

# Kupplungen für Ackerschlepper-Auslegung und Prüfung von Kupplungsbelägen

Von Manfred Schmidt und Hans-Jürgen Drexl, Schweinfurt\*)

Professor Dr.-Ing. Horst Göhlich zum 60. Geburtstag

DK 631.372:629.113:621.825.5:620.1.05

Die Auslegung und Prüfung von Reibbelägen für Kraftfahrzeug- und Ackerschlepperkupplungen gehört zu den ständigen Aufgaben der Entwicklungsabteilung eines Kupplungsherstellers. Ausgehend von den Lastkollektiven für die verschiedenen Kupplungseinsatzfälle, erfolgt die Belagprüfung sowohl im Fahrversuch als auch auf Prüfständen. Die Vor- und Nachteile beider Versuchsträger werden geschildert. Der Wunsch nach praxisbezogenen Prüfmöglichkeiten auf Prüfständen machte die Entwicklung eines neuen Prüfstandskonzeptes erforderlich. Die damit erschlossenen neuen Wege zur Gewinnung weiterführender Erkenntnisse über die Zusammenhänge zwischen Belastungszuständen und Belageigenschaften werden beschrieben und durch ausgewählte Beispiele erläutert.

## 1. Einleitung

Die Kupplung als Drehzahlwandler im Kraftfahrzeug ist so alt wie dieses selbst. Sie dient dazu, die Drehzahlücke zwischen dem Antriebskennfeld des Verbrennungsmotors und dem Bedarfskennfeld des Fahrzeuges zu schließen. Das heißt, die Kupplung ermöglicht das Anfahren aus dem Stand (Kennungswandler), bei Schaltgetrieben den Übergang zwischen den Schaltstufen und das Anhalten des Fahrzeuges ohne Abwürgen des Motors (Trennungsglied).

Die geschichtliche Entwicklung der Kraftfahrzeugkupplung reicht vom rutschenden Flachriemen aus Leder über eine Vielzahl von Zwischenstufen bis zum heutigen Stand der Technik, der trockenlaufenden mechanischen Reibkupplung.

Standard ist die Einscheibenkupplung mit organischen Reibbelägen, bei Ackerschleppern ab 50–70 kW häufig auch Sintermetallbelägen. Ackerschlepper benötigen neben der Fahrkupplung eine zweite, unabhängige Zapfwellenkupplung.

Es herrschen zwei Bauformen vor:

- bei den Zweifach-Druckplatten sind zwei Einscheibenkupplungen zu einer Baueinheit mit zwei getrennt ausgeführten Ausrückmechanismen zusammengefaßt, Bild 1,
- bei den Nebenabtriebs-Druckplatten ist der Zapfwellenantrieb fest mit dem Kupplungsgehäuse verbunden, er kann also nicht abgeschaltet werden. Diese Aufgabe wird meist von einer separaten, trocken oder im Ölbad laufenden Lamellenkupplung übernommen.

Das Standard-Element zur Aufbringung der Anpreßkraft für die Reibpaarung in der Kupplung ist heute die Tellerfeder. Sie wird in den meisten Schlepperkupplungen eingesetzt. Zur Betätigung der Kupplung werden Ausrückhebel mit einem entsprechenden

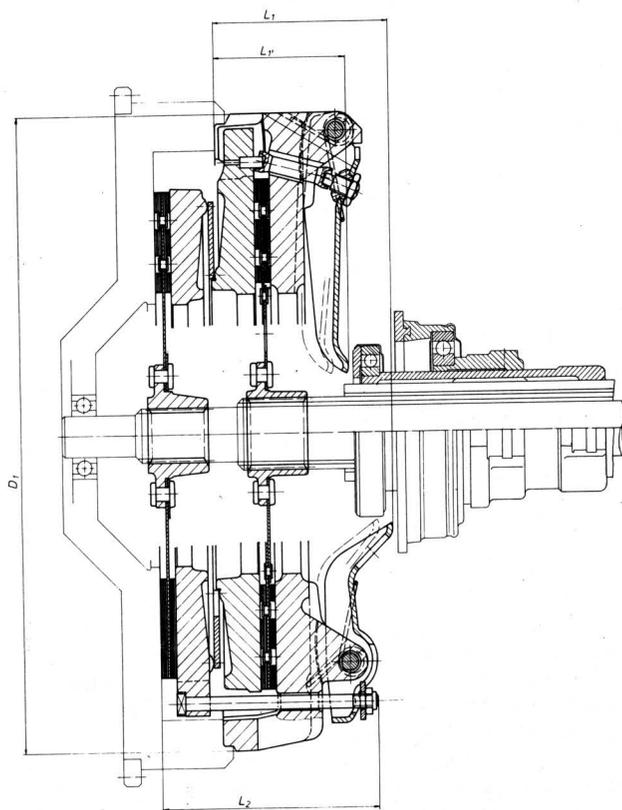


Bild 1. Zweifach-Druckplatte der Baureihe DuT mit 2 Kupplungs-scheiben und 2 Ausrückern (FICHTEL & SACHS AG); 2 Einscheibenkupplungen zu einer Baueinheit zusammengefaßt; Unabhängige Betätigung von Fahr- und Nebenabtrieb. Haupteinsatzgebiet: Ackerschlepper und sonstige landwirtschaftliche Nutzfahrzeuge.

Übersetzungsverhältnis verwendet. Werden die Ausrückhebel in die Tellerfeder integriert, so entsteht daraus die bekannte Membranfeder, die im Personen- und Nutzkraftwagenbereich überwiegend zur Anwendung kommt.

Eine umfassende Übersicht über die komplexe Thematik der schaltbaren Reibkupplungen im Kfz-Bau wird in [1] gegeben. Hier finden sich auch zahlreiche weiterführende Schrifttumhinweise. Die FICHTEL & SACHS-Druckschriften liefern zu diesem Thema praxisorientierte Informationen, z.B. [2, 3].

Obwohl das Maschinenelement Reibkupplung nunmehr das stattliche Alter von ca. 100 Jahren erreicht hat, ist nach wie vor ein erheblicher Aufwand zur Weiterentwicklung erforderlich. Ständige Verbesserungen des Kraftfahrzeugs hinsichtlich Komfortmaximierung, Verbrauchsreduzierung, Leistungssteigerung, Lärmminde- rung usw. haben unmittelbare Auswirkungen auch auf die Kraftfahrzeugkupplung. In diesem Zusammenhang spielt das Dreh-

\*) Dr.-Ing. M. Schmidt ist Leiter der Gruppe Kupplungsprüffeld, Dr.-Ing. H.-J. Drexl Leiter der Abteilung Kupplungsversuch der FICHTEL & SACHS AG Schweinfurt.

schwingungsverhalten des gesamten Antriebsstranges eine immer wichtigere Rolle. Dieses Schwingungsverhalten wird mit dem in der Kupplungsscheibe integrierten Torsionsdämpfer abgestimmt, d.h. in der gewünschten Weise beeinflusst. Die Arbeiten auf diesem Gebiet beanspruchen unterdessen ca. 50 % der gesamten Entwicklungskapazität für Kupplungen!

Für fast jeden Fahrzeugtyp muß praktisch eine eigene Kupplung entwickelt und abgestimmt werden. Die Forderungen nach hoher Funktionsgüte und Lebensdauer sowie kostengünstiger Produktion als Großserienprodukt müssen in der Entwicklung ständig optimal aufeinander abgestimmt werden. Dies bedingt laufende Versuchsarbeiten an Einzelteilen, Baugruppen und kompletten Kupplungen.

## 2. Kupplungsbelagprüfung

### 2.1 Kupplungsbeläge

Die wichtigsten anwendungstechnischen Beurteilungskriterien für Kupplungsbeläge sind:

- Reibwert (Höhe und Konstanz, d.h. möglichst geringe Abhängigkeit von Temperatur und Gleitgeschwindigkeit)
- Verschleiß
- mechanische Festigkeit (Berstdrehzahl, Nietbodenfestigkeit)
- Geräusche in der Rutschphase
- Rupfen (Anfahrerschwingungen)
- Gegenreibflächenverschleiß
- Festrost-Neigung
- spezifisches Gewicht, Massenträgheitsmoment
- Verformung bei thermischer Belastung
- Bearbeitbarkeit (Bohren, Schleifen)
- Handling (Risiko von allergischen Hautreaktionen)
- Kosten.

Das letztgenannte, aber mitentscheidende Kriterium bedeutet für den Belaghersteller, daß das Belagmaterial problemlos und kostengünstig herstellbar sein muß.

Diese Zusammenstellung der sich zum Teil widersprechenden Anforderungen mag verdeutlichen, wie schwierig sich die Einführung neuer Werkstoffe in die Serie gestalten kann. Zur Zeit werden die bewährten asbesthaltigen Beläge wegen Gesundheitsgefährdung auf asbestfreie Austauschmaterialien umgestellt (z.B. [4, 5, 6]). Die jahrzehntelangen Anwendungserfahrungen mit asbesthaltigen Reibbelägen müssen also für die Ersatzwerkstoffe (Glas-, Aramid- und Polyacrylnitrilfasern u.a.) innerhalb kurzer Zeit nachgeholt werden.

