

K U P P L U N G S B E A N S P R U C H U N G

I M

F A H R - U N D T E S T B E T R I E B

- Vortrag von H. Christoph Schmid -

1. Einleitung

Wird man als Versuchingenieur vor die Aufgabe gestellt, die Kupplungsbeanspruchung unter objektiven Kriterien zu simulieren, fragt man sofort danach, welche Beanspruchung im Fahrzeug wirklich auftritt.

Da in der Literatur dafür keine Hinweise zu finden sind, bleibt eigentlich nur der Weg offen, die Prüfspezifikationen verschiedener Kupplungs- und Fahrzeughersteller miteinander zu vergleichen, um daraus Rückschlüsse auf die Beanspruchung im Felde zu ziehen. Doch schon nach Durcharbeiten der ersten Prüfspezifikationen wird klar, daß entweder die Kupplung bei jedem Fahrzeug völlig unterschiedlich beansprucht wird, oder aber, daß Prüfspezifikation und Praxis zwei völlig verschiedene Dinge sind.

Es gibt Prüfungen auf Schwungmassenprüfständen unter Beanspruchungen, die Anfahrten mit fast leerem Fahrzeug in der Ebene entsprechen, bis hin zu Beanspruchungen, die nur mit zulässigem Anhängengewicht bei Steigungen um 15% erreicht werden können. Zum Teil werden Bedingungen simuliert, bei denen das Fahrzeug festgebremst ist und das Maximalmoment des Motors bei 3000 min^{-1} über längere Zeit durch die Kupplung

in Reibungswärme umgewandelt wird. Bei wieder anderen Prüfungen läßt man mit voll geöffneter Drosselklappe bei hoher Drehzahl und eingelegtem 3. oder 4. Gang die Kupplung schnappen.

Schon nach diesen wenigen Beispielen, die nur einen schmalen Ausschnitt aus den üblichen Prüfspezifikationen zeigen, wird sicher jeder zustimmen, daß die meisten Prüfungen nicht entsprechend den normalen Praxisanforderungen festgelegt wurden. Man kann vermuten, daß entweder ein aktuelles Feldproblem oder ein vorhandener Prüfstand die Prüfanforderungen bestimmt hatten.

Sofern die genannten Prüfbedingungen jedoch geeignet sind, ausreichend dimensionierte von schwachen Kupplungen und verschleißfeste von schlechten Kupplungsbelägen zu trennen, sollte man diese unangetastet lassen. Man muß jedoch die Frage stellen, warum ein Kupplungsbelag beim Fahrzeughersteller "X" in den unterschiedlichsten Fahrzeugen mit guten Feldergebnissen eingebaut wird, und derselbe Belag vom Fahrzeughersteller "Y" abgelehnt wird, da er den Prüfstandstest nicht bestanden hat.

Um die angesprochenen Probleme etwas zu erhellen, haben wir uns die Aufgabe gestellt, das Kollektiv der in der täglichen Fahrpraxis auftretenden Kupplungsbeanspruchung zu ermitteln. Hierzu sollte im Fahrzeug die bei jedem Kupplungsvorgang verrichtete Reibarbeit gemessen und registriert werden. Anhand der Ergebnisse soll versucht werden, Prüfbedingungen festzulegen, die die Beanspruchung der Kupplung in der Praxis weitgehend berücksichtigen.

2. Meßverfahren zur Ermittlung der Kupplungsbeanspruchung im Fahrzeug

Im ersten Schritt war die Frage zu klären, durch welche Größen die Kupplungsbeanspruchung bestimmt ist, und im zweiten Schritt, wie diese Größen meßtechnisch erfaßbar sind.

In Bild 1 ist der prinzipielle Verlauf von Motordrehzahl, Getriebeeingangsdrehzahl und Reibleistung "q" für einen Kupplungsvorgang dargestellt. Die Arbeitsbelastung "A" ist die gestrichelte Linie unter der Kurve der Reibleistung. Sie berechnet sich aus Gleichung:

$$A = \int_{t = t_0}^{t = t_s} M \times \omega_{rel} \times dt$$

Da die Fläche durch Integration berechnet wird, dürfen, im Gegensatz zur vereinfachten Darstellung im Bild, die Motordrehzahl und das Kupplungsmoment veränderlich sein.

Anfang und Ende des Kupplungsvorgangs, d.h. die Integrationsgrenzen "to" und "ts", sind dadurch bestimmt, daß während des Kupplungsvorgangs sowohl ein Moment als auch eine Schlupfdrehzahl vorliegt; vor oder nach dem Kupplungsvorgang ist entweder das Moment oder die Schlupfdrehzahl gleich Null.

Die Messung von Drehmoment und Schlupfdrehzahl wurde in einem Versuchsfahrzeug verwirklicht; der schematische Aufbau des Meßfahrzeugs ist in Bild 3 dargestellt.

2.1 Drehmomentmessung

Das von der Kupplung auf die Getriebeeingangs- welle übertragene Drehmoment wird von Dehnungs- meßstreifen auf der Getriebewelle erfaßt, das Meßsignal wird über Schleifringe mit Silberband- bürsten an einen Trägerfrequenz-Meßverstärker weitergeleitet.

Die Lösung mit Schleifringen hat gegenüber einer drahtlosen Meßwertübertragung den Nachteil, daß Verschleiß an den Bürsten und Schleifringbahnen zu Störungen oder Funktionsausfall führen können. Andererseits hatte diese Lösung für uns den Vorteil, daß sie bei einem Fahrzeughersteller bereits erfolgreich eingesetzt wird, somit war kurzfristig der sichere Weg vorgegeben. Speziell bei den im Kupplungsraum auftretenden Temperaturen $> 80^{\circ}\text{C}$ erschien uns außerdem das Risiko mit einer drahtlosen Meßwertübertragung zu groß.

2.2 Drehzahlmessung

Die Messung der Drehzahlen von Motor und Getriebeeingangswelle erfolgt mit magnet-induktiven Sonden an Zahnrädern. Erfäßt wird die Frequenz der an der Sonde auftretenden Zahnimpulse.

Da die minimal mögliche Motordrehzahl $> 800 \text{ min}^{-1}$ beträgt, ist eine marktgängige Frequenz-Spannungswandlung möglich.

Für die Erfassung der Getriebedrehzahl muß bei Anfahrvorgängen bereits bei Drehzahlen nahe Stillstand ein verwertbares Ausgangssignal am Meßverstärker vorliegen. Ein Frequenz-Spannungswandler, wie er für die Messung der Motordrehzahl

eingesetzt wird, würde hier jedoch entweder die Eingangsimpulse verstärkt wiedergeben und eine schwankende Drehzahl vortäuschen, oder das Ausgangssignal müßte sehr stark gefiltert werden und würde nur noch verzögert und träge auf Drehzahländerungen reagieren.

Der Meßverstärker für die Getriebedrehzahlmessung ist deshalb so aufgebaut, daß der zeitliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Impulsen erfaßt wird. Dieser Meßwert wird zwischengespeichert, während der Meßteil sofort den nächsten Meßvorgang einleitet. Am Ausgang des Meßverstärkers liegt der Reziprokwert des im Speicher stehenden Zeitwerts an. Somit steht auch bei kleinster Drehzahl das Ausgangssignal ohne Welligkeit, Drehzahländerungen folgt es nach einer Treppenkurve im Takt der Meßfrequenz.

2.3 Berechnung der Arbeitsbelastung

Der eigentliche Berechnungsvorgang der Kupplungsarbeit erfolgt in einem mikroprozessorgesteuerten Meßwerterfassungssystem. Die elektrischen Signale analog zu Drehzahlen und Drehmoment, werden im Analog/Digital-Wandler in digitale Signale umgewandelt. Im Takt von 100 Hz, d.h. alle 10 ms wird

der Momentanwert der Differenzdrehzahl und der Momentanwert des Kupplungsmomentes erfaßt. Sobald vom Rechner erkannt wird, daß Moment und Schlupfdrehzahl von Null verschieden sind, wird das Produkt der Momentanwerte aufaddiert und abgespeichert, bis entweder Moment oder Schlupfdrehzahl zu Null werden. Der Wert, der jetzt als Summe der einzelnen Meßwerte im Speicher steht (geteilt durch 100, da pro sec 100 Meßwerte addiert wurden), ist die durch die Kupplung verrichtete Reiarbeit "A", dieser Wert wird im Massen-Speicher abgelegt.

