

# Vorlesung

## Bremstechnik des Hochgeschwindigkeitsverkehr

Pkt 5 Scheibenbremse (Kompendium von Pkt 5.1-5.4)  
Teil 1

*Dr. Dieter Jaenichen*

Dresden, November 2020



### **5. Scheibenbremse**

5.1 Vor- und Nachteile der Scheibenbremse gegenüber Klotzbremsen

5.2 Konstruktiver Aufbau der Scheibenbremse

5.3 Gesamtsystem mit den Anforderungen

5.4 Bremsscheiben-Bauarten

5.5 Betätigungseinrichtungen

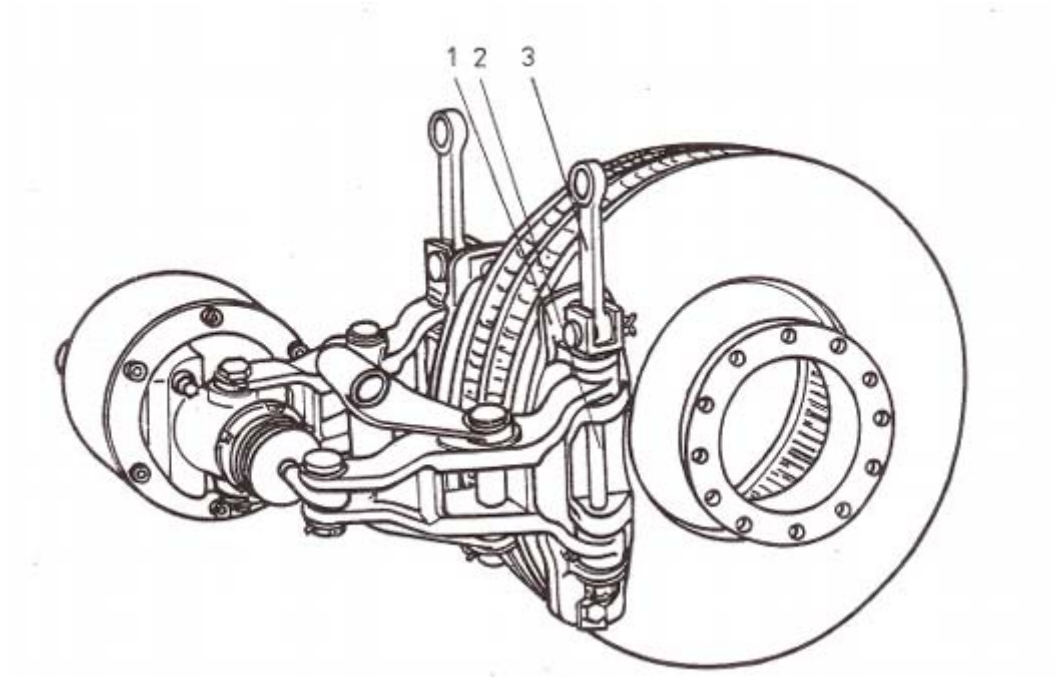
5.6 Bremsbeläge und ihre Reibwerte

5.7 Dimensionierung der Scheibenbremse

5.8 Bremsbelag-Verschleiß



### Aufbau einer Scheibenbremseinheit



**Wellen-Scheibenbremse Bauart Westinghouse, 1 Belaghalter, 2 Gabelbolzen, 3 Hängelaschen**

### Vorteile

- Bessere Ausnutzung der verfügbaren Kraftschlusskraft gegenüber der Klotzbremse mit GG-Bremssohlen
- dadurch kürzere Bremswege, gleichmäßigere Bremsverzögerungen, kein Halteruck, keine zweistufige geschwindigkeitsabhängige Regelung der Anpresskraft aus Gründen des Reibwertverlaufs
- Höhere thermisch-mechanische Leistungsfähigkeit der Scheibenbremse gegenüber Klotzbremse
- Vermeidet thermische Überbeanspruchung der Radlaufflächen, bei bereiften Rädern kein Lösen der Radbandagen
- Höherer Fahrkomfort
- Weniger Bremsgeräusche (Roll- und Bremsgeräusche)
- Keine Riffelbildung auf den Radlaufflächen
- Höherer Belagreibwert
- dadurch kleinere Bremszylinder und Übersetzung des Bremsgestänges, leichteres Bremsgestänge, geringerer Bremsluftverbrauch

### Weitere Vorteile

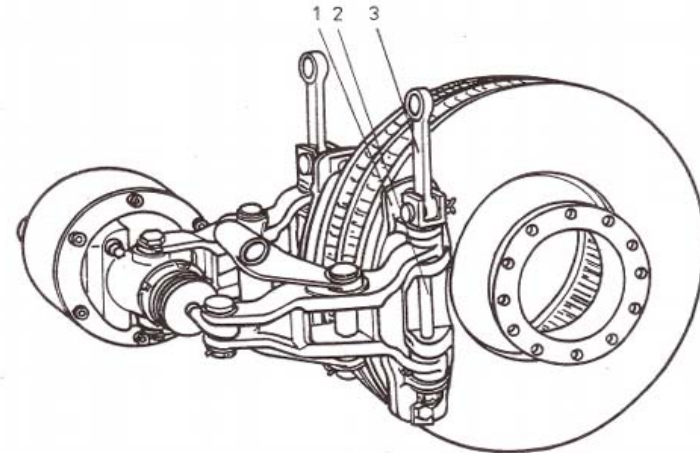
- Geringere Betriebskosten LCC
- Längere Einsatzdauer der Bremsbeläge, leichteres Auswechseln der Beläge , weniger metallischer Bremsstaub
- keine thermischen Radschäden, keine Überschreitung der Vergleichsspannungen

