



Innovative Kupplungsbeläge –

Cooler Beläge für heiße
Anwendungen

Robert Felger
Christian Spandern
Martin Häßler
Hans-Dieter Elison



Einleitung

Leistungsfähigere Motoren, längere Übersetzungen und neue Lebensdauervorgaben waren Anlass zur Entwicklung und Einführung aufwändiger Kupplungskonzepte. Neben weiteren wichtigen Bauteilen ist der Kupplungsbelag ein Kernstück der Kupplung. Blickt man auf die Geschichte des Kupplungsbelags zurück, erkennt man, dass der technische Fortschritt der Kupplung sich nur wenig auf die Technologie des Kupplungsbelags ausgewirkt hat. LuK hat begonnen, dieses Potenzial zu heben.

Geschichte des Kupplungsbelags

Mit den ersten Kraftfahrzeugen wurden die ersten trocken laufenden Kupplungen eingesetzt. Als Reibmaterial dienten Beläge aus Buchen- oder Eichenholz. Mit der Erfindung des Phenolharzes zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde der Grundstein für die heute übliche Belag-Technologie gelegt. Rasch erkannte und nutzte man die Vorteile der Phenolharze als Bindemittel für Brems- und Kupplungsbeläge. Erstmals konnten Teile aus einer leicht formbaren Masse hergestellt werden, die nach entsprechender Aushärtung auch unter großer Hitze hart blieben.

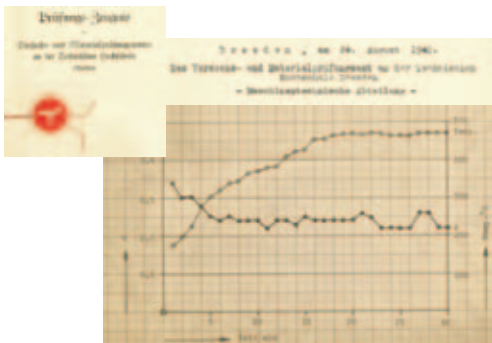


Bild 1 Reibwertuntersuchung bis 470°C aus dem Jahr 1940

Seit 1930 werden Kupplungsbeläge wie wir sie heute kennen hergestellt. Bereits in den 30er Jahren erfolgten umfangreiche Materialprüfungen an Kupplungsbelägen auf Schwungmassen-Prüfständen bis über 400 °C (Bild 1). Vollsynthetische, härtbare Kunststoffe mit hochwertigen

Endeigenschaften, die rationell verarbeitet werden können, bilden noch heute die Basis der Kupplungsbeläge.

Wenn, wie in vielen anderen Fällen, konventionelle Technologien an ihre Grenzen stoßen, müssen neue Ansätze gefunden werden, um diese Grenzen zu überwinden. Der nachfolgende Beitrag zeigt das Anforderungsprofil an künftige Beläge sowie die Grenzen des aktuellen Stands der Technik und gibt einen Einblick in die Zukunft des Kupplungsbelags.

Anforderungen an den Kupplungsbelag

Temperaturbeständigkeit und Betriebssicherheit

Aktuelle aufwändige Kupplungskonstruktionen erlauben, dass eine Kupplung heute ein ganzes Fahrzeubleben lang halten kann. Damit dies in der Tat auch geschieht, muss der Belag alle Situationen mit erhöhter Belastung ohne wesentliche Herabsetzung der Lebensdauer meistern.

Kurzzeitige hohe Belastungen müssen vom Belag so überstanden werden, dass Reibeigenschaften, Strukturfestigkeit und Restlebensdauer möglichst wenig verändert werden. Je höher die Temperaturbeständigkeit ist, desto größer ist auch die Betriebssicherheit des Belags. Parallel dazu nimmt die Leistungsdichte für die Beläge aufgrund stärkerer Motoren bei wenig veränderten Bauraumverhältnissen sukzessive zu.

