



Quelle: <https://www.zevrail.de/artikel/squats-studs-und-aehnliche-defekte-ein-ueberblick>

2023 (Jahrgang 147) / Ausgabe 05 / Sprache: Deutsch

Squats, Studs und ähnliche Defekte – ein Überblick

Autor: Dipl.-Ing. Dr. mont. Richard Stock

Zusammenfassung

Squat-Defekte sind Schienenfehler, erkennbar an einer charakteristischen Nierenform mit V-Riss an der Schienenoberfläche. Dieser Defekt wurde in den 1970er Jahren speziell in England vertiefend erforscht. Ursache dafür sind Beschädigungen durch Rollkontaktermüdung, die durch plastische Scherverformung des Mikrogefüges an der Schienenoberfläche entstehen. Diese Defekte können durch Kombination von präventiver Schieneninstandhaltung und Einsatz von Schienengütern mit höherer Festigkeit und Härte vermieden werden. Seit den 1990er Jahren tritt dieser Defekt wieder vermehrt auf. Genaue Analysen haben gezeigt, dass bei neuen Squats andere Mechanismen ausschlaggebend sind. Zur Erläuterung der Komplexität dieses Defekts, Stud genannt, wurde das Squat/Stud-Treppenkonzept entwickelt. Dieses fasst sämtliche bekannten Parameter zusammen, die für Stud-Bildung ausschlaggebend sind. Es zeigt aber auch auf, dass noch einiges an Forschungsaufwand nötig ist, um Stud-Defekte zu verstehen und in weiterer Folge vermeiden zu können.

1 Entwicklungsgeschichte von Squat-Defekten

Squat-Defekte haben, wie eine Reihe von anderen Defekten im Rad-Schiene-Kontakt, eine jahrzehntelange Entwicklungsgeschichte. Entdeckt wurden sie das erste Mal in den 1950er Jahren auf den japanischen Shinkansen-Hochgeschwindigkeitsstrecken. Da sich die Einsenkung im Bereich der Defekte mit der Zeit dunkel verfärbt, nannte man sie „dark spots“. Diese Bezeichnung hat sich in Japan teilweise bis heute erhalten. In Frankreich und in Großbritannien kam es in den 1970er Jahren zu einem Auftreten von Squat-Defekten, was speziell in England zu verstärkter Forschungsaktivität zu diesem Thema führte. Ein durchaus kuriose Detail dieser Tätigkeiten stellt die Namensgebung „Squat“ für diesen Defekt dar [1]. Im Englischen bedeutet „to squat“ „sich hinsetzen“ oder „in die Hocke gehen“. Um diesen neuen Defekt von anderen

Defekten wie Head Checks zu unterscheiden, sollte ein eindeutiger Name gefunden werden. Da der genaue Schädigungsmechanismus zunächst nicht bekannt war, wurde von einem Mitarbeiter von British Rail Research (BRR) die scherzhafte These erstellt, ein schwergewichtiger Gnom sei wohl auf der Schiene gesessen oder gehockt und habe eine Einbuchtung hinterlassen (Zitat: „It looks as though a very heavy gnome has sat or squatted on the rail producing an indentation shape.“). Es ist nicht überliefert, ob das tatsächliche Gewicht dieses allgegenwärtigen Gnoms von BRR berechnet wurde, dessen Vorliebe, auf den Schienen zu rasten, seit über 70 Jahren weltweit Probleme verursacht. Der Name für den Defekt ist auf jeden Fall geblieben.

Abgesehen von der Namensgebung, hat BRR zur Erforschung des Defekts beigetragen. Ein Squat (Bild 1) besteht aus einer nierenförmigen Erweiterung des Fahrspiegels mit einem V-förmigen Riss auf einer Seite des Fahrspiegels (zumeist an der Fahrkantenseite). Durch diese Teilung in zwei Hälften wächst der Riss sowohl in Fahrtrichtung als auch gegen die Fahrtrichtung. Dabei breitet er sich unter der Oberfläche schalenförmig quer zur Längsachse der Schiene aus. In einem weit fortgeschrittenen Zustand tritt der Riss wieder auf der anderen Seite des Fahrspiegels halbkreisförmig an die Oberfläche und kann eine Schädigungstiefe von bis zu 10 mm erreichen. Abhängig von den lokalen Gegebenheiten können auch X-, Y-, S- oder U-förmige Risse auftreten. Wird ein Squat-Defekt nicht rechtzeitig entfernt, können sich die Risse vertikal verzweigen und in weiterer Folge einen Schienenbruch verursachen. BRR konnte folgende Charakteristika für einen Squat ermitteln [1]:

- In den 1970er Jahren wurden hauptsächlich Schienen der Güten R200 oder R220 mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,4 bis 0,6% verwendet. Aufgrund dieses geringen Anteils bildet sich eine perlitische Gefügestruktur mit Korngrenzenferrit aus. Diese Art von Gefüge hat einen geringen Widerstand gegen plastische Verformung und Verschleiß (im Vergleich zu heute üblichen Schienengüten).
- Der Mechanismus der Rissbildung erfolgt mittels „Ratcheting“. Darunter wird eine inkrementelle, plastische Deformation der oberflächennahen Gefügestruktur, verursacht durch jedes darüberrollende Rad, verstanden. Um eine nennenswerte Verformung der oberflächennahen Schicht der Schiene zu erzielen, sind Hunderttausende Überrollungen nötig. „Ratcheting“ ist auch der Initiierungsmechanismus von anderen RCF-Defekten (Rollkontaktermüdung) wie Head Checks (periodische Risse an der Fahrkante). Als Hauptgrund für die plastische Gefügeverformung bei Squats wurde die Fahrzeugtraktion identifiziert (Bild 2).
- Zirka 40 bis 50 MGT (Million Gross Tons) an Belastung sind nötig, damit sich Squats bilden können. Es sind ungefähr weitere 100 MGT an Belastung nötig, damit sich der Defekt zu einer kritischen Größe entwickelt. Das bedeutet auch, dass hauptsächlich ältere Schienen betroffen waren – im englischen Schienennetz waren diese älter als zehn Jahre.
- Squats wurden hauptsächlich auf Mischverkehrsstrecken mit hohem Personentransportanteil in geraden Abschnitten und in weiten Bögen gefunden.

- Bei Squats mit kritischer Größe besteht die Gefahr, dass vertikale Rissverzweigung zu einem Schienenbruch führt.
- Da Squats nie in Tunneln gefunden wurden, wurde auch ein gewisser Anteil an hydraulisch beschleunigtem Risswachstum vermutet („hydraulic entrapment“): Dabei wird Flüssigkeit durch ein überrollendes Rad im Riss eingeschlossen und treibt diesen mittels Hydraulikdruck weiter.

Zur Lösung/Eindämmung des Squat-Problems gegen Ende der 1980er Jahre trugen zwei Entwicklungen bei. Mit dem Übergang von korrektivem zu präventivem Schienenschleifen konnte durch regelmäßige Intervention mit geringem Materialabtrag die Entwicklung der plastisch verformten Schicht deutlich reduziert werden. Etwaige Risse, die sich in der Schicht gebildet hatten, wurden so frühzeitig wieder entfernt und konnten sich nicht zu Squats entwickeln. Zusätzlich wurde auch vermehrt die Schienengüte R260 zum Einsatz gebracht, die aufgrund ihrer rein perlitischen Gefügestruktur (kein Korngrenzenferrit) einen erhöhten Widerstand gegen plastische Verformung und Verschleiß zeigt.



Bild 1: Typischer Squat-Defekt, Nierenform mit V-Riss

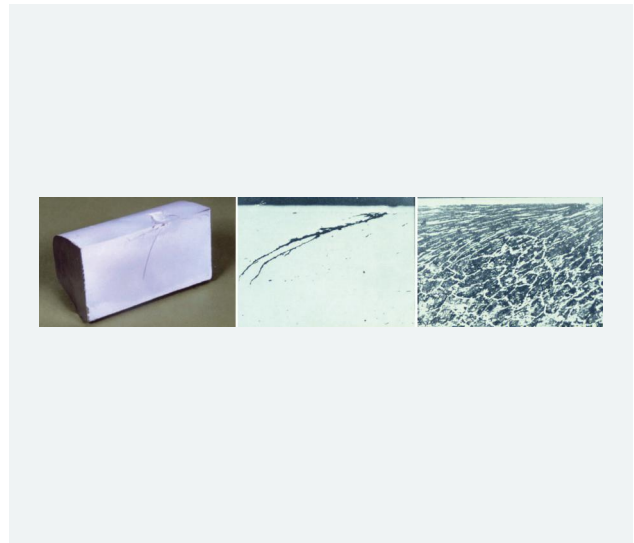


Bild 2: Squat-Untersuchung aus [1], Längsschnitt durch Schienenkopf und Detailaufnahme zur Rissmorphologie und plastischer Materialverformung

2 Defekt-Renaissance

Nachdem das Squat-Problem gegen Ende der 1980er Jahre gelöst schien, trat der Defekt überraschend erneut Anfang der 2000er Jahre international auf, teilweise sogar in epidemischen Ausmaßen. In manchen Netzwerken waren/sind ganze Streckenabschnitte von dem Defekt massiv betroffen (Bild 3).

Analysen ergaben, dass dieser „neue Squat“ das gleiche visuelle Erscheinungsbild wie der „klassische“ Squat (Kapitel zuvor) aufweist, doch im Detail signifikante Unterschiede feststellbar sind:

- Das Material/Gefüge and der Schienenoberfläche zeigt nur geringe bis keine plastische Verformung.
- Diese neue Art von Squats kann sehr schnell auftreten – es wurden Squats beobachtet, die sich nach 10 MGT Belastung nach Neuinstallation von Schienen gebildet hatten.
- Betroffen sind ältere wie auch neue/neuere Schienen.
- Dies gilt für gerade Streckenabschnitte, weitere Bögen und auch enge Bögen (auf Außen- oder Innensträngen).
- Dieser Defekt wird ebenso nicht in Tunneln gefunden. Es gibt auch keinen Hinweis, dass hydraulisch beschleunigtes Risswachstum eine Rolle spielt.
- Weiße Schichten (WEL – White Etching Layer) treten immer im Bereich vor, nach und auf den Defekten auf.