- 2.4 Mit der Berechnung und Abspeicherung der Größe der Reiarbeit eines jeden Kupplungsvorgangs ist die gestellte Aufgabe gelöst. Darüberhinaus wollten wir aber auch wissen, wie mit der Einsatzart des Fahrzeugs die Kupplungsbeanspruchung schwankt. Um Unterschiede durch die Beladung des Fahrzeugs oder durch die Betriebsart, wie Stadtfahrt oder Überlandfahrt zu erfassen, werden vom Fahrer Angaben über die momentanen Einsatzbedingungen durch ein Bedienteil eingegeben. Folgende Zustände können hierbei unterschieden werden:

- A. Betriebsarten: - Stadtverkehr
- Autobahn
- Landstraße Ebene
- Landstraße Gebirge
- B. Beladung : - leer 1100 kg
- halb beladen 1300 kg
- voll beladen 1550 kg
- Anhängerbetrieb 2050 kg/2750 kg

Das Fahrzeug wurde überwiegend mit einem Anhänger 500 kg gefahren, ausgewählte Testfahrten wurden zum Vergleich mit maximal zulässigem Anhängergewicht, d.h. Gesamtgewicht Fahrzeug + Anhänger 2750 kg durchgeführt.

Für die weitere Beschreibung der gemessenen Kupplungsvorgänge wurden folgende Größen gemessen und, zugeordnet zum Kupplungsvorgang, im Massenspeicher des Meßwerterfassungssystems abgelegt: Unterscheidung zwischen Anfahr- und Schaltvorgang, Wegstrecke und Zeit seit Beginn des Versuchslaufs, mittlere Motordrehzahl während der Rutschphase der Kupplung, Temperatur in der Kupplungsglocke.

Alle Werte werden als Block im Massenspeicher abgelegt. Während eines Versuchslaufs können ca. 2500 Kupplungsvorgänge (\cong 32 K-Byte) abgespeichert werden, d.h. über eine Fahrstrecke von 500 km bei 5 Kupplungsvorgängen pro km können Meßdaten gesammelt werden.

2.5 Meßwertverarbeitung

Die während eines Versuchslaufs gesammelten Daten werden anschließend auf einen HP 9845 Tischrechner überspielt. Hierzu wird der Digitalteil des Meßwertaufzeichnungssystems aus dem Meßfahrzeug entnommen, die dort gespeicherten Daten werden über eine genormte Parallelschnittstelle auf den Tischrechner übertragen und auf Magnetbandkassette abgelegt. Der Digitalteil kann sofort wieder im Fahrzeug eingesetzt werden.

Mit diesem Systemaufbau ist es möglich, einerseits kompakt und kostengünstig Meßdaten zu erfassen und abzuspeichern, andererseits aber auch, nach der Datenübertragung auf den Tischrechner, in der Programmiersprache BASIC sehr einfach die Daten zu sichten und statistisch auszuwerten. Der Speicherbereich des Digitalteils konnte auf die für einen Versuchslauf benötigte Größe beschränkt bleiben, weil sofort nach der Datenübertragung, die ca. 5 Minuten dauert, das Fahrzeug wieder einsatzbereit ist.

3. Abhängigkeit der Kupplungsbeanspruchung vom Einsatz des Fahrzeugs

Jedem Fahrzeugbenutzer ist klar, daß beim Anfahren an einer Steigung mit vollbeladenem Fahrzeug oder mit Anhänger die Kupplung am stärksten beansprucht wird. Zumindest macht ihn sein Geruchssinn darauf aufmerksam, daß bei solchen Anfahrten die Temperaturen an der Kupplung sehr hoch sein müssen. Unterhalb dieser Grenze ist eine subjektive Beurteilung der Reibarbeit, die bei den einzelnen Kupplungsvorgängen verrichtet wird, nur schwer möglich; außerdem ist zu vermuten, daß die Kupplungsbelastung auch von der Fahrweise des Fahrers abhängt.

Die möglichen Einflüsse auf die Kupplungsbeanspruchung wurden auf einer sogenannten Standardteststrecke ermittelt. Die Teststrecke führt rund durch den Schwarzwald, überwiegend auf vielbefahrenen Bundesstraßen ohne Ortsumgehung. Im Bild 7 ist das Streckenprofil dargestellt. Der Gesamthöhenunterschied beträgt 840 m, die Streckenlänge 160 km. Die maximale Steigung von 12% liegt etwa in der Mitte bei 80 km.

Im unteren Teil ist die spezifische, d.h. auf die Reibfläche bezogene Arbeit für jeden Kupplungsvorgang dargestellt. Jeder Stern entspricht einem Schaltvorgang, jeder Punkt stellt die gemessene Reibarbeit eines Anfahrvorgangs dar. Die im Bild gezeigte Testfahrt wurde mit voll beladenem Fahrzeug + Anhänger 500 kg durchgeführt. Die Kurve über den Werten für die Reibarbeit der einzelnen Kupplungsvorgänge ist der Verlauf der Temperatur in der Kupplungsglocke, der Maximalwert beträgt 85°C.

An der Maximalsteigung 12% wurden bei jeder Testfahrt zusätzlich 10 Anfahrten an definierten Streckenpunkten durchgeführt. Man erkennt die Häufung der Punkte zwischen 80 und 90 km und die Erhöhung der Temperatur um 22°C durch die Kupplungsbeanspruchung. Interessant ist auch, daß an der nachfolgenden Gefällstrecke große Werte für die Reibarbeit gemessen wurden, die durch Zurückschalten vor Kurven entstehen.

Die 10 zusätzlichen Anfahrten an der Steigung wurden nicht in die Darstellung der Beanspruchung miteinbezogen, sondern wurden getrennt ausgewertet, um Einflüsse, die durch Fahrer und Beladung bedingt sind, bei diesen Extrembeanspruchungen zu erfassen.

Die auf der Standardteststrecke gesammelten Daten konnten nicht allein die Kupplungsbeanspruchung über die gesamte Lebensdauer beschreiben. Deshalb wurden darüberhinaus mit dem Testfahrzeug beliebige Fahrten durchgeführt, wobei lediglich der Fahrer die Betriebsart und die Beladung eingeben mußte. Mit diesen, im täglichen Betrieb des Fuhrparks angefallenen Daten, wurden die Untersuchung auf eine breitere Basis gestellt und Werte über Stadtfahrt und Autobahnfahrten ermittelt, da diese Anteile in der Standardteststrecke nicht enthalten sind.

3.1 Auswertung der Meßdaten

Die Meßwerte für die Reibarbeit bei jedem Kupplungsvorgang wurden getrennt nach Einsatzbedingungen aufbereitet und als Häufigkeitsverteilung, bezogen auf die gesamte Reibarbeit während des Versuchslaufs dargestellt. Als Beispiel sehen Sie im Bild 8 die relative Häufigkeit der Reibarbeit pro Kupplungsvorgang, wobei in den Klassen nicht die Anzahl der Kupplungsvorgänge, sondern die Reibarbeit aufsummiert ist. Es wurden alle Fahrten im Gebirge ausgewertet und die Verteilung für alle Kupplungsvorgänge erstellt, zusätzlich werden auf dem Bild folgende Angaben eingetragen:

1. die mittlere Reibarbeit " A_m " aus allen Kupplungsvorgängen
2. die mittlere Motordrehzahl " N_m " während des Kupplungsvorgangs
3. die mittlere Kupplungsglockentemperatur " T_m "
4. die Durchschnittsgeschwindigkeit " V_m "
5. die gefahrene Wegstrecke
6. die Anzahl der Kupplungsbetätigungen und
7. die Anzahl der Betätigungen pro km.

Durch diese zusätzlichen Angaben ist ein Vergleich unterschiedlicher Fahrten sehr leicht möglich, man kann z.B. den Fahrstil eines Fahrers durch Vergleich von mittlerer Drehzahl und Durchschnittsgeschwindigkeit bewerten.

3.2 Einfluß von Beladung und Steigung

Vergleicht man die Meßwerte der Fahrversuche mit dem berechneten Wert für die Arbeitsbelastung, stellt man eine gute Übereinstimmung fest: Der bei den Testfahrten aufgetretene Maximalwert der spezifischen Arbeit von 100 Nm/cm^2 entspricht einer Anfahrt an einer 12%igen Steigung mit einer mittleren Anfahrtdrehzahl von 2260 min^{-1} . Über alle Testfahrten wurde bei Anfahrten am Berg, fast unabhängig von der Beladung, mit mittleren Anfahrtdrehzahlen zwischen 2100 und 2500 min^{-1} angefahren. Mit der Drehzahl des maximalen Motormoments, die beim Testfahrzeug bei 4000 min^{-1} liegt, wurde auch bei maximaler Zuladung in keinem Fall angefahren.

3.3 Einfluß der Betriebsart

Sämtliche Stadtfahrten wurden in Städten ohne Steigung durchgeführt. Vergleicht man im Bild 9 die hierbei gemessene Verteilung der Reibarbeit mit der Verteilung für die Betriebsart Landstraße Ebene, läßt sich kein wesentlicher Unterschied ablesen.

