

eBrake[®] - die mechatronische Keilbremse

Dipl.-Ing. Henry Hartmann, Dipl.-Ing. Bernd Gombert
eStop GmbH, Seefeld/Obb.

eStop GmbH
An der Hartmühle 10
82229 Seefeld/Obb.

Tel: 08152 9936 0
Fax: 08152 9936 11
Email: henry.hartmann@estop.de
<http://www.estop.de>

1 Abstract

eBrake[®] (siehe auch [1], [2]) - eine neuartige *brake-by-wire* Technologie - wurde am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR e.V. entwickelt. Sie basiert auf einer geregelten elektromotorischen Bremse mit hoher mechanischer Selbstverstärkung. Um das Blockieren des eingesetzten Bremskeils zu verhindern wurde eine spezielle Steuerungs- und Regelungstechnik entwickelt. Auf diese Weise wird durch intelligentes Kontrollieren eines Bremskeils die kinetische Energie eines abzubremsenden Fahrzeugs in Bremskraft umgewandelt. In einer Weiterentwicklung der Grundidee wurde ein Konzept gefunden, welches auch bei einer großen Schwankungsbreite des Reibkoeffizienten zu hohen und höchsten Verstärkungsfaktoren führt. Die zugrundeliegenden physikalischen Effekte führen zu einer signifikanten Reduzierung des Energie- und Leistungsbedarfs des Bremsaktuators im Vergleich zu „konventionellen“ Bremssystemen.

2 Einführung

Die im DLR durchgeführten Entwicklungen mit der *brake-by-wire* Technik auf der Basis rein elektromechanischer Bremssysteme entsprechen dem Trend, wo immer möglich, hydraulische und pneumatische Systeme durch saubere, intelligent regelbare Elektromechanik bzw. Mechatronik zu ersetzen. Mechatronische Systeme werden alle Bereiche der künftigen Industrie- und Dienstleistungsgesellschaft durchdringen und einen Großteil ihrer innovativsten Produkte darstellen. Ihre volkswirtschaftliche Bedeutung wird in den nächsten Jahren ständig zunehmen. Vorrangig profitieren werden aller Voraussicht nach vor allem der Fahrzeug- und Flugzeugbau, der in Zukunft vermutlich noch stärker auf Exportfähigkeit und internationale Wettbewerbsfähigkeit angewiesen sein wird (aktuelle Konkurrenz-Beispiele: ICE-TGV, Airbus-Boing).

Die enge Integration von Mechanik, Elektronik und Informationstechnik (z.B. Computer-Leistung) zur Schaffung intelligent gesteuerter und geregelter Systeme und Maschinen löst den klassischen Maschinenbau in immer mehr Bereichen ab und führt ihn zu einer Renaissance in neuer Gestalt. Die angesprochene Integration muss dabei oft auf kleinstem Raum bis hin zur Mikrosystemtechnik erfolgen. Die optimale Gesamtfunktion mechatronischer Systeme kann nur durch das ganzheitliche Zusammenwirken elektronischer, informationstechnischer und mechanischer Komponenten entstehen.

Auch heute schon findet man zahlreiche Ausformungen mechatronischer Systeme. CD-Spieler, Tintenstrahldrucker, Werkzeugmaschinen und Roboter gehören genauso dazu wie *fly-by-wire*-Flugzeuge, ABS-, ASR- und ESP-Systeme (A-Klasse) im Auto, Airbags, die die Sitzbelastung erkennen etc. Diese Palette wird sich in Zukunft noch wesentlich vergrößern.

3 Problembeschreibung

Die heutzutage zunehmenden Anforderungen an ein modernes Kraftfahrzeug-Bremssystem - z.B. Antiblockiereinrichtungen, Fahrstabilitätsregelungen, Antriebs-schlupfsteuerungen oder Traktionskontrollen - machen radselektive Bremseneingriffe erforderlich. Dies wird bisher mit konventionellen Bremssystemen realisiert, die um Hydropumpen und Magnetventile erweitert wurden. Hierbei ergeben sich jedoch Schwingungsprobleme in den Hydraulikleitungen und eine schwierige Ansteuerung der Druckmodulationseinheiten, d.h. der Magnetventile. Bedingt durch die Eigenschaften dieser Ventile, bei denen es sich um hochgradig nichtlineare Zweipunktglieder handelt, ist auch die Regelgüte bezüglich des Bremsdruckes begrenzt.

Alle bisherigen Versuche, elektromotorische Bremsen zu verwirklichen, wurden mit der Problematik enormer Aktuatorkräfte und dem daraus resultierenden hohen Leistungs- und Energiebedarf des Aktuators konfrontiert. Die Antriebsquellen, üblicherweise Elektromotoren, die die extrem hohen Kräfte und Drehmomente abgeben müssen, sind groß, schwer und entsprechend teuer. Wirtschaftlich profitable Lösungen des rein elektromechanischen *brake-by-wire*-Ansatzes stehen daher noch aus.

eBrake® - die mechatronische Keilbremse - wird, bedingt durch das zugrundeliegende Selbstverstärkungsprinzip, im Hinblick auf Energieverbrauch, Wirkungsgrad, Gewicht und Preis den gegenwärtig am Markt angebotenen und den derzeit in Entwicklung befindlichen *brake-by-wire* Technologien deutlich überlegen sein.

4 Neue Lösungsansätze

Die neuartige *brake-by-wire* Technologie des DLR basiert auf einer elektromotorischen Bremse mit Selbstverstärkung (eBrake®). Wann immer Ingenieure vorhandene Kräfte elegant nutzen, bestehen einfache Konzepte. Durch intelligent geregelten Einsatz eines „Bremskeils“ wird die Bewegungsenergie des Fahrzeugs in Bremskraft umgewandelt.