Trotz der oberflächlichen Ähnlichkeiten unterscheiden sich diese neuen Defekte signifikant von klassischen Squats. Aus diesem Grund wurden auch andere Namen für diesen Defekt vorgeschlagen, jedoch beruht keine dieser Benennungen auf „Gnomen, die auf Schienen sitzen“: Squat type defect, Seriensquats, neuer Squat, Squat-ähnlicher Defekt oder Stud. Der Name Stud wurde von Stuart Grassie [1] eingeführt (STUD=STUdard's Defect), der maßgeblich zur Erforschung und Klassifizierung dieser Art von Defekten beigetragen hat. Um in diesem Artikel eine eindeutige Unterscheidung zu gewährleisten, wird von hier an der Begriff „Squat“ für „klassische Squats“ und der Begriff „Stud“ für „neue Squats“ verwendet. Es sei darauf verwiesen, dass in der Literatur trotzdem oft der Begriff Squat für beide Defektarten verwendet wird.

3 Ursachensuche – der Anfang

Nach dem vermehrten Auftreten von Studs in Europa und Australien [2] wurde mit der Suche nach möglichen Ursachen begonnen. Da seit Anfang der 1990er Jahre vermehrt wärmebehandelte Schienen zum Einsatz kamen und erste Anlassfälle anscheinend gehäuft auf solchen Schienen gefunden wurden, wurde zunächst dieser „neue“ Schientyp als Ursache vermutet. Wärmebehandelte Schienen der Güte R350HT haben ein feinperlitisches Gefüge mit reduziertem Lamellenabstand. Aufgrund dieser Gefügestruktur haben R350HT-Schienen erhöhte Härte und Festigkeit bei zumindest gleicher Zähigkeit im Vergleich zu R260-Schienen. Aufgrund dieser Eigenschaften haben R350HT-Schienen erhöhten Widerstand gegen Verschleiß, plastische Verformung und RCF-Bildung. Die Analysen von multiplen Schienen der Güte R350HT mit Squat-Defekten konnten aber keinen Zusammenhang zu etwaigen Herstellungsfehlern oder zur allgemeinen Gefügestruktur der Schienen herstellen. In weiterer Folge wurden Stud-Defekte ebenso auf Schienen der Güten R260 gefunden [3]. Aus den Untersuchungen konnte abgeleitet werden, dass Studs bevorzugt in Bereichen mit geringem Schienenverschleiß auftreten. Der Systemverschleiß hängt von verschiedenen Parametern ab: Profilpaarung Rad-Schiene, Reibungsbedingungen (trocken, konditioniert, nass, geschmiert) und natürlich auch von der verwendeten Schienengüte. Aufgrund dieser Erfahrungen

haben manche Eisenbahnbetreiber in Europa den Einsatz von R350HT-Schienen auf mittlere bis engere Bögen (das sind Bereiche mit höherem Systemverschleiß) reduziert.



Bild 3: Typische gehäufte Ausprägung von „neuen Squats“ oder Seriensquats

4 Ursachensuche – Profile

Nachdem der Defekt Squat Ende der 1980er Jahre an Bedeutung verloren hatte, rückte ein anderer RCF-Defekt in das Zentrum der Aufmerksamkeit: Head Checks (auch Gauge Corner Cracking genannt) sind periodische Risse an der Fahrkante. Wie zuvor erwähnt, ist auch hier der Ratcheting-Mechanismus ausschlaggebend für die Bildung und das Wachstum dieser Risse. Mehrere Maßnahmen führten dazu, dass Head Checks heute gut beherrscht werden können: Einführung der Schienengüte R350HT (oder anderer höchstfester Schienengüten wie R370CrHT oder R400HT), präventive Schieneninstandhaltung und Anti-Head Check-Profile. Bei solchen AHC-Profilen wird die Fahrkante (im Bogen) etwas stärker unterschliffen, damit dort weniger bis kein Rad-Schiene-Kontakt erfolgt (Bild 4), wodurch der Rad-Schiene-Kontakt am Schienenkopf konzentriert wird. Stud-Untersuchungen haben ergeben, dass ein konzentrierter Kontakt (mit daraus resultierenden hohen Kontaktspannungen) auf der Lauffläche der Schiene (schmales Kontaktband) ein weiterer Faktor für die Ausbildung der Defekte ist. Obwohl AHC-Profile einen klaren Vorteil gegenüber Head Check-Ausbildung aufweisen, scheinen sie einen nicht zu unterschätzenden Nachteil bezüglich Studs zu bedeuten. AHC-Profile haben mittlerweile einen festen Platz in der Europäischen Normung gefunden [4] und kommen verbreitet zur Anwendung.