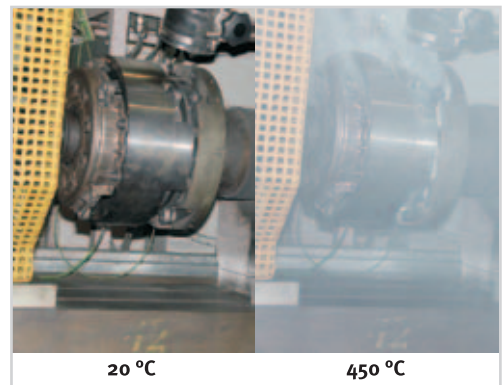


Bild 2 Zerstörung des Belagmaterials unter der Einwirkung von Hitze

Stand der Technik sind für trocken laufende Kupplungen Beläge mit einem organischen Grundwerkstoff, einem Duroplast-Elastomer-Materialverbund, der ab 320 °C seinen chemischen Aufbau deutlich verändert und sich ab 450 °C gänzlich zersetzt. Daraus erklärt sich, dass der Verschleißverlauf eines Belages eine Funktion der Temperatur darstellt und exponentiell mit der Temperatur ansteigt.

Lebensdauer

Das Verschleißverhalten des Belags ist wesentlich vom im Fahrzeugbetrieb stark schwankenden Temperaturniveau, der Reibleistung und der spezifischen Flächenpressung abhängig.

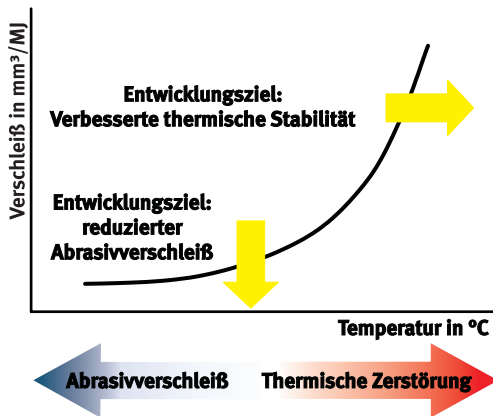


Bild 3 Belagverschleiß als Funktion der Temperatur

Der überwiegende Teil der Laufstrecke wird bei Temperaturen unter 100 °C zurückgelegt, während Spitzenbelastungen zu über 400 °C führen können. Die Verschleißrate steigt dabei um Größenordnungen an. Ein guter Belag hat bei einer breiten Gewichtung der Zeitanteile der unterschiedlichen Temperaturen eine geringe Verschleißrate (Bild 3).

Hohe Anpresskräfte bei mittleren Kupplungsgrößen führen zu Kupplungen mit hoher Leistungsdichte, was

zu einer hohen spezifischen Flächenpressung der Beläge führt.

Bei hoher Reibleistung steigt die Reibflächentemperatur schnell auf Werte die ausreichen, um den Grundwerkstoff zu schädigen und der Reibungskoeffizient sinkt schnell ab. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Belags führt dazu, dass zunächst nur die Oberfläche geschädigt wird, sofern die Energiezufuhr rechtzeitig unterbrochen wird.

Komfort

Grundsätzlich können nur solche Beläge verwendet werden, die durch ihren Reibwertverlauf über der Schlupfdrehzahl zur Dämpfung von Triebstrangschwingungen beitragen und so Rupfen vermeiden. Rupfen war in der Vergangenheit eines der größten kupplungsbezogenen Qualitätsprobleme. Von Rupfen spricht man, wenn die erste Eigenfrequenz des Antriebsstrangs so stark angeregt wird, dass Längsschwingungen des Fahrzeugs fühlbar werden. Auch vermeintlich unempfindliche Fahrzeuge mit überdurchschnittlicher Triebstrangdämpfung sind in Randbereichen des Gebrauchsspektrums anfällig für Rupfen.

