

Ausdrehbarkeit von Fahrwerken im Kontext der Niederflurstraßenbahn-Entwicklung.

**Eine einfache Methode zur Ermittlung
der Ausdrehbarkeit von Straßenbahnfahrwerken**

**Jiri Hofman
Skoda Transportation**



***SCHIENENFAHRZEUGTAGUNG
GRAZ, September 2014***

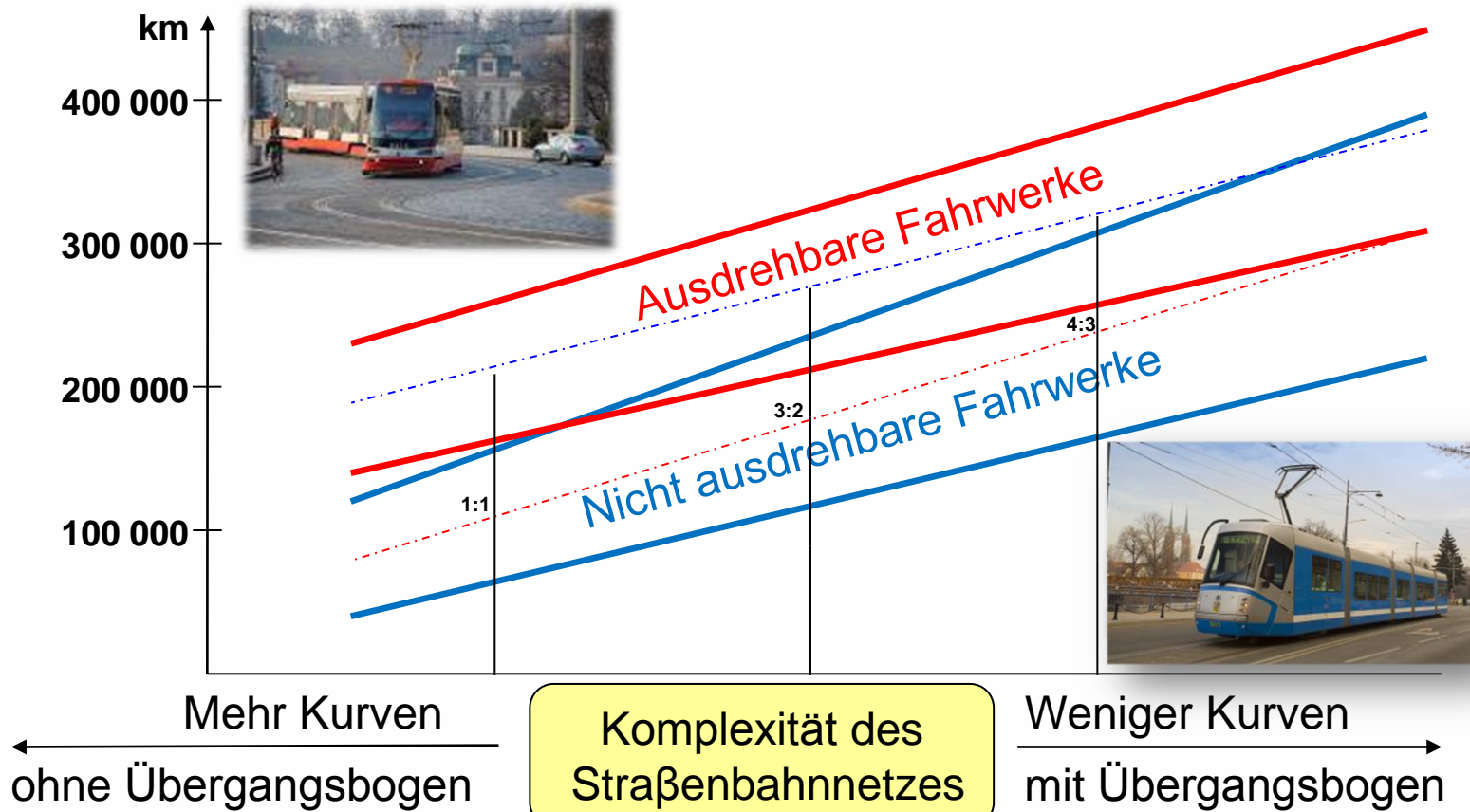
Inhalt

- Warum ist die Methode entstanden?
- Kurze historische Übersicht zur Entwicklung von Fahrwerkstypen und Antriebsarten
- Beschreibung der Methode zur Ermittlung der Ausdrehbarkeit vonFahrwerken
- Beispiele
- Schlussfolgerungen

Straßenbahnen mit oder ohne Drehgestelle?

