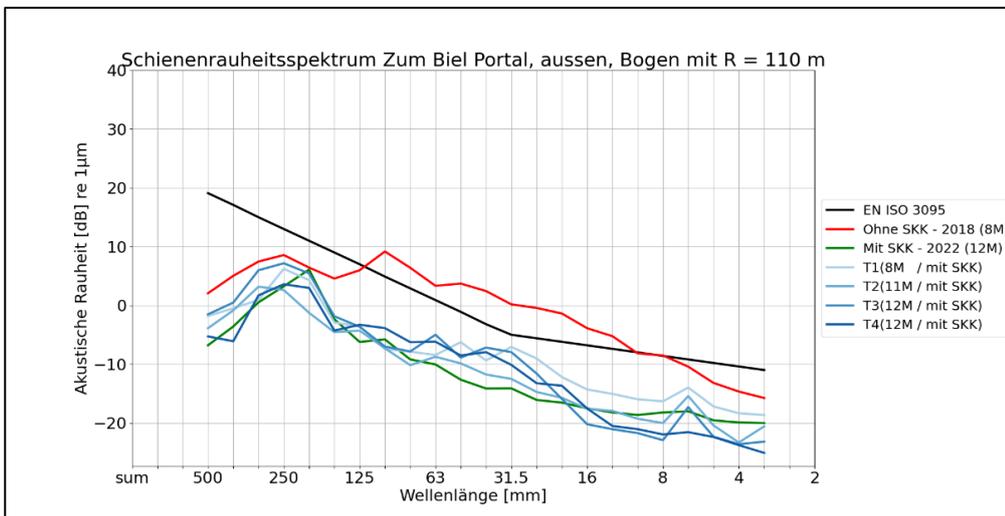


Abbildung 17: Schienenrauheitsspektren «Zum Biel Portal», bogenaussen

4.1.1.2 Zum Biel Brücke

Schlupfwellenmessungen an der bogeninneren Schiene zeigen 12 Monate nach dem letzten Schleifen Schlupfwellen in einem Wellenlängenbereich von 40-80mm, siehe in Abbildung 18. Dabei sticht aber vor allem das Wachstum der Schlupfwellen in dem Wellenlängenbereich von 40-50mm hervor. Diese wachsen über die gesamte Messperiode stetig bis sie sich deutlich über der EN ISO 3095 Grenzkurve befinden, während sich die Schlupfwellen in dem Bereich von 63-80mm nicht verändern. Da keine Nullmessung nach dem Schleifen im Oktober durchgeführt wurde kann nicht beurteilt werden, ob diese durch das letzte Schleifen vollständig entfernt wurden. Dies führt den Trend der vorherigen Messperiode fort, bei der ebenfalls eine Änderung der dominanten Wellenlängen seit dem Einsatz von SKK zu einem niedrigeren Wellenlängenbereich festgestellt wurde. Auch in diesem Bogen ist ein langsames Wachstum verglichen mit den vergangenen Messperioden erkennbar.

Der bei fast allen Schienenrauheitsspektren insbesondere bei den bogenäusseren Schienen sichtbare Peak im Terzband von 6.3mm ($\lambda < 1\text{cm}$) ist eine Folge des Schienenschleifens mit den rotierenden Schleifscheiben. Dieser Ausschlag wird mit zunehmender Überrollung geglättet. Dafür ist die Schiene anschliessen im kurzwelligen Bereich $\lambda < 4\text{cm}$ deutlich rauer.

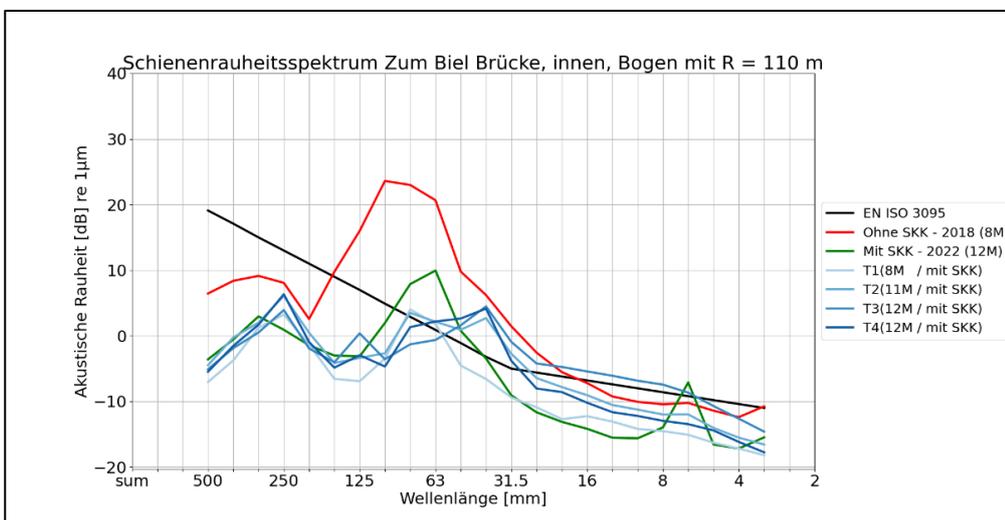


Abbildung 18 : Schienenrauheitsspektren «Zum Biel Brücke», bogeninnen

Mit dem Einsatz von SKK ist kein Schlupfwellenwachstum an der bogenäusseren Schiene erkennbar. Diese kann, entsprechend der Auswertung in Abbildung 19, als glatt bezeichnet werden.

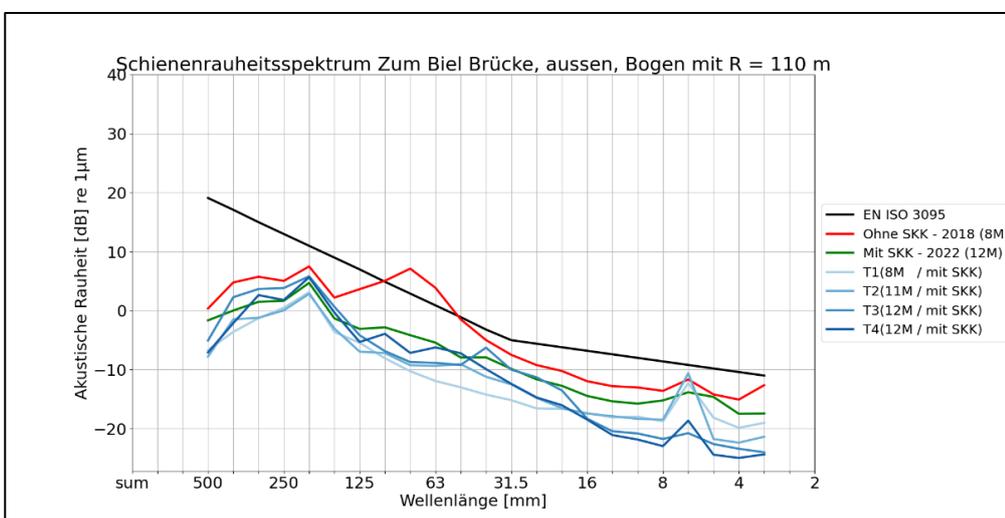


Abbildung 19: Schienenrauheitsspektren «Zum Biel Brücke», bogenäussen Lügelwang

4.1.1.3 Lüegelwang

Schlupfwellenmessungen an der bogeninneren Schiene zeigen 12 Monate nach dem letzten Schleifen Schlupfwellen in einem Wellenlängenbereich von 63-80mm, siehe Abbildung 20. Damit verbleiben die dominanten Schlupfwellen in dem gleichen Wellenlängenbereich wie in den vorherigen Messperioden. Wie auch in dem Bogen Zum Biel Portal liegen die Schlupfwellen auch in diesem Bogen nur knapp über der EN ISO 3095 Grenzkurve und weisen damit ein langsames Wachstum verglichen mit allen vergangenen Messperioden auf. Dies entspricht einer deutlichen Verbesserung in der Minderung des Wachstums durch SKK, da in der letzten Messperiode mit SKK das beinahe idente Wachstum wie im nicht konditionierten Zustand erreicht wurde.

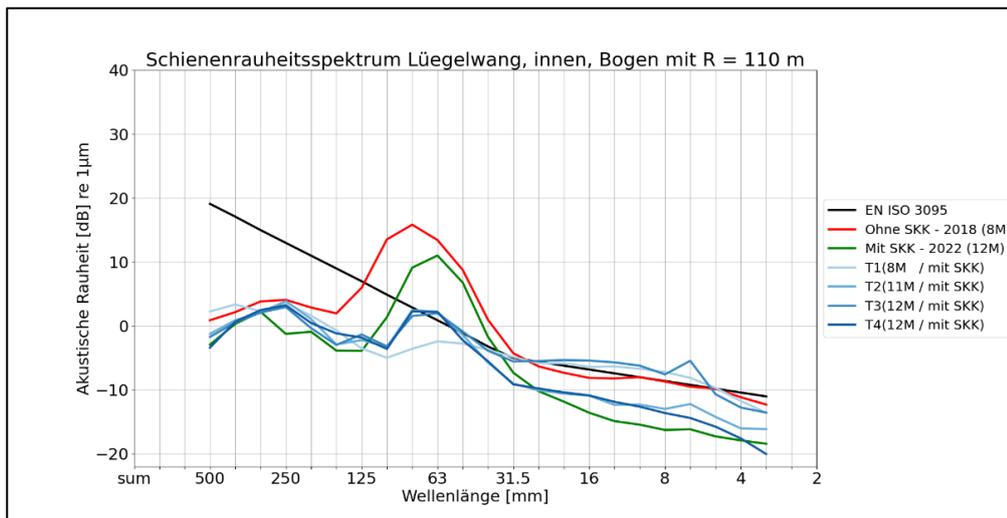


Abbildung 20: Schienenrauheitsspektren «Lüegelwang», bogeninnen

Mit dem Einsatz von SKK ist kein Schlupfwellenwachstum an der bogenäusseren Schiene erkennbar. Diese kann, entsprechend der Auswertung in Abbildung 21, als glatt bezeichnet werden.

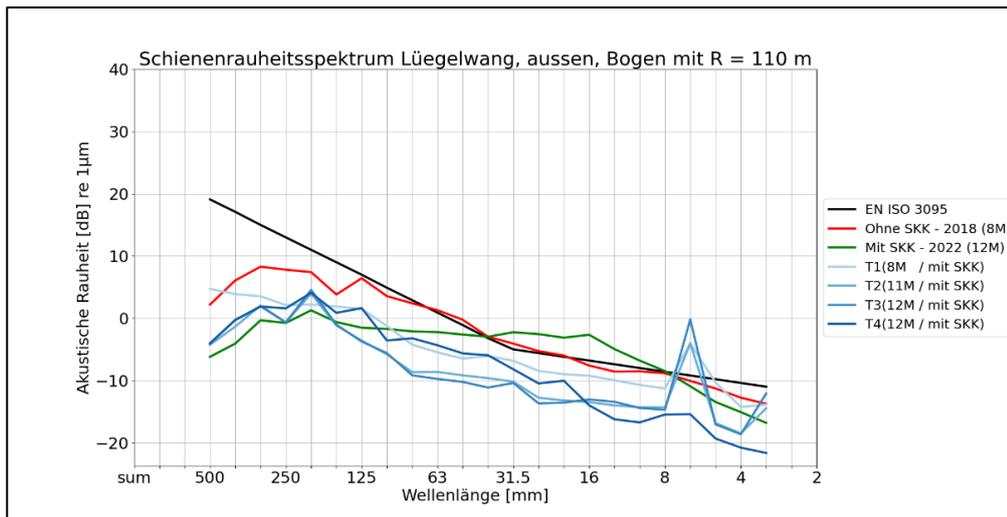


Abbildung 21: Schienenrauheitsspektren «Lüegelwang», bogenaussen

4.1.1.4 Anmerkungen Entwicklung der Schienenrauheit

Vergleicht man die Ergebnisse mit den Messungen aus der vorherigen Messperiode, so kann festgestellt werden, dass sich in den Bögen Zum Biel Portal und Zum Biel Brücke der Bereich der dominanten Schlupfwellenlängen weiter zu geringeren Wellenlängen verschoben hat. Ein Grund für diesen Trend kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht genannt werden, soll aber durch zukünftige Untersuchungen näher beleuchtet werden. Weiters ist das Wachstum der Schlupfwellen 12 Monate nach dem Schleifen in allen Bögen deutlich geringer als in der vorherigen Messperiode, in der ebenfalls SKK eingesetzt wurde. Damals nahm das Wachstum der Schlupfwellen in den heissen Sommermonaten deutlich zu. Da die Messungen der Schlupfwellen im Jahr 2023 nicht in den gleichen Abständen durchgeführt wurden ist eine Beurteilung der Änderung der Wachstumsrate über das Jahr nicht möglich. Diese Beurteilung erfolgt anhand der Messungen der Beschleunigungen mit dem Messsystem von Technode (siehe Kapitel 7).

Da nach dem letzten Schleifen im Oktober 2022 keine Nullmessung durchgeführt wurde kann nicht beurteilt werden, ob die in der Messperiode 2021-2022 entwickelten Schlupfwellen vollständig entfernt werden konnten.

Eine Zusammenfassung der dominanten Wellenlängen ist in Tabelle 13 gegeben. Da in den betrachteten Bögen nicht nur eine dominante Wellenlänge vorliegt, wird die Wellenlänge, welche am deutlichsten über der ISO EN 3095 Grenzkurve liegt, als λ_1 angegeben und die zweithöchste als λ_2 .

Ort	Radius [m]	λ_1 [mm]	λ_2 [mm]
Zum Biel Portal	110	50	63
Zum Biel Brücke	110	40	50
Lüegelwang	95	63	80

Tabelle 13: Dominante Wellenlängen in den betrachteten Bögen

4.1.2 Formation von Schlupfwellen [6]

Die Formation von Schlupfwellen ist ein konstantes Frequenz Phänomen (engl. constant-frequency phenomena [8]). Dies bedeutet, dass die Variation der Reibarbeit, oder einer anderen für den Verschleiss relevanten physikalischen Grösse, mit einer konstanten Frequenz für die Entstehung von Oberflächenunregelmässigkeiten mit einer bestimmten Wellenlänge verantwortlich ist. Diese Variation resultiert aus der Anregung einer Resonanzfrequenz einer Systemkomponente. Der Zusammenhang aus angeregter Frequenz und resultierender Wellenlänge ist dabei durch

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [8]$$

gegeben, wobei λ die Wellenlänge, v die Fahrzeuggeschwindigkeit und f die Frequenz darstellt. Welche Resonanzfrequenz welcher Systemkomponente angeregt wird ist durch die Literatur nicht eindeutig beschrieben. Das ist auch nicht möglich, da je nach Fahrzeug- und Gleistyp die relevanten Komponenten auch unterschiedliche Eigenfrequenzen aufweisen können. Hauptsächlich wird auf die ersten Torsions- und Biegemoden der Radsätze verwiesen, aber auch auf Schwingungen der Schiene in vertikale oder laterale Richtung. Anhand der unter Kapitel 6 beschriebenen Inertanzmessungen der Radsätze und der Schiene, wird in diesem Kapitel versucht einen Frequenzbereich zu identifizieren, in dem sich die Moden befinden, welche für die Ausbildung der Schlupfwellen in den betrachteten Bögen verantwortlich sein könnten.

Bei der Festlegung der betrachteten Frequenzen sind einige Punkte zu beachten. Da die Schlupfwellen nicht mit einer konstanten Wellenlänge auftreten, sondern sich in einem Bereich bewegen wird auch hier ein Frequenzbereich berechnet. Weiters kommt dazu, dass zwar eine Fahrzeuggeschwindigkeit für die Bögen vorgegeben wird, in der Realität Fahrzeuge jedoch auch mit geringeren Geschwindigkeiten durch diese Bögen verkehren. Dies kann wiederum zu einer Vergrösserung, theoretisch aber auch Verkleinerung, des betrachteten Frequenzbereichs führen. Da die tatsächliche Verteilung der Geschwindigkeiten nicht bekannt ist wird mit der vorgegebenen

Fahrzeuggeschwindigkeit gerechnet. Weiters wurde die Auswertung der Wellenlängen gemäss EN 15610 in einem Terzbandspektrum durchgeführt. Dies bedeutet, dass alle Wellenlängen innerhalb eines Terzbandes zusammengefasst werden. Die Information, ob sich die tatsächliche Wellenlänge der Schlupfwelle am unteren oder oberen Ende des Terzbandes befindet, geht dabei verloren, was zu einer weiteren Streuung des Frequenzbereichs führt. Auch wenn diese Einflüsse in der Auswertung in diesem Bericht noch nicht berücksichtigt werden, werden diese trotzdem erwähnt, um aufzuzeigen, dass noch einige Unsicherheiten vorliegen. Die aus den in Tabelle 13 angeführten Wellenlängen λ_1 und λ_2 werden folgend in Frequenzen umgerechnet, welche den betrachteten Frequenzbereich der Mobilitätsanalyse abstecken (siehe Tabelle 14).

Ort	Fahrzeuggeschwindigkeit [km/h]	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]
Zum Biel Portal	38	211	167
Zum Biel Brücke	38	263	211
Lüegelwang	38	167	131

Tabelle 14: Grenzen des betrachteten Frequenzbereichs

Die Grenzen des betrachteten Frequenzbereichs werden durch die maximalen und minimalen Werte von f_1 und f_2 mit 131-263 Hz bestimmt. Weiters wird angemerkt, dass wie in Kapitel 4.1.1.4 erwähnt, in den vergangenen Messperioden Schlupfwellen mit grösseren Wellenlängen auftraten, was gemäss Gleichung 1 aus geringeren Frequenzen resultiert. In diesem Bericht wird der Fokus auf die Messperiode im Jahr 2023 gelegt, siehe Messungen T1-T4 in Tabelle 11.

4.1.3 Inertanzmessungen

Zur Beurteilung der potenziell angeregten Systemkomponenten, werden die Inertanzmessungen herangezogen. Durch das Abstecken des betrachteten Frequenzbereichs aus der in Tabelle 14 angegebenen Frequenzen kann ermittelt werden, ob sich Resonanzfrequenzen der unterschiedlichen Systemkomponenten innerhalb dieser Grenzen befinden. Die in den folgenden Diagrammen dargestellten Frequenzgänge zeigen die Inertanz (Beschleunigung/Anregungskraft) der Trieb- und Laufradsätze des Fahrzeugtyps «Komet», sowie der Schiene in dem Bogen «Zum Biel Brücke». Der obig definierte Frequenzbereich wird durch schwarze strichlierte Linien markiert. Weiters ist anzumerken, dass für die dargestellten Frequenzgänge die Beschleunigungen in dieselbe Richtung wie die Kraftanregung ausgewertet wurden.

4.1.3.1 Laufradsatz

Die Inertanzmessung des Laufradsatzes bei einer Anregung in laterale Richtung ist in Abbildung 22 gegeben. Diese zeigt einen deutlich ausgeprägten Peak bei ca. 200Hz, was mit grosser Wahrscheinlichkeit einer Biegemode des Radsatzes entspricht.

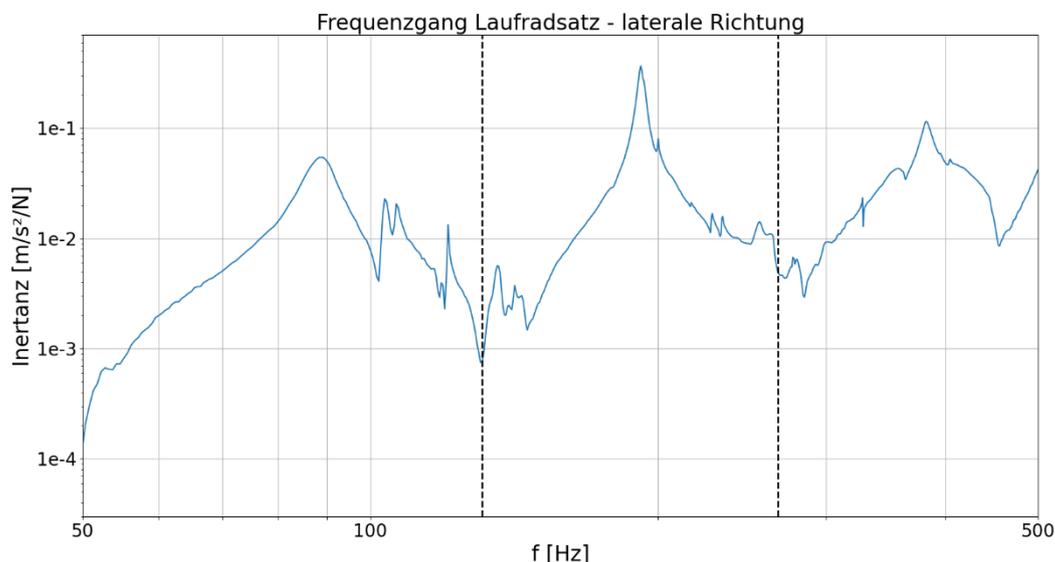


Abbildung 22: Frequenzgang eines Laufradsatzes durch eine Anregung in laterale Richtung

Der Frequenzgang des Laufradsatzes bei einer Anregung in Umfangsrichtung, siehe Abbildung 23, zeigt einen kleinen Peak in dem betrachteten Frequenzbereich. Da dieser jedoch bei derselben Frequenz wie die ausgeprägte Biegemode in Abbildung 22 liegt, ist dies wahrscheinlich ein Resultat aus einer Biegeschwingung, welche aus dem Hammerschlag in Umfangsrichtung resultiert und keine Torsionsschwingung.

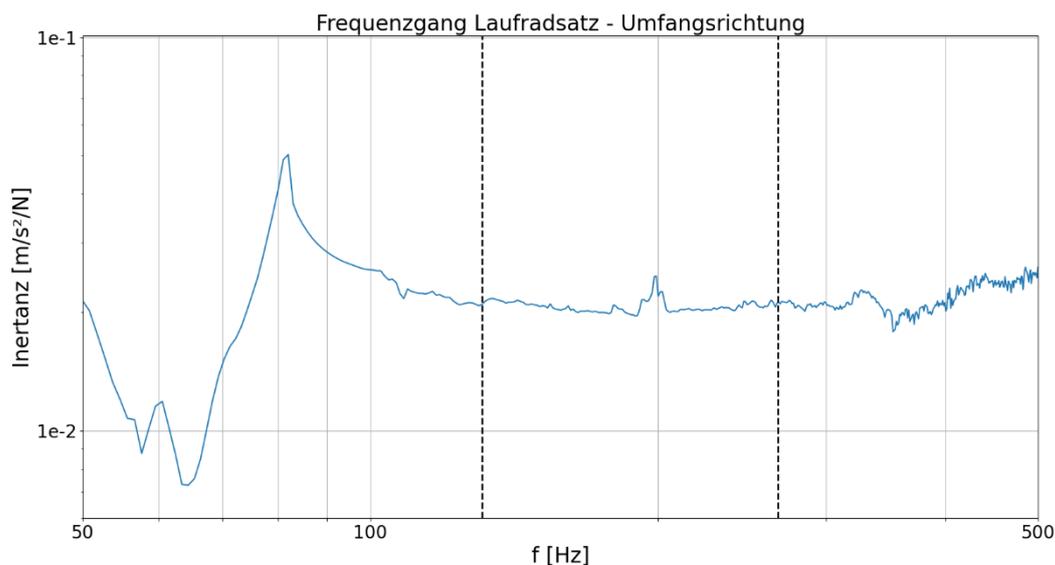


Abbildung 23: Frequenzgang eines Laufradsatzes durch eine Anregung in Umfangsrichtung

4.1.3.2 Triebradsatz

Die Inertanzmessungen des Triebradsatzes zeigen bei einer Anregung in laterale Richtung keine deutlich ausgeprägten Resonanzfrequenzen, siehe Abbildung 24. Da die Messungen an der Triebachse mit angezogener Bandbremse durchgeführt wurden, ist eine daraus resultierende Beeinflussung der Messergebnisse sehr wahrscheinlich, weswegen eine Beurteilung des Einflusses der Biegemoden des Triebradsatzes zu diesem Zeitpunkt nicht möglich ist.

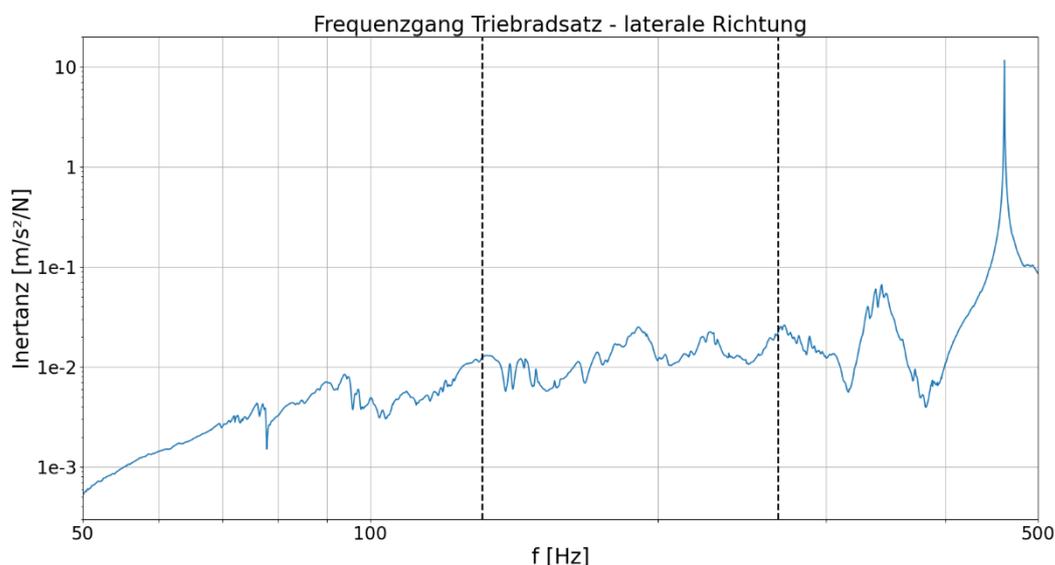


Abbildung 24: Frequenzgang eines Triebradsatzes durch eine Anregung in laterale Richtung

Auch bei dem Frequenzgang des Triebradsatzes bei einer Anregung in Umfangsrichtung, siehe Abbildung 25, ist eine Beurteilung des Einflusses der Torsionsmoden des Triebradsatzes zu diesem Zeitpunkt nicht möglich.

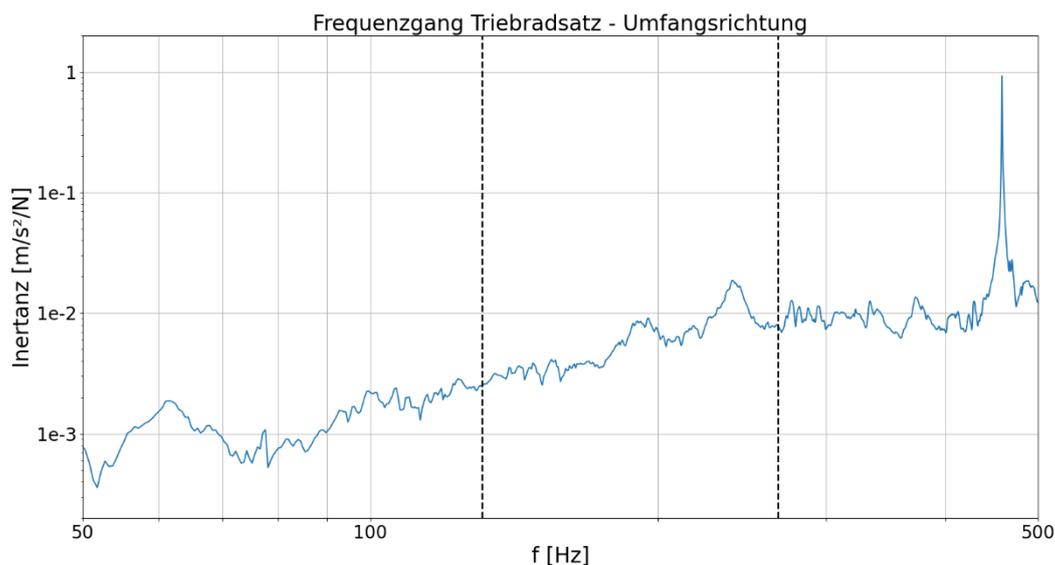


Abbildung 25: Frequenzgang eines Triebradsatzes durch eine Anregung in Umfangsrichtung

4.1.3.3 Schiene über der Schwelle

Die Inertanzmessungen an der Schiene über der Schwelle zeigen bei einer Anregung in vertikale Richtung keinen ausgeprägten Peak in dem betrachteten Frequenzbereich, siehe Abbildung 26.

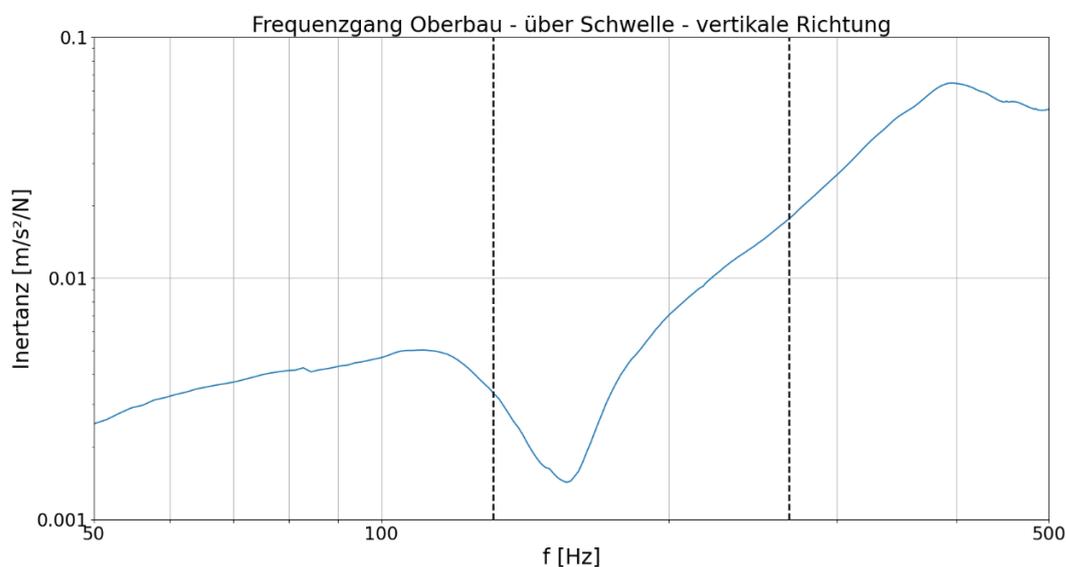


Abbildung 26: Frequenzgang der Schiene über einer Schwelle durch eine Anregung in vertikale Richtung

Der Frequenzgang bei einer Anregung in laterale Richtung zeigt mehrere schwach ausgeprägte Peaks in dem betrachteten Frequenzbereich. Diese sind in Abbildung 27 abgebildet und liegen in der Grössenordnung nur gering unter jenen des Laufradsatzes, jedoch höher als bei einer Anregung der Schiene in vertikale Richtung.

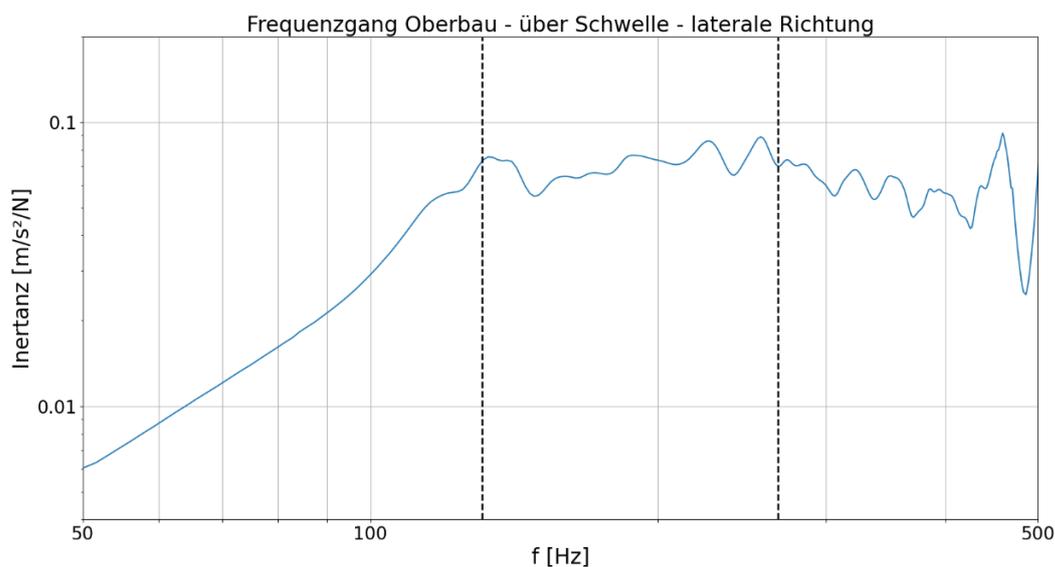


Abbildung 27: Frequenzgang der Schiene über einer Schwelle durch eine Anregung in laterale Richtung

4.1.3.4 Schiene zwischen den Schwellen

Die Inertanzmessungen an der Schiene zwischen den Schwellen zeigen sehr ähnliche Ergebnisse wie jene über der Schwelle, Kapitel 4.3.3. Der Frequenzgang bei einer Anregung in vertikale Richtung, siehe Abbildung 28, zeigt keine ausgeprägten Peaks in dem betrachteten Frequenzbereich.

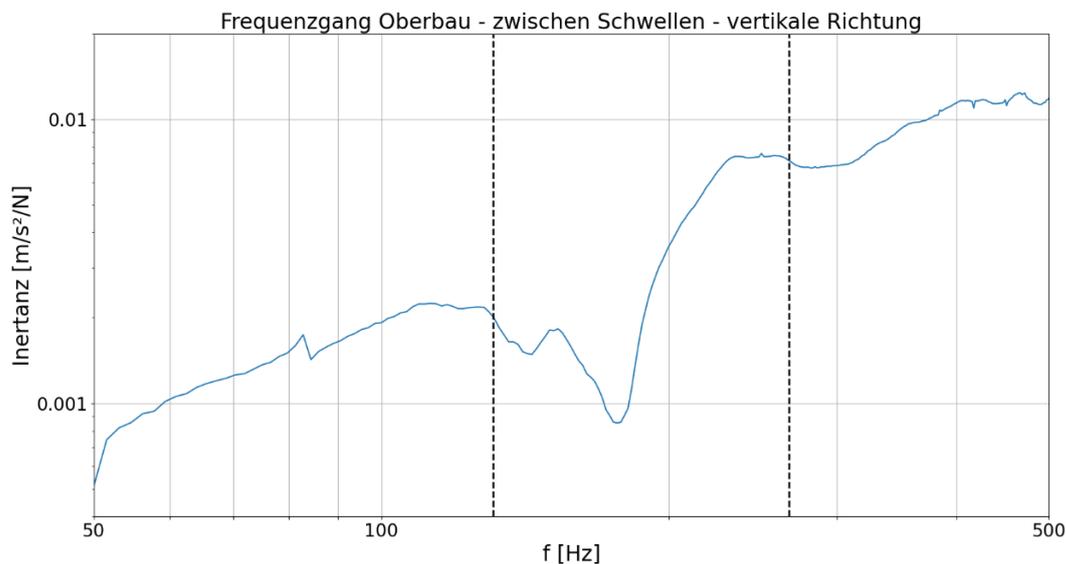


Abbildung 28: Frequenzgang der Schiene zwischen den Schwellen durch eine Anregung in vertikale Richtung

Ebenso bei einer Anregung in laterale Richtung, siehe Abbildung 29, ist ein ähnlicher Verlauf wie an der Schiene über den Schwellen erkennbar.

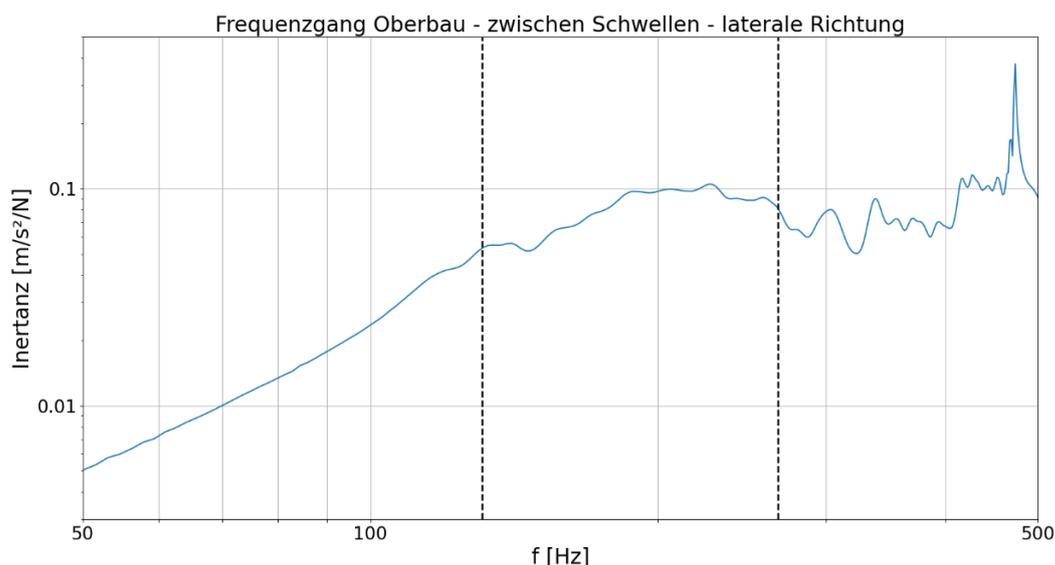


Abbildung 29: Frequenzgang der Schiene zwischen den Schwellen durch eine Anregung in laterale Richtung

4.1.3.5 Anmerkungen zu den Inertanzmessungen

Aus den Frequenzgängen des Oberbaus und der Radsätze können Resonanzfrequenzen dieser Systemkomponenten identifiziert werden. Einige davon befinden sich innerhalb des Frequenzbereiches, innerhalb dessen jene Eigenmoden vermutet werden, welche für die Formation der Schlupfwellen in den betrachteten Bögen verantwortlich sind. Der Laufradsatz weist eine ausgeprägte Biegemode knapp unter 200Hz auf und der Oberbau mehrere weniger ausgeprägte Moden in lateraler Richtung. Weiters kann an dem Triebradsatz in dem betrachteten Frequenzbereich kein ausgeprägter Resonanzpeak erkannt werden. Da bei der Vermessung von diesem jedoch die Bandbremse angezogen war, ist eine Beurteilung des Einflusses des Triebradsatzes mit diesen Messungen leider nicht möglich. Sollte dieser über ähnlich ausgeprägte Resonanzpeaks wie der Laufradsatz verfügen, ist dessen Beteiligung an der Ausbildung der Schlupfwellen aufgrund der höheren Achslast sehr wahrscheinlich.

4.1.4 Auswirkung der Schlupfwellen im Betrieb [6]

In diesem Kapitel werden die in Kapitel 6 beschriebenen akustischen Messungen und Vibrationsmessungen an der Schiene bei einer Überfahrt im Bogen «Zum Biel Brücke» ausgewertet. Die Messergebnisse in diesem Kapitel stammen aus den Versuchen im Oktober 2023, und zwar während der Versuchsphase ohne Konditionierung der Schiene. Dabei liegt der Fokus auf dem Einfluss der Schlupfwellen auf der im Betrieb gemessene Grössen. Die Ergebnisse der Messungen werden als Spektrogramme wiedergegeben, um aufzuzeigen, mit welchen Frequenzen die Schiene bei einer Überfahrt vibriert und ob Geräuschemissionen im Zusammenhang mit den Schlupfwellen erkannt werden können. Die gezeigten Auswertungen beziehen sich auf Messungen vom 19.10.2023 um 12:48 bei einer Überfahrt zwei zusammengeschlossener dreiteiliger Fahrzeuge (Komet und Shuttle). Dabei sind die einzelnen Drehgestelle der Fahrzeuge deutlich zu erkennen (vertikales Muster). Dies wird in Abbildung 30 aufgezeigt, bei der die Vibration der Schiene zwischen zwei Schwellen bei einer Überfahrt dargestellt ist.

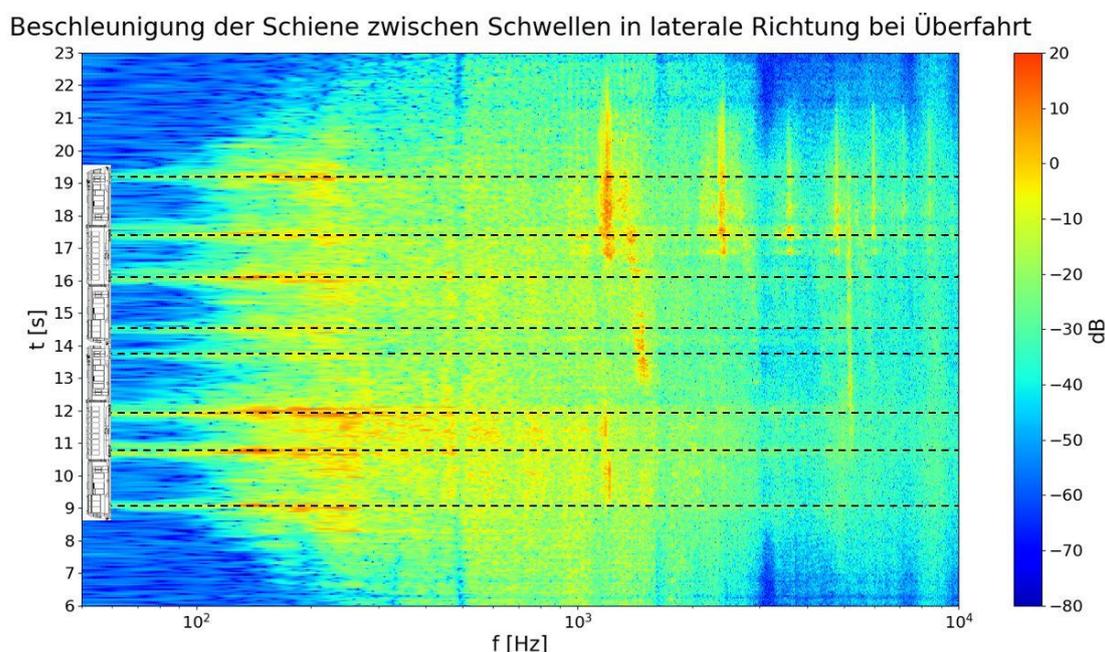


Abbildung 30: Vibration der Schiene zwischen zwei Schwellen bei der Überfahrt der einzelnen Drehgestelle

Die Messungen fanden 27 Tage nach der Schlupfwellenmessung T4 in diesem Bogen statt. Aus diesem Grund kann angenommen werden, dass die Schlupfwellen zwar gering gewachsen sind, jedoch in demselben Wellenlängenbereich vorliegen. Während in Kapitel 4.1.1 jene Wellenlängen betrachtet wurden, welche in dem Zeitbereich der letzten Messperiode am stärksten gewachsen sind (40-50mm), um Rückschlüsse auf die Ursachen deren Formation zu ziehen, sind in diesem Kapitel alle ausgeprägten Wellenlängen in diesem Bogen und deren Auswirkungen auf den Betrieb von Interesse. Dies umfasst laut Abbildung 16 alle Schlupfwellen in einem Wellenlängenbereich von 40-80mm. Bei einer Überfahrt mit 38 km/h entspricht dies einem Frequenzbereich von 131-263Hz. Dieser Frequenzbereich ist in den folgenden Abbildungen durch strichlierte Linien optisch hervorgehoben.

4.1.5 Vibration der Schiene zwischen den Schwellen

Die Auswertung des Beschleunigungssensors in lateraler Richtung, welcher auf dem Schienenkopf zwischen den Schwellen angebracht wurde, zeigt bei der Überfahrt eine Schwingung der Schiene mit mehreren Frequenzen. Bestimmte Frequenzen werden dabei über einen längeren Zeitbereich angeregt und sind in Abbildung 31 als vertikale Streifen ersichtlich. Ein Beispiel dafür ist die in Abbildung 31 rot umrandete Frequenz von 450Hz, bei der ein ausgeprägter Resonanzpeak der Schiene zwischen den Schwellen (Abbildung 29) und des Triebradsatzes (Abbildung 24) liegt. Diese befinden sich jedoch alle ausserhalb des durch die zwei vertikalen schwarzen Linien markierten für Schlupfwellen relevanten Frequenzbereichs.

Innerhalb des markierten Bereichs in Abbildung 31 ist eine Vibration der Schiene deutlich erkennbar, jedoch nur zu den diskreten Zeitpunkten, in denen ein Drehgestell über die Messposition fährt. Weiters ist ersichtlich, dass die Vibration der Schiene nicht bei einer einzelnen Frequenz auftritt, sondern sich über einen Frequenzbereich erstreckt, welcher sehr genau durch den betrachteten Bereich abgesteckt wird. Obwohl die Überfahrt einer Oberflächenunregelmässigkeit zu einer Anregung in vertikaler Richtung führt, kann damit ebenfalls eine Anregung in laterale Richtung erklärt werden. Die Variation der Normalkraft resultiert ebenfalls in einer Variation der Schlupfkräfte, welche in Querrichtung in engen Bögen besonders gross sind. Dies lässt auf eine Anregung durch die Schlupfwellen bei der Überfahrt zurückschliessen.

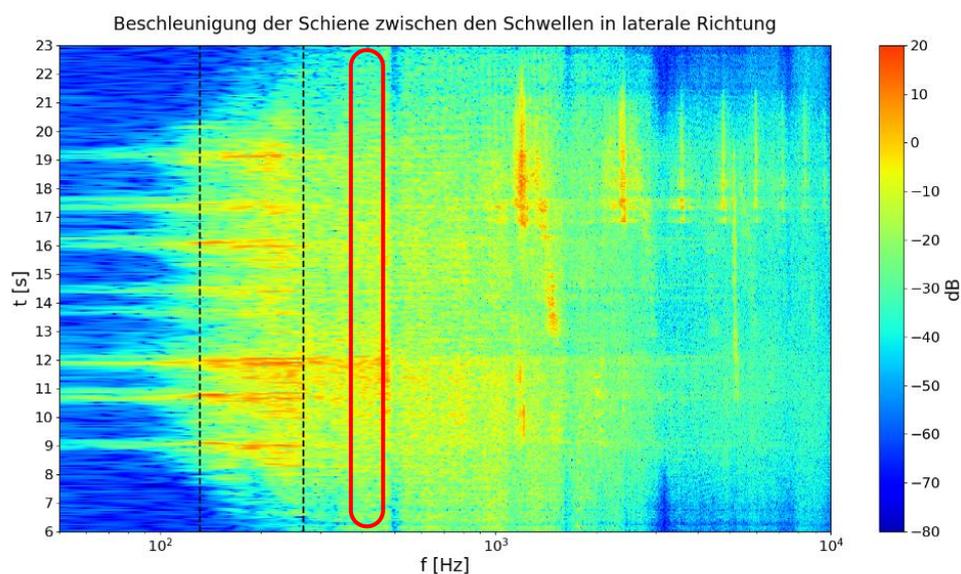


Abbildung 31: Beschleunigung der Schiene zwischen den Schwellen in laterale Richtung

Eine Auswertung desselben Beschleunigungssensors in vertikale Richtung (Abbildung 32) zeigt eine beinahe idente Vibration der Schiene wie in lateraler Richtung. Dies kann dadurch erklärt werden, dass Normal- und auch Schlupfkraft mit derselben Frequenz variieren. Die geringere Amplitude der Vibration kann durch den Vergleich der Inertanz der Schiene in vertikale und laterale Richtung, siehe Kapitel 0, erklärt werden. Diese weist in dem betrachteten Frequenzbereich eine deutlich höhere Inertanz in laterale Richtung auf, was zu einer entsprechend höheren Schwingungsamplitude in diese Richtung resultiert.

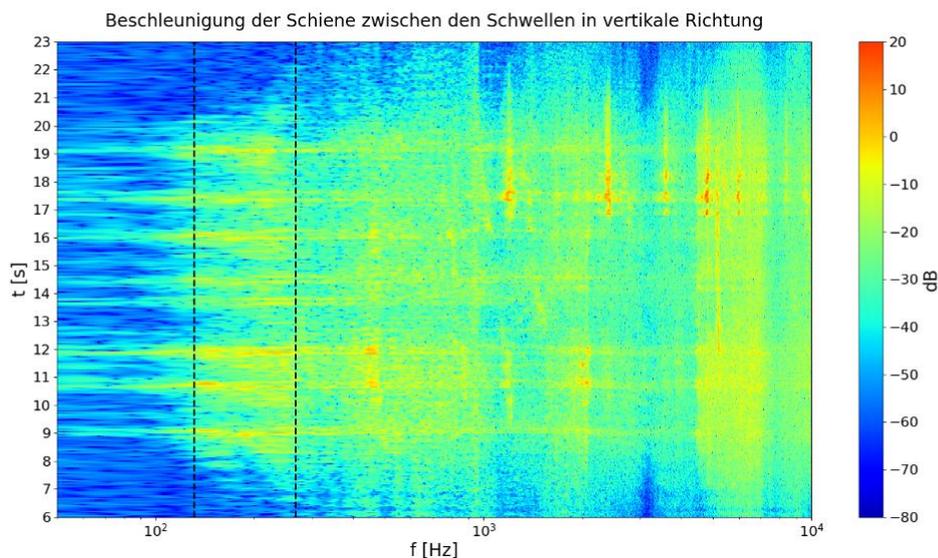


Abbildung 32: Beschleunigung der Schiene zwischen den Schwellen in vertikaler Richtung

4.1.6 Schallemission

Bei der Aufzeichnung der Schallemission an der bogeninneren Schiene am 19.10.2023 um 12:48 (Abbildung 33) zur Untersuchung von Kurvenkreischen können auch Geräusche im niederfrequenten Bereich untersucht werden. Diese zeigen ebenfalls innerhalb des abgesteckten Frequenzbereichs deutlich erkennbaren Lärm, welcher auf die Überrollung der Schlupfwellen rückzuführen ist. Die Schallpegel ist vor allem bei der Überfahrt der Triebdrehgestelle besonders ausgeprägt, was auf die höhere ungedeferte Masse zurückzuführen ist.

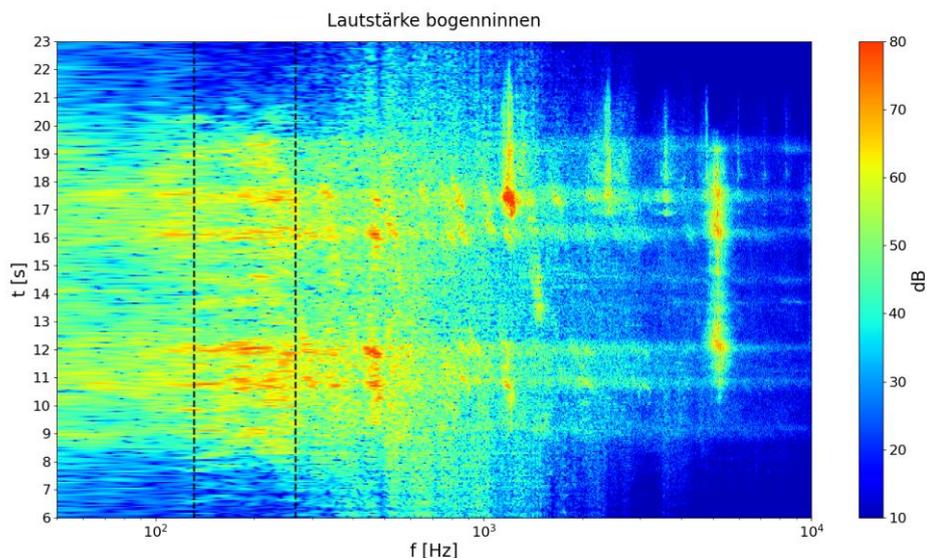


Abbildung 33: Schallemissionsmessung an der bogeninneren Schiene

4.1.7 Anmerkungen zu den Auswirkungen der Schlupfwellen auf den Betrieb

Die in dem Bogen «Zum Biel Portal» vorliegenden Schlupfwellen resultieren in Vibrationen der Schiene und Geräuschemissionen bei deren Überrollung in dem zu erwartenden Frequenzbereich. Durch die höhere Inertanz der Schiene in laterale Richtung weisen auch die gemessenen Vibrationen in diese Richtung eine höhere Amplitude auf. Diese Messungen liefern einen Einblick in die Auswirkungen der Schlupfwellen, jedoch nicht, was der Grund für deren Formation sein könnte. Dafür wären Messungen an einer geschliffenen Schiene notwendig, bei der ebenfalls Torsions- und Biegeschwingungen an den Achsen des Fahrzeugs durchgeführt werden.

4.2 Abrasiver Schienenverschleiss

Die Schienenprofile wurden gemäss Messplan in Tabelle 2 mit dem Messgerät Calipri – Rail durch die MGBahn abgezeichnet. Die Messbögen sowie deren Zuordnung zum Streckenverlauf sind in Abbildung 34 mit schwarzer Umrandung und Pfeil gekennzeichnet. Wie dem Verlauf der Streckengeschwindigkeit (rosarotes Band in der Abbildung 34) befinden sich alle Bögen in einer Beschleunigungs- bzw. Verzögerungsphase (32km/h auf 38km/h). Die beiden Bögen zum Biel befinden sich etwas weiter vom aktiven Sprühbereich (verschleppter Bereich) entfernt als der Bogen Lüegelwang.

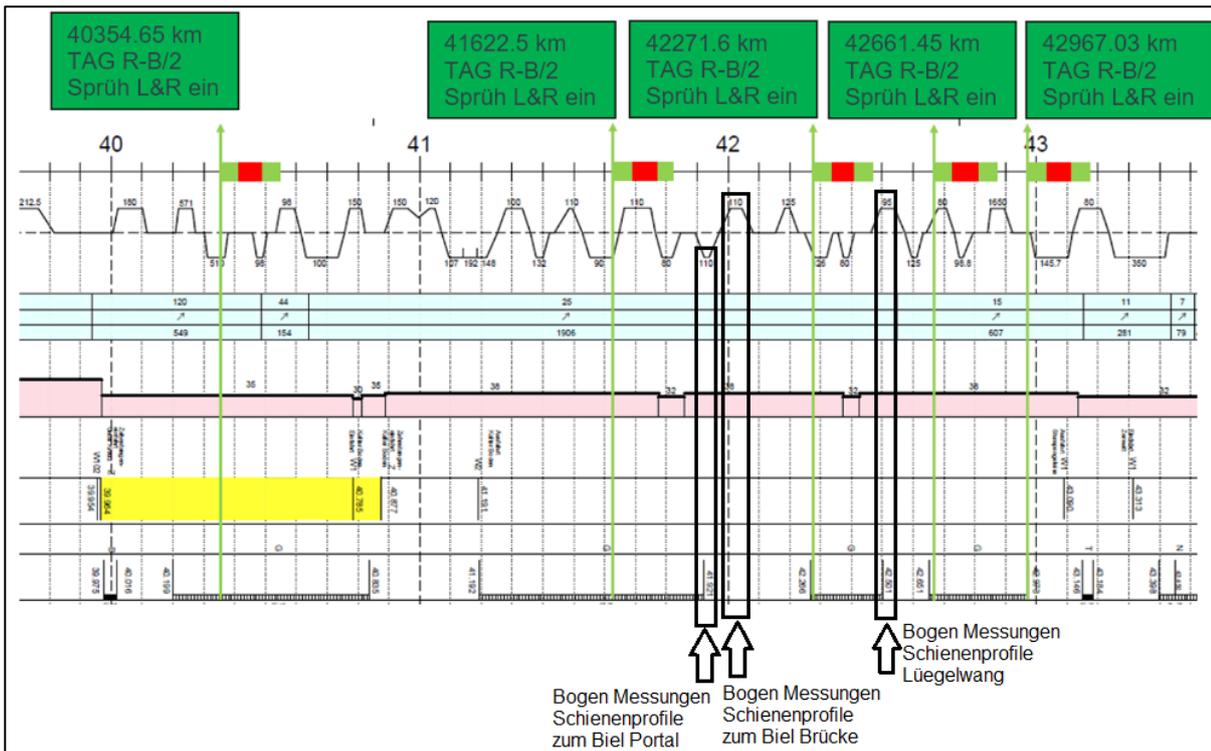


Abbildung 34: Messbögen und deren Zuordnung zum Streckenverlauf

In Biel – Brücke und Lüegelwang handelt es sich in Fahrtrichtung Brig jeweils um Linksbögen und in Biel – Portal um einen Rechtsbogen. Die beiden Bögen im zum Biel verfügen über einen Bogenhalbmesser von 110m, derjenige in Lüegelwang über einen solchen von 96m.

Zur leichteren Lesbarkeit der Ergebnisse in den entsprechenden Abbildungen zum Schienenverschleiss werden in den folgenden beiden Abbildungen (Abbildung 35 und Abbildung 36) die Unterschiede bei den Interpretationen der Ergebnisse in den beiden Bogenrichtungen erläutert. Der Verschleiss der Schienen wird durch die Abkürzungen W1, W2 und W3 an drei Stellen am Schienenkopf gekennzeichnet. Bei W1 handelt es sich um den Wert in der Schienenkopfmitte, bei W2 um denjenigen an der Schienenfahrkante und bei W3 um den Wert an der Schienenflanke. W2 und W3 kommen an beiden Schienen vor, wobei jeweils zwischen linker Seite und rechter Seite unterschieden wird (W2L, W2R, W3L, W3R). Bei der in der Messrichtung linken Schiene befinden sich jeweils die rechten Schienenkopfseiten und entsprechend bei der rechten Schiene die linken Schienenkopfseiten in Richtung der Gleismitte. Bei der Betrachtung des durch das Rad verursachten abrasiven Verschleisses am Schienenkopf werden deshalb nur die Messwerte in der Schienenmitte und diejenigen in der Richtung der Gleismitte bewertet. In der Freilaufstellung werden Schienenflanke und Fahrkante nur durch das vorlaufende bogenäussere Räder der Fahrwerke berührt. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen muss in den drei betrachteten Bögen nur dieses Stellungsbild der Fahrwerke berücksichtigt werden. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass bei den Links- und Rechtsbögen jeweils die durch das bogenäussere Rad des vorlaufenden Radsatzes berührte Schienenkopfseite betrachtet wird:

- Abbildung 35 zeigt die rechte Schiene bogenaussen und für den Flankenverschleiss ist deshalb dort die linke Schienenkopfseite zu betrachten.
- Abbildung 36 zeigt die linke Schiene bogenaussen und entsprechend ist die rechte Schienenkopfseite zu betrachten.

Die beiden Abbildungen (Abbildung 35 und Abbildung 36) dienen zur Hilfe bei der Betrachtung der Verschleisswerte an den Schienen und werden deshalb in den folgenden Grafiken zum Verschleiss in den drei Bögen jeweils oben über der den Diagrammen aufgeführt. Sie stellen aber nicht den in den darunter liegenden Diagrammen aufgeführten Verschleiss dar.

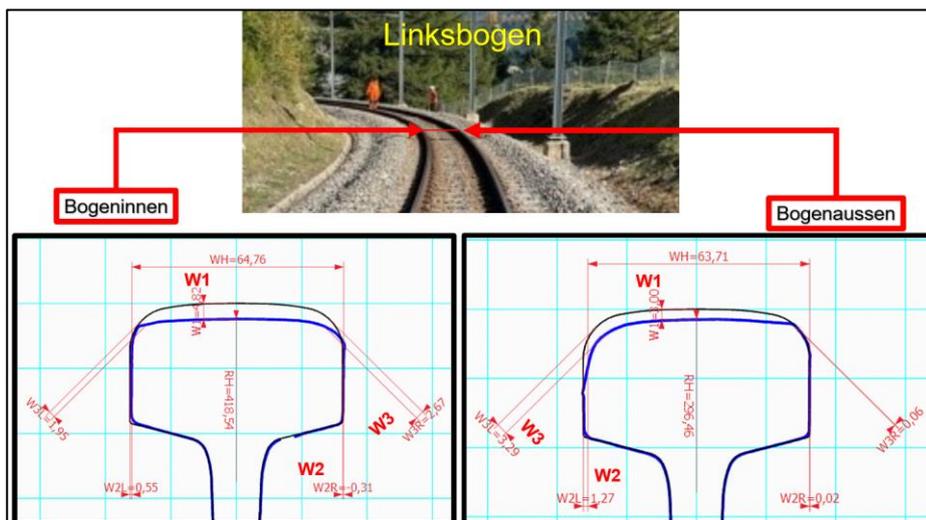


Abbildung 35: Bezeichnungen im Linksbogen

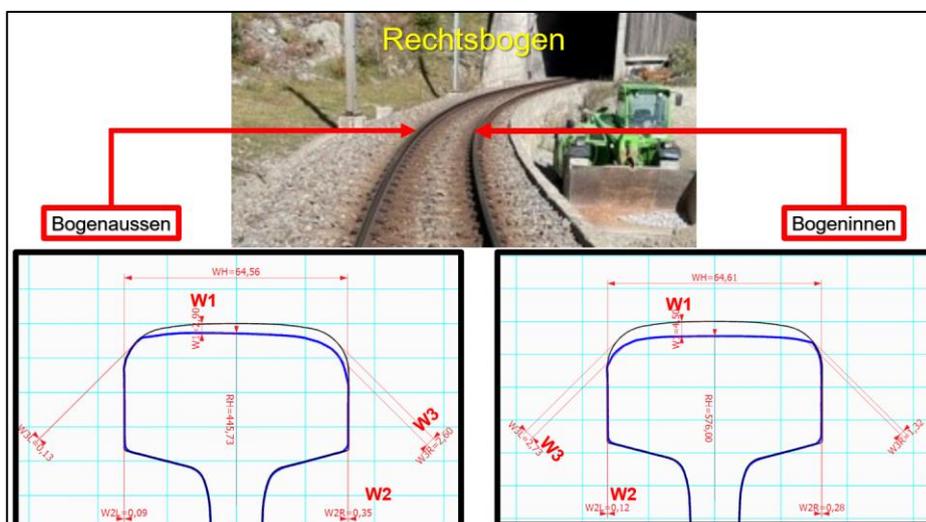
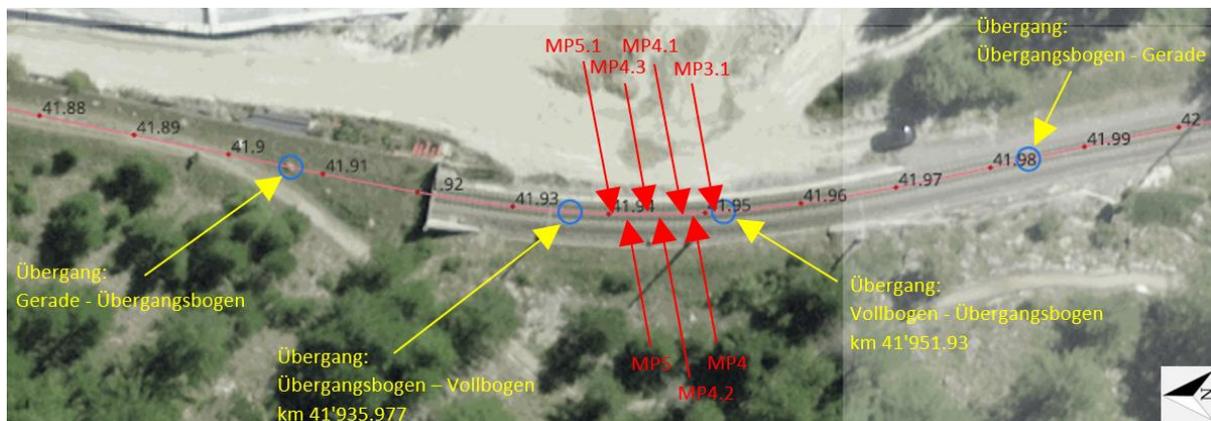


Abbildung 36: Bezeichnungen im Rechtsbogen

4.2.1 Zum Biel – Portal, Rechtsbogen (Vollbogen km: 41'935.977 - 41'951.93)

Die Messpunkte beim Bogen «Zum Biel – Portal» sind in Abbildung 37 aufgeführt. Es handelt sich um einen Rechtsbogen. Die Messpunkte (MPs) befinden sich innerhalb des Vollbogens und wurden zur genauen Verortung bei den Folgemessungen durch Farbmarkierungen auf den Schwellen gekennzeichnet.



