

Rupfen - Ursachen und Abhilfen

o. Prof. Dr.-Ing. **Albert Albers**

Dipl.-Ing. **Daniel Herbst**

Definition Rupfen

Unter Rupfen sollen per definitionem Schwingungen verstanden werden, die während der Schlupfphase der Kupplung im Antriebsstrang eines Kraftfahrzeugs auftreten und im Bereich der Kupplung erzeugt werden. Diese Begriffsbestimmung ist bewußt allgemein gehalten, sie macht keine Aussagen über die Ursachen der Schwingungen. Sie wird auch von anderen Autoren so verwendet [1].

Der Antriebsstrang kann auch bei **geschlossener Kupplung** in einem ähnlichen Frequenzbereich wie beim tatsächlichen Rupfen schwingen. Dieses „Pseudo-Rupfen“ wird z. B. durch extrem niedertouriges Fahren, defekte Motorlager oder schlagartiges Einkuppeln hervorgerufen und häufig mit dem eigentlichen Rupfen verwechselt.

Entstehung und Erscheinungsform des Rupfens

Rupfen entsteht, wenn bei einer schlupfenden Kupplung periodische Wechseldrehmomente erzeugt werden, die im Eigenfrequenzbereich des durch die Kupplung dynamisch getrennten Antriebsstrangs liegen. Die erste Eigenfrequenz von PKW-Antriebssträngen liegt unter diesen Bedingungen zwischen 8 und 12 Hz und damit bei einer Motordrehzahl von ca. 480 bis 720 U/min (bei einer Anregung 1. Ordnung).

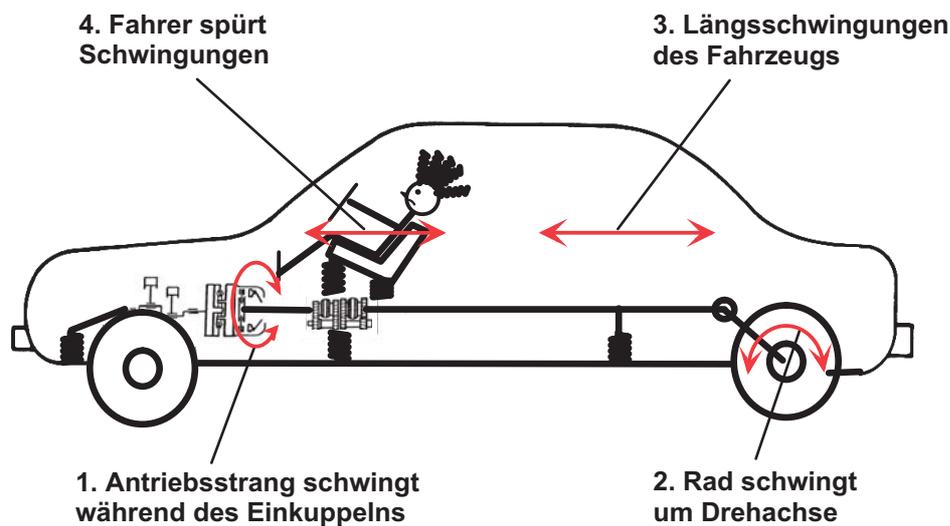


Bild 1: Entstehung und Erscheinungsform des Rupfens

Die Antriebsräder wandeln die Drehschwingungen des Antriebsstrangs in eine Längsschwingung des Fahrzeugs. Das Rupfen äußert sich dann als Schwingung in Längsrichtung des Fahrzeugs und wird über die Bedienelemente und den Sitz auf den Fahrer übertragen. Dieser empfindet unangenehme Vibrationen und Schwingungen (s. Bild 1), die auch noch mit Geräuschen verbunden sein können.

Im Resonanzbereich reichen schon kleinste Erregungsamplituden aus, um starke Schwingungen des Antriebsstrangs zu erzeugen. So können z. B. bei bestimmten Antriebssträngen mit einem maximal übertragbaren Moment der Kupplung von 500 Nm schon Amplituden von 1 Nm, also 0,2 % (!), Schwingungen anregen und deutlich spürbares Rupfen erzeugen.

Physikalischer Hintergrund der Rupfschwingungsarten

Es gibt zwei unterschiedliche Arten Rupfschwingungen:

- **selbsterregtes** Rupfen (Reibschwingungen) und
- zwangserregtes Rupfen

Ursache des **selbsterregten Ruppens** ist eine Änderung des Reibwertes in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit. Bild 2 stellt ein Ersatzmodell hierfür dar: Ein Körper wird von seiner Gewichtskraft auf das Band gedrückt. Dadurch entsteht zwischen Körper und Band Reibung. Wird das Band in Bewegung gesetzt, nimmt es den Körper aufgrund der Haftreibung mit und lenkt die Feder aus. Ab einer bestimmten Federauslenkung bleibt der Körper stehen, weil die Federkraft der Haftreibung entspricht. Zwischen Körper und dem laufenden Band tritt eine Relativbewegung auf. Ist nun der Gleitreibwert des Kontaktes niedriger als der Haftreibwert, sinkt plötzlich die Reibkraft und die Feder zieht den Körper solange über das Band zurück, bis wieder Haften auftritt und der Körper erneut nach vorne gezogen wird. Der Vorgang beginnt von vorne - der Körper schwingt.

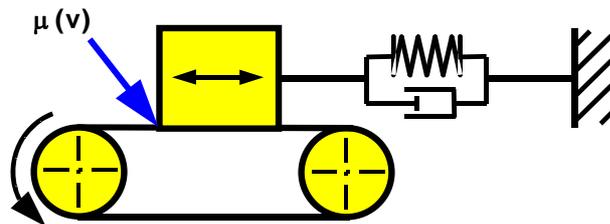


Bild 2: Ersatzmodell für selbsterregte Schwingung

Eine Schwingung kann demnach nur auftreten, wenn der Gleitreibwert niedriger ist als der Haftreibwert bzw. der Gleitreibwert mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit abfällt, weil sich sonst ein stationärer Gleichgewichtszustand ausbildet. Nimmt der Gleitreibwert mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit ab, so wirkt der Reibkontakt zusätzlich anregend, da die Reibkraft - die der Federkraft entgegenwirkt - beim Einsetzen des Gleitens absinkt und der Körper durch die Federkraft stärker beschleunigt wird.

Die charakteristische Größe stellt in diesem Fall der Reibwertgradient dar. Er ist definiert als die Steigung des Reibwerts über der Gleitgeschwindigkeit:

$$\mu' = \frac{d\mu}{d\Delta v}$$

Es sind drei Fälle möglich (s. Bild 3):

1. Der **Reibwert fällt** mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit: Dem System wird beim Ankuppeln Energie zugeführt, d. h. es wird angeregt. Dieser Fall wurde diskutiert.
2. Der **Reibwert ist unabhängig** von der Gleitgeschwindigkeit: Der Reibkontakt verhält sich neutral, der Körper nimmt sofort einen stationären Gleichgewichtszustand ein
3. Der **Reibwert steigt** mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit: Der Reibkontakt dämpft, weil beim Zurückschwingen die Gleitgeschwindigkeit und damit die Reibkraft steigt, die den Körper bremst. Dadurch wird dem System Energie entzogen (bei $\mu_H > \mu_G$). Auch hier nimmt der Körper einen stationären Gleichgewichtszustand ein.