Auch bei den für manche Einsatzfälle, insbesondere für Ackerschlepper, erforderlichen Sintermetall-Werkstoffen ist es nach wie vor schwierig, einen allseits akzeptablen Kompromiß zu finden.

### 2.2 Kupplungsauslegung

Bei der Drehzahlwandlung wird mechanische Energie durch Reibung in Wärme umgesetzt. Das bedeutet für die Kupplung

- Verschleiß an den Belägen und den Gegenreibflächen des Schwungrads und der Anpreßplatte und
- bei Überschreitung bestimmter Grenztemperaturen Absinken des Reibwertes (Fading), was bis zum unbeabsichtigten Durchrutschen der Kupplung und damit zu ihrem Funktionsausfall führen kann. Temperaturen, die solche Folgen haben, treten allerdings im normalen Fahrbetrieb nicht auf.

Der praktische Fahrzeugeinsatz setzt sich aus zufälligen Folgen von Anfahr- und Schaltvorgängen zusammen, aus denen sich aber typische, einsatzbezogene Kollektive bilden lassen, wie z.B. für Pkw mit und ohne Anhänger, Lkw im Verteiler-, Fern- und Baustellenverkehr, Ackerschlepper, Bild 2, und Stadtbusse.

Jedes Kollektiv zeichnet sich durch charakteristische Anfahr- und Schaltvorgänge (Reibarbeit, Anzahl der Kupplungsbetätigungen pro km bzw. Betriebsstunde, Zeitabstand, Verhältnis von Anfahr- zu Schaltvorgängen usw.) aus. Die Reibarbeit eines Anfahrvorgangs

beträgt das Vielfache der eines Schaltvorgangs und bestimmt deshalb im wesentlichen den Belagverschleiß, obwohl die Zahl der Schaltvorgänge — zumindest bei Pkw und Lkw — viel höher ist als die der Anfahrvorgänge. Die Rutschzeiten liegen in der Regel im Bereich  $< 2$  s. Die dabei entstehende Wärme wird zunächst fast völlig durch Speicherung in den Eisenmassen des Schwungrads und der Anpreßplatte aufgenommen.

Bei Pkw und Lkw ist der Zeitabstand zwischen zwei Anfahrten im Normalbetrieb so groß, daß — trotz der geschlossenen Bauweise der Kupplung und der Kupplungsglocke — die Reibwärme an die Außenluft abgeführt werden kann, ohne daß die zur Erreichung eines thermischen Gleichgewichtszustands erforderliche mittlere Temperatur in Schwungrad und Anpreßplatte nennenswert über  $100$  °C steigen muß. Kupplungen für diese Fahrzeuge sind deshalb auch besonders auf gute Wärmespeicherfähigkeit, d.h. ausreichend dick dimensionierte Schwungräder und Anpreßplatten ausgelegt.

Je kürzer die Pausen zwischen den Anfahrvorgängen werden, desto wichtiger wird eine schnelle, möglichst direkte Wärmeübertragung an die Außenluft und desto geringer wird die Bedeutung einer guten Zwischenspeicherung. Fahrzeuge mit hoher Anfahrhäufigkeit sind Ackerschlepper im Frontladereinsatz, Stadtbusse, Müllfahrzeuge und Baustellenfahrzeuge. Hier kommt es bei konventionell ausgelegten Kupplungen zu mittleren Anpreßplattentemperaturen von  $200$  °C und mehr mit entsprechend verkürzten Belagstandzeiten, obwohl die Wärmemenge eines einzelnen Anfahrvorgangs dabei meist relativ klein ist. Hochverschleißfeste, aber im Eingriff harte Sintermetall-Beläge, gezielte Belüftung oder Naßlaufkupplungen sind für solche Einsätze besonders geeignet.

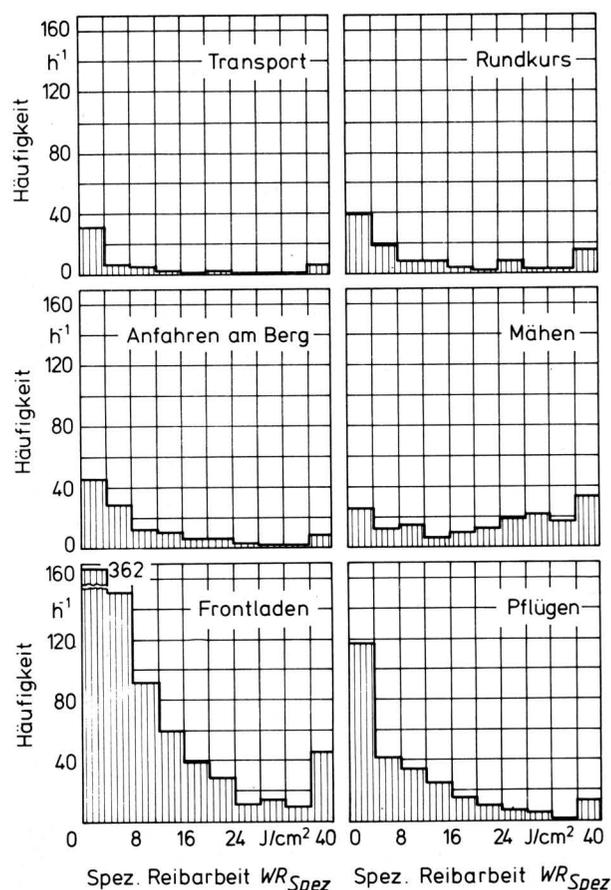
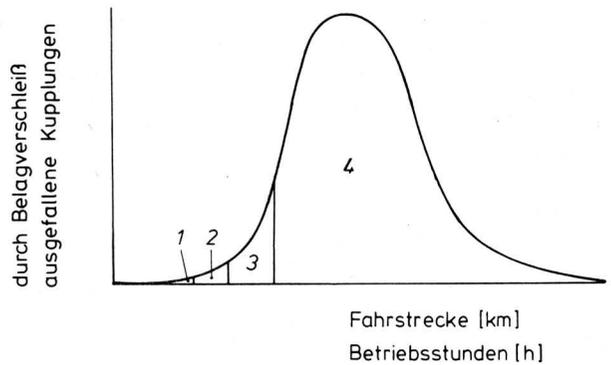


Bild 2. Stündliche Häufigkeit der spezifischen (flächenbezogenen) Reibarbeit einer Ackerschlepperkupplung bei verschiedenen Einsatzfällen.

Kupplungsauslegung und -prüfung werden durch den großen Einfluß, den der Fahrer auf die Bedienung der Kupplung hat, stark erschwert. Neben der Kupplung gehören auch Reifen und Bremsen zu den Fahrzeugkomponenten, deren Lebensdauer sehr stark vom Fahrer selbst bestimmt wird. Während aber bei Reifen und Bremsen selbst der technisch weniger informierte Fahrer aus den Fahrzeugreaktionen, d.h. den Quer- bzw. Längsbeschleunigungen erkennt, in welchem Beanspruchungsbereich er fährt, fehlt ihm diese Information bei der Kupplung fast völlig. Eine vergleichende Betrachtung der Bremse macht den Unterschied deutlich. Die Bremse dient zur Verzögerung des Fahrzeugs oder zum Halten einer bestimmten Geschwindigkeit bei Bergabfahrt. Aus den Einsatzdaten (Fahrzeug, Fahrbahneigung, Ausgangsgeschwindigkeit, Verzögerung, Zeitabstand zwischen zwei Bremsungen usw.) ist der Bremsvorgang eindeutig definiert und reproduzierbar. Bei der Kupplung dagegen bedient der Fahrer zwei Pedale: Kupplungspedal und Gaspedal. Er kann die Motordrehzahl beim Anfahrvorgang und ihren Verlauf während der Rutschzeit frei wählen, wobei die Drehzahl in die Reibarbeit quadratisch eingeht. Bild 3 zeigt diesen Einfluß sehr deutlich.

Auch bei den Bremsen erschöpfen lange Bremszeiten, wie z.B. bei Paßabfahrten, das Zwischenspeichervermögen für die Reibwärme. Die daraus resultierenden Temperaturen können bis zum Funktionsausfall führen. Das hat jeder Führerschein-Inhaber zu wissen. Leider gibt es einen solchen Schutz für die Kupplung nicht.



**Bild 4.** Der belagverschleißbedingte Ausfall von Fahrzeugkupplungen als Funktion der Fahrstrecke bzw. der Betriebsstunden.

