

Wichtige Kenngrößen von Kraftaufnehmern

Thomas Kleckers
HBM GmbH, Im Tiefen See 45, 64293 Darmstadt
E-Mail: thomas.kleckers@hbm.com

Wie funktioniert ein Kraftaufnehmer auf Basis von Dehnungsmessstreifen?

Kraftaufnehmer auf Basis von Dehnungsmessstreifen verfügen über einen so genannten Federkörper oder Verformungskörper, in den die zu messenden Kräfte eingeleitet werden.

Dabei verformt sich der Federkörper und an der Oberfläche entstehen Dehnungen. Die Aufgabe des Federkörpers besteht also darin, die zu messenden Kräfte möglichst wiederholbar und linear in Dehnungen umzuwandeln. Mit der Auswahl von Material und Design eines Federkörpers legt man viele Eigenschaften eines Kraftaufnehmers fest.

Das eigentliche Sensorelement ist der Dehnungsmessstreifen (DMS). DMS bestehen aus einer Isolierschicht, dem so genannten Träger, auf dem ein Messgitter angebracht ist. Solche Dehnungsmessstreifen werden an geeigneter Stelle auf den Federkörper geklebt. Dabei werden in der Regel vier DMS verwendet, von denen zwei so installiert werden, dass sie unter Einwirkung einer Kraft gedehnt werden, die zwei anderen werden gestaucht.

Diese vier DMS werden in der Wheatstoneschen Brückenschaltung verschaltet. Wie in der Zeichnung unten gezeigt, wird die Wheatstone-Brücke mit einer Speisespannung versorgt. Eine Ausgangsspannung entsteht immer dann, wenn sich die vier Widerstände in unterschiedlicher Richtung ändern, das heißt wenn zwei gestaucht und zwei gedehnt werden. Dies ist z. B. der Fall, wenn Dehnung in die DMS eingeleitet wird. Dabei müssen gegenüberliegende DMS gleichbelastet werden. Ändert sich der Widerstand aller DMS in gleicher Richtung und mit gleichem Betrag, so wird kein Ausgangssignal erzeugt.

Es gilt:

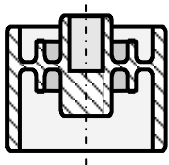
$$\frac{U_a}{U_0} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4)$$

U_a = Ausgangsspannung

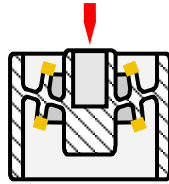
U_0 = Versorgungsspannung

K = k-Faktor der DMS (Dehnungsempfindlichkeit)

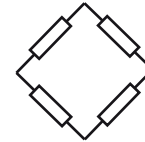
ε = Dehnung an den DMS



Federkörper



Die zu messende Kraft bewirkt Verformungen des Federkörpers. Dehnungsmessstreifen wandeln die Dehnungen in Widerstandsänderungen um.



Mit Hilfe der Wheatstone-Brücke können kleinste Widerstandsänderungen als elektrische Spannungen gemessen werden.

Arbeitsweise eines Kraftaufnehmers auf Basis von Dehnungsmessstreifen am Beispiel eines Ringtorsionsaufnehmers (Type: C18).

Das Ausgangssignal hängt von der Größe der Widerstandsänderung der DMS ab. Da die Dehnung proportional von der eingeleiteten Kraft abhängt und die Widerstandsänderung der DMS linear von der anliegenden Dehnung abhängt, ist auch das Ausgangssignal linear mit der zu messenden Kraft verbunden.

Dieses Prinzip hat sich millionenfach bewährt und bietet zahlreiche Vorzüge. Die wichtigsten im Überblick:

- Ändern sich die elektrischen Widerstände der DMS in gleicher Richtung mit gleichem Betrag, so wird keine Ausgangsspannung erzeugt. Somit können viele parasitäre Einflüsse, wie z. B. Temperaturabhängigkeit des Nullpunktes, Biegemomenteinflüsse oder Querkrafteinflüsse kompensiert werden (siehe unten).
- Das Messprinzip erlaubt die Herstellung von Kraftaufnehmern mit sehr hohen Genauigkeiten bei vergleichsweise geringen Kosten.
- Die Nennkraft des Aufnehmers wird nur durch die Steifigkeit des Federkörpers bestimmt. Bei HBM stehen Aufnehmer mit Nennkräften zwischen 10 N und 5 MN zur Verfügung.

1. Allgemeine Kenngrößen

Nennkraft (F_{nom})

Die Nennkraft beschreibt, bei welcher Kraft der Aufnehmer zu 100 % belastet ist. Innerhalb dieses Kraftbereiches werden alle Spezifikationen des Aufnehmers eingehalten. Beachten Sie bitte, dass auch Taralasten, die z. B. durch das Eigengewicht von Anbauteilen entstehen können, eingerechnet werden müssen und einen Teil der Nennkraft aufbrauchen. Bei dynamischer Belastung ist die Schwingbreite der Aufnehmer zu beachten.