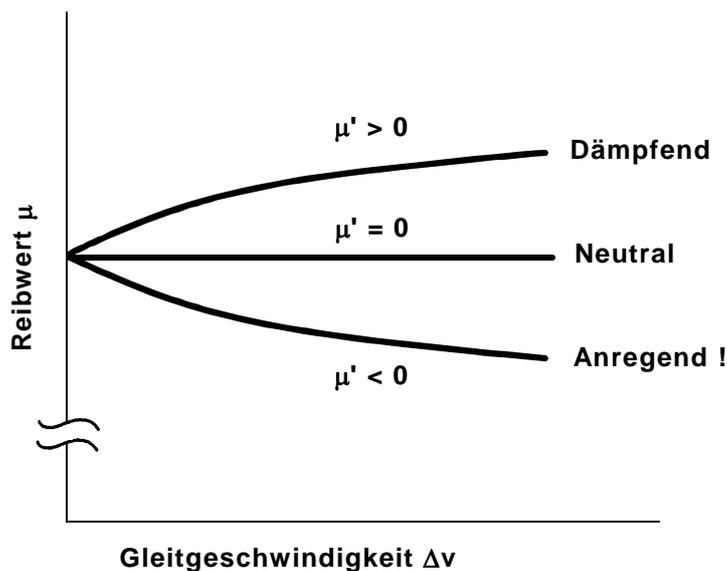


Bild 3: Prinzipielle Reibwertverläufe

Zwangsangeregtes Rupfen ist die Folge einer äußeren Erregerquelle mit periodischer Anregung. Auch hier kann das Bandmodell zum Verständnis des Anregungsmechanismus dienen (s. Bild 4). Auf den im Bild dargestellten Körper wirkt eine sich periodisch ändernde Normalkraft. Durch die sich damit ändernde Reibkraft zwischen Körper und Band ändert sich auch die momentane Federkraft und damit die Gleichgewichtslage des Körpers auf dem Band. Der Körper schwingt auf dem Band mit der Erregerfrequenz. Ist diese gleich der Eigenfrequenz des Körper-Feder-Systems, kommt es zur Resonanzüberhöhung und damit zu großen

Schwingungsamplituden des Körpers. Das zwangserregte Rumpfen kann natürlich auch bei neutralem Reibwertverhalten auftreten, da es durch eine äußere Kraftmodulation angeregt wird. Die dämpfende Wirkung des mit der Gleitgeschwindigkeit steigenden Reibwertes ist natürlich wieder gegeben, da sie einer Vergrößerung der Schwingungsamplituden in Resonanznähe entgegenwirkt.

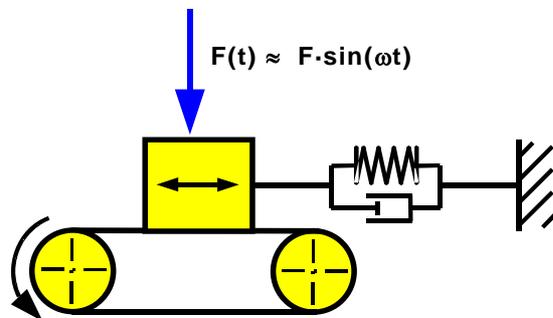


Bild 4: Ersatzmodell für erzwungene Schwingung

Rupfen im Fahrzeug

Messung und Bewertung des Rumpfens

Die Erfassung von Rumpferscheinungen in Fahrzeugen kann durch Messung und subjektive Beurteilung erfolgen.

Bei der objektiven Messung nimmt ein Beschleunigungssensor in der Nähe des Fahrers (z. B. an der Sitzschiene) die Längsschwingungen des Fahrzeugs auf. Zugleich erfolgt sinnvollerweise eine Drehzahlmessung von Getriebeeingang und Motor. Bild 5 zeigt Messungen der Längsbeschleunigung des Fahrzeugs (oberes Diagramm) sowie von Motor- und Getriebedrehzahl (unteres Diagramm). Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, daß die Messung unabhängig vom Empfinden des Fahrers ist.

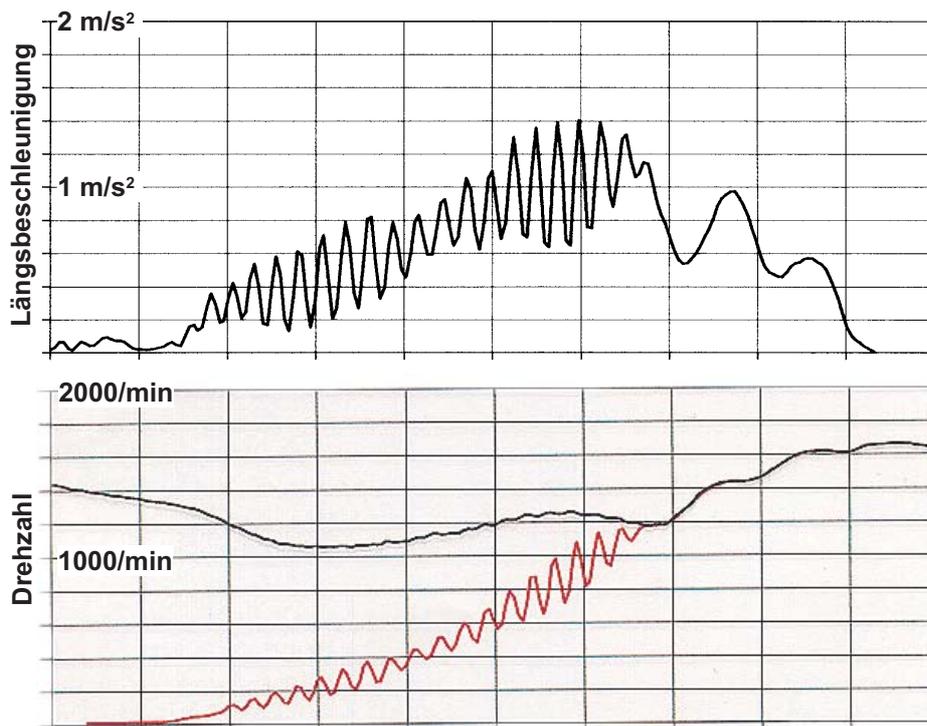


Bild 5: Längsbeschleunigung Fahrzeug (oben), Motor- und Getriebedrehzahl (unten)

Unabdingbar ist aber die subjektive Bewertung des Ruffens durch einen erfahrenen Fahrer mit einem Benotungssystem. Der Fahrer vergibt z. B. für das Fahrzeug die Noten 1 bis 10, wobei die Note 10 einem absolut rupffreien Fahrzeug entspricht. Die subjektive Bewertung hat den Vorteil, daß sich das Empfinden der Schwingung und der Geräusche auf den Fahrer widerspiegelt. Nur dieses subjektive Empfinden ist kundenrelevant. Aufgrund allgemein gestiegener Komfortansprüche und den großen Verbesserungen auf dem gesamten Gebiet des Fahrzeuggeräusch- und Schwingungsverhaltens (NVH) in den letzten Jahren wird die Beurteilung des Ruffens immer kritischer. Die Bewertungsskala hat sich verschoben. Bei der subjektiven Beurteilung muß natürlich die begrenzte Trennschärfe und die Abhängigkeit vom individuellen Beurteiler berücksichtigt werden. Aussagen müssen daher bei grundlegenden Untersuchungen statistisch abgesichert werden. Eine Korrelation von Beschleunigungsmessungen und subjektiver Beurteilung ist näherungsweise möglich. Die **fahrzeug-unabhängige**, objektiv vergleichbare Messung von Rupfschwingungen mit tatsächlicher Korrelation zum subjektiven Empfinden ist aber bisher noch nicht vollständig gelöst.

Modellbildung

Der Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen kann durch eine Drehschwingerkette bestehend aus Drehmassen und Kopplungen (Federn, Dämpfer und Reibkontakte) dargestellt werden. Daraus läßt sich ein Ersatzmodell aus sechs Drehmassen erstellen, das für die Simulation geeignet ist (s. Bild 6).

