



Next Generation Train

AP 5500





Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.

Institut für Bauweisen- und Konstruktionsforschung

Pfaffenwaldring 38-40

D-70569 Stuttgart, GERMANY

Tel +49 (0)711/6862-8046

Fax +49 (0)711/6862-227

Name

Tel

Fax

E-Mail

Titel		Keramische Bremsscheibe
Thema MS		
Schlüsselwörter		
Zugänglichkeit		DLR; NGT beteiligte Institute
Autor		Christian Zuber, Marius Kütemeyer
Mit Beiträgen von		
Version	Kommentar	Datum
2.0		29.03.2011
Dateiname		
Zuletzt gespeichert von		Marius Kütemeyer
Zuletzt gespeichert am		
NFS-PL: Geprüft durch:		
Unterschrift:		
FK: Freigegeben durch:		
Unterschrift:		
Gedruckt am		

Inhalt

1	Einleitung	4
2	Arbeitspaket	5
3	Bremskonzept	6
4	Anforderungen an keramische Bremssysteme	7
4.1	Wärmeaufnahme - Umsetzung der hohen kinetischen Energien	7
4.2	Bauraum und Anbindung der Bremsscheibe	9
4.3	Senkung des Gesamtenergieverbrauchs des Zuges	9
4.4	Kosten des Bremssystems.....	10
5	Definition des keramischen Bremssystems	12
6	Zusammenfassung	16

1 Einleitung

Seit den späten 80er Jahren werden am Institut für Bauweisen und Konstruktionsforschung des DLR Ceramic Matrix Composite (CMC) Materialien und Strukturbauteile entwickelt. Diese sogenannten C/C-SiC Materialien werden mit dem kosteneffizienten Liquid Silicon Infiltration Prozess (LSI) hergestellt, der ebenfalls am DLR entwickelt wurde. C/C-SiC Werkstoffe sind durch eine extreme thermische Stabilität und Thermoschockbeständigkeit sowie ein quasi duktilen Bruchverhalten und eine geringe spezifische Dichte charakterisiert. Typische Anwendungen sind Leichtbaustrukturen für Thermalschutzsysteme wieder verwendbarer Raumfahrzeuge, ausdehnungsarme Teleskopstrukturen und Hochleistungs-Leichtbaubremsen.

C/C-SiC bietet sich aufgrund seiner hohen spezifischen Festigkeit, der Thermoschockbeständigkeit, dem konstanten Reibkoeffizienten und dem geringen Verschleiß, sowie der Möglichkeit diese Werte in einem großen Bereich zu variieren, für Hochleistungsleichtbaubremsenanwendungen an. Die C/C-SiC Faserkeramik ist ein Mehrphasenkomposit bestehend aus Kohlefasern, Kohlenstoff- und SiC-Matrix, sowie einem kleinen Anteil von freiem Silizium.

Am DLR ist die vollständige Prozesskette zur Entwicklung von CMC Strukturen, inklusive Werkstoff- und Prozessentwicklung, Konstruktion und Berechnung, Analyse, Prototypenfertigung ($l_{\max} = 900$ mm) und Qualitätssicherung vorhanden. Für letzteres werden unterschiedliche Methoden zur zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfung eingesetzt, unter anderem stehen dazu zwei moderne Computertomographen zur Verfügung.

2 Arbeitspaket

Der „Next Generation Train“ ist ein Hochgeschwindigkeitszug, der auf eine Höchstgeschwindigkeit von 400 km/h im Alltagsbetrieb ausgelegt ist. Bezogen auf den einzelnen Sitzplatz wird bei einer Fahrgeschwindigkeit von 300 km/h eine 50%-Reduktion des Energieverbrauchs gegenüber dem ICE3 angestrebt. Für die Zulassungsfahrten des NGT sind Maximalgeschwindigkeiten von bis zu 440 km/h geplant. Um die hierbei auftretende kinetische Energie im Fall einer Notbremsung umzusetzen, sind neuartige Hochleistungsbremssysteme notwendig. Bisher eingesetzte, metallische Bremsscheiben und organische/sintermetallische Reibbeläge gelangen dabei an ihre Einsatzgrenzen, bzw. können diese überschreiten. Keramische Verbundwerkstoffe bieten hier die Möglichkeit, wesentlich höhere Bremsenergien aufzunehmen, bei gleichzeitiger, deutlicher Reduzierung des Gewichts und der ungefederten Massen.

