GUMETA AG

TECHNISCHE INFORMATION

TECHNISCHE INFORMATION

Isolierung von mechanischen Schwingungen und Körperschallwellen

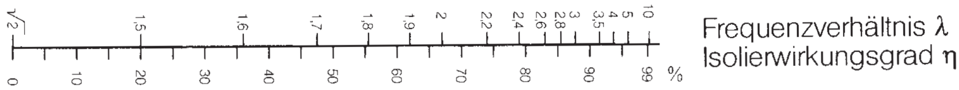
Für die Wahl der richtigen Antivibrations-Federelemente ist bei jedem Isolationsproblem grundsätzlich zu prüfen, um welche Ereignisse es sich handelt:

- Erzwungene Schwingungen, hervorgerufen durch zyklisch wechselnde Kräfte und Momente.
- Schlagartige Erregungen (Stöße), entstanden durch Impulse oder Erdbewegungen.
- Körperschall, verursacht durch alle Schallwellen, welche sich in festen Körpern ausbreiten.

Mechanische Schwingungen

Die Technik der Schwingungsisolation besteht darin, das störende Objekt (aktive Isolation) oder das zu schützende Objekt (passive Isolation) von der Umgebung zu trennen und durch Zwischenschaltung von Federn zu einem selbständigen, schwingungsfähigen System auszubilden.

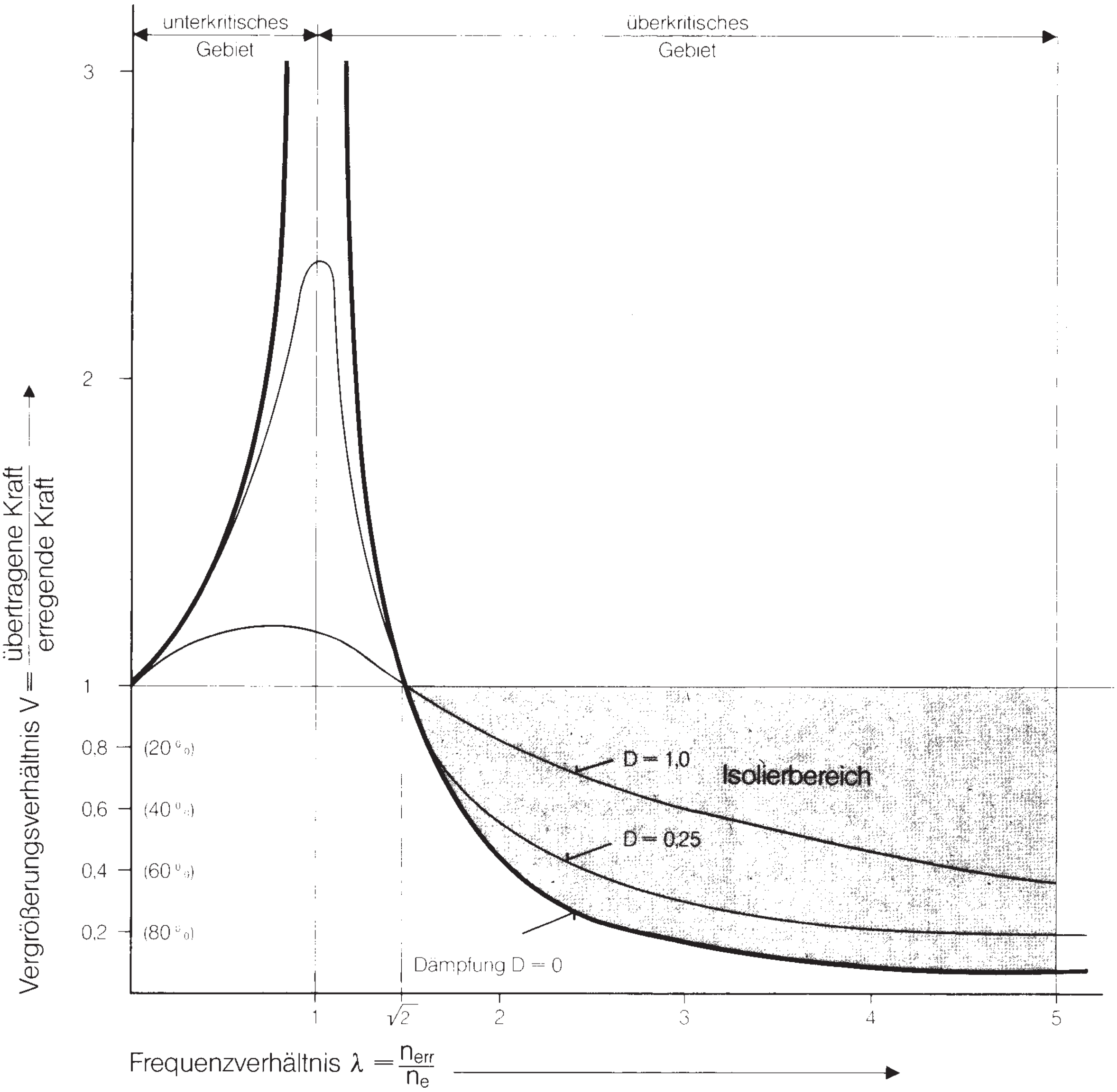
Der Mechanismus der Entstörung besteht darin, daß durch entsprechende Frequenzabstimmung die zyklischen Bewegungen des Systems nicht mehr synchron zur Störung erfolgen, sondern sich in Gegenphase zu ihr befinden.



