

**Einleitung**

Ein fahrendes Fahrzeug besitzt eine Bewegungsenergie ( $E_{\text{kin}}$ ), deren Grösse von der Fahrzeugmasse ( $m$ ) und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit ( $v$ ) abhängt.

$$E_{\text{kin}} = \frac{m \times v^2}{2}$$

Diese Energie muss ganz oder teilweise umgewandelt werden, wenn das Fahrzeug anhalten oder seine Geschwindigkeit verringern soll. Dies ist die Aufgabe der Bremse, welche die Bewegungsenergie des Fahrzeugs durch Reibung in Wärme umwandelt.

**Beschleunigung und Verzögerung**

Als Beschleunigung bezeichnet man die **Geschwindigkeitszunahme** um einen bestimmten Geschwindigkeitswert in Metern je Sekunde pro Sekunde ( $= \text{m/s}^2$ ). Unter (Brems-) Verzögerung verstehen wir die **Geschwindigkeitsabnahme** um einen bestimmten Geschwindigkeitswert in Metern je Sekunde pro Sekunde ( $= \text{m/s}^2$ ).

Ist dieser Wert in jeder Sekunde gleich, spricht man von einer **gleichförmigen Beschleunigung oder Verzögerung**.

Die Geschwindigkeit wird errechnet nach der Formel:

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Weg}}{\text{Zeit}} \quad v = \frac{s}{t} \quad \text{in } \frac{m}{s}$$

Die Beschleunigung und ebenfalls die Verzögerung wird berechnet nach der Formel:

$$\text{Verzögerung} = \frac{\text{Geschwindigkeit}}{\text{Zeit}} \quad a = \frac{v}{t} \quad \text{in } \frac{m}{s^2}$$

**Die maximale Bremsverzögerung**

Die Verzögerung oder Abbremsung kann bei Fahrzeugbremsen nicht beliebig gesteigert werden. **Eine Grenze** stellt die theoretisch erreichbare Verzögerung durch die **Erdbeschleunigung ( $g$ )** mit  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  dar (gerundeter Wert  $10 \text{ m/s}^2$ ). Die Verzögerung einer auch noch so guten Bremsanlage wird diesen Wert kaum erreichen, geschweige denn überschreiten können.

Eine **weitere Grenze** ist der **Reibwert zwischen Reifen und Fahrbahn**, der durch den **Kraftschlussbeiwert ( $k$ )** ausgedrückt wird. Die Verzögerung ist in der Regel (es gibt Ausnahmen) dann am grössten, wenn die Räder beim Bremsen nicht blockieren, also sich gerade noch drehen. Eine Erhöhung der Bremskraft würde also nicht in jedem Fall eine höhere Bremswirkung erzielen, sondern durch Blockieren der Räder den Verlust der Lenkfähigkeit und Schleudern des Fahrzeugs zur Folge haben.

## Kraftschlussbeiwert (k)

Je nach Fahrbahndecke und ihrem momentanen Zustand (trocken, nass) ergibt sich ein bestimmter Kraftschlussbeiwert (k), der die maximal erreichbare Bremsverzögerung bestimmt. Sie wird wie folgt errechnet:

Max. erreichbare Verzögerung = Erdbeschleunigung × Kraftschlussbeiwert

$$a_{\max} = g \times k \quad \text{in } \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Eine Übersicht über den **Kraftschlussbeiwert k** bei unterschiedlichen Fahrbahnzuständen gibt die folgende Tabelle

Straßendecke	trocken	nass	
		sauber	schmierig
Beton, Granitpflaster	0,7	0,6	ca. 0,4
Teermakadam	0,6	0,5	ca. 0,3
Asphalt	0,6	0,5	ca. 0,25
Blaubasaltplaster	0,55	0,3	0,1 – 0,2
Schnee (festgefahren)	0,2	0,1	
Glatteis	0,1	0,01 bis 0,1	

