

## **Erfahrungen mit hochfesten Schienenstählen/Experiences with high-strength rail steels/Expériences avec les aciers à rails haute résistance**

### **Vortragende / Speakers / Intervenants**

Title: Dipl.-Ing. Dr.  
Forename: Albert  
Surname: JÖRG  
Function: Leitung Technischer Kundendienst  
Firm/Organisation: voestalpine Schienen GmbH  
Address: Kerpelystraße 199  
8700 Leoben/Donawitz  
Austria  
Phone: +43 50304/26-4420  
Fax: +43 50304/66-4997  
E-Mail: albert.joerg@voestalpine.com



Title: Dipl.-Ing. Dr.  
Forename: Bernhard  
Surname: KNOLL  
Function: Leiter Oberbau, Streckenmanagement und Anlagenentwicklung  
Firm/Organisation: ÖBB-Infrastruktur AG  
Address: Nordbahnstraße 50  
1020 Wien  
Austria  
Phone: +43 19300035525  
E-Mail: bernhard.knoll@oebb.at



Title: Dipl.-Ing.  
Forename: Alexander  
Surname: STRAUCH  
Firm/Organisation: SBB AG  
Infrastruktur Anlagen & Technologie  
Address: Hilfikerstrasse 3  
3000 Bern 65  
Switzerland  
E-Mail: alexander.strauch@sbb.ch



Title: Dr.  
Forename: Christian  
Surname: TAPP  
Function: Experte Schienentechnik  
Firm/Organisation: DB Netz AG  
Technik und Anlagenmanagement Fahrbahn  
Technik und IH-Management Schiene  
Address: Richelstraße 3  
80634 München  
Germany  
Phone: +49 (0)89 1308-7340  
E-Mail: christian.tapp@deutschebahn.com



## **Kurzfassung**

Betrachtet man in europäischen Ländern die Entwicklung der Eisenbahn, so ist zu beobachten, dass diese von einer außergewöhnlichen Dynamik geprägt ist. Dabei ist hier nicht nur die Erhöhung der Zugzahlen und der Achslasten zu nennen, auch die Antriebstechnik und Laufwerkskonstruktion waren und sind Gegenstand weitreichender Entwicklungen. Die Beanspruchungen im Kontakt Rad / Schiene sind enorm.

Als am 23. Oktober 1853 zum ersten Mal eine Lokomotive über die „Semmering-Bergstrecke“ in Österreich fuhr, waren die Ingenieure angesichts der außergewöhnlichen Geschwindigkeit von ca. 11,5 km/h bei einer Achslast von weniger als 12 t euphorisch. Heute verkehren moderne Railjet-Züge mit ca. 22 t Achslast und einer Geschwindigkeit von 60-70 km/h über diese Steilrampe mit Neigungen von bis zu 27 ‰ und engen Bogenradien mit weniger als 190 m. Bei einer Streckenbelastung von ca. 20 Mio. Gesamtbruttotonnen pro Gleis und Jahr eine enorme Beanspruchung für den gesamten Oberbau und hier insbesondere der Schiene.

Es ist daher seit Anbeginn der Eisenbahnen in Österreich, Deutschland und der Schweiz ein besonderes Anliegen der Ingenieure, einen wirtschaftlich leistbaren und erhaltungsarmen Oberbau zu schaffen, was sich mit der zunehmenden Gleisbelastung und der immer höheren Geschwindigkeit als ziemliche Herausforderung für Bahnbetreiber und Industrie herausstellen sollte. Im Laufe der Zeit gelang es zusammen mit der Industrie durch Anwendung innovativer Konzepte immer wieder, die Widerstandsfähigkeit der Schienen im Gleis zu erhöhen. Bis zum Ende des 20. Jahrhunderts wurde der Fokus vor allem auf die Steigerung der Härte zur Verbesserung der Schienenwerkstoffe gelegt. Testeinbauten, speziell in der Schweiz, zeigen, dass das Verbesserungspotenzial von höheren Härten aktuell erreicht ist.

