Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

ZUVERLÄSSIGKEIT UND LEBENSDAUER VON SCHLEPPERKUPPLUNGEN

DIPL.-ING. KARL KECK

APRIL 1986

1 0006/5/01.86/S+S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

ZUVERLÄSSIGKEIT UND LEBENSDAUER VON SCHLEPPERKUPPLUNGEN

INHALTSANGABE

1. Einleitung

2. Funktionen der Kupplung, Ausfallarten

2.1 Funktion 'zwei Wellen trennen'

2.2 Funktion 'zwei Wellen verbinden'

3. Einsatzbedingungen

3.1 Häufigkeit der Betätigungen

3.2 Reibarbeit, Temperaturen

3.3 Drehmomente

3.4 Einbauverhältnisse

3.5 Betätigungssystem

4. Zielwert für die Zuverlässigkeit, Vorgabe von definierten Belastungen

4.1 Zielwert für die Zuverlässigkeit

4.2 Vorgabe einer definierten Belastung

5. Erforderliche Dimensionierung für den genannten Zuverlässigkeits-Zielwert

5.1 Beläge

5.2 Erforderliche Dimensionierungskennwerte Motorleistung/Reibfläche und Verschleißreserve

5.3 Wärmekapazität der Druckplatte

5.4 Rutschsicherheit, Pedalkraft

5.5 Massenträgheitsmoment der Kupplungsscheibe

6. Zusammenfassung

1 0006/5/01 86/S+S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

Bild 1 : Definition der Zuverlässigkeit

Bild 2 : Funktionen der Kupplung

Bild 3 : Torsionskennlinie für Schlepper mit 4- und 6-Zyl. Motoren

Bild 4 : Beispiel zur Zuverlässigkeit einer Schlepperkupplung aufgrund von Belagverschleiß

Bild 5 : Beispiel zur Zuverlässigkeit einer Pkw-Kupplung aufgrund von Belagverschleiß

Bild 6 : Belastungen der Schlepperkupplungen

Bild 7 : Temperatur der Reibfläche in Abhängigkeit von der mittleren spezifischen Reibleistung in geschlossener Glocke

Bild 8 : Zielwert für Zuverlässigkeit

Bild 9 : Angenommenes Lastkollektiv für Mindestlebensdauer

Bild 10: Angenommene Verteilung der Belastung für ein Schlepperkollektiv

Bild 11: Zuverlässigkeit aufgrund von Belagverschleiß; Rechenbeispiel

Bild 12: Verschleißrate in Abhängigkeit von Belagart und Temperatur

Bild 13: Erforderliche Dimensionierungskennwerte für das genannte Zuverlässigkeitsziel

Bild 14: Einsatzgrenzen der verschiedenen Kupplungsgrößen

Bild 15: Druckplattendicke in Abhängigkeit von Dimensionierungskennwerten

Bild 16: Pedalkraft in Abhängigkeit von der Motorleistung und der Belagart

Bild 17: Massenträgheitsmoment der Kupplungsscheibe in Abhängigkeit von der Motorleistung und der Belagart

1 0006/5/01.86/S+S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

ZUVERLÄSSIGKEIT UND LEBENSDAUER VON SCHLEPPERKUPPLUNGEN

1. Einleitung

Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit eines Produktes, die geforderten Funktionen während einer bestimmten Zeitdauer unter festgelegten Bedingungen zu erfüllen.

Dieser Vortrag beschäftigt sich mit der **Zuverlässigkeit** einer Komponente des Schleppers, nämlich der Hauptkupplung für den Fahrantrieb.

Außer der **Zuverlässigkeit** sind dabei für das Gesamtfahrzeug andere konkurrierende Eigenschaften zu beachten. Dies sind neben dem allgegenwärtigen Problem der Herstellkosten vor allem

- Bedienbarkeit
- Einhaltung bestimmter Baumaße
- universelle Verwendbarkeit des Fahrzeuges.

Die letztgenannte Eigenschaft 'universelle Verwendbarkeit' erschwert die Angabe von Zielwerten für die Entwicklung, da die daraus entstehenden Belastungen der Kupplung und ihre zeitliche Verteilung nicht ausreichend bekannt sind.

Die Zuverlässigkeit kann jedoch erst dann genannt werden, wenn die Streuung der Belastungen im praktischen Einsatz bekannt ist.

1 0006/5/01 86/S+S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

Dieser Vortrag bezieht sich, soweit von Zuverlässigkeit die Rede ist, auf die 'trocken laufende Kupplung, die in Europa fast ausschließlich eingesetzt wird, und nennt notwendige und mögliche Verbesserungen.

Unabhängig vom Kupplungstyp sind dagegen die Ausführungen zu Funktionen und Belastung. Diese gelten allgemein auch für die Entwicklung andersartiger Kupplungsaggregate, falls die Konzeption des Gesamtfahrzeuges es nicht ermöglicht, die erforderliche Zuverlässigkeit mit einer trocken laufenden Kupplung zu erreichen.

2. Funktionen der Kupplung, Ausfallarten

Folgende drei Funktionen werden von der Kupplung gefordert und führen bei Nichterfüllung zum Ausbau:

- Zwei Wellen mechanisch verbinden, um das Motordrehmoment auf das Fahrzeug zu übertragen

- Zwei Wellen mechanisch trennen, um die Schaltung der Getriebegänge zu ermöglichen

- Zwei Wellen im schwingungstechnischen Sinne trennen, um Getriebegeräusche zu vermeiden

Häufigkeit der Ausbauten und Lebensdauer bis zu diesem Zeitpunkt ergeben die Zuverlässigkeit, die zum Beispiel nach dem Weibull-Verfahren angegeben werden kann.

1 0006/5/01 86/S+S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

'Nichterfüllen' der Funktionen oder Versagen ist dabei nur in einem Teil der Fälle ein objektives, durch Messungen der Funktionskennwerte belegbares Kriterium, z.B. durch Verschleiß von Reibbelägen, durch Brüche oder Setzen von Federelementen, durch Brüche von Betätigungselementen, etc. In einem anderen Teil der Fälle, besonders in der Garantiezeit, erfolgt der Ausbau jedoch aufgrund von subjektiven Kriterien, d.h., der Benutzer lehnt entweder von vornherein die gewählten Funktionskennwerte ab oder er beanstandet durch Messungen an der Kupplung nicht feststellbare Veränderungen.

Im folgenden werden die o.g. drei Funktionen der Kupplung und die damit verbundenen Ausfallarten näher beschrieben.

2.1 Zwei Wellen trennen

Die Funktion 'Trennen', sowohl mechanisch als auch schwingungstechnisch, scheint bei richtiger Auslegung der Kupplung das untergeordnete Problem zu sein. Bei dem mechanischen Trennen ist allgemein zu fordern, daß das Rutschmoment M_R eine eindeutig definierte Funktion des Pedalweges ist mit der Randbedingung $M_R = 0$, d.h., daß durch die Erzeugung eines ausreichend großen Lüftspaltes die Kupplungsscheibe freiläuft. Die dazu notwendigen mechanisch-geometrischen Verhältnisse dürfen sich unter dem Einfluß von Temperatur, Korrosion, Verschmutzung und durch die Anwesenheit des Kühlmediums nicht wesentlich verändern.

Das mechanische Trennen ist längst nicht immer zufriedenstellend gelöst, wie Beanstandungen bis 1000 Betriebsstunden

1 0006/5/01 86/S + S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

beweisen. Etwa 50 % der Ausbauten sind auf diesen Problemkreis zurückzuführen. Beanstandet wird dabei nicht nur das unvollständige Trennen selbst, sondern auch die Größe der zum Trennvorgang erforderlichen Betätigungskraft sowie Schäden an Teilen des Ausrücksystems.

Das Trennen im schwingungstechnischen Sinne dagegen ist bei Schleppern von den Beanstandungen her gesehen tatsächlich ein untergeordnetes Problem. Dies hat nichts damit zu tun, daß Schlepperfahrer ein weniger empfindliches Ohr haben als Pkw-Fahrer. Der Grund dafür ist vielmehr, daß die vom Fahrzeug her vorgegebenen Größen im Regelfall die Lösung des Problemes mit Hilfe einer relativ einfachen Torsionskennlinie erlauben. Bild 3 zeigt eine derartige 2stufige Kennlinie mit $\pm$ 4° Verdrehwinkel in der Vorstufe und einem gesamten Verdrehwinkel von 18°, die für 4- und 6-Zyl. Motoren fast immer geeignet ist. Wesentlich scheint dabei zu sein, daß die Vorstufe wegen des hohen Trägheitsmomentes der Getriebeteile relativ steif ausgeführt werden kann. Dadurch werden neben den Leerlaufgeräuschen auch die bei Schleppern typischen Zuggeräusche beim niedertourigen Fahren in den höheren Gängen beseitigt.

Weiterhin steht bei Schlepperkupplungen im Regelfall auch der für eine solide Dämpferkonstruktion erforderliche Bauraum zur Verfügung, denn mit Rücksicht auf den Belagverschleiß und die Beherrschung der Temperaturen ist im Vergleich zu Pkw bei gleichem Motordrehmoment eine wesentlich größere Kupplung erforderlich.

1 0006/5/01 86/S+S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

2.2 Zwei Wellen verbinden

Die Funktion 'zwei Wellen verbinden' wird durch den totalen Verschleiß der Reibbeläge beendet. Dieser Verschleiß ist bei Trockenkupplungen eine unvermeidbare Folge der geleisteten Reibarbeit, die während des unter Last und bei differierenden An- und Abtriebsdrehzahlen erfolgenden Einkuppelvorganges entsteht.

