



STADLER
Cleverer Lösungen auf der Schiene

Einflussparameter auf die Betriebsfestigkeit von Straßenbahnen



Dipl.-Ing. Marcus von Borany, Stadler Pankow GmbH

Dipl.-Ing. Dr. habil. Alois Starlinger, Dipl.-Ing. Johann Habenbacher, Stadler Altenrhein AG

Gliederung

1. Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge von Stadler Rail
2. Nachweiskonzept / Festigkeitsauslegung
3. Betriebsfestigkeitsmessfahrten bei Stadler Rail
4. Diskretisierung / Detailanalyse
5. Linieneinfluss
6. Parametereinfluss
7. Zusammenfassung



STADLER

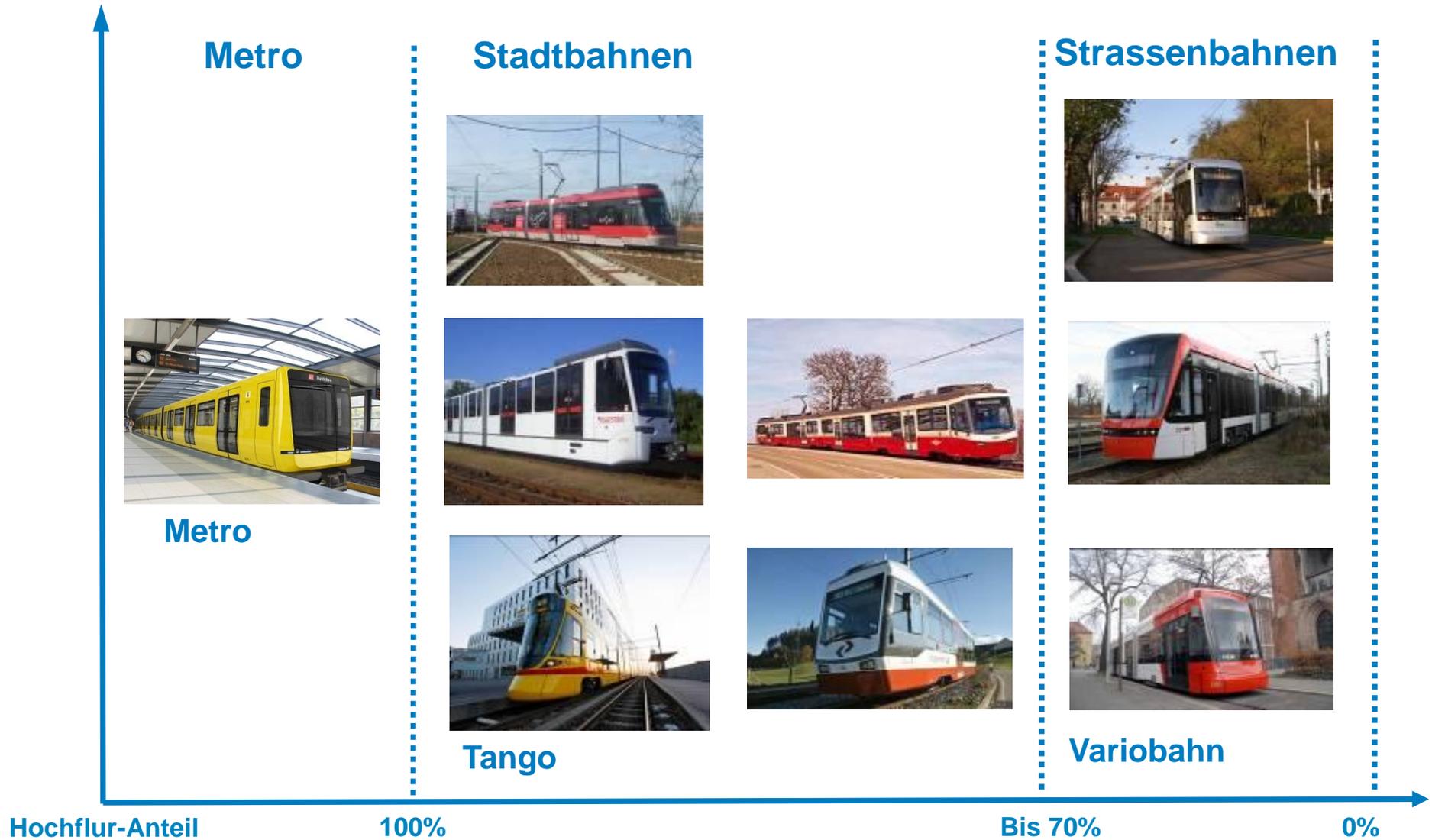
Cleverer Lösungen auf der Schiene

1. Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge von Stadler Rail

1. Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge von Stadler Rail



1. Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge von Stadler Rail

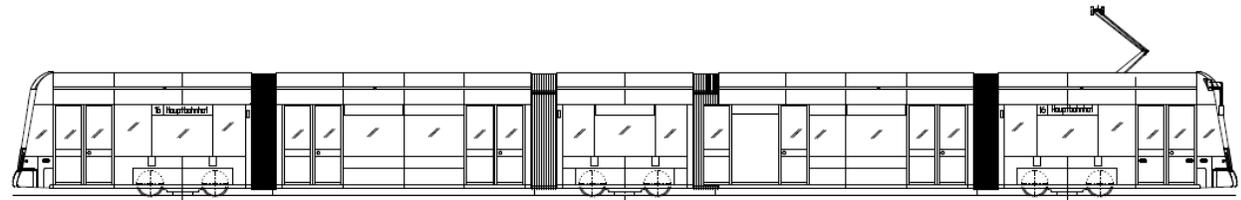


1. Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge von Stadler Rail



Variobahn-Familie

- 312 Fahrzeuge in 6 Ländern
- > 100 Mio. Betriebskilometer weltweit



- modular aufgebaute Straßenbahn
- Multi-Gelenk-Fahrzeug, bestehend aus Fahrwerkmodulen und Sänften
- Einrichtungs- oder Zweirichtungsfahrzeug
- Fußbodenniveau konstant 100 % Niederflur
- Rohbau aus nichtrostendem Edelstahl (1.4589, 1.4307)
- Außenverkleidung durch Klebetechnologie realisiert
- freie Anordnung der Türen im Fahrgastmodul
- Längen- und Breitenanpassung über ausgewählte Module
 - hohes Maß an Flexibilität bezüglich Länge, Breite, Spurweite
- Ausführung der Sekundärstufe mit Luft- oder Stahlfeder
- getriebelose Antriebstechnik mit Radnabenmotoren

1. Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge von Stadler Rail: Variobahn-Familie



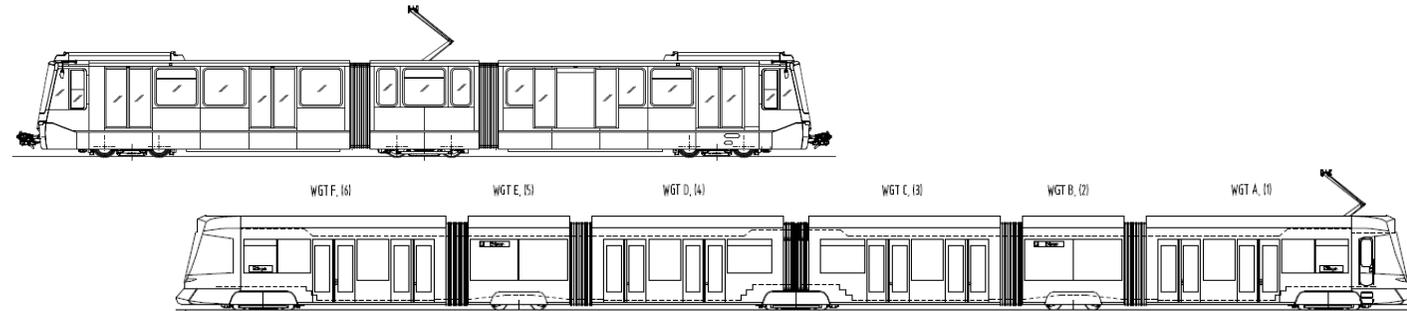
	Nürnberg	Bochum/ Gelsen- kirchen	München	Bergen	Graz	Potsdam	Mainz	Croydon (London)
Land	DE	DE	DE	NO	AT	DE	DE	GB
1. Lieferung	2007	2008	2009	2009	2009	2011	2011	2012
Fahrzeuge	8	45	14	20	45	18	9	6
2-Richt.-fzg.	-	x	-	x	-	-	-	x
Spurweite	1.435 mm	1000 mm	1.435 mm	1.435 mm	1.435 mm	1.435 mm	1.000 mm	1.435 mm
Breite	2.300 mm	2300 mm	2.300 mm	2.650 mm	2.300 mm	2.300 mm	2.300 mm	2.650 mm
Länge	33.940 mm	29.620 mm	33.900 mm	32.370 mm	27.468 mm	29.972 mm	30.068 mm	32.370 mm
Sekundärf.	Luftfeder	Stahlfeder	Luftfeder	Luftfeder	Stahlfeder	Stahlfeder	Stahlfeder	Luftfeder

1. Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge von Stadler Rail



Tango-Familie

- 101 Fahrzeuge in 3 Ländern



- Stadtbahnfahrzeug klassischen Drehgestellen
- Modularer Fahrzeugbaukasten mit bewährter Drehgestelltechnologie
- optimale Anpassung an städtische Infrastruktur
- Einrichtungs- oder Zweirichtungsfahrzeug
- Fußbodenniveau 70 % Niederflur oder 100 % Hochflur
- Rohbau aus nichtrostendem Edelstahl (1.4589, 1.4307) oder Baustahl (S355 J2+N)
- Ausführung der Sekundärstufe mit Luftfeder
- klassische Antriebstechnik mit Asynchronmotoren

1. Straßen- und Stadtbahnfahrzeuge von Stadler Rail: Tango-Familie



	Bochum/ Gelsen- kirchen	Basel	Lyon	Genf	Stuttgart
Land	DE	CH	FR	CH	DE
1. Lieferung	2007	2008	2009	2009	2012
Fahrzeuge	6	40	6	32	20
2-Richt.-fzg.	x	-	x	x	x
Spurweite	1.435 mm	1.000 mm	1.435 mm	1.000 mm	1.435 mm
Fzg.-breite	2.650 mm	2.300 mm	2.550 mm	2.300 mm	2.650 mm
Fzg.-länge	28.200 mm	45.000 mm	27.000 mm	44.000 mm	39.110 mm
Niederflur	-	75 %	70 %	75 %	-



STADLER

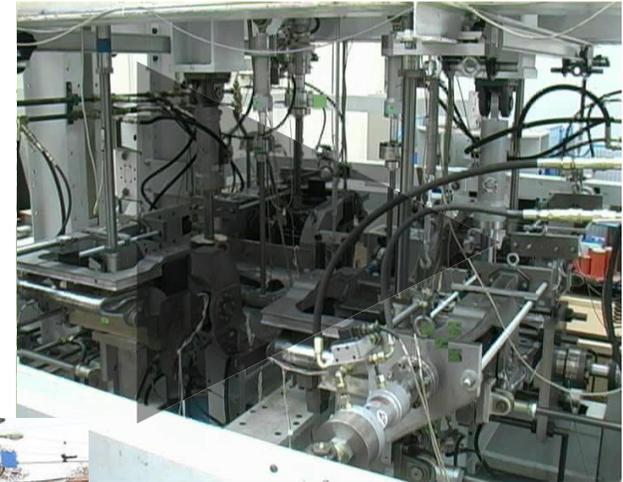
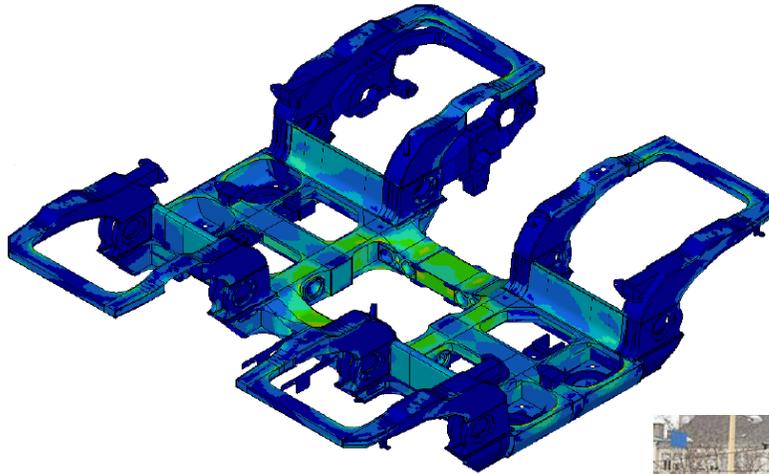
Clevere Lösungen auf der Schiene

2. Nachweiskonzept / Festigkeitsauslegung

2. Nachweiskonzept / Festigkeitsauslegung

Nachweiskonzept für die Festigkeit von Schienenfahrzeugen (vgl. auch EN 12663-1, EN 13749)