Hauptaugenmerke liegen dabei auf:

- der Umsetzung der hohen kinetischen Energien durch den Einsatz keramischer Werkstoffe
- der Möglichkeit zur günstigen Serienfertigung
- der Gewichtsreduktion als Beitrag zu den angestrebten 50%-Reduktion des Energieverbrauchs
- niedrige life cycle costs durch geringen Bremsscheibenverschleiß

Arbeitsschritte:

1. Betrachtung der physikalischen Randbedingungen wie Energieeintrag, mechanische Lasten, etc. Unterschiedliche Bauweisen- und Fertigungskonzepte werden in Absprache mit den Projektpartnern untersucht. Der Focus liegt dabei auf:
 - o werkstoffgerechten Anbindungskonzepte
 - o günstiger Serienfertigung / niedrige life cycle costs
 - o Gewichtsreduktion
 - o Hybrider Bauweise (Kurzfasern / Gewebe sowie Keramik / Metall)
 - o hoher Wärmeaufnahme
2. Definition des keramischen Bremssystems

3 Bremskonzept

Basierend auf den Ergebnissen des AP1411 wird im AP5500 das Konzept einer Kombination aus:

- rekuperativer generatorischer Bremse
- linearer Wirbelstrombremse
- aerodynamische Bremsen
- keramischer Bremscheibe in Verbindung mit radintegrierten Antriebsmotoren

verfolgt.

Die rekuperative generatorische Bremse übernimmt im Zusammenspiel mit der linearen Wirbelstrombremse und der aerodynamische Bremsen die Aufgabe der Betriebsbremsung.

Zur Vermeidung unerwünschter Stützmomente ist vorgesehen, den Einsatz der Wirbelstrombremse auf die Drehgestelle (= Fahrwerk mit zwei Radpaaren) der Endwagen zu beschränken. Die Montage einer Wirbelstrombremse in einem Fahrwerk mit nur einem Radpaar würde zur Induzierung unerwünschter Stützmomente führen. Die zur Aktivierung der linearen Wirbelstrombremse benötigte Energie ist vorzugsweise von der generatorischen Bremse zu beziehen, als Backupversorgung werden Akkumulatoren favorisiert.

Das hier vorgestellte Bremskonzept sieht vor, dass die im Bereich der radintegrierten Antriebsmotoren integrierten keramischen Bremscheiben den Anteil der zur Schnellbremsung notwendigen Bremsleistung erbringen, der nicht durch generatorische Bremse in Kombination mit der linearen Wirbelstrombremse abgedeckt werden kann.

Des Weiteren ist vorgesehen, dass die keramischen Bremscheiben die Funktion der Feststellbremse bei einem Maximalgefälle von 35‰ übernimmt.

Das hier definierte Bremskonzept erfüllt die in den „Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität“ (TSI) geforderten „fail-safe“ Eigenschaften für Bremssysteme. Dies wird durch die hohen Leistungsreserven der keramischen Bremscheiben sichergestellt. Die faserverstärkten Keramikbremscheiben sind in der Lage, als singuläres Bremssystem ca. 81% der kinetischen Energie des NGT während einer Schnellbremsung umzusetzen, wenn diese bei einer Spitzengeschwindigkeit von 440 km/h eingeleitet wird. Beim skizzierten Bremskonzept wird davon ausgegangen, dass es aus technischer Sicht ausgeschlossen ist, dass alle 48 generatorischen Bremsen, die grundsätzlich unabhängig voneinander operieren, ausfallen.