Während der Betriebszeit bis zum totalen Verschleiß muß unter allen Betriebsbedingungen das übertragbare Reibmoment größer sein als das zu übertragende Motormoment; bei Schlepperkupplungen schätzungsweise um den Faktor 1,4. Den dominierenden Einfluß auf das Reibmoment üben dabei die Temperaturen aus, die zu Streuungen des Reibwertes um den Faktor 3 führen.

Bei der Funktion 'zwei Wellen verbinden' ist damit zwischen zwei grundsätzlich verschiedenen Ausfallarten zu unterscheiden. Trägt man die Ausfälle durch vollständigen Verschleiß nach dem Weibull-Verfahren auf, so ergibt sich für die Kupplung wie auch für andere Verschleißteile eine nach rechts gekrümmte Linie. Bild 4 zeigt dies beispielhaft für eine Auswertung des Verschleißes von etwa 30 Doppelkupplungen Ø 310 im Leistungsbereich von 70 bis 110 PS mit dem Einsatzgebiet Mitteleuropa. Die Kupplungen waren alle wegen schwerer Schaltbarkeit des Getriebes beanstandet worden. Es könnte daher mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit hinsichtlich der Beanspruchung eine zufällige Auswahl vorliegen. Die Kurve ergibt hier eine Mindestlebensdauer von etwa 1000 Stunden Betriebsstunden und eine mittlere Lebensdauer von etwa 3500 Betriebsstunden.

1 0006/5/01 86/S+S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

Die Linie der Ausfälle 'Rutschen durch Aufbrauch der Verschleißreserve' gibt die maximal zu erwartende Zuverlässigkeit der Kupplung an. Alle durch andere Ursachen hervorgerufenen Ausfälle überlagern sich dieser Kurve und verringern die Gesamtzuverlässigkeit, verschieben also die Kurve nach links.

Ausbauten der Kupplung wegen Rutschens, bevor die Verschleißreserve aufgebraucht ist, machen heute etwa 50 % der Beanstandungen bis 1000 Betriebsstunden aus, fast unabhängig vom Kupplungstyp und von der absoluten Höhe der Beanstandungsquote.

Durch unzureichende Übertragung des Drehmomentes entsteht allerdings eine beträchtliche Vergrößerung der Reibarbeit und ein entsprechend gesteigerter Verschleiß, so daß die eigentliche Ausfallursache nicht mehr eindeutig feststellbar ist.

Selbstverständlich würde die Ausfallart 'Rutschen durch Aufbrauch der Verschleißreserve' nicht besonders interessieren, wenn die Kurve zum größten Teil oder vollkommen aus **dem** Lebensdauerbereich des Fahrzeuges verschoben wäre, der aufgrund der Dimensionierung anderer Bauteile, z.B. des Motors, vorgegeben ist. Dies ist beim Schlepper mit einer Lebensdauer von etwa 10 000 Betriebsstunden nicht der Fall; es könnte aber zum Beispiel in Zukunft bei PKW bei Verwendung asbestfreier Beläge der Fall sein, wie Bild 5 zeigt. Hier wurden etwa 100 Kupplungen ∅ 230 ausgewertet von einem Fahrzeug der oberen Mittelklasse mit aufgeladenem 2,5 l Dieselmotor. Die Kupplungen waren alle wegen Rupfens beanstandet worden. Es ist deshalb auch hier mit einer

1 0006/5/01.86/S+S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

gewissen Wahrscheinlichkeit anzunehmen, daß eine zufällige Auswahl vorliegt. Die Zuverlässigkeitskurve zeigt wieder die für ein Verschleißteil typische Krümmung nach rechts, die Mindestlebensdauer beträgt etwa 70 000 Laufkilometer. Da für einen Pkw dieser Klasse die mittlere Lebensdauer mit etwa 120 000 Laufkilometern angesetzt werden kann, spielt die Ausfallart 'Rutschen durch Aufbrauch der Verschleißreserve' nur noch bei etwa 15 % der Fahrzeuge eine Rolle.

3. Einsatzbedingungen

Die Einsatzbedingungen eines Schleppers variieren sehr viel stärker als die eines Straßenfahrzeuges und dementsprechend auch die Belastung der Kupplung. Bereits ein einzelner Schlepper hat ein breites Belastungskollektiv aufgrund des Einsatzes mit einer Vielzahl von Arbeitsgeräten, veränderlicher Witterungsbedingungen und der Bedienung durch mehrere Personen. Dieses Belastungskollektiv des Einzelschleppers wird sich wiederum beträchtlich erweitern, wenn alle Schlepper dieses Typs betrachtet werden, da Schlepper heute weltweit verkauft werden und von Einsatzort zu Einsatzort sich Bodenverhältnisse, Feldgrößen und Umweltbedingungen sowie Art und Einsatzhäufigkeit der Arbeitsgeräte ändern. Nach unseren Erfahrungen ergeben sich etwa folgende Belastungen für die Kupplung, die wir unseren Auslegungsberechnungen zugrunde legen:

1 0006/5/01.86/S+S

LuK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

3.1 Häufigkeit der Betätigungen

Etwa 0,1 bis 8 pro Minute. Es handelt sich dabei weitgehend um Anfahrvorgänge.

3.2 Reibarbeit und Temperaturen

Wegen des ähnlichen Leistungsgewichtes - zumindest bei Standardschleppern - ist es sinnvoll, Reibarbeit und Reibleistung der Kupplung auf die installierte Leistung des Motors zu beziehen. Bild 6 zeigt Erfahrungswerte sowie die daraus resultierenden Temperaturen bei der heute üblichen Dimensionierung von Trockenkupplungen.

a) Normale Dauerbelastung, z.B. Pflügen

- mittlere Reibleistung entsprechend 0,3 bis 0,6 % der Motornennleistung
- Reibarbeit pro kW Motorleistung und Betriebsstunde 10 000 - 20 000 Joule
- Umlufttemperaturen in der Glocke: 70 bis 90° C
- Spitzentemperaturen an den Reibflächen: 130 bis 150° C

b) Extreme Dauerbelastung, z.B. Frontladereinsatz

- mittlere Reibleistung entsprechend 2,5 bis 5 % der Motornennleistung
- Reibarbeit pro kW Motorleistung und Betriebsstunde 90 000 - 180 000 Joule
- Umlufttemperaturen in der Glocke: 100 bis 160° C
- Spitzentemperaturen an den Reibflächen: 230 bis 350° C

1 0006/5/01.86/S+S

LuK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

c) Extreme Kurzzeitbelastung, z.B. Anfahrten bei hohem Zugwiderstand

- Rutschvorgänge in der Größenordnung von 10 sec bei voller Motorleistung

Die Angabe einer mittleren Reibleistung oder einer Reibarbeit pro kW Motorleistung und Betriebsstunde ist hier nicht sinnvoll, da diese Belastung eine Trockenkupplung bei der heute üblichen Kühlung nach kurzer Zeit zerstören würde. Es treten dabei Temperatursprünge an den Reibflächen von etwa 80° C auf, und etwa 2000 bis 5000 derartige Zyklen zehren die gesamte Verschleißreserve auf.

3.3 Drehmomente

Es ist mit Momentenspitzen bis zum 3-fachen des maximalen Motordrehmomentes zu rechnen.

3.4 Einbauverhältnisse

Die Kupplung ist im Normalfall in eine vollkommen geschlossene Glocke eingebaut, um Störungen durch eindringenden Schmutz zu vermeiden. Führungsflächen und Lager des Ausrückers sind in dieser Hinsicht noch stärker anfällig als die Kupplung selbst. Die geschlossene Glocke verhindert dabei die direkte Kühlung der Kupplung mittels Außenluft; die Kühlung erfolgt indirekt über die Luft in der Glocke, die ein wesentlich höheres Temperaturniveau hat. Da auch in Zukunft in der großen Mehrzahl der Fälle mit geschlossener

1 0006/5/01 86/S + S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

Glocke gerechnet werden muß, wird den nachstehenden Berechnungen der in Bild 7 gezeigte Temperaturverlauf zugrunde gelegt, d.h., die Reibflächentemperatur beträgt mindestens 70° C und steigt linear mit der mittleren spezifischen Reibleistung 'q_m' an. In Abhängigkeit von der Gestaltung der Kupplung und der Größe der Kupplungsglocke können allerdings beträchtliche Streuungen auftreten, die im Bild durch den schraffierten Bereich angedeutet sind.

Die Größe der Glocke ist weiterhin in der Regel durch vorgegebene Baumaße des Schleppers begrenzt. Hier spielen Kriterien wie Radstand, Rahmenbreite, freier Einstieg in die Kabine, Verwendung standardisierter Fertigungseinrichtungen, etc. eine Rolle. Auch bei größeren Schleppern im Leistungsbereich von 80 bis 120 kW ist im Normalfall durch den Innen-Ø der Glocke die Kupplungsgröße auf max. Ø 330 bis 360 beschränkt.

3.5 Betätigungssystem

Mit Rücksicht auf die Anschaffungskosten wird heute fast ausschließlich eine Betätigung durch reine Muskelkraft verwendet. Die Pedalkraft sollte dabei erfahrungsgemäß auf max. 200 N am neuen Schlepper und max. 300 N während der gesamten Betriebszeit beschränkt sein. Der Pedalweg beträgt bei Kabinenschleppern 150 bis max. 200 mm, die Gesamtwirkungsgrade ausgeführter Betätigungssysteme liegen bei 40 bis 60 %.

1 0006/5/01.86/S + S

LuK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

4. Zielwert für die Zuverlässigkeit, Vorgabe von definierten Belastungen

Bei der Ausübung der geschilderten Funktionen erreicht die Kupplung in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen bestimmte Werte der Zuverlässigkeit. Diese Werte streuen bei den z.Zt. von LuK ausgerüsteten Schleppertypen beträchtlich - in erster Linie aufgrund der ebenfalls stark streuenden Auslegungskennwerte. Der schraffierte Bereich in Bild 8 zeigt die heute erreichte Gesamtzuverlässigkeit, wie sie sich aufsummiert aus den eingangs geschilderten Ausfallarten ergibt:

- mittlere Lebensdauer von 2000 bis 6000 Betriebsstunden;
- Ausfallrate bei 1000 Betriebsstunden von 1 bis 20 %.