Anhand dieser ersten beiden Faktoren (geringer Systemverschleiß, konzentrierter Kontakt am Schienenkopf) lässt sich die Systemkomplexität dieses Defekts veranschaulichen. Ein geringer

Systemverschleiß alleine für sich oder Gleisabschnitte mit schmalen Kontaktband alleine für sich sind keine Auslöser für Stud-Defekte. Wenn aber beide Faktoren gemeinsam auftreten, kann sich deren Wirkung gegenseitig verstärken: Geringer Systemverschleiß stabilisiert ungünstige Kontaktbedingungen mit hohen Kontaktspannungen über eine längere Zeit und kann so die Initiierung von Stud-Defekten bewirken.



Bild 4: Überlagerung des Anti-Head Check-Profiles 54E5 (blau) mit dem Standard-Profil 54E1 (rot); durch Hinterschneidung im Fahrkantenbereich wird der Rad-Schiene-Kontakt tendenziell in Richtung Schienenkopf verschoben

5 Ursachensuche – weiße Schichten

Untersuchungen haben gezeigt, dass weiße Schichten eine weitere Komponente für Studs sind. Weiße Schichten (White Etching Layers – WEL) sind Materialumwandlungen auf der Schienenoberfläche. Im Lichtmikroskop betrachtet, erscheinen sie weiß, da sie nicht vom üblichen Ätzmittel (3 % Nital) angegriffen werden (Bild 5) [5]. WEL können thermisch erzeugt werden. Eine Wärmequelle (Rad oder Schleifstein) erhitzt dünne Bereiche der Schiene auf über 723°C (Perlit-Austenit-Umwandlungstemperatur). Sobald die Wärmequelle entfernt wird, wirkt die restliche, kalte Schienenmasse wie ein Kühlkörper und entzieht dieser dünnen Schicht schlagartig die Wärme. Es kommt zu einem sogenannten Abschreckvorgang, bei dem Martensit (harte und spröde Materialstruktur) entsteht. WEL können auch mittels massiver plastischer Verformung (mehrere 1.000% Umformgrad) herbeigeführt werden. Das dabei entstehende amorphe Gefüge hat ähnliche Eigenschaften wie Martensit und erscheint ebenso nach der Ätzung weiß im Lichtmikroskop. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass WEL im Rad-Schiene-Kontakt zumeist über die thermische Route erzeugt werden, einerseits über Schienenschleifen oder andererseits über die Traktion (Schlupf durch Beschleunigen und Bremsen).

WEL auf Schienen sind seit Jahrzehnten bekannt und werden nahezu überall gefunden. Meistens platzen

solche Schichten mit der Zeit von der Schienenoberfläche ab (Verschleiß), ohne einen Schaden anzurichten. Im Fall von Studs wird vermutet, dass Risse in WEL oder an der Grenzfläche zwischen WEL und Grundmaterial auftreten können, aus denen in weiterer Folge Studs entstehen. Eine klare Definition für eine kritische WEL zur Stud-Bildung wurde bisher noch nicht gefunden.



Bild 5: Beispiel einer weißen Schicht auf einer Schienenoberfläche [5]

6 Ursachensuche – Instandhaltung

Die Schieneninstandhaltung durch Schleifen oder Fräsen ist ein wichtiges Werkzeug zur Verlängerung der Schienenlebensdauer. Eine präventive Schleifstrategie, die auf Squats und Head Checks ausgerichtet ist, scheint für Studs nur geringe Wirksamkeit zu zeigen. Des Weiteren erhitzt der Schleifvorgang die Schienenoberfläche über die oben erwähnte Umwandlungstemperatur von 723°C und erzeugt somit immer Bereiche mit WEL auf der Schienenoberfläche [6]. Da die Zugfolgen immer dichter werden, die Radsatzlasten kontinuierlich steigen und Sperrpausen immer kürzer werden, steht die Schieneninstandhaltung vor dem Dilemma, in immer kürzerer Zeit höhere Produktivität zu liefern. Das bedeutet einerseits höhere Bearbeitungsgeschwindigkeiten, aber auch höheren Materialabtrag in möglichst wenig Überfahrten. Dies wird durch höheren Anpressdruck und gröbere Schleifsteine erzielt, was einen höheren Energieeintrag (Wärme) in die Schiene verursacht. Im Fall des Schienenfräsen stellt sich die Situation etwas anders dar. Der Fräsvorgang erhitzt die Schiene nur gering (ca. 320°C) und es erfolgt daher keine Materialumwandlung [7]. Der integrierte Polierschritt mittels Schleiftechnik verwendet nur geringe Anpressdrücke und erzeugt nur sehr dünne und fragmentierte WEL, die zumeist gleich nach der ersten Zugüberfahrt abplatzen. Das Schienenschleifen erzeugt das Querprofil in Form eines Polygonzugs durch

