

## Schnittstelle Rad - Schiene Chancen - Grenzen - Risiken

**Roland Müller (Gleislauftechnik Müller) und Volkmar Walz (zb Zentralbahn)**

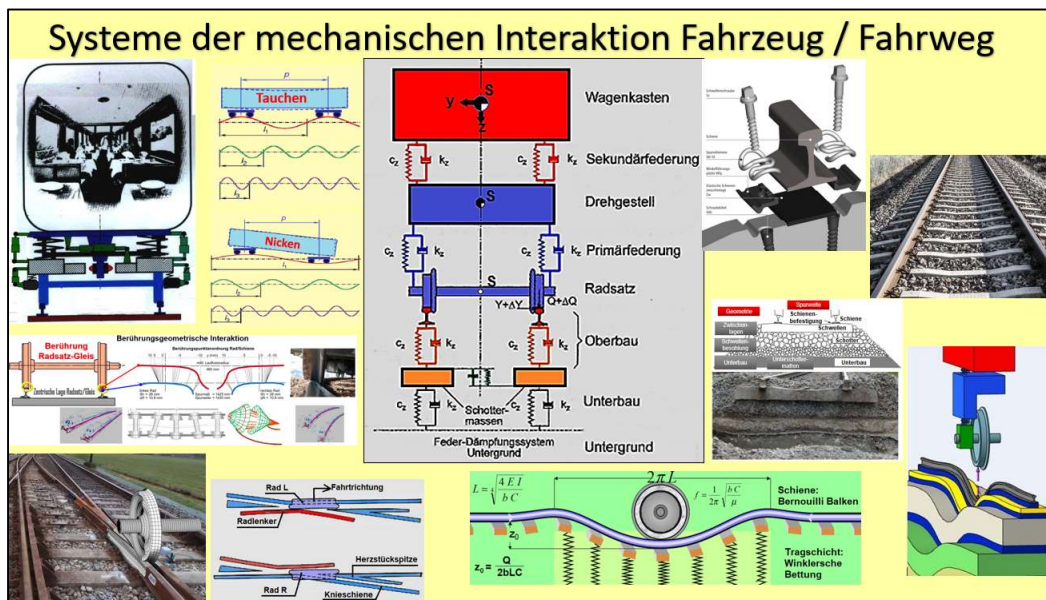
1. Die Interaktion Rad – Schiene ist das Bindeglied zwischen Fahrzeug und Fahrweg. Die Vorgänge, die sich in diesem Bindeglied abspielen, sind kaum sichtbar. Sie sind manchmal hörbar und spürbar. Dies sowohl im Fahrzeuginnern (Komfort) als auch in der Umgebung (Lärm und Erschütterungen). Die Systembeherrschung Rad-Schiene erfordert gemeinsame Anstrengungen von Infrastrukturbetreibern und Eisenbahnverkehrsunternehmen. Ist das aber möglich, wenn Infrastrukturbetreiber wie in Deutschland seine Strecken 452 öffentlichen und 149 nichtöffentlichen EVUs zur Verfügung stellen müssen? Gemeinsam muss und wird man das schaffen.



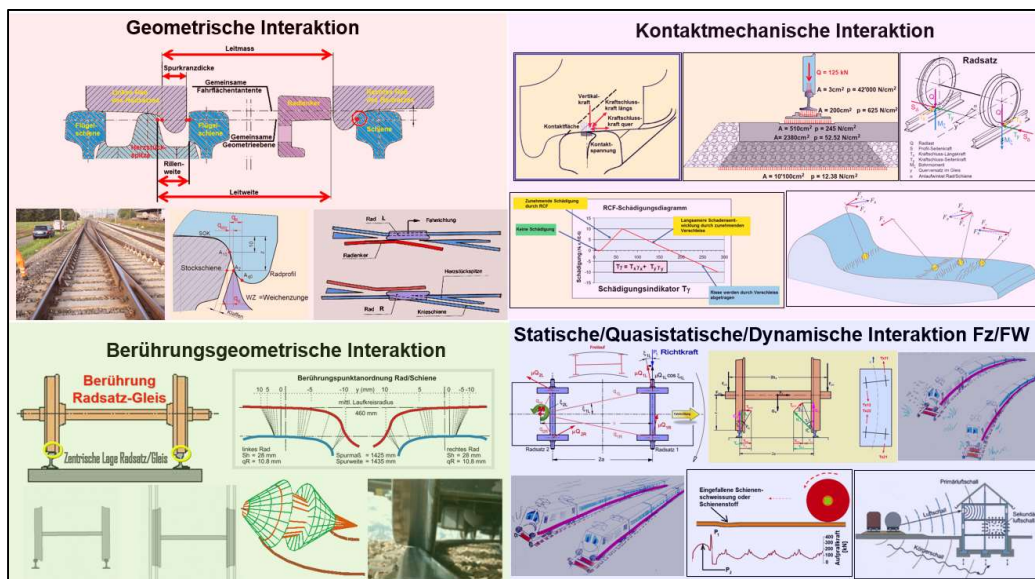
### 2. Inhalt



3. Das System der mechanischen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg besteht aus verschiedenen Komponenten am Fahrzeug einerseits und am Fahrweg andererseits. Das Fahrzeug mit Kasten, Drehgestellen, Radsätzen und deren Kopplungen. Der Fahrweg mit dem Oberbau, Unterbau, Untergrund und deren Aufgaben zur Erhaltung einer dauerhaften Gleislage. Diese Komponenten und deren Bindeglieder sind massgebend beteiligt an Fahrkomfort, Fahrverhalten, Fahrsicherheit sowie Kosten und Verfügbarkeit des Systems Eisenbahn

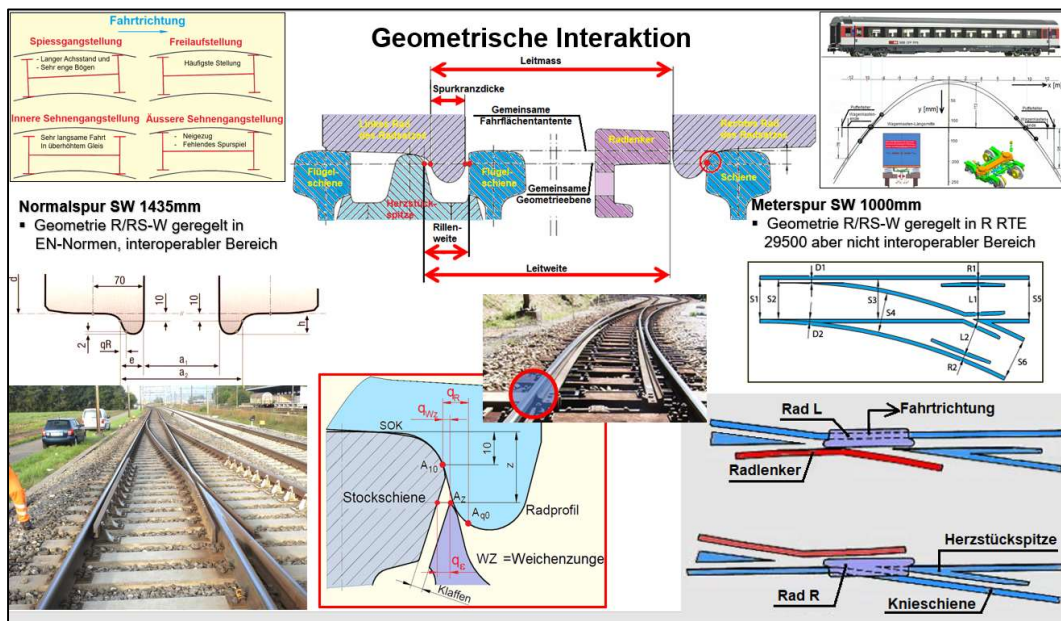


4. Ein wesentlicher Bestandteil der Eisenbahnen setzt sich aus einer Vielzahl von Fahrzeugen und Infrastrukturanlagen zusammen. Vieles davon ist sichtbar und in unendlich vielen schönen Bildern darstellbar, hörbar, fühlbar, tastbar und in kleinerem Massstab in faszinierender Art und Weise nachbaubar. Den menschlichen Sinnen jedoch weniger zugänglich sind die Mechanismen aus mechanischen Wechselwirkungen Fahrzeug/Fahrweg sowie die sich darin tummelnden Interaktionen. Hier sind sie in einer groben Übersicht aus den Gesichtspunkten der Geometrie, der Berührung und Kontaktmechanik sowie der vielfältigen dynamischen Vorgänge dargestellt.