4 Anforderungen an keramische Bremssysteme

Wärmeaufnahme - Umsetzung der hohen kinetischen Energien

Der NGT-Zuges hat bei seiner Höchstgeschwindigkeit von 440 km/h in erster Näherung eine kinetische Energie von:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m_{Zug\ ges} \cdot v_{max}^2 = \frac{1}{2} \cdot 384 \cdot 10^3\ kg \cdot \left(\frac{440\ m}{3,6\ s} \right)^2 = \underline{\underline{2,87 \cdot 10^9\ J}}$$

E_{kin} Kinetische Energie NGT-Halbzug

$m_{Zug\ ges}$ Gesamtmasse NGT-Halbzug

v_{max} Maximalgeschwindigkeit

Während einer Schnellbremsung die per se weder verschleißfrei noch rekuperativ ablaufen muss, können wie im Folgenden dargestellt, aufgrund der hohen spezifischen Wärmekapazität von C/C-SiC ($c = 1400\ J/kg \cdot K$), große Teile der kinetischen Energie des Zuges, in Form von Wärme in den Brems scheiben zwischengespeichert werden.

Thermische Energie:

$$m_{ges} = V_{ges} \cdot \rho = n \cdot \pi \cdot (r_a^2 - r_i^2) \cdot d \cdot \rho$$

$$Q = c \cdot m_{ges} \cdot (T_{Bremsbeginn} - T_{Bremsende})$$

Q Thermische Energie

c Spezifische Wärmekapazität C/C-SiC

m_{ges} Gesamtmasse Brems scheiben bzw. Trägerscheiben

V_{ges} Gesamtvolumen

ρ Dichte

r_a	Scheibenradius (außen)
r_i	Scheibenradius (innen)
d	Bremsscheibendicke
$T_{\text{Bremsbeginn}}$	Temperatur Bremsscheibe vor der Bremsung
$T_{\text{Bremsende}}$	Temperatur Bremsscheibe nach der Bremsung

Thermische Energie aufgenommen durch C/C-SiC Keramik:

$$m_{\text{ges C/C-SiC}} = 48 \cdot \pi \cdot (39,3^2 - 30,1^2) \text{ cm}^2 \cdot 3,0 \text{ cm} \cdot 1,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \underline{\underline{547,96 \text{ kg}}}$$

$$Q_{\text{C/C-SiC}} = 1400 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 547,96 \text{ kg} \cdot (900 \text{ }^\circ\text{C} - 100 \text{ }^\circ\text{C}) = \underline{\underline{6,14 \cdot 10^8 \text{ J}}}$$

Thermische Energie aufgenommen durch Trägerscheibe (Stahl):

$$m_{\text{ges Stahl}} = 48 \cdot \pi \cdot (39,3^2 - 16^2) \text{ cm}^2 \cdot 2,2 \text{ cm} \cdot 7,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \underline{\underline{3381,49 \text{ kg}}}$$

$$Q_{\text{Stahl}} = 500 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 3381,49 \text{ kg} \cdot (900 \text{ }^\circ\text{C} - 100 \text{ }^\circ\text{C}) = \underline{\underline{1,35 \cdot 10^9 \text{ J}}}$$

Gesamte aufgenommene thermische Energie:

$$Q_{\text{ges}} = Q_{\text{C/C-SiC}} + Q_{\text{Stahl}} = 6,14 \cdot 10^8 \text{ J} + 1,35 \cdot 10^9 \text{ J} = \underline{\underline{1,97 \cdot 10^9 \text{ J}}}$$

Anteil der durch die keramischen Bremsscheiben aufgenommenen kinetischen Energie:

$$E_{\text{kin}} = \frac{100}{E_{\text{kin}}} \cdot Q_{\text{ges}} = \frac{100}{2,87 \cdot 10^9 \text{ J}} \cdot 1,97 \cdot 10^9 \text{ J} = \underline{\underline{68,5 \%}}$$