Radlebensdauer

Dieses Schaubild beruht auf Gesprächen mit Fachleuten von Verkehrsbetrieben



Ausser der Ausdrehbarkeit und Netzkomplexität sind die Unterschiede auch den Differenzen in Achslast, Raddurchmesser, Härte, Geometrie ua. zuzuschreiben

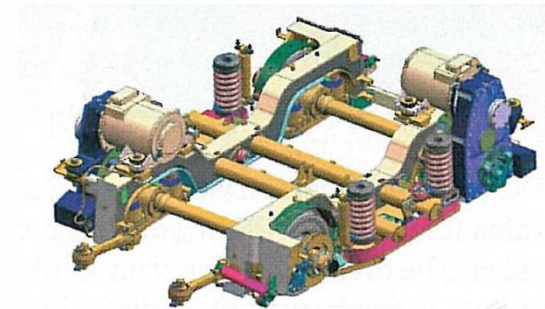
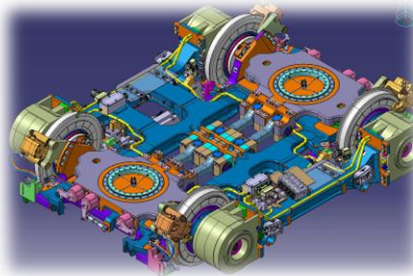
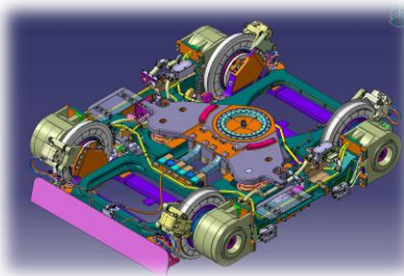
- 1) Haben beide Fahrzeugtypen Drehgestelle?
- 2) Sind also beide Fahrzeuge Drehgestellfahrzeuge?



Drehgestellfahrzeug



Multigelenker



Obwohl kein Fachmann sagen würde,
dass ein Multigelenker auch ein Drehgestellfahrzeug ist,
trotzdem wurde oft auch in Fachkreisen behauptet,
dass die Fahrwerke beider Fahrzeuge Drehgestelle sind,
falls sie wenigstens geringfügig um die Hochachse rotieren können.

Und gerade dieser Widerspruch hat zur Entstehung der
METHODE ZUR EXAKTEN ERKENNUNG VON FAHRWERKSTYPEN
geführt.

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung

1) Es hat einst mit Gütern ohne Schienen begonnen



Beachten Sie, dass es sich um Drehgestelltechnik handelt

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung



2) Dann änderte die Traktionsart

Auch in Drehgestelltechnik

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung

3) Wenn es gut für Gut ist, warum nicht auch für Personen?



Drehgestelltechnik für immer?

Auf der Straße (Wiese) geht es einfach nicht anders.

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung



Keine Drehgestelle mehr. Schienen machen sie überflüssig.

Wirklich?

(Und Schienen haben auch Energieersparungen gebracht.)

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung

5) Und wieder eine Änderung des Traktionssystems



**Die menschliche Vernunft hat die Natur besiegt.
Endlich kein Kot mehr am Boden. Aber in der Luft?**

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung



Frischluftaustausch

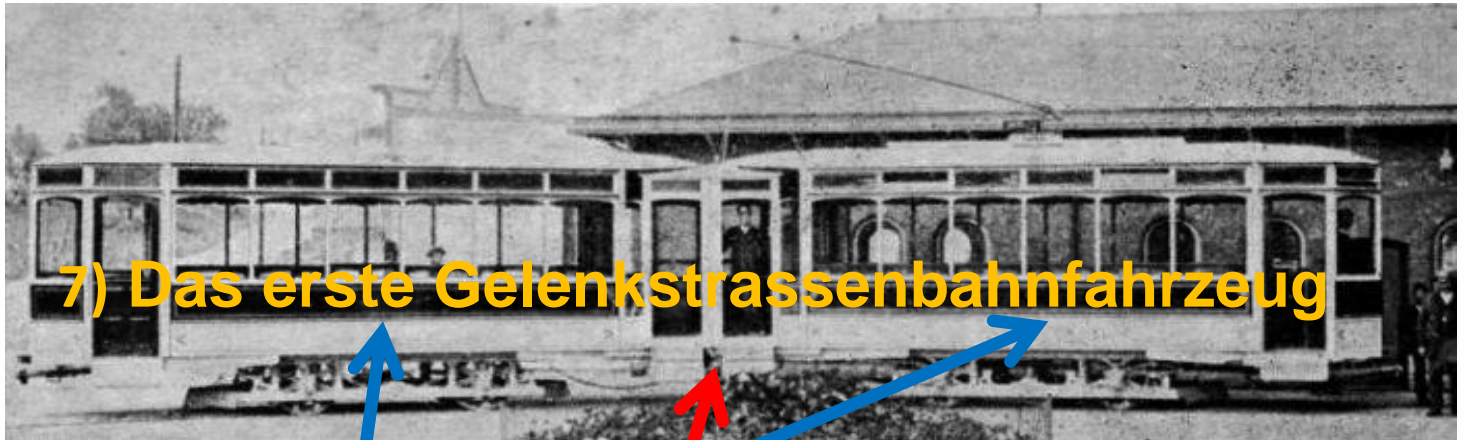
6) Und darum nochmals Traktionsänderung



Stangenstromabnehmer statt Schornstein.