Wenn also eine nach unten gerichtete Erregerkraft ihren Höchstwert erreicht hat, befindet sich das schwingende Objekt in der obersten Stellung, d. h., es bewegt sich entgegen der Erregerkraft. Eine wirkungsvolle Isolierung von Schwingungen wird somit durch ein hohes Frequenzverhältnis λ erreicht.

Prinzipiell sind bei der Auslegung einer elastischen Lagerung Werte der Eigenfrequenz zu wählen, die außerhalb des Resonanzfeldes liegen. Überall dort, wo eine Übereinstimmung zwischen Erregerfrequenz n_{err} und Eigenfrequenz n_e zutrifft, ist mit einer ungewünschten Aufschaukelung zu rechnen.

TECHNISCHE INFORMATION



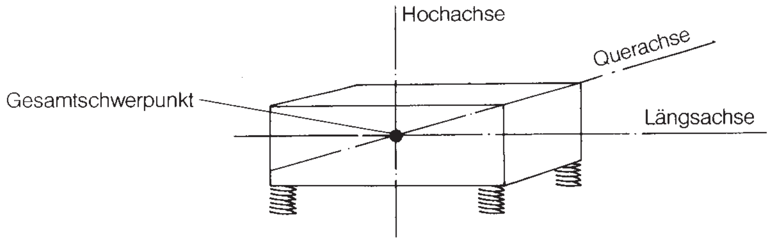
$\lambda < 1$ Keine Schwingungsisolation
Körperschalldämmung möglich

$\lambda = 1$ Aufschaukelung · Maximalwerte je nach Dämpfung D
innerhalb des Resonanzgebietes

$\lambda > \sqrt{2}$ Schwingungsisolation; Wirkungsgrad η abhängig von λ
Körperschalldämmung möglich

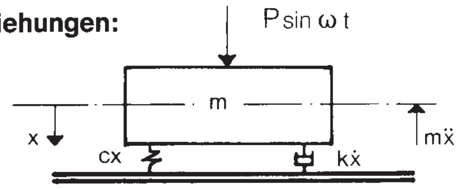
TECHNISCHE INFORMATION

Die wirksame Isolierung von Schwingungen wird also durch eine tiefe Frequenzabstimmung, d.h. durch ein hohes Frequenzverhältnis λ, erreicht Eine große Dämpfung D übt dabei einen hinderlichen Einfluß aus, indem sie die Isolationswirkung herabsetzt. Eine gewisse Dämpfung ist jedoch erwünscht, um Aufschaukelungen im Resonanzgebiet zu mindern oder rasches Ausschwingen bei Stößen zu bewirken.