Die wesentlichen Einflußgrößen sind:

- Motor (Kurbelwellenaxialschwingungen)
- Kupplung mit Betätigung
- Dämpfung im Antriebsstrang
- sämtliche Übertragungselemente zwischen Antriebsstrang und Fahrzeug (Reifen, Radaufhängungen, ...)
- Fahrzeugaufbau (als träge Masse)
- Übertragung vom Fahrzeug auf den Fahrer (Sitz, ...)

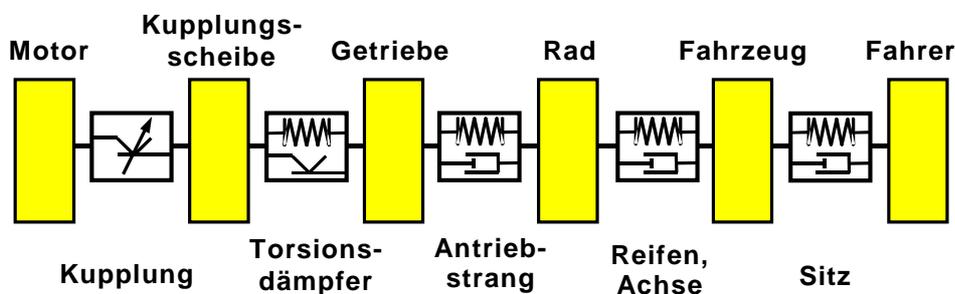


Bild 6: Sechs-Massenmodell

Die in den folgenden Abschnitten dargestellten Simulationen wurden mit dem von LuK entwickelten Programm „TORS“ durchgeführt [3]. Bei ihm werden Drehmassen mit Koppellelementen wie Federn, Dämpfungen und Coulomb'sche Reibung miteinander verbunden. Die Simulationsmodelle geben die das Rupfen auslösenden Erregungsmechanismen im Bereich der Kupplung wider, und bilden die Federungs- und Dämpfungseigenschaften sowie die Eigenfrequenzen des Antriebsstrangs ab. Das erlaubt detaillierte Parametervariationen von Kupplung und Antriebsstrang. Gezielt lassen sich einzelne Parameter ohne störende Zusatzeinflüsse modulieren. Die gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Meßergebnissen zeigen z. B. Bild 9 und Bild 10.

Selbsterregtes Rupfen (Belagrupfen)

Wie erläutert, treten selbsterregte Schwingungen auf, wenn beim Einkuppeln während der Rutschphase mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit im Reibkontakt der Reibwert abnimmt, der Reibwertgradient also negativ ist.

Die Reibwertgradienten heute üblicher Beläge liegen zwischen $\mu' = 0$ s/m und $\mu' = -0,015$ s/m. Das Bild 7 zeigt reale Reibwertverläufe von Kuppelungsbelägen. Es wird deutlich, daß die hier diskutierten und relevanten Reibwertgradienten sehr niedrig sind und keineswegs mit den oft in Prinzipdarstellungen (s. Bild 3) verwendeten Übersteigerungen bewertet werden dürfen.

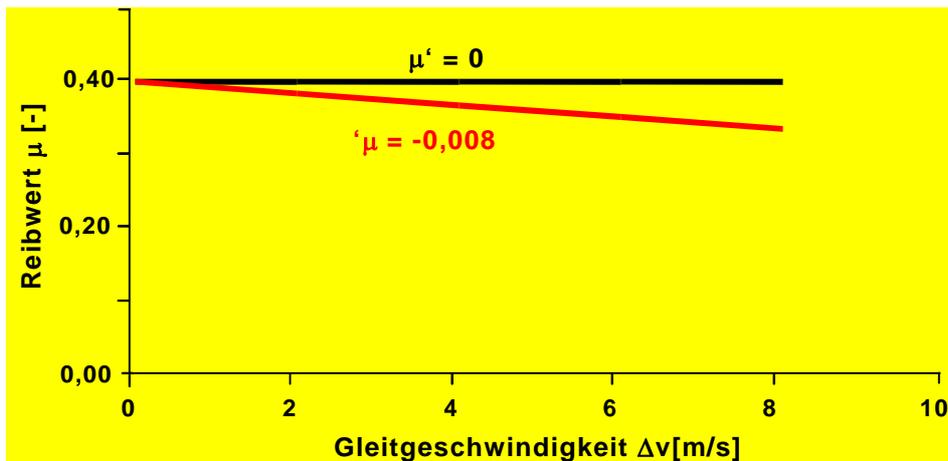


Bild 7: Reibwertverläufe

Bei einigen neuentwickelten Belägen werden auch schon positive Gradienten erreicht. In der Praxis haben aber auch die als rupfunempfindlich geltenden Beläge bei bestimmten Betriebszuständen einen fallenden Reibwert und damit ein Erregungspotential. Auf der anderen Seite gibt es keine dämpfungsfreien Antriebsstränge. Deshalb liegt immer eine gewisse Restdämpfung vor, so daß ein Belag mit nur leicht fallendem Reibwert zu einem insgesamt rupffreien Fahrzeug führen kann. Für die derzeit gebauten Fahrzeuge mit ihrer Antriebstrangdämpfung ist ein leicht negativer Reibwertgradient von $\mu' = -0,002$ s/m unkritisch. Steigt der Reibwert im relevanten Gleitgeschwindigkeitsbereich stark an, tritt Dämpfung auf, die sogar das zwangsangeregte Rupfen beseitigen kann. Deshalb ist ein stark positiver Reibwertgradient anzustreben.

Aber selbst in solchen Fällen kann das Verhalten sofort wieder umkippen, wenn Öl, Fett oder Wasser in den Reibkontakt gelangt. Die Wirkung von Feuchtigkeit läßt sich folgendermaßen erklären: Bei hohen Gleitgeschwindigkeiten wird mehr Wärme im Reibkontakt erzeugt. Es bilden sich Dampfblasen, die die Reibpartner aufschwimmen lassen. Dadurch wird der Reibwert vermindert. Die früher verwendete Rostschutzimprägnierung mit Natriumnitrit verhindert zwar das Festrostern, ist aber hygroskopisch. Besonders nach längerem Stillstand bei feuchter Witterung kann dann teilweise starkes Rupfen auftreten, da das gebundene Kristallwasser plötzlich frei wird. Nach einigen Anfahrten - nach Verdampfen des Wassers - verschwindet das Rupfen wieder. Da das Natriumnitrit nur an der Oberfläche aufgebracht wird, tritt dieser Effekt bei länger gelaufenen Belägen nicht mehr auf. Es ist zu vermuten, daß bei Verunreinigungen mit Öl oder Fett ein ähnlicher Wirkmechanismus auftritt wie bei Wasser.