Die Schornsteine sind umgesiedelt und die reine Luft ist zurück?

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung



Two rooms and „kitchen“. Cleveland - 1893

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung



8) Bald ist die Niederflertechnik gekommen

Two rooms and bath. Boston - 1912

Teilniederflur

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung



9) Und etwas später schon in der Drehgestelltechnik

Two rooms and bath. Boston - 1916

Teilniederflur

Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung



10) Mit dem PCC Konzept hat sich die Drehgestelltechnik voll durchgesetzt

Ab 1925 Drehgestelltechnik für immer?

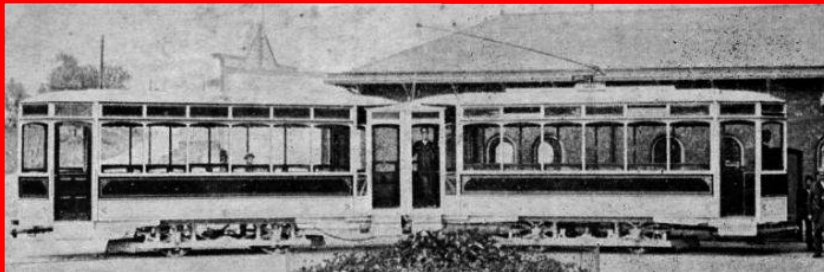
Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung

11) Noch 50 Jahre später alle neuen Strassenbahnfahrzeuge
ausschliesslich in der Drehgestelltechnik



Drehgestelltechnik für immer?

Botschaft der kurzen historischen Übersicht: von der Drehgestelltechnik **über feste Fahrwerke** wieder zur Drehgestelltechnik



Kurze historische Übersicht zur Fahrwerkstypen- und Antriebsentwicklung

Um 1980 waren alle modernen Straßenbahnen
in Drehgestell- und gleichzeitig Hochflurbauweise gebaut.

Die Hochflurbauweise (mit drei Stufen) ist für
mobilitätseingeschränkte Fahrgäste schwer zu akzeptieren.

Die moderne Gessellschaft nimmt Rücksicht
auf mobilitätseingeschränkte Fahrgäste.

Darum entstanden die modernen Niederflurstraßenbahnen,
die aber aus technischen Gründen auf Drehgestellbauweise verzichten mussten.

Die ersten Niederflurstraßenbahnen waren ein Schritt vorwärts
für die Fahrgäste, gleichzeitig aber auch ein Schritt zurück für die Betreiber.

Weg von Drehgestelltechnik für immer?

Entwicklung moderner NF-Straßenbahnen

von der Drehgestelltechnik über feste Fahrwerke zur Drehgestelltechnik

Technisches Niveau

teilniederflurig
100 % niederflurig
voll ausdrehbare Fahrwerke

- ———— Höchster Stand der Technik und erstes Serienprodukt
- ———— Alstom
- ———— Bombardier
- ———— Siemens
- ———— ŠKODA
- ★ Einzelstehende Lösungen mit hohem technischen Niveau

nächste Generation

Jahr 1987

1990

1995

2000

2005

2010

2015

Vevey
Be 4/6
Geneve

Düwag
NGT6C
Kassel

MAN
GT6N
Bremen

ADtranz
Variobahn
Chemnitz

Siemens
Combino
Potsdam

Alstom
Citadis
302
Lyon

★
ULF Wien

★
T2000 Brüssel

Bombardier
Lodz
Flexity Outlook

★
Cobra Zürich

★
Crotram Zagreb

Škoda
ForCity
Prague

Alstom Dualis (X04)
Bombardier Flexity Melbourne

PESA Twist
Czestochowa

Siemens
Avenio
Almada

Flexity
Berlin

Combino crisis

ASTRA

Elektra

Bombardier
Flexity Classic
Kassel

NGT8
Leipzig

Entwicklung moderner Niederflurstraßenbahnen

Man erkennt, dass im Unterschied zu anderen Schienenfahrzeugen die **Entwicklung von Niederflurstraßenbahnen sehr heterogen** ist.

Es sind **sehr viele Niederflurstraßenbahkonzepte entstanden**.
Der Grund dafür ist, dass Fahrkomfort, Rad- und Schienenabnutzung und Instandhaltungskosten **nicht befriedigend waren**.