Aneinanderreihen sogenannter Schleiffacetten (Bearbeitungsspur eines Schleifsteines). Jede Facettengrenze stellt eine Kante in Längsrichtung des Profils dar, wo es zu erhöhten Kontaktspannungen kommen kann. Ebenso erzeugt das Schienenschleifen Schleifriefen mit Querausrichtung zur Längsachse der Schiene. Auch hier kann es an den Spitzen dieser Riefen zu erhöhten Kontaktspannungen kommen. Es ist zu erkennen, dass Facetten und Schleifriefen für sich betrachtet kein Problem darstellen, aber kombiniert mit WEL, geringem Systemverschleiß und unvorteilhaften Kontaktbedingungen einen weiteren Beitrag zur Stud-Bildung darstellen können. Hinsichtlich Schleifriefen und Facetten gibt es noch keine Erkenntnisse bezüglich kritischer Größen/Werte, um Stud-Bildung auszulösen. Erste Forschungsergebnisse deuten an, dass WEL und Oberflächenzustand nach dem Schleifen eher einen untergeordneten Einfluss haben [8]. Einige Bahnbetreiber haben auch das Schleifen zugunsten des Fräsens deutlich reduziert, um die Bildung von WEL aus der Schienenbearbeitung zu minimieren.

7 Ursachensuche – Traktion

Eine weitere Ursache für WEL kann im Traktionsverhalten von Fahrzeugen gefunden werden. Auch bei der Antriebstechnologie erfolgten seit den 1990er Jahren signifikante Entwicklungsschritte. Einerseits wurde die Traktionstechnologie von Gleichstrom-Traktion auf Wechselstrom-Traktion umgestellt. Letztere ermöglicht kontrolliertes Anfahren und Fahren bei wesentlich höheren Schlüpfen mit wesentlich höheren Adhäsionskoeffizienten und erlaubt somit wesentlich höhere Zugkräfte. Höhere Schlüpfen bedeuten aber auch wesentlich mehr Reibungsenergie, d.h. Wärme, die in die Schienenoberfläche eingebracht wird. Zusätzlich kann durch moderne Motorsteuerungen jeder angetriebene Radsatz individuell angesteuert werden. Wenn die Traktionskontrolle die Zugkraft beim ersten Radsatz reduzieren muss (z.B. wegen nasser Schienenoberfläche), haben die darauffolgenden Radsätze weiterhin die Möglichkeit, unabhängig voneinander die volle Zugkraft aufzubringen. Des Weiteren sind bei modernen Triebwagen mehrere angetriebene Radsätze über die Länge des Zuges verteilt. Zusammen mit den generell gestiegenen Zugfolgen lässt sich ableiten, dass Schienen heutzutage eine wesentlich höhere Traktionsbelastung aufweisen als noch vor 20 Jahren. Traktionssteuerungen sowie auch Bremssteuerungen sind proprietäre Technologie von Fahrzeugherstellern und somit auch nicht öffentlich zugänglich und untersuchbar. Zusätzlich spielt im europäischen Raum die Zulassungsthematik eine signifikante Rolle: Ist ein Fahrzeug zugelassen (oft ein mehrjähriger Prozess), können Änderungen am Traktionssystem und/oder Bremssystem nicht ohne Verlust der Zulassung durchgeführt werden. Anders formuliert: Damit an einem existierenden Fahrzeugtyp die Traktions- oder Bremssteuerung geändert werden kann, muss erneut ein Zulassungsprozess durchlaufen werden (zumindest gemäß den Europäischen Normen und der Gesetzeslage). Neben der Zeitkomponente ist das mit nennenswerten Kosten verbunden, wobei das Thema der Übernahme dieser Kosten einiges an Diskussionspotenzial zwischen Eisenbahnbetreiber und Fahrzeuglieferant bieten kann und wird. Es gilt auch zu bedenken, dass die Möglichkeit, entsprechend hohe Zugkräfte auf die „Gleise zu bringen“, eine Voraussetzung für Einhaltung von Fahrplänen und

Zugfrequenzen auf den dichtest befahrenen Strecken in Europa ist. Jede Reduzierung der zur Verfügung stehenden Zugkräfte (geringere Beschleunigung des Zuges) würde sich nachteilig auswirken.

Demgegenüber zu beachten ist die Einbringung von WEL (durch Traktion) und deren möglicher Beitrag zur Stud-Entwicklung.

