

Über neuere Entwicklungen zum geometrischen Rad/Schiene-Kontakt

Dr. Paul Mittermayr, BAMM



DR. MITTERMAYR SCIENTIFIC GMBH & CO KG

Büro für Angewandte Mechanik und Mathematik | Bureau of Applied Mechanics and Mathematics · Vienna, Austria

Der Rad/Schiene - Kontakt

- Theorie und Entwicklung

- Parameter der Rad/Schiene Kontaktgeometrie EN 15302 und TR 17792
- Radprofile (EN 13715)
- Schienenprofile (EN 13674)

- Normativer Rahmen, Anwendung

- Normung EN 14363, TSI
- Messung Rad/Schiene
- Planung und Betrieb

Äquivalente Konizität und andere Parameter

Die Querbewegung eines freien, im Gleis rein rollenden Radsatzes wird durch eine ungedämpfte Wellenbewegung beschrieben. Die äquivalente Konizität γ_e entspricht dem Tangens des Kegelwinkels eines Radsatzes mit konischen Radprofilen, dessen Querbewegung die gleiche kinematische Wellenlänge hat wie die des zugrunde gelegten Radsatzes. (EN 15302:2021 und TR 17792:2022)

Voraussetzungen:

- Rad und Schiene werden als starr (und masselos) angesehen,
- Räder(querprofile) sind über dem Umfang gleich,
- Schienen sind gerade (γ_e) und parallel zueinander, außer für den Radialstellungskoeffizienten
- es werden nur Punktkontakte betrachtet und
- das Wanken des Radsatzes bei seitlicher Auslenkung wird vernachlässigt.

Albert Einstein: „Man soll die Dinge so einfach wie möglich machen, aber nicht einfacher.“

Wellenlauf

Stabilitätsmessfahrten

Beobachtung des Wellenlaufes:

Schon von [Stephenson](#) beschrieben

Ferdinand [Redtenbacher](#): Doppelkegel im Bogen 1855

Von [Klingel](#) 1883 analysiert:

„Über der Lauf der Eisenbahnwagen auf gerader Bahn“

Seither vielfach untersucht!



Rad/Schiene Kontakt

Große Berührfläche

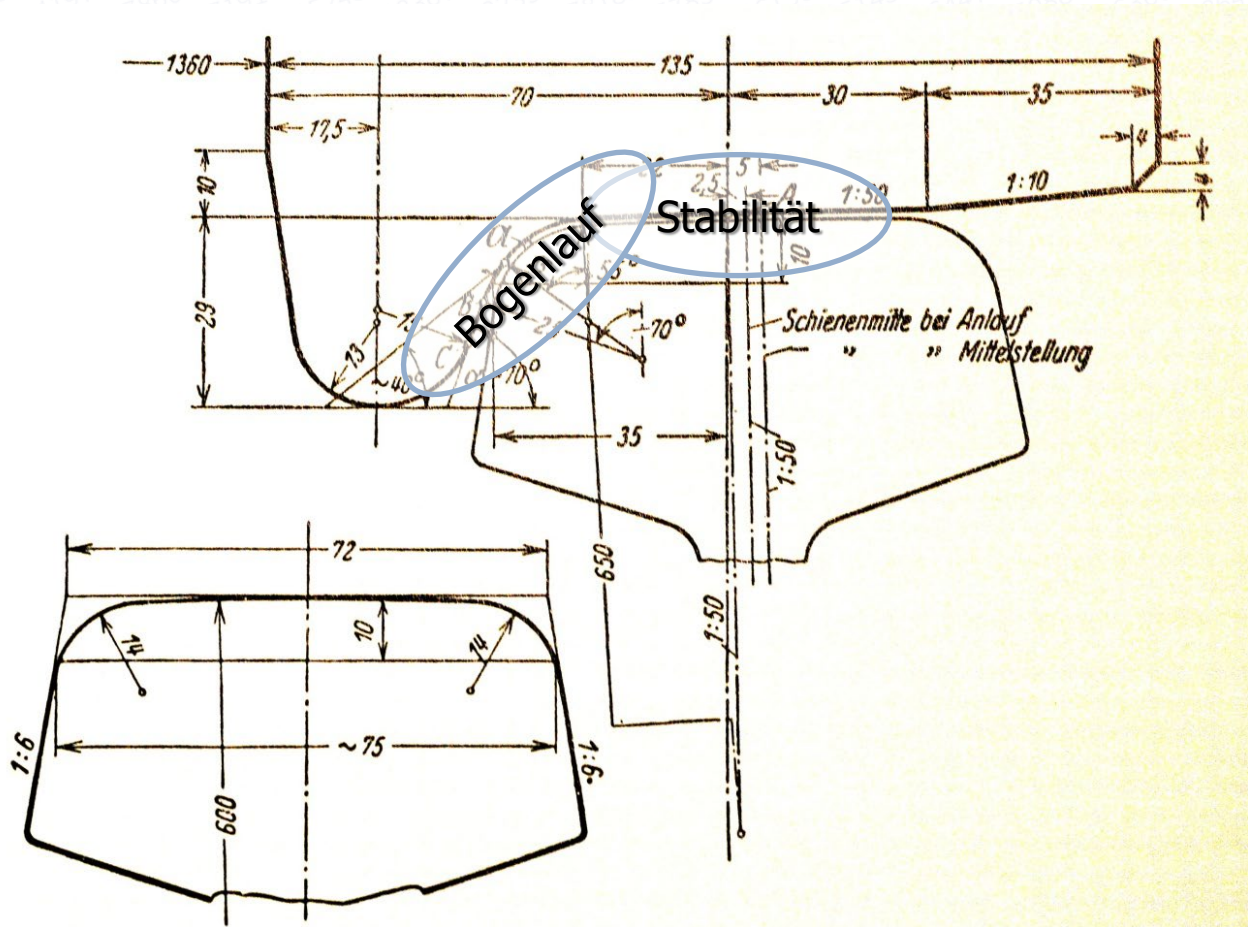
Geringe Abnutzung

Flankenwinkel $b_0=70^\circ$

Lit.:

Organ 89. Seite 341 (1934)

Heumann:



Geometrische Problemstellung

Voraussetzungen:

Starres Rad

R

Starre Schienen

R'

Reines Rollen

Gerades Gleis

Zu seitlichen Auslenkung y

Wankwinkel

$$\varphi = \phi \quad y$$

Höhenlage

$$h = h_0 + \zeta \quad y^2$$

Berührnormale

$$\delta_i = \delta_0 + \xi \quad y$$

Rollradien

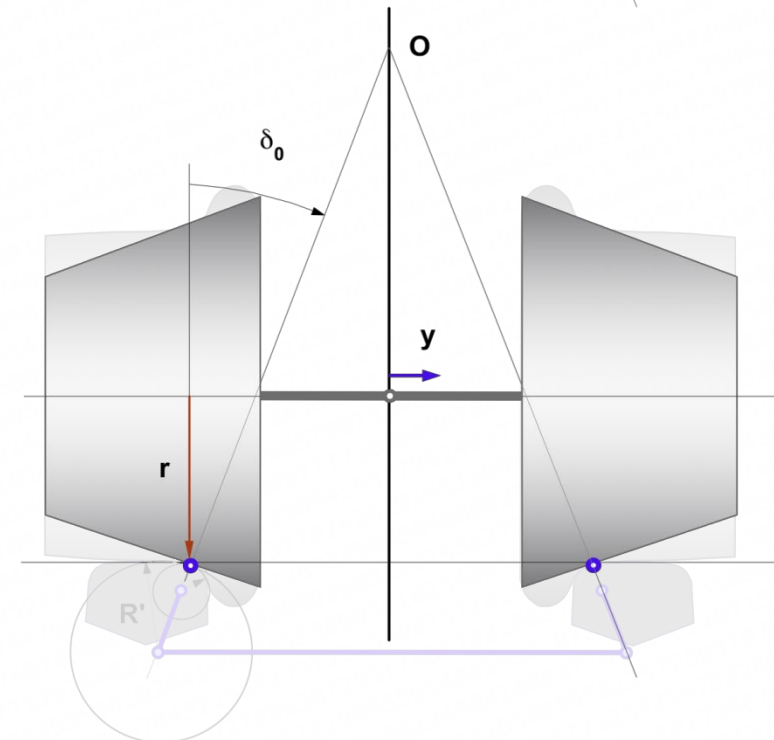
$$r_i = r_0 \pm \gamma_e \quad y$$

Rollradiendifferenz

$$\Delta r = 2 \gamma_e \quad y$$

Kinematische Äquivalenz: Viergelenksbogen

Der Radmittelpunkt beschreibt eine Radlinie



Berechnungsmethoden

Das Anfangswertproblem des Wellenlaufes des starren Radsatzes:

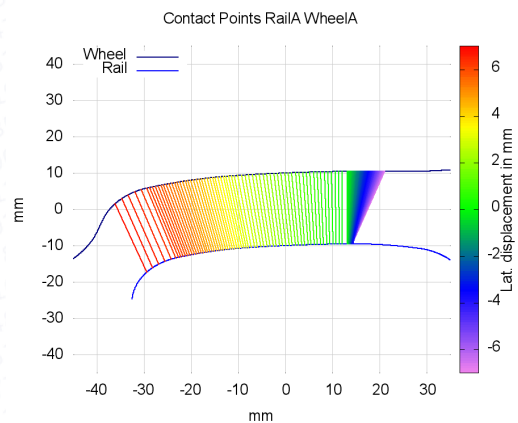
$$y'' + \frac{2(r_l - r_r)}{(r_r + r_l)b} \approx y'' + \frac{\Delta R(y)}{r_0 b} = 0 \quad \text{mit} \quad y(0) = a, y'(0) = 0$$

kann auf unterschiedliche Weise gelöst werden:

- Analytischen Methoden
 - nur für spezielle Fälle (Kegel, Kreis, Berührungspunktsprung)
- Numerische Lösungsmethoden
 - zweistufige Integration der nichtlinearen DGL (z.B. Verfahren von Runge Kutta 1900!)
 - direkte Integration (zweistufig) zur Bestimmung der Periodendauer (siehe TR 17792)
- Näherungsmethoden (teilweise große Abweichungen!)
 - lineare Regression der Δr Funktion
 - harmonische Linearisierung
- Alternative Methoden
 - BRR (Analyse der Spurweite)
 - Quick Conicity (berechnet **nicht** die Konizität im Sinne der EN 15302!)