Die **Betreiber haben** die guten Erfahrungen mit Drehgestellfahrzeugen gemacht und haben auf **Niederflurfahrzeuge in Drehgestelltechnik gehofft**.

Und die **Hersteller haben sich bemüht**, dieser Hoffnung irgendwie (und **nicht immer erfolgreich**) zu entsprechen.

Bemerkung:

Erst wenn alle Hersteller dieselben Fahrzeugkonzepte herstellen werden, kann gesagt werden, dass das beste Konzept gefunden wurde.
Das ist aber noch nicht geschehen.

„Babylon“ in Fahrwerkstypen?

Bei der Suche nach dem bestgeeigneten Niederflurstraßenbahnkonzept sind so **viele verschiedensten Fahrwekstypen entstanden**, dass es schwierig war, deren Eigenschaften richtig zu verstehen.

Und gerade die Eigenschaften der **Fahrwerke bestimmen größtenteils das Verhalten und die Instandhaltungskosten** im Betrieb.

Und die Verkäufer von Straßenbahnen präsentieren dem Kunden vor allem deren Vorteile und nur sehr selten deren Nachteile.

Sogar Fahrwerke, die mit der Drehgestelltechnik nichts zu tun haben, wurden als Drehgestelle bezeichnet.

Kein „Babylon“ mehr in Fahrwerkstypen

Um „Babylon“ zu verhindern, hat sich der VDV entschieden, die Fahrwerkstypen offiziell zu unterscheiden.

In seinem Forschungsvorhaben BMVBW Stadtverkehr 2004 (FOPS),
„**70.0763/04 Bestimmung fahrdynamischer Parameter für die
Strukturauslegung moderner Multi-Gelenkfahrzeuge nach BOStrab**“
wurde eine neue Klassifizierung von Straßenbahnfahrzeugen
und ihren Fahrwerken eingeführt.

Danach wurden die Fahrwerke in folgende Typen verteilt:

- **ausdrehbare Fahrwerke** (Drehgestelle)
 - **bedingt ausdrehbare Fahrwerke** (?)
 - **nicht ausdrehbare Fahrwerke** (keine Drehgestelle)
-

Ganz unabhängig davon ist eine **einfache Methode** entstanden, deren Resultate dieser Einteilung voll entsprechen und aufgrund der einfachen Berechnung **exakt die Fahrwerkstypen bestimmen**.

Hauptprinzipien der Erkennungsmethode – I

1) Die Hauptkomponenten moderner Straßenbahnen sind

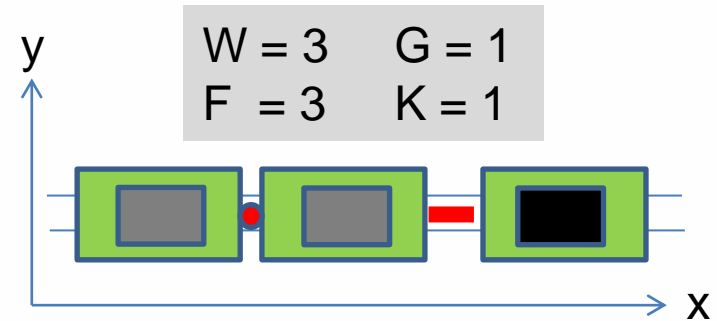
Wagenkastenteile, **W** – Anzahl der Wagenteile

Fahrwerke, **F** – Anzahl der Fahrwerke

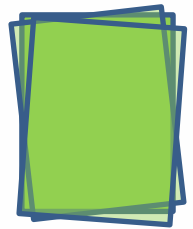
Gelenke, **G** – Anzahl der Gelenke

Kupplungen, **K** – Anzahl der Kupplungen

Bindungen, **B** – Anzahl der Bindungen



2) Diese Hauptkomponenten (es müssen nicht alle sein) sind untereinander zu einem Strassenbahnfahrzeug verbunden, das nur einen Freiheitsgrad (x-Achse, d.h. in Längsrichtung) hat.



3) Selbstverständlich sind auch kleine Bewegungen (bis zum Ausschöpfen der Spiele) in anderen Richtungen möglich.

4) Wir konzentrieren uns **nur** auf Bewegungen in der Querrichtung (**y-Achse**). Damit alle Teile des Fahrzeugs in der Begrenzungslinie bleiben, **muss** deren **weitere Bewegung** (nach der Ausschöpfung von Spielen) **in der y-Richtung verhindert werden**.