- Bereich 1: Durch Fahrer verursachte Fehlbedienung.
- Bereich 2: Fahrzeugeinsatz entspricht nicht der Fahrzeugauslegung oder Kupplungen der Bereiche 3 und 4 mit teilweiser Fehlbedienung.
- Bereich 3: Fahrzeugeinsatz entspricht der Fahrzeugauslegung, aber Häufigkeit der besonders kupplungsbelastenden Vorgänge höher als normal.
- Bereich 4: Fahrzeugeinsatz und Fahrweise entsprechen der Auslegung.

Im Bereich 3 handelt es sich um Kupplungen, die unter an sich bekannten und bei der Auslegung berücksichtigten Einsatzbedingungen gelaufen sind, bei denen aber die schweren Vorgänge prozentual häufiger auftreten, als bei der Auslegung vorgesehen, so z.B. wenn ein Pkw überwiegend mit Anhänger im Gebirge gefahren wird oder ein Ackerschlepper überwiegend im Frontladereinsatz ist.

Im Bereich 2 sind es Kupplungen, die unter den Bedingungen des Bereichs 3 zusätzlich noch ungeschickt bedient werden. Im Bereich 2 findet man auch Kupplungen von Fahrzeugen mit Einsatzbedingungen, die bei der Auslegung nicht berücksichtigt wurden, z.B. solche, wo zur genauen Einhaltung einer bestimmten niedrigen Fahrgeschwindigkeit die Kupplung über eine längere Zeit als Drehzahlwandler benutzt wird.

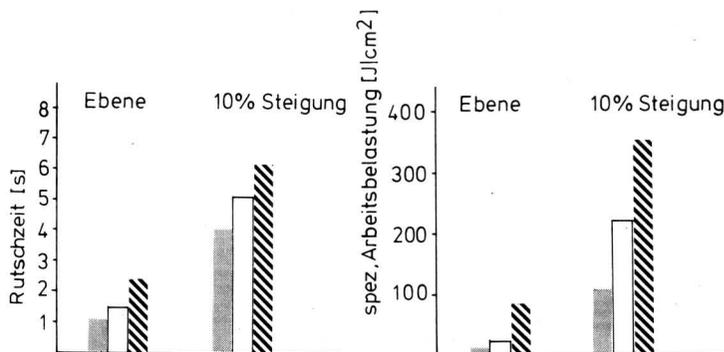
Der Bereich 4 umfaßt alle Kupplungen, deren Lebensdauer vom Fahrzeugbenutzer als angemessen betrachtet wird. Das sind in der Praxis immer deutlich über 95 %. Bei Ausfall durch Verschleiß wird dann ein Neu- oder Austauschteil eingebaut, ohne daß es zu Reklamationen des Fahrzeugbenutzers beim Fahrzeug- oder Kupplungshersteller kommt. Deshalb ist es auch schwierig, Zahlenangaben über diesen Bereich zu erhalten.

Die Versuche, die bei den Kupplungs- und Fahrzeugherstellern durchgeführt werden und die die Grundlage für die Entwicklungsfreigabe einer neuen Serienkupplung darstellen, konzentrieren sich im wesentlichen auf den Bereich 3, weil es hier am ehesten zu Reklamationen kommt und weil im Bereich 3 auch ein gewisser Zeitraffereffekt vorhanden ist, der bei der meist unter Zeitdruck durchgeführten Erprobung eine wichtige Rolle spielt. Diese Versuche werden in Fahrzeugen und auf Prüfständen durchgeführt, wobei trotz hochentwickelter Prüfstandstechnik Fahrversuche unverzichtbar bleiben, auch wenn sie "nur noch" zur Bestätigung bzw. Absicherung der Prüfstands- und Berechnungsergebnisse dienen.

### 2.3 Fahrversuch

Grundsätzlich ist das Kraftfahrzeug der ideale Versuchsträger für die Kupplung mit folgenden Vorzügen:

- kurzfristige Verfügbarkeit.
- die Prüflinge lassen sich mit geringem Aufwand installieren.
- 2-Schicht-, evtl. sogar 3-Schicht-Betrieb ist möglich.
- die Belastungen entsprechen der Fahrpraxis. Bestimmte Lastkollektive lassen sich gezielt einstellen.



**Bild 3.** Rutschzeit und flächenbezogene Reibarbeit beim Anfahrvorgang eines Pkw in der Ebene (Leergewicht plus 2 Personen ohne Anhänger) bzw. an 10 % Steigung (maximales Gesamtgewicht des Pkw und maximal zulässige Anhängelast) für verschiedene Motordrehzahlen während der Rutschzeit.

- linke Säulen: sehr kupplungsschonende Fahrweise in der Ebene  $900 \text{ min}^{-1}$ ; an 10 % Steigung  $2000 \text{ min}^{-1}$
- mittl. Säulen: durchschnittliche Kupplungsbelastung in der Ebene  $1200 \text{ min}^{-1}$ ; an 10 % Steigung  $3000 \text{ min}^{-1}$
- rechte Säulen: überdurchschnittliche Kupplungsbelastung in der Ebene  $2400 \text{ min}^{-1}$ ; an 10 % Steigung  $4000 \text{ min}^{-1}$

Motor- und Fahrzeugdaten:  
 max. Drehmoment  $185 \text{ Nm}$  bei  $2800 \text{ min}^{-1}$   
 max. Leistung  $80 \text{ kW}$  bei  $4600 \text{ min}^{-1}$   
 Gesamtübersetzung des Anfahranges  $13,4$   
 Masse, leer  $1400 \text{ kg}$   
 zul. Gesamtmasse  $1900 \text{ kg}$   
 zul. Anhängelast  $1500 \text{ kg}$

Der Ausfall von Fahrzeugkupplungen aufgrund von Belagverschleiß folgt dem in Bild 4 angegebenen Verlauf. Ausgesprochene Frühausfälle (Bereich 1) sind auf Fehlbedienungen zurückzuführen. Zu solchen Frühausfällen kommt es, wenn häufiger Rutschzeiten von mehr als 5 s auftreten. Bei Rutschzeiten von 15 s und mehr unter hohem Moment genügt bereits ein einmaliger Vorgang zur thermischen Zerstörung organischer Beläge. Dabei treten Temperaturen über  $600 \text{ °C}$  in der Reibfläche auf, die weit über den ertragbaren Temperaturen von Harzen und Kautschuken liegen, die als Bindemittel verwendet werden.

- die Kupplung wird in ihrer Original-Umgebung getestet, d.h. Schwingungen, Temperaturen, Korrosion usw. entsprechen den späteren Einsatzbedingungen.
- Reparaturen des "Prüfstandes Kraftfahrzeug" lassen sich kurzfristig in jeder Werkstatt ausführen; es muß kein eigenes qualifiziertes Personal für Wartung und Instandhaltung vorgehalten werden.
- der Fahrversuch ist – bei schnell wechselnden Prüflingen und Versuchsanforderungen – flexibel und kostengünstig.

Nachteile des Fahrversuchs sind:

- Bei Neuentwicklungen steht das Fahrzeug bei Versuchsbeginn oft noch nicht zur Verfügung. Das ersatzweise eingesetzte Fahrzeug entspricht dann nicht dem späteren Serienstand, d.h. die Versuchsergebnisse sind u.U. nicht problemlos übertragbar.
- Witterung (Winterpause) und Unfälle können langwierige Unterbrechungen verursachen.
- die Lastkollektive sind nicht genau reproduzierbar, bedingt durch wechselnde Verkehrssituationen, Witterungs- und Fahrereinflüsse.
- wenn Belastungs- und sonstige Daten gemessen werden sollen, ist in der Regel ein sehr großer Vorbereitungs- und Installationsaufwand für das Fahrzeug und die Meßtechnik erforderlich.
- gezielte Einzeluntersuchungen können auf Prüfständen oft mit erheblicher Zeitraffung durchgeführt werden, im Fahrzeug ist das nicht in dieser Form möglich.

Trotz der beschriebenen Nachteile werden die Vorzüge des Fahrversuchs regelmäßig genutzt. Werden z.B. Taxen mit Versuchskupplungen ausgerüstet, so können zu sehr geringen Kosten langfristige vergleichende Untersuchungen gefahren werden. Die notwendigen Umbauten und Überprüfungen können in auslastungsschwachen Zeiten gelegt werden. Ähnliche Modelle werden bei Kurierdiensten, Speditionen usw. angewendet.

Bei einigen Prüfpunkten kann auf den Fahrversuch auf keinen Fall verzichtet werden. Die Rupfneigung eines Belages z.B. kann bis heute nur im Serienfahrzeug zuverlässig beurteilt werden.

Ein im 2-Schicht-Betrieb auf einem gemischten Rundkurs – Stadt-, Überland- und Autobahnverkehr – gefahrener Pkw kann pro Tag eine Strecke von ca. 1 200 km zurücklegen. In einem Monat sind unter Berücksichtigung erforderlicher Stillstandszeiten etwa 30 000 km Laufleistung erreichbar. Ein privat genutzter Pkw würde für diese Strecke im Durchschnitt zwei Jahre benötigen. Mit einem Versuchsfahrzeug lassen sich also bereits nach ein bis zwei Monaten fundierte Aussagen über das Langzeitverhalten eines Kupplungsbelages machen, die zuverlässig auf die Kupplungslebensdauer extrapoliert werden können.