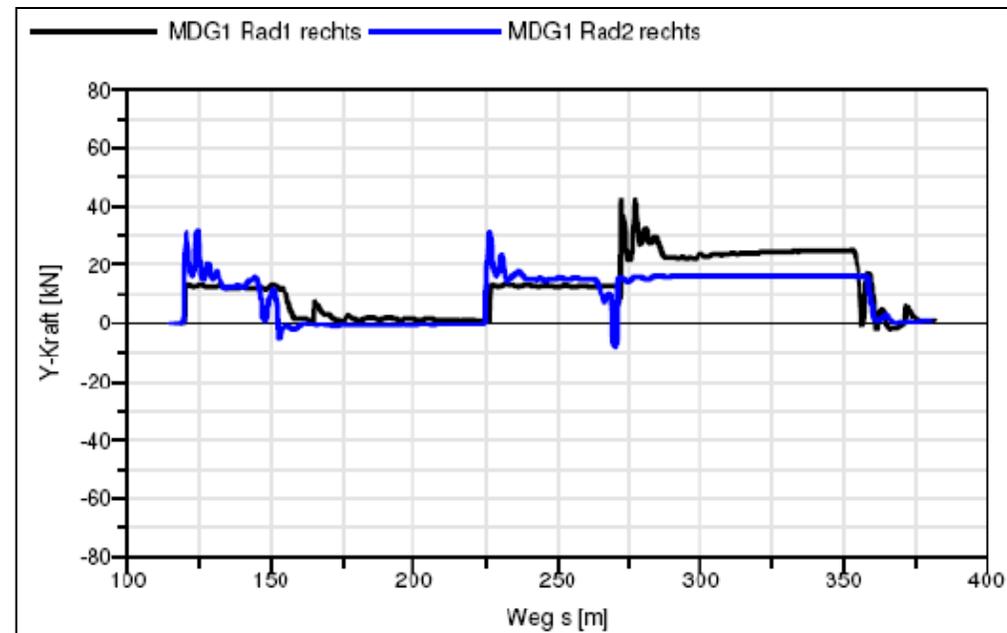
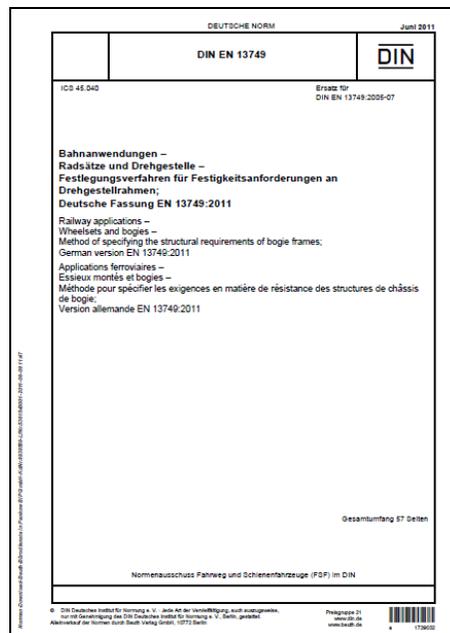
- Rechnerischer Nachweis
- Statische Laborversuche
- Ermüdungsversuche im Labor (Fahrwerkrahmen)
- Streckenversuche unter Betriebsbedingungen mit Betriebsfestigkeitsbewertung



2. Nachweiskonzept / Festigkeitsauslegung

Lastannahmen

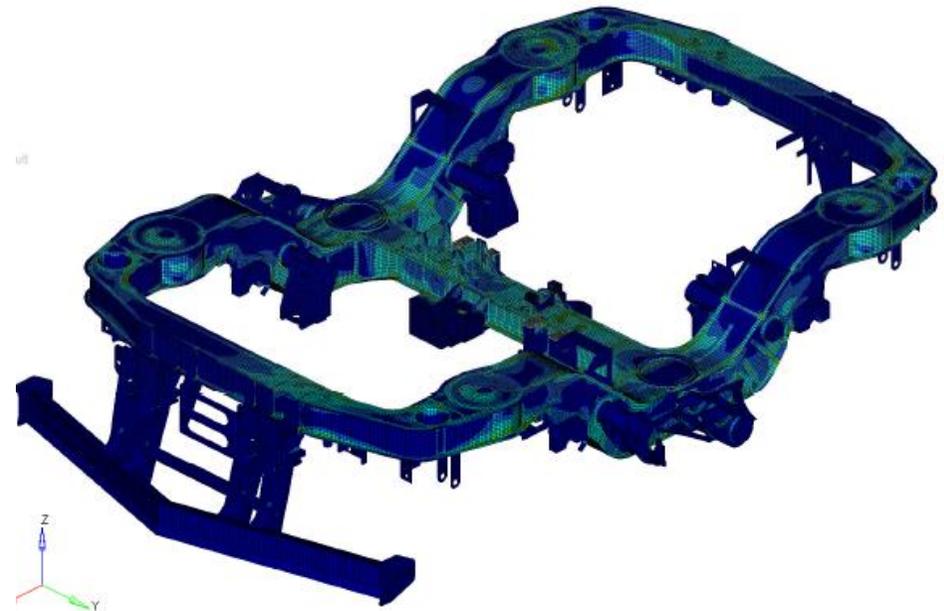
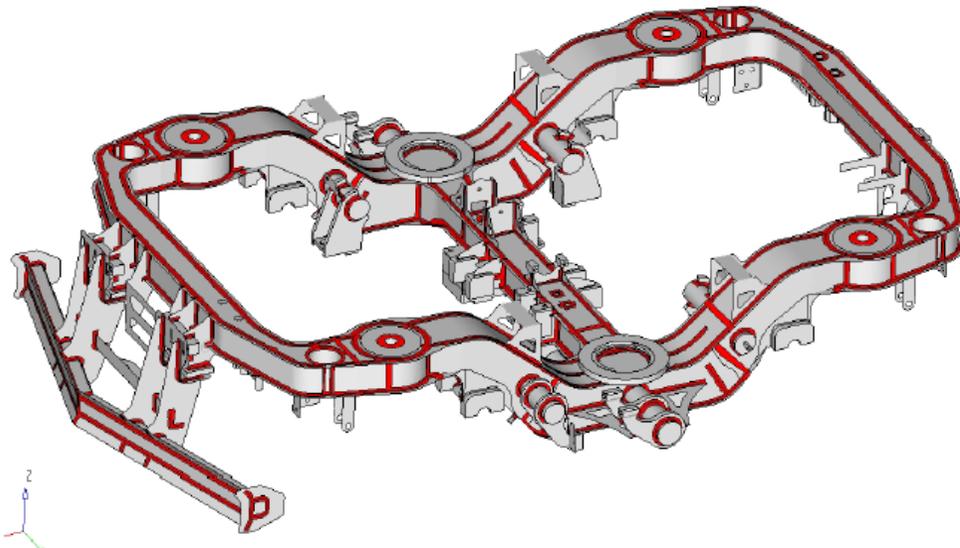
- Basislastfälle entsprechend dem gültigen Regelwerk (EN 12663-1, EN 13749, VDV 152)
- Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Randbedingungen
 - z.B. Übertragung des Ausdrehmomentes auf den Wagenkasten als Kräftepaar über zwei Anlenkstangen
- Lastfallerweiterung durch MKS-Simulationen
 - z.B. Fahrt durch engen Bogen
 - z.B. Berücksichtigung realer Trassierungen aus dem Netz des Betreibers



2. Nachweiskonzept / Festigkeitsauslegung

Rechnerischer Festigkeitsnachweis

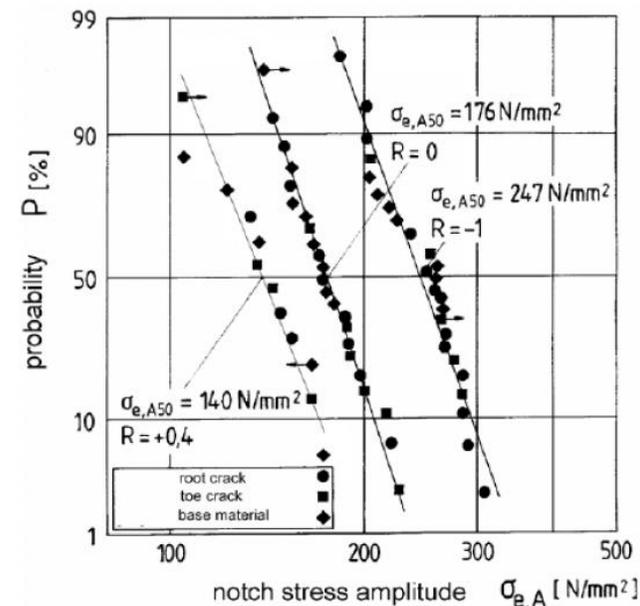
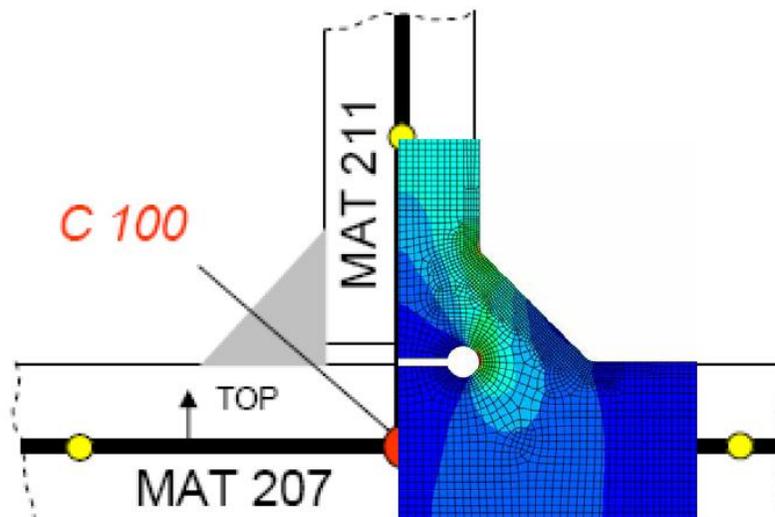
- einheitliches Vorgehen für Wagenkasten und Fahrwerk
- Statischer Nachweis für außergewöhnliche Belastungen
- Ermüdungsnachweis in Form eines Dauerfestigkeitsnachweises
 - Bewertung mittels Postprocessorprogramm FEMFAT
 - basierend auf dem Kerbspannungskonzept
 - Materialdaten basierend auf FKM-Richtlinie bzw. IIW-Empfehlungen



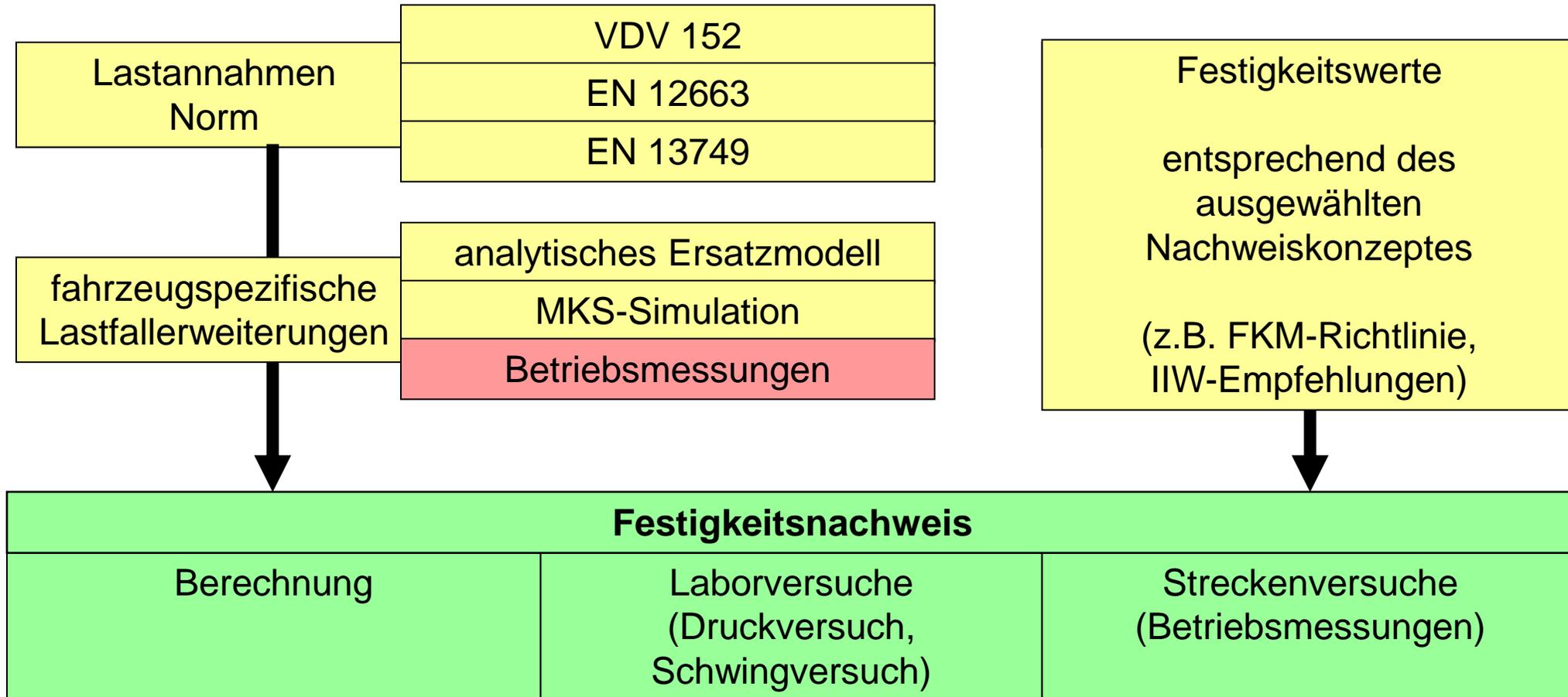
2. Nachweiskonzept / Festigkeitsauslegung