Bauraum und Anbindung der Bremscheibe

Der Bauraum der Bremscheibe wird maßgeblich vom Lichtraum unterhalb des Zuges beeinflusst. Zudem wird dieser durch den Primärfederweg und den Radverschleiß beeinträchtigt. Der maximale Durchmesser für die Bremscheibe wird hauptsächlich durch die Bremscheibendicke (5,2cm) in Verbindung mit dem nach außen reduzierten Bauraum begrenzt (siehe Abbildung 1). Dabei muss von der Bremscheibe noch genügend kinetische Energie in Form von Wärme aufgenommen werden. Um die Bremskraft übertragen zu können, muss die Reibfläche bei geringerem Durchmesser in Umfangrichtung vergrößert werden. Eventuell lässt sich der Motor noch weiter nach innen versetzen, was sich positiv auf den maximalen Bremscheibendurchmesser auswirken würde. Dadurch wäre es wiederum möglich mehr kinetische Energie während des Bremsvorgangs durch die Bremscheibe auf zu nehmen. Nach außen ist über der Achse genügend Raum für den Bremsattel vorhanden, allerdings ist auf der Innenseite der Platz durch den Motor beschränkt und somit der Einsatz eines Faustsattels erforderlich.

Angebunden wird die Bremscheibe über Bolzen an den Wellensitz. Bei einer Bremskraft von 565,04kN (NGT AP 1411) ergibt sich ein Drehmoment von 32,8kNm pro Bremscheibe. Hierfür ist eine Anbindung mit zehn 10mm Ø Bolzen ausreichend.

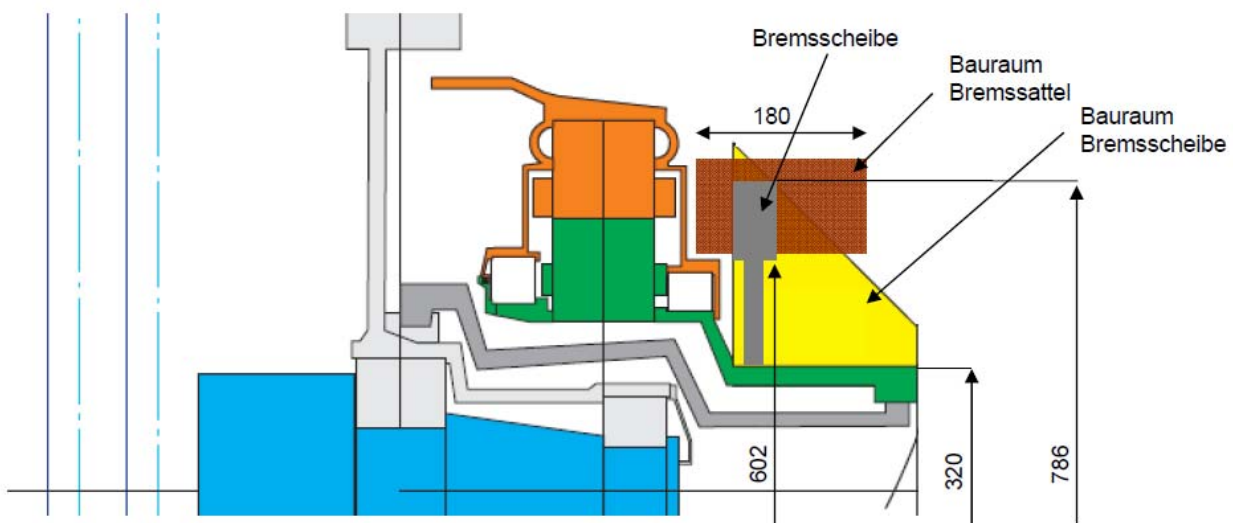


Abbildung 1 Verfügbarer Bauraum der Bremscheibe

Senkung des Gesamtenergieverbrauchs des Zuges

Eine weitere Anforderung an das Bremssystem des NGT ist ein gewisser Beitrag zur angestrebten Reduktion des Gesamtenergieverbrauchs um 50%.

Dieser Beitrag erfolgt zunächst einmal durch eine deutliche Gewichtsreduktion. Würde man die hybrid aufgebauten Brems scheiben durch massive Stahlbrems scheibe substituieren, würde dies eine Massenzunahme von etwa 1580 kg für den Zug bedeuten.