### Nachteile

- Erhöhung der unabgefederten Massen durch zusätzliche
- Abbremsung von rotatorischen Massen (Brems scheiben z. B. 4achsige Diesellokomotive 90t,  $m_R = 13,4$  t, d. h. 15% Erhöhung))
- geringerer Kraftschlusswert und höhere Sensibilität etwa um den Betrag 0,01
- Kleine Flachstellen werden nicht herausgeschliffen
- Geringere Kraftschlusskraft bei Stillstand des Fahrzeugs gegenüber GG-Bremssohlen
- Anschaffungskosten erheblich teurer
- Zusätzlicher Brems scheibenwiderstand durch ständige Ventilation der Brems scheiben (innere Luftwiderstandskraft)
- Feinstaub durch Abriebprodukte der organischen Beläge
- Güterwagen mit 2t/Brems scheibe (Leerzustand) sehr geringe Anpresskräfte und damit mit organischen Belägen i. d. R. sehr hohen Reibwert (spez. Anpresskräfte etwa von ca. 10 N/cm<sup>2</sup>)

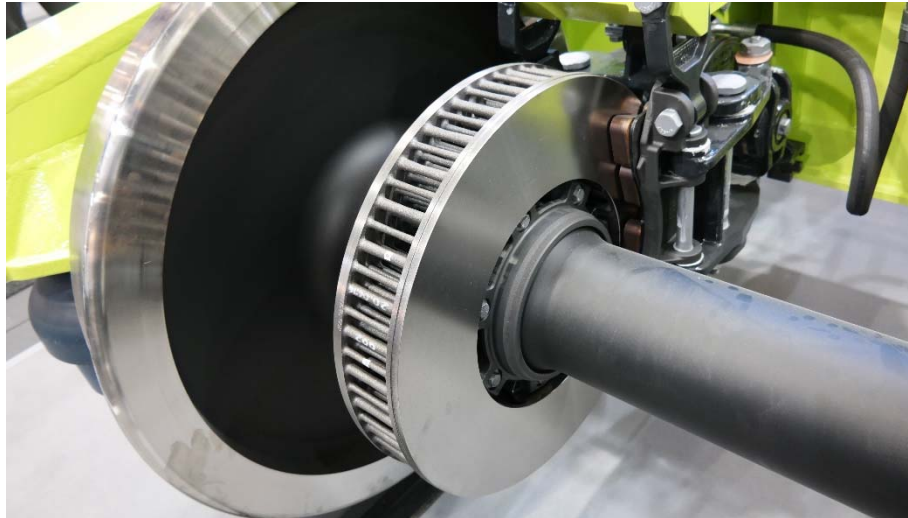
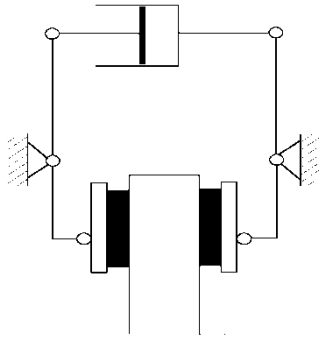
### Aufgaben:

- Erzeugen des Bremsmomente und die Übertragung auf die Radsatz- oder Antriebswelle
- Umwandlung der kinetischer und potentieller Energie in Wärme durch Reibung mit den Bremsbelägen beim Verzögern des Fahrzeugs, etwa 1,2 MW je Radsatz
- Absorption eines Teiles der gesamten kin. und pot. Energie
- Abgabe dieser Energie durch Strahlung, Konvektion und Wärmeleitung

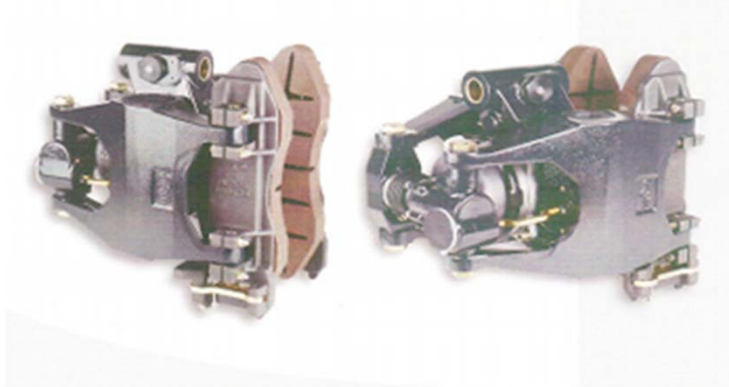


## 5.2 Konstruktiver Aufbau

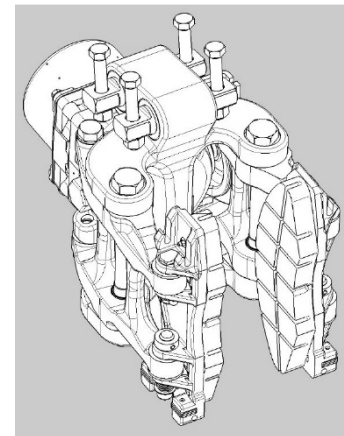
**Wirkprinzip**  
**Scheibenbremse mit zwei Zangenhebeln**