Messpunkte: (MPs)	MP3.1	MP4	MP4.1	MP4.2	MP4.3	MP5	MP5.1
Kilometer:	41'951.7	41'949.7	41'948.1	41'946.4	41'944.2	41'942.5	41'940.9

Abbildung 37: Messpunkte Zum Biel – Portal

In Abbildung 38 unten ist der Verschleiss W1 in Schienenkopfmittle der beiden Schienen für den Rechtsbogen in Biel Portal dargestellt. Entsprechend dem Rechtsbogen ist auf der linken Seite die bogenäussere und auf der rechten Seite die bogeninnere Schiene dargestellt. In schwarzer Farbe ist der Verlauf vor dem Schienenschleifen und in den anderen Farben derjenige während der Betriebserprobung dargestellt. Alle in der Folge aufgeführten Diagramme zum Schienenverschleiss sind entsprechend dieser Definition dargestellt.

Auffallend ist der insgesamt grössere Verschleisszustand W1 bei den bogeninneren Schienen im Vergleich zu den bogenäusseren Schienen. Zudem musste an den bogenäusseren Schienen deutlich weniger weggeschliffen werden als an den bogeninneren Schienen. Insgesamt ist der Verschleiss W1 an allen Messstellen sehr gering was auf die SKK zurückzuführen ist.

In Abbildung 39 ist der Verschleiss W2 an der gleismittigen Schienenflanke dargestellt. Insgesamt hat hier seit der Schienenneuerlegung und insbesondere während der Betriebserprobung nahezu kein Verschleissabtrag stattgefunden. Da es sich in Biel Portal um einen Rechtsbogen handelt, läuft das vorlaufende bogenäussere Rad an linken Schienenflanke an. Auch an dieser Flanke liegt der Verschleissabtrag im Bereich der Messgenauigkeit. Dieses Ergebnis ist auf ein effizient funktionierende Spurkranzschmierung zurückzuführen.

Oben in Abbildung 40 ist der Verlauf der Spurweite und unten zur Interpretation der Grösse der Spurweite der Verlauf des Schienenflankenverschleisses an den beiden gleismittigen Flanken der beiden Schienen dargestellt. Die Spurweiten liegen im Bereich zwischen 1008mm und 1010mm. Da davon ausgegangen werden kann, dass die Schienen ohne Spurerweiterung verlegt wurden, kann diese gegenüber dem Nominalzustand deutlich vergrösserte Spurweite nicht auf den Schienenverschleiss zurückzuführen sein. Diese Spurerweiterungen müssen daher auf andere Ursachen zurückgeführt werden.

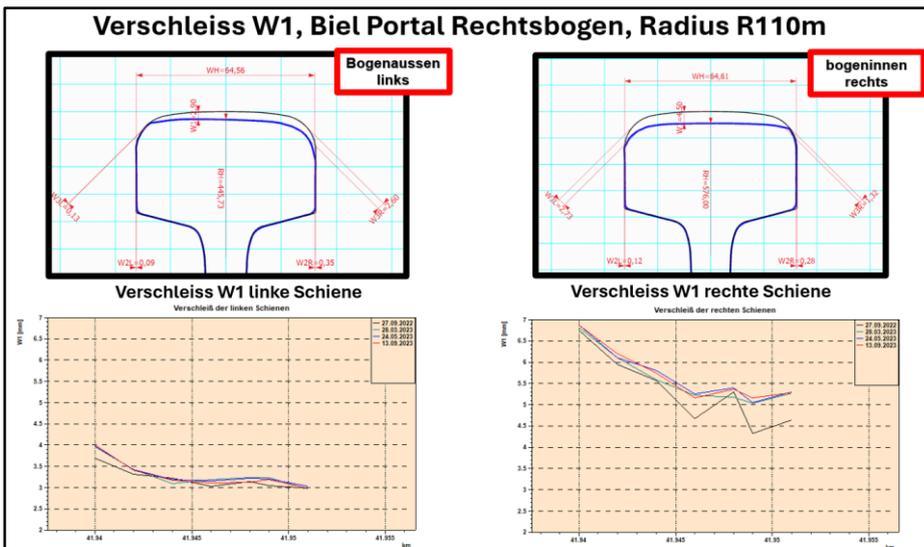


Abbildung 38: Verschleiss W1 in Biel Portal

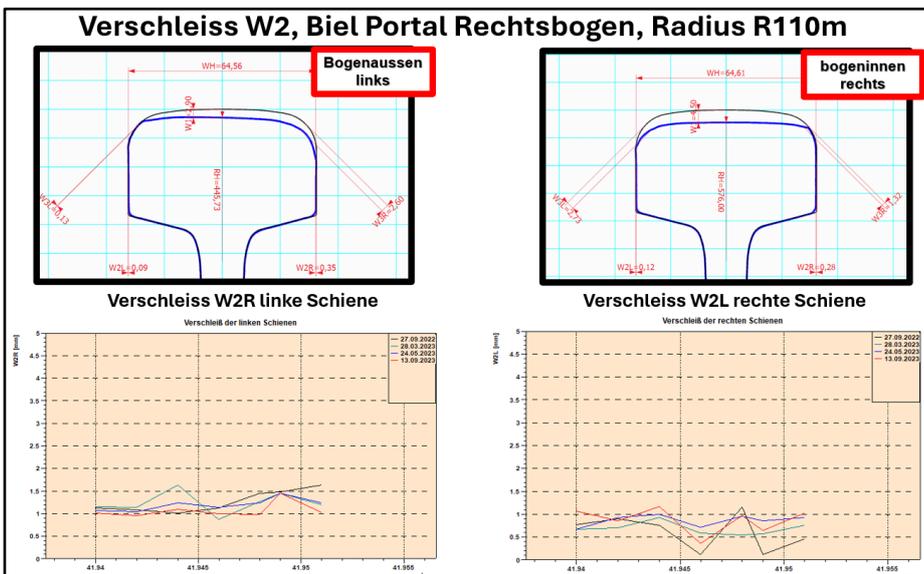


Abbildung 39: Verschleiss W2 in Biel Portal

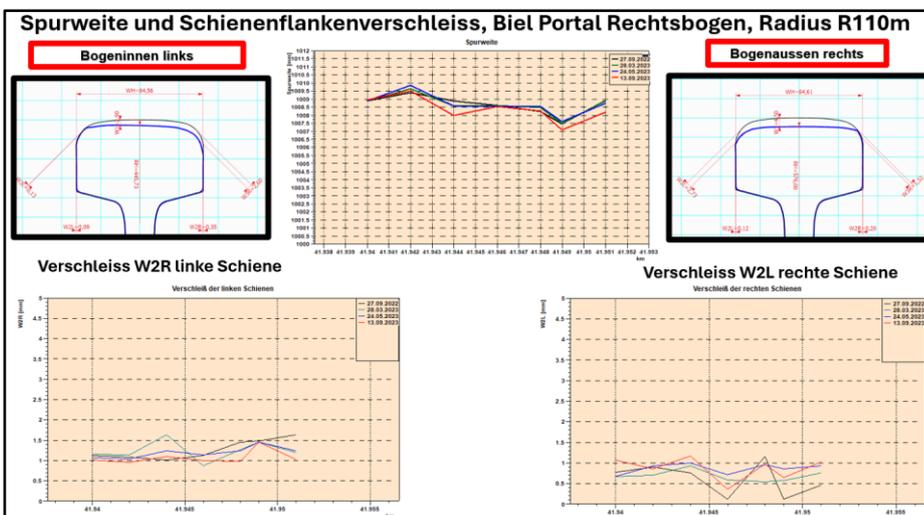
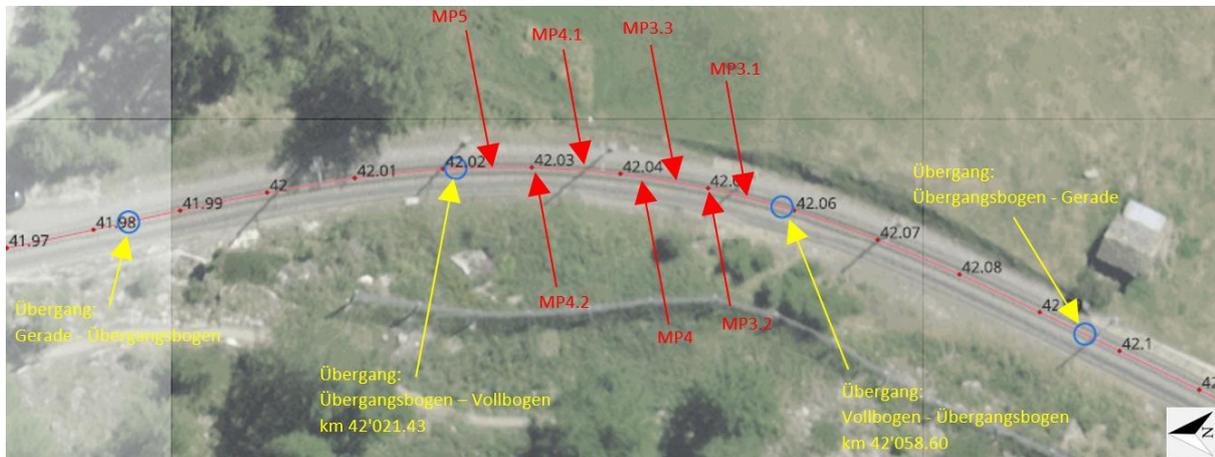


Abbildung 40: Spurweite und deren Veränderung sowie Vergleich mit dem Schienenflankenverschleiss

4.2.2 Zum Biel – Brücke, Linksbogen (Vollbogen km: 42'053.3 - 42'024.7)

Die Messpunkte beim Bogen «Zum Biel – Brücke» sind in Abbildung 41 aufgeführt. Es handelt sich um einen Linksbogen. Auch hier befinden sich die Messpunkte (MPs) innerhalb des Vollbogens und wurden zur genauen Verortung bei den Folgemessungen durch Farbmarkierungen auf den Schwellen gekennzeichnet.



Messpunkte: (MPs)	MP3.1	MP3.2	MP3.3	MP4	MP4.1	MP4.2	MP5
Kilometer:	42'053.3	42'050.3	42'046.1	42'042.1	42'036.5	42'030.5	42'024.7

Abbildung 41: Messpunkte Zum Biel Brücke

Die Abbildung 42 zeigt den Verschleiss W1, die Abbildung 43 den Verschleiss W2 und die Abbildung 44 die Spurweite und deren Veränderung sowie Vergleich mit dem Schienenflankenverschleiss in Biel Brücke. Grundsätzlich ergeben sich auch hier die gleichen Feststellungen wie oben in Biel Portal. Dies gilt sowohl für den Verschleiss an der bogeninneren Schiene, welcher deutlich grösser ist als bogenäusser als auch für die Spurerweiterung, welche nicht auf den Schienenflankenverschleiss zurückzuführen ist. Hier ist zu beachten, dass es sich um einen Linksbogen handelt. Das heisst die bogenäussere befindet sich auf der rechten Seite und bogeninnere auf der linken Seite.

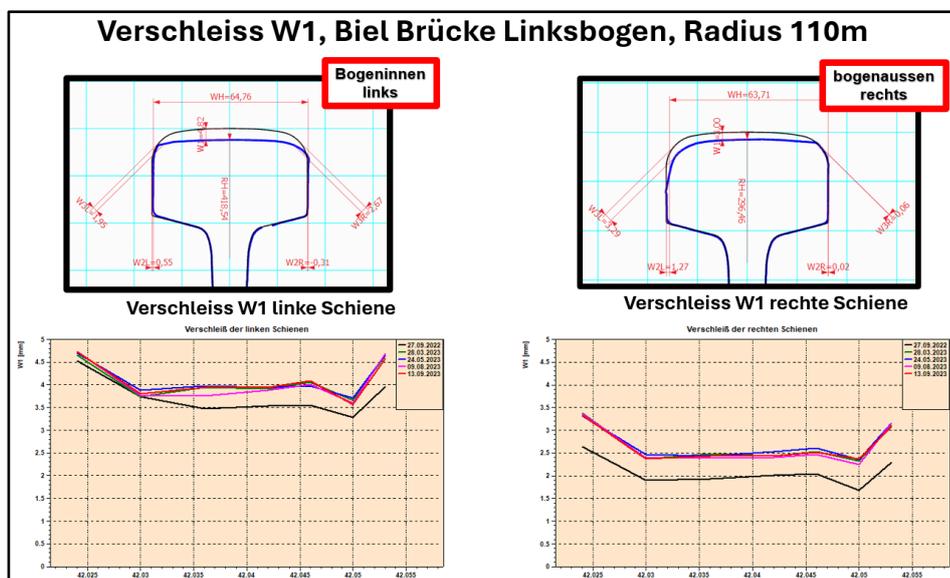


Abbildung 42: Verschleiss W1 in Biel Brücke

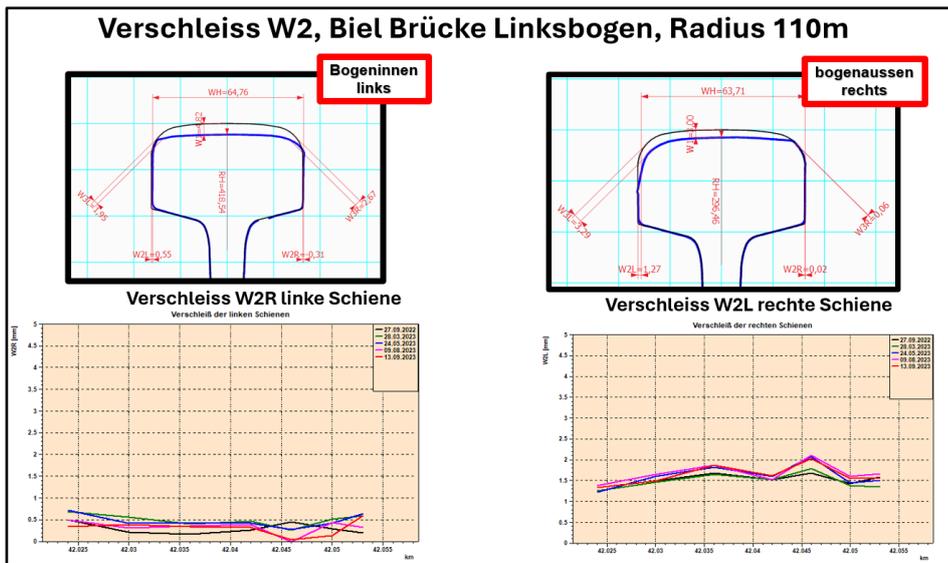


Abbildung 43: Verschleiss W2 in Biel Brücke

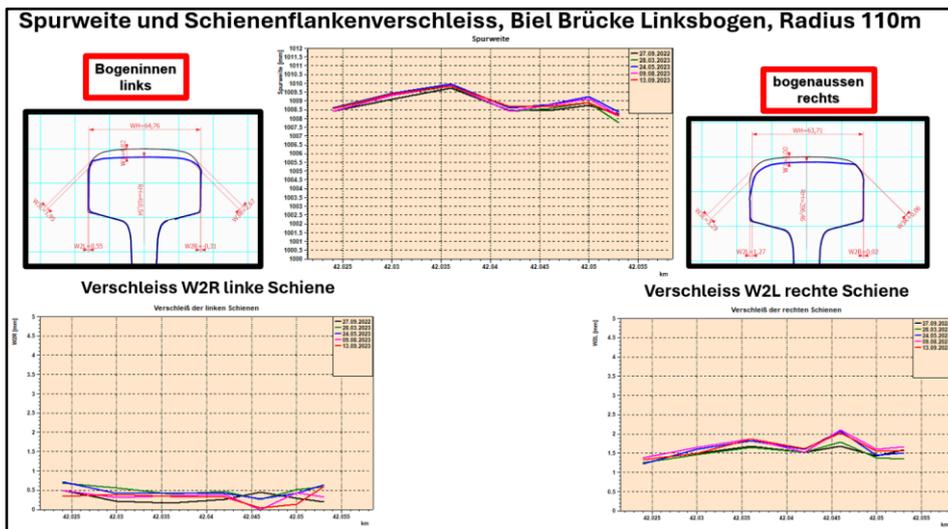
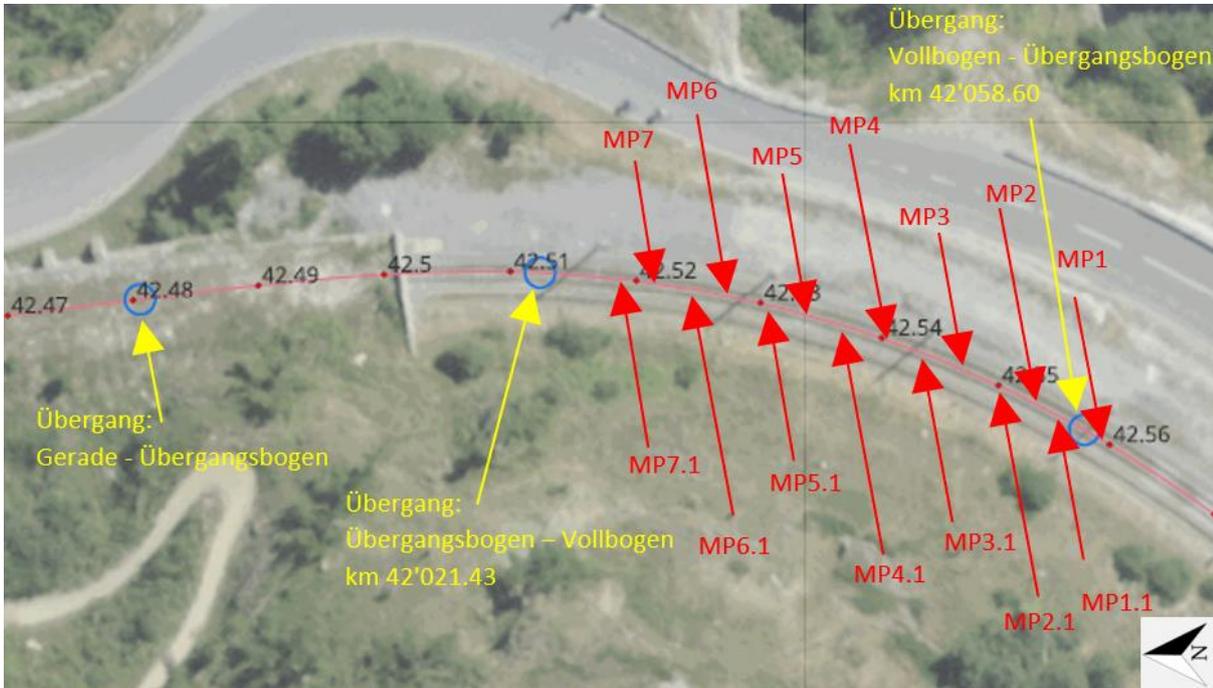


Abbildung 44: Spurweite und deren Veränderung sowie Vergleich mit dem Schienenflankenverschleiss

4.2.3 Lüegelwang, Linksbogen (Vollbogen km: 42'512.35 - 42'557.67)

Die Messpunkte beim Bogen «Lüegelwang» sind in Abbildung 45 aufgeführt. Es handelt sich um einen Linksbogen. Auch hier befinden sich die Messpunkte (MPs) innerhalb des Vollbogens und wurden zur genauen Verortung bei den Folgemessungen durch Farbmarkierungen auf den Schwellen gekennzeichnet.



Messpunkte (MPs)	MP1	MP1.2	MP2	MP2.1	MP3	MP3.1	MP4
Kilometer	42'558.8	42'555.7	42'552.8	42'550.3	42'546.6	42'543.7	42'540.6

MP4.1	MP5	MP5.1	MP6	MP6.1	MP7	MP7.1
42'537.6	42'534.7	42'531.7	42'528.7	42'525.7	42'522.7	42'519.7

Abbildung 45: Messpunkte Lüegelwang

Die Abbildung 46 zeigt den Verschleiss W1, die Abbildung 47 den Verschleiss W2 und die Abbildung 48 die Spurweite und deren Veränderung sowie Vergleich mit dem Schienenflankenverschleiss in Biel Brücke. Grundsätzlich ergeben sich auch hier die gleichen Feststellungen wie oben in Biel Portal und Biel Brücke. Dies gilt sowohl für den Verschleiss an der bogeninneren Schiene, welcher deutlich grösser ist als bogenaussen als auch für die Spurerweiterung, welche nicht auf den Schienenflankenverschleiss zurückzuführen ist. Hier ist wie schon bei Biel Brücke zu beachten, dass es sich um einen Linksbogen handelt. Das heisst die bogenäussere befindet sich auf der rechten Seite und bogeninnere auf der linken Seite.

Obschon sich der Bogen Lüegelwang gemäss Abbildung 34 näher am verschlepten Bereich des letzten aktiven SSK Sprühimpulses befindet unterscheiden sich hier vor allem der Schienenkopfverschleiss W1 während der Betriebserprobung kaum von denjenigen bei den beiden Bögen im zum Biel.

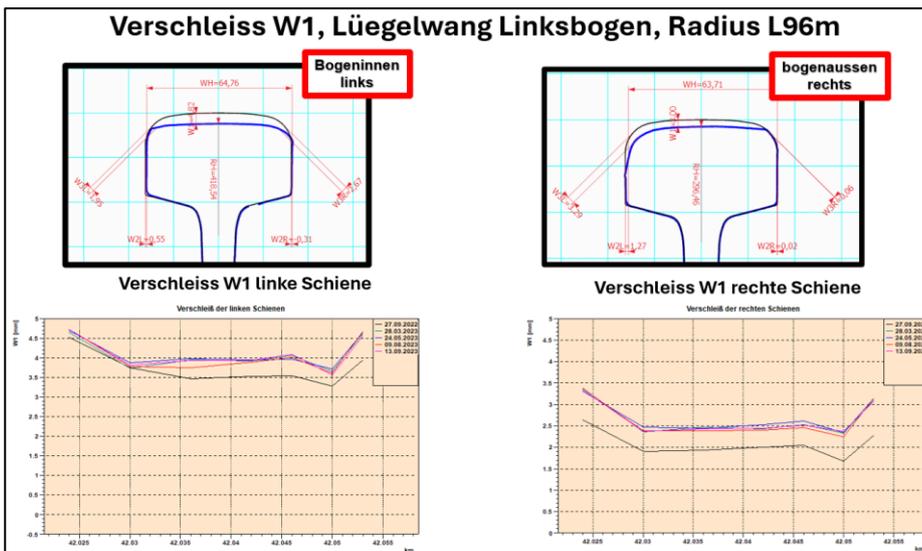


Abbildung 46: Verschleiss W1 in Lügelwang

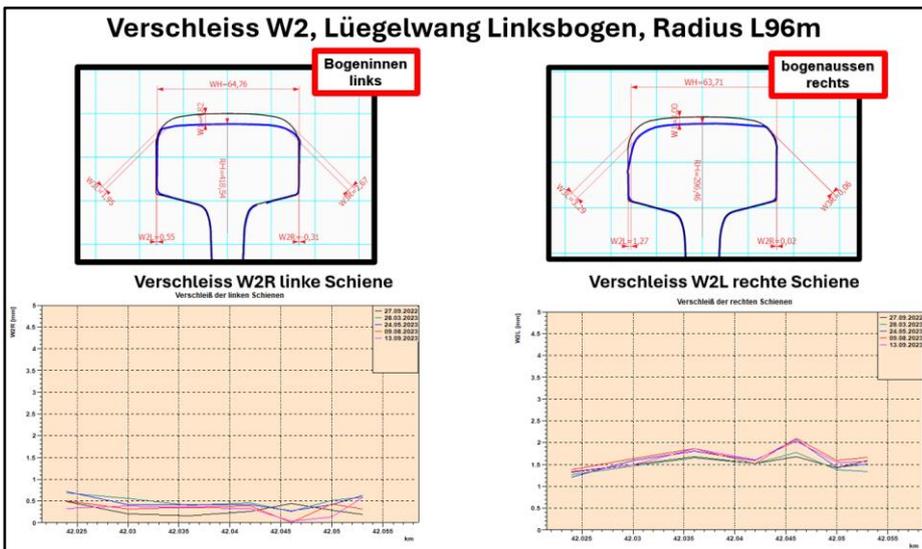


Abbildung 47: Verschleiss W2 in Biel Brücke

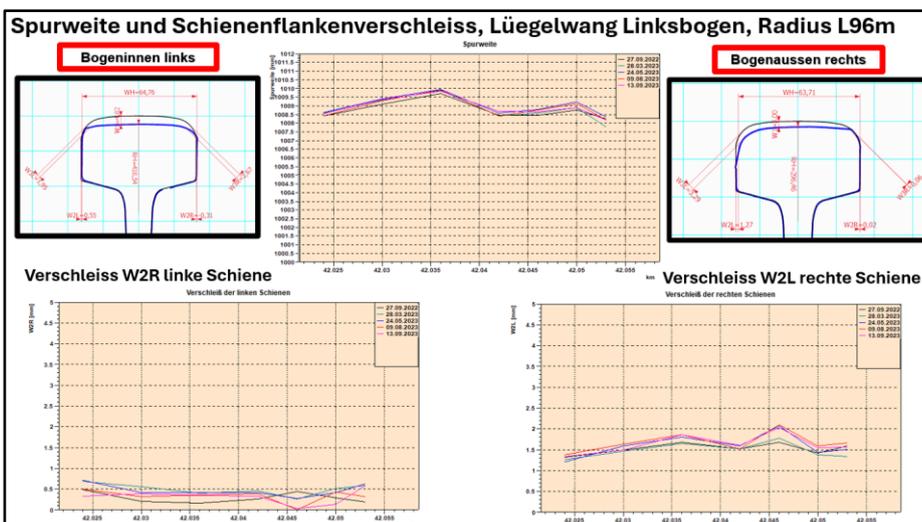


Abbildung 48: Spurweite und deren Veränderung sowie Vergleich mit dem Schienenflankenverschleiss

4.2.4 Schlussfolgerungen zum Schienenverschleiss

Basierend auf den Verschleisswerten aus den Calipri – Rail Messungen in den beiden Bögen zum Biel und in demjenigen in Lügelwang ergeben sich die folgenden Feststellungen:

- Im schienenmittenmittigen Bereich, charakterisiert durch W1, ist der Gesamtverschleiss der Schienen am grössten. Dies gilt sowohl für die bogeninneren als auch für die bogenäusseren Schienen.
- An den bogeninneren Schienen ist der Verschleiss W1 immer und zum Teil auch deutlich grösser als an den bogenäusseren Schienen.
- Der Verschleissfortschritt W1 während der Betriebserprobung ist sehr gering ausgefallen. Dies gilt gleichermassen für die bogeninneren und die bogenäusseren Schienen.
- Die Schienen wurden im Bereich der drei Bögen im Jahr 2019 durch neue Schienen ersetzt. In den Jahren 2022 und 2023 fanden hintereinander zwei Betriebserprobungen mit SKK statt. Die Schienen wurden zwischen den beiden Erprobungen geschliffen. Wie jedoch den Diagrammen entnommen werden kann, war der Abtrag durch das Schleifen sehr gering, was daraus resultiert, dass während der ersten Betriebserprobung nur geringes Wachstum der Schlupfwellen stattgefunden hat. Damit dürfte der grösste Verschleiss bei W1 aus der Zeit zwischen 2019 und Ende 2021 stammen. Das bedeutet, dass der Verschleiss durch die SKK zu einer signifikanten Reduktion des Schienenverschleisses beigetragen hat.
- Der Verschleiss W2 an den in Richtung Gleismitte liegenden Schienenflanken insbesondere bei den bogenäusseren Schienen lag während der Betriebserprobung im Bereich der Messgenauigkeit und war daher kaum nennenswert. Dieser dürfte aufgrund der Messergebnisse schon vor Beginn der Betriebserprobungen sehr gering gewesen sein. Durch die effiziente Spurkranzschmierung ist unabhängig von SKK praktisch nur marginaler Schienenflanken- und Schienenfahrkantenverschleiss aufgetreten. Die Fahrkantenverschleiss wurde hier nicht in Form von Diagrammen aufgeführt. Es zeigt sich jedoch bei den Auswertungen ein zur Schienenflanke ähnliches Verhalten.
- Obschon seit der Schienenneuerlegung nur marginaler Schienenflankenverschleiss aufgetreten ist, tritt in allen überprüften Bögen eine signifikante Spurerweiterung auf. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Hauptursache für die Spurerweiterungen nicht beim Schienenverschleiss liegen.

4.3 Reibwert / Tribometer Messungen

Für die Reibwertmessungen wird jeweils die bogeninnere und die bogenäussere Schiene dreimal an derselben Stelle gemessen und der Mittelwert übernommen. Neben dem Reibwert werden die Tageszeit und die Umweltbedingungen festgehalten (Temperatur und Luftfeuchtigkeit, vgl. Anhang 12.4). Die Gleisseiten, d.h. Schiene links (rot markiert) und Schiene rechts (gelb markiert) wurden in der Fahrrichtung Brig definiert (vgl. Anhang 12.4).

4.3.1 Messpunkte und Messresultate

Seit Ende der ersten Betriebserprobung (Oktober 2022), wurden bzw. werden diese Messungen monatlich weitergeführt. Die Intention war während den warmen Sommermonaten regelmässiger zu messen, was aufgrund von Ressourcenknappheit des Fahrbahnteams nur im August 2024 möglich war.

Abbildung 49 zeigt die Messorte an welchen periodisch Messungen des Reibwertes mit dem Push – Tribometer durchgeführt wurden. Es handelt sich um die drei Bögen im Kalten Boden, Biel Brücke und Lüegelwang sowie um die Gerade unmittelbar nach dem Bogen von Biel Brücke. Der Bogen im Kalten Boden liegt weit ausserhalb des konditionierten Bereiches. In dieser Kreuzungsstation musste überwacht werden, dass der Reibwert wegen der Zughalte von zwei aufeinander auf dem gleichen Gleis aufschliessenden Zügen nicht zu tief absinkt. Der Bogen in Biel – Brücke liegt zwischen zwei konditionierten Abschnitten und damit auf den rund 200m verschlepten Bereichen. Der Bogen von Lüegelwang befindet sich unmittelbar nach dem aktiv konditionierten Bereich.

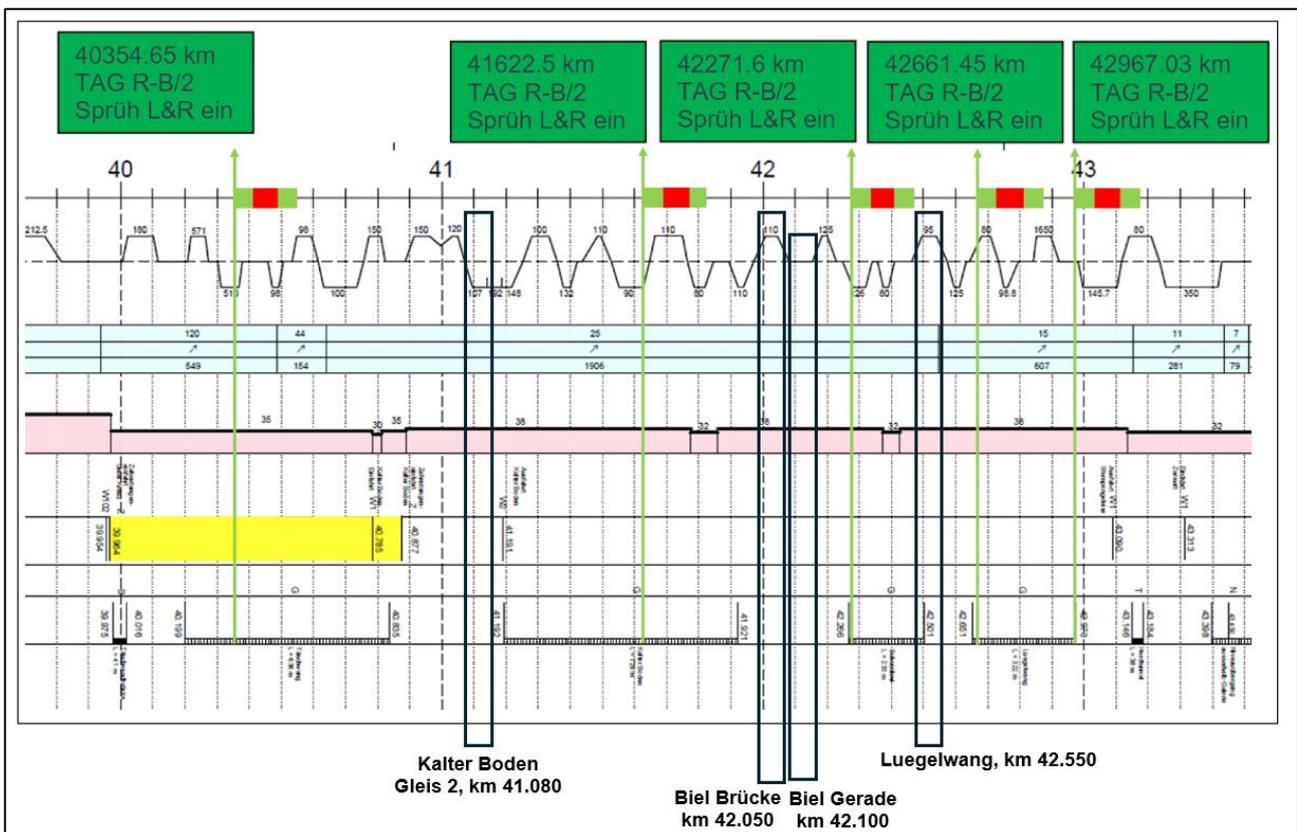
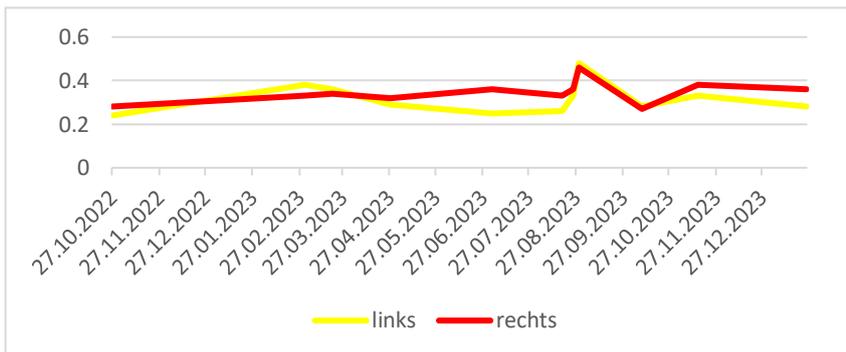


Abbildung 49: Messorte des Reibwertes mit dem Tribometer

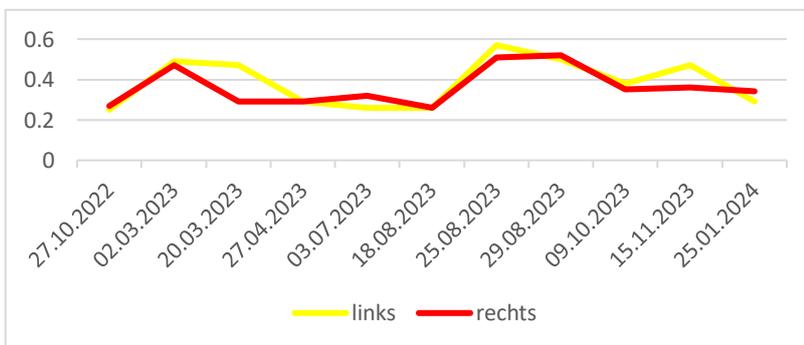
Die tribologischen Messungen werden an den unten aufgeführten Stellen durchgeführt (siehe Kilometrierung). In den Diagrammen sind die Messergebnisse jeweils an den linken und rechten Schienen durchgeführt (linke und rechte Schiene jeweils bei Betrachtung in Richtung Brig).

In Abbildung 50 sind für die vier Messtellen die Verläufe des Reibwertes an den beiden Schienenköpfen aufgeführt. Dabei handelt es sich über den Zeitverlauf um Messpunkte, welche durch gerade Linien miteinander verbunden sind. Diese sollen jedoch keinen Trend zwischen den Messpunkten darstellen, sondern eine bessere Lesbarkeit der Diagramme ermöglichen.

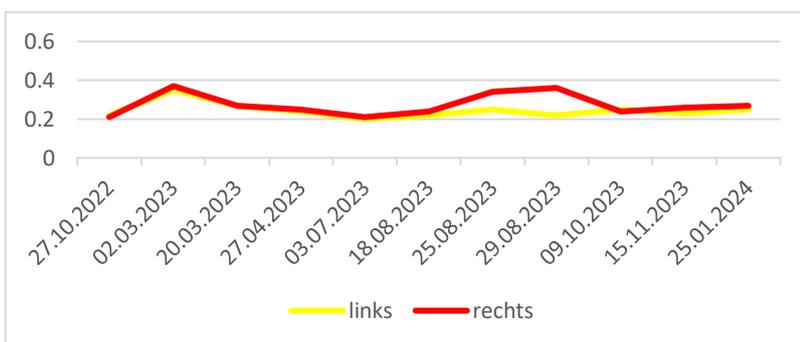
1. Kalter Boden Gleis 2 (Radius 100 m) vor Relaisraum Streckenkilometer 41.080



2. Biel Kurve (110m) Streckenkilometer 42.050



3. Biel Gerade Streckenkilometer 42.100



4. Lügelwang enge Kurve (95m) Streckenkilometer 42.550

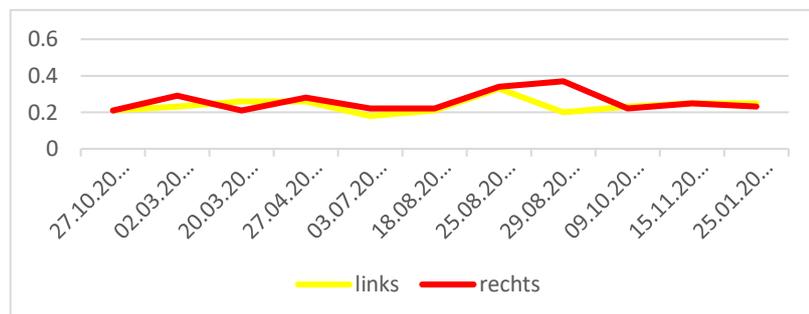


Abbildung 50: Messergebnisse zu den Reibwerten

4.3.2 Feststellungen zu den Messergebnissen

Die Messwerte sind grossenteil konstant zwischen 0.2 und 0.3. Es gibt jedoch an allen Messstellen erhöhte Reibwerte im Februar - März und Ende August.

Die Annahme, dass die Reibwerte während des Sommers 2023 analog zum Sommer 2022 markant ansteigen, hat sich nicht im erwarteten Umfang bestätigt. Ende August 2023 sind tatsächlich erhöhte Reibwerte gemessen worden, jedoch ist diese Spitze im Vergleich zum Vorjahr weniger hoch und weniger lange. Da der Sommer 2023 weniger heiss war als der Sommer 2022, wird davon ausgegangen, dass die «kritischen Temperaturen» nicht oder kaum erreicht wurden.

Die Reibwerte haben sich anschliessend sowohl im Februar – März 2023 wie auch im August 2023 ohne Änderungen wieder im Bereich zwischen 0.2 und 0.3 eingependelt.

Trotz den insgesamt konstanten Reibwerten sind auch in Zukunft die Wetterverhältnisse zu berücksichtigen. Aufgrund von neuesten Untersuchungen von AC2T auf dem Zwei-Scheiben-Prüfstand mit drei verschiedenen Konditioniermitteln besteht bereits bei einer Schientemperatur von 60°C eine signifikante Veränderung bei der Leistungsfähigkeit dieser Produkte. Die Ergebnisse dieser Versuche und die daraus resultierenden Empfehlungen werden durch AC2T in einem noch zu veröffentlichenden Bericht präsentiert.

5 Berührung von Rad und Schiene (Rad- und Schienenprofile)

Während der Betriebserprobung wurden in festgelegten Zeitintervallen die Rad- und Schienenprofile mit Calipri – Rail und Calipri – Wheel aufgenommen und berührungsgeometrisch ausgewertet. Dies erfolgte bei den drei Shuttle – Fahrzeugen (2051, 2052 und 2052) sowie in den drei Bögen zum Biel Brücke, Biel Portal und Lüegelwang. Dabei interessierte neben dem oben in Kapitel 0 beschriebenen Verschleiss auch die Entwicklung der Rad- und Schienenprofile. Das Schienenprofil bei der MGBahn ist die 46E1. Das verwendete Radprofil entspricht der R RTE 29500 Typ A [2].

Für die Beurteilung der Radprofile aus dem Betriebseinsatz werden verschiedene Paarungen von Rad und Schiene verwendet. Dazu werden einerseits die nominellen Profile und andererseits die Profile aus dem Betriebseinsatz berücksichtigt. In diesem Bericht werden die im Folgenden beschriebenen Paarungen betrachtet:

- Nominelles Schienenprofil gepaart mit den an den Fahrzeugen abgezeichneten realen Radprofilen.
- Reale Radprofile aus dem Betriebseinsatz mit den realen Profilen aus den untersuchten drei Bögen.
- Reale und nominelle Radprofile mit den realen Schienenprofilen des gesamten Streckenabschnittes Täsch-Zermatt.

5.1 Nominelle Rad- und Schienenprofile

Das nominelle Schienenprofil ist die Schiene 46E1 mit der Schieneneinbauneigung 1/20 und mit der Spurweite 1000mm. Bei den Radprofile wird zwischen vier unterschiedlichen Radprofilen unterschieden:

- Das Radprofil RTE 29500 Typ A [2]. Dieses Profil wird bei der MGBahn als Nominalprofil verwendet und war vor Beginn der ersten Betriebserprobung auf die Shuttle aufgedreht worden.
- Das Radprofil «Triebradsatz.tww» hat sich nach der zweijährigen Betriebserprobung auf einigen Shuttle Triebradsätzen ausgebildet. Diese Radsätze wurden nach Beginn der Erprobung nie reprofiliert.
- Das Radprofil zb.Opt.tww ist aus einer Verschleissanpassung im Betriebseinsatz an einem Fahrzeug der zb entstanden und wird derzeit auf einem Fink der Zentralbahn (zb) im Betriebseinsatz erprobt. Dieses Radprofil verfügt über eine reduzierte Spurkranzdicke auf ein Mass von 25mm (nominell beim RTE 29500 27mm [2]) und soll einer Überschreitung der maximal zulässigen Dicke von 27mm durch Spurkranzdickenwachstum begegnen.
- Das Radprofil zb.Opt._27_28.tww entspricht den Radprofil zb.Opt.tww jedoch mit einer nominellen Spurkranzdicke von 27mm. Es ist vorgesehen, mit diesem Radprofil eine Betriebserprobung bei der MGBahn durchzuführen.

Die Abbildung 51 zeigt oben die berührungsgeometrischen Paarungen dieser vier Radprofile mit der nominellen Schiene 46E1 (wie oben beschrieben). Unten wurden dieselben Paarungen durchgeführt jedoch mit einer vergrösserten Spurweite von 1010mm. Letztere wurde deshalb gewählt, weil bei Nachmessungen in den engen Bögen oft diese Spurweite festgestellt wurde. Dies wie oben bereits als Spurerweiterung ohne nennenswerten Verschleiss an den gleismittigen Spurkranzflanken erwähnt.

Die beiden zb.opt-Profile zeigen ein ähnliches Verhalten, wobei sich bei demjenigen mit Spurkranschwächung etwas günstigere Werte einstellen. Wie schon in [9] aufgezeigt stellen sich durch die Spurerweiterung in den Bögen günstigere Werte für den Radialstellungsindex und damit

für den Bogenlauf ein. Die für den Bogenlauf günstigeren Radprofile zb.Opt. zeigen aufgrund des Verlaufs der äquivalenten Konizität, zumindest mit dem theoretischen Schienenprofil auf der Neigung 1/20, keine negativen Auswirkungen auf geraden Strecken im oberen Geschwindigkeitsbereich.

Auch das Radprofil RTE29500 und das Profil des sich in Richtung Verschleissanpassung entwickelnde Radprofil des Triebradsatzes zeigen eine Verbesserung für den Bogenlauf bei Spurerweiterung.

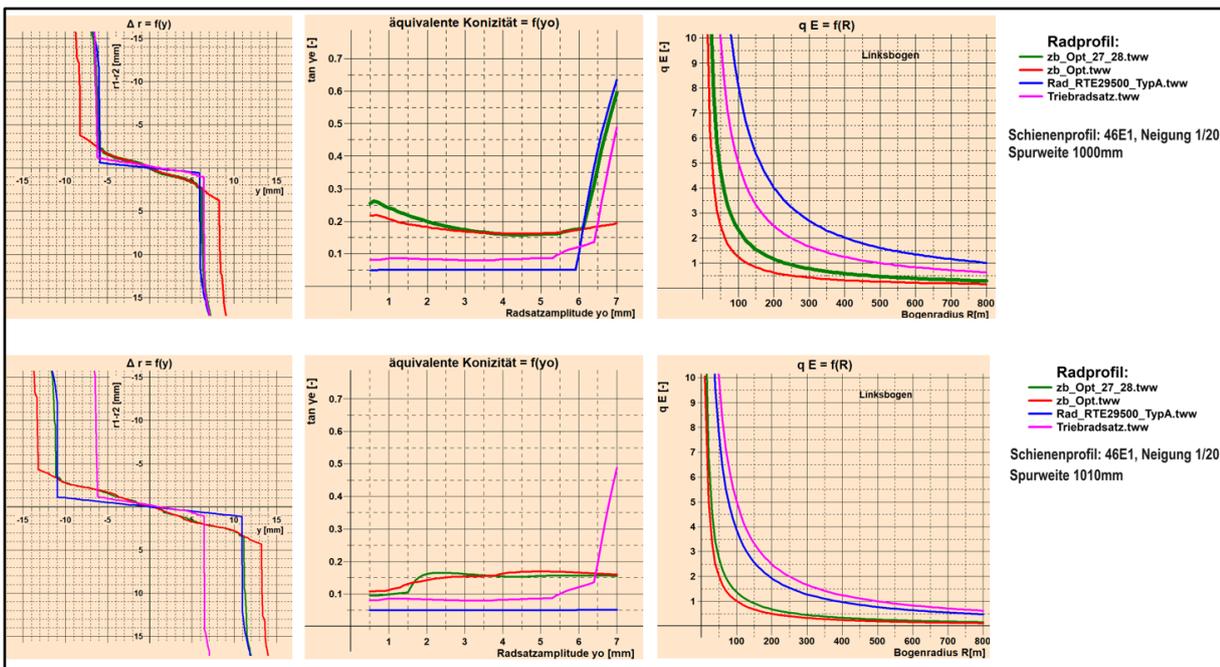


Abbildung 51: Paarung von nominellen Rad- und Schienenprofilen

Awesome that's a touching the thing the the mastermind from techno that umm maybe so yeah doesn't turn waste master when off let me play him OK yeah they're standing here right now we don't talk right by those state numbers. On Jeff on the on J field camache warden from J field he may submit Dana Cruz renowned press craft on declining opening on laughing challenge trailer

5.2 Entwicklung der Radprofile im Betriebseinsatz

Schon im ersten Schlussbericht zur Betriebserprobung Täsch-Zermatt [1] wurde festgestellt, dass sich das bei den meisten Meterspurbahnen Schweiz verwendete Radprofil RTE29500A im Betriebseinsatz nicht stabil verhält. Aus diesem Grund werden hier die an den drei Shuttle abgezeichneten Radprofile weiter dokumentiert. Um ein Gefühl für die Entwicklung und die Trends bei den realen Radprofilen zu erhalten, werden diese zunächst mit den nominellen Schienen mit ihren nominellen Einbauneigungen und Spurweiten gepaart. OK does he still

Die Abbildung 52 enthält die berührgeometrischen Funktionen (Δr , $\tan \gamma_e$, q_E linkes und rechtes Rad) der während der Betriebserprobung abgezeichneten Radprofile beim Shuttle 2051. Oben sind die Ergebnisse aller Radsätze und daraus in der Mitte diejenigen der Triebradsätze sowie unten diejenigen der Laufradsätze dargestellt. Mit zunehmender Laufleistung verändern sich bei diesem Fahrzeug die berührungsgeometrischen Funktionen in Richtung günstigerer Radialstellungsindizes, ohne die Konizitäten massgeblich zu verändern. Da durch die SKK der Reibwert Rad / Schiene stark reduziert ist und damit der Radverschleiss vermindert ist, verläuft diese Veränderung bzw. Verschleissanpassung des Radprofils jedoch sehr langsam. Ein Radialstellungsindex ≤ 1 bei einem Bogenhalbmesser von $R=200m$ reicht jedoch für die Streckencharakteristik der MGBahn nicht aus.

Bei der Beurteilung der Entwicklung der Radprofile wird das nominelle Schienenprofil der 46E1 mit Neigung 1/20 und einer Spurweite von 1000mm betrachtet

Die Abbildung 53 enthält die berührungsgemessenen Daten des Fahrzeugs 2052 und die Abbildung 54 jene des Fahrzeugs 2053. Auch bei diesen Fahrzeugen zeigen sich ähnliche Ergebnisse und vor allem Tendenzen wie beim Shuttle 2051. Beim Fahrzeug 2053 stellen sich bei einigen wenigen Messungen erhöhte äquivalente Konizitäten ein. Diese sind zum Teil auf Diskontinuitäten im Berührungspunktverlauf bzw. bei der Δr -Funktion zurückzuführen.

Ein Einfluss der unterschiedlichen Radwerkstoffe bei den Triebbradsätzen ist nicht zu erkennen. Die Laufradsätze passen sich als Folge des weniger verschleissresistenten Radwerkstoffes ER7 tendenziell schneller an die Schienen an.

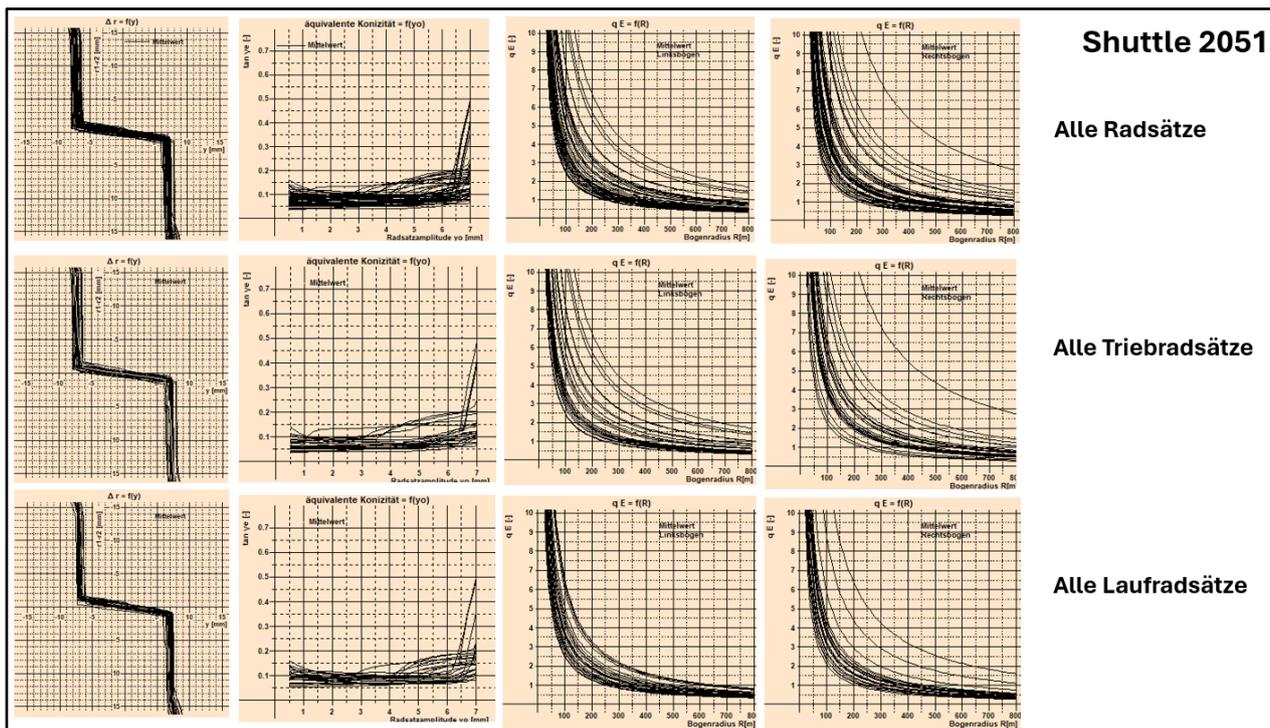


Abbildung 52: Entwicklung der Radprofile beim Shuttle 2051

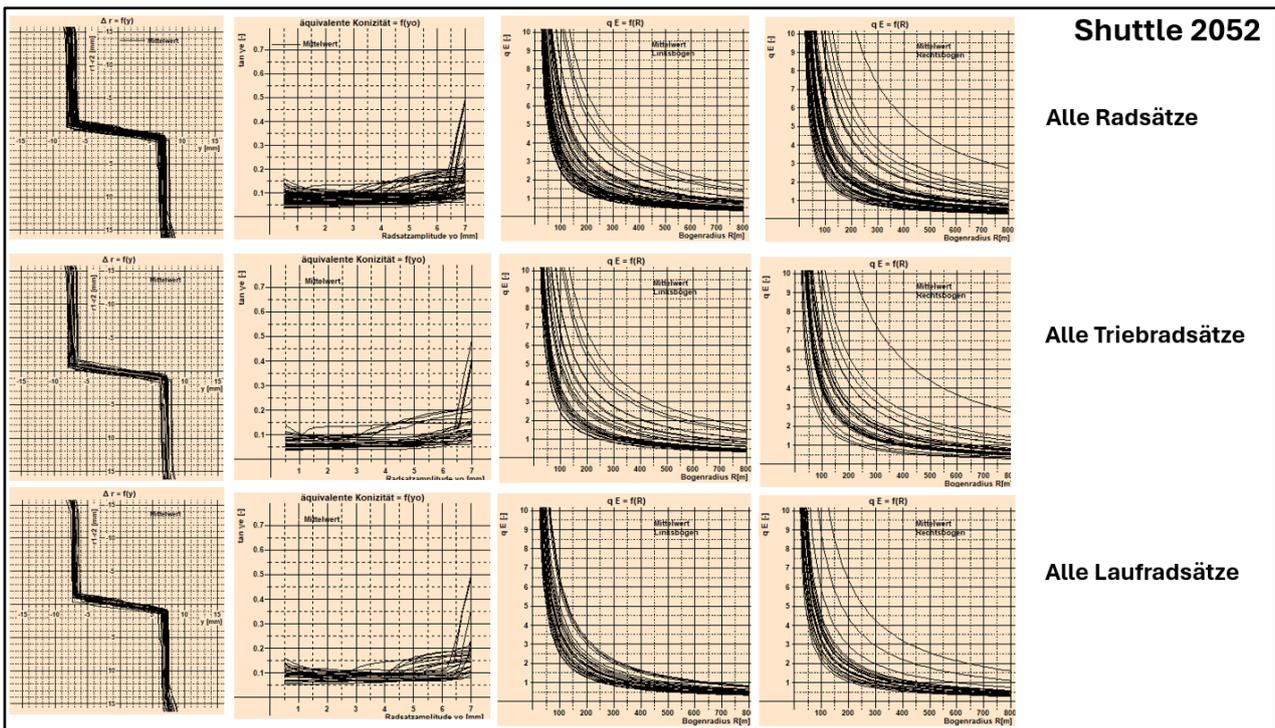


Abbildung 53: Entwicklung der Radprofile beim Shuttle 2052

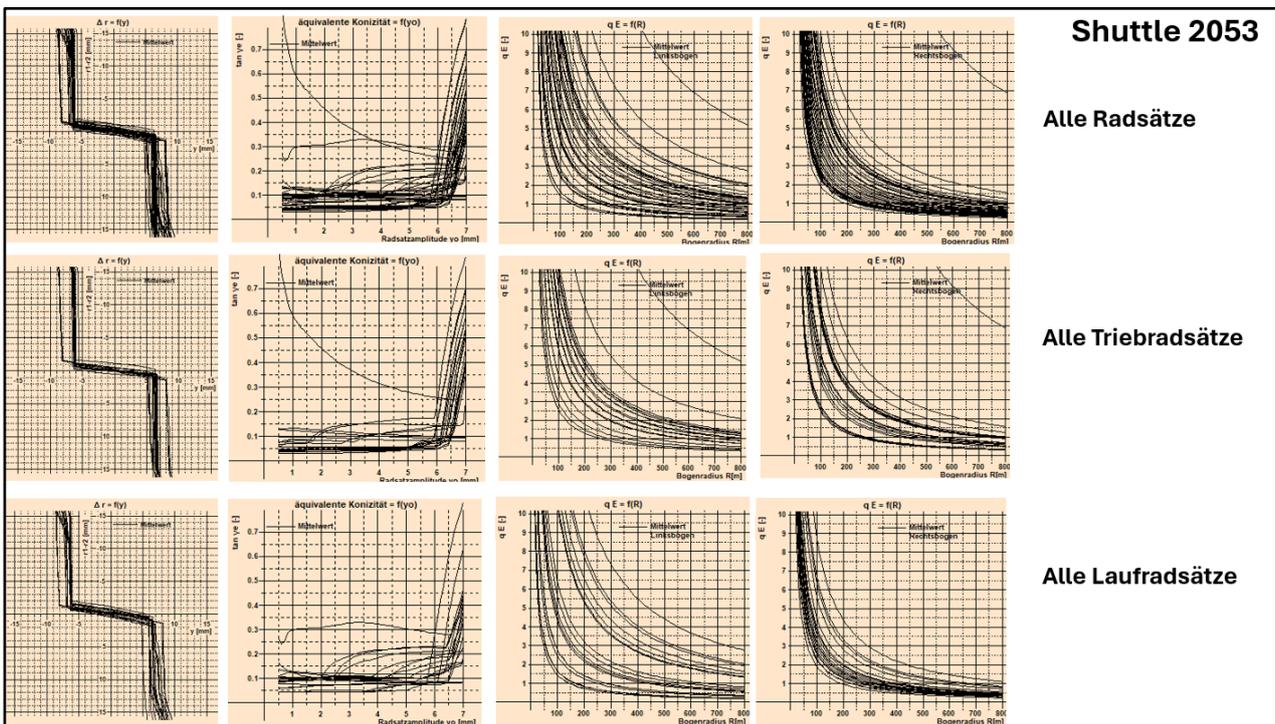


Abbildung 54: Entwicklung der Radprofile beim Shuttle 2053

Fazit zur berührungsgemessenen Entwicklung der Radprofile

Die Radprofile zeigen über die zweijährige Betriebserprobung eine langsame Veränderung in Richtung günstigeres Verhalten im Bogen ohne eine nennenswerte Verschlechterung des Indikators für die Fahrt auf geraden Strecken. Die Laufradsätze passen sich schneller an die bogenäusseren Schienen an als die Triebradsätze. Dies dürfte auf die unterschiedlichen Stahlqualitäten bei diesen

beiden Laufwerksprinzipien zurückzuführen sein. Bei den Rechtsbögen erfolgt die Anpassung schneller als bei den Linksbögen (Linksbögen bei den Diagrammen zum Radialstellungsindex auf der linken Seite)

5.3 Entwicklung der Schienenprofile im Betriebseinsatz

Abbildung 55 bis Abbildung 57 zeigen die Entwicklung der Schienenprofile im Betriebseinsatz. Um Veränderungen gegenüber den nominellen Schienenprofilen sichtbar zu machen, werden für diese Betrachtung drei der vier Radprofile aus Abbildung 51 (ohne Radprofil zb.Opt.tww) mit den abgezeichneten Schienen aus den drei Bögen Biel-Brücke, Biel-Portal und Lügelwang gepaart. Vergleichsweise zu den oben betrachteten Radprofilen aus den Shuttle-Fahrzeugen streuen die Verläufe der berührgemessenen Funktion bei den Schienen deutlich weniger. Ganz links sind jeweils die Δr -Verläufe, in der Mitte die Verläufe der Radialstellungsindizes bei den jeweils bogenäusseren Schienen und rechts daraus der Mittelwert aus allen Radialstellungsindizes. Für das Radprofil

- zb.Opt.tww zeigen sich in allen Bögen kaum Unterschiede und es stellt sich ein $q_E \leq 1$ für einen Bogenradien bis 100m ein.
- RTE29500 zeigen sich in den drei Bögen leichte Unterschiede und es stellt sich ein $q_E \leq 1$ für Bogenradien in der Spanne zwischen 350m und 450m ein.
- Triebradsatz.tww zeigen sich deutlich günstigere Werte als beim RTE-Profil und es stellt sich ein $q_E \leq 1$ für Bogenradien in der Spanne zwischen 200m und 300m ein.

Vergleichsweise zu den nominellen Schienen in Abbildung 51 zeigen die Schienen bei längerem Betriebseinsatz Veränderungen, die sich günstiger auf den Radialstellungsindex auswirken. Um eine Einschätzung zur gegenseitigen Anpassung von Radprofilen aus dem Betriebseinsatz und von Schienenprofilen aus längerer Liegedauer nach dem Schleifen vornehmen zu können ist die aus der Betriebserprobung verfügbare Stichprobe zu klein und bei den Schienen vor allem durch die Konditionierung beeinträchtigt. Es zeigt sich aber aus den vorliegenden Ergebnissen, dass vor allem die Räder im Betriebseinsatz deutliche Veränderungen erfahren. Bei den Schienen zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Diese ist aber nicht so ausgeprägt wie bei den Rädern. Es ist davon auszugehen, dass die Veränderung bei den Schienen weniger schnell voranschreitet, da bei diesen die Anzahl an Belastungszyklen deutlich geringer ist als bei den Rädern.

