Der Schienenlebenszyklus im Fahrweg – eine Ende-zu-Ende-Analyse

Die genaue Analyse des Schienenlebenszyklus vom Einbau bis zum Ausbau erlaubt es, gezielt Strategien, Maßnahmen und Technologien zum Einsatz zu bringen, mit dem Fokus auf maximale Verlängerung der Schienenlebensdauer.

Dipl.-Ing. Dr. mont. Richard Stock
Global Head of Rail Solutions
rstock@plausa.com

1. Einleitung

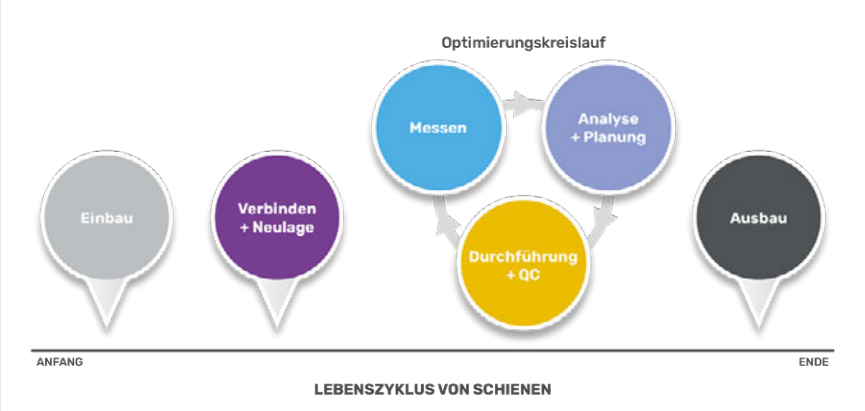
Der Begriff „Ende-zu-Ende" (abgekürzt auch E2E) ist in der Welt der Telekommunikation weit verbreitet. Unter Ende-zu-Ende-Verschlüsselung beim Chat-Verkehr versteht man eine Verschlüsselung der übertragenen Nachrichten über den gesamten Kommunikationsweg, von Gesprächspartner 1 zu Gesprächspartner 2. Eine E2E-Betrachtung des Lebenszyklus von Schienen deckt den gesamten Zeitraum vom Einbau der Schiene bis zum Ausbau am Ende der Nutzungsdauer ab. Die prinzipiellen Stationen im Lebenszyklus von Schienen sind in Abbildung 1 dargestellt.

2. Am Beginn des Schienenlebenszyklus

Das Lebenszyklusmanagement für Schienen beginnt schon vor dem eigentlichen Einbau mit der Wahl der geeigneten Schienengüte. Neben einer Normalgüte stehen mehrere wärmebehandelte Schienengüten zur Auswahl, die einen verbesserten Widerstand gegen Verschleiß und Rollkontaktermüdung bieten. Entsprechend kann schon zu diesem Zeitpunkt der Grundstein für maximale Lebensdauer gelegt werden. Im nächsten Schritt müssen die Schienen zum Einbauort gebracht werden. Langschienen mit Produktionslänge von 120 m werden in stationären Schweißwerken manchmal zu Bändern mit vielfacher Länge verschweißt. Für den Transport zur Baustelle und das Abladen kommen Schienenladezüge [1] zum Einsatz. Mit solchen Systemen ist gewährleistet, dass es in keiner Phase zu unsachgemäßer Handhabung der Schienen kommt und Beschädigungen der Schienenoberfläche vermieden werden.

Im nächsten Schritt muss die Schiene im Gleis installiert werden. Hier kommen spezielle Einbau- und Umbauzüge zum Einsatz. Diese arbeiten kontinuierlich im Fließbandverfahren [2] und installieren/tauschen neben den Schienen auch andere Fahrwegkomponenten (Plasser ConstructionLiner, Plasser AssemblyLiner). Hier liegt das Augenmerk darauf, dass die Schienen möglichst schonend manipuliert werden, um etwaige Beschädigungen zu vermeiden.