Direkt im Zusammenhang mit der Traktion stehen die Reibungsbedingungen zwischen Rad und Schiene. Traktions- und Bremssteuerungen benötigen spezifizierte Reibungszustände, um entsprechende Beschleunigungs- und Bremsleistungen umzusetzen. Studs wurden bisher nie in Tunneln gefunden, wo das Klima und somit der Reibwert zwischen Rad und Schiene relativ stabil ist (kein Niederschlag und keine anderen Umwelteinflüsse). Das bedeutet auch für die Traktions- und Bremssysteme konstante Voraussetzungen. Auf freier Strecke können die Traktionsbedingungen abhängig von der Tageszeit und entlang des Gleises variieren. Untersuchungen haben gezeigt [9], dass leicht „feuchte“ Schienenoberflächen sehr geringe Reibungskoeffizienten aufweisen können, dies kann auch bei schönem Wetter z.B. in Waldstücken entlang einer Strecke auftreten. Andererseits ist bekannt, dass gewisse Eisenoxide, wie sie nach Niederschlägen auf den getrockneten Schienen vorliegen, sehr hohe Reibungskoeffizienten bewirken können [10]. Die bisher nicht beantwortete Frage betrifft die Thematik, wie Brems- und Traktionssteuerungen mit örtlich schnell veränderlichen Reibungsbedingungen umgehen können.

8 Ursachensuche – Systemsteifigkeit

Der finale Parameter für Stud-Bildung kann in der Systemsteifigkeit des Fahrzeug-Fahrweg-Systems gefunden werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass entweder eine steife Fahrwegkonstruktion oder eine entsprechend steife Federung der Fahrzeuge [11] die Stud-Bildung unterstützt. Vermutlich fördert eine entsprechend hohe Systemsteifigkeit dynamische Fahrzeugreaktionen, die in der Folge das Traktions- und Bremsverhalten sowie die Kräfte zwischen Rad und Schiene beeinflussen können. Dieser bisher am wenigsten untersuchte Stud-Parameter beruht rein auf empirischer Beobachtung.

9 Das Treppenkonzept

Um die Komplexität des Systems rund um Studs darzustellen, wurde das sogenannte Squat/Stud-Treppenkonzept entwickelt [12], das die oben genannten Ursachen in einem Diagramm darstellt (Bild 6). Anwenden lässt es sich sowohl auf Squat-Defekte als auch auf Stud-Defekte (gemäß der in diesem Artikel getroffenen Unterscheidung).

Für die Squat- und Stud-Defekte gelten folgende Feststellungen:

- Voraussetzung ist ein Ausgangspunkt oder auch eine Initialstörung. Das können WEL, Schweißstöße, Schlupfwellen, Head Checks, Eindrückungen oder eine generelle Oberflächen-irregularität sein. Einzig WEL spielen nur für Studs eine Rolle, nicht für Squats. Die Schieneninstandhaltung lässt sich gezielt

einsetzen, um solche Oberflächenirregularitäten frühzeitig zu entfernen, kann aber unter ungünstigen Umständen selbst wieder WEL generieren (Schienenschleifen), die als Ausgangspunkt für Studs dienen können.

- Die Kontaktbedingungen, hervorgerufen durch die Rad-Schiene-Profilpaarung, spielen eine wichtige Rolle. Profile, welche die Kontaktspannungen auf einen schmalen Bereich der Lauffläche fokussieren (z.B. AHC-Profile), tragen zur Stud-Bildung bei. Auch bei Squats fördern hohe Kontaktspannungen die plastische Verformung, solange der Verschleiß dadurch nicht zu hoch wird. Mit Hilfe der Schieneninstandhaltung ist es möglich, Profile entsprechend anzupassen (im Positiven wie im Negativen).
- Der Systemverschleiß muss entsprechend gering sein, damit sich Studs oder auch Squats ausbilden. Der Schienenverschleiß hängt ab von der Rad-Schiene-Profilpaarung, dem verwendeten Schienenmaterial, der Art der Züge und deren Radsatzlasten sowie von den (bewusst oder unbewusst) eingestellten Reibungsbedingungen (z.B. geschmiert, trocken, nass, Laub auf Schiene ...). Mit Hilfe der Schieneninstandhaltung kann der Systemverschleiß bewusst erhöht/gesteuert werden.
- Das Traktionsverhalten (Beschleunigen, Bremsen) der Züge ist ein weiterer Faktor in der Treppe. Bei Squats trägt die Traktion maßgeblich zur Ausbildung der plastischen Verformung bei. Die WEL, die von modernen Traktionssystemen verursacht werden, können für die Stud-Bildung von zentraler Bedeutung sein (nicht aber für Squats). Es wurde auch vermutet, dass die Traktionskräfte in weiterer Folge auch für das Wachstum der Stud-Defekte eine Rolle spielen könnten. Die Reibungsbedingungen sowie deren örtliche und zeitliche Änderung haben einen signifikanten Einfluss auf die Übertragung der Traktionskräfte zwischen Rad und Schiene.
- Die Systemsteifigkeit ist ein Faktor ausschließlich für Stud-Defekte. Systeme mit hoher Steifigkeit erzeugen höhere dynamische Reaktionen und Systemkräfte. Das kann sich einerseits auf das Traktionsverhalten auswirken, andererseits auch direkt über erhöhte dynamische Vertikal- und Tangentialkräfte die Bildung und das Wachstum der Stud-Defekte beeinflussen.