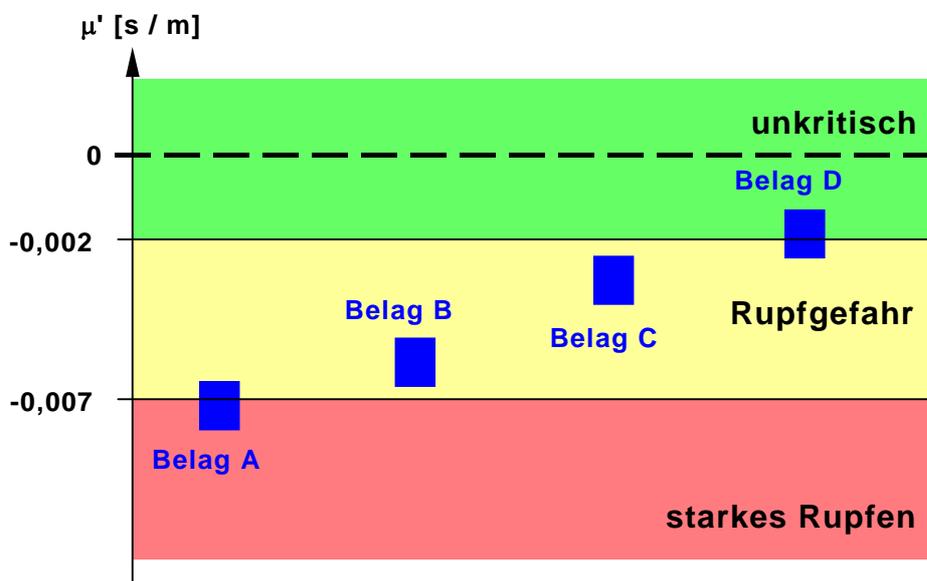


Bild 8: Reibwertgradienten für verschiedene Beläge

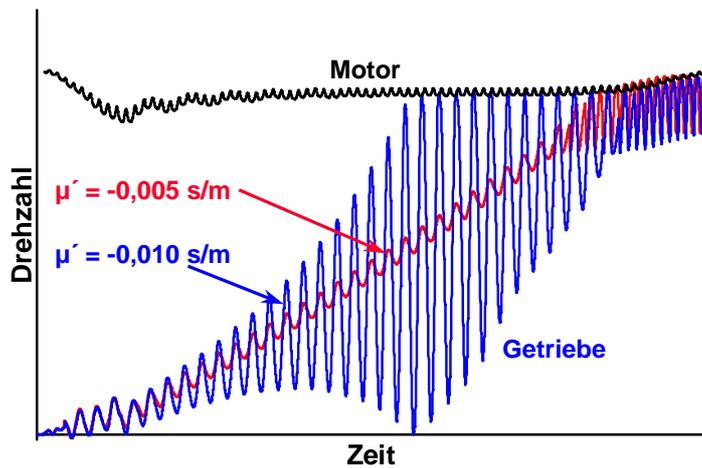


Bild 9: Belagrupfen (Simulation)

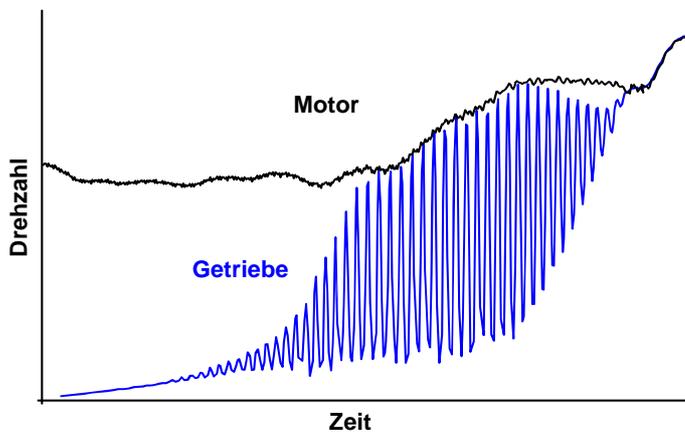


Bild 10: Belagrupfen (Meßergebnis)

Bild 9 zeigt die simulierten Drehschwingungen am Getriebeeingang bei Reibwerten von $\mu' = -0,010 \text{ s/m}$ und bei $\mu' = -0,005 \text{ s/m}$. Beim stärker fallenden Reibwert ist zu erkennen, daß die Amplitude sich immer weiter aufschaukelt, bis sie durch die Motordrehzahl begrenzt wird. Beim Reibwertgradienten von $\mu' = -0,005 \text{ s/m}$ halten sich Antriebstrangdämpfung und Belaganregung annähernd im Gleichwicht. Zum Vergleich ist auf Bild 10 das nahezu gleiche Meßergebnis einer reibwertinduzierten Rupschwingung dargestellt.

Zwangserregtes Rupfen

Bauteilabweichungen und Kurbelwellenaxialschwingungen führen zu periodischen Anpreßkraftschwankungen und damit zu periodischen Momentenschwankungen. Die Folge sind erzwungene Schwingungen.

Um eine Zwangsanregung zu erzeugen, müssen mindestens zwei Abweichungen auftreten.

An einem einfachen Modell (s. Bild 11) soll dies erläutert werden. Eine Bauteilabweichung - hier als Erhebung der Anpreßplatte dargestellt -, die mit der Antriebsdrehzahl n_1 umläuft und auf der abtriebsseitigen Kupplungsscheibe mit einer Relativdrehzahl gleitet (s. „oben“, „unten“ in Bild 11) , führt noch zu keiner Anpreßkraftschwankung. Kommt noch eine zweite Abweichung dazu - als Winkelversatz dargestellt -, schwankt die Anpreßkraft während der Rutschphase je nach Stellung der Anpreßplatte relativ zur abtriebsseitigen Kupplungsscheibe. Die Abtriebsdrehzahl n_2 wird dadurch ungleichförmig.

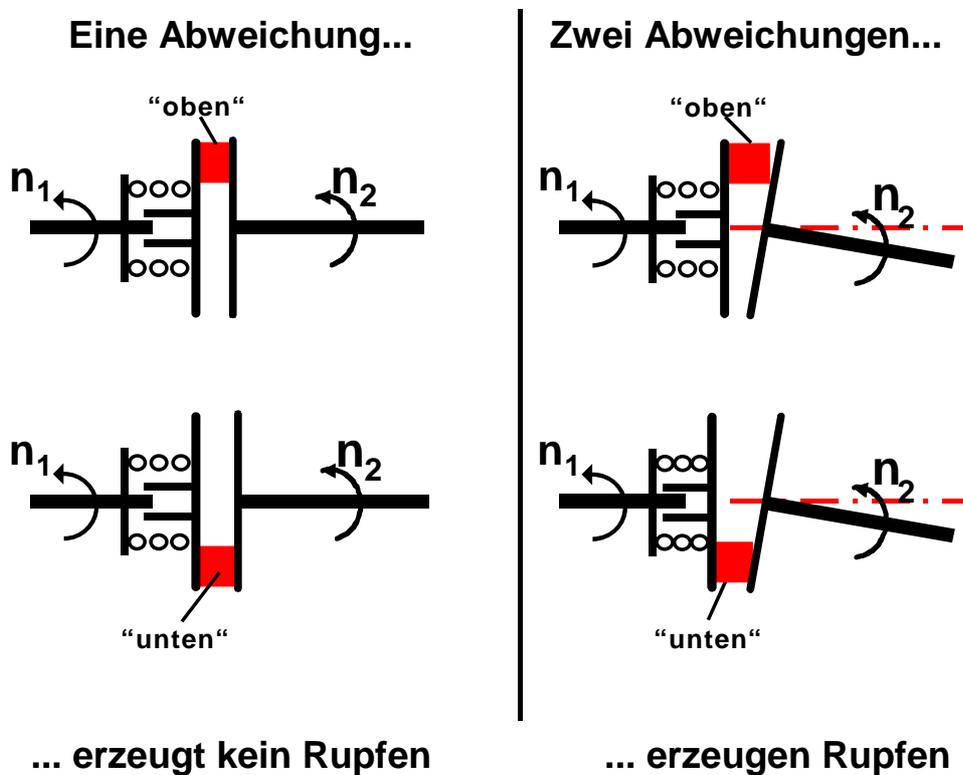


Bild 11: Modellbetrachtung für zwangserregtes Rupfen

Je nach Kombination der verschiedenen geometrischen Störungen können

- absolut- (motor-) drehzahlabhängiges
- differenzdrehzahlabhängiges und
- getriebedrehzahlabhängiges

Rupfen erzeugt werden.