Kennwert (c)

Der Kennwert gibt an, welches Ausgangssignal in mV/V entsteht, wenn der Aufnehmer mit 100 %, also mit Nennkraft belastet wird. Dabei wird ein eventuelles Nullsignal abgezogen. Beispiel: Ein Aufnehmer zeigt ein Nullsignal von -0,1 mV/V. Der Kennwert ist 2 mV/V, dann liegt bei Nennkraft ein Ausgangssignal von 1,9 mV/V an.

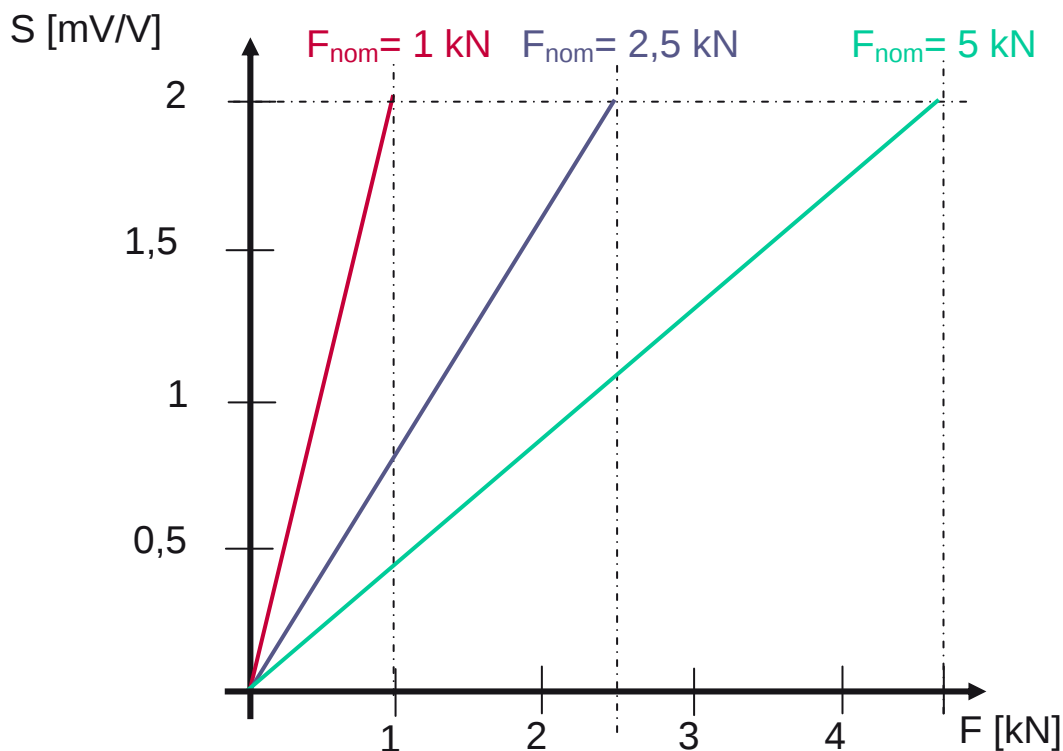
2 mV/V ist ein sehr übliches Ausgangssignal für Kraftaufnehmer. Wie oben beschrieben sind Kraftaufnehmer auf Basis von DMS auf eine Spannungsversorgung angewiesen, die von den Messverstärkern zur Verfügung gestellt wird (Speisespannung). Ein Kennwert von 2 mV/V bedeutet, dass ein Kraftaufnehmer bei Nennkraft ein Ausgangssignal von 2 mV erzeugt, wenn er mit einem Volt gespeist wird. Bei einer Speisung mit 5 V liegen entsprechend 10 mV am Ausgang an.

Die Ausgangsspannung eines Kraftaufnehmers lässt sich berechnen durch:

$$U = U_0 \cdot C \cdot \frac{F}{F_{nom}}$$

Dabei ist U die Ausgangsspannung, U_0 die Speisespannung, C der Kennwert, F die wirkende Kraft und F_{nom} die Nennkraft des Aufnehmers. In dieser Formel ist das Nullsignal als ideal null vorausgesetzt.

Genauso verhält sich der Aufnehmer auch, wenn sich die Kraft ändert, d. h. der Aufnehmer im Beispiel mit halber Nennkraft belastet wird, sodass 1 mV/V am Ausgang anliegt. Bei einer Speisung von 5 V entspricht dies 5 mV.



Die Kennlinien von drei verschiedenen Kraftaufnehmern mit einem Kennwert von 2 mV/V, aber unterschiedlichen Nennkräften. Je kleiner die Nennkraft, desto steiler ist die Kennlinie im Diagramm, der Kraftaufnehmer ist dann empfindlicher.

In den technischen Datenblättern ist ein Nennkennwert angegeben. Dieser Kennwert gilt für alle Kraftaufnehmer eines Typs und ist deshalb mit einer Toleranz versehen, der sogenannten „Kennwerttoleranz“.

Aus diesem Grund liegt jedem HBM-Kraftaufnehmer ein Prüfprotokoll bei, das den exakten Kennwert für den entsprechenden Aufnehmer aufweist.

Tipp: Stellen Sie den Messverstärker immer nach den Angaben des Prüfprotokolls oder einer vorhandenen Kalibrierung ein, um die optimale Messgenauigkeit zu erreichen. Die Kennwerttoleranz hat in diesem Fall keinen Einfluss auf die Fehlerberechnung.

