



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

136 Pilotbetrieb Re 460 Teillastbetrieb



Schlussbericht

Johannes Estermann, SBB / Rollmaterialverantwortung und Instandhaltungsentwicklung
Wylenstrasse 125, 3000 Bern 65, johannes.ester mann@sbb.ch, www.sbb.ch

Orhan Sylejmani, SBB / Rollmaterialverantwortung und Instandhaltungsentwicklung
Industriestrasse 153, 4600 Olten, orhan.sylejmani@sbb.ch, www.sbb.ch

Begleitgruppe

BAV: Walter Josi, Tristan Chevroulet, Stefan Schnell, Daniel Schaller (PO).

Impressum

Herausgeberin:
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)
CH-3003 Bern

Programmleiter
Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: 136
Bezugsquelle
Kostenlos zu beziehen über das Internet
www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor –in oder sind ausschliesslich die Autoren –
innen dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 23.12.2022

Inhalt

Executive Summary in Deutsch	1
Executive Summary in Französisch	2
Executive Summary in English.....	2
Zusammenfassung	3
1. Ausgangslage	3
2. Ziele der Arbeit	3
3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand	4
4. Ergebnisse.....	7
5. Diskussion	14
6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen	15
Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	16
Literaturverzeichnis	16

Executive Summary in Deutsch

Um die Zwischenlager in den Getrieben der SBB Lok 2000 (Baureihe Re 460) vor übermässiger Abnutzung zu schützen, sind die beiden Drehgestelle der Lok bisher zugkraftmässig gegeneinander verspannt. Die gleiche Herausforderung gab es auch bei der Re 465 der BLS, bei der als Abhilfe schliesslich brünierte Lager eingesetzt wurden. Seit mehreren Jahren werden auch bei der Re 460 der SBB brünierte Lager eingesetzt, so dass heute die mechanischen Voraussetzungen für einen Teillastbetrieb gegeben sind. Versuche mit aufgehobener Drehgestellverspannung, eine Vorstufe zum Teillastbetrieb, wurden auf der Re 460 durchgeführt und erfolgreich abgeschlossen.

Im Rahmen dieses Projekts werden im Herbst 2019 die ersten drei Prototypen mit Teillastbetrieb ausgestattet, sie verkehren seither im Regelbetrieb der SBB. In festgelegten Zeitabständen werden Befundungen der kritischen Zwischenlager im Getriebe durchgeführt. Nach 250'000 km, etwa einem Viertel der regulären Laufleistung der Lager, werden Verschleisspuren auf den Lagern festgestellt, die auf die häufigeren Lastwechsel durch den Teillastbetrieb zurückgeführt werden. Diese sind jedoch so gering, dass dem Probetrieb im Frühjahr 2021 drei weitere Fahrzeuge hinzugefügt werden, um eine breitere Datenbasis für das Projekt zu erhalten.

Ein Nachweis der Energieeinsparung des Teillastbetriebes wird auf Basis von Energieverbrauchsdaten erstellt. Der Teillastbetrieb reduziert den Energieverbrauch der Re 460 um 1.5 % bzw. 5 GWh pro Jahr, hochgerechnet für die ganze Flotte. Der Nachweis der Aktivierungshäufigkeit des Teillastbetriebs in Bezug auf Distanz und Fahrzeit bestätigt die vorab theoretisch erwarteten Werte von 16 %.

Einzig die letzte Befundung der Lager muss bis zum Erreichen der vollen Laufleistung im Sommer 2023 abgewartet werden. Bis dahin wird das Monitoring der Prototypen aufrechterhalten, um mögliche Langzeitschäden festzustellen. Der Teillastbetrieb ist heute bereits als Softwareoption auf allen Re 460 installiert und kann nach einer positiven Entscheidung rasch per SW-Bit aktiviert werden.

Executive Summary in Französisch

Afin de prévenir une usure excessive des paliers intermédiaires dans les réducteurs de la locomotive 2000 des CFF (série Re 460), les deux bogies de la locomotive sont jusqu'à maintenant serrés selon l'effort de traction. La question s'est également posée pour la locomotive Re 465 du BLS et on a finalement eu recours ici à des paliers brunis pour remédier au problème. Les Re 460 des CFF sont elles aussi équipées de paliers brunis depuis plusieurs années et les conditions mécaniques sont donc aujourd'hui réunies pour utiliser le mode de charge partielle lors des circulations. Des essais ont été menés sur la Re 460 en supprimant la fonction de serrage des bogies, ce qui constitue une étape préliminaire à l'utilisation du mode de charge partielle, et les résultats sont concluants.

Dans le cadre de ce projet, les trois premiers prototypes ont été équipés à l'automne 2019 du mode de charge partielle et circulent depuis cette date en service normal aux CFF. On examine à intervalles donnés les paliers intermédiaires critiques au sein du réducteur. Au bout de 250 000 km, soit environ un quart de la prestation kilométrique normale des paliers, on a constaté sur les paliers des traces d'usure qui sont attribuées aux changements de charge plus fréquents en mode de charge partielle. Cette usure est cependant si faible que trois autres véhicules ont été incorporés aux essais en exploitation au début de l'année 2021 de manière à disposer d'une base de données plus large.

Les économies d'énergie apportées par le mode de charge partielle sont démontrées en se basant sur les données de consommation d'énergie. Le mode de charge partielle réduit de 1,5% la consommation d'énergie de la Re 460, ce qui équivaut à 5 GWh par an pour l'ensemble de la flotte. Les chiffres relatifs à la fréquence d'activation du mode de charge partielle en fonction de la distance et du temps de parcours confirment les valeurs théoriques attendues, à savoir 16%.

Il ne reste plus qu'à attendre le dernier examen des paliers à l'été 2023, lorsque les véhicules auront réalisé la prestation kilométrique complète. Dans l'intervalle, on continue à surveiller les prototypes afin de pouvoir détecter d'éventuels dommages à long terme. Le mode de charge partielle est déjà installé aujourd'hui en tant qu'option logicielle sur toutes les Re 460 et il pourra être rapidement activé en cas de décision favorable.

Executive Summary in English

To protect the intermediate bearings in the gearboxes of the SBB locomotive 2000 (class Re 460) from excessive wear, the two bogies of the locomotive have so far been tensioned against each other. The same challenge was also encountered with BLS's Re 465, where browned bearings were finally used as a remedy. For several years now, SBB's Re 460 has also been fitted with browned bearings, so that the mechanical prerequisites for part-load operation are now in place. Trials with the bogie tension lifted, a preliminary stage to part-load operation, were carried out on the Re 460 and successfully completed.

As part of this project, the first three prototypes are equipped with part-load operation in autumn 2019; they have been in regular operation since then. Inspections of the critical intermediate bearings in the transmission are carried out at specified intervals. After 250,000 km, about a quarter of the regular mileage of the bearings, signs of wear are noticed on the bearings, which are attributed to the more frequent load changes due to partial load operation. However, these are so small that three more vehicles are added to the trial operation in spring 2021 to obtain a broader data basis for the project.