Mit neuen Konzepten wird die Mikrostruktur beeinflusst und über eine höhere Widerstandsfähigkeit des Schienenstahls werden neue Verbesserungspotenziale erreicht. Hier sind zum einen hypereutektide Schienenstähle (R400HT) zu nennen, bei denen trotz Kohlenstoffgehalten über dem Phasengleichgewicht, ein rein perlitisches Gefüge erzielt wird. Dadurch wird der Materialwiderstand hinsichtlich aller gängigen Schädigungsmechanismen wie Head Check Bildung, Verschleiß und Schlupfwellenbildung verbessert – Untersuchungen zur Auswirkung auf Fehler, wie z.B. Squats, laufen aktuell. Waren derartige Schienen zu Beginn des 21. Jahrhunderts vor allem im Schwerlastsektor zu finden, so haben sie mittlerweile nicht nur in den klassischen Mischverkehr Eingang gefunden, sie werden seit einigen Jahren auch in Gleisen von S- und U-Bahnen eingesetzt. Außerdem können über neue Legierungskonzepte bainitische Schienen erzeugt werden, die frei von Rollkontaktermüdungsschäden bleiben.

Was den Mischverkehr und Schienenverschleiß betrifft, lag die durchschnittliche Liegedauer von Schienen der Stahlsorte R260, beispielsweise am Semmering im Netz der österreichischen Bundesbahnen, in den 1980er Jahren im Außenstrang bei nur ca. 2-3 Jahren, so konnte mit Einführung der perlitisch kopfgehärteten Stahlsorte R350HT eine Verdreifachung auf ca. 7-8 Jahre erreicht werden. Die weltweit erste aluminothermische Schweißung einer 120m langen 54E2-Schiene mit R350HT

erfolgte am 27.06.1990 auf der Semmeringbahn und prägte in den Folgejahren wesentlich die Einbaustrategie der ÖBB, Schienen in Radien  $< 600$  m grundsätzlich mit der Stahlsorte R350HT einzubauen. Die naturharte, legierte Stahlsorte R320Cr wurde zwischen 1988 und 1994 testweise in einzelnen Gleisbögen eingebaut, blieb aber ein Nischenprodukt und wird derzeit ausschließlich für Radlenker in Weichen verwendet. Mit der Stahlsorte R400HT kann jedoch wieder ein derartiger Performancesprung wie in der Vergangenheit erzielt werden. Verschleiß sowie Schlupfwellenbildung können erfolgreich reduziert werden, wie bei den ÖBB in einem stark belasteten Gleisbogen mit  $R = 280$  m sehr erfolgreich gezeigt werden konnte.

Hinsichtlich der Beurteilung der RCF-Beständigkeit erstrecken sich die Erprobungen der hochfesten Perlite über den Radienbereich von 400 m bis 1.500 m, wobei auch bainitische Werkstoffe bislang in Radien von 600 m bis 3.000 m getestet wurden. Die Zwischenstände lassen eine vorläufige Abschätzung für technisch wirtschaftliche Einsatzgebiete der Stahlsorten zu. Bewertet wird hierzu der Verschleiß, die Schädigungstiefe von Head-Checks – zerstörungsfrei mit der Wirbelstromprüfung bestimmt - und wenn vorhanden, auch die metallographisch bestimmte Risstiefe aus Gleisproben.

Vorläufig können die Ergebnisse folgendermaßen zusammengefasst werden und sie zeigen ein ähnliches Bild wie bei dem Schienenverschleiß oder der Schlupfwellenbildung:

- Die Schienenstahlgüte R400HT kann in Bögen kleiner etwa 700 m mit einer hohen täglichen Belastung durch den kombinierten hohen Verschleiß- und RCF-Widerstand einen technisch-wirtschaftlichen Vorteil bieten.
- Ein weiter Vorteil von R400HT ist der deutlich erhöhte Widerstand gegen Schlupfwellen.
- Die Einbauten in reinen RCF Bögen mit Radien zwischen 700 m und 1.500 m werden zum Nachweis des RCF-Widerstands derzeit in der Schweiz intensiviert.
- Die Stahlsorte R370CrHT bietet technologisch nur eine geringfügige Verbesserung gegenüber R350HT, sie stellt daher eine Alternative, aber keine ergänzende Variante dar.
- Rissfreie bainitische Schienen bieten Einsatzmöglichkeiten in hoch belasteten Bögen von 600 m – 3.000 m. Die Verbindungsschweißungen genügen noch nicht den LCC-Ansprüchen.