Es ist auch möglich, den Aufnehmer mit so genannten TEDS zu bestellen. Hierbei wird ein kleiner Chip in den Aufnehmer oder das Kabel eingebaut, in dem die exakten Angaben des Prüfprotokolls gespeichert sind. Geeignete Messverstärker können dies auslesen und stellen sich entsprechend automatisch ein.

Relativer Kennwertunterschied Zug/Druck (d_c)

Kraftaufnehmer, die für Zug- und Druckbelastung einsetzbar sind, weisen oft aus mechanischen Gründen einen kleinen Unterschied der Kennlinie auf, je nachdem, ob sie im Bereich der Zug- oder der Druckkräfte zum Einsatz kommen.

Der maximale Unterschied wird mit dieser Kenngröße beschrieben.

Nullsignal

Das Nullsignal ist das Ausgangssignal des Kraftaufnehmers im nicht montierten Zustand. Wenn Sie den Kraftaufnehmer montieren, ändert sich das Signal durch Vorspannungen und Massen der Anbauteile.

2. Mechanische Kenngrößen

Nennmessweg (s_{nom})

Unter Einwirkung der zu messenden Kraft verformt sich der Kraftaufnehmer entsprechend. Der Nennmessweg gibt an, wie groß diese Verformung bei Nennkraft ist. Er ist eine wichtige Kenngröße, weil er zusammen mit der Nennkraft die Steifigkeit eines Aufnehmers bestimmt. Entscheidend für die Resonanzfrequenz des Kraftaufnehmers ist die Steifigkeit. Physikalisch ist es durchaus zulässig, einen Kraftaufnehmer mit einer sehr steifen Feder zu vergleichen.

Steifigkeit (c_{ax})

Die Steifigkeit eines Aufnehmers berechnet sich durch die Nennkraft F_{nom} und den Nennmessweg s_{nom} .

$$c_{ax} = \frac{F_{nom}}{s_{nom}}$$

Die Steifigkeit ist vorwiegend durch das Konstruktionsprinzip des Aufnehmers und seiner Nennkraft gegeben. Sie entspricht physikalisch einer Federkonstante. Die Steifigkeit ist entscheidend bei der Berechnung der Resonanzfrequenz eines Kraftaufnehmers.

Grundresonanzfrequenz (f_g)

Wie jedes System aus Masse und Feder weisen auch Kraftaufnehmer eine Resonanzfrequenz auf. Diese lässt sich berechnen durch:

$$f_g = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_{ax}}{m}}$$

m ist hierbei die Masse, die schwingt, nicht zu verwechseln mit der Masse des Aufnehmers. Die Resonanzfrequenz in den technischen Daten berücksichtigt nur den Kraftaufnehmer und nicht die notwendigen Einbauteile. Die relevante Resonanzfrequenz des gesamten Aufbaus ändert sich natürlich, wenn zusätzliche Massen an den Aufnehmer montiert werden. Deshalb ist diese Angabe ein Richtwert. Für die dynamische Auslegung eines Aufbaus ist immer die Beachtung der Einbausituation erforderlich.

3. Kenngrößen hinsichtlich der auf den Kraftaufnehmer wirkenden Kräfte

(Relative) maximale Gebrauchskraft (F_g)

Die maximale Gebrauchskraft wird entweder absolut in N oder relativ zu Nennkraft F_{nom} in % angegeben. Bis zur maximalen Gebrauchskraft nimmt der Kraftaufnehmer keinen Schaden, wenn der

Kraftaufnehmer nicht mehrfach innerhalb dieses Bereiches benutzt wird. Es besteht ein wiederholbarer Zusammenhang zwischen dem Ausgangssignal und der angelegten Kraft, d. h. der Fehler der Messung steigt an, jedoch kann die Kraft noch abgeschätzt werden.

Kraftaufnehmer sollen so dimensioniert sein, dass die maximale Gebrauchskraft nicht benutzt wird.

(Relative) Grenzkraft (F_L)

Wie auch bei der Gebrauchskraft ist eine relative Angabe auf Basis der Nennkraft in % oder die absolute Gebrauchskraft in N üblich.

Wird der Aufnehmer oberhalb seiner Grenzkraft belastet, so ist damit zu rechnen, dass der Aufnehmer nicht mehr messfähig ist.

Oft ist der Kraftaufnehmer nach einer Überschreitung der Grenzkraft plastisch verformt, und es lässt sich eine deutliche Veränderung des Nullpunktes feststellen. Der Kraftaufnehmer darf dann nicht mehr eingesetzt werden und ist auszutauschen, da sich die technischen Daten des Kraftaufnehmers wesentlich geändert haben. Insbesondere besteht die Gefahr, dass die mechanischen Grenzwerte wie Bruchkraft und dynamische Schwingbreite geringer sind.

