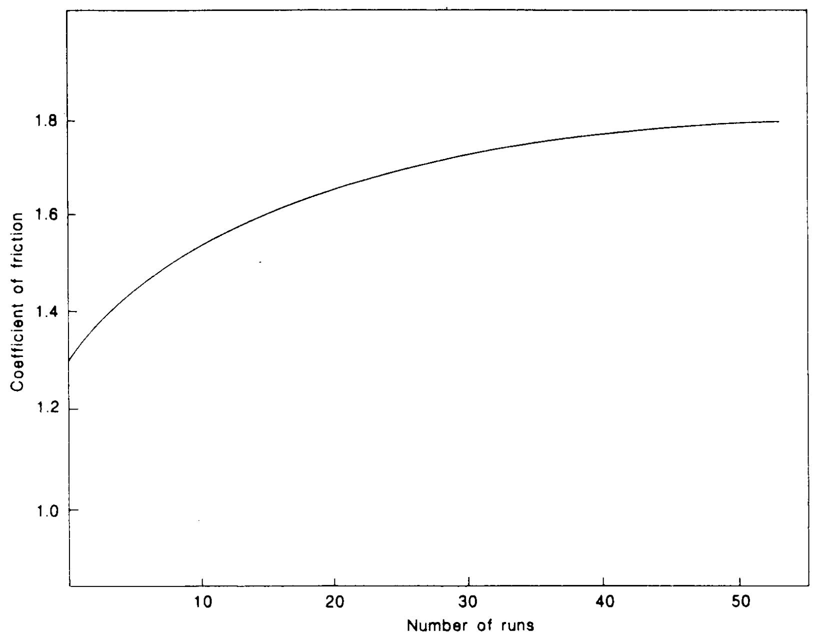


Ähnlich wie viele der bereits vorher zitierten Quellen stellt [95] fest, daß es einer gewissen Zyklenzahl benötigt, bis sich die Reibwerte auf einen asymptotischen Wert einstellen. **Abb.6.23** stellt die mit einer Elastomer – Probe aufgenommene Abhängigkeit des Reibwertes mit der steigenden Zyklenzahl dar.

Abb.6.23. Veränderung des Reibwertes in Abhängigkeit der Zyklenzahl. Aufgenommen mit dem RAPRA/Daventest Meßaufbau. [95]

Zunächst müssen die Proben von Rückständen, wie z.B. Trennmitteln aus der Preßform, gereinigt werden. Dies geschieht am besten mit Azeton oder reinem Alkohol. Außerdem kommen die Autoren zu dem Urteil, daß die Versuchswerte erst dann aufgenommen werden sollten, wenn sich die Werte dem asymptotischen Wert nähern. Diese Vorgehensweise wird auch in dieser Arbeit angewandt. Die **Abbildung 6.24** zeigt beispielhaft die mit der RAPRA/ Daventest – Meßaufbau aufgenommene Abhängigkeit des Reibwertes von Elastomer in Abhängigkeit der Temperatur.

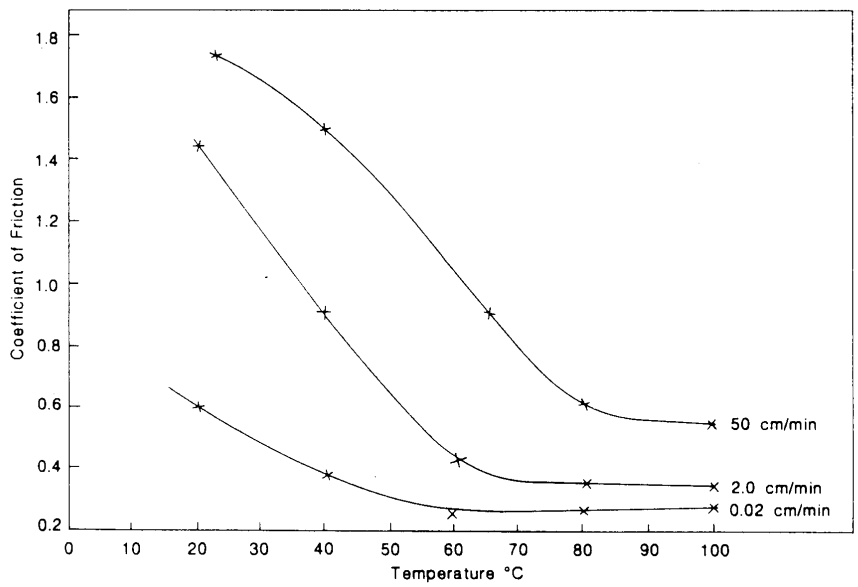


Abb.6.24. Reibwerte von Elastomeren in Abhängigkeit von Temperatur, Gleitgeschwindigkeit. Aufgenommen mit RAPRA/Daventest Meßaufbau. [95]

6.4.2.4 Fazit der Meßaufbauten

Der Tannert – Gleitindikator und der Freudeberg Simrit – Meßaufbau sind vom Konzept her gleich und unterscheiden sich nur in Details.
Der Aufbau RAPRA / Daventest besteht im wesentlichen aus einer Kraftmeßmaschine, was für diese Messungen nachteilig ist. Die Aufnahme von mehreren Messungen mit der gleichen Probe dauert wesentlich länger. Messungen von mehreren hundert, oder sogar mehreren Tausend Zyklen sind mit dem RAPRA/Daventest – Aufbau unmöglich.
Hier haben die beiden anderen Meßaufbauten klare Vorteile. Wenn die Messung zyklischer Belastung uninteressant ist, sind beide Konzepte gleichwertig. Mit beiden Meßaufbauten, werden bei gleichen Reibpaarungen auch gleiche Werte gemessen.

6.4.3 Weitere Einflußfaktoren bei der Elastomerreibung

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse experimentell ermittelter Werte zusammengefaßt, die die Abhängigkeit des Reibwertes μ von anderen Faktoren belegen und quantifizieren.

6.4.3.1 Reibwert in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit

Der Reibungskoeffizient ist stark geschwindigkeitsabhängig. Die **Abb.6.25** zeigt am Beispiel einer trockenlaufenden EPDM Probe auf einer geschliffenen Gegenlauffläche Stahl, daß sich der Reibwert asymptotisch einem Grenzwert nähert.

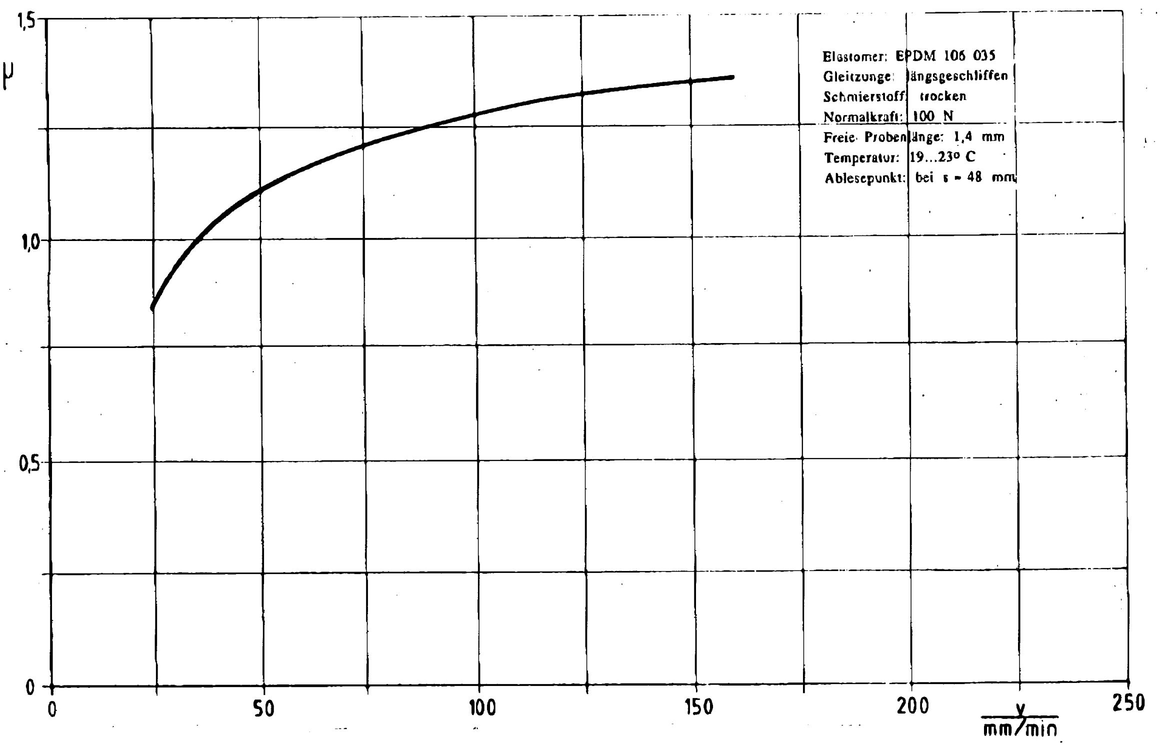


Abb.6.25. Reibungskoeffizient in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit. Gemessen mit dem Freudenberg – Simrit Meßaufbau. [96]

Diese Aussage muß ein wenig relativiert werden. Gemäß der Untersuchung von Rieger [97], bei der wesentlich größere Geschwindigkeitsbereiche untersucht worden sind, stellt sich heraus, daß der Reibwert von Elastomeren zunächst asymptotisch mit steigender Geschwindigkeit ansteigt, bei einer Geschwindigkeit von ca.1 mm/s das Maximum erreicht, um dann ca. zwei Zehnerpotenzen, also bei ca.100 mm/s wieder zu sinken. (**Abb.6.26**) stellt dieses Verhalten dar.