MECHANISCHES MODELL

Der Bremsbelag weist auf seiner Rückseite einen Keil auf, mit welchem er sich auf einem Bolzen abstützt. Der Aktuator schiebt den Bremsbelag mit der Motorkraft F_m zwischen Abstützrolle und Bremsscheibe hinein. Die aus dem Kontakt zwischen Bremsscheibe und Belag resultierende Bremskraft F_b wirkt in die gleiche Richtung wie die Motorkraft, wodurch die gewünschte Selbstverstärkung entsteht (Bild 1).

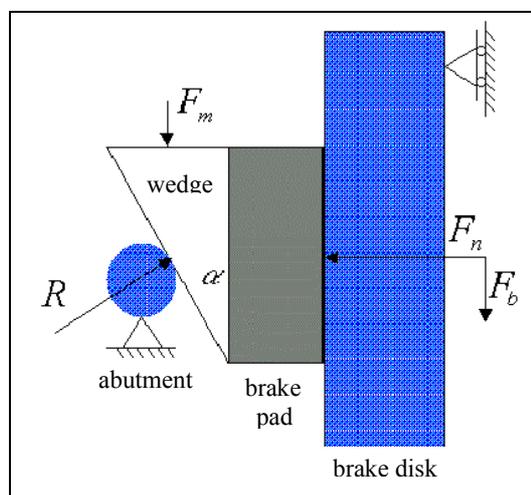


Bild 1: Mechanisches Modell.

Aus dem Kräftegleichgewicht ergibt sich mit dem Reibkoeffizienten μ :

$$F_m = F_b \frac{\tan \alpha - \mu}{\mu}$$

Für den Bremsenkennwert C^* gilt somit:

$$C^* = \frac{F_b}{F_m} = \frac{2\mu}{\tan \alpha - \mu}$$

REGLERSTRUKTUR UND ERSTE VERSUCHSERGEBNISSE

Das prinzipielle Problem dieser einfachen aber effizienten Methode besteht darin, das Blockieren des Rades zu verhindern bzw. zu kontrollieren. Dem DLR ist es gelungen, dieses Problem zu lösen. Unter MATLAB/Simulink und dSPACE wurden spezielle Steuer- und Regelalgorithmen entwickelt, die verhindern, dass sich der Keil „festsetzt“ (vgl. Bild 2).

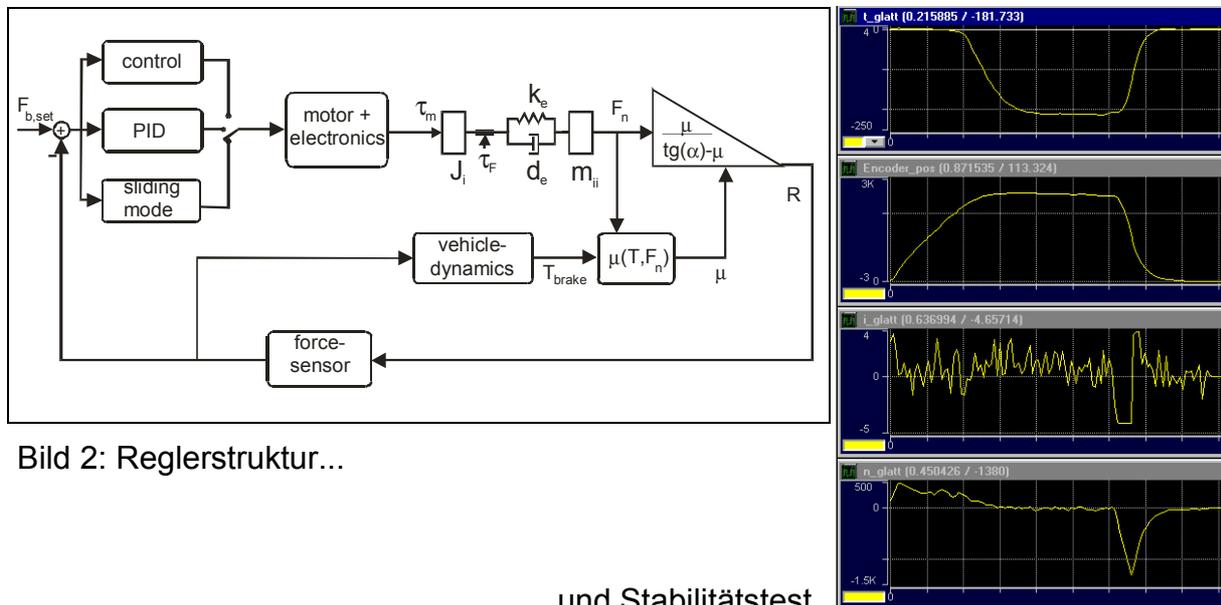


Bild 2: Reglerstruktur...

... und Stabilitätstest.

Um die Realisierbarkeit einer geregelten elektromechanischen Keilbremse unter Beweis zu stellen, wurde bei DLR ein erster Prototyp der eBrake® gebaut und auf einem eigens entwickelten Prüfstand getestet. In diesem ersten Ansatz wurde eine mechanisch stabile Ringkonstruktion realisiert, um asymmetrische Verwindungen innerhalb der Struktur zu vermeiden (Bild 3, links). Der Schwungmassenprüfstand (Bild 3, rechts) ermöglicht die Untersuchung von Bremsmomenten bis zu 500 Nm. Bild 2 zeigt links die Reglerstruktur und rechts einen Bremsversuch, der die Stabilität des Systems nachweist. Gezeigt werden von oben nach unten: Bremsmoment mit Sollwert 210 Nm, Position, Stromaufnahme und Drehzahl des Bremsantriebs (siehe auch [3]).