Bei der im Rahmen des AP5500 konzeptionieren Hybridbrems scheibe handelt es grundsätzlich um eine massive Brems scheibe. Durch den Einsatz der Faserkeramik im Bereich der Friktionsflächen kann auf die ansonsten übliche Innenbelüftung, wie sie exemplarisch in Abbildung 2 dargestellt ist, verzichtet werden. Es lässt sich an dieser Stelle leicht nachvollziehen, dass bei einer vergleichsweise dünnen, massiven Brems scheibe der zu erwartende Luftwiderstand signifikant unter dem der innenbelüfteten Stahlbrems scheibe liegt.



Abbildung 2 Innenbelüftete Brems scheibe des Oberleitungstriebwagens Baureihe 711.1

Kosten des Bremssystems

Voraussetzung für die Einführung der keramischen Brems scheibe sind neben der reinen Friktionsperformance auch konkurrenzfähige Life Cycle Costs.

Einen wesentlichen Anteil dieser über den Lebenszyklus des Bremssystems akkumulierten Kosten verursachen die Anschaffungskosten. Um diese so niedrig wie möglich zu halten, wurde ein hybrides System (Abbildung 3), bestehend aus einer metallischen Trägerscheibe und einem beidseitig angebrachten segmentierten, faserkeramischen Reibbelag gewählt (Abbildung 4). Als Verstärkungsfaser der Keramik sind Kurzfasern vorgesehen. Diese erlauben eine vergleichsweise günstige, industrialisierbare Herstellung der near net shape Grünkörper via Warmpresstechnik. Ein weiter Vorteil der Warmpresstechnik liegt in der Möglichkeit, die einzelnen Friktionselemente bereits während der Herstellung des CFK-Grünkörpers, im Bereich der Friktionsfläche kostengünstig mit einer Reibschicht auszustatten.

Ein weiter, die Life Cycle Costs bestimmender Aspekt, ist die Wartbarkeit des Systems. Durch die segmentierte Bauweise ist es möglich, die grundsätzlich dem Verschleiß unterworfenen Reibsegmente auszutauschen, ohne hierzu die metallische Trägerscheibe demontieren zu müssen.

Ausgehend von der Tatsache, dass die keramische Bremsscheibe im PKW-Bereich als Lebensdauerbremse mit einer Lebenserwartung von etwa 300.000 km ausgelegt ist und dem Umstand, dass der Scheibenbremse des NGT nur eine unterstützende Rolle der verschleißfrei arbeitende generatorische Bremse während der Schnellbremsung zukommt, ist auch hier von einer Lebenserwartung auszugehen, die die konventionellen innenbelüfteten Stahlbremsscheiben deutlich übersteigt.

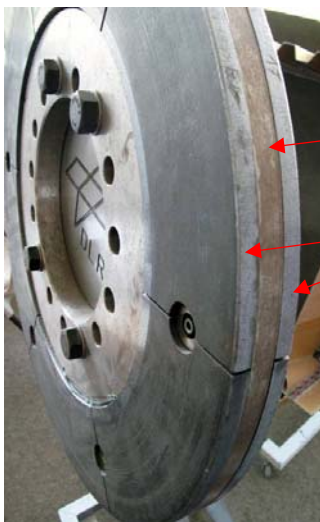
Zusammengefasst sind somit folgende Aspekte kostenrelevant:

- Hybride Bauweise
 - Wartungsfreundlichkeit
- Segmentierte Bauweise
 - Günstig Herstellung vergleichsweise kleiner Keramikkomponenten
 - Möglichkeit zum Ersatz von Teilkomponenten
- Verschleißbeständigkeit
 - Ziel: Lebensdauerbremse

5 Definition des keramischen Bremssystems

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, ist die keramische Bremsscheibe hybrid, bestehend aus einer metallischen Trägerstruktur und einem keramischen Reibbelag, konzeptioniert (Abbildung 3). Für den keramischen Reibbelag wurde eine segmentierte Bauweise gewählt (Abbildung 4).