Das **motordrehzahlabhängige Rupfen** wird z. B. verursacht durch Kurbelwellenaxialschwingungen oder Schrägstellung der Tellerfeder **und** schiefes Ausrücken der Kupplung über das Ausrücksystem (s. Bild 12). Die Frequenz der Zwangserregung ergibt sich dabei aus der absoluten Motordrehzahl.

Ein Ausrücklagerweg von $\Delta s = 0,01$ mm führt bei einem maximal übertragbaren Moment der Kupplung von $M_{\max} = 500$ Nm zu einer Momentenänderung von ca. 1 Nm (s. Bild 13). Eine Schwankung des Anpreßplattenweges wirkt sich noch stärker aus (s. Bild 14). Die Rupfanregung steigt bei gleicher geometrischer Störung mit dem übertragbaren Moment. Stärker motorisierte Fahrzeuge sind also prinzipiell stärker durch Rupfen gefährdet.

Das motordrehzahlabhängige Rupfen kann während des gesamten Anfahrvorgangs auftreten (s. Bild 15).

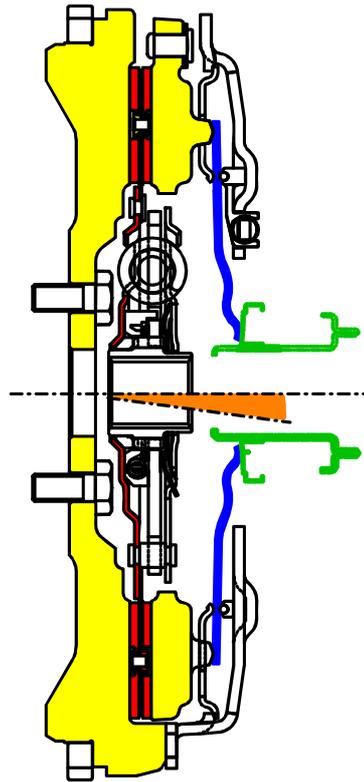


Bild 12: Geometrische Störungen im Kupplungssystem mit Betätigung:

- Axialschwingungen der Anpreßplatte (gelb);
- periodische Zungenbewegung der Tellerfeder (blau);
- Abstützung am Ausrücklager (grün);
- Parallelitätsabweichungen zwischen Schwungrad und Anpreßplatte (gelb);
- Schiefabhub der Kupplungsscheibe (rot); Lageabweichungen der Drehachsen

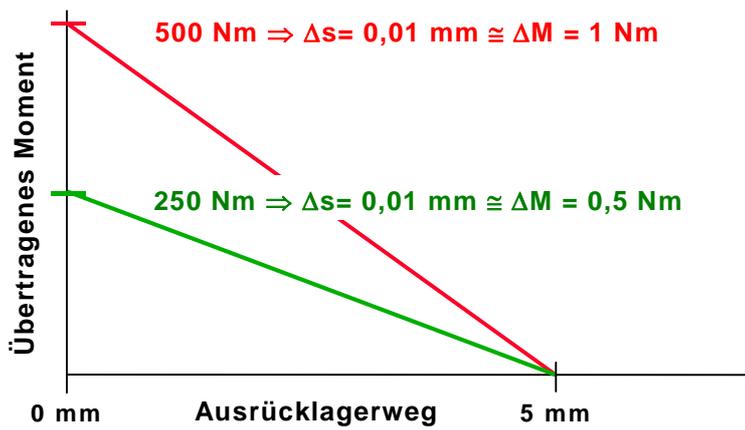


Bild 13: Abhängigkeit Kupplungsmoment / Ausrücklagerweg

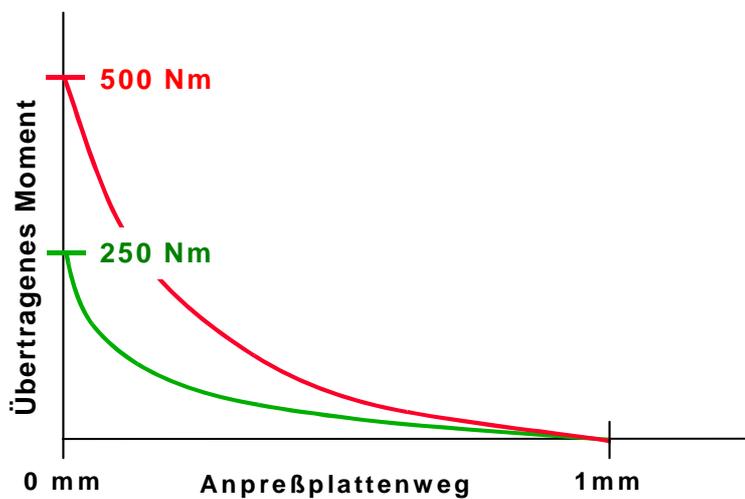


Bild 14: Abhängigkeit Kupplungsmoment / Anpreßplattenweg

Das **differenzdrehzahlabhängige Rupfen** wird durch Parallelitätsabweichungen an der Kupplungsdruckplatte, Abweichungen an der Kupplungsscheibe und Winkelversatz zwischen Kurbelwelle und Getriebeingangswelle hervorgerufen (s. Bild 12). Es führt während des Einkuppelns nur solange zum Rupfen, wie die Drehzahldifferenz zwischen Kupplungsscheibe und Anpreßplatte im Resonanzbereich liegt (s. Bild 16).

Das **getriebedrehzahlabhängige Rupfen** tritt nur in Kombination motor- und differenzdrehzahlabhängiger Abweichungen auf. Es stellt von allen drei zwangsangeregten Rupfformen die harmloseste dar, da der Resonanzbereich erst bei sehr kleiner Drehzahldifferenz - kurz bevor die Kupplung schließt - durchfahren wird (s. Bild 17).

Die Abweichungen bewegen sich normalerweise innerhalb der z. T. sehr eng festgelegten Toleranzbereiche in einer statistischen Verteilung und beeinflussen sich gegenseitig.

Das zwangsangeregte Rupfen ist daher vor allem als statistisches Problem zu sehen, wie zwei prinzipiell mögliche Extremfälle verdeutlichen sollen:

- Sämtliche Bauteile weichen nur geringfügig vom Idealwert ab. Die Wirkungen der Abweichungen summieren sich aber zufällig und erzeugen damit starkes Rupfen.
- Einige Abweichungen liegen an der Toleranzgrenze. Die Wirkungen heben sich aber zufällig gegenseitig auf, es tritt kein Rupfen auf.

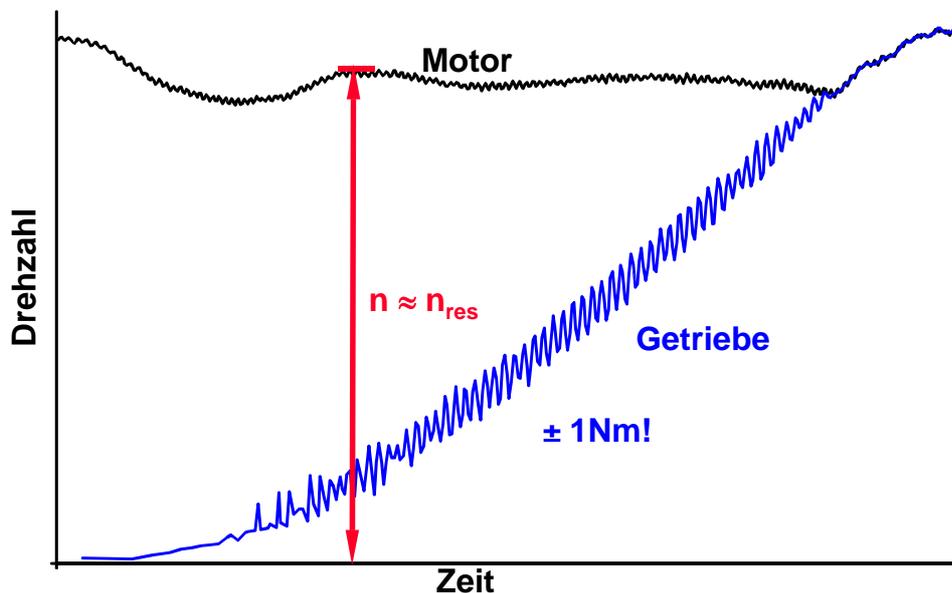


Bild 15: Motordrehzahlabhängiges Rupfen (Meßergebnis)