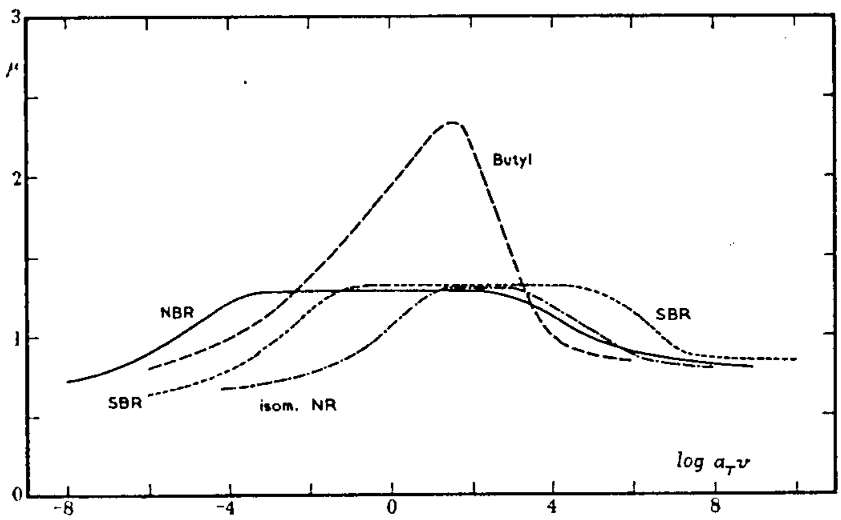


Abb.6.26. Reibwerte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Umgerechnet mit der WLF – Transformation gem. Kapitel 6.4.3.2.3. Gemessen mit einem Tannert – Gleitindikator.[66]

Bei anderen Quellen wird das asymptotische Annähern früher [66], bei anderen später gemessen [96], als bei Rieger [97] .
Bei der Untersuchung des Klappendrehmomentes ist praktisch nur der asymptotische Wert von Bedeutung. Bei einer Klappe mit typischer Auslegung mit pneumatischen bzw. schnellen elektrischen Antrieben, kann man von Gleitgeschwindigkeiten zwischen Metall und Elastomer jenseits der Größenordnung von mindestens 3mm pro Sekunde ausgehen, aber weit unterhalb von 50mm pro Sekunde. Dieser Wert stellt aber gemäß aller Quellen den Bereich dar, in dem die Geschwindigkeit keine Rolle für den Reibungskoeffizienten spielt. Man kann also mit ausreichend genauer Näherung den asymptotischen Wert des Reibungskoeffizienten annehmen.

Aus den durch Brydson [19], Schallamach [102], Spieß [96], als auch aus den durch Ettles [121] durchgeführten Versuchen kann die Aussage getroffen werden, daß für die folgende Kombination:

- EPDM in den Shore Härten zwischen 65° Shore A und 80° Shore A
- bei Raumtemperatur
- bei einer Gleitgeschwindigkeit oberhalb 3mm/s
- bei einer Gleitgeschwindigkeit unterhalb 50mm/s
- bei rauhem Reibpartner Stahl
- bei ungeschmierter Reibung
- nach mindestens 10 Schaltzyklen

der Reibwert μ = 1 und unabhängig der Flächenpressung ist (siehe auch **Abb.6.27** und **Abb.6.28**)

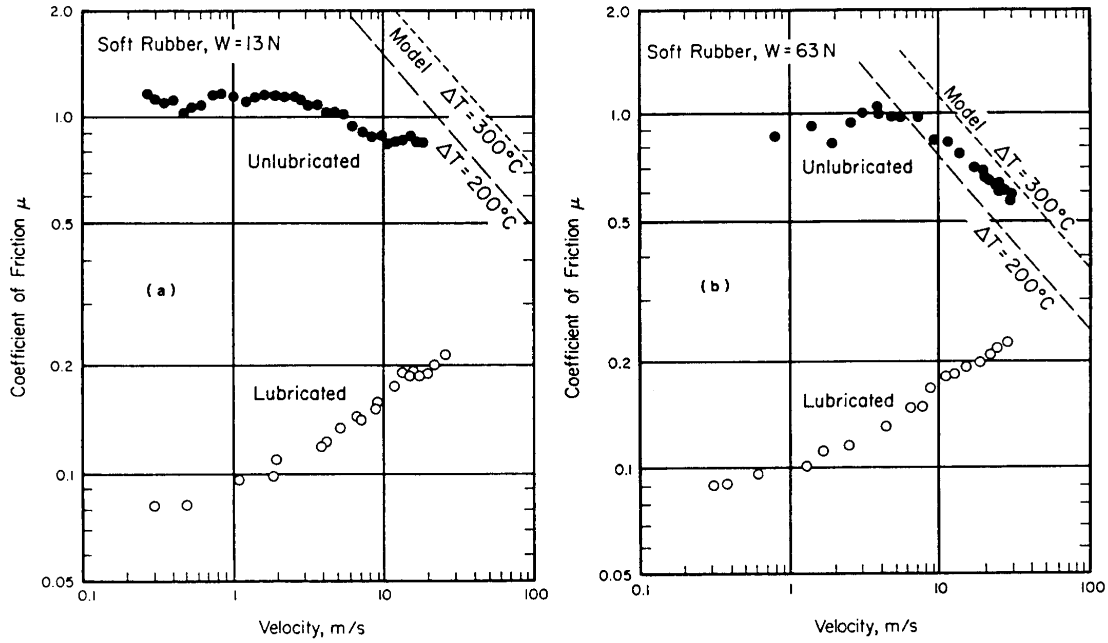


Abb.6.27. Reibwerte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Weicher Elastomer**.** [121]

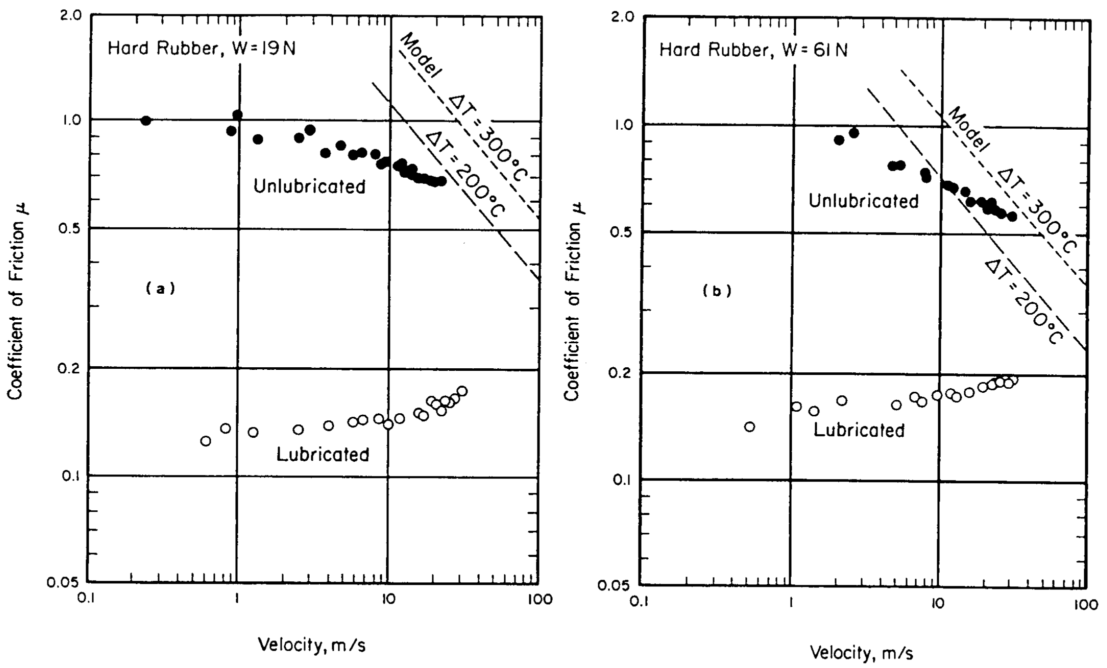


Abb.6.28. Reibwerte in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Harter Elastomer [121]**.**

6.4.3.2 Reibwert und Reibwärme

Weil Elastomere sehr schlechte Wärmeleiter sind, liegt die Vermutung nahe, daß an der Kontaktfläche zwischen Elastomer und Reibpartner hohe Wärmegradienten entstehen, die nicht in die Tiefe des Materials abgeführt werden können. Die Experimente von Grosch [122] als auch Ludema und Tabor [123], haben lediglich Gleitgeschwindigkeitsbereiche zwischen 0,001 bis 10 cm/s untersucht.

Aus diesen Experimenten resultiert, daß der Reibwert des Elastomers kaum vom Effekt der Entstehung der Reibungswärme abhängt.
Dagegen werden in den Untersuchungen von Hsien Shen und Ettles [109], als auch von Schallamach [98], Gleitgeschwindigkeitsbereiche zwischen 0,001 bis 30 m/s untersucht. Diese Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, daß ab bestimmten Gleitgeschwindigkeiten der Reibwert stark von der Gleitgeschwindigkeit abhängt.

6.4.3.2.1 Modell von Blok

Aufbauend auf den Ergebnissen von Blok [124] wird die Temperaturerhöhung der Oberfläche aufgrund der Reibungswärme errechnet aus der Beziehung:

$$\Delta T = 2 \cdot Q \left(\sqrt{\frac{t_G}{\pi \cdot k \cdot \rho \cdot c}} \right) \tag{6.12}$$

Wobei k der Wärmeleitwert, ρ die Dichte, c die spezifische Wärme, t_G die Gleitzeit und Q die Reibungsleistung pro Fläche ist. Die Gleitzeit t_G errechnet sich aus der Beziehung:

$$t_G = \frac{S_G}{v_G} \tag{6.13}$$

mit S_G als Gleitweg und v_G als Gleitgeschwindigkeit.
Mit Flächenpressung an der Reibstelle P folgt für die Reibungsleistung pro Fläche (Q):

$$Q = \mu \, P \, v_G \tag{6.14}$$

Und folgt mit Gl. (6.1):

$$\Delta T = 2 \cdot \mu \cdot P \cdot v_G \cdot \sqrt{\frac{t_G}{\pi \cdot k \cdot \rho \cdot c}} \tag{6.15}$$

Für einen kugeligen Kontakt gilt für die mittlere Temperatur T_m in der Oberfläche:

$$\Delta T_m = 1.21 \cdot K \cdot \mu \cdot P \cdot \sqrt{\frac{S_G \cdot V_G}{\pi \cdot k \cdot \rho \cdot c}} \tag{6.16}$$

K = Wien Konstante.
Der experimentelle Nachweis des Modells von Blok ist schwierig, weil die Messung der Erhöhung der Oberflächentemperatur aus praktischen Gründen immer zu großen Verfälschungen führt. Die Einbettung von Sensoren in größerer Entfernung von der für die Reibung wichtigen Oberfläche verfälscht die Wärmemessung der Elastomeroberfläche. Dagegen versteift die Einbettung von Sensoren unmittelbar unterhalb der Elastomeroberfläche den Elastomer. Die Temperaturerhöhung findet zunächst nur in wenigen Molekküllagen statt [124], was eine experimentelle Messung sehr schwer macht.

6.4.3.2.2 Begrenzungstemperatur

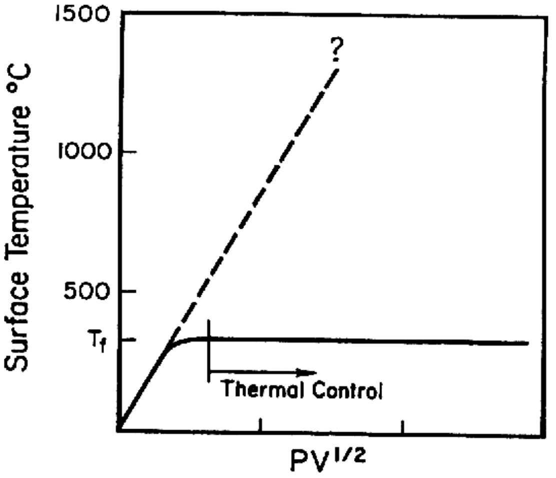


Abb.6.29. Begrenzung der maximalen Oberflächentemperatur für Elastomerreibung [121]

Trotz der Verifizierung durch die Arbeiten von Bhushan und Cook [4] und von Nagaraj, Sanborn und Winer [69] für metallische Materialien, kann die Gleichung nicht ohne weitere Korrekturen für Elastomere gültig sein. Aus einer einfachen Berechnung für Geschwindigkeiten, wie sie z.B. ein Autoreifen bei blockierten Rädern erfährt, würde folgen, daß die Oberflächentemperatur weit jenseits der 1000°C liegen müßte. (**Abb.6.29**) Die meisten Elastomere würden aber bereits bei Bruchteilen dieser Temperatur zerstört werden.