Dementsprechend wird die heutige Situation auch als mehr oder weniger zufriedenstellend beurteilt.

Konkrete Zielwerte für die Zuverlässigkeit der Kupplung liegen von den Schlepperherstellern kaum vor. Außerdem sind auch die Belastungskollektive nicht in ausreichendem Maße bekannt. Da beide Angaben jedoch für eine sinnvolle Entwicklungsarbeit vorgegeben werden müssen, möchte ich dazu folgende Hypothesen zur Diskussion stellen:

4.1 Zielwert für die Zuverlässigkeit

Der o.g. Bereich der Gesamtzuverlässigkeit der heutigen Kupplungen ist in Bild 8 schraffiert angegeben. Da die auf der rechten Seite des Bereiches liegenden Kupplungen als

1 0006/5/01.86/S+S

ausgezeichnet beurteilt werden und die Kunden im allgemeinen jegliche Kostenerhöhung zur weiteren Verbesserung solcher Kupplungen ablehnen, wird vorgeschlagen, die rechte, dick ausgezogene Randlinie als ausreichenden Zielwert der Zuverlässigkeit für Kupplungen der nächsten Schleppergeneration zu verwenden. Es wird dabei angenommen, daß dieser Zielwert der Gesamtzuverlässigkeit nur dann erreicht wird, wenn Ausfälle durch Aufbrauch der Verschleißreserve die strichpunktierte Linie nicht überschreiten, die durch folgende Punkte gekennzeichnet ist:

- Mindestlebensdauer von 1000 Betriebsstunden
- Zuverlässigkeit von 80 % bei 4000 Betriebsstunden

Die Zuordnung der beiden Kurven, also der Zuverlässigkeit der Komponente Belag zur Gesamtzuverlässigkeit, entspricht den z.Zt. bei LuK vorliegenden Erfahrungen.

4.2 Vorgabe einer definierten Belastung

Den bisherigen Lebensdauerberechnungen von LuK wurden bestimmte Belastungen zugrunde gelegt, die jedem kW installierte Motorleistung pro Betriebsstunde einen bestimmten Betrag an Reibarbeit zuordnen:

- 100 000 Joule pro kW und Betriebsstunde als maximale Belastung, die die Mindestlebensdauer der Kupplung ergibt.

- 13 000 Joule pro kW und Betriebsstunde als minimale Belastung, die die Maximallebensdauer der Kupplung ergibt.

1 0006/5/01.86/S+S

LuK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

Die maximale Belastung ist in Bild 9 als Kollektiv über der relativen Reibleistung angenommen mit Anteilen, die bis zu einer Reibleistung von etwa 11 % der Motorleistung reichen, und entsprechend hohen Temperaturen.

Für die minimale Belastung hingegen ist die Annahme eines Kollektives überflüssig, da das relativ niedrige Temperaturniveau ohne Einfluß auf das Verschleißverhalten der Beläge ist. Diese Belastungsextreme, die ursprünglich aus Feldergebnissen zurückgerechnet wurden, beschreiben nach unserer Ansicht nach wie vor genügend genau die Grenzwerte der Einsatzbedingungen einer Schlepperkupplung; sie werden deshalb auch für die nachstehenden Berechnungen verwendet.

Von entscheidender Bedeutung für den Verlauf der Zuverlässigkeitskurve ist jedoch die Häufigkeit ihres Auftretens innerhalb eines Kollektives von Fahrzeugen. Die Häufigkeit hoher Belastungen ist bei den bisherigen Berechnungen offensichtlich unterschätzt worden. Es wird deshalb im folgenden von der im Bild 10 gezeigten Verteilung der Kupplungsbelastung ausgegangen, die einen der derzeitigen Erfahrung entsprechenden Verlauf der Zuverlässigkeitskurve ergibt. Die Extremwerte 100 000 bzw. 13 000 Joule pro kW und Betriebsstunde sind bei 0,1 bzw. 99,9 % Summenhäufigkeit eingezeichnet und durch eine Gerade verbunden. Die mittlere Belastung bei 50 % Summenhäufigkeit, die die mittlere Lebensdauer ergeben wird, liegt bei 22 000 Joule pro kW und Betriebsstunde; der vor allem interessierende Verlauf vom Höchstwert bis zu diesem Mittelwert entspricht in etwa einer logarithmischen Normalverteilung. Bild 11 zeigt als Beispiel das Ergebnis der Berechnung, das sich nach diesen Annahmen für den bisher von LuK genannten Auslegungsgrenzwert von

1 0006/5/01 86/S+S

80 Watt/cm² bei Verwendung von Kerasinterbelägen und einer Verschleißreserve von 3 mm ergibt. Dies wäre z.B. eine Kupplung ∅ 310 für einen Schlepper von 75 kW (102 PS). Das Rechenergebnis wird durch die ausgezogene Linie links im Bild wiedergegeben. Die Ausfallrate von knapp 4 % bei 1000 Betriebsstunden allein durch Verschleiß erscheint durchaus nicht unrealistisch. Zum Vergleich gibt die gestrichelte Linie rechts im Bild den vorhin genannten Zielwert an.

5. Erforderliche Dimensionierung für den genannten Zuverlässigkeits-Zielwert

5.1 Beläge

Neben den Belastungen und den daraus entstehenden Temperaturen ist für die Berechnung der Lebensdauerwerte die Kenntnis des Verschleißverhaltens der Beläge erforderlich. In Bild 12 ist die gemessene Verschleißrate folgender Belagarten als Funktion der Temperatur aufgetragen:

- Kerasinterbeläge - durchgezogene Linie
- organische asbestfreie Beläge - gestrichelte Linie
- organische asbesthaltige Beläge - strichpunktierte Linie

Entgegen früheren Erfahrungen ist nach dem heutigen Stand unserer Versuche der Verschleiß der besten asbestfreien organischen Beläge über dem gesamten interessierenden Temperaturbereich als geringer anzusehen als der asbesthaltiger organischer Beläge. Da die Verwendung asbesthaltiger Beläge bis zum Ende dieses Jahrzehnts voraussichtlich vom Gesetzgeber untersagt werden wird, ist im folgenden auch nur noch von der Verwendung von asbestfreien organischen oder von Kerasinterbelägen ausgegangen.

1 0006/5/01 86/S+S

LUK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

5.2 Erforderliche Dimensionierungskennwerte Motorleistung/ Reibfläche und Verschleißreserve

Die Rechnung unter den genannten Voraussetzungen ergibt, daß mit den in Bild 13 angegebenen Dimensionierungskennwerten Motorleistung/Reibfläche und Verschleißreserve das geforderte Zuverlässigkeitsziel etwa erreicht werden kann. Diese Werte sind in den Zeilen 1 und 2 angegeben. Die Verschleißreserve ist jeweils so gewählt, daß eine Mindestlebensdauer von 1000 Betriebsstunden entsteht. Aus Zeile 4 geht hervor, daß bei Verwendung von organischen asbestfreien Belägen wegen des flacheren Verlaufes der Zuverlässigkeitskurve die geforderte Lebensdauer bei 20 % Ausfallrate von 4000 Betriebsstunden um etwa 10 % überschritten, bei Verwendung von Kerasinterbelägen um etwa 10 % unterschritten wird.

Zu den gezeigten Ergebnissen ist weiterhin zu bemerken:

- Es ist eine relativ großzügige Kupplungsauslegung erforderlich; mit organischem asbestfreiem Belagmaterial sollte im Bereich von 50 bis 55 Watt/cm^2 dimensioniert werden, mit Kerasinterbelägen im Bereich von 60 bis 65 Watt/cm^2 oder - falls die angegebene Verschleißreserve von 5,6 mm erreicht werden kann - bis max. 70 Watt/cm^2.

- Gleichzeitig sind auch relativ hohe Verschleißreserven erforderlich. Werte über 4 - 4,5 mm können nur mit Tellerfederhebelkupplungen oder gezogen betätigten Tellerfederkupplungen erreicht werden. Werte über 6 mm sind für Tellerfederkupplungen unrealistisch.

1 0006/5/01.86/S+S

Bild 14 zeigt, welche Bereiche der Motorleistung bei der genannten Auslegung mit den z.Zt. üblichen Kupplungsgrößen abgedeckt werden. Sollte auch in Zukunft kein Einbauraum für Kupplungen über dem Nenn-Ø 350 mm zur Verfügung stehen, so wäre es demnach vernünftig, für Leistungen über etwa 88 kW (120 PS) die Verwendung von Einscheiben-Trockenkupplungen aufzugeben und auf Zweischeibenkupplungen oder im Ölbad laufende Kupplungen auszuweichen.

5.3 Wärmekapazität der Druckplatte

Das Leistungsgewicht der Druckplatte liegt bei den z.Zt. von LuK gelieferten Schlepperkupplungen zwischen 5 und 11 kW/kg. Zur Vermeidung von Überhitzungen und Ausfällen durch grobe Fehlbedienungen erscheint es ratsam, in Zukunft Werte von 6 bis 7 kW/kg nicht zu überschreiten.

Aus Bild 15 geht hervor, welche mittlere Druckplattendicke dafür in Abhängigkeit vom Dimensionierungskennwert Motorleistung/ Reibfläche erforderlich ist. Ordnet man den Wert 6 kW/kg den organischen und 7 kW/kg den Kerasinterbelägen zu und dimensioniert mit 55 bzw. 65 Watt/cm^2, so ergibt sich jeweils eine mittlere Druckplattendicke von etwa 25 mm.