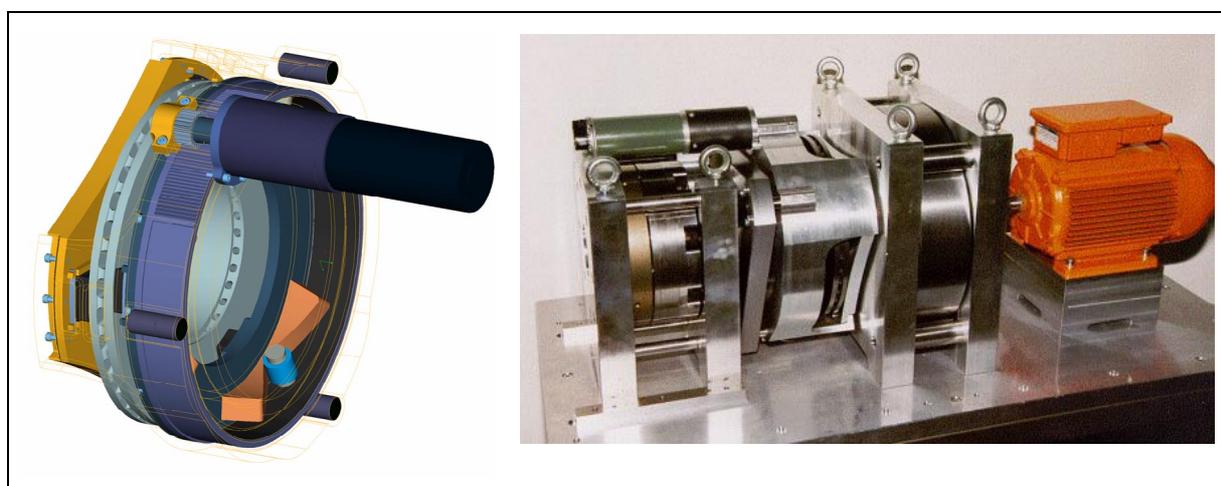


Bild 3: Erster Prototyp der DLR eBrake® und Bremsenprüfstand.

DAS „DRUCK-KEIL-PRINZIP“

Betrachten wir zunächst einmal das sogenannte „Druck-Keil-Prinzip“ (vgl. Bild 4), für das gelten soll:

$$\tan \alpha > \mu$$

Hierdurch ist gewährleistet, dass im gesamten Betriebsbereich, das heißt für alle im Betrieb auftretenden Reibwerte, ausschließlich Druckkräfte am Keil auftreten bzw. ausgeübt werden müssen.

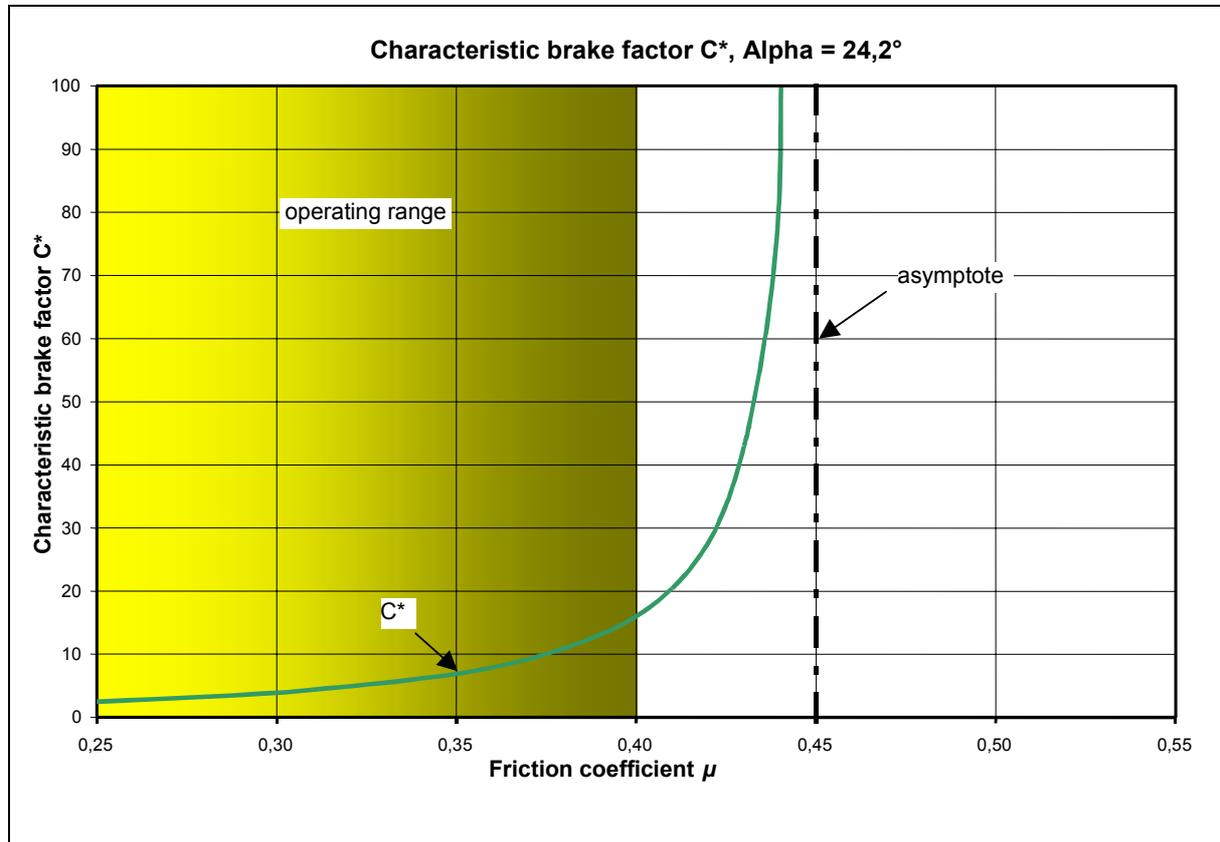


Bild 4: Charakteristischer Bremsenkennwert C^* in Abhängigkeit vom Reibkoeffizienten μ bei Anwendung des „Druck-Keil-Prinzips“.

Um ein Blockieren des Keils zu verhindern, muss der Betriebsbereich einen hinreichend großen Sicherheitsabstand zur Asymptote der Kennlinie in Bild 4 einhalten, welche durch die Bedingung

$$\mu = \tan \alpha$$

gekennzeichnet ist.