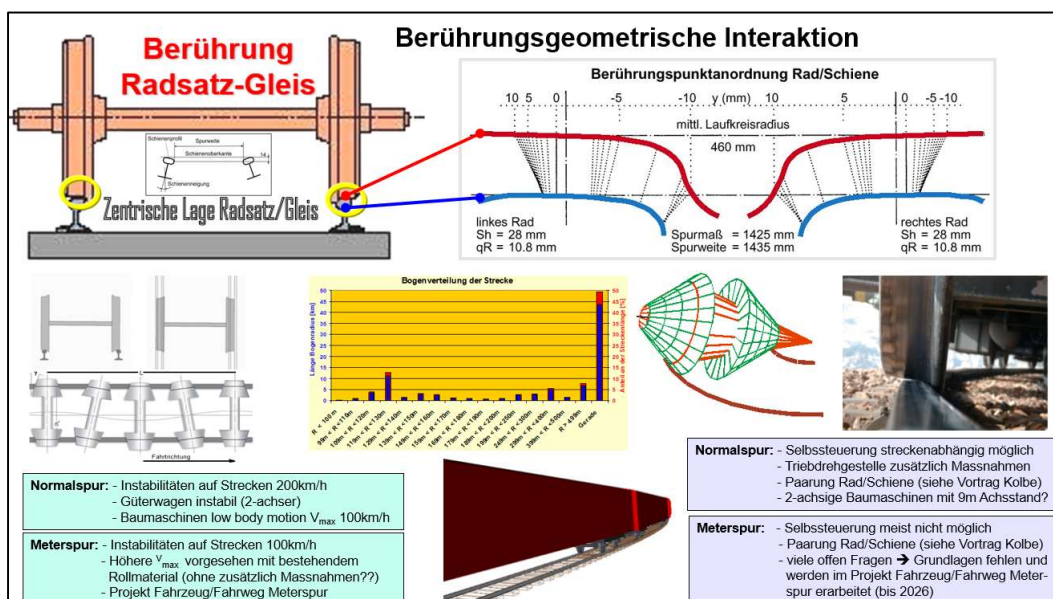




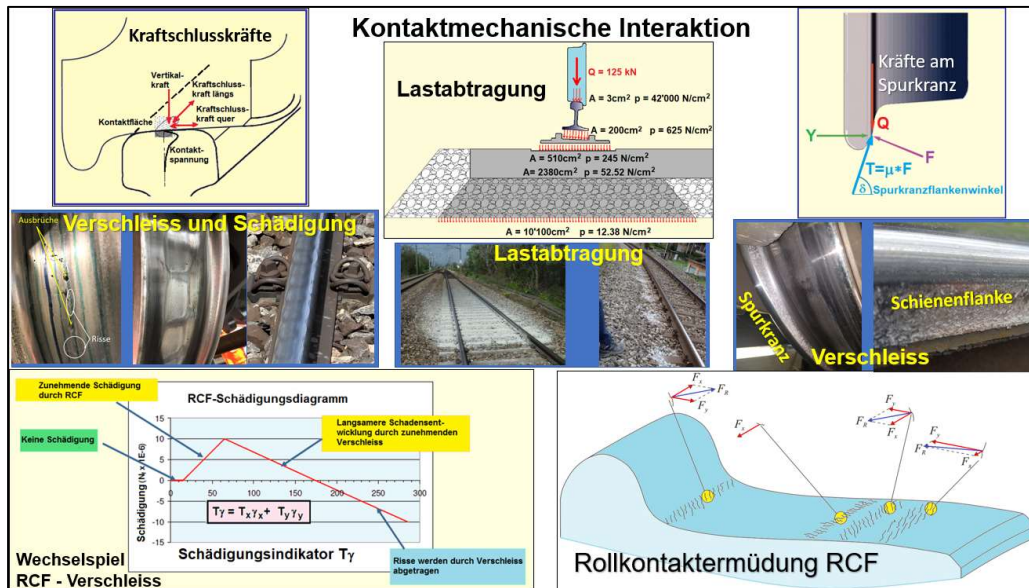
5. Die einheitlichen Regeln der geometrische Interaktion Rad/Schiene und Radsatz/Gleis sind eine der Grundvoraussetzungen für Interoperabilität des Eisenbahnsystems. Im Gegensatz zur Strasse handelt es sich dabei um ein spurgebundenes System. Die Abmessungen und Formen der Rad- und Schienenprofile, Radsätze und Gleise, die Gestaltung der Weichen und Kreuzungspartien, die Stellung der Fahrzeuge und Fahrwerke im Spurkanal sind Gegenstand der geometrischen Interaktion und ein wesentlicher Bestandteil der Sicherheit des Eisenbahnsystems.



6. Bei der Berührung von Rad und Schiene bzw. Radsatz und Gleis und vor allem bei den Auswirkungen dieser Interaktionsgegebenheiten sind zwar die Auswirkungen noch allgemein verständlich darstellbar. Zum Verständnis der detaillierten Ursachen gibt es zwar eine Menge von Veröffentlichungen. Diese sind jedoch von der Fachwelt für die Fachwelt geschrieben. Darin sind die Gesetzmässigkeiten für die Beherrschung hoher Fahrgeschwindigkeiten und des Bogenlaufverhaltens verborgen. Sie enthalten aber auch die Grundlagen für das Verständnis von Schädigungen und ungünstigen Veränderungen an Rad und Schiene.



7. Die Tragfähigkeiten der Schichten im Oberbau, Unterbau und Untergrund sind signifikant geringer als diejenigen von zum Beispiel Stahl auf Stahl. Die Lasten müssen sich daher in diesen Schichten auf deutlich grösseren Flächen abstützen können, damit sich keine negativen Auswirkungen auf die Gleislage einstellen können. Im direkten Kontakt von Rad und Schiene herrschen sehr hohe Beanspruchungen, welche sich in erhöhtem Verschleiss Schädigungen an den Fahrflächen äussern. Die Kontaktmechanik ist das Bindeglied zwischen den Kräften Rad/Schiene und den auf deren Kontaktbereiche einwirkenden Mechanismen. Bilden sich im Kontaktbereich Schäden wie zum Beispiel Risse aus, so kann durch höheren Verschleiss das Wachstum der Risse durch deren Abtrag vermieden werden.

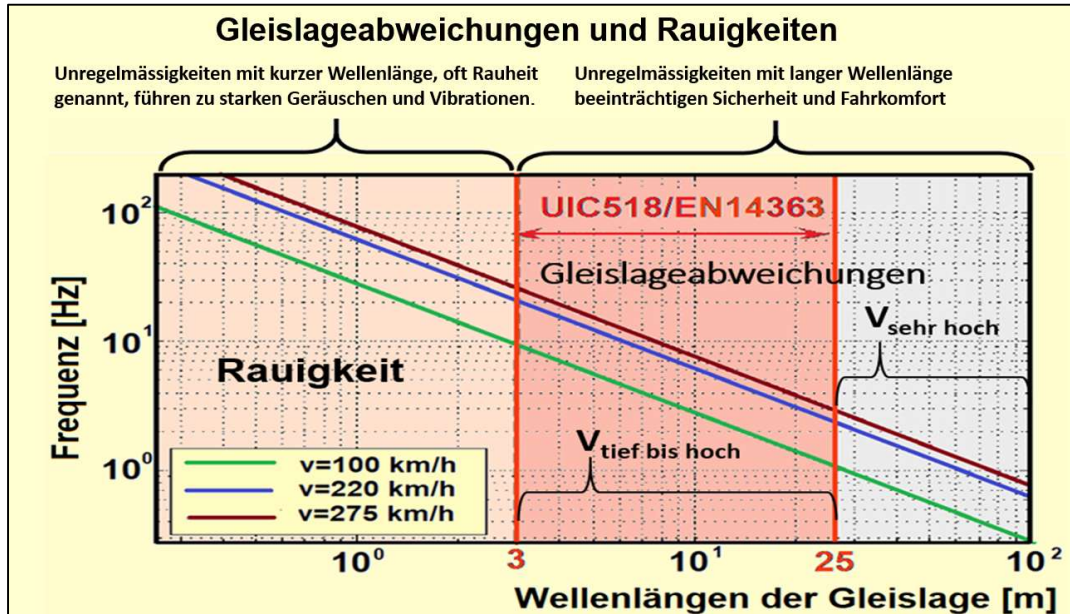


8. Im Gegensatz zum Strassenfahrzeug werden die Radsätze der Eisenbahnfahrzeug in der Regel nicht gesteuert. Das heisst, die Radsätze fahren im Bogen gerade aus. Dies hat bei der Bogenfahrt «quasistatische» zur Kraftschlusskräfte und damit Verschleiss und Schädigungen zur Folge. Je nach Gleislage, Steifigkeitssprüngen in der Gleislängsachse und Berührbedingungen Rad/Schiene entwickeln sich unterschiedlichste dynamische Reaktionen. Diskontinuitäten am Fahrweg (Weichen, Isolierstösse), Schlupfwellen und unrunde Räder führen zu erhöhten Beanspruchungen an Fahrzeug und Fahrweg sowie zu Lärm und Erschütterungen.