Wird nun ein zu isolierendes Objekt künstlich vom Untergrund getrennt, so ist die Eigenfrequenz der elastischen Lagerung auf Werte zu bringen, die um den Faktor $\sqrt{2}$ tiefer liegen als die Erregerfrequenz. Dieses Frequenzverhältnis λ bewirkt, daß die Trägheitskraft des elastisch gelagerten Systems der erregenden Kraft phasenverschoben entgegenwirkt. Die so eintretende Isolierwirkung wird als Isolierwirkungsgrad η bezeichnet.

Wichtige Beziehungen:



$$m\ddot{x} + k\dot{x} + cx = P \sin \omega t$$

Darin sind:

	P	=	Amplitude der Erregerkraft [N]
	ω	=	Erregerkreisfrequenz [Rad/s]
	m	=	Elastisch gelagerte Masse [kg]
	k	=	Dämpfungskonstante [kg/s]
	c	=	Federkonstante [N/m]

Die Größen x, $\dot{x}$ und $\ddot{x}$ sind zeitabhängig und bezeichnen die Koordinate, die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Masse m. Dabei steht ein Punkt jeweils für eine – aus dem mathematischen Sprachgebrauch bekannte – Ableitung nach der Zeit.

Wichtige schwingungstechnische Begriffe sind außerdem:

$\omega_e = \sqrt{\frac{c}{m}}$ = Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems [Rad/s]

$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$ = Eigenfrequenz des ungedämpften Systems [Hz]

$n_e = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{c}{m}}$ = Eigenfrequenz des ungedämpften Systems (Drehzahl) [min^{-1}]

Bei bekannter Erregerdrehzahl n_{err} [min^{-1}] ergibt Division mit n_e das Frequenzverhältnis λ .

TECHNISCHE INFORMATION

Lineare Federn erlauben die Darstellung der Federsteifigkeit mit Hilfe der statischen Einfederung x_{st} und der Gewichtskraft G. Ist die Federrate unabhängig von der Frequenz, gilt: $c = G/x_{st} = mg/x_{st}$.

Aus $\omega_e^2 = c/m$ folgt damit für die Eigenkreisfrequenz: $\omega_e^2 = g/x_{st}$. Setzt man für die Erdbeschleunigung $g = 981\ cm/s^2$ ein, wird:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{981/x_{st}} \approx 5/\sqrt{x_{st}} \quad [Hz] \qquad x_{st}\ [cm]$$

$$n_e \approx 300/\sqrt{x_{st}} \quad [min^{-1}] \qquad x_{st}\ [cm]$$

Dämpfung:

Mit den x-Koeffizienten der Bewegungsgleichung kann die Dämpfung D dimensionslos angegeben werden:

$$D = \frac{k}{2\sqrt{cm}}$$

Sie läßt sich aber auch aus Messungen gewinnen oder überschlägig aus der Werkstoffelastizität nach DIN 53512 ermitteln:

$D \approx (100 - \text{Elastizität } [\%])/950$

Lösung der Bewegungsgleichung:

Der Ansatz: $x = x_p = A \sin(\omega t - \varphi)$ stellt eine partikuläre Lösung der Schwingungsgleichung dar. Sie wird zur Gesamtlösung, wenn der „Einschwingvorgang" abgeschlossen ist und das System nur noch im Takt der Erregerfrequenz ω schwingt. Dann ist die Schwingungsamplitude

$$A = \frac{P}{c} \frac{1}{\sqrt{(1-\lambda^2)^2 + (2D\lambda)^2}} = \frac{P}{c} \cdot V$$

V ist dimensionslos und wird als Vergrößerungsfunktion bezeichnet. Ihre Größe ist wesentlich vom Frequenzverhältnis λ abhängig.

Die zugehörige Phasenverschiebung φ (Nacheilwinkel der Schwingung gegenüber der Erregung) errechnet sich aus der Beziehung:

$$\tan \varphi = \frac{2D\lambda}{1-\lambda^2}$$

Schwingungsisolation:

Das Verhältnis von Schwingungsamplitude zu dem Quotienten aus P und c ist ein Maß für die „Durchlässigkeit" der Erregung und nach obiger Formel gleich der Vergrößerungsfunktion V. Die Schwingungsamplitude A ist also dem Betrage nach gleich der statischen Einfederung unter der konstanten Erregerkraftamplitude multipliziert mit dem Vergrößerungsverhältnis V.