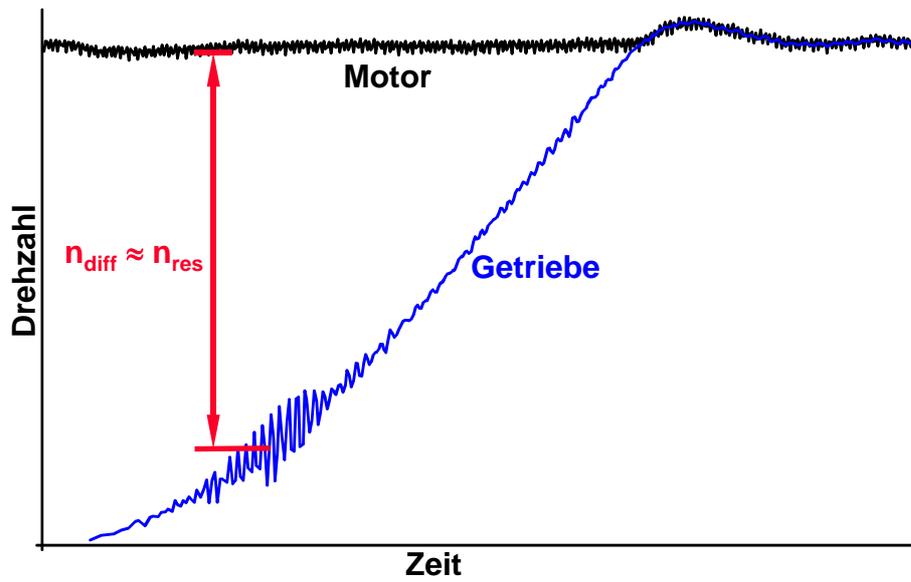


Bild 16: Differenzdrehzahlabhängiges Rupfen (Meßergebnis)

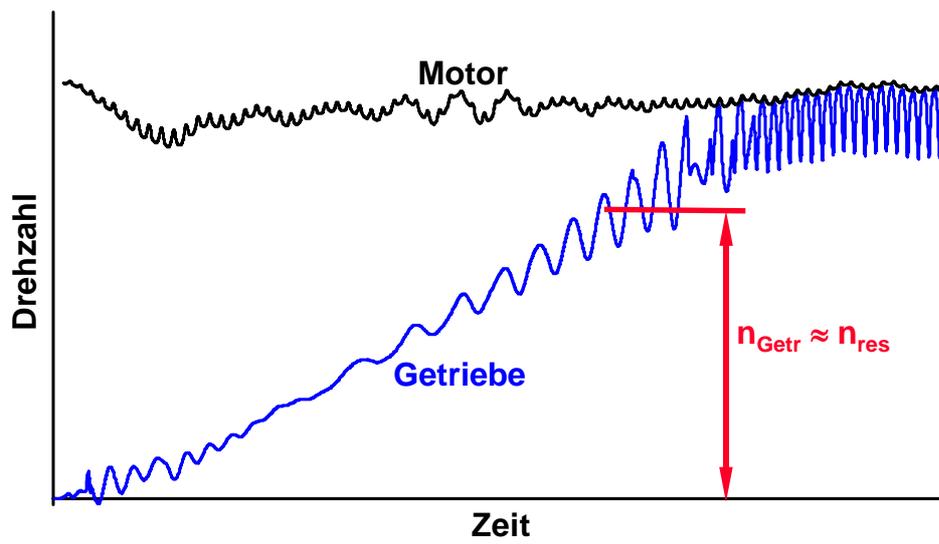


Bild 17: Getriebedrehzahlabhängiges Rupfen (Simulation)

Einfluß der Antriebsstrangdämpfung

Eine hohe Dämpfung im Antriebsstrang reduziert die Ruffamplituden beim zwangserregten Ruffen. Im Fall des Belagruffens kann eine hohe Antriebsstrangdämpfung das Ruffen nahezu vollständig beseitigen (s. Bild 18), wenn der Dämpfungswert die Anregung aus dem Belag überwiegt. Die Antriebsstrangdämpfung liegt bei heutigen Fahrzeugen zwischen 0,05 und 0,10 Nms. Sie basiert aber wesentlich auf Reibung (Getriebe, Lager, Dichtungen, ...) im gesamten Antriebsstrang. Dadurch sind aber auch die Reibungsverluste höher. Da tendenziell im Kraftfahrzeugbau der Wirkungsgrad steigen und der Kraftstoffverbrauch sinken soll, nimmt die Dämpfung im Antriebsstrang immer weiter ab und die Ruffempfindlichkeit zu. Als Beispiel zeigt Bild 19 die Ruffnoten zweier Oberklassefahrzeuge gleichen Typs, aber verschiedener Modelljahre, bei denen die **Ruffanregung des Systems gleich war**. Die deutliche Verschlechterung der Ruffbenotung und der gemessenen Längsschwingung bei gleicher Ruffanregung zeigt die gestiegene Ruffempfindlichkeit.

Dieser Zusammenhang ist bei der Lastenheftdefinition für neue Fahrzeugmodelle zu berücksichtigen. Insbesondere muß durch frühzeitige Gesamtbetrachtung des Fahrzeugs und seines Antriebsstrangs die beste Lösung gefunden werden, da eine alleinige Optimierung der Kupplung nicht zu einem technisch und wirtschaftlich vertretbaren Ergebnis führt.

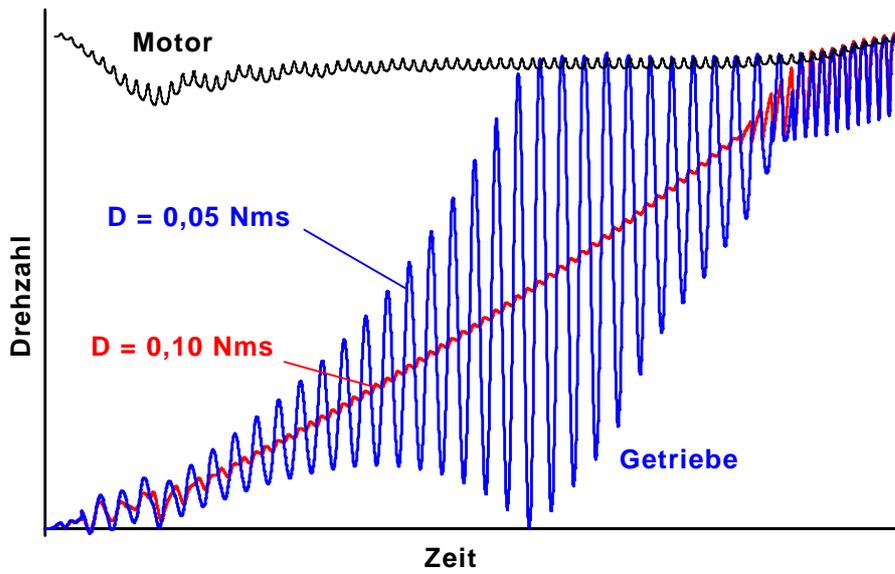


Bild 18: Auswirkungen unterschiedlicher Antriebsstrangdämpfung am Beispiel des Belagrupfens mit $\mu' = -0,010 \text{ s/m}$ (Simulation)