Vorteile des Kerbspannungskonzeptes

- Mit diesem Verfahren ist ein durchgängiger Festigkeitsnachweis von der Berechnung bis zum Betriebsfestigkeitsnachweis von gemessenen Beanspruchungen möglich
- ausreichend sichere Auslegung bei gleichzeitiger Gewichtsreduktion gegenüber dem Nennspannungskonzept
- Kerbfalleinteilung für alle Stoß- und Nahtarten möglich



2. Nachweiskonzept / Festigkeitsauslegung





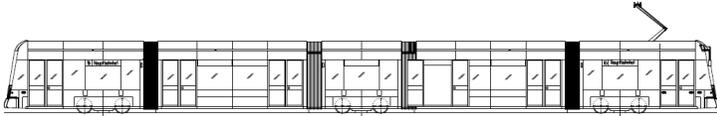
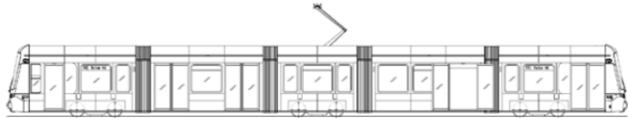
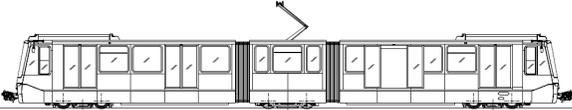
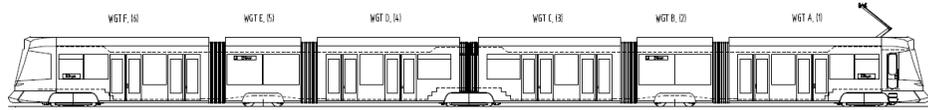
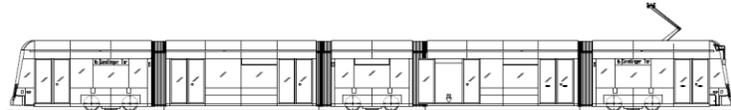
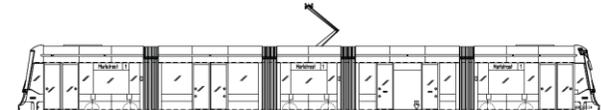
STADLER

Clevere Lösungen auf der Schiene

3. Betriebsfestigkeitsmessfahrten bei Stadler Rail

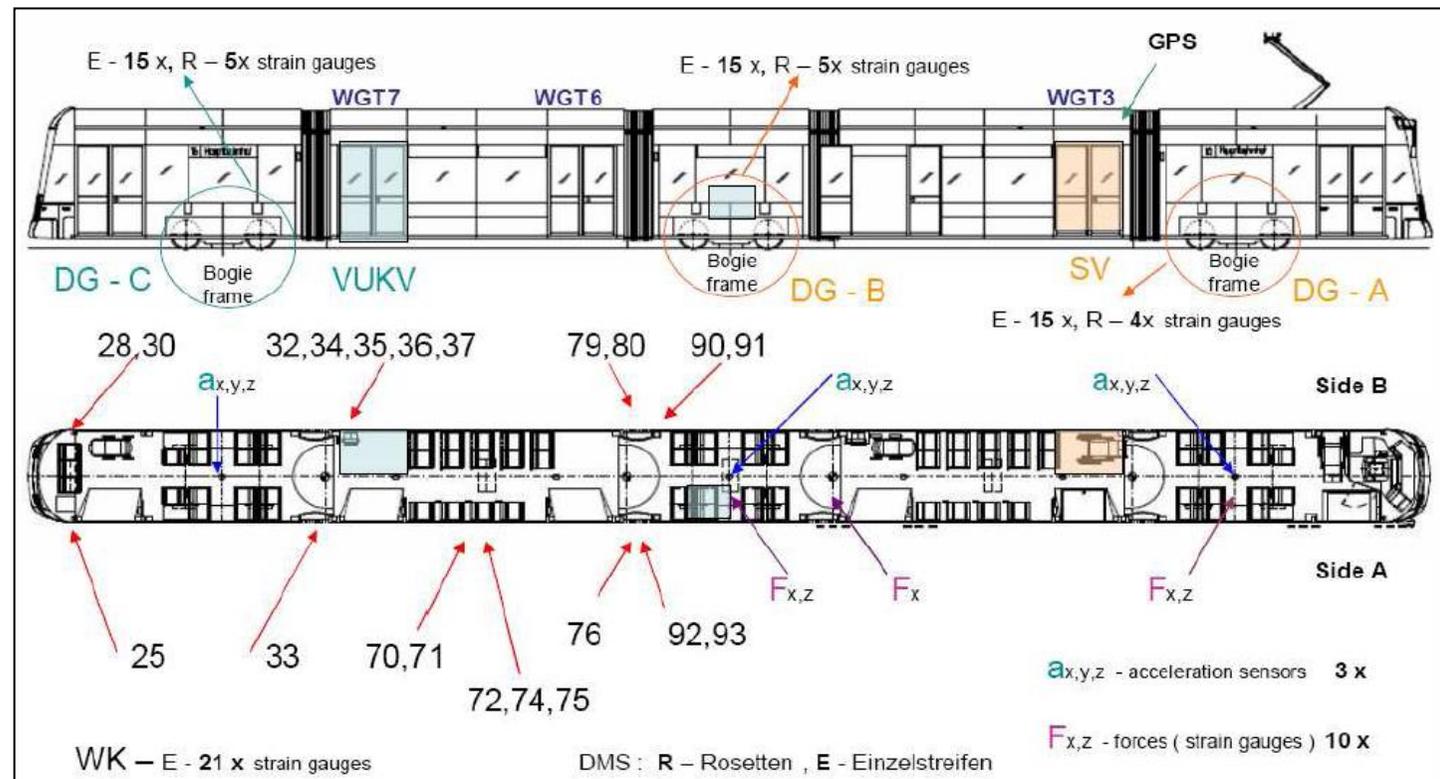
3. Betriebsfestigkeitsmessfahrten bei Stadler Rail

- 2008 – 2010 Betriebsmessungen an insgesamt 6 Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen
- Betriebsfestigkeitsnachweis konnte für alle Fahrzeuge erfolgreich erbracht werden.

Jahr	Fahrzeug	Messlänge	
2008	Variobahn Nürnberg	225 km	
2009	Variobahn BOGESTRA (Bochum/Gelsenkirchen)	264 km	
2009	Tango BOGESTRA (Bochum)	55 km	
2009	Tango BLT (Basel)	350 km	
2010	Variobahn München	470 km	
2010	Variobahn Graz	184 km	

3. Betriebsfestigkeitsmessfahrten bei Stadler Rail

- Messfahrten mit typischem Fahrspiel im gesamten Streckennetz
- Messstellen
 - ca. 80 DMS je Messfahrt
 - Kräfte an kalibrierten Lenkern (ausgewählte Koppelstellen)
 - Beschleunigungen im Wagen über den Fahrwerken
 - Geschwindigkeit
 - Weg
 - GPS

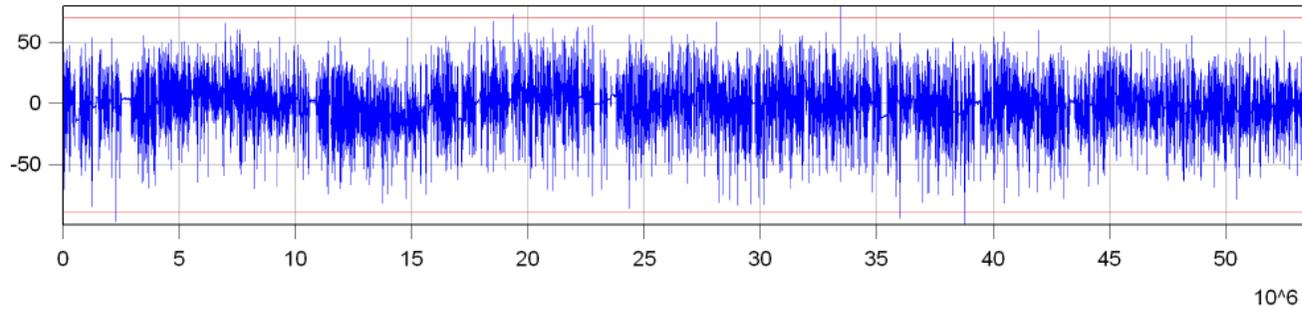


3. Betriebsfestigkeitsmessfahrten bei Stadler Rail

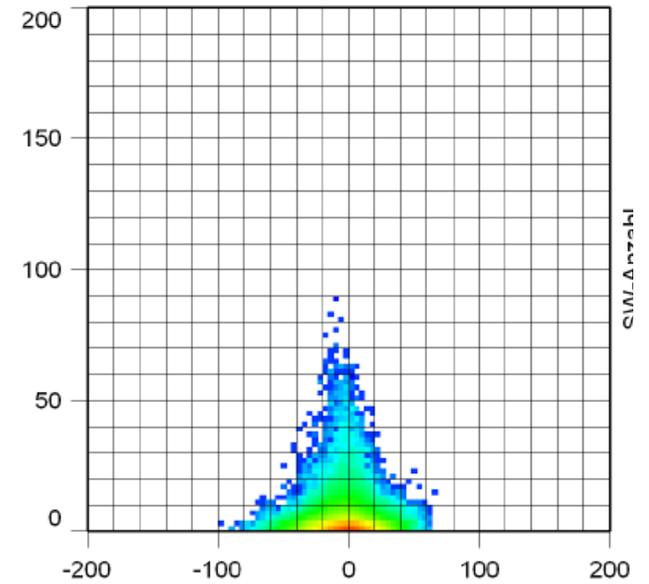
Parameter

Beladung	leer	2/3-Beladung nach BOStrab bzw. VDV 152	
Messstrecke	1	2..3	gesamtes Streckennetz
Betriebsdauer	↓	35..40	Jahre
Laufleistung		60.000..110.000	km/Jahr
Depotfahrten		700	1/Jahr
Notbremsungen		350	1/Jahr
Sicherheitsfaktor		1,05	
		Vergleichsmessung	<u>Auswertung</u>

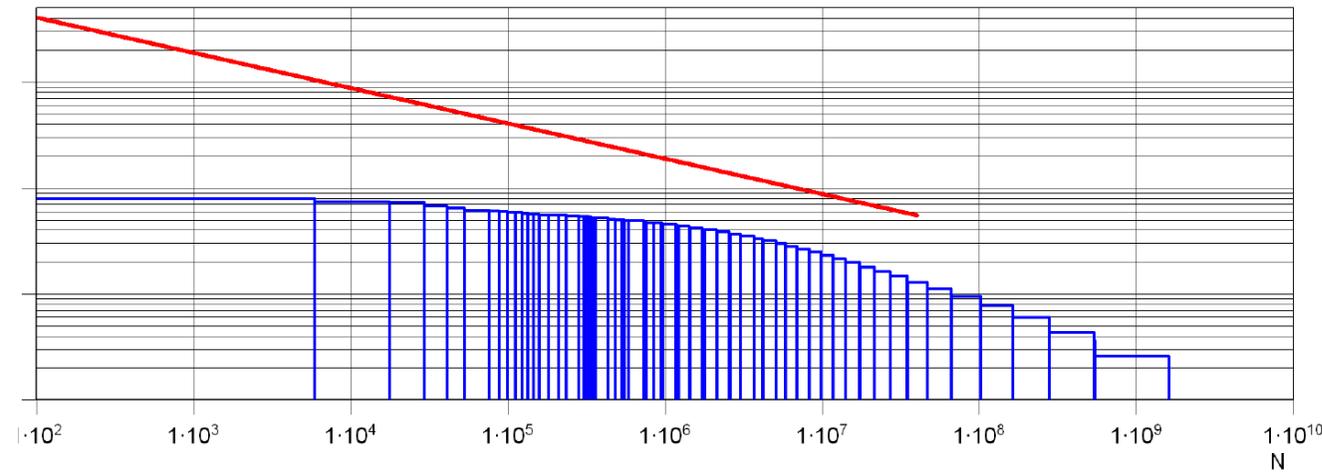
3. Betriebsfestigkeitsmessfahrten bei Stadler Rail