Im Bild ist die Verteilung der Reibarbeit über alle Kupplungsvorgänge in der Stadt aufgetragen und darüber die Verteilung für Landstraße Ebene. Der Anteil der Anfahrvorgänge liegt in der Stadt bei ca. 30% aller Kupplungsvorgänge, in der Ebene liegt der Anteil nur bei 10%. Die größere Anzahl Schaltvorgänge zeigt sich in der Verteilung Landstraße mit dem deutlichen Maximum bei einer spezifischen Reibarbeit von 5 - 10 Nm/cm².

Die Anfahrvorgänge in der Stadt, bei denen die Kupplung stärker beansprucht wird, sind in der Verteilung nicht zu erkennen, da, im Gegensatz zur Stadt, bei Fahrten auf der Landstraße während der Schaltvorgänge beschleunigt wird, was die Reibarbeit beim Schaltvorgang erhöht.

Wir können also feststellen, daß die Verteilung der Reibarbeit im wesentlichen von Steigung und Beladung abhängig ist und nicht von den Fahrbedingungen, z.B. Stadtfahrt oder Fahrt auf der Landstraße.

Bei unseren Fahrten wurde auf der Autobahn weniger als 1 mal pro 20 km Fahrtstrecke gekuppelt, außerdem war die Reibarbeit immer kleiner als 8 Nm/cm². In der Gesamtbetrachtung der Kupplungsbeanspruchung wurden deshalb Autofahrten nicht berücksichtigt.

3.4 Fahrereinfluß

Sogenannte Kupplungsfahrer, d.h. Fahrer, die jede Kupplung in kürzester Zeit vollständig verschleiben lassen, sind allen bekannt. Wir ließen deshalb unsere Teststrecke von möglichst vielen Fahrern abfahren, darunter waren Schüler, Versuchsmechaniker, Ingenieure und Berufskraftfahrer. In einem Fall wurde versucht, die Strecke in kürzest möglicher Zeit zu bewältigen. Überraschend war dabei, daß der maximale Unterschied von Fahrer zu Fahrer bei 30% lag, sowohl bezogen auf den Mittelwert der Arbeitsbelastung, als auch bezogen auf den Kupplungsvorgang mit der höchsten Arbeitsbelastung pro Fahrt. Diese 30% Unterschied entsprechen einer Erhöhung der Anfahrtdrehzahl von 2100 auf 2400 min⁻¹.

4. Weitere Ergebnisse aus den Meßfahrten

Aus den zusätzlichen Daten, wie Temperatur, Wegstrecke usw., die bei jedem Kupplungsvorgang mit erfaßt wurden, lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

4.1 Kupplungshäufigkeit

In der Tabelle, Bild 10, ist die Kupplungshäufigkeit pro km aufgelistet, zugeordnet zu Beladung und Betriebsart. Die gefundenen Werte für Landstraße ca. 2 Kupplungsvorgänge pro km, für Stadtverkehr durchschnittlich 10 pro km, sowie der Durchschnittswert 2,8 Betätigungen pro km, decken sich gut mit den schon bisher von uns angenommenen Werten.

Die Abhängigkeit der Kupplungshäufigkeit von der Beladung, bzw. vom Leistungsgewicht des Fahrzeugs, insbesondere im Stadtverkehr entspricht der Erwartung.

4.2 Lufttemperatur in der Kupplungsglocke

Die Temperaturen in der Kupplungsglocke ergeben sich aus dem Verhältnis der Aufheizung durch Motor und Getriebe zu Kühlung durch Fahrtwind. Zusätzlich wird die Luft durch die Verlustleistung der Kupplung erwärmt.

Die mittlere Verlustleistung der Kupplung können wir aus der Kuppelhäufigkeit und der Arbeit pro Reibvorgang berechnen. Die höchste Verlustleistung wurde im Stadtverkehr ermittelt,

da hier bei niedriger Reibarbeit pro Kupplungsvorgang die Kupplung sehr häufig betätigt wird; die mittlere spezifische Reibleistung beträgt ca. $0,6 \text{ W/cm}^2$. Bei Landstraßen- und Gebirgsfahrten schwankt die Verlustleistung zwischen $0,2$ und $0,4 \text{ Watt/cm}^2$.

Der Vergleich der Temperaturen in der Kupplungsglocke zwischen Stadt, Ebene und Gebirge ergab keine wesentlichen Unterschiede. Selbst bei Stadtfahrten, wo wegen der niedrigen Durchschnittsgeschwindigkeit von ca. 30 km/h nur wenig Kühlung durch Fahrtwind vorhanden ist, und die Reibleistung der Kupplung am höchsten ist, lag die mittlere Temperatur in der Kupplungsglocke genau so hoch wie bei Fahrt in der Ebene oder im Gebirge. Vermutlich heizt Motor und Getriebe die Kupplungsglocke in der Stadt weniger auf, sodaß die erhöhte Erwärmung durch die Kupplung ausgeglichen wird.

Einzige Ausnahme bilden die bei jeder Testfahrt auf der Standardstrecke zusätzlich durchgeführten Anfahrten: Hier treten Temperaturerhöhungen bis zu 30°C auf.

Die überwiegende Zahl der Testfahrten wurden bei winterlichen Außentemperaturen um 0°C absolviert, die Temperaturen im Kupplungsraum lagen dementsprechend niedrig. Die durchschnittliche Differenz zur Außentemperatur betrug 70°C, dies bedeutet, daß durchschnittliche Temperaturen in der Kupplungsglocke von 90 bis 100°C zu erwarten sind.

5. Verteilung der Beanspruchung über die Lebensdauer der Kupplung

Setzt man die Häufigkeiten, die für die einzelnen Betriebsarten gefunden wurden, entsprechend der wirklich auftretenden Verteilung zusammen, hat man die Beschreibung der Gesamtbeanspruchung der Kupplung.

In der Literatur waren keine Angaben zu finden, in welchen Verhältnissen sich die einzelnen Anteile zusammensetzen, deshalb mußten wir aus eigener Erfahrung Annahmen treffen:

Wir gingen von gleichen Kilometeranteilen der Betriebsarten Stadtverkehr, Autobahn und Landstraße Ebene aus, mit einem Anteil von 10% Landstraße Gebirge. Die Beladungszustände wurden gleichmäßig verteilt auf leer, halbvoll, voll und Anhängerbetrieb mit Anhänger 500 kg.

Es ist uns bewußt, daß wir bei dieser Aufteilung in den üblichen Fehler aller Versuchsingenieure verfallen sind, und die kritischen Zustände Anhängerbetrieb und Gebirgsfahrt überbewertet haben. Hier muß in der Diskussion mit den Fahrzeugherstellern eine realistische Verteilung ermittelt werden.

Erstellt man unter diesen Voraussetzungen eine Häufigkeitsverteilung, extrapoliert auf 100 000 km ergibt sich die im Bild 11 gezeigte Verteilung. Deutlich fällt auf, daß das Maximum der Reibarbeit bei Kupplungsvorgängen mit niedriger spezifischer Reibarbeit liegt, der Wert beträgt etwa 9 Nm/cm^2 . Im Bild 12 werden die Anfahrvorgänge und Schaltvorgänge getrennt dargestellt. Sie sehen, daß beim Anfahren die Verteilung der Reibarbeit zu höheren Werten verschoben ist, jedoch machen die Anfahrvorgänge nur 18% aller Kupplungsvorgänge aus, somit wird die Gesamtverteilung überwiegend durch die Verteilung der Schaltvorgänge bestimmt.

6. Praxisorientierte Kupplungsprüfung

Bei der Betrachtung der Gesamtverteilung der Reibarbeit fängt man unwillkürlich an, die üblichen Prüfstandsbedingungen für die Verschleißprüfung von Kupplungen mit den gemessenen Werten zu vergleichen. Als Beispiel sei der sogenannte Belag-Standardtest herausgegriffen, der in dieser Form

weit verbreitet ist. Diese Prüfung wird auf einem Schwungmassenprüfstand durchgeführt, wobei alle 40 s eine Schwungmasse von $3,13 \text{ kgm}^2$ von Null auf 1470 min^{-1} beschleunigt wird. Dies bedeutet eine spezifische Reibarbeit pro Kupplungsvorgang von 112 Nm/cm^2 und eine mittlere spezifische Reibleistung von $2,8 \text{ W/cm}^2$.

Solch eine hohe Reibarbeit wurde bei unseren Testfahrten bei Anfahrten an Steigungen von 12% mit voll beladenem Fahrzeug und 500 kg Anhängerlast nicht erreicht, bei maximal zulässiger Anhängerlast 1200 kg wurde der Wert um 80% überschritten. Wir dürfen also feststellen, daß diese Prüfung sicher nicht den am häufigsten vorkommenden Bereich der Kupplungsbeanspruchung abdeckt, sondern extremen Fahrbedingungen zuzuordnen ist.

Man könnte einwenden, daß es prinzipiell unwichtig ist, bei welcher Beanspruchung eine Kupplung getestet wurde. Unterschiede in den Belägen müssen bei allen Beanspruchungen in gleicher Weise gefunden werden. Daß dies jedoch nicht der Fall ist, zeigt Bild 14, in dem der spezifische Belagverschleiß über der mittleren spezifischen Reibleistung aufgetragen ist.