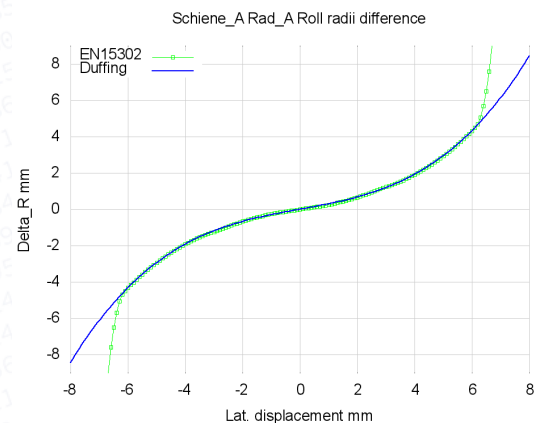
Rechenschritte

Rad/Schiene Berührlagen



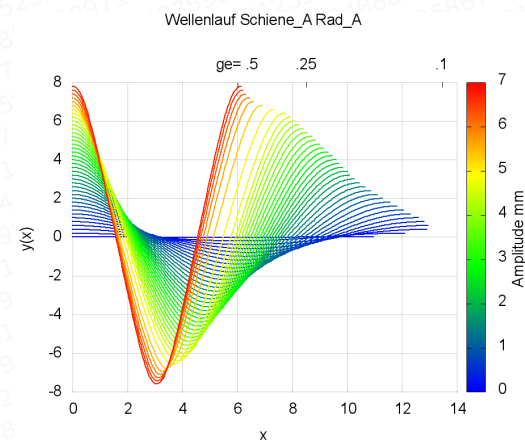
(c) BAMM 2021

Rollradiendifferenz



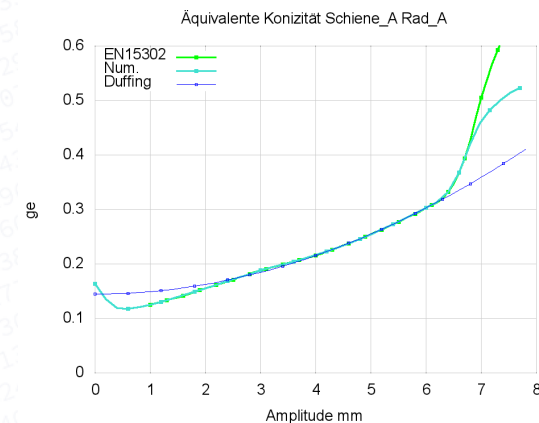
(c) BAMM 2021

Wellenlauf

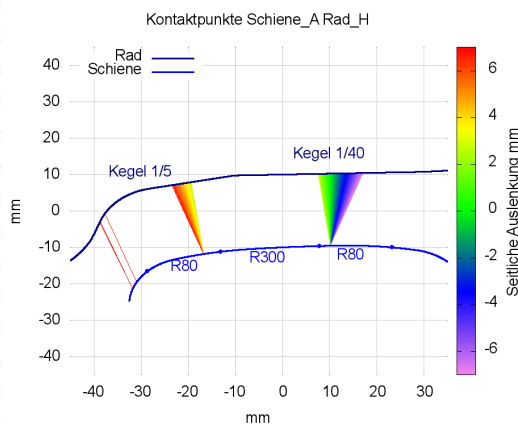


(c) BAMM 2021

Konizität

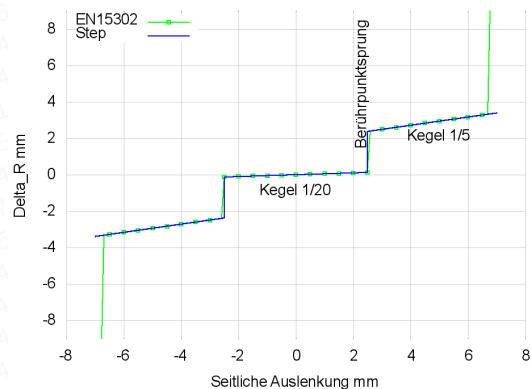


(c) BAMM 2021



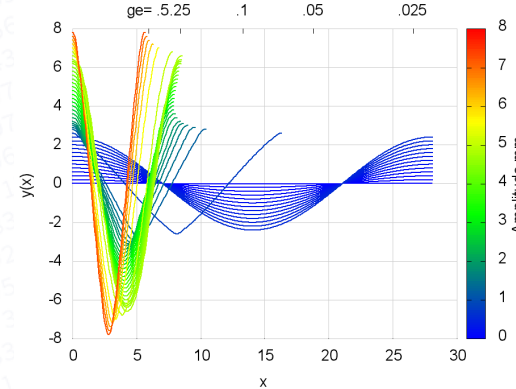
(c) BAMM 2021

Rollradiendifferenz



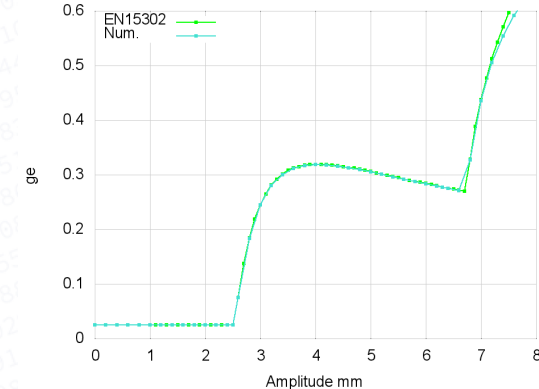
(c) BAMM 2021

Wellenlauf Schiene_A Rad_H



(c) BAMM 2021

Schiene_A Rad_H Äquivalente Konizität



(c) BAMM 2021

Weitere Parameter, Anwendungen:

Nonlinearity Parameter (EN 15302)

Steigung der äquivalenten Konizität γ_e zwischen 2 und 4 mm

Rollradienkoeffizient (EN 15302)

Beziehung, die die Fähigkeit einer Rad-Schiene-Berührgeometrie beschreibt, die Rollradiendifferenz bereitzustellen, die für einen Radsatz erforderlich ist, um einen tatsächlichen Gleisbogen ohne Längsschlupf und Spurkranzanlauf zu befahren.

Berührungpunktdichte

Fahrspiegel

Profilentwicklung

Rollradienkoeffizient

EN 15302:

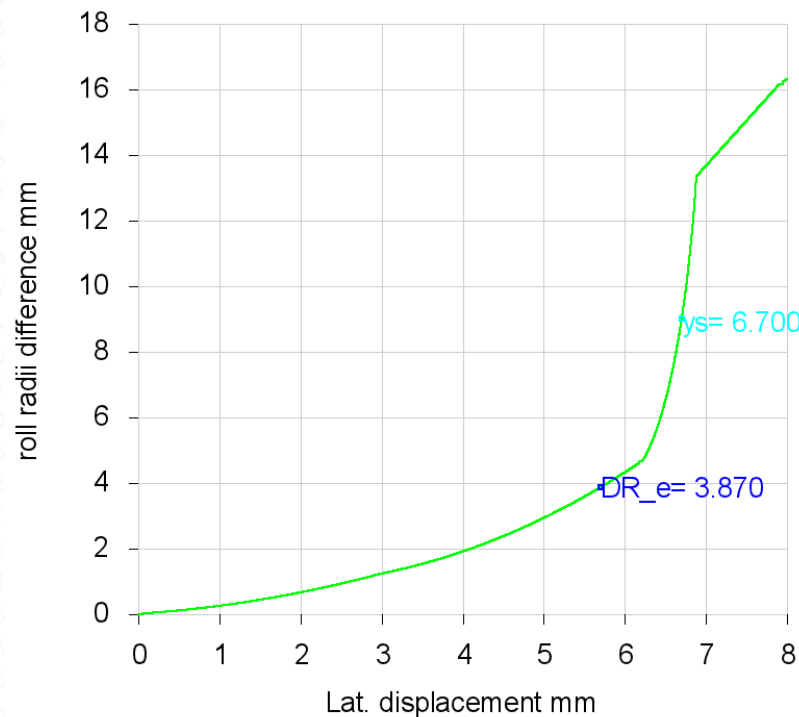
Die Δr -Funktion muss auf Diskontinuitäten überprüft werden:

ausgehend von einer Suche $\Delta r = 0$ nach dem ersten Punktepaar $A^\circ (yA^\circ, \Delta rA^\circ)$ und $A^\infty (yA^\infty, \Delta rA^\infty)$

im Bereich $0 \leq \Delta r \leq 10$ mm für Linksbögen und $-10 \text{ mm} \leq \Delta r \leq 0$ für Rechtsbögen mit $|yA^\circ - yA^\infty| = 0,1$ mm und $|\Delta rA^\circ - \Delta rA^\infty| \geq 3$ mm

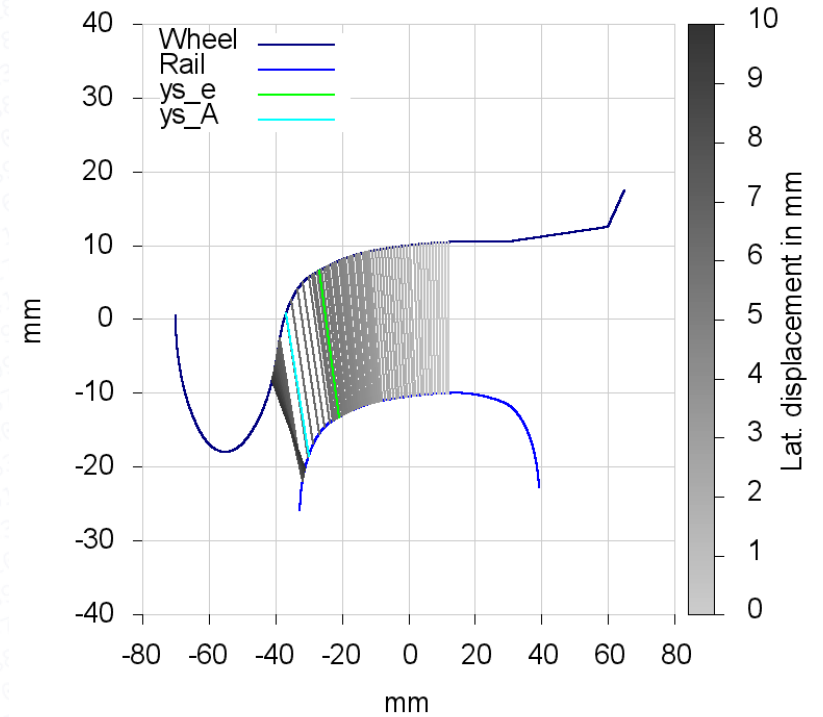
unter Berücksichtigung der Einschränkungen $yA^\circ < yA^\infty$ für Linksbögen und $yA^\infty < yA^\circ$ für Rechtsbögen