Als Teil des Einbaus müssen die (Lang-) Schienen auch verbunden werden. Stand der Technik ist es, ein lückenlos verschweißtes Gleis zu erzeugen. Ziel einer Schweißung ist es, eine Schienenverbindung zu erzeugen, die möglichst gleiche Eigenschaften wie die verbundenen Schienen aufweist. Vorzeitige Schädigung auf den Schweißstößen führt unweigerlich zu einer Verkürzung der Lebensdauer der verbundenen Schienenstränge. In Europa kommen zwei Schweißtechnologien zur Anwendung, das aluminothermische Verfahren und das Abbrennstumpfschweißen. Das Thermitschweißen benötigt keine externe Energiequelle, erfordert jedoch aufwendige, manuelle Vorbereitungs- und Nachbereitungstätigkeiten, was die Fehleranfälligkeit steigert. Das Abbrennstumpfschweißen ist ein automatisiertes Verfahren, das über den elektrischen Widerstand die Schienenenden erhitzt und mittels Stauchschlag verschweißt. Der Prozess benötigt eine externe Energiequelle und wird sowohl stationär in Schweißwerken als auch mobil mit Trägerfahrzeugen im Gleis verwendet. Moderne Schweißmaschinen wie der Plasser FlashWelder (Abbildung 2) automatisieren den gesamten Schweißprozess [3]. Nach jedem Schweißvorgang



1: Schematische Darstellung des Ende-zu-Ende-Lebenszyklus von Schienen

© DVV Media Group GmbH

2: Die Schweißmaschine Plasser FlashWelder

wird ein Schweißprotokoll erstellt, das eine direkte Aussage über die Qualität und den Erfolg der Schweißung zulässt. Generell ist die Schweißnaht beim Abbrennstumpfverfahren kleiner, bei gleichzeitig erhöhter Qualität und Reproduzierbarkeit im Vergleich zum Thermitverfahren.

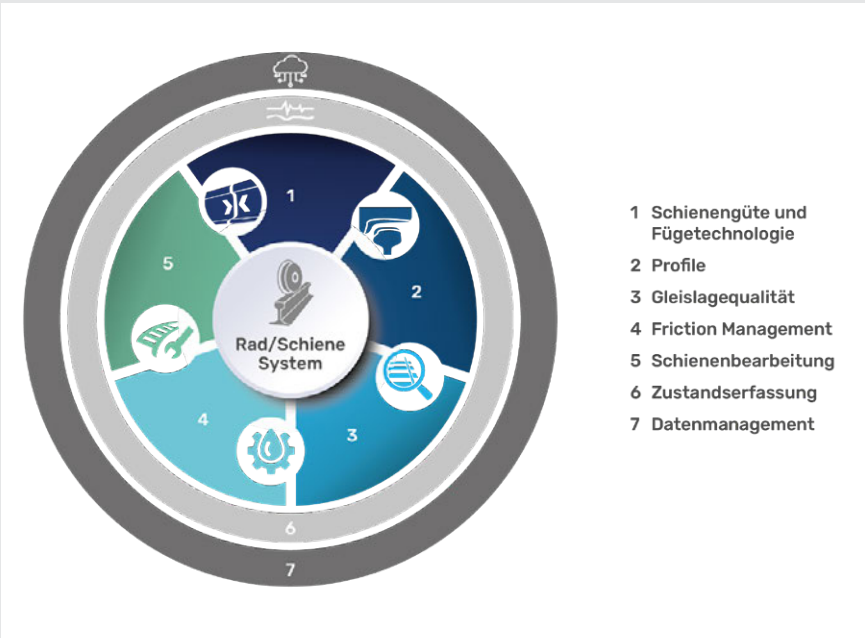
Sind die Schienen im Gleis installiert, ist zeitnah eine Bearbeitung der Neulagen notwendig. Dabei werden (hauptsächlich mittels Schleifen – siehe später) die randentkohlte Schicht (auch Walzhaut genannt) entfernt, diverse oberflächliche Verletzungen (vom Einbau) beseitigt und bei Bedarf auch das Schienenprofil angepasst. So wird initial ein idealer und fehlerfreier Schienenzustand hergestellt.

3. Messdaten und intelligente Auswertung

Mit der ersten Zugüberfahrt beginnt der eigentliche Lebenszyklus. Abhängig von den Belastungen entsteht nach einiger Zeit Schienenschädigung in Form von plastischer Verformung, Verschleiß, Rollkontaktermüdung (Risse) und thermischer Schädigung. Ebenso kann es zu Ermüdungsdefekten im Inneren der Schiene kommen. Diese Schädigungen verkürzen die Schienenlebensdauer und erfordern entsprechende Maßnahmen im Rahmen des Optimierungskreislaufs: Auf die messtechnische Erfassung des Schienenzustands folgt die Auswertung und Analyse der Messdaten, um entsprechende Strategien und Maßnahmen zu planen. Nach deren Durchführung wird der Schienenzustand im Rahmen der Qualitätskontrolle wieder erfasst und der Kreis schließt sich. In weiterer Folge werden die Schritte Messen – Planen – Instandhalten – Messen in kontinuierlicher Abfolge wiederholt. Dieser Zyklus erlaubt es auch, frühzeitig auf Veränderungen im System zu reagieren sowie Maßnahmen und Strategien anzupassen. Dem Infrastrukturbetreiber steht eine Reihe von Werkzeugen und Technologien zur Verfügung (Abbildung 3), die ihn bei Implementierung und Durchführung dieses Optimierungszyklus unterstützen.