Folgerichtig kann dazu der Isolationsgrad η als Differenzbetrag zu 100 % eingeführt werden:

$$\eta = [1 - V] \cdot 100\,\%$$

Für vernachlässigbare Dämpfung ist $\eta = 1 - \frac{1}{|1-\lambda^2|}$

TECHNISCHE INFORMATION

Körperschallwellen

Darunter versteht man alle Schallwellen, die sich in festen Körpern ausbreiten.

Erschütterungen:	Sind tieffrequente Körperschallschwingungen ($<$50 Hz), wie sie durch Fahrzeuge, Bauarbeiten oder Erdbeben verursacht werden.
Trittschall:	Diese Art von Körperschall entsteht zum Beispiel beim Begehen von Treppen, Podesten oder Decken.

Während die Isolation von Störkräften mit Hilfe der Schwingungstheorie errechnet werden kann, gehorcht die Körperschalldämmung den Gesetzen der Wellenmechanik und ist von verschiedenen Parameter abhängig. Dabei wird das Maß der Dämmung in Dezibel (dB) angegeben, da die Wirkung von den Schallhärten der aneinanderstoßenden Materialien (Reflexion) abhängt.

Schallhärte:	Die Schallhärte ist das Produkt aus Schallgeschwindigkeit x Dichte		
Schallhärte von	Stahl	=	$3{,}95 \cdot 10^7$ kg/m^{2}s
	Kork	=	$1{,}18 \cdot 10^5$ kg/m^{2}s
	Kautschuk	=	$6{,}62 \cdot 10^4$ kg/m^{2}s
	Luft	=	$4{,}45 \cdot 10^2$ kg/m^{2}s

Schallweichstes Material ist Luft, gefolgt von weichelastischen Kautschuken.
Kautschuk-Metallverbindungen sind somit vortreffliche Kombinationen von schallharten und schallweichen Materialien. Bei der Wahl der geeigneten Qualität (Dichte, E-Modul) und der richtigen Schichtstärke ist aufgrund der Reflexionsverluste eine sehr hohe Dämmwirkung über den ganzen Frequenzbereich gegeben.

Berechnungsbeispiel einer elastischen Lagerung

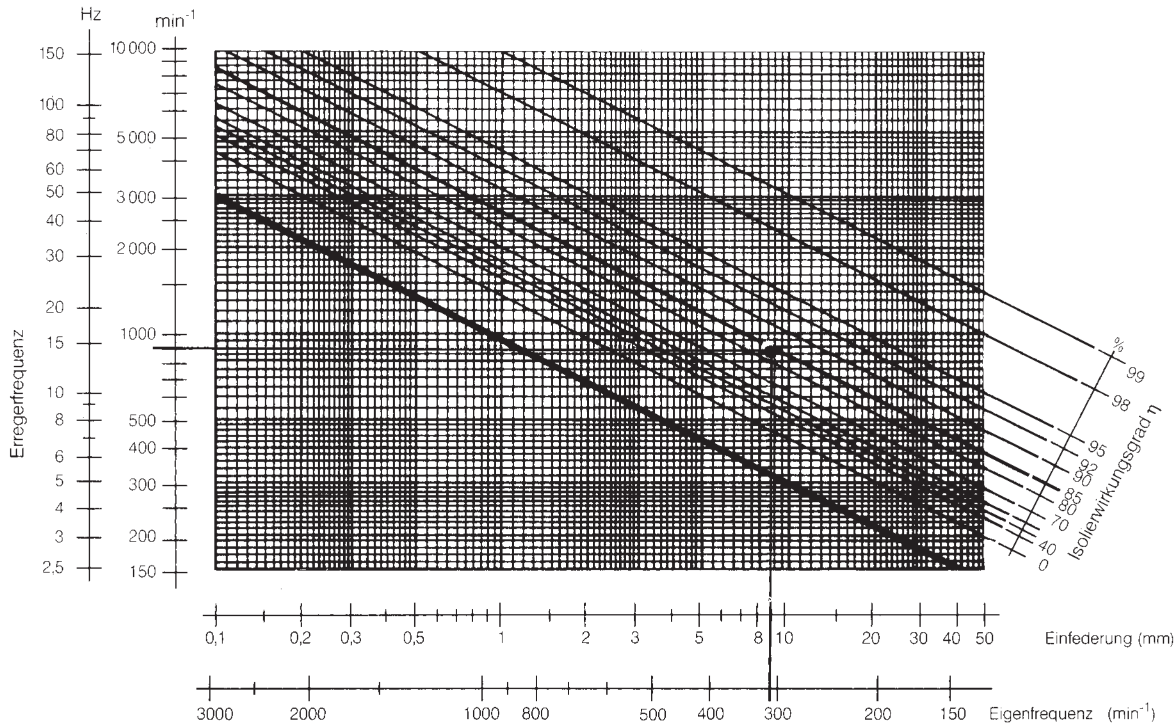
Ein Kompressor ist schwingungsisoliert zu lagern.