EN15302: RSI Rail_A Wheel_A



Rail: Rail_A sw=1435.2 Wheel: Wheel_A sm=1425.4

EN15302: RailA-WheelA



Rail: Rail_A sw=1435.2 Wheel: Wheel_A sm=1425.4

Profilnormen (Rad/Schiene)

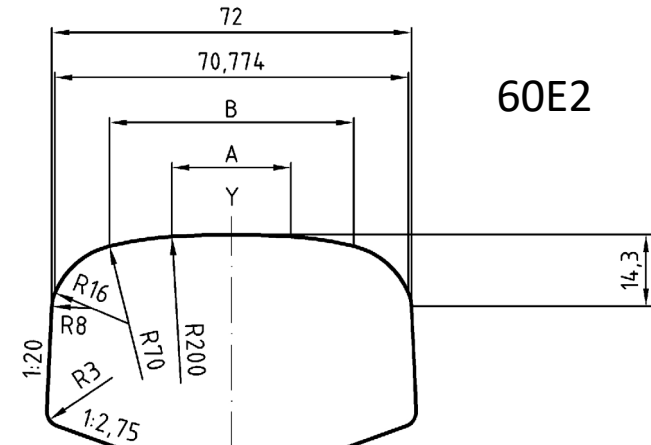
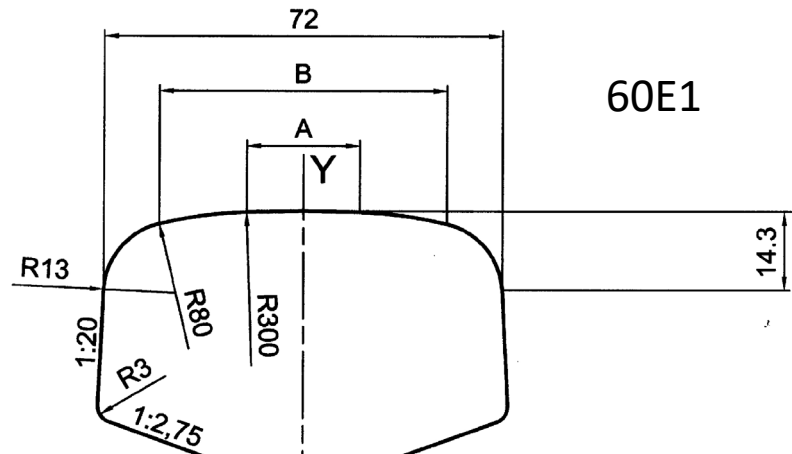
- Laufprofil von Rädern EN 13715 (EPS, S1002, Kegel)

Jedes Profil, das nicht konform zu dieser Norm ist, kann nur nach Vereinbarung zwischen dem Betreiber und dem Infrastrukturmanager angewandt werden.

➤ Die berührgeometrische Eignung der Rad/Schienenpaarung ist zu prüfen!

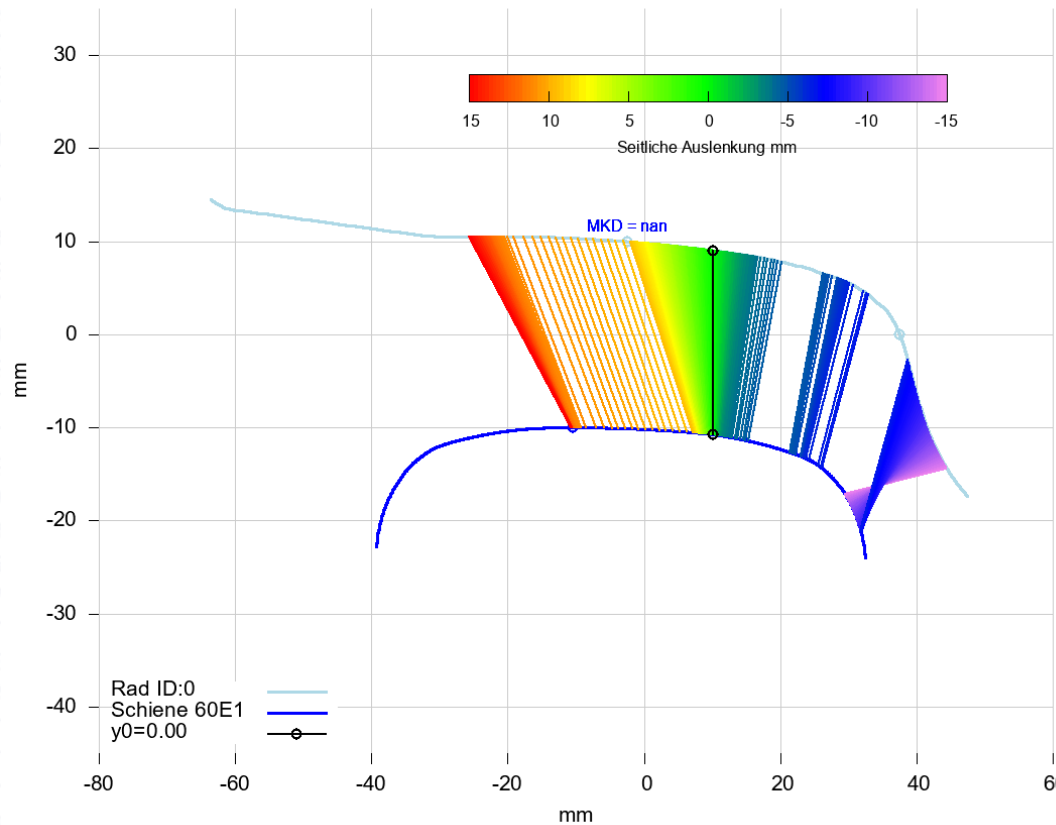
- Schienenprofile EN 13674-1

Abmessungen der Vignolschienen ab 46 kg/m, z.B.:



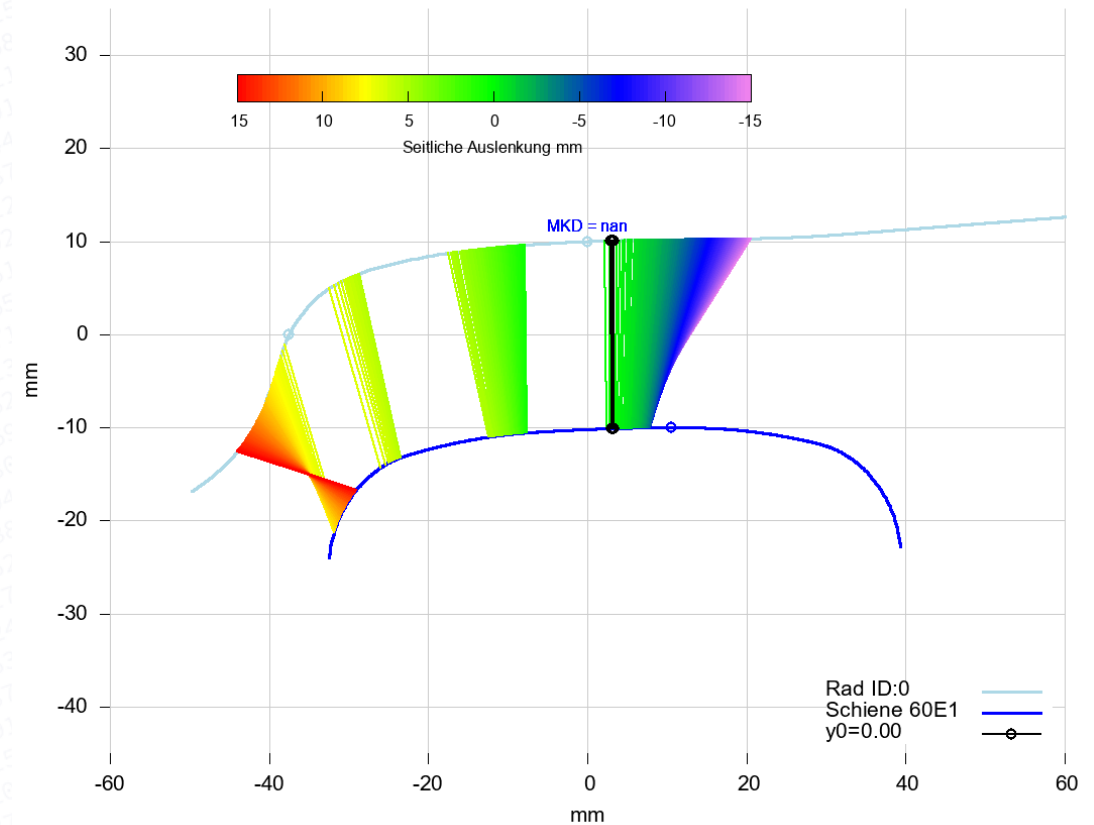
Einfluss der Schiene 60E1 auf S1002/EPS

Berührungspunktzuordnung Messung: 13715



Schiene: 60E1 sw=1435.0 Rad: EPS. sm=1425.0

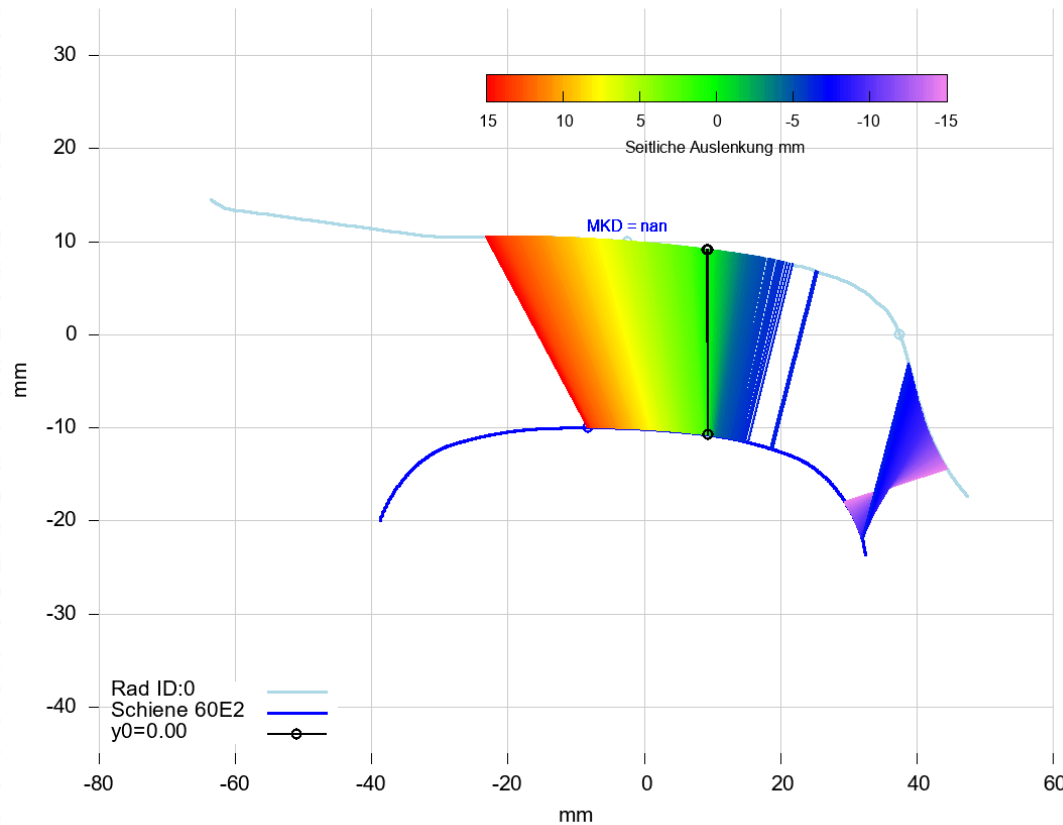
Berührungspunktzuordnung Messung: 13715



Schiene: 60E1 sw=1435.0 Rad: S1002. sm=1425.0

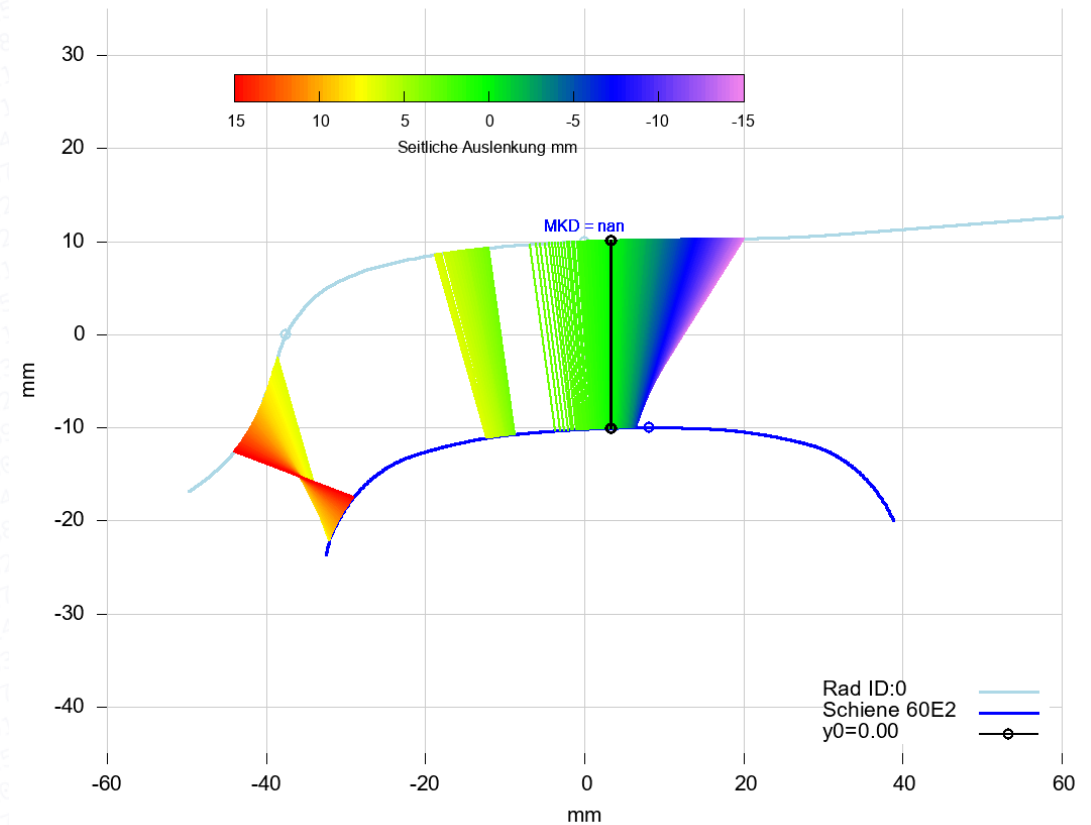
Einfluss der Schiene 60E2 auf S1002/EPS

Berührungspunktzuordnung Messung: 13715



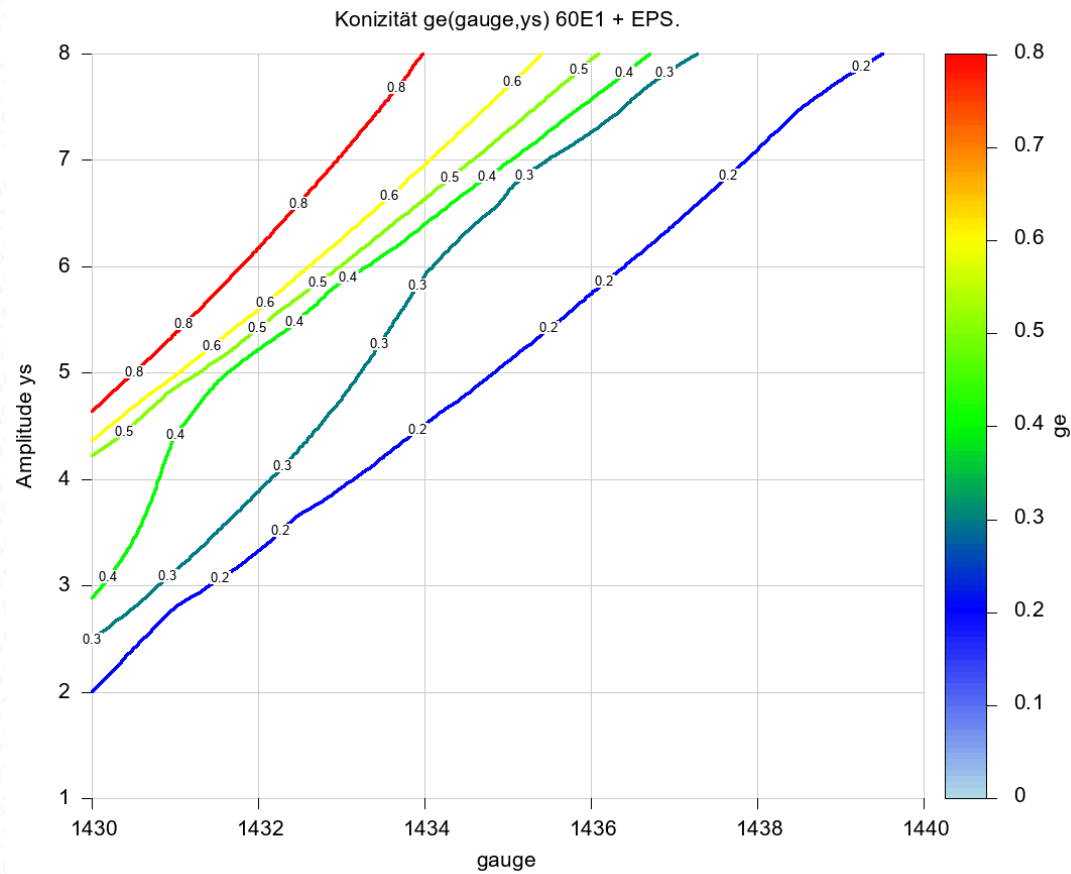
Schiene: 60E2 sw=1435.0 Rad: EPS. sm=1425.0