Formstabilität und Festigkeit

Im Gebrauch sind Beläge einem breiten Spektrum an Fliehkräften und Temperaturen ausgesetzt. Für eine unter allen Umständen funktionierende Kupplung bedarf es einer hohen Formstabilität des Belags. Hoch drehende Motoren und Getriebe mit großer Spreizung führen zu hohen Anforderungen an die Drehzahlfestigkeit.

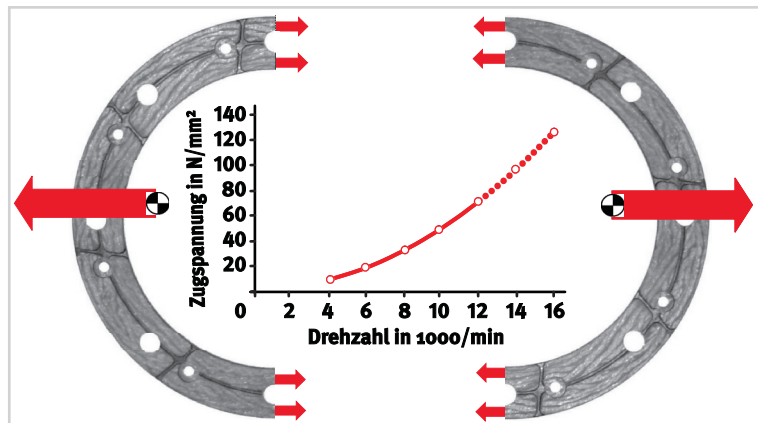


Bild 4 Anforderungen des Fliehkrafteinflusses auf die Festigkeit des Materialverbunds

Die Drehzahlfestigkeit, und damit die Zugfestigkeit des Belagwerkstoffs, ist ein wichtiges Kriterium für die Anforderungen an einen Kupplungsbelag. Sie muss die maximale Motordrehzahl deutlich übersteigen, da Fehler beim Schalten in Verbindung mit einer leistungsfähigen Getriebesynchronisierung zu sehr hohen Drehzahlen der Kupplungsscheibe führen. Eine hohe thermische Belastung kann die Festigkeit des Belags dauerhaft deutlich reduzieren. Daher müssen moderne Beläge auch nach einmaligem Erreichen der thermischen Belastungsgrenze weiterhin eine hohe Festigkeit aufweisen.

Reibwert

Das von der Kupplung übertragene Moment ergibt sich aus Anpresskraft und Reibwert. Je höher der Reibwert ist, desto geringer sind die notwendigen Kräfte in der Kupplung wie im Betätigungssystem. Ziel der Belagentwicklung ist es daher, ein möglichst hohes Reibwertniveau bei vertretbaren anderen Eigenschaften zu erreichen (Bild 5). Theoretisch sind Reibwerte zwischen 0,1 (Gleitlager) und 1,0 (Reifen) möglich. Gleichzeitig ist es wichtig, ein möglichst konstantes Reibwertniveau zu erreichen. Unter Berücksichtigung aller Belageigenschaften sind derzeit Reibwertuntergrenzen von etwa 0,2 darstellbar.

Bauraum und Gewicht

Die Verschleißreserve der Beläge beträgt zusammen nur wenige Millimeter und damit nur etwa ein Drittel der Belagdicke. Der überwiegende Teil der Belagdicke wird benötigt, um die Beläge zu befestigen.

Eine gute Schaltbarkeit des Getriebes erfordert eine geringe Massenträgheit der Kupplungsscheibe und damit der Beläge. Dies erreicht man z. B. durch Beläge mit geringem Volumen und geringem spezifischen Gewicht.

Kosten

Betrachtet man eine Großserienfertigung, so gibt es zwei Treiber, welche die Kosten des Belags maßgeblich bestimmen: Materialaufwand und Bearbeitungsaufwand. Genau genommen muss man allerdings zwei weitere Kostentreiber betrachten: konstruktiver Aufwand für die Kupplung und Gewährleistungskosten, welche durch die Belageigenschaften maßgeblich beeinflusst werden.