Proof of the energy savings of partial load operation is provided based on energy consumption data. Partial load operation reduces the energy consumption of the Re 460 by 1.5 % or 5 GWh per year, extrapolated for the entire fleet. The proof of the activation frequency of the partial load operation in relation to distance and driving time confirms the previously theoretically expected values of 16 %.

Only the final assessment of the bearings has to wait until the full mileage is reached in summer 2023. Until then, monitoring of the prototypes will be maintained to determine possible long-term damage. Partial load operation is already installed as a software option on all Re 460s today and can be quickly activated by SW bit after a positive decision.

Zusammenfassung

1. Ausgangslage

Heute sind auf der Re 460 die beiden Drehgestelle gegeneinander verspannt. Der Grund ist, dass v.a. in den ersten Jahren nach der Betriebseinführung der Fahrzeuge übermässige Abnutzungen des Zwischenlagers zu beobachten waren. Das gleiche Problem lag auch bei der Lok Re 465 der BLS vor. Während die BLS brünierte Lager einsetzte, änderte die SBB die Antriebsregelung auf der Re 460. Seit mehreren Jahren werden aber auch bei der Re 460 brünierte Lager eingesetzt, so dass heute die Drehgestellverspannung aufgehoben werden kann. Seit 2014 wurden mehrere Versuche mit aufgehobener Drehgestellverspannung, der Vorstufe zum Teillastbetrieb, auf der Re 460 gefahren. Während drei Betriebsjahren wurden Probezerlegungen und Befundungen der Getriebe durchgeführt, ohne negative Einflüsse nachweisen zu können.

Somit bestehen dank dieser ausführlichen und erkenntnisreichen Versuche die nötigen Grundlagen, um den Teillastbetrieb etappenweise auf der modernisierten Re 460 einzuführen. Die Funktion des Teillastbetriebes ist bekannt, jedoch dessen Auswirkungen auf das mechanische und fahrzeugdynamische Verhalten des Fahrzeugs nur begrenzt. Daher müssen durch ein aktives Monitoring und gezielte Bauteilbefundungen die Rückwirkungsfreiheit und Zuverlässigkeit der Massnahme sichergestellt werden. Überwachbarkeit und präzise Befundung durch die SBB und Lieferanten sind für beide Seite von grossem Interesse. Die SBB erhält einen vertieften Einblick in das Systemverhalten und der Lieferant kann bisher unbekannte System- und Umweltbedingungen direkt an seinen Produkten erfahren.

2. Ziele der Arbeit

Der Teillastbetrieb hat primär zum Ziel Energie zu sparen, indem bei kleineren Zugkräften Antriebsstränge wegschaltet werden und die verbleibenden Antriebstränge die geforderte Zugkraft aufbringen. Durch die Abschaltung von Motoren lassen sich so Umrichter- und Antriebsverluste reduzieren, während die aktiven Motoren und Umrichter in einem besseren Wirkungsgradbereich betrieben werden. Bei der Re 460 werden jeweils zwei Antriebsstränge eines gemeinsamen Drehgestells in einem sogenannten Gruppenantrieb geregelt, im Teillastbetrieb werden also beide Antriebsstränge eines Drehgestells ausgeschaltet.

Dabei gilt es zu verhindern, dass die Getriebelager der Re 460 Schaden nehmen, wenn sie über längere Zeit unbelastet betrieben werden, da sie konstruktiv dafür nicht ausgelegt wurden. Bei der Re 460 der SBB wurde in der Antriebssteuerung deshalb eine sogenannte Drehgestellverspannungsfunktion implementiert, die dafür sorgt, dass die Antriebsstränge bei kleinen Zug- oder Bremskräften immer mit einem gewissen minimalen Drehmoment belastet sind. Da die Lok aber „gegen aussen“, trotzdem mit kleinen Zug-/Bremskräften oder gar mit Zugkraft 0 betrieben werden können muss, werden die beiden Drehgestelle künstlich gegeneinander verspannt. Bei einer Zugkraftanforderung von 0 kN heisst dies zum Beispiel, dass ein Drehgestell zieht, während das andere Drehgestell gleichzeitig bremst, somit resultiert in der Summe „gegen aussen“ keine Zug- oder Bremskraft.

Ohne die Verspannungsfunktion soll bei kleinen Zug- oder Bremskräften ein Drehgestell deaktiviert werden, um keine Verluste zu verursachen. Unbeeinflusst davon bleiben die Verluste im Transformator und den Hilfsbetriebe [1].

3. Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Die bisherige Antriebsregelung sieht eine Verspannung von +/-12 kN der Drehgestelle gegeneinander vor. Um einen unbelasteten Zustand der Getriebe zu vermeiden, werden die Drehgestelle im Bereich einer Zugkraftanforderung («Zugkraft total» Abbildung 1) für die Lok zwischen +/- 15 kN gegeneinander verspannt. Ober- und unterhalb dieser Zugkraftanforderung wird diese zu gleichen Teilen auf beide Drehgestelle aufgeteilt. Die Abbildung 1 veranschaulicht die die heutige Antriebssteuerung.

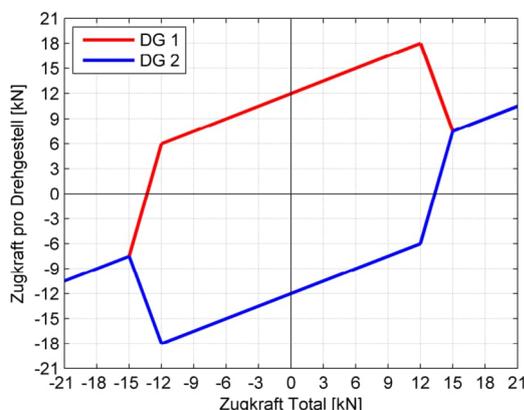


Abbildung 1: Bisherige Drehgestellverspannung der Re 460 in Abhängigkeit der Zugkraftanforderung («Zugkraft total»)

Mit der Einführung von brünierten Lagern in den Getrieben der Re 460 vor mehreren Jahren wurden die mechanischen Voraussetzungen geschaffen, die Drehgestellverspannung aufzuheben und den Teillastbetrieb einzuführen.

Vorversuche: Aufhebung der Drehgestellverspannung

Um mit Sicherheit negative Einflüsse auf die Mechanik und das Fahrverhalten durch die Aufhebung der Drehgestellverspannung vor der Einführung des Teillastbetriebes auszuschliessen, wird während drei Jahren ein Versuch mit aufgehobener Drehgestellverspannung durchgeführt. Im Frühling 2015 wird die Drehgestellverspannung der folgenden drei Fahrzeuge aufgehoben.

- Re460 062 - ohne Verspannung mit Messausrüstung
- Re460 034 - ohne Verspannung
- Re460 085 - ohne Verspannung

Zur gleichen Zeit dienen die beiden folgenden Fahrzeuge als Referenzfahrzeuge.