Berührungspunktzuordnung Messung: 13715

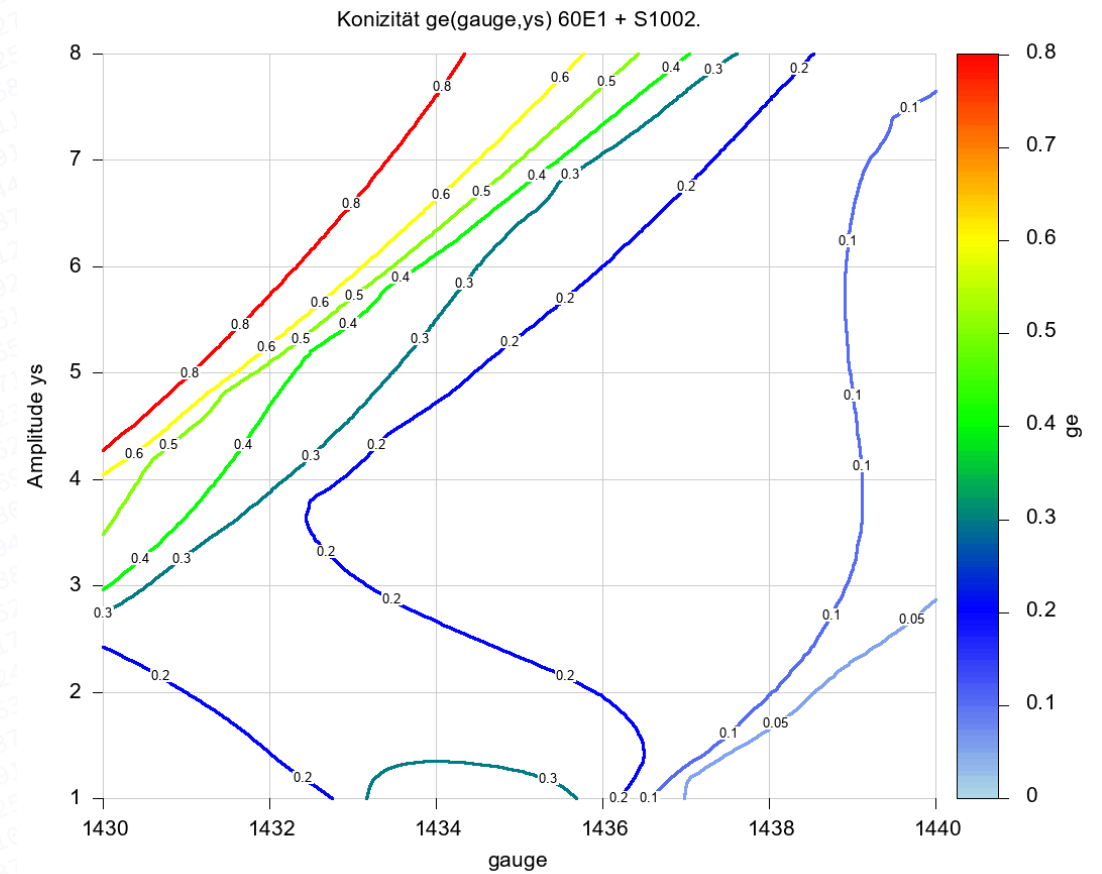


Schiene: 60E2 sw=1435.0 Rad: S1002. sm=1425.0

Einfluss der Spurweite 60E1

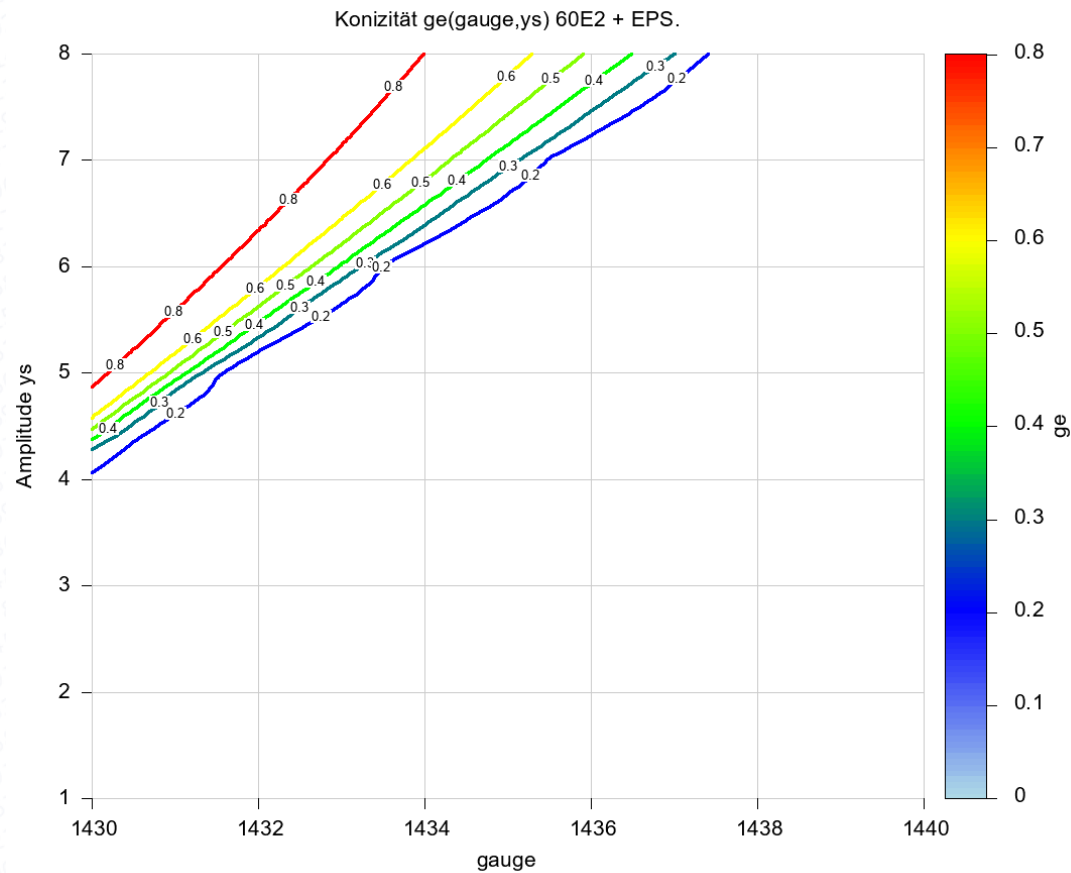


(C) BAMM 2022

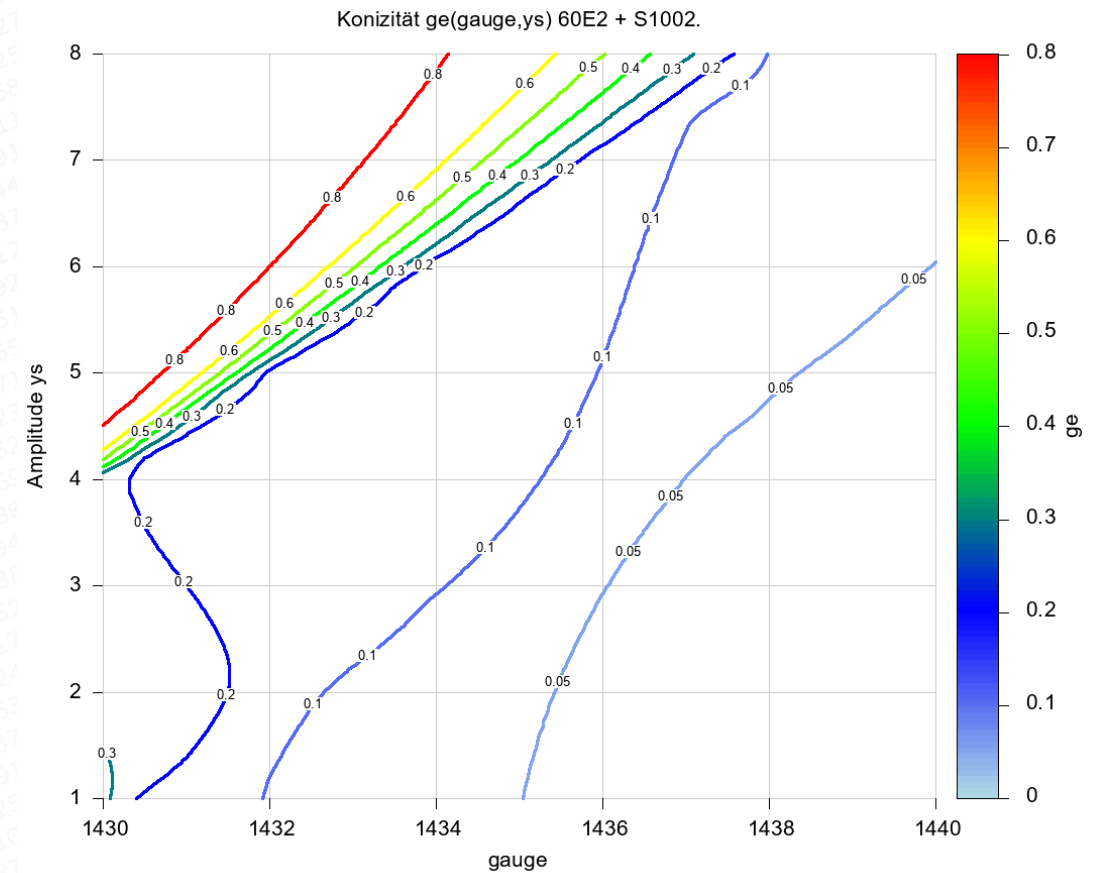


(C) BAMM 2022

Einfluss der Spurweite 60E2

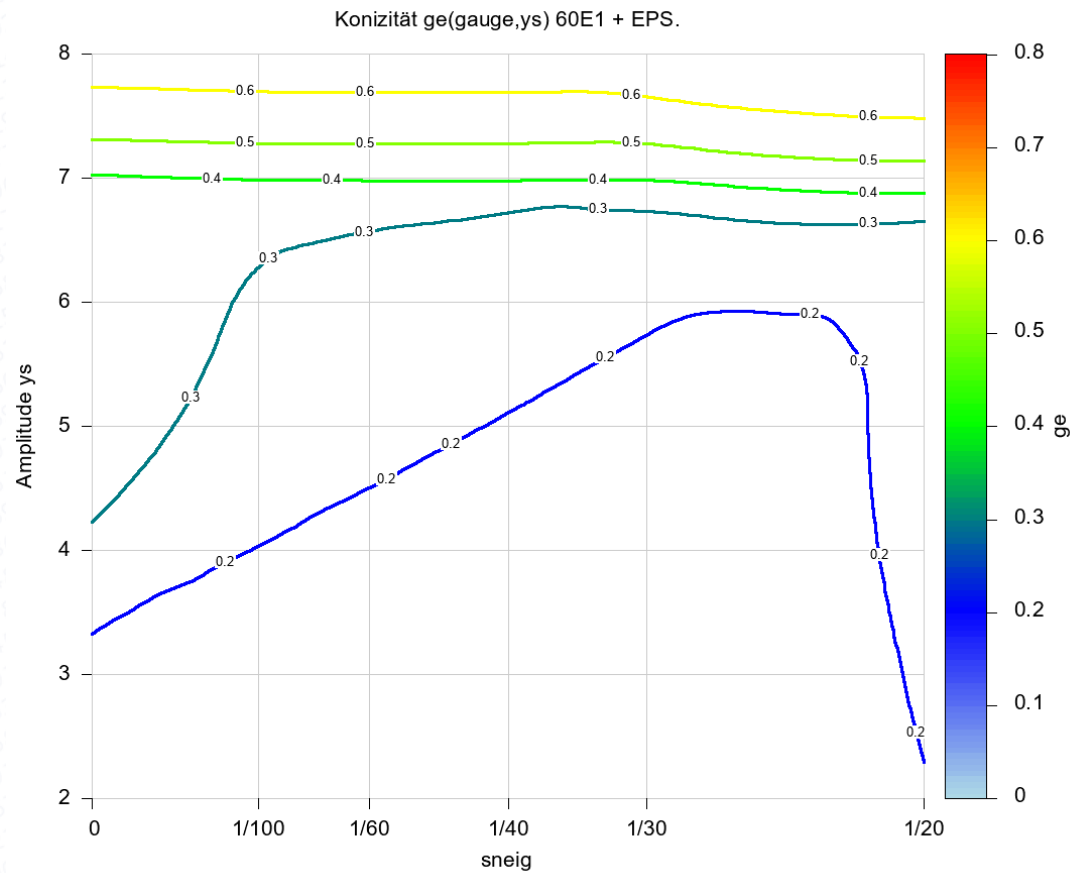