Technische Daten:

Totalgewicht	12 kN
Drehzahl des Motors	1440 min^{-1}
Drehzahl des Kompressors	900 min^{-1}
Freie Massenkräfte	keine
Anzahl Lagerpunkte	6
Gesamtschwerpunkt symmetrisch zu den Lagerpunkten	
Isolierwirkungsgrad η	85 %

Lösung:

Belastung pro Federelement	$\frac{12\ kN}{6} =$	2 kN
Erforderliches Frequenzverhältnis	λ für $\eta = 85\,\%$	2,75
Erforderliche Eigenfrequenz	$\frac{900,}{2,75} =$	317 min^{-1}



Die nötige Einfederung von 8,4 mm wird aus obigem Nomogramm gelesen.

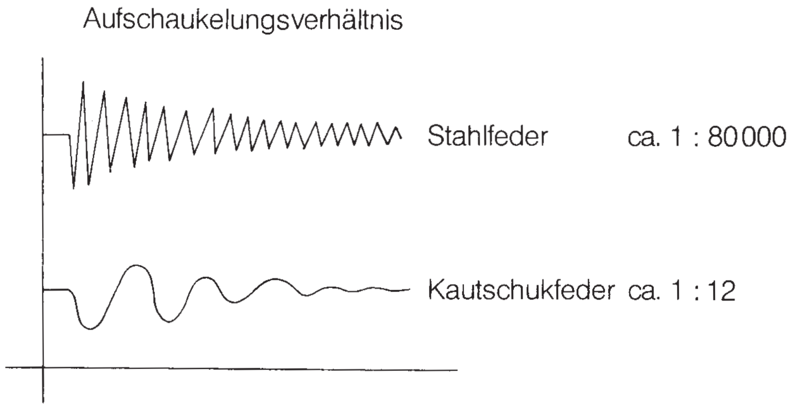
Benötigt werden nun Federelemente, die bei 2 kN eine Einfederung von 8,4 mm aufweisen.

TECHNISCHE INFORMATION

Der Einfluß der Dämpfung

Die Schwingungsisolation hat nichts, wie irrtümlicherweise immer wieder angenommen wird, mit Dämpfung zu tun. Eine wirkungsvolle Isolation wird allein durch entsprechende Frequenzabstimmung erreicht.

Dämpfung ist überall dort zu fordern, wo sich Resonanz ergeben kann oder Stöße rasch ausklingen müssen.



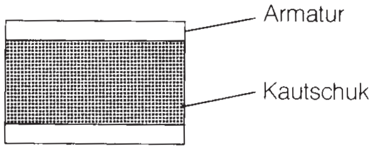
Die Kautschukdämpfung, wie sie sich aufgrund experimenteller Ergebnisse erkennen läßt, unterscheidet sich wesentlich von derjenigen der viskosen Dämpfung. Im Frequenzbereich von 10 bis 200 Hz ist die Fläche der Kraft-Weg-Diagramme (Dämpfungsellipsen) konstant und unabhängig von der Anregungsfrequenz. Die Amplitude der Dämpfungskraft ist proportional zur Rückstellkraftamplitude der Kautschukfeder, wobei eben der Proportionalitätsfaktor eine frequenzunabhängige Materialkonstante darstellt. Der Dämpfungsfaktor selbst ist bei Kautschuk frequenzabhängig und strebt mit zunehmender Frequenz gegen Null.