- Re460 064 - mit Verspannung
- Re460 017 - mit Verspannung

Für die Fahrzeugüberwachung wurde ein Monitoring mittels Messausrüstung bestehend aus Vibrations-Schlupf- und Ölsumpftemperaturmessungen auf der Re 460 062 durchgeführt. Über die fahrzeugbezogenen Störungsmeldungen der Instandhaltung wurden die Auswirkungen aus dem Betrieb beobachtet.

Mit den Vibrationsmessungen können die Vibrationen der Getriebe im nicht verspannten Zustand mit Getrieben im verspannten Zustand verglichen werden. Die Vibrationsmessung wurde auf vier Getriebe-kästen montiert (Abbildung 2 und Abbildung 3).

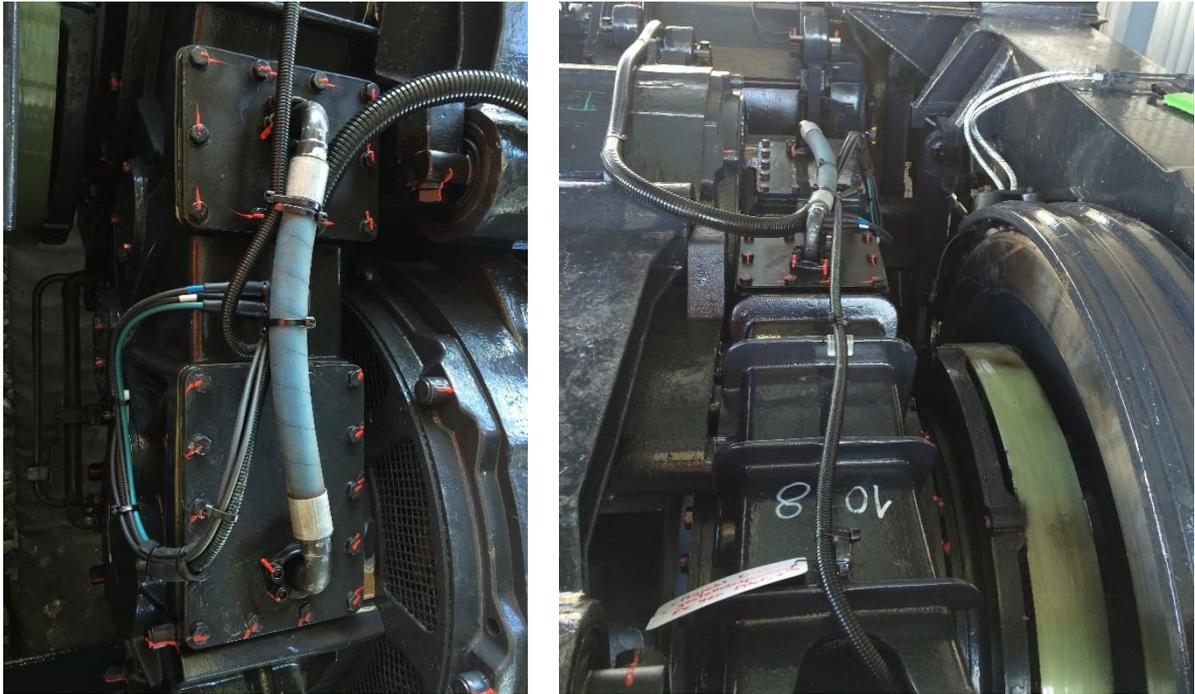


Abbildung 2: Messaufbau der Vibrationsmessung.

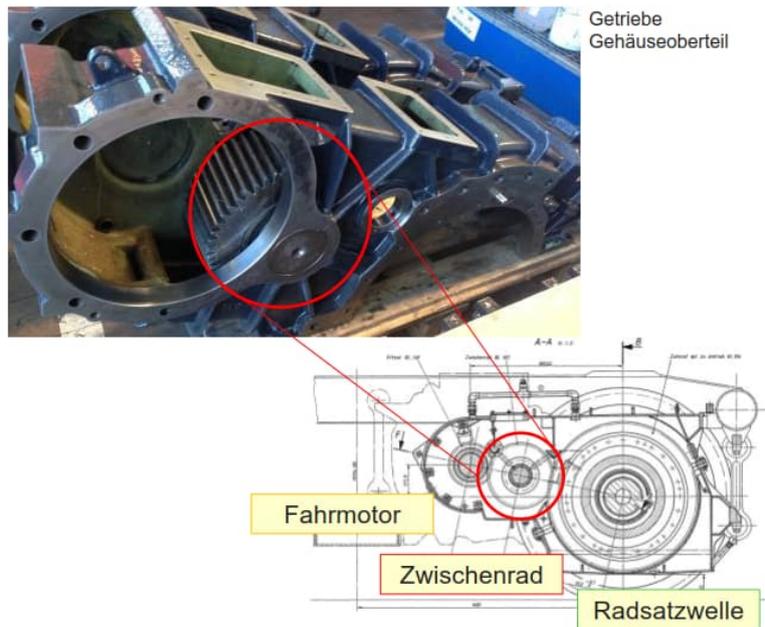


Abbildung 3: Übersicht des Getriebes mit dem Zwischenradlager.

Die Auswertung der Vibrationsmessung zeigt, dass unverspannte Drehgestelle keine erhöhten Vibrationen aufweisen, die sich negativ auf die Lebensdauer auswirken könnten. Weitere Details sind dem Bericht zur Vibrationsmessung [2] zu entnehmen.

Die Loks wurden mit einer fest installierten Schlupfmessungen (Abbildung 4) ausgerüstet, welche kontinuierlich die Drehzahl der vier Lagerkäfige der Motoren, Zugkraft, Fahrtrichtung und Drehzahlvorgabe der Motoren aufzeichnet.

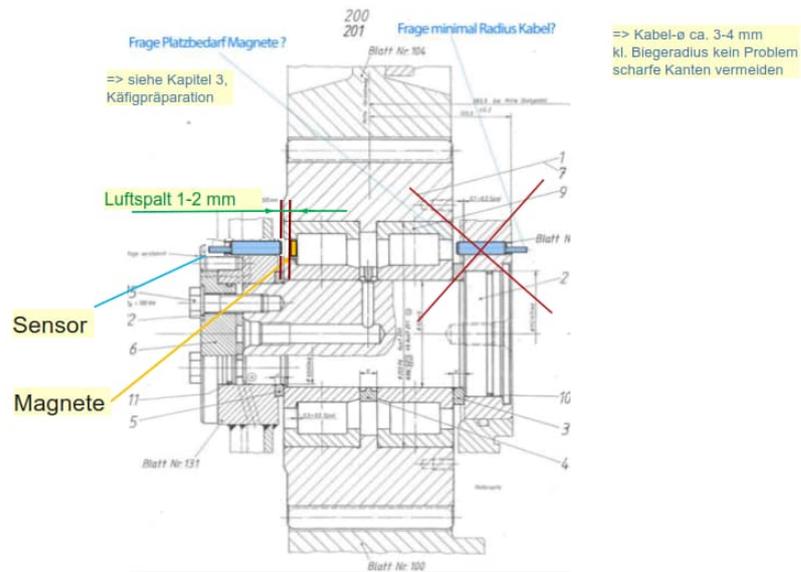


Abbildung 4: Übersicht des Messaufbaus für die Schlupfmessungen.