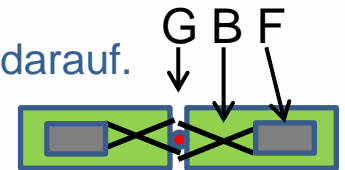


Hauptprinzipien der Erkennungsmethode – II

- 5) Jeder Wagenteil hat in der Querrichtung **zwei** Freiheitsgrade (Verschub in der y-Achse und Rotation um die Hochachse). Hat das Fahrzeug **W** Wagenteile, müssen durch andere Komponenten **2 x W** Freiheitsgrade eliminiert werden, damit das Fahrzeug in der Begrenzungslinie bleibt.



- 6) Auf jeden Wagenteil wirken (= eliminieren Freiheitsgrade) Fahrwerke (**F**), Gelenke (**G**) und Kupplungen (**K**). Auf dem Fahrzeug können noch Bindungen (**B** – z.B. KT4) sein. Da diese Bindungen sehr selten benützt werden, verzichten wir jetzt darauf. Keine weitere Elemente wirken an die Wagenteile.



- 7) Jedes **Gelenk (G)** **eliminiert** in der Querrichtung **einen Freiheitsgrad** (Verschub).
Kupplung (K) **eliminiert** in der Querrichtung **keinen Freiheitsgrad** (Freiheitsgradeliminierung nur in der x-Achse).
- 8) Die **übrigbleibenden Freiheitsgrade**, die nicht durch Gelenke eliminiert werden, **müssen durch Fahrwerke eliminiert werden**.

„Fahrwerkgleichung 1“

$$2 \cdot W - 1 \cdot G - 0 \cdot K = x \cdot F$$

x – Freiheitsgradeliminierung durch Fahrwerk

→
substitution $x = 2 - d$

„Fahrwerkgleichung 2“


$$2 \cdot W - 1 \cdot G = (2 - d) \cdot F$$

d = $(2 - x)$ - Fahrwerksdrehbarkeit

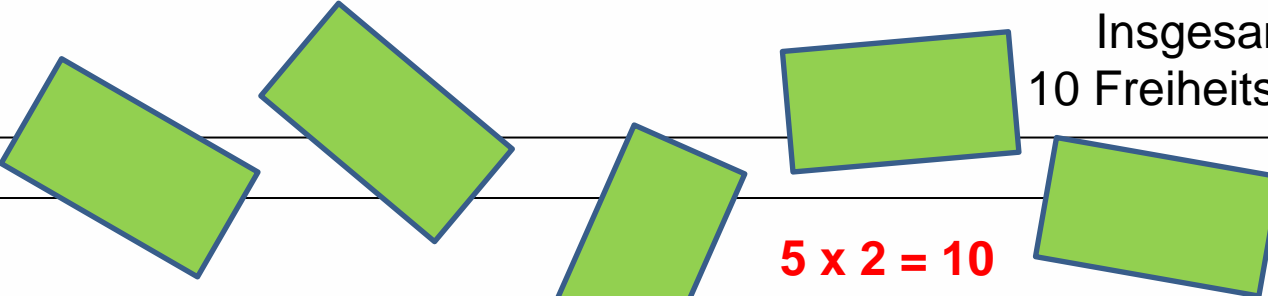
Warum muss das Fahrzeug komplett sein?

(Also alle nötigen Gelenke, Kupplungen und Fahrwerke haben?)