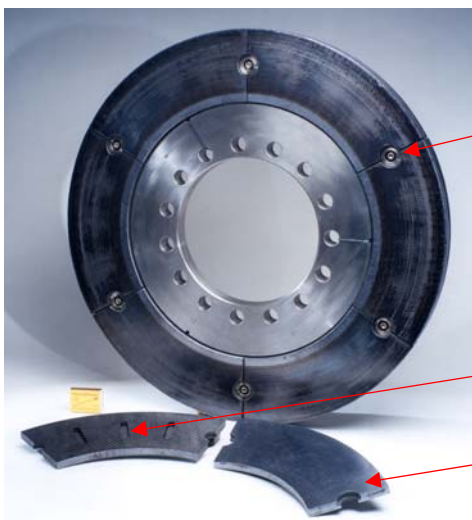
Bei der konstruktiven Kombination von faserverstärkter Keramik und Metall muss grundsätzlich das Problem der stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten beider Werkstoffe gelöst werden. Die kurzfaserverstärkte C/C-SiC Keramik in XB Qualität hat in der Bauteilebene einen Ausdehnungskoeffizienten (CTE) von näherungsweise $\alpha_{C/C-SiC} = 3,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$. Dem gegenüber steht ein Ausdehnungskoeffizient von etwa $\alpha_{St52-3} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ für Stahl (St52-3).



16 mm Trägerscheibe (St52-3)

2 mal 12 mm C/C-SiC Bremsscheibe in segmentierter Bauweise

Abbildung 3 Keramische Bremsscheibe in hybrider Bauweise



Element zur axialen Fixierung der keramischen Reibbeläge

Nut zur tangentialen Fixierung des Reibbelags

Keramischer Reibbelag

Abbildung 4 Keramische Bremscheibe in segmentierter Bauweise

Die axiale Fixierung (siehe Abbildung 5) der keramischen Reibelemente befindet sich im Erstentwurf auf einem Lochkreisdurchmesser mit $D = 695 \text{ mm}$. Wenn vereinfachend von einer gleichmäßigen Erwärmung der gesamten Bremscheibe (Stahl- und Keramikkomponenten) auf maximal 900 °C während der Schnellbremsung ausgegangen wird, führt der α -mismatch (Differenz der Ausdehnungskoeffizienten) zu einer Durchmesserdifferenz zwischen dem Lochkreis der metallischen Trägerplatte und dem der keramischen Reibelemente von etwa $6,4 \text{ mm}$. Hieraus wird deutlich, dass eine keramikgerechte Konstruktion der Bremscheibe unabdingbar ist.

Berechnung der durch das α -mismatch bedingten Durchmesserdifferenz:

$$\Delta D = (T_{\max} - T_{\text{normal}}) \cdot (\alpha_{\text{ST52-3}} - \alpha_{\text{C/C-SiC}}) \cdot D$$

$$D \quad \text{Durchmesser } (900 \text{ °C} - 20 \text{ °C}) \cdot (14 \cdot 10^{-6} - 3,5 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{K}} \cdot 695 \text{ mm} = \underline{\underline{6,4 \text{ mm}}}$$

$\alpha_{\text{C/C-SiC}}$ Thermischer Ausdehnungskoeffizient von C/C-SiC

$\alpha_{\text{ST52-3}}$ Thermischer Ausdehnungskoeffizient von ST52-3

T_{\max} Maximaltemperatur

T_{normal} Temperatur unter Normalbedingungen (vor Schnellbremsung)