Die Schlupfmessungen zeigen, dass an den Lagern keine Hinweise auf Schlupf messbar sind. Ausserdem zeigen die Lager keine Schäden oder Materialermüdung. Weitere Details sind dem Bericht [3] des Lieferanten und dem Bericht der Befundung der Lager [4] zu entnehmen.

Die Ölsumpftemperaturmessungen dienten der Kontrolle und wurden nicht weiter ausgewertet.

Alle Wälzlager aus dem Versuch mit oder ohne aufgehobener Drehgestellverspannung wurden analysiert und die Messdaten bzgl. Schlupf ausgewertet.

Ergebnisse der Vorversuche

Die Analyse der Lager zeigen keine abweichenden Erkenntnisse im Vergleich mit den Lagern der verspannt betriebenen Loks. Die Ergebnisse wurden dokumentiert und durch die SBB freigegeben. Damit kann der Vorversuch erfolgreichen abgeschlossen werden und die Voraussetzungen für einen Probebetrieb mit aktivem Teillastbetrieb sind geschaffen.

4. Ergebnisse

Implementierung des Teillastbetriebs in der Fahrzeugleittechnik

Um den Teillastbetrieb erproben zu können, wird die Fahrzeugleittechnik der Re 460 angepasst. Die Anforderungen des Teillastbetriebs [5], [10] wurden durch die SBB zusammengestellt und ein kommerzielles Angebot bei den Lieferanten eingeholt. Nach Abschluss der kommerziellen Belange wurde eine Spezifikation der Änderung der Leittechnik [12] durch die Lieferanten erstellt und mittels Reviews der SBB die Erfüllung aller Anforderungen überprüft und für die Umsetzung freigegeben.

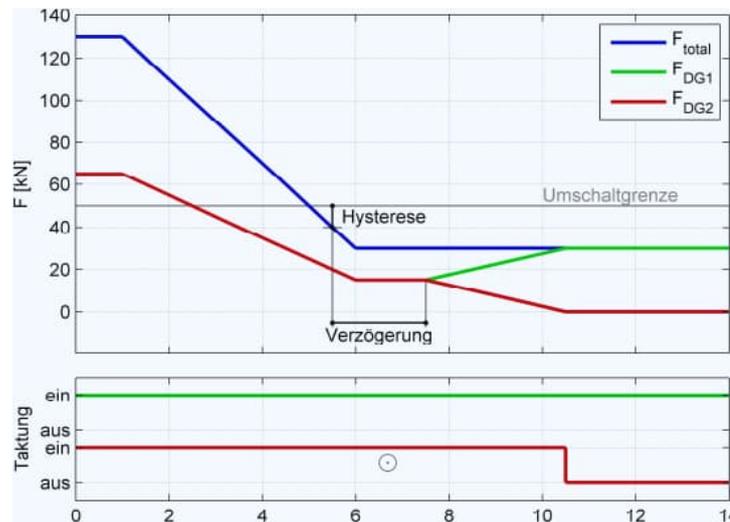


Abbildung 5: Zeitlicher Verlauf der Taktsperrung im Teillastbetrieb.

Aufteilung der Zu- oder Bremskraftanforderung: Beträgt die Zugkraftanforderung für die Lok mehr als 50 kN, wird die Zugkraft wie bisher je zur Hälfte von beiden Drehgestellen aufgebracht. Bei einer Zugkraftanforderung von weniger als 50 kN wird ein Stromrichter eines Drehgestells mittels Taktsperrung gesperrt (Abbildung 5), womit das verbleibende Drehgestell die geforderte Zugkraft aufbringen muss. Gleiches gilt bei einer Bremskraftanforderung. Die Aufteilung der Zugkraftanforderung im Teillastbetrieb ist in Abbildung 6 dargestellt.

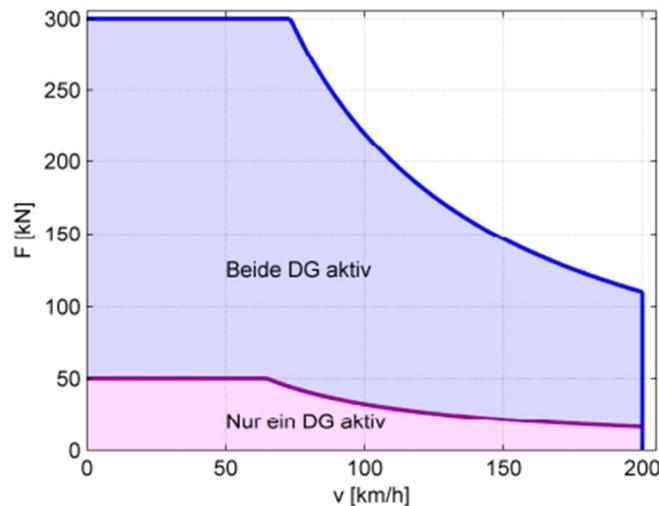


Abbildung 6: Aufteilung der Zug-/Bremskraftanforderung auf die Drehgestelle (DG).

Die Aktivierung des zweiten Antriebsstrangs, um aus dem Teillastbetrieb wieder zurück in den Vollastbetrieb zu wechseln, muss für verschiedene Betriebspunkte gesichert sein. Dies wird mit der sogenannten Antaktsteuerung realisiert. Um die Bedienung und das Bremsverhalten des Fahrzeugs nicht zu ändern, muss der Wechsel vom Teillast- in den Vollastbetrieb mit einer Reaktionszeit von unter einer Sekunde erfolgen. Die Reaktionszeit wird mittels Regressionstests nachgewiesen. Das dynamische Verhalten des Antaktvorgangs ist in Abbildung 7 dargestellt.