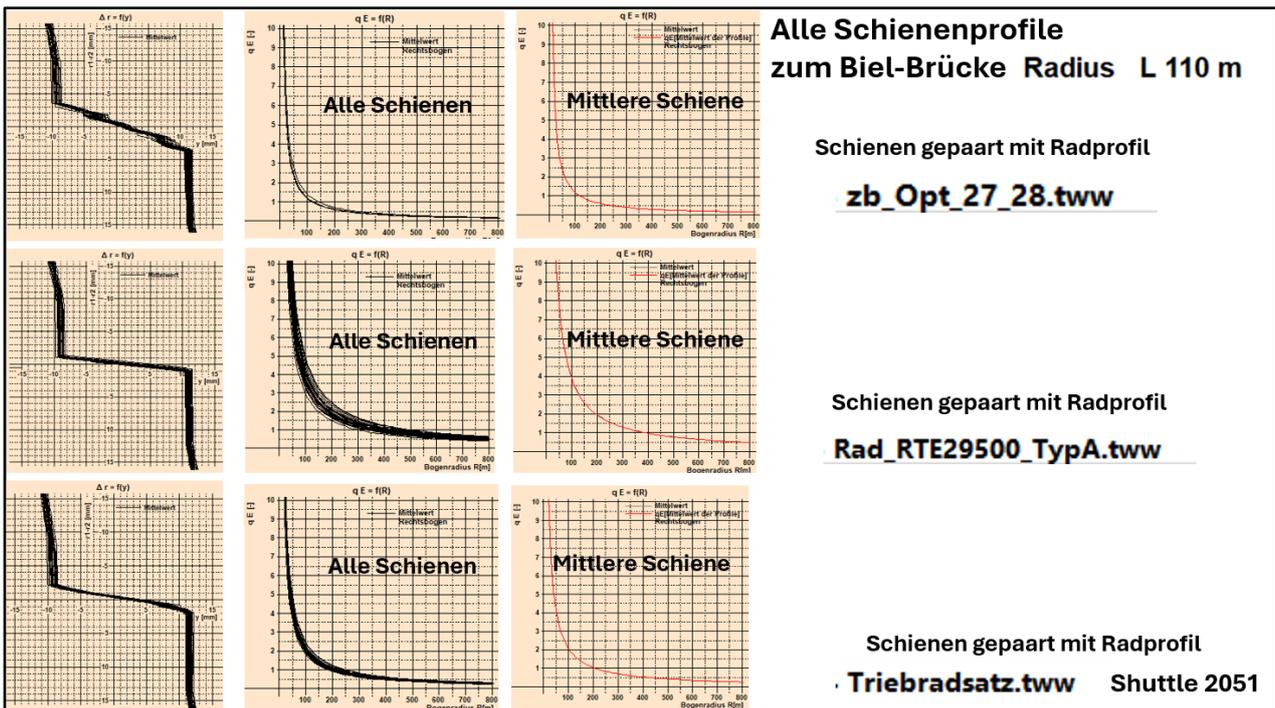


Abbildung 55: Ausgewählte Radprofile gepaart mit den Schienenprofilen von Biel-Brücke

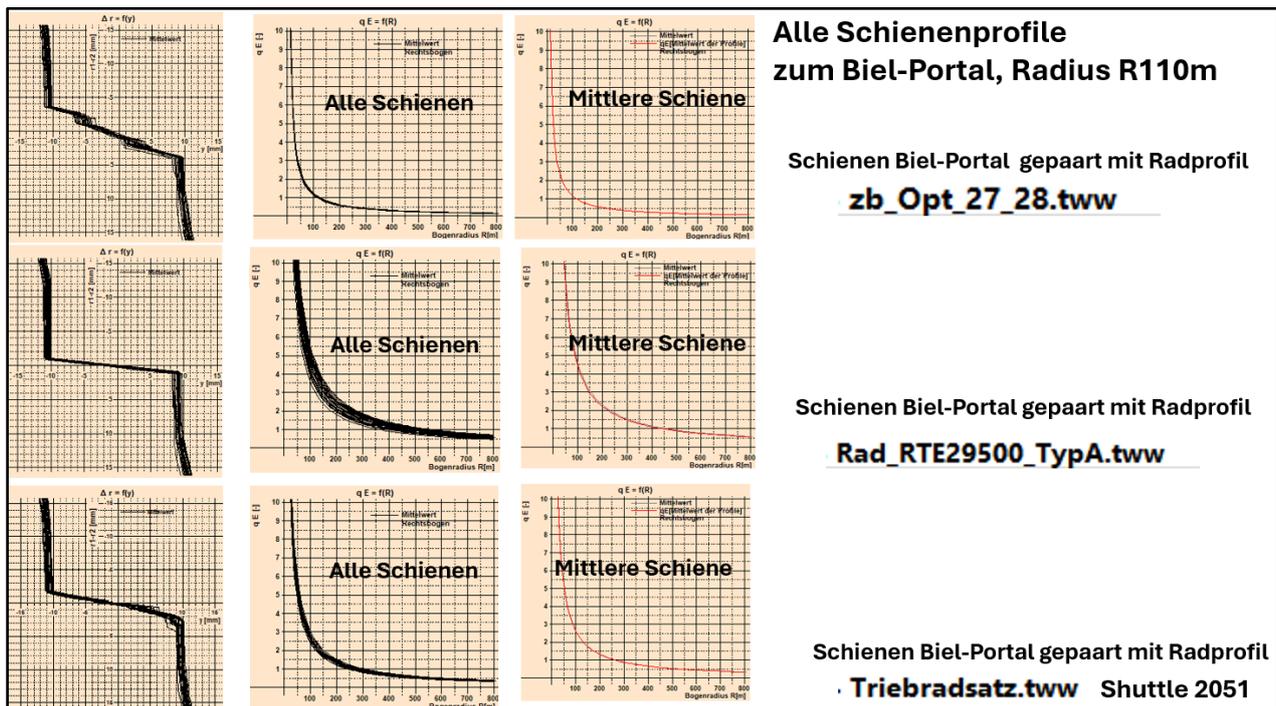


Abbildung 56: Ausgewählte Radprofile gepaart mit den Schienenprofilen von Biel-Portal

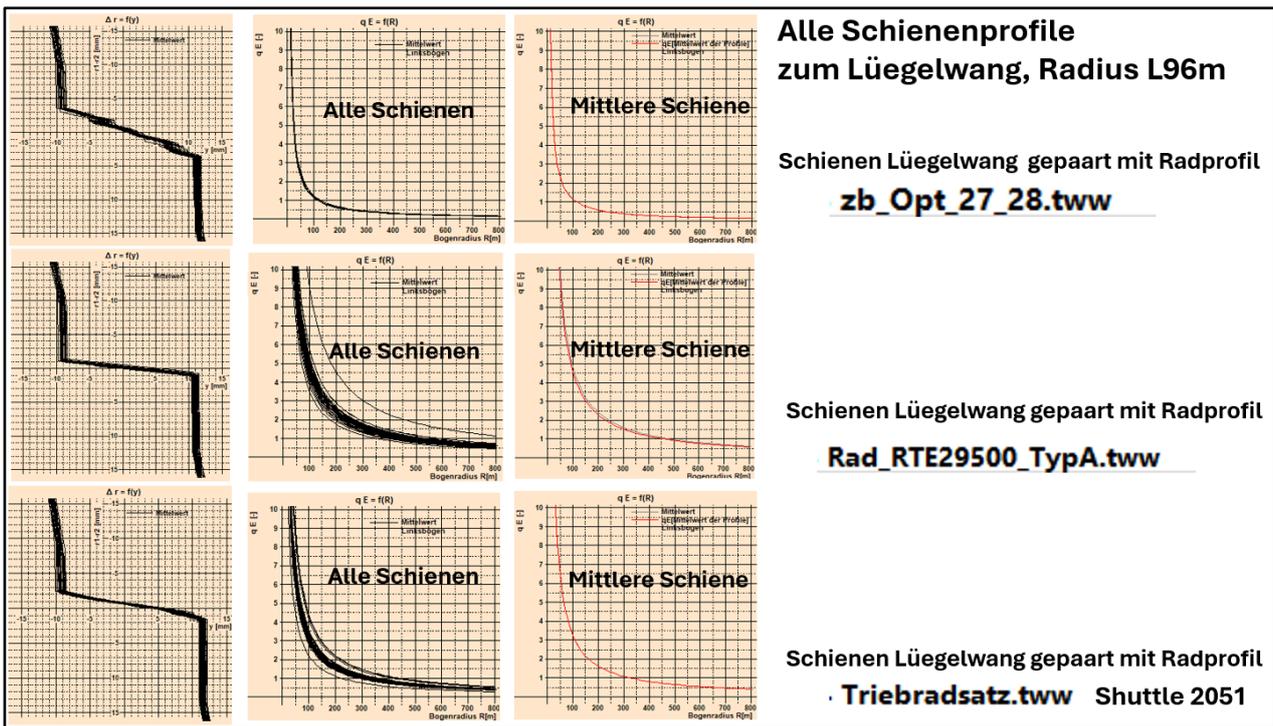


Abbildung 57: Ausgewählte Radprofile gepaart mit den Schienenprofilen von Lüegelwang

Fazit zur berührungsgeometrischen Entwicklung der Schienenprofile

Bei der Entwicklung der Schienenprofile wird vor allem deren Streuung betrachtet. Die Beurteilung hängt vom verwendeten Radprofil ab. Die geringsten Streuungen stellen sich beim verschleissangepassten Radprofil **zb_Opt_27_28** ein. Dieses zeigt aufgrund des Radialstellungsindex die beste Verschleiss-Anpassung im Vergleich zum Nominalprofil und zu demjenigen eines Triebbradsatzes nach zweijährigem Einsatz auf der Strecke Täsch-Zermatt. Die drei betrachteten Bögen zeigen ein ähnliches Verhalten sowohl hinsichtlich der Radialstellungsindizes als auch bei der Streuung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich bei allen drei Bögen eine Spurerweiterung eingestellt hat. Dies führt im Vergleich zur nominellen Schiene zu einem günstigeren Bogenlaufverhalten.

5.4 Einfluss der Radprofils auf den Radialstellungsindex auf ganzen Strecken

Mittlerweile liegen für die MGBahn Schienenprofile für alle Strecken, erfasst durch das Diagnosefahrzeug von Sersa, vor. Die vier weiter oben erwähnten Radprofile wurden mit den Schienen der gesamten Strecken der MGBahn gepaart. Dafür stehen die Schienenprofile in einem Abstand von 1m über die gesamte Streckenlänge zur Verfügung. Die Abbildung 58 zeigt die Paarung der Schienenprofile mit den vier Radprofilen des Streckenabschnitts Täsch – Zermatt. Oben in der Abbildung ist das Streckenprofil mit den Trassierungsgrößen Bogenradien und Streckenneigung dargestellt. Unten sind die Radprofile mit den Schienen der Strecke gepaart und mit diesen verortet. Der Radialstellungsindex wird nur für die Bögen ermittelt und aufgeführt. Bei jeder Paarung ist rechts eine Legende platziert, aus der für jeden Bogen der Radialstellungsindex ermittelt werden kann. Daraus ist klar ersichtlich, dass die Radprofile RTE29500 und Triebbradsatz.tww für diesen Streckenabschnitt völlig ungeeignet sind. Am besten schneidet das spurkranzgeschwächte Radprofil **zb_Opt.tww** ab. Um zu verstehen, warum auch dieses Radprofil auf gewissen Abschnitten den Radialstellungsindex nicht erfüllt, ist eine vertiefte Strecken- und Profilanalyse erforderlich.

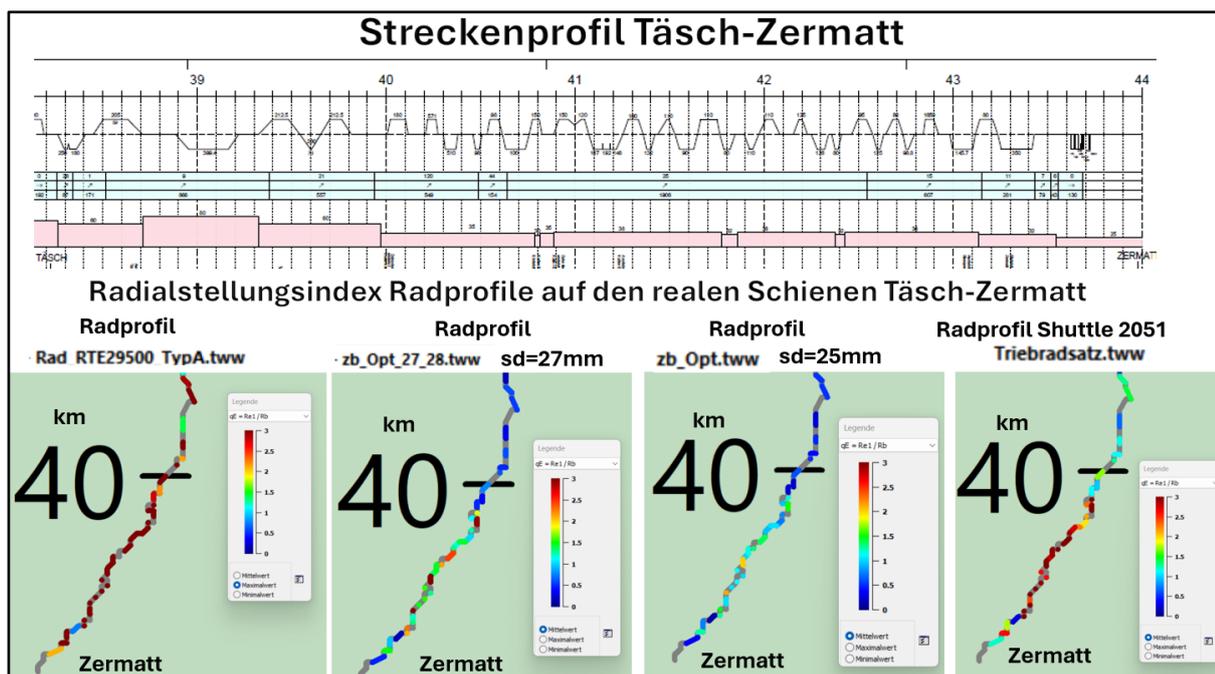


Abbildung 58: Auszug Täsch-Zermatt aus der Rad-Schienen-Paarung Brig-Zermatt

Fazit zum Verhalten auf der gesamten Strecke Täsch-Zermatt

Das Interaktionsverhalten der verschiedenen Radprofile auf der gesamten Strecke Täsch-Zermatt ist vergleichbar mit demjenigen in den drei regelmässig gemessenen Bögen zum Biel und Lügelwang. Auch das günstigste Radprofil wird in den engsten Bögen den geforderten Radialstellungsindex nicht erfüllen.

5.5 Einfluss der Bremssohle auf die Berührungsgeometrie

Beim Shuttle 2053 mussten im Juli 2023 alle Triebbradsätze (beim Shuttle sind alle Radsätze durch den Antriebstrang miteinander verbunden) wegen Muldenbildung und daraus resultierenden Fahrflächenschädigungen an einem Rad reprofiliert werden. Dabei mussten die Raddurchmesser zwischen 3.5mm und 5.5mm reduziert werden, was grosse Auswirkungen auf den über die ganze Periode ermittelten Verschleissindikator hatte (siehe Abbildung 3). Die Abbildung 59 zeigt die Schädigung in Form von Fahrflächenausbrüchen und die durch den Bremsklotz erzeugte Mulde. In Abbildung 60 ist die Berührung von Rad und Schiene in einem Linksbogen dargestellt. Die Mulde verhindert den Aufbau der Rollradiendifferenz. In der Folge tritt Zweipunktberührung und vermutlich im Bogen ein «Hin- und Herspringen» zwischen den möglichen Berührungen in der Lauffläche und der Spurkranzflanke auf. Die Mulde hat sich nur am rechten Rad gebildet. Am linken Rad scheint sich zwischen Bremsklotz und Radlauffläche ein konformer Kontakt einzustellen.

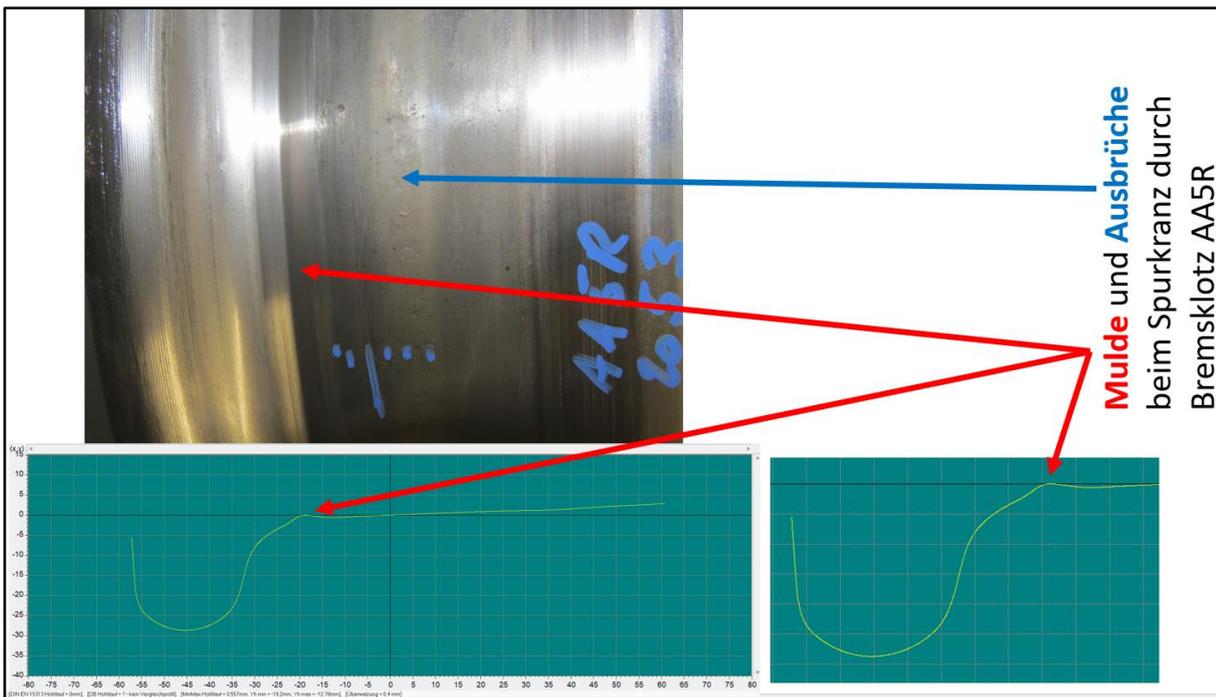


Abbildung 59: Muldenbildung im Bereich der Hohlkehle durch Interaktion des Rades mit dem Bremsklotz

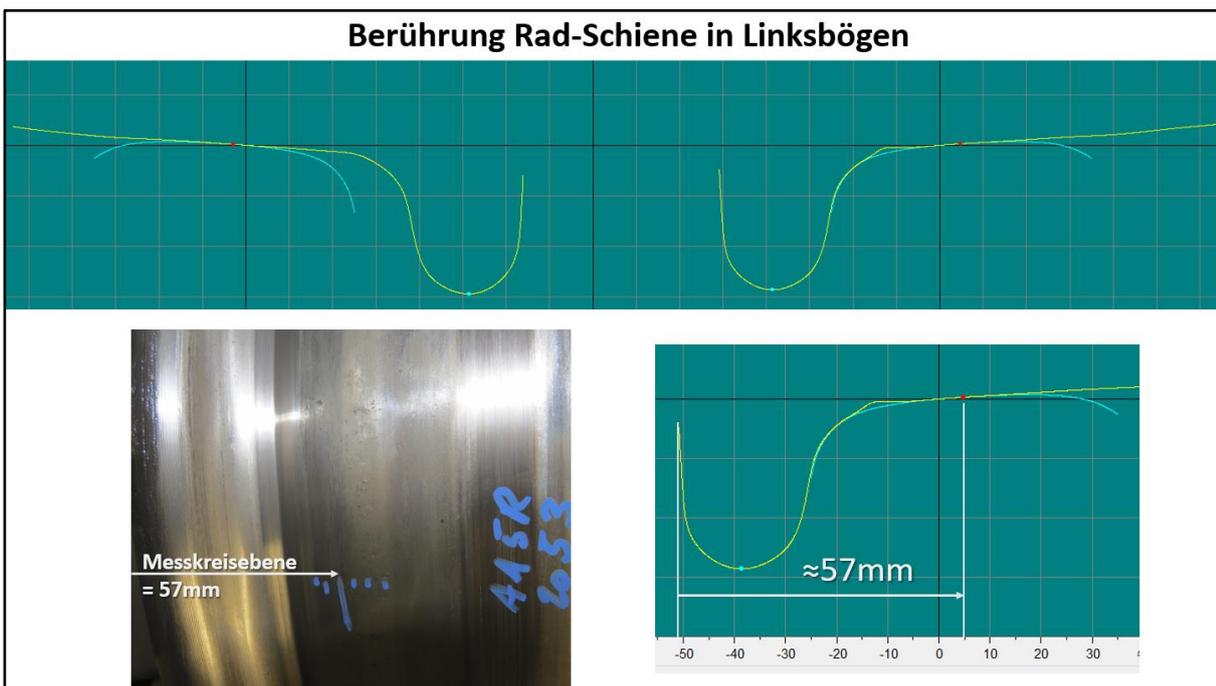


Abbildung 60: Paarung von Rad und Schiene in einem Linksbogen

6 Lärm: Messungen / Überwachung und Resultate zur Schiene – Noise [10]

In diesem Kapitel werden Untersuchungen im Rahmen einer Messkampagne bei der MGBahn beschrieben. Ziel der Untersuchungen war es, erste phänomenologische Studien an Messdaten zur Analyse von Kurvenkreischen durchzuführen.

Abbildung 61 zeigt eine Übersicht über die prinzipielle Vorgehensweise bei der Analyse und Modellierung des Phänomens «Kurvenkreischen», welche bereits im vorangegangenen Bericht gezeigt wurde. Die hier beschriebene und durchgeführte Messkampagne ist als zusätzlicher Vorversuch zu werten (hervorgehoben), um eine spätere umfangreiche Messkampagne («Feldmessungen») präziser planen und effizienter durchführen zu können. Dabei konnten Synergien zwischen den Themenstellungen genutzt werden, beispielsweise waren andere Forschungseinrichtungen (Universität Sheffield, AC2T) aus anderen Projekten involviert, um gemeinsame Erkenntnisse ziehen zu können.

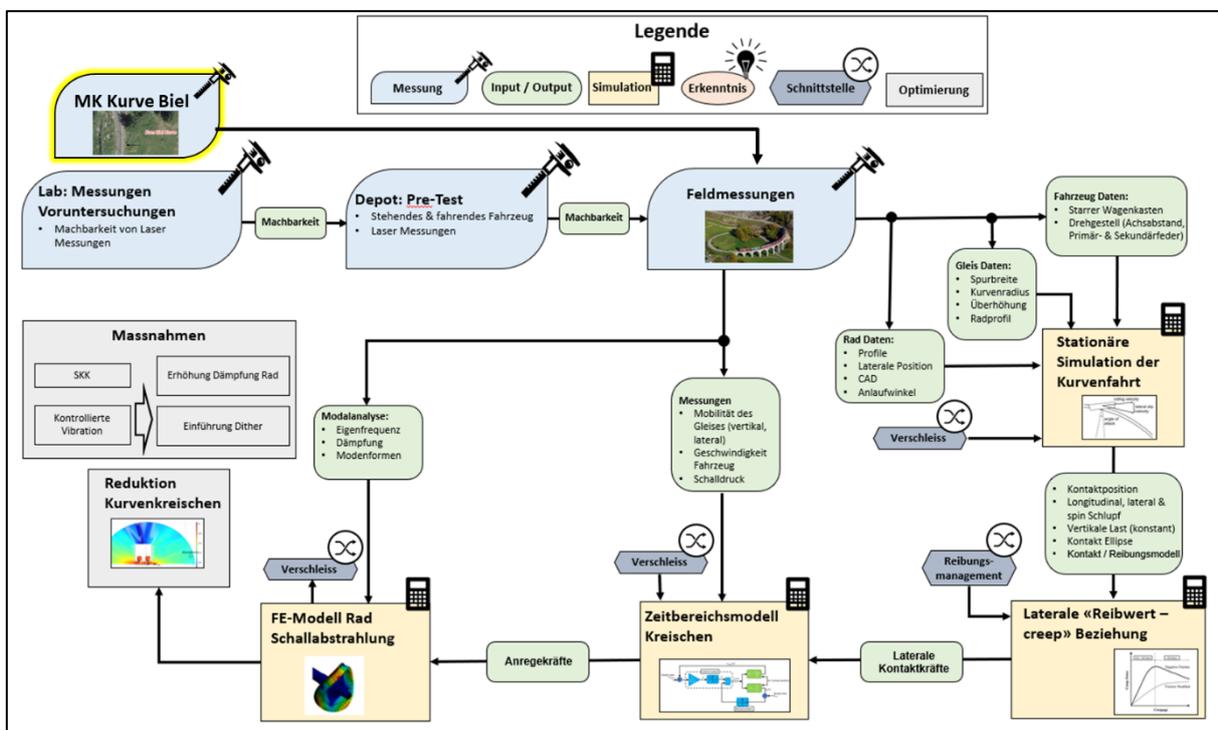


Abbildung 61: Prinzipielle Vorgehensweise bei der Analyse und Modellierung des Phänomens «Kurvenkreischen»

6.1 Messkampagne „Zum Biel Brücke“, Oktober 2023

6.1.1 Messort

Abbildung 62 zeigt ein Satellitenbild der untersuchten Kurve. Die Kurve befindet sich zwischen Täsch und Zermatt nahe eines Schotterwerks und ist gut zugänglich. Die Messungen in der Kurve fanden am 19.10. (Messaufbau und Vormessungen) und am 20.10. (Hauptmessungen) statt. Es wurden Akustikmessungen und Vibrationsmessungen während Vorbeifahrten durchgeführt, wie auch Hammermessungen zur dynamischen Charakterisierung des Gleises.



Abbildung 62: Messort «Zum Biel Kurve»

6.1.2 Voruntersuchungen

Bereits seit einiger Zeit werden an einem Shuttle – Fahrzeug Schall- und Vibrationsmessungen ausgehend von der Firma «Technode» durchgeführt. Im Vorfeld der Messkampagne «Zum Biel Brücke» wurden diese Messdaten über ein Webinterface gesichtet, um sicherzustellen, dass in der ausgewählten Kurve tatsächlich Kurvenkreischen auftritt, um das Risiko eines Fehlschlages bei der Messkampagne zu verhindern (z.B., wenn kein Kurvenkreischen während der Messungen auftritt und somit keine verwertbaren Daten entstehen würden).

Abbildung 63 zeigt eine Analyse von Schallmessungen an einem instrumentierten Radsatz eines «Shuttle» Triebwagens für zwei unterschiedliche Tageszeiten. Auf der rechten Seite ist eine Verortung der Schallmessung und Markierung der Kurve (+) dargestellt, auf der linken Seite werden die Spektren des Schalls abhängig von Zeit / Ort und Markierung der Kurve (schwarzer Kreis) gezeigt. Wie aus früheren Messberichten bekannt, zeigt sich auch hier Kurvenkreischen im Frequenzbereich von ca. 5000 Hz. Die Durchführung der Messkampagne ist somit zielführend.

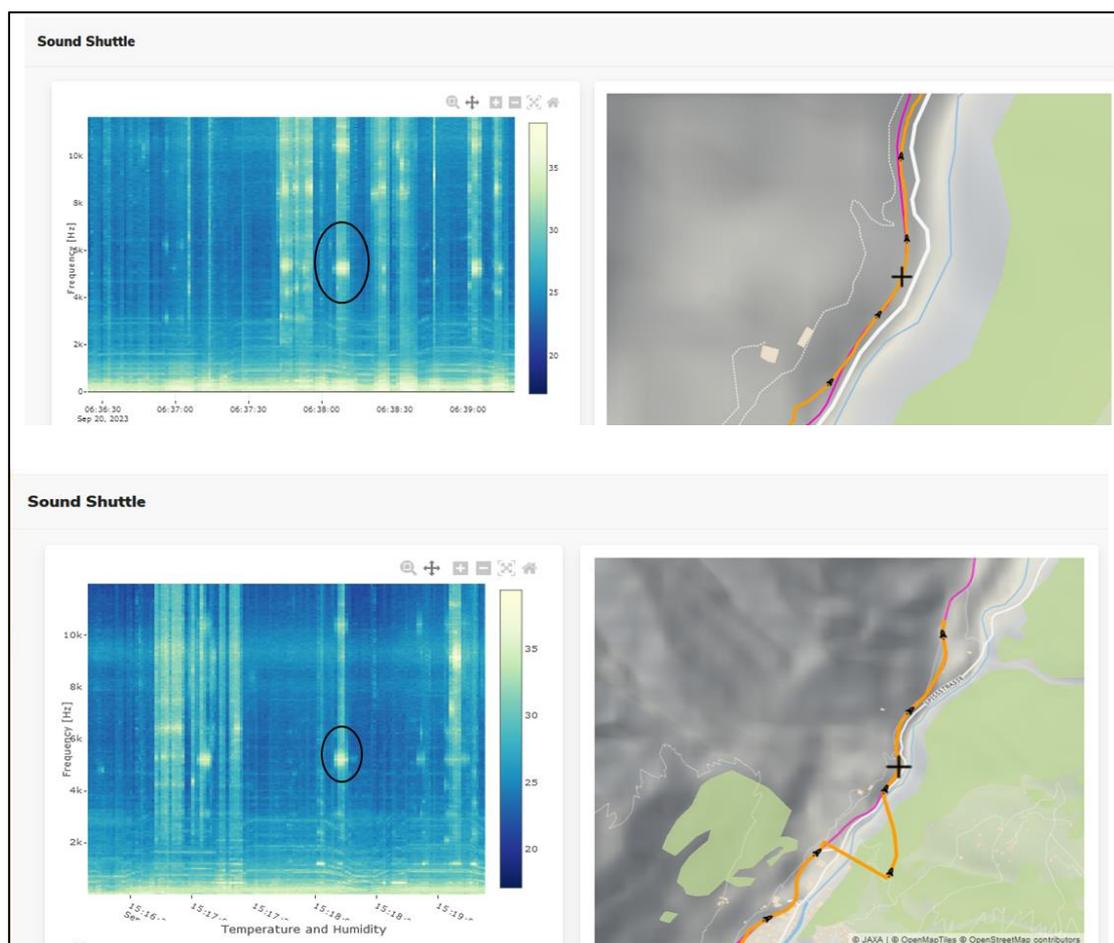


Abbildung 63: Analyse von Schallmessungen an einem instrumentierten Radsatz eines «Shuttle» Triebwagens

6.2 Messungen

6.2.1 Radsatz

Beim Kurvenkreischen wird Schall vom Rad nahe einer Mode des Rades abgestrahlt. Um die Moden des Rades zu ermitteln, wurden Messungen mittels Impulshammer in der Werkstatt durchgeführt. Dazu wurde der Radsatz hydraulisch am Achslager hochgehoben. Beschleunigungssensoren wurden an Rad und Radsatzwelle montiert. Mit unterschiedlichen Impuls-Hämmern wurde das Rad angeregt. Abbildung 64 zeigt einen Sensor, welcher an einem Rad montiert ist. Es wurde je ein Laufradsatz und ein Triebradsatz vermessen.

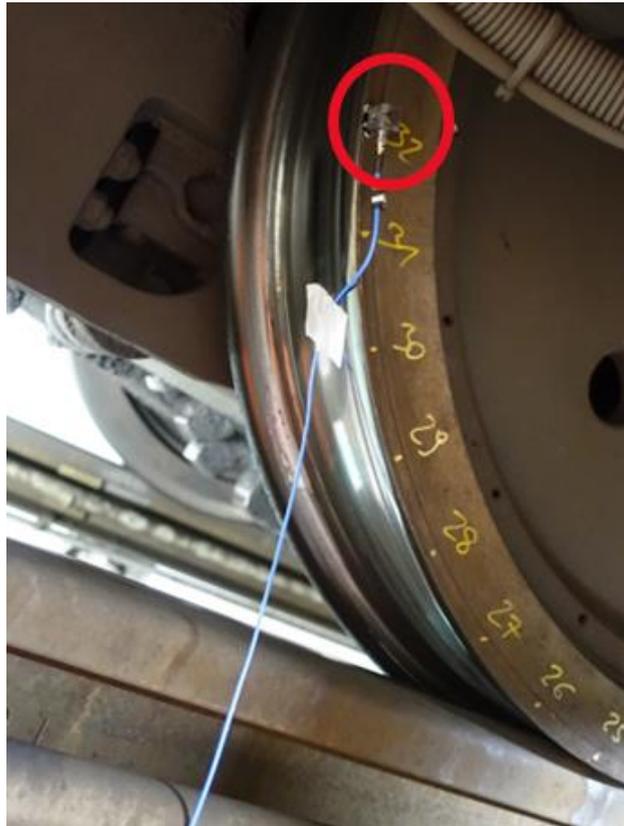


Abbildung 64: Hammermessungen am Radsatz in der Werkstatt

6.2.2 Stationäre Messungen in der Kurve

Abbildung 65 zeigt den Messaufbau während der Vorbeifahrt eines Triebzugs. An beiden Seiten des Gleises wurden Mikrofone auf Höhe der Radscheibe positioniert. An der inneren Schiene wurden triaxiale Beschleunigungssensoren am Schienenkopf montiert, wie auch ein uniaxialer Beschleunigungssensor an der Schwelle.



Abbildung 65: Instrumentierung der Kurve und Vorbeifahrt eines Triebzugs

Es wurden Hammermessungen am Gleis und Messungen des Vorbeifahrtgeräusches von unterschiedlichen Zügen in beide Richtungen durchgeführt. Weiters wurden relevante Umweltbedingungen wie Lufttemperatur und -feuchtigkeit gemessen.

6.3 Messergebnisse

6.3.1 Eigenfrequenzen und Inertanzen der Radsätze und Räder

Abbildung 66 zeigt die Eingangsinertanz einer Radscheibe eines Triebradsatzes. Die Scheibe wurde an Position 32 (siehe Abbildung 64) mittels Hammers angeregt und die Beschleunigung an derselben Position gemessen. Die Kohärenz als Gütekriterium zeigt sehr gute Werte (>0.95) ab einer Frequenz von ca. 200 Hz. Die Moden der Radscheibe sind klar ersichtlich (prägnante Peaks), ebenso wie die Mode, welche sich auch in Vorbeifahrtmessungen zeigt (bei ca. 5200 Hz).

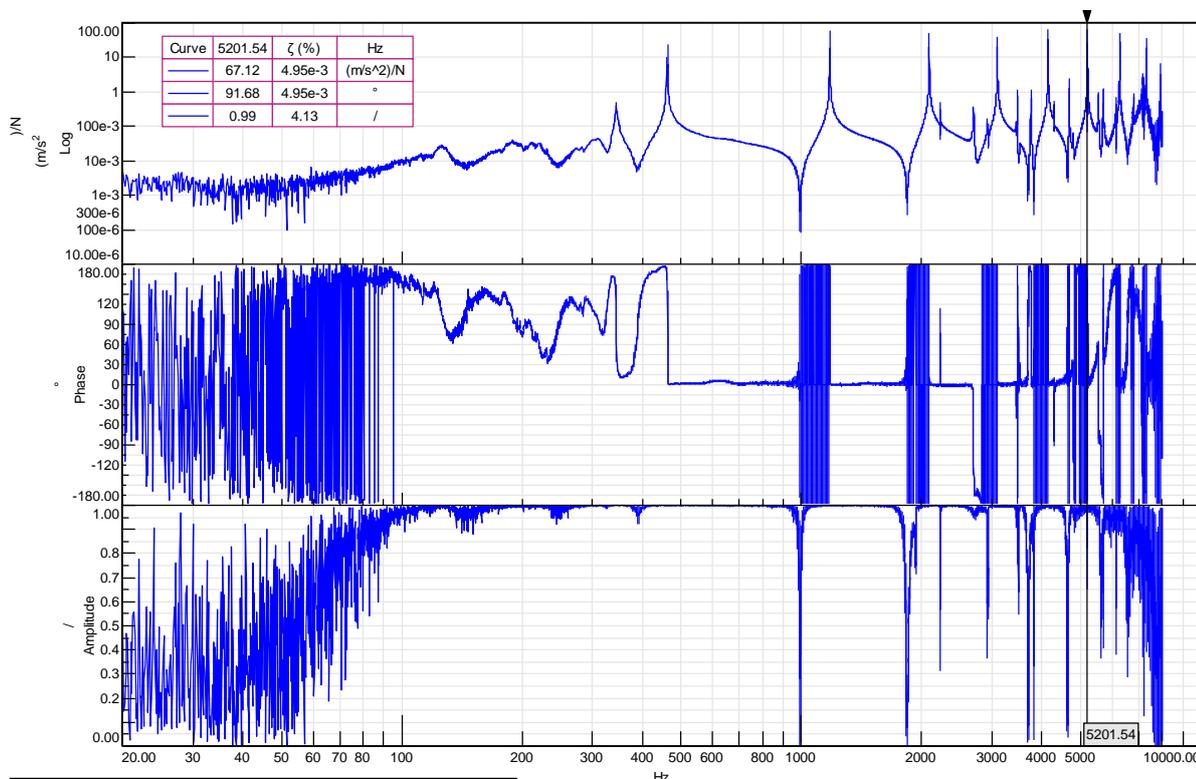


Abbildung 66: Eingangsineranz an einer Radscheibe eines Triebradsatzes – Magnitude (oben), Phase (Mitte), Kohärenz (unten)

Weitere Messungen wurden an einem Laufradsatz durchgeführt, wobei hier der Fokus auf den tieferen Frequenzbereich bis 1000 Hz gelegt wurde, um Erkenntnisse für das Thema «Verschleiss» zu ermöglichen (siehe Kapitel 3). Der Radsatz wurde an der Radscheibe angeschlagen (Abbildung 67, roter Pfeil) und an derselben Position wurde die Beschleunigung gemessen. Abbildung 68 zeigt die Messergebnisse. Die tieffrequenten Moden sind hinab bis ca. 6 Hz klar ersichtlich. Eine Zuteilung der Moden zu den entsprechenden Formen ist im weiteren Verlauf des Projektes im Zuge von Vergleichen mit Finite Elemente Berechnungen des Radsatzes vorgesehen.

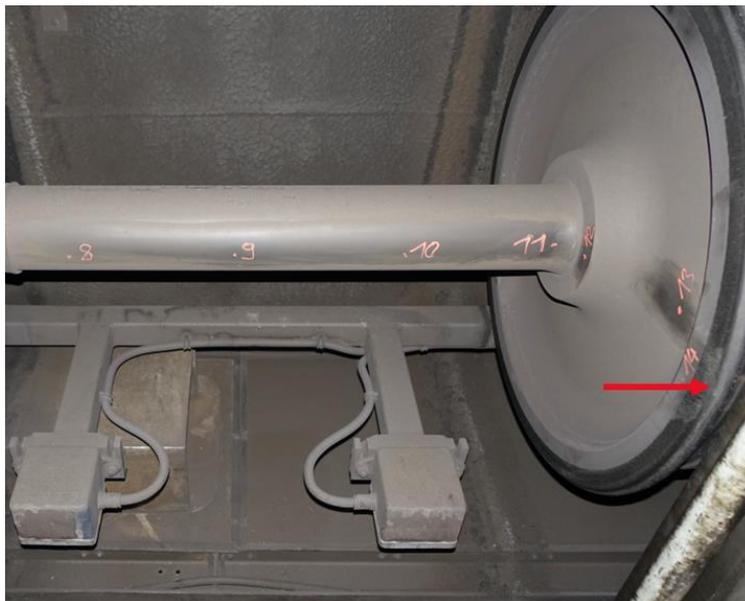


Abbildung 67: Hammermessungen am Laufradsatz in der Werkstatt

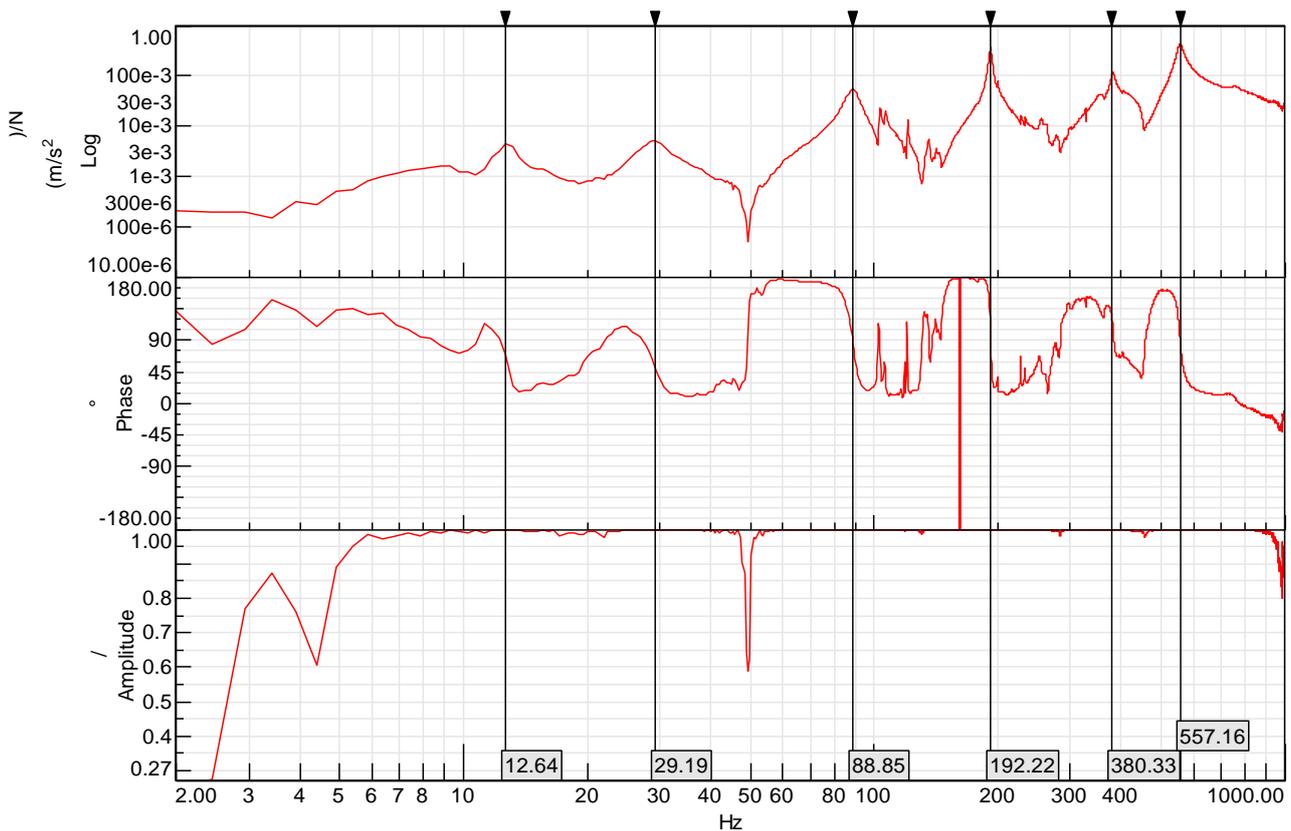


Abbildung 68: Eingangsinertanz des Laufradsatzes – Magnitude (oben), Phase (Mitte), Kohärenz (unten)

6.3.2 Eigenfrequenzen und Inertanzen des Gleises

Die Schiene wurde im Messquerschnitt wie in Abbildung 69 dargestellt mittels Impulshammer in vertikaler Richtung angeregt und die Beschleunigung wurde in den Sensoren (blau bzw. rot) gemessen. Daraus wurden die Eingangsinertanz (blau) und die Transferinertanz (rot) jeweils für die vertikale Richtung ermittelt. Die Ergebnisse daraus sind in Abbildung 70 ersichtlich. Eine gute Kohärenz wurde bis ca. 700 Hz erreicht. Bei ca. 159 Hz ergibt sich eine Antiresonanz, wobei zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht klar ist, woher diese Antiresonanz stammt. In zukünftigen

Untersuchungen wird ein Finite Elemente Modell des Gleises aufgebaut, mit diesem Modell sollte es möglich sein, diesen Effekt näher zu untersuchen. Die Messungen sind geeignet, ein erstes derartiges Modell zu erstellen, wobei dieser Frequenzbereich eher für das Thema «dynamischer Verschleiss» relevant ist als für Kurvenkreischen. Generell werden dynamische Messungen durchgeführt, um möglichst beide Themen bedienen zu können.

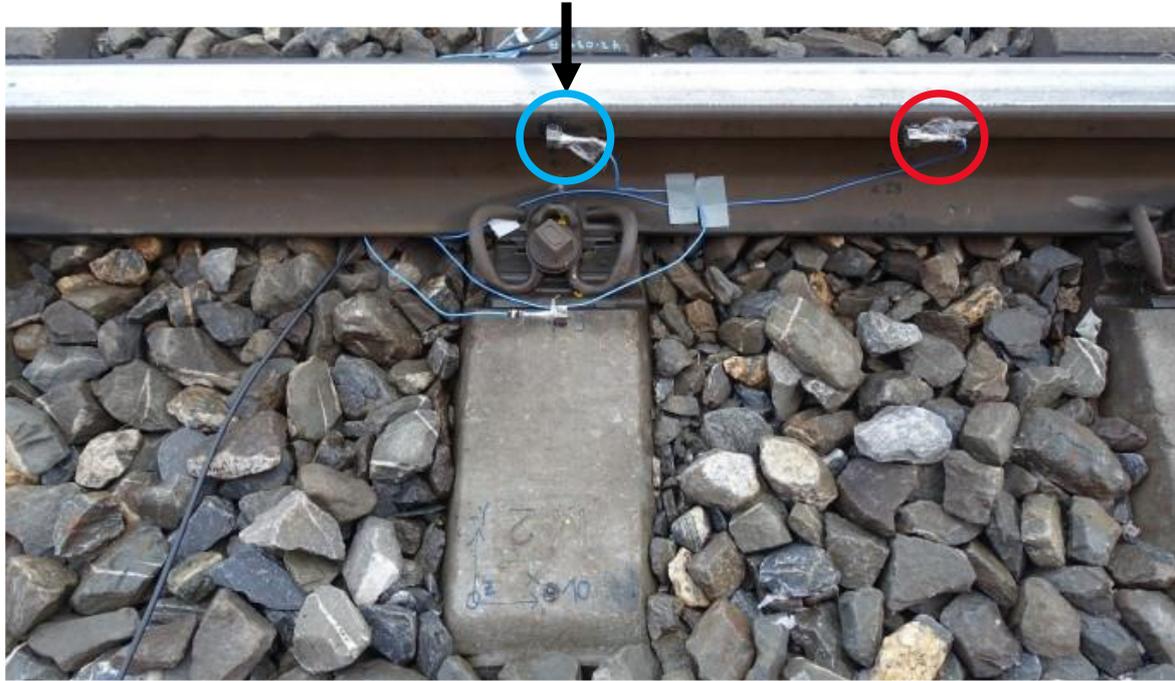


Abbildung 69: Anregung (schwarz) und Messung der Beschleunigung (blau bzw. rot)

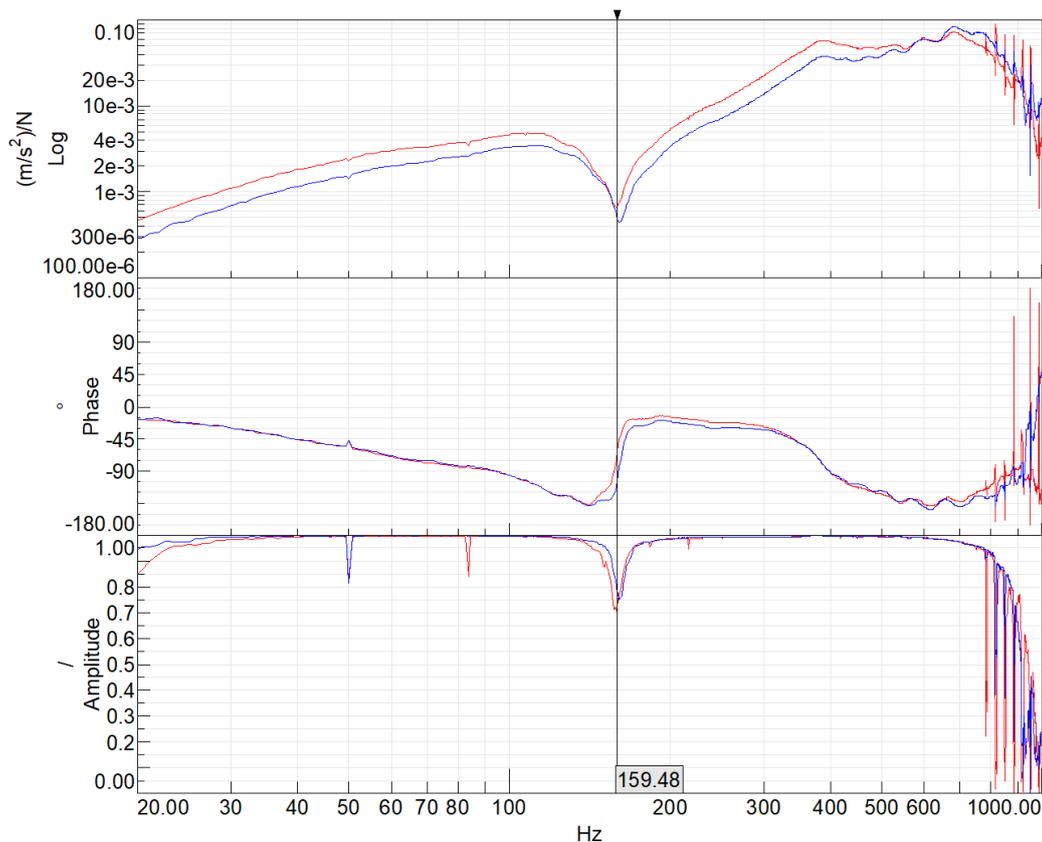


Abbildung 70: Eingangsineranz des Gleises bei Anregung an der Schwelle – Magnitude (oben), Phase (Mitte), Kohärenz (unten)

6.4 Kurvenkreischen während der Vorbeifahrt

Kurvenkreischen ist generell ein sehr komplexes Phänomen, welches von vielen Parametern abhängt, wie Reibungsverhältnissen, Tageszeit, Lufttemperatur und -feuchtigkeit, etc. Bei der Messkampagne wurde unterschiedliche Vorbeifahrten gemessen, wobei Kurvenkreischen nicht immer aufgetreten ist.

Abbildung 71 zeigt den Schalldruck (Power Spectral Density, PSD) an der Innenschiene während der Vorbeifahrt in Richtung Täsch. Das Kurvenkreischen tritt bei ca. 5140 Hz auf. Dies entspricht der Mode, welche bereits zuvor in Abbildung 66 hervorgehoben wurde. Der geringfügige Unterschied der gemessenen Frequenzen von Hammermessung und Vorbeifahrtsgeräusch ergibt sich dadurch, dass die Eigenfrequenz eines sich drehenden Rades immer etwas geringer ist als jene des stehenden Rades. Weiters wurden hier die Laufradsätze (grüne Pfeile) und die Triebradsätze (rote Pfeile) der zwei Triebwagen der beiden Züge markiert. Es zeigt sich, dass das Kurvenkreischen bei einem bestimmten Triebradsatz auftritt.

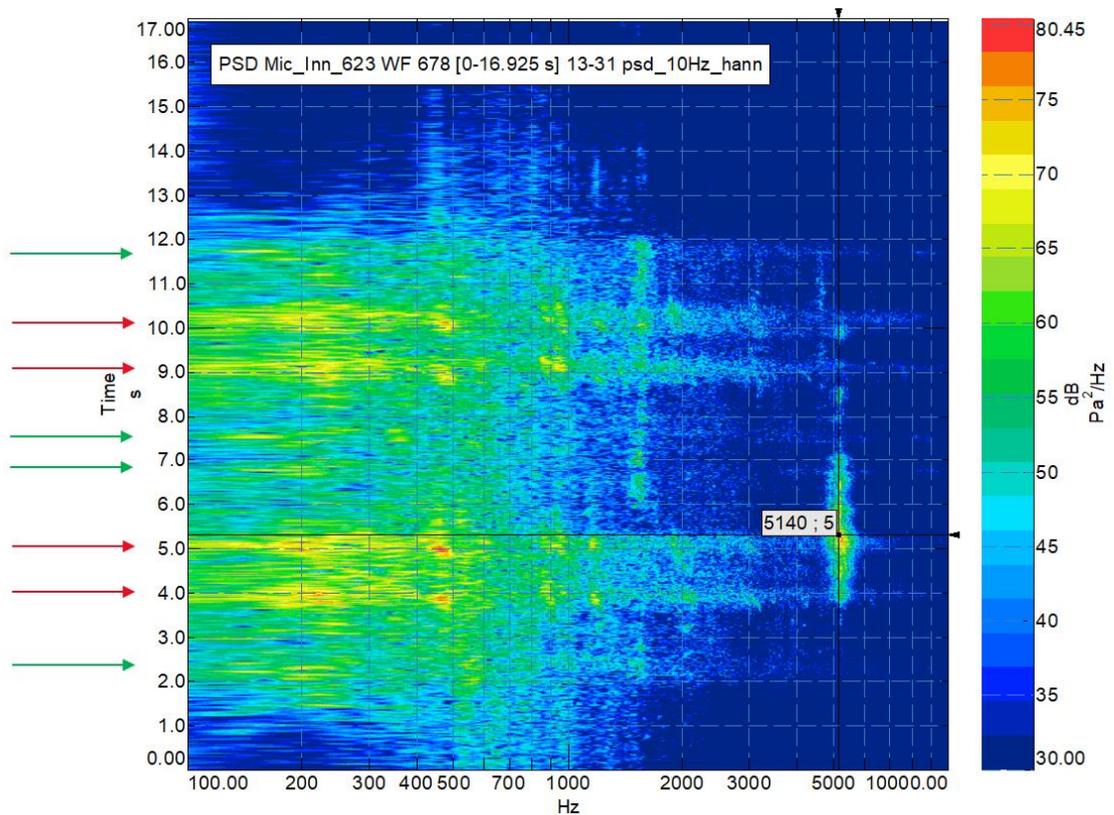


Abbildung 71: Schalldruck (PSD) an der Innenschiene während der Vorbeifahrt – Richtung Täsch - Kurvenkreischen bei ca. 5140 Hz

Weiters wurde die Richtungsabhängigkeit des Kurvenkreischen untersucht. Erste Analysen zeigten, dass das Kurvenkreischen eher bei der Talfahrt in Fahrtrichtung Täsch als bei der Bergfahrt in Fahrtrichtung Zermatt auftritt. Abbildung 72 zeigt einen derartigen Vergleich des Schalldrucks.

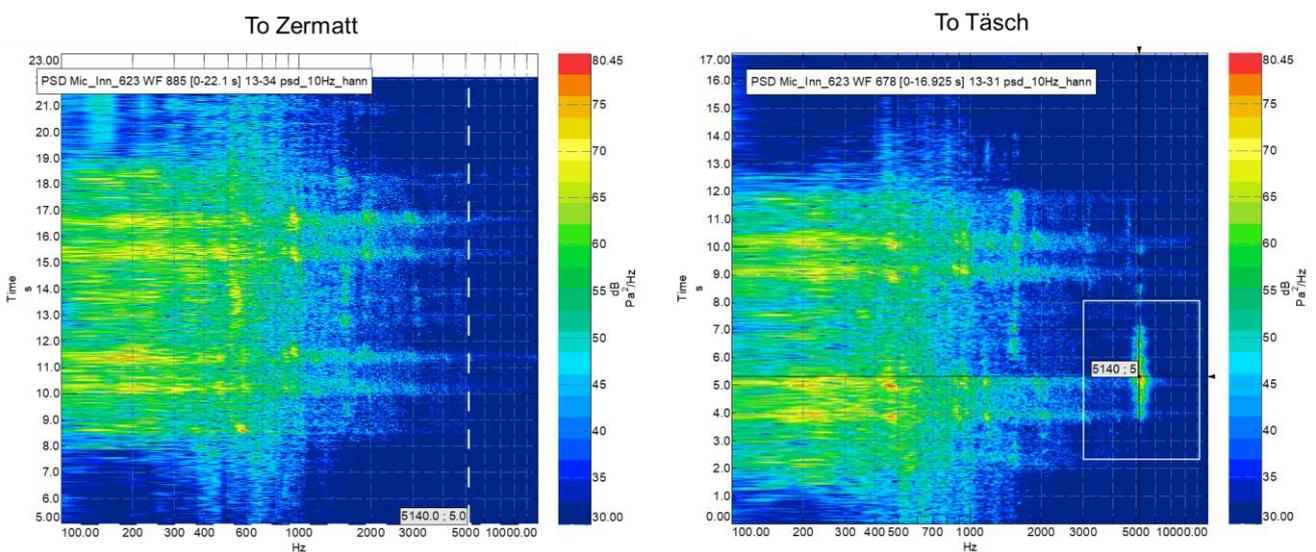


Abbildung 72: Schalldruck (PSD) an der Innenschiene während der Vorbeifahrt – Fahrt in Richtung Zermatt (links) und Täsch (rechts) - Kurvenkreischen bei ca. 5140 Hz

7 Messungen / Überwachung und Resultate Allgemein [11]

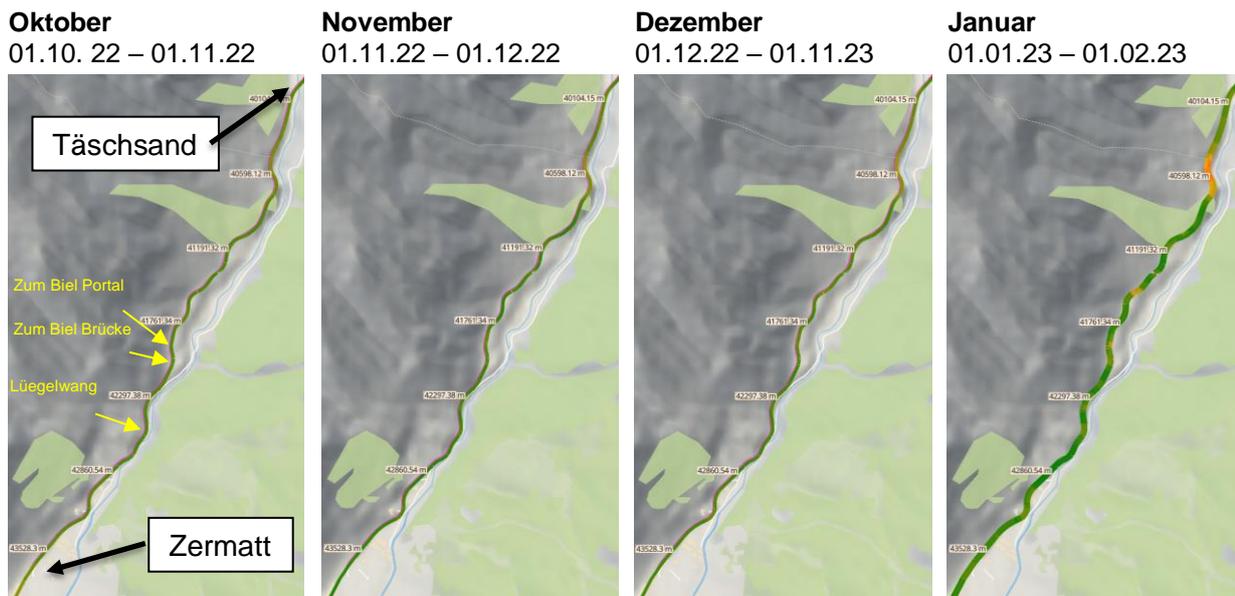
7.1 Schwingungen am Radsatzlager

Das Messsystem ist auf zwei Zugkompositionen der MGBahn, einem Komet ABDeh 2026 und einem Shuttle BDeh 2052 installiert. Die wesentlichen Komponenten sind die Beschleunigungssensoren an den Radsatzlagern eines Radsatzes, welcher bei Bergfahrt nachlaufend ist und Mikrofonen, welche in der Nähe desselben Radsatzes am Wagenkasten montiert sind. Zudem verfügt das Messsystem über eine Verortung mittels GNSS (globales Navigationssatellitensystem), welche benutzt wird, um die Position auf dem Durchfahrtsgeleis zu bestimmen.

Eine ausführliche Dokumentation ist im «Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch-Zermatt» [1] zu finden. Daher wird auf eine weiterführende Dokumentation an dieser Stelle verzichtet.

7.1.1 Messwerte Beschleunigungen – Allgemein

Um eine allgemeine Übersicht für die Messdaten zu erhalten, werden in der nachfolgenden Abbildung 73 die Beschleunigungswerte an den Radsatzlagern pro Monat während der zweiten Betriebserprobung dargestellt. Dabei gilt, dass grün überlagerte Streckenabschnitte auf wenig und rot überlagerte Streckenabschnitte auf starke Vibrationen hindeuten. Zusammenfassen lässt sich sagen, dass die Vibrationswerte auf der konditionierten Strecke über das ganze Jahr im «grünen Bereich» sind, was auf gut funktionierende SKK – Anlagen hindeutet.



Februar
01.02.23 – 01.03.23



März
01.03.23 – 01.04.23



April
01.04.23 – 01.05.23



Mai
01.05.23 – 01.06.23



Juni
01.06.23 – 01.07.23



Juli
01.07.23 – 01.08.23



August
01.08.23 – 01.09.23



September
01.09.23 – 01.10.23



Oktober
01.10.23 – 01.11.23

November
01.11.23 – 01.12.23

Dezember
01.12.23 – 01.01.24

Januar
01.01.24 – 01.02.24



Abbildung 73: Historie Vibrationen «Täschsand» - Zermatt, Oktober 22 - Dezember 22

7.1.2 Fazit zu den Beschleunigungswerten – Schlupfwellen im Allgemeinen

In den Sommermonaten Juli und August 2022 herrschten sehr hohe Tagestemperaturen. Dies führte dazu, dass sich die Beschleunigungswerte an den beiden mit Beschleunigungsaufnehmern ausgerüsteten Fahrzeugen (Komet 2026 und Shuttle 2052) erhöhten. Dies war einer der Gründe für die Fortsetzung der Betriebserprobung bei der MGBahn um ein weiteres Jahr. Im Sommer 2023 wurden die ausserordentlich hohen Temperaturen des Vorjahres nicht mehr erreicht. Immerhin bewegten sich die Temperaturen im Sommer 2023 in einer für diese Jahreszeit üblichen Grössenordnung. Aufgrund der Überwachung konnte festgestellt werden, dass sich der im Jahre 2022 beobachtete Effekt nicht wiederholte. Aufgrund von mittlerweile vorliegenden Prüfstandsversuchen zu dieser gemachten Erfahrung zeigt sich, dass die Leistungsfähigkeit der derzeit verwendeten Konditioniermittel bei erhöhten Schienentemperaturen eingeschränkt wird.

7.2 Messwerte zum Lärm

Die erhobenen Messdaten der beiden Messsysteme werden bezüglich SKK wie in den folgenden zwei Kapiteln beschrieben verarbeitet und aufbereitet und mit den auf das Durchfahrtsgleis projizierten Koordinaten des GNSS – Systems verortet.

Wenn nicht explizit erwähnt, so wurden alle Daten für das Jahr 2023 in den Auswertungen verwendet. Die Auswertungen sind je nach Messfahrzeug und Fahrtrichtung unterteilt.

Um Veränderungen oder Differenzen aufzuzeigen, wird der Verlauf über den Tag (Stunde 0 bis 23) oder über das Jahr 2023 (Kurswoche 1 bis 52) dargestellt.

Da der Shuttle 2052 hauptsächlich auf der betrachteten Strecke Täsch-Zermatt fährt, ist die Datengrundlage für dieses Fahrzeug sehr gut. Daher wird in den Auswertungen hauptsächlich auf dieses Fahrzeug eingegangen. Im Gegensatz dazu liegen vom Komet 2026 nicht über den ganzen Tag oder in jeder Kalenderwoche Messdaten auf der Strecke Täsch-Zermatt vor.

Nachfolgend wird in Abbildung 74 ein Plot der Auswertung für das Kurvenkreischen beschrieben, wobei im Plot oben die Bergfahrt und im Plot unten die Talfahrt dargestellt ist.