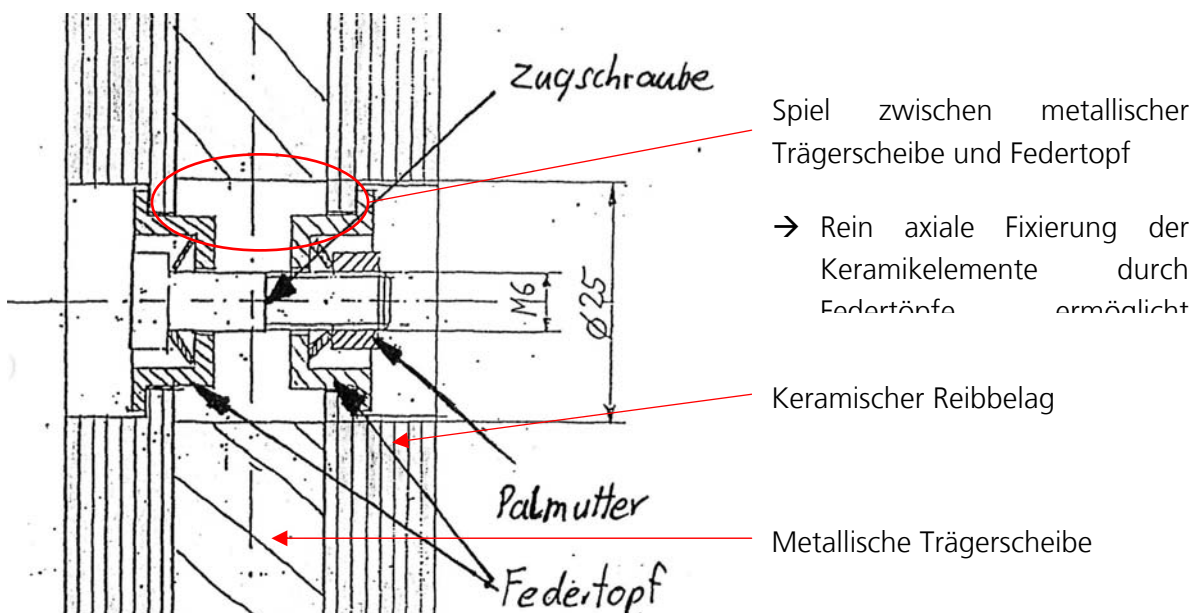


Abbildung 5 Axiale Fixierung der keramischen Friktionselemente auf Trägerscheibe

Wie in Abbildung 5 dargestellt, wird die axiale Befestigung der Keramiksegmente über metallischen Federtöpfe und Tellerfedern (z.B. DIN 2093) realisiert. Verspannt wird der Aufbau über eine Schraube in Verbindung mit einer Kronenmutter (z.B. DIN 935).

Die segmentierte Bauweise in Kombination mit der rein axialen Fixierung der Keramikelemente durch die Federtöpfe erlaubt einen Ausgleich des α -mismatch.

Die während der Bremsung auftretenden Schubkräfte werden über Schubelemente (Abbildung 6 und Abbildung 7) von den keramischen Friktionselementen in die metallische Trägerscheibe eingeleitet. Hierzu sind rückseitig jeweils drei Nuten in die Friktionselementen eingearbeitet. Die Nuten sind dabei so ausgelegt, dass die Schubelemente sich in radialer Richtung frei bewegen können und somit einen Ausgleich des α -mismatch ermöglichen. Bei der Dimensionierung der Nutbreite ist grundsätzlich wieder der deutlich größer Ausdehnungskoeffizient der metallischen Schubelemente im Vergleich zu den keramischen Friktionselementen zu berücksichtigen.

Dimensionierung der Nutbreite B zur Aufnahme der Schubelemente unter Berücksichtigung des α -mismatch:

$$\begin{aligned}\Delta B &= (T_{\max} - T_{\text{normal}}) \cdot (\alpha_{ST52-3} - \alpha_{C/C-SiC}) \cdot B \\ &= (900\text{ }^{\circ}\text{C} - 20\text{ }^{\circ}\text{C}) \cdot (14 \cdot 10^{-6} - 3,5 \cdot 10^{-6}) \frac{1}{\text{K}} \cdot 15\text{ mm} = \underline{\underline{0,14\text{ mm}}}\end{aligned}$$

Um unerwünschte Druckspannungen innerhalb der Nuten der Friktionselemente zu vermeiden, ist somit eine Mindestnutbreite von 15,14 mm zu wählen. Metallseitig, also zwischen Schubelement und Trägerscheibe, besteht naturgemäß kein Problem bezüglich ungleicher CTE-Werte, da beide Elemente stoffgleich sind. Um eine möglichst spielfreie Lagerung zu gewährleisten, sind die Schubelemente hier über eine Übergangspassung (z.B. H7/j6) in der Trägerscheibe positioniert.