Nach der Zusammenfassung der Gleistestergebnisse sei angemerkt, dass auch im Laborversuch heute Verschleiß und Head-Check Neigung von Schienenstählen gut miteinander verglichen werden können. Um konkrete Schädigungsraten im Betrieb zu prognostizieren, sind jedoch weiterhin Betriebsversuche und Betriebserfahrungen erforderlich.

Auch wenn höchstfeste Schienenstähle seit mehr als 15 Jahren in Schwerlastgleisen in aller Welt erfolgreich verschweißt werden, so bedarf der Einsatz dieser Stähle in Europa doch gewisser Anpassungen und Adaptierungen hinsichtlich der Schweißtechnik. So scheiterten die großen Anstrengungen der europäischen Schienenerzeuger, hochfeste Schienen im Gleis zum Einsatz zu bringen in den letzten 10 Jahren an der Tatsache, dass diese Schienen im Gleis nicht aluminothermisch eingeschweißt werden konnten. Als Ergebnis umfangreicher gemeinschaftlicher Bemühungen von Bahnen und Industrie, die schweißtechnischen Herausforderungen zu lösen, stehen seit Herbst 2013 die ersten zugelassenen AT-

Schweißungen für die Stahlsorte R400HT zur Verfügung. Diese Entwicklungen basieren auch auf Erfahrungen im Gleis, wie beispielsweise auf Testschweißungen bei den ÖBB schon aus dem Jahr 2003.

Wie andere europäische Bahnen auch, setzt die DB Netz AG derzeit nach Regelwerk die perlitischen Stahlsorten R260 und die kopfgehärtete Variante R350HT ein. Der Einsatz erfolgt unter den Prämissen, die Lebenszykluskosten gering zu halten und gleichzeitig die Variantenvielfalt der Produkte zu begrenzen. In den vergangenen Jahren ist der Anteil der kopfgehärteten Schienen bei der DB am Beschaffungsvolumen auf knapp 20 % angestiegen. Durch den ausgeweiteten Einsatz in Bögen, je nach Randbedingungen bis zu 3.000 m Radius, konnte ein Beitrag geleistet werden, die Instandhaltungskosten zu senken. An einigen hoch beanspruchten Knotenpunkten im Netz werden weiterhin häufig Schienenbearbeitung auf Grund des Schienenfehlers Head-Check oder auch wegen Schlupfwellenbildung in engen Bögen erforderlich. Hochfeste Schienenstahlsorten mit perlitischem oder auch bainitischem Gefüge versprechen hier eine weitere Verminderung der Schädigungsraten gegenüber R350HT. Gelingt es, die Instandhaltungszyklen zu strecken und gleichzeitig die Liegedauer zu erhöhen, dann sinken nicht nur die LCC, es steigt auch die Verfügbarkeit der Knotenpunkte und damit ganzer Streckenabschnitte.

### **Abstract**

If we take a closer look at the development of railways in Europe we realise their exceptionally dynamic nature. Far-reaching developments have resulted, and will continue to result, not only in a growing number of trains and higher axle loads but also in advanced motive power systems and bogie design. The loads impacting the wheel-on-rail system are enormous.

When on 23<sup>rd</sup> October 1853 the first locomotive travelled the Semmering “mountain line” in Austria, engineers were euphoric about its extraordinarily high speed of 11.5km/h with an axle load of less than 12t. Today, modern Railjet trains with axle loads of approx. 22t and speeds of 60-70km/h travel uphill, negotiating gradients of up to 27‰ and tight curves of less than 190m. With roughly 20 million gross tonnes per track and year in total, this line sustains enormous loads impacting on the entire superstructure and the rails in particular.