Das „Druck-Keil-Prinzip“ erfordert eine konstruktive Auslegung mit sehr großen Keilwinkeln, die sich zwangsläufig in einem verhältnismäßig geringen Selbstverstärkungspotenzial widerspiegeln.

Bei diesem ersten Denkansatz bestand die große Sorge, dass es beim Erreichen des kritischen Betriebspunktes, also besagter Asymptote, unweigerlich zu einem Blockieren oder sogar zur Zerstörung der Bremse kommen würde. In der Praxis zeigt sich diese Sorge als völlig unbegründet – aber warum ist das so?

DAS „ZUG-DRUCK-KEIL-PRINZIP“

Gehen wir gedanklich einmal von der Keil-Theorie zur realen Antriebstechnik über, so stellen wir fest, dass elektromechanische Aktuatoren, welche bspw. als Motor-Spindelantrieb aufgebaut sind, sowohl Zug- als auch Druckkräfte ausüben können bzw. müssen. Dies ist in der Auslegung unabdingbar, um eine schnelle, stabile Regelung des Systems zu ermöglichen. Hier spiegeln sich z.B. Anforderungen aus bi-direktionalen dynamischen Belastungen wider, die auf träge Massen im Antriebsstrang zurückzuführen sind.

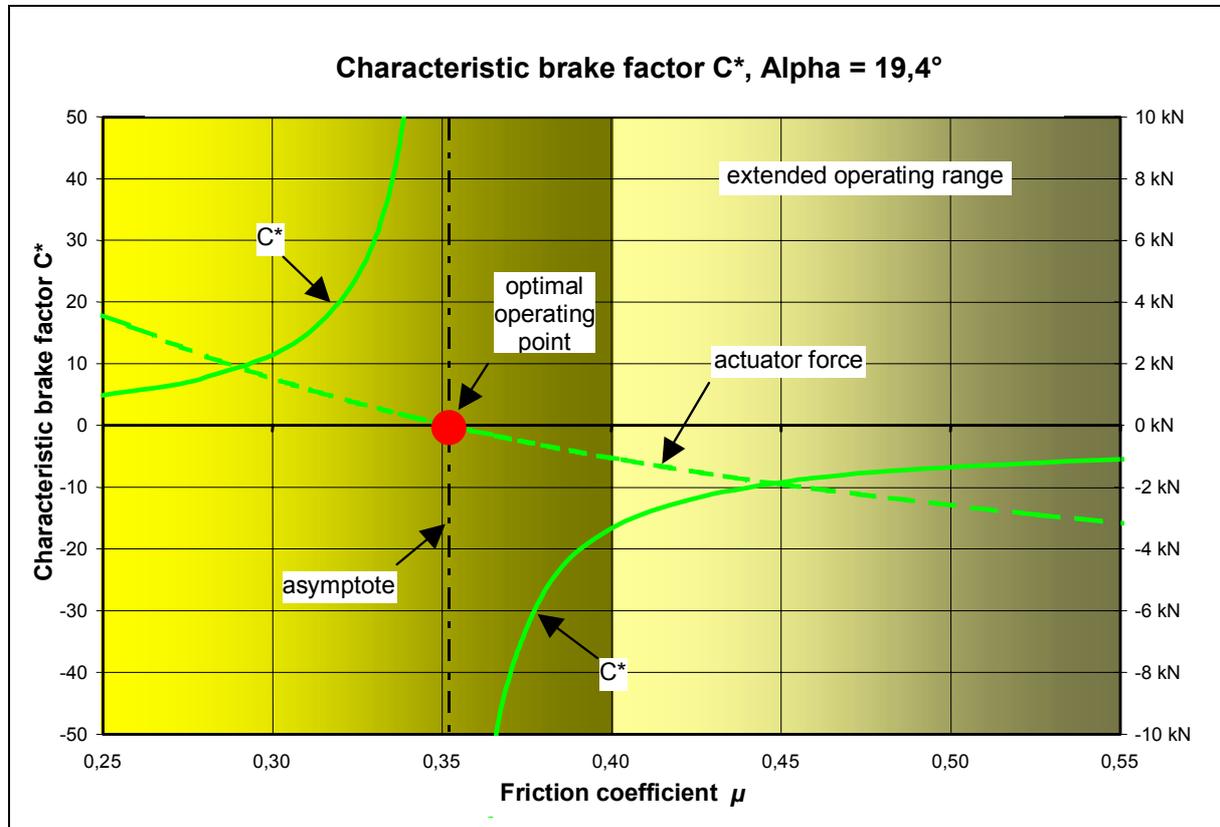


Bild 5: Charakteristischer Bremsenkennwert C* in Abhängigkeit vom Reibkoeffizienten μ bei Anwendung des „Zug-Druck-Keil-Prinzips“.

Betrachten wir nun einen Bremsvorgang, bei dem der Reibkoeffizient im Verlauf der Bremsung durch die eingebrachte Wärmeenergie und den damit verbundenen Temperaturanstieg stetig zunimmt. Irgendwann erreichen wir den kritischen Betriebspunkt und der Bremsenkennwert macht einen Unendlichkeitssprung, doch was passiert mit der Aktuatorkraft: Die Aktuatorkraft wird nicht unendlich, sondern Null (Bild 5)!

$$F_m(\mu = \tan \alpha) = 0$$

Sobald der Reibkoeffizient weiter ansteigt, wechselt die Krafrichtung im Antriebsstrang von Druck auf Zug. Der Aktuator muss dann also den Keil nicht mehr hineindrücken, sondern festhalten. Betrachten wir noch einmal den Kurvenverlauf in Bild 5, so stellen wir fest, dass der ehemals gefürchtete, kritische Betriebspunkt in Wahrheit unser optimaler Betriebspunkt ist: Die Selbstverstärkung ist unendlich!

OPTIMIERUNG DES KEILPROFILS

Nehmen wir mal für einen Moment an, der Reibwert sei konstant und der Keilwinkel würde der Bedingung $\alpha = \arctan(\mu)$ genügen. In diesem Gedankenexperiment wäre zum Betrieb der Bremse nur eine Positionsregelung des Keils erforderlich.