(Relative) Bruchkraft (F_B)

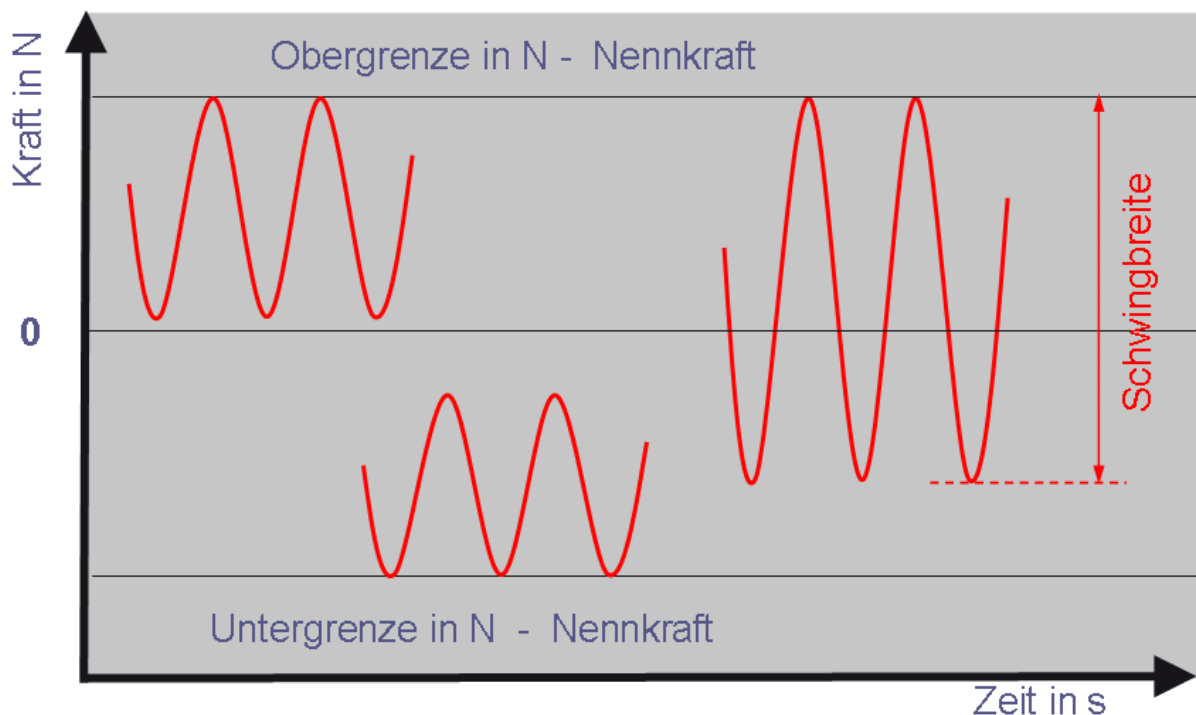
Die Angabe erfolgt absolut oder in %. Dem Namen der Kenngröße entsprechend ist ein Bruch des Aufnehmers möglich.

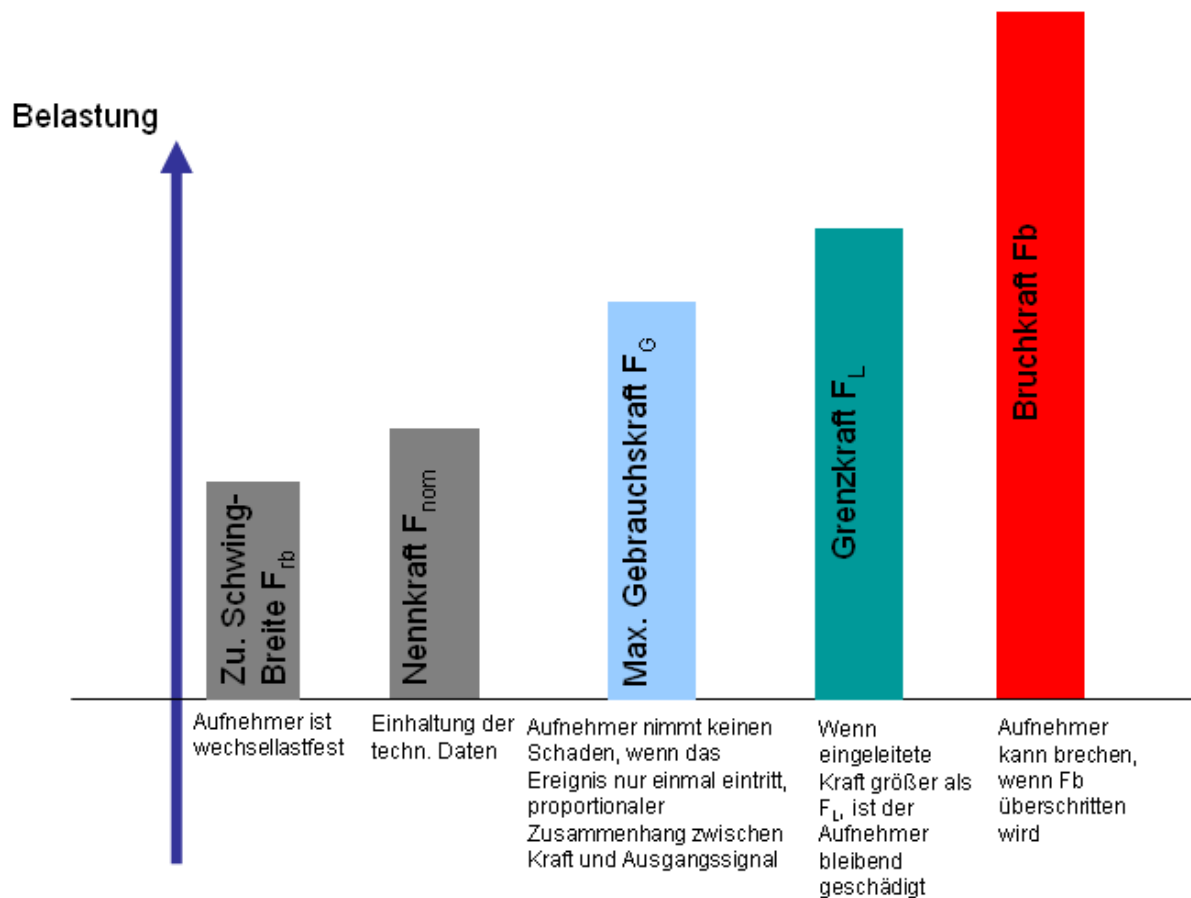
Tipp: Bitte beachten Sie hierzu die Sicherheitshinweise in der Montageanleitung der Kraftaufnehmer.