β_K M k_S

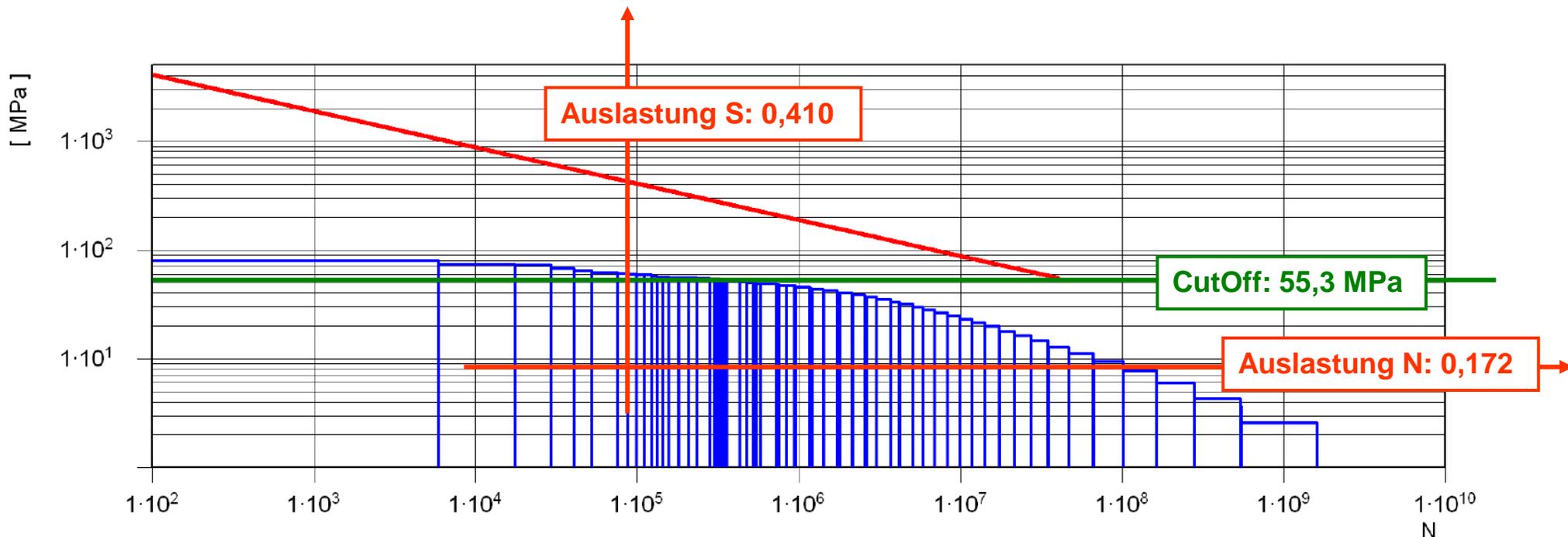


k σ_{FAT} N_{FAT}



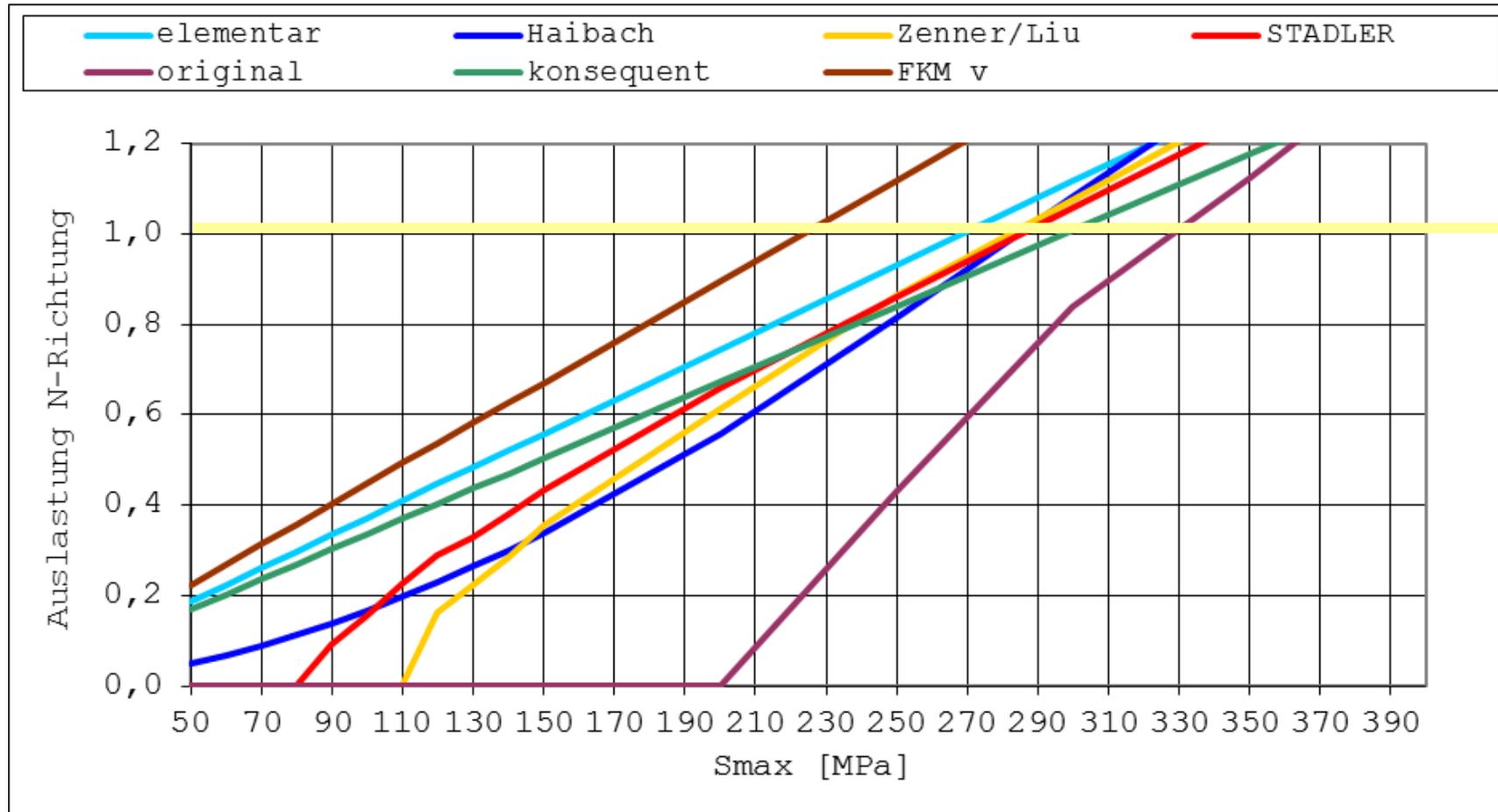
3. Betriebsfestigkeitsmessfahrten bei Stadler Rail

- Schadensakkumulation:
 - Variante Miner Elementar mit „cut off“ bei 50% des 5 Mio. Wertes
 - ertragbare Schädigungssumme $D_m = 1,0$
 - physikalisch begründet (Schwellenwert Bruchmechanik)
 - Vernachlässigung kleiner, nicht schädigungsrelevanter Amplituden
 - Berechnung der Auslastungsgrade in Lastspiel- und Spannungsrichtung
 - Konvergenz bei Auslastung = 1

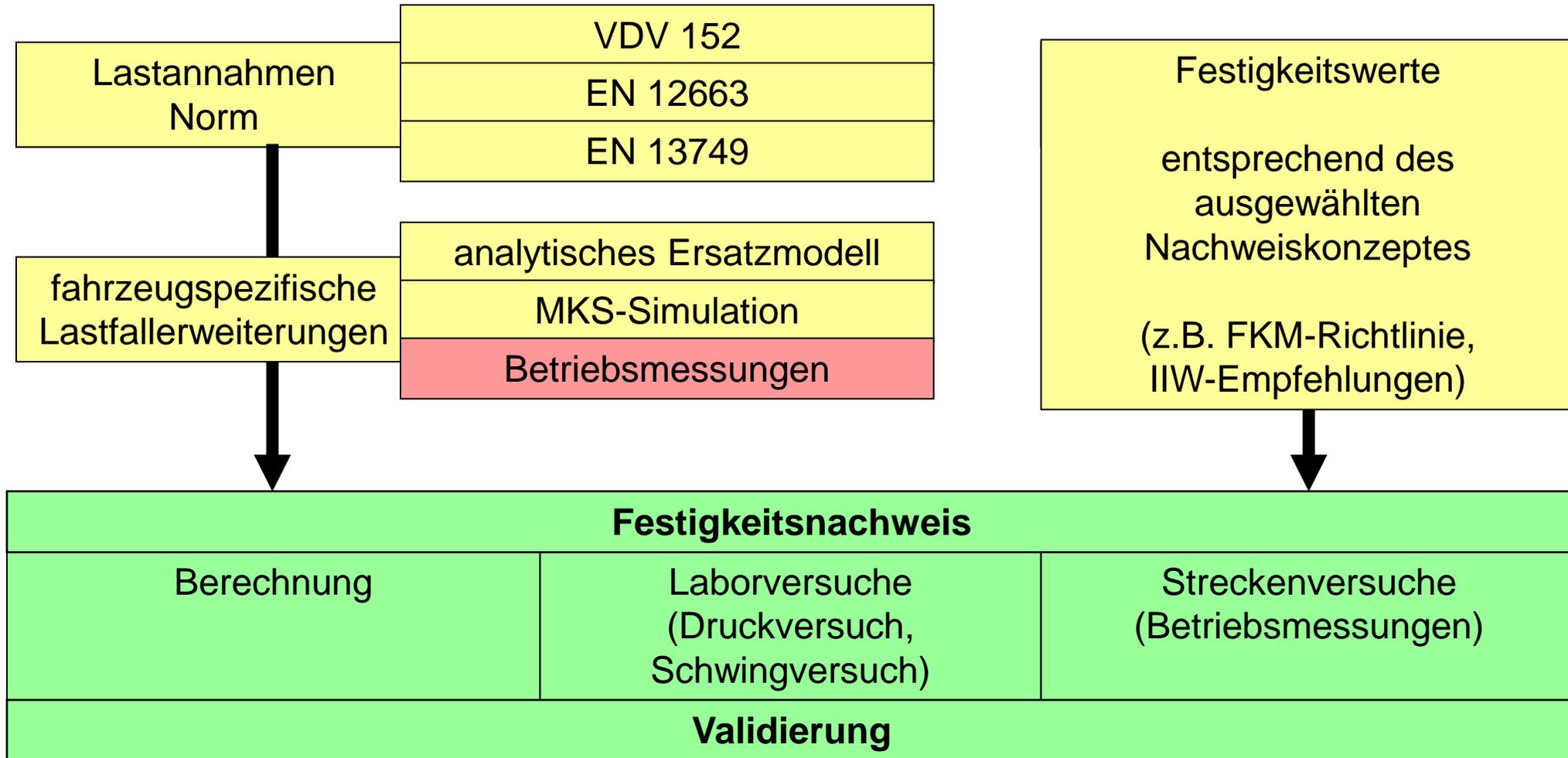


3. Betriebsfestigkeitsmessfahrten bei Stadler Rail

Auslastung N:	Haibach	Zenner/Liu	„cut off“	original	konsequent	elementar
Auslastung N:	0,83	0,87	0,87	0,47	0,85	0,94
Auslastung S:	0,89	0,90	0,89	0,77	0,85	0,94



3. Betriebsfestigkeitsmessfahrten bei Stadler Rail



Welche Zusatzinformationen können aus der Datenmenge der Betriebsmessungen gewonnen werden?

4. Diskretisierung / Detailanalyse

Aufgaben:

- Zerlegung der Messstrecken in kleine Teile und Berechnung der Einzelschädigungen
 - Welche diskreten Streckenabschnitte tragen maßgeblich zur Schädigung bei?
- Reduzierung der großen Datenmengen auf ein verarbeitbares Maß

Verfahren:

1. Extremwertsuche

- Spannungsspitzen aus Messdaten
- Ortung mit Hilfe der GPS-Daten
- erster Hinweis auf kritische Stellen im Netz
- Spitzen führen nicht zwangsläufig zu großer Schädigung

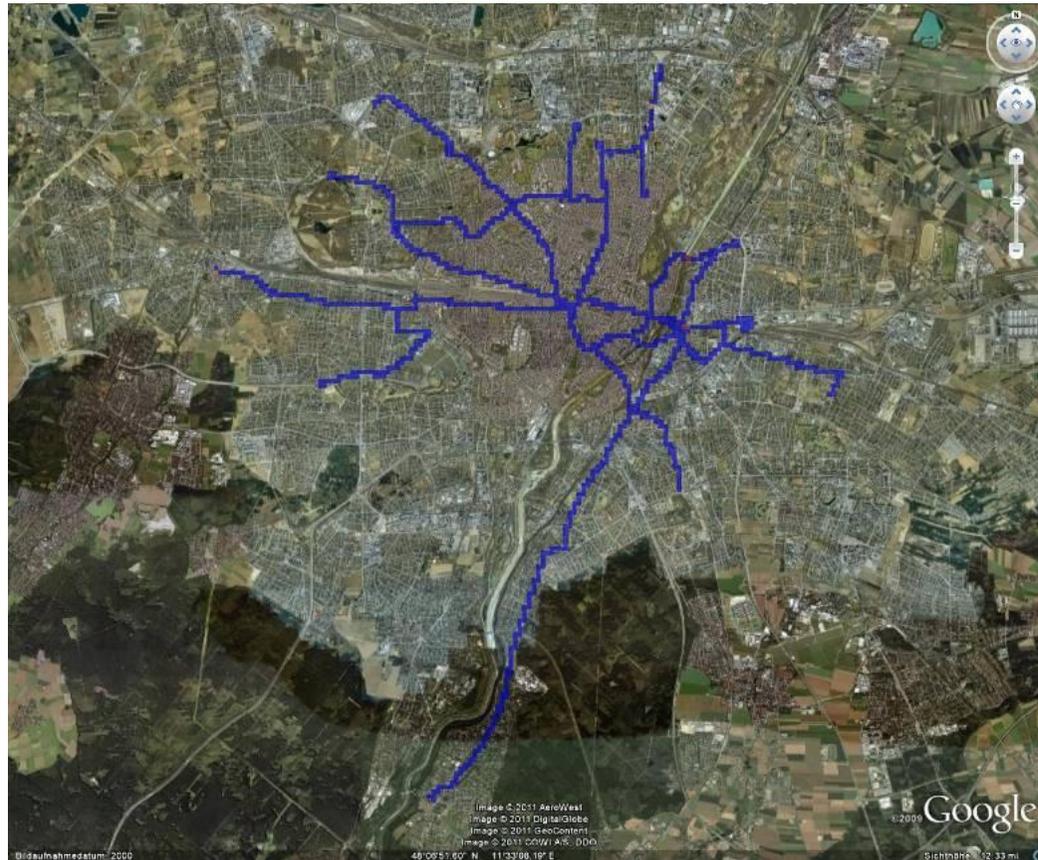
2. Schadenssummen über Messabschnitte

- Schadenssummen für die einzelnen Messabschnitte
- gezieltes Auffinden von Messabschnitten, die maßgeblich zur Schädigung beitragen.