5.4 Rutschsicherheit, Pedalkraft

'Ungenügende Momentenübertragung' hat - wie bereits weiter oben geschildert - heute einen Anteil von etwa 50 % an den Beanstandungen. LuK empfiehlt deshalb, trotz der angestrebten großzügigen Dimensionierung auch weiterhin auf eine nominelle Rutschsicherheit von min. 2,2 auszulegen,

1 0006/5/01 86/S+S

ausgehend von einem Reibwert von 0,27 für organische und 0,4 für Kerasinterbeläge.

Um von der Rutschsicherheit und den daraus folgenden Anpreßkräften auf die Pedalkraft zu kommen, sind folgende Annahmen getroffen:

- Motoren mit Nenndrehzahl von 2200 U/min und Momentenüberhöhung von 20 %.

- Pedalweg von 160 mm und Gesamtwirkungsgrad des Betätigungssystems des Schleppers von 60 %.

- Mechanischer Wirkungsgrad der Kupplung von 75 % bei einem Mindestabhub von 1,8 mm.

Bei einer Dimensionierung mit 55 Watt/cm^2 bei organischen und 65 Watt/cm^2 bei Kerasinterbelägen ergeben sich dann die in Bild 16 in Abhängigkeit von der Motorleistung gezeigten Pedalkräfte. Das Bild gilt für den Neuzustand von Kupplung und Betätigungssystem. Hier sollten 200 N Pedalkraft nicht überschritten werden, da über der Betriebszeit mit einem Anstieg von etwa 50 % zu rechnen ist aufgrund der Verringerung der Wirkungsgrade von Kupplung und Betätigungssystem sowie der Kraftüberhöhung der Tellerfeder. Beanstandungen beginnen erfahrungsgemäß ab etwa 300 N Pedalkraft.

Das Bild zeigt, daß bei Kerasinterbelägen der zugrunde gelegte Betätigungswirkungsgrad von 60 % über dem gesamten Leistungsbereich ausreichend ist, ausgenommen bei der Zweischeibenkupplung. Bei organischen Belägen sind dagegen

1 0006/5/01 86/S+S

bereits ab etwa 50 kW Verbesserungen an Kupplung und Betätigungssystem notwendig, z.B. gesickte Tellerfederzungen in der Kupplung oder Übertotpunktfedern im Ausrücksystem oder eine Servobetätigung.

5.5 Massenträgheitsmoment der Kupplungsscheibe

Erfahrungsgemäß ist es relativ schwierig, Beanstandungen wegen Nichttrennens der Kupplung und der damit verbundenen hohen Kräfte zum Schalten der Getriebegänge zu beseitigen. Es wird sich in dieser Beziehung auf jeden Fall positiv auswirken, daß durch eine großzügige Auslegung Temperatureinflüsse, die sicher eine Rolle spielen, reduziert werden. Es darf jedoch nicht übersehen werden, daß durch große Durchmesser und hohe Verschleißreserven Kupplungsscheiben mit hohen Massenträgheitsmomenten entstehen. Bild 17 zeigt, mit welchen Werten zu rechnen ist. Es ist dabei angenommen, daß organische Reibbeläge ein spezifisches Gewicht von 2 g/cm^3 haben und daß bei Verwendung von Kerasinterbelägen ein Drittel der Reibfläche durch Beläge bedeckt ist. Das Bild zeigt für beide Belagtypen jeweils die Massenträgheitsmomente, die mit oder ohne Torsionsdämpfer entstehen.

1 0006/5/01 86/S + S

LuK
Kupplungen
Clutches
Embrayages
Embragues

6. Zusammenfassung

Die Zuverlässigkeit der z.Zt. verwendeten trockenen Kupplungen für Schlepper wird zum Teil als unzureichend empfunden. Es wird vorgeschlagen, dem durch eine großzügigere Auslegung zu begegnen, die gleichzeitig das Verschleißvolumen der Beläge erhöht und die thermische Belastung herabsetzt. Durch die definierten Kennwerte wird die gewünschte Zuverlässigkeit hinsichtlich Verschleißverhalten der Beläge und Momentenübertragung erreicht werden. Ausfälle durch Ansteigen der Pedalkraft und der Kräfte zum Schalten des Getriebes können dagegen durch die Kupplung nur zum Teil oder überhaupt nicht gelöst werden. Hier sind gleichzeitig Verbesserungen an einwirkenden Komponenten des Schleppers notwendig, also am Betätigungssystem und an der Synchronisierung.

Der genannte Zielwert der Zuverlässigkeit definiert die trocken laufende Kupplung weiterhin als Verschleißteil, das bei der großen Mehrzahl der Schlepper während der Gesamtbetriebszeit von 10 000 h mindestens einmal ausgewechselt werden muß. Wird dies nicht akzeptiert oder kann der erforderliche Bauraum nicht zur Verfügung gestellt werden, so sollte ein anderer Kupplungstyp verwendet werden. Hier bietet sich die im Ölbad laufende Kupplung an. Sie kann prinzipiell so gestaltet werden, daß sie nicht mehr als Verschleißteil betrachtet werden muß. Es werden dann - selbstverständlich neben den Herstellkosten - andere Aspekte wie Überlastsicherheit und Trennverhalten in den Vordergrund treten. LuK ist jedoch der Meinung, daß die Möglichkeiten der Trockenkupplung noch nicht voll ausgeschöpft sind.

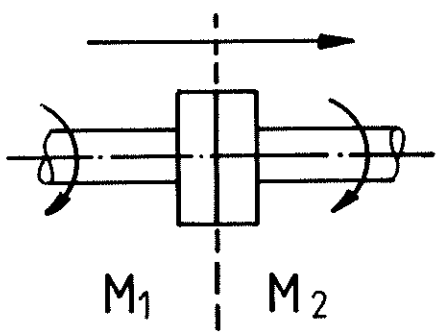
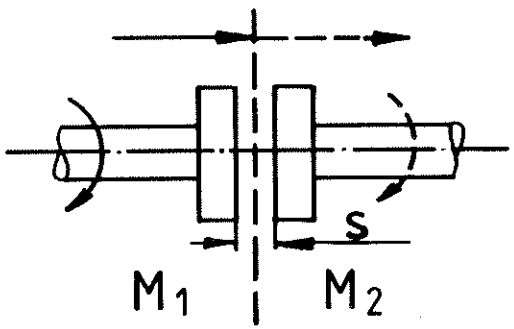
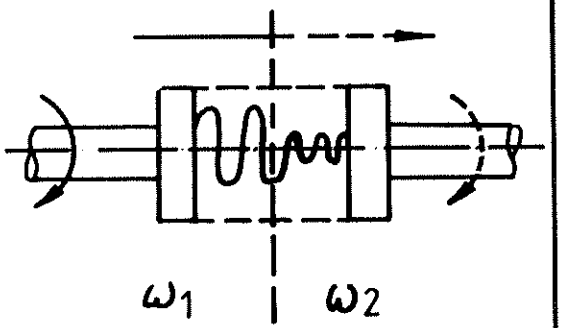
1 0006/5/01.86/S + S

Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit eines Produktes, die geforderten Funktionen während einer bestimmten Zeitdauer unter festgelegten Bedingungen zu erfüllen.

Affidabilita è la capacità di un prodotto di assolvere una funzione durante un tempo ben preciso in condizioni prestabilite.

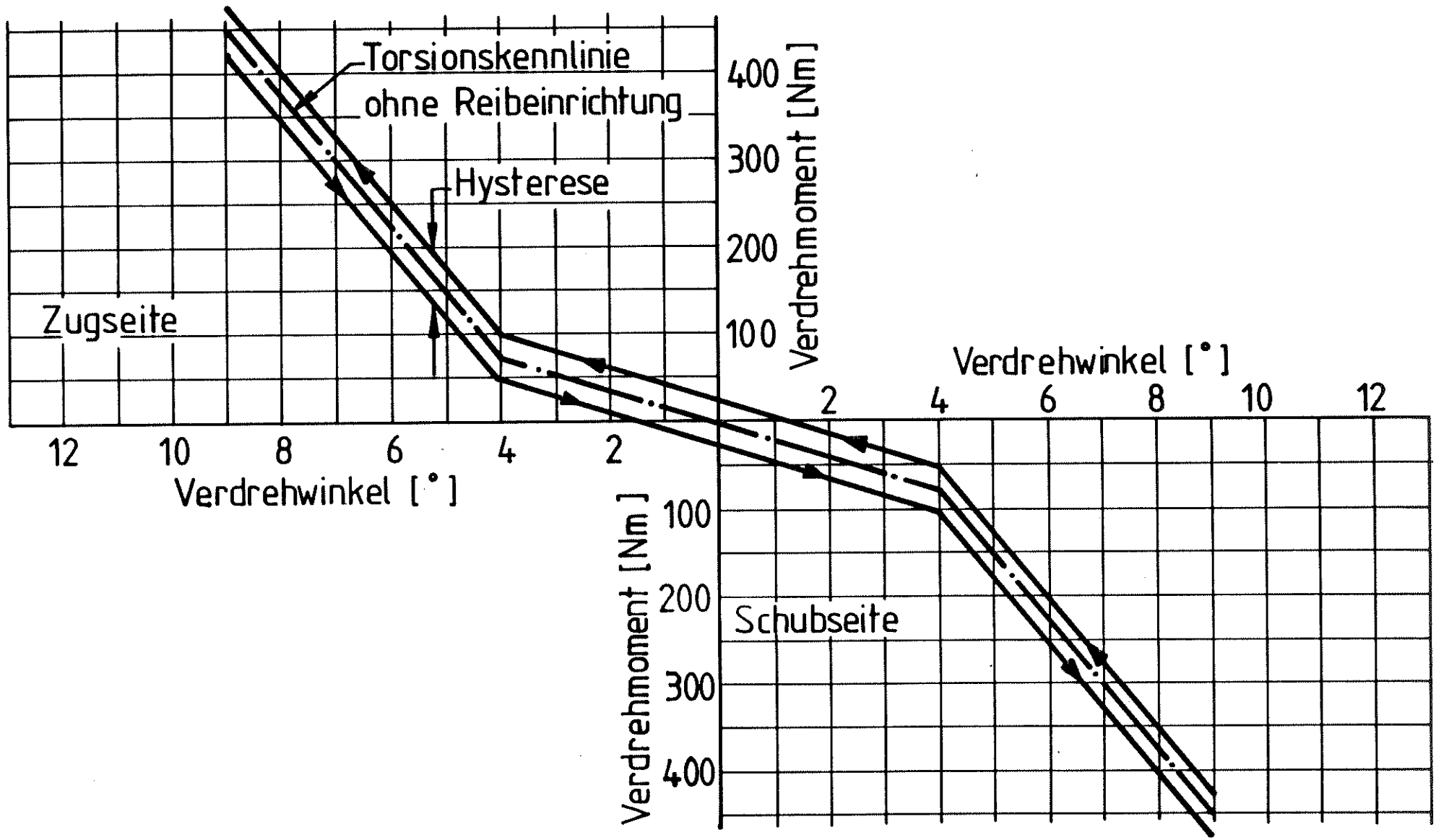
Reliability is a product's ability to fulfill its required functions under specified conditions over a certain period of time.