4. Messtechnik und Datenmanagement

Bevor entsprechende Optimierungsmaßnahmen geplant und durchgeführt werden können, muss der Zustand der Schienen in regelmäßigen Abständen erfasst werden [4]. Das Querprofil der Schiene oder auch die Schienenform kann entweder taktil oder mittels Laser gemessen werden. Die taktile Messung eignet sich nur für stationäre (Hand-) Messungen, während mit Lasertechnologie bis 200 km/h schnell gemessen werden kann. Auch bei der Messung von Längsprofil oder Schienenwelligkeit kommen taktile oder berührungslose Systeme zum Einsatz. Taktile Systeme erzielen höhere Genauigkeit, sind aber auf maximal 25 km/h beschränkt. Berührungslose Systeme auf Laserbasis weisen geringere Genauigkeiten auf, sind dafür je nach System für Geschwindigkeiten bis 250 km/h einsetzbar. Zum Detektieren von Oberflächeneffekten (Risse, flächige Defekte, Walzzeichen…) kommen hochauflösende, KI-gestützte Videoinspektionssysteme zum Einsatz. Oberflächenrisse können mittels Wirbelstromprüfung oder magnetischer Streuflussprüfung charakterisiert werden. Wirbelstromtechnologie lässt sich für Geschwindigkeiten bis zu 80 km/h verwenden und misst die Länge eines Risses. Die eigentliche Risstiefe (maximal 3 bis 5 mm) muss über einen angenommenen (unbekannten) Winkel berechnet werden. Fakto-



3: Maßnahmen und Technologien zur Optimierung des Schienen-Lebenszyklus

© DVV Media Group GmbH

4: Links: Schleifzug RR24MB der Firma Speno. Rechts: Fräse ROMILL Mainline 2 der Firma Robel

ren wie Schienengüte oder Sensorabstand zur Oberfläche beeinflussen das Messergebnis. Die magnetische Streuflussprüfung erlaubt direkte, materialunabhängige Bestimmung der Schädigungstiefe (bis 7 mm), ist jedoch auf maximal 25 km/h Prüfgeschwindigkeit beschränkt [5]. Innenfehler im Schienenkopf, im Steg und im zentralen Bereich des Schienenfußes können mittels Ultraschall bis 80 km/h detektiert werden. Aufgrund physikalischer Beschränkungen eignet sich diese Prüftechnik nicht für oberflächennahe Fehler bis ca. 7 mm Tiefe. Diese Messsysteme können in Instandhaltungsmaschinen, Messfahrzeugen [6], Messdraisinen etc. integriert oder als Handmessgeräte ausgeführt sein und verfügen auch über entsprechende Analyse- und Darstellungs-Softwareanwendungen. Da die Daten von unterschiedlichsten Messsystemen inklusive Verortung auch mit Daten des Infrastrukturbetreibers (z. B. GIS-Informationen, Anlagenverzeichnis) kombiniert werden müssen, sind Systeme notwendig, die sichere Datenübertragung und generelle Datensicherheit gewährleisten, Datenintegrität sicherstellen, Daten aus verschiedensten Quellen miteinander verknüpfen und intelligente Auswertungen sowie benutzerfreundliche Visualisierungen anbieten. Darüber hinaus sollen aus diesen Analysen entsprechende Arbeitsanweisungen generiert werden, um sie an Instandhaltungsmaschinen übermitteln zu können [7].