Der Aufwand erscheint auf den ersten Blick sehr hoch. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, daß – wenn Prüfstände für neue Prüfaufgaben erst umgerüstet und z.T. sogar umgebaut werden müssen – der Fahrversuch sehr oft schneller und billiger sein kann.

Der Fahrversuch dient vorzugsweise zur Bestätigung getroffener Kupplungsauslegungen. Eine Simulation des Fahrbetriebes mit einem Prüfstand ist machbar. Ein solcher Prüfstand wird im Anschluß beschrieben. Man muß sich jedoch darüber im klaren sein, daß sich wegen der großen Temperaturabhängigkeit der wichtigsten Belageigenschaften eine im Vergleich zum Fahrversuch drastisch kürzere Prüfzeit nicht ohne Einfluß auf die Ergebnisse erreichen läßt.

Trotzdem sind solche Prüfstände unbedingt erforderlich, weil im Fahrversuch die komplexen Zusammenhänge zwischen den Belastungszuständen und den Belageigenschaften nicht exakt genug ermittelt werden können. Diese Kenntnisse sind aber für die Weiterentwicklung unverzichtbar.

## 2.4 Prüfstandsversuch

Für den Einsatz von Prüfständen sprechen folgende Punkte:

- alle Prüfzyklen lassen sich sehr gut reproduzieren, Prüfzyklen mit hohen Genauigkeitsanforderungen lassen sich nur auf einer Maschine realisieren.
- Fahrer-, Verkehrs- und Umwelteinflüsse lassen sich ausschalten, können jedoch auch gezielt simuliert werden.
- die Prüflinge lassen sich mit geringem Aufwand montieren und demontieren; allerdings nur, wenn der Prüfstand für diesen Prüfling auch vorbereitet ist.
- die Meßwerterfassung und -verarbeitung gestaltet sich wesentlich einfacher als im Fahrzeug.
- eigenüberwachte Prüfstände können ohne Bedienungspersonal im 24 h-Betrieb laufen.

Diese Vorteile der stationären Belagprüfstände gegenüber dem mobilen Prüfstand Kraftfahrzeug müssen jedoch mit einigen Einschränkungen erkaufte werden:

- Bisherige Prüfstände sind keine Universalmaschinen. Ihre Simulationsmöglichkeiten sind beschränkt. Lastkollektive lassen sich nur mit mehr oder weniger großen Einschränkungen übertragen. Für Prüfstände nach dem neuesten Stand der Technik gilt das jedoch nicht mehr.
- Schnelle Reaktionen auf veränderte Versuchsanforderungen sind z.T. nur mit hohem Aufwand realisierbar.
- Prüfstände sind Sondermaschinen, die häufig nur einmal gebaut werden. Infolgedessen sind sie sehr entwicklungs- und kostenintensiv. Die Entwicklung ist selbst für erfahrene und spezialisierte Prüfmaschinenhersteller oft mit großen Problemen verbunden. Dies gilt insbesondere für komplexe, rechnergesteuerte Prüfstände, die zum ersten Mal konzipiert werden und für die deshalb noch keine Erfahrungen vorliegen. Aus diesem Grund werden Prüfstände auch heute noch in vielen Fällen von den Betreibern in eigener Regie entwickelt. Der Betreiber muß also über qualifiziertes Personal verfügen, und zwar für die Prüfstandsentwicklung und für die Prüfstandsbedienung, -wartung und -instandhaltung. Ingenieure mit gutem Prüftechnik-Know-how werden auch bei Fremdentwicklungen benötigt, sonst werden schon Konzept und Lastenheft teilweise unrealistisch, und der Ärger wegen manchmal gar nicht machbarer, aber eigentlich erforderlicher Nachbesserungen in der Inbetriebnahmephase ist vorprogrammiert.

Prüfresultate sind angesichts der oft kurzen verfügbaren Entwicklungszeit schnell erforderlich. Das ist eine der Hauptforderungen an jedes Prüfkonzept. Aber sie ist nicht einfach zu realisieren, wenn man bedenkt, daß einerseits z.B. eine Lkw-Kupplung im Fernverkehr 500 000 bis 1 Mio km hält, was 2 bis 4 Jahre Einsatz bedeutet, und andererseits eine zu starke Zeitraffung aus bereits genannten Gründen zu einer Verfälschung der Ergebnisse führen kann. Es muß also unbedingt dafür gesorgt werden, daß alle auf Zeitraffung beruhenden Abweichungen quantifizierbar sind.

Es gibt mehrere Möglichkeiten zur Zeitraffung:

1. Rearbeiten der charakteristischen Einkuppelvorgänge wie im Fahrzeug, aber kürzere Zeitabstände zwischen den Vorgängen.
2. Erhöhung aller Rearbeiten um einen bestimmten Prozentsatz, Zeitabstände wie im Fahrzeug.
3. Wegfall oder Verringerung des Anteils der leichten Vorgänge (z.B. aller Schaltvorgänge), da sie für den Verschleiß nur eine untergeordnete Rolle spielen. Manche Beläge reagieren auf sehr niedrige Belastungen aber mit sinkendem Reibwert; diese Gefahr würde hier nicht erkannt!
4. Kombination aus den drei genannten Möglichkeiten.

In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu wissen, daß die Angabe der Mittelwerte der Arbeits- und Leistungsbelastung eines Kollektivs keinesfalls zu seiner eindeutigen Charakterisierung ausreicht. Wenn also ein Belag verschiedenen Prüfungen mit gleichen Belastungs-Mittelwerten, aber unterschiedlichem Aufbau der Kollektive unterworfen wird, können sich die Ergebnisse hinsichtlich Reibwert und Verschleiß deutlich unterscheiden.

Eine weitere Grenze für die Verkürzung der Prüfzeiten ist durch den Stand der Technik bei der Messung des Belagverschleißes gegeben. Der mittlere und rechte Teil des Bereichs 4 in Bild 4 repräsentiert den überwiegenden Teil aller Kupplungen im Feld. Simuliert man den dazu gehörenden Fahrbetrieb, ergeben sich sehr niedrige Kupplungsbelastungen mit entsprechend niedrigen Verschleißraten. Um den Verschleiß auch für diesen Bereich angeben zu können, muß der Prüfstand sehr lange laufen, bis der extrem kleine Verschleiß ausreichend genau zu messen ist.

Es besteht also die Schwierigkeit, einen vernünftigen Kompromiß zwischen kurzer Versuchslaufzeit und Praxisrelevanz der Ergebnisse zu finden. Ein wesentliches Hilfsmittel dazu ist eine moderne Prüfstandstechnologie.

### 3. Prüfstandstechnologie

#### 3.1 Schwungmassenprüfstände

Stand der Technik in der Verschleiß- und Reibwertprüfung von Kupplungsbelägen auf Prüfständen waren bisher sogenannte Schwungmassenprüfstände.

Auf ihnen werden alle translatorischen und rotatorischen abtriebsseitigen Massen des Fahrzeuges als rotierende Schwungmasse abgebildet, reduziert auf die Getriebeeingangswelle. Verschiedene Fahrzeugmassen erfordern Schwungmassen mit unterschiedlichen Massenträgheitsmomenten. Die Simulation des Hangabtriebes und des Rollwiderstandes ist technisch möglich, die erforderliche Momentenregelung ist aber problematisch.

Als Antrieb kommen elektrische Dreh- oder Gleichstrommotoren zum Einsatz, bei besonderen Prüfstandstypen auch Verbrennungsmotoren. Der Schwungmassenabtriebsstrang wird durch hydraulische, mechanische oder Wirbelstrombremsen gebremst. Die Kupplung wird durch das handelsübliche Ausrücklager ein- und ausgerückt. Die Betätigung erfolgt pneumatisch, hydraulisch oder servohydraulisch.

Die Kupplung wird bei konstanter Antriebsdrehzahl mit vorgegebener Einrückgeschwindigkeit gegen den stehenden Abtriebsstrang eingekuppelt. Dieser wird bis zur Synchronisation beschleunigt, danach die Kupplung wieder geöffnet und die Schwungmassen bis zum Stillstand abgebremst. Bei veränderlichen Antriebsdrehzahlen lassen sich auch Schubschaltungen realisieren, d.h. es wird das Abbremsen des Fahrzeuges mit der Kupplung beim Gangwechsel simuliert.

Diese Beschreibung zeigt die begrenzte Flexibilität dieses Prüfkonzeptes auf. Ein einmal eingerichteter Prüfstand vermag pro Einstellung nur einen bestimmten Einkuppelzyklus zu simulieren, der dann mit Hilfe von Programmsteuerungen beliebig oft wiederholt und mit großer Genauigkeit reproduziert werden kann. Das ist die größte Schwäche dieses Konzepts, da – wie bereits erwähnt – für eine realistische Simulation des Reibverhaltens der Kupplung im Fahrzeug hohe und niedrige Belastungen unbedingt wechseln müssen.