La fiabilité est l'aptitude d'un produit à répondre aux fonctions exigées durant un temps déterminé pour des conditions fixées.

Verbinden	Trennen	
mechanisch	mechanisch	schwingungstechnisch
		
$M_2 = M_1$ $M_R = K \times M_1$ $> M_1$	$M_2 \overset{!}{\pm} f(s)$ $M_2 \approx 0 \; (s = s_{max.})$	$\dot{\omega}_2 = K \times \dot{\omega}_1$ $< \dot{\omega}_{max.}$

Funktionen der Kupplung

LuK



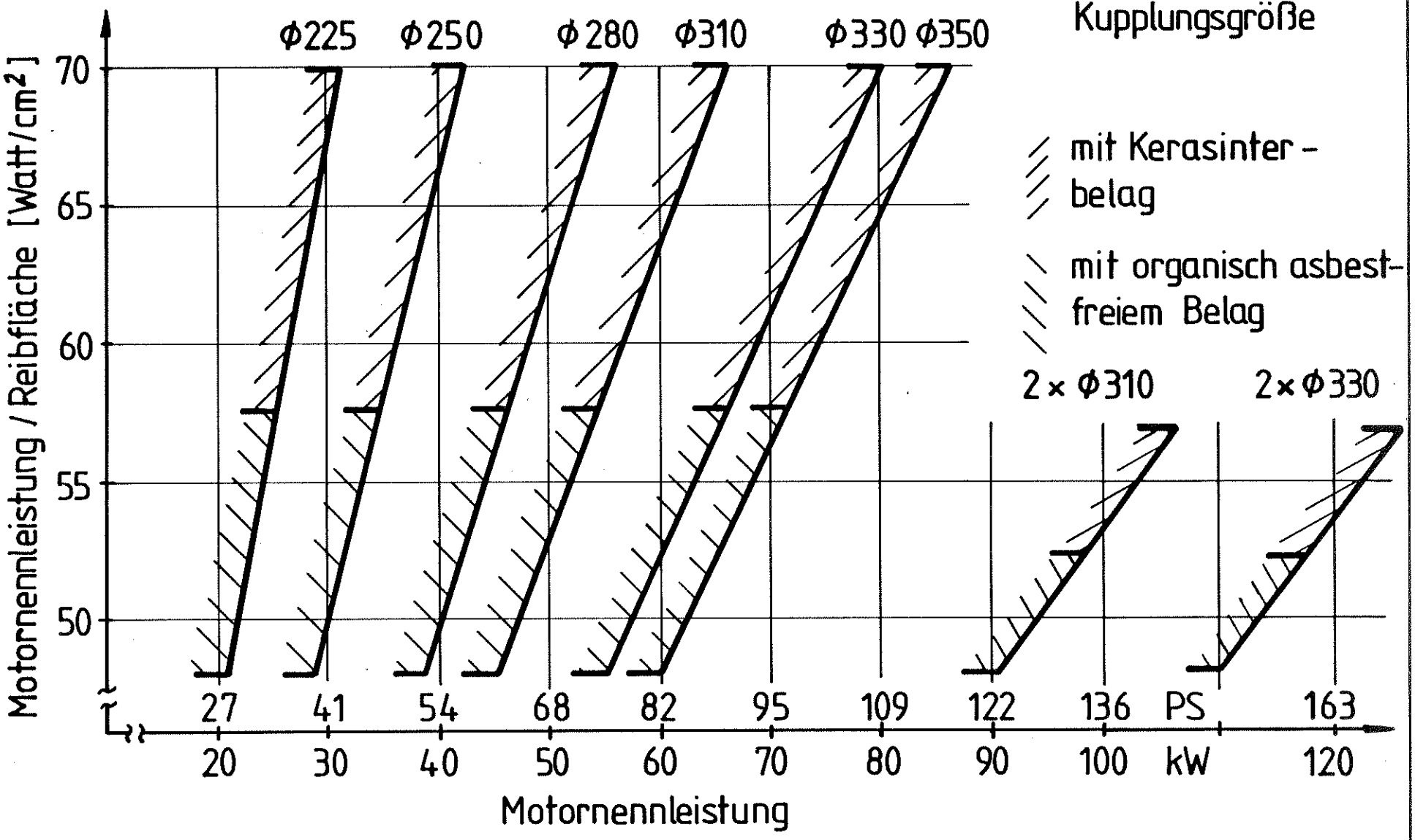
03 03 86	Torsionskennlinie für Schlepper mit 4- und 6-zyl.-Motoren	LuK

Belagart		organisch, asbestfrei			Kerasinter			
Dimensionierung [Watt/cm²]		50	55	(60)	60	65	70	1
Verschleiß-reserve [mm]		3,3	4,7	(6,4)	4,5	5	5,6	2
Lebensdauer [h] bei Ausf.-Summenhäuf.	0%	1000	1000	(1000)	1000	1000	1000	3
	10%	3300	3400	(3500)	3000	3000	3000	4
	20%	4200	4400	(4600)	3700	3700	3700	5
	62,5%	6820	7380	(7900)	5400	5400	5500	6