3. Planquadratmethode

- Zerlegung des Streckennetzes mit Hilfe der GPS-Koordinaten in gleichmäßige Planquadrate (z.B. 100 x 100 m Kantenlänge)
- Ermittlung der jeweiligen Gesamtschadenssumme für die Planquadrate
- übersichtliche Bewertung für das gesamte Streckennetz

4. Diskretisierung / Detailanalyse



Messstelle AL05 1:

Extremwertsuche

Messabschnitte

> 50% Schädigung

Planquadrate

> 50% Schädigung

Übereinstimmung

	<u>Netz A</u>	<u>Netz B</u>
Extremwertsuche	4	15
Messabschnitte > 50% Schädigung	4	3
Planquadrate > 50% Schädigung	4	3
Übereinstimmung	3	3

- die Ergebnisse der Diskretisierungsmethoden stimmen weitgehend überein
- Einschränkung relevanter Streckenabschnitte

→ Weitere Auswertung erfolgt auf Basis der Planquadratmethode

4. Diskretisierung / Detailanalyse

Messstellen für Detailanalyse

	<u>Netz A</u>	<u>Netz B</u>	<u>Netz C</u>	Σ Messreihen
Fahrwerkrahmen	9	9	9	27
Wagenkasten	3	3	6	12

Beispiele

Fahrwerkrahmen
Schweißnaht
Querträger
im Bereich
Längsanlenkung



Wagenkasten
Portalsäule
Fenster oben
Schweißnaht



Fahrwerkrahmen
Schweißnaht
Innen
Querträger
Kröpfung



Wagenkasten
Portalsäule
unten
Schweißnaht



4. Diskretisierung / Detailanalyse

→ Kollektive normiert auf 3.500.000 km (100.000 km / Jahr x 35 Jahre)

Fahrwerkrahmen

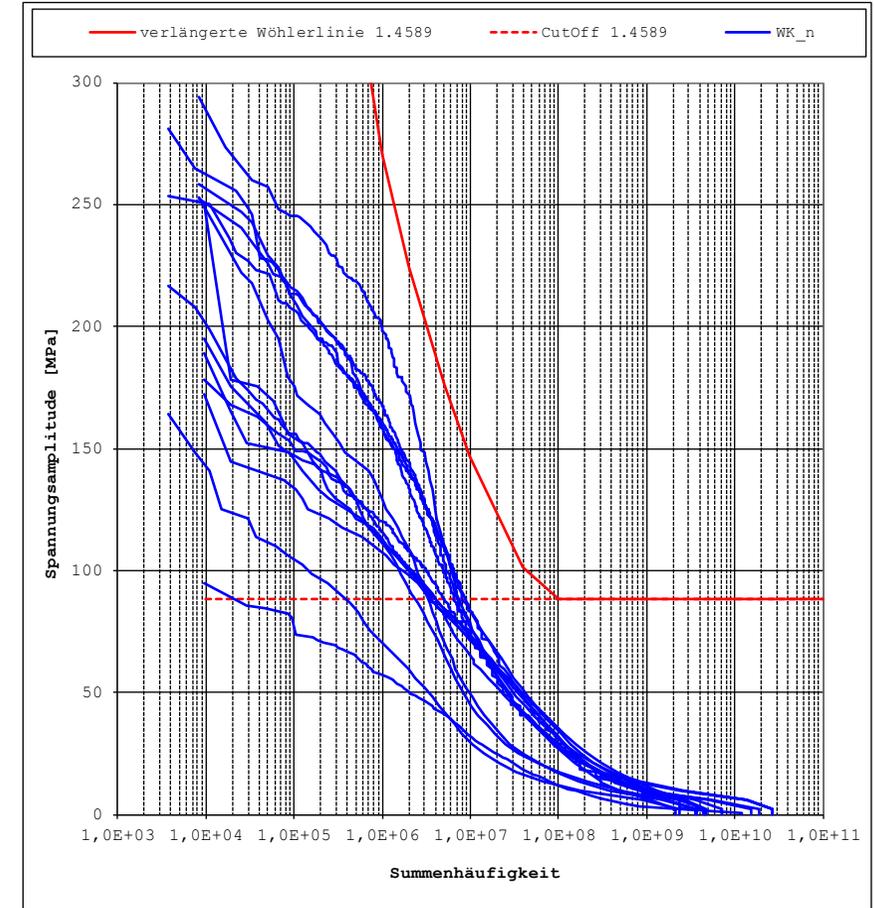
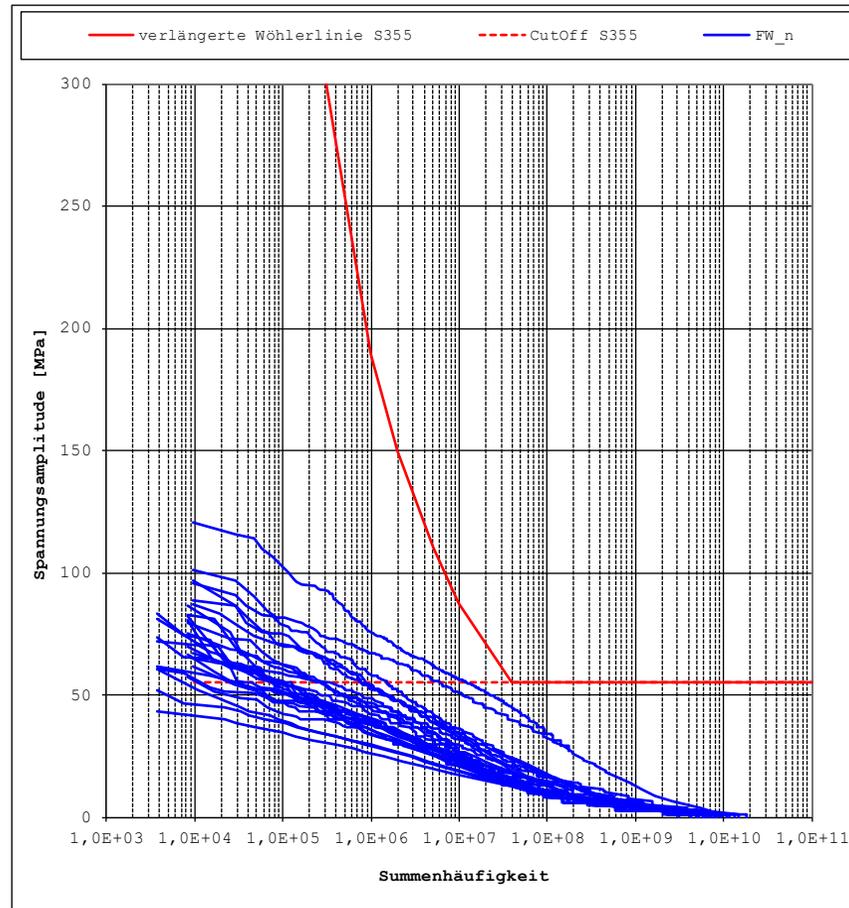
Wagenkasten

Kollektivkennwerte:

	S_{max}	LL	Σh	D	a	1/x
	[MPa]	[km]	[-]	[-]	[-]	[-]
FW_n	120,4	3500000	1,8E+10	0,472	0,78	0,90

Kollektivkennwerte:

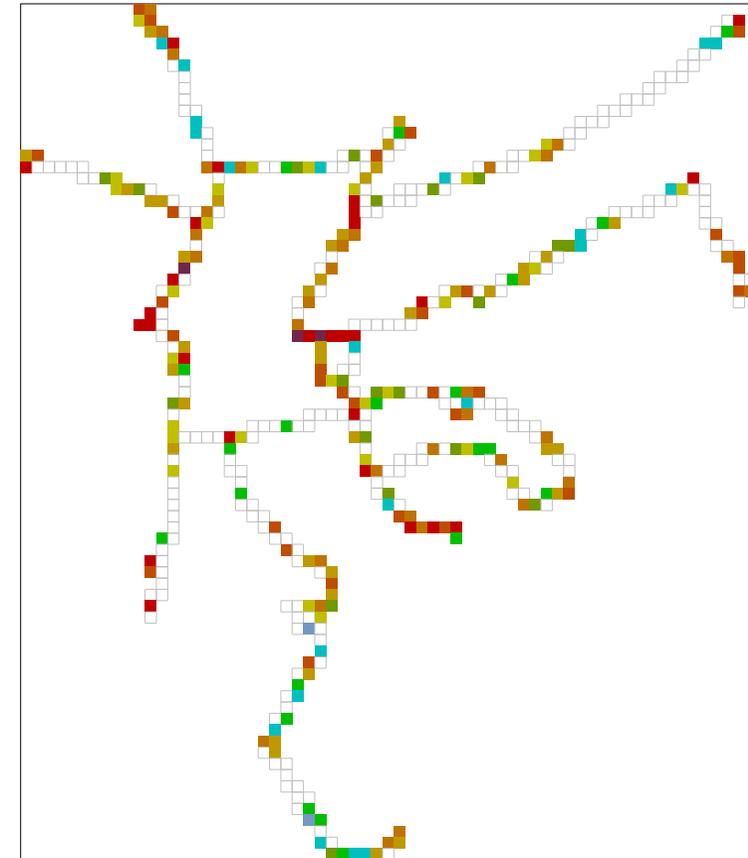
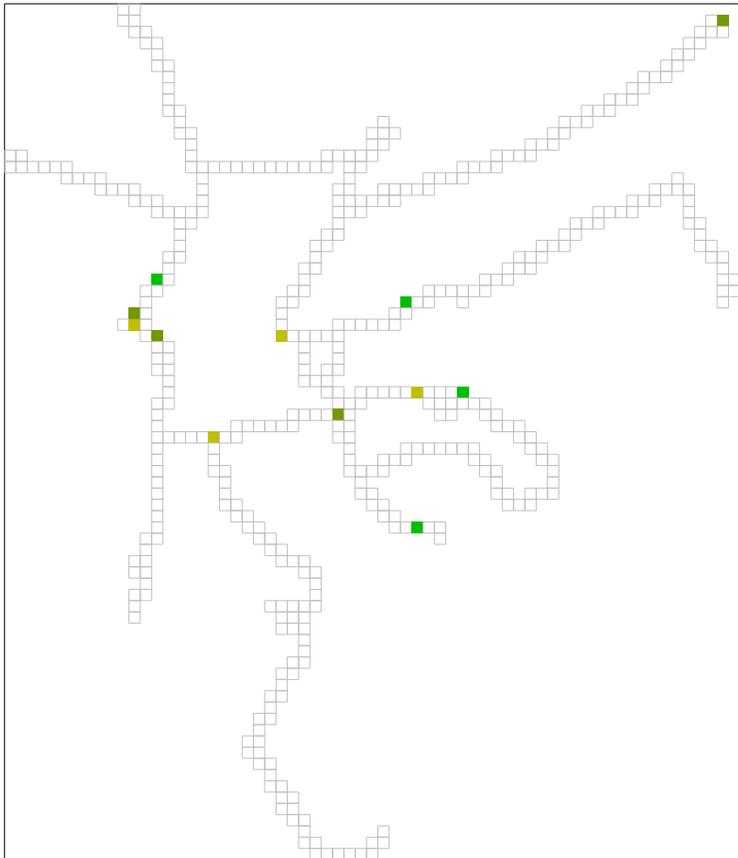
	S_{max}	LL	Σh	D	a	1/x
	[MPa]	[km]	[-]	[-]	[-]	[-]
WK_n	294,3	3500000	2,7E+10	1,009	1,00	1,00