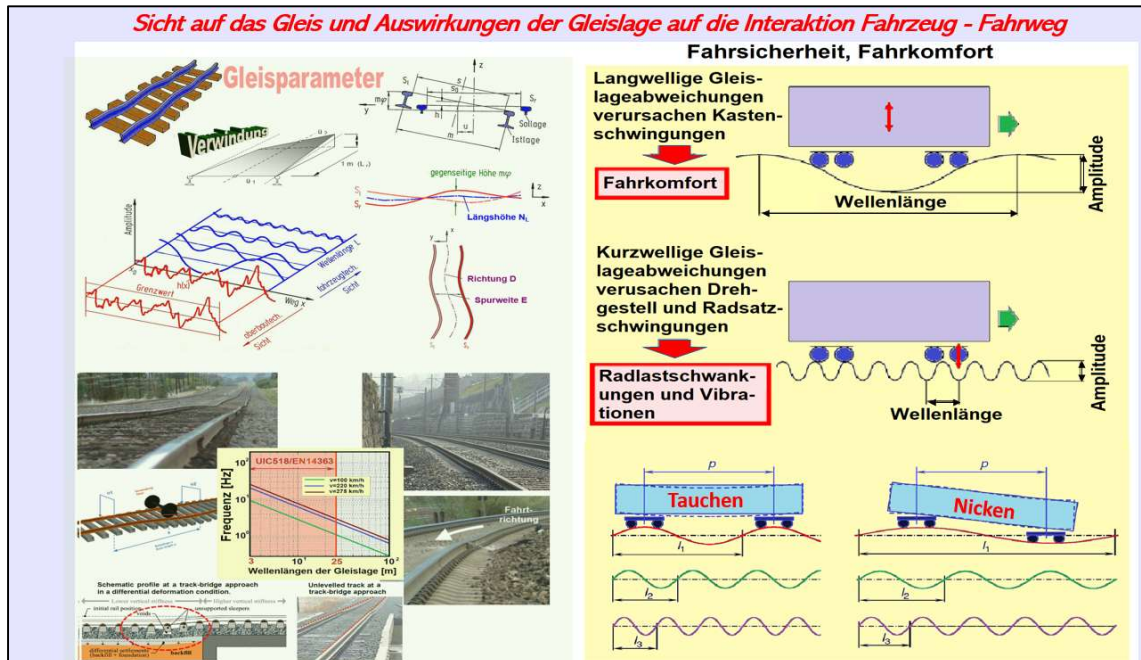
9. Bei den Gleislageabweichungen wird zwischen 3 Bereichen unterschieden. Für Fahrsicherheit, Fahrkomfort und Laufverhalten bis 200 km/h grundsätzlich Wellenlängen von 3 bis 25m. Darüber Hochgeschwindigkeitsverkehr. Wellenlängen unter 3m als Rauigkeiten bezeichnet. Dargestellt sind für drei Geschwindigkeiten die Frequenzen, die in Abhängigkeit der Wellenlängen und der Fahrgeschwindigkeiten angeregt werden.



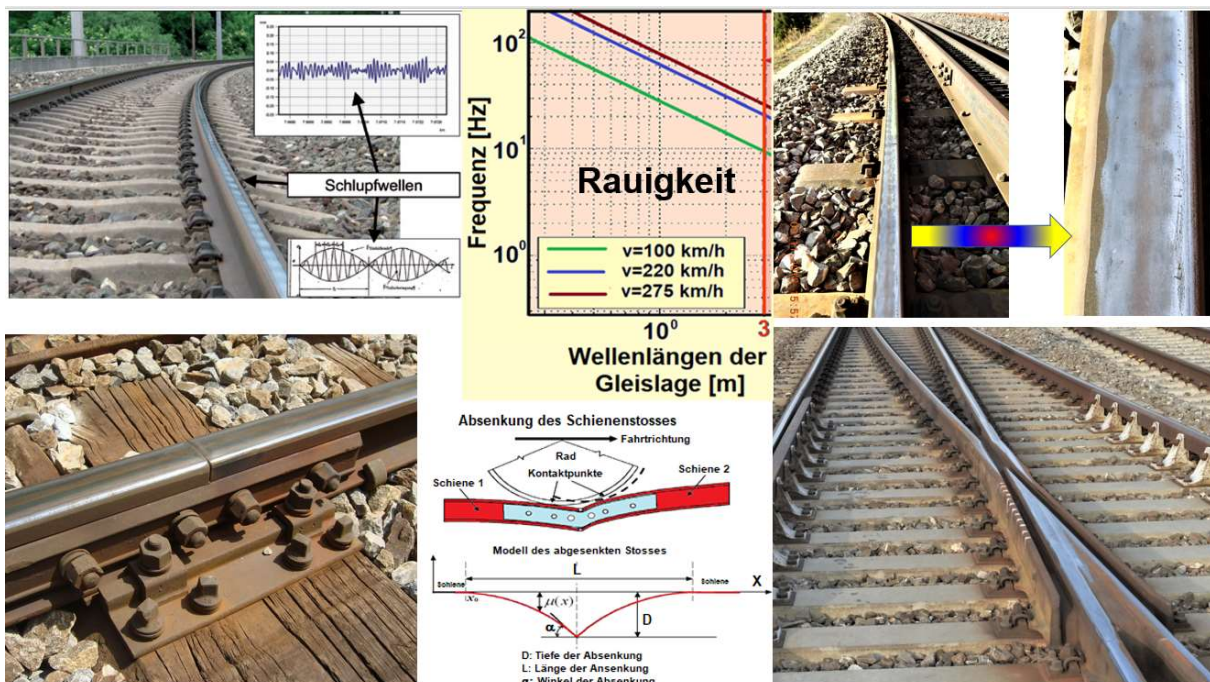
10. Die Starrkörper Drehgestell (4 bis 10 Hz) und Fahrzeugkasten (0.5 bis 3Hz) bewegen sich bei tiefen Frequenzen. An der Schnittstelle Rad/Schiene treten die höchsten Frequenzen auf. Gleiskörper und Schichten der Fahrbahn liegen im mittleren Frequenzbereich



11. Links oben ein Messschrieb zur Gleislage. Dieser wird für die Gleisinstandhaltung benötigt und kann für Simulationsrechnungen zur Interaktion Fahrzeug/Fahrweg verwendet werden. Aus Sicht der Fahrzeugreaktionen sind jedoch die Wellenlängen und deren Amplituden von Interesse. Bei grossen Wellenlängen reagiert der Fahrzeugkasten (zum Beispiel Tauchen, Nicken). Bei kleineren Wellenlängen reagieren die Drehgestelle. Die Räder und Radsätze beteiligen sich auch bei sehr kleinen Wellenlängen.