**Wellenbremsscheibe  
mit Bremszange (Bild  
Jaenichen)**



Scheibenbremse Bauart WZK Knorr-Bremse

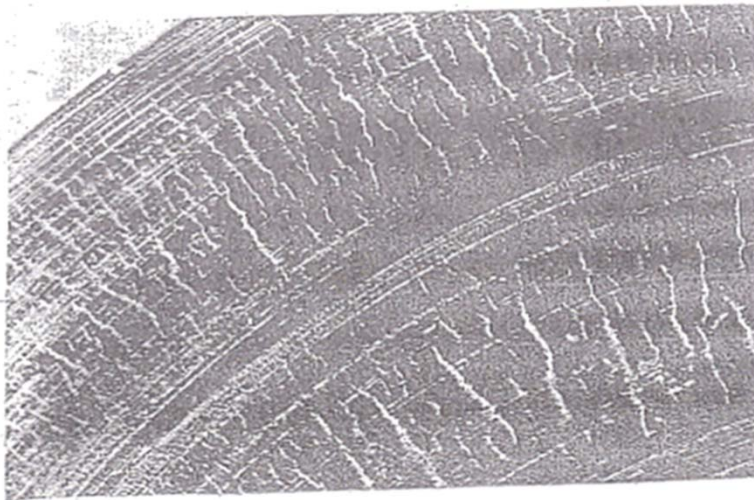


Scheibenbremse Triebzug Talent 2

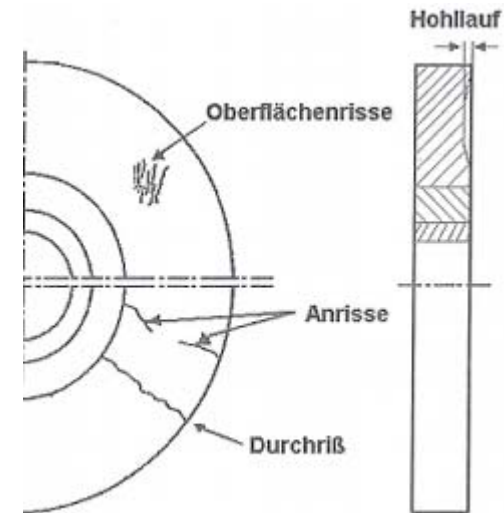
### **Forderungen an die Konstruktion der Bremsscheibe:**

- Bremsscheibe muss ein ausreichendes thermisches Leistungsvermögen besitzen und ausreichend gekühlt werden können.
- Dazu sind das vorkommende Lastkollektiv einschließlich der Beharrungsfahrten im Gefälle und zwei unmittelbar hintereinander folgende Schnellbremsungen mit max. Masse des Fahrzeugs bei Wirken aller kraftschlussabhängigen Bremsen zu berücksichtigen.
- Ausreichende Festigkeit gegen Belastungen aus den Bremskräften und Stoßkräften aus den fahrdynamischen Umgebungsbedingungen der Strecke

### Risse und Hohllauf auf der Bremsscheibe im Betriebseinsatz



*Graugußbremsscheibe mit Wärmerissen*



Risse und Hohllauf auf  
der Bremsscheibe im  
Betriebseinsatz

**Beachte:**

- Risse auf der Reibfläche dürfen nicht länger als 5 mm sein.
- Risse sind mit anerkannten Prüfverfahren festzustellen.
- Bremsscheiben dürfen nur so viel Energie aufnehmen und Wärme abstrahlen, dass die Umgebung nicht thermisch beschädigt wird

### **Einflussfaktoren auf die Gestaltung des Gesamtsystems :**

- Betriebsbedingungen  $v_0$ ,  $m$ ,  $s$ ,  $i$ , Bremshäufigkeit
- Verfügbare Laufwerkskonstruktion (Bauart) mit den Raddurchmessern
- Verfügbare Werkstoffe GG, GS, Al, C für die Bremsscheibe
- Umwandlung der Energie möglichst energiearm bei der Ventilation
- Niedrige LCC, Herstellungskosten
- Kein Schrägverschleiß der Beläge
- Federwege berücksichtigen

### **Anforderungen an den Werkstoff:**

- Hohe Verschleißfestigkeit
- geringe Rißempfindlichkeit (Thermoschock)
- möglichst leicht (Bremsscheiben ca. 1000 kg im Laufdrehgestell, etwa 13 % der Gesamtmasse)
- kostengünstige Bremspaarung

Charakterisierung  
der verwendbaren  
Werkstoffe:

### Vergleich der Bremsscheibenwerkstoffe

Werkstoff-Kennwerte	Fe	GG	Al	$\frac{(\dots)_{Fe}}{(\dots)_{Al}}$
Dichte $\rho$ in $\text{kg/m}^3$	7870	7200	2700	2,91
spez. Wärmekapazität $c$ in $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$	0,465		0,921	0,50
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ in $\text{WK} \cdot \text{m}$	67	42...63	221	0,30
Ausdehnungskoeffizient $\alpha \cdot 10^{-4}$ in $1/\text{K}$	2,51	2,21	4,90	0,51
Schmelztemperatur in $^{\circ}\text{C}$	1530		660	2,32
Schmelzenthalpie in $\text{kJ/kg}$	272,1		355,9	0,76
Siedetemperatur in $^{\circ}\text{C}$	2500		2270	1,10

### Wärmeaufnahmefähigkeit

$$\frac{\rho_{Fe} \cdot c_{Fe}}{\rho_{Al} \cdot c_{Al}} = \frac{7,87 \cdot 0,465}{2,7 \cdot 0,921} = \frac{3,660}{2,487} = 1,47$$

### Temperaturleitfähigkeit

$$a_T = \frac{\lambda}{\rho \cdot c}$$

$$\text{Fe} \quad a_T = \frac{67}{7870 \cdot 0,465 \cdot 1000} = 1,83 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\text{Al} \quad a_T = \frac{221}{2700 \cdot 0,921 \cdot 1000} = 8,89 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\frac{a_{TFe}}{a_{TAl}} = 0,21$$

### **Verwendete Werkstoffe:**

#### **Stahlguß GS**

- Legiert mit Chrom und Molybdän, auch unlegiert
- hohe Festigkeit Monoblock-Bremsscheiben
- Geringe Rißfortpflanzungsgeschwindigkeit
- mit org. Belägen ergeben sich Eiseneinschlüsse, unlegiert mangelnde Verschleißfestigkeit
- im HGV GS legiert mit hoher Oberflächenhärte, dann aber mit Sinterbelägen
- Temp.-Grenze etwa 400°C
- Massebezogene Wärmeenergie 350 kJ/kg, Einsatz bis 400 km/h