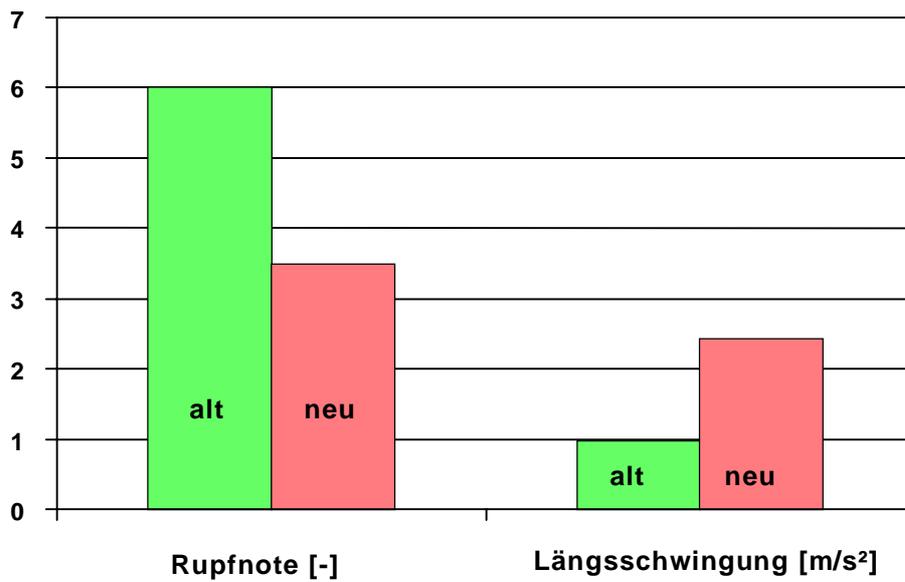


Bild 19: Vergleich altes und neues Modell gleichen Typs

Übertragung der Schwingungen auf die Karosserie

Die Schwingungen des Antriebsstrangs übertragen sich auf den Fahrzeugaufbau. Übertragungselemente sind in Reihenfolge des Kraftflusses (s. Bild 20):

- Motorlager
- Getriebelager
- Kardanwellenlager
- Reifen
- Achsaufhängungen

In mehreren Messungen wurde das Übertragungsverhalten zwischen Antriebsstrang und Aufbau verschiedener Fahrzeuge ermittelt. Offensichtlich ist die Übertragungsfunktion vom Fahrzeuggewicht abhängig. Außerdem wird sie von den o. g. Elementen beeinflusst, die üblicherweise alle aus Gummiwerkstoffen bestehen. Dadurch ist die Übertragungsfunktion nichtlinear.

Defekte Lager (vor allem Motor- und Kardanwellenlager) verstärken die Rumpfeigung wesentlich.

Beim Reifen (s. Bild 21) kommt als weitere wichtige Größe noch der Fahrbahnkontakt im Latsch (Reifenaufstandsfläche) hinzu. Dieser wurde bisher für die Torsions- und Längsschwingungsdynamik des Antriebsstrangs oft nicht ausreichend berücksichtigt. Hier liegt noch Forschungspotential für die nähere Zukunft. Forschungsarbeiten des Instituts für Maschinenkonstruktionslehre und Kraftfahrzeugbau beschäftigen sich mit dieser Problematik.

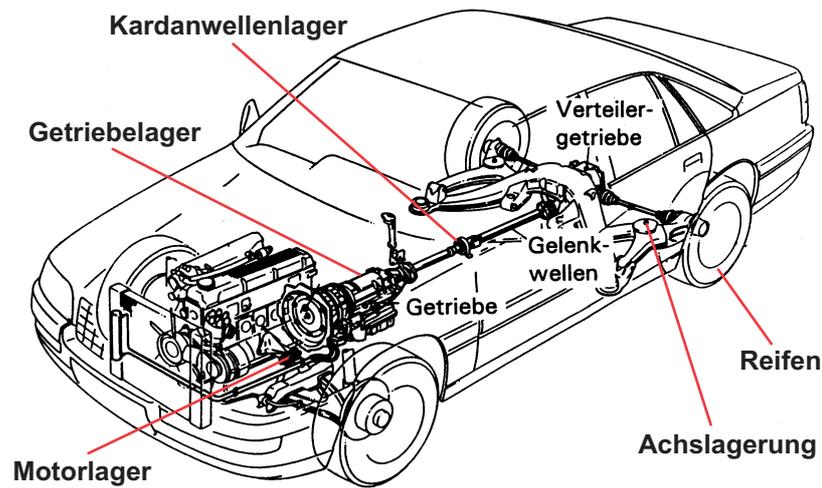


Bild 20: Übertragungselemente zwischen Antriebsstrang und Fahrzeugaufbau

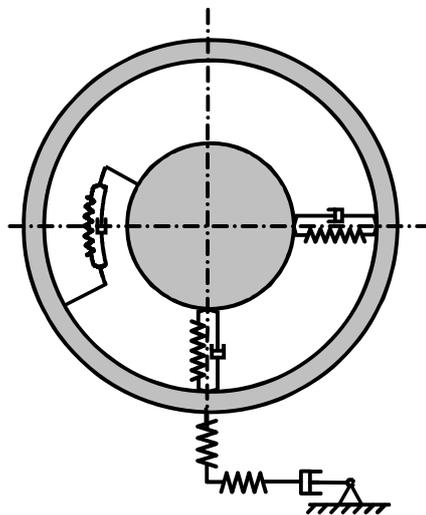


Bild 21: Übertragungen am Reifen

Schließlich sollte noch erwähnt werden, daß auch die Fahrzeugsitze einen großen Einfluß durch mehr oder weniger stark dämpfende Eigenschaften haben und damit das subjektive Empfinden beeinflussen.

Die vollständige Erfassung des Ruffens und seiner Auswirkungen auf den Fahrer kann nur durch weitere Verbesserung der Simulationsmodelle und durch Betrachtung der Übertragungsfunktion „Mensch“ gelingen.

Gegenmaßnahmen und ihre Grenzen

Reibwert

Ein Reibbelag mit steigendem Reibwertverlauf über der Gleitgeschwindigkeit hat dämpfende Eigenschaften. Serienmäßig hergestellte Reibbeläge weisen aber kein derartiges Verhalten über den gesamten Temperaturbereich auf.

Hat der Reibwertgradient im relevanten Gleitgeschwindigkeitsbereich einen ausgeprägt steigenden positiven Verlauf, läßt sich Rupfen vollkommen vermeiden. Wenn es gelingt, einen solchen Reibbelag zu entwickeln, könnten damit auch die zwangserregten Schwingungen reduziert werden. Es würde kein spürbares Rupfen mehr auftreten.

Die Entwicklung von trockenlaufenden Reibbelägen mit begrenzt positiven Reibwertgradienten sollte daher forciert werden. Dafür ist ein genaueres physikalisches und chemisches Verständnis der Reibpaarung in der Kupplung notwendig.

Weitere Einengung der Fertigungstoleranzen

Mit einer weiteren Einengung der Fertigungstoleranzen lassen sich nur die durch geometrische Bauteilabweichungen angeregten Schwingungen senken. Diese Methode verteuert den Fertigungsprozeß, weil eine Vielzahl von Toleranzen, die Einfluß auf das Rupfen haben, extrem verringert werden müssen, um zum gewünschten Ergebnis zu führen. Dabei kann diese Maßnahme das Rupfen nur mildern, aber nicht verhindern, sofern ein Belag mit rupfempfindlicher Qualität verwendet wird, weil damit nur das zwangserregte Rupfen reduziert wird.