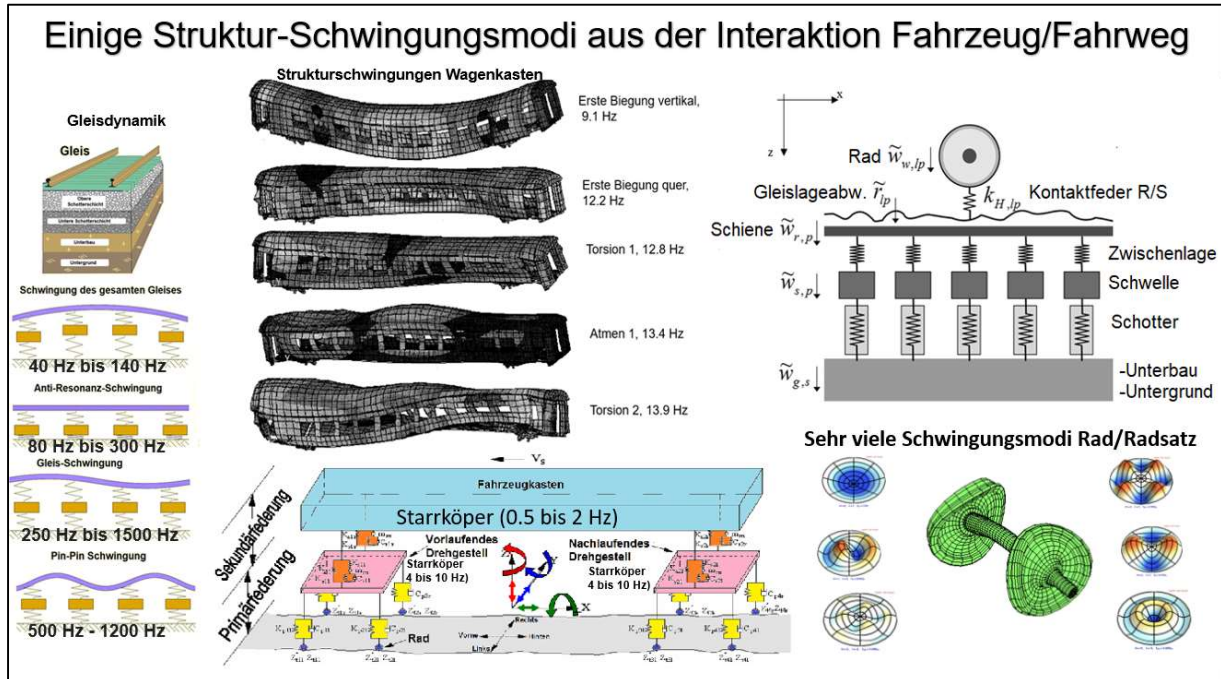


12. Hier befinden wir uns im Bereich der Rauigkeiten. In diesem Bereich finden sehr hochfrequente Vorgänge statt, wo vor allem die Radsätze/Räder und der Oberbau/Schienen beteiligt sind. Die Schlupfmuster an den bogeninneren Schienen deuten auf hochfrequente Bewegungen an der Schnittstelle von Rad und Schiene hin. Die stossartigen Anregungen an Schienenstössen und Weichenherzstücken regen den gesamten Radsatz und den Oberbau zu Schwingungen an und erzeugen Erschütterungen und Lärm sowie Schäden am Fahrweg.





13. Hier einige Schwingungsmoden von Fahrzeug und Gleis. Schön zu sehen sind die tieffrequenten Vorgänge im abgefederten Teil der Fahrzeuge (bis 14 Hz). Dann der Oberbau des Gleises im mittelfrequenten Bereich und die Schienen bis 1500 Hz. Noch höher sind die Frequenzen beim Radsatz und im höchsten Frequenzbereich sind die Schwingungsmodi der Räder angesiedelt (bis 8000 Hz).



14. Zwei unterschiedliche Radprofile im gleichen Bogen eingebaut in derselben Fahrzeugbauart links kurz nach der Reprofilierung und rechts nach Verschleissanpassung durch den Betriebseinsatz. Das was wir auf die Räder draufdrehen verändert sich im Betriebseinsatz mit grösseren Konsequenzen auf das Fahrzeugverhalten. Links schlecht im Bogen aber unter Umständen günstig bei höheren Fahrgeschwindigkeiten. Rechts gut im Bogen aber unter Umständen ungünstig bei höheren Fahrgeschwindigkeiten.



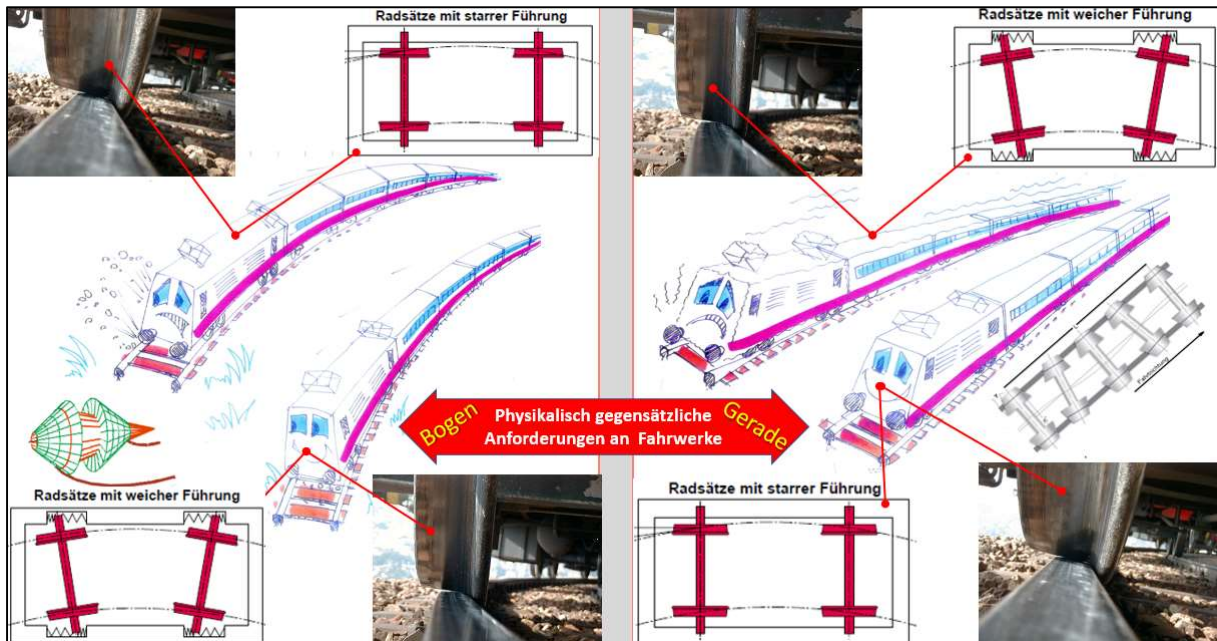
## 10. IHRUS Tagung 2021 Verkehrshaus Luzern, 18. November 2021

15. Hier nochmals die beiden Radprofile von vorhin.

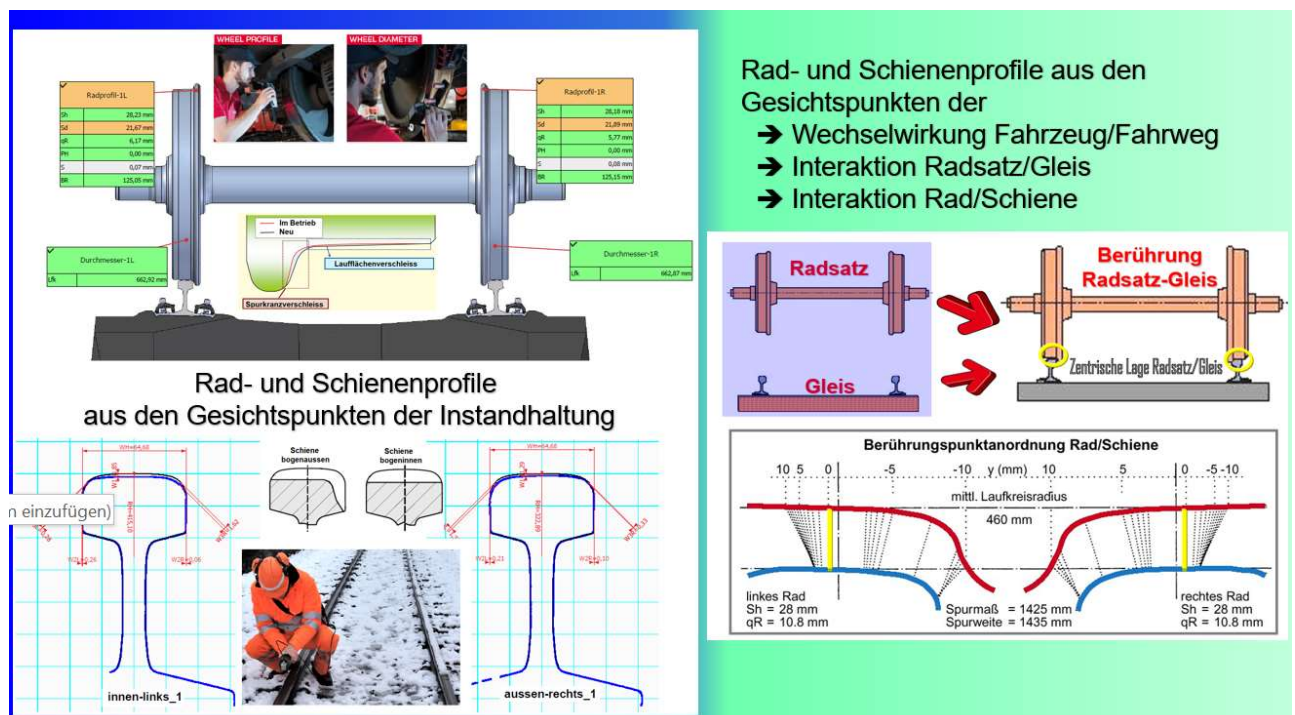
Links oben ungünstiges Radprofil mit starr geführten Radsätzen im Fahrwerk → schlecht im Bogen, rechts unten die gleiche Kombination günstig bei höheren Fahrgeschwindigkeiten.