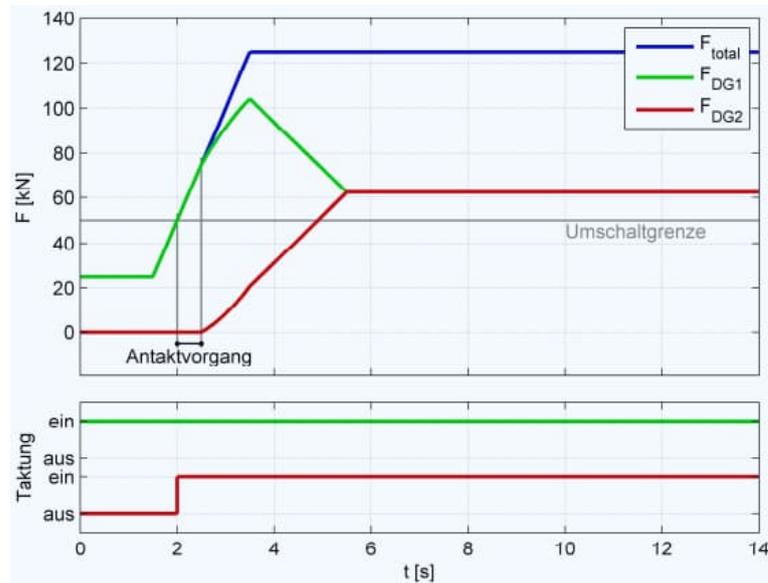


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf des Antaktvorgangs im Teillastbetrieb.

In Zusammenarbeit der SBB mit den Lieferanten wurde die angepasste Leittechnik den üblichen Typen- und Regressionstests unterzogen.

Veränderte Belastung des Antriebsstranges

Als Grundlage zur Beurteilung, wie sich die geänderte Belastung des Antriebsstranges auswirkt, wurden Zuglaufrechnungen für verschiedene Strecken durchgeführt [5]. Zur Darstellung der Häufigkeit der einzelnen Arbeitspunkte wurden Histogramme erstellt, wobei nur der Bereich zwischen -35 und 35 kN fein aufgelöst wurde, da nur der Betrieb mit kleinen Zugkräften im Zusammenhang mit Teillastbetrieb von besonderem Interesse ist. Für den Fall „mit Taktsperr“ (also Häufigkeit des aktiven Teillastbetriebs) wurde zudem der Arbeitspunkt „Motorumrichter gesperrt“ als zusätzliche Kategorie ausgewertet. Diese Kategorie ist als grüner Balken auf der Nulllinie dargestellt. Damit wird unterschieden, ob ein elektrisch geregeltes Moment von 0 kN bei taktendem Motorumrichter und aufmagnetisiertem Motor anliegt (enthalten im blauen Balken), oder ob der Motor abmagnetisiert und der Motorumrichter gesperrt ist (grüner Balken).

Die Analysen zeigen (Abbildung 8), dass mit Einführung des Teillastbetriebs nur etwa auf 10 bis 15 % der Strecke der Teillastbetrieb aktiv ist. Bei Doppeltraktion kann die Häufigkeit des Teillastbetriebs je nach Fahrweise gegenüber Einfachtraktion um bis zu 10% zunehmen.

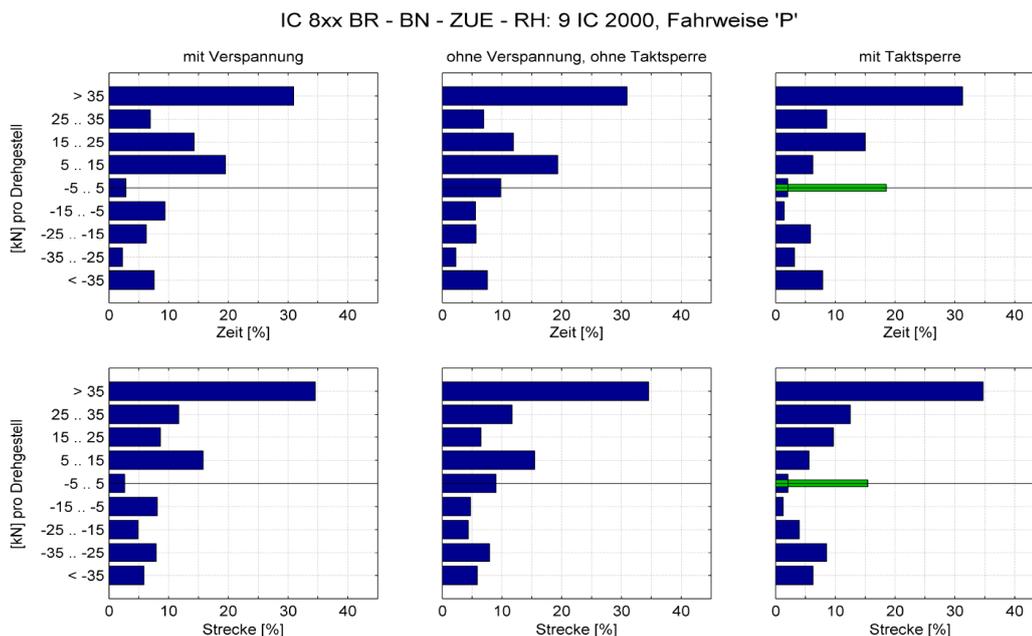


Abbildung 8: Veränderung der Belastung des Antriebsstrangs bei der Aktivierung des TLB für die Strecke Brig – Bern – Zürich – Romanshorn pro Fahrzeit [%] bzw. Wegstrecke [%]. Grüner Balken: Häufigkeit des Teillastbetriebs

In der etappierten Einführung des Teillastbetriebes wäre eine Laufleistungsabhängige Befundung von Vorteil gewesen. Im Vorfeld wurde eine Befundung nach 6-, 12- und 18- Monaten definiert. Leider sind die Informationen aus den Befundungsberichten nicht genügend für die Bewertung eines Rollouts. Daraus resultierte die Verschiebung der Umsetzungsentscheidung auf das Ende der Laufleistung der Lager, was 2023 erreicht werden wird und den Probetrieb entsprechend verlängert.

Etappierte Einführung des Teillastbetriebes - Probetrieb

Um mögliche negative Einflüsse auf die Mechanik und das Fahrverhalten der Lok Re 460 durch die Einführung des Teillastbetriebes vor der flottenweiten Einführung zu erkennen, wird für zwei Jahre ein Probetrieb zunächst auf drei Prototypfahrzeugen durchgeführt. Da zeitgleich mit der Erprobung des Teillastbetriebes eine umfassende Modernisierung der Lok Re 460 stattfindet, bei der viele Änderungen umgesetzt werden, ist eine Abgrenzung zu den Prototypen mit Teillastbetrieb wichtig. Auf den Prototypen wird daher direkt nach der Modernisierung der Teillastbetrieb aktiviert. Zu diesem Zeitpunkt sind die Drehgestelle der Loks frisch revidiert und damit auf einem definierten Ausgangszustand. Die Prototypen sind keiner permanenten Überwachung ausgesetzt. Jedoch wird ein Monitoring der fahrzeugbezogenen Störungsmeldungen der Instandhaltung durchgeführt.

Im Frühjahr 2021 werden weitere drei Loks Re 460 mit Teillastbetrieb ausgestattet.

Zum Zeitpunkt der Berichterstellung hatten die Loks mit aktivem Teillastbetrieb die folgende Kilometerleistung gefahren.

Tabelle 1: Laufleistung je Prototypfahrzeug.