Weiterhin wissen wir, dass die Keilposition x kinematisch mit der Aufweitung des Bremssattels verknüpft ist. Mit der näherungsweise als konstant angenommenen Sattelsteifigkeit c erhalten wir für die Normalkraft F_n die Beziehung

$$F_n = c \cdot \tan(\alpha) \cdot x,$$

woraus hervorgeht, dass die Normalkraft in der Bremszange eine reine Funktion des Keilweges ist.

Wir kommen somit zu einer ersten wichtigen Erkenntnis, um in einem gesamtoptimierten Ansatz die im realen Betrieb erforderlichen Aktuatorkräfte zu reduzieren:

Keilweg und Normalkraft stehen direkt miteinander in Beziehung!

Lassen wir in einem zweiten Schritt eine Variation des Reibkoeffizienten zu und setzen jetzt einen konstanten Wert für die geforderte Nennbremskraft $F_{b,max}$ an,

$$F_{b,max} = \mu \cdot F_n = const.$$

dann erhalten wir die erforderliche Keilauslenkung zu:

$$x = \frac{F_{b,max}}{\mu \cdot c \cdot \tan(\alpha)}.$$

Es wird offensichtlich, dass die maximal erforderliche Keilauslenkung indirekt proportional zum Reibkoeffizienten ist. Dies führt zur zweiten wichtigen Erkenntnis:

Große Keilauslenkungen sind nur für kleine Reibwerte erforderlich!

Wir schließen hieraus:

Der Keilwinkel für extreme Keilauslenkungen, welche nur bei extremen Reibwerten auftreten, kann für diese Reibwerte unabhängig vom normalen Reibwertebereich optimiert werden!

Diese Überlegungen ermöglichen eine Gesamtoptimierung der Keilkontur zur Minimierung der erforderlichen Aktuatorkräfte bei maximaler Normalkraftanforderung (Bild 6). Das Potenzial zur Verkleinerung des Antriebsstranges ist offensichtlich.

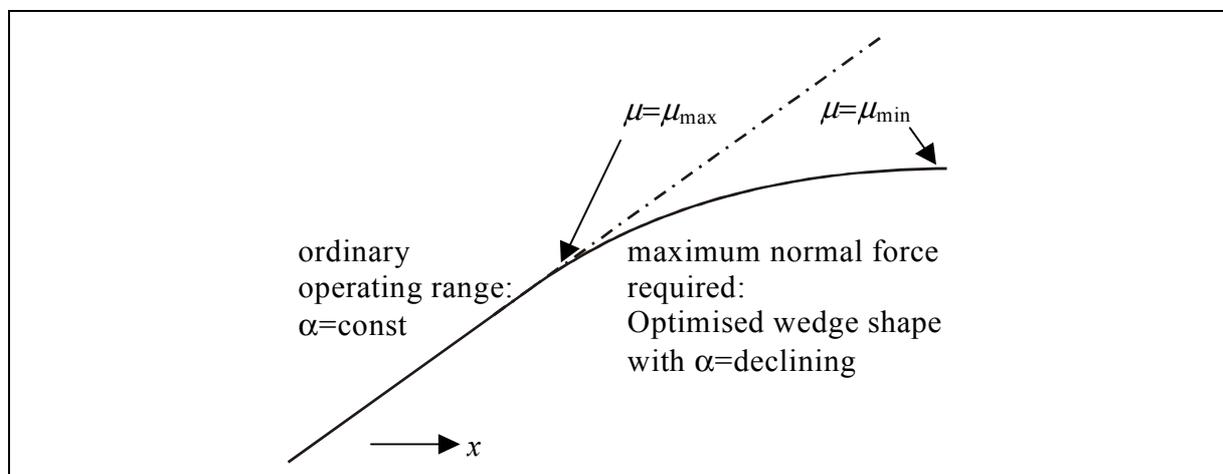


Bild 6: Gesamtoptimierte Keilkontur mit degressivem Keilwinkelverlauf.