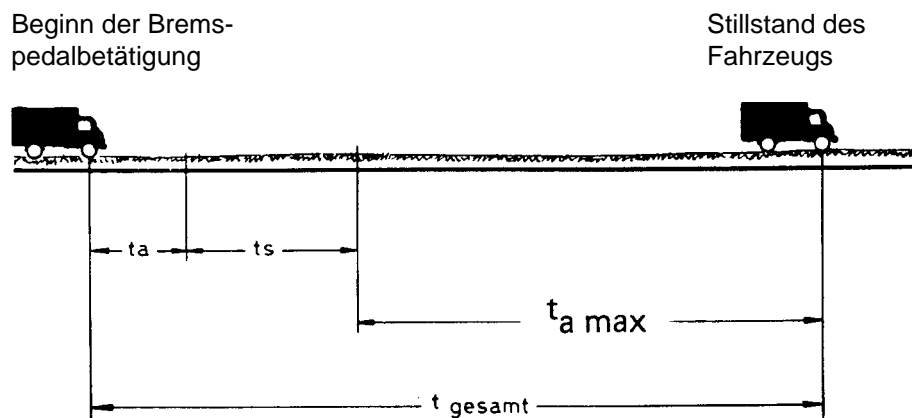
Für das Beispiel Bremsen auf Glatteis bedeutet dies,

$$a_{\max} = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 0,1 = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Wird jedoch ein k-Wert von 0,6 angenommen (Beton sauber) kommen wir auf einen maximal erreichbaren Wert von 6 m/s<sup>2</sup>.

## Der zeitliche Ablauf eines Bremsvorganges

Die maximale Bremsverzögerung ist nicht während des gesamten Bremsvorganges bzw. während der gesamten Bremsdauer wirksam, denn vom Beginn der Pedalbetätigung bis zum Erreichen der maximalen Verzögerung verstreicht die Ansprechzeit  $t_a$  und die Schwellzeit  $t_s$ .



Aus der symbolischen Darstellung des zeitlichen Ablaufes ergeben sich nachfolgende Zeitfaktoren (Angaben in s).

**Die Ansprechdauer ( $t_a$ )**

Vereinfacht erklärt, versteht man unter der Ansprechdauer ( $t_a$ ) den Zeitablauf, der zwischen der Bremspedalbetätigung und dem Einsetzen der Bremswirkung liegt.

**Die Schwelldauer ( $t_s$ )**

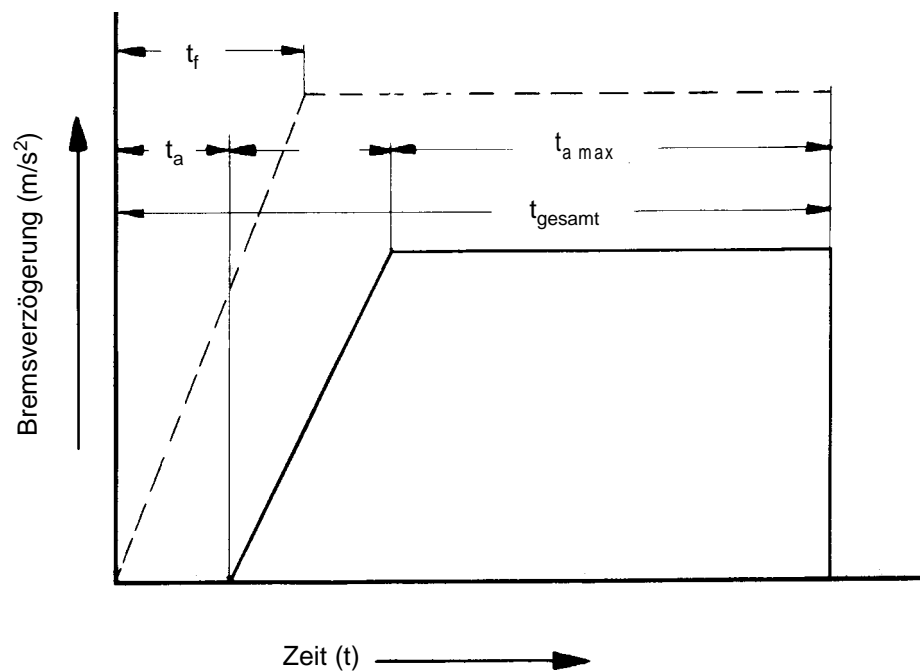
Ebenfalls vereinfacht ausgedrückt, versteht man unter der Schwelldauer ( $t_s$ ) den Zeitablauf, der zwischen dem Einsetzen der Bremswirkung und dem Erreichen der max. Bremsverzögerung liegt.