START
NUR
WAGENTEILE



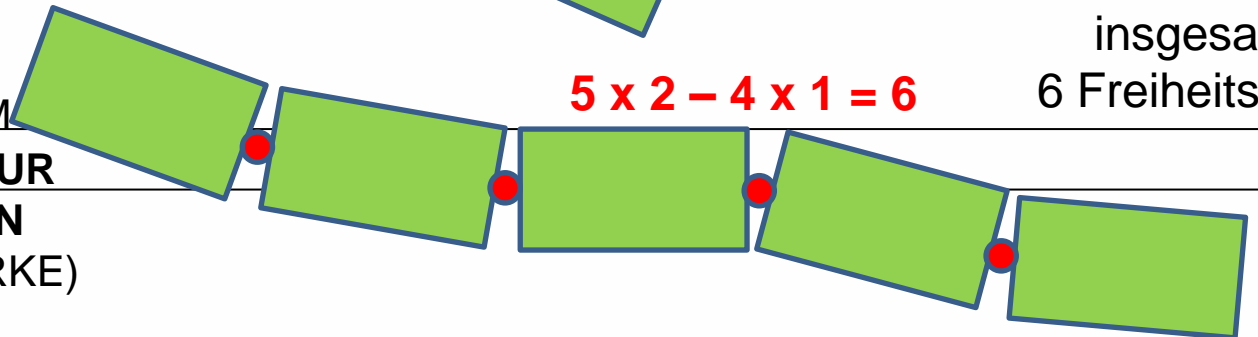
a) IN KURZEM
WAGENTEILE
OHNE ALLE
ANDEREN
KOMPONENTEN



Insgesamt
10 Freiheitsgrade

$5 \times 2 = 10$

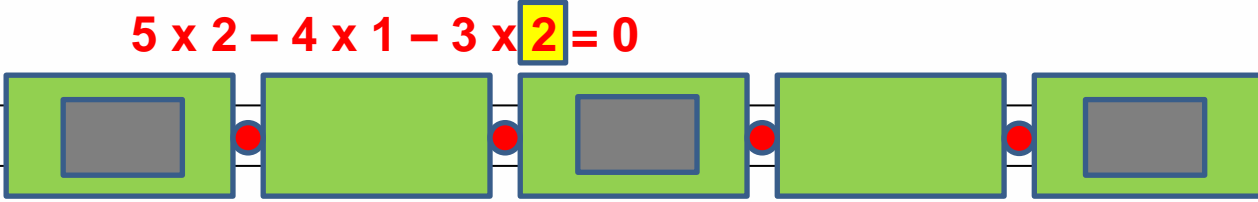
b) IN KURZEM
WAGENTEILE NUR
MIT GELENKEN
(OHNE FAHRWERKE)



insgesamt
6 Freiheitsgrade

$5 \times 2 - 4 \times 1 = 6$

c) IN KURZEM
FAHRZEUG
KOMPLETT
(AUCH MIT
FAHRWERKEN)



$5 \times 2 - 4 \times 1 - 3 \times 2 = 0$

keine Freiheitsgrade
in Querrichtung

Da c) richtig ist

Überprüfung der „Fahrwerkgleichung“ für die Fahrzeuge mit gleichen Fahrwerktypen

$$\underline{2 \cdot W - 1 \cdot G = (2 - d) \cdot F}$$



$$d = 2 - \frac{2 \cdot W - G}{F}$$

- 1) Fahrzeuge mit nicht ausdrehbaren Fahrwerken ala **Combino** (Multigelenkfahrzeug)
„Ausdrehbarkeit“ von Fahrwerken ca $\pm 1^\circ$



$$d = 2 - \frac{2 \cdot W - G}{F} = 2 - \frac{2 \cdot 5 - 4}{3} = 0$$

$x=2$

- 2) Fahrzeuge ala „**Bremer Straßenbahnfahrzeug**“ GT8N, Avenio
Ausdrehbarkeit von Fahrwerken ca $\pm 5^\circ$



$$d = 2 - \frac{2 \cdot W - G}{F} = 2 - \frac{2 \cdot 4 - 2}{4} = 0,5$$

$x=1,5$

- 3) Fahrzeuge ala **Flexity Classic** NGT8
Ausdrehbarkeit von Fahrwerken ca $\pm 10^\circ$ bis 20°



$$d = 2 - \frac{2 \cdot W - G}{F} = 2 - \frac{2 \cdot 3 - 2}{4} = 1$$

$x=1$

Überprüfung der „Fahrwerkgleichung“ für die Fahrzeuge mit verschiedenen Fahrwerken

$$2 \cdot W - 1 \cdot G = (2 - d) \cdot F \quad \longrightarrow$$

$$d = 2 - \frac{2 \cdot W - G}{F}$$

4) Fahrzeuge mit gemischten Fahrwerken ala **K 4000 - Köln** (Bombardier)

Zwei ausdrehbare Fahrwerke und ein nicht ausdrehbares Fahrwerk.



$$d = 2 - \frac{2 \cdot W - G}{F} = 2 - \frac{2 \cdot 3 - 2}{3} = 0,66$$

$x=1,33$

5) Siemens Fahrzeug **R100 - Düsseldorf**

Zwei ausdrehbare und zwei nicht ausdrehbare Fahrwerke



$$d = 2 - \frac{2 \cdot W - G}{F} = 2 - \frac{2 \cdot 5 - 4}{4} = 0,5$$

$x=1,5$

6) Skoda Fahrzeug **ForCity**

Zwei Standard- und zwei Jacobs- ausdrehbare Fahrwerke



$$d = 2 - \frac{2 \cdot W - G}{F} = 2 - \frac{2 \cdot 3 - 2}{4} = 1$$

$x=1$

Schlussfolgerungen aus der Überprüfung der „Fahrwerkgleichung“

Wenn $d = 1$, dann handelt es sich um ein Fahrzeug mit **ausdrehbaren Fahrwerken (Drehgestellen).**

Wenn $d = 0,5$, dann handelt es sich um ein Fahrzeug mit **bedingt ausdrehbaren Fahrwerken** (wenn alle Fahrwerke gleich sind).