Zielkonflikte

Organisch gebundene Reibbeläge stellen einen befriedigenden Kompromiss in Bezug auf die geforderten Eigenschaften dar. Einen Kompromiss deshalb, da die Auswirkungen einiger tribologischer Eigenschaften dem Effekt mancher Formteileigenschaften diametral gegenüberstehen. Zudem bestehen zwischen allen von einem Reibbelag geforderten Eigenschaften Wechselwirkungen. Das heißt mit anderen Worten, dass bei der Optimierung einer Eigenschaft alle anderen mit verändert werden können (Bild 5).

Die makroskopischen Eigenschaften eines Belages sind das Ergebnis des Zusammenwirkens seiner Inhaltsstoffe. Eine Kupplungsbelagrezepatur enthält bis zu 25 verschiedene Rohstoffe. Dieses Vielstoffsystem erweitert die Zahl der Parameter, die auf die Belageigenschaften Einfluss nehmen, um ein Vielfaches.

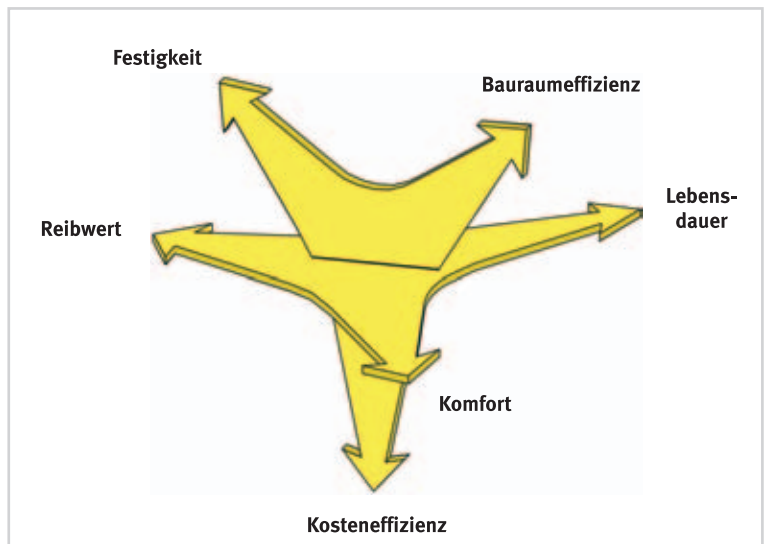


Bild 5 Zielkonflikte der Belagentwicklung

Die große Anzahl dieser Inhaltsstoffe und die Anzahl möglicher Wechselwirkungen erfordern zur systematischen Arbeit eine Vielzahl von Versuchen.

Lösungsansätze

Basistechnologie gewickelter Beläge

Für normale Beanspruchungen stehen, neben der Einhaltung einiger Grundvoraussetzungen, die Kosten im Vordergrund. Stand der Technik sind Beläge, die aus einem gewickelten Verbund von in einer Harzmischung getränktem Garn hergestellt werden (Bild 6).