Trotzdem ist der erforderliche technische Aufwand für solche Prüfstände erheblich. Das gilt sowohl für den mechanischen Aufbau als auch für die elektrischen Einrichtungen zur Steuerung bzw. Regelung, Überwachung, Meßwertaufzeichnung und -auswertung.

Es ist also nicht möglich, in Fahrzeugen gemessene Lastkollektive in ihrer Gesamtheit auf solche Prüfstände zu übertragen. Wenn für eine gewünschte Aussage die Prüfung in einem eng begrenzten Lastkollektiv-Ausschnitt genügt, dann lassen sich sehr gut vergleichende Ergebnisse erarbeiten.

#### 3.2 Prüfstände mit elektrischer Schwungmassensimulation

##### 3.2.1 Grundkonzeption

Ausgehend von der oben beschriebenen Situation wurde bei FICHTEL & SACHS die Eigenentwicklung eines universellen Kupplungsbelag-Prüfstandes neuester Konzeption eingeleitet. Ziel

war dabei, die die Versuchsmöglichkeiten einschränkenden system-spezifischen Eigenschaften der Schwungmassenprüfstände zu umgehen. Wesentliche Lastenheftforderungen waren

1. weitgehende Übertragbarkeit von Fahrzeug-Lastkollektiven auf den Prüfstand durch
  - freiprogrammierbare Einkuppelvorgänge (Einzel-Prüfzyklen)
  - Schaffung einer Zyklenprogramm-bibliothek
  - Schaffung einer Versuchsprogramm-bibliothek
2. kurze Prüfdauer ohne Ergebnisverfälschung
3. leichte Ein-/Ausbaumöglichkeit der Prüflinge für häufige Verschleißzwischenmessungen
4. leichte Bedienbarkeit
5. leichte Meßdatenauswertung
  - tabellarisch
  - graphisch.

Die freie Gestaltung von Prüfzyklen analog zu Kuppelvorgängen im Fahrzeug ist nur durch das Prinzip der elektrischen Schwungmassen-Simulation möglich.

Mit ihrer Hilfe lassen sich bei Reduktion auf die Getriebeeingangswelle die Schwungmomente, die aus unterschiedlichen Fahrzeugmassen und Fahrzeugdaten folgen, und die Antriebsmomente, die sich aus unterschiedlichen Werten von Fahrbahn-längsneigung und Rollwiderstand ergeben, als zeitvariante Größen elektrisch simulieren. Dies geschieht mittels eines geeigneten Gleichstrommotors. Durch den völligen Verzicht auf Schwungmassen kann einerseits ein äußerst kompakter mechanischer Aufbau erzielt werden, andererseits bietet das Konzept der elektrischen Schwungmassen-Simulation sehr frei gestaltbare Prüfmöglichkeiten.

Eine Umsetzung dieser Möglichkeiten in praxistgerechte Kupplungs- und Belagprüfungen wird jedoch erst durch einen konsequenten Rechnerinsatz mit speziell gestalteter Software erreicht. Sie ermöglicht die freie Erstellung von Versuchsprogrammen nach verschiedensten Vorgaben, z.B. Lastkollektive, Sonderfahrprogramme oder Prüfspezifikationen der Fahrzeughersteller.

Die Abarbeitung der Prüfprogramme erfolgt vollautomatisch, wobei der Prüfstandsrechner nach den Erfordernissen des Versuchsprogrammes die Prüfstandssteuerung und -überwachung, die Meßwertaufzeichnung sowie die Meßdatenverarbeitung mit tabellarischer bzw. graphischer Ergebnisdarstellung übernimmt.

##### 3.2.2 Aufbau

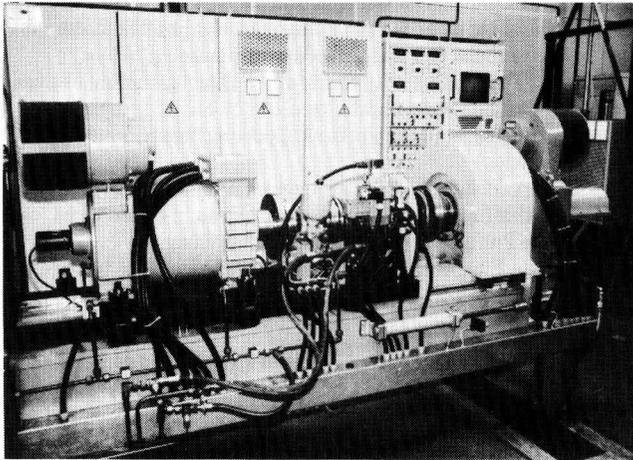
Der Prüfstands-aufbau gliedert sich in zwei Hauptbaugruppen, den

- mechanischen Prüfstands-aufbau und die
- elektrischen Funktionseinrichtungen.

Der mechanische Teil des Prüfstandes, **Bild 5**, ist auf einem leichten Grundgestell angeordnet. Antriebs- und Abtriebsmotor sind zwei jeweils im Vierquadrantenbetrieb arbeitende Gleichstrommaschinen. Im Vergleich zu Schwungmassenprüfständen gleicher Leistung werden sehr geringe Abmessungen erzielt.

Die Kupplungsdruckplatte ist unter Ausschaltung jeglicher Zwischenlagerung mit ihrer Aufnahme direkt auf dem Wellenstummel der Antriebsmaschine angeordnet. Als Aufnahme werden, je nach Anforderung, die zum Prüfling gehörenden Kfz-Schwungräder oder speziell gestaltete Anpaßteile verwendet. Der Abtriebsstrang mit Kupplungsscheibe, Profilwelle, Ausrücksystem, Zwischenlagerbock, Momentenmeßwelle und Abtriebsmaschine ist auf einem fahrbaren Schlitten aufgebaut. Sie können komplett zur Montage/Demontage der Kupplung axial verfahren werden.

Das Ausrücksystem wird servohydraulisch betätigt. Das Hydraulikaggregat ist räumlich abgesetzt aufgestellt. Die Sicherheitsabdeckhaube des Prüflings kann zu Montagearbeiten verfahren werden. Dieser Raum ist extern belüftbar. Die Kupplung selbst kann mit einem weiteren, in der Form dem tatsächlichen Kupplungsgehäuse angenäherten Gehäuse umschlossen werden.



**Bild 5.** Kupplungs- und Belagprüfstand mit elektrischer Schwungmassen-Simulation (Wellenabdeckung für Momentenmeßwelle entfernt, Prüflingsgehäuse geöffnet).

In den Schaltschränken sind untergebracht:

- Einspeisung
- Stromrichter
- Meßtechnik
- Steuer- bzw. Regeleinrichtungen
- Sicherheitsüberwachungen
- Anzeige- und Bedieneinrichtungen
- Rechner mit Peripherie.

In einem getrennten Laborraum ist ein zweites Terminal mit Printer und Plotter installiert. Dieses Terminal ist gleichberechtigt mit dem am Prüfstand befindlichen Terminal. Hier werden vorzugsweise – unbeeinflusst von der Geräusch- und Temperaturbelastung im Prüffeld – Versuchsprogramme erstellt und Auswertungen vorgenommen.

Alle Sicherheits- und Fehlerüberwachungseinrichtungen sind grundsätzlich hardwaremäßig ausgeführt. Zwar werden fast alle Fehlermeldungen auch softwaremäßig überwacht, jedoch könnte ein unbeaufsichtigter, gefahrloser 24 h-Betrieb nur unter Software-Kontrolle wegen möglicher Rechnerstörungen nicht garantiert werden. Der Rechner kann jedoch bei von ihm erkannten Fehlern den Prüfstand sofort stillsetzen und den eigenen Programmablauf definiert unterbrechen. Dies gilt beispielsweise auch für das softwaremäßig realisierte Wartungsüberwachungssystem. Dieses überprüft, ob vorgegebene Wartungsintervalle eingehalten worden sind.

Hat der Bediener für eine bestimmte Wartungsaktivität die Abbruchberechtigung freigegeben, so wird zum entsprechenden Zeitpunkt der Prüfstand stillgesetzt. Ist keine Abbruchberechtigung erteilt, so wird die entsprechende Wartungsaktivität lediglich vom Rechner per Bildschirmmeldung mit Angabe der aktuellen Zeitüberschreitung angemahnt.

### 3.2.3 Prüfmöglichkeiten

Um eine größtmögliche Flexibilität des Prüfstandes zu erreichen, sind drei Betriebsmöglichkeiten realisiert worden.

#### 3.2.3.1 Handsteuerung

Mit Hilfe der Handsteuerung lassen sich alle Einzelfunktionen des Prüfstandes unabhängig voneinander aktivieren. Diese sind:

- Drehzahl
- Drehrichtung
- Drehmoment
- Wahl Drehzahlregelung, Momentensteuerung

- Einrückposition
- Ausrückposition
- Ein-/Ausrückgeschwindigkeit.