In den Arbeiten von Oksanen und Keinonen [70] und Ettles [121] wird eine Begrenzungstemperatur der Reibung T_B (bzw. T_F) eingeführt und aus der Gleichung 6.17. folgt für den Reibwert μ die Beziehung:

$$\mu = 1{,}45 \cdot \frac{T_B - T_R}{K \cdot P} \cdot \sqrt{\frac{k \cdot \rho \cdot c}{v_G \cdot S_G}} \qquad (6.17)$$

Mit:

$$\Delta T = T_{Begrenz.} - T_{Raum} \qquad (6.18)$$

Das Modell basiert auf der Annahme, daß die Oberflächentemperatur des Elastomers nicht unbegrenzt aufgrund von Reibungswärme steigen kann. Es wird angenommen, daß nur eine extrem dünne Schicht des Elastomers die Begrenzungstemperatur erreicht und daß diese Schicht durch intaktes Elastomermaterial unterstützt wird. Aus experimentellen Untersuchungen resultiert, daß der Einfluß der Temperaturerhöhung der Oberfläche aufgrund der Geschwindigkeit erst bei Geschwindigkeiten von mehr als 50mm/s beginnt [97] und erst dann den Reibwert senkt. Hierbei ist streng zu unterscheiden, ob die Temperatur nur in der Oberfläche des Elastomers aufgrund der Reibung entsteht (Abb.6.29), oder ob der gesamte Elastomer temperiert wird (Abb.6.24).

Die Abbildung 6.29 stellt die Abhängigkeit der Oberflächentemperatur während des Reibens in Abhängigkeit der Temperatur dar. Diese Werte wurden mit Temperatursensoren aufgenommen, die direkt unterhalb der Oberfläche des Elastomers angebracht waren. An dieser Stelle sei anzumerken, daß die Werte mit höheren Temperaturen, zumindest jedoch die jenseits der 100°C mit äußerster Vorsicht zu betrachten sind. Elastomer ändert seine Eigenschaften extrem mit steigender Temperatur. Die normalen Mischungen fangen bereits bei 100°C an zerstört zu werden. Spätestens bei diesen Temperaturen fangen die Reibspuren an zu schmieren.
Nur wenige Elastomere, wie z.B. peroxidisch vernetztes EPDM und Viton, als auch Silikone sind in der Lage, Temperaturen jenseits der 130°C ohne Zerstörung zu überstehen.

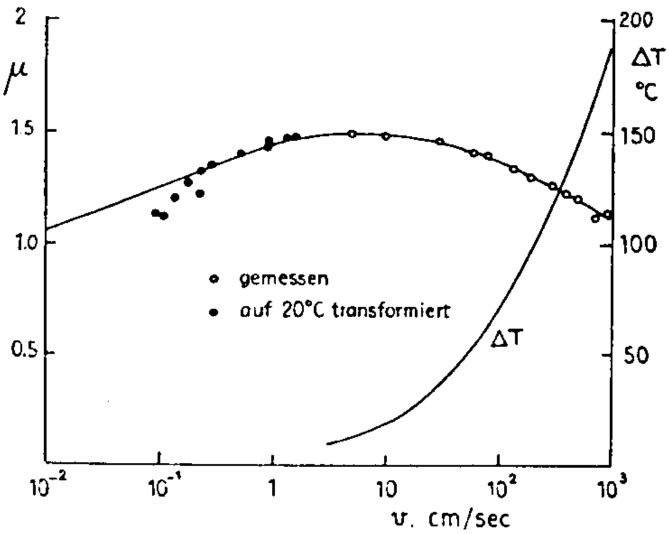


Abb.6.30. Durch Reibung hervorgerufene Temperaturerhöhung der Elastomeroberfläche in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. [121]

Die **Abb.6.30** kommt zu vergleichbaren Werten, wie die bereits genannten Quellen. Obwohl Ettles [121] die Werte mit anderen Meßmitteln aufgenommen hat, sind die Werte sehr ähnlich.

6.4.3.2.3 W –L – F Transformation

Die sogenannte W - L - F Transformation, nach ihren ursprünglichen Autoren [116] Williams, Landell, Ferry benannt, ermöglicht es, für viskoelastische Materialien eine sogenannte Meisterkurve zu erstellen, die die Abhängigkeit der Reibung von der Gleitgeschwindigkeit bei verschiedenen Temperaturen darstellt.

Die viskoelastische Natur des Elastomers wird durch ein Spektrum von Relaxationszeiten τ beschrieben. Diese Relaxationszeit tritt generell in allen Gleichungen als Produkt mit der Verformungsgeschwindigkeit ν auf: $\tau\nu$.
Im Folgenden wird τ durch $f_{(T)}$ ersetzt. Die Größe $f_{(T)}$ ist lediglich von der Temperatur abhängig. So sollte die an einem viskoelastischen Werkstoff gemessene Größe konstant bleiben, solange das Produkt $\nu f_{(T)}$ konstant ist:

$$\nu_1 f_{(T1)} = \nu_2 f_{(T2)} = \nu_3 f_{(T3)} \;\ldots\ldots = \nu_i f_{(Ti)} \qquad (6.19)$$

Bei einer logarithmischen Abtragung der gemessenen Größe mit den jeweiligen Temperaturen T_1 und T_2 (bei denen gemessen wurde) als Parameter sollten alle Kurven in der Form identisch sein, jedoch horizontal um den Betrag :

$$\log\left(\frac{f(T_1)}{f(T_2)}\right) \qquad (6.20)$$

verschoben sein. Kurven für weitere Temperaturen sollten durch Superposition herzuleiten sein. Diese Beziehung ist in sehr weiten Grenzen nachgewiesen worden. Zusätzlich ist in rein empirischen Untersuchungen gezeigt worden, daß jeder Elastomer eine charakteristische

Temperatur T_E hat, mit der als Bezugstemperatur die Verschiebungsfunktion : $\frac{f(T_1)}{f(T_2)}$ denselben Wert a_T hat:

$$\log(a_T) = \log(f(T)) - \log(f(T_E)) = \frac{-8.86\cdot(T - T_E)}{101.6 + T - T_E} \qquad (6.21)$$

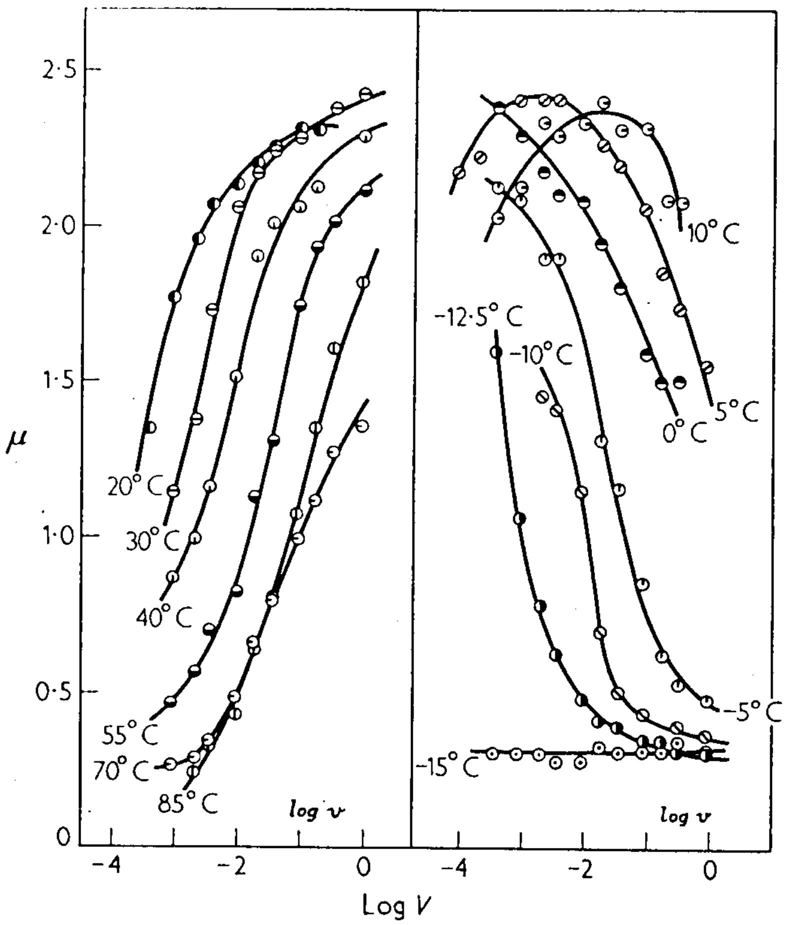


Abb.6.31. Messung des Reibwertes von NBR auf Glas bei verschiedenen Temperaturen und Geschwindigkeiten. [122]

Die experimentellen Möglichkeiten sind häufig begrenzt. Durch die Temperatur – Geschwindigkeits – Äquivalenz kann dann z.B. aus Messungen bei geringeren Geschwindigkeiten und entsprechend tieferen Temperaturen auf Werte bei höheren Geschwindigkeiten zurückgeschlossen werden. Die folgenden Abbildungen zeigen das Bilden einer sog. Meisterkurve.
Die in **Abb.6.31** abgebildete Kurvenschar wurde mit NBR auf Glas aufgenommen. Die Messungen wurden bei Temperaturen zwischen –15°C und 85°C aufgenommen und stammen aus der Arbeit von Grosch [122].

Mit Hilfe der W-L-F Transformation werden die einzelnen Kurven in eine Meisterkurve für 20°C übertragen (**Abb.6.32**). Die Kurvenzweige überlappen sich genügend, um die Anwendbarkeit der W-L-F Transformation zu untermauern. Es ergibt sich eine Abhängigkeit des Reibwertes μ von der Geschwindigkeit.

Die Untersuchungen von Rieger [97] bestätigen nochmals die Anwendbarkeit der WLF – Transformation und zeigen, daß die Meisterkurve für glatte Reibpartner ein ausgeprägtes Maximum besitzt und daß dagegen der Reibwert bei rauhen Reibpartnern für einen weiten Geschwindigkeitsbereich konstant ist.