Lok Re 460	Start des Teillastbetriebs	Laufleistung Stand 12.11.2021
460 009	05.09.2019	532'102 km
460 043	20.09.2019	542'346 km
460 101	04.10.2019	584'878 km
460 028	16.02.2021	149'729 km
460 079	22.02.2021	193'962 Km
460 115	08.03.2021	238'813 Km

Lagerbefundung nach Probebetrieb

Um mögliche Schäden des Antriebs durch den Teillastbetrieb zu erkennen, wurden laufleistungsabhängige Befundungen definiert, um die Zwischenradlager der Prototypen auf Schäden in den Laufflächen zu untersuchen. Die folgenden Laufleistungen wurden festgelegt.

1. Prototyp soll nach 6 Monaten befundet werden, nach etwa 15% der Laufleistung
2. Prototyp soll nach 12 Monaten befundet werden, nach etwa 25% der Laufleistung
3. Prototyp soll nach 18 Monaten befundet werden, nach etwa 50% der Laufleistung

Zu einer Befundung gehören der Ausbau und die optische Oberflächenanalyse der Zwischenradlager samt ihrer Wälzkörper. Alle vier Lager eines Drehgestells werden befundet, es werden also vier von insgesamt acht Lager einer Lokomotive befundet.

Die erste Befundung der Lokomotive 460 043 findet am 05.05.20 statt, nach einer Laufleistung von ungefähr 160'000 km. Gemäss der Befundungsberichte [6] werden kleine Oberflächenbeschädigungen an den Lagern gefunden, welche zunächst unkontrollierten Stromdurchgängen zugeordnet werden. Eine detailliertere Analyse [7] zeigte jedoch, dass es sich um kleine Schlupfspuren handelt.

Mit der zweiten Befundung der vier Lager der Lokomotive 460 009 am 02.09.2020 nach einer Laufleistung von ca. 240'000 km verdeutlichen sich die Schlupfmerkmale an den Lagern. Der Befundungsbericht [8] zeigt, dass der Teillastbetrieb zu höherer Beanspruchung der Lager führt. Abbildung 9 zeigt deutlich eine 3 cm lange Spur in der Lastzonen auf dem Innenring des Zwischenradlagers des zweiten Vorläufers. Unter dem REM sind Eindrücke mineralischer, harter Partikel und Verschleisspuren erkennbar.

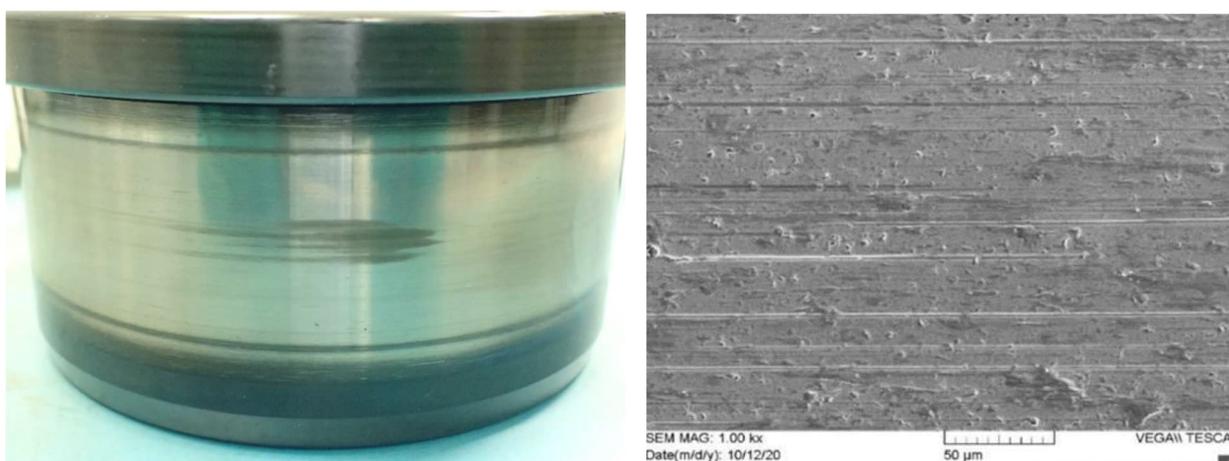


Abbildung 9: Lastzonenbereich des Innenrings des Zwischenradlagers nach der zweiten Befundung.

Abbildung 10 zeigt je einen Axial- und Umfangsschliff des Lagers der zweiten Befundung, wobei auch Erwärmungszonen bis zu 14 µm ersichtlich werden. Diese werden auf Gleitspuren zurückgeführt.

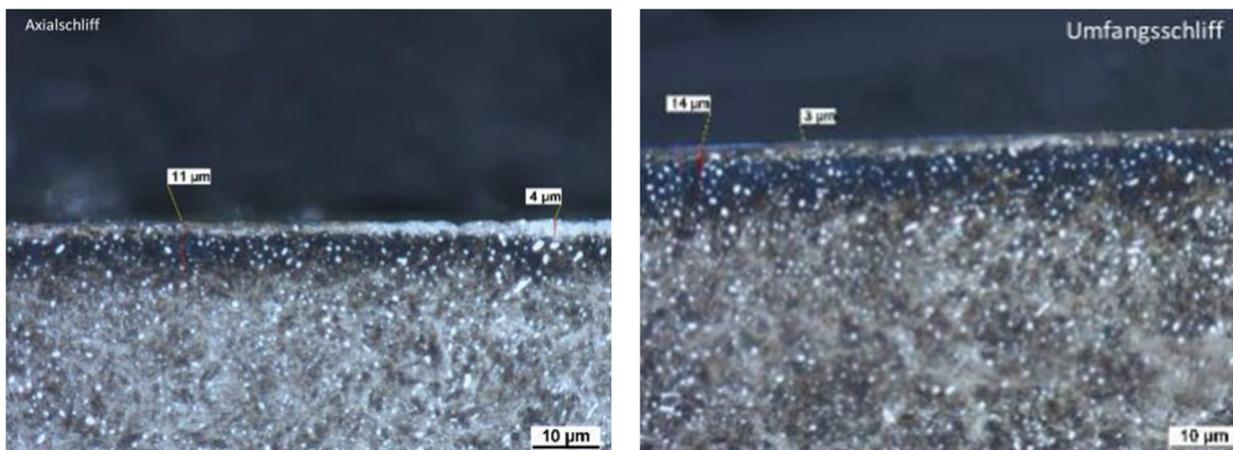


Abbildung 10: Erwärmungszonen im Axial- und Umfangsschliff.

Aufgrund der beiden ersten Befundungen wird entschieden, die dritte Befundung erst nach Ausfahren eines ganzen Revisionszyklus vorzunehmen, also nach 900'000 km Laufleistung.

Nachweis der Aktivierungshäufigkeit des Teillastbetriebs

Im Rahmen einer weiteren Analyse [13] wird auf der Lok Re 460 117-5 vom 29.11.2021 bis zum 31.01.2022 der Teillastbetrieb aktiviert. Die Lok verkehrt im kommerziellen Betrieb und legt in dieser Zeit über 40'000 km zurück.