Das bedeutet, daß bei kleinen Bewegungen die Kautschuk-Dämpfungskräfte vernachlässigbar klein sind und die Isolationswirkung kaum beeinflussen.

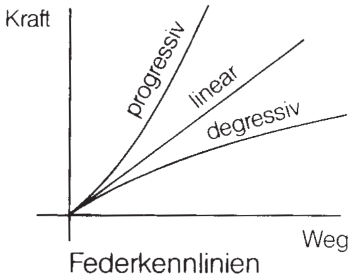
Demgegenüber nimmt die Dämpfungskraft bei viskoser Dämpfung und wachsender Frequenz zu, was zu einer Verschlechterung der Isolationswirkung führt.

Gebundene Kautschukfedern

Kautschukfedern sind schwingungs- und schallmäßig einzigartige Antivibrationselemente. Speziell die Vulkanisate von GMT haben sich in der Praxis dort bewährt, wo andere Elemente längst versagen.



Gebundene Feder



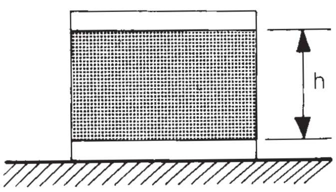
Federkennlinien

Die sorgfältig vulkanisierten Federelemente weisen Haftwerte zwischen Armatur und Kautschuk von 1,3 kN/cm² auf. Zudem ist GMT heute in der Lage, verschiedenste Armaturen an Kautschuk zu binden, wie:

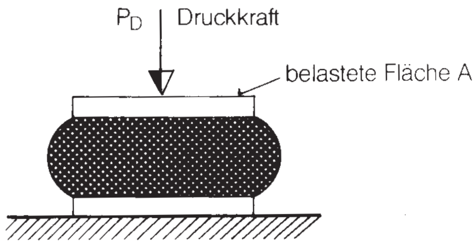
- Stahl, roh oder veredelt
- Stahl, rostfrei
- Messing, Aluminium
- Kunststoffe

Statische Beanspruchungen an Kautschukfedern

DRUCK



unbelastet



belastet

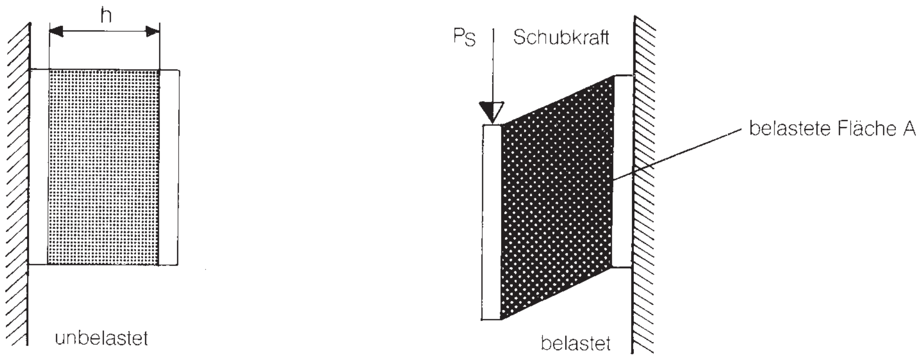
Bei jeder Auslegung einer Kautschukfeder für den Druckbereich ist der Einfluß des Formfaktors zu berücksichtigen. Unter dem Formfaktor versteht man das Verhältnis von Aktionsdruckfläche zur freien Ausdruckfläche des Kautschuks. Dies rührt von der verhinderten Querdehnung und somit des variablen Elastizitätsmoduls E_C des inkompressiblen Werkstoffes Kautschuk her.