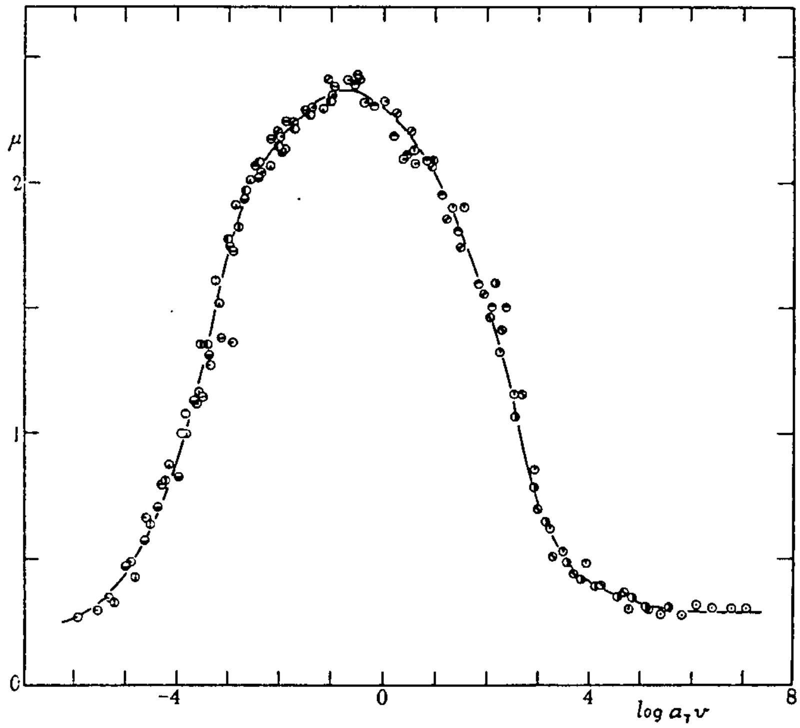


Abb. 6.32. Meisterkurve für NBR auf Glas für den Reibwert μ in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit. [122]

Diese Abhängigkeit ist allgemein anerkannt [127] und ist bereits in Normen festgelegt worden. So schlägt z.B. die DIN 53535 [46] die folgende Formel für die WLF – Transformation vor (die Gleichungen sind von der Art des Elastomers unabhängig):

$$\ln a_{(T)} = \frac{-C_1 \cdot (T - T_0)}{C_2 + (T - T_0)} \qquad (6.22)$$

und die Näherung:

$$\log_{10} a_{(T)} = \frac{-17 \cdot (T - T_g)}{52 + (T - T_g)} \qquad (6.23)$$

Wobei T_g die Glasübergangstemperatur darstellt (dilatometrisch gemessen).
Die Ungenauigkeiten ergeben sich durch Füllstoffe im Elastomer [127] und durch das Vorhandensein von kristallinen Bereichen [128]. Die WLF – Transformation ist sehr gut dazu geeignet, Transformationen durchzuführen, bei denen die Frequenz und die Temperatur große Bereiche abdecken. Sie ist jedoch nur recht ungenau bei der Berechnung im engen Temperatur- oder Frequenzbereich.

6.4.3.3 Reibwert in Abhängigkeit der Oberflächenrauheit

Unabhängig von der Ausgangsbeschaffenheit der Elastomerprobe stellt sich mit zunehmender Zyklenzahl ein konstanter Endwert des Reibungskoeffizienten ein. Dabei ist festzustellen, daß der Reibwert der preßglatten Probe höher ist und der Reibwert der angeschliffenen bzw. aufgerauhten Elastomerprobe niedriger ist, als der sich zuletzt einstellende Reibwert. Das Diagramm (**Abb.6.33**) zeigt die Abhängigkeit der Reibwerte einer Elastomerprobe der Mischung EPDM IN 106 035 in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit. Bei Raumtemperaturen wurden von einer preßglatten, von einer angeschliffenen, von einer aufgerauhten und von einer Probe mit der bereits einige Reibzyklen gemacht worden sind, die

Reibwerte mit Hilfe des Freudenberg – Simrit Aufbaus aufgenommen. Die Geschwindigkeit lag dabei bei 35 mm pro Minute.

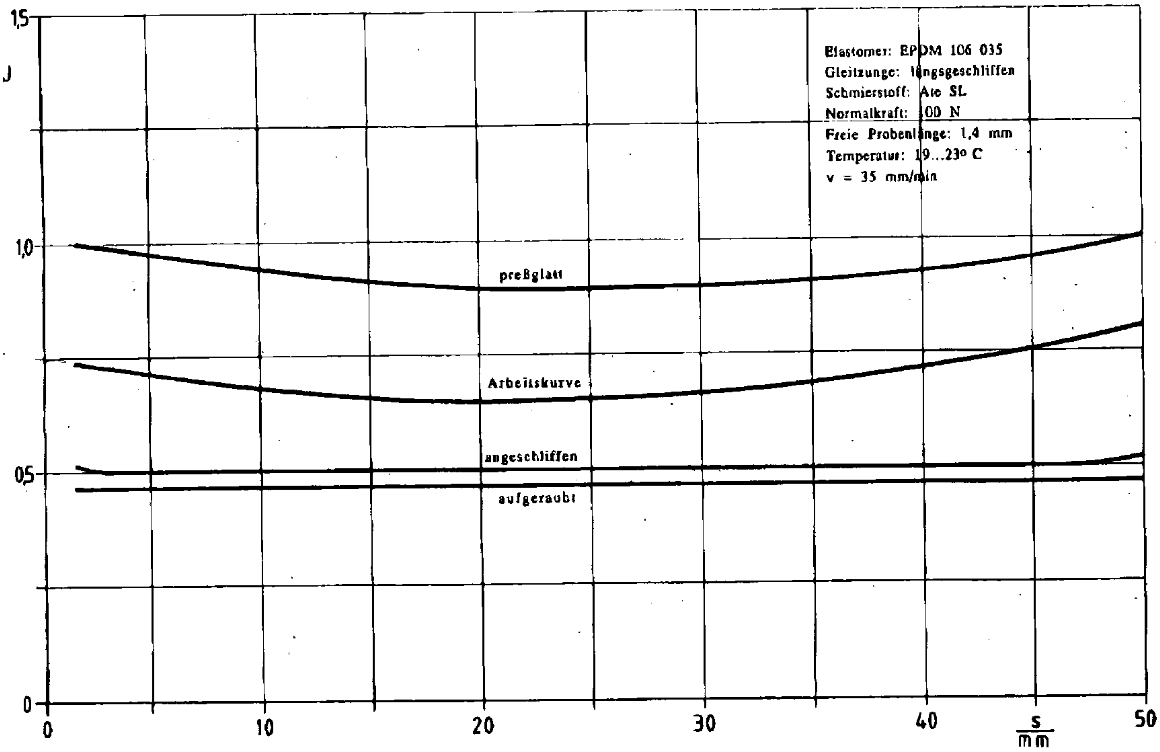


Abb.6.33. Reibwert μ in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit . Gemessen mit dem Freudenberg – Simrit Aufbau. [96]

Im nächsten Diagramm (**Abb.6.34**) wird die Abhängigkeit der Reibwerte von der Zyklenzahl aufgezeigt.

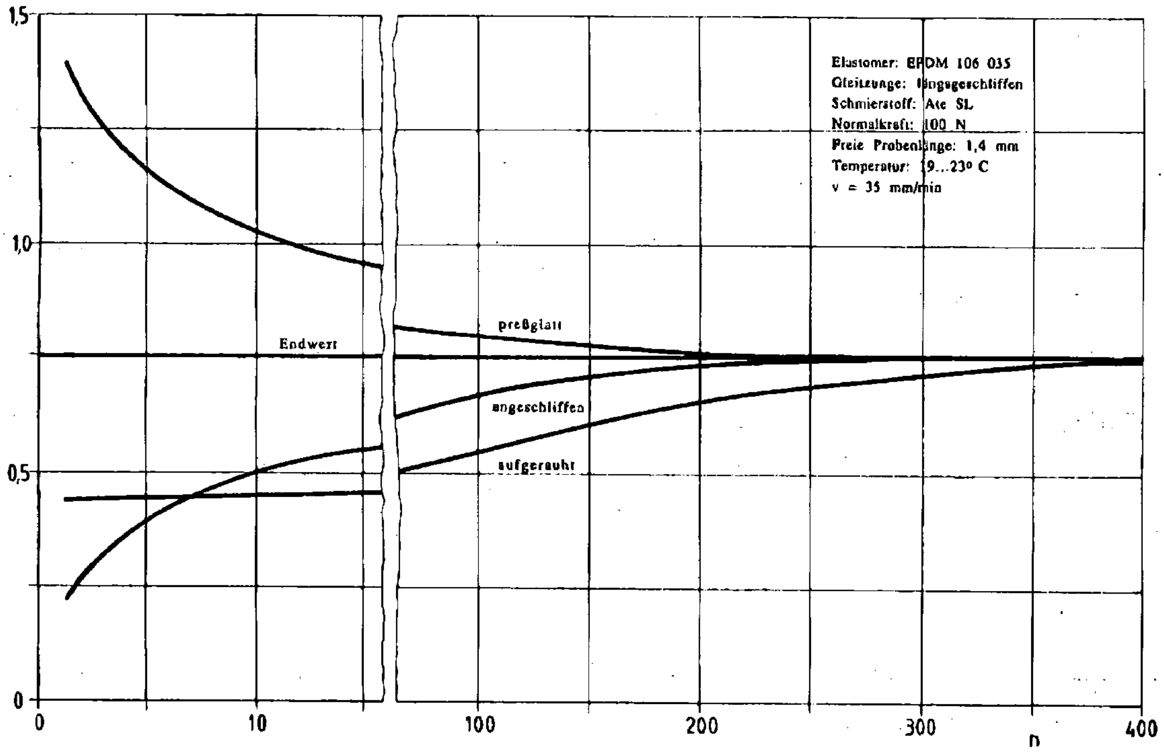


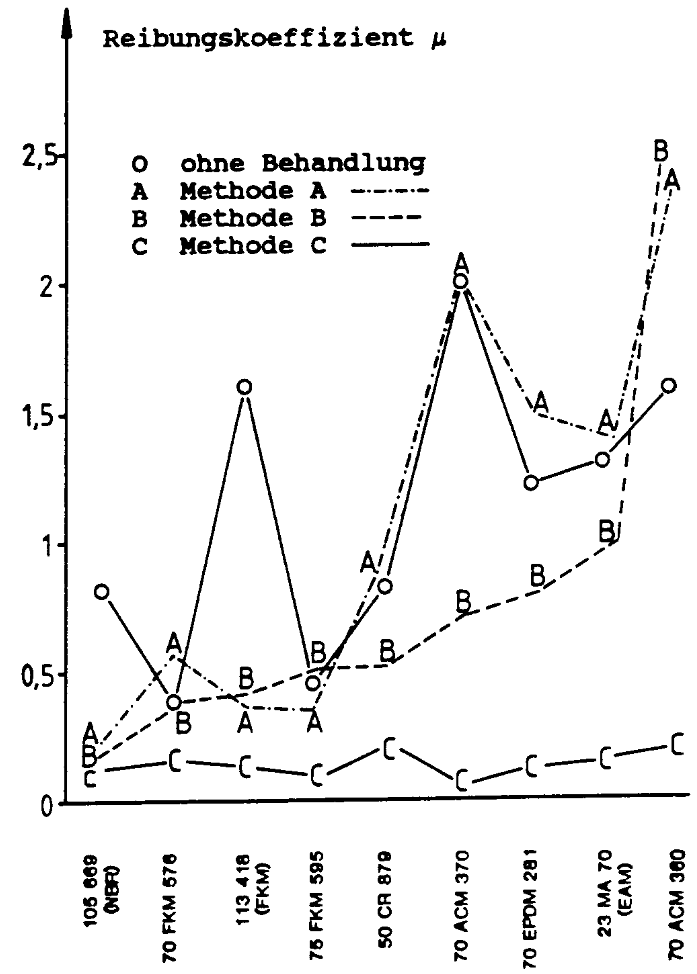
Abb.6.34. Reibungskoeffizient von EPDM auf längsgeschliffener Gegenlauffläche in Abhängigkeit der Zyklenzahl. [96]