(Relative) zulässige Schwingbeanspruchung (F_{rb})

Die relative zulässige Schwingbeanspruchung gibt an, bis zu welcher Belastung der Kraftaufnehmer dauerhaft ist. Üblicherweise wird dieser Wert als relative Größe mit Basis zur Nennkraft angegeben. Die zulässige Schwingbeanspruchung wird grundsätzlich als Spitze – Spitze-Wert angegeben, d. h. die Differenz zwischen der höchsten und der niedrigsten Kraft. Kraftaufnehmer dürfen mit dieser Amplitude sowohl schwellend als auch alternierend belastet werden.

Beispiel: Ein Kraftaufnehmer für Zug- und Druckbelastung weist eine Nennkraft von 200 kN auf, die zulässige Schwingbreite ist 100 %. In diesem Fall darf der Aufnehmer zwischen 0 und 200 kN, aber auch zwischen -100 kN und 100 kN belastet werden.





4. Elektrische Angaben

Eingangswiderstand (R_E)

Der Eingangswiderstand ist der Widerstand, der an den Anschlüssen des Kraftaufnehmers gemessen werden kann, an denen die Speisung angeschlossen wird. Da die Wheatstonesche Brückenschaltung mit weiteren Widerständen versehen wird, die dem Abgleich des Kraftaufnehmers dienen, können die Werte für Eingangs- und Ausgangswiderstand unterschiedlich sein.

Wenn Sie Kraftaufnehmer parallel schalten, beachten Sie bitte, dass der Widerstand der Gesamtschaltung sinkt. Dieser Gesamtwiderstand darf die in der Bedienungsanleitung des Messverstärkers angegebene Grenze nicht unterschreiten.

Ausgangswiderstand (R_A)

Hier ist der Widerstand angegeben, der an den Leitungen anliegt, die an den Messverstärkereingang angeschlossen werden. Bei Parallelschaltung soll die Toleranz des Ausgangswiderstandes 10 Ohm nicht überschreiten, da sonst Querströme das Messergebnis beeinflussen können.

Gebrauchsbereich der Speisespannung ($B_{U,GT}$)

Die Speisespannung ist die Versorgungsspannung des Kraftaufnehmers und im Allgemeinen wird ein Bereich angegeben. Wichtig ist die maximale Speisespannung nicht zu überschreiten, da sonst die zulässige elektrische Spannung an den DMS überschritten wird. Die Folge ist, dass die elektrische Leistung zu groß wird, und sich der Dehnungsmessstreifen deshalb zu stark erwärmt. Dies führt nun wieder zu einer Änderung des Nullpunktes (Temperatureinfluss auf den Nullpunkt) und zu einer Änderung der Empfindlichkeit (Temperatureinfluss auf den Kennwert).

Referenzspeisespannung (U_{ref})

Alle Messungen zur Ermittlung der Kenndaten werden mit der Referenzspeisespannung durchgeführt.

Isolationswiderstand (R_{iso})

Der Widerstand zwischen einer beliebigen Anschlussleitung und dem Federkörper ist der Isolationswiderstand. Der Isolationswiderstand muss dem im Datenblatt angegebenen Wert bei Raumtemperatur entsprechen, andernfalls ist der Aufnehmer auszutauschen, da die Kenndaten sonst nicht mehr stimmen.

5. Temperaturangaben

Nenntemperaturbereich ($B_{\text{t,nom}}$)

Innerhalb des Nenntemperaturbereiches erfüllt der Kraftaufnehmer die in den technischen Daten angegebenen Werte.

Gebrauchstemperaturbereich ($B_{\text{t,G}}$)

Innerhalb des Gebrauchstemperaturbereiches sind Messungen mit dem Kraftaufnehmer möglich, jedoch ist die Genauigkeit der Messung eingeschränkt.

Lagertemperaturbereich ($B_{\text{t,s}}$)

Der Kraftaufnehmer kann dieser Temperatur ausgesetzt werden, jedoch darf er nicht zu Messungen eingesetzt werden.