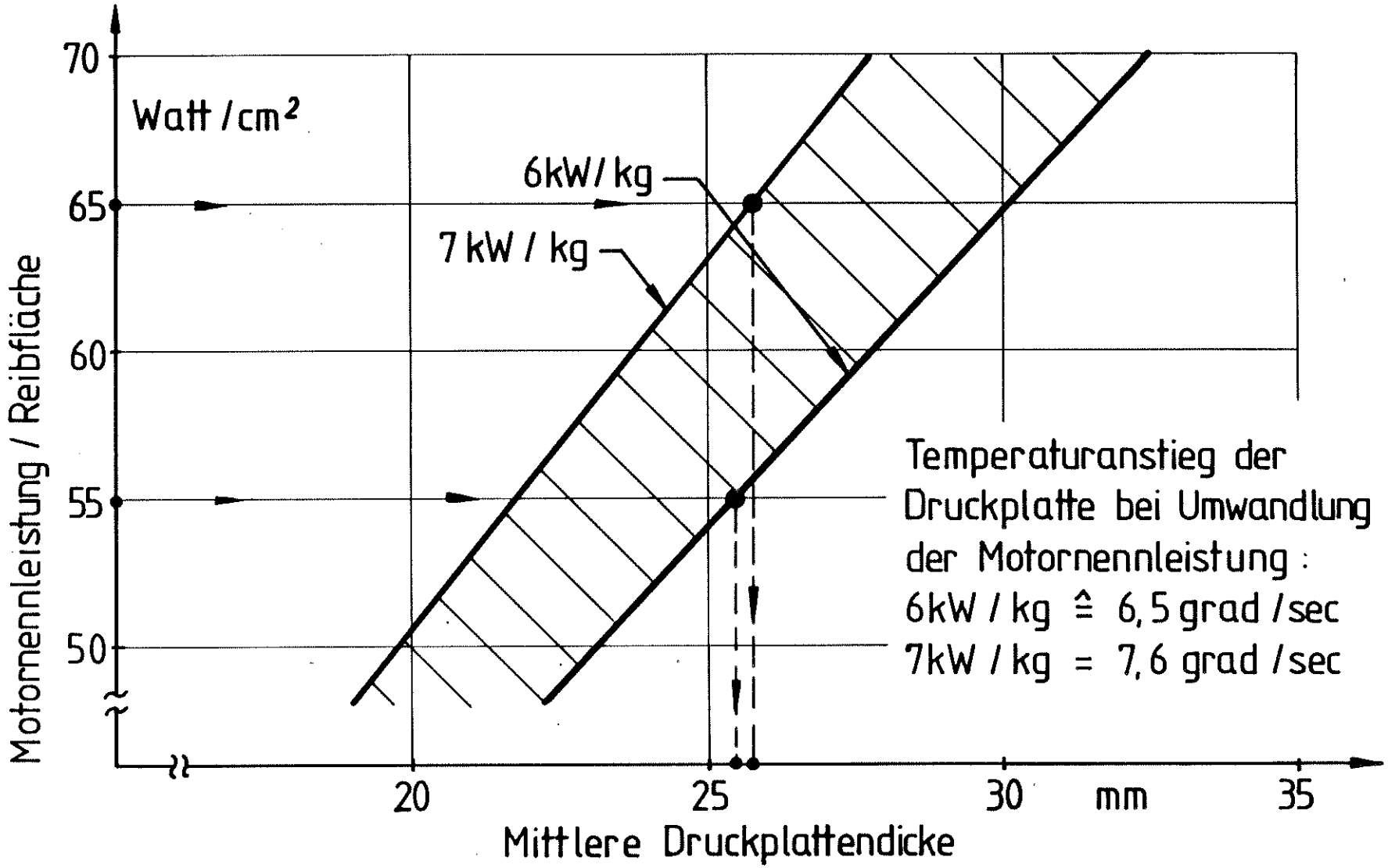
13 03 86

Erforderliche Dimensionierungskennwerte für das genannte Zuverlässigkeitsziel

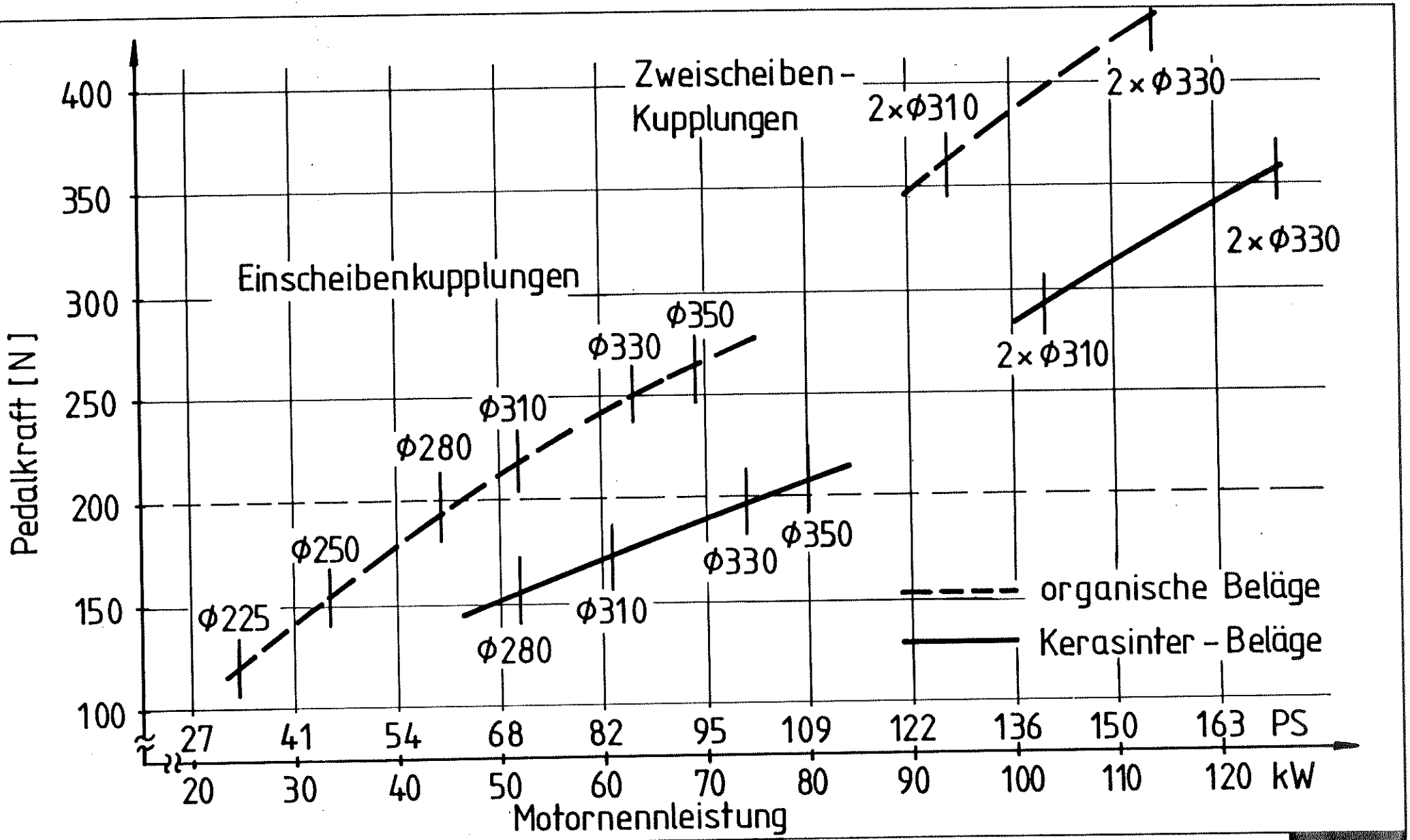
LUK



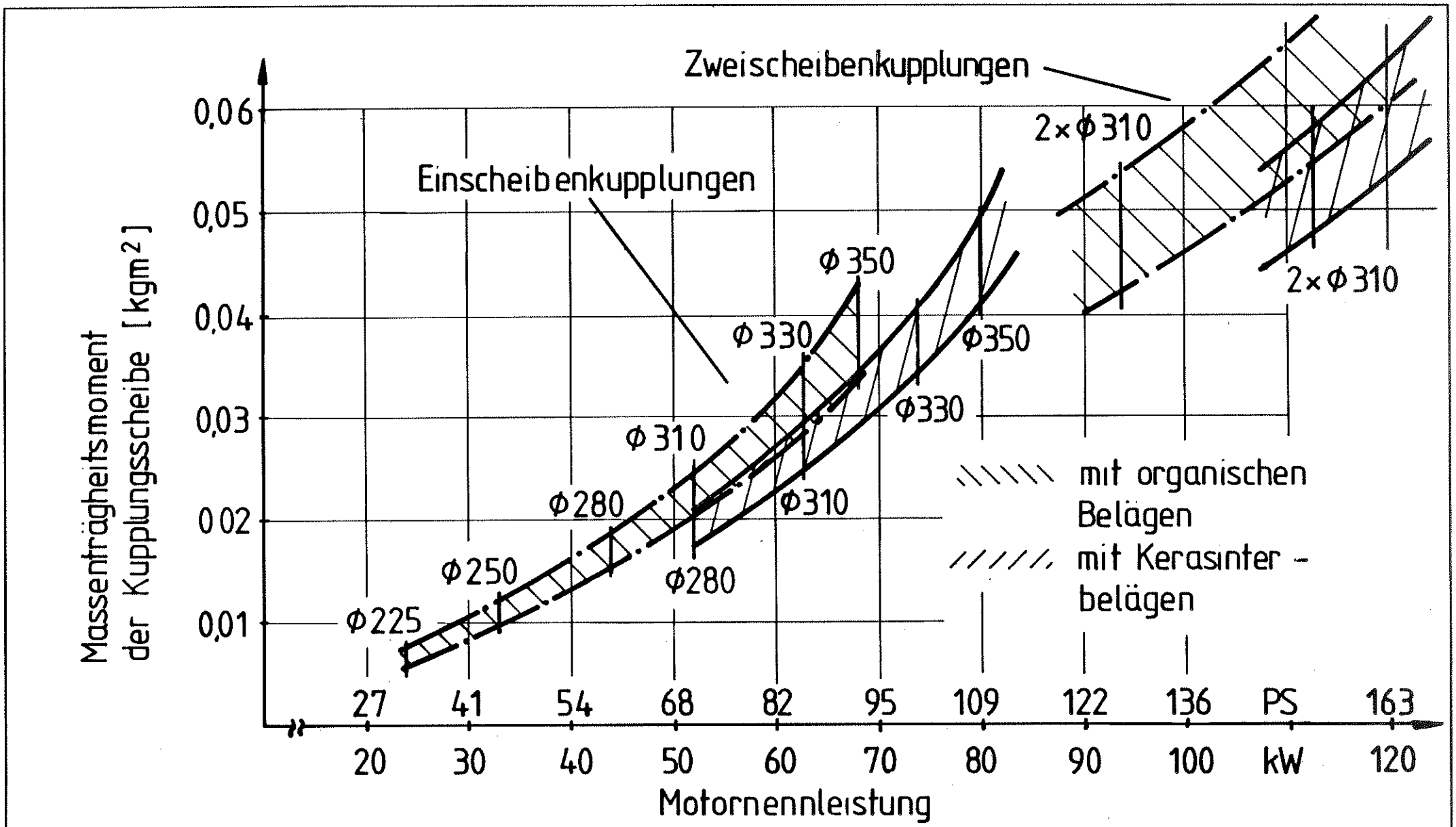
14 03 86	Einsatzgrenzen der verschiedenen Kupplungsgrößen für das genannte Zuverlässigkeitsziel