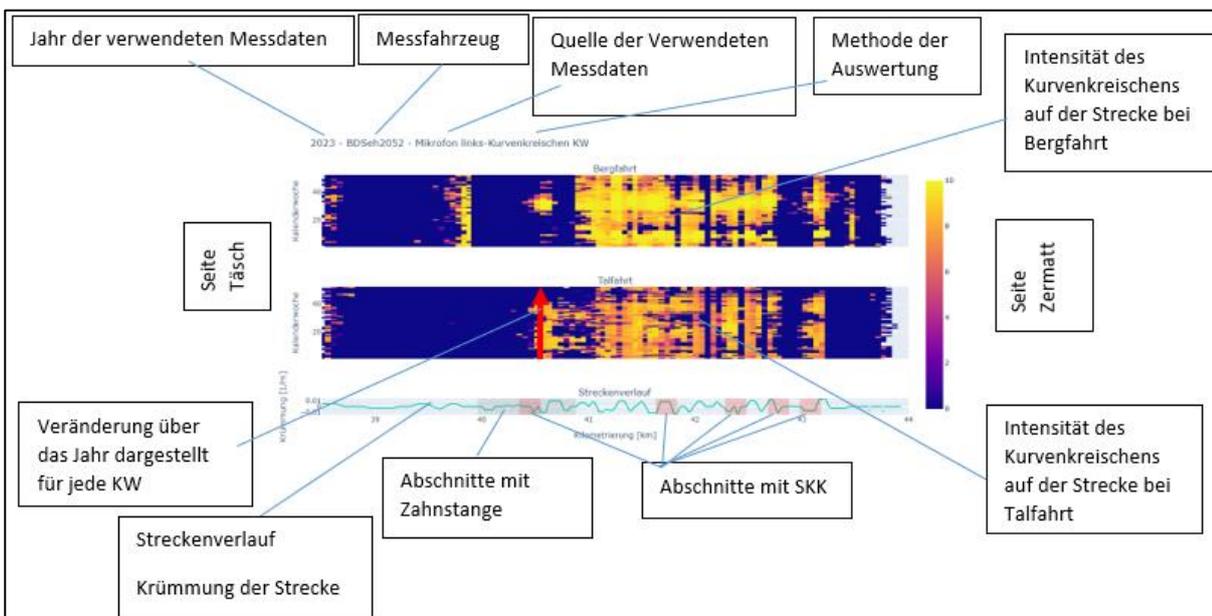


Abbildung 74: Beschreibung zu Auswertungsplot Technode

7.2.1 Filter für Kurvenkreischen

Die Messdaten der Mikrofone werden bereits im Sensor in den Frequenzbereich (Fourier Transformation) transformiert und die Amplituden pro Frequenz über eine Sekunde gemittelt. Die Information über die Phasenlage wird dabei verworfen, um ein Spektrum zu erhalten, welches allein im reellen Zahlenraum liegt.

Es wurde im ersten Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK Täsch - Zermatt festgestellt [1], dass Kurvenkreischen bei den Triebbradsätzen spezifisch bei einer Frequenz von ca. 5300 Hz auftritt. Dies trifft auf beide Zugkompositionen zu, da sie dieselben Drehgestelle und insbesondere dieselben Radsätze bzw. Räder verwenden.

Beim Kurvenkreischen scheint es sich um ein einzelnes isolierbares Band im Spektrum zu handeln.

Um einen Indikator zu erhalten, ob Kurvenkreischen auftritt, wurde dazu der im ersten Schlussbericht zur Betriebserprobung Täsch - Zermatt [1] beschriebene Filter verwendet. Dies resultiert in einer Grösse, welche nur relativ verglichen werden kann.

7.2.2 Filter für Schlupfwellen

Schlupfwellen haben aus Erfahrung eine Wellenlänge zwischen 40mm und 90mm. Um diese zu detektieren, muss also im Wellenlängenbereich und nicht im Frequenzbereich gefiltert werden. Der Zusammenhang zwischen den Wellenlängen und der Frequenz ist die Geschwindigkeit des Fahrzeuges.

Für die Berechnung eines charakteristischen Wertes für die Schlupfwellen wird das Spektrogramm der Beschleunigungen verwendet. Dabei werden die Frequenzen mittels der aktuellen Geschwindigkeit des Fahrzeuges in Wellenlängen umgerechnet. Anschliessend werden die diskreten Amplituden des Spektrums, welche im genannten Wellenlängenbereich liegen, verwendet, um die Varianz in diesem Band zu berechnen.

7.2.3 Resultate Kurvenkreischen

Die folgenden zwei Plots zeigen den Verlauf des Kurvenkreischens auf der Strecke Täsch – Zermatt bei der Berg- bzw. Talfahrt über das Jahr 2023 (Kalenderwoche auf vertikaler Achse).

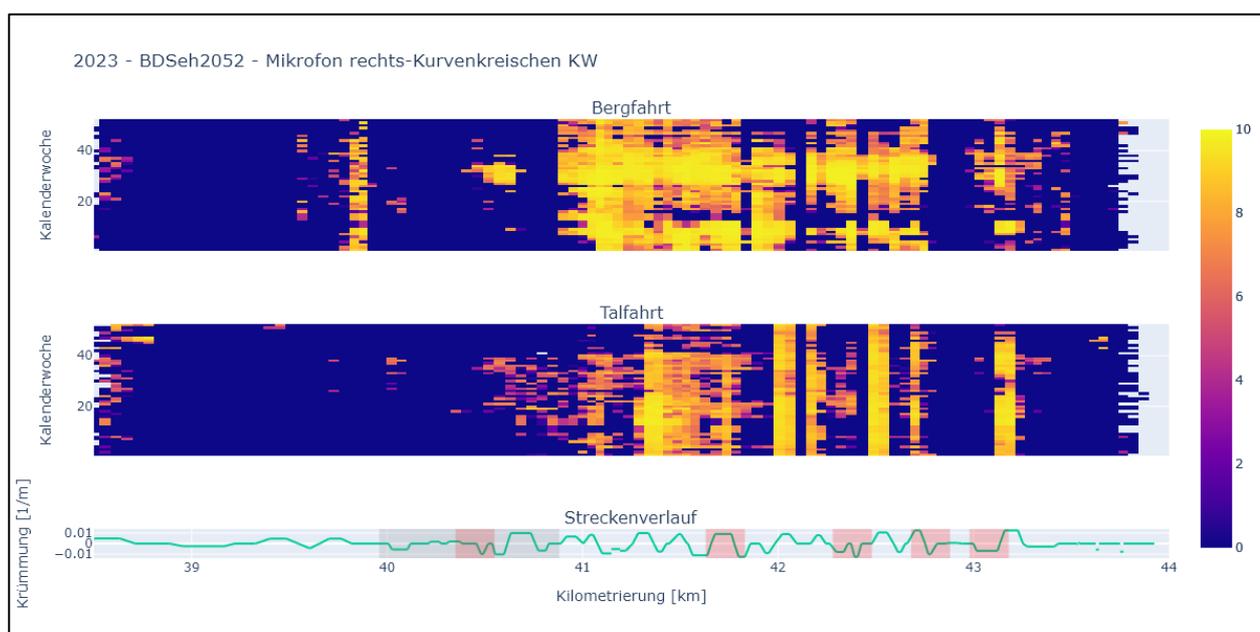


Abbildung 75: 2023 – BDeh 2052 - Mikrophon rechts-Kurvenkreischen KW

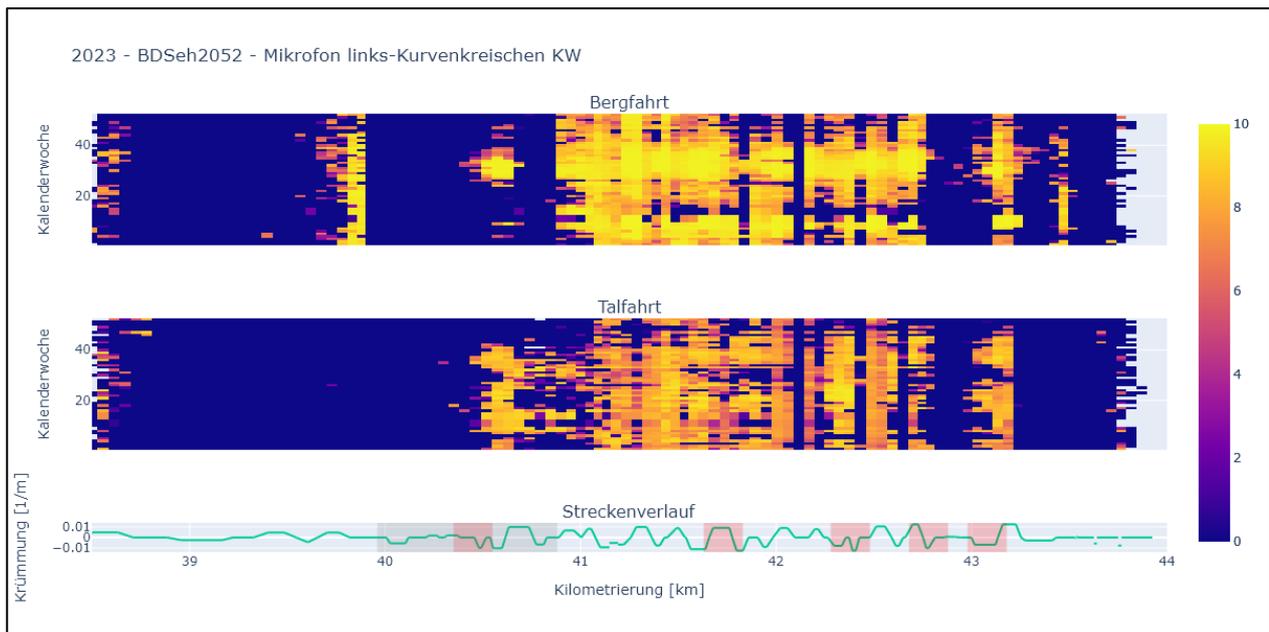


Abbildung 76: 2023 – BDeh 2052 - Mikrofon links-Kurvenkreischen KW

Die folgenden zwei Plots zeigen den Verlauf des Kurvenkreischen auf der Strecke Täsch – Zermatt und über den Tagesverlauf.

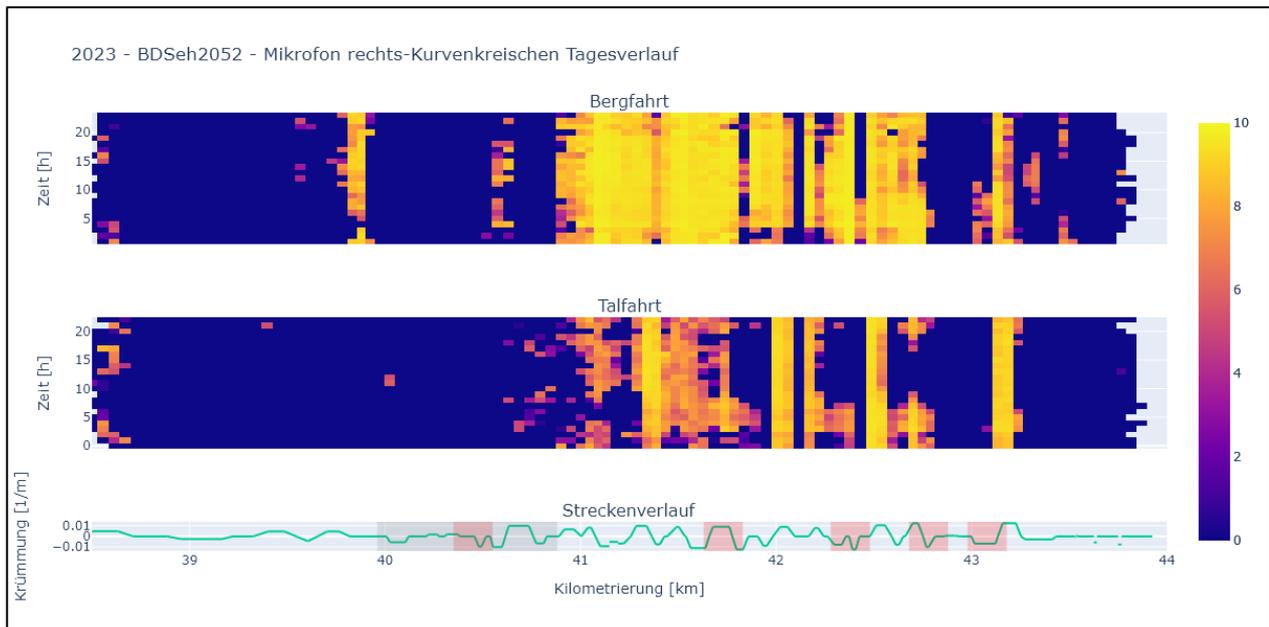


Abbildung 77: 2023 – BDeh 2052 - Mikrofon rechts-Kurvenkreischen Tagesverlauf

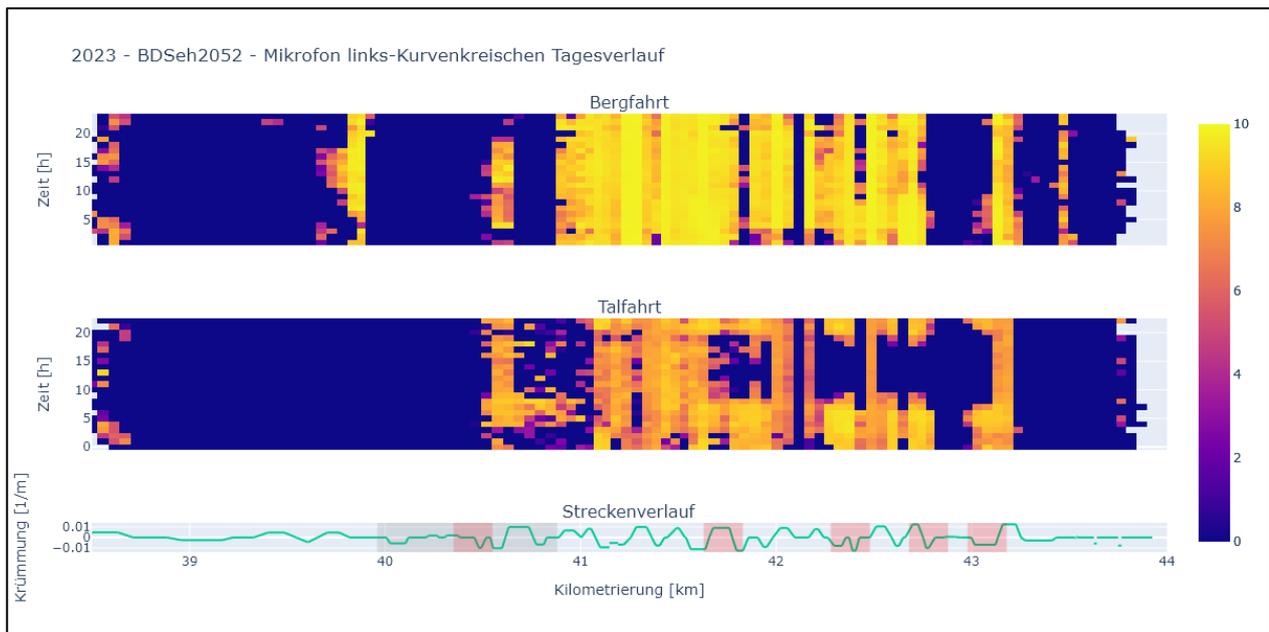


Abbildung 78: 2023 – BDeh 2052 - Mikrofon links-Kurvenkreischen Tagesverlauf

Die folgenden Schlussfolgerungen sind aus diesen Plots ersichtlich:

- Bei Bergfahrt ist das Kurvenkreischen prominenter als bei der Talfahrt. Bei Bergfahrt tritt Kurvenkreischen auch in mehr Kurven auf.
- Auffallend ist, dass der Abschnitt bei KM 39.9 nur bei Bergfahrt Kurvenkreischen verursacht.
- Im Sommer ist das Kurvenkreischen bei Bergfahrt intensiver als in den restlichen Jahreszeiten. Bei Talfahrt ist dieser Effekt nicht so gut sichtbar.
- Bei Talfahrt ist das Kurvenkreischen in der Nacht in den SKK – Bereichen intensiver als am Tag.

7.3 Resultate Schlupfwellen bzw. Vibrationen im Wellenlängenbereich von 40 – 90mm

Die folgenden zwei Plots in Abbildung 79 und Abbildung 80 zeigen den Verlauf der Varianz der vertikalen Beschleunigungen im Wellenlängenbereich von 40-90mm über die Strecke Täsch – Zermatt und über das Jahr 2023.

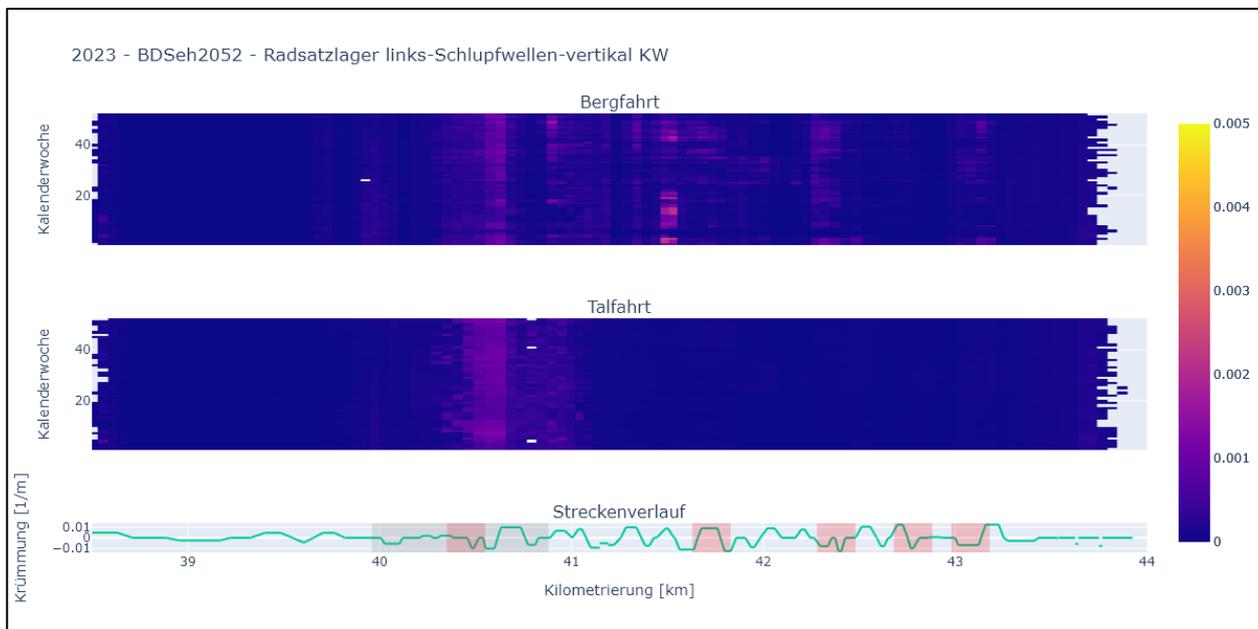


Abbildung 79: 2023 – BDeh 2052 - Radsatzlager links-Schlupfwellen-vertikal KW

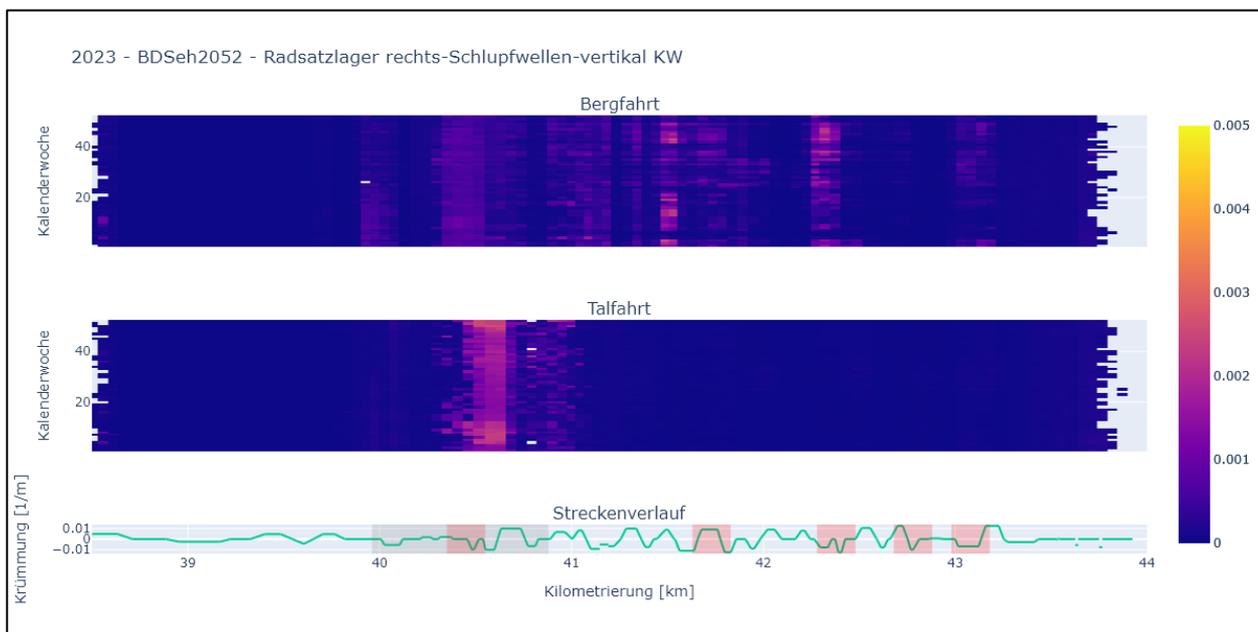


Abbildung 80: 2023 – BDeh 2052 - Radsatzlager rechts-Schlupfwellen-vertikal KW

Die folgenden zwei Plots in Abbildung 81 und Abbildung 82 zeigen den Verlauf der Varianz der lateralen Beschleunigungen im Wellenlängenbereich von 40 – 90mm über die Strecke und über das Jahr 2023. Achtung unterschiedliche Skalierung beim Farbbalken mit den Plots auf der vorangehenden Seite!

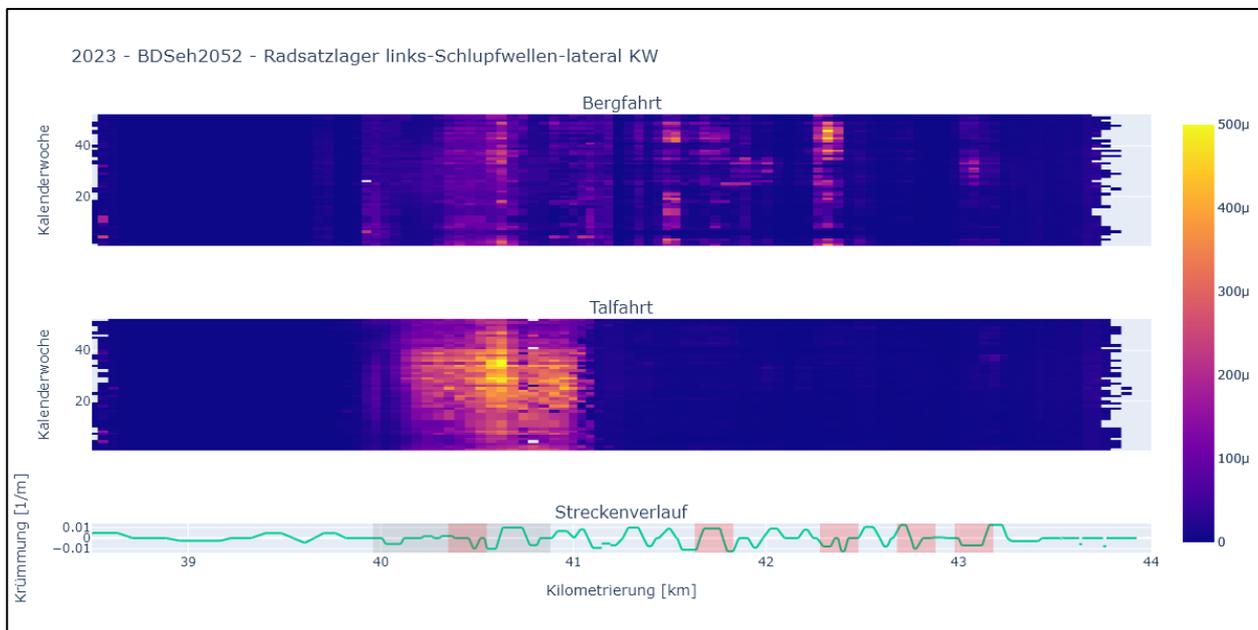


Abbildung 81: 2023 – BDeh 2052 - Radsatzlager links-Schlupfwellen-lateral KW

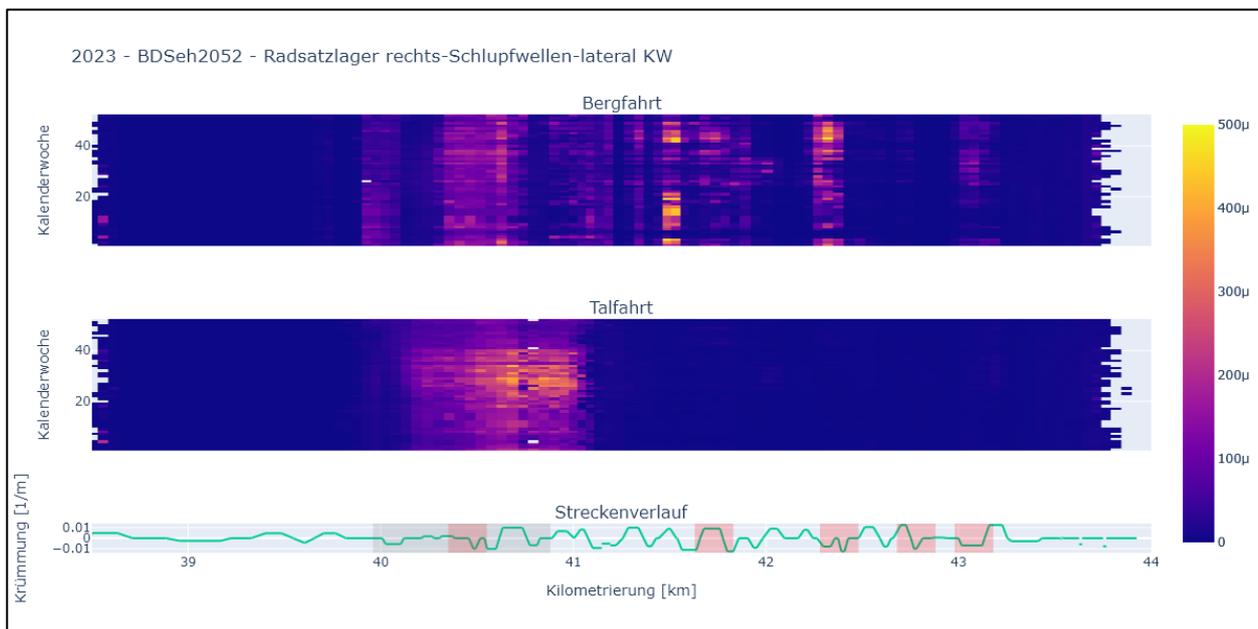


Abbildung 82: 2023 – BDeh 2052 - Radsatzlager rechts-Schlupfwellen-lateral KW

Die folgenden Punkte sind aus den obigen Plots ersichtlich:

- Generell ist auffallend, dass die Darstellungen alle grosse Unterschiede zwischen Berg- und Talfahrt zeigen. Die möglichen Ursachen dafür sind die Traktionsverhältnisse (Bremsen oder Traktion) und die Position des gemessenen Radsatzes im Zug (vorlaufender oder nachlaufender Radsatz am Drehgestell bzw. auch vor- oder nachlaufendes Drehgestell am Wagen).
- Bei Bergfahrt gibt es mehr Abschnitte, welche zu Vibrationen im definierten Wellenlängenbereich neigen. Bei Talfahrt liegen die Bereiche in denen Vibrationen im definierten Wellenlängenbereich auftreten ausschliesslich im Bereich der Zahnstangen.
- Laterale Vibrationen im definierten Wellenlängenbereich treten bei Talfahrt auf einer wesentlich längeren Strecke im Zahnstangenbereich auf als vertikale Vibrationen.

7.4 Diskussion der Resultate

7.4.1 Veränderung ab Ende Januar 2022

Dass Kurvenkreischen bei Bergfahrt so stark vorhanden ist, erstaunt, da dies im Jahr 2022 so nicht aufgefallen ist.

Daher wurde der Verlauf über die Tage genauer analysiert und in den folgenden zwei Plots in Abbildung 83 und Abbildung 84 dargestellt:

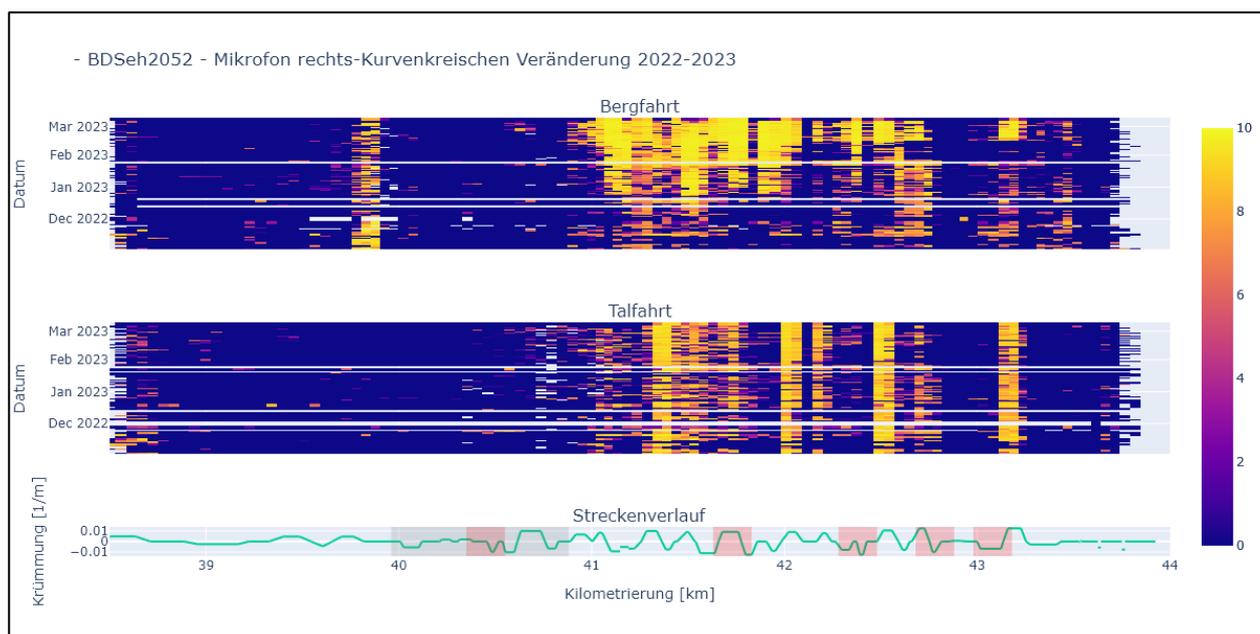


Abbildung 83: BDeh 2052 Mikrophon rechts Kurvenkreischen 2022-2023

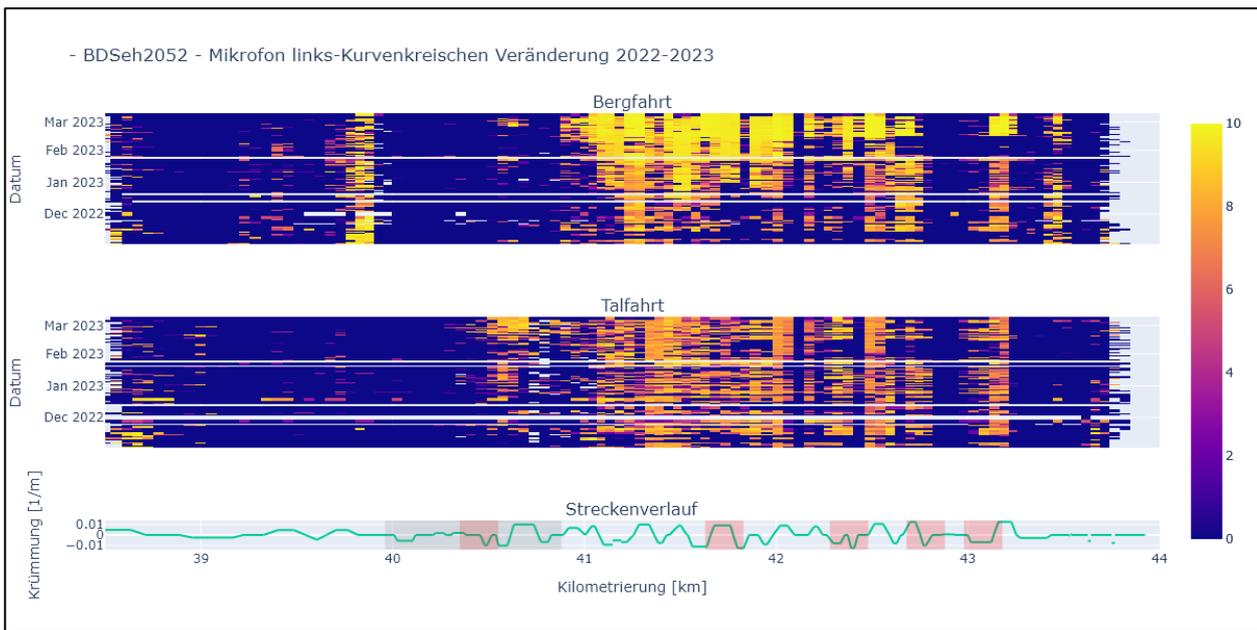


Abbildung 84: BDeh 2052 Mikrofon links Kurvenkreischen 2022-2023

Aus diesen Plots ist ersichtlich, dass sich die Verhältnisse des Kreischens ab Ende Januar 2023 tatsächlich bei der Bergfahrt verändert haben. Während bei der Talfahrt das Kreischen auf der Strecke kaum eine Veränderung über die Zeit zeigt, so tritt bei Bergfahrt ab Ende Januar vermehrt Kurvenkreischen auf. Diese Veränderung ist so stark, dass sich die Verhältnisse umgedreht haben. War das Kreischen im Dezember bei Talfahrt noch stärker als bei Bergfahrt, so war dies ab Ende Januar umgekehrt. Dieser Umstand ist erstaunlich und konnte leider bisher nicht zugeordnet werden.

Es stellt sich die Frage, ob sich etwas am Fahrzeug oder an der Strecke verändert hat.

Die folgenden zwei Plots in Abbildung 85 und Abbildung 86 zeigen dieselben Plots, aber mit den Daten der Mikrofone des Kometen. Im genannten Zeitabschnitt konnte bei der Bergfahrt am Kometen keine ähnliche Veränderung festgestellt werden. Beim Vergleich der Abbildungen beim Shuttle mit denjenigen des Kometen scheint bei letzterem deutlich weniger Kurvenkreischen aufgetreten zu sein.

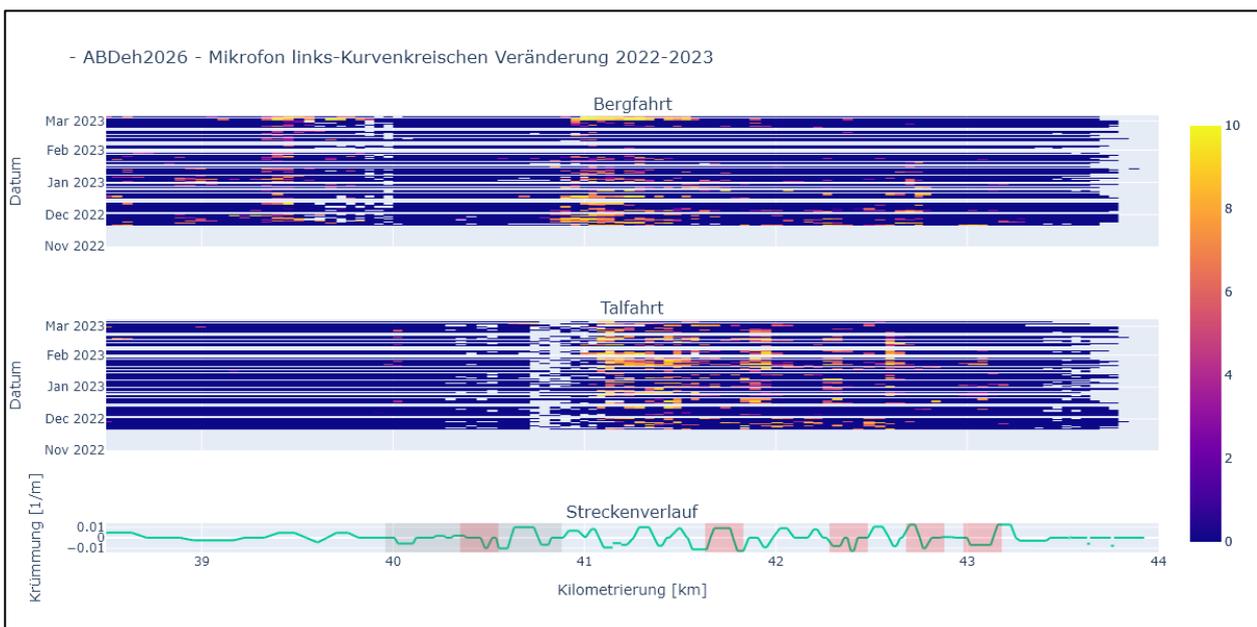


Abbildung 85: ABDeh 2026 Mikrofon rechts Kurvenkreischen 2022-2023

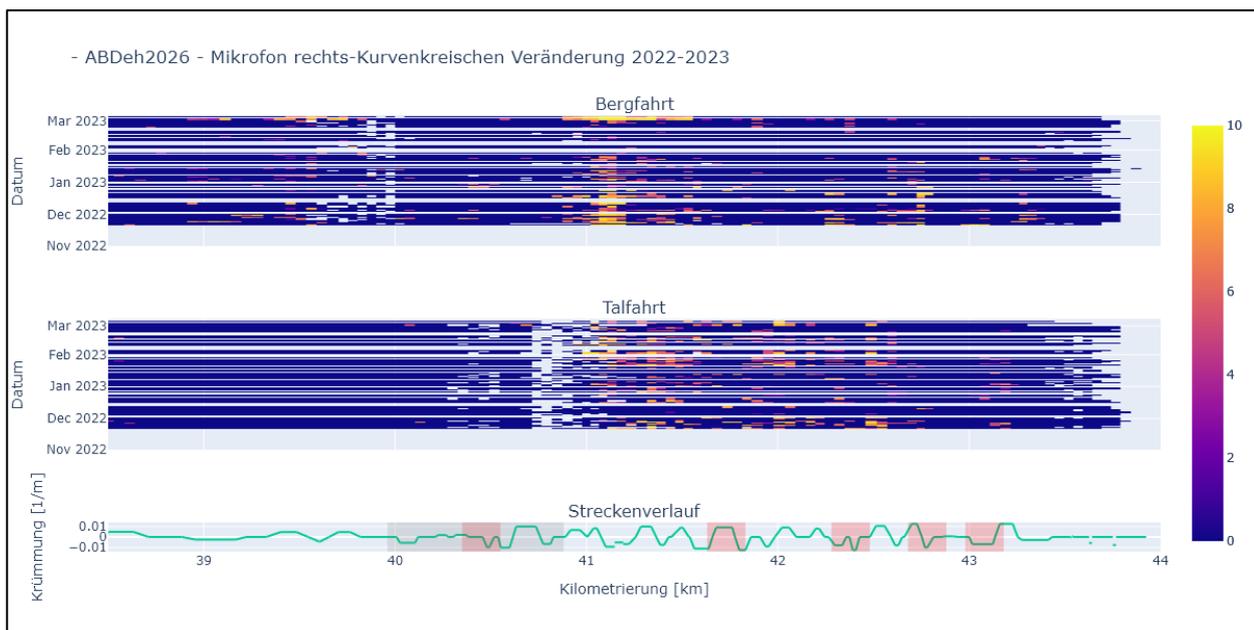


Abbildung 86: ABDeh 2026 Mikrophon rechts Kurvenkreischen Veränderung 2022-2023

7.5 Starke Differenzen zwischen Berg- und Talfahrt

Es gibt grosse Unterschiede beim Kreischen wie auch bei den Vibrationen zwischen Berg- und Talfahrt. Der Unterschied scheint bei den Vibrationen noch grösser als beim Kreischen.

Es wird davon ausgegangen, dass dieser Unterschied auf die Position des gemessenen Radsatzes im Fahrzeug und deren unterschiedlichen Stellungsbilder im Spurkanal sowie auf die Traktionsverhältnisse zurückzuführen ist.

Auffallend ist, dass gerade bei Talfahrt erhöhte Vibrationen nur im Bereich der Zahnstange auftreten.

Auch soll hier erwähnt werden, dass die Mikrofone vermutlich auch die Schallemissionen des zweiten Radsatzes desselben Drehgestells aufnehmen. Es wird somit mit den Mikrofonen immer auch ein zweiter Radsatz desselben Drehgestells gemessen. Im Gegensatz dazu sind die Beschleunigungsmessungen selektiv und messen wirklich nur den einen Radsatz.

7.6 Zeitliche Veränderung des Kurvenkreischens

Aus der zeitlichen Veränderung des Kurvenkreischens scheint man herauslesen zu können, dass in den trockenen und warmen Monaten vermehrt Kurvenkreischen auftritt. Dies ist vermutlich auf die Differenz der Luftfeuchtigkeit und die dadurch veränderten Reibwerte zwischen Rad und Schiene zurückzuführen.

Die zeitliche Veränderung über den ganzen Tag bei Bergfahrt scheint Sinn zu machen, da in der Nacht SKK nicht genutzt wird.

8 Tribometrische Charakterisierung von SKK [12]

Das verfügbare Wissen, z.B. aus wissenschaftlichen Zeitschriften, über die Wirkung von SKK bezieht sich hauptsächlich auf ihre Anwendung bei Normalspurbahnen, während für Meterspurbahnen nur wenige Informationen verfügbar sind. Um diese Wissenslücke zu schliessen, werden experimentelle Arbeiten und Modellierungen durchgeführt, um den besonderen Bedingungen des Rad-Schiene – Kontakts bei der Meterspur, z.B. den höheren Kontakt – Spannungen in engen Kurven, Rechnung zu tragen. Die tribometrische Charakterisierung von SKK setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen, die miteinander verknüpft sind:

- Methodenentwicklung und Experimente für zukünftige R RTE für SKK,
- Methodenentwicklung und Experimente zur Bereitstellung von Eingangsdaten für Rad-Schiene-Kontaktmodelle.

Im Sinne einer wirtschaftlichen Betrachtungsweise soll eine wohldefinierte, reproduzierbare und kostengünstige Methode zur Bewertung von SKK hinsichtlich des Reibungskoeffizienten entwickelt werden. Dabei soll der Umfang von Feldversuchen durch Laborversuche deutlich reduziert werden. Im besten Fall sollen Feldversuche vollständig durch Laborversuche ersetzt werden.

Der Feldversuch wurde auf der Strecke Täsch – Zermatt durchgeführt und zielte darauf ab, den Einfluss von SKK auf den Reibungskoeffizienten im Regelbetrieb einer Meterspurbahn zu bestimmen. Die Schienenkopfkonditionierung erfolgt auf diesem Streckenabschnitt automatisiert durch eine auf den Shuttle - Fahrzeugen eingebaute Anlage und über an der Strecke positionierte RFID – Tags, sodass die Konditionierung stets weitgehend an derselben Stelle erfolgt.

Hier wurden Testmethoden eingesetzt, um ein besseres Verständnis des Rad–Schiene Kontakts in der Meterspur zu erlangen und um Eingangsdaten für die Modellierung solcher Rad–Schiene Kontakte zu generieren. Labor- und Feldversuche wurden von The University of Sheffield (USheffield) und der AC2T research GmbH (AC²T) durchgeführt, die Modellierung erfolgt bei Virtual Vehicle GmbH (Virtual Vehicle).

Dabei wurden im Feldversuch Reibungsmessungen durchgeführt und ergänzende analytische Methoden verwendet. Die ergänzenden Methoden sind ein Top-Down-Ansatz, reichend von Schienenprofilen über die Oberflächenrauigkeit zur „Oberflächenchemie“.

Beim Feldversuch werden zwei Szenarien untersucht:

- Konditionierung im Regelbetrieb (morgens): Zu beachten ist, dass von 20:00 Uhr bis 8:00 Uhr keine Schienenkopfkonditionierung erfolgt, also der Aufbau einer konditionierten Schiene am Morgen erfolgt. Es wurde beobachtet, wie lange es dauert, bis sich eine konditionierte Schiene einstellt (konstant niedriges Reibungsniveau). Weiters erfolgt keine Konditionierung bei einer Luftfeuchtigkeit > 85%.
- SKK-Mittel-Verbrauch im Regelbetrieb (tagsüber): Sobald eine konditionierte Schiene vorliegt, wird die Schienenkopfkonditionierung durch Deaktivieren der RFID – Tags abgestellt. Im Anschluss wird beobachtet, wie lange es dauert, bis sich eine nicht konditionierte Schiene einstellt (konstant hohes Reibungsniveau).

Die schematische Anordnung des RFID-Tags und der Messpositionen A, B und C sowie eine Übersicht der Kurve Biel sind in Abbildung 87 dargestellt. Die Messpositionen befinden sich im verschleppten Bereich der konditionierten Zone.

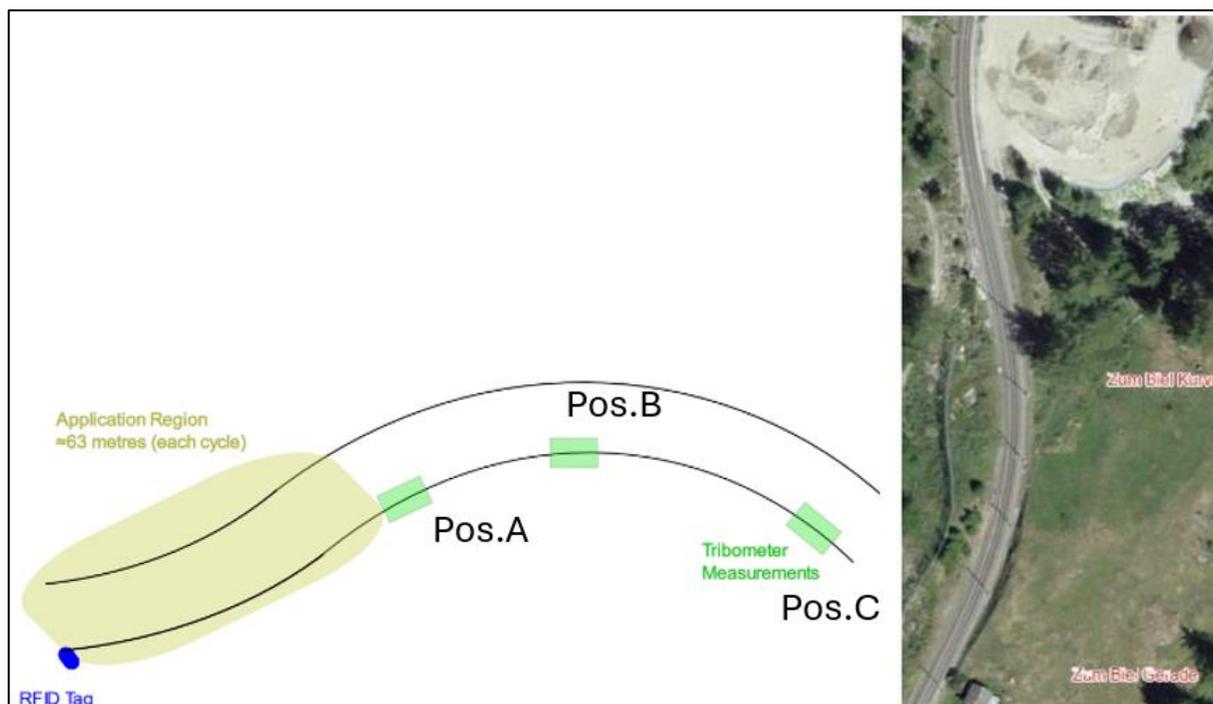


Abbildung 87: RFID-Tag und Messpositionen (links) und Überblick über die Kurve Biel (rechts)

8.1 Tribometrische Charakterisierung von SKK

Für diese Feldversuche wurden zwei Tribometer verwendet: das tragbare Tribometer von Rivelin Rail (bereitgestellt von USheffield) und das „Push“ – Tribometer von Salient Systems (bereitgestellt von RAILplus).

Das tragbare Tribometer von Rivelin Rail wird magnetisch an den Schienenkopf geklemmt, siehe Abbildung 88. Die Reibung kann über eine Kontaktlänge von 300 mm gemessen werden. Das tragbare Tribometer verwendet ein ER8 – Stahlmessrad, mit dem die Reibung am Schienenkopf oder an der Schienenkante gemessen wird. Normalkraft und Schlupfwerte können variiert werden. Die Messwerte werden als CSV – Datei auf einer SD-Karte gespeichert.

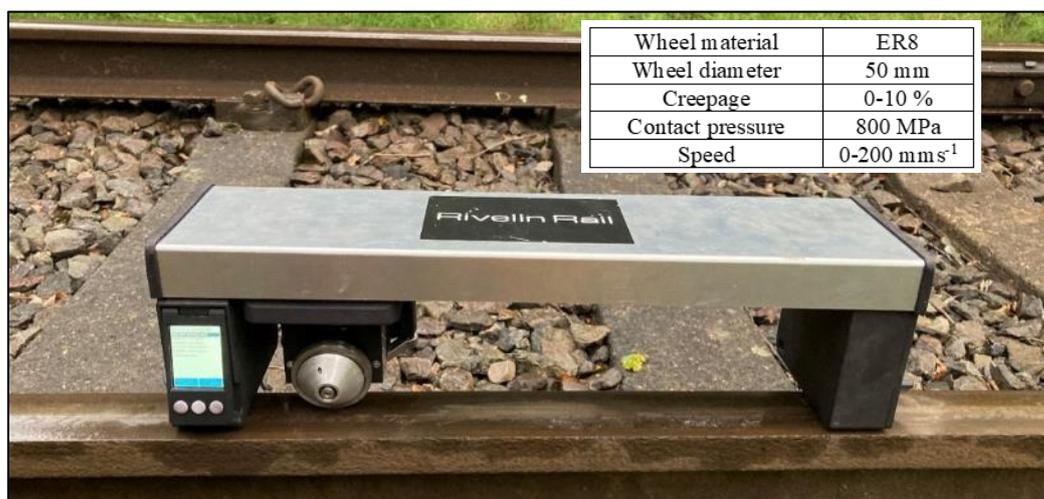


Abbildung 88: Tragbares Tribometer von Rivelin Rail

Ein Beispiel für einen Box – Plot von Messungen in Grossbritannien während der Herbstsaison der Messergebnisse ist für einen trockenen (dry) und einen nassen Schienenkopf (wet) unter Verwendung des tragbaren Tribometers von Rivelin Rail in Abbildung 89 dargestellt.

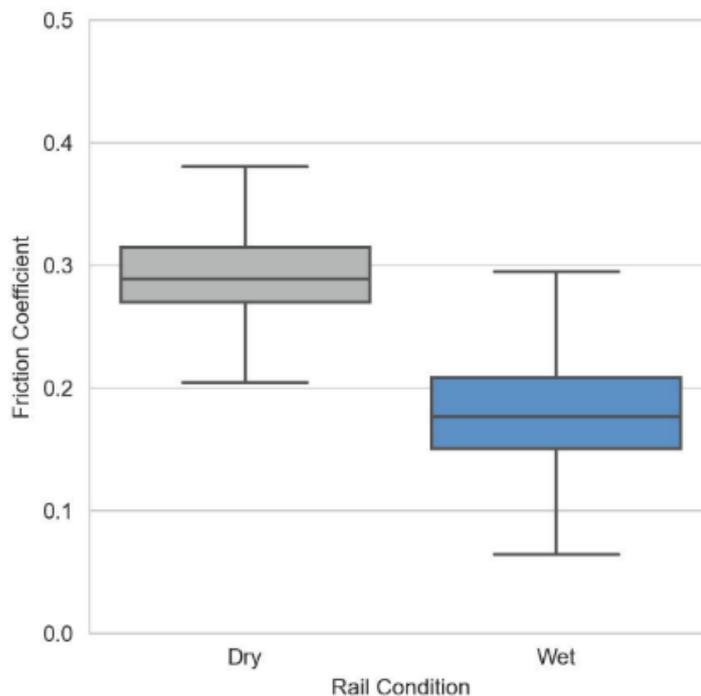


Abbildung 89: Box-Plot zu beispielhaften Ergebnissen des trockenen (dry) und nassen (wet) Schienenkopfes (Grossbritannien, Herbst), gemessen mit dem tragbaren Tribometer von Rivelin Rai

RAILplus stellte das „Push“ – Tribometer von Salient Systems zur Verfügung, das kontinuierlich über die Schiene geschoben wird, siehe Abbildung 90.



Abbildung 90: „Push“-Tribometer von Salient Systems

Für diese Feldversuche wurden die meisten Messungen bei einer Normalkraft von 100 N (ca. 800 MPa), 5 % Schlupf und 200 mms⁻¹ durchgeführt. Einige Messungen wurden zum Vergleich nacheinander bei 3, 5 und 8 % Schlupf durchgeführt. Das Tribometer wurde so am Schienenkopf montiert, dass sich das Messrad seitlich betrachtet in einer Linie mit dem Kontaktband der Räder des Zuges befand, so dass die Reibungsergebnisse für den Zugbetrieb repräsentativ waren.

8.2 Ergänzende analytische Methoden

8.2.1 Profilometer zur Erfassung von Rad- und Schienengeometrien

8.2.1.1 Calipri-Schienenmessgerät – Linienprofil

Das Calipri – Schienenmessgerät ermöglicht die schnelle und korrekte Auswertung aller gängigen Schienenprofile, eine Erweiterung mit Softwaremodulen ist möglich. Aufgrund des berührungslosen Messvorgangs sind die Ergebnisse benutzerunabhängig. Grenzwertüberschreitungen werden nach der Messung auf dem Tablet – PC farblich hervorgehoben. Die Dokumentation der Messdaten erfolgt digital über verschiedene Exportschnittstellen und Reportfunktionen.



Abbildung 91: Calipri-Schienenmessgerät

8.2.1.2 3D-Scanner – 3D-Topografie

Der 3D-Handscanner der Firma Artec (Modell LEO) kann 3D-Objekte mit einer 3D-Punktgenauigkeit (laterale Auflösung) von $\pm 0,05$ mm und einer 3D-Auflösung (normale Richtung) von $\pm 0,1$ mm erfassen, siehe Abbildung 92. Das Gerät weist eine Datenerfassungsrate von 35 Millionen Punkten/s auf. Der 3D-Scanner verfügt ausserdem über eine Video-Stream-Aufnahme, ein 5,5-Zoll-Touch-Display und einen Speicher von bis zu 512 GB. Die Akkulaufzeit beträgt 8 Stunden. Mit diesem 3D-Scanner können grössere Teile, wie Weichenkomponenten und Schienenabschnitte, in kurzer Zeit konturnah gescannt werden.



Abbildung 92: 3D-Handscanner: a) Artec LEO 3D-Scanner b) gescannter Gleisbereich

8.2.2 Abdrücke zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit

Eine hochauflösenden Abdruckmasse wird verwendet, um Oberflächenrauigkeitsmessungen im Feld oder an grossen Teilen durchzuführen, siehe Abbildung 93. Dazu wird die Abdruckmasse auf die Schiene aufgetragen und mit einer dünnen Glasplatte flachgedrückt. Nach einer Aushärtezeit von 5 (vorzugsweise 10) Minuten wird der Abdruck mit dem Glas von der Oberfläche entfernt. Die erhaltenen Abdrücke können auf einem 3D-Profilometer im Labor vermessen werden, um Informationen über die Oberflächenstruktur, wie z.B. Rauheitsdaten, zu erhalten.



Abbildung 93: Forensic Sil, Foto: Loci Forensics B.V.1 (links), Abdruckmasse auf einer Schiene (rechts)

¹ <https://www.lociforensics.nl/forensic-sil/forensic-sil/forensic-sil-grey-50ml-cartridge-met-castingmaterial--harder-included-50-mixingtips-10-pcs>

8.2.3 Qualitativer und quantitativer Nachweis von SKK

Diese Methoden sind grundsätzlich auf Oberflächen von Laborproben und Schienen in Feldversuchen anwendbar. Für die Qualifizierung und (Semi-)Quantifizierung sowie die Ergebnisinterpretation ist eine Dokumentation des Ortes der Probeentnahme und der Flächengröße unerlässlich.

Probenahme durch Abtupfer und anschließende Analyse im Labor (AC²T)

Zur Analyse der Ölfilmdicke werden Filze oder Abtupfer verwendet, siehe Abbildung 94. Beide sind in der Lage, Öl aufzunehmen. Das Volumen bzw. die Schichtdicke kann anhand der aufgenommenen Ölmenge (und der Öldichte) bestimmt werden. Das Verfahren mit dem Filz oder Abtupfer wird auf die Fläche, der Position der Probenahme und der Zeit für die Absorption abgestimmt.



Abbildung 94: Probenahme eines Ölfilms mit einem Filz (links) oder eines Abtupfers und eines Rahmens zur Herstellung einer definierten Fläche (rechts)

Zur Analyse der mit dem Abtupfer (Abbildung 95) genommenen Probe von der Schienenoberfläche sind eine Reihe von Labormethoden verfügbar:

- Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDX) insbesondere für anorganische Anteile
- Röntgenfotoelektronenspektroskopie (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS)_insbesondere für anorganische Anteile (Feststoffe wie Verdicker und Metalle)
- Gaschromatographie (GC)_insbesondere für organische Anteile (Basisöl)

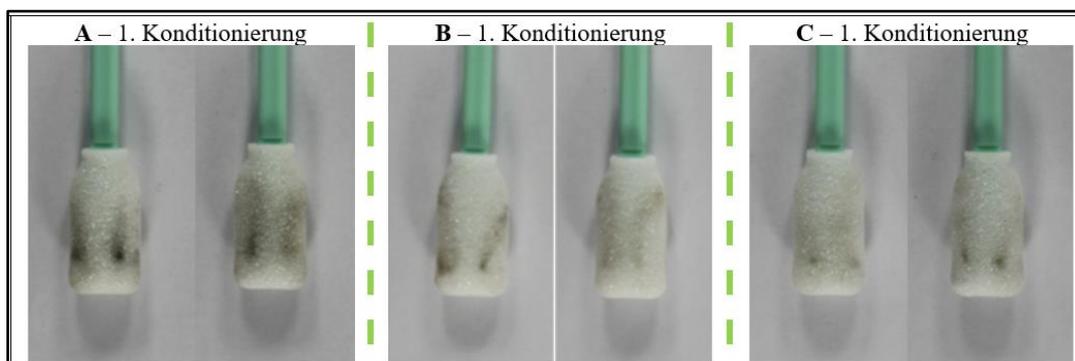


Abbildung 95: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C der inneren Schiene während der aktiven Konditionierung

8.3 Ergebnisse zu den Feldversuchen

Am ersten Tag der Feldversuche (18.10.2023) wurde die Kurve Biel besichtigt und die Ausrüstung für die geplanten Messungen vorbereitet. Es wurde eine Fotodokumentation der Messpositionen A, B und C erstellt. Der Zustand der inneren und äusseren Schiene an den Standorten A, B und C ist in Abbildung 96 dargestellt. Das Ausmass der Abnutzung ist unterschiedlich zwischen den verschiedenen Messpositionen, wobei die Unterschiede zwischen der inneren und der äusseren Schiene üblich sind. Die mögliche Lage einer Mischung aus SKK und SKS an der Schienenflanke ist in Abbildung 97 dargestellt. Ausserdem sind Reste von SKK und / oder SKS im Schotterbett und auf den Schwellen zu beobachten.

Messpos.	Innere Schiene	Äussere Schiene
A		
B		



Abbildung 96: Übersicht über die innere und äussere Schiene an den Messpositionen A, B and C



Abbildung 97: Schienenflanke mit einer möglichen Mischung aus SKK und SKS (links), Rückstände von SKK und/oder SKS im Schotterbett (Mitte) und auf der Schwelle (rechts).

Die Ergebnisse der Abdrücke der Innenschiene an den Messpositionen A, B und C sind in Abbildung 98 dargestellt. Detaillierte Messungen der Mikrorauheit wurden in einem Bereich von 5x5 mm innerhalb der Verschleissspur am Schienenkopf durchgeführt. Es wurden die Oberflächenrauheitsparameter nach ISO 25178 ermittelt. Der quadratische Mittelwert der Höhe ist an der Messposition A ($S_q = 1,690 \mu\text{m}$) am höchsten, an der Messposition C ($S_q = 1,406 \mu\text{m}$) deutlich niedriger, und der niedrigste Wert wurde an der Messposition B ($S_q = 1,229 \mu\text{m}$) in der Kurve Biel ermittelt. Hinsichtlich der arithmetischen Mittelhöhe zeigen die Messpositionen A und C mit $S_a = 0,959 \mu\text{m}$ bzw. $S_a = 0,942 \mu\text{m}$ vergleichbare Ergebnisse. Der niedrigste Wert wurde wiederum in der Mitte der Kurve, an der Messposition B, mit einem S_a -Wert von $0,615 \mu\text{m}$ ermittelt.

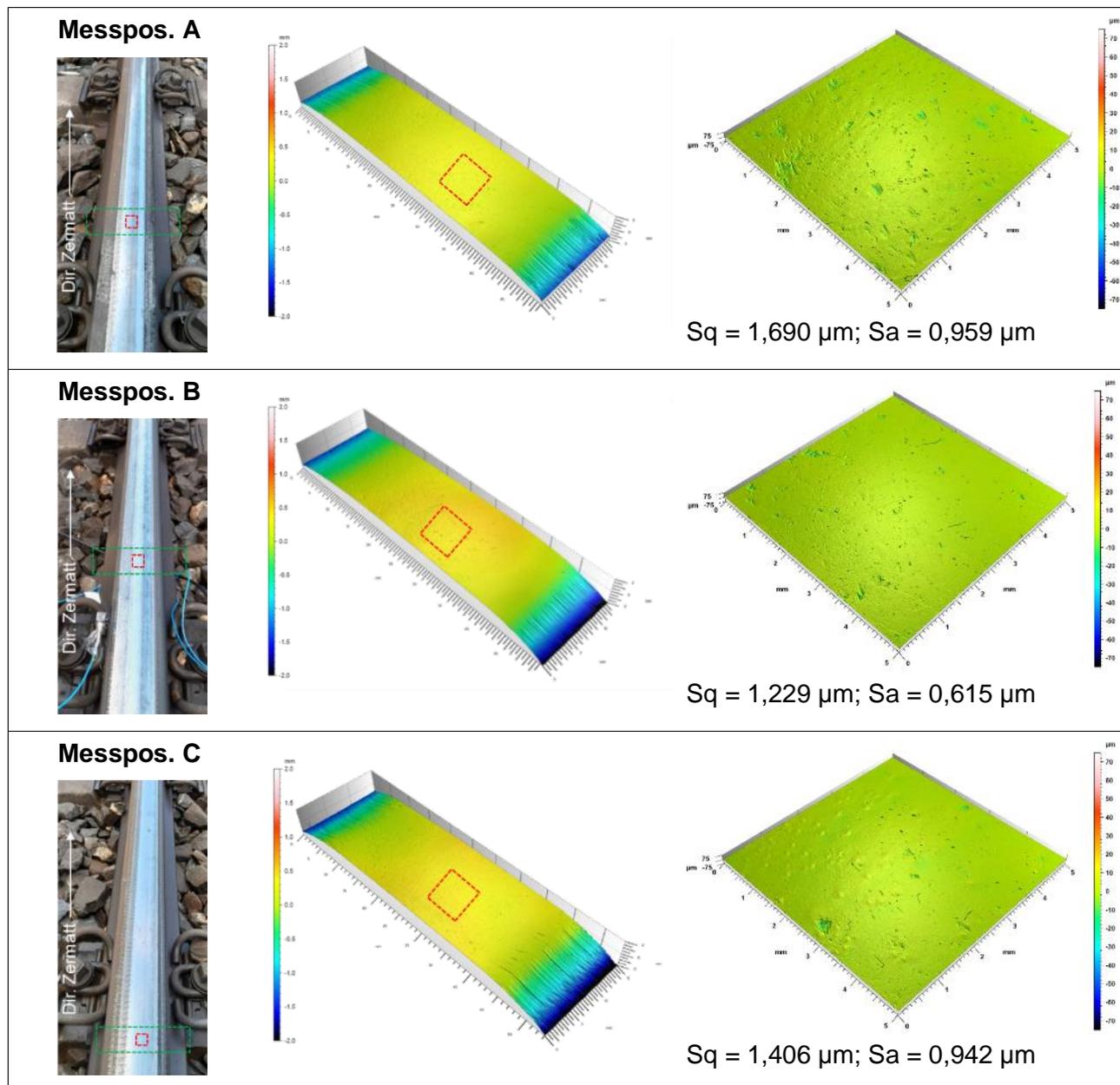


Abbildung 98: Überblick über die Abdrücke der Messpositionen A, B and C (linke Spalte), Abbildung der Topografie (mittlere Spalte) und die zugehörige Detailmessung für Parameter der Oberflächenrauigkeit (rechte Spalte)

Am 19.10.2023 wurde mit den Feldversuchen begonnen, nachdem es in der Nacht geregnet hatte. Zu Beginn der Feldmessungen lag die Luftfeuchtigkeit bei 90,5 % und die Lufttemperatur bei 8,5°C. Daher war an den Zügen keine SKK – Aufbringung aktiv (Schwellenwert von 85 %). Der aktive Zugverkehr in der Kurve Biel sowie die gemessenen Feuchten und Temperaturen sind in Tabelle 15 aufgeführt. Der erste Zug mit aktivierter SKK-Aufbringung in Richtung Zermatt passierte die Kurve Biel um 10:50 Uhr.