Links unten günstiges Radprofil mit radialeinstellbaren Radsätzen im Fahrwerk → günstig im Bogen, rechts oben die gleiche Kombination ungünstig bei höheren Fahrgeschwindigkeiten.

⇒ Bogen und Gerade verlangen Kompromisse zwischen den physikalisch gegensätzlichen Anforderungen an Fahrwerke

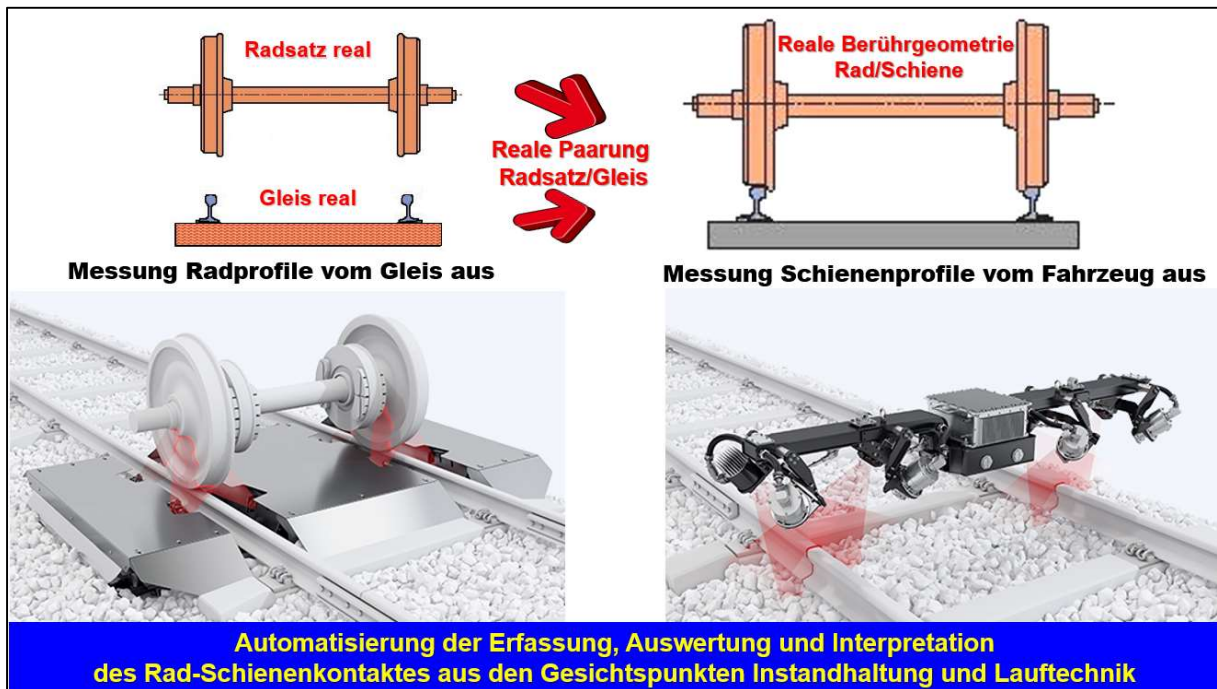


16. Um diese gegensätzlichen Verhaltensweisen zu verstehen brauchen wir die Eigenschaften der Fahrwerke und die realen Profile von Rädern und Schiene. Dazu müssen die Profile von Rad und Schiene nicht aus den Gesichtspunkten der Instandhaltung (links) sondern als Paarung Rad/Schiene aus den Gesichtspunkten der Lauftechnik (rechts) zur Verfügung stehen.

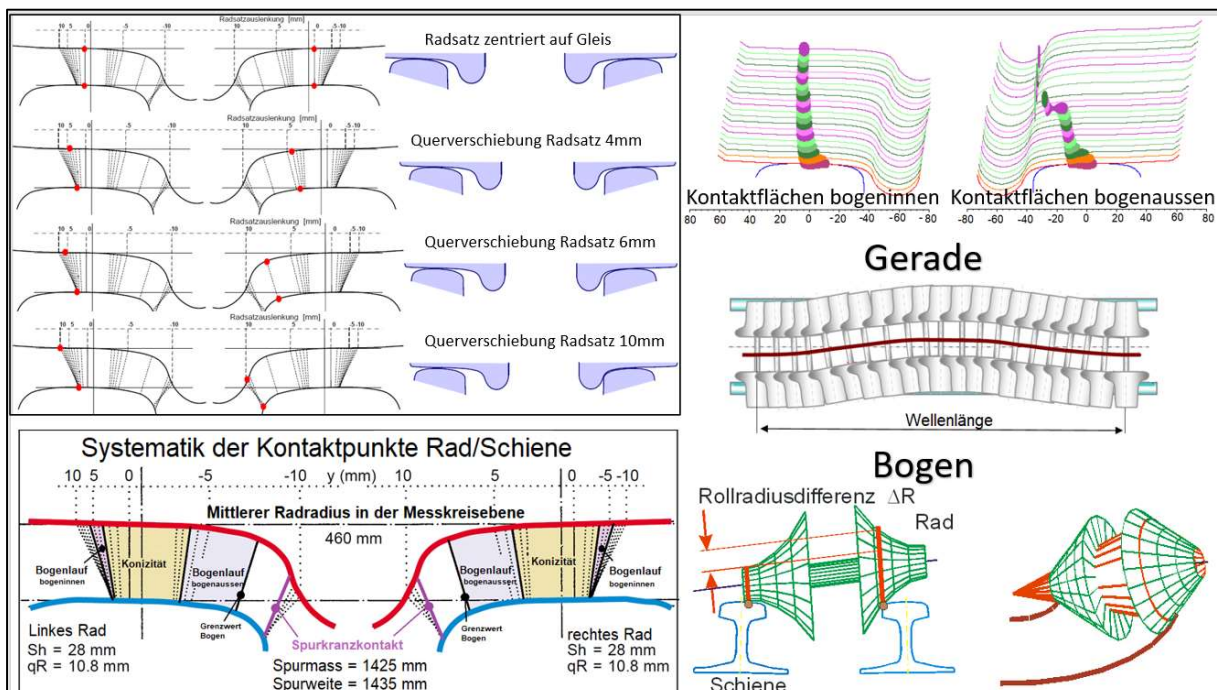




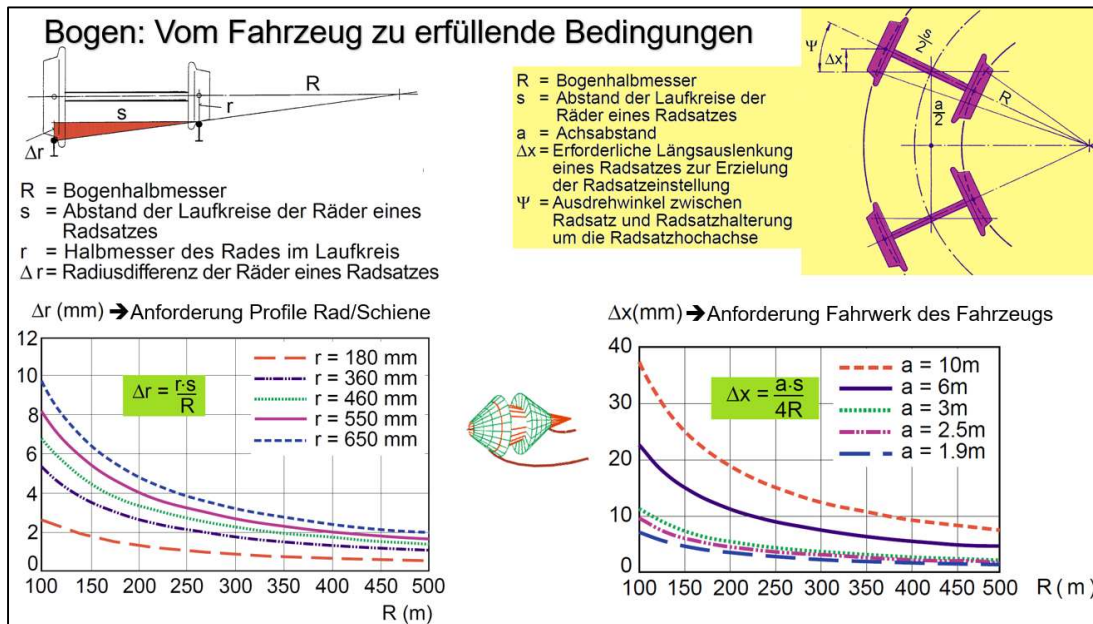
17. Für die Erfassung der Profile von Rad und Schiene stehen heute Anlagen der Automatisierungstechnik zur Verfügung. Diese Daten dienen neben den Gesichtspunkten der Instandhaltung auch zur Beherrschung der Interaktion Fahrzeug/Fahrweg und Rad/Schiene.