VORTEILE DES EBRAKE® - KONZEPTS

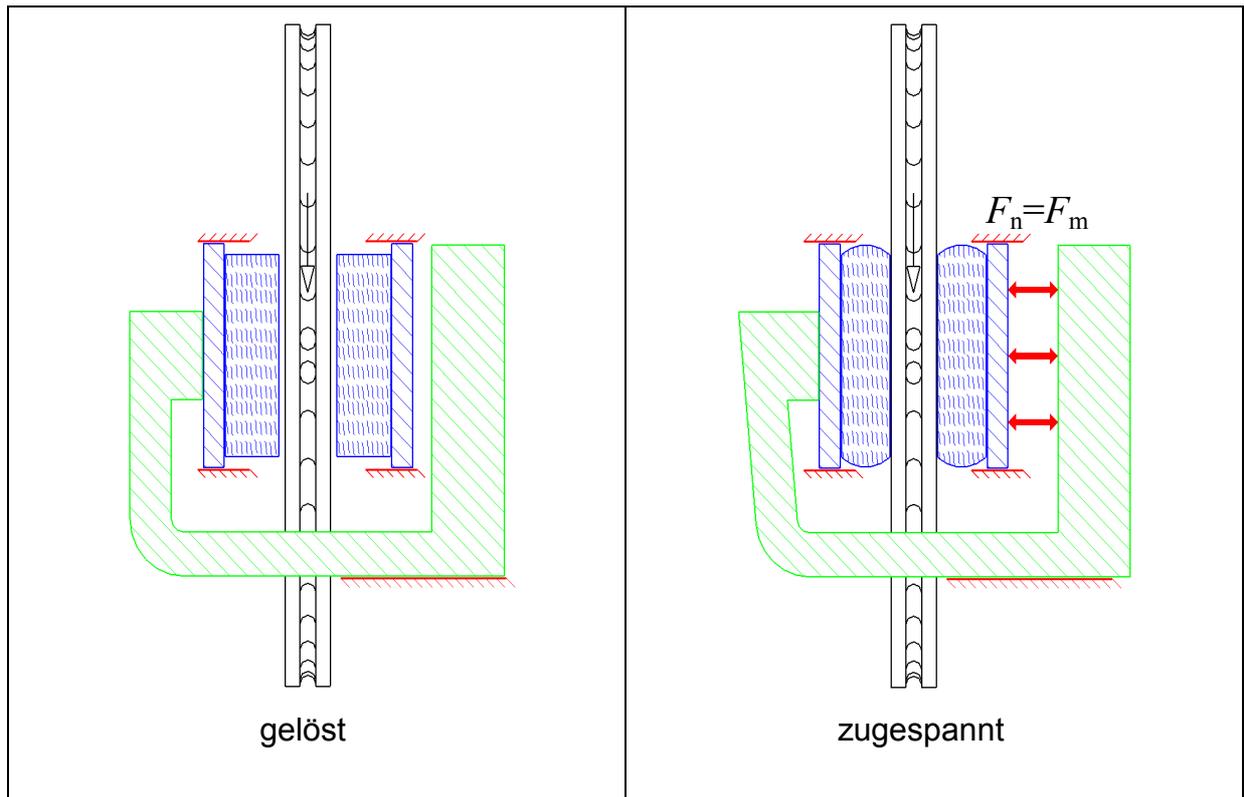


Bild 7a): „Konventionelle“ Bremsen-Philosophie.

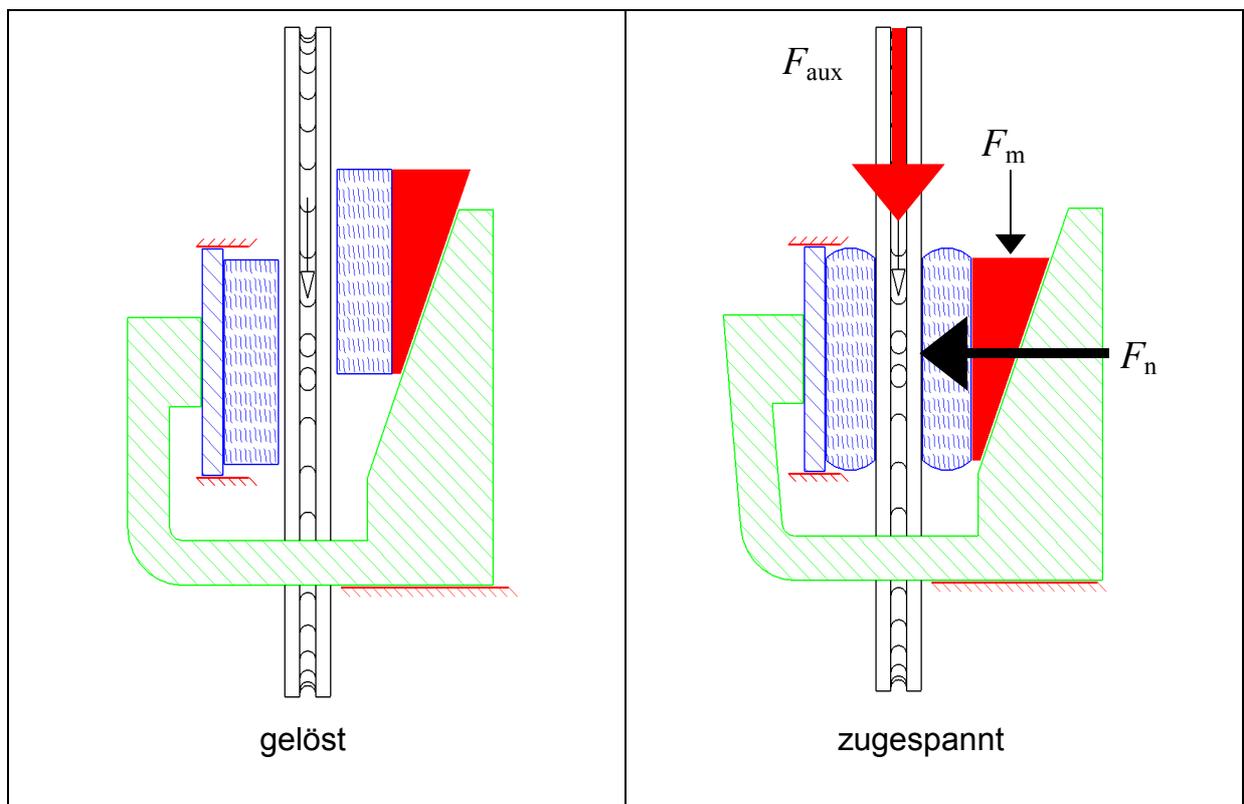


Bild 7b): eBrake® - geregelt elektromechanische Bremse mit Selbstverstärkung [4].

Die konventionelle Bremsen-Philosophie (Bild 7a) geht davon aus, dass die erforderliche Spannkraft direkt in Normalenrichtung aufgebracht wird. Neuartige Ansätze versuchen lediglich hydraulische oder pneumatische Betätigungseinrichtungen durch elektrohydraulische oder rein elektromechanische Lösungen zu ersetzen.

Diese rein elektromechanischen Lösungen müssen dann die Normalkraft aktiv und in voller Höhe erzeugen. Weiterhin müssen dementsprechende Aktuatoren die Energie bereitstellen, welche vom Bremsattel aufgenommen bzw. darin gespeichert wird. Hieraus entsteht ein hoher Energiebedarf für den Antrieb. Um darüber hinaus eine hohe System-Dynamik zu gewährleisten müssen weitere Leistungsreserven bereitgestellt werden. Gerade hier wirken sich große Antriebe aufgrund der hohen Massenträge im Antriebsstrang doppelt negativ aus.