Genutzt werden diese Funktionen im wesentlichen bei der Einrichtung des Prüfstandes sowie zur Funktionskontrolle des Prüfstandes und des Prüflings. Verwendung findet diese Betriebsweise jedoch auch zur Durchführung von Prüfungen, die sich keinem Programm-schemata zuordnen lassen, deren Ablauf jedoch durch den Bediener noch kontrollierbar ist. Erleichtert wird dies dadurch, daß die Funktionssollwerte nicht nur über Potentiometer statisch vorgegeben, sondern auch von außen als analoge elektrische Größen eingespeist werden können (z.B. von Funktionsgeneratoren, Bandgeräten usw.). Die Überwachungseinrichtungen lassen sich flexibel auf entsprechende Sicherheitsgrenzwerte einstellen. Im Bedarfsfall wird der Prüfstand auch im Handbetrieb automatisch stillgesetzt.

#### 3.2.3.2 Schütz-Programmsteuerung

Mit Hilfe einer Schütz-Programmsteuerung können Kuppelzyklen nach dem Schema

– Einkuppeln – Auskuppeln – Bremsen – Pause in vorwählbarer Anzahl automatisch ablaufen. Die Zeiten für die einzelnen Teilfunktionen können über Zeitrelais vorgewählt werden. Drehzahlen, Ein-/Ausrückgeschwindigkeit usw. werden vorgewählt und fest eingestellt.

Diese Betriebsweise ist identisch mit der von Schwungmassenprüfständen. Als Schwungmasse wirkt die physikalisch vorhandene Drehmasse des Abtriebsstranges. Diese ist nicht veränderlich, die Prüfmöglichkeiten sind also sehr eingeschränkt. Infolgedessen werden mit diesem Programmteil nur Einlaufvorgänge für Kupplungsbeläge und einfache Dauerfunktionsprüfungen vorgenommen.

#### 3.2.3.3 Rechnerbetrieb

Im Rechnerbetrieb ist das vollautomatische Abarbeiten von komplexen Versuchsprogrammen möglich. Für deren Erstellung sind z.Z. die Grundgerüste für folgende Kuppelzyklen softwaremäßig realisiert (aufgeführt sind nur die wichtigsten Parameter):

##### 1. Anfahr- und Schaltvorgänge

Einstellparameter:

- Antriebsdrehzahl
- Abtriebsdrehzahl
- red. Massenträgheitsmoment des Abtriebs oder Fahrzeugdaten (Masse, Getriebeübersetzungen usw.) oder Kupplungsmomentenverlauf
- red. Bremsmoment des Abtriebs (Rollwiderstand, Hangabtrieb)
- Einkuppelgeschwindigkeitsfunktion
- max. Rutschzeit
- Pausenzeit oder Grenztemperatur

##### 2. Abwürgetest

Einstellparameter:

- Antriebsdrehzahl
- Antriebsdrehmoment als Funktion der Antriebsdrehzahl (Simulation des Drehmomentverlaufs eines Verbrennungsmotors)
- max. Rutschzeit
- Einkuppelgeschwindigkeit
- Pausenzeit oder Grenztemperatur

##### 3. Fading- und Gleitgeschwindigkeitstest

Einstellparameter:

- Antriebsdrehzahl
- Abtriebsdrehzahl
- Einkuppelgeschwindigkeit
- Rutschzeit oder Rutscharbeit
- Pausenzeit oder Grenztemperatur

#### 4. Abreißprüfung (Haftreibwertbestimmung)

Einstellparameter:

- Antriebsdrehzahl (= Abtriebsdrehzahl, d.h.  $\Delta n = 0$ )
- Grundmoment
- Momentengradient
- Grenzmoment
- Grenzprüfzeit
- Grenztemperatur
- Grenzschlupf mit Grenzschlupfzeit oder Grenztemperatur
- Pausenzeit oder Grenztemperatur

#### 5. Momentenkapazitätstest

Einstellparameter:

- Antriebsdrehzahl
- Abtriebsdrehzahl
- Kupplungsmoment
- Rutschzeit
- Pausenzeit oder Grenztemperatur

#### 6. Abkühlzyklus

Einstellparameter:

- Pausenzeit oder Grenztemperatur.

Erweiterungsmöglichkeiten für weitere Grundtypen von Kuppelvorgängen sind vorgesehen. Innerhalb dieser vorgegebenen Gerüste sind die Kuppelzyklen frei definierbar.

Einige der Zyklus-Grundtypen lassen sich darüber hinaus nach festgelegten Kriterien variieren. Durch die entsprechende Parameterwahl können je nach Anforderung praxisgerechte, aber auch ganz spezielle Einkuppelvorgänge gestaltet werden. Die in einer Zyklusbibliothek einmal definierten Kuppelzyklen sind zu kompletten Versuchsprogrammen kombinierbar. Die Rechnersteuerung sorgt für beliebige Wiederholung unter exakt reproduzierbaren Bedingungen in gewünschter Reihenfolge.

Die Prüfprogramme sind auf Disketten speicherbar und lassen sich jederzeit wieder laden, ohne von Hand neu eingegeben werden zu müssen.

Der Rechner liefert während des Versuchslaufes auf Anforderung laufend Informationen über

- den aktuellen Versuchsstand
- die Belastungssituation des aktuellen Kuppelvorganges und des bisher abgearbeiteten Versuchsprogrammes
- alle gemessenen und errechneten Einzelgrößen des aktuellen Kuppelvorganges als tabellarischen Zeitverlauf
- die gleichen Größen als Mittelwerte.

Alle Bildschirmmasken sind in selbstüberschreibender Technik ausgeführt, d.h. bei Veränderungen am momentanen Bildschirminhalt wird dieser aktuell überschrieben.

Es können vorgeplante Programmunterbrechungen definiert werden. Beim angegebenen Programmzählerstand wird dann das Prüfprogramm unterbrochen, z.B. zur Durchführung von Zwischenmessungen. Erst nach Bestätigung durch das Bedienungspersonal wird der Programmablauf fortgesetzt.

Im Prüfprogramm wird vom Anwender ebenfalls definiert, welche der Kuppelzyklen für eine spätere Beurteilung als Meßdaten aufgezeichnet werden müssen.

Folgende Größen werden vom Rechner während des Rutschvorganges erfaßt:

- Antriebsdrehzahl
- Abtriebsdrehzahl
- Kupplungsdrehmoment
- Ausrückweg
- Temperaturen von 3 Meßstellen aus der sich drehenden Kupplung.

Alle Größen stehen auch als analoge Werte an entsprechenden Ausgängen zur externen Aufzeichnung zur Verfügung.

Mit Hilfe des Rechners lassen sich darüber hinaus abgeleitete Größen, wie z.B. Reibwerte, Reibarbeiten, Reibleistungen usw. berechnen.

Die Meßdaten und alle zum Versuchslauf gehörenden Zusatzinformationen können zur Langzeitsicherung auf Magnetband gespeichert

und jederzeit zur erneuten Auswertung wieder in den Rechner geladen werden. So lassen sich auch noch nach längerer Zeit vergleichende Fragestellungen zu verschiedenen Versuchen beantworten, ohne daß ein Versuch wiederholt werden mußte. Da der Prüfstandsrechner im Multitasking-Betrieb arbeitet, lassen sich Versuchsläufe und Auswertarbeiten parallel bearbeiten.

Eine Beurteilung der gemessenen Daten ist sowohl durch die manuelle Auswertung der in Tabellenform ausgebbaren Meßwerte, als insbesondere aber auch durch die Darstellung in farbiger Graphik möglich. Dazu steht ein komfortabel zu handhabendes Graphikprogramm zur Verfügung. Mit dessen Hilfe lassen sich nach Wahl unterschiedlichste funktionale Abhängigkeiten aus den gemessenen Rohdaten extrahieren und darstellen.

Das für diesen Prüfstand entwickelte Softwarepaket enthält über die vorgestellten Merkmale hinaus eine Vielzahl weiterer Funktionen, deren Beschreibung den vorgegebenen Rahmen sprengen würde. Dies würde alleine schon für die Beschreibung des Graphik-Softwarepaketes gelten.

Die gesamte Prüfstandsbedienung, Versuchsprogrammdefinition und Datenauswertung erfolgt rein menügeführt am Bildschirm. Zur Handhabung sind keinerlei Kenntnisse einer Programmiersprache erforderlich.