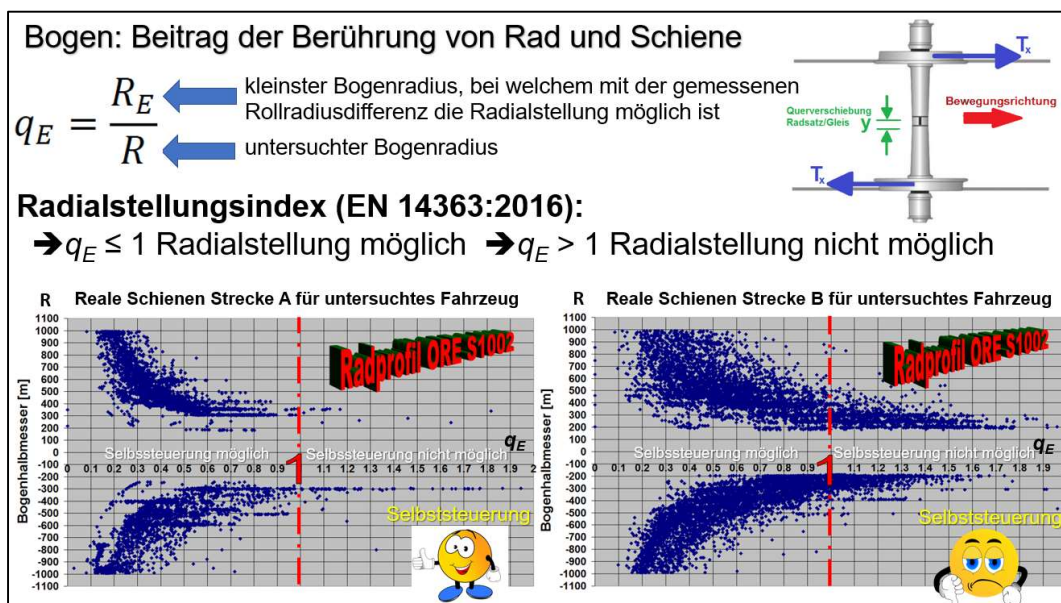
18. Liegen die realen Daten zu den Rad- und Schienenprofilen vor, so lassen sich durch deren Paarungen erste Rückschlüsse auf ungünstige Verhaltensweisen der Fahrzeuge bei Bogenfahrt oder bei höheren Fahrgeschwindigkeit erklären und daraus Abhilfemassnahmen ableiten. Zudem ergeben sich daraus Anforderungen an neu zu bauende Fahrzeuge, an die Reprofilierung der Radsätze und an das Reprofilieren der Schienen (Schleifen, Fräsen). Die farbliche Unterscheidung bei den Berührungspunktzuordnungen verdeutlicht die Aufenthaltsbereiche der Berührflächen in Abhängigkeit der Trassierungsgegebenheiten (Bögen, Geraden).



19. Für guten Bogenlauf müssten für das kinematische Abrollen der Radsätze die bogen-äusseren Räder einen grösseren Durchmesser aufweisen als die bogeninneren. Das ist aber praktisch nicht umsetzbar. Also muss dies durch die Profilpaarung von Rad- und Schiene realisiert werden. Da die Profile der Räder einen konischen Verlauf aufweisen erzeugen sie diese Durchmesserunterschied durch Querverschiebung des Radsatzes bei der Fahrt im Bogen von selbst. Links unten ist die notwendige Rollradiendifferenz in Abhängigkeit von Bogenhalbmesser und Raddurchmesser dargestellt. Wenn diese Bedingungen erfüllt ist muss das Fahrwerk dieses Abrollen durch entsprechende Stellung der Radsätze im Bogen ermöglichen (Ausdrehen um die Hochachse).

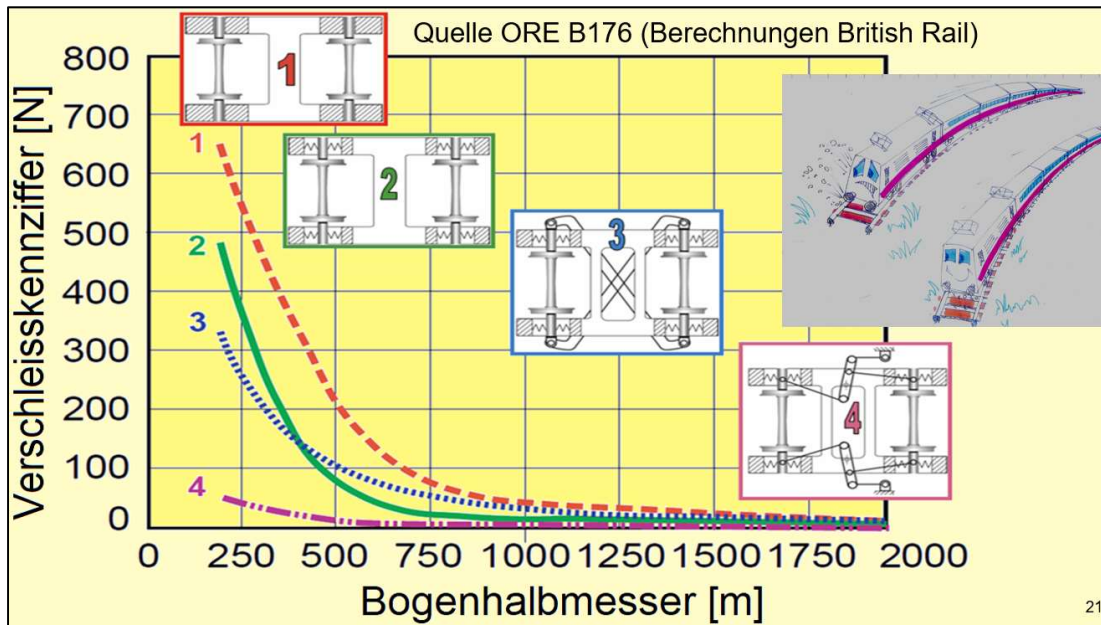


20. Dank den onboard-Systemen zur Erfassung der Schienenprofile ist es möglich, ganze Strecken mit unterschiedlichen Radprofilen zu paaren und abzuklären, ob die Rad- Schienen-paarung eine Selbststeuerung der Radsätze zulässt. Ist aufgrund der Paarung der durch Selbststeuerung befahrbare Bogen kleiner ist als der zu befahrende Bogen so ist  $q_E < 1$  und damit eine Selbststeuerung der Radsätze möglich. Die Strecke links eignet sich damit für Fahrwerke mit Selbststeuerung, die Strecke rechts hingegen nicht.