**Die Bremsverzögerungsdauer ( $t_{a \max}$ )**

Unter max. Bremsverzögerungsdauer ( $t_{a \max}$ ) versteht man den Zeitablauf, der zwischen dem Einsetzen der Höchstverzögerung ( $a_{\max}$ ) und dem Stillstand des Fahrzeugs liegt.

**Gesamte Bremsdauer ( $t_{\text{ges}}$ )**

Die Zeit, die von der Betätigung der Bremse bis zum Stillstand des Fahrzeugs verstreicht. Die Schreck- und Reaktionszeit des Fahrers wird hierbei nicht berücksichtigt.

**Die Betätigungsdauer ( $t_f$ )**

Ansprech- und Schwelldauer sind in ihrer zeitlichen Ausdehnung natürlich von der Betätigungsdauer ( $t_f$ ) abhängig.

Hierunter versteht man den Zeitablauf, der zwischen dem Beginn der Bremspedal- oder Trittplattenbetätigung und dem Erreichen des Endanschlags liegt.

## Die Abbremsung (z)

Neben der Bremsverzögerung gibt es ein anderes Mass für das Bremsverhalten: die **Abbremsung z**.

Darunter versteht man das prozentuale Verhältnis der erzeugten, d.h. auf dem Rollenprüfstand ermittelten Bremskräfte, im Verhältnis zur momentanen Gewichtskraft des Fahrzeugs.

$$\text{Abbremsung in \%} = \frac{\text{Summe der Bremskräfte des Fahrzeugs}}{\text{Prüfgewicht des Fahrzeugs}}$$

$$z = \frac{F}{G_p} \times 100 \%$$

## Zusammenhang zwischen Abbremsung z und max. Bremsverzögerung a<sub>max</sub>

Ein Zusammenhang zwischen der max. Verzögerung a<sub>max</sub> und der Abbremsung z ergibt sich aus der Formel:

$$a_{\max} = \frac{F \times g}{G_p} = z \times g$$

Das bedeutet, dass ein direkter Zusammenhang zwischen (z) und (a<sub>max</sub>) besteht, der es ermöglicht, die erreichte Abbremsung (a<sub>max</sub>) auch als prozentuale Abbremsung (z) auszudrücken und umgekehrt.

Die Tabelle zeigt die entsprechenden Vergleichswerte

Abbremsung z	Bremsverzögerung (a <sub>max</sub> )	
	genau	aufgerundet
10 %	0,981 m/s <sup>2</sup>	1,0 m/s <sup>2</sup>
20 %	1,962 m/s <sup>2</sup>	2,0 m/s <sup>2</sup>
30 %	2,943 m/s <sup>2</sup>	3,0 m/s <sup>2</sup>
40 %	3,924 m/s <sup>2</sup>	4,0 m/s <sup>2</sup>
50 %	4,905 m/s <sup>2</sup>	5,0 m/s <sup>2</sup>
60 %	5,886 m/s <sup>2</sup>	6,0 m/s <sup>2</sup>
70 %	6,867 m/s <sup>2</sup>	7,0 m/s <sup>2</sup>
80 %	7,848 m/s <sup>2</sup>	8,0 m/s <sup>2</sup>
90 %	8,829 m/s <sup>2</sup>	9,0 m/s <sup>2</sup>
100 %	9,810 m/s <sup>2</sup>	10,0 m/s <sup>2</sup>

**Messung der Verzögerung  
bzw. Abbremsung**

Hierzu gib es zwei Möglichkeiten

1. Die Ermittlung der Abbremsung  $z$  in % **mit Hilfe eines Bremsenprüfstandes** (Rollen- oder Plattenprüfstand)
2. Die Ermittlung während der Verzögerung **im Fahrversuch mit Hilfe eines Verzögerungsmessgerätes** (schreibend oder nichtschreibend). Während ein nichtschreibendes Gerät nur die Höhe der maximalen Bremsverzögerung anzeigt, zeichnet ein schreibendes Gerät darüber hinaus auch noch den zeitlichen Verlauf der Ansprech- und Schwelldauer auf.