In dem Diagramm ist der Reibwert der preßglatten Probe am Anfang wesentlich höher, der Reibwert der angeschliffenen bzw. aufgerauhten Probe wesentlich niedriger als der Wert, der sich nach einer gewissen Zyklenzahl einstellt.
Spätestens nach 200 Zyklen kann man davon ausgehen, daß die Reibwerte sämtlicher Proben sich dem gleichen Wert asymptotisch nähern. Auch diese Messung wurde mit der Mischung EPDM 106 035 bei Raumtemperatur aufgenommen. Die Reibgeschwindigkeit lag ebenfalls bei 35 mm pro Min. Der Effekt der asymptotischen Annäherung der Reibungskoeffizienten an die endgültige Arbeitskurve stellt sich bei ungeschmierter Reibung wesentlich schneller ein. Bei ungeschmierten Versuchen werden bereits nach einigen wenigen Zyklen stabile Werte erreicht.[95,96,115]
Der endgültige Wert des Reibungskoeffizienten ist materialspezifisch und hängt von der Oberflächenbeschaffenheit der Gegenlaufstelle, also von der Oberfläche des Stahls ab. Es spielt also eine wesentlich höhere Rolle, welche Oberflächenstruktur der Reibpartner Stahl hat.
Demnach lohnt es sich wesentlich mehr, in die Oberfläche des Stahls zu investieren, als in die Oberfläche des Elastomers. Gleichzeitig hängt das Verschleißverhalten der Dichtstelle ganz wesentlich von der Oberflächenbeschaffenheit des Reibpartners Stahl ab und zwingt, sich mit der Rauhigkeit der Oberfläche des Stahls zu befassen. Der Reibungskoeffizient der geschmierten Proben ist auf Grund der geometrischen Gegebenheiten der Prüfeinrichtung, wegabhängig. Bei Trockenreibung ist der Reibwertkoeffizient mit dem Weg konstant.

6.4.3.4 Abhängigkeit des Reibwertes vom Elastomeraufbau

Außer den mechanisch - technologischen Eigenschaften des Elastomers ist der Einsatz reibungsarmer Füllstoffe, wie Graphit, PTFE oder anderer, von großer Bedeutung. Durch die geeignete Wahl des Füllstoffes kann der Reibwert der Elastomermischung entscheidend verringert werden. Mindestens die ersten zwei Anteile der Gleichung 6.11 werden durch den chemischen Aufbau des Elastomers direkt beeinflußt. Auf die weiteren Möglichkeiten der Elastomermischung soll aber hier, wie bereits erwähnt, nicht weiter eingegangen werden. Hierbei wird auf viele Arbeiten der Hersteller bzw. auf diverse Diplomarbeiten verwiesen, die sich ausschließlich mit der chemisch - technologischen Zusammensetzung von Elastomermischungen befassen. Zu erwähnen ist, daß es für viele Klappenventilhersteller von Bedeutung ist, daß die Elastomermischung insgesamt silikonfrei ist. Insbesondere der Einsatz in Lackieranlagen oder in deren unmittelbarer Umgebung verlangt nach dieser Einschränkung. Diese Einschränkung bewirkt bereits, daß man viele Füllstoffe nicht für die Mischung des Elastomers verwenden kann.

Eine andere Möglichkeit stellt die Oberflächenbehandlung dar. Auf dem folgenden Diagramm (**Abb.6.35**) sind Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt, die mit Hilfe des Freudenberg - Simrit Reibwertmeßgerätes im Rahmen einiger Diplomarbeiten aufgenommen worden sind. Hierbei wurde insbesondere untersucht, inwieweit sich eine Oberflächenbehandlung des Elastomers auf den Reibwert auswirkt. Verschiedenste Möglichkeiten sind getestet worden. Bestrahlung der Oberfläche mit energiereicher Strahlung, Elektronenstrahlung [129], Halogenierung [130], Bromierung, Plasmapolymerisation [11], etc., sind nur einige der ungewöhnlichen Möglichkeiten, die Reibungswerte von Elastomeren zu verringern. Die Reibungswerte von Elastomeren vor und nach entsprechender Behandlung der Elastomeroberfläche wurden dabei in unzähligen Untersuchungen getestet. Je nach Methode kann dabei die Reibung gegenüber dem Reibpartner Stahl, ohne Schmierung, um den Faktor 2 (Fluorierung) verringert werden.



Der Verschleiß darf nicht vernachlässigt werden. So kommt [98] zu dem Ergebnis, daß nach einer Oberflächenbehandlung des Elastomers mit Alluminiumoxid praktisch keine Reibung mehr zwischen Elastomer und dem eigentlichen Reibpartner stattfindet, sondern, daß praktisch nur noch Alluminiumoxid an dem Reibpartner gleitet. Dieser Effekt kann unter Umständen nur von kurzer Dauer sein, wenn die Schichtdicke des reibungsminimierenden Zusatzstoffes gering ist, oder wenn die Verbindung nicht standfest genug ist.

Abb.6.35. Reibwert in Abhängigkeit der Oberflächenbehandlung. [11]

6.4.3.5 Reibwert und Dauer der Belastung

Wegen des häufig sehr komplexen Aufbaus der Werkstoffe und wegen deren viskoelastischen Verhaltens ist Reibung von Elastomerbauteilen und der Gleitmechanismus sehr schwierig zu beschreiben.
Als viskoelastisches Verhalten wird die Eigenschaft vieler Stoffe bezeichnet, sich bei kurzzeitigen Belastungen "quasielastisch" zu verhalten, sich dagegen plastisch zu verformen, wenn die Belastung länger anhält. Ein solches Verhalten haben die meisten Polymere: praktisch alle Kunststoffe haben ein mehr oder weniger ausgeprägtes Fließverhalten.
Ebenfalls sehr ausgeprägt ist diese Eigenschaft bei Elastomeren. Obwohl Elastomer sehr elastisch ist, zeigt sich bereits nach wenigen Minuten, daß eine Metallscheibe, die in den Elastomer eingedrückt wird, bleibende plastische Verformungen im Elastomer hinterläßt. Diese Eigenschaft spielt bei Elastomeren unter Druckbelastung eine größere Rolle als bei Zuganwendungen, der ungeschäumte Elastomer ist inkompressibel.
Die Eigenschaft der bleibenden Verformung von Elastomeren ist allgemein bekannt. Einige Normen beschreiben Prüfverfahren, um diese Eigenschaft in verschiedenen Belastungszuständen zu prüfen: Prüfen des Druckverformungsrestes [131], Prüfen des Zug-Verformungsrestes[132], Prüfen des Kriechens [133].
Wegen dieses komplizierten Verhaltens von Elastomeren befassen sich sehr viele Arbeiten nur mit den einfachsten Bauteilen und sind oft rein empirisch. Basierend auf der Erfahrung,

daß mit wenigen Ausnahmen der Reibwert (allerdings auch die Dichtigkeit) einer Klappe mit der Dauer der Anwendung sinkt, wird in dieser Arbeit das Fließen des Elastomers nicht untersucht.

6.4.4. Festlegung der Reibungswerte

Unter den im Experiment festgelegten und bereits erläuterten Randbedingungen (siehe auch Seite 104), ist der Reibwert für die Paarung Elastomer und Metall unabhängig von folgenden Größen:

- Gleitgeschwindigkeit
- Temperatur
- Elastomerrauheit
- Metallrauheit
- Flächenpressung an der Kontaktstelle

Der Reibwert μ gemäß der Coulomb´schen Reibgesetze kann als Konstante mit dem Reibwert $\mu = 1$ angenommen werden. Damit ist die wichtigste Unbekannte für das Bilden der Drehmomentsimulation bekannt.

6.5 Bilden des FEM - Modells

Das Bilden des Modells für die Simulation des Drehmomentversuches ist im Softwarepaket MARC sehr einfach und entspricht im wesentlichen dem vorhergehenden FEM – Modell für die Ermittlung der Kraft / Weg Kurve.

Folgende Werte wurden aus dem FEM Modell zur Simulation der Kraft / Weg Kennlinie (Kapitel 5) übernommen:

- Größe des Elastomers
- Form der Scheibe
- Vernetzung , **Abb.6.36** (in IDEAS wurde der fein vernetzte Bereich erweitert, **Abb.6.41**)
- Einspannung des Elastomers (in IDEAS nur im ersten Schritt)
- Metallscheibe als starrer Körper
- Materialgesetz des Elastomers
- Materialwerte des Elastomers
- Art des Finiten Elementes

Bei der Bildung der Kontaktbedingungen wurde ein Reibwert $\mu = 1$ eingegeben. Bei der Simulation des Drehmomentversuches wurde mit feineren Inkrementen gearbeitet. Mit steigender Verpressung muß die Inkrementanzahl mit bis zu 400 eingegeben werden.