Referenztemperatur (t_{ref})

Alle Messwerte, die nicht temperaturabhängig sind, wie z. B. relative Umkehrspanne, Schwingbreite usw., werden bei der angegebenen Referenztemperatur ermittelt.

6. Angaben zur Messgenauigkeit

Linearität (d_{lin})

Die Linearität beschreibt die größtmögliche Abweichung der realen Kennlinie von der idealen Gerade. Die Angabe erfolgt in Prozent relativ zur Nennkraft.

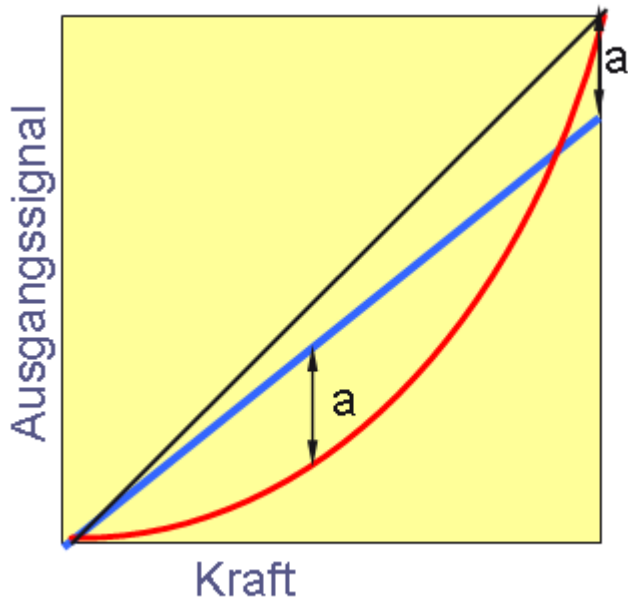
Bei Referenzkraftaufnehmern (U15, Top Class Aufnehmer, ...) mit allerhöchsten Genauigkeiten wird oft kein Linearitätsfehler angegeben, da hier nicht mit einem Kennwert, sondern mit einem Polynom oder mit Stützstellen gearbeitet wird. In diesem Fall wird die so genannte Interpolationsabweichung angegeben, also die maximale Abweichung von der gefitteten Kurve.

Außerdem gilt bei Referenzkraftaufnehmern, dass angegeben wird, welche Messgenauigkeit der Kraftaufnehmer bei einer Kalibrierung mindestens erreichen wird. Da hierzu die Vorgaben der internationalen Richtlinie ISO376 herangezogen werden, ist die Angabe bei HBM in den technischen Datenblättern entsprechend. Das heißt, dass sich die Angabe zur Linearität auf den Ist-Wert bezieht, also relativ zum Messwert ist.

Kraftaufnehmer für den Einsatz im industriellen Bereich oder zur experimentellen Mechanik richten sich nach der VDI/VDE 2638. Hierbei ist die Linearität auf die Nennkraft bezogen.

Beispiel:

Ein Kraftaufnehmer weist bei 20 % der Nennkraft (1000 N) eine Linearitätsabweichung von 0,2 N auf. Relativ zum Endwert ist damit die Linearitätsabweichung 0,02 %. Relativ zum Ist-Wert ist die Abweichung auf Basis von 200 N zu berechnen und liegt bei 0,1 %. Dies ist der fünffache Wert.



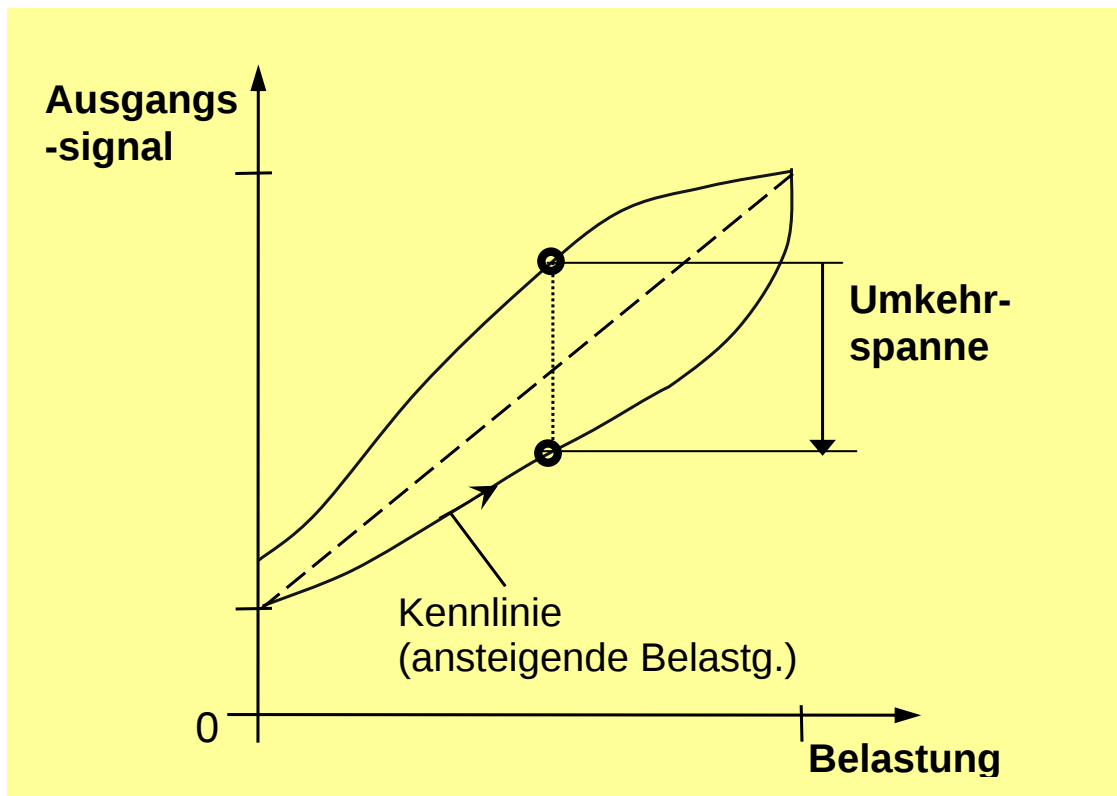
Zur Linearität: Die blaue Linie ist die ideale Gerade, die rote Linie ist die tatsächliche Kennlinie. „a“ ist die Abweichung. Für das Datenblatt wird „a“ relativ zur Nennkraft angegeben.