Since the introduction of railways in Austria, Germany and Switzerland the creation of an economically affordable low-maintenance track has been of particular concern to engineers; a feat that was to become a major challenge for railway operators and industry, given the ever increasing speeds and track loads. In cooperation with industry and based on the application of innovative concepts, the resilience of rails could be enhanced more and more over time. Up until the end of the 20<sup>th</sup> century, the focus was on improving rail materials by increasing their hardness. Test installations, in particular those in Switzerland, show that the new approaches are used to influence the micro-structure, and new improvement potential is realised by enhancing the resilience of rail steel. Examples are hyper-eutectoid rail steels (R400HT), which have a purely pearlitic structure in spite of carbon contents beyond phase equilibrium. This improves material resistance to common damage mechanisms such as head checking, wear and corrugations; tests on the impact of defects, e.g. squats, are currently being conducted. Whereas at the beginning of the

21<sup>st</sup> century these rails were mainly found in the heavy-haul sector, they are now used not only in classical mixed traffic but also in tracks of urban rail and metro systems. New alloy concepts enable the production of bainitic steel rails, which remain free from rolling contact fatigue (RCF) damage.

While the average service life of grade R260 high rails on e.g. ÖBB's Semmering line was only 2-3 years in the 1980s with regard to mixed traffic and rail wear, it has tripled to roughly 7-8 years with the introduction of pearlitic head-hardened R350HT rail steels. The first aluminothermic welding worldwide of a 120m long 54E2 rail of grade R350HT took place on 27<sup>th</sup> June 1990 on the Semmering line and greatly influenced ÖBB's relaying policies in subsequent years: only grade R350HT rails were to be used for radii of <600m. Naturally cooled alloyed grade R320Cr steel was tested in a number of curves between 1988 and 1994, but remained a niche product and is currently used only for check rails in switches. With R400HT steel we may achieve yet another such leap in performance as in the past. Wear and corrugations can be reduced as has been successfully demonstrated in a highly frequented curve (r=280m) of the ÖBB's rail network.

Assessment of resistance to RCF focuses on testing high-strength pearlite for radii between 400m and 1,500m, with bainitic materials being tested in curves with radii between 600m and 3,000m. Interim results enable a preliminary assessment of the technico-economic application of the steel grades tested. To this end we evaluated wear, depth of head checks (determined by non-destructive eddy current testing) and, where present, crack depth with metallographic measurements in rail samples.

For now, the results can be summarised as follows, showing a pattern similar to that of rail wear or corrugation development:

- The R400HT rail grade can offer technico-economic benefits in curves of less than approx. 700m and high daily loads owing to superior resistance to both wear and RCF.
- Another benefit of R400HT is its significantly enhanced resistance to corrugations.
- The installation of R400HT rails in curves subject to RCF (radii of between 700m and 1,500m) is currently being intensified in Switzerland to corroborate their resistance to RCF.
- R370CrHT steels offer only minor improvement over R350HT in technological terms, i.e. they are an alternative rather than an additional variant.
- Non-cracking bainitic rails may be used in very exposed curves with radii of 600m-3,000m. However, the welded joints do not yet comply with LCC requirements.

The above field tests and their results are not the only way of comparing steel grades. Laboratory tests, too, are suitable means of identifying the rate of wear and head checking in different rail steels. However, field tests and operational experiences continue to be indispensable for predicting the actual rates of damage under service conditions.

Although ultra-high-strength rail steels have been welded in heavy-haul tracks for more than fifteen years worldwide, their use in Europe requires a number of changes and adjustments to welding processes. Consequently, all efforts of European rail producers to install high-strength rails in tracks failed during the last ten years due to the fact that these rails could not be installed by aluminothermic welding.

Comprehensive joint efforts by railways and industry to resolve the challenges of welding technology resulted in the first AT welding processes being authorised for R400HT steels as of autumn 2013. These developments are based on field experience such as test welds carried out by the ÖBB as early as 2003.

Like other European rail infrastructure companies, Germany's DB Netz AG now uses pearlite R260 rails and the head-hardened R350HT variant as defined by current rules and regulations. Their use meets the requirement of keeping Life Cycle Costs low, while limiting the number of product variants. In recent years, the proportion of head-hardened rails within the DB's procurement volume rose to almost 20%. Their increased use – depending on outline conditions – in curve radii of up to 3,000m helped reduce maintenance costs. In a number of highly frequented junctions within the DB network, frequent rail rectification is still required to remove defects such as head checks or corrugations in tight curves. High-strength steels of pearlitic or bainitic structure promise to further reduce the rates of damage compared to R350HT rails. If we succeed in extending maintenance cycles while at the same time increasing service life, this will result not only in lower LCCs but also in a greater availability of hubs and thus of whole line sections.