Datum	Zeit	Zug-Nr.	Richtung	Zugtyp	SKK-Aufbringung	Wetter			Beschreibung					
						Luftfeuchte (%)	Lufttemp. (°C)	Schientemp. (°C)						
19.10.2023	09:35	1	Zermatt	Shuttle	aus	90,5	8,5	8,2	Bewölkt, trocken					
19.10.2023	09:48	2	Täsch	Shuttle										
19.10.2023	09:52	3	Zermatt	Shuttle										
19.10.2023	10:11	4	Täsch	Shuttle										
19.10.2023	10:14	5	Täsch	Fracht										
19.10.2023	10:17	6	Zermatt	Shuttle										
19.10.2023	10:31	7	Täsch	Shuttle										
19.10.2023	10:37	8	Zermatt	Shuttle										
19.10.2023	10:43	9	Täsch											
19.10.2023	10:50	10	Zermatt			an (1)	83,9	9,3	9,5	Einige Regentropfen				
19.10.2023	10:55	11	Zermatt	Fracht										
19.10.2023	11:10	12	Täsch	Fracht										
19.10.2023	11:13	13	Täsch											
19.10.2023	11:16	14	Zermatt							an (2)				
19.10.2023	11:31	15	Täsch											
19.10.2023	11:38	16	Zermatt		an (3)									
19.10.2023	11:48	17	Täsch											
19.10.2023	11:52	18	Zermatt	Fracht										
19.10.2023	11:54	19	Zermatt							an (4)				
19.10.2023	12:10	20	Täsch											
19.10.2023	12:15	21	Zermatt							an (5)	71,9	12	12,7	Bewölkt, trocken
19.10.2023	12:32	22	Täsch											
19.10.2023	12:38	23	Zermatt		an (6)									
19.10.2023	12:48	24	Täsch											
19.10.2023	12:52	25	Zermatt		an (7)									
19.10.2023	12:58	26	Täsch	Fracht										
19.10.2023	13:13	27	Täsch											
19.10.2023	13:17	28	Zermatt							an (8)	72,2	11,8	12,9	Bewölkt, trocken
19.10.2023	13:31	29	Täsch											
19.10.2023	13:36	30	Zermatt							an (9)	68,3	12,7	13,8	Wolken und Sonne
19.10.2023	13:48	31	Täsch											
19.10.2023	13:51	32	Zermatt	Fracht										
19.10.2023	13:53	33	Zermatt		an (10)									
19.10.2023	14:12	34	Täsch											
19.10.2023	14:15	35	Zermatt		aus (1)									
19.10.2023	14:31	36	Täsch											
19.10.2023	14:38	37	Zermatt		aus (2)	59,9	13,4	16,5	Einige Regentropfen					
19.10.2023	14:49	38	Täsch											
19.10.2023	14:53	39	Zermatt							aus (3)				
19.10.2023	15:11	40	Täsch											
19.10.2023	15:15	41	Zermatt							aus (4)	52,3	14,3	17,0	Wolken und Sonne
19.10.2023	15:33	42	Täsch											
19.10.2023	15:48	43	Zermatt							aus (5)				
19.10.2023	15:50	44	Täsch											
19.10.2023	15:54	45	Zermatt							aus (6)	51,8	14	17,2	Bewölkt
19.10.2023	16:10	46	Täsch											
19.10.2023	16:16	47	Zermatt							aus (7)				
19.10.2023	16:30	48	Täsch											
19.10.2023	16:35	49	Zermatt							aus (8)	52,6	14,2	16,8	Bewölkt

Tabelle 15: Überblick über den Zugverkehr, Perioden der SKK-Aufbringung und Wetterdaten am 19.10.2023

Die Ergebnisse der SKK-Probenahme durch Abstriche werden durch eine Fotodokumentation der Vorder- und Rückseite des Abtupfers abgebildet, siehe Abbildung 99 bis Abbildung 103. Da mit einer definierten Schablone Proben vom Kontaktband des Schienenkopfes entnommen wurden, lässt das Aussehen der Abtupfer nach Probenahme Rückschlüsse auf die SKK-Menge zu. Abbildung 99 zeigt die Abstriche für die Innen- und Aussenschienen an den Messpositionen A, B und C, bevor die SKK – Aufbringung aktiviert wurde. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Schwarzfärbung der Abstriche, mit einem vergleichbaren Ausmass an den Messpositionen A und C. Messposition B weist einen

etwas geringeren Grad der Färbung auf, wobei der Abstrich der Innenschiene eine verstärkte Färbung gegenüber der Aussenschiene aufweist.

Um 10:50 Uhr passierte der erste Zug in Richtung Zermatt die Kurve Biel mit aktivierter SKK – Aufbringung. Es wurden eine Luftfeuchtigkeit von 83,9 %, eine Lufttemperatur von 9,3°C und eine Schienenkopftemperatur von 9,5°C gemessen, wobei einige Regentropfen auf dem Gleis festgestellt wurden. Bis 14:15 Uhr war die SKK – Aufbringung aktiviert. In dieser Zeit passierten 23 Züge die Kurve Biel, wobei 10 Personenzüge mit aktiver SKK – Aufbringung in Richtung Zermatt fuhren. Für diesen Zeitraum wurde ein leichter Wetterwechsel von bewölkt / Regen zu bewölkt / Sonne dokumentiert (Tabelle 15). Die Probenahme durch Abtupfer erfolgte an den Innenschienen an den Messpositionen A, B und C, siehe Abbildung 100. Zu Beginn des Zeitraums der SKK – Aufbringung zeigten die Abstriche eine geringfügige Schwarzfärbung (nach der 1. Zugdurchfahrt, 10:50 Uhr). Mit fortschreitender SKK-Aufbringung lässt die Auswertung der Abstriche an den Messpositionen A und C auf eine zunehmende SKK – Menge schliessen. An der Messposition B war eine deutliche geringere Zunahme der Schwarzfärbung zu beobachten.

Nach der 9. Durchfahrt in Richtung Zermatt mit aktiver SKK – Aufbringung zeigten die Proben die grösste SKK-Menge an der Messposition A, gefolgt von Messposition C, während Messposition B die am wenigsten ausgeprägte Färbung aufwies, siehe Abbildung 101. An allen Messpositionen wurde an der inneren Schiene tendenziell höhere SKK-Mengen auf der äusseren Schiene gefunden.

Nach Deaktivierung der SKK – Aufbringung durch die Züge um 14:15 Uhr wurde eine rasche Reduktion des mittels Abtupfens nachgewiesenen SKK-Produkts auf den Schienen festgestellt, siehe Abbildung 102. Die Probenahme nach dem zweiten Zug (bzw. der zweiten Durchfahrt) in Richtung Zermatt (14:38 Uhr) zeigte bereits eine deutlich geringere SKK-Menge. Im weiteren Verlauf, in der keine Schienenkonditionierung durchgeführt wurde, waren kaum noch Veränderungen zu erkennen.

Nach 15 Zügen (bzw. 15 Durchfahrten) in der Kurve Biel ohne SKK – Aufbringung wurde die letzte Probenahme nach dem achten Zug (bzw. der achten Durchfahrt) in Richtung Zermatt durchgeführt, siehe Abbildung 103. In dieser Phase waren keine signifikanten Unterschiede im Aussehen der Abstriche festzustellen.

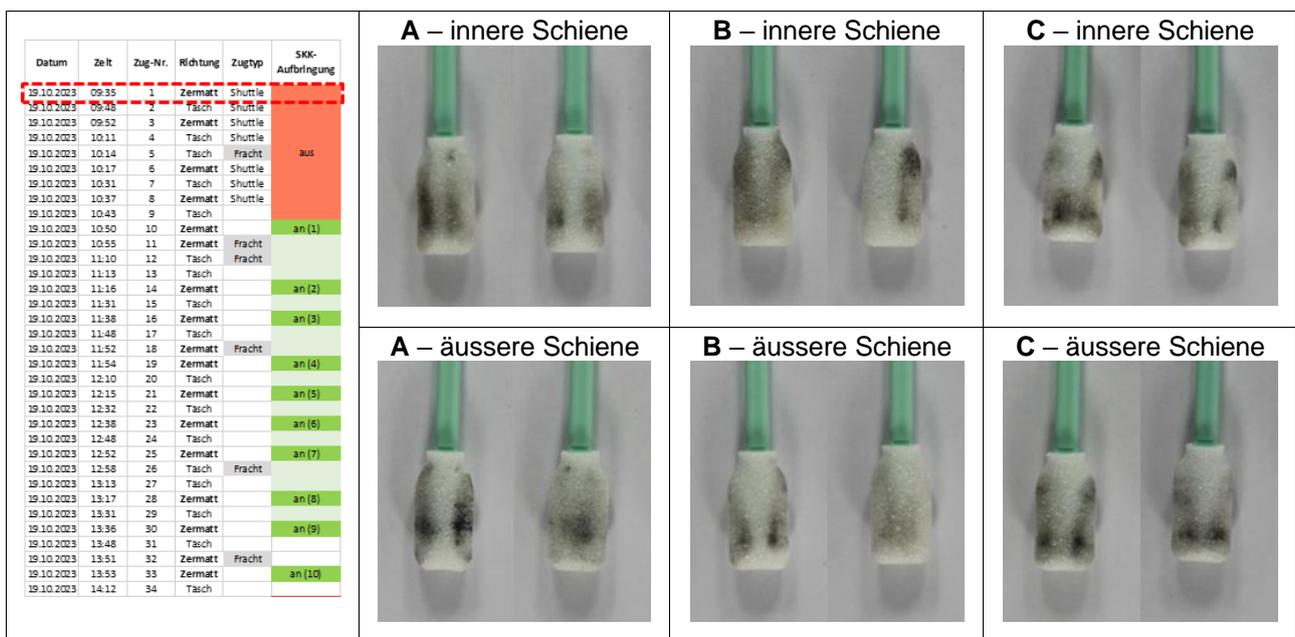


Abbildung 99: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C vor der Konditionierung der inneren und äusseren Schiene

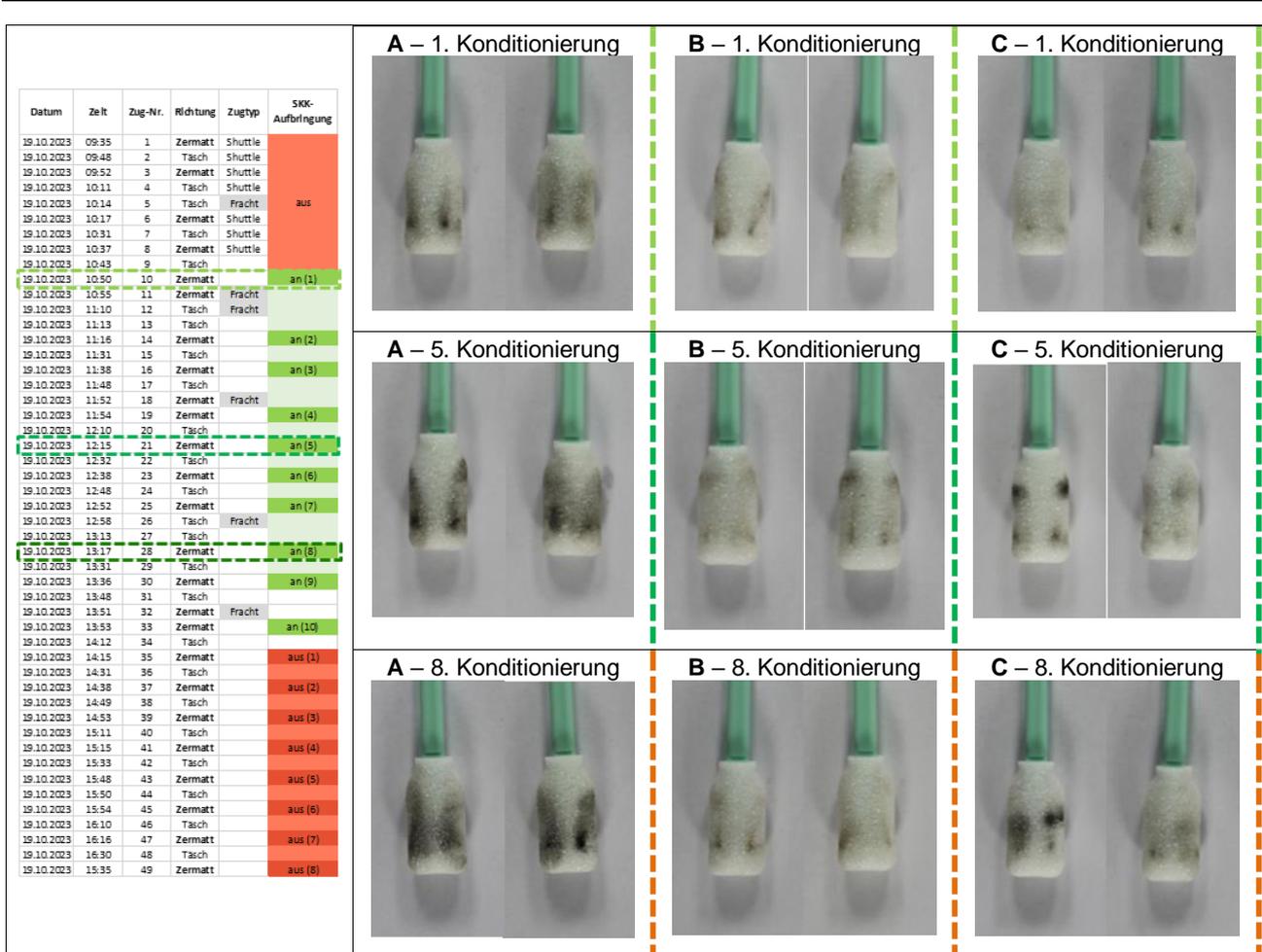


Abbildung 100: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C der inneren Schiene während der aktiven Konditionierung

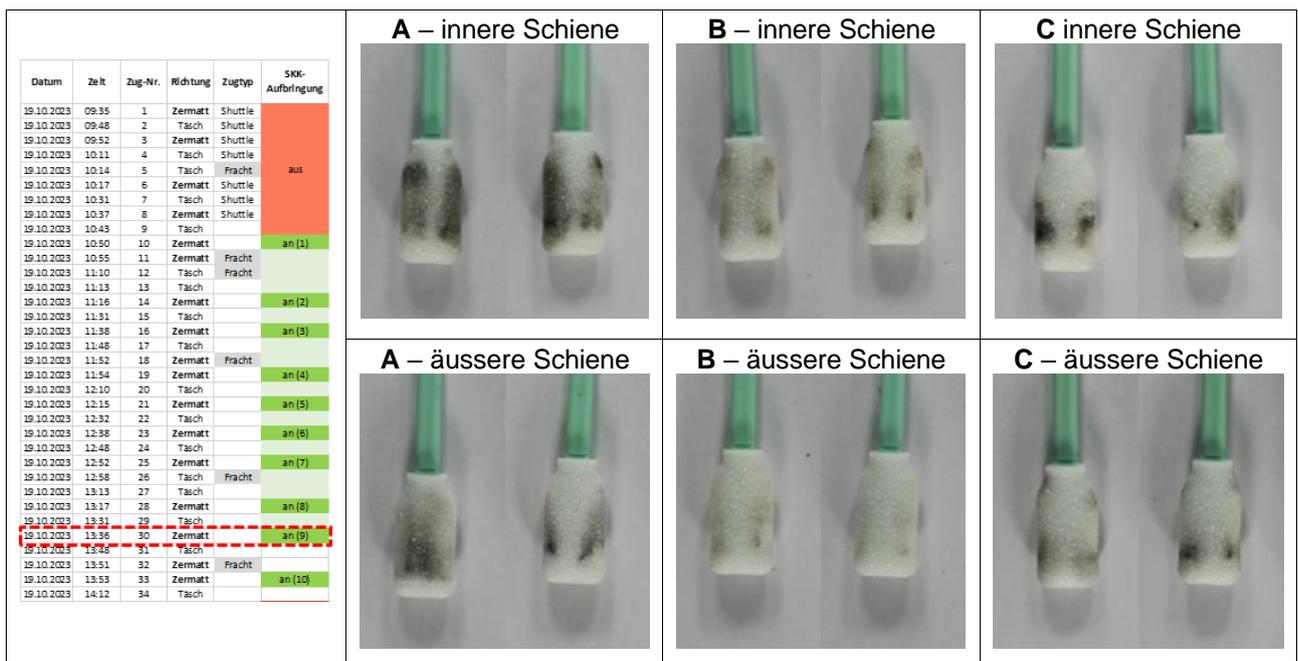


Abbildung 101: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C nach der 9. Durchfahrt während der Konditionierung der inneren und äusseren Schiene

Datum	Zeit	Zug-Nr.	Richtung	Zugtyp	SKK-Aufbringung
19.10.2023	09:35	1	Zermatt	Shuttle	aus
19.10.2023	09:48	2	Täsch	Shuttle	
19.10.2023	09:52	3	Zermatt	Shuttle	
19.10.2023	10:11	4	Täsch	Shuttle	
19.10.2023	10:14	5	Täsch	Fracht	
19.10.2023	10:17	6	Zermatt	Shuttle	
19.10.2023	10:31	7	Täsch	Shuttle	
19.10.2023	10:37	8	Zermatt	Shuttle	
19.10.2023	10:43	9	Täsch		an (1)
19.10.2023	10:50	10	Zermatt		
19.10.2023	10:55	11	Zermatt	Fracht	
19.10.2023	11:10	12	Täsch	Fracht	
19.10.2023	11:13	13	Täsch		
19.10.2023	11:16	14	Zermatt		an (2)
19.10.2023	11:31	15	Täsch		
19.10.2023	11:38	16	Zermatt		an (3)
19.10.2023	11:48	17	Täsch		
19.10.2023	11:52	18	Zermatt	Fracht	
19.10.2023	11:54	19	Zermatt		an (4)
19.10.2023	12:10	20	Täsch		
19.10.2023	12:15	21	Zermatt		an (5)
19.10.2023	12:32	22	Täsch		
19.10.2023	12:38	23	Zermatt		an (6)
19.10.2023	12:48	24	Täsch		
19.10.2023	12:52	25	Zermatt		an (7)
19.10.2023	12:58	26	Täsch	Fracht	
19.10.2023	13:13	27	Täsch		
19.10.2023	13:17	28	Zermatt		an (8)
19.10.2023	13:31	29	Täsch		
19.10.2023	13:36	30	Zermatt		an (9)
19.10.2023	13:48	31	Täsch		
19.10.2023	13:51	32	Zermatt	Fracht	
19.10.2023	13:53	33	Zermatt		an (10)
19.10.2023	14:12	34	Täsch		
19.10.2023	14:15	35	Zermatt		aus (1)
19.10.2023	14:31	36	Täsch		
19.10.2023	14:38	37	Zermatt		aus (2)
19.10.2023	14:49	38	Täsch		
19.10.2023	14:53	39	Zermatt		aus (3)
19.10.2023	15:11	40	Täsch		
19.10.2023	15:15	41	Zermatt		aus (4)
19.10.2023	15:35	42	Täsch		
19.10.2023	15:48	43	Zermatt		aus (5)
19.10.2023	15:50	44	Täsch		
19.10.2023	15:54	45	Zermatt		aus (6)
19.10.2023	16:10	46	Täsch		
19.10.2023	16:16	47	Zermatt		aus (7)
19.10.2023	16:30	48	Täsch		
19.10.2023	15:35	49	Zermatt		aus (8)

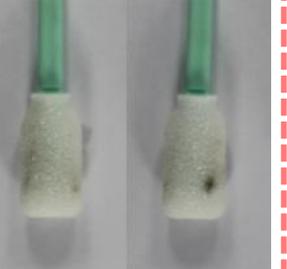
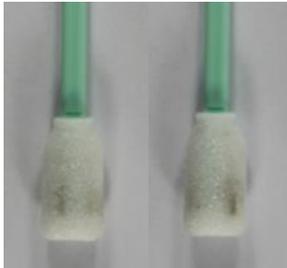
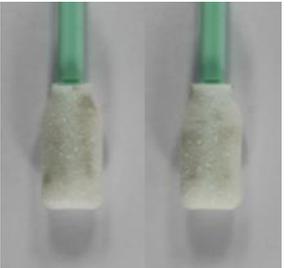
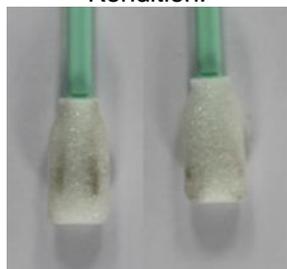
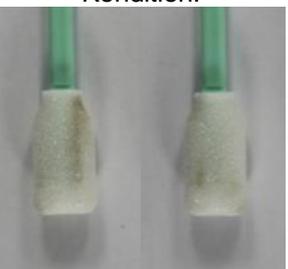
Position	Conditioning Status	Image A	Image B	Image C
2. Durchfahrt	ohne Kondition.			
4. Durchfahrt	ohne Kondition.			
6. Durchfahrt	ohne Kondition.			

Abbildung 102: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C der inneren Schiene nach Deaktivierung der Konditionierung

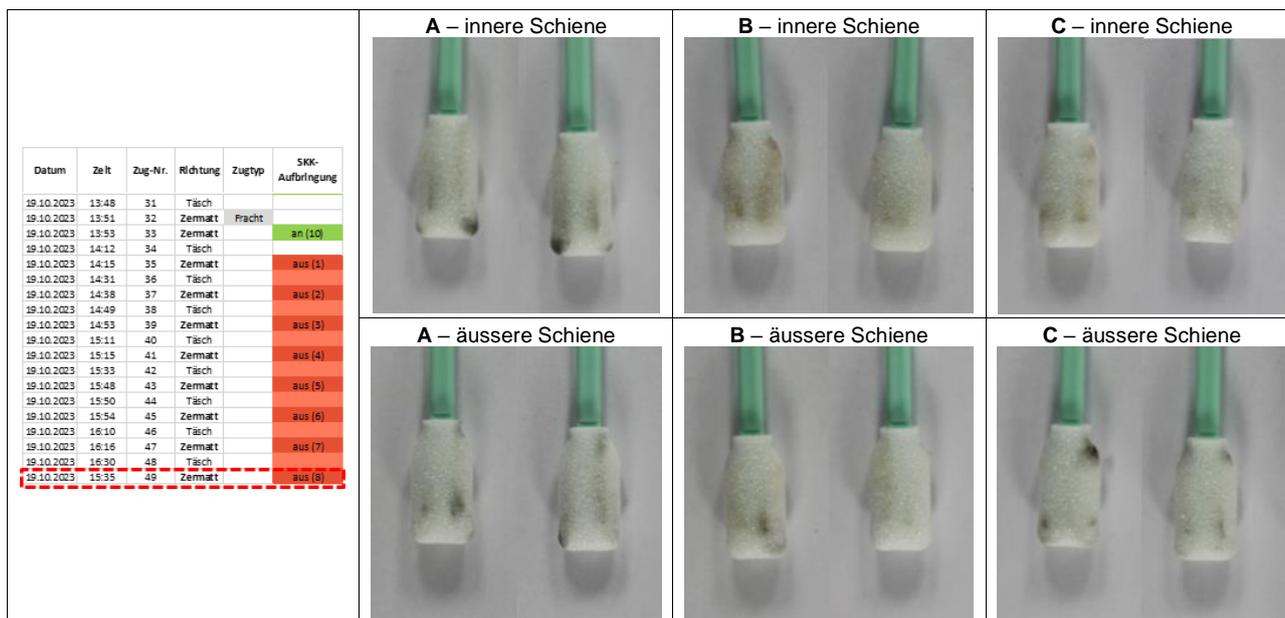


Abbildung 103: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C nach der 8. Durchfahrt ohne Konditionierung der inneren und äusseren Schiene

Die Ergebnisse des tragbaren Tribometers von Rivelin Rail an den drei Messpositionen A, B und C an der Innen- und Aussenschiene am 19.10.2023 sind in Abbildung 104 bis Abbildung 106 dargestellt. Die Durchfahrten von und nach Zermatt sind ebenso dokumentiert wie die Zeiten, in denen die Konditionierung aktiviert bzw. deaktiviert war.

Messposition A lag der Konditionierungszone am nächsten und zeigte die grösste Verringerung des Reibungskoeffizienten kurz nach der Aktivierung der Schienenkopfkonditionierung. Die Messposition C zeigte eine zeitliche Verzögerung der Reibungsreduzierung aufgrund des Transports des SKK über den Raddurchlauf am Schienenkopf (carry on). Nach Deaktivierung der Schienenkopfkonditionierung nahm der durchschnittliche Reibungskoeffizient der äusseren Schiene schneller höhere Werte an als jener der inneren Schiene.

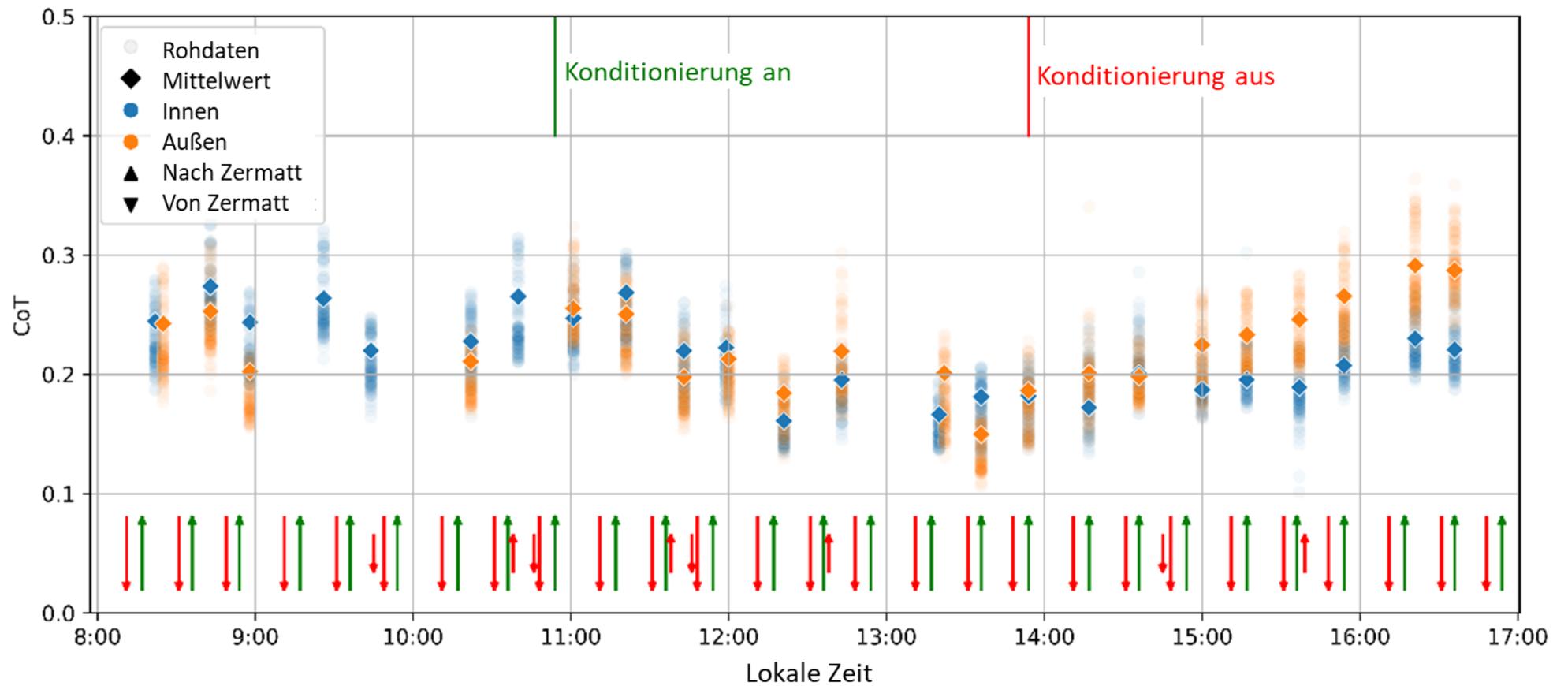


Abbildung 104: Reibungsmessungen (Coefficient of Traction, CoT) an der Messposition A

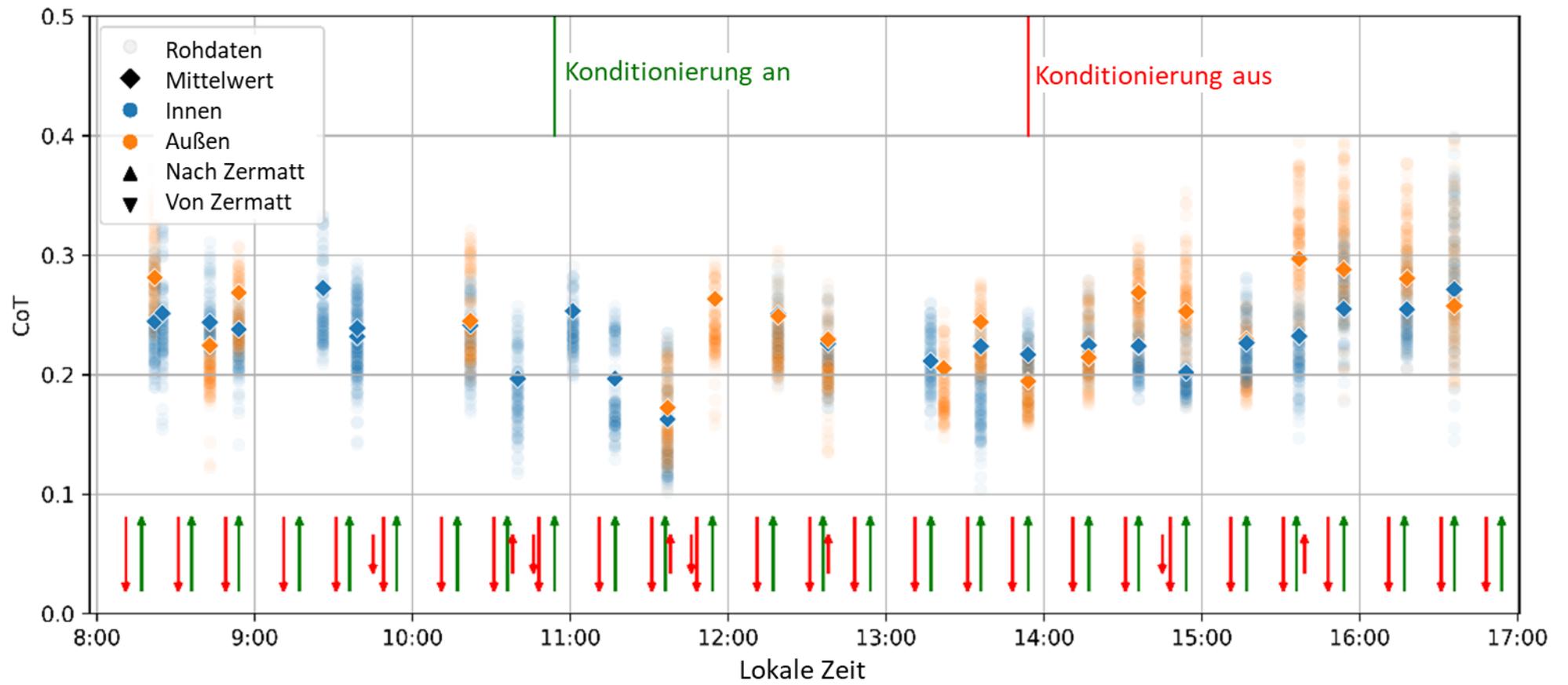


Abbildung 105: Reibungsmessungen (Coefficient of Traction, CoT) an der Messposition B

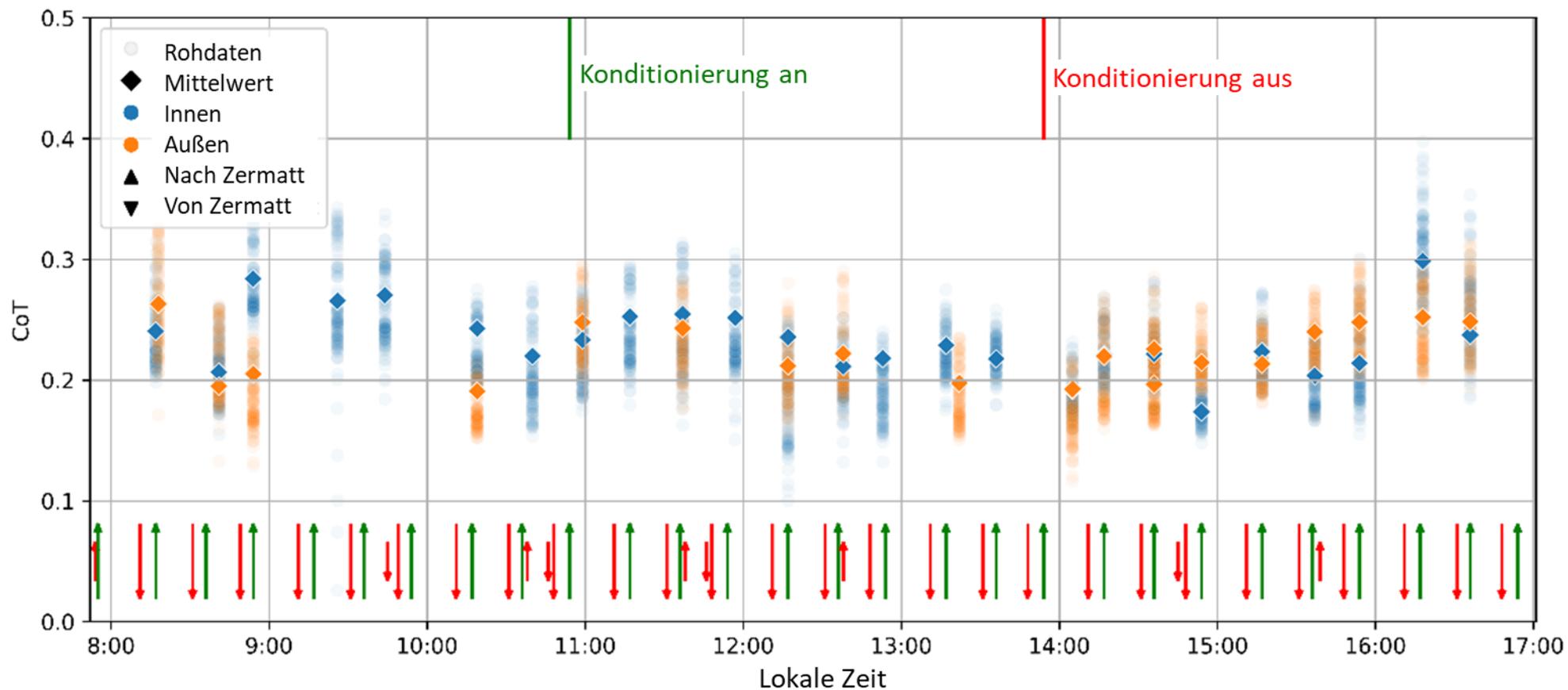


Abbildung 106: Reibungsmessungen (Coefficient of Traction, CoT) an der Messposition C

Am letzten Tag (20.10.2023) wurden aufgrund von Regen keine Feldmessungen durchgeführt. Dieser Umstand wurde genutzt, um Proben von SKK direkt von den Düsen des On-Board-Systems am Fahrzeug 2051 zu entnehmen, siehe Abbildung 107. Durch das vollständige Sammeln der ausgesprühten SKK – Menge in Kunststoffbehältern während des Sprühvorgangs von 6 Sekunden (Drücken des Testknopfes) wurden Proben für genaue gravimetrische Messungen bei AC²T gesammelt.

Der gesammelten SKK – Proben wurden mit Petrolether in einem Ultraschallgerät gelöst bzw. dispergiert und in eine Petrischale überführt. Die Petrischale wurde dann in einen Trockenschrank für die Dauer von 2 bis 2,5 Stunden bei 80°C gestellt, um das Lösungsmittel zu entfernen. Anschliessend wurden gravimetrische Messungen des Rückstands (SKK) an einer analytischen Waage durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 16 zusammengefasst. Die Ergebnisse variieren sehr stark, wobei auf der linken Seite tendenziell eine grössere SKK – Menge aufgetragen wurde. Die Abweichung zur rechten Seite liegt im Bereich von +137 % (Probe 04) und -65 % (Probe 02). Die Gesamtmenge an SKK – Mittel (linke und rechte Düse) schwankt zwischen 371 mg (Probe 03) und 1087 mg (Probe 05). Berücksichtigt man mögliche Luftdruckprobleme bei der Entnahme der Probe 03, so schwankt die Gesamtmenge an SKK zwischen 709 mg (Probe 1 und Probe 12) und 1087 mg (Probe 05). Die ausgewogenste Probe zwischen linker und rechter Düse ist Probe 06, bei der eine SKK – Menge von ~530 mg für jede Seite festgestellt wurde.



Abbildung 107: Fahrzeug 2051 in der Werkstätte (oben links) und die Düse des On-Board-Systems zur SKK-Aufbringung (oben rechts). SKK-Proben (6 Sekunden Sprühdauer) gesammelt in Kunststoff-Behältern (unten) für die weitere Analyse bei AC²T

Probe		SKK-Menge (mg)	Gesamte SKK-Menge (mg)	Differenz zw. links und rechts (mg)	Differenz zw. links und rechts (%)
20.10.2023	01	links rechts	209 500	709	-291 -58
	02	links rechts	205 578	783	-373 -65
	03	links rechts	172 199	371	-27 -14
02.02.2024	04	links rechts	593 250	843	343 137
	05	links rechts	601 486	1087	115 24
	06	links rechts	532 537	1069	-4 -1
	07	links rechts	442 560	1002	-118 -21
	08	links rechts	338 595	933	-257 -43
	09	links rechts	335 519	854	-184 -35
	10	links rechts	314 443	757	-129 -29
	11	links rechts	307 417	724	-110 -26
	12	links rechts	275 434	709	-159 -37

Tabelle 16: Zusammenfassung der gravimetrischen Messungen von SKK-Proben des On-Board-Systems des Fahrzeuges 2051 nach 6 Sekunden Sprühdauer

9 Gesamtwirtschaftlichkeit [13]

Für die Beurteilung der Gesamtwirtschaftlichkeit der SKK-Anlage wurde wie im ersten Bericht zur Betriebserprobung SKK Täsch – Zermatt [1] das Büro IMDM beauftragt, Simulationen unter Berücksichtigung der Kosten sowie von Einsparnissen durchzuführen. Anhand dieser Simulationen soll aufgezeigt werden, ob und wie wirtschaftlich die Installation sowie der Betrieb der SKK-Anlagen ist. Dies einerseits für die Strecke der Betriebserprobung Täsch – Zermatt und andererseits mit Ausblick auf die Ausweitung der SKK – Anwendung auf das gesamte Streckennetz der MGBahn.

9.1 Ziel und Methode

Ziel dieser Analyse ist es, die Wirtschaftlichkeit der Implementierung der SKK auf der Grundlage von Daten zu bewerten, die von der MGBahn auf dem Abschnitt zwischen Täsch und Zermatt gesammelt wurden.

Die Bewertung beruht auf einem Vergleich der äquivalenten Annuität (EA) für zwei verschiedene Szenarien: mit SKK (1) und ohne SKK (2). Dadurch erhält man einen differentiellen Cashflow, bei dem zusätzliche Ausgaben als "Kosten" und Einsparungen als "Einnahmen" betrachtet werden. Die abweichenden Cashflows für diese beiden Szenarien umfassen:

- Ausgaben im Zusammenhang mit SKK
- Einsparungen, die durch die positiven Auswirkungen des SKK – Systems auf das Rollmaterial und die Infrastruktur entstehen.

Diese Studie nimmt die Perspektive des Eisenbahnunternehmens (EVU) ein; die Auswirkungen auf die Umwelt und die Allgemeinheit (Verringerung der Lärmbelastung) werden in dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

9.2 Umfang

Die Rentabilitätsschätzung wird zunächst auf die Testphase der Linie Täsch-Zermatt angewendet und dann auf die gesamte MGBahn – Linie ausgeweitet. Zu den berücksichtigten Elementen gehören:

- die Anzahl der mit SKK ausgestatteten Fahrzeuge,
- die Anzahl der angetriebenen Drehgestelle,
- Kurvengleise mit kleinem Radius (Radius ≤ 200 Meter).

	Täsch – Zermatt	Netz MGBahn
Anzahl Fahrzeuge mit SKK	4 Fahrzeuge	20
Anzahl Motordrehgestelle	8 Drehgestelle	40
Gleislänge (Radius ≤ 200 Meter)	2'511 Meter	38'926 Meter

Tabelle 17: Umfang Analyse Gesamtwirtschaftlichkeit

9.3 Getroffene Annahmen (vgl. Anhang 12.5)

Die Auswirkungen des SKK – Systems auf die Fahrzeuge und die Infrastruktur werden aus den jüngsten Rückmeldungen auf der Teststrecke (Januar 2024) abgeleitet.

Es wird davon ausgegangen, dass diese Wechselwirkungen auf das MGBahn – Netz übertragen werden können, mit Ausnahme der Auswirkungen auf die Lebensdauer der Gleise, die von den Besonderheiten des Unterbaus abhängen.

	Täsch – Zermatt	Netz MGBahn
(1) Auswirkung auf die zwischen den Revisionen zurückgelegte Strecke	+ 207%	Identisch
(21) Auswirkung auf die Lebensdauer der Schiene	+ 78%	Identisch
(22) Auswirkung auf die Lebensdauer des Gleises	+ 40%	Nicht angewandt
(23) Auswirkung auf das Schleifintervall	+ 300%	Identisch

Tabelle 18: Getroffene Annahmen Analyse Gesamtwirtschaftlichkeit

9.3.1 Auswirkungen auf die Fahrzeugwartung

Die Schätzung beschränkt sich auf die Auswirkungen von SKK auf die Wartung der Räder von Triebdrehgestellen. Die Kilometerleistung pro Millimeter Radverschleiss wird auf der Grundlage der geleisteten Kilometer pro 1mm Reduktion des Raddurchmessers abgeleitet.

Variationen des Wartungsintervalls der Räder je nach Radmaterial werden in der Bewertung nicht berücksichtigt.

9.3.2 Auswirkungen auf die Infrastruktur

Die Auswirkungen des SKK – Systems werden nur in Bezug auf den Bedarf an Schleifarbeiten und Schienenaustausch in Kurven mit kleinen Radien bewertet.

Die Auswirkungen auf das Stopfen sind aufgrund des Alters der Fahrbahn vernachlässigbar.

In einem zweiten Schritt wurden auch die Auswirkungen von SKK auf die Gesamtlebensdauer der Gleise geschätzt.

9.3.3 Annahmen zu den Kosten

Die Kosten für die SKK – Investitionen und die verschiedenen Arten der Wartung stammen von der MGBahn, mit folgenden Besonderheiten:

- die Instandhaltungskosten für den SKK werden in Verbindung mit den üblichen planmässigen Wartungsintervallen der Fahrzeuge durchgeführt, wodurch die Notwendigkeit häufigerer Aufenthalte auf dem Grubengleis entfällt;
- Die Kosten für die Erneuerung des Gleises umfassen nur den Oberbau;
- Die Kosten für das Schleifen beider Schienen sind im Wesentlichen gleich hoch wie die Kosten für das Schleifen nur einer Schiene der beiden Schienen.

9.3.4 Annahmen des Modells

Die Monte-Carlo-Methode wird auf die Bewertung angewandt, um die Robustheit der Entscheidungen zu erhöhen. Die Simulation wendet eine Variation von $\pm 10\%$ auf die Lebenszyklusannahmen an, wobei ein Diskontsatz von 3% berücksichtigt wird.

9.4 Resultate

9.4.1 Auf der Teststrecke Täsch-Zermatt

Die Bewertung zeigt, dass auf der Teststrecke die Installation des SKK unabhängig vom analysierten Szenario rentabel ist (vgl. Abbildung 108).

Betrachtet man nur die Auswirkungen auf die Drehgestelle (1), ist die Installation der SKK mit einer EA-Differenz von rund 140kCHF (zwischen 75kCHF/Jahr und 215kCHF/Jahr) rentabel.

Wenn man die Auswirkungen auf die Drehgestelle (1) und die Schienenwartung (23) berücksichtigt, ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von etwa 165kCHF (zwischen 85kCHF/Jahr und 235kCHF/Jahr) rentabel.

Unter Berücksichtigung aller systemischen Effekte ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von rund 270kCHF (zwischen 210kCHF/Jahr und 335kCHF/Jahr) rentabel.

Unter Vorbehalt der Gültigkeit der Annahmen zeigt keine Simulation, dass die SKK nicht rentabel ist.

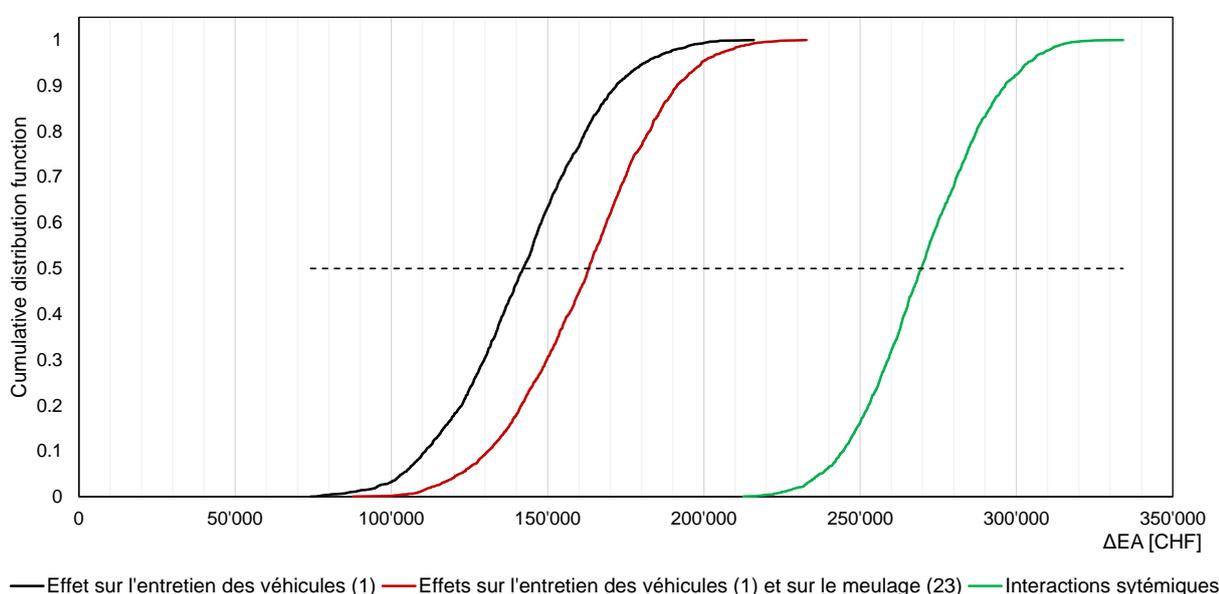


Abbildung 108: Grafik zur Rentabilität SKK auf der Strecke Täsch - Zermatt

9.4.2 Auf dem MGBahn – Netz

Die Rentabilität der allgemeinen Einführung von SKK auf dem MGBahn – Netz hängt von der Länge der Abschnitte, die mit denselben Problemen wie die Teststrecke Täsch - Zermatt zu kämpfen haben, sowie von der Anzahl der auszurüstenden Fahrzeuge ab.

In einem ersten Ansatz wird der SKK bei 20 Fahrzeugen installiert und das Produkt systematisch auf kurvenreichen Strecken mit kleinen Radien angewendet.

Die Bewertung zeigt, dass die Installation des SKK auf dem gesamten Netz im Allgemeinen kosteneffizient ist (vgl. Abbildung 109).

Betrachtet man nur die Auswirkungen auf die Drehgestelle (1), ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von rund 720kCHF (zwischen -200kCHF/Jahr und 1'600kCHF/Jahr) rentabel.

Betrachtet man die Auswirkungen auf die Drehgestelle (1) und den Schienenunterhalt (23), ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von rund 1'050kCHF (zwischen 195kCHF/Jahr und 1'950kCHF/Jahr) rentabel.

Berücksichtigt man die Auswirkungen auf die Drehgestelle (1), die Schienenwartung (23) und die Lebensdauer der Schiene (21), ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von rund 2'300kCHF (zwischen 1'600kCHF/Jahr und 2'900kCHF/Jahr) rentabel.

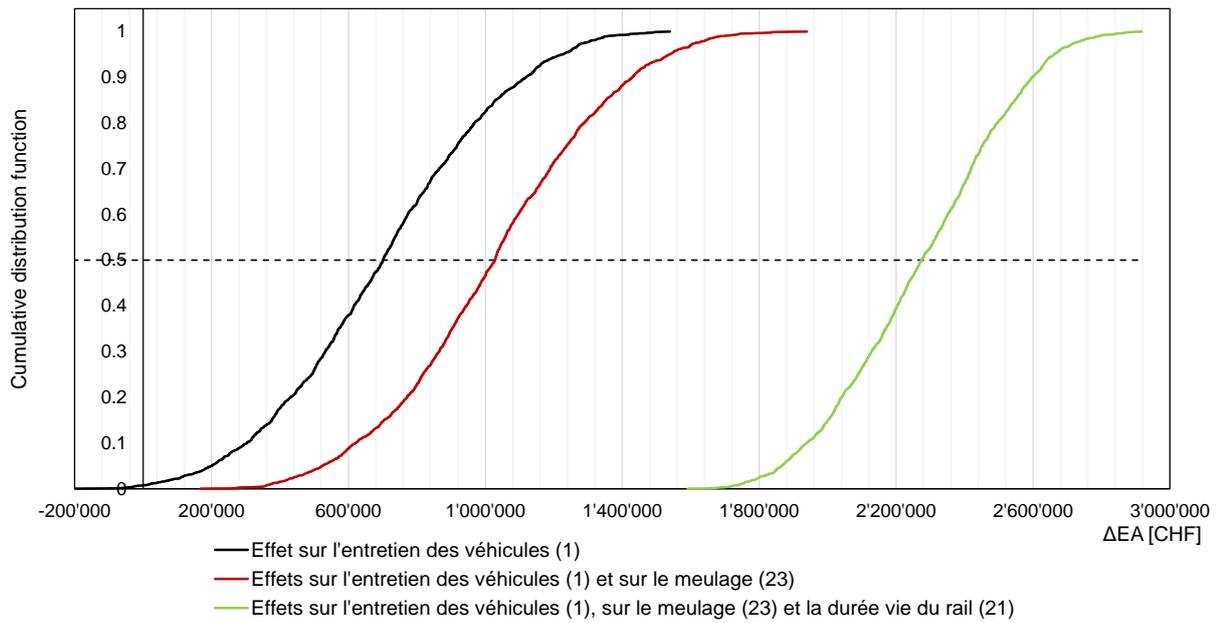


Abbildung 109: Grafik zur Rentabilität auf dem gesamten Netz der MGBahn

10 Schlussfolgerungen und weiteres Vorgehen

Die erste Betriebserprobung bei der MGBahn auf der Strecke Täsch – Zermatt mit on-board Schienenkopfkonditionierung fanden im Jahre 2022 statt. Dabei wurde, vor allem während den sehr hohen Temperaturen im Sommer 2022, eine Erhöhung des Schlupfwellenwachstums festgestellt. Um die Signifikanz dieses auf sehr hohe Tagestemperaturen während einer längeren Periode zurückzuführenden Ergebnisses zu überprüfen und über die vier Jahreszeiten durch zusätzliche Messdaten die Stichprobe zu erhöhen, wurde die Betriebserprobung um ein Jahr verlängert. In der vom BAV beauftragten Systemaufgabe Interaktion Fahrzeug / Fahrweg Meterspur wurden durch das Programm mehrere Kernprojekte zur Erforschung der Phänomene und Lösungsfindung beauftragt. Aus diesem Grunde fanden in Zusammenarbeit mit dem ViF, AC²T und der Universität Sheffield zusätzliche Untersuchungen auf der Strecke Täsch – Zermatt und auf Prüfständen statt. Aufgrund der Erfahrungen mit den erhöhten Schientemperaturen fanden deshalb, für ein besseres Verständnis dieses Einflusses auf das Reibungsverhalten der Konditioniermittel, zusätzliche Versuche auf einem Zweischeibenprüfstand statt. Dabei konnte nachgewiesen werden, dass durch längere Sonneneinstrahlung und in der Folge höhere Schientemperaturen das SKK – Mittel sich schneller verflüchtigt als während des restlichen Jahres.

Nach der ersten Phase der Betriebserprobung im Jahre 2022 und der Feststellung leicht erhöhter Schlupfwellenamplituden wurden die Schienen auf der Strecke Täsch – Zermatt geschliffen. Da der Shuttle 2054 über die gleichen Stahlqualitäten bei den Radreifen verfügte (KVR600) wie der Shuttle 2051, wurden beim Shuttle 2054 zwar über die ortsfeste Messanlage in Täsch (Rundheitsabweichungen) weiter beobachtet, jedoch von den zusätzlichen Kontrollen der Räder und Radabzeichnungen ausgeschlossen.

Der vorstehende Bericht enthält Ergebnisse zu den folgenden Aspekten des Rad-Schienen-Systems:

- a) Verschleiss und Schädigungen an den Rädern, wobei beim Verschleiss zwischen demjenigen an den Spurkränzen und demjenigen an den Radlaufflächen unterschieden wird.
- b) Veränderungen an den Radprofilen im Betriebseinsatz gegenüber dem bei der Reprofilierung verwendeten Nominalprofil RTE 29500A.
- c) Verschleiss und Schädigungen an den Schienen in den Bögen, unterschieden nach den verschiedenen Zonen der Berührung von Rad und Schiene sowie unterschieden nach bogeninneren und bogenäusseren Schienen.
- d) Reibwert gemessen an den Berührflächen Rad / Schiene auf den Schienenköpfen bogeninnen und bogenaussen an drei signifikanten Bögen mit dem Tribometer.
- e) Rauigkeit der Schienenfahrlflächen in der Längsrichtung bogeninnen und bogenaussen gemäss Vorgaben der EN 15610 [6] zur Beurteilung der Schlupfwellenbildung.
- f) Grundlagen zur Erklärung der Schlupfwellenbildung am Gleis und deren Auswirkungen auf den Betrieb (Schwingungen von Schienen und Schwellen, Lärmemission)
- g) Berührung von Rad und Schiene (Rad- und Schienenprofile)
- h) Lärm: Messungen / Überwachung und Resultate zur Schiene – Noise
- i) Schwingungen an der Schiene
- j) Ergebnisse zu einem im Einsatz befindlichen on-board-System zur Detektion von Schlupfwellen und Kurvenkreischen
- k) Rundheitsabweichungen beurteilt anhand Messanlage im Gleis
- l) Tribometrische Charakterisierung von SKK
- m) Entnahme von SKK – Proben von den Düsen des On-Board-Systems am Fahrzeug 2051

n) Gesamtwirtschaftlichkeit

Zu a) Verschleiss und Schädigungen an den Rädern

- Der Spurkranzverschleiss (Spurkranzdicke und q_R - Mass) ist bei allen Fahrzeugen und an allen Rädern untergeordnet. Es ist tendenziell ein leichtes Wachstum der Spurkranzdicke festzustellen. Für ein günstigeres Radprofil beim Bogenlauf wäre deshalb eine Spurkranzschwächung in Betracht zu ziehen. Dies setzt jedoch weiterhin ein gutes Funktionieren der Spurkranzschmierung voraus.
- Bei den Streckenbegehungen war wie schon im Vorjahr an den Schienenflanken eine Tendenz zur Überschmierung festzustellen. Das Schmiermittel wird dadurch auf die Fahrflächen der bogenäusseren Schienenköpfe verdrängt, was zu einer Beeinträchtigung der Traktion führen kann. Eine bedarfsgerechte Spurkranzschmierung könnte dabei Abhilfe schaffen.
- Bei den Kontrollen der Radlauflächen sind keine Tendenzen zur Bildung von Polygonen und mit zwei Ausnahme keine ergebnisbeeinträchtigender Rollkontaktermüdung erkennbar gewesen.
- In einem Fall ist bei einem Rad nach längerer reprofiliierungsfreier Laufzeit umlaufende Rollkontaktermüdung (RCF) festgestellt worden. Dies dürfte auf den gegen RCF weniger resistenten Radwerkstoff KVR600 zurückzuführen sein.
- An einigen Rädern sind an den Radlauflächen umlaufende Mulden im Bereich der Hohlkehle festgestellt worden. Diese sind auf ein ungünstiges Zusammenwirken von Rad und Bremssohle zurückzuführen. In einem Fall sind dadurch umlaufende RCF-Schäden am Rad aufgetreten.
- Ohne Schädigungen an den Rädern werden bei den Triebradsätzen Indikatoren zwischen 15'000km und 20'000km erreicht. Allerdings sind die Streuungen beträchtlich. Bei den Laufradsätzen ist die Streuung noch grösser als bei den Triebradsätzen. Bei diesen liegen die Indikatoren zwischen 30'000km und 50'000km. Die Werte liegen im Trend bei den Triebradsätzen etwas tiefer und bei den Laufradsätzen in der gleichen Grössenordnung wie im Jahre 2022. Insgesamt liegen die Werte mit Konditionierung deutlich höher als in der Zeit ohne Konditionierung. Wie weiter unten bei den Ergebnissen aus der Detektionsanlage im Gleis gezeigt wird, sind die Schädigungen an den Fahrflächen der Räder als Folge von Flachstellen nicht auf die Konditionierung zurückzuführen.
- Schädigungen an den Rädern und anschliessende Reprofilierungen reduzieren den Indikator Anzahl Kilometer pro 1mm Reduktion des Raddurchmessers sowohl kurzzeitig und insbesondere über eine längere Betrachtungszeit massiv.

Zu b) Veränderungen an den Radprofilen

- Die Radprofile zeigen über die zweijährige Betriebserprobung eine langsame Veränderung in Richtung günstigeres Verhalten im Bogen ohne eine nennenswerte Verschlechterung des Indikators für die Fahrt auf geraden Strecken. Die Laufradsätze passen sich schneller an die bogenäusseren Schienen an als die Triebradsätze. Dies dürfte auf die unterschiedlichen Stahlqualitäten bei diesen beiden Laufwerksprinzipien zurückzuführen sein. Bei den Rechtsbögen erfolgt die Anpassung schneller als bei den Linksbögen.
- Das unterschiedliche Verhalten in den beiden Bogenrichtungen ist auf asymmetrische Radprofile links rechts zurückzuführen. Diese Asymmetrien äussern sich in der Regel in unterschiedlichen Raddurchmessern bei den beiden Rädern desselben Radsatzes

- Durch die Schienenkopfkonditionierung und den geringeren Reibwert Rad / Schiene reduziert sich der Radverschleiss. Dadurch erfolgt die Verschleissanpassung deutlich langsamer als ohne Konditionierung.

Zu c) Verschleiss und Schädigungen an den Schienen in den Bögen

- Im schienenmittenmittigen Bereich, charakterisiert durch W1, ist der Gesamtverschleiss der Schienen am grössten. Dies gilt sowohl für die bogeninneren als auch für die bogenäusseren Schienen.
- An den bogeninneren Schienen ist der Verschleiss W1 immer und zum Teil auch deutlich grösser als an den bogenäusseren Schienen.
- Der Verschleissfortschritt W1 während der Betriebserprobung ist sehr gering ausgefallen. Dies gilt gleichermassen für die bogeninneren und die bogenäusseren Schienen.
- Die Schienen wurden im Bereich der drei Bögen im Jahr 2019 durch neue Schienen ersetzt. In den Jahren 2022 und 2023 fanden hintereinander zwei Betriebserprobungen mit SKK statt. Die Schienen wurden zwischen den beiden Erprobungen geschliffen. Wie jedoch den Diagrammen entnommen werden kann, war der Abtrag durch das Schleifen sehr gering, was daraus resultiert, dass während der ersten Betriebserprobung nur geringes Wachstum der Schlupfwellen stattgefunden hat. Damit dürfte der grösste Verschleiss bei W1 aus der Zeit zwischen 2019 und Ende 2021 stammen. Das bedeutet, dass der Verschleiss durch die SKK zu einer signifikanten Reduktion des Schienenverschleisses beigetragen hat.
- Der Verschleiss W2 an den Richtung Gleismitte liegenden Schienenflanken insbesondere bei den bogenäusseren Schienen lag während der Betriebserprobung im Bereich der Messgenauigkeit und war daher kaum nennenswert. Dieser dürfte aufgrund der Messergebnisse schon vor Beginn der Betriebserprobungen sehr gering gewesen sein. Durch die effiziente Spurkranzschmierung ist unabhängig von SKK praktisch nur marginaler Schienenflanken- und Schienenfahrkantenschleiss aufgetreten. Die Fahrkantenschleiss wurde hier nicht in Form von Diagrammen aufgeführt. Es zeigt sich bei den Auswertungen ein zur Schienenflanke ähnliches Verhalten.
- Obschon seit der Schienenneuerlegung nur marginaler Schienenflankenverschleiss aufgetreten ist, tritt in allen überprüften Bögen eine signifikante Spurerweiterung auf. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Hauptursachen dafür nicht beim Schienenverschleiss liegen. Zu diesem Verhalten des Gleises werden weitergehende Untersuchungen im Rahmen des Projektes P3 durchgeführt.