Bei der Auswertung der Simulation sind zwei Werte von Bedeutung:

- die Flächenpressung an der Kontaktstelle (**Abb.6.37-39**)
- das Drehmoment, das notwendig ist, um die Scheibe durch den Elastomer zu drehen

um die berechneten Werte mit den Versuchen vergleichen zu können. (**Abb.6.40**)

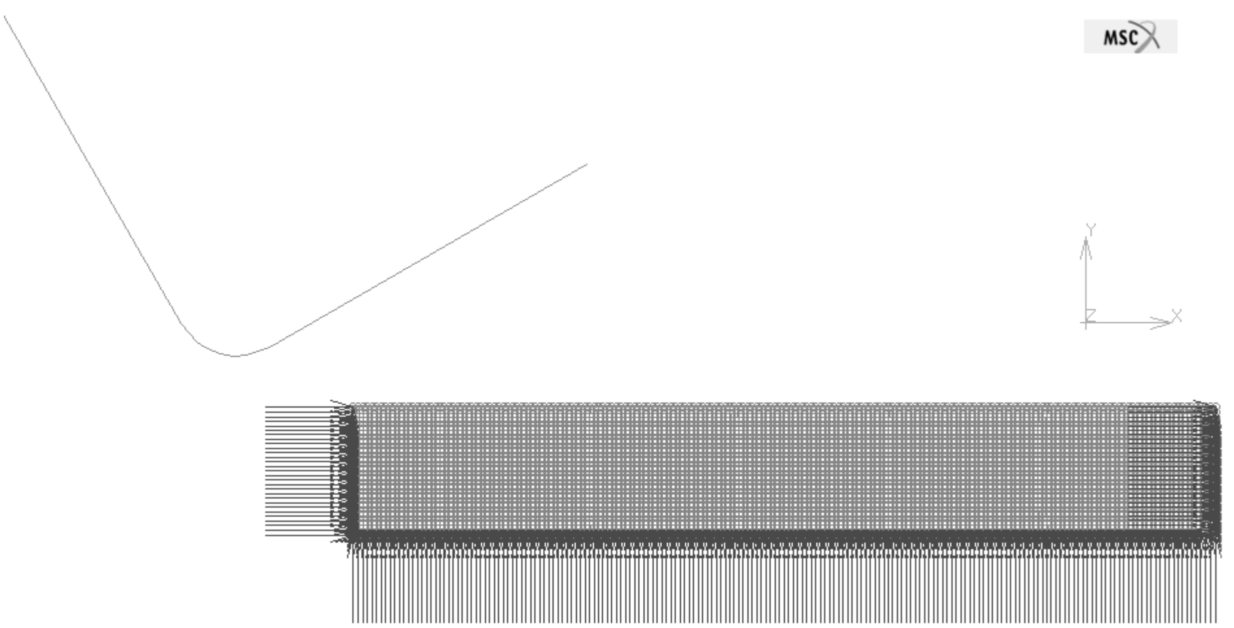


Abb.6.36. Simulation des Drehmomentversuchs im Softwarepaket MARC.

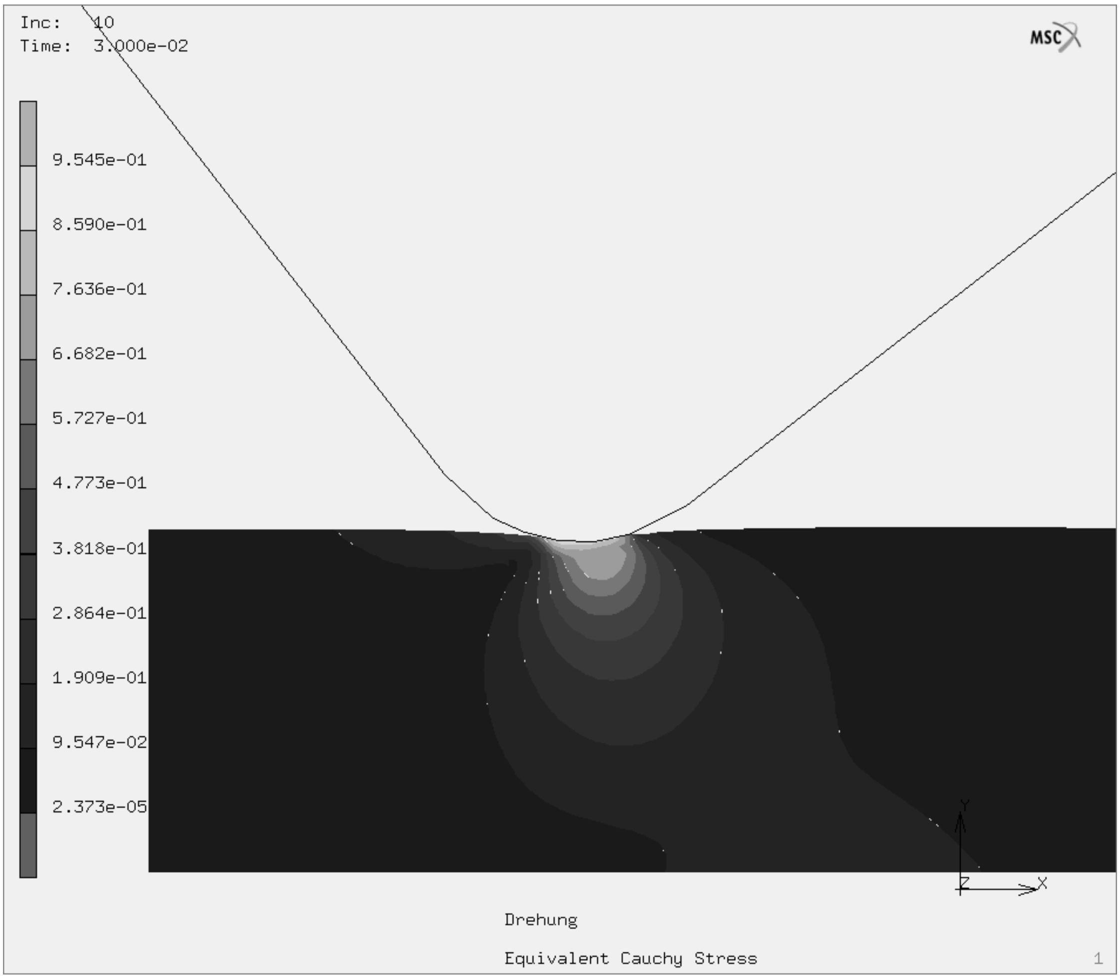


Abb.6.37. Drehmomentsimulation mit der Software MARC. Inkrement 10.

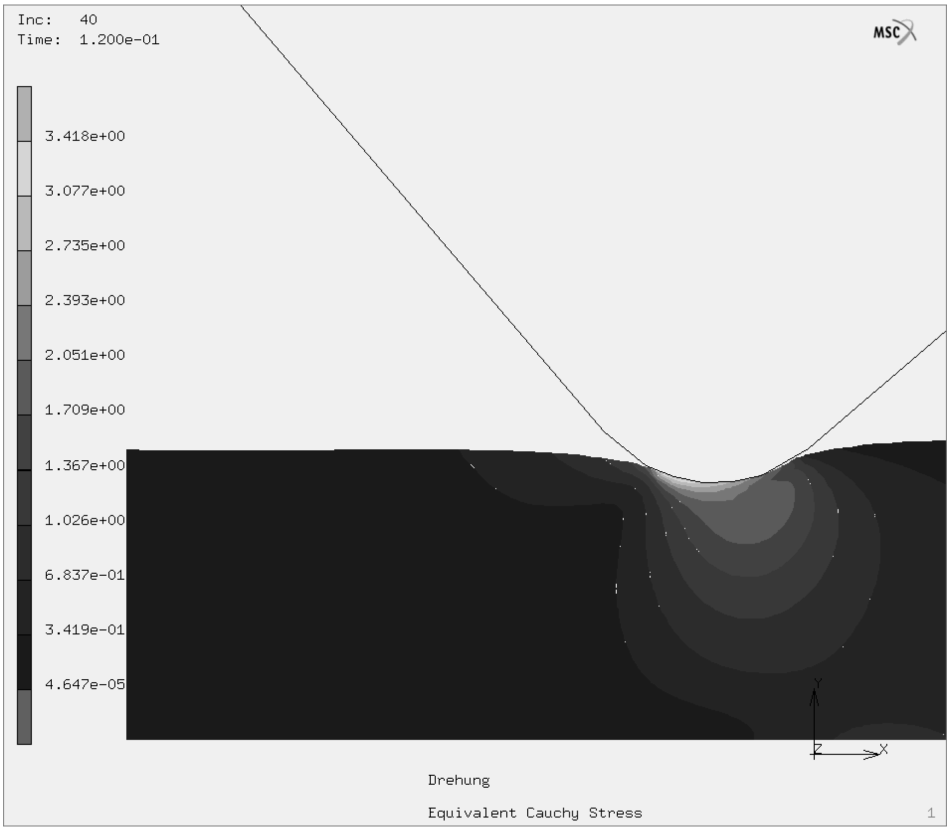


Abb.6.38. Drehmomentsimulation mit der Software MARC. Inkrement 40.

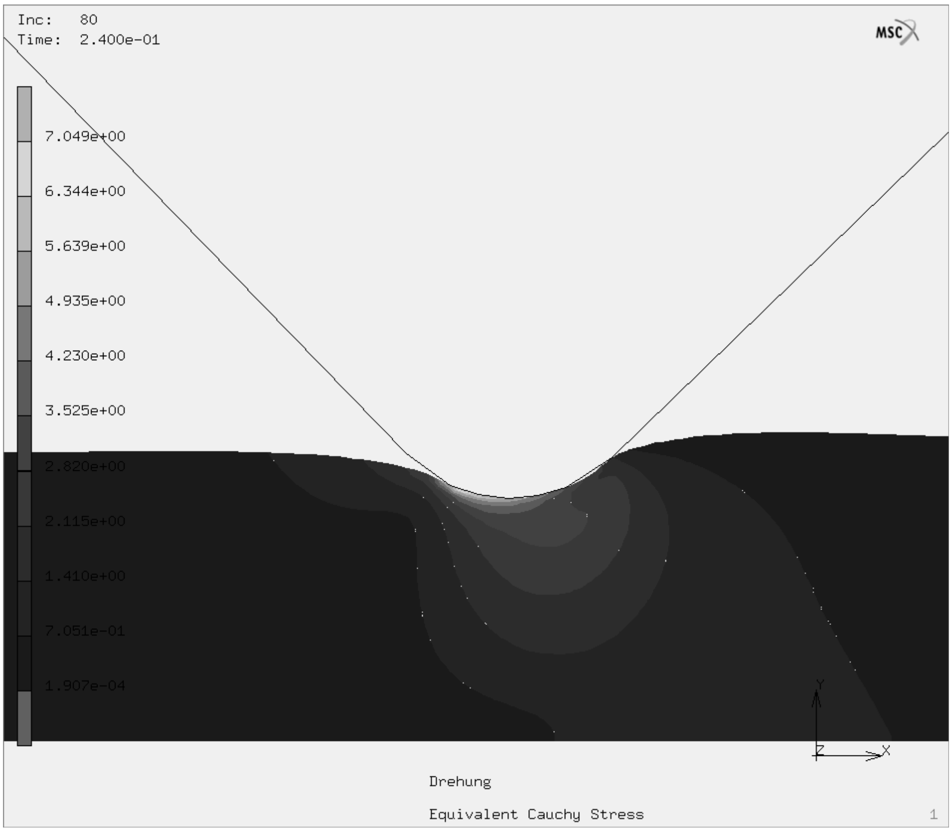


Abb.6.39. Drehmomentsimulation mit der Software MARC. Inkrement 80.