Wenn $d = 0$, dann handelt es sich um ein Fahrzeug mit **nicht ausdrehbaren Fahrwerken** (keine Drehgestelle)

Wenn die Fahrwerke nicht gleich sind und wenn d zwischen 0 und 1 liegt, handelt es sich um ein Fahrzeug der **gemischten Konstruktion** (mit verschiedenen Typen von Fahrwerken) oder um ein statisch unbestimmtes Fahrzeug (s. GT6N).

Für diese Fälle ist es geeignet, eine erweiterte „Fahrwerkgleichung“ zu nützen.

$$2.W = 1.G + 0.K + (2.FF + 1,5.BF + 1.AF + 1.EF + 2.JD)$$

wo

- FF die Zahl von nicht ausdrehbaren (festen) Fahrwerken darstellt
- BF die Zahl von bedingt ausdrehbaren Fahrwerken darstellt
- AF die Zahl von ausdrehbaren Fahrwerken darstellt
- EF die Zahl von Einzelachsfahrwerken darstellt
- JD die Zahl von Jacobdrehgestellen darstellt.

Einige Anwendungsbeispiele der erweiterten „Fahrwerkgleichung“

Grundformel
 $d = 2 - (2 \cdot W - G) / F$

erweiterte „Fahrwerkgleichung“
 $2 \cdot W = 1 \cdot G + 0 \cdot K + (2 \cdot FF + 1,5 \cdot BF + 1 \cdot AF + 1 \cdot EF + 2 \cdot JD)$

Citadis 301 – Orleans



0,66

$$\frac{2 \cdot 3}{6} = \frac{1 \cdot 2 + 0 \cdot K + (2 \cdot 1 + 1,5 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0)}{2 + (2 + 2)}$$

R100 - Düsseldorf



0,5

$$\frac{2 \cdot 5}{10} = \frac{1 \cdot 4 + 0 \cdot 0 + (2 \cdot 2 + 1,5 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0)}{4 + (4 + 2)}$$

NGT6 – Kassel, Rostock



1

$$\frac{2 \cdot 3}{6} = \frac{1 \cdot 2 + 0 \cdot 0 + (2 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 2 + 2 \cdot 0)}{2 + (2 + 2)}$$

ULF - Wien



1

$$\frac{2 \cdot 6}{12} = \frac{1 \cdot 5 + 0 \cdot 0 + (2 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 7 + 2 \cdot 0)}{5 + (7)}$$

2 x T3 - Prag



1

$$\frac{2 \cdot 2}{4} = \frac{1 \cdot 0 + 0 \cdot 1 + (2 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + 1 \cdot 4 + 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0)}{0 + (4)}$$

KT4 - Berlin



0,5

Ergänzte erweiterte „Fahrwerkgleichung“
 $2 \cdot T = 1 \cdot G + 0 \cdot K + 1 \cdot B + (2 \cdot FF + 1,5 \cdot BF + 1 \cdot AF + 1 \cdot EF + 2 \cdot JD)$

$$\frac{2 \cdot 2}{4} = \frac{1 \cdot 1 + 0 \cdot 0 + 1 \cdot 1 + (2 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + 1 \cdot 2 + 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0)}{1 + 1 + (2)}$$

Fahrwerkbindung B

Eine Ausnahme bestätigt die Regel

Die Ausnahme heisst GT6N (Berlin, Nürnberg, Jena, Frankfurt/Oder,)
(dreiteiliges Fahrzeug mit drei bedingt ausdrehbaren Fahrwerken)



Grundformel
 $d = 2 - (2 \cdot W - G) / F$

0,66

erweiterte „Fahrwerkgleichung“
 $2 \cdot W = 1 \cdot G + 0 \cdot K + (2 \cdot FF + 1,5 \cdot BF + 1 \cdot AF + 1 \cdot EF + 2 \cdot JD)$

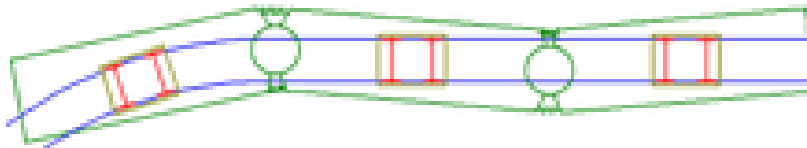
$2 \cdot 3 \neq 1 \cdot 2 + 0 \cdot 0 + (2 \cdot 0 + 1,5 \cdot 3 + 1 \cdot 0 + 1 \cdot 0 + 2 \cdot 0)$
 $6 \neq 2 + (4,5)$

Für bedingt
 ausdrehbare Fahrwerke
 sollte das Resultat **0,5** sein

$6 \neq 6,5$



Erklärung – das Fahrzeug ist statisch überbestimmt = bei der Bogenein/ausfahrt fährt nicht glatt, sondern wie ein Skier