Zu d) Reibwert gemessen an den Berührflächen Rad / Schiene mit Push-Tribometer

- Die Messwerte sind gossenteil konstant zwischen 0.2 und 0.3. Es gibt jedoch an allen Messstellen erhöhte Reibwerte im Februar – März und Ende August.
- Die Annahme, dass die Reibwerte während des Sommers 2023 analog zum Sommer 2022 markant ansteigen, hat sich nicht im erwarteten Umfang bestätigt. Ende August 2023 sind tatsächlich erhöhte Reibwerte gemessen worden, jedoch ist diese Spitze im Vergleich zum Vorjahr weniger hoch und weniger lange. Da der Sommer 2023 weniger heiss war als der Sommer 2022, wird davon ausgegangen, dass die «kritischen Temperaturen» nicht oder kaum erreicht wurden.
- Die Reibwerte haben sich anschliessend sowohl im Februar – März 2023 wie auch im August 2023 ohne Änderungen wieder im Bereich zwischen 0.2 und 0.3 eingependelt.
- Trotz den insgesamt konstanten Reibwerten sind auch in Zukunft die Wetterverhältnisse zu berücksichtigen. Aufgrund von neuesten Untersuchungen von AC2T auf dem Zwei-Scheiben-

Prüfstand mit drei verschiedenen Konditioniermitteln besteht bereits bei einer Schienentemperatur von 60°C eine signifikante Veränderung bei der Leistungsfähigkeit dieser Produkte. Die Ergebnisse dieser Versuche und die daraus resultierenden Empfehlungen werden durch AC2T in einem noch zu veröffentlichenden Bericht präsentiert.

Zu e) Rauigkeit der Schienenfahrflächen in der Längsrichtung bogeninnen und bogenaussen

- Werden die Ergebnisse mit den Messungen aus der vorherigen Messperiode verglichen, so kann festgestellt werden, dass sich in den Bögen Zum Biel Portal und Zum Biel Brücke der Bereich der dominanten Schlupfwellenlängen weiter zu geringeren Wellenlängen verschoben hat. Ein Grund für diesen Trend kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht genannt werden, soll aber durch zukünftige Untersuchungen näher beleuchtet werden.
- Das Wachstum der Schlupfwellen 12 Monate nach dem Schleifen ist in allen Bögen deutlich geringer als in der vorherigen Messperiode, in der ebenfalls SKK eingesetzt wurde. Damals nahm das Wachstum der Schlupfwellen in den heissen Sommermonaten 2022 deutlich zu. Dieses Verhalten ist im Sommer 2023 nicht beobachtet worden.
- Der bei fast allen Schienenrauheitsspektren, insbesondere bei den bogenäusseren Schienen, sichtbare Peak im Terzband von 6.3mm ($\lambda < 1\text{cm}$) ist eine Folge des Schienenschleifens mit den rotierenden Schleifscheiben. Dieser Ausschlag wird mit zunehmender Überrollung geglättet. Dafür ist die Schiene anschliessen im kurzwelligen Bereich $\lambda < 4\text{cm}$ deutlich rauer.

Zu f) Grundlagen zur Erklärung der Schlupfwellenbildung am Gleis und deren Auswirkungen auf den Betrieb

- Die Formation von Schlupfwellen ist ein konstantes Frequenz Phänomen (engl. constant-frequency phenomena). Dies bedeutet, dass die Variation der Reibarbeit, oder einer anderen für den Verschleiss relevanten physikalischen Grösse, mit einer konstanten Frequenz für die Entstehung von Oberflächenunregelmässigkeiten mit einer bestimmten Wellenlänge verantwortlich ist.
- Zur Beurteilung der potenziell angeregten Systemkomponenten, wurden die am Shuttle und im Bogen von Biel Brücke durchgeführten Inertanzmessungen an den Lauf- und Triebbradsätze, an den Schwellen und an den Schienen über sowie zwischen den Schwellen herangezogen.
- Aus den Frequenzgängen des Oberbaus und der Radsätze können Resonanzfrequenzen dieser Systemkomponenten identifiziert werden. Einige davon befinden sich innerhalb des Frequenzbereiches, innerhalb dessen jene Eigenmoden vermutet werden, welche für die Formation der Schlupfwellen in den betrachteten Bögen verantwortlich sind.
- Die in dem Bogen «Zum Biel Portal» vorliegenden Schlupfwellen resultieren in Vibrationen der Schiene und Geräuschemissionen bei deren Überrollung in dem zu erwartenden Frequenzbereich. Durch die höhere Inertanz der Schiene in laterale Richtung weisen auch die gemessenen Vibrationen in diese Richtung eine höhere Amplitude auf. Diese Messungen liefern einen Einblick in die Auswirkungen der Schlupfwellen, jedoch nicht, was der Grund für deren Formation sein könnte. Dafür wären Messungen an einer geschliffenen Schiene notwendig, bei der ebenfalls Torsions- und Biegeschwingungen an den Achsen des Fahrzeugs durchgeführt werden.

Zu g) Berührung von Rad und Schiene

- Bei der Entwicklung und Veränderung der Schienenprofile wird vor allem deren Streuung betrachtet. Die Beurteilung hängt vom verwendeten Radprofil ab. Die geringsten Streuungen stellen sich beim verschleissangepassten Radprofil zb_Opft_27_28 ein. Dieses zeigt aufgrund

- des Radialstellungsindex die beste Verschleiss-Anpassung im Vergleich zum Nominalprofil und zu demjenigen eines Triebradsatzes nach zweijährigem Einsatz auf der Strecke Täsch-Zermatt.
- Vergleichsweise zu den nominellen Schienen zeigen die Schienen bei längerem Betriebseinsatz Veränderungen, die sich günstiger auf den Radialstellungsindex auswirken. Um eine Einschätzung zur gegenseitigen Anpassung von Radprofilen aus dem Betriebseinsatz und von Schienenprofilen aus längerer Liegedauer nach dem Schleifen vornehmen zu können, ist die aus der Betriebserprobung verfügbare Stichprobe zu klein und bei den Schienen vor allem durch die Konditionierung beeinträchtigt.
 - Die drei betrachteten Bögen (zum Biel und Lüegelwang) zeigen ein ähnliches Verhalten sowohl hinsichtlich der Radialstellungsindizes als auch bei der Streuung. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich bei allen drei Bögen praktisch ohne Seitenverschleiss eine signifikante Spurerweiterung eingestellt hat. Dies führt im Vergleich zur nominellen Schiene zu einem günstigeren Bogenlaufverhalten.
 - Mittlerweile liegen für die MGBahn Schienenprofile für alle Strecken (jeden Meter ein Schienenprofil), erfasst durch das Diagnosefahrzeug von Sersa, vor. Vier unterschiedliche Radprofile wurden mit den Schienen auf den gesamten Strecken der MGBahn gepaart. Die Berührgeometrie der Schienen auf dem gesamten Streckenabschnitt Täsch – Zermatt wurde qualitativ mit denjenigen in drei Versuchsbögen verglichen. Die vier verwendeten Radprofile verhalten sich auf dem gesamten Streckenabschnitt ähnlich wie in den drei Versuchsbögen, Am besten war das Verhalten des bei der Zentralbahn verschleissangepassten Radprofil zb_Opt.tww ab. Um jedoch zu verstehen, warum auch dieses Radprofil auf gewissen Abschnitten den Radialstellungsindex nicht erfüllt, ist eine vertiefte Strecken- und Profilanalyse erforderlich.

Zu h) Lärm: Messungen am Gleis / Überwachung und Resultate zur Schiene – Lärm

- Beim Kurvenkreischen wird Schall vom Rad nahe einer Mode des Rades abgestrahlt. Um die Moden des Trieb- und Laufrades zu ermitteln, wurden Messungen mittels Impulshammer in der Werkstatt durchgeführt. Die Messungen am Gleis wurden im Bogen zum Biel – Brücke durchgeführt.
- Die Moden der Radscheibe sind klar ersichtlich (prägnante Peaks), ebenso wie die Mode, welche sich auch in Vorbeifahrtsmessungen zeigt (bei ca. 5200 Hz). Weitere Messungen wurden an einem Laufradsatz durchgeführt, wobei hier der Fokus auf den tieferen Frequenzbereich bis 1000 Hz gelegt wurde, um Erkenntnisse für das Thema «Verschleiss» zu ermöglichen. Die tieffrequenten Moden sind hinab bis ca. 6 Hz klar ersichtlich. Eine Zuteilung der Moden zu den entsprechenden Formen ist im weiteren Verlauf des Projektes im Zuge von Vergleichen mit Finite Elemente Berechnungen des Radsatzes vorgesehen.
- Bei den Schienen wurde eine gute Kohärenz bis ca. 700 Hz erreicht. Bei ca. 159 Hz ergibt sich eine Antiresonanz, wobei zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht klar ist, woher diese Antiresonanz stammt. In zukünftigen Untersuchungen wird ein Finite Elemente Modell des Gleises aufgebaut, mit diesem Modell sollte es möglich sein, diesen Effekt näher zu untersuchen. Die Messungen sind geeignet, ein erstes derartiges Modell zu erstellen, wobei dieser Frequenzbereich eher für das Thema «dynamischer Verschleiss» relevant ist als für Kurvenkreischen
- Bei der Messkampagne wurde unterschiedliche Vorbeifahrten gemessen, wobei Kurvenkreischen nicht immer aufgetreten ist. Das Kurvenkreischen tritt an der Innenschiene bei ca. 5140 Hz auf. Dies entspricht dem Mode, welcher schon bei den Hammerschlagmessungen erhoben wurde. Weiters wurden die Messsignale der Laufradsätze der Triebradsätze der zwei

Triebwagen der beiden Züge analysiert. Es zeigte sich, dass das Kurvenkreischen nur bei einem bestimmten Triebbradsatz auftrat.

- Weiters wurde die Richtungsabhängigkeit des Kurvenkreischens untersucht. Erste Analysen zeigten, dass das Kurvenkreischen eher bei der Talfahrt in Fahrtrichtung Täsch als bei der Bergfahrt in Fahrtrichtung Zermatt auftritt. Abbildung 72 zeigt einen derartigen Vergleich des Schalldrucks.
- Bei der Aufzeichnung der Schallemission an der bogeninneren Schiene am 19.10.2023 um 12:48 zur Untersuchung von Kurvenkreischen können auch Geräusche im niederfrequenten Bereich untersucht werden. Diese zeigen ebenfalls innerhalb des abgesteckten Frequenzbereichs deutlich erkennbaren Lärm, welcher auf die Überrollung der Schlupfwellen rückzuführen ist. Die Schallpegel ist vor allem bei der Überfahrt der Triebdrehgestelle besonders ausgeprägt, was auf die höhere ungefederte Masse zurückzuführen ist.

Zu i) Schwingungen an der Schiene

- Die Auswertung der Beschleunigungen am Schienenkopf zwischen den Schwellen in lateraler Richtung zeigt bei der Überfahrt eine Schwingung der Schiene mit mehreren Frequenzen. Bestimmte Frequenzen werden dabei über einen längeren Zeitbereich angeregt. Eine davon liegt bei einer Frequenz von 450Hz, bei der ein ausgeprägter Resonanzpeak der Schiene zwischen den Schwellen und des Triebbradsatzes liegt.
- Obwohl die Überfahrt einer Oberflächenunregelmässigkeit zu einer Anregung in vertikaler Richtung führt, kann damit ebenfalls eine Anregung in laterale Richtung erklärt werden. Die Variation der Normalkraft resultiert ebenfalls in einer Variation der Schlupfkräfte, welche in Querrichtung in engen Bögen besonders gross sind. Dies lässt auf eine Anregung durch die Schlupfwellen bei der Überfahrt zurückschliessen.

Zu j) Ergebnisse zu einem im Einsatz befindlichen on-board-System (Technode) zur Detektion von Schlupfwellen und Kurvenkreischen

- Das Messsystem ist auf zwei Zugkompositionen der MGBahn, einem Komet ABDeh 2026 und einem Shuttle BDeh 2052 installiert. Die wesentlichen Komponenten sind die Beschleunigungssensoren an den Radsatzlagern eines Radsatzes, welcher bei Bergfahrt nachlaufend ist und Mikrofonen, welche in der Nähe desselben Radsatzes am Wagenkasten montiert sind. Zudem verfügt das Messsystem über eine Verortung mittels GNSS (globales Navigationssatellitensystem), welche benutzt wird, um die Position auf dem Durchfahrtsgleis zu bestimmen.
- Die Messdaten werden während der Fahrt laufend aufgezeichnet und sind im Bericht über das ganze Jahr für die ganze Zeit in Form von Plots aufgeführt.
- In den Sommermonaten Juli und August 2022 herrschten sehr hohe Tagestemperaturen. Dies führte dazu, dass sich die Beschleunigungswerte an den beiden mit Beschleunigungsaufnehmern ausgerüsteten Fahrzeugen (Komet 2026 und Shuttle 2052) erhöhten. Im Sommer 2023 wurden zwar die ausserordentlich hohen Temperaturen des Vorjahres nicht mehr erreicht. Immerhin bewegten sich die Temperaturen in diesem Sommer in einer für diese Jahreszeit üblichen Grössenordnung. Aufgrund der Überwachung konnte festgestellt werden, dass sich der im Jahre 2022 beobachtete Effekt nicht wiederholte. Aufgrund von mittlerweile vorliegenden Prüfstandsversuchen zu dieser gemachten Erfahrung zeigt sich, dass die Leistungsfähigkeit der derzeit verwendeten Konditioniermittel bei erhöhten Schienentemperaturen eingeschränkt wird.
- Aus der Auswertung der Plots zum Kurvenkreischen ergeben sich die folgenden Schlussfolgerungen:

- Bei Bergfahrt ist das Kurvenkreischen prominenter als bei der Talfahrt. Bei Bergfahrt tritt Kurvenkreischen auch in mehr Kurven auf.
- Im Sommer ist das Kurvenkreischen bei Bergfahrt intensiver als in den restlichen Jahreszeiten. Bei Talfahrt ist dieser Effekt nicht so gut sichtbar.
- Bei Talfahrt ist das Kurvenkreischen in der Nacht in den SKK – Bereichen intensiver als am Tag.

Zu k) Rundheitsabweichungen beurteilt anhand Messanlage im Gleis

- Die Messanlage zur Radrundheit (Wheel Monitoring System WMS Müller BBM Rail Technologies liefert seit Anfang März 2022 Messwerte zu Polygonen, Flachstellen und allfälligen anderen Schädigungen in der Umfangrichtung an den Radlaufflächen der Räder. Die Gleismessstelle ist kurz nach Täsch auf der Strecke nach Zermatt installiert.
- Die Gleismessstelle identifiziert ankommende Züge bzw. Fahrzeuge mittels eines Fahrzeugidentifikationssystems. Hierzu wurde das bei der Rhätischen Bahn verwendete Fahrzeugidentifikationssystem implementiert. Im Gleis wurden zwei RFID – Antennen installiert, welche die bei der MGBahn und der Rhätischen Bahn installierten RFID-Tags lesen und damit die Fahrzeuge identifizieren.
- Im Gleis integrierte Sensoren erfassen die Schwingungen. Das WMS berechnet aus den Signalen die Schädigungen der Lauffläche. Die Schädigung wird über zwei Indikatoren beschrieben:
 - Polygonindikator. Dieser kennzeichnet den Grad der Polygonisierung. Der Wellenlängenbereich der Polygonisierung wurde auf 4 cm – 40 cm festgelegt.
 - Flachstellenindikator. Dieser erfasst singuläre Defekte, wie z.B. Flachstellen.
- Die Ergebnisse zu den erfassten Rundheitsabweichungen können wie folgt zusammengefasst werden:
 - Im Jahr 2023 sind an den Komet-, Shuttle- und Gelenksteuerwagen – Fahrzeugen insgesamt 54 Flachstellen aufgetreten. Im Jahr 2022 betrug die Anzahl an Flachstellen 39. Die Anzahl an Flachstellen hat damit um 15 zugenommen (+38%).
 - Die Zunahme der Flachstellen ist vor allem auf die Zunahme bei den Komet-Fahrzeugen 2021-2028 und den Shuttle-Fahrzeugen zurückzuführen.
 - Die Komet- und die Shuttle-Fahrzeuge weisen in etwa gleich viele Flachstellen auf (ca. 3 pro Fahrzeug in 2023). Lediglich an den Gelenksteuerwagen treten weniger Flachstellen auf (ca. 1,5 pro Fahrzeug in 2023).
 - Bei den Shuttle Fahrzeugen treten die Flachstellen in etwa gleicher Häufigkeit an den Lauf- und Triebachsen auf.
 - Bei den regelmässig gemessenen Komet-Fahrzeugen treten die Flachstellen in etwa gleicher Häufigkeit an den Lauf- und Triebachsen auf.
 - Die Anzahl an Flachstellen pro Monat war 2023 in den Monaten Oktober und November etwas geringer als in den anderen Monaten. In diesen Monaten wurden erhöhte Reibbeiwerte festgestellt.
 - Flachstellen treten bei den Komet-Fahrzeugen in den Monaten November und Dezember häufiger auf als in den anderen Monaten. Bei den dreiteiligen Komet-Fahrzeugen traten im Jahr 2022 und 2023 insgesamt 23 Flachstellen auf, davon 8 in den Monaten November und Dezember (35%).

- Bei den vierteiligen Komet-Fahrzeugen waren dies bei insgesamt 39 Flachstellen im Jahr 2022 und im Jahr 2023 16 in den Monaten November und Dezember (41%).
- Bei den Shuttle- und Gelenksteuerwagen-Fahrzeugen ist keine Häufung in den Monaten November und Dezember erkennbar.

Zu I) Tribometrische Charakterisierung von SKK

Die tribometrische Charakterisierung von SKK setzt sich aus zwei Hauptteilen zusammen, die miteinander verknüpft sind:

- Methodenentwicklung und Experimente für zukünftige R RTE für SKK,
- Methodenentwicklung und Experimente zur Bereitstellung von Eingangsdaten für Rad-Schiene-Kontaktmodelle.

Im Sinne einer wirtschaftlichen Betrachtungsweise soll eine wohldefinierte, reproduzierbare und kostengünstige Methode zur Bewertung von SKK hinsichtlich des Reibungskoeffizienten entwickelt werden. Dabei soll der Umfang von Feldversuchen durch Laborversuche deutlich reduziert werden. Im besten Fall sollen Feldversuche vollständig durch Laborversuche ersetzt werden. Der Feldversuch zielte darauf ab, den Einfluss von SKK auf den Reibungskoeffizienten im Regelbetrieb einer Meterspurbahn zu bestimmen. Hier wurden Testmethoden eingesetzt, um ein besseres Verständnis des Rad-Schiene-Kontakts in der Meterspur zu erlangen und um Eingangsdaten für die Modellierung solcher Rad-Schiene-Kontakte zu generieren. Labor- und Feldversuche wurden von The University of Sheffield (USheffield) und der AC2T research GmbH (AC²T) durchgeführt, die Modellierung erfolgt bei Virtual Vehicle GmbH (Virtual Vehicle). Dabei wurden im Feldversuch Reibungsmessungen durchgeführt und ergänzende analytische Methoden verwendet.

Für die tribometrische Charakterisierung von SKK wurden zwei Tribometer verwendet: das tragbare Tribometer von Rivelin Rail (bereitgestellt von USheffield) und das „Push“ – Tribometer von Salient Systems (bereitgestellt von RAILplus).

Beim Feldversuch wurden zwei Szenarien untersucht:

- Konditionierung im Regelbetrieb (morgens): Zu beachten ist, dass von 20:00 Uhr bis 8:00 Uhr keine Schienenkopfkonditionierung erfolgt, also der Aufbau einer konditionierten Schiene am Morgen erfolgt. Es wurde beobachtet, wie lange es dauert, bis sich eine konditionierte Schiene einstellt (konstant niedriges Reibungsniveau). Weiters erfolgt keine Konditionierung bei einer Luftfeuchtigkeit > 85%.
- SKK-Verbrauch im Regelbetrieb (tagsüber): Sobald eine konditionierte Schiene vorliegt, wird die Schienenkopfkonditionierung durch Deaktivieren des RFID-Tags abgestellt. Im Anschluss wird beobachtet, wie lange es dauert, bis sich eine nicht konditionierte Schiene einstellt (konstant hohes Reibungsniveau).

Die Messungen erfolgten in drei aufeinander folgenden Messpositionen. Messposition A lag der Konditionierungszone am nächsten und zeigte die grösste Verringerung des Reibungskoeffizienten kurz nach der Aktivierung der Schienenkopfkonditionierung. Die Messposition C zeigte eine zeitliche Verzögerung der Reibungsreduzierung aufgrund des Transports des SKK über den Raddurchlauf am Schienenkopf (carry on). Nach Deaktivierung der Schienenkopfkonditionierung nahm der durchschnittliche Reibungskoeffizient der äusseren Schiene schneller höhere Werte an als jener der inneren Schiene.

Zudem wurden ergänzende analytische Methoden eingesetzt zur Dokumentation der Messdaten und Darstellung der Oberflächenstrukturen in den Kontaktbereichen von Rad und Schiene:

- Profilometer zur Erfassung von Rad- und Schienengeometrien.
- 3D-Scanner – 3D-Topografie zur konturnahen Darstellung der Schienenfahrflächen zur Zuordnung der Oberflächenstruktur an die Kontaktbereiche der verschiedenen Räder auf die Schienen.
- Abdrücke zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit mit einer hochauflösenden Abdruckmasse. Die erhaltenen Abdrücke können auf einem 3D-Profilometer im Labor vermessen werden, um Informationen über die Oberflächenstruktur, wie z.B. Rauheitsdaten, zu erhalten. Die Ergebnisse der Abdrücke der Innenschiene an aufeinander folgenden Messpositionen A, B und C wurden in einem Bereich von 5x5 mm innerhalb der Verschleissspur am Schienenkopf durchgeführt. Es wurden die Oberflächenrauheitsparameter nach ISO 25178 ermittelt.

Die Methoden zum qualitativen und quantitativen Nachweis von SKK sind grundsätzlich auf Oberflächen von Laborproben und Schienen in Feldversuchen anwendbar. Für die Qualifizierung und (Semi-)Quantifizierung sowie die Ergebnisinterpretation ist eine Dokumentation des Ortes der Probeentnahme und der Flächengrösse unerlässlich. Die Probenahme auf den Schienen erfolgte durch Abtupfer und anschliessende Analyse wurde im Labor (AC²T) durchgeführt.

Analog zu den Ergebnissen der Reibwertmessungen verhielt es sich bei der Analyse der Tupfer mit den auf den Schienen verfügbaren Mengen an Konditioniermittel. In einer ersten Phase wurde konditioniert. Nach der 9. Zugdurchfahrt in Richtung Zermatt stellte sich die grösste Menge ein. Nach Deaktivierung der Konditionierung zeigte sich schon nach der 2. Zugdurchfahrt eine deutlich verringerte Menge. Im weiteren Verlauf, in der keine Schienenkonditionierung durchgeführt wurde, waren danach kaum noch Veränderungen bei den Mengen zu erkennen.

Zu m) Entnahme von SKK-Proben von den Düsen des On-Board-Systems am Fahrzeug 2051

Durch das vollständige Sammeln der ausgesprühten SKK – Menge in Kunststoffbehältern während des Sprühvorgangs von 6 Sekunden (Drücken des Testknopfes) wurden Proben für genaue gravimetrische Messungen bei AC²T gesammelt. Der gesammelten SKK-Proben wurden mit Petrolether in einem Ultraschallgerät gelöst bzw. dispergiert und in eine Petrischale überführt. Die Petrischale wurde dann in einen Trockenschrank für die Dauer von 2 bis 2,5 Stunden bei 80°C gestellt, um das Lösungsmittel zu entfernen. Anschliessend wurden gravimetrische Messungen des Rückstands (SKK) an einer analytischen Waage durchgeführt. Die Ergebnisse variieren sehr stark, wobei auf der linken Fahrzeugseite tendenziell eine grössere SKK-Menge ausgetragen wurde. Die Abweichung zur rechten Seite liegt im Bereich von +137 % (Probe 04) und -65 % (Probe 02). Die Gesamtmenge an SKK (linke und rechte Düse) schwankt zwischen 371 mg (Probe 03) und 1087 mg (Probe 05).

Zu n) Gesamtwirtschaftlichkeit

Die Bewertung beruht auf einem Vergleich der äquivalenten Annuität (EA) für zwei verschiedene Szenarien: mit SKK und ohne SKK. Dadurch erhält man einen differentiellen Cashflow, bei dem zusätzliche Ausgaben als "Kosten" und Einsparungen als "Einnahmen" betrachtet werden. Die abweichenden Cashflows für diese beiden Szenarien umfassen:

- Ausgaben im Zusammenhang mit SKK
- Einsparungen, die durch die positiven Auswirkungen des SKK – Systems auf das Rollmaterial und die Infrastruktur entstehen.

Diese Studie nimmt die Perspektive des Eisenbahnunternehmens (EVU) ein; die Auswirkungen auf die Umwelt und die Allgemeinheit (Verringerung der Lärmbelastung) werden in dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

- Die Bewertung zeigt, dass auf der Teststrecke die Installation des SKK unabhängig vom analysierten Szenario rentabel ist.
- Betrachtet man nur die Auswirkungen auf die Drehgestelle, ist die Installation der SKK mit einer EA-Differenz von rund 140kCHF (zwischen 75kCHF/Jahr und 215kCHF/Jahr) rentabel.
- Wenn man die Auswirkungen auf die Drehgestelle und die Schienenwartung berücksichtigt, ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von etwa 165kCHF (zwischen 85kCHF/Jahr und 235kCHF/Jahr) rentabel.
- Unter Berücksichtigung aller systemischen Effekte ist die Installation des SKK mit einer EA-Differenz von rund 270kCHF (zwischen 210kCHF/Jahr und 335kCHF/Jahr) rentabel.
- Unter Vorbehalt der Gültigkeit der Annahmen zeigt keine Simulation, dass die SKK nicht rentabel ist.

11 Verzeichnisse

11.1 Referenzen

- [1] RAILplus: Schlussbericht zur Betriebserprobung SKK auf der Strecke Täsch - Zermatt, Technischer Bericht V1.0 20.10.2022
- [2] R-RTE 29500: Standardisierung Radsätze und Weichen Meterspur
- [3] RAILplus: FIMO LO-1, Konzeptionelle Bewertung, 2023
- [4] Müller BBM: Radunrundheit beurteilt anhand Messanlage im Gleis, März 2024
- [5] Müller BBM RAIL TECHNOLOGIES: OPTIMISING VEHICLE MAINTENANCE BY CONDITION BASED MAINTENANCE, WHEEL MONITORING SYSTEM WMS
- [6] ViF: Entwicklung der Schienenrauheit, Formation von Schlupfwellen und deren Auswirkungen auf den Betrieb, März 2024
- [7] SN EN 15610:2019-11: Bahnanwendungen – Akustik – Messung der Schienen– und Radrauheit im Hinblick auf die Entstehung von Rollgeräuschen
- [8] Grassie, S. (2009). Rail corrugation: Characteristics, causes, and treatments. Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit, 223, 581-596
- [9] RAILplus: Gedanken zur Spurerweiterung in engen Bögen, 2023
- [10] ViF: Messungen / Überwachung und Resultate zur Schiene – Noise, März 2024
- [11] technode: Auswertung der Messdaten des Systems technode für das Jahr 2023, März 2024
- [12] AC2T: P2 – Top-of-rail friction management and flange lubrication, Module 5 – Theoretical fundamentals of top-of-rail friction modifiers and flange lubricants, 11.03.2024
- [13] IMDM: Business case – rentabilité globale SKK - MGB23, 27.02.2024

11.2 Abbildungen

Abbildung 1: Indikator Anzahl km pro 1mm Durchmesserreduktion Shuttle 2051	18
Abbildung 2: Indikator Anzahl km pro 1mm Durchmesserreduktion Shuttle 2051	18
Abbildung 3 : Indikator Anzahl km pro 1mm Durchmesserreduktion Shuttle 2053	19
Abbildung 4: Abmessungen am Spurkranz beim Shuttle 2051	20
Abbildung 5: Abmessungen am Spurkranz beim Shuttle 2051	21
Abbildung 6: Abmessungen am Spurkranz beim Shuttle 2053	21
Abbildung 7: Installation des Wheel Monitoring Systems WMS bei der Matterhorn Gotthard Bahn bei Täsch.....	22
Abbildung 8: Radzustand und zugehörige WMS-Indikatorwerte (WMS = Wheel-Monitoring-System) 23	
Abbildung 9: Polygonindikator Achse 4 des Shuttles 2051 von März bis Ende 2023.	23
Abbildung 10: Flachstellenindikator Achse 5 und 6 des Shuttles 2054 von März 2022 bis Ende 2023. Am 15.2.2023 wurden beide Achsen überdreht	24
Abbildung 11: Flachstellenindikator des Komet 2021 von März 2022 bis Ende 2023. Flachstellen treten hier überwiegend in den Monaten November und Dezember auf.	28
Abbildung 12: Flachstellenindikator Achse 4 und 5 des Shuttles 2053 von März 2022 bis Ende 2023. An beiden Achsen liegen deutliche Flachstellen über einen längeren Zeitraum vor.	29
Abbildung 13: Rollkontaktermüdung bei Rad 4R vom Shuttle 2051	31
Abbildung 14: Berührgeometrie Radsatz 4 von Shuttle 2051 vor der Reprofilierung	31
Abbildung 15: Aufzeichnungen Flachstellen und Polygone der Messstelle Wheel Monitoring System WMS Müller BBM an den Radsätzen 1 bis 4 des Shuttle 2051	32
Abbildung 16: Schienenrauheitsspektren «Zum Biel Portal», bogeninnen.....	37
Abbildung 17: Schienenrauheitsspektren «Zum Biel Portal», bogenaussen	37
Abbildung 18 : Schienenrauheitsspektren «Zum Biel Brücke», bogeninnen	38
Abbildung 19: Schienenrauheitsspektren «Zum Biel Brücke», bogenaussen Lüegelwang	38
Abbildung 20: Schienenrauheitsspektren «Lüegelwang», bogeninnen.....	39
Abbildung 21: Schienenrauheitsspektren «Lüegelwang», bogenaussen	39
Abbildung 22: Frequenzgang eines Laufradsatzes durch eine Anregung in laterale Richtung	42

Abbildung 23: Frequenzgang eines Laufradsatzes durch eine Anregung in Umfangsrichtung.....	42
Abbildung 24: Frequenzgang eines Triebradsatzes durch eine Anregung in laterale Richtung.....	43
Abbildung 25: Frequenzgang eines Triebradsatzes durch eine Anregung in Umfangsrichtung	43
Abbildung 26: Frequenzgang der Schiene über einer Schwelle durch eine Anregung in vertikale Richtung	44
Abbildung 27: Frequenzgang der Schiene über einer Schwelle durch eine Anregung in laterale Richtung	44
Abbildung 28: Frequenzgang der Schiene zwischen den Schwellen durch eine Anregung in vertikale Richtung	45
Abbildung 29: Frequenzgang der Schiene zwischen den Schwellen durch eine Anregung in laterale Richtung	45
Abbildung 30: Vibration der Schiene zwischen zwei Schwellen bei der Überfahrt der einzelnen Drehgestelle.....	46
Abbildung 31: Beschleunigung der Schiene zwischen den Schwellen in laterale Richtung	47
Abbildung 32: Beschleunigung der Schiene zwischen den Schwellen in vertikaler Richtung.....	48
Abbildung 33: Schallemissionsmessung an der bogeninneren Schiene	49
Abbildung 34: Messbögen und deren Zuordnung zum Streckenverlauf.....	50
Abbildung 35: Bezeichnungen im Linksbogen	51
Abbildung 36: Bezeichnungen im Rechtsbogen	51
Abbildung 37: Messpunkte Zum Biel – Portal.....	52
Abbildung 38: Verschleiss W1 in Biel Portal.....	53
Abbildung 39: Verschleiss W2 in Biel Portal.....	53
Abbildung 40: Spurweite und deren Veränderung sowie Vergleich mit dem Schienenflankenverschleiss	53
Abbildung 41: Messpunkte Zum Biel Brücke	54
Abbildung 42: Verschleiss W1 in Biel Brücke	54
Abbildung 43: Verschleiss W2 in Biel Brücke	55
Abbildung 44: Spurweite und deren Veränderung sowie Vergleich mit dem Schienenflankenverschleiss	55
Abbildung 45: Messpunkte Lüegelwang.....	56
Abbildung 46: Verschleiss W1 in Lüegelwang.....	57
Abbildung 47: Verschleiss W2 in Biel Brücke	57
Abbildung 48: Spurweite und deren Veränderung sowie Vergleich mit dem Schienenflankenverschleiss	57
Abbildung 49: Messorte des Reibwertes mit dem Tribometer.....	59
Abbildung 50: Messergebnisse zu den Reibwerten.....	61
Abbildung 51: Paarung von nominellen Rad- und Schienenprofilen	63
Abbildung 52: Entwicklung der Radprofile beim Shuttle 2051	64
Abbildung 53: Entwicklung der Radprofile beim Shuttle 2052.....	65
Abbildung 54: Entwicklung der Radprofile beim Shuttle 2053.....	65
Abbildung 55: Ausgewählte Radprofile gepaart mit den Schienenprofilen von Biel-Brücke	67
Abbildung 56: Ausgewählte Radprofile gepaart mit den Schienenprofilen von Biel-Portal	67
Abbildung 57: Ausgewählte Radprofile gepaart mit den Schienenprofilen von Lüegelwang	68
Abbildung 58: Auszug Täsch-Zermatt aus der Rad-Schienen-Paarung Brig-Zermatt	69
Abbildung 59: Muldenbildung im Bereich der Hohlkehle durch Interaktion des Rades mit dem Bremsklotz.....	70
Abbildung 60: Paarung von Rad und Schiene in einem Linksbogen.....	70
Abbildung 61: Prinzipielle Vorgehensweise bei der Analyse und Modellierung des Phänomens «Kurvenkreischen»	71
Abbildung 62: Messort «Zum Biel Kurve»	72
Abbildung 63: Analyse von Schallmessungen an einem instrumentieren Radsatz eines «Shuttle» Triebwagens	73
Abbildung 64: Hammermessungen am Radsatz in der Werkstatt.....	74
Abbildung 65: Instrumentierung der Kurve und Vorbeifahrt eines Triebzugs	74
Abbildung 66: Eingangsinertanz an einer Radscheibe eines Triebradsatzes – Magnitude (oben), Phase (Mitte), Kohärenz (unten)	75

Abbildung 67: Hammermessungen am Laufradsatz in der Werkstatt	76
Abbildung 68: Eingangsinertanz des Laufradsatzes – Magnitude (oben), Phase (Mitte), Kohärenz (unten)	76
Abbildung 69: Anregung (schwarz) und Messung der Beschleunigung (blau bzw. rot).....	77
Abbildung 70: Eingangsinertanz des Gleises bei Anregung an der Schwelle – Magnitude (oben), Phase (Mitte), Kohärenz (unten)	78
Abbildung 71: Schalldruck (PSD) an der Innenschiene während der Vorbeifahrt – Richtung Täsch - Kurvenkreischen bei ca. 5140 Hz.....	79
Abbildung 72: Schalldruck (PSD) an der Innenschiene während der Vorbeifahrt – Fahrt in Richtung Zermatt (links) und Täsch (rechts) - Kurvenkreischen bei ca. 5140 Hz.....	79
Abbildung 73: Historie Vibrationen «Täschsand» - Zermatt, Oktober 22 - Dezember 22	82
Abbildung 74: Beschreibung zu Auswertungsplot Technode	83
Abbildung 75: 2023 – BDeh 2052 - Mikrofon rechts-Kurvenkreischen KW	84
Abbildung 76: 2023 – BDeh 2052 - Mikrofon links-Kurvenkreischen KW.....	85
Abbildung 77: 2023 – BDeh 2052 - Mikrofon rechts-Kurvenkreischen Tagesverlauf	85
Abbildung 78: 2023 – BDeh 2052 - Mikrofon links-Kurvenkreischen Tagesverlauf	86
Abbildung 79: 2023 – BDeh 2052 - Radsatzlager links-Schlupfwellen-vertikal KW.....	87
Abbildung 80: 2023 – BDeh 2052 - Radsatzlager rechts-Schlupfwellen-vertikal KW	87
Abbildung 81: 2023 – BDeh 2052 - Radsatzlager links-Schlupfwellen-lateral KW	88
Abbildung 82: 2023 – BDeh 2052 - Radsatzlager rechts-Schlupfwellen-lateral KW.....	88
Abbildung 83: BDeh 2052 Mikrofon rechts Kurvenkreischen 2022-2023	89
Abbildung 84: BDeh 2052 Mikrofon links Kurvenkreischen 2022-2023.....	90
Abbildung 85: ABDeh 2026 Mikrofon rechts Kurvenkreischen Veränderung 2022-2023	90
Abbildung 86: ABDeh 2026 Mikrofon rechts Kurvenkreischen Veränderung 2022-2023	91
Abbildung 87: RFID-Tag und Messpositionen (links) und Überblick über die Kurve Biel (rechts)	93
Abbildung 88: Tragbares Tribometer von Rivelin Rail	93
Abbildung 89: Box-Plot zu beispielhaften Ergebnissen des trockenen (dry) und nassen (wet) Schienenkopfes (Grossbritannien, Herbst), gemessen mit dem tragbaren Tribometer von Rivelin Rai	94
Abbildung 90: “Push”-Tribometer von Salient Systems	94
Abbildung 91: Calipri-Schienenmessgerät.....	95
Abbildung 92: 3D-Handscanner: a) Artec LEO 3D-Scanner b) gescannter Gleisbereich	96
Abbildung 93: Forensic Sil, Foto: Loci Forensics B.V. (links), Abdruckmasse auf einer Schiene (rechts)	96
Abbildung 94: Probenahme eines Ölfilms mit einem Filz (links) oder eines Abtupfers und eines Rahmens zur Herstellung einer definierten Fläche (rechts).....	97
Abbildung 95: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C der inneren Schiene während der aktiven Konditionierung	97
Abbildung 96: Übersicht über die innere und äussere Schiene an den Messpositionen A, B and C ...	99
Abbildung 97: Schienenflanke mit einer möglichen Mischung aus SKK und SKS (links), Rückstände von SKK und/oder SKS im Schotterbett (Mitte) und auf der Schwelle (rechts).	99
Abbildung 98: Überblick über die Abdrücke der Messpositionen A, B and C (linke Spalte), Abbildung der Topografie (mittlere Spalte) und die zugehörige Detailmessung für Parameter der Oberflächenrauigkeit (rechte Spalte).....	100
Abbildung 99: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C vor der Konditionierung der inneren und äusseren Schiene	102
Abbildung 100: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C der inneren Schiene während der aktiven Konditionierung	103
Abbildung 101: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C nach der 9. Durchfahrt während der Konditionierung der inneren und äusseren Schiene	103
Abbildung 102: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C der inneren Schiene nach Deaktivierung der Konditionierung	104
Abbildung 103: Qualitative Ergebnisse der Abtupfer an den Messpositionen A, B und C nach der 8. Durchfahrt ohne Konditionierung der inneren und äusseren Schiene	105
Abbildung 104: Reibungsmessungen (Coefficient of Traction, CoT) an der Messposition A	106
Abbildung 105: Reibungsmessungen (Coefficient of Traction, CoT) an der Messposition B	107

Abbildung 106: Reibungsmessungen (Coefficient of Traction, CoT) an der Messposition C.....	108
Abbildung 107: Fahrzeug 2051 in der Werkstätte (oben links) und die Düse des On-Board-Systems zur SKK-Aufbringung (oben rechts). SKK-Proben (6 Sekunden Sprühdauer) gesammelt in Kunststoff-Behältern (unten) für die weitere Analyse bei AC ² T.....	109
Abbildung 108: Grafik zur Rentabilität SKK auf der Strecke Täsch - Zermatt	113
Abbildung 109: Grafik zur Rentabilität auf dem gesamten Netz der MGBahn.....	114

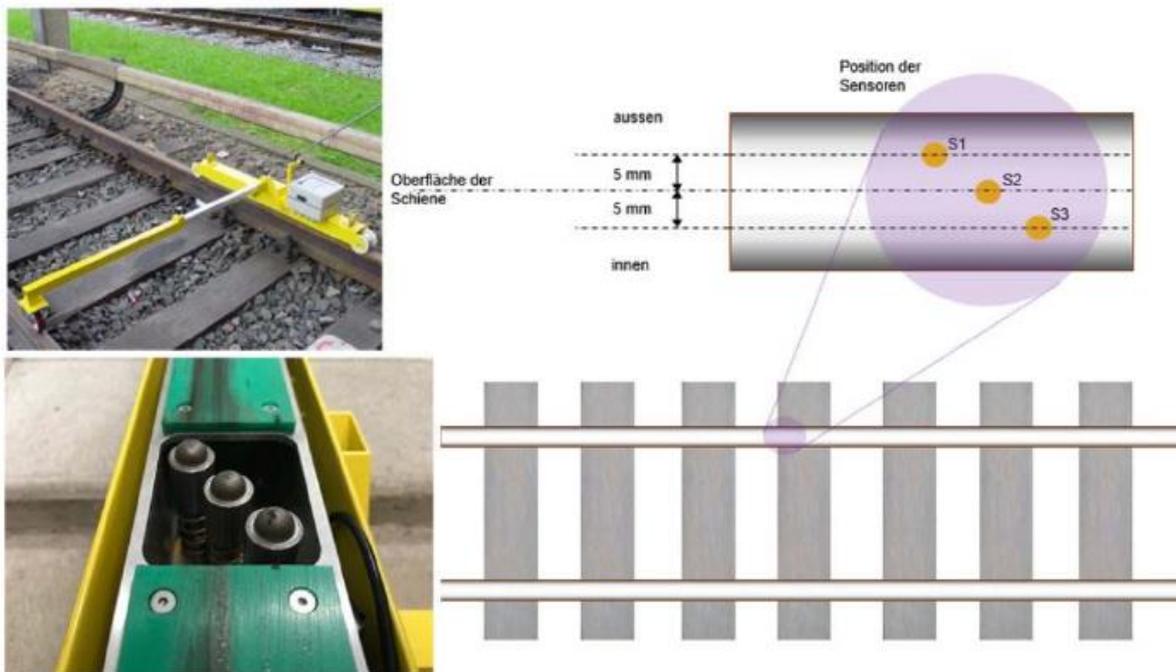
11.3 Tabellen

Tabelle 1: Übersicht Ausrüstung bzw. Materialien der Fahrzeuge.....	14
Tabelle 2: Terminplan Messungen an Rad und Schiene	15
Tabelle 3: Umfang und Auswertung der Messungen	16
Tabelle 4: Anzahl der Flachstellen an den Komet-Fahrzeugen (2011 – 2014) im Jahr 2022, 2023 und speziell den Monaten Oktober/November 2023	25
Tabelle 5: Anzahl der Flachstellen an den Komet-Fahrzeugen (2021 – 2028) im Jahr 2022, 2023 und speziell den Monaten Oktober/November 2023	25
Tabelle 6: Anzahl der Flachstellen an den Shuttle Fahrzeugen (2051 – 2054) im Jahr 2022, 2023 und speziell den Monaten Oktober/November 2023	26
Tabelle 7: Anzahl der Flachstellen an den Gelenksteuerwagen (2131 - 2134) im Jahr 2022, 2023 und speziell den Monaten Oktober/November 2023	26
Tabelle 8: Zusammenstellung der Reprofilierungen	30
Tabelle 9: Fotodokumentation der Shuttle Triebräder nach längerer Laufleistung	34
Tabelle 10, Ausgewählte Bögen für Schienenrauheitsmessungen	36
Tabelle 11 : Zeitpunkte der Schienenrauheitsmessungen im Jahr 2023.....	36
Tabelle 12: Zeitpunkte der Schienenrauheitsmessung vor 2023	36
Tabelle 13: Dominante Wellenlängen in den betrachteten Bögen	40
Tabelle 14: Grenzen des betrachteten Frequenzbereichs	41
Tabelle 15: Überblick über den Zugsverkehr, Perioden der SKK-Aufbringung und Wetterdaten am 19.10.2023.....	101
Tabelle 16: Zusammenfassung der gravimetrischen Messungen von SKK-Proben des On-Board-Systems des Fahrzeuges 2051 nach 6 Sekunden Sprühdauer	110
Tabelle 17: Umfang Analyse Gesamtwirtschaftlichkeit	111
Tabelle 18: Getroffene Annahmen Analyse Gesamtwirtschaftlichkeit.....	112

12.2 Umfang Auswertungen und Zuständigkeit

Tätigkeit	Umfang der Auswertung	Zuständigkeit
<i>Räder</i>		
UFD / Calipri Messungen alle zwei Monate (MGB)	Messungen durchführen, Überwachung Laufleistung km/mm Auswertung der Profile	MGB (Werkstatt, Odilo Ruppen) Roland Müller
UFD / Calipri Messungen jeden Monat (MGB)	Messungen durchführen, Überwachung Laufleistung km/mm Auswertung der Profile	MGB (Werkstatt, Odilo Ruppen) Roland Müller
Erfassung Rundheitsabweichungen der Räder (Messstelle im Gleis Nähe Täsch) kontinuierlich	Überwachung der Flachstellen und der Polygone an den Fahrzeugen der Betriebserprobung und des Regelverkehrs	Müller-BBM
<i>Schiene</i>		
Tribometermessungen monatlich (MGB)	Erfassung Reibwerte, Überwachung Entwicklung der Reibwerte	MGB (Infrastruktur, Aaron Seeberger)
Tribometermessungen wöchentlich (MGB)	Erfassung Reibwerte, Überwachung Entwicklung der Reibwerte	MGB (Infrastruktur, Aaron Seeberger)
Schienenrauigkeit (KPZ)	Erfassung Schlupfwellenbildung, Bericht zu erfassten Messungen (Vergleich zu vorher / Entwicklung)	KPZ
Schienenverschleiss: Schienenprofilmessungen (MGB)	Erfassung Profile mittels Calipri Auswertung der Profile	MGB (Aaron Seeberger) Roland Müller
Sersa Messwagen (Sersa)	Gemäss Sersa Messwagen Auswertung bzw. Vergleich mit restlichen Messungen	Sersa Roland Müller
Technode	Weiterbetrieb Technode Messsystem wie bisher	This Wiederkehr

12.3 Rauheit der Schiene - Messgerät APT RSA – Rail Surface Analyser



Anwendungen

- Quantifizierung der Schienenrauheit und Schlupfwellen
- Beurteilung der Schienenschleifqualität
- Als Grundlage für Lärmessungen und -prognosen

Messmöglichkeiten

- Misst die vertikale Schienenkopfvariation relativ zu einer gleitenden Referenz mit einer Länge von 1 m als Funktion der Distanz
- Messung gemäss ISO 3095: 2005 (E)
- Unlimitierte Messlänge
- Leichte und handliche Führung auf dem Gleis

Messaufnehmer

- Dynamischer Messbereich : $\pm 5000 \mu\text{m}$
- Aufnehmertyp: Wegsensor (LVDT)
- Anzahl Aufnehmer: 3 (unabhängig positioniert auf dem Schienenkopf)
- Grundrauschen Sensor: $0.1 \mu\text{m}$
- Geber für Positionsbestimmung 128 Pulse pro Umdrehung

Datenaufnahme

- Aufnahmegerät: 4-kanalig simultan– 16 bit A/D Converter
- Resampling post-processing bei 1000 samples pro Meter
- Speicherkapazität: 1 Gigabyte memory
- 6 Stunden Messung
- Download Daten auf Laptop: USB-1

Data Processing

- Flexible Software für Daten Output in verschiedener Form
- Rauheitsspektren in: 1/3 Oktavband, Schmalband, PSD
- Farbkarten
- RMS level versus Distanz

Die Schienenrauheitsmessungen fanden zu folgenden Zeitpunkten statt:

Datum	Beschreibung	Bemerkung
T1		
T2		
T3		
T4		
T5		
T6		

12.4 Tribometer Messungen

12.4.1 Kalter Boden Gleis 2 (Radius 100 m) vor Relaisraum Streckenkilometer 41.080

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
02.03.23	08.00	Schön	-2	links	0.40	0.37	0.37	0.38
				rechts	0.32	0.33	0.34	0.33
20.03.23	13.30	Schön	9	links	0.36	0.36	0.36	0.36
				rechts	0.39	0.33	0.31	0.34
27.04.23	13.15	Bewölkt	14	links	0.28	0.28	0.30	0.29
				rechts	0.30	0.33	0.31	0.32
03.07.23	14.30	Schön	21	links	0.23	0.26	0.25	0.25
				rechts	0.34	0.37	0.36	0.36
18.08.2023	13.30	Schön	26	links	0.24	0.28	0.27	0.26
				rechts	0.32	0.34	0.32	0.33
25.08.2023	6.15	Schön	17	links	0.29	0.35	0.36	0.33
				rechts	0.34	0.36	0.39	0.36
29.08.2023	13.30	Bewölkt	9	links	0.46	0.49	0.48	0.48
				rechts	0.42	0.45	0.51	0.46
09.10.2023	14.00	Schön	19.5	links	0.22	0.31	0.31	0.28
				rechts	0.27	0.25	0.29	0.27
15.11.2023	13.35	Schön	8	links	0.31	0.33	0.34	0.33
				rechts	0.39	0.39	0.37	0.38
25.01.2024	15.00	Schön	8	links	0.28	0.30	0.26	0.28
				rechts	0.34	0.36	0.38	0.36

12.4.2 Biel Kurve (110m) Streckenkilometer 42.050

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
02.03.23	08.20	Schön	-2	links	0.47	0.46	0.54	0.49
				rechts	0.43	0.43	0.54	0.47
20.03.23	14.10	Schön	9	links	0.46	0.47	0.47	0.47
				rechts	0.29	0.30	0.27	0.29
27.04.23	14.00	Bewölkt	14	links	0.29	0.29	0.28	0.29
				rechts	0.29	0.30	0.29	0.29
03.07.23	13.30	Schön	21	links	0.24	0.26	0.28	0.26
				rechts	0.34	0.31	0.32	0.32
18.08.2023	13.50	Schön	26	links	0.24	0.27	0.26	0.26
				rechts	0.27	0.25	0.25	0.26
25.08.2023	6.40	Schön	17	links	0.62	0.58	0.53	0.57
				rechts	0.55	0.51	0.47	0.51
29.08.2023	14.30	Bewölkt	8	links	0.45	0.53	0.54	0.50
				rechts	0.49	0.52	0.56	0.52
09.10.2023	14.35	Schön	20	links	0.36	0.40	0.37	0.38
				rechts	0.34	0.31	0.41	0.35
15.11.2023	13.45	Schön	8	links	0.43	0.48	0.51	0.47
				rechts	0.42	0.32	0.35	0.36
25.01.2024	14.20	Schön	8	links	0.27	0.29	0.30	0.29
				rechts	0.32	0.34	0.35	0.34

12.4.3 Biel Gerade Streckenkilometer 42.100

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
02.03.23	08.45	Schön	-2	links	0.34	0.35	0.37	0.35
				rechts	0.38	0.37	0.37	0.37
20.03.23	13.50	Schön	9	links	0.24	0.28	0.25	0.27
				rechts	0.26	0.27	0.29	0.27
27.04.23	13.40	Bewölkt	14	links	0.23	0.24	0.24	0.24
				rechts	0.24	0.26	0.26	0.25
03.07.23	14.00	Schön	21	links	0.20	0.19	0.22	0.20
				rechts	0.23	0.21	0.20	0.21
18.08.2023	14.15	Schön	26	links	0.21	0.21	0.25	0.22
				rechts	0.23	0.24	0.24	0.24
25.08.2023	7.00	Schön	17	links	0.25	0.24	0.26	0.25
				rechts	0.35	0.34	0.32	0.34
29.08.2023	14.15	Bewölkt	8	links	0.21	0.22	0.23	0.22
				rechts	0.35	0.40	0.32	0.36
09.10.2023	14.50	Schön	20	links	0.26	0.25	0.24	0.25
				rechts	0.24	0.24	0.25	0.24
15.11.2023	14.15	Schön	8	links	0.23	0.24	0.23	0.23
				rechts	0.26	0.26	0.26	0.26
25.01.2024	14.00	Schön		links	0.25	0.24	0.27	0.25
				rechts	0.25	0.29	0.27	0.27

12.4.4 Lügelwang enge Kurve (95m) Streckenkilometer 42.550

Datum	Zeit	Wetter	Temp °C	Schiene	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Mittelwert
02.03.23	09.00	Schön	-2	links	0.24	0.24	0.22	0.23
				rechts	0.30	0.31	0.26	0.29
20.03.23	14.30	Schön	9	links	0.21	0.28	0.28	0.26
				rechts	0.22	0.20	0.21	0.21
27.04.23	13.00	Bewölkt	14	links	0.26	0.26	0.27	0.26
				rechts	0.25	0.29	0.29	0.28
03.07.23	13.30	Schön	21	links	0.17	0.18	0.19	0.18
				rechts	0.21	0.22	0.24	0.22
18.08.2023	14.30	Schön	26	links	0.23	0.20	0.21	0.21
				rechts	0.22	0.21	0.22	0.22
25.08.2023	7.00	Schön	17	links	0.32	0.30	0.37	0.33
				rechts	0.35	0.34	0.33	0.34
29.08.2023	14.00	Bewölkt	9	links	0.23	0.19	0.18	0.20
				rechts	0.37	0.40	0.35	0.37
09.10.2023	13.50	Schön	19	links	0.18	0.27	0.23	0.23
				rechts	0.24	0.22	0.21	0.22
15.11.2023	14.30	Schön	9	links	0.25	0.25	0.25	0.25
				rechts	0.25	0.25	0.24	0.25
25.01.2024	13.45	Schön	8	links	0.24	0.25	0.25	0.25
				rechts	0.24	0.23	0.21	0.23

12.5 Gesamtwirtschaftlichkeit – Annahmen

SKK	Szenario mit SKK	Szenario ohne SKK
Lebensdauer	40 ans	
Installation 1. Fahrzeug	34'760 CHF/Fz	
Installation weitere Fahrzeuge	28'856 CHF/Fz	
Wartungs- und Betriebskosten pro Jahr	1'375CHF/Fz/Jahr	
Rollmaterial		
	27'040	27'040
Radreifenwechsel pro Drehgestell	CHF/Drehgestell	CHF/Drehgestell
Kilometerleistung pro mm Radverschleiss	10'750 km/mm	3'500 km/mm
Kilometerleistung pro Jahr	80'000 km	80'000 km
Infrastruktur		
Lebensdauer Schiene	16 Jahre	9 Jahre
Kosten Schiene	600 CHF/m	600 CHF/m
Lebensdauer Fahrbahn	63 Jahre	45 Jahre
Kosten Fahrbahn (Oberbau)	2'000 CHF/m	2'000 CHF/m
Kosten Schienenschleifen	6 CHF/m	6 CHF/m
Schleifintervall	2 Jahre	6 Monate

12.5.1 Investition

Rollmaterial

- Lebensdauer: 40 Jahren- mit 50% Reinvestition nach 20 Jahren
- Material, inkl. Halterungen, Montageplatten etc.
 - Bestellungen: 17'300 CHF pro Fahrzeug (Anlage, Halterungen, RFID Tags, Platte (Boden) + ca. 2'000 CHF Eigenmaterial (Halterungen, Klemmleisten, Schrauben) → 20'000 CHF / Fahrzeug
- Installation, erstes Fahrzeug:
 - 41 Std. * 4 Pers. * 90 CHF = 14'760 CHF Personenaufwand
- Installation, weitere Fahrzeuge:
 - 4 Pers. * 24.6 Std. * 90 CHF = 8'856 CHF Personalaufwand / Fahrzeug
- Engineering (Schätzung 4 Tage für Bestellungen, Schemaanpassungen usw.):
 - 32.8 Std. * 130 CHF = 4'264 CHF (*One shot*)

Infrastruktur

- Schienen
 - Fr. 600.- pro Laufmeter Schiene,
 - Lebensdauer ohne SKK: 9 Jahre, mit SKK: 16 Jahre
- Gleis
 - Fr. 2000.- pro Laufmeter Gleis inkl. Schiene

- Lebensdauer ohne SKK: 45 Jahre, mit SKK: 63 Jahre

Wartungs- und Betriebskosten

Rollmaterial

- Materialkosten
 - (SKK-Mittel) = ca. 3'500 CHF / Jahr
- Personalkosten
 - ca. 1 Std. pro Monate (P1), -> $12 * 90 = 1'080$ CHF
 - $2 * 4$ Std. pro Jahr (P3) -> $8 * 90 = 720$
 - ca. 2'000 CHF Personalkosten
- 5'500 CHF / Jahr

Infrastruktur

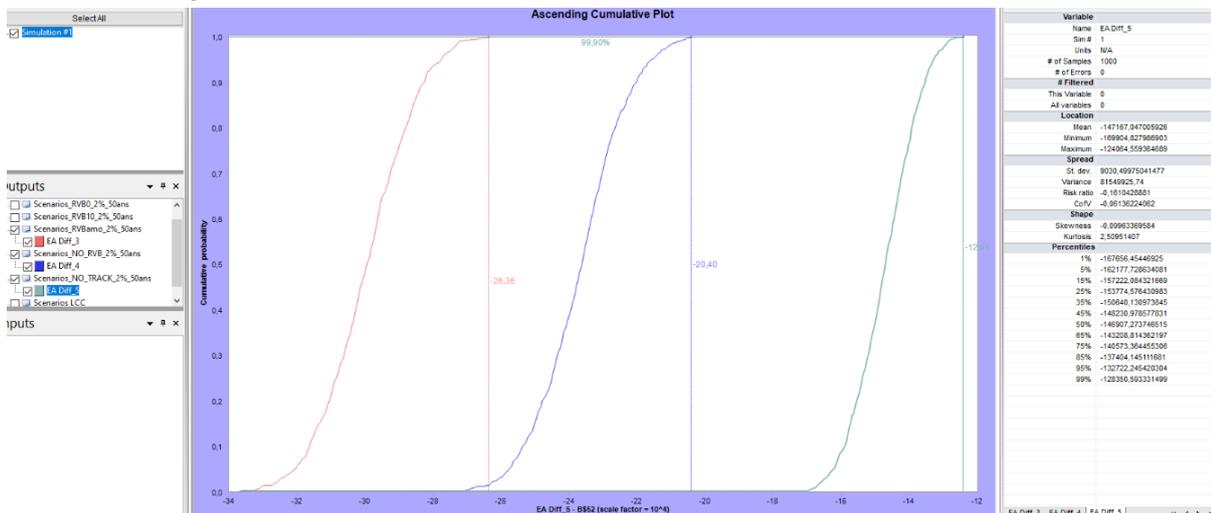
- Ohne SKK
 - Schleifen: 6 CHF/m, Stopfen: 4 CHF/m
 - Schienenersatz: 150'000 CHF / 5000m -> in den Fr. 150'000.- sind rund 250m reiner Schienenersatz eingerechnet, da nicht die ganze Strecke enge Radien sind, werden nur die Schienen in den Kurven ausgetauscht. ($5000m / 9$ Jahre = 555m -> ca. $\frac{1}{2}$ in engen Radien -> ca. $250m * Fr. 600.- = Fr. 150'000.-$)
- Mit SKK :
 - Schleifen: 4 CHF/m, Stopfen: 4 CHF/m
 - Lebensdauer der Schiene (alle 9 Jahre), Lebensdauer des Gleises (Schotter). 16 Jahre
 - Schienenersatz: 90'000 CHF / 5000m

Betriebskosten Drehgestellwechsel / Radreifenwechsel vor / nach SKK

- DG-Wechsel:
 - $20 * 90 = 1'800$, Reinigung DG: $15 * 90 = 1'350$, Komponenten spritzen: $5 * 90 = 450$, Ein- Ausbau Achsantriebe: $30 * 90 = 2'700$, Drehkranz versetzen um 90° : $2 * 90 = 180$ -> Gesamt Stunden = 6'480 CHF
 - Externe Leistung: NB Radsatz (extern) ohne Antrieb zerlegen: $2 * 4900 = 9'800$, Transportkosten = 1'500, -> Gesamt externe Leistungen = 11'300 CHF
 - Material: Reinigung TDG = 100, Komponenten spritzen = 100, Ein- Ausbau Achsantriebe = 3'500, Bandagen = 1'980, Rissprüfung = $250 * 2 = 500$, Widerstandsmessung = $130 * 2 = 260$,
 - Tarollager revidieren = 1'400 -> Gesamt Material = 7'840 CHF
 - DG / Radreifenwechsel Gesamt: 25'620 pro Drehgestell
- Annahmen:
 - Laufleistungen vor SKK = 3'500km/mm
 - Laufleistungen während SKK = 16'000km/mm
 - Benötigte Laufleistung Fz pro Jahr = 80'000 km
 - Anzahl DG / Radreifenwechsel über ein Jahr vor SKK = ca. 8
 - Anzahl DG / Radreifenwechsel während Betriebserprobung SKK = ca. 2

- Kosten DG Wechsel pro Jahr (vor / na)
 - Jährliche Kosten vor SKK: $8 \cdot 25620 = 204'960$
 - Jährliche Kosten während Betriebserprobung SKK: $2 \cdot 25620 = 51'240$
 - Differenz ca.: $204'960 - 51'240 = \underline{153'720 \text{ CH}}$

12.5.2 Auszug Simulation



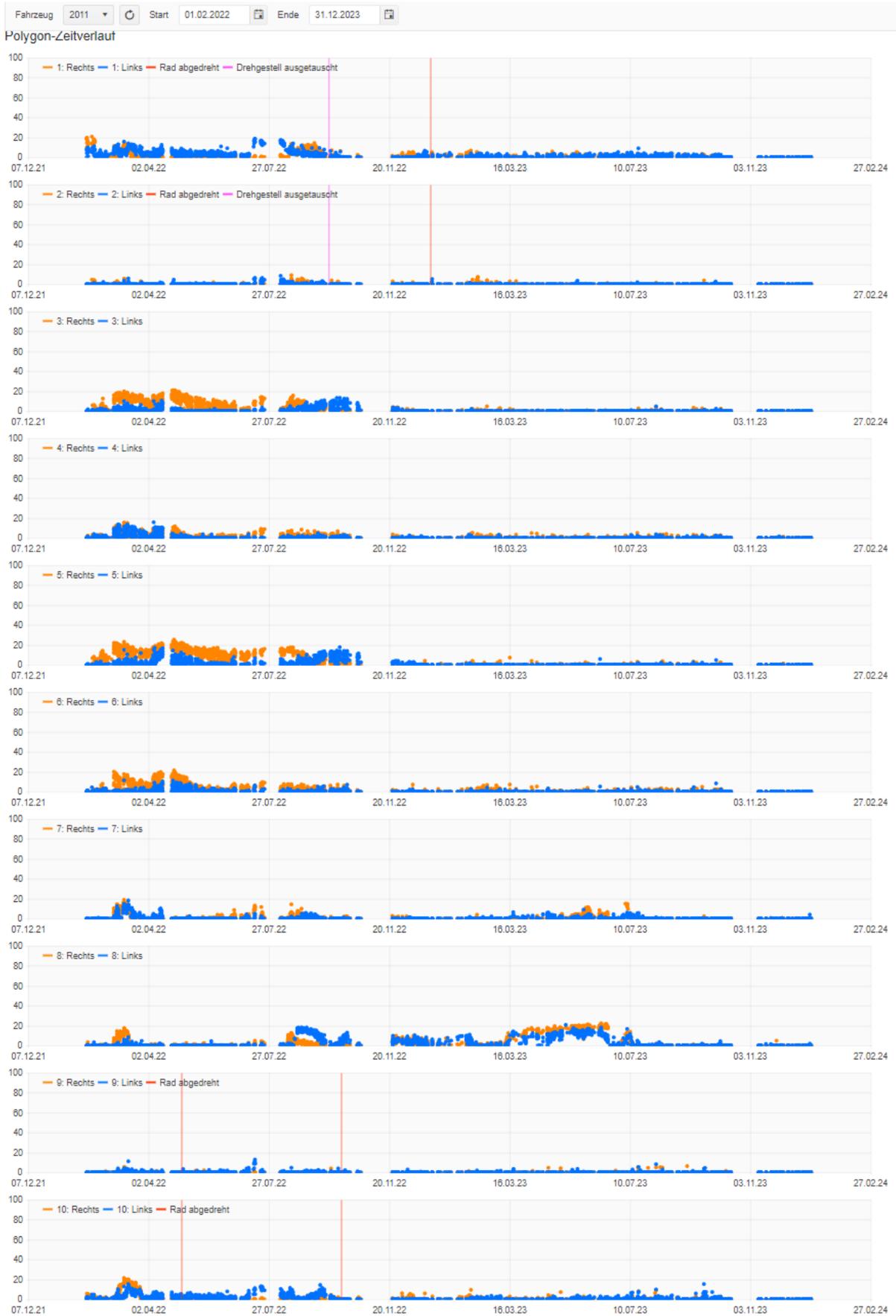
12.6 Radunrundheiten der Räder

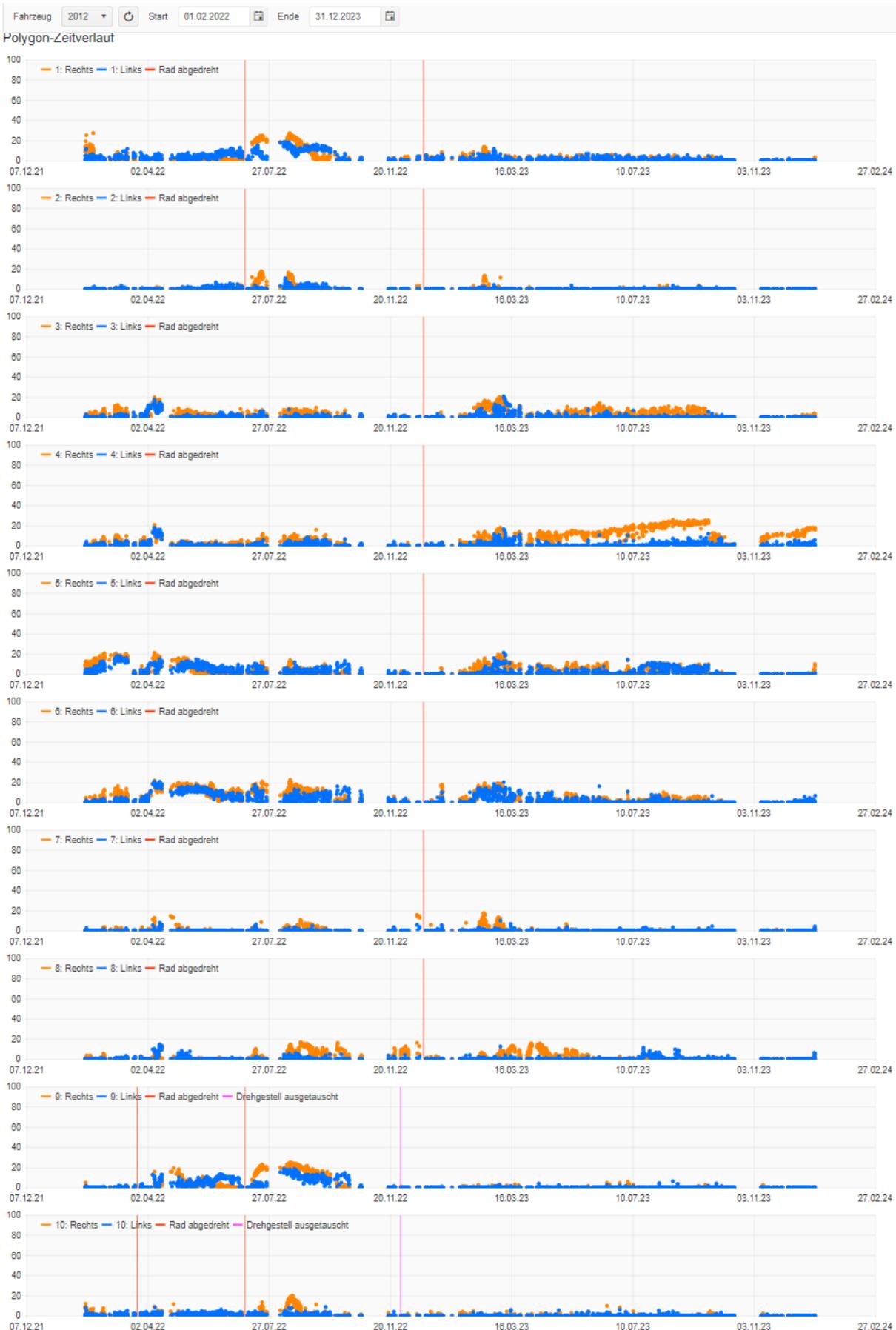
In den unten aufgeführten Tabellen sind für jedes der Fahrzeuge vom Typ Komet (3-teilig, 4-teilig), Shuttle und GSW jeweils auf den ersten Seiten die Rundheitsabweichungen des Typs Polygon und auf den zweiten Seiten die Rundheitsabweichungen des Typs Flachstelle aufgeführt. Dargestellt sind die Messwerte aller Räder pro Überfahrt auf der Messstelle vom 23.02.2022 bis Anfangs Oktober 2022.