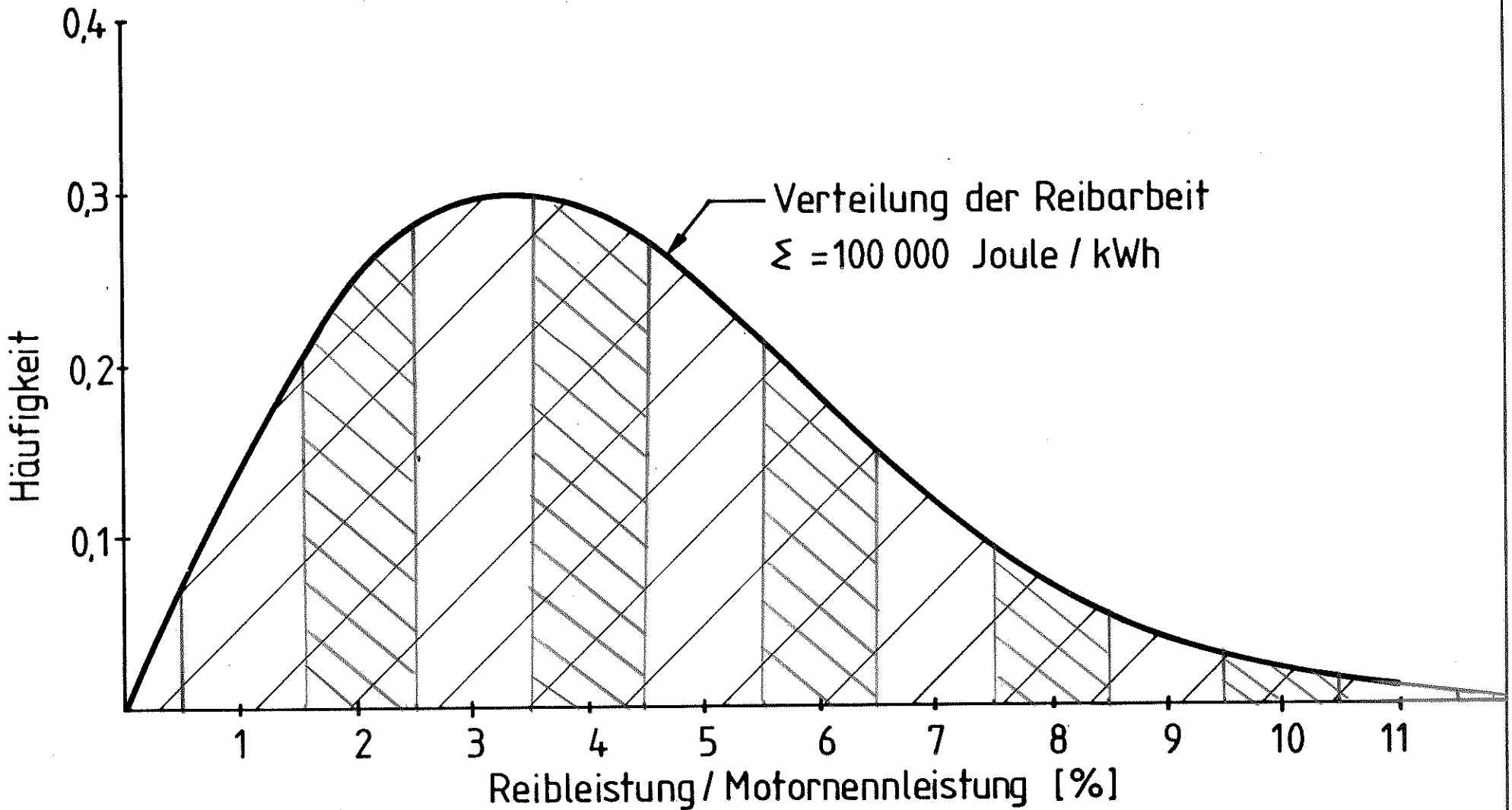
15 03 86	Druckplattendicke in Abhängigkeit von Dimensionierungskennwerten	LuK



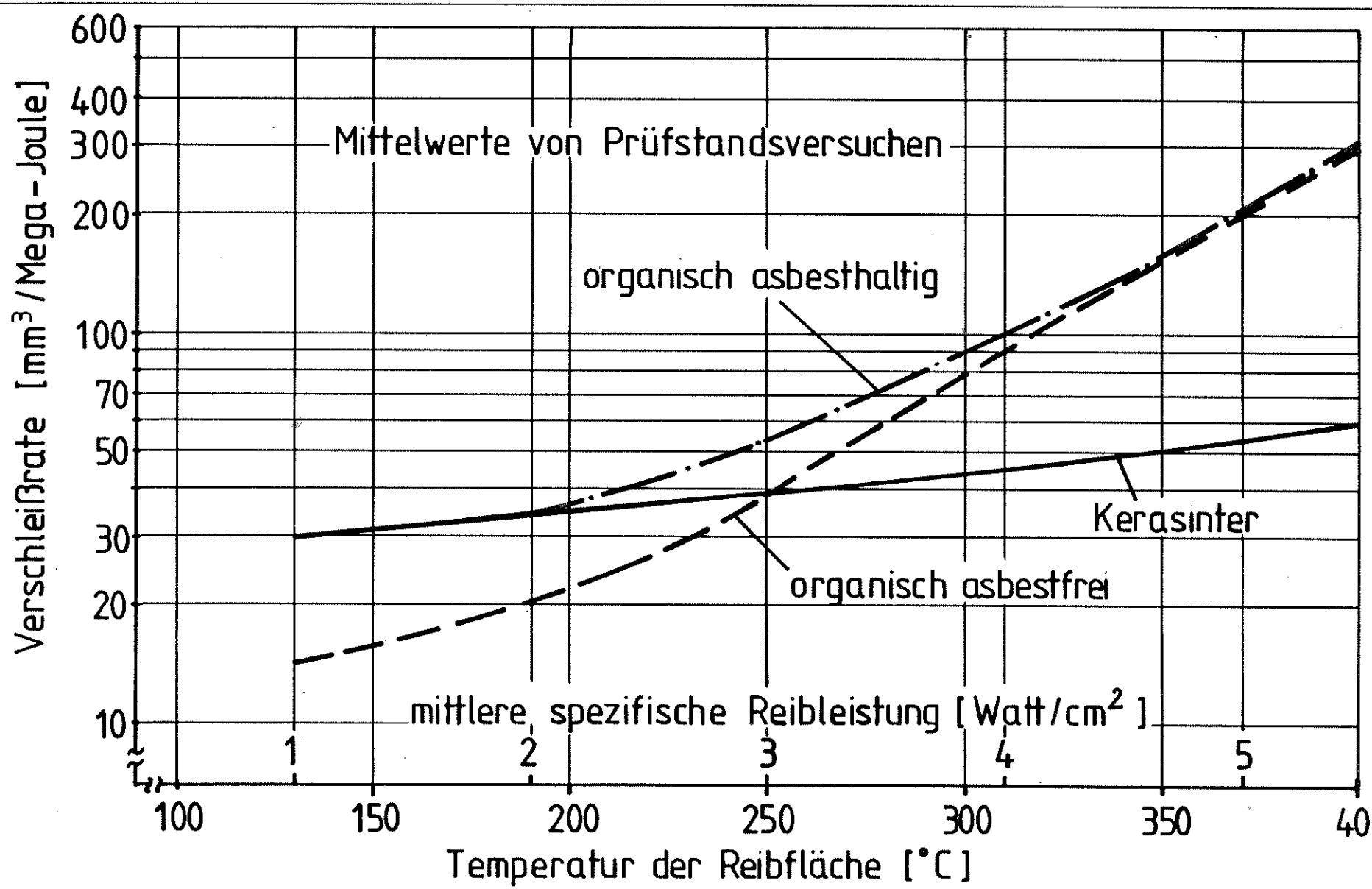
16 03 86	Pedalkraft in Abhängigkeit von der Motornennleistung und der Belagart



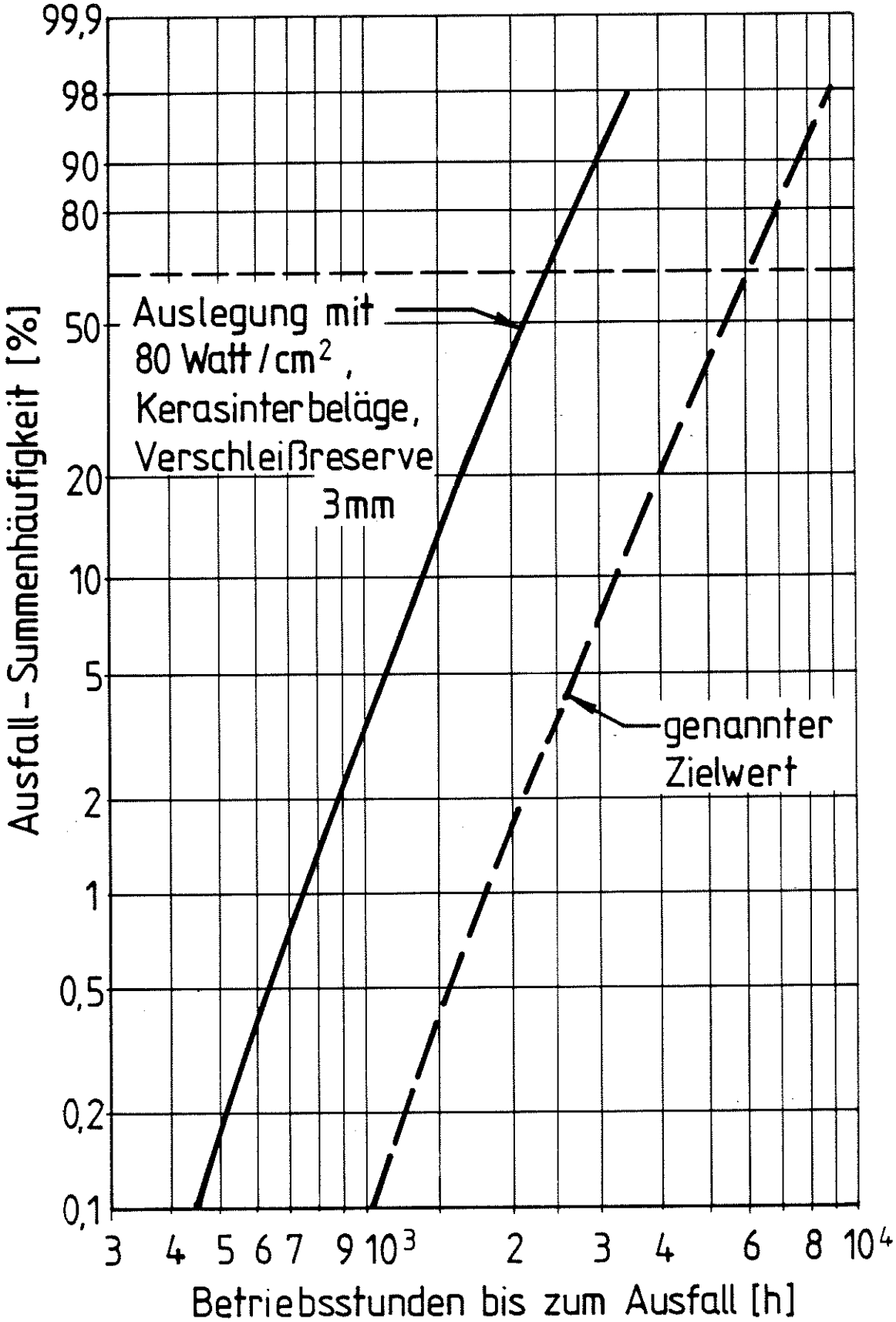
17 03 86	Massenträgheitsmoment der Kupplungsscheibe in Abhängigkeit von der Motorleistung und der Belagart