(C) BAMM 2022

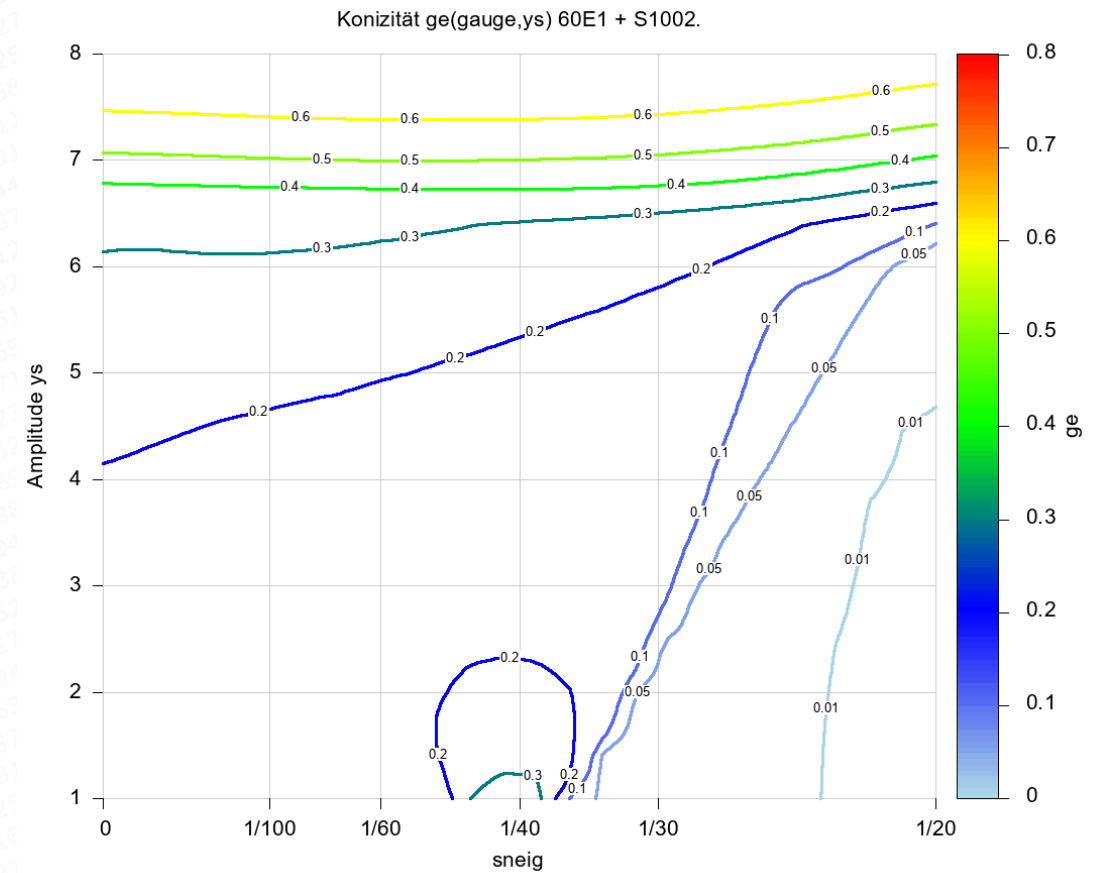


(C) BAMM 2022

Einfluss der Einbauneigung 60E1



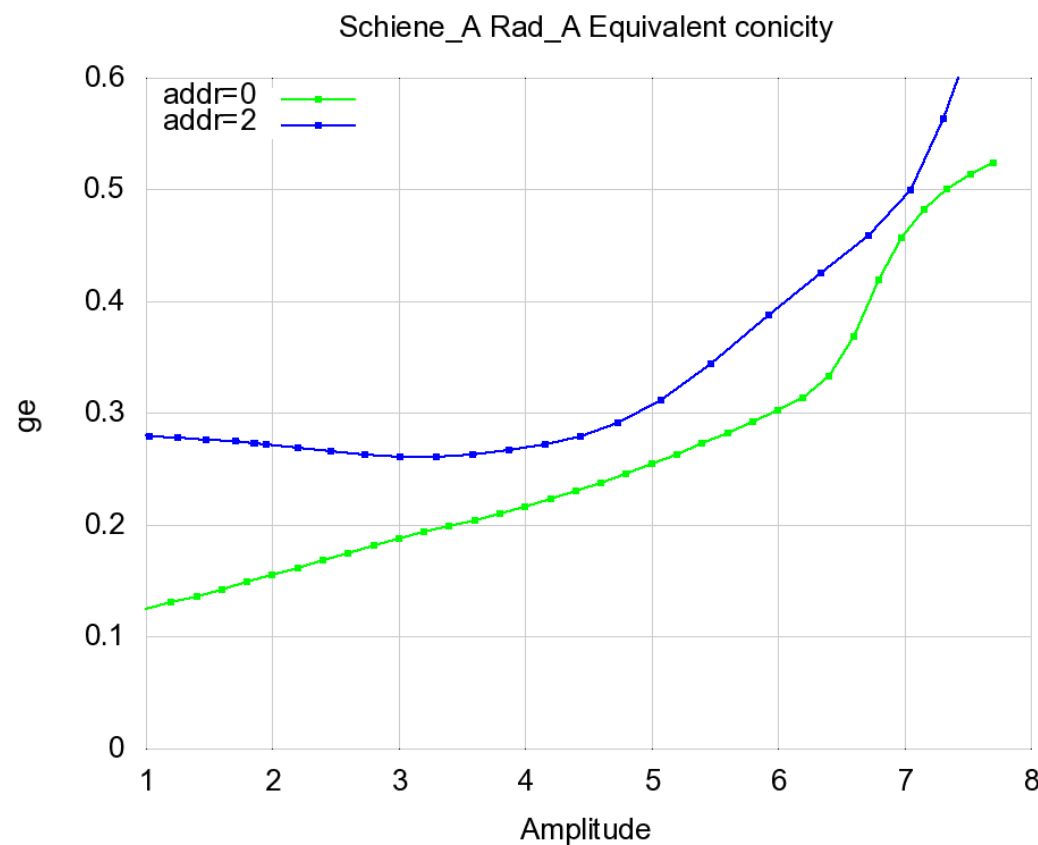
(C) BAMM 2022



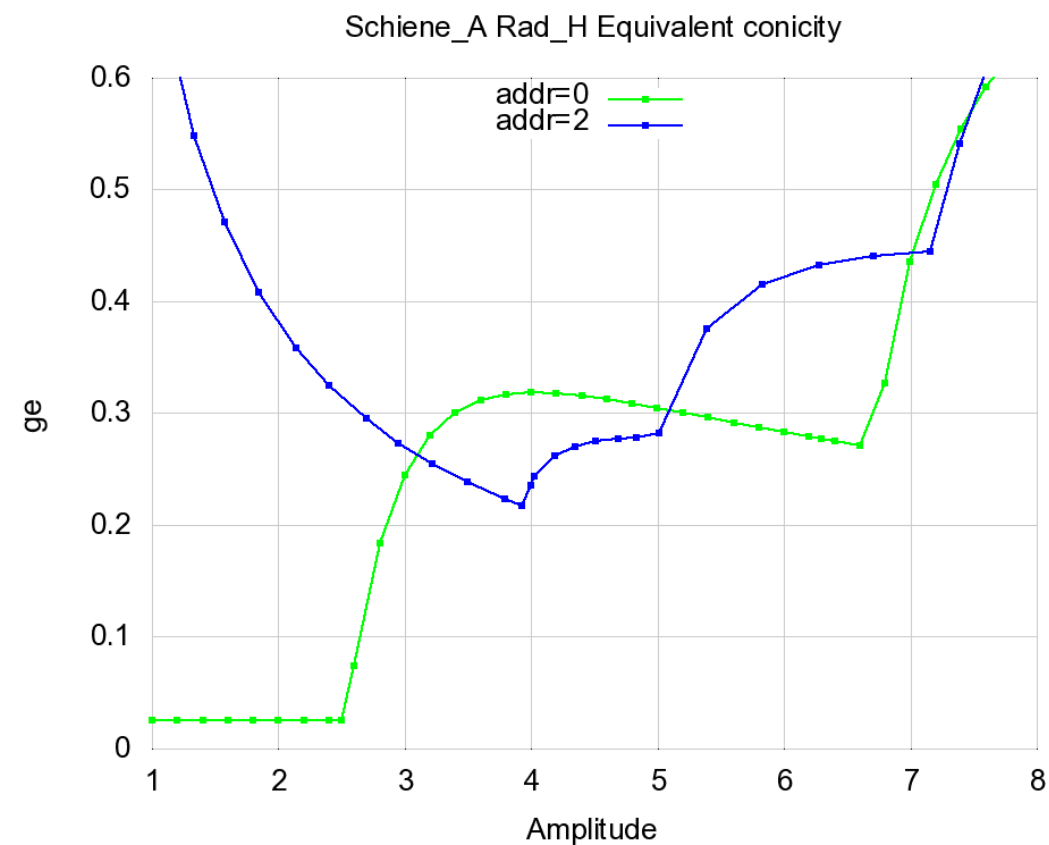
(C) BAMM 2022

Raddurchmesser

unterschiedliche Durchmesser verschieben die Rollradiendifferenz, qualitative Änderung der Konizität