Der Linearitätsfehler lässt sich in der Praxis sehr stark einschränken, wenn der Kalibrierbereich des Aufnehmers geschickt gewählt wird. Wird ein Kraftaufnehmer mit einer Nennkraft von 100 kN z. B. bei 50 kN genutzt, so kann die Kalibrierung in diesem Bereich erfolgen. Hierdurch halbiert sich der Fehler, da der Linearitätsfehler nunmehr auf Basis des Kalibrierbereichs berechnet werden kann.

Relative Umkehrspanne (v)

Unter der relativen Umkehrspanne versteht man den Unterschied zwischen der Kennlinie des Kraftaufnehmers bei aufsteigender und bei absteigender Kraft. Angegeben wird bei HBM die maximale Abweichung. Zusätzlich kann dem Datenblatt entnommen werden, in welchem Kraftbereich die relative Umkehrspanne ermittelt wurde. Die Angabe erfolgt in Bruchteilen der Nennkraft (z. B. 0,4 F_{nom} = bei 40 % der Nennkraft).

Sinngemäß gilt hier der gleiche Zusammenhang wie bei der Linearität, bei Referenzkraftaufnehmern ist die Angabe der relativen Umkehrspanne relativ zum Ist-Wert.



Zur relativen Umkehrspanne: Der Unterschied der Messwerte bei gleicher anliegender Kraft zwischen den Fällen aufsteigende und absteigende Kraft.

Relatives Kriechen (d_{crf+E})

Alle Aufnehmer auf Basis von DMS zeigen unter einer konstanten Last eine kleine Signalveränderung, die näherungsweise in Form einer e-Funktion verläuft. Dieser Vorgang wird als Belastungskriechen bezeichnet. Wird die Kraft wieder vom Aufnehmer entfernt, so ändert sich das Signal in umgekehrter Richtung in etwa gleicher Weise. Dieser Vorgang wird als Entlastungskriechen bezeichnet.



Zum Kriechen von Kraftaufnehmern: Der prinzipielle Verlauf.

Neben dem maximalen Wert der Signaländerung in Prozent ist auch die Zeit angegeben, innerhalb welcher die Angabe ermittelt wurde.

Wichtig ist, dass der Kriecheinfluss nicht relativ zur Nennkraft, sondern immer relativ zur anliegenden Kraft berechnet werden muss. Bei HBM wird der Kriechwert nach 30 Minuten angegeben, aufgrund

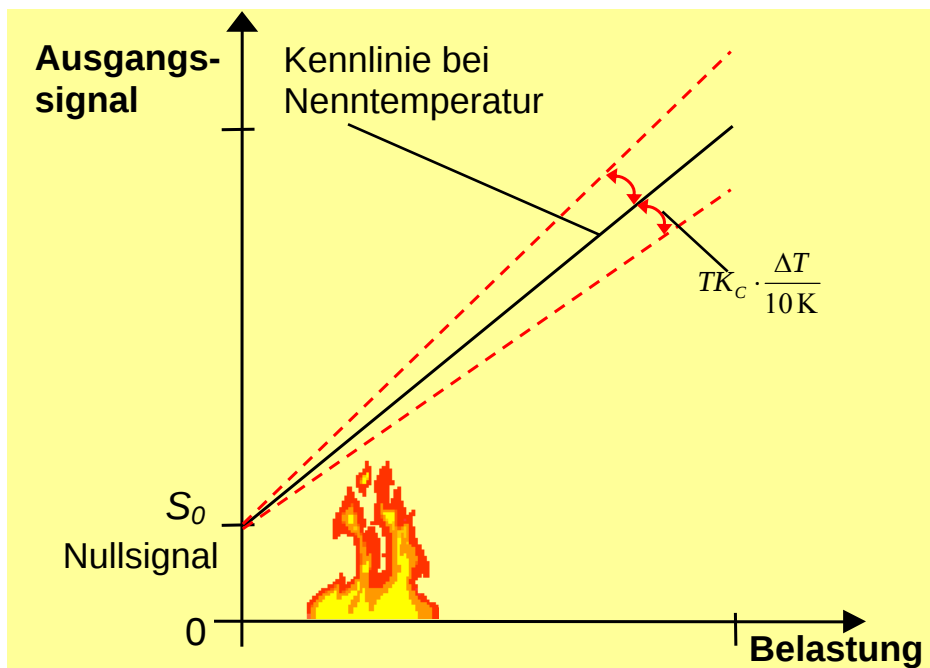
des typischen Verlaufs in Form einer e-Funktion kann diese Angabe in sehr guter Näherung als Kriechmaximum angenommen werden. Keinesfalls ist es richtig, diesen Wert linear hochzurechnen.