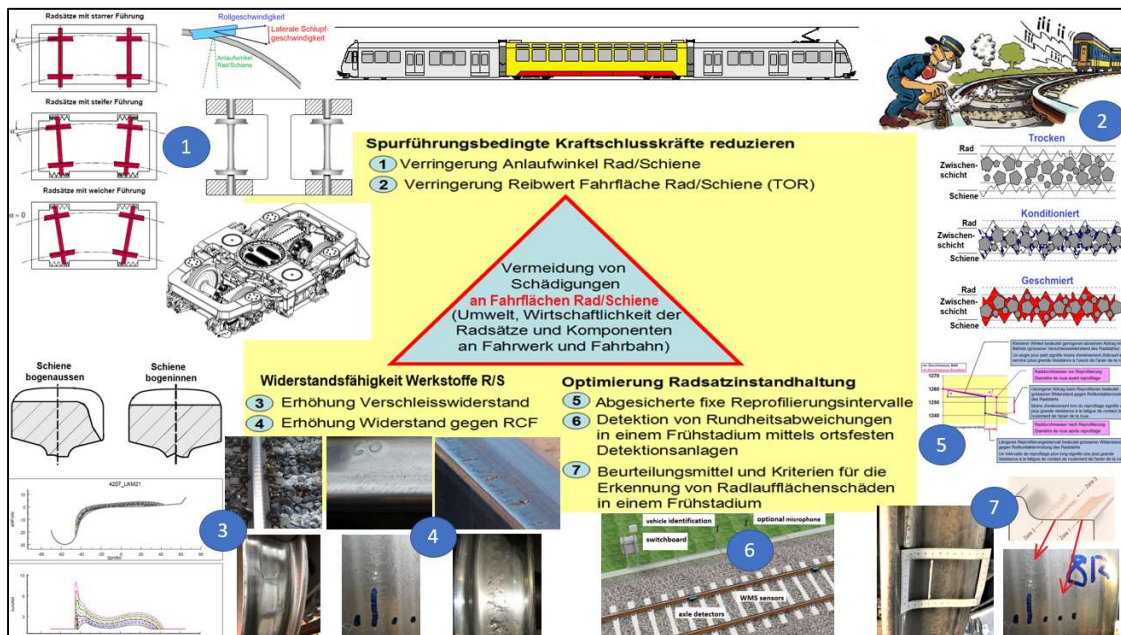


21. Das Bild zeigt für 4 unterschiedliche Fahrwerksprinzipien die Verschleisskennziffer in Abhängigkeit des Bogenhalbmessers. Unter der Voraussetzung bedingungsgemässer Rad-Schienenpaarung zeigen sich oberhalb Bogenhalbmessern von rund 750m keine Unterschiede bei den verschiedenen Fahrwerksprinzipien. Bis zu Bogenhalbmessern von rund 400 Meter zeigen die Fahrwerke 2 und 3 deutliche Vorteile gegenüber dem Fahrwerk 1. Bei Netzen mit einer Häufung von sehr kleinen Bogenhalbmessern dürfte es vorteilhaft sein auf zwangsgeführte Fahrwerke überzugehen.

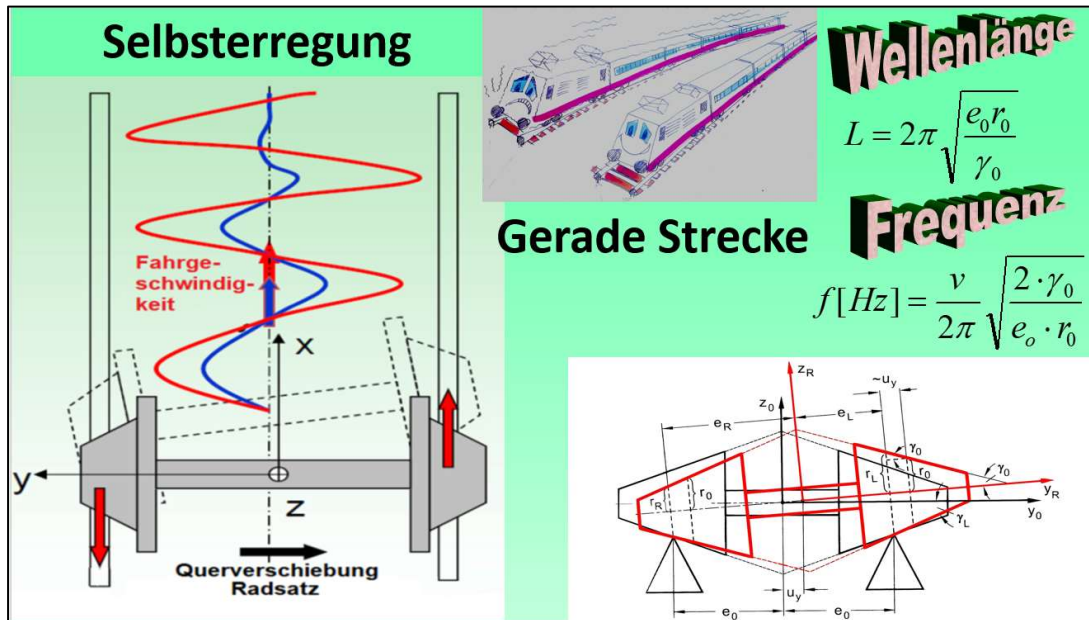


22. Bei Bahnnetzen mit Bogenverteilungen, die im Bereich der kleinen bis sehr kleinen Bogenhalbmesser angesiedelt sind, ergibt sich zur Reduktion von Verschleiss und Schädigungen Rad/Schiene eine Spielwiese mit kurz-, mittel- bis langfristigen Massnahmen. Dazu gehören

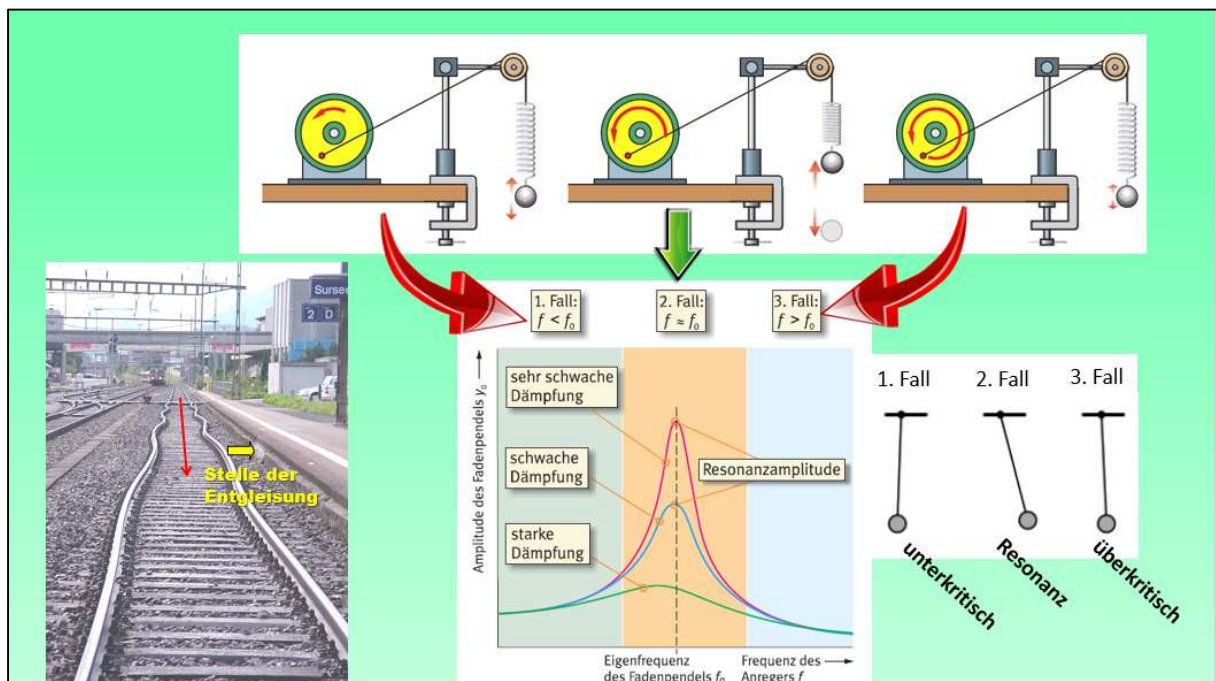
- die Reduktion der spurführungsbedingten Kraftschlusskräfte (Fahrwerk (1), Spurkranzschmierung (2), Schienenkopfkonditionierung (2))
- die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit der Rad- und Schienenwerkstoffe (3) (4)
- die zustandsbezogene Instandhaltung von Rad- und Schiene (5) (6) (7)



23. Auf den geraden Strecken führen die Radsätze einen Wellenlauf aus. Dessen Wellenlänge hängt unter anderem von der Konizität  $\gamma_0$  der Rad-/Schienenpaarung ab. Je höher die Konizität um so kürzer die Wellenlänge und umso höher die Erregerfrequenz bei gleicher Geschwindigkeit. Dabei können die Amplituden der Radsatzquerbewegung mit zunehmender Geschwindigkeit anwachsen, bis sie schliesslich mit den Spurkränzen an den Schienenflanken anschlagen (Zickzacklauf).