#### **Grauguß GG mit Lamellengrafit**

- - Hohe Verschleißfestigkeit
- - keine Eiseneinschlüsse in org. Belägen
- - gute Vergießbarkeit
- - Nachteil: geringe Festigkeit , fehlende Dehnung
- - Max. T. 600 °C, massebez. Wärmeenergie 400 kJ/kg, Einsatz bis 200 km/h

### **Kugelgrafitguß GGG**

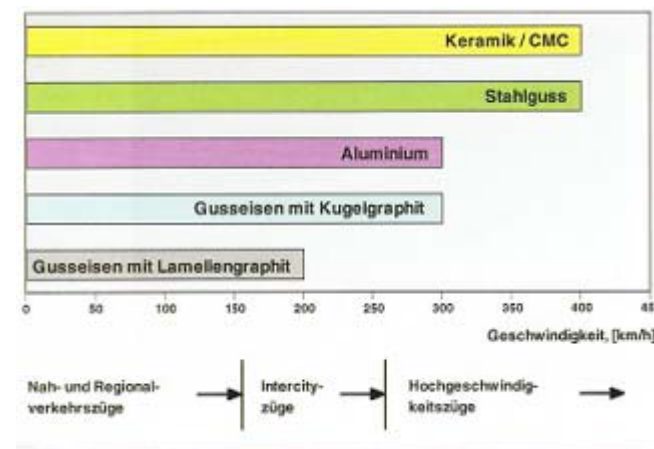
- - Hohe Verschleißfestigkeit wie bei GG
- - Geringere Rißempfindlichkeit u. -fortpflanzungsgeschw. zu GG
- - Nachteil: Wärmeleitfähigkeit gegenüber GG geringer
- - Einsatz bis 300 km/h

### **Ceramik-Bremsscheiben**

- - Scheiben mit einem Silizium-Komposit Werkstoff
- - Sehr hitzebeständig, geringer Verschleiß
- - Nachweis der „Wirtschaftlichkeit“ fehlt
- - steht noch in der Entwicklung
- - Zukunft Carbon-Bremsscheiben
- - Einsatz bis 400 km/h

### Aluminium

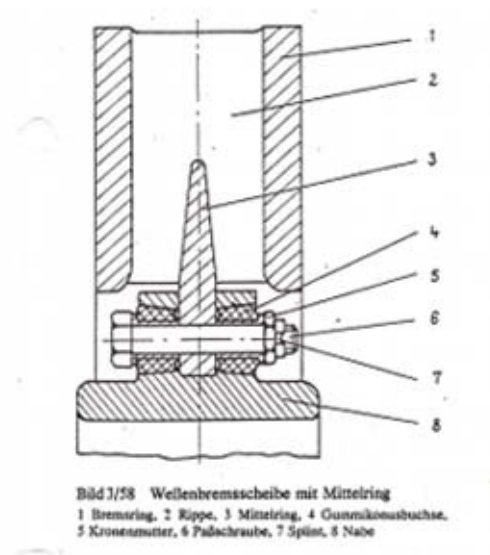
- - hohe Verschleißfestigkeit, 2-5 fache längere Lebensdauer
- - Geringe Dichte, leichter, z. B. 120 kg bei GG , hier 74 kg ; 40-50% geringeres Gewicht
- - Vermeidung von hotspots auf der Scheibe, weniger Wärmerisse
- Hohe Wärmeleitfähigkeit, die Kühlleistung steigt hierdurch um ca 25%
- - geringerer Scheiben- und Belagverschleiß, geräuscharmes Bremsen
- - massebezogene Wärmeenergie 350 kJ/kg, Einsatz bis 300 km/h
- - Bremsarbeit bis 11 MJ;
- Nachteil:
- - etwa doppelte Anschaffungskosten gegenüber GGG
- - temperaturabhängige Werkstofffestigkeit



Anwendungsbereiche (Hochleistungsbremsen ETR 2005, H.1,2)

### Anordnung am Fahrwerk (Wellen-, Rad-, Motor- und Bremswellen- Bremsscheibe)

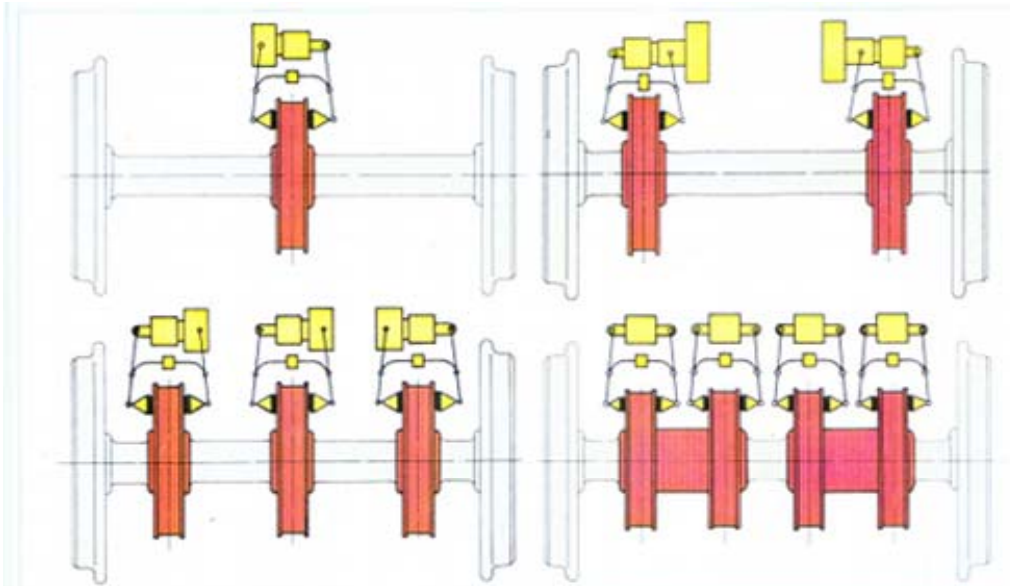
- belüftete oder unbelüftete Bremsscheiben
- geteilte oder ungeteilte sowie segmentierte Bremsscheiben
- mit oder ohne Mittelsteg in den Wellenbremsscheiben