Die Werte wurden bei uns auf dem Prüfstand mit frei ausblasender Kupplung ermittelt. Dargestellt sind die Verschleißraten von 3 asbesthaltigen und 3 asbestfreien Belägen. Man sieht, daß bei der Prüfung bei niedriger Beanspruchung von 2 W/cm^2 die Bewertung des Verschleißverhaltens völlig anders ausfällt als bei einer Prüfung bei ca. 6 W/cm^2 . Die für eine Prüfstandserprobung gewählte Beanspruchung muß also unbedingt den Bedingungen des Fahrbetriebs entsprechen um eine Übertragung der Ergebnisse zu ermöglichen.

6.1 Verschleißprüfung

Ein Prüfprogramm für eine Verschleißprüfung auf dem Schwungmassenprüfstand könnte unter Berücksichtigung der gemessenen Werte folgendermaßen aussehen: Wir wählen als Reibarbeit pro Kupplungsvorgang 9 Nm/cm^2 ; dies entspricht dem Mittelwert der gefundenen Verteilung über 100 000 km. Die zugehörige Anfahrtdrehzahl wurde mit 1300 min^{-1} ermittelt; wir wählen die Drehzahl einer 4-poligen Asynchronmaschine mit 1500 min^{-1} . Aus Drehzahl und Arbeit ergibt sich die gesuchte Schwungmasse mit $0,33 \text{ kgm}^2$.

Die mittlere Reibleistung betrug bei Stadtfahrt $0,6 \text{ W/cm}^2$; dies entspricht einer Schalzhäufigkeit von 4,5 Schaltungen pro Minute. Um den Praxisbedingungen gerecht zu werden, müßte nun noch die Kupplung in einer Kupplungsglocke angeordnet werden, die von außen so gekühlt wird, daß die mittlere Lufttemperatur in der Glocke 90 bis 100°C beträgt. Wesentlich einfacher wird der Prüfaufbau, wenn man die Schalzhäufigkeit so auswählt, daß die gewünschte Lufttemperatur sich von selbst einstellt. Die Schalzhäufigkeit ist dann bei gleicher Kupplung und gleicher Kupplungsglocke konstant, nur bei Veränderungen an der Kupplungsglocke muß die Schalzhäufigkeit korrigiert werden, um die veränderten Kühlbedingungen auszugleichen.

6.2 Überprüfung der Grenzbelastbarkeit

Mit den oben festgelegten Prüfbedingungen können wir Beläge aussuchen, die sicher für 90% der Einsatzarten des Fahrzeugs einwandfrei funktionieren und wenig verschleifen. Es könnte jedoch geschehen, daß bei der ersten hohen Beanspruchung der Belag völlig zerstört wird. Um dies mit Sicherheit auszuschalten, muß also noch geprüft werden, ob alle in der Praxis auftretenden Beanspruchungen ohne Zerstörung des Belages ertragen werden.

Die meisten Fahrzeughersteller fahren solche Tests in Form von Anfahrtests an Steigungen mit oder ohne Anhänger. Wir halten solche Tests für sinnvoll, da hier die Funktion der Kupplung unter Grenzbedingungen praxisnah geprüft werden kann.

Die bereits bekannte Abhängigkeit der Verschleißrate von der mittleren spezifischen Reibleistung zeigt bei höheren Reibleistungen einen steilen Anstieg. Hier ist offensichtlich die Grenze der Verwendbarkeit von organischen Reibbelägen erreicht.

Aus Erfahrung weiß man, daß bei einem solchen Test die Grenze der Belastbarkeit der Beläge durchaus erreicht wird. Man darf also nicht nach dem Motto vorgehen: "Viel hilft viel" ; vielmehr ist gerade hier sorgfältig auf konstante Prüfbedingungen zu achten, da schon geringe Erhöhungen der Reibleistung zu Ausfall des Belages führen können und somit das Ergebnis eines Vergleichs von 2 Belägen dem Zufall überlassen bleibt.

Bei einer Erhöhung der mittleren Motordrehzahl während des Anfahrvorgangs von 2500 auf 3000 min^{-1} vergrößert sich die Reibarbeit um mehr als 50%.

Neben der Überprüfung der thermischen Festigkeit des Kupplungsbelages gibt ein solcher Anfahrtest gleichzeitig Aufschluß über ein weiteres wichtiges Kriterium neben der Verschleißfestigkeit, nämlich über die Übertragungssicherheit der Kupplung.

Kupplungsbeläge haben leider die unangenehme Eigenschaft, mit zunehmender spezifischer Reibleistung, dies ist gleichbedeutend mit erhöhter Reibflächentemperatur, im Reibwert nachzulassen. Im Bild 15 ist der Reibbeiwert organischer Beläge in Abhängigkeit von der mittleren spezifischen Reibleistung aufgetragen, der in Prüfstandsversuchen mit frei ausblasender Kupplung ermittelt wurde. Der große Unterschied des Reibbeiwerts bei hohen Reibtemperaturen wird bei der Überprüfung der Grenzanfahrbedingungen am Berg gleichzeitig mitgeprüft.

Wir schlagen vor, neben dem Verschleißtest bei niedriger Beanspruchung auf dem Schwungmassenprüfstand, einen Anfahrtest am Berg durchzuführen, bei dem an der maximal zulässigen Steigung mit vollbeladenem Fahrzeug und zulässiger Anhängelast angefahren wird. Die Anfahrhäufigkeit wird in Anlehnung an den DIN Test auf 1 Anfahrt pro Minute festgelegt.

Als wesentlichsten Punkt bei Durchführung dieses Tests sehen wir die Einhaltung einer konstanten Drehzahl, da die Reibarbeit mit dem Quadrat der Drehzahl berechnet wird. Weil die Motoren und Fahrzeuge unterschiedlich ausgelegt sind, muß für jedes Fahrzeug die Anfahrtdrehzahl festgelegt werden.

Die ausgewählte Drehzahl darf maximal 2500 min^{-1} betragen; keinesfalls sollte die Drehzahl bei Maximalmoment des Motors gewählt werden, da dies nicht den Praxisbedingungen entspricht.

10 Anfahrten im Abstand von 1 Minute halten wir für die Überprüfung der Überlastsicherheit der Kupplung für ausreichend. Der Test gilt als bestanden, wenn die Kupplung nicht durchrutscht und die Beläge durch die hohe thermische Beanspruchung nicht zerstört wurden. Dies bedeutet für die Praxis, daß auch nach einer Grenzbeanspruchung die Kupplung ohne Funktionsbeeinträchtigung weiter eingesetzt werden kann.

Nicht sinnvoll erscheint uns die Größe des Belagverschleißes bei dieser Prüfung als Beurteilungskriterium zu wählen, da bei solch hohen Beanspruchungen der Verschleiß nicht reproduzierbar ist und der Test lediglich die Funktionssicherheit der Kupplung gewährleisten soll.

7. Schlußbetrachtung

Sicher wollen auch wir nicht behaupten, daß die bisher angewandten Prüfmethode zu unbrauchbaren Praxisergebnissen führten. Es ist jedoch zu vermuten, daß durch extreme Prüfbedingungen eine zufällige Auswahl getroffen wurde und in der Praxis taugliche Beläge wegen nicht erfüllter Prüfstandstests ausgeschieden wurden.