Um den Anforderungen an ein elektromechanisches Bremssystem nach der konventionellen Bremsen-Philosophie gerecht zu werden, sind große, schwere und kostenintensive Antriebslösungen erforderlich. Teure Kraftwandlungs- und Zwischengetriebe zur Untersetzung der hohen Startmomente des Antriebsstrangs sind erforderlich, da dieser die volle Spannkraft sieht. Letztendlich führen diese Randbedingungen zu erhöhten Bauraumanforderungen und einem Anstieg der primär gedämpften Massen im Fahrwerk.

Demgegenüber nutzt die DLR eBrake® die kinetische Fahrzeugenergie, um den elektrischen Aktuator zu entlasten. Aus der mechanischen Selbstverstärkung resultiert dabei eine Hilfskraft F_{aux} , mit deren Unterstützung die erforderliche Normalkraft aufgebaut wird. Der eigentliche Bremsaktuator hat also nur einen sehr kleinen aktiven Beitrag zum Spannkraftaufbau zu leisten. Hinzu kommt, dass die zum Aufspannen des Bremsattels aufzuwendende Energie ebenfalls aus der kinetischen Energie des Fahrzeugs gewonnen werden kann.

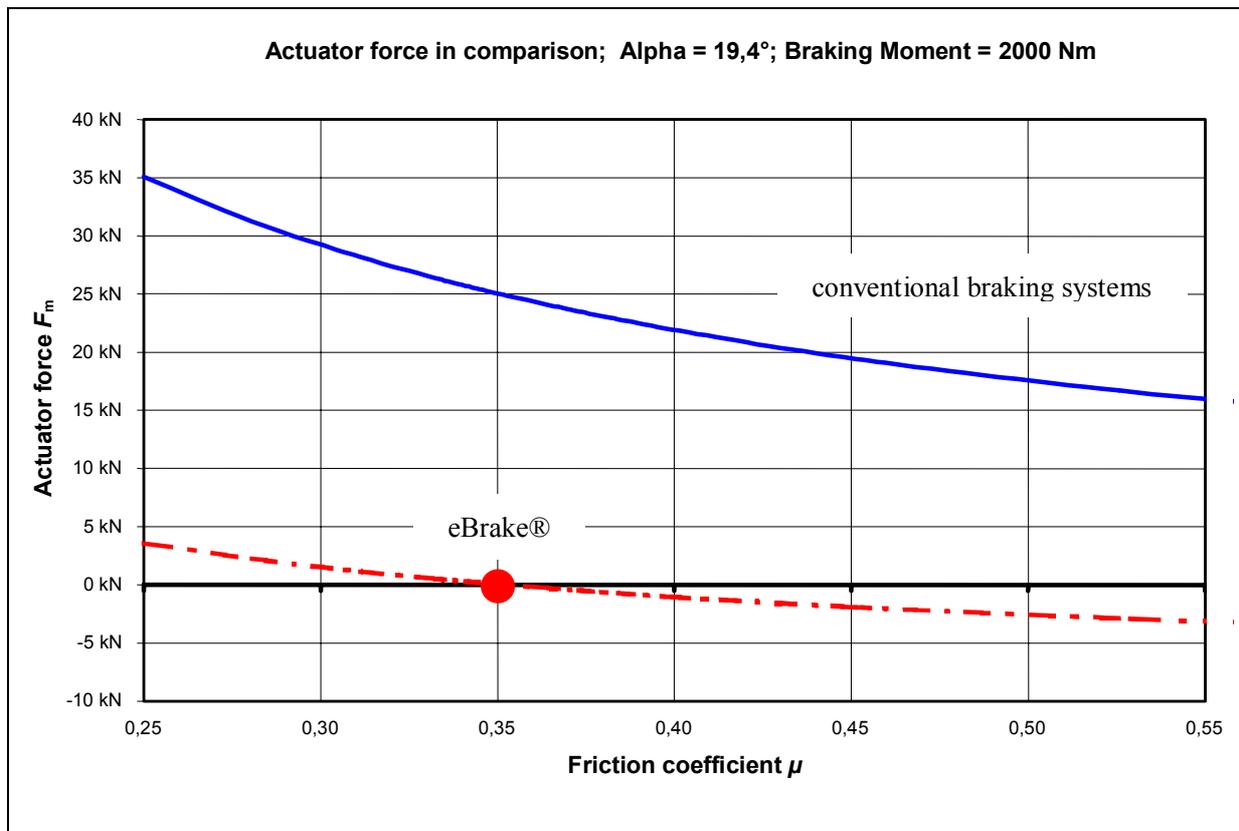


Bild 8: Vergleich der erforderlichen Aktuatorkräfte.

Die dem eBrake®-Konzept zugrunde liegenden physikalischen Effekte führen zu einer Vielzahl von Vorteilen im Vergleich zu konventionellen Bremssystemen, insbesondere im Hinblick auf die jüngsten *brake-by-wire*-Ansätze:

1. Der mittlere Energieverbrauch der Aktuatoren kann signifikant gesenkt werden, denn
 - die benötigten Aktuatorkräfte werden drastisch reduziert und fallen im optimalen Betriebspunkt sogar auf Null ab (Bild 8),
 - der Energiebedarf, um den Bremssattel aufzuspannen muss nicht über das elektrische Bordnetz zugeführt werden, sondern wird aus der kinetischen Fahrzeugenergie gedeckt.
2. Der Aktuator kann wesentlich kleiner ausgeführt werden, damit verringern sich
 - die Bauraumanforderungen,
 - die ungedämpften, bzw. primär gedämpften Massen im Fahrwerk und
 - die Kosten der Bremseneinheit.
3. Eine Konvertierung des Bordnetzes auf 42 V kann entfallen.
4. Die Dynamik, Regelbarkeit und Stabilität des Bremssystems lassen sich weiter verbessern, vor allem im Vergleich zu pneumatischen, hydraulischen und elektrohydraulischen Bremssystemen.

An dieser Stelle gilt besonders zu bemerken, dass sich eine Verbesserung der Systemdynamik positiv niederschlagen wird in:

- verkürzten Ansprechzeiten des Systems (schnellerer Kraftaufbau),
- beschleunigten ABS-Zyklen und damit
- dem Potenzial zur weiteren Verringerung des Bremswegs.