09 03 86	Angenommenes Lastkollektiv für Mindestlebensdauer	LuK



12 03 86	Verschleißrate in Abhängigkeit von Belagart und Temperatur

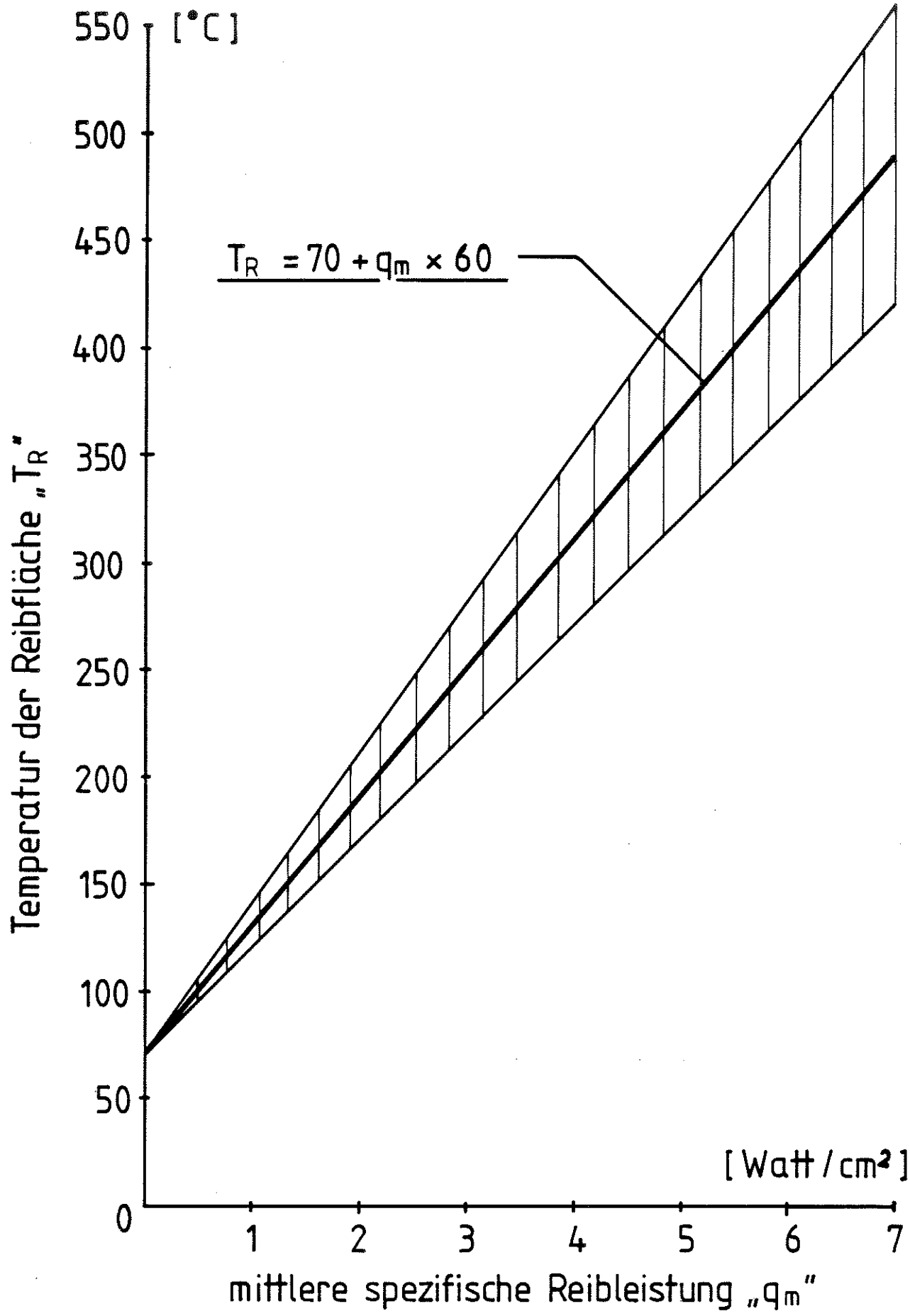


11 03 86	Zuverlässigkeit auf Grund von Belagverschleiß Rechenbeispiel

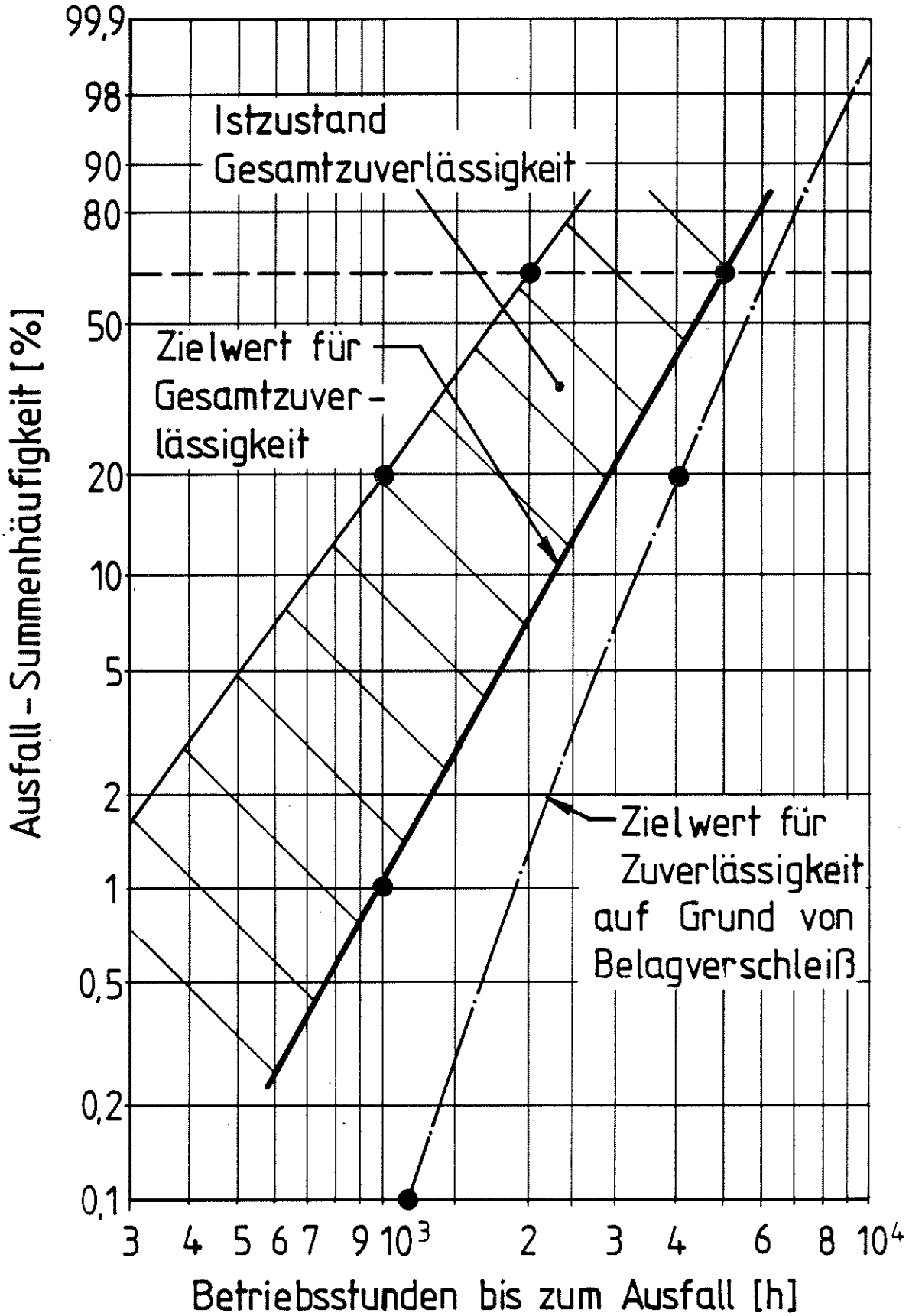
	mittlere Reib-leistung /Motor-nennleistung	Reibarbeit pro kW und Betriebsstunde	Temperatur der Umluft	Temperatur der Reibfläche
normale Dauer-belastung	0,3 ÷ 0,6 %	10 000 ÷ 20 000 Joule / kWh	70 ÷ 90° C	130 ÷ 150° C
extreme Dauer-belastung	2,5 ÷ 5 %	90 000 ÷ 180 000 Joule / kWh	100 ÷ 160° C	230 ÷ 350° C
extreme Kurzzeit-belastung	Rutschvorgänge bis zu 10 sec. bei voller Motorleistung			

Belastungen der Schlepperkupplung

LuK



07 03 86	Temp. der Reibfläche in Abhängigkeit von der mittl. spez. Reibleistung bei geschl. Glocke



08 0386	Zielwert für Zuverlässigkeit	LUK