#### 4. Beispiele für durchgeführte Untersuchungen

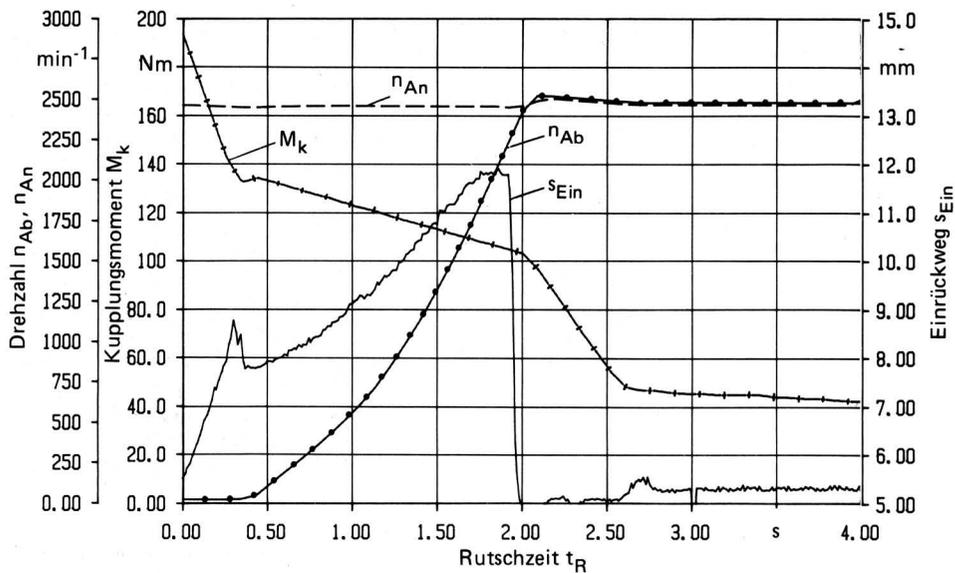
In Bild 6 und 7 ist die Simulation des Anfahrvorganges eines Pkw der unteren Mittelklasse unter Ausnutzung des vollen Motormomentes dargestellt. Die Wahl der Anfahrerdrehzahl, aber auch der zeitliche Verlauf der Einkuppelwegfunktion entscheiden über den Kupplungsmomentenverlauf und die Rutschzeit. Damit wird die Leistungsbelastung der Kupplung vorherbestimmt. Durch die freie Kombinierbarkeit von verschiedenen Anfahrerdrehzahlen und Einkuppelcharakteristiken – bei gegebenen Fahrzeugdaten und Steigungen – lassen sich unterschiedliche Fahrweisen, Fahrzeuge und Fahrzustände nachbilden. Kuppelvorgänge, wie z.B. in Bild 6 und 7 gezeigt, bilden die Grundlage für die auf diesem Prüfstand laufenden Lastkollektive. Die Simulationsmöglichkeiten sind nur durch die installierte Antriebs- bzw. Bremsleistung des Prüfstandes begrenzt.

Einen umfassenden Überblick über die Temperaturverhältnisse in der Kupplung während eines kurzen Versuchslaufes gibt Bild 8. Hier wurde ein gezielt erstelltes Lastkollektiv simuliert. Dieses enthält neben einer Vielzahl bestimmter Anfahrvorgänge einen extrem schweren Kuppelvorgang.

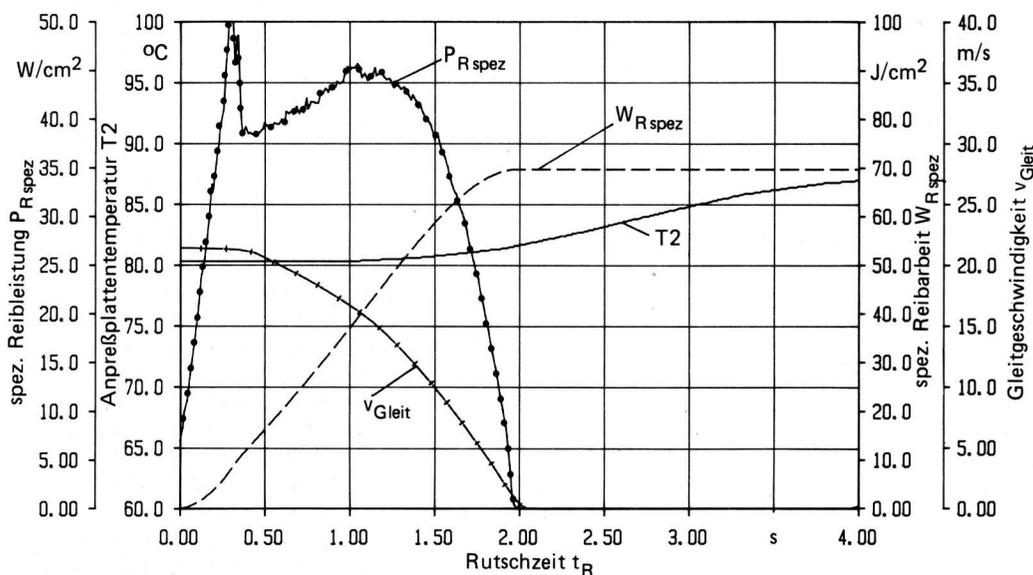
Dargestellt ist die relative Häufigkeitsverteilung der kleinsten und größten vorkommenden Anpreßplattentemperatur je Schaltvorgang, gemessen am inneren Reibradius.

Bei etwa 45 % aller Kuppelvorgänge stellten sich Temperaturen um ca. 60 °C ein. Etwas weniger häufig wurden Temperaturen von ca. 130 °C ermittelt. Nur ein einziges Mal – bei einem 15 s dauernden Rutschvorgang mit konstantem Kupplungsmoment – wurden Temperaturen von ca. 420 °C in der Anpreßplatte gemessen. Damit ist die Grenze für schwere Belagschädigungen bereits überschritten. Der hier simulierte Vorgang entspricht z.B. einem mißglückten Anfahrversuch eines Pkw mit Anhänger an einer Steigung, wobei es dem Fahrer nicht gelingt, das Fahrzeug zügig bis zur Drehzahlsynchronisation zu beschleunigen, und er den Versuch darauf hin nicht sofort abbricht. Mit dieser Simulation läßt sich die Reserve einer Kupplung für den Fall extremer Fehlbedienung ermitteln.

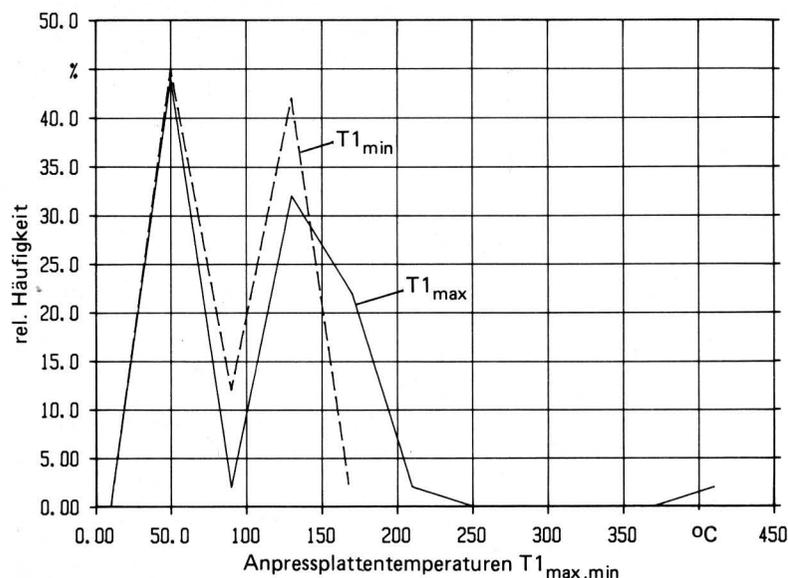
Im Bild 9 sind die Temperaturverläufe in der Anpreßplatte während dieses Rutschvorganges aufgetragen. Gemessen wurden die Temperaturen am inneren (T1), mittleren (T2) und äußeren Reibradius (T3). Setzt man voraus, daß die Anpreßkraftverteilung für die Reibpartner über die gesamte Reibfläche konstant ist, so müssen wegen der radialen Reibgeschwindigkeitsverteilung die Temperaturen von außen nach innen fallen ( $T3 > T2 > T1$ ).



**Bild 6.** An- und Abtriebsdrehzahl, Kupplungsmoment und Einrückweg als Funktion der Zeit für den simulierten Anfahrvorgang eines Pkw der unteren Mittelklasse unter Ausnutzung des vollen Motormomentes. Die Wahl der Anfahrerdrehzahl und der Einrückgeschwindigkeitsfunktion bestimmen den Kupplungsmomentenverlauf und die Belastung der Kupplung.