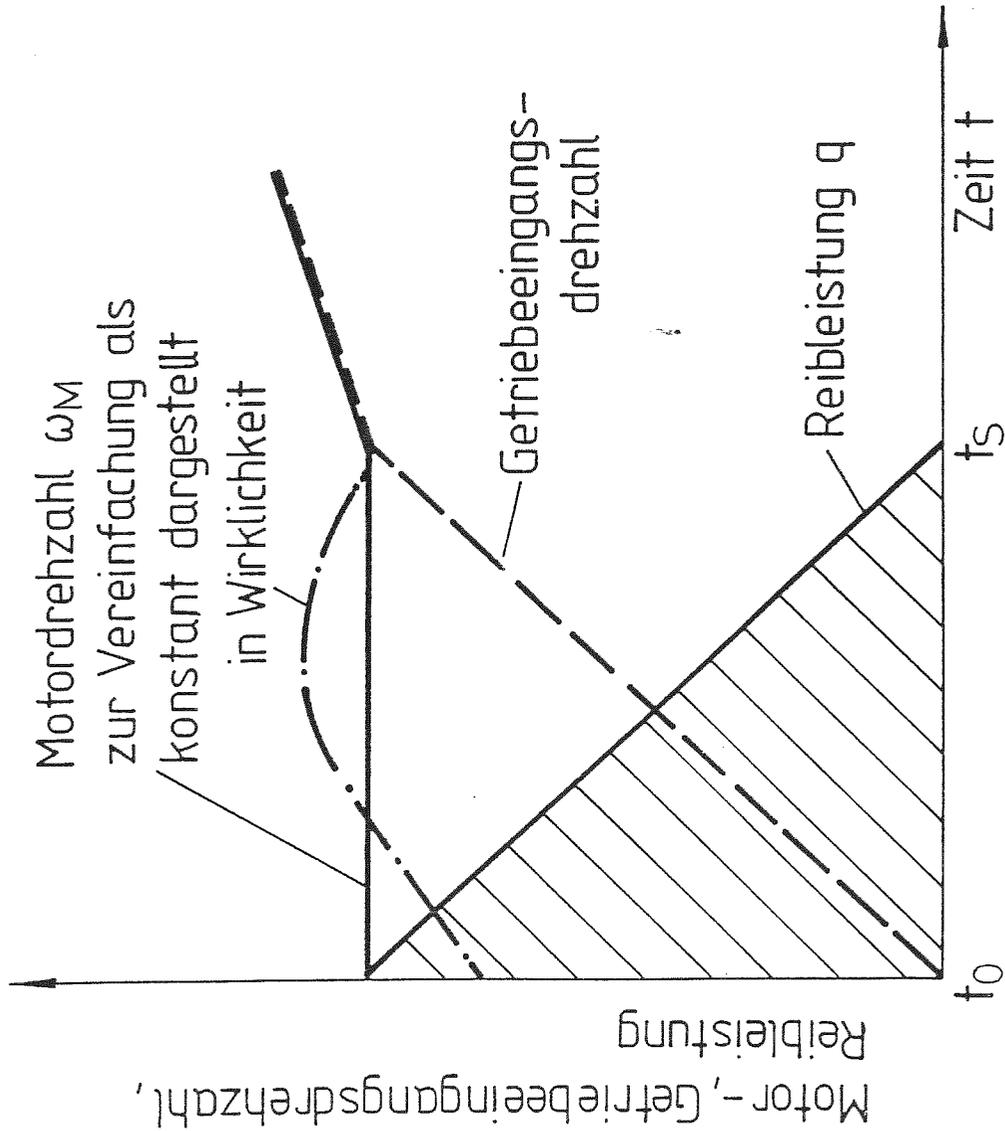
Es konnte gezeigt werden, daß in der Fahrpraxis nur sehr selten extreme Kupplungsbeanspruchung im Pkw auftreten.

Eine Auswahl von Belägen aufgrund von Extrembeanspruchung hinsichtlich Verschleißverhalten ist gefährlich, vor allem wenn die Bedingungen nicht konstant gehalten werden.

Durch die notwendige Umstellung auf asbestfreie Beläge, zumal diese unter Zeitdruck vorgenommen wird, ist es wichtig, überlieferte Prüfbedingungen unter dem Blickwinkel der Praxisorientierung neu zu überdenken. Das andersartige Verschleißverhalten der asbestfreien Beläge und besonders die zum Teil geringe thermische Stabilität können sonst zu einer nicht praxisgerechten Belagauswahl führen.

Die vorgeschlagenen Prüfungen der Kriterien Verschleißfestigkeit bei niedriger Beanspruchung und Funktionssicherheit bei Grenzbeanspruchung werden mit ausreichender Sicherheit eine Aussage über die Verwendbarkeit der Kupplung bringen.

//// = Arbeitsbelastung „A“



$$A = \int_{t=t_0}^{t=t_s} \omega_{rel.} \times dt$$

Integrationsgrenzen:

für $t_0 < t < t_s$ gilt $M \neq 0$

und $\omega_M \neq \omega_G$

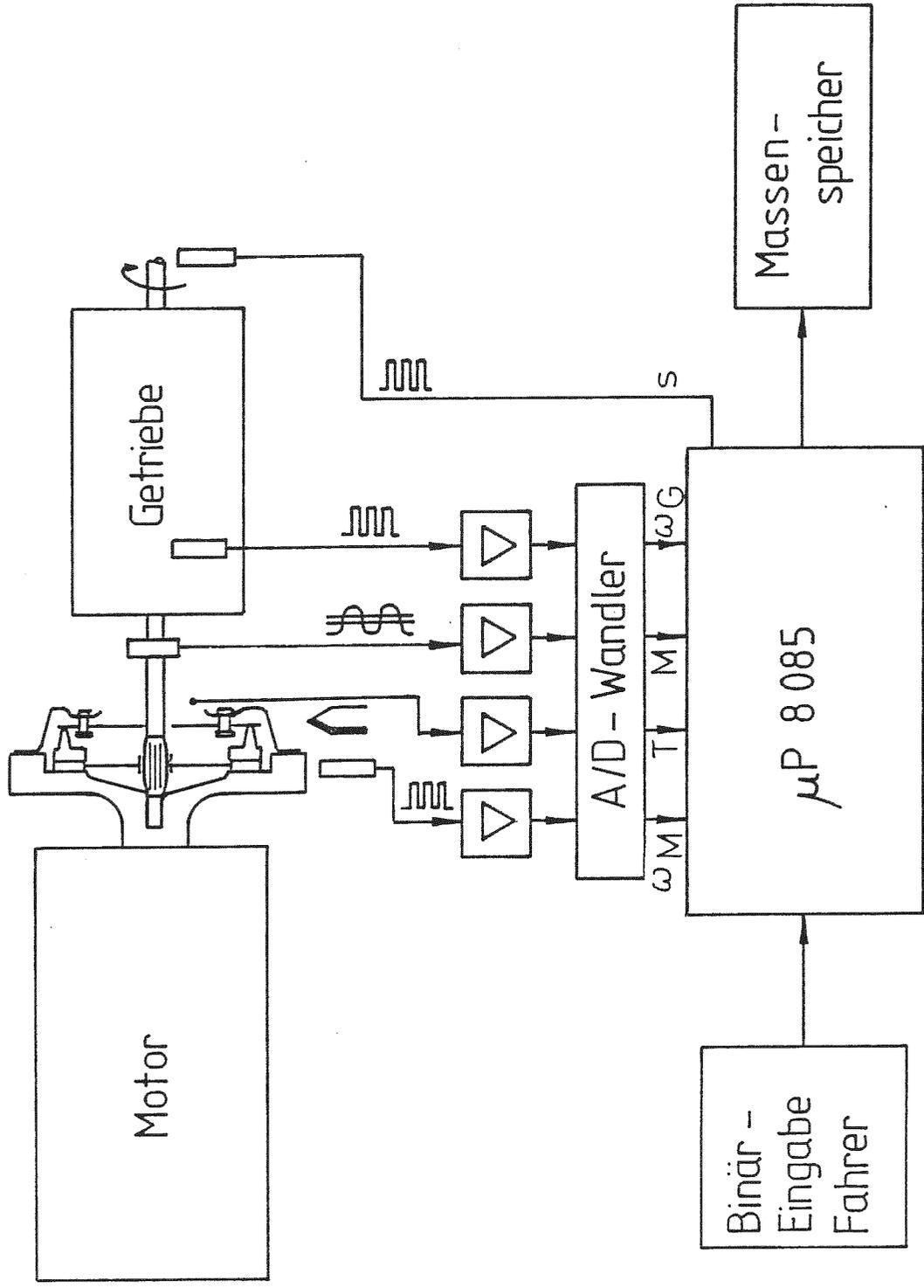
$t_0 > t > t_s$ gilt $M = 0$

oder $\omega_M = \omega_G$

01 01 82

Vereinfachte Darstellung des Kupplungsvorgangs

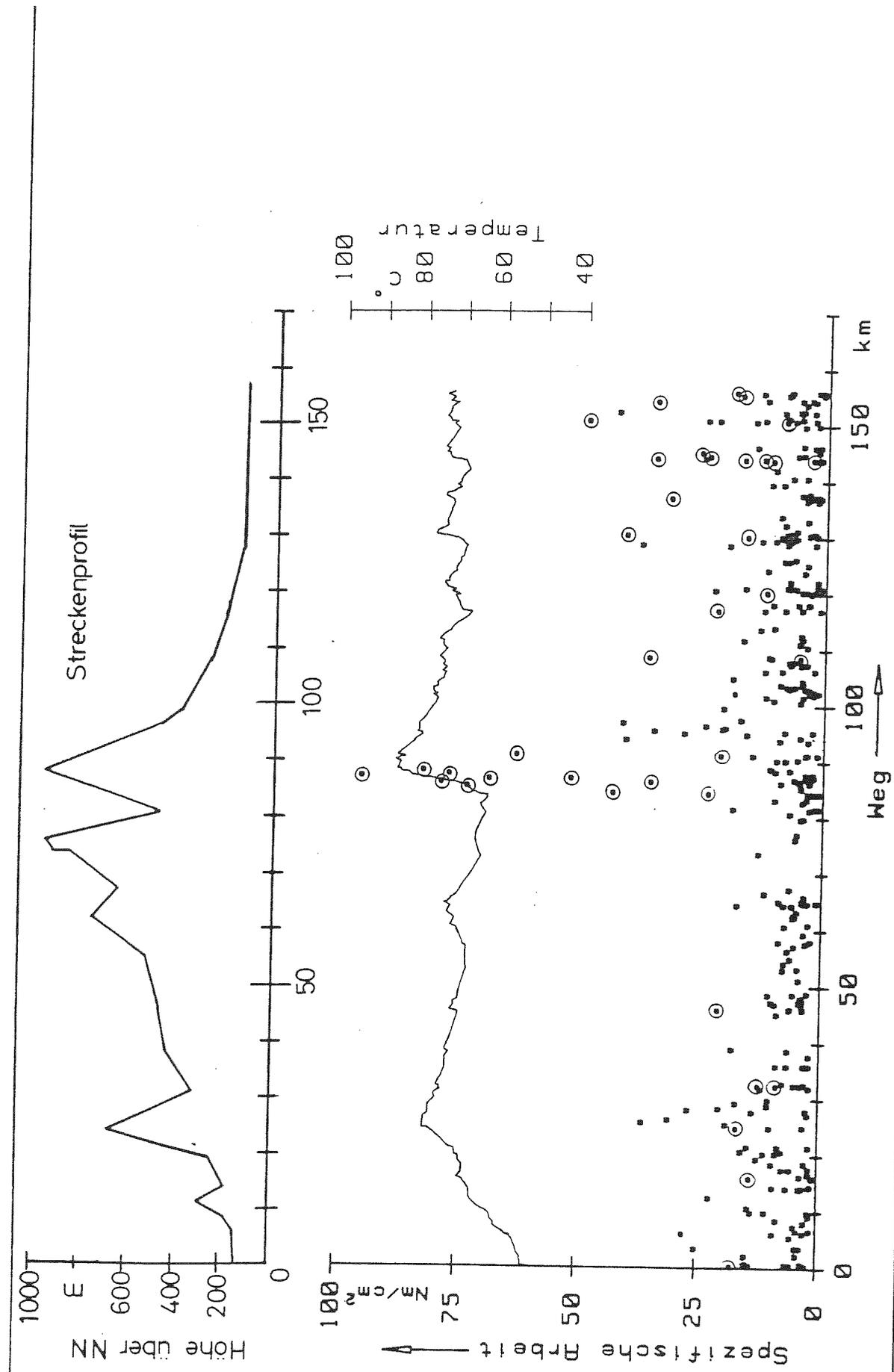


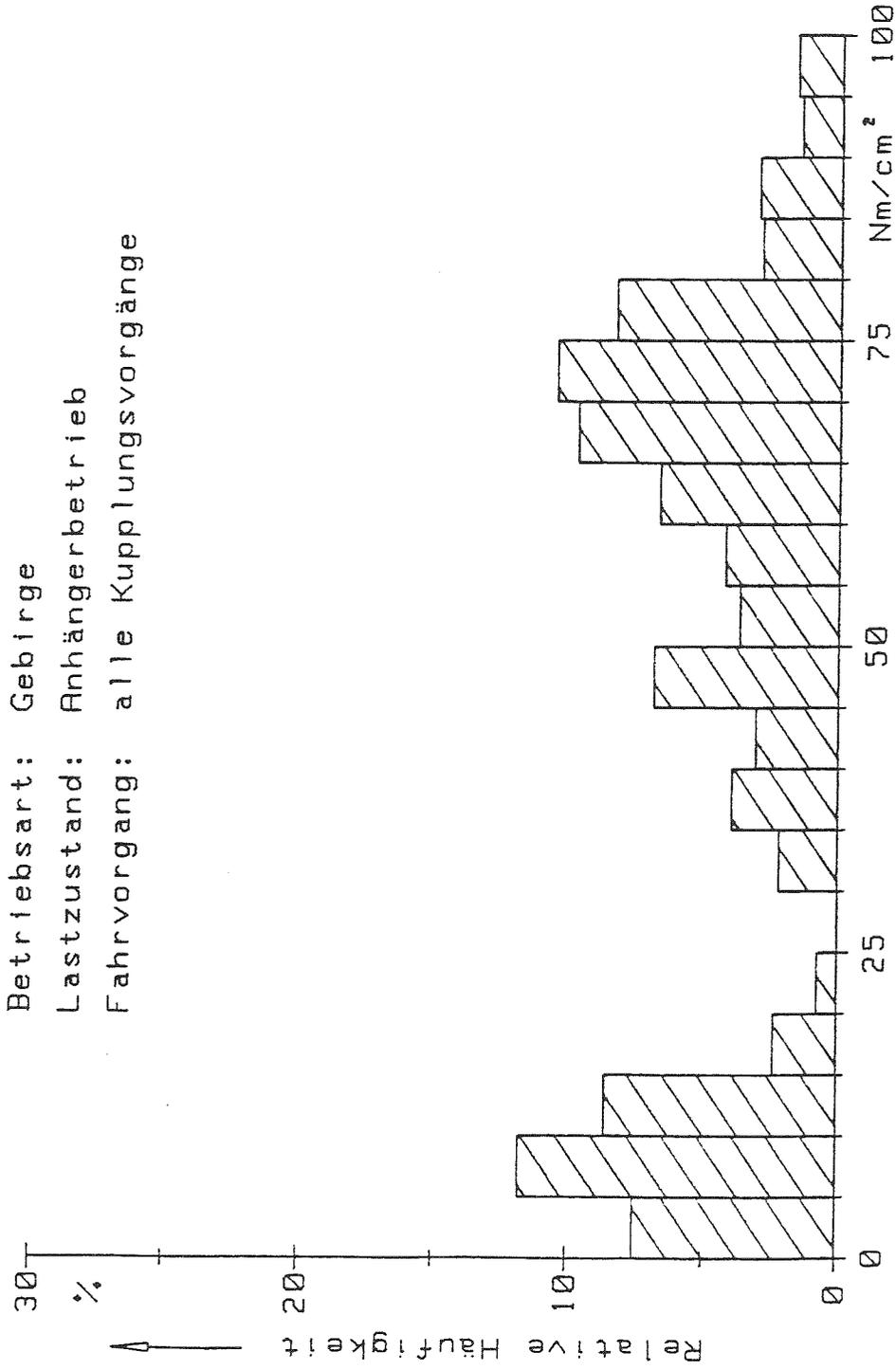


07 01 82

Standardteststrecke

Streckenprofil, Temperaturverlauf, Kupplungsvorgänge



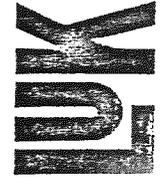


Betriebsart: Gebirge
 Lastzustand: Anhängerbetrieb
 Fahrvorgang: alle Kupplungsvorgänge

$R_m: 13 \text{ Nm/cm}^2$ $N_m: 2395 \text{ min}^{-1}$ $T_m: 70^\circ\text{C}$ $V_m: 51 \text{ Km/h}$
 Fahrstrecke: 3579 Km 6831 Betätigungen 2 Betätigungen/Km