## **Résumé**

Si l'on observe le développement des chemins de fer dans les pays européens, on constate qu'il est caractérisé par un dynamisme exceptionnel. Il ne s'agit pas seulement de l'augmentation du nombre de rames et de la charge par essieu – la technique d'entraînement et la conception des organes de roulement ont fait et continuent à faire l'objet de développements importants. Les sollicitations au niveau du contact roue/rail sont énormes.

Lorsque la première locomotive franchit le 23 octobre 1853 le col du Semmering en Autriche (tronçon appelé « Semmering-Bergstrecke »), les ingénieurs tombèrent en euphorie compte tenu de la vitesse extraordinaire de 11,5 km/h en présence d'une charge par essieu inférieure à 12 t. Aujourd'hui, les rames modernes du Railjet circulent avec une charge par essieu de près de 22 t et à une vitesse de 60-70 km/h sur cette rampe prononcée présentant des gradients pouvant atteindre 27 ‰ et des rayons de courbe étroits inférieurs à 190 m. En présence d'une densité de trafic d'environ 20 millions de tonnes brutes par voie et par an, cela constitue une énorme sollicitation pour la voie, et en l'occurrence pour le rail.

Depuis les débuts de l'ère ferroviaire en Autriche, en Allemagne et en Suisse, les ingénieurs se sont donc efforcés de concevoir des voies finançables et à faible besoin de maintenance, un objectif qui allait s'avérer un grand défi pour les opérateurs ferroviaires et l'industrie face à des charges de ligne et des vitesses croissantes. Au fil du temps, on réussit conjointement avec l'industrie à accroître régulièrement la résistance des rails par l'application de concepts novateurs. Jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, on a essentiellement mis l'accent sur une dureté accrue pour l'amélioration des matériaux utilisés pour les rails.

Des essais de mise en œuvre, notamment en Suisse, montrent que le potentiel d'amélioration des duretés accrues est actuellement pleinement exploité.

De nouveaux concepts permettent d'influencer la microstructure, et d'obtenir de nouveaux potentiels d'amélioration grâce à une résistance plus élevée de l'acier à rails. Citons ici d'une part les aciers à rails hypereutectiques (R400HT), où l'on obtient malgré des teneurs en carbone supérieures à l'équilibre de phases une structure purement perlitique. La résistance du matériau à tous les mécanismes d'endommagement courants, tels que la formation de criques dans le champignon (head-checks), l'usure et la formation d'ondulations de glissement, est ainsi améliorée – des études sur l'impact en termes de défauts, tels que les fissures en V (squats), sont actuellement en cours. Si l'on trouvait essentiellement de tels rails au début du XXI<sup>e</sup> siècle dans le domaine du transport lourd, ils ont à présent non seulement fait leur entrée dans le trafic mixte classique, mais sont également utilisés depuis quelques années pour les métros et les RER. Par ailleurs, de nouveaux concepts d'alliage permettent de réaliser des rails bainitiques qui restent exempts de dommages dus à la fatigue de contact de roulement.

En ce qui concerne le trafic mixte et l'usure des rails, alors que la durée moyenne de séjour des rails du type d'acier R260 en file extérieure, par exemple sur le Semmering dans le réseau des Chemins de fer autrichiens, n'était que de 2 à 3 ans dans les années 80, le passage au rail perlitique à champignon traité thermiquement en acier de type R350HT permet de faire tripler cette durée, qui atteint ainsi 7 à 8 ans. Le premier soudage aluminothermique du monde d'un rail 54E2 de 120 m de long dans la nuance R350HT fut réalisé le 27 juin 1990 sur la ligne du Semmering, et incita dans les années qui suivirent les ÖBB à favoriser pour les rayons <600 m des rails en acier R350HT. À titre d'essai, l'acier allié de dureté naturelle R320Cr fut posé à l'essai entre 1988 et 1994 dans certaines courbes, mais cette nuance resta toujours un produit créneau et n'est utilisée actuellement que pour les contre-rails dans les appareils de voie. Avec le type d'acier R400HT, il est toutefois à nouveau possible de réaliser un bond de performance comparable à ceux du passé. Il permet de réduire l'usure et la formation d'ondulations de glissement, comme l'a montré avec beaucoup de succès un essai des ÖBB sur une courbe à forte charge d'un rayon de 280 m.