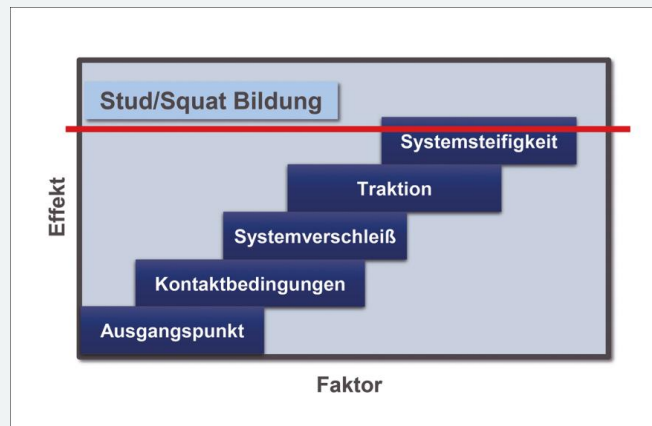


Bild 6: Stud/Squat-Treppenkonzept; Veranschaulichung der Systemparameter, die zur Bildung von Studs und Squats beitragen [12]

10 Squats und Studs in Streckennetzen

Aus der Sicht des Autors sind die meisten Defekte, die aktuell gefunden werden, Stud-Defekte. Beobachtungen aus Deutschland, Dänemark, der Schweiz und von London Underground belegen das klar. Auch Defekte, die in Australien dokumentiert wurden und werden, sind als Stud-Defekte zu klassifizieren. In England scheint die Situation etwas anders zu sein, da dort noch immer viele Schienen des Typs R200 und R220 verbaut sind. Ebenso werden Schienen der Güte R350HT (oder ähnliche) noch sehr zurückhaltend eingesetzt, was eine Auswirkung des schweren Zugsunglücks von Hatfield im Jahr 2000 ist. Auch in Holland wird von Squat-Defekten gesprochen und teilweise werden Stud-Defekte dezidiert ausgeschlossen. Jedoch legen die verfügbaren Publikationen aus den Niederlanden die Vermutung nahe, dass auch dort hauptsächlich Stud-Defekte zu finden sind (auch wenn in Holland der Begriff „Stud“ kaum akzeptiert ist). Nordamerika war bisher von Stud- wie auch Squat-Defekten weitgehend verschont. Die Belastungen, Profilkombinationen, natürlicher Verschleiß und Instandhaltungsintervalle verhindern unter nordamerikanischen Schwerlastbedingungen die Bildung von Squats (oder Studs). Die Situation bei den nordamerikanischen Transitsystemen (U-Bahn, Stadtbahn, Straßenbahn) beginnt sich aber langsam zu ändern. Nordamerika steht hier vor einem ähnlichen Szenario wie Europa Anfang der 1990er Jahre. Neue, moderne Fahrzeugtypen werden bei vielen Systemen eingeführt, es kommen vermehrt wärmebehandelte Schienen zum Einsatz, Friction Management (Schienenflankenschmierung kombiniert mit Laufflächenkonditionierung) wird von vielen Systemen aktiv genutzt und präventive Instandhaltung mit einem sehr groben Schwerlast-Schleiffinish (Riefen, WEL) wird angewandt. Es gibt daher bereits einige Anlassfälle von offensichtlichen Studs bei Bahnsystemen diverser nordamerikanischer Großstädte (Bild 7).