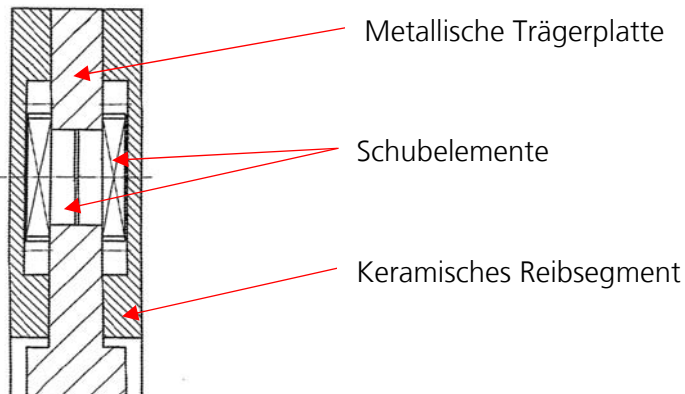


Abbildung 6 Tangentiale Fixierung der keramischen Friktionselemente auf Trägerscheibe durch Schubelemente

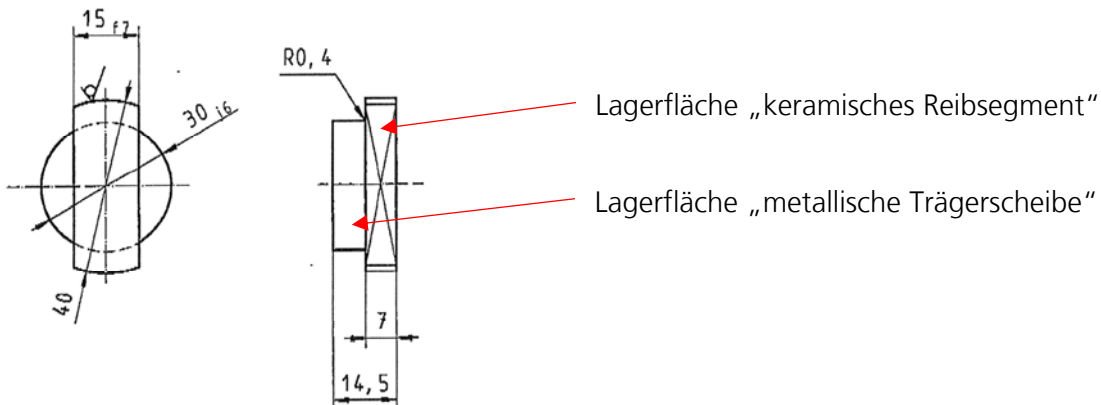


Abbildung 7 Schubelement zur formschlüssigen tangentialen Fixierung der keramischen Friktionselemente auf Trägerscheibe

6 Zusammenfassung

Durch eine keramikgerechten Konstruktion, also ein geeignetes Anbindungskonzept zwischen faserverstärkter Keramik und metallischer Substruktur, ist es möglich, eine keramische Brems Scheibe zu entwickeln, die geeignet ist, im Fall einer Schnellbremsung ca. 81 % der kinetischen Energie in Wärme umzusetzen, zwischenzuspeichern und letztendlich als Wärmestrahlung an die Umgebung abzugeben.

Die keramische Brems Scheibe, die naturbedingt verschleißbehaftet arbeitet, dient im vorgestellten Konzept als komplementäre Bremse zu den verschleißfrei arbeitenden Systemen:

- rekuperative generatorische Bremse
- lineare Wirbelstrombremse
- aerodynamische Bremsen

Die keramische Brems Scheibe übernimmt neben der Aufgabe, die Spitzenbelastungen während der Schnellbremsung aufzunehmen, die Funktion der Feststellbremse.

Das vorgestellte Brems Scheibendesign zeichnet sich durch folgende Eigenschaften aus:

- Wartungsfreundlichkeit und vergleichsweise kostengünstige Herstellung durch segmentierte Bauweise
- Geringer Verschleiß der keramischen Reibsegmente
 - Zielsetzung: Lebensdauerbremse
- Energieeinsparung
 - Reduzierte Brems Scheibenmasse
 - Reduzierter Luftwiderstand der Brems Scheibe im Vergleich zur konventionellen innenbelüfteten Bauweise