TECHNISCHE INFORMATION

Druckverformung $f_D = \frac{P_D \cdot h}{A \cdot E_C}$ Gültigkeitsbereich bis $f_D \simeq 0{,}2\ h$

SCHUB

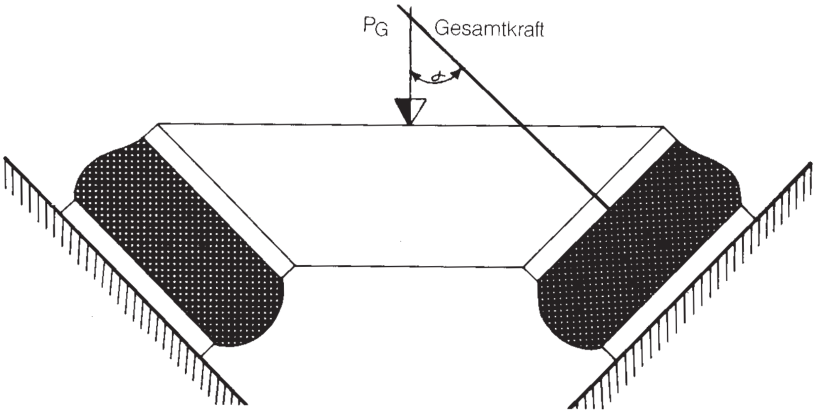
Der Schubmodul G stellt die einzige Materialkonstante von Kautschuk dar und liegt in Abhängigkeit von der Shore-Härte für jede Mischung fest. Somit ist auch die Federkennlinie bei Parallelschub linear. Erfolgen Schubverformungen bei größeren Druckvorspannungen, ist dieser Einfluß speziell zu berücksichtigen.



Schubverformung $f_S = \frac{P_S \cdot h}{A \cdot G}$ Gültigkeitsbereich bis $f_S \simeq 0{,}35\ h$

DRUCK-SCHUB

Vielfach werden Antivibrationselemente unter Schrägstellung eingebaut. Sind die Elemente mit einer Brücke verbunden, so bringt diese Art einer elastischen Lagerung gute Standfestigkeit bei entsprechender Weichheit in vertikaler Richtung mit sich.



Gesamtverformung $f_G = \dfrac{P_G \cdot h}{2 \cdot A\,(G \sin^2\alpha + E_C \cos^2 \alpha)}$

ZUG

Werden Kautschuk-Metallverbindungen auf reinen Zug beansprucht, treten Spitzenspannungen an den Hafträndern auf. Dadurch kann bei oxydierten Teilen aufgrund der Kerbempfindlichkeit des Kautschukes die Funktionstüchtigkeit zerstört werden. Zugbeanspruchungen sind deshalb zu unterlassen.

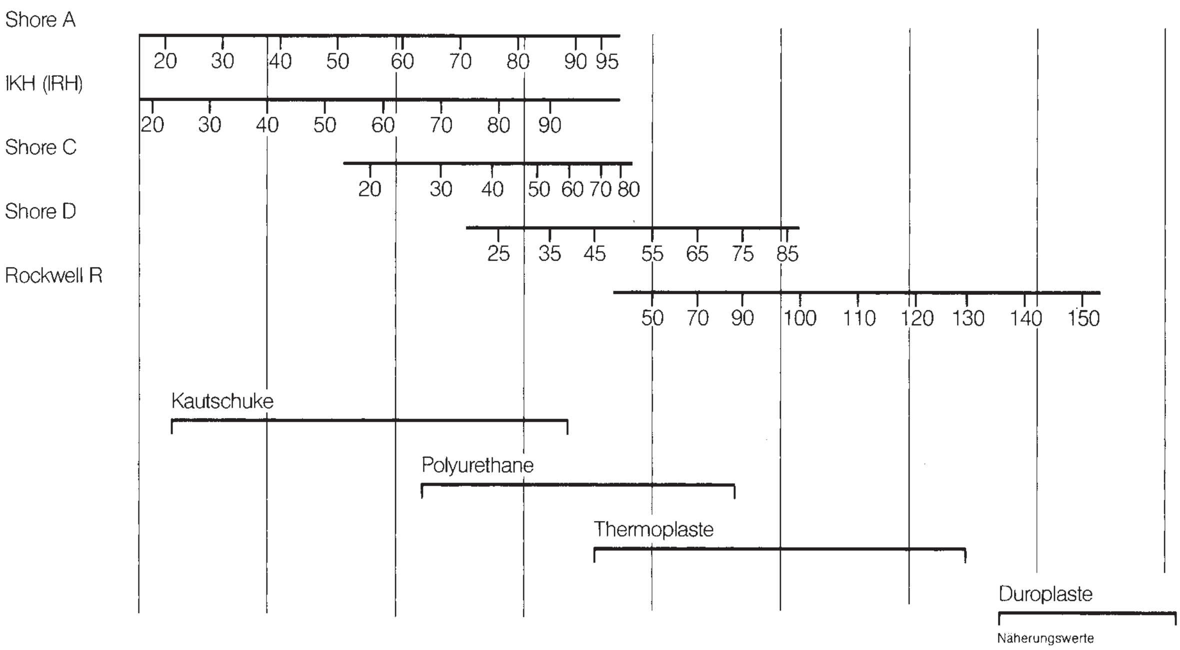
Dynamische Beanspruchung an Kautschukfedern