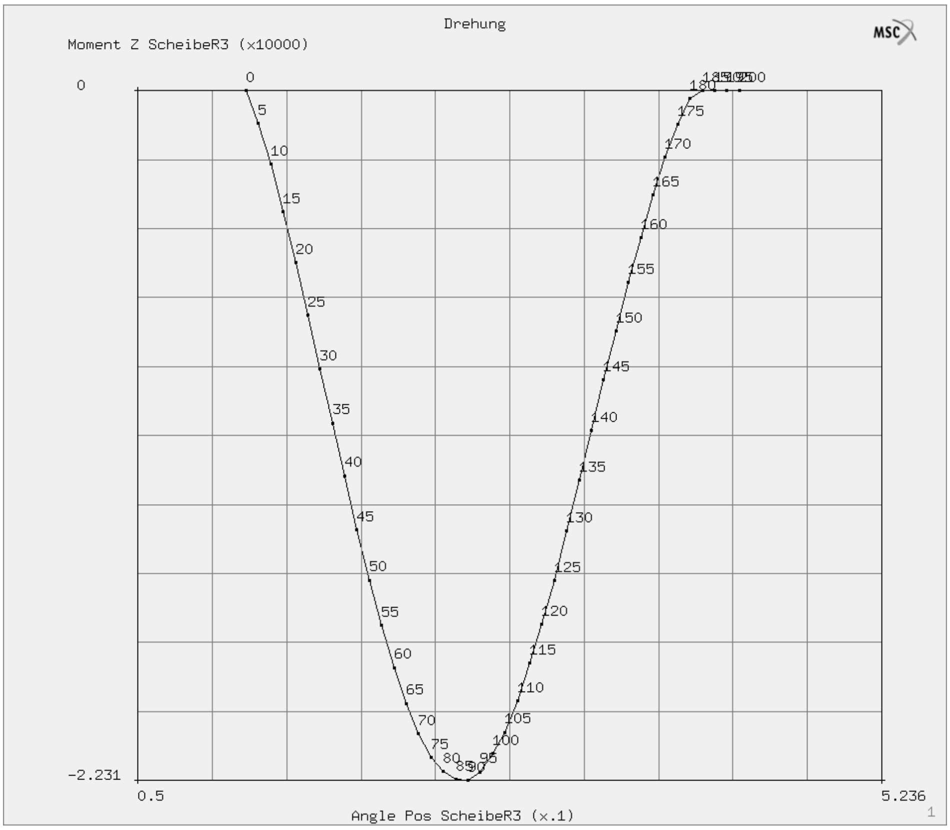


Abb.6.40. Drehmomentsimulation mit der Software MARC. History Plot des Drehmomentes der Scheibe R3 45°, EPDM 60° ShoreA. Drehmomentwerte in Nmm, Winkel in Bogenmaß.

Die Simulation des Drehmomentversuches ist mit dem Softwarepaket IDEAS wesentlich aufwendiger.
Das Modell wurde in mehreren Schritten aufgebaut:

Bilden des Modells für die Kraft / Weg Simulation.

Übernahme der Spannungs / Dehnungs - Werte

Eingabe der neuen Randbedingungen

„Contact Set“ mit Reibung
Solver einstellen

Lösung

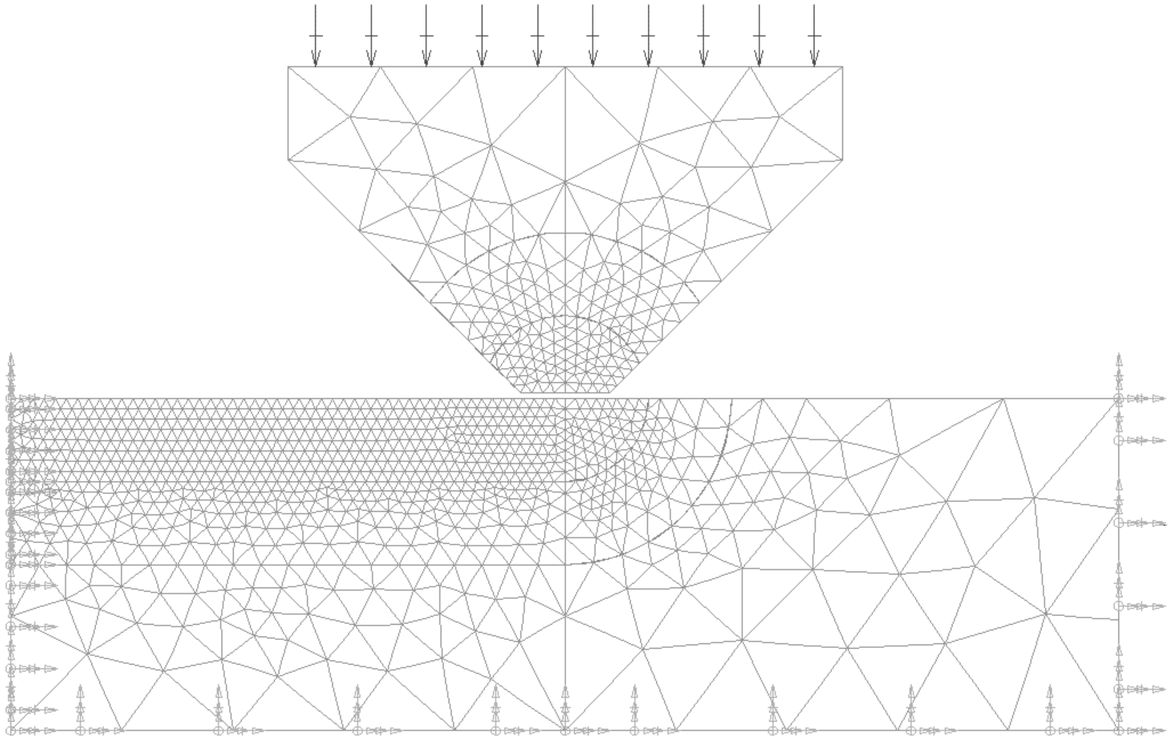


Abb.6.41.IDEAS. Geändertes Netz für die Drehmomentsimulation. Ausgangssituation.

Nach der Berechnung der Spannungs / Dehnungs Werte im Modell für die Kraft / Weg Simulation werden die Werte in die zweite Berechnung übernommen. Die Elastomereinspannung bleibt gleich. Dagegen ist die Metallscheibe nur in der x – Richtung verschiebbar. Es wird auf die Scheibe eine Kraft in x – Richtung aufgebracht.
Es wird ein Reibwert $\mu = 1$ eingegeben.
Es wird die Kraft in x – Richtung errechnet, die auf den Elastomer wirkt. Diese Kraft wird durch die Reibkräfte übertragen. Diese Kraft, multipliziert mit dem Hebelarm von 100mm, entspricht dem Drehmoment des Versuchsaufbaus.
Durch das aufwendigere Netz, als das, welches für die Simulation der Kraft / Weg Ermittlung verwendet wurde, steigt die Rechenzeit erheblich (**Abb.6.41**). Die Knotenanzahl wird mehr als verdoppelt. Die Übernahme der Spannungs / Dehnungswerte ist nur mit Subroutinen möglich. Auch bei den Lösungen, die mit dem Softwarepaket IDEAS errechnet werden, ist eine ausreichende Übereinstimmung mit dem Versuch gegeben. Jedoch ist die notwendige Rechenzeit und der Zeitaufwand kaum tragbar.

6.6 Einfaches Berechnungsmodell

Eine wesentliche Vereinfachung der Berechnung der Drehmomentwerte ergibt sich aus einem weiteren, möglichen Modell. Bei erneuter Anwendung der Annahme, daß der Reibwert $\mu = 1$ und unabhängig von allen anderen Faktoren ist, kann das Drehmoment aus der Beziehung errechnet werden:

$$M_D = F_S * \mu * l_H \qquad (6.24)$$

mit:

F_S = Kraft senkrecht zum Elastomer aus der Kraft / Weg Ermittlung
μ = Reibwert
l_H = Hebelarm

Die Werte aus dieser Berechnung liegen vom Betrag her nicht befriedigend nah an den empirisch ermittelten Werten. Der Vergleich der aus diesem Modell berechneten Kurvenscharen für verschiedene Scheibenkonturen und Elastomerdicken zeigt, daß das Modell zumindest qualitativ gute Aussagen liefert. Die mit dieser Methode berechnete Scheibenkontur mit dem geringsten Drehmoment entspricht der Scheibenkontur mit dem geringsten Drehmoment aus dem Versuch. Der besondere Vorteil dieser Methode ist die sehr einfache Rechnung.
Die Kraft / Weg Ermittlung kann empirisch erfolgen. Auch mit nicht so komfortablen FEM – Programmen kann, wie aufgezeigt, die Kraft / Weg Ermittlung, einfach simuliert werden. Mit Hilfe dieses Modells kann mit Einsetzen der errechneten Kraft sehr einfach das Drehmoment verschiedener Kombinationen miteinander verglichen werden.

6.7 Vergleich FEM – Simulation und empirisch ermittelte Werte

Wie im Kapitel 5 dargestellt, stellt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und mit FEM - berechneten Werten bei der Kraft / Weg Ermittlung dar. Sowohl IDEAS als auch MARC bieten Werte die sehr gut mit den im Versuch gemessenen übereinstimmen.

Am Beispiel einer Scheibenkontur werden die Drehmomentwerte aus dem Versuch, aus dem einfachen Berechnungsmodell und aus der FEM - Simulation miteinander verglichen (**Abb.6.42**).

Der Versuchsaufbau liefert sehr gut wiederholbare Werte. Der Versuchsaufbau ist aufwendig. Die Messungen verschiedener Kombinationen bei einem vorhandenen Meßaufbau ist dann jedoch einfach und erfolgt sehr schnell.

Das Modell zur Drehmomentberechnung nach Gl.6.24 liefert zwar Werte, die vom Betrag her weit von den gemessenen Drehmomentwerten abweichen, jedoch ist die Lage der Kurvenscharen verschiedener Scheibenkonturen und Elastomerdicken zueinander identisch mit der, die aus dem Versuch und in der FEM - Berechnung ermittelt werden. Das Model ist ausreichend, um dem Konstrukteur den qualitativen Vergleich der verschiedenen Möglichkeiten zu liefern. Das Modell ist in seiner Einfachheit nicht zu überbieten.

Das Modell zur Drehmomentberechnung im Softwarepaket MARC ist recht komfortabel, jedoch auch zeitraubend. Aus Inkrementzahlen von bis zu 400 resultiert eine sehr lange Rechenzeit. Gleichzeitig wird, anders als beim Modell für die Kraft / Weg Berechnung lediglich ein Wert des Drehmomentes als Funktion der Verpressung errechnet. Der Aufwand ist noch vertretbar, um auch quantitative Werte zu erreichen. Insbesondere bei großen Verpressungen und breiten Scheibenkonturen ist es zum Teil problematisch, konvergierende Lösungen zu finden.