Dies sind wichtige Beiträge zur Erhöhung der aktiven Sicherheit und damit zur Entlastung des Fahrers.

Weitere Vorteile der eBrake® sind die Wartungs- und Diagnose- bzw. Servicefreundlichkeit. Aus ökologischer Sicht ist der Verzicht auf jegliche Hydraulik-Flüssigkeit ein besonderes Plus. Durch aktive Lüftspieleinstellung bietet sich außerdem die Möglichkeit, den Verschleiß durch schleifende Bremsen zu eliminieren und so die Lebens- und Gebrauchsdauer der Bremsanlage zu erhöhen bzw. die Instandhaltungskosten zu senken.



Bild 9: Zweiter Prototyp (Foto mit freundlicher Unterstützung von PSA).

Ein nachfolgender Prototyp (Bild 9) basiert auf einem zweimotorigen Antriebskonzept und beinhaltet bereits *Fail-Safe*-Funktionalität und eine Parkbremse. Das entscheidende Kriterium der zweimotorigen Antriebsstrang-Auslegung liegt in der Tatsache begründet, dass eine aktive Kompensation des Spiels im optimalen Betriebspunkt möglich ist, um die sogenannte „Null-Kraft-Regelung“ durchführen zu können.

Jeder Motor liefert bei diesem Ansatz unter normalen Betriebsbedingungen die halbe Betriebslast, ist aber im Fehlerfall in der Lage eine Notbremse bzw. Notöffnung der Bremseinheit durchzuführen. Die Parkbremsfunktion wird vorteilhafterweise durch Ausnutzung eines gezielt vergrößerten Spiels innerhalb des zweimotorigen Antriebsstranges realisiert – denn hierbei darf die Selbsthemmung ihre Wirkung zeigen und den Keil verklemmen.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Der Artikel beschreibt eine neuartige und einmalige *brake-by-wire* Technologie - eBrake® - welche am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelt wurde. Sie basiert auf einer geregelten elektromechanischen Reibungsbremse mit hohem Selbstverstärkungspotenzial. Durch intelligentes Kontrollieren eines Bremskeils wird dabei kinetische Fahrzeugenergie in Bremskraft umgewandelt.

Es wird ein Regelalgorithmus skizziert, mit dessen Hilfe ein Blockieren des Keils verhindert und die Stabilität des Systems experimentell nachgewiesen werden konnte. Das zugrundeliegende mechanische Modell wird beschrieben, die Systemgleichung hergeleitet und das Systemverhalten diskutiert. Die Verläufe des charakteristischen Bremsenkennwerts C^* werden für zwei unterschiedliche Ausführungen der eBrake® analysiert und weitere Optimierungspotenziale aufgezeigt.

Ein Vergleich zwischen der eBrake® und konventionellen Bremssystemen wird gegeben, wobei besonders auf *brake-by-wire* -Systeme eingegangen wird. Dabei werden die folgenden Vorteile der eBrake® aufgezeigt:

- der durchschnittliche Energieverbrauch des Brems-Aktuators kann signifikant gesenkt werden,
- der Aktuator kann wesentlich kleiner ausgeführt werden (Bauraum, Gewicht, Kosten),
- ein Umstieg auf das 42 V-Bordnetz ist nicht erforderlich,
- die Bremsdynamik, Regelbarkeit und Stabilität lassen sich weiter verbessern und damit die Ansprechzeiten, ABS-Zyklen und Bremswege weiter verkürzen

Außer im *Automotiv*-Bereich kann die eBrake® in einer Vielzahl von Anwendungsfeldern eingesetzt werden, als Beispiele seien hier Schienenfahrzeuge, Portalkräne sowie der Maschinen- und Anlagenbau erwähnt. Besonders im industriellen Bereich wird sich die eBrake® schnell zur Serienreife entwickeln lassen.

Wie alles Neue wird aber auch die intelligente mechatronische Keilbremse ihre Zeit brauchen, um als selbstverständlicher Standard anerkannt zu werden. Doch was jetzt noch wie Zukunftsmusik klingt, wird schon bald Realität sein. Auf jeden Fall gibt es viele gute Gründe, die dafür sprechen, dass in wenigen Jahren Autofahrer mit Hilfe eines Systems bremsen werden, mit dem unsere Vorfahren schon seit Jahrtausenden beste Erfahrungen gesammelt haben.

DANKSAGUNGEN

Wir danken an dieser Stelle den Mitarbeitern des Instituts für Robotik und Mechatronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, DLR e.V., in Oberpfaffenhofen unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Gerd Hirzinger, für die grundlegenden Forschungsarbeiten und den Aufbau der ersten eBrake®.

Des Weiteren gilt unser Dank der BBA Friction, ehem. Textar, für die Ausstattung unserer Versuchsträger mit verschiedenen Reibmaterialien.

REFERENZEN

1. Deutsches Patent 19819564 – Elektromechanische Bremse mit Selbstverstärkung
2. US patent 6,318,513 - elektromechanical brake with self-energization
3. Martin Semsch, „Neuartige Mechatronische Teilbelagscheibenbremse“, XIX. Internationales μ -Symposium, 29./30. Oktober 1999, Bad Neuenahr, ISBN 3-18-340512-1, pp 53-74
4. <http://www.estop.de/eStop-flyer-Deutsch.pdf>

NOMENKLATUR

F_m	: Aktuatorkraft (motor force)
F_n	: Normalkraft (normal force)
F_{aux}	: Hilfskraft (auxiliary force)
F_b	: Bremskraft (braking force)
$F_{b,max}$: Nennbremskraft (maximum braking force/ nominal value)
R	: Reaktionskraft (reaction force)
α	: Keilwinkel (wedge angle)
c	: Sattelsteifigkeit (caliper stiffness)
x	: Keilposition/ Keilauslenkung (wedge position/ wedge deflection)

ZUSATZBEMERKUNGEN

eStop® und eBrake® sind eingetragene Warenzeichen der eStop® - innovative brake technology - GmbH