24. Beim Erreichen oder bei der Annäherung der Erregerfrequenz aus dem Wellenlauf an gewisse Eigenfrequenzen von Fahrzeugkasten oder Drehgestell steigt deren Schwingungsamplitude stark an (Resonanz). Wir sprechen hier von instabilem Fahrverhalten. Kann dieser Schwingungsmodus nicht ausreichend bedämpft werden, so kann es unangenehm oder gar gefährlich werden (Entgleisung). Das Bild links zeigt eine mögliche Auswirkungen bei instabilem Fahrzeuglauf. Der gesamte Gleisrost hat als Abbild der Wellenlänge des Wellenlaufs verschoben.





25. Aufgrund der unterschiedlichen Massen und in der Folge der höheren Massenträgheiten des Fahrzeugkastens gegenüber dem Drehgestell treten Instabilitäten der beiden Fahrzeugbauteile bei unterschiedlichen Frequenzen auf. Oben ist die Schlingerbewegung des Kastens und unten die Schlingerbewegung der beiden Drehgestelle dargestellt.

- Instabilität des Kastens
  - Frequenz 1 - 2 Hz
  - niedrige äquivalente Konizität
  - grosse Kastenbewegungen
  - Beeinträchtigung des Fahrkomforts
  - bei Fahrzeugen mit weicher Sekundärfederung keine Überschreitung der Grenzwerte der Fahrsicherheit
- Drehgestellinstabilität
  - Frequenz 3 - 9 Hz
  - hohe äquivalente Konizität
  - sicherheitsrelevant
  - Kräfte zwischen Rad und Schiene nehmen mit steigender Geschwindigkeit zu
  - Risiko von Gleisverschiebung und Entgleisung

## Formen der Instabilität

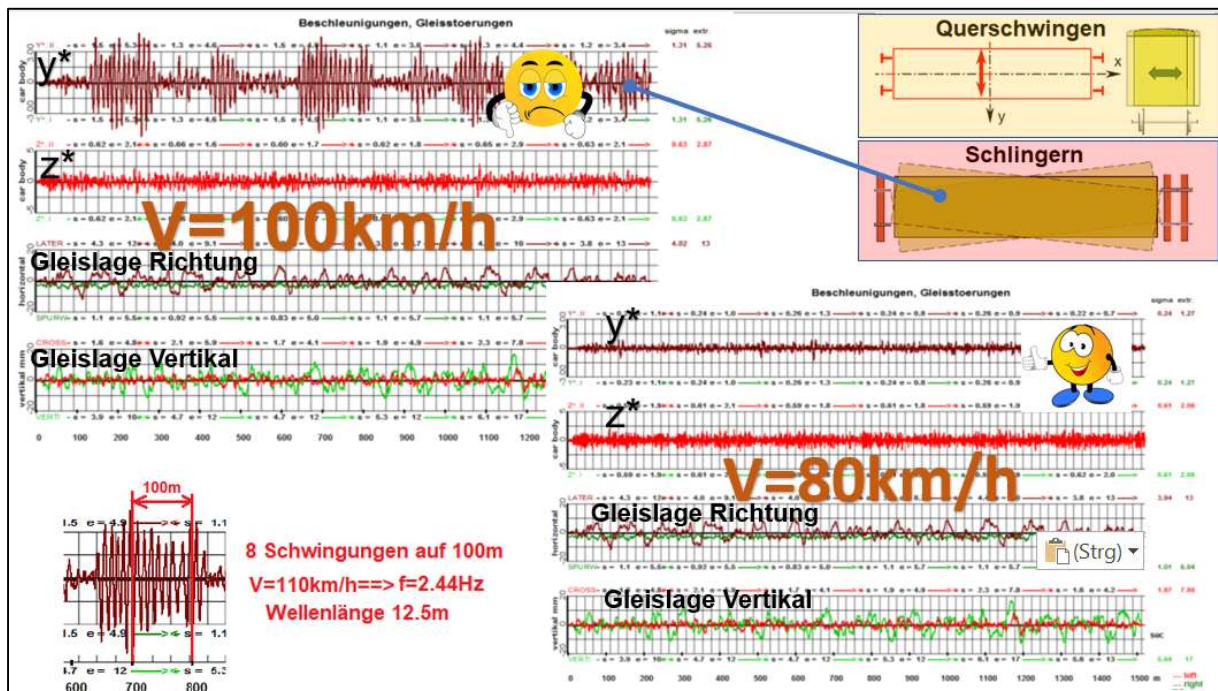
### Schlingern Fahrzeugkasten



### Schlingern Fahrwerke

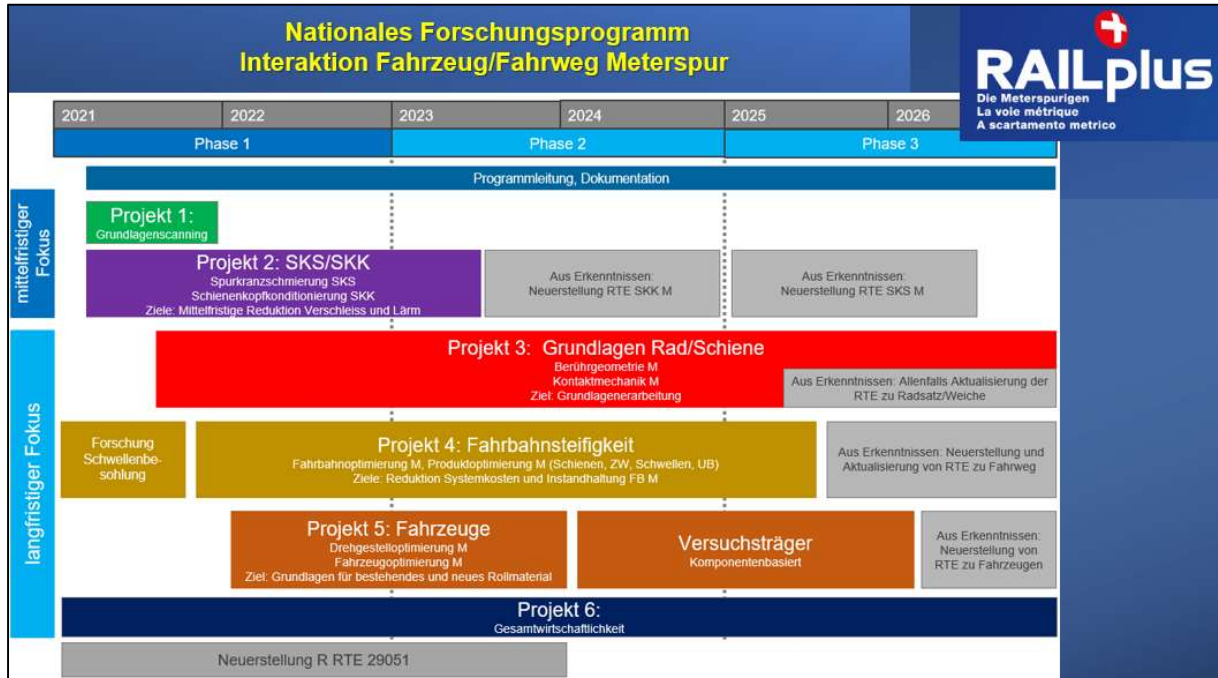


26. Stellenweise instabile Kastenschwingung um die Hochachse bei 100 km/h und stabiles Verhalten bei 80 km/h. Bei einfachen Fahrwerken ist oft schwierig dieses Schwingungsverhalten nachhaltig zu verbessern.



## 10. IHRUS Tagung 2021 Verkehrshaus Luzern, 18. November 2021

27. In der Interaktion Fahrzeug/Fahrweg sind in den letzten Jahren bei diversen Meterspurbahnen vermehrt massive Verschleisserscheinungen sowohl bei den Fahrzeugen wie auch der Infrastruktur zu Tage getreten. Der Schluss liegt nahe, dass im Bereich des Systems Fahrzeug-Fahrweg Meterspur unwissentlich Veränderungen am System vorgenommen wurden, welche das natürliche Systemgleichgewicht aus dem Lot gebracht haben. Die Betroffenheit und die Komplexität des Themas legen ein gemeinsames, koordiniertes Vorgehen der Bahnen, des Sektors unter Berücksichtigung nahe.



28. Danke, dass wir an diesen interessanten Themen arbeiten dürfen.