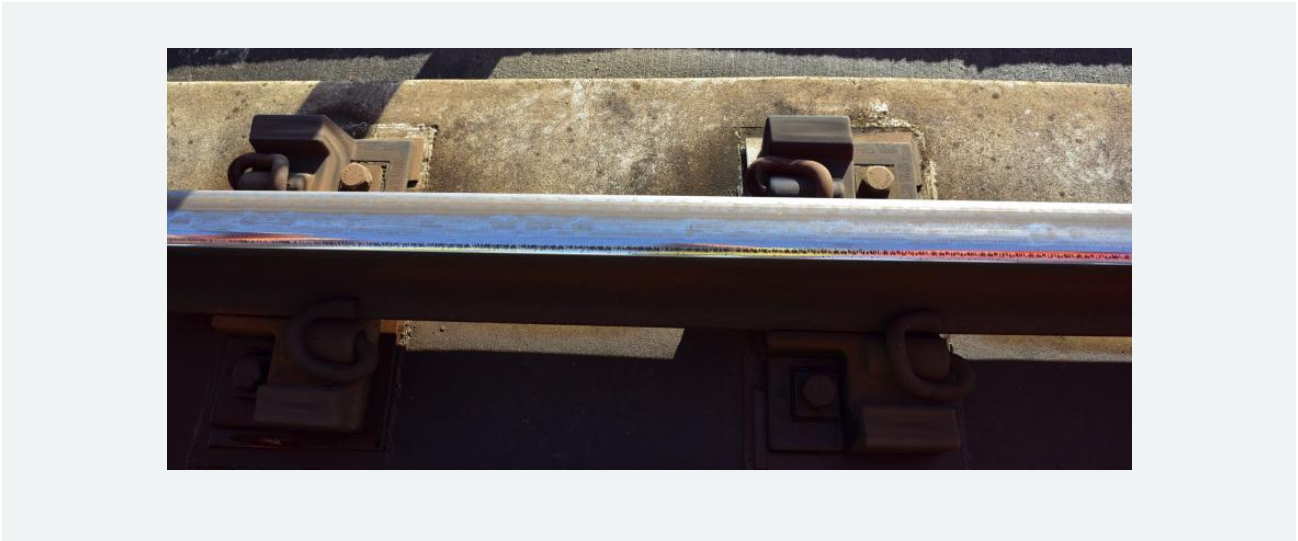


Bild 7: Studs mit unterschiedlicher Ausprägung bei einem nordamerikanischen Transitsystem

11 Ausblick

Squats und Studs sind zwei Arten von Defekten, die sich in ihrem Erscheinungsbild sehr ähneln, doch in den Bildungsmechanismen deutlich unterscheiden. Squats werden mit dem Mechanismus der plastischen inkrementellen Materialverformung in Verbindung gebracht. Bei Studs spielen ganz andere Faktoren eine Rolle, die im Konzept der Squat/Stud-Treppe zusammengefasst sind. Die zentrale Frage, die immer noch unbeantwortet ist und auch durch das Konzept der Squat/Stud-Treppe nicht beantwortet wird, ist die nach einer eindeutigen Erklärung für die Bildung und in weiterer Folge das Wachstum der Stud-Defekte.

Aus diesem Grund kooperieren Industriepartner (Plasser & Theurer, voestalpine Rail Technology GmbH), Bahnbetreiber (DB, SBB, ÖBB) und Fahrzeughersteller (Siemens Mobility GmbH, Alstom Transport Deutschland GmbH) mit dem Kompetenzzentrum „Das virtuelle Fahrzeug“ in Graz (Virtual Vehicle Research GmbH, www.v2c2.at), um im Rahmen eines gemeinsamen Projekts (gefördert im Rahmen des COMET K2 Competence Centers for Excellent Technologies von BMK ¹⁾, BMDW ²⁾ und Land Steiermark) die Ursachen für die Stud-Entstehung systematisch zu erforschen. Da es sich bei Stud-Defekten um einen Systemdefekt handelt, wird einzig ein Systemansatz zur nachhaltigen Lösung dieses globalen Schienenfehlers beitragen.

Fußnoten

1) Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie in Österreich

2) Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort

Literatur

- [1] Grassie, S.: Squats and squat-type defects in rails: the understanding to date. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit 226 (Issue 3, 2012), S. 235-242.
- [2] Kerr, M.; Wilson, A.; Marich, S.: The epidemiology of squats and related rail defects. In Proceedings of CORE 2008 Conference on Railway engineering: rail-the-core of integrated transport, September 2008, Perth, Australia, S. 83-96.
- [3] Li, Z.; Zhao, vX.; Dollevoet, R.: The determination of a critical size for rail top surface defects to grow into squats. Proceedings of the 8th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2009), 2009, Firenze, Italy, S. 379-388.
- [4] DIN EN13674-1:2017: Bahnanwendungen - Oberbau – Schienen – Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m; Europäische Norm, 2017.
- [5] Wetscher, F.: Effect of Large Shear Deformation on Rail Steels and Pure Metals. Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2006.
- [6] Zhang, Z.Y. et. Al.: Thermal model and temperature field in rail grinding process based on a moving heat source. Applied Thermal Engineering 106, 2016, S. 855-864.
- [7] Stock, R.; Kubin, W.; Daves, W.; Six, K.: Advanced maintenance strategies for improved squat mitigation. Wear 436-437, 2019, S. 8.
- [8] Luther, M.; Mädler, K.: Rail grinding and squats. Präsentation gehalten beim International Webinar on Squat Rolling Contact Fatigue, 23. Mai 2022, Delft University of Technology, Netherlands.
- [9] Buckley-Johnstone, L.E.; Trummer, G.; Voltr, P.; Six, Lewis, R.: Full-scale testing of low adhesion effects with small amounts of water in the wheel/rail interface. Tribology International 141, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105907>.
- [10] Kalousek, J.; Hou, K.; Magel, E.; Chiddick, K.: The benefits of friction management a third body approach. Proceedings of the World Congress on Rail Research Conference, 1996, Colorado Springs, USA, S. 461-468.
- [11] Li, Z.; Zhao X.; Dollevoet, R.: An approach to determine a critical size for rolling contact fatigue initiating from rail surface defects. International Journal of Rail Transportation, 5:1, 2017, S. 16-37.
- [12] Joerg, A.; Stock, R.; Scheriau, S.; Brantner, H.P.; Knoll, B.; Mach, M.; Daves, W.: The Squat Condition of Rail Materials – a Novel Approach to Squat Prevention. Proceedings of 10th International Conference on Contact Mechanics (CM2015), 2015, Colorado Springs, USA, S. 8.
-