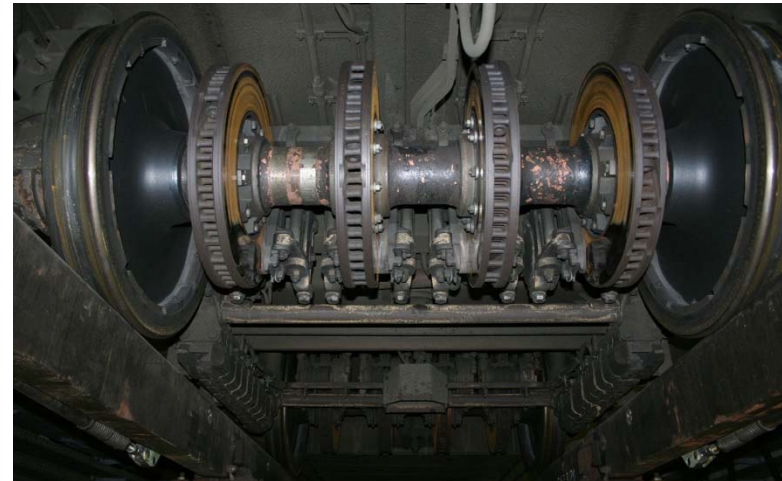
#### Belüftete Wellenbremsscheibe

Bestandteile einer Wellenbremsscheibe

- » Nabe
- » Bremsringe
- » Verbindungselemente

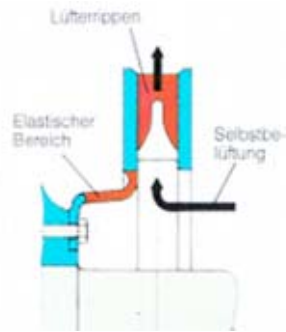


Varianten der Anordnung der Bremsscheiben)

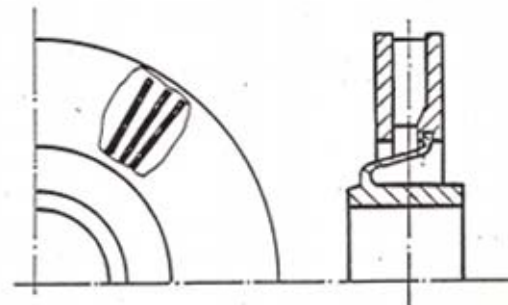


Lauffahrgestell ICE 1 (Foto Jaenichen)

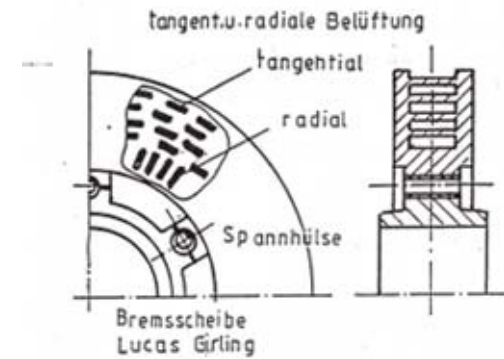
## 5.4 Brems­scheiben-Bauarten



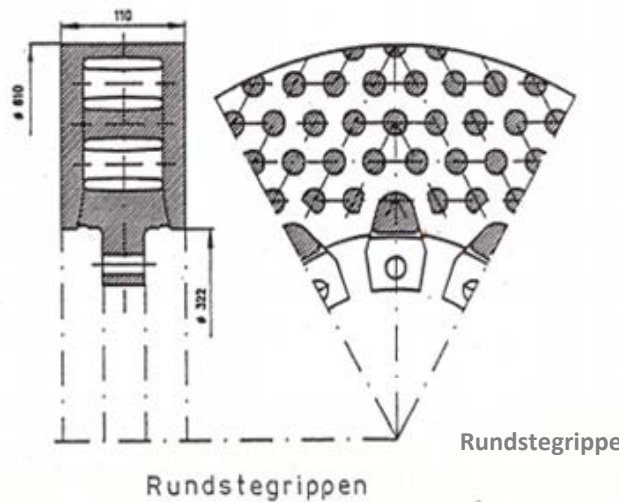
Ausbildung der Luftkanäle



Verbundguß-Bremsscheibe  
Paunt a. Mousson



Bremsscheibe  
Lucas Girling



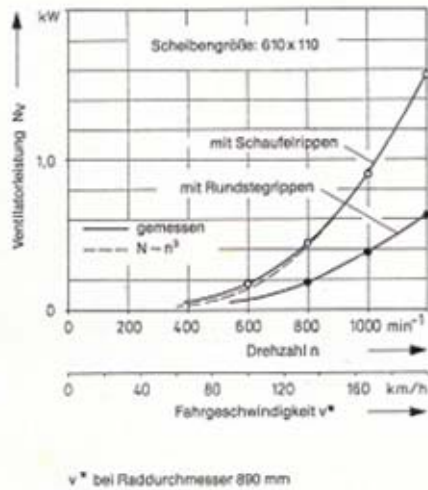
Rundstegrippen



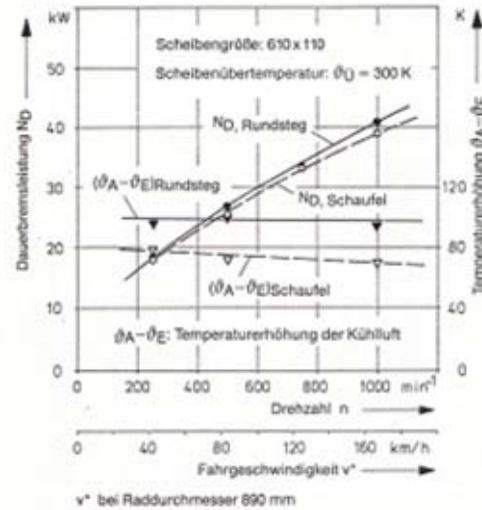
Foto Jaenichen

Rundstegrippen besitzen eine 60% geringere Verlustleistung und 3% höhere Dauerbremsleistung