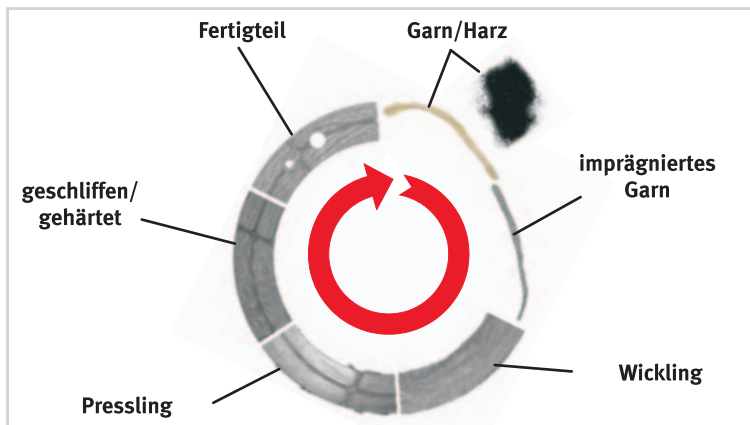


Bild 6 Fertigungsfolge eines gewickelten Belags

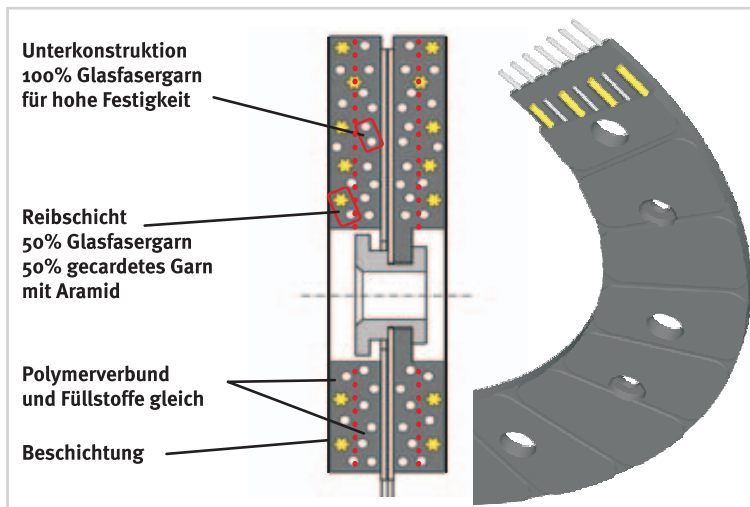


Bild 7 Aufbau des Belags LuK C3002 als gewickelter Belag in zwei Schichten

Entwicklungsziel ist, einen ausgewogenen Kompromiss zwischen den verschiedenen Anforderungen an den Belag darzustellen.

Gewickelter Kupplungsbelag mit Funktionstrennung

Das Ergebnis der Belagentwicklung ist ein ausgewogener Kompromiss aller technischen Eigenschaften des Belags. Um weitere Freiheitsgrade bei der Entwicklung von Kupplungsbelägen zu erlangen, kann ein Belag aus mehreren Funktionsbereichen dargestellt werden.

Die Unterkonstruktion des Belags bildet die Basis für Formstabilität und Festigkeit und wird diesbezüglich optimiert. Die dem Reibpartner zugewandte obere Schicht kann gezielt bezüglich Verschleiß und Reibwertverhalten tribologisch optimiert werden.

Durch eine hauchdünne, spezielle Oberflächenschicht wird von Beginn an das volle Reibwertniveau erreicht. Die übliche Einlaufphase entfällt.

Die Festigkeit und das Verschleißverhalten werden maßgeblich von den verwendeten Faserarten beeinflusst. Ober- und Unterkonstruktion unterscheiden sich daher in den Garnarten, die unterschiedliche Faserstrukturen aufweisen, während für beide Lagen das gleiche Bindemittel mit den gleichen Füllstoffen verwendet wird. Das Durchmischen entlang der Trennebene wird gezielt genutzt, um eine optimale Verbindung sicher zu stellen.

Der Belag C3002 erreicht mit dieser Technologie überlegene Festigkeitswerte, auch nach dauerhafter hoher thermischer Belastung, bei gleichzeitig sehr guten tribologischen Eigenschaften.

Massegepresstes Belagkonzept der 2. Generation

Der massegepresste und organisch gebundene Kupplungsbelag ist chemisch gesehen gleich aufgebaut wie der gewickelte Kupplungsbelag. Es gibt zwei prinzipbedingte Unterschiede. Der Duroplast-Elastomer-Materialverbund besteht aus einer trockenen Pulvermischung statt aus einer flüssigen Lösung. Ferner werden die Verstärkungsfasern nicht in der Form von Garnen, sondern ungerichtet als Stapelfasern in diese trockene Mischung eingebracht. Ein Stahlblech im Belag stellt die Formstabilität und die Festigkeit sicher (Bild 8).



Bild 8 Aufbau des Belags LuK RCF-1 mit Stahlträger

Bauraumoptimiertes Belagkonzept „Slim Disc“

Die hohe Leistungsdichte, besonders bei Front-Quer-Anwendungen, erfordert Kupplungen mit kompakten äußeren Abmessungen und hoher Wärmekapazität. In vielen Fällen stellt die Dicke der Anpressplatte einen Kompromiss dar zwischen notwendiger Wärmekapazität und verfügbarem Platz. Dünnere Kupplungsscheiben, und damit Beläge, tragen über dickere Anpressplatten zu einer robusteren Kupplung bei.

Die Entwicklung des „Slim Disc“-Konzepts von LuK trägt diesen Anforderungen Rechnung. „Slim Disc“ verbindet die von LuK entwickelte Technologie des stahlblechverstärkten, massegepressten Belags mit einem neuartigen Befestigungskonzept. Die Beläge behalten über das gesamte Temperaturspektrum ihre parallele Form. Dies wird durch die rückwärtige Laschenverbindung zwischen den Belagträgern sichergestellt.

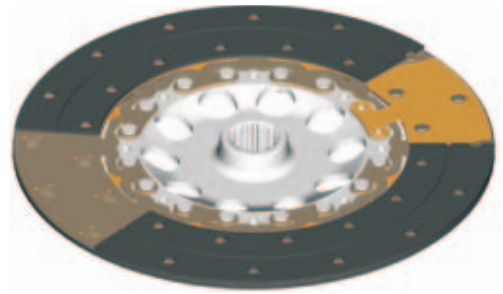


Bild 9 Slim Disc-Konzept mit radial innen liegenden Belagnieten

Bei gleichbleibendem Verschleißvolumen können so etwa 2 mm Bauraum gewonnen werden. Die damit möglichen dickeren Gegenreibflächen von Anpressplatte und Schwungrad tragen entscheidend zu einer robusteren Kupplung bei.

Konzept für hohe Temperaturen „Slim Disc“ HPF

Mit der Entwicklung des neuen Werkstoffsystems HPF (High Performance Facing) auf der Basis eines besonders temperaturbeständigen Duroplasts und des bereits beschriebenen neuen Scheibenkonzepts ist es LuK gelungen, eine Kupplungsscheibe darzustellen, die auch bei hohen Temperaturen zuverlässig funktioniert und dabei alle anderen Anforderungen an einen Belag erfüllt.

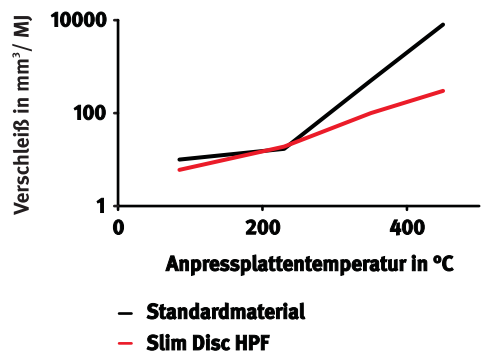


Bild 10 Vorteil des Hochtemperaturwerkstoffs HPF

Die Sprödigkeit und die Prozesstechnologie legen nahe, das Belagmaterial in Belagsegmenten, sogenannten Pads, herzustellen. Wie beim „Slim Disc“-Konzept wird die Formstabilität

unter Temperatur durch eine Laschenverbindung sicher gestellt und die Pads werden radial innen an der Kupplungsscheibe befestigt (Bild 11).

Neben der thermischen Optimierung der Kupplung durch eine dickere Anpressplatte erlaubt das HPF-Konzept so hohe Temperaturen an den Reibflächen und in der Umgebungsluft, dass die Temperaturbeständigkeit des Belages nicht mehr der limitierende Faktor für den Wärmehaushalt der Kupplung ist.

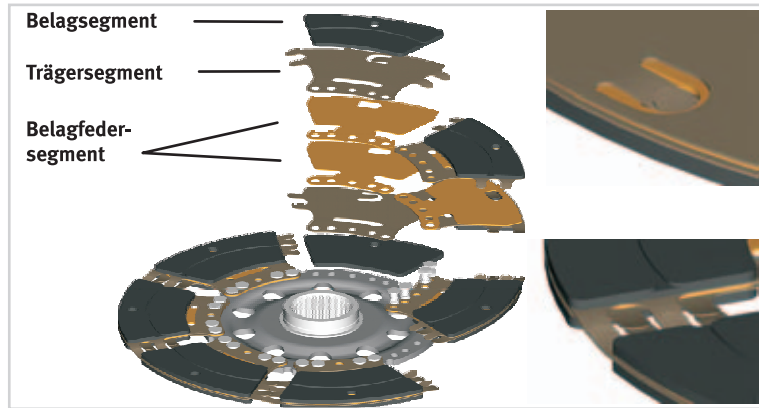


Bild 11 Aufbau des Hochtemperaturkonzepts Slim Disc HPF

Weitere Belagtechnologien

Sinterwerkstoffe

Sinterwerkstoffe finden Anwendung in Traktoren und schweren Nutzfahrzeugen. Sie werden verwendet, wenn ausgezeichnete Temperaturbeständigkeit und hohe Reibwerte gewünscht werden. Massive Schwächen im Anfahrkomfort und im Gegenmaterialverschleiß setzen sehr enge Grenzen für die Verwendbarkeit.

Kohlenstoff-Faser-Verbundwerkstoffe

Kohlenstoff-Faser-Verbundwerkstoffe zeigen eine sehr interessante Eigenschaft. Der Reibwert steigt über Temperatur an, besonders oberhalb 300 °C. Die Kostensituation und das Verschleißverhalten gegen herkömmliche Gegenmaterialien sind aber problematisch. Daher finden Kohlenstoff-Faser-Verbundwerkstoffe nur Anwendung im Rennsport und im Flugzeugbau.

Keramikwerkstoffe

Keramikwerkstoffe auf der Basis von Silikaten, Karbiden oder Oxiden befinden sich noch im experimentellen Stadium. Keramikwerkstoffe werden hauptsächlich anstelle von Gusseisen als Werkstoff für Gegenreibflächen zum Einsatz kommen, während das verschleißende Reibelement weiter aus einem organischen Materialverbund besteht. Interessante neue Ansätze mit anorganischen Reibelementen zeigen derzeit noch zu hohen Abrasivverschleiß.

Zusammenfassung

LuK bietet ein sehr breites Spektrum von Belagtechnologien an; von der sehr breit genutzten Basistechnologie über sehr wirtschaftliche neue Ansätze bis zu hochwertigen Lösungen für sehr anspruchsvolle Anwendungen. Damit können für den jeweiligen Anwendungsfall maßgeschneiderte Lösungen dargestellt werden.

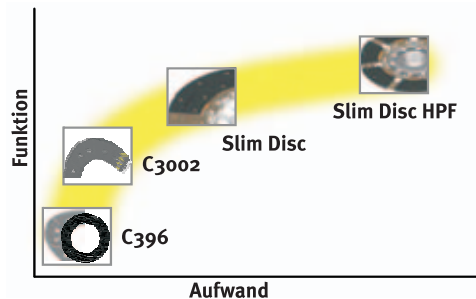


Bild 12 Produktspektrum für Kupplungsbeläge von LuK

Ausblick

Die Entwicklung von Kupplungen und Belägen ist enger zusammengedrückt und die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Chemikern und Konstrukteuren hat zu neuen Lösungsansätzen mit konkretem Potenzial für Serienanwendungen geführt.

Weitere Lösungsansätze sind derzeit im ersten Entwicklungsstadium und werden zu weiteren technisch und wirtschaftlich interessanten Belagalternativen führen.