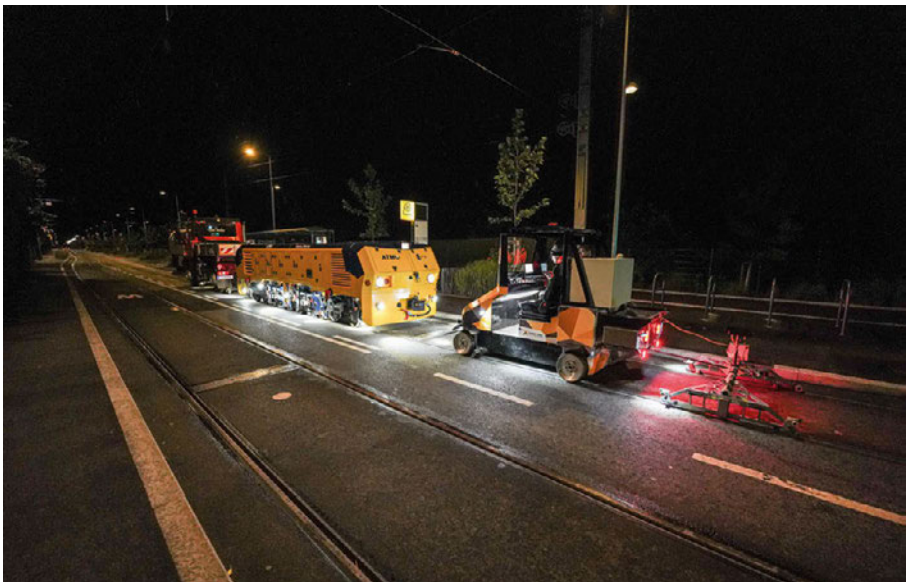
5. Werkzeuge zur Lebenszyklusoptimierung

Die eigentlichen Werkzeuge zur Optimierung des Schienenlebenszyklus lassen sich in fünf Kategorien unterteilen (Abbildung 3). Die Kategorie Schienengüte und Fügetechnologie wurde schon behandelt. Diese Entscheidungen zu Beginn des Lebenszyklus beeinflussen nachhaltig die Lebensdauer der Schiene und den Optimierungszyklus.

Die nächste Kategorie beschäftigt sich mit der Optimierung der Rad- und Schienenprofile. Dadurch können Kontaktspannungen zwischen Rad und Schiene reduziert und der Fahrzeuglauf in Gerade und Bogen (dynamische Kräfte) optimiert werden.

Die Gleislagequalität hat maßgeblichen Einfluss auf die Schienenlebensdauer und umgekehrt. Fehlerfreie Schienenoberfläche und hohe Gleislagequalität unterstützen sich gegenseitig im positiven Sinne. Sobald einer dieser beiden „Partner" unter einen gewissen Qualitätslevel sinkt, wird auch der andere Partner negativ beeinflusst, selbst wenn er sich in fehlerfreiem Zustand befindet.

Das Thema „Friction Management" zielt darauf ab, einerseits zu hohe Reibwerte (beschleunigte Schädigung – hohe Kontaktspannungen) entsprechend zu reduzieren, andererseits zu geringe Reibwerte zu beseitigen. An der Fahrkante im engeren Bogen wird versucht, den Reibwert mittels eines Schmiermittels auf ein Minimum zu begrenzen, um Verschleiß möglichst gering zu halten. Auf der Lauffläche ist ein mittlerer Reibwert (0,3 bis 0,4) nötig, um sicheres Anfahren und Bremsen zu gewährleisten. Hier werden hohe Reibwerte auf Laufflächen mit Hilfe eines Konditionierungsmittels auf den gewünschten mittleren Wert reduziert (Schädigungsreduzierung) [8]. Im Falle von zu geringem Reibwert aufgrund von Oberflächenkontamination (z. B. Laub) können



5: Integrierter Arbeitseinsatz – ATMO mit ROSPECT Messfahrzeug

© DVV Media Group GmbH

Traktionsverbesserer (Traktionssand etc.) in den Rad-Schiene-Kontakt eingebracht oder auch die Schiene mit speziellen Verfahren gereinigt werden. Eine innovative Lösung befreit die Schienenoberfläche effizient von jeder Kontamination mittels Hochdruckwasserstrahl (bis zu 4000 bar) und beigemengtem Abrasivmaterial [9].