## 5.4 Bremsscheiben-Bauarten



**Bild 1:** Ventilatorleistung von Rundsteg- und Schaufelrippenscheibe



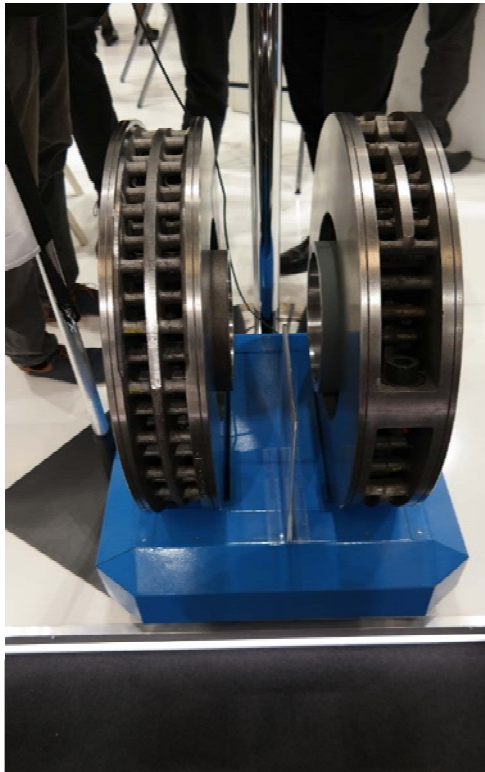
**Bild 2:** Dauerbremsleistung und Kühllufttemperaturerhöhung von Rundsteg- und Schaufelrippenscheibe



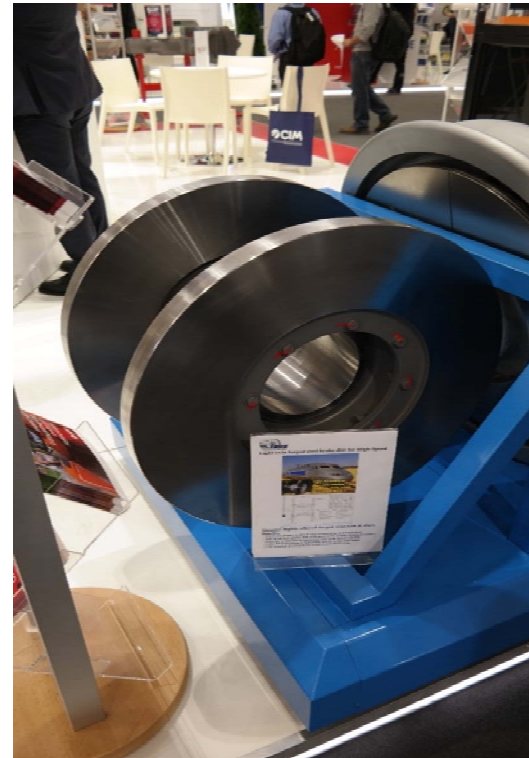
**Segmentierte Bremsscheibe** (Foto jaenichen)

Verlustleistung für Scheibendurchmesser 610 mm bei 200 km/h:  
 Schaufelrippen  $P_v = 1,6$  kW, Rundstegrippen  $P_v = 0,6$  kW

## 5.4 Bremsscheiben-Bauarten



Belüftete Wellenbremsscheibe mit Mittelsteg Foto Jae



Unbelüftete Wellenbremsscheibe Foto Jae  
keine Ventilatorleistung

## Optimierung der Kühlleistung von Bremsscheiben durch Beachtung zweier physikalischer Bedingungen

1. Wärmeübergang zwischen einem festen Körper und einem strömenden Medium
2. Fördervermögen der rotierenden Bremsscheibe

Zu 1. Wärmestrom  $\varphi_m$

$$\varphi_m = \alpha_m \cdot A \cdot (\vartheta_W - \vartheta_A)$$

$\alpha_m$  - mittlerer Wärmeübergangskoeffizient

A - vom Kühlmittel umströmte Oberfläche

$\vartheta_W$  - Oberflächentemperatur des Körpers

$\vartheta_A$  - Ausgangstemperatur des strömenden Mediums

Zu 2. Förderleistung P

- Annahme Radialgebläse
- Massedurchsatz  $\dot{m} \sim \omega$  proportional der Winkelgeschwindigkeit
- Antriebsleistung des Lüfters  $P \sim \omega^3 \sim \dot{m}^3$