08 01 82

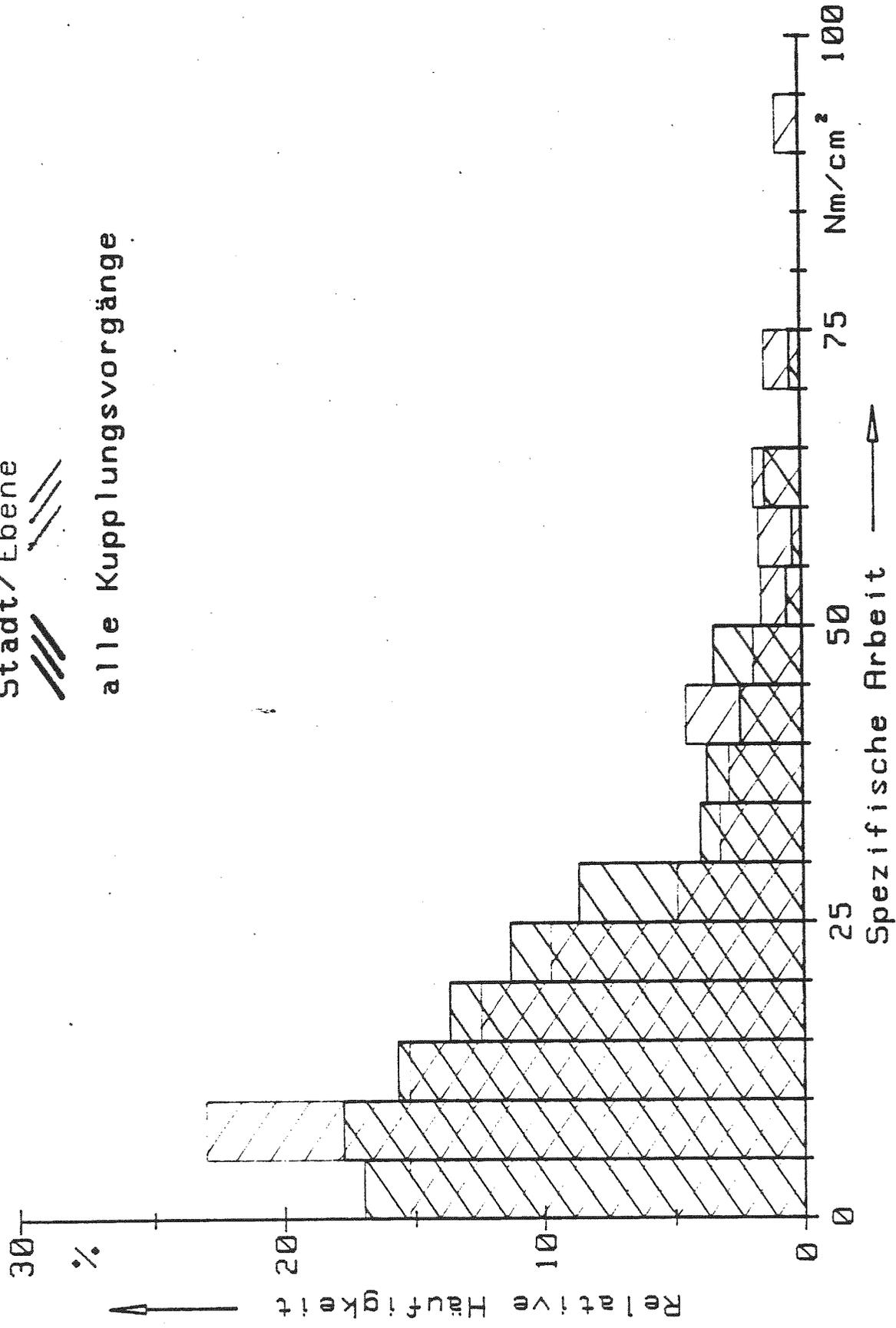
Häufigkeitsverteilung der spezifischen Reibarbeit



Stadt / Ebene

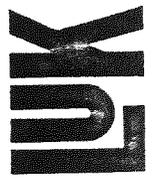


alle Kupplungsvorgänge



09 01 82

Häufigkeitsverteilung der spezifischen Reibarbeit
Vergleich Stadtverkehr, Ebene / Landstraße, Ebene



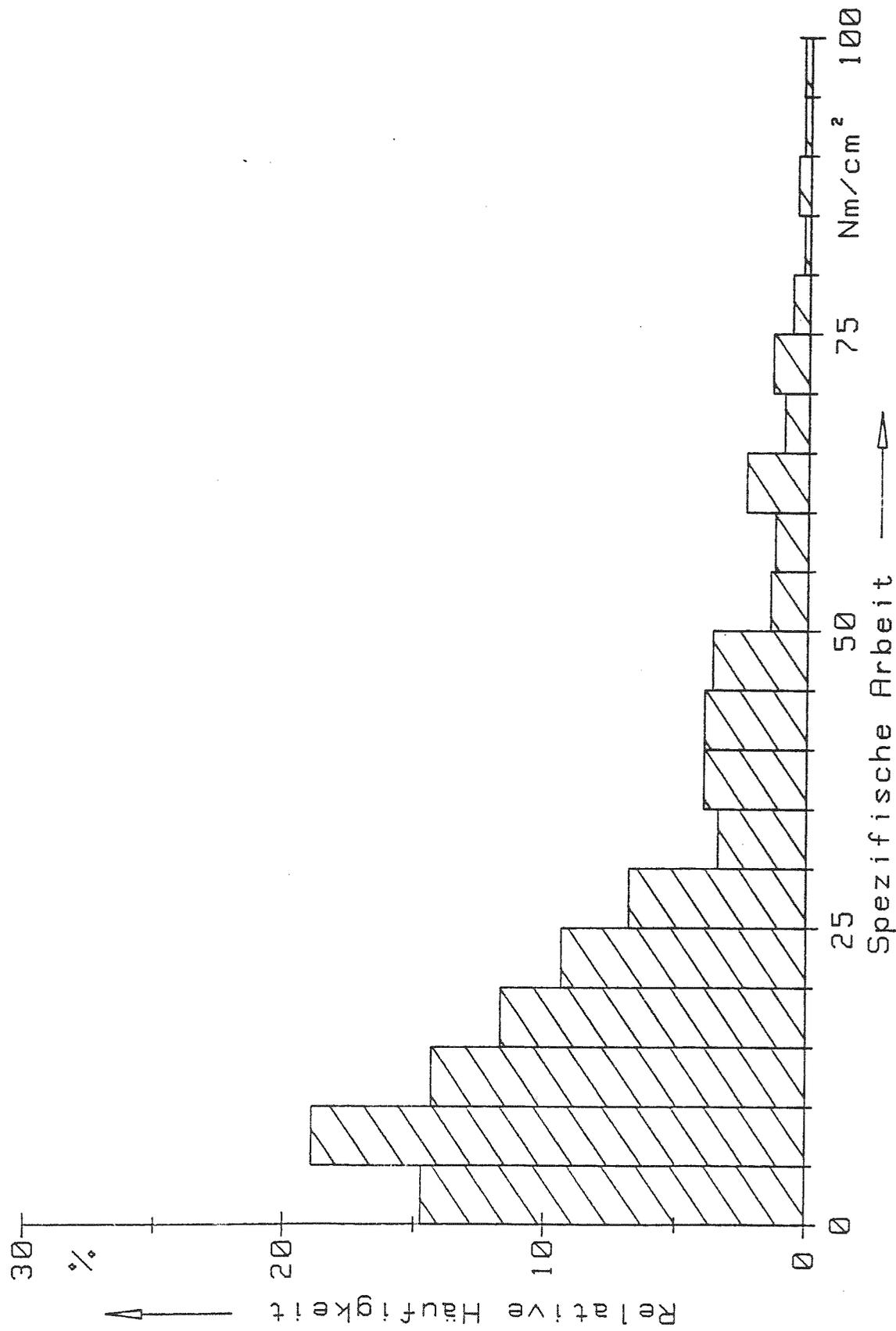
Beladung	Leistungsgewicht	Landstraße	Stadtverkehr
Fahrzeug leer	12 kg/kW	1,8	7
vollgeladen	17 kg/kW	2,1	8
Anhänger 500kg	23kg/kW	2,1	11
Anhänger 1000kg	30kg/kW	2,2	13