 <p>Komet</p>	<table border="1"> <tr> <td>Bauartbezeichnung:</td> <td>ABDeh 4/10</td> <td>ABDeh 4/8</td> </tr> <tr> <td>Nummerierung:</td> <td>2011–2014</td> <td>2021–2028</td> </tr> <tr> <td>Anzahl:</td> <td>4</td> <td>8</td> </tr> <tr> <td>Baujahre:</td> <td colspan="2">2007–2008, 2014</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">Achsformel:</td> <td>4-teilig</td> <td>3-teilig</td> </tr> <tr> <td>2'Bo'zz Bo'zz</td> <td>2'Bo'zz</td> </tr> <tr> <td></td> <td>2'2'</td> <td>Bo'zz 2'</td> </tr> </table>	Bauartbezeichnung:	ABDeh 4/10	ABDeh 4/8	Nummerierung:	2011–2014	2021–2028	Anzahl:	4	8	Baujahre:	2007–2008, 2014		Achsformel:	4-teilig	3-teilig	2'Bo'zz Bo'zz	2'Bo'zz		2'2'	Bo'zz 2'
Bauartbezeichnung:	ABDeh 4/10	ABDeh 4/8																			
Nummerierung:	2011–2014	2021–2028																			
Anzahl:	4	8																			
Baujahre:	2007–2008, 2014																				
Achsformel:	4-teilig	3-teilig																			
	2'Bo'zz Bo'zz	2'Bo'zz																			
	2'2'	Bo'zz 2'																			
 <p>Shuttle</p>	<table border="1"> <tr> <td>Nummerierung:</td> <td>2051–2054</td> </tr> <tr> <td>Baujahr(e):</td> <td>2003, 2005</td> </tr> <tr> <td>Achsformel:</td> <td>2'Bo'zz Bo'zz 2'</td> </tr> </table>	Nummerierung:	2051–2054	Baujahr(e):	2003, 2005	Achsformel:	2'Bo'zz Bo'zz 2'														
Nummerierung:	2051–2054																				
Baujahr(e):	2003, 2005																				
Achsformel:	2'Bo'zz Bo'zz 2'																				
 <p>GSW</p>	<table border="1"> <tr> <td>Nummerierung:</td> <td>2131-2134</td> </tr> </table>	Nummerierung:	2131-2134																		
Nummerierung:	2131-2134																				