En ce qui concerne la résistance à la fatigue de contact de roulement, les essais avec des aciers perlitiques haute résistance portent sur la gamme de rayons de 400 à 1500 m, et des matériaux bainitiques ont également été testés jusqu'à présent pour des rayons de 600 à 3000 m. Les résultats intermédiaires permettent une évaluation provisoire des domaines d'utilisation d'intérêt technique et économique des différents aciers. On tient compte à cet effet de l'usure, de la profondeur des head-checks – déterminée par contrôle non destructif par courants de Foucault – et le cas échéant de la profondeur des fissures déterminée par procédé métallographique sur des échantillons de rails.

Pour l'instant, les résultats peuvent être résumés comme suit, et présentent un tableau similaire à celui de l'usure des rails ou de la formation d'ondulations de glissement :

- Grâce à sa résistance élevée aussi bien à l'usure qu'à la fatigue de contact de roulement, la nuance d'acier à rails R400HT peut présenter un avantage technique et économique sur des courbes d'un rayon de moins de 700 m environ soumises à une sollicitation quotidienne élevée.
- Un autre atout de l'acier R400HT est sa résistance nettement plus élevée à l'usure ondulatoire.

- La pose dans des courbes de rayons entre 700 et 1500 m uniquement sujettes à la fatigue de contact de roulement est actuellement intensifiée en Suisse afin de déterminer la résistance à celle-ci.
- Le type d'acier R370CrHT n'apporte sur le plan technologique qu'une amélioration minimale par rapport à l'acier R350HT, et représente donc une alternative, mais non pas une variante complémentaire.
- Les rails bainitiques résistants à la fissuration peuvent être utilisés dans des courbes fortement sollicitées d'un rayon de 600 à 3000 m. Les soudures d'assemblage ne répondent pas encore aux exigences relatives au coût du cycle de vie.

Après le résumé des résultats des essais de rails, notons que l'on peut aujourd'hui bien comparer également en laboratoire l'usure et le comportement de head-check des différents aciers à rails. Afin de pronostiquer des taux d'endommagement concrets en cours de service, les essais et expériences en exploitation restent toutefois indispensables.

Même si des aciers à rails ultrarésistants sont soudés avec succès depuis plus de 15 ans dans des voies à charge lourde dans le monde entier, la mise en œuvre de ces aciers en Europe exige néanmoins certains ajustements et adaptations au niveau de la technique de soudage. Ainsi, les importants efforts entrepris par les producteurs européens de rails pour l'emploi de rails haute résistance furent entravés au cours des 10 dernières années par le fait qu'il n'était pas possible de souder ces rails dans la voie par aluminothermie. Suite aux vastes études effectuées conjointement par les chemins de fer et l'industrie afin de résoudre les défis techniques de soudage, on dispose depuis l'automne 2013 des premiers soudages AT homologués pour le type d'acier R400HT. Ces développements s'appuient également sur des expériences d'essais sur la voie, tels que les essais de soudage des ÖBB effectués en 2003 déjà.

Tout comme d'autres compagnies ferroviaires européennes, la DB Netz AG également met actuellement en œuvre, conformément à un référentiel, les types d'acier perlitique R260 et la variante à champignon trempé R350HT. L'emploi s'inscrit dans la volonté de maintenir les coûts du cycle de vie à un niveau peu élevé, tout en limitant le nombre de variantes des produits. Ces dernières années, la DB a porté la part des rails à champignon trempé à près de 20 % du volume des approvisionnements. L'emploi étendu à des courbes jusqu'à un rayon de 3000 m selon les conditions d'application a pu contribuer à réduire les frais de maintenance. Sur certains nœuds ferroviaires fortement sollicités, des interventions fréquentes sur les rails restent nécessaires en raison du head-check ou d'une usure ondulatoire dans les courbes étroites. Les types d'acier haute résistance à structure perlitique ou bainitique promettent ici une réduction supplémentaire des taux d'endommagement par rapport à l'acier R350HT. Si l'on parvient à allonger les cycles de maintenance tout en augmentant la durée de séjour, cela ne réduira pas seulement les coûts du cycle de vie, mais accroîtra également la disponibilité des nœuds ferroviaires et ainsi de tronçons entiers du réseau.