**Zusammenhang zwischen Kühl- und Ventilator-Leistung**

Innere Energie der durchgesetzten Luft

$$\varphi_L = m * c * (\vartheta_A - \vartheta_E)$$

$c$  – spezifische Wärmekapazität des Kühlmediums

$\vartheta_E$  – mittlere Temperatur des eintretenden Mediums

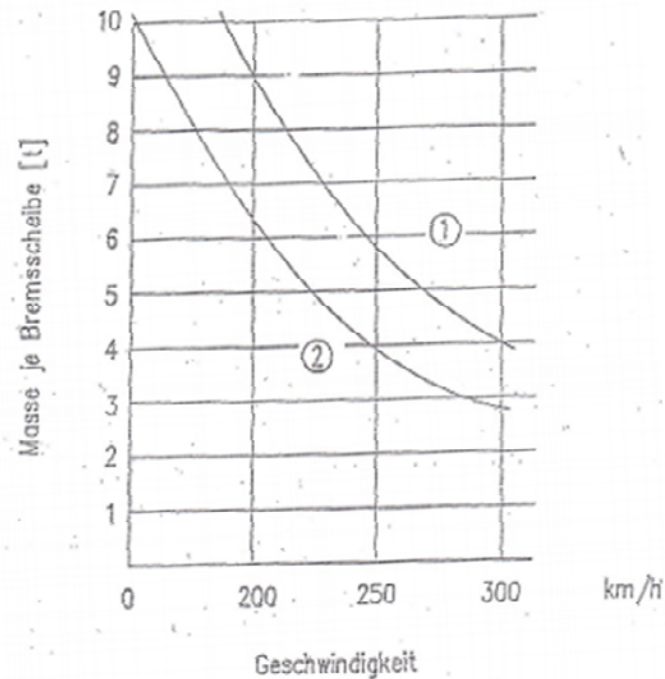
$\vartheta_A$  – mittlere Temperatur des ausströmenden Mediums

Mit  $m = \sqrt[3]{P}$  wird  $\varphi_L \sim \sqrt[3]{P} (\vartheta_A - \vartheta_E)$

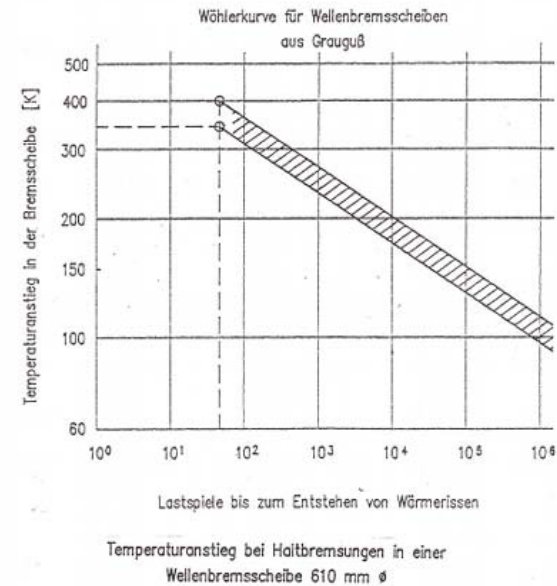
**Ergebnis:**

Bremsscheibe mit reduzierter Ventilatorleistung  $P$  und bei gleicher Kühlleistung ist nur dann zu realisieren, wenn die Kühlluft beim Durchströmen des Scheibenkanals stärker aufgeheizt wird; d. h. die Differenz zwischen  $\vartheta_A$  und  $\vartheta_E$  größer wird.

### Leistungsgrenzen der Wellenbremsscheibe



- ① Stahlgußbremsscheibe mit Sintermetallbremsbelägen
- ② Graugußbremsscheibe mit Verbundstoffbremsbelägen



## Berechnung des Außendurchmessers der Wellenbremsscheibe

$D_{\text{Außen}}$

$D_{\text{Außen}} = f(\text{Fahrzeugbegrenzungslinie, Raddurchmessers})$

Bodenfreiheit bei unabgedeckten Massen Reiszugwagen

über Ablaufberg  $a = 125 \text{ mm}$

$$D_{\text{Außen}} = (D_{\text{Rad}}/2 - a) \cdot 2 = (860/2 - 125) \cdot 2 = 610 \text{ mm}$$

Außendurchmesser der Wellenbremsscheiben 500, 560, 590, 610, 640, und 660 mm

Dicke belüftet 130,110,90,80 mm

Dicke unbelüftet 45 mm

Rauhigkeit der Reibflächen  $R_z = 16 \text{ } \mu\text{m}$

### Radbremsscheiben Fotos Jaenichen



Radbremsscheibe BR 101

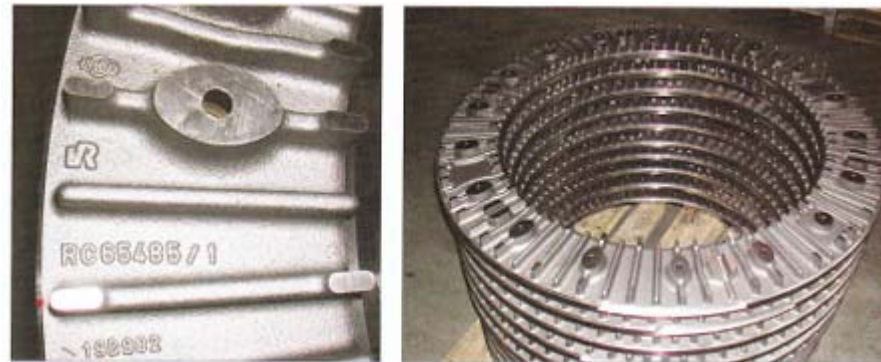
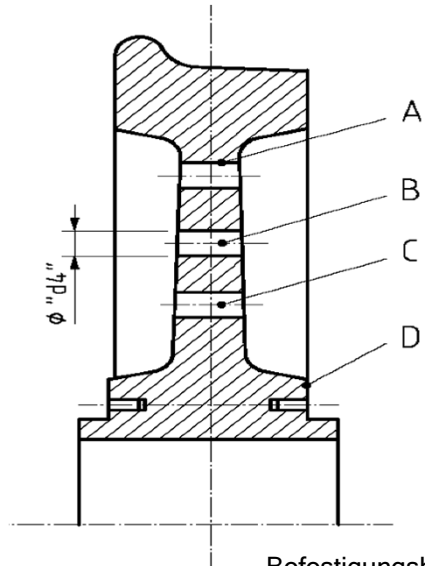