Die Bremsprüfung im Fahrversuch auf der Straße ist zeitraubend und bei der heutigen Verkehrsdichte auch gefährlich. Deshalb werden zur Überprüfung der Bremsanlagen nach § 29 StVZO überwiegend Bremsenprüfstände (bei Nutzfahrzeugen in erster Linie Rollenprüfstände) eingesetzt.

Nur Fahrzeuge, die aufgrund ihrer Bauart auf einem solchen Prüfstand nicht geprüft werden können, sind auf der Straße mit einem schreibenden Verzögerungsmessgerät zu prüfen.

**Ermittlung der Abbremsung  
auf dem Prüfstand**

Auf einem Rollenprüfstand werden die max. Bremskräfte pro Rad gemessen. Addiert man diese Bremskräfte und stellt die Summe prozentual dem jeweiligen Fahrzeuggewicht gegenüber, so erhält man nach der schon bekannten Gleichung die prozentuale Abbremsung des Fahrzeugs:

$$z = \frac{F}{G_p} \times 100 \%$$

Beispiel:  $F = 96\,000\text{ N}$ ;  $G_p = 160\,000\text{ N}$

$$z = \frac{96.000\text{ N}}{160.000\text{ N}} \times 100 \% = 60 \%$$

Der Gesetzgeber schreibt bei den Überprüfungen der Fahrzeuge nach § 29 StVZO (Hauptuntersuchungen HU bzw. Sicherheitsprüfung SP) bestimmte Mindestabbremsungen vor, die **das beladene Fahrzeug** auf jeden Fall erreichen muss.

Die grosse Mehrheit der Fahrzeuge wird allerdings nicht im vollbeladenen, sondern im leeren oder evtl. teilbeladenen Zustand zur Bremsenprüfung vorgestellt.

Aus diesem Grund muss dann zum Nachweis, dass die gesetzlichen Vorschriften erfüllt werden, eine Hochrechnung vorgenommen werden.

Grund dafür ist, dass im leeren Fahrzeugzustand wegen der fehlenden Radlast auf der Rolle auch nur geringere Bremskräfte zu messen sind, bevor die Blockierschutzschaltung wirksam wird.

Die Bremskraft an den Rädern eines Fahrzeuges nimmt linear mit dem eingesteuerten Bremsdruck zu. Dies gilt für druckluftgebremste Fahrzeuge genauso wie für hydraulisch gebremste Fahrzeuge.

Auf dieser Grundlage lässt sich mit Hilfe der im leeren Zustand gemessenen Bremskräfte und den dabei in die Bremszylinder eingesteuerten Drücken die im beladenen Zustand zu erwartende Bremskraft hochrechnen.

**Die Hochrechnung**

Zur Hochrechnung wird aus dem vom Fahrzeughersteller angegebenen max. Bremsdruck für die Bremsanlage  $p_N$  sowie den jeweils in die Bremszylinder der einzelnen Achsen eingesteuerte Druck  $p$  der Faktor  $i$  unter Berücksichtigung des Anlegedrucks von 0,4 bar errechnet.

$$z = \frac{F_1 \times i_1 + F_2 \times i_2 + \dots + F_n \times i_n}{G_z} \times 100 \%$$

$G_z$  = Zul. Gesamtgewichtskraft des Fahrzeugs (N)

$z$  = Abbremsung (%)

$F_1$  = Bremskraft der ersten Achse, die bei dem Druck  $p_1$  ermittelt wurde in (N)

$F_2$  = Bremskraft der zweiten Achse, die bei dem Druck  $p_2$  ermittelt wurde in (N)

$F_n$  = Bremskraft der letzten Achse in (N)

**Formel**

$$i_1 = \frac{p_N - 0,4}{p_1 - 0,4}$$

Die 0,4 bar berücksichtigen den Anlegedruck der Radbremse

$$i_2 = \frac{p_N - 0,4}{p_2 - 0,4}$$

**Index**

$p_N$  = der vom Hersteller für die betreffende Achse angegebene max. Bremsdruck (bar Überdruck) siehe Fabrikschild.  
(Falls  $p_N$  nicht angegeben ist, so ist wie bisher der Berechnungsdruck einzusetzen).