Das Modell zur Drehmomentberechnung im Softwarepaket IDEAS ist sehr aufwendig. Es müssen mindestens zwei Berechnungen durchgeführt werden, um einen Drehmomentwert als Funktion der Eindringtiefe zu erhalten. Dieser Zeitaufwand ist nicht zu vertreten. Zudem waren Änderungen am Programm notwendig, um diese Berechnungen durchführen zu können.

Die Abweichungen der Beträge sind befriedigend, jedoch größer als beim Softwarepaket MARC.

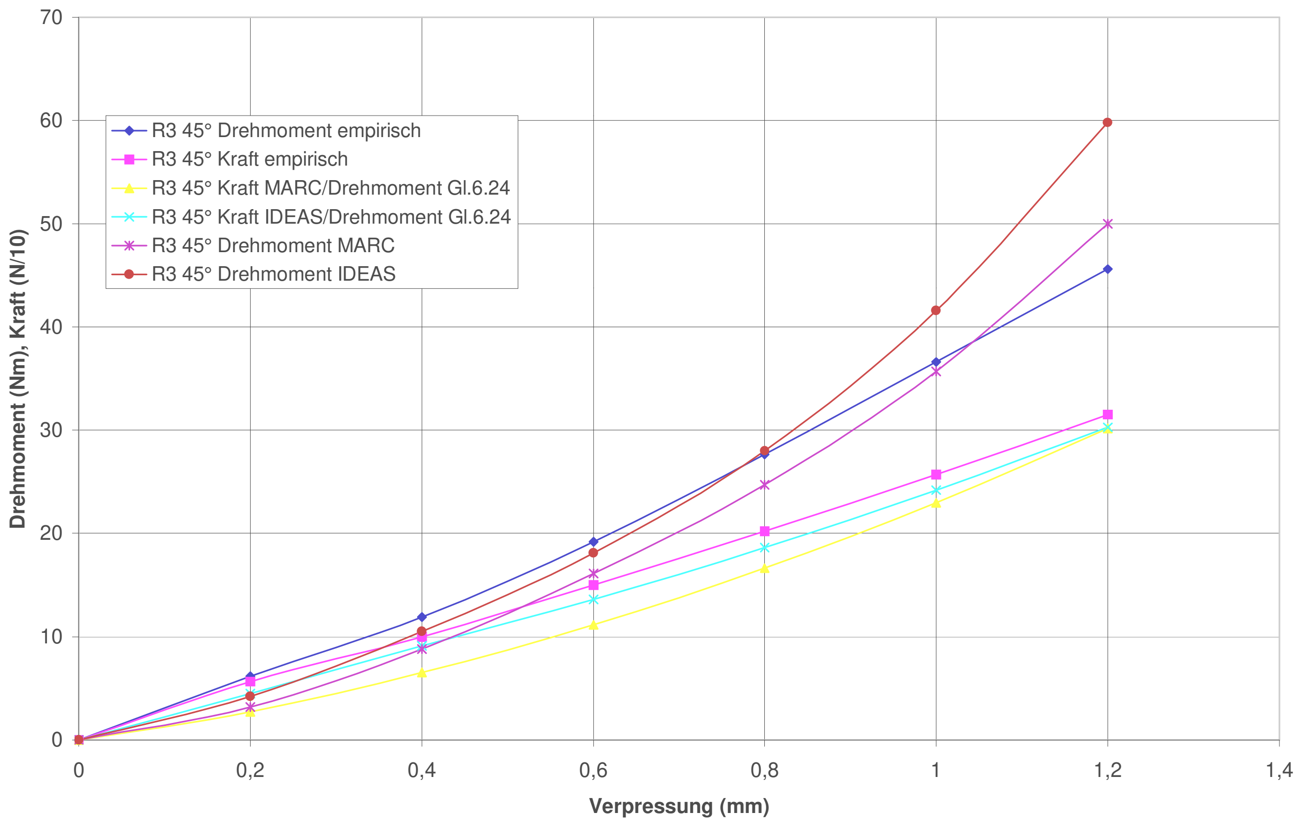


Abb.6.42. Vergleich der Versuchswerte und der FEM – Rechenergebnisse. Scheibe R3 45°, EPDM 70° Shore A, 6mm stark.

Wenn der Zeitaufwand für die Berechnung einer kompletten Kraft / Weg Kurve im Softwarepaket MARC als 1 angenommen wird, (an dem hier verwendeten Rechner ca. 30 min.) ergeben sich folgende Zeitfaktoren für die Berechnungen:

- komplette Kraft / Weg Kennlinie MARC	1
- ein Punkt aus der Kraft / Weg Kennlinie IDEAS	5
- komplette Kraft / Weg Kennlinie IDEAS	30
- Drehmomentberechnung eines Punktes MARC	4
- Drehmomentberechnung eines Punktes IDEAS	120

Der Aufbau des Drehmomentprüfstandes hat es ermöglicht, den Einfluß einzelner Faktoren auf das Drehmoment zu untersuchen. Die Drehmomentversuche haben große Unterschiede in den jeweiligen Kombinationen des Scheibenkonturen, Elastomerhärten, Elastomerdicken, etc., aufgezeigt.
Die Lösbarkeit der Simulation des Drehmomentversuches wurde mit guter Übereinstimmung mit dem Versuch aufgezeigt.

In der nächsten Abbildung (**Abb.6.43**) werden Dichtigkeitswerte aus dem Kapitel 5 mit den in diesem Kapitel mit FEM ermittelten Flächenpressungen verglichen. Die Werte der Flächenpressung, die aus dem Modell dieses Kapitels errechnet werden, entsprechen bis auf eine Abweichung von max. 27% den Werten aus dem Modell Kraft /Weg. Die Lage der FEM

– berechneten Kurvenscharen zueinander entspricht exakt der Lage der Kurven aus dem Versuch in Kapitel 5.

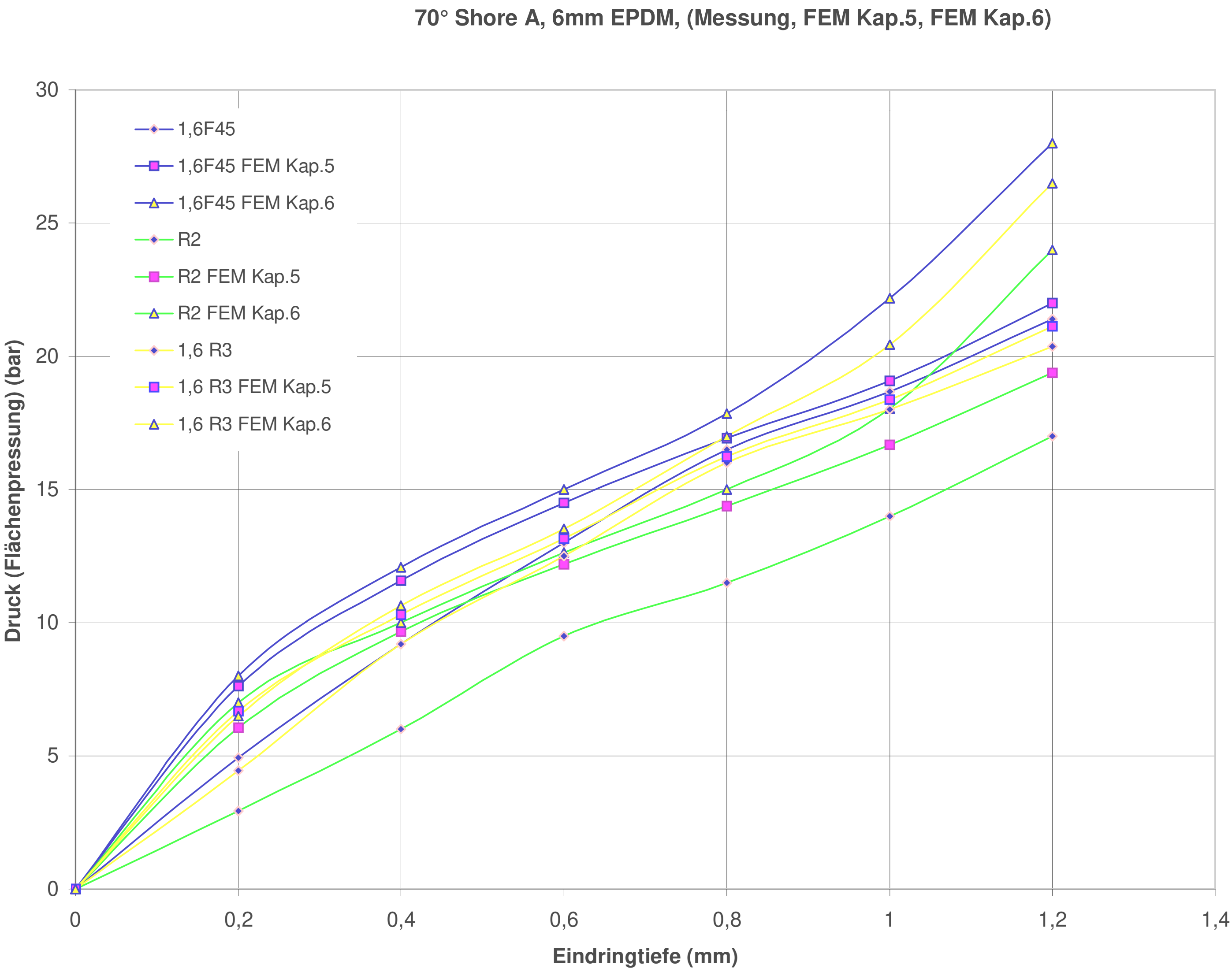


Abb.6.43. Vergleich der gemessenen Dichtigkeitswerte (Druck) aus Kapitel 5 mit den FEM – berechneten Flächenpressungen mit den Modellen aus Kapitel 5 und Kapitel 6. In gleicher Linienfarbe die Kurvenschar gleicher Scheibenkontur. Mit gleicher Markierung die Punkte der gleichen Berechnungs- oder Meßmethode.

Damit sind die Voraussetzungen geschaffen, um das Drehmoment an einer Absperrklappe zu optimieren. Im folgenden Kapitel soll anhand eines praktischen Beispieles aus der Serienfertigung von Absperrklappen der Ablauf einer solchen Optimierung aufgezeigt werden. Die in Kapitel 5 ermittelten Dichtigkeitswerte sollen mit den in diesem Kapitel gemessenen Drehmomentwerten für die gleiche Eindringtiefe verglichen werden, um eine optimale Kombination (Elastomerdicke, Härte, Scheibenkontur, etc.) zu ermitteln.