4. Diskretisierung / Detailanalyse

Fahrwerkrahmen

Wagenkasten



449

n Planquadrate gesamt

449

12

i 100% der Schädigung

225

3

k > 50% der Schädigung

32

0,7% // 25,0%

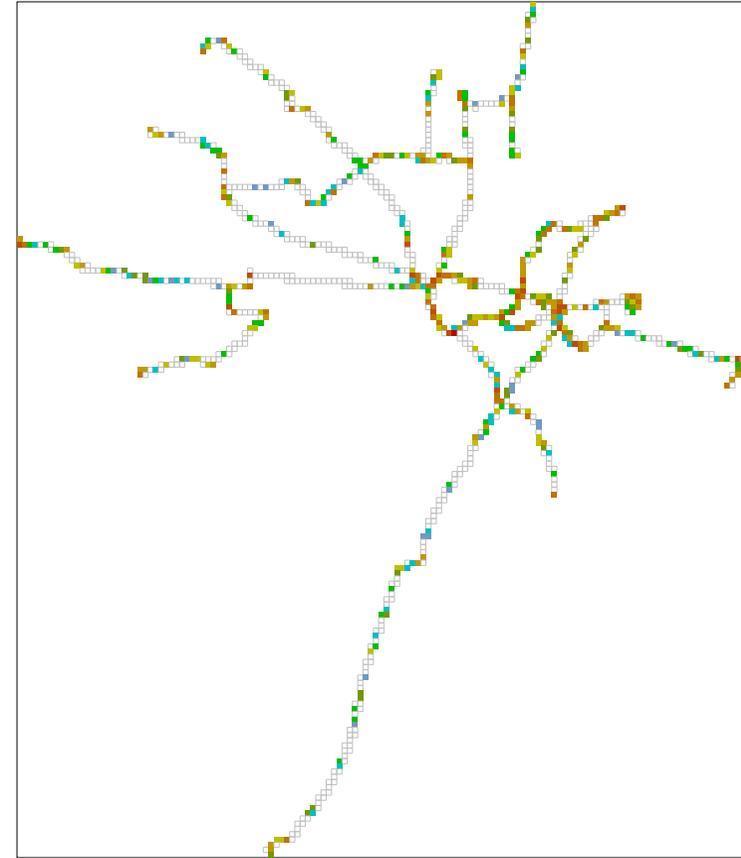
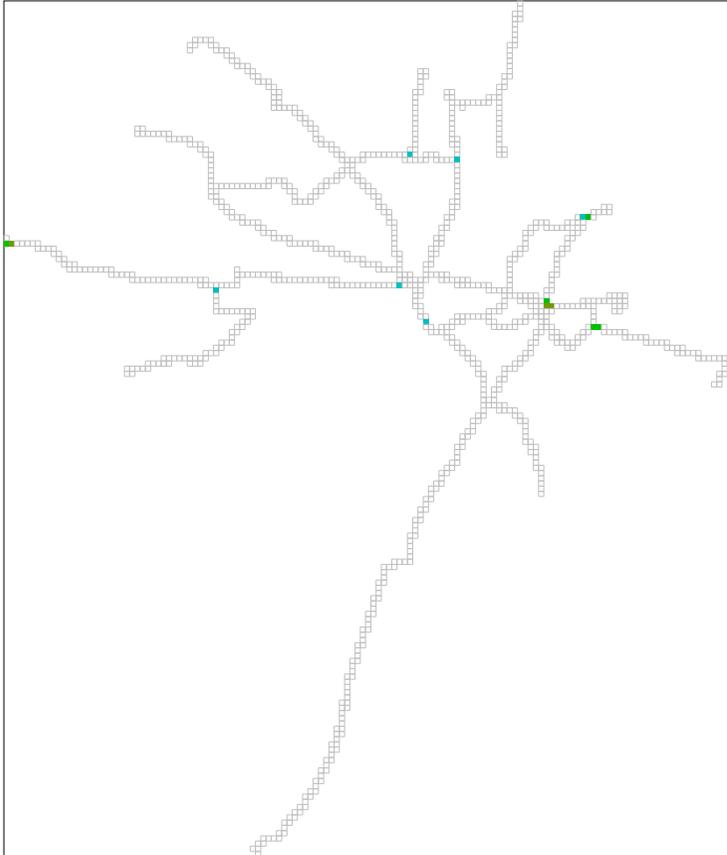
k/n // k/i

7,1% // 14,2%

4. Diskretisierung / Detailanalyse

Fahrwerkrahmen

Wagenkasten



964

n Planquadrate gesamt

964

14

i 100% der Schädigung

455

4

k > 50% der Schädigung

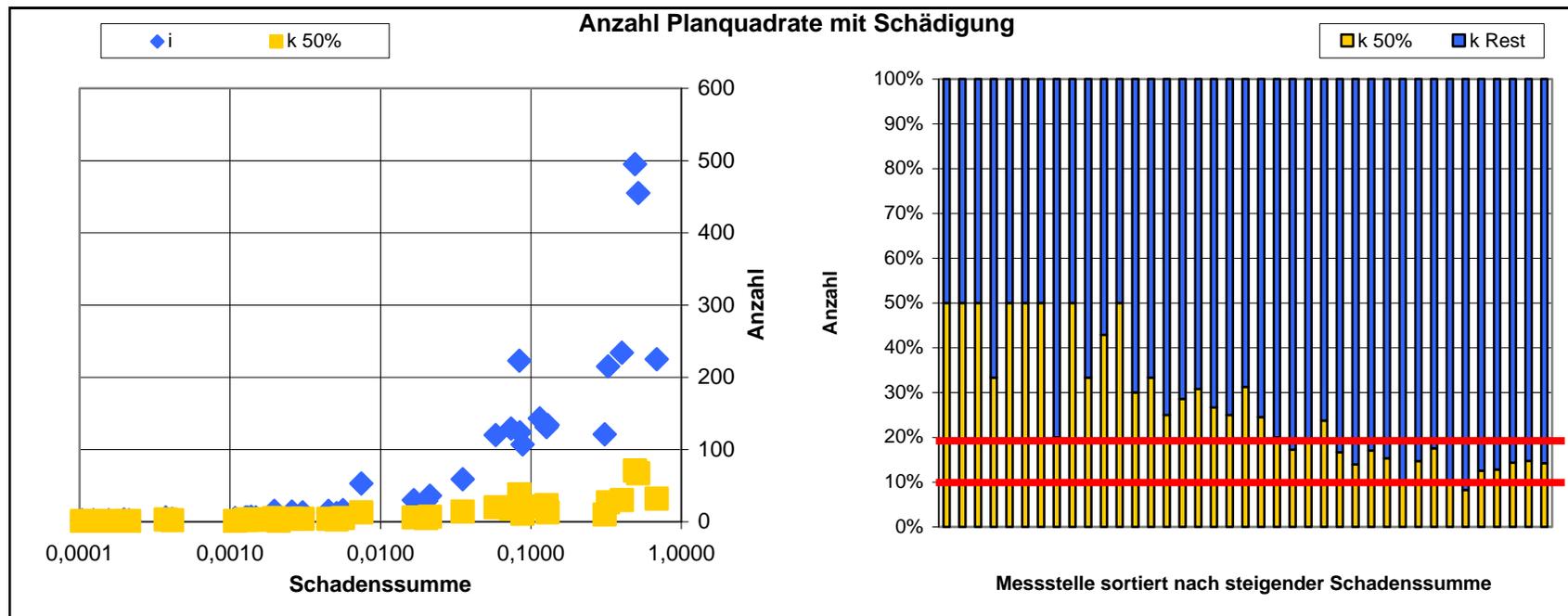
67

0,4% // 28,6%

k/n // k/i

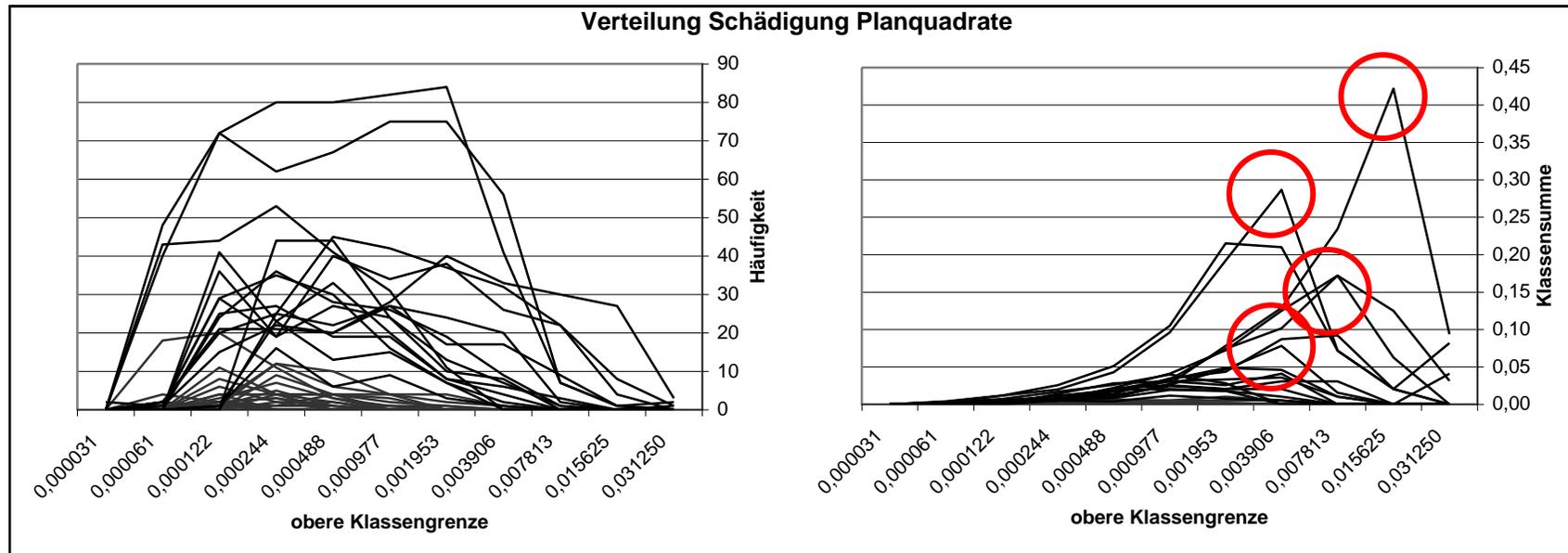
7,0% // 14,7%

4. Diskretisierung / Detailanalyse



- Bezogen auf die Gesamtzahl der schädigenden Stellen im Streckennetz, bestimmen nur 10% bis 20% der Stellen maßgebend die Schädigung der Fahrzeuge.

4. Diskretisierung / Detailanalyse



- Die höchste Schädigung erfolgt durch die Stellen im Netz, die 25% bis 50% des Schadenseintrages bezogen auf die Stelle mit der höchsten Schadenssumme erzeugen.