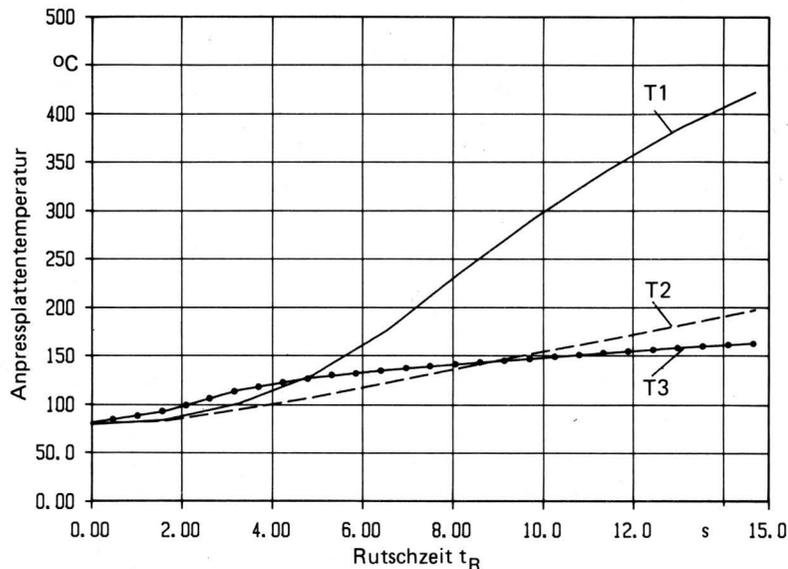


**Bild 7.** Spezifische Reibarbeit, spezifische Reibleistung, Gleitgeschwindigkeit und Anpreßplattentemperatur als Funktion der Zeit ( $T_2$  ist die Temperatur auf dem mittleren Reibradius der Anpreßplatte) bei einem Anfahrvorgang entsprechend Bild 6.

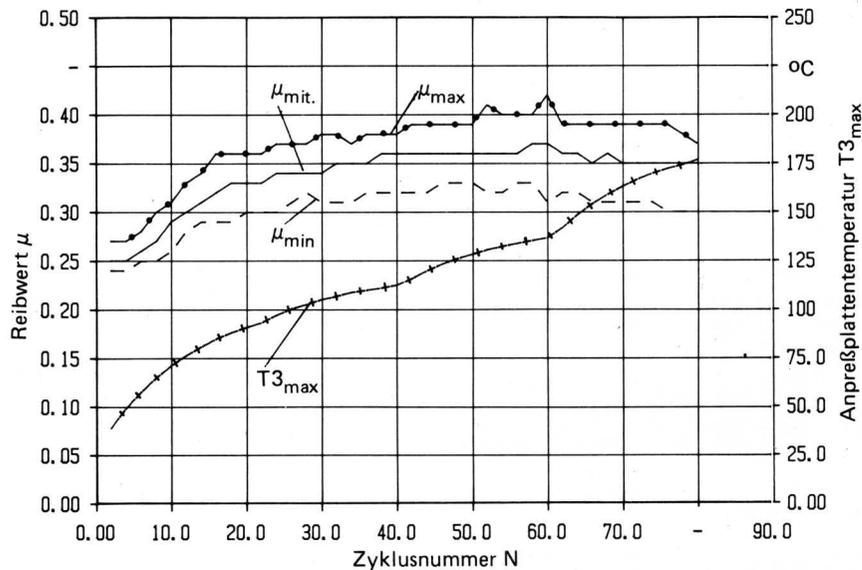


**Bild 8.** Häufigkeitsverteilung der kleinsten und größten aufgetretenen Anpreßplattentemperaturen an der Meßstelle  $T_1$  (innerer Reibradius); das zugrundeliegende Lastkollektiv enthält neben einer Vielzahl von bestimmten Anfahrvorgängen einen extrem schweren Kuppelvorgang.

Diese Verhältnisse stellen sich, wie Bild 9 zeigt, zunächst auch ein. Mit zunehmender Rutschzeit und damit steigenden Temperaturen kommt es offenbar durch Wärmeverzug zu einer Erhöhung der Anpreßkraft am Innenradius, korrespondierend mit einer Verringerung am Außenradius. Da weiterhin das gleiche Moment übertragen werden muß, steigt die Belastung der verbleibenden wirksamen Reibfläche. Die Temperatur steigt stärker an, der Wärmeverzug nimmt weiter zu usw. Es stellt sich also ein selbstverstärkender Effekt ein, der innerhalb kurzer Zeit den Kupplungsausfall zur Folge haben kann. Zum Ende der Rutschzeit gilt nach Bild 9  $T_1 > T_2 > T_3$ . Dieses Ergebnis dient nun als Ausgangspunkt für die erforderlichen konstruktiven Verbesserungsmaßnahmen.



**Bild 9.** Zeitlicher Verlauf der Anpreßplattentemperaturen während des extremen Kuppelvorganges aus Bild 8; T1 innerer, T2 mittlerer und T3 äußerer Reibradius.



**Bild 10.** Zeitlicher Verlauf von Reibwert und max. Anpreßplattentemperatur (Meßstelle T3, äußerer Reibradius) während eines Lastkollektives, gemessen an dem vorgeschädigten Belag entsprechend Bild 8 und 9. Der Reibwertverlauf zeigt deutlich, wie sich ein vorgeschädigter Belag wieder erholen kann.

Ein durch einen einzigen extremen Kuppelvorgang vorgeschädigter Reibbelag kann jedoch bei richtiger Behandlung noch eine befriedigende Lebensdauer erreichen. In **Bild 10** wird gezeigt, wie dieser Belag – nach Abkühlung der Kupplung – erneut einer Prüfung mit einem anderen Lastkollektiv unterworfen wird. Es handelt sich dabei um eine vierstufige schnelle Folge von Anfahrvorgängen mit steigender Belastung. Die nach jedem Anfahrvorgang automatisch gemessenen Reibbeiwerte steigen im Mittel von ungefähr 0,25 wieder auf etwa 0,36, ein Reibwert, der für diesen Belag als normal anzusehen ist.

Ein nicht völlig in seiner Struktur zerstörter Kupplungsbelag erholt sich also wieder, wenn man ihm die Gelegenheit dazu gibt. Dies ist eine wichtige Erkenntnis für den Fahrer, der seine Kupplung einer extremen Belastung unterzogen hat.

## 5. Zusammenfassung

Als zentrales Bauelement im Antriebsstrang von Kraftfahrzeugen hat auch die Kupplung einen Beitrag zur permanenten Weiterentwicklung der Kraftfahrzeugtechnik zu leisten.

Die Prüfung von Reibbelägen für Kupplungen hat zwei Zielrichtungen:

1. Feststellung der Möglichkeiten und Grenzen für den Einsatz spezieller Reibwerkstoffe in Kraftfahrzeugkupplungen,
2. Gewinnung neuer Erkenntnisse über die komplexen Zusammenhänge zwischen den Belastungszuständen und den Belageigenschaften für die gezielte Weiterentwicklung von Kupplungen.

Die Prüfung wird sowohl im Fahrversuch als auch auf Prüfständen durchgeführt. Der Fahrversuch liefert Ergebnisse für praxisnahe Lastkollektive, er läßt jedoch keine wesentliche Prüfzeitverkürzung zu. Außerdem sind die Abhängigkeiten zwischen Lastkollektiv und Reibmaterialverhalten nicht exakt zu ermitteln.

Bei Versuchen auf Prüfständen lassen sich solche Ergebnisse zwar gewinnen, jedoch sind bei den bisher verwendeten Schwingmassenprüfständen die Möglichkeiten zur Prüfung mit praxisnahen Lastkollektiven nur für eng begrenzte Kollektivbereiche gegeben.

Diese Ausgangssituation führte bei der Firma FICHTEL & SACHS AG zur Eigenentwicklung eines neuen Prüfstandskonzeptes, das mittels elektrischer Schwingmassen-Simulation und durch konsequente Nutzung moderner Rechner-technik die nahezu uneingeschränkte Prüfung mit Fahrzeuglastkollektiven auf dem Prüfstand erlaubt.

Die neue Prüfstandstechnologie wird beschrieben. Sie wird die Weiterentwicklung von Kupplungen durch Gewinnung neuer Erkenntnisse über die Physik der Reibbelagwerkstoffe wesentlich unterstützen können. Einige Beispiele demonstrieren die Simulationsmöglichkeiten und Ergebnisse von Versuchen.

### Schrifttum

Bücher sind durch ● gekennzeichnet

- [ 1 ] ● Winkelmann, S. u. H. Harmuth: Schaltbare Reibkupplungen. 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag 1985.
- [ 2 ] Kupplungen: Technische Information für den Konstrukteur. Druckschrift der FICHTEL & SACHS AG, Schweinfurt.
- [ 3 ] Funktion und Werkstattthinweise für Kraftfahrzeugteile. Druckschrift der FICHTEL & SACHS AG, Schweinfurt.
- [ 4 ] Schwartzkopf, U.: Aramidfasern – Eine Lösung der Probleme des Asbestersatzes in Reibbelägen. Automobiltechn. Zeitschr. – ATZ Bd. 87 (1985) Nr. 3, S. 129/33.
- [ 5 ] Strohm, F.: Reibbeläge für die Industrie. techno-tip Bd. 15 (1985) Nr. 6, S. 97/101.
- [ 6 ] Oehl, K.-H.: Entwicklung und heutiger Stand asbestfreier Reibbeläge. Automobil-Industrie Bd. 31 (1986) Nr. 1, S. 35/41.