Temperaturkoeffizient des Kennwertes (TK_C)

Bei Temperaturänderung ergibt sich eine kleine Änderung der Empfindlichkeit von Sensoren auf Basis von DMS. Dies ist zum einen damit begründet, dass das E-Modul der Werkstoffe, aus denen der Federkörper gebaut wurde, mit steigender Temperatur kleiner wird - gleiche Kraft führt zu höherer Dehnung und damit zu größerem Ausgangssignal.

Auch der k-Faktor (die Empfindlichkeit) der DMS ist temperaturabhängig.

Die somit entstehende Temperaturabhängigkeit des Kennwertes ist bei sehr vielen Kraftaufnehmern kompensiert und sehr gering. Wie das Kriechen gilt bei einer Fehlerrechnung, dass die Angabe immer auf den aktuellen Messwert bezogen werden muss.

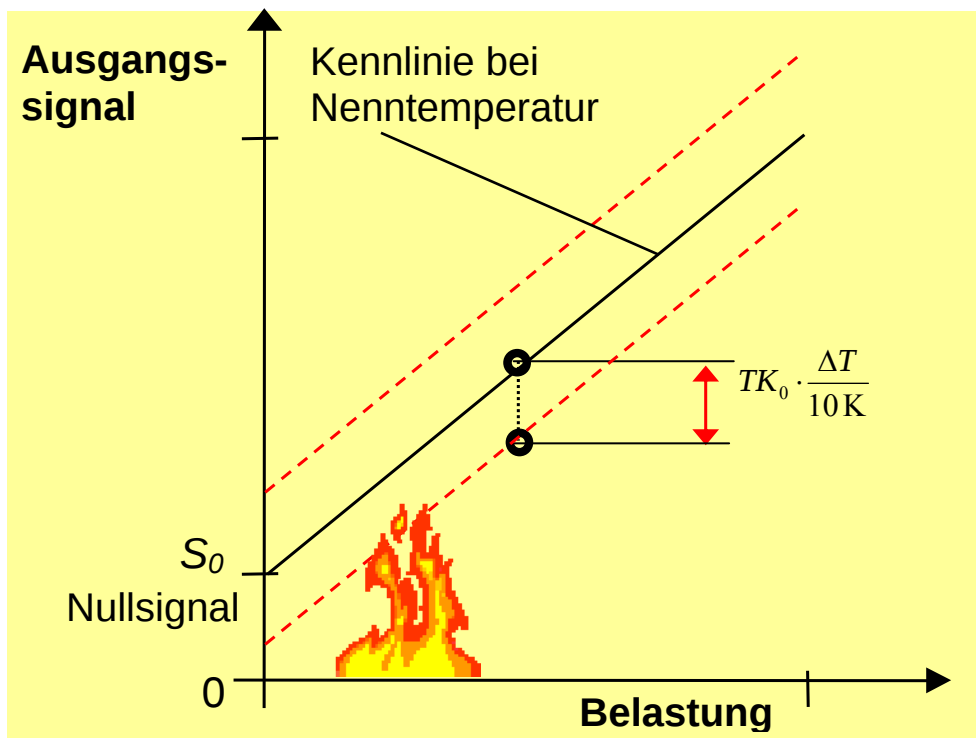


Zum TK_C : Die Steigung der Kennlinie ändert sich bei Temperatureinfluss.

Temperaturkoeffizient des Nullpunktes (TK_0)

Neben dem Kennwert variiert der Nullpunkt geringfügig mit der Temperatur. Die Wheatstonesche Brückenschaltung kompensiert den Effekt der einzelnen Messstreifen weitestgehend. Der verbleibende Restfehler erklärt sich aus den unvermeidbaren Toleranzen. Dieser kleine Fehler lässt sich durch geeignete Schaltungsmaßnahmen weiter verringern, sodass moderne Kraftaufnehmer einen Restfehler von weniger als 0,05 % / 10 K aufweisen.

Der Temperaturkoeffizient des Nullpunktes muss immer auf die Nennkraft bezogen werden, unabhängig davon, welche Kraft gemessen wird. Aus diesem Grund empfiehlt es sich bei größeren Temperaturschwankungen und /oder wenn im Teillastbereich gearbeitet wird, einen Kraftaufnehmer zu verwenden, der einen besonders kleinen TK_0 aufweist.



Zum TK_0 : Die Kennlinie eines Kraftaufnehmers wird bei Temperatureinfluss parallel verschoben.