Die Auswertung ermittelt, in welchen Anteilen keiner, einer oder beide Umrichter der Lok sowohl bezogen auf die Fahrzeit als auch auf die zurückgelegte Strecke ausgeschaltet werden. Über alle Fahrten gesehen ist der Teillastbetrieb auf die beiden Drehgestelle gleichmässig verteilt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2: Aktivierungshäufigkeit des Teillastbetriebs.

Parameter	Anteil an Gesamtdistanz	Anteil an Gesamtfahrzeit
Nur Umrichter 1 im Teillastbetrieb	16.3 %	15.7 %
Nur Umrichter 2 im Teillastbetrieb	16.2 %	15.9 %
Beide Umrichter 1 und 2 im Teillastbetrieb	5.7 %	5.3 %

Nachweis der Energieeinsparung

Die Energieeinsparung wird anhand der Daten der Energiemesssysteme der Loks durchgeführt. Diese Daten werden auch für die Verrechnung der Energiekosten verwendet. Das Energiemesssystem misst die gesamte durch den Stromabnehmer aufgenommene Energie des Zuges. Dabei werden Fahrten von Oktober 2019 bis November 2021 verwendet, die in Einzeltraktion erfolgten und länger als 5000 m waren. Die Messwerte werden in sogenannte korrigierte spezifische Verbräuche umgerechnet, wobei die Anzahl Wagen, Höhenunterschiede und die Belegung berücksichtigt werden. Es werden sechs Prototypen mit den übrigen modernisierten Loks Re 460 in den gleichen Monaten auf den gleichen Strecken verglichen [11].

Die Analyse wurde mit einem «Linear Mixed Effect Modell» erstellt und mit dem Programm Tableau visualisiert. Um eine möglichst gute Abschätzung der Einsparungen des Teillastbetriebs zu erhalten, werden potenzielle Einflussgrößen herausgerechnet, indem die entsprechenden Größen als zusätzliche Variablen im Modell einbezogen werden. So können die Einflüsse von Monat und Jahr, der Distanz, der Fahrzeugnummer, der Fahrten und der Masse herausgerechnet werden.

Der mittlere spezifische Energieverbrauch wird demnach durch den Teillastbetrieb um 0.29 Wh/Btkm reduziert, was bei einem resultierenden Verbrauch von 19.02 Wh/Btkm einer prozentualen Einsparung von 1.5 % entspricht.

In der Abbildung 11 ist der korrigierte spezifische Verbrauch der Prototypen im Vergleich zu den modernisierten Fahrzeugen je Monat abgebildet.



Abbildung 11: Monatsweiser Vergleich des korrigierten spezifischen Energieverbrauchs in Wh/Btkm der Prototypen mit Teillastbetrieb (orange) gegenüber den modernisierten Fahrzeugen (blau). In der rechten Spalte in grau sind die Anzahl Fahrten je Monat dargestellt.

Mit einem statistischen Test wird überprüft ob die ermittelten Einsparungen nicht auf Zufall basieren. Die beiden Häufigkeitsverteilungen werden in einem ersten Schritt visualisiert und in einem zweiten Schritt einem Test unterzogen.

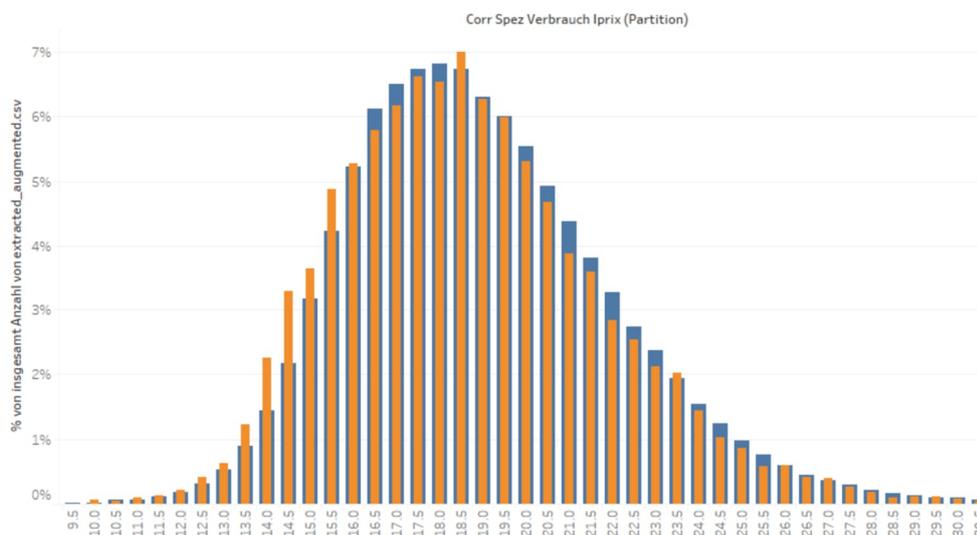


Abbildung 12: Vergleich der Häufigkeit des spezifischen Verbrauchs aller Fahrten mit aktivem Teillastbetrieb (orange) und ohne (blau) Teillastbetrieb.

Anhand des Wilcoxon Rangsummen-Tests (Abbildung 12) konnte statistisch nachgewiesen werden, dass zwischen den Häufigkeitsverteilungen des spezifischen Verbrauchs mit Teillastbetrieb und ohne Teillastbetrieb ein signifikanter Unterschied vorliegt. Somit gilt als erwiesen, dass die Optimierung im Betrieb Wirkung zeigt und Energie spart.

Um die absolute Energieeinsparung in Gigawattstunden pro Jahr (GWh/a) zu ermitteln wird zunächst der Energiebedarf der Fahrzeuge vor der Optimierung berechnet. Aus der Applikation I-Prix sind die gefahrenen Btkm bekannt. Multipliziert man diese mit dem gewichteten höhenkorrigierten spezifischen Verbrauch vor der Optimierung, erhält man den Energiebedarf der Fahrzeuge ohne Teillastbetrieb. Mit dem eruierten Prozentsatz von 1.5 % lässt sich die Energieeinsparung der Gesamtflotte in GWh/a berechnen.

Im Basiszeitraum 2019 wurden 17.3 Mrd. Btkm mit allen Loks Re 460 gefahren. Wären bereits sämtliche Loks Re 460 modernisiert, hätten diese 333.5 GWh Energie dabei verbraucht. Mit einer Verbrauchsreduktion von 1.5 % ergibt sich damit eine Energieeinsparung von 5.0 GWh pro Jahr für alle 119 Loks Re 460 der SBB.

Tabelle 3: Einsparung durch Teillastbetrieb, Hochrechnung auf ganze Fahrzeugflotte Re 460.