Kinematisch reine Lösungen für das GT6N Fahrzeug

Ein ausdrehbares Fahrwerk + Gelenk



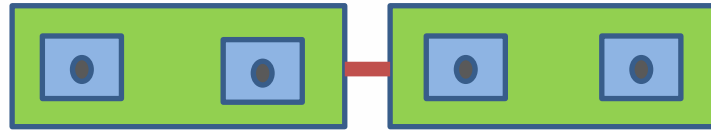
Ein nicht ausdrehbares Fahrwerk + Kupplung



Ein paar Anwendungsbeispiele der Methode

Zwei Wagenteile + **Kupplung** = 4 Freiheitsgrade müssen eliminiert werden

4 Fahrwerke



3 Fahrwerke



2 Fahrwerke



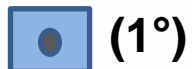
2 Fahrwerke



2 Fahrwerke



2 Fahrwerke



Bindung (1°)



+ eine Bindung

+ eine Bindung

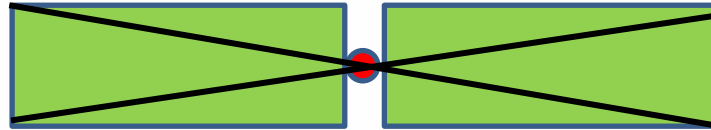
+ zwei Bindungen

Ein paar Anwendungsbeispiele der Methode

Zwei Wagenteile + **ein Gelenk** = 3 Freiheitsgrade müssen eliminiert werden

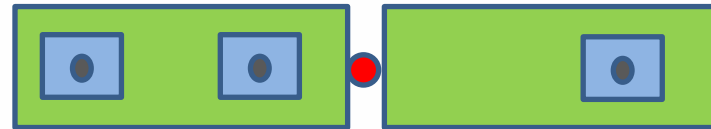


4 Fahrwerke

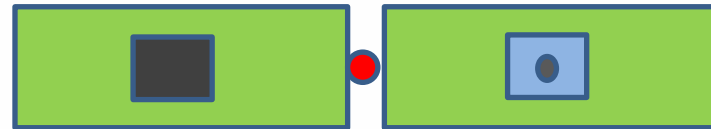


nicht möglich

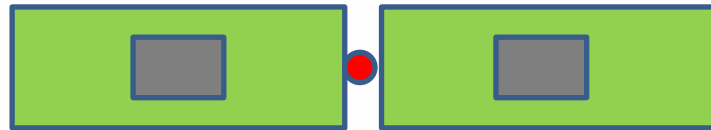
3 Fahrwerke



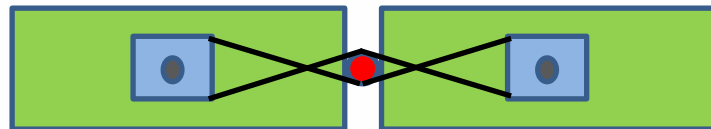
2 Fahrwerke



2 Fahrwerke



2 Fahrwerke

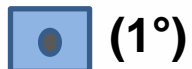


+ eine Bindung

1 Fahrwerk



+ eine Bindung



Bindung (1°)

Einfaches Hilfsmittel für Erkennung der Fahrwerksausdrehbarkeit

oder

**Wieviel Gelenke muss ein Straßenbahnfahrzeug mit zwei zweiachsigen
Fahrwerken haben, damit es durch den engsten Bogen durchfahren kann?**

nötige
Anzahl Gelenke

ausdrehbare Fahrwerke
(Drehgestelle)



0

bedingt ausdrehbare Fahrwerke

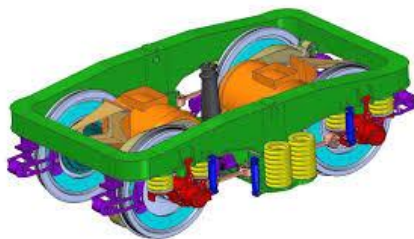


1

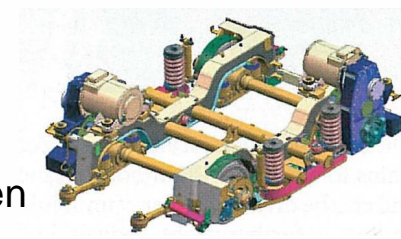
nicht ausdrehbare Fahrwerke
(keine Drehgestelle)



2



Bemerkung: das gleiche Konstruktionsprinzip der Fahrwerksausdrehbarkeit kann für verschiedene Fahrzeuge (z.B. Lokomotive - Straßenbahn) verschiedene Ausdrehbarkeit bedeuten



Aufgrund
des Studiums der Methode
kann ein Entstehen von neuen
Straßenbahnfahrzeugkonzepten
mit besseren Fahreigenschaften
und einfacherer Konstruktion
vorhersagt werden.

Danke für Ihre Aufmerksamkeit