segmentierte Radbremsscheiben der Firma IBRE mit Montage



## 5.4 Bremsscheiben-Bauarten

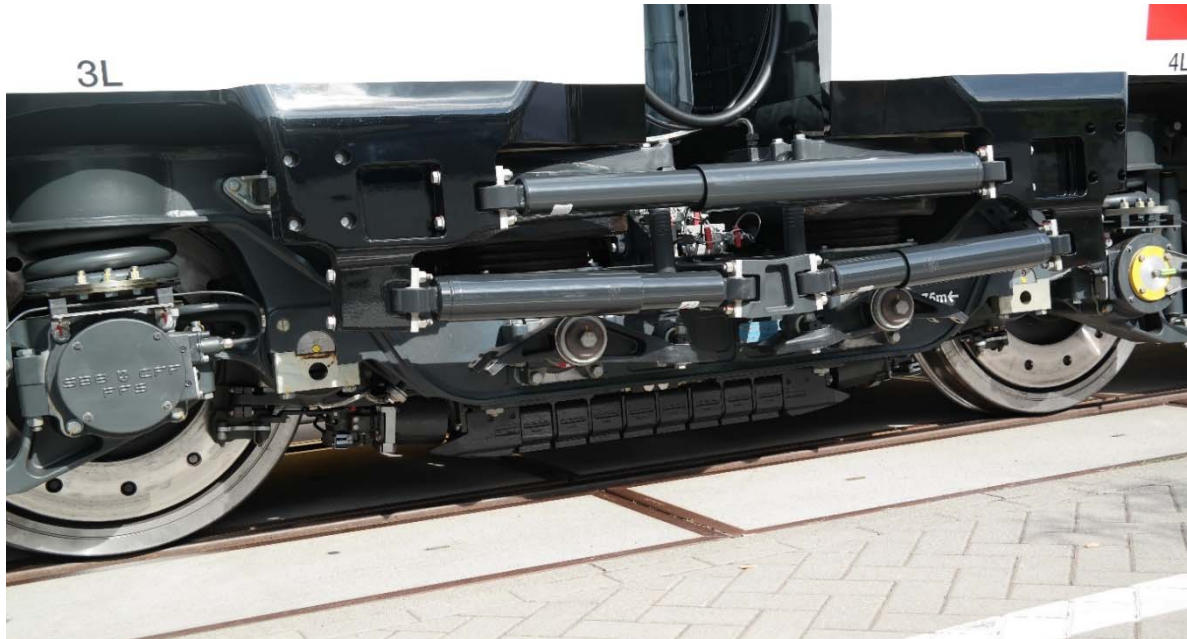
- Verwendung bei angetriebenen Radsätzen,
- bei fehlenden Einbauräumen
- unterschiedliche Befestigungsmöglichkeiten am Rad
- (Nabenbefestigung, Passschrauben, Spannhülsen)
- Belüftung radial
- Bremsringe sind untereinander nicht verbunden
- Zusätzliche Löcher in den Bremsringen



*Radbremsscheibe für BR 185 (Rechsteiner: Hochleistungsbremsen, ETR, 2005, H. 1/2) Fertiggewicht 92 kg*

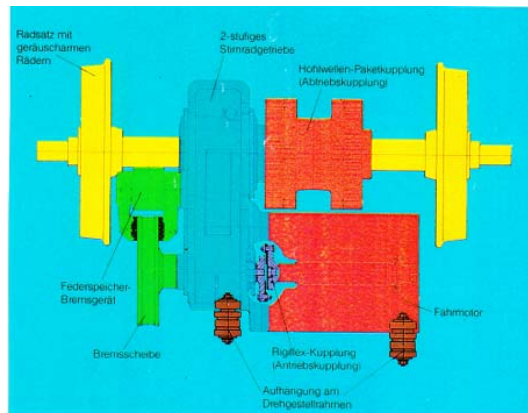
Befestigungsbereiche nach DIN EN 14535-2 (Bremsscheiben für Schienenfahrzeuge)

## 5.4 Bremsscheiben-Bauarten

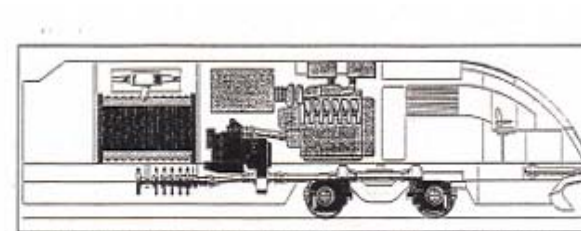


Radbremsscheiben HGV  
Schweiz  
Foto Jaenichen

### Motorwellen – und Bremswellen-Bremsscheibe



**Motor-Wellen** Bremsscheibe



Innovative arrangement of the traction and braking equipment in the power car.

**Bremswellen-Bremsscheibe**

#### **Vorteile:**

- Verwendung von ungeteilten Wellenbremsscheiben, einfacher Tausch der Bremsscheiben unter dem Fahrzeug
- konstante geometrische Zuordnung von Scheiben zu Belägen
- Keine unabgefederten Massen
- Bremswelle und Motorwelle sind tauschbar

#### **Herstellung und Prüfung von Bremsscheiben DIN EN 14535**

Bahnanwendungen – Bremsscheiben für Schienenfahrzeuge

Teil 1: Wellenbremsscheiben, aufgespresst oder geschrumpft, Abmessungen und Qualitätsanforderungen

Teil 2: Bremsscheiben, die an einem Rad befestigt werden, Abmessungen und Qualitätsanforderungen;

Teil 3: Bremsscheiben, Leistung der Bremsscheibe und der Reibpaarung, Klassifikation

## Dieter Jaenichen

- Tel.: +49 (0)351 463 36583
- Email : [dieter.jaenichen@tu-dresden.de](mailto:dieter.jaenichen@tu-dresden.de)



**»Wissen schafft Brücken.«**