Durchschnittswert : 2,8 Betätigungen / km

Kuppelhäufigkeit in Abhängigkeit
von Betriebsart und Beladung

10 01 82

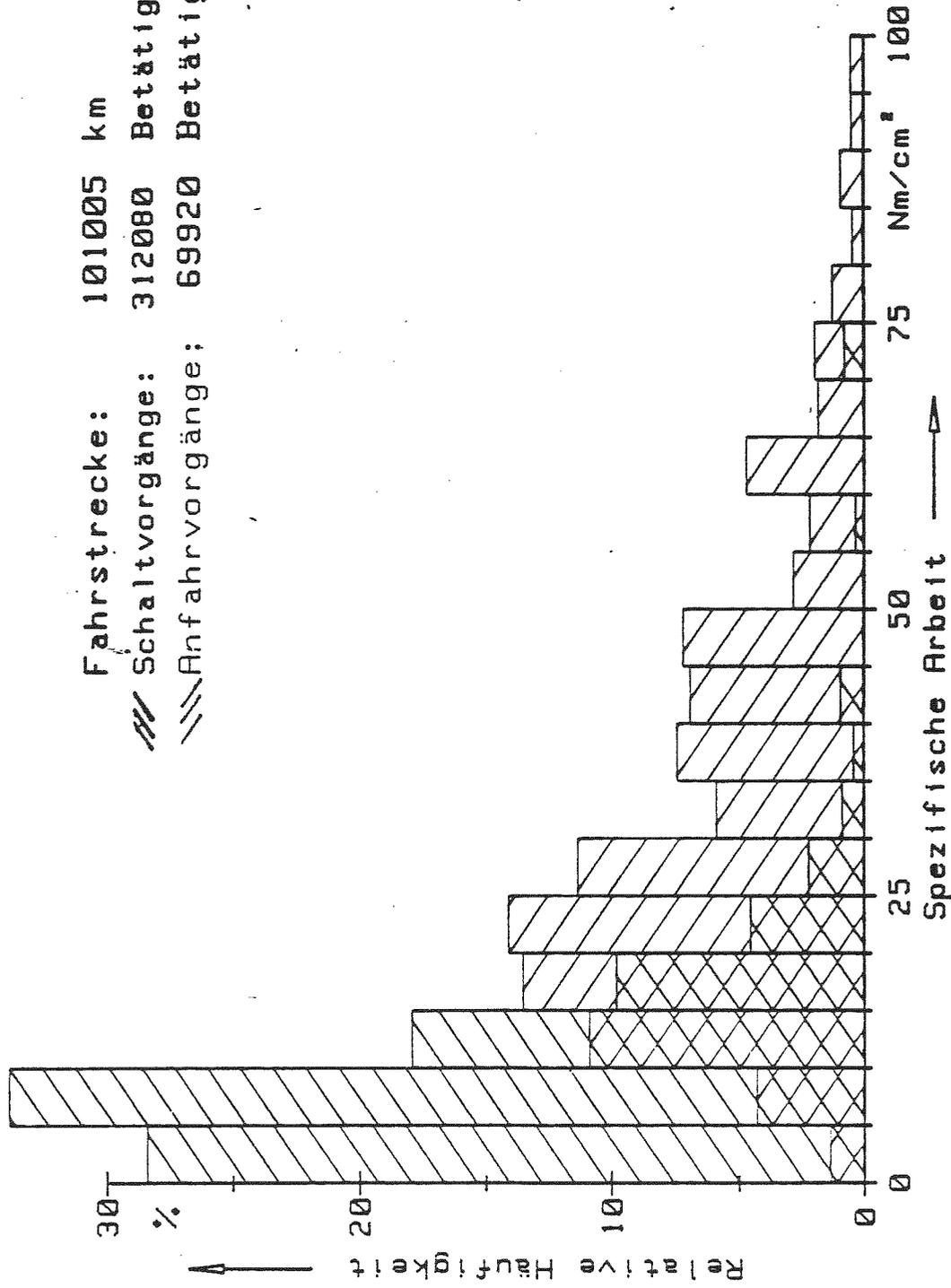




Häufigkeitsverteilung der spezifischen Reibarbeit
über Fahrstrecke 100 000 km



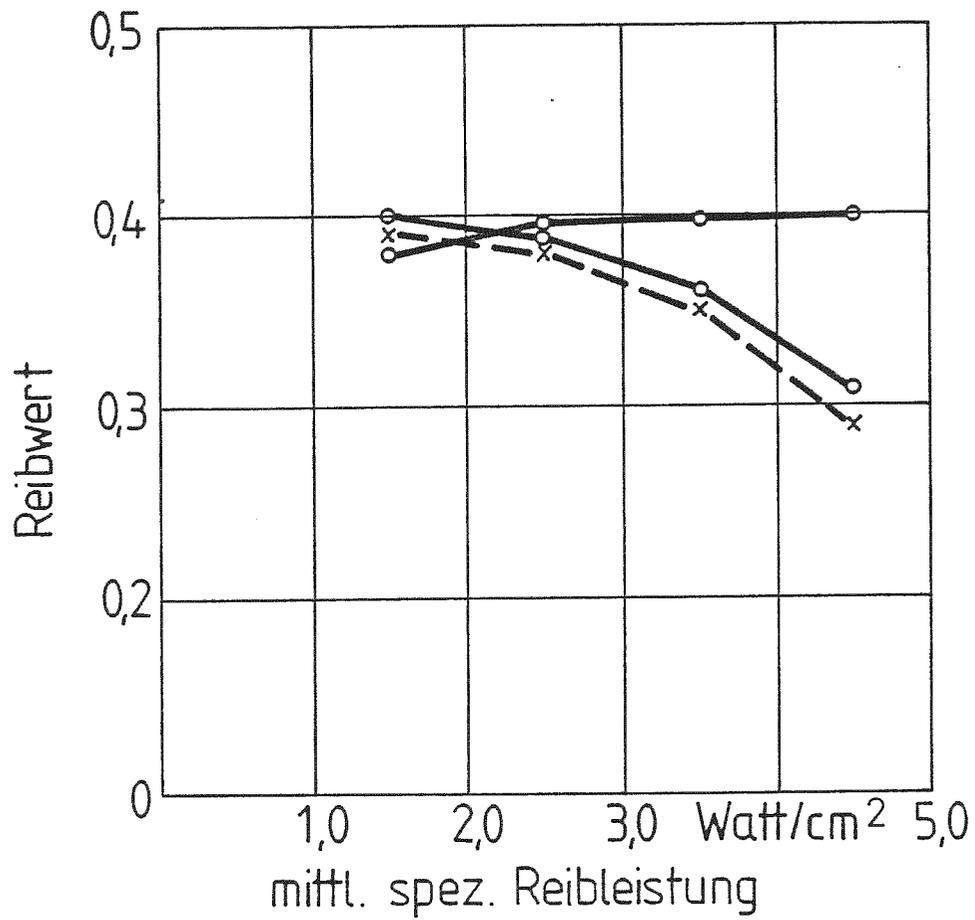
11 01 82



Häufigkeit der spezifischen Reiarbeit
 beim Anfahren und Schalten

12 01 82

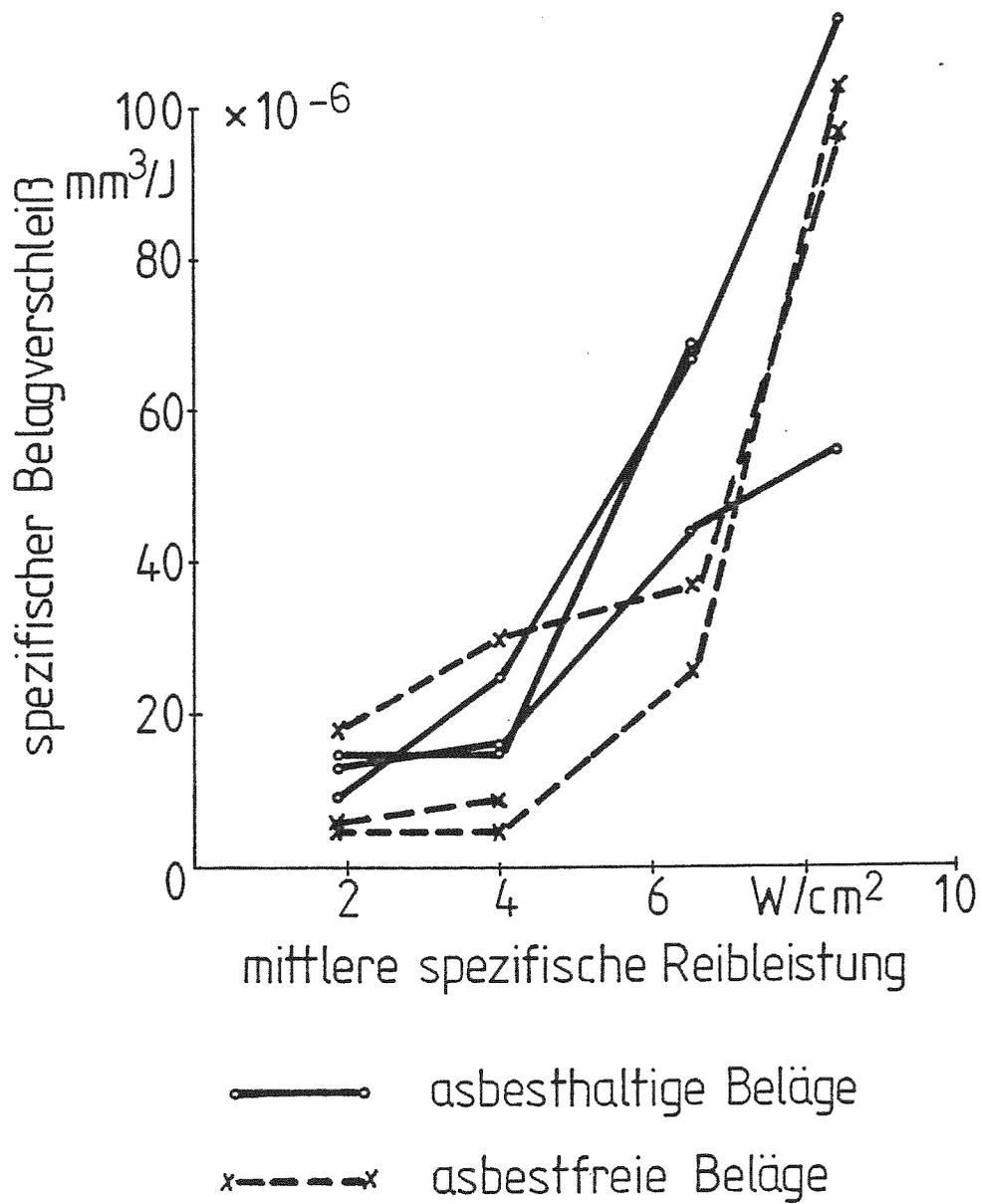




15 01 82

Reibwert in Abhängigkeit von der
mittleren spezifischen Reibleistung

LUK



14 01 82

Spezifischer Belagverschleiß
in Abhängigkeit von der Reibleistung

LUK