$p_1; p_2$  = Bremsdruck, der bei der Bremsprüfung in den Radzylindern der jeweiligen Achse eingesteuert wird (bar Überdruck).

**Beispiel**

$$G_z = 220\,000 \text{ N}$$

$$F_1 = 8\,500 \text{ N}$$

$$F_2 = 6\,000 \text{ N}$$

$$F_3 = 6\,000 \text{ N}$$

$$p_n = 7,0 \text{ bar (in diesem Fall vom Hersteller angegeben und für sämtliche Achsen)}$$

$$p_1 = 2,0 \text{ bar}$$

$$p_2 = 1,7 \text{ bar}$$

$$p_3 = 1,7 \text{ bar}$$

**Gesucht: z**

$$i_1 = \frac{7,0 \text{ bar} - 0,4}{2,0 \text{ bar} - 0,4} = 4,1$$

$$i_1 \text{ u. } i_3 = \frac{7,0 \text{ bar} - 0,4}{1,7 \text{ bar} - 0,4} = 5,1$$

$$z = \frac{8.500 \text{ N} \times 4,1 + 6.000 \text{ N} \times 5,1 + 6.000 \text{ N} \times 5,1}{220.000 \text{ N}} \times 100 (\%) = 44,0 \%$$

**Die Abbremsung z beträgt also 44 %.**

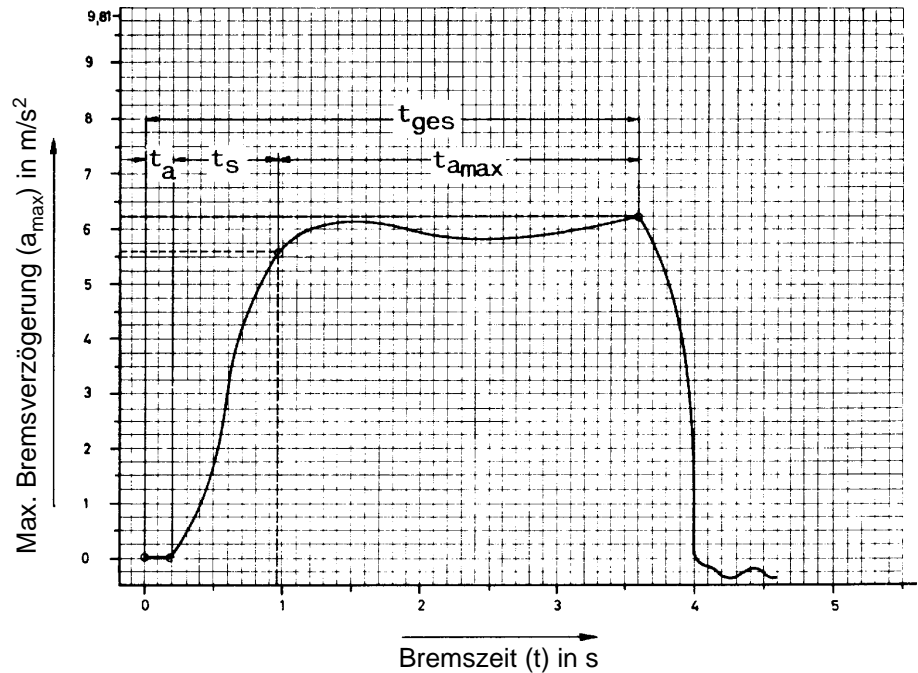
**Ermittlung der Verzögerung im Fahrversuch**

Kann auf einem Prüfstand die Abbremsung nicht geprüft werden, wird ein schreibendes Bremsmessgerät eingesetzt, das während des Bremsvorganges ein Diagramm des Bremsverlaufs aufzeichnet. Hieraus kann dann neben der Höhe der max. Verzögerung auch der zeitliche Verlauf des Bremsvorganges abgelesen werden und so also auch eine Aussage über die Ansprech- und Schwelldauer getroffen werden.

Die Ausgangsgeschwindigkeit bei Bremsprüfungen auf der Straße ist - mit Ausnahme der Dauerbremsanlage - **zwischen 45 und 50 km/h** zu wählen. Sofern diese Geschwindigkeit nicht erreichbar ist, gilt die jeweilige Höchstgeschwindigkeit. In besonderen