Basiszeit- raum	Fahrten [Btkm]	Korr. spez. Ver- brauch ohne TLB [Wh/Btkm]	Energiever- brauch ohne TLB [GWh]	Einspa- rung [%]	Einspa- rung [GWh]
2019	17'268'119'614	19.31	333.4	1.5	5.0

5. Diskussion

Prototyperstellung

Mit einer theoretischen Analyse zur Häufigkeit des Teillastbetriebs wurde abgeschätzt, wie oft die Getriebe der Re 460 dem potenziell kritischen lastfreien Betrieb ausgesetzt werden. Die Voraussetzungen für den lastfreien Betrieb waren mit der Einführung der brünierten Lager seit mehreren Jahren vorhanden. Mit der Implementierung des Teillastbetriebs in der Fahrzeugsteuerung konnte mit diesem Projekt ein Probetrieb zunächst von drei Loks und nach zwei weiteren Jahren auf drei weiteren Loks gestartet werden. Bei den Typentests und begleiteten Fahrten wurde nachgewiesen, dass der Teillastbetrieb zu einer Umverteilung der Zugkräfte der Drehgestelle führt.

Lagerbefundung

Die Auswirkungen des lastfreien Betriebs wurden mit Lagerbefundungen überprüft, wobei Spuren von erhöhtem Verschleiss nachgewiesen wurden. In Diskussion mit dem Lieferanten der Lager wurde daher festgelegt, dass eindeutige Aussagen zur Verschleissentwicklung der Lager erst nach Durchlaufen der gesamten Laufleistung erfolgen können. Da ein Revisionszyklus für das Getriebe und damit der Lager bei 900'000 km liegt, wurde entschieden, die dritte Befundung der Lager am Ende des Revisionszyklus der Getriebe vorzunehmen [9].

Aktivierungshäufigkeit des Teillastbetriebs

Die Fahrten im betrachteten Zeitraum wurden in Hinblick auf Teillastbetrieb analysiert. Dabei wurden die Umrichter der beiden Drehgestelle getrennt betrachtet. Die Auswertung wurde für über 412 Fahrten ausgeführt.

Die Übersicht der Ergebnisse zeigt, dass der Anteil mit aktivem Teillastbetrieb eines Umrichters für beide Drehgestelle ähnlich sind und über alle Fahrten betrachtet ungefähr 16 % betragen. Der Anteil mit aktivem Teillastbetrieb auf beide Umrichter gleichzeitig beträgt ungefähr 6 %.

Die Anteile Teillastbetrieb auf einem Stromrichter können jedoch zwischen einzelnen Fahrten trotz ähnlicher abgefahrener Strecke zwischen 5 % und 30 % variieren, was auf eine hohe Abhängigkeit der Aktivierung des Teillastbetriebs von den Streckenverhältnissen, dem allgemeinen Betriebslage und der Fahrweise des Lokpersonals hinweist.

Insgesamt werden die Abschätzungen aus [5], Kapitel 5 bestätigt, siehe auch Abschnitt «Veränderte Belastung des Antriebsstranges» in diesem Bericht. Die dort ermittelten theoretisch erwartbaren Anteile Teillastbetrieb in Bezug auf Distanz und Fahrzeit liegen im gleichen Bereich wie in der Auswertung der Messungen der tatsächlichen Implementierung auf dem Fahrzeug [13].

Energieeinsparung

Es konnte eine Energieverbrauchsreduktion von 1.5 % oder 5 GWh/a nachgewiesen werden, sollte der Teillastbetrieb für alle 119 Loks Re 460 der SBB zum Einsatz kommen. Damit konnten die Erwartungen der frühen Studie [1] nicht erfüllt werden, jedoch wurde diese noch auf Basis des ursprünglichen Umrichters der Re 460 erstellt. Zieht man in Betracht, dass der Energieverbrauch der Lok Re 460 durch den neue Antriebsumrichter bereits um 8.2 % reduziert wird, so ist die nachgewiesene Energieeinsparung durch den Teillastbetrieb nachvollziehbar.

6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Technisch konnte nachgewiesen werden, dass der Teillastbetrieb der Re 460 wie spezifiziert funktionieren und auch mit der erwarteten Häufigkeit auf der Lok aktiviert wird. Die Lagerbefundungen sowie der bisherige Verlauf des Probetriebes konnten bisher keine kritischen Faktoren offenlegen, die einem Rollout auf die ganze Flotte im Wege stehen würden. Die Wirtschaftlichkeit des Teillastbetriebs wird mit dem Nachweis der Energieeinsparung untermauert.

Einzig die letzte Befundung der Lager muss bis zum Erreichen der vollen Laufleistung im Sommer 2023 abgewartet werden. Bis dahin wird das Monitoring der Prototypen aufrechterhalten, um mögliche Langzeitschäden festzustellen. Der Teillastbetrieb ist heute bereits als Softwareoption auf allen Re 460 installiert und kann nach einer positiven Entscheidung rasch per SW-Bit aktiviert werden.

Eine abschliessende Empfehlung für die Umsetzung des Teillastbetriebs auf der ganzen Flotte der Re 460 wird damit im Sommer 2023 erwartet.

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

TLB	Teillastbetrieb
DG	Drehgestell
DGV	Drehgestellverspannung
REM	Rasterelektronenmikroskop
EMS	Energiemesssystem

Literaturverzeichnis

- [1] M. Lerjen: **Energieverbrauch Drehgestellverspannung Re460**, Dokument 14-0529, Potentialanalyse
- [2] MB Diagnostik AG: **Vibrationsmessungsbericht Re460**
- [3] W. Preisig: **Schlupfversuche bei der Lokomotive Re460**, FAG Präsentation
- [4] H. Fuchs: **Untersuchungsbericht Aufhebung der DG Verspannung**, Untersuchungsbericht-Nr.: 242165217
- [5] M. Lerjen: **Spezifikation Teillastbetrieb Re 460**, Dokument 16-0649
- [6] W. Preisig / S. Maso: **Befundungsbericht 460043 Zusammenfassung / optische Lageruntersuchung von 4 Lager aus Teillastbetrieb Re460**, 15.06.2020
- [7] H. Fuchs: **Befundungsbericht 460 043**, Untersuchungsbericht Nr. 800042693_RevB
- [8] H. Fuchs: **Befundungsbericht 460 009**, Untersuchungsbericht Nr. 800047011
- [9] O. Sylejmani: **Abstimmung SBB: Weiteres Vorgehen Teillastbetrieb Re460**,
- [10] M. Lerjen: **Software-Anforderungsspezifikation Taktsperr im Teillastbetrieb Re 460 Refit**, emkamatik 17-0718
- [11] C. Heiniger: **Wirkungsnachweis Teillastbetrieb Re460**, SBB
- [12] R. Khosrofar: **SW Anforderungsspezifikation Re460 Teillastbetrieb**, Bombardier
- [13] T. Vennemann, Re 460 Teillastbetrieb **Auswertungsbericht Einsatzhäufigkeit Teillastbetrieb**, enotrac