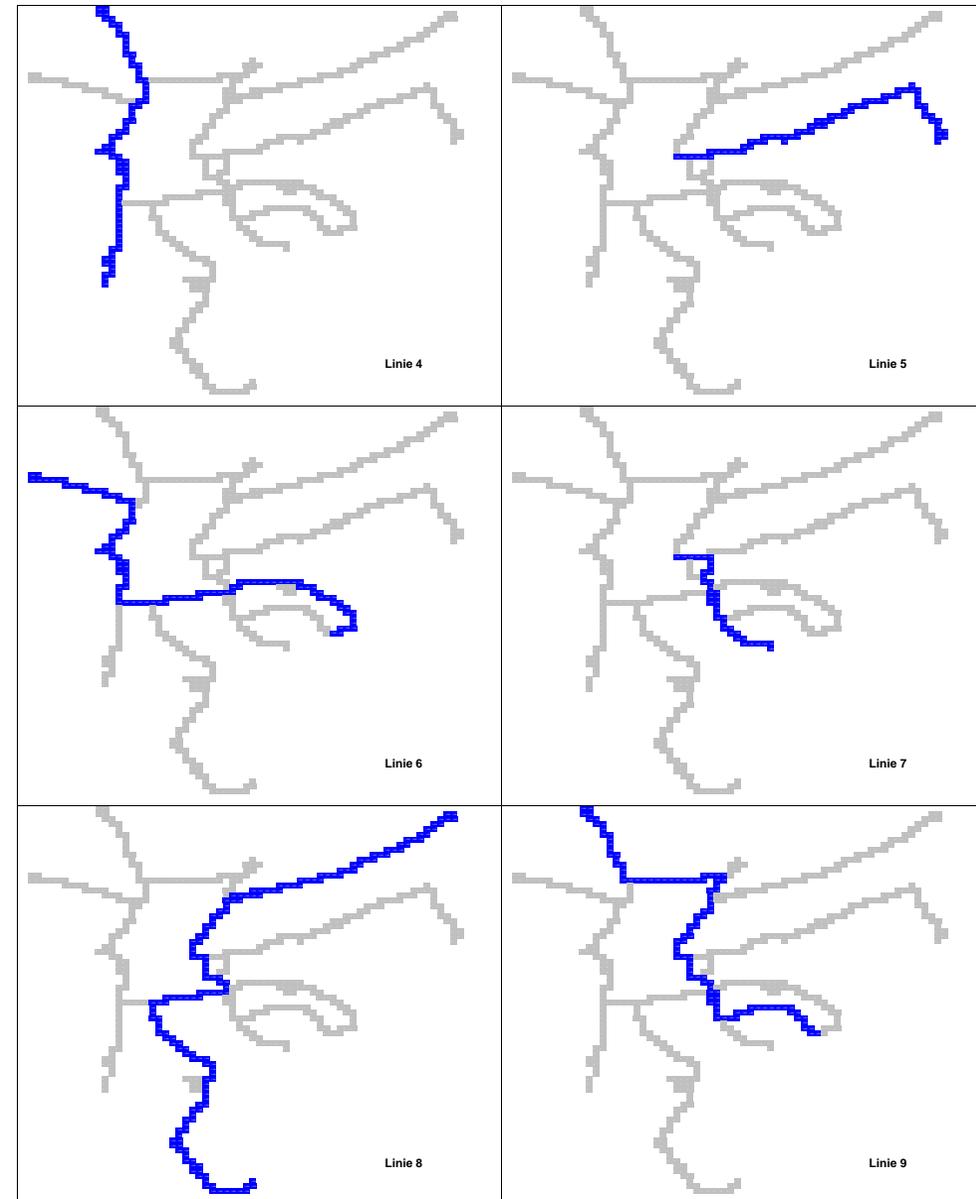
STADLER

Clevere Lösungen auf der Schiene

5. Linieneinfluss

5. Linieneinfluss

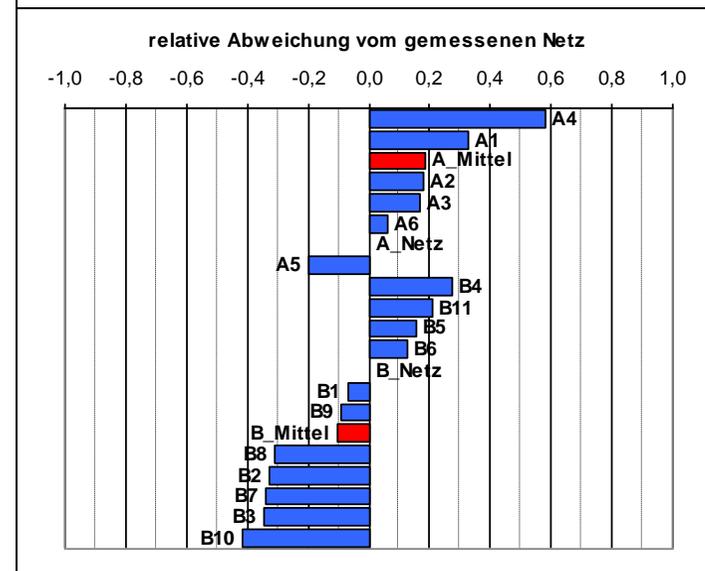
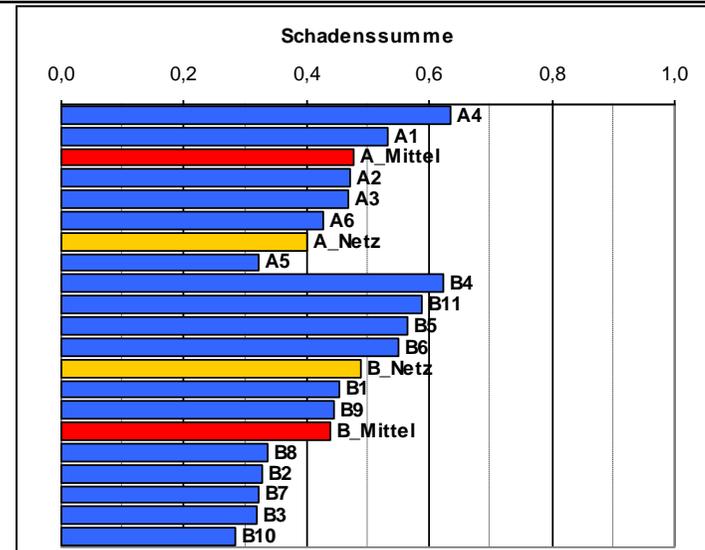
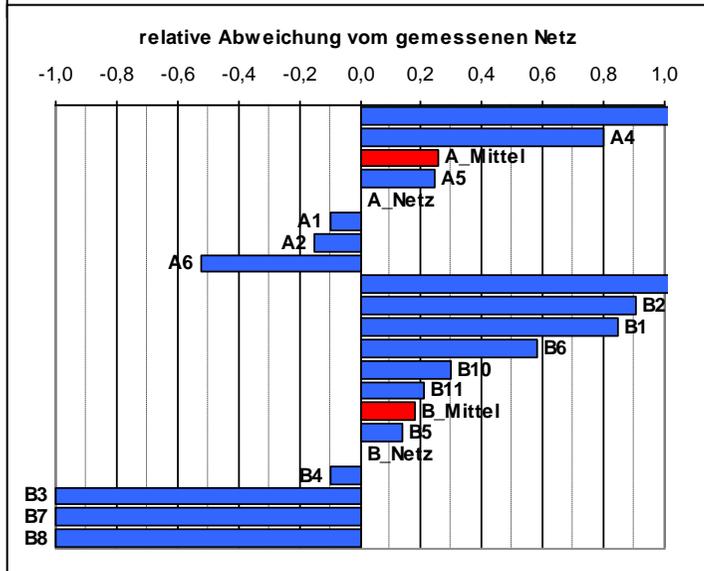
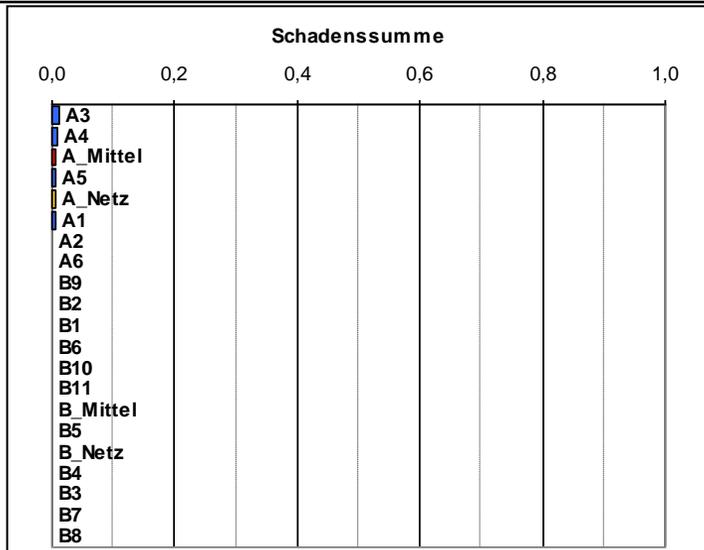
- Wie verteilt sich die Schädigung über unterschiedliche Linien?
 - einfache Abschätzung auf Grundlage der Planquadratmethode
 - Kombination der Einzelschädigungen (Linienbezogen) und Vergleich der Schadenssummen



5. Linieneinfluss

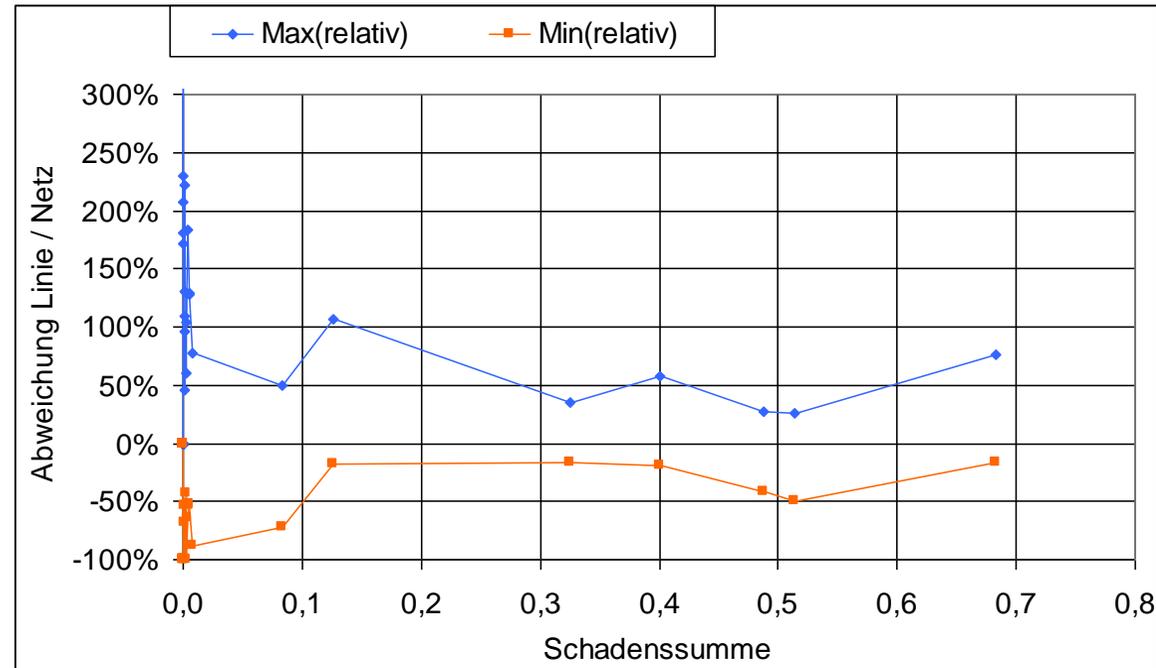
Fahrwerkrahmen

Wagenkasten



5. Linieneinfluss

- verschiedene Linien / Umläufe im Streckennetz ergeben unterschiedlich hohes Schädigungspotential
- Bestimmend für die Schadenssumme der Einzellinie:
 - Linienlänge
 - Anzahl der schädigungsrelevanten Stellen im Linienverlauf
- Fahrzeuglebensdauer
 - Einsatz über das gesamte Streckennetz verteilt
 - Fahrtrouten der Linien wechseln
 - oft Kopplung mehrerer Linien zu einem Umlauf



- Fahrzeugeinsatz und Schädigung unterliegen statistischen Einflüssen
- es bleibt weiterhin richtig, das Gesamtnetz als Bewertungsgrundlage anzusetzen



STADLER

Cleverer Lösungen auf der Schiene

6. Parametereinfluss

6. Parametereinfluss

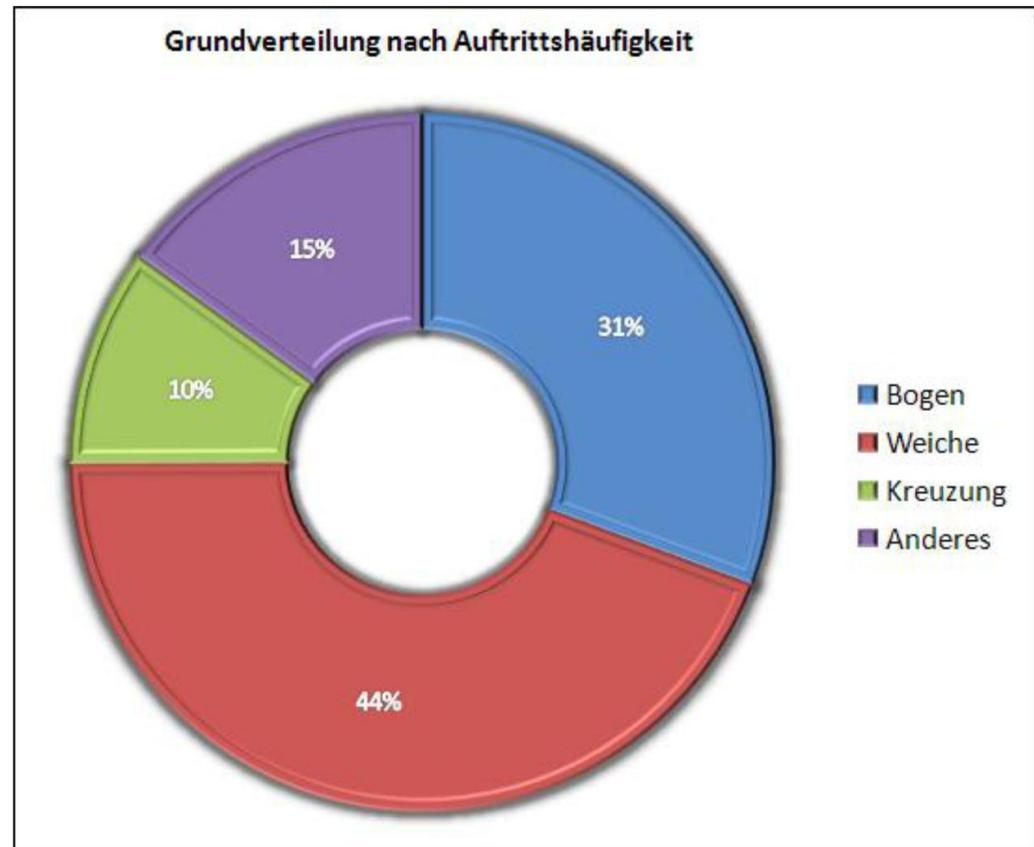
- Welche Parameter (Beladung, Fahrgeschwindigkeit, Beschleunigung, Trassierung) haben einen nennenswerten Einfluss auf die Schädigung?
- Verteilung der Streckenanteile, die zu den höchsten Spannungen führen