Das nichtlineare Einfederungsgesetz von Kautschuk kommt bei dynamischer Beanspruchung im Falle von Schwingungen nur bedingt, hingegen bei großen Arbeitsaufnahmen ganz erheblich zur Geltung.

Bei der Lösung entsprechend komplexer Probleme dynamischer Richtung stehen unsere Fachleute zur Verfügung. Ferner können auch spezifisch geforderte Werte in konzerneigenen Labors gemessen oder überprüft werden.

Für die einfacheren statischen Berechnungen sind die Werte für den Schubmodul G und den korrigierten Elastizitätsmodul E_C aus nachstehenden Kurven ersichtlich.

Die Härte
Die gebräuchliche Meßmethode für Kautschuk ist die Messung nach DIN 53 505 und wird in Shore A (C und D) ausgedrückt. Dabei wird der Widerstand gegen das Eindringen eines Kegels gemessen.



	weich	40° Shore A
Unsere Lagerqualitäten	mittel	55° Shore A
	hart	70° Shore A

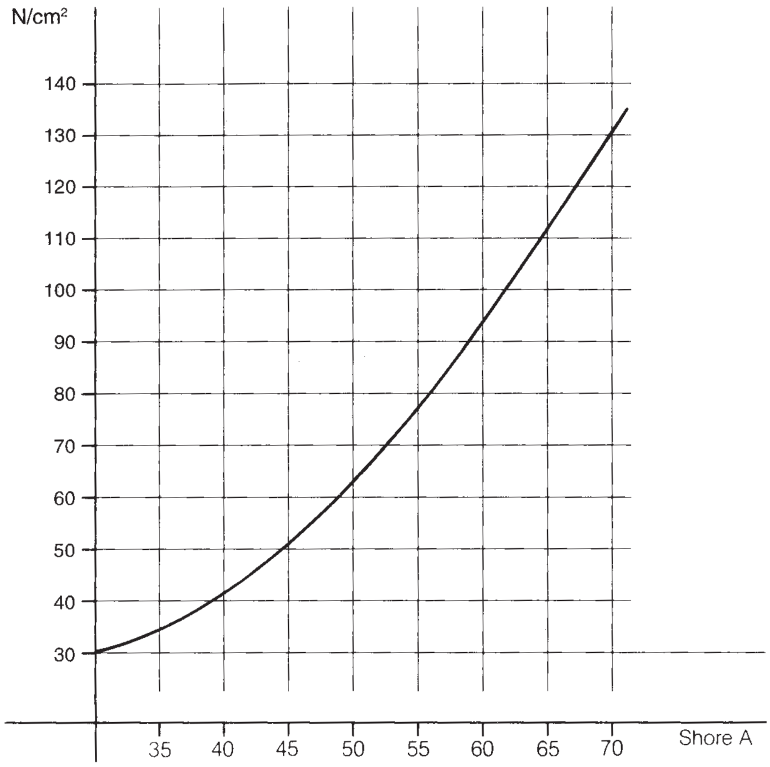
GMT	– Fertigungstoleranz	± 5 Shore A
	– Härtebereich	15°-95° Shore A

Härtekorrekturfaktor

Abweichung in ° Shore A	Korrekturfaktor
1	1,038
2	1,087
3	1,118
4	1,161
5	1,205
6	1,251
7	1,298
8	1,348
9	1,399
10	1,458

TECHNISCHE INFORMATION

Der Schubmodul G



Der Elastizitätsmodul E_C