12.6.1 Polygone

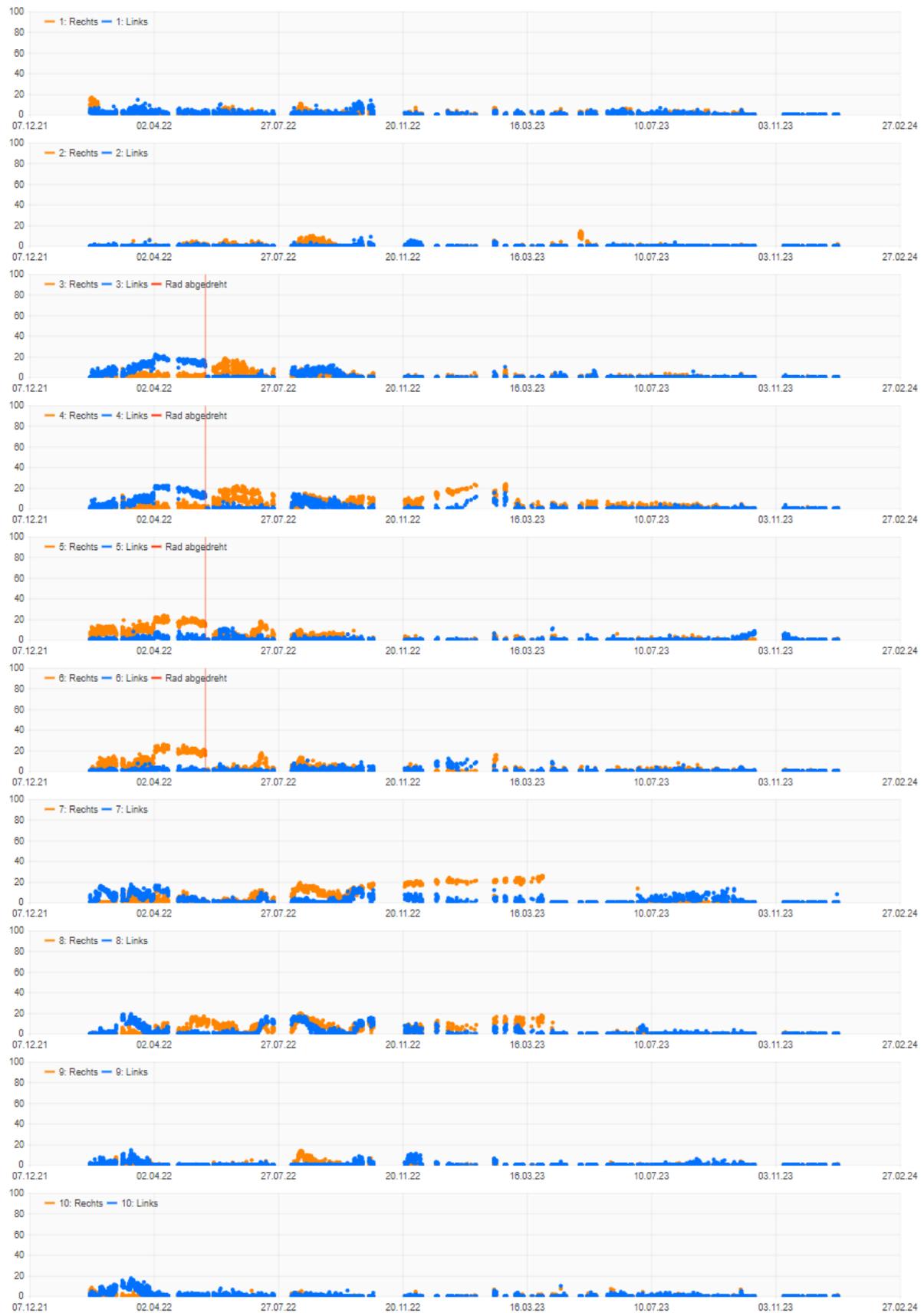
2011 - 2014 Komet3teilig

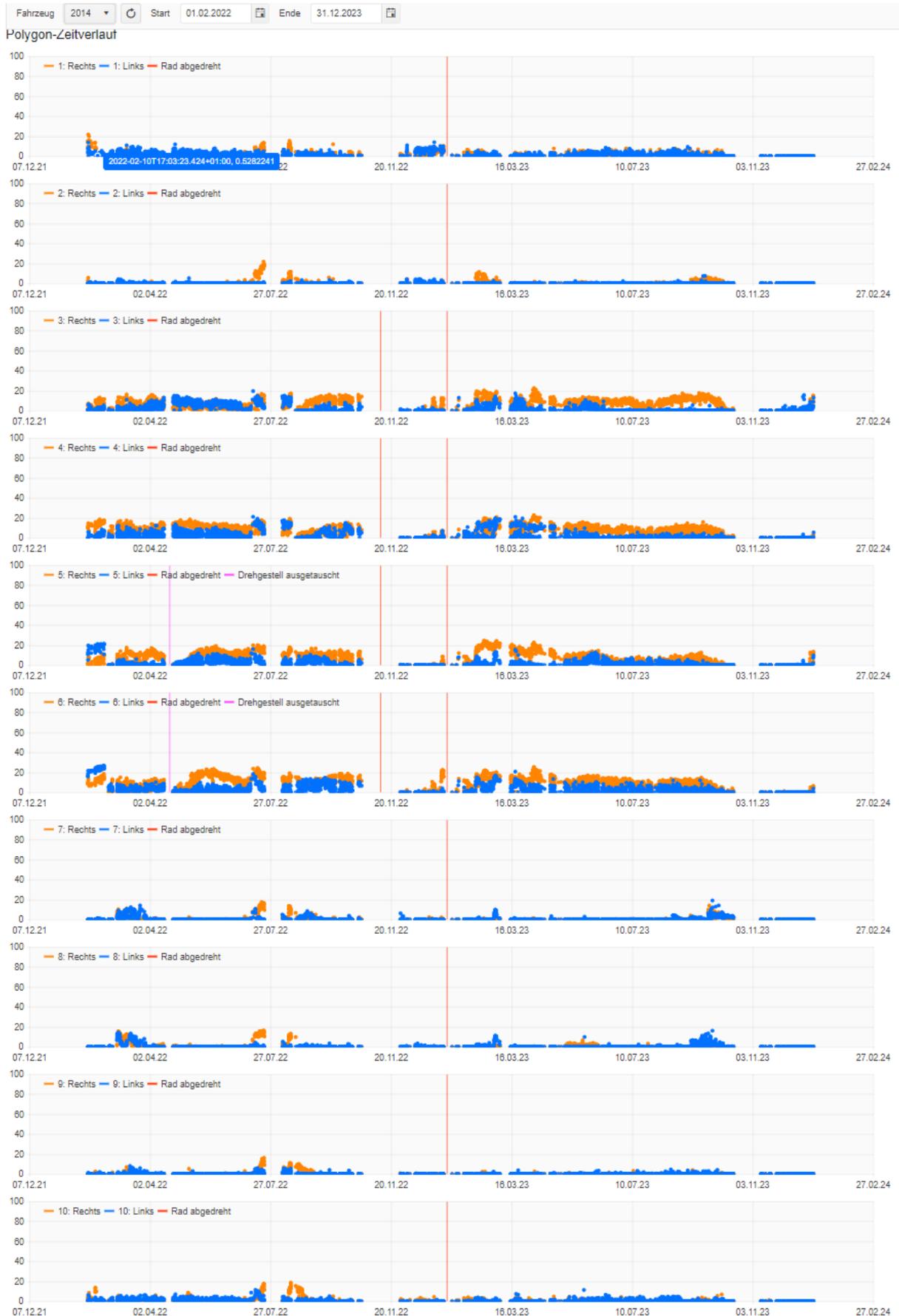




Fahrzeug 2013 Start 01.02.2022 Ende 31.12.2023

Polygon-Zeitverlauf

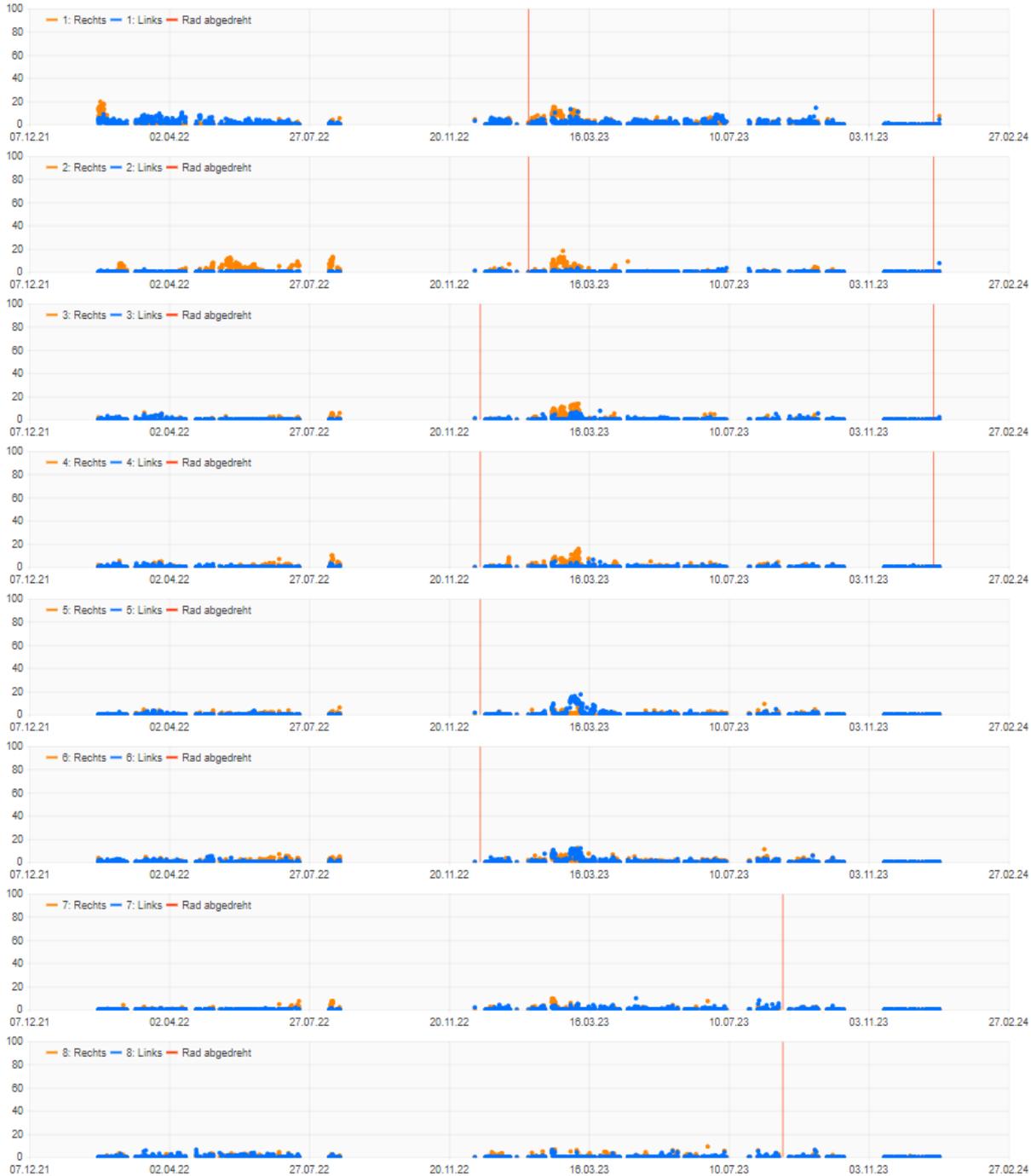


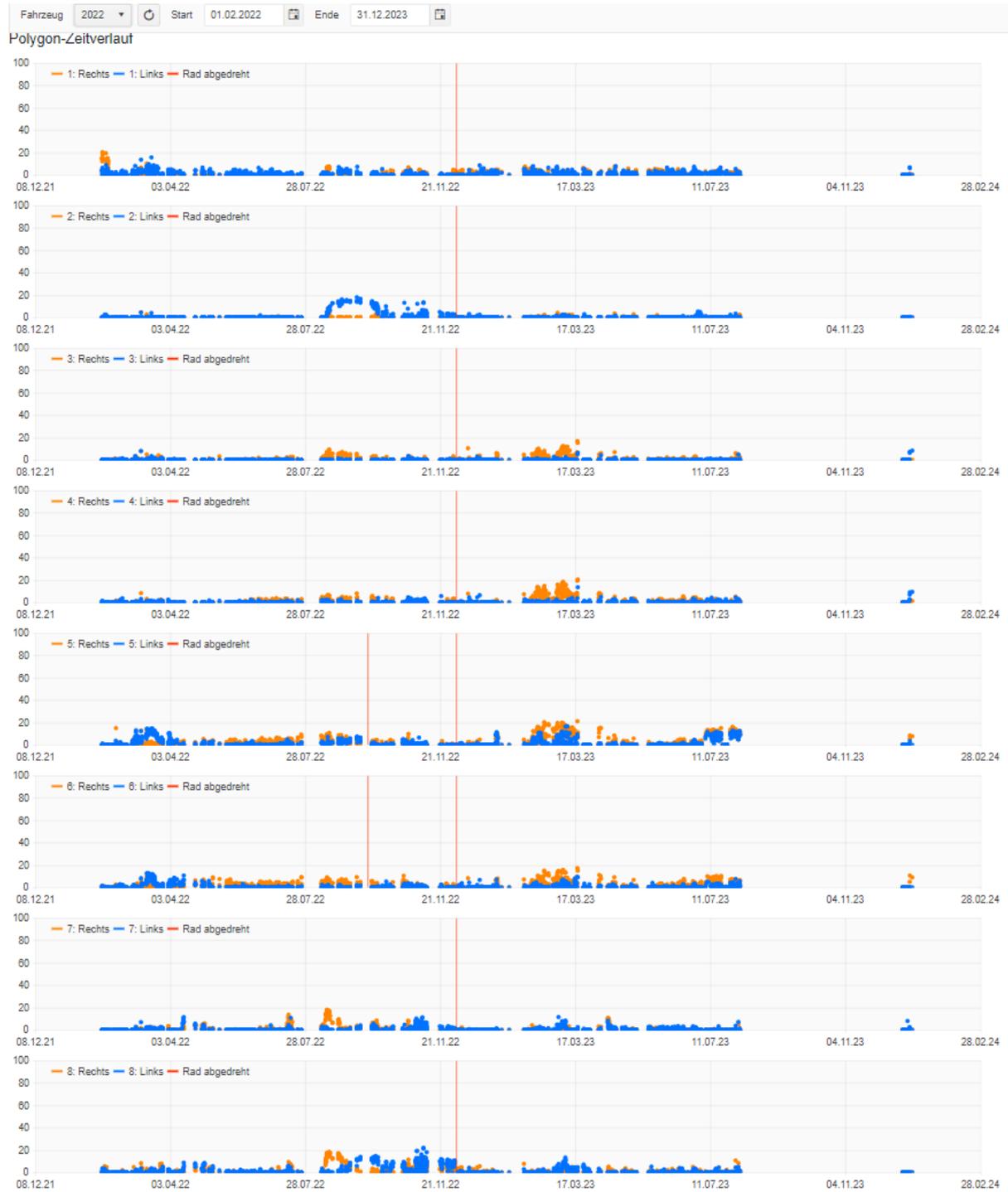


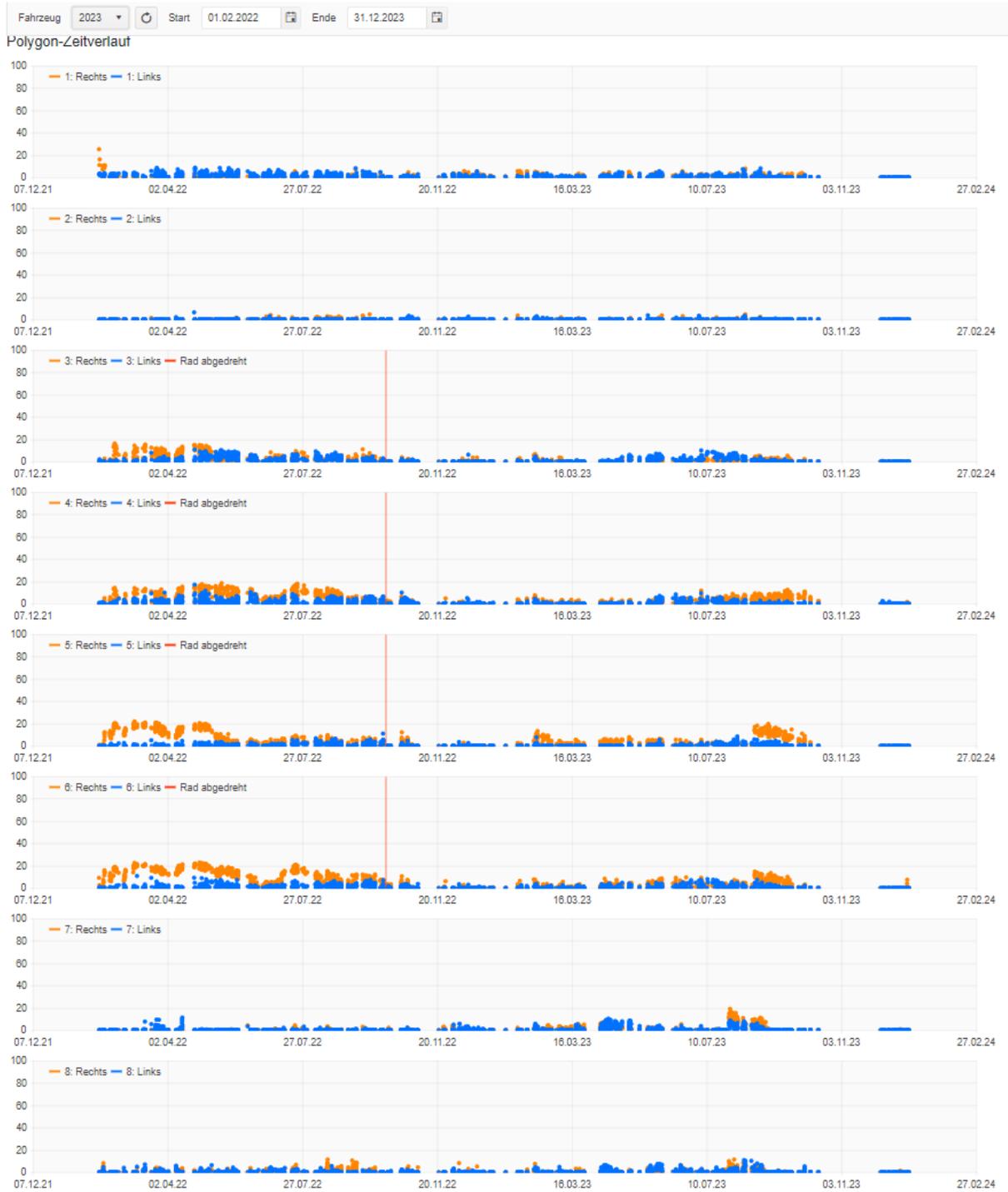
2021 - 2028 Komet3teilig

Fahrzeug 2021 Start 01.02.2022 Ende 31.12.2023

Polygon-Zeitverlauf



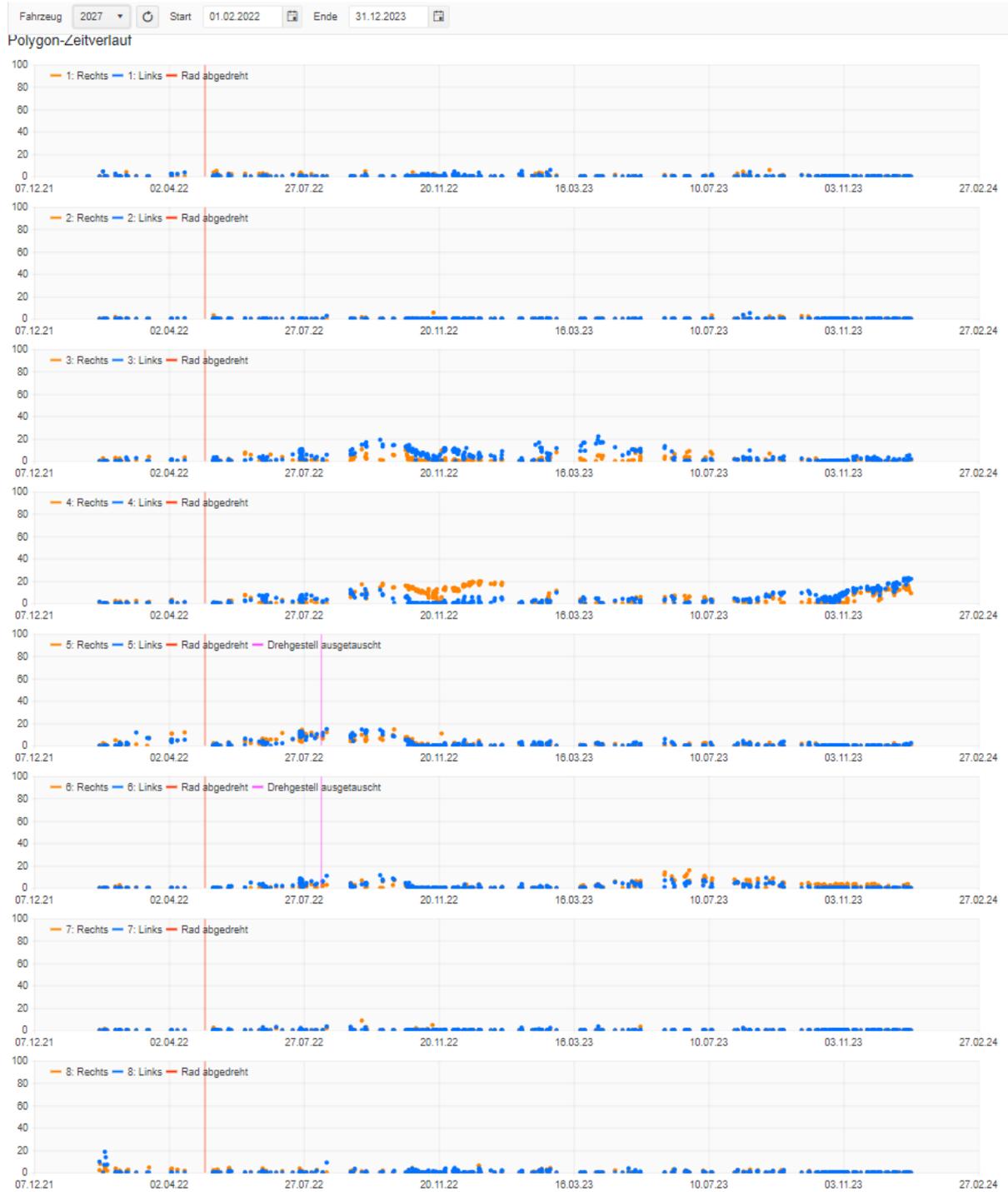








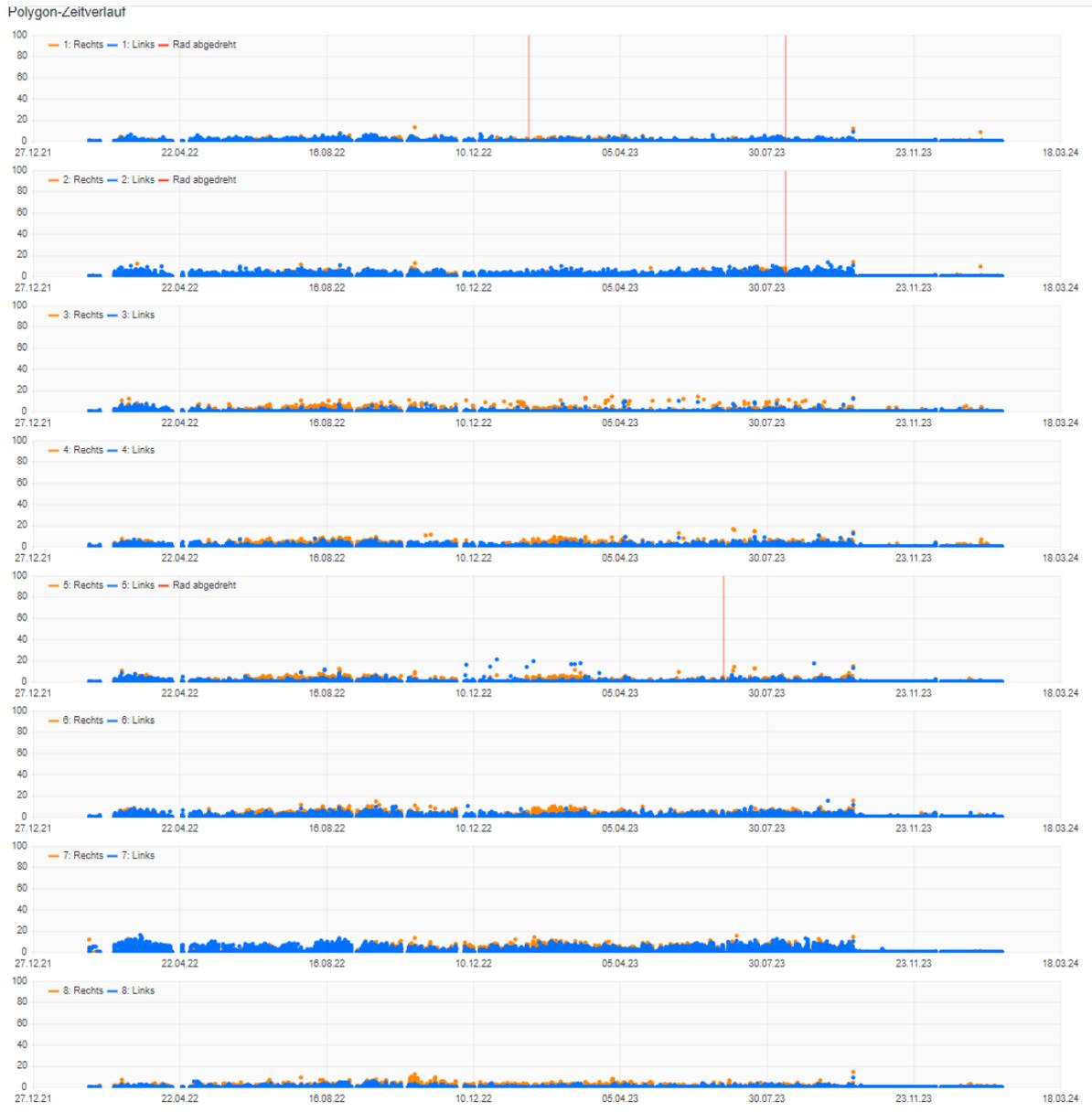


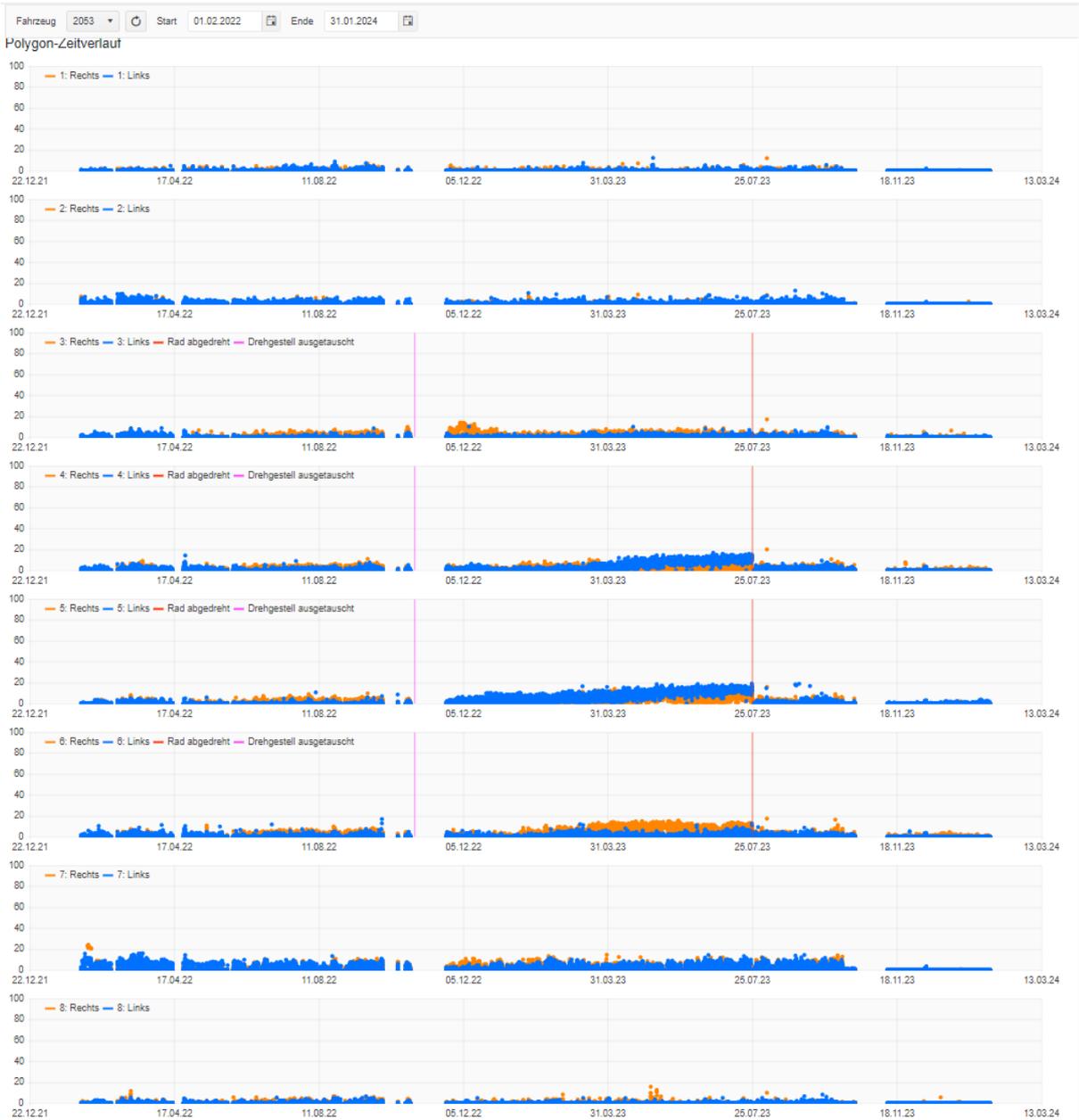


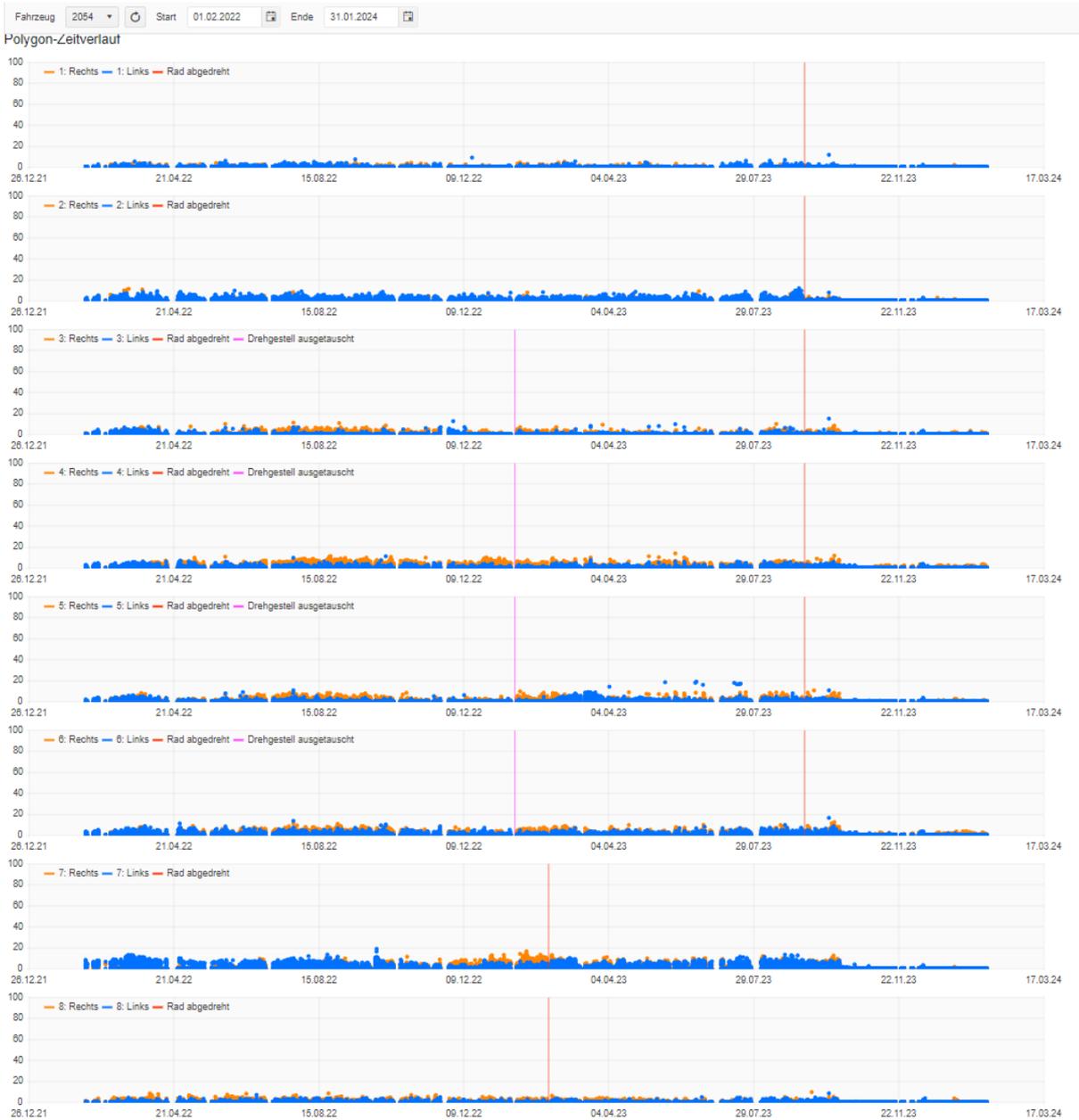


2051 - 2054 Shuttle







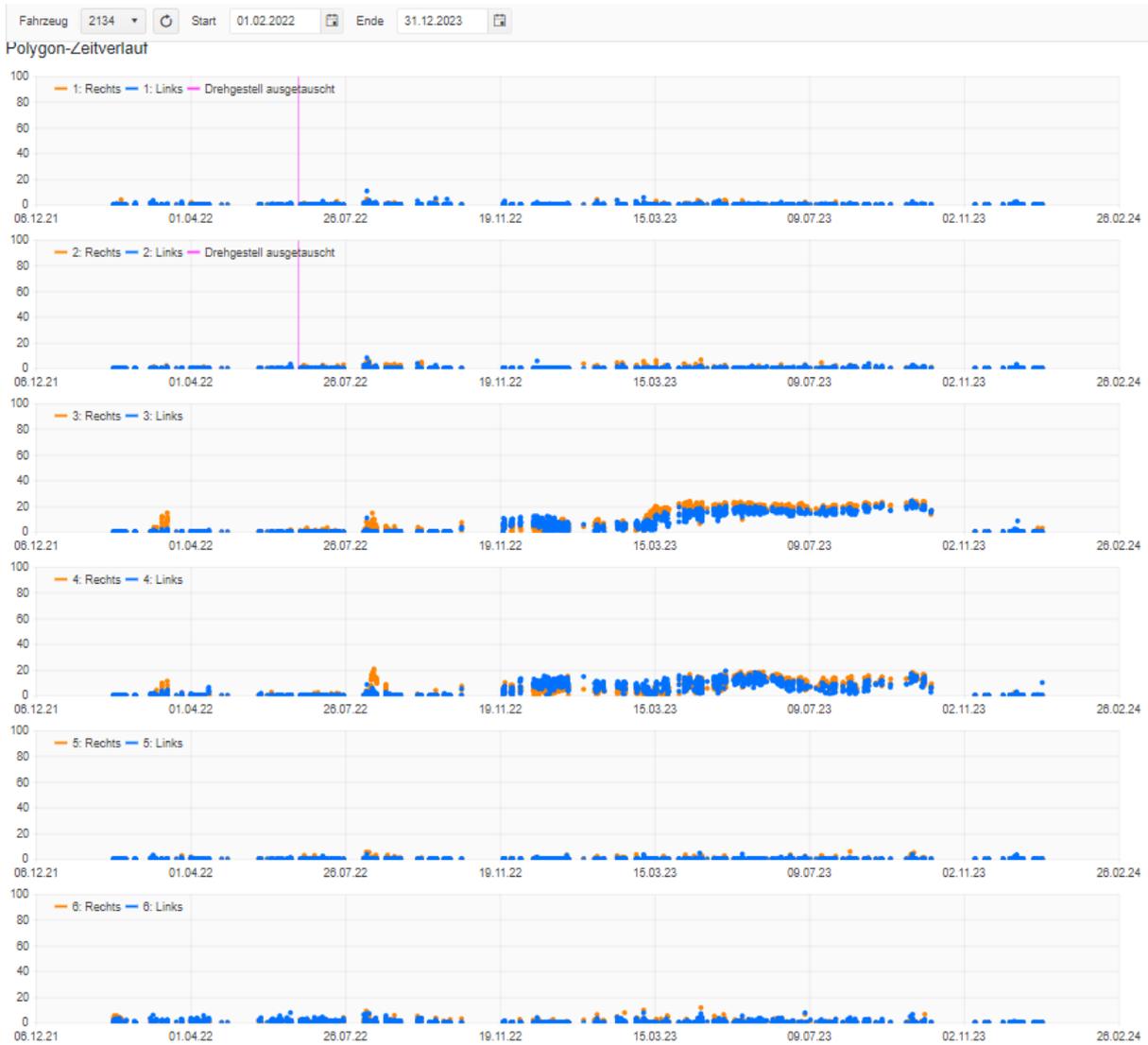


2131 - 2134 GSW



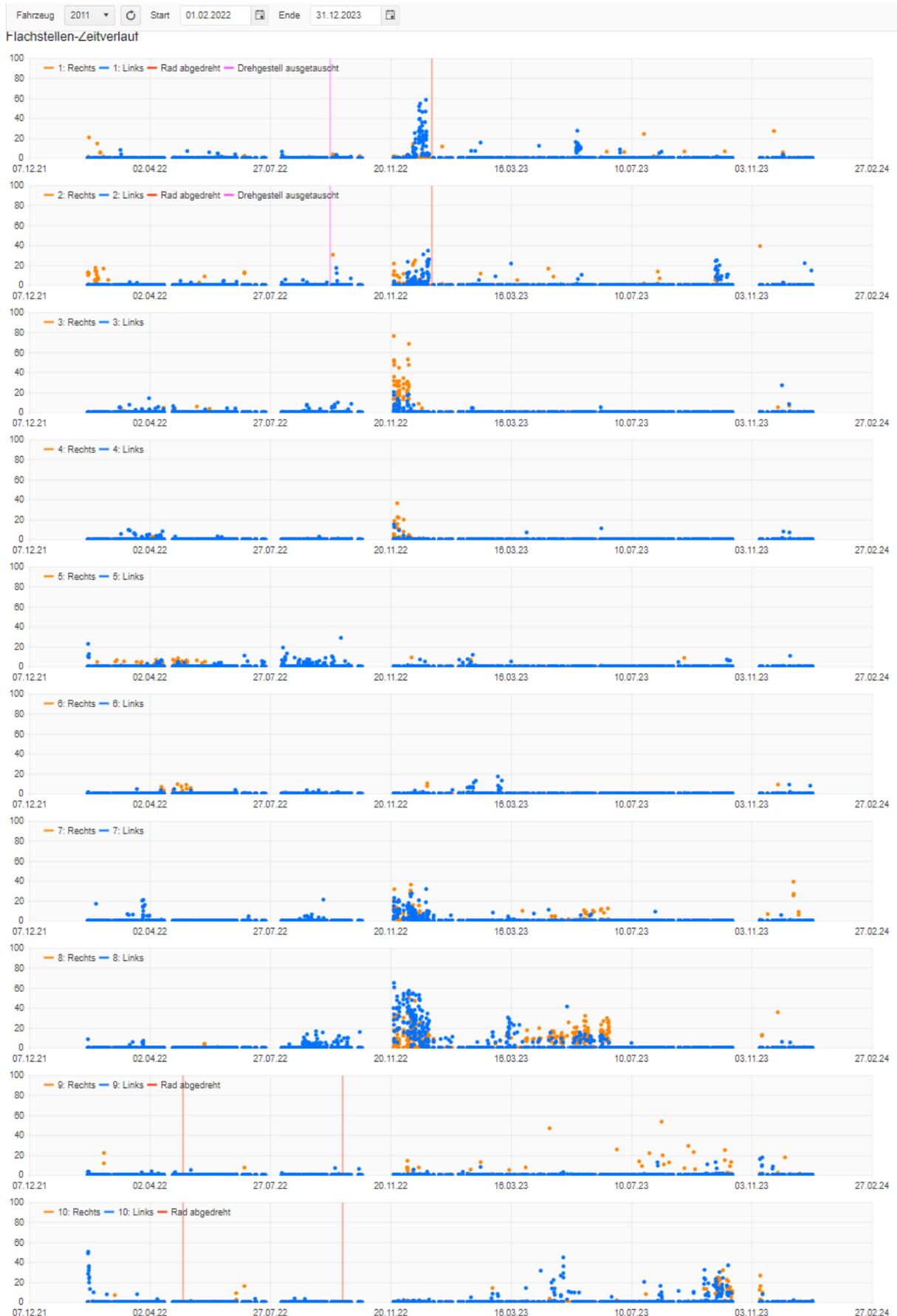


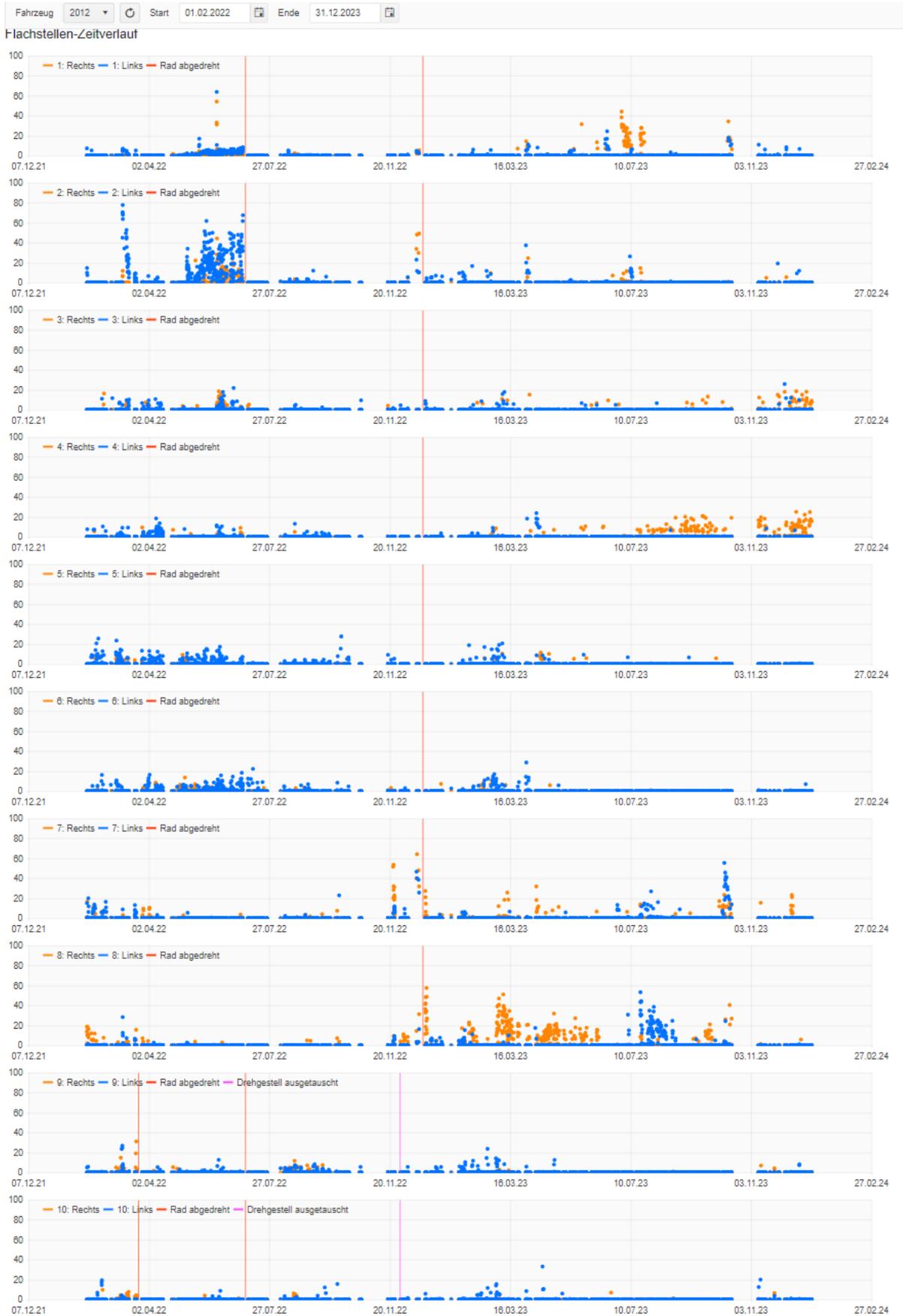


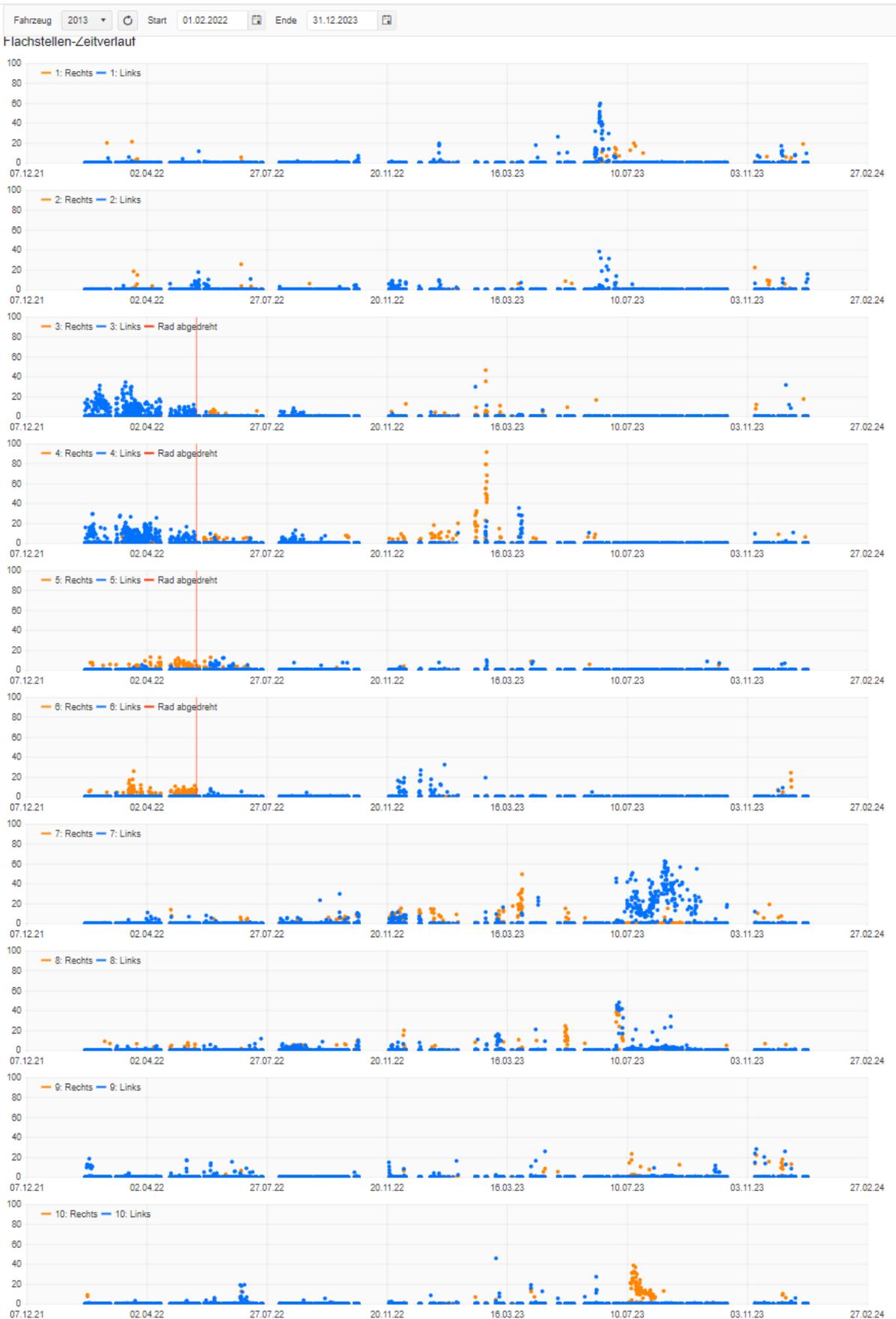


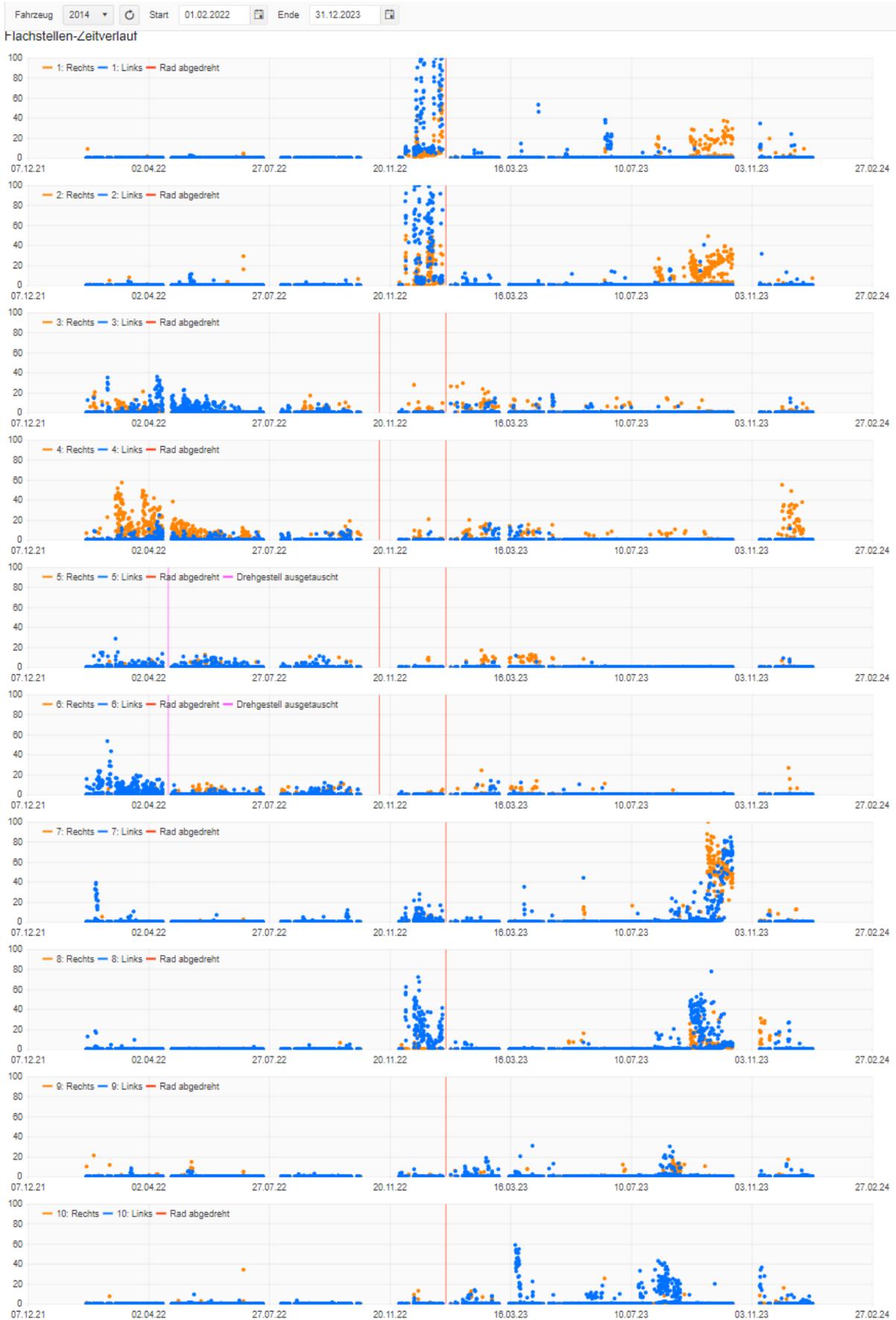
12.6.2 Flachstellen

2011 - 2014 Komet3teilig

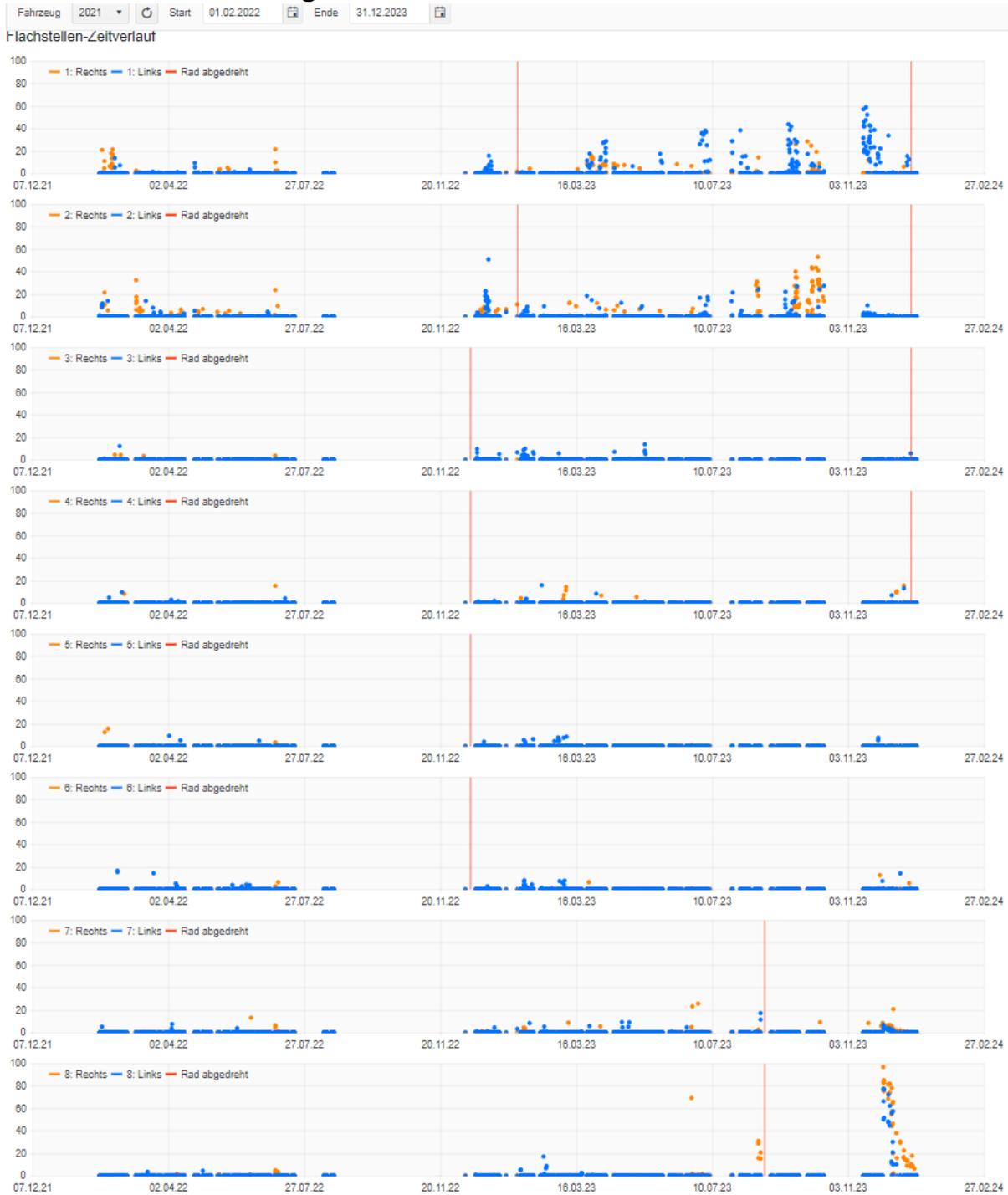


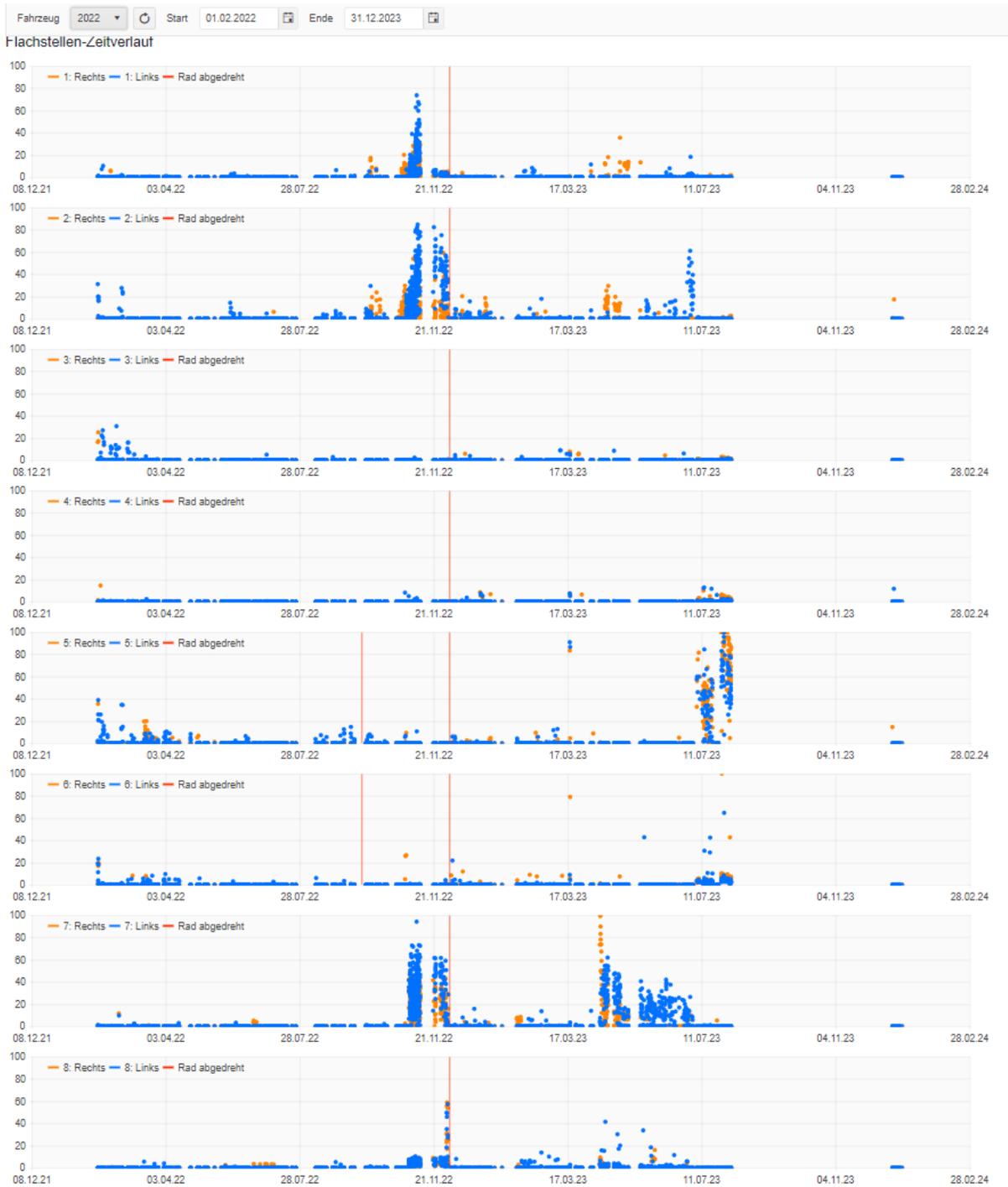


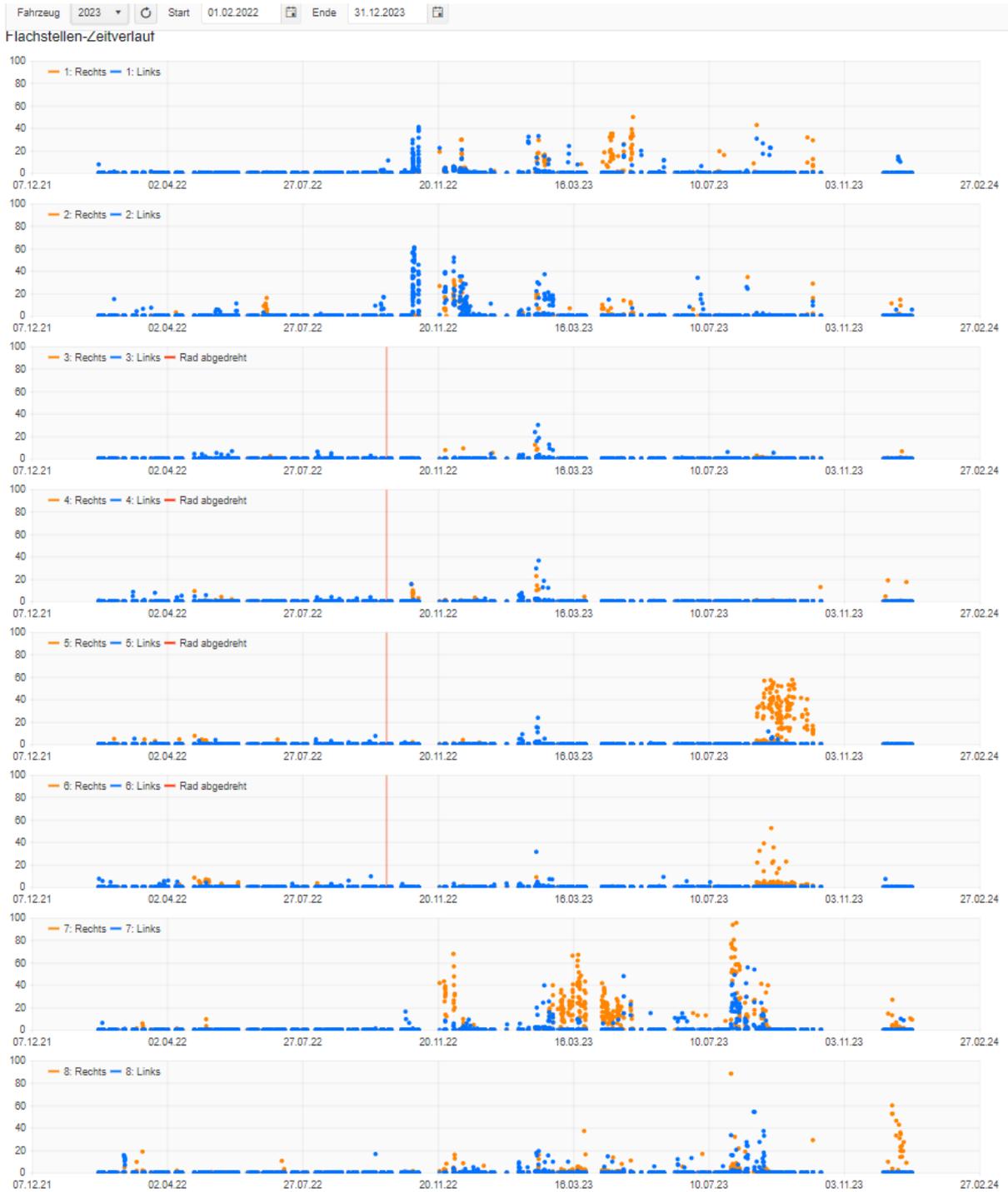




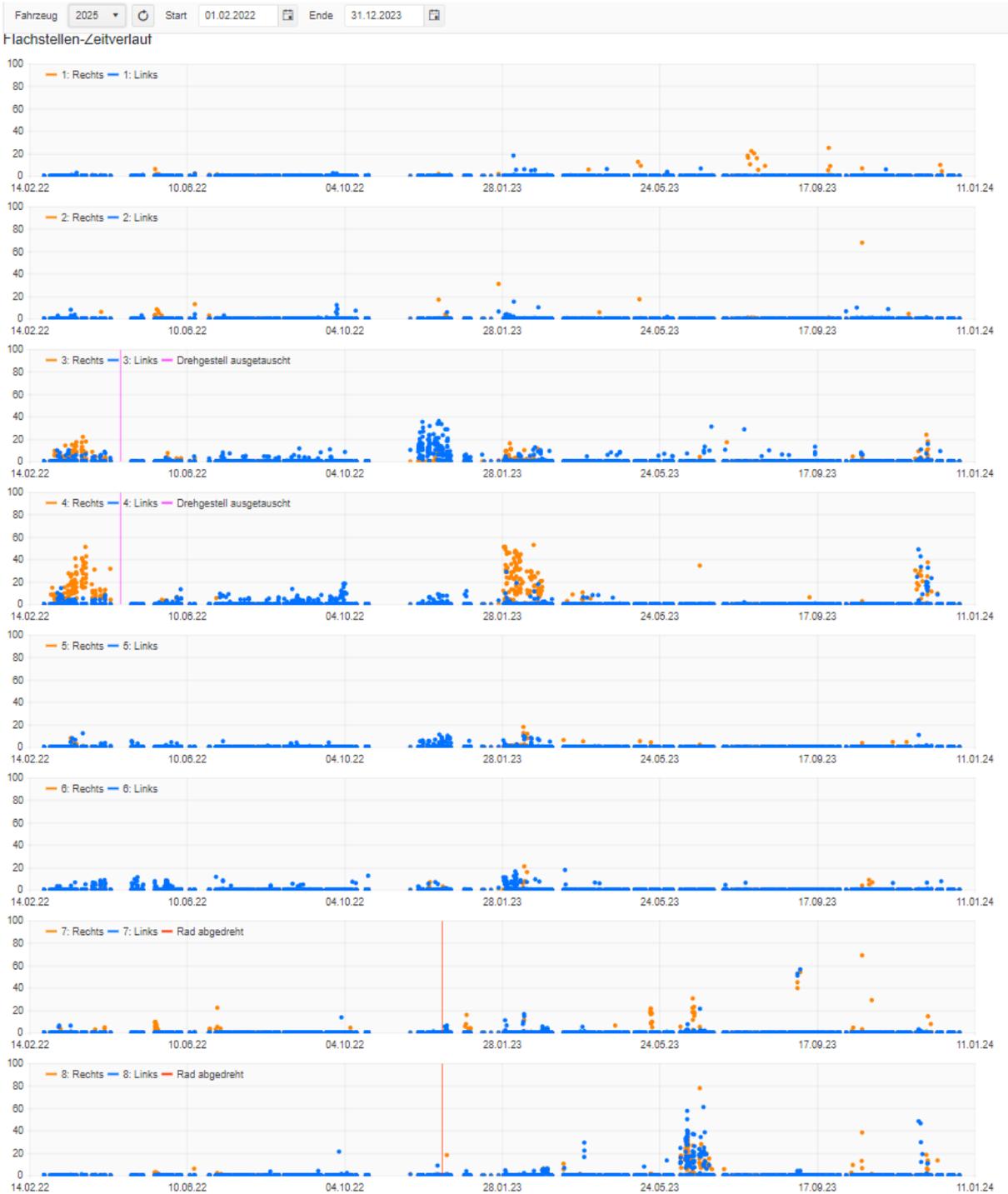
2021 - 2028 Komet3teilig

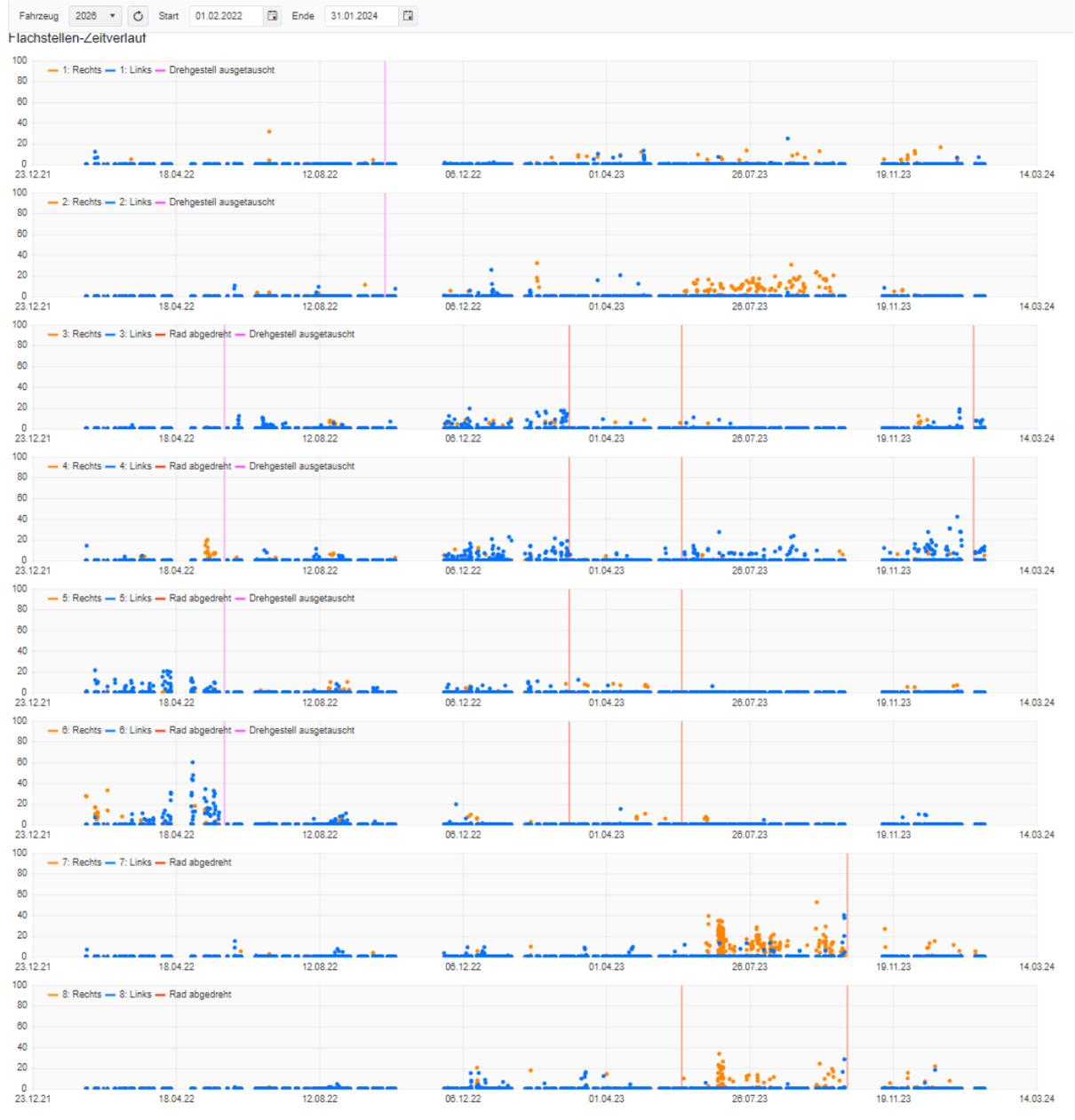


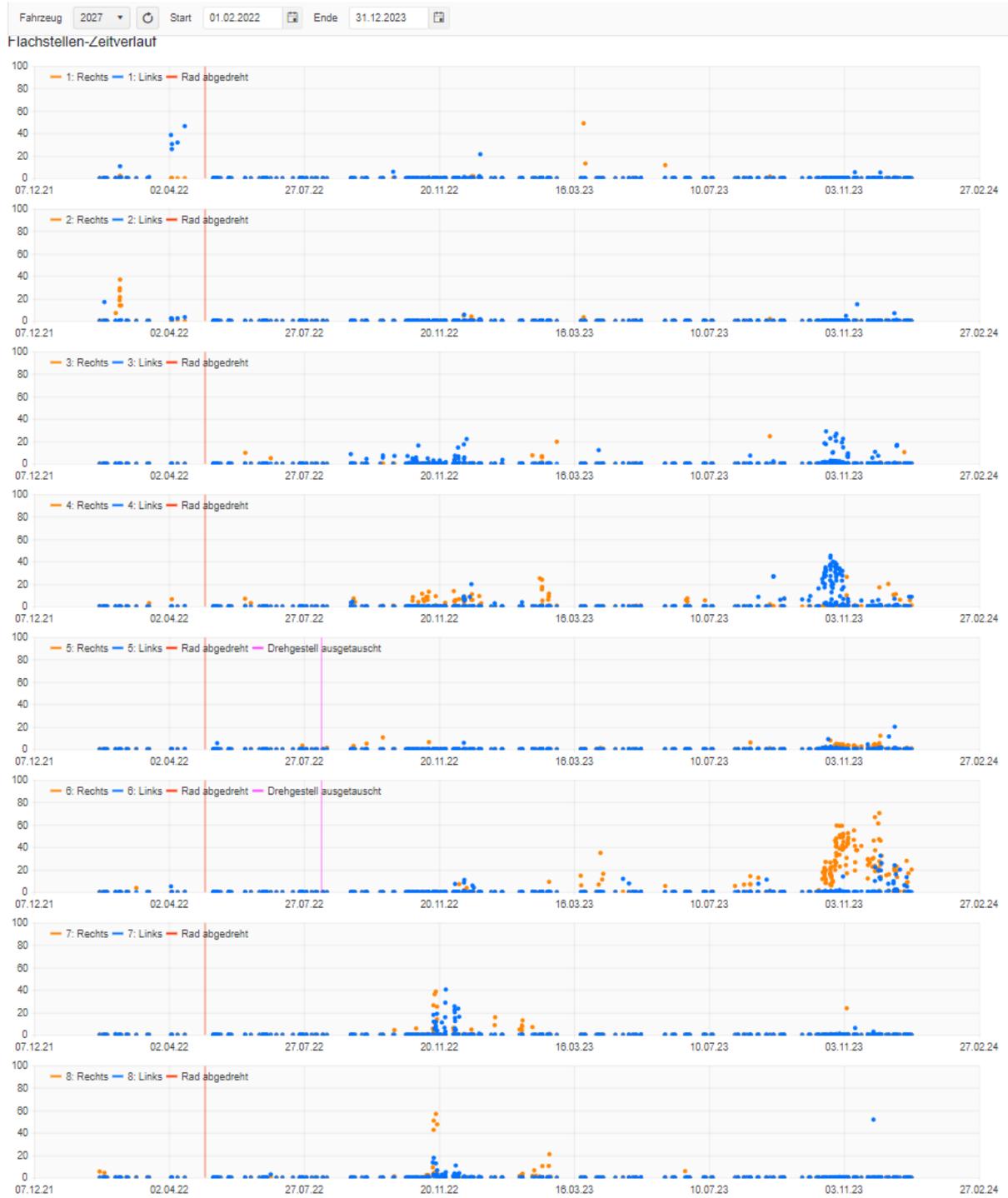


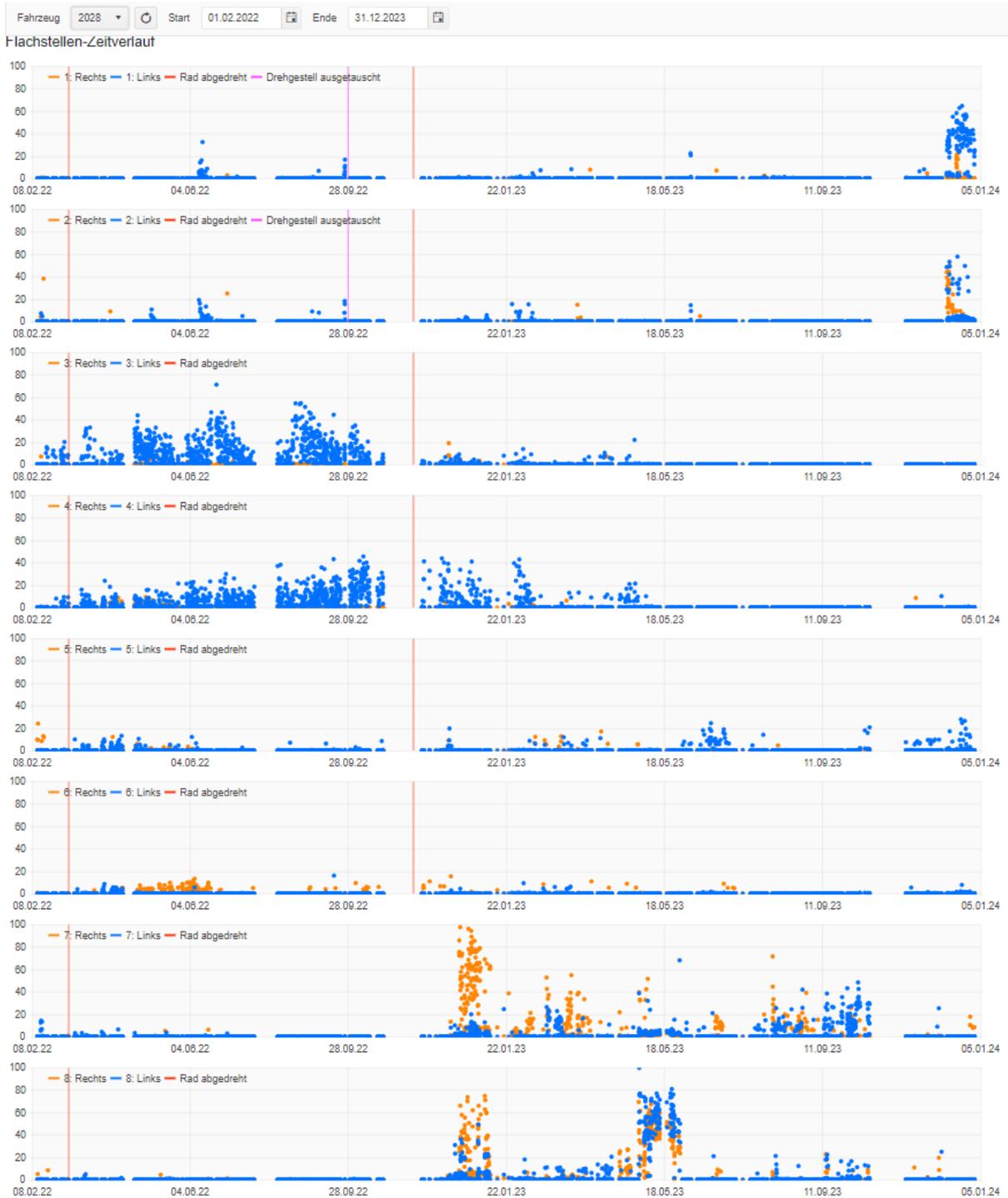




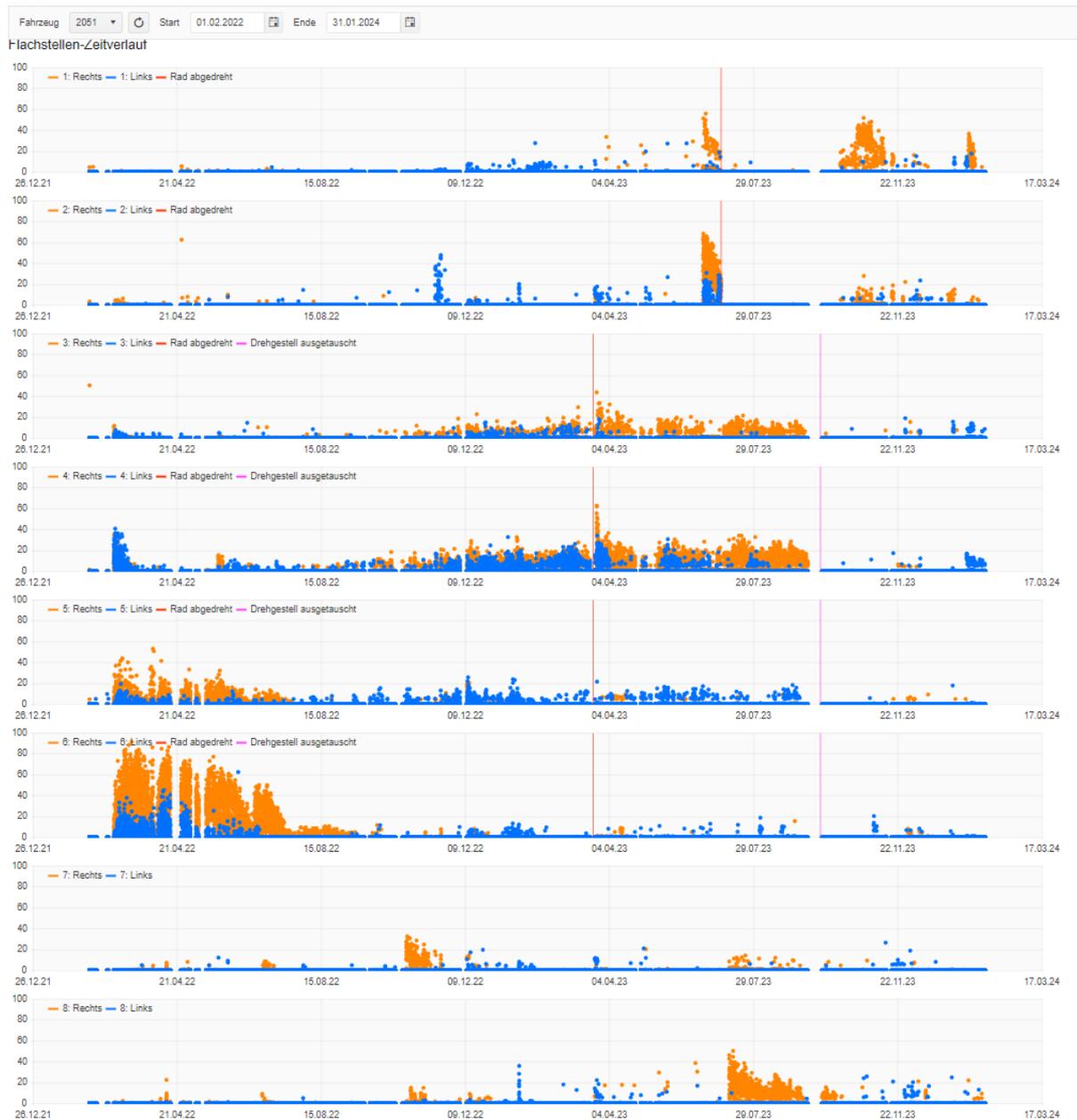


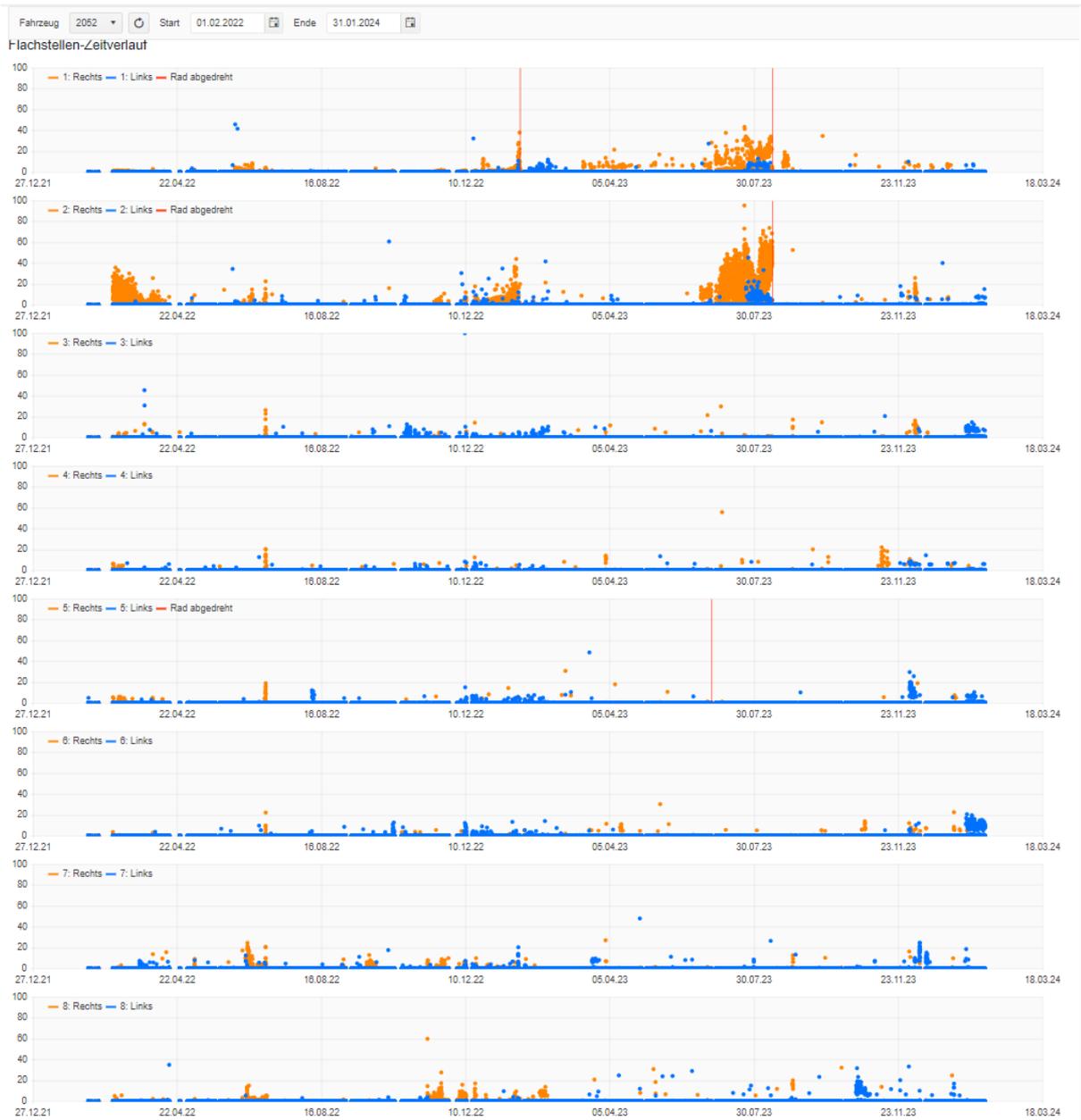


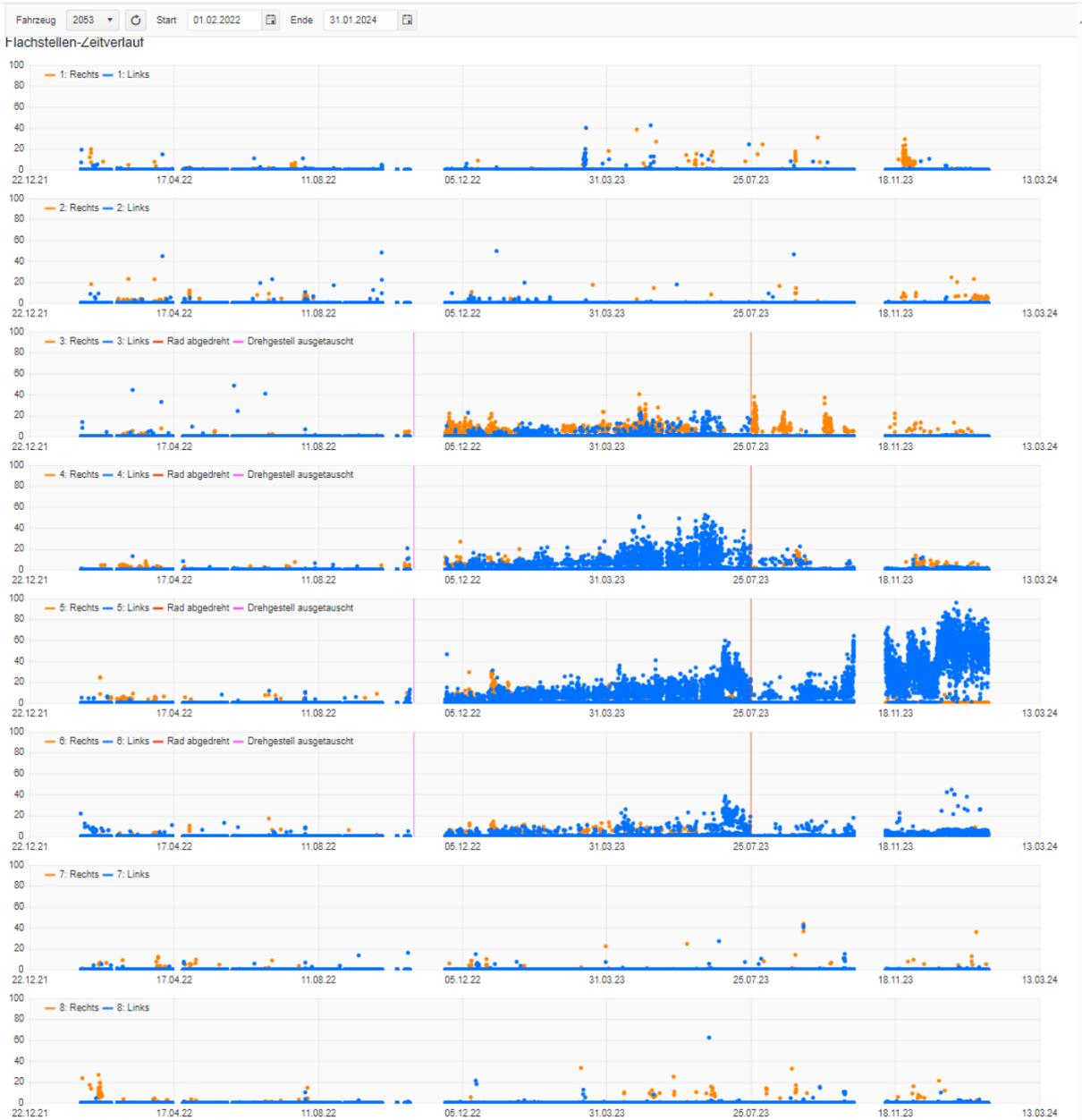


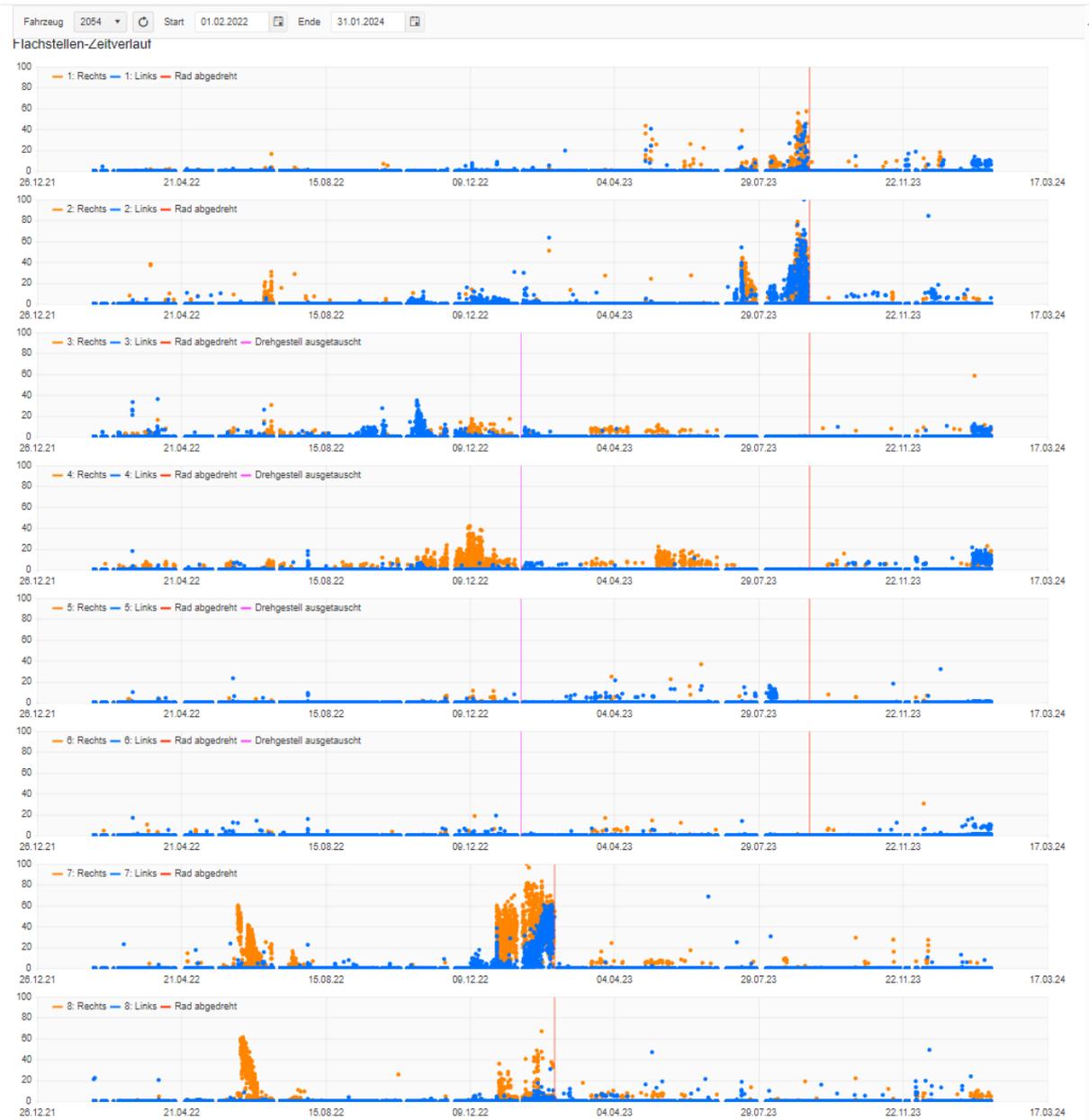


2051 - 2054 Shuttle





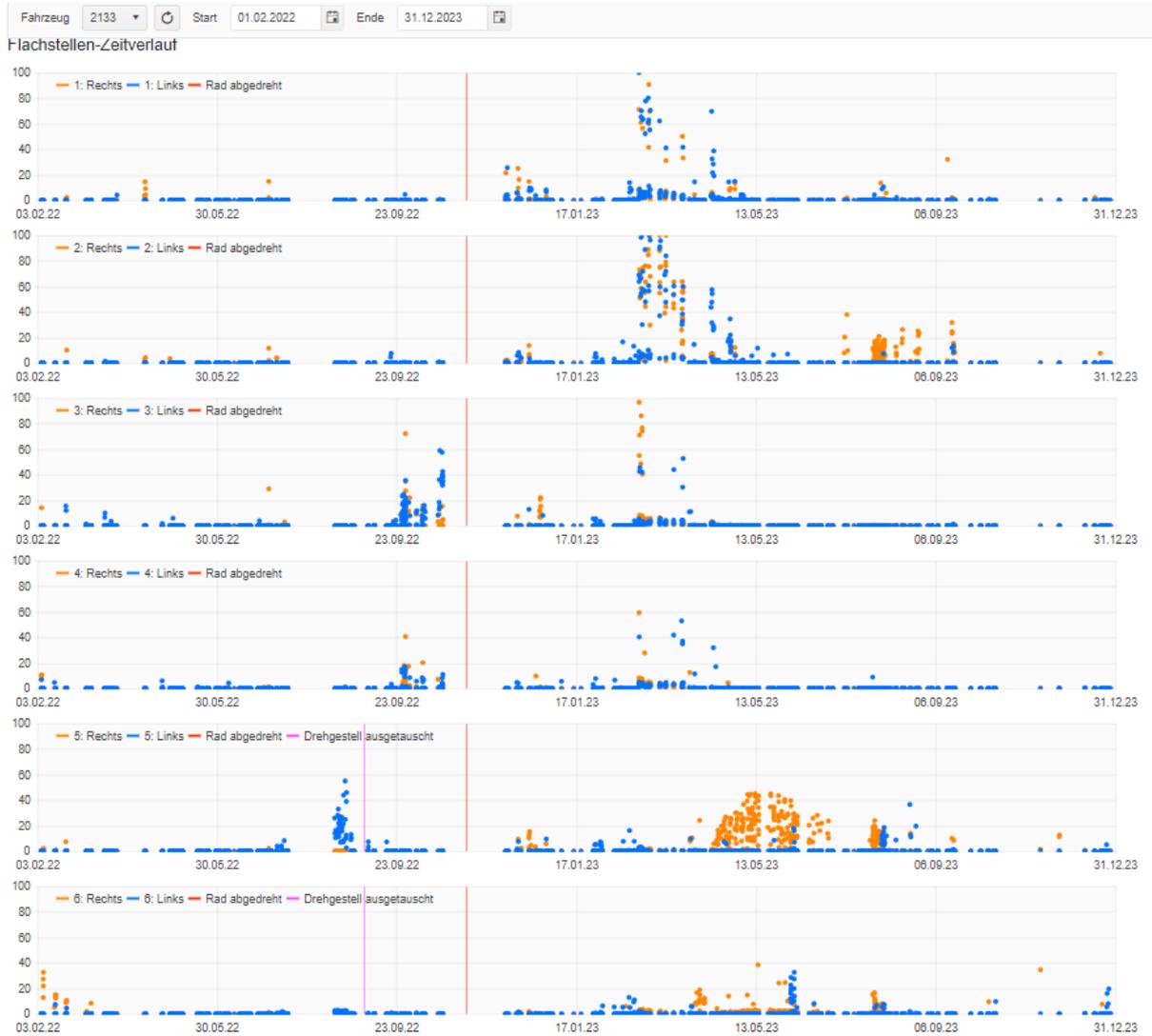




2131 - 2134 GSW









12.7 Überdrehen der Fahrzeuge / Notizen UFD Messungen

Fz 2051:

Datum	Was?
22.03.23	Achse 3-6 überdreht (Ausbrüche Achse 4)
22.03.2023	1385171 4 1 671.20 671.10 16541 0.40 0.40 41353 41353 UFD
22.03.2023	1385171 3 2 671.00 671.30 16541 0.40 0.40 41353 41352 UFD
22.03.2023	1385171 6229/6229 3 777.50 778.20 775.80 775.80 16541 0.70 0.80 23630 20676 KVR 600 UFD
22.03.2023	1385171 8270/163 4 778.50 777.00 773.70 773.70 16541 0.80 1.50 20676 11027 KVR 600 UFD
22.03.2023	1385171 8292/192 5 778.90 779.10 776.00 775.80 16541 0.80 0.90 20676 18379 KVR 600 UFD
22.03.2023	1385171 6111/6111 6 779.70 779.40 775.80 775.80 16541 0.70 0.80 23630 20676 KVR 600 UFD
	Achse 4 starke Ausbrüche, alle anderen angeglichen
03.07.23	Achse 1-2 überdreht (Flachstelle Achse 1 und / oder 2)
03.07.2023	1407134 4 1 670.60 670.50 670.60 670.60 13200 0.40 0.20 33000 66000 UFD
03.07.2023	1407134 3 2 670.40 670.70 669.00 669.40 13200 1.80 1.60 7333 8250 UFD
03.07.2023	1407134 6229/6229 3 774.10 774.20 13200 0.80 0.80 16500 16500 KVR 600 UFD
03.07.2023	1407134 8270/163 4 771.90 771.70 13200 0.80 0.90 16500 14667 KVR 600 UFD
03.07.2023	1407134 8292/192 5 774.50 774.10 13200 0.70 0.80 18857 16500 KVR 600 UFD
03.07.2023	1407134 6111/6111 6 774.50 774.10 13200 0.50 0.70 26400 18857 KVR 600 UFD
03.07.2023	1407134 49 7 663.40 662.60 13200 0.20 1.20 66000 11000 UFD
03.07.2023	1407134 51 8 663.30 663.60 13200 0.30 -0.70 44000 -18857 UFD
	Flachstelle
21.09.23	Achse 3-6 neue DGs
11.09.2023	1423124 4 1 669.90 670.10
11.09.2023	1423124 3 2 668.10 668.60
21.09.2023	1423194 6214/6214 3 796.00 796.00
21.09.2023	1423194 6212/6212 4 796.00 796.00
21.09.2023	1423194 6228/6228 5 796.00 796.00
21.09.2023	1423194 6218/6218 6 796.00 796.00
11.09.2023	1423124 49 7 663.00 662.10
11.09.2023	1423124 51 8 662.50 663.20

Fz 2052:

Datum	Was?
23.01.23	Achse 1 überdreht (kein Grund)
23.01.2023	1 679.60 679.60 677.90 677.80 8516 2.10 2.10 4055 4055 UFD
23.01.2023	2 680.50 680.50 680.50 680.50 8516 0.30 0.20 28387 42580 UFD
23.01.2023	3 788.40 789.30 8516 0.50 -0.40 17032 -21290 B7T UFD
23.01.2023	4 789.20 788.10 8516 0.30 1.00 28387 8516 B7T UFD
23.01.2023	5 788.70 789.00 8516 0.40 0.30 21290 28387 B7T UFD
23.01.2023	6 788.30 787.60 8516 0.60 0.60 14193 14193 B7T UFD
23.01.2023	7 680.10 680.00 8516 0.20 0.20 42580 42580 UFD
23.01.2023	8 680.00 680.20 8516 0.20 0.20 42580 42580 UFD
26.06.23	Achse 5 überdreht (Flachstelle)
26.06.2023	1 676.60 676.50 12592 0.30 0.30 41973 41973 UFD
26.06.2023	2 680.00 679.70 12592 0.20 0.30 62960 41973 UFD
26.06.2023	3 786.70 788.00 12592 0.70 0.50 17989 25184 B7T UFD
26.06.2023	4 788.00 786.30 12592 0.60 1.20 20987 10493 B7T UFD
26.06.2023	5 787.20 787.50 786.90 787.00 12592 0.60 0.60 20987 20987 B7T UFD
26.06.2023	6 786.50 785.80 786.50 785.80 12592 0.70 0.70 17989 17989 B7T UFD
26.06.2023	7 679.50 679.30 12592 0.20 0.40 62960 31480 UFD
26.06.2023	8 679.40 679.50 12592 0.20 0.30 62960 41973 UFD
	Flachstelle
14.08.23	Achse 1-2 überdreht
14.08.2023	1410054 85 1 676.20 676.20 675.50 675.60
14.08.2023	1410054 86 2 679.70 679.50 677.30 677.60
14.08.2023	1410054 6224 / 6031 3 785.90 787.40
14.08.2023	1410054 8291 / 1187 4 785.90 787.40
14.08.2023	1410054 8264 / 1189 5 785.90 785.60
14.08.2023	1410054 8263 / 1184 6 785.40 784.70
14.08.2023	1410054 2119 7 679.20 679.10
14.08.2023	1410054 2110 8 678.60 678.90

Fz 2053:

Datum	Was?
27.10.23	Neue DGs Achse 3-6
27.10.2022	1191073 12 1 670.70 670.30 10915 0.50 0.20 21830 54575 UFD
27.10.2022	1191073 11 2 669.40 669.10 10915 0.30 0.20 36383 54575 UFD
27.10.2022	1191073 6210/6210 3 796.30 796.20 10915 #DIV/0! #DIV/0! B6Z UFD
27.10.2022	1191073 6029/6029 4 796.20 796.10 10915 #DIV/0! #DIV/0! B6Z UFD
27.10.2022	1191073 8222/1188(8222) 5 796.30 796.20 10915 #DIV/0! #DIV/0! B6Z UFD
27.10.2022	1191073 6031/6134 6 796.20 796.20 10915 #DIV/0! #DIV/0! B6Z UFD
27.10.2022	1191073 2112 7 644.30 644.30 10915 0.30 0.10 36383 109150 UFD
27.10.2022	1191073 2116 8 644.60 644.70 10915 0.30 0.20 36383 54575 UFD
25.07.23	Achsen 3-6 überdreht (Ausbrüche und Kerben beim Spurkranz durch Bremsklotz)
25.07.2023	1246819 12 1 670.10 668.60 10036 0.20 0.50 50180 20072 UFD
25.07.2023	1246819 11 2 668.40 667.60 10036 0.30 0.50 33453 20072 UFD
25.07.2023	1246819 6210/6210 3 792.10 792.60 788.60 788.70 10036 1.50 1.00 6691 10036 B6Z UFD
25.07.2023	1246819 6029/6029 4 793.30 791.90 787.80 787.80 10036 0.70 1.30 14337 7720 B6Z UFD
25.07.2023	1246819 8222/1188(8222) 5 793.00 792.50 788.80 789.00 10036 0.70 1.00 14337 10036 B6Z UFD
25.07.2023	1246819 6031/6134 6 792.90 792.50 789.20 789.10 10036 0.80 1.00 12545 10036 B6Z UFD
25.07.2023	1246819 2112 7 643.30 642.40 10036 0.20 0.60 50180 16727 UFD
25.07.2023	1246819 2116 8 643.00 642.90 10036 0.50 0.10 20072 10036 UFD
	Ausbrüche und Kerbe beim Spurkranz durch Bremsklotz AASR

Fz 2054:

Datum	Was?
19.01.23	Achse 3-6 neu DG's
	24.11.2022 1183254 2 1 647.90 647.90
	24.11.2022 1183254 1 2 652.40 652.90
	19.01.2023 1183254 6213/6213 3 796.00 796.00
	19.01.2023 1183254 8267/8267 4 796.00 796.00
	19.01.2023 1183254 6023/6023 5 796.00 796.00
	19.01.2023 1183254 6220/6220 6 796.00 796.00
	15.02.2023 1200448 8827 7 648.70 648.50 645.90 645.90
	15.02.2023 1200448 8828 8 649.70 649.70 647.90 648.00
	15.02.23
24.11.2022 1183254 2 1 647.90 647.90	
24.11.2022 1183254 1 2 652.40 652.90	
19.01.2023 1183254 6213/6213 3 796.00 796.00	
19.01.2023 1183254 8267/8267 4 796.00 796.00	
19.01.2023 1183254 6023/6023 5 796.00 796.00	
19.01.2023 1183254 6220/6220 6 796.00 796.00	
15.02.2023 1200448 8827 7 648.70 648.50 645.90 645.90	
15.02.2023 1200448 8828 8 649.70 649.70 647.90 648.00	
08.09.23	
	08.09.2023 1239214 2 1 646.00 646.20 644.90 644.90
	08.09.2023 1239214 1 2 650.90 651.40 648.60 648.80
	08.09.2023 1239214 6213/6213 3 793.70 794.00 788.40 788.20
	08.09.2023 1239214 8267/8267 4 793.90 793.80 787.50 787.10
	08.09.2023 1239214 6023/6023 5 787.10 789.00 785.80 786.30
	08.09.2023 1239214 6220/6220 6 794.20 794.10 787.10 787.60
	15.02.2023 1200448 8827 7 648.70 648.50 645.90 645.90
	15.02.2023 1200448 8828 8 649.70 649.70 647.90 648.00

Fz 2021:

Datum	Was?
16.12.2 2	Achse 3-6 überdreht (Flachstelle)
	16.12.2022 1263228 2113 1 668.20 669.70 3816 0.30 -1.70 12720 -2245
	16.12.2022 1263228 2115 2 669.50 669.70 3816 0.30 0.40 12720 9540
	16.12.2022 1263228 8279 / 1187 3 788.60 789.10 782.10 782.10 3816 0.50 0.30 7652 12720 B7T UFD
	16.12.2022 1263228 8278 / 1185 4 789.90 789.70 783.30 783.30 3816 0.40 0.30 9540 12720 B7T UFD
	16.12.2022 1263228 11249 / 11247 5 788.20 787.10 782.80 782.80 3816 0.50 0.40 7652 9540 B7T UFD
	16.12.2022 1263228 11246 / 11249 6 787.80 787.10 782.40 782.40 3816 0.50 0.20 7652 19080 B7T UFD
	16.12.2022 1263228 246 (60) 7 667.90 668.80 3816 0.20 0.40 19080 9540
	16.12.2022 1263228 258 (55) 8 668.00 668.40 3816 0.20 0.50 19080 7632
	25.01.2 3
25.01.2023 1276124 2113 1 667.10 666.70 664.60 664.70 12896 3.60 5.00 3582 2579	
25.01.2023 1276124 2115 2 668.50 669.10 666.70 666.80 12896 2.80 2.90 4606 4447	
25.01.2023 1276124 8279 / 1187 3 780.90 780.70 782.10 782.10 12896 1.20 1.40 10747 9211 B7T UFD	
25.01.2023 1276124 8278 / 1185 4 781.90 782.10 782.80 782.80 12896 1.40 1.10 9211 11724 B7T UFD	
25.01.2023 1276124 11249 / 11247 5 781.70 781.70 782.10 782.10 12896 1.10 1.10 11724 11724 B7T UFD	
25.01.2023 1276124 11246 / 11249 6 781.40 781.00 782.10 782.10 12896 1.00 1.40 12896 9211 B7T UFD	
25.01.2023 1276124 246 (60) 7 666.80 668.40 12896 1.10 0.40 11724 32240	
25.01.2023 1276124 258 (55) 8 667.20 667.90 12896 0.80 0.30 16120 25792	
24.08.2 3	
	24.08.2023 1339241 2113 1 661.10 660.80 19100 0.50 1.00 38200 19100
	24.08.2023 1339241 2115 2 662.60 662.90 19100 0.70 1.00 27286 19100
	24.08.2023 1339241 8279 / 1187 3 777.90 777.70 19100 0.60 1.00 31833 19100 B7T UFD
	24.08.2023 1339241 8278 / 1185 4 779.50 779.20 19100 0.60 0.90 31833 21222 B7T UFD
	24.08.2023 1339241 11249 / 11247 5 778.90 778.30 19100 0.60 0.90 31833 21222 B7T UFD
	24.08.2023 1339241 11246 / 11249 6 778.80 778.00 19100 0.70 0.90 27286 21222 B7T UFD
	24.08.2023 1339241 246 (60) 7 664.40 665.80 662.60 662.90 19100 2.20 3.80 8682 5026
	24.08.2023 1339241 258 (55) 8 665.00 665.60 662.60 662.70 19100 2.80 3.80 6821 5026
	27.12.2 3
27.12.2023 1372396 2113 1 658.50 658.50 657.70 657.30 33155 3.40 3.50 9751 9473	
27.12.2023 1372396 2115 2 659.70 660.50 658.60 658.30 33155 4.00 4.60 8289 7208	
27.12.2023 1372396 8279 / 1187 3 775.10 775.20 774.30 774.00 33155 3.60 3.70 9210 8961 B7T UFD	
27.12.2023 1372396 8278 / 1185 4 776.50 777.10 775.60 775.80 33155 3.90 3.40 8501 9751 B7T UFD	
27.12.2023 1372396 11249 / 11247 5 776.70 776.10 776.70 776.10 33155 2.20 2.20 15070 15070 B7T UFD	
27.12.2023 1372396 11246 / 11249 6 776.20 775.80 776.20 775.80 33155 2.60 2.20 12752 15070 B7T UFD	
27.12.2023 1372396 246 (60) 7 660.40 661.00 33155 2.20 1.90 15070 17450	
27.12.2023 1372396 258 (55) 8 660.60 660.70 33155 2.00 2.00 16578 16578	

Fz 2024:

Datum	Was?																		
07.12.22	Achse 7-8 neues DG	15.12.2022	825740	077	1				685.20	685.00	35565	-685.20	-685.00	-52	-52				
		15.12.2022	825740	068	2				685.10	685.20	35565	-685.10	-685.20	-52	-52				
		15.12.2022	825740	8273 / 216	3	783.40	782.70				35565	1.30	1.50	27358	23710	877			
		15.12.2022	825740	11248 / 41	4	784.70	784.10				35565	1.60	1.80	22228	19758	877			
		15.12.2022	825740	6024 / 6024	5	777.90	778.70				35565	2.20	1.90	16166	18718	862			
		15.12.2022	825740	6026 / 6026	6	774.80	775.50				35565	2.20	1.90	16166	18718	862			
		15.12.2022	825740	070	7				685.40	685.70	35565	-685.40	-685.70	-52	-52				
		15.12.2022	825740	076	8				685.60	685.60	35565	-685.60	-685.60	-52	-52				
		29.12.22	Achse 1-2 überdreht (Flachstelle)	29.12.2022	830208	077	1	685.10	684.70		681.80	681.80	4468	3.40	3.20	1314	1394		
29.12.2022	830208			068	2	685.10	685.20		681.40	681.40	4468	3.70	3.80	1208	1176				verschliffen
29.12.2022	830208			8273 / 216	3	783.20	782.30				4468	0.20	0.40	22340	11170	877			
29.12.2022	830208			11248 / 41	4	784.50	783.80				4468	0.20	0.30	22340	14893	877			
29.12.2022	830208			6024 / 6024	5	777.70	778.40				4468	0.20	0.30	22340	14893	862			
29.12.2022	830208			6026 / 6026	6	774.60	775.20				4468	0.20	0.30	22340	14893	862			
29.12.2022	830208			070	7	685.20	685.60				4468	0.20	0.10	22340	44680				
29.12.2022	830208			076	8	685.50	685.30				4468	0.10	0.30	44680	14893				
13.02.23	Achse 3-4 neues DG (Welle gebrochen)			13.02.2023	843896	077	1	680.70	680.90				13688	1.10	0.90	12444	15209		
		13.02.2023	843896	068	2	680.30	680.60				13688	1.10	0.80	12444	17110				
		13.02.2023	843896	61126/112 2	3				795.50	795.70	13688	-12.30	-13.40	-1113	-1021	862			Neues DG, Welle 3 gebrochen
		13.02.2023	843896	6106/6106	4				795.90	796.10	13688	-11.40	-12.30	-1201	-1113	862			Neues DG, Welle 3 gebrochen
		13.02.2023	843896	6024 / 6024	5	776.80	777.60				13688	0.90	0.80	15209	17110	862			
		13.02.2023	843896	6026 / 6026	6	773.70	774.30				13688	0.90	0.90	15209	15209	862			
		13.02.2023	843896	070	7	685.00	684.60				13688	0.20	1.00	68440	13688				
		13.02.2023	843896	076	8	685.00	684.80				13688	0.50	0.50	27376	27376				
		23.03.23	Achse 1-2 und 7-8 überdreht (kein Grund)	23.03.2023	855116	077	1	680.10	680.40		678.10	678.20	11220	2.60	2.70	4315	4156		
23.03.2023	855116			068	2	679.90	680.10		679.20	679.10	11220	1.10	1.50	10200	7489				
23.03.2023	855116			61126/112 2	3	794.90	795.00				11220	0.60	0.70	18700	16028	862			
23.03.2023	855116			6106/6106	4	795.20	795.30				11220	0.70	0.80	16029	14025	862			
23.03.2023	855116			6024 / 6024	5	776.10	776.80				11220	0.70	0.80	16029	14025	862			
23.03.2023	855116			6026 / 6026	6	773.10	773.20				11220	0.60	1.10	18700	10200	862			
23.03.2023	855116			070	7	684.60	684.30		683.20	683.30	11220	1.80	1.30	6233	8631				
23.03.2023	855116			076	8	684.50	684.40		681.10	681.30	11220	3.90	3.50	2877	3206				
15.06.2 3	Achse 5-6 neues DG			08.05.2023	869551	077	1	677.10	677.30										
		08.05.2023	869551	068	2	678.30	678.10												
		08.05.2023	869551	61126/112 2	3	794.10	794.30												
		08.05.2023	869551	6106/6106	4	794.60	794.70												
		15.06.2023	878760	8262/191	5				795.00	795.00									
		15.06.2023	878760	6226/6226	6				795.00	795.00									
		08.05.2023	869551	070	7	682.30	682.50												
		08.05.2023	869551	076	8	680.10	680.40												

Fz 2026:

Datum	Was?																		
02.03.2 3	Achse 3-6 überdreht (Ausbrüche)	31.01.2023	805053	69	1	684.80	684.40				0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!	ERTEN	UFD	messen		
		31.01.2023	805053	84	2	684.30	684.40				0.00	0.00	0.00	0.00	ERTEN	UFD	messen		
		02.03.2023	813787	8284/33	3	792.00	792.30		785.30	785.30	8734	7.30	7.50	1196	1165	862	UFD	Ausbrüche	
		02.03.2023	813787	8277/165	4	789.10	789.60		782.40	782.60	8734	7.60	7.90	1169	1108	862	UFD	Ausbrüche	seit letzter Messperiode andauernd schönes und trockenes Wetter!
		02.03.2023	813787	6032/6032	5	791.60	791.20		787.10	787.00	8734	5.00	4.80	1747	1820	862	UFD	Ausbrüche	
		02.03.2023	813787	6110/6110	6	792.20	791.70		787.00	786.80	8734	5.60	5.50	1560	1588	862	UFD	Ausbrüche	
		31.01.2023	805053	17	7	651.50	651.80				0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!			UFD	messen	
		31.01.2023	805053	53	8	649.80	649.30				0.00	0.00	#DIV/0!	#DIV/0!			UFD	messen	
		01.06.2 3	Achse 3-6 und wahrscheinlich auch Achse 8 überdreht (kein Grund)	01.06.2023	837510	69	1	683.70	683.40				15760	0.90	0.90	31520	31520	ERTEN	UFD
01.06.2023	837510			84	2	683.40	683.40				15760	0.40	0.40	39400	39400	ERTEN	UFD	messen	
01.06.2023	837510			8284/33	3	783.60	783.70		781.80	781.70	15760	2.60	2.70	6062	5837	862	UFD	messen	
01.06.2023	837510			8277/165	4	780.40	780.90		779.50	779.20	15760	1.80	2.40	8756	6567	862	UFD	messen	
01.06.2023	837510			6032/6032	5	785.20	785.20		783.90	783.70	15760	2.10	2.30	7505	6852	862	UFD	messen	
01.06.2023	837510			6110/6110	6	785.40	785.10		783.90	783.70	15760	2.20	2.20	7164	7164	862	UFD	messen	
01.06.2023	837510			17	7	650.40	650.80		650.40	650.80	15760	0.70	0.60	22314	26267			UFD	messen
01.06.2023	837510			53	8	648.70	648.00		647.50	647.30	15760	1.60	1.20	9850	13133			UFD	messen
13.10.2 3	Achse 7-8 überdreht (kein Grund)			13.10.2023	875757	69	1	682.80	682.30				23487	0.60	0.70	39145	33553	ERTEN	UFD
		13.10.2023	875757	84	2	682.40	682.40				23487	0.70	0.60	33553	39145	ERTEN	UFD	messen	
		13.10.2023	875757	8284/33	3	779.30	779.50				23487	1.20	1.00	19572	23487	862	UFD	messen	
		13.10.2023	875757	8277/165	4	776.70	776.70				23487	1.40	1.20	16776	19573	862	UFD	messen	
		13.10.2023	875757	6032/6032	5	781.50	781.50				23487	1.10	1.10	21352	21352	862	UFD	messen	
		13.10.2023	875757	6110/6110	6	782.20	781.60				23487	0.90	1.10	26097	21352	862	UFD	messen	
		13.10.2023	875757	17	7	649.20	649.50		646.70	646.60	23487	0.90	1.00	25097	23487			UFD	messen
		13.10.2023	875757	53	8	645.80	645.40		643.30	643.00	23487	0.70	0.80	33553	29359			UFD	messen
		23.01.2 4	Achse 3-4 neues DG	26.07.2023	852270	69	1	683.40	683.00										
26.07.2023	852270			84	2	683.10	683.00												
23.01.2024	904606			6215/6215(52)	3				796.00	796.00									
23.01.2024	904606			8280/8286	4				796.00	796.00									
26.07.2023	852270			6032/6032	5	782.60	782.60												
26.07.2023	852270			6110/6110	6	783.10	782.70					</							