Messstelle AL05 1:

Messereignisse

Grenzwerte

	<u>Netz A</u>
Messereignisse	92
Grenzwerte	63% / Max 82% / Min

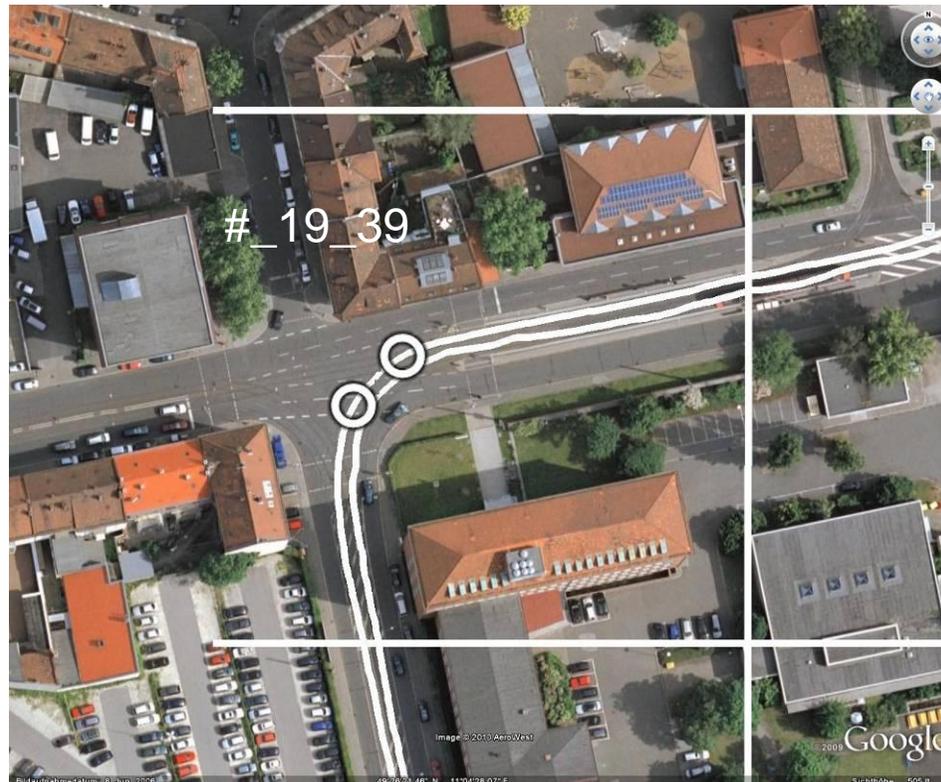


6. Parametereinfluss

Messstelle AL05_1:

Netz A

Planquadrat	#_19_39
Streckencharakteristik	Abzweig, 25 m Bogenradius, Weichenanlagen an beiden Bogenenden



6. Parametereinfluss

Messstelle AL05 1: **Netz A**

Extremwertereignisse	2		
Durchfahrten	5	davon mit Schädigung	2

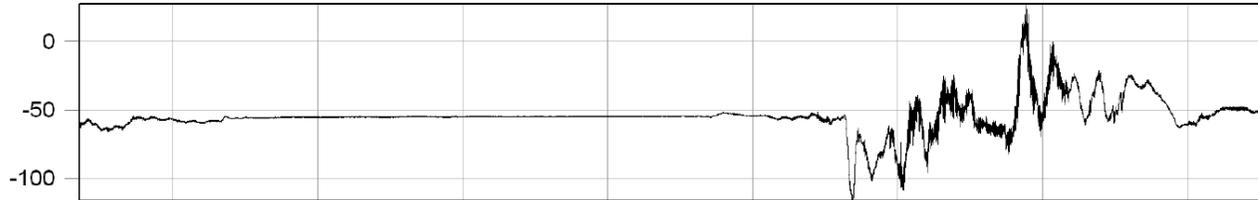
Fahrt		16	25	32	33	39
Messdaten	max	-17,5	-17,1	20,7	-6,5	27,5
	min	-126,8	-133,2	-99,8	-122,8	-116,5
Amplitude	max	45,9	49,3	56,3	51,0	65,1
Quer- beschleunigung	max	0,4	0,6	1,8	0,5	2,2
	min	-1,8	-2,0	-0,3	-1,9	-0,2
Schadenssumme		0,000000	0,000000	0,000155	0,000000	0,000239
		rechts	rechts	links	rechts	links

- Extremwerte resultieren aus Stoß bei Bogenein- und –auslauf
- Beanspruchung bei Rechtsbogen aufgrund negativer Mittelspannung geringer

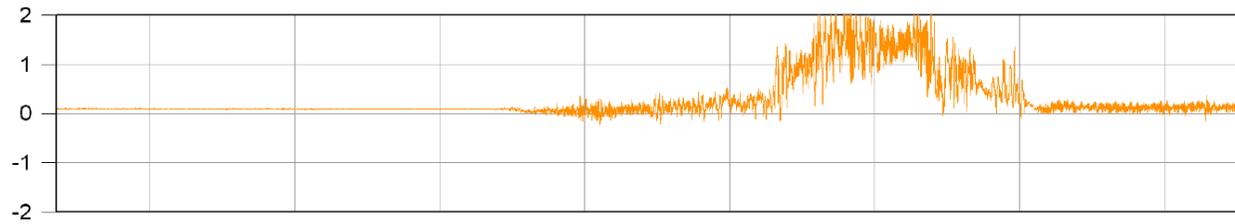
6. Parametereinfluss

- Vergleich Beanspruchung AL05_1 <> Querbeschleunigung <> Kraft Anlenkstange

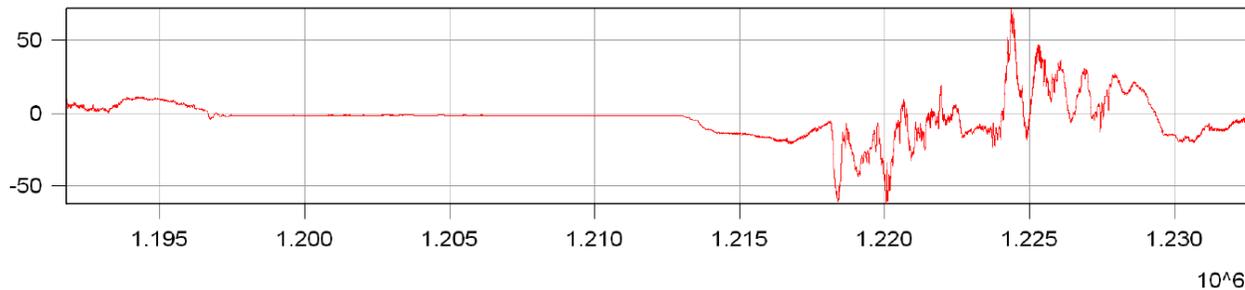
Analyse_19_39_#_39_1: Messdaten_skal



Analyse_19_39_#_39_1: Beschleunigung_Y

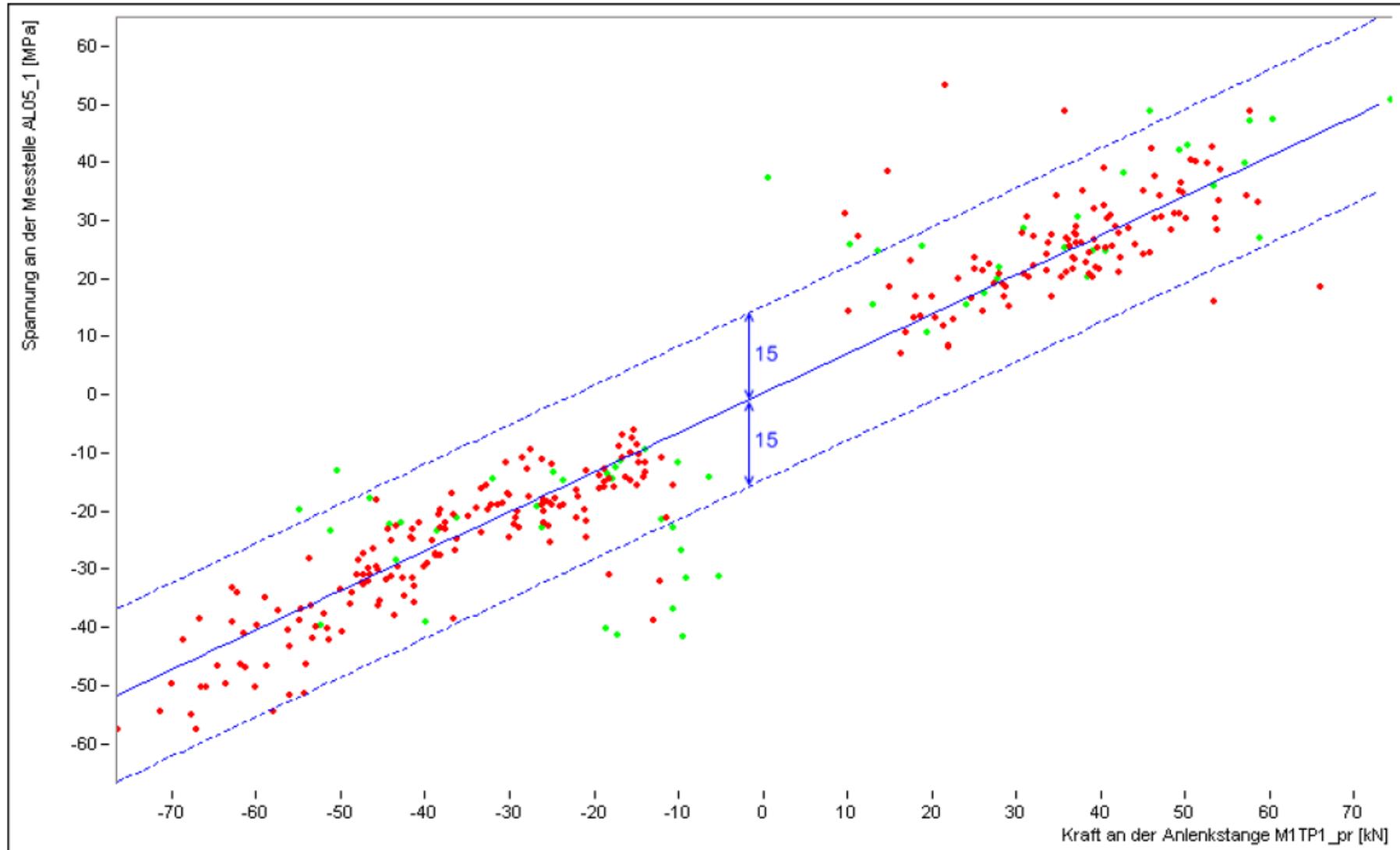


Analyse_19_39_#_39_1: M1TP1_pr



6. Parametereinfluss

- Sensitivitätsanalyse Beanspruchung AL05_1 <> Kraft Anlenkstange (grün = leer, rot = 2/3-beladen)





STADLER

Clevere Lösungen auf der Schiene

7. Zusammenfassung

7. Zusammenfassung

- 2008 – 2010 Betriebsmessungen an insgesamt 6 Stadler Rail Straßen- und Stadtbahnfahrzeugen vom Typ Tango und Variobahn
- Betriebsfestigkeitsnachweis für alle Fahrzeuge erfolgreich erbracht
- Validierung der Auslegung ist mittlerweile elementarer Bestandteil des Zulassungsprozesses
- höhere Akzeptanz der Festigkeitsnachweise bei Kunden und Zulassungsbehörden über die Anforderungen der gültigen Regelwerke hinaus
- Minimierung des wirtschaftlichen Risikos des Fahrzeugherstellers
- Aufgrund der Vielzahl der durchgeführten Messungen konnte bei verschiedenen Projekten auf Analogiebetrachtungen zurückgegriffen und auf die Durchführung weiterer Messfahrten in verzichtet werden.

7. Zusammenfassung

Welche Zusatzinformationen können aus der Datenmenge der Betriebsmessungen gewonnen werden?

- Bezogen auf die Gesamtzahl der schädigenden Stellen im Streckennetz, bestimmen nur 10% bis 20% der Stellen maßgebend die Schädigung der Fahrzeuge.
- Die höchste Schädigung erfolgt durch die Stellen im Netz, die 25% bis 50% des Schadenseintrages bezogen auf die Stelle mit der höchsten Schadenssumme erzeugen.
 - Diese Streckenabschnitte müssen bei der Betriebsfestigkeitsmessung durch eine ausreichende Wahl der Messlänge sicher erfasst werden.
 - Erfassung singulärer, ungünstigster Ereignisse ist nicht zwingend erforderlich
- verschiedene Linien / Umläufe im Streckennetz ergeben unterschiedlich hohes Schädigungspotential
 - Fahrzeugeinsatz und Schädigung unterliegen statistischen Einflüssen
 - es bleibt weiterhin richtig, das Gesamtnetz als Bewertungsgrundlage anzusetzen
- Zusatzinformationen für die Weiterentwicklung der Nachweiskonzepte durch gezielte Parameterstudien

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