Die letzte Kategorie betrifft die Instandhaltung von Schienen. Das ist das einzige Werkzeug, das die Schienenlebensdauer nicht nur verlängert, sondern auch bestehende Schädigung entfernen kann [10]. Klassisches Schienenschleifen verwendet rotierende Topfschleifsteine, um Material entlang einer Facette (Schleifsteinspur) von der Schienenoberfläche zu entfernen. Das Querprofil wird flexibel durch entsprechende Winkelanordnung mehrerer Schleifsteine als Polygonzug erzeugt. Die Schleiftechnologie eignet sich besonders für geringen bis mittleren Materialabtrag (präventive und korrektive Strategien) – Abbildung 4 links. Das Schienenfräsen als zweite Haupttechnologie entfernt Schienenmaterial über einen rotierenden Schneidprozess. Das Schienenprofil ist über die Form des Schneidwerkzeuges (Messerkopf bestückt mit Hartmetallplättchen) definiert. Damit können sehr große Materialabträge in einer Überfahrt erzielt werden, wodurch sich diese Technologie besonders für korrektive oder regenerative Strategien eignet – Abbildung 4 rechts. Speziell für den urbanen Bereich kommen auch andere Verfahren zum Einsatz wie die Blocksteintechnologie [11] im Rutscherstein- oder oszillierenden Betrieb. Damit lässt sich einerseits die Lauffläche präventiv auf hohem Qualitätsniveau halten, andererseits können auch korrektiv Schlupfwellen und Riffel entfernt werden (Abbildung 5). Neue Entwicklungen erlauben eine automatisierte Lösung zur lokalen Defektreparatur von Schienen und Herzstücken [12]. Der gesamte Reparaturvorgang wird automatisiert durchgeführt, ohne dass das Gleis betreten werden muss. Das erhöht die Prozesssicherheit und trägt auch aktuellen demografischen Trends Rechnung.

6. Das Ende ist der Anfang

Ist das Verschleiß- oder Schädigungslimit der Schienen nach vielen Jahren (und multiplen Optimierungszyklen) erreicht, werden sie ausgebaut und durch neue Schienen ersetzt, womit der nächste Lebenszyklus beginnt. Ebenso können andere Gründe wie Schienen- oder Schweißbruch sowie generelle Erneuerung des Fahrweges zu (vorzeitigem) Tausch führen. Auch für den Ausbau der Schienen kommen die anfangs erwähnten Umbauzüge zum Einsatz. Nach dem Ausbau werden Schienen als hochwertiger Schrott dem Recycling-Prozess zugeführt. Mit diesem letzten Schritt endet der Lebenszyklus einer Schiene. •

Literatur

[1] Flämig, J.: Schienenlogistik auf neuem Sicherheitsniveau. EI – Der Eisenbahningenieur, Oktober 2024, S. 25–29.

[2] Misar, S.; Hansmann, F.: Bahnbau im ökologischen Wandel – grüner Übergang in der Gleisinstandhaltung. ZEVrail, Jahrgang 148, Ausgabe 01/02, 2024.

[3] Lottersberger, F.; Antony, B. et al.: Weiterentwicklung beim Schienenschweißen: Die Plasser FlashWelder-Serie. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), Nr. 4, April 2023, S. 50–54.

[4] Stock, R.; Obexer, C.; Herter, R.: Schienenzustandserfassung für effiziente Instandhaltungsplanung. ZEVrail, Jahrgang 148, Ausgabe 05, 2024.

[5] Stock, R.; Herter, R.: Neue Messtechnologie zur Bestimmung rissartiger Oberflächenfehler. EI – Der Eisenbahningenieur, September 2022, S. 98-101.

[6] Obexer, C.: Neues Leistungsniveau für die Inspektion der Bahninfrastruktur. EI – Der Eisenbahningenieur, Dezember 2023, S. 30–33.

[7] Brennsteiner, A.; Stuntner, B.: Nahtloser Datenfluss: intelligente Vernetzung von Gleisbaumaschinen und Backoffice. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), Nr. 4, April 2024, S. 38–42.

[8] Stock, R.; Beck, M.: Reibwertoptimierung zwischen Rad und Schiene – ein nachhaltiger Lösungsansatz für das Schlupfwellenproblem. ZEVrail, Jahrgang 138, Ausgabe 11/12, 2014

[9] Stock, R.; Mateo, J.: Effizienter und sicherer Betriebsablauf durch saubere Schienen. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), Nr. 11, November 2024, S. 54–57.

[10] Stock, R.: Vom Wettbewerb zur Synergie – Schienenschleifen und Schienenfräsen. EI – Der Eisenbahningenieur, Juli 2024, S. 8–12.

[11] Stock, R.; Aulinger, F. et al.: Schienenpflege für urbane Anwendungen. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), Nr. 6., Juni 2025, S. 28–32.

[12] Koch, E.; Reiter, M. et al.: Automatisierte Weicheninstandhaltung für einen hochverfügbaren Fahrweg, EI – Der Eisenbahningenieur, September 2023, S. 50–54.

Summary

The rail life cycle in the track - an end-to-end analysis

Precisely analysing the rail life cycle from installation to removal makes it possible to implement targeted strategies, measures and technologies with a focus on maximising rail service life.

© DVV Media Group GmbH