(C) BAMM 2021



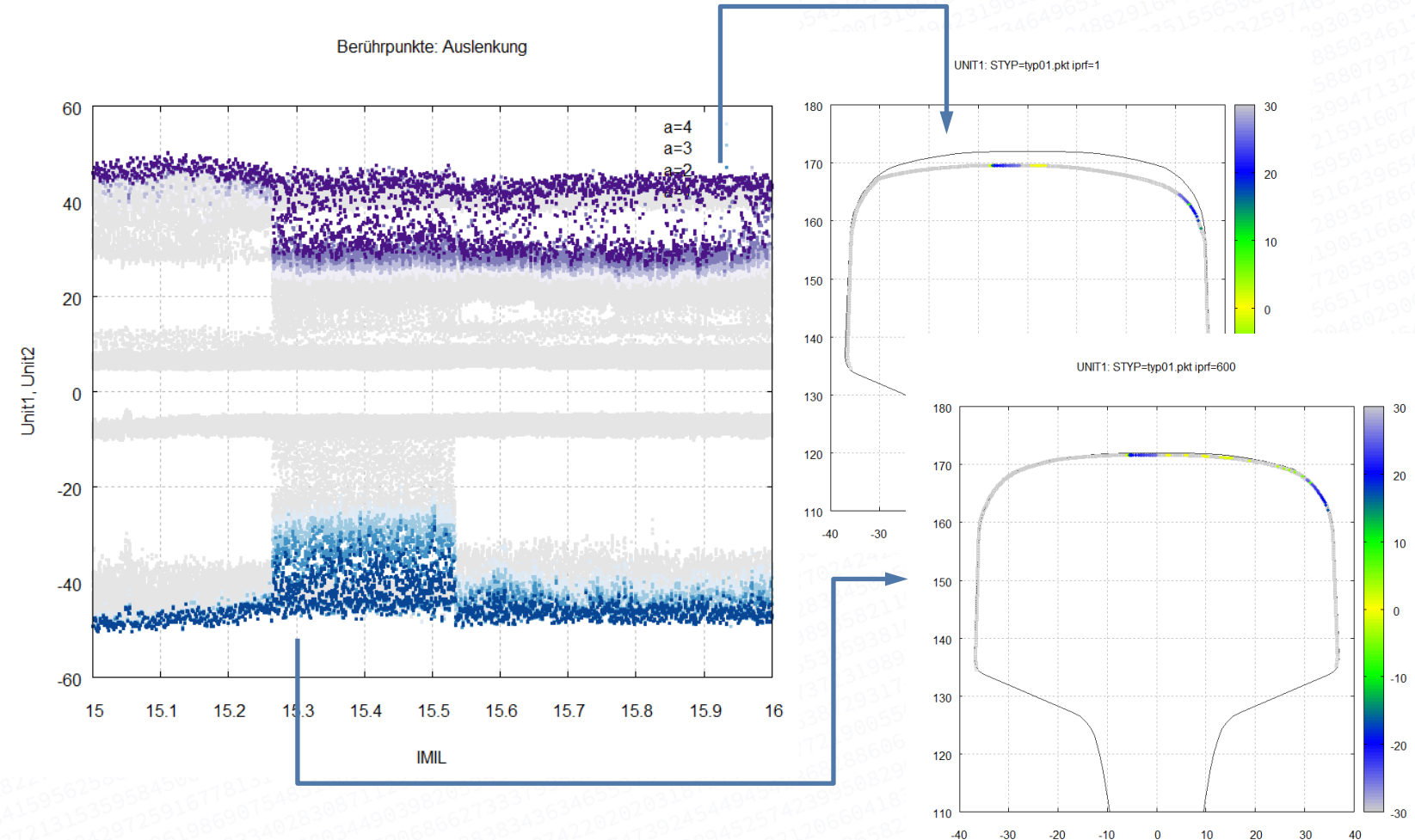
(C) BAMM 2021

Fahrspiegel

Berührungspunktverteilung

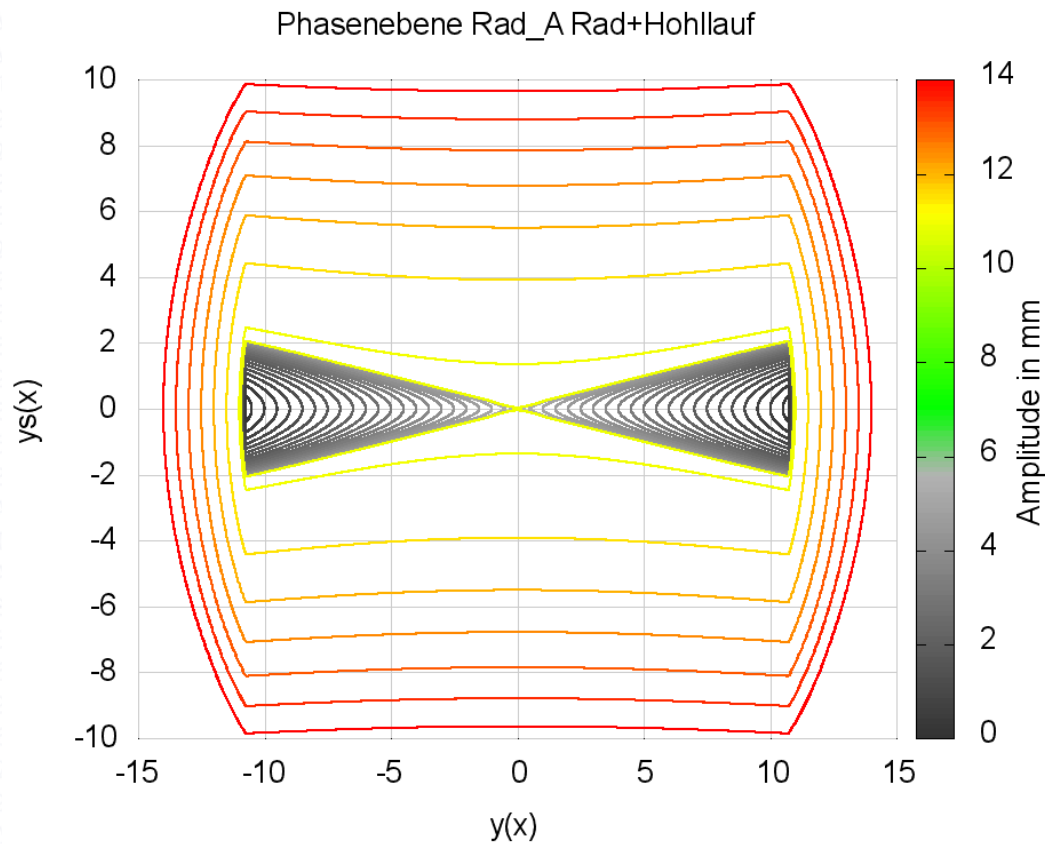
bewertet nach:

- Auslenkung
- Berührungpunktdichte

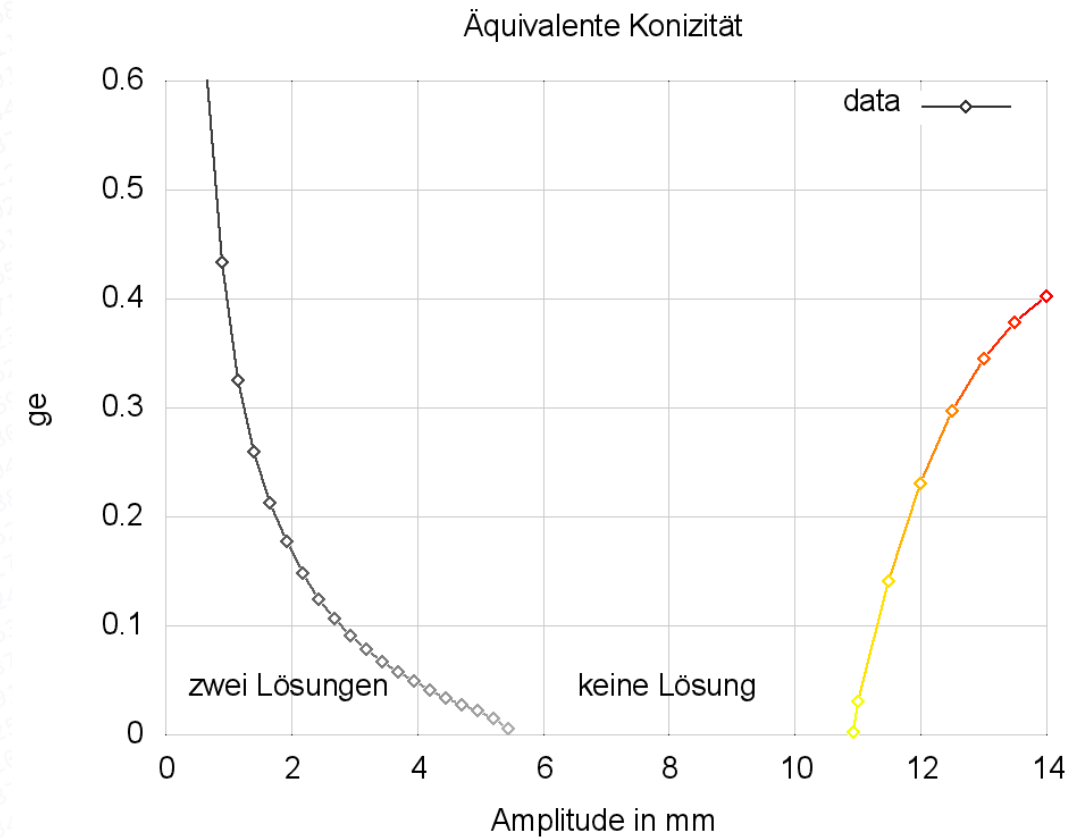


Hohlraum

kann zu mehreren Nullstellen der Δr Funktion führen, die Konizität ist dann nicht mehr eindeutig!



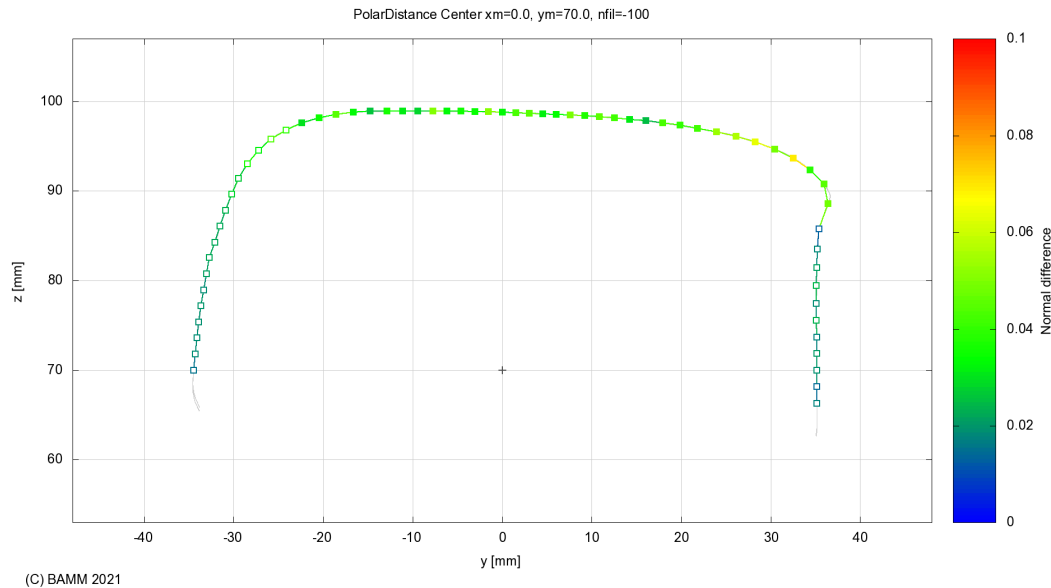
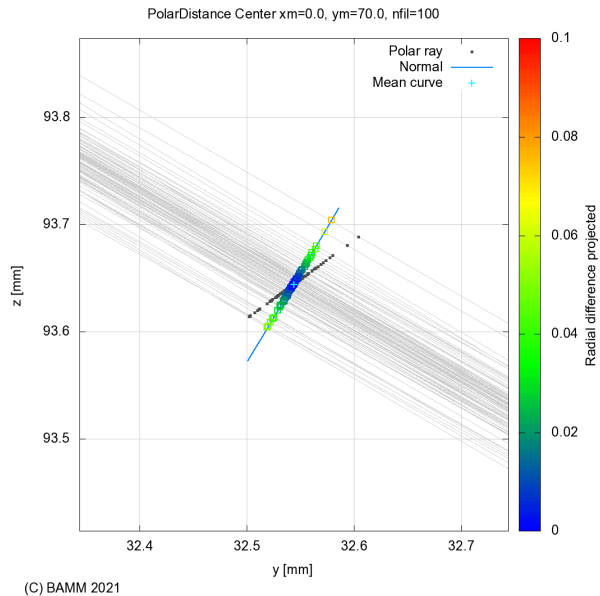
(c) BAMM 2022



(c) BAMM 2022

Profilmessung

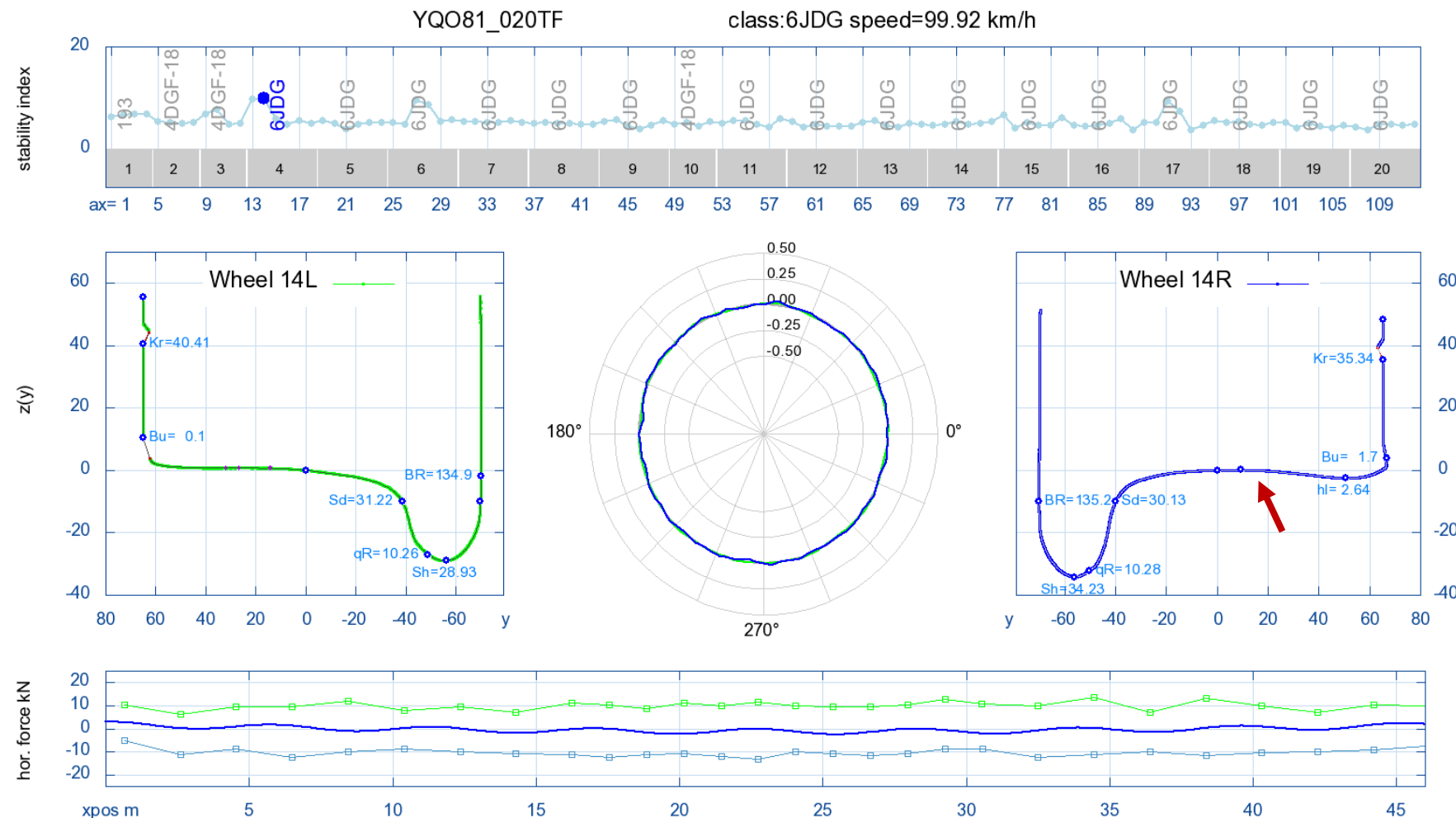
- Meist optisch, manuell oder automatisiert
- Gleis/Fahrzeug gebunden
- Bestimmung der Reproduzierbarkeit
- Unsicherheit des Gesamtprozesses typisch ($\gamma_e < \pm 0,05$)



Hohllauf

Messung von einer ortsfesten Messstelle:

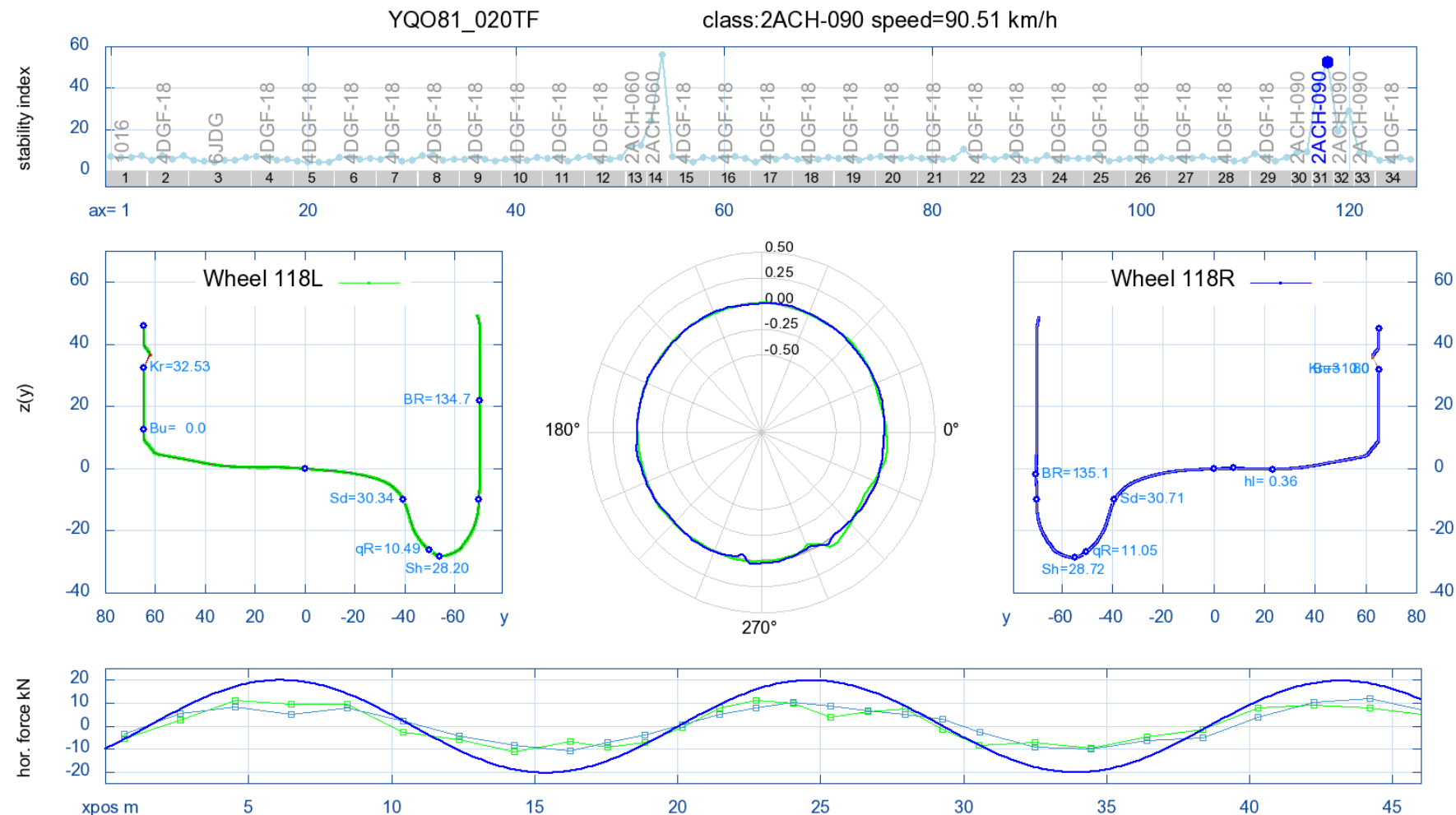
Gegengleiche horizontale Radkräfte erhöhen den Verschleiß an Rad und Schiene!



Wellenlauf

Messung von einer
ortsfesten Messstelle:

Deutlicher wellenförmiger
Verlauf der horizontalen
Radkräfte



Normen

Angestrebte Versuchsbedingungen EN 14363:

- Geschwindigkeitsabhängige Konizität, niedrige Konizität ($<0,05$)
- Die Mehrheit der Bedingungen muss für den normalen Betriebseinsatz repräsentativ sein
- Vermeidung einer geringen Spanne berührgeometrischer Bedingungen (äquivalente Konizitäten)
- ggf. Ausschluss von Auswerteabschnitten mit außergewöhnlichen Konizitätswerten außerhalb des erwarteten Betriebsbereichs

National Rules

- Geschwindigkeitsabhängige erhöhte Konizität z.B 0,8 gefordert
- Versuchsdurchführung wird dadurch immer schwieriger: spez. Radprofile, Streckenabschnitte

Conclusio

Die in der Norm EN 15302 vorgeschlagenen Kenngrößen erlauben:

- Netzweite rasche Beurteilung der Berührgeometrie in Gerade und Bogen mittels einfacher Kennzahlen (äquivalente Konizität und Radialstellungsindex)
- Monitoring der Veränderung der Berühreigenschaften der Radprofile im Betrieb
- Abschätzung der Auswirkungen von (geplanten) Änderungen:
 - ❖ Spurweite bzw. Spurmaß
 - ❖ Einbauneigung der Schiene
 - ❖ Profilformänderungen (Rad und Schiene)

Die kontinuierliche Erfassung der Rad-Schiene-Parameter im Betrieb sollte integraler Bestandteil jeder Instandhaltungsstrategie von Rad und Schiene sein!



GAINING
INSIGHT
FROM DATA

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!