Bei heutigen Kupplungen beträgt normalerweise die Geradheit in Umfangsrichtung für die Lauffläche der Anpreßplatte 0,1 mm. Eine Reduzierung dieses Wertes bedeutet einen erheblichen zusätzlichen Fertigungsaufwand, z. B. durch Schleifen der Oberflächen.

Weichere Belagfederung

Eine weichere Kennlinie der Belagfederung in der Kupplungsscheibe führt bei geometrischen Abweichungen der Kontaktpartner zu einer geringeren Variation der Anpreßkraft und damit des übertragenen Drehmomentes (s. Bild 22). Es ist also möglich, für gegebene Geometrieabweichungen die dadurch erzeugte Rupfanregung zu verringern. Die weichere Kennlinie kann mit Rücksicht auf die geometrischen Verhältnisse und die letztendlich

aufzunehmende Anpreßkraft nur in Teilbereichen realisiert werden. Die Auswirkungen auf das sonstige Systemverhalten der Kupplung muß berücksichtigt werden.

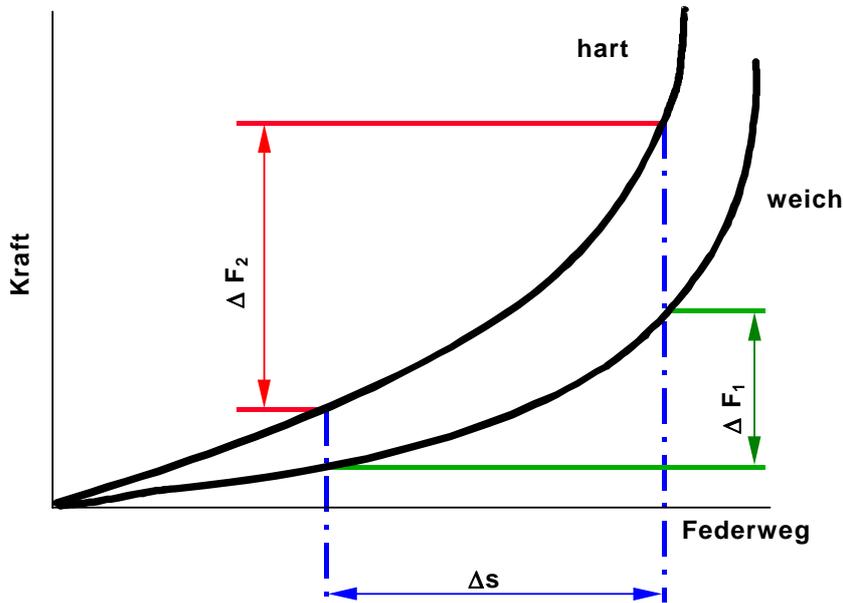


Bild 22: Kennlinien von Belagfedern

Dämpfung im Antriebsstrang

Eine hohe Dämpfung im Antriebsstrang kann das Belagrupfen vollkommen beseitigen und das zwangserregte Rupfen mildern. Eine Dämpfungserhöhung durch z. B. höherviskose Getriebschmierstoffe wird aus Wirkungsgradgründen nicht realisiert.

Die Rupfeschwingungen treten nur während der Schlupfphase der Kupplung auf. Daher ist es überlegenswert, einen zuschaltbaren Schwingungsdämpfer zu integrieren. Vorstellbar wäre hier eine Wirbelstrombremse, die elektronisch gesteuert wird. Die Entwicklung wird jedoch durch die Lastenheftvorgabe (Bauraum, Gewicht, Kosten) erschwert.

Konstruktive Maßnahmen

Weiterhin ist auch ein Drehschwingungstilger im Antriebsstrang denkbar.

Das elektromotorisch dämpfende Schwungrad kann keine Verbesserung des Rupfens erreichen, da es durch die schlupfende Kupplung dynamisch vom schwingenden Triebstrang getrennt ist.

Montageseitige Maßnahmen

Montageseitig läßt sich das zwangserregte Rupfen **wirkungsvoll verringern**. Hier sind alle Maßnahmen von Bedeutung, die Eigen- spannungen und Verformungen toleranzbehafteter Bauteile reduzieren. Die kraftfreie Aufschraubung der Druckplatte kann - wie in mehreren konkreten Anwendungsfällen nachgewiesen - die geometrischen Störungen im montierten Kupplungssystem entscheidend verbessern.

Zusammenfassung

Das Rupfen tritt nur während der Schlupfphase der Kupplung auf und wird in zwei verschiedene Arten unterteilt:

- das reibwertinduzierte selbsterregte Belagrupfen
- das zwangserregte Rupfen als Folge von Bauteilabweichungen und Axial-schwingungen

Die Bedeutung des Belagrupfens nimmt eher ab, weil die Beläge besser werden. Dafür tritt vermehrt zwangserregtes Rupfen auf, weil aus Wirkungsgradgründen die Antriebsstrangdämpfung moderner Kraftfahrzeuge immer weiter absinkt und deshalb immer kleinere Schwankungen des Drehmomentes im Bereich der Kupplung zu Rupfproblemen im Fahrzeug führen. Zusätzlich steigen im Mittel die Motorleistungen, wodurch die Kupplungen größere Momente übertragen müssen und damit die Drehmomentenschwankungen zunehmen. Letztlich wird durch die steigenden Komfortansprüche und die in den letzten Jahren erreichte deutliche Verbesserung des allgemeinen Geräusch- und Schwingungsverhaltens der Fahrzeuge auch ein sporadisch auftretendes geringfügiges Rupfen kundenrelevanter.

Die Rupf-schwingungen werden nicht nur von der Kupplung und dem Betätigungssystem selbst beeinflußt, sondern auch vom Motor, dem Antriebsstrang, den Antriebsrädern, der Achsaufhängung und dem Fahrzeugaufbau. Alle Übertragungselemente beeinflussen die Rupfempfindlichkeit und müssen in die Betrachtung mit einbezogen werden.

Eine rupfunempfindliche Kupplung ohne zusätzliche, neue Bauteile oder Baugruppen läßt sich nach heutigem Kenntnisstand erreichen, wenn:

- der Belag einen steigenden Reibwertgradienten hat
- eine weiche Belagfederung eingebaut ist
- die Fertigungstoleranzen sinnvoll eingeeengt werden und
- bei der Montage Eigenspannungen vermieden werden

Das Verständnis für Ursache, Übertragung und Wirkung von Rupschwingungen in Bezug auf das Gesamtsystem Kraftfahrzeug muß durch entsprechende Forschungsarbeiten noch weiter verbessert werden, um dadurch bereits bei der Entwicklung neuer Fahrzeuge das Rupfen bestmöglich zu vermeiden bzw. zu bekämpfen.

Abschließend ist festzustellen, daß das Rupfen **nicht** durch isolierte Maßnahmen an einem Teilsystem des Fahrzeugs - wie z. B. der Kupplung -, sondern nur durch eine Betrachtung und Abstimmung des Gesamtsystems Kraftfahrzeug nachhaltig und auf Dauer erfolgreich vermieden werden kann.

Literatur

- [1] Winkelmann, S.; Harmuth, H.:
Schaltbare Reibkupplungen, Konstruktionsbücher Band 34; 1985
- [2] Pfeiffer, F.:
Das Phänomen der selbsterregten Schwingungen,
VDI-Berichte Nr. 957 (1992), S. 1
- [3] Seebacher, R.; Fischer, R.:
Triebstrangabstimmung mit Simulationsunterstützung,
VDI-Berichte Nr. 1285 (1996), S. 395
- [4] Maucher, P.:
Kupplungsrupfen, Möglichkeiten zur Vermeidung,
4. LuK-Kolloquium 1990
- [5] Albers, A.:
Elektronisches Kupplungsmanagement die mitdenkende Kupplung,
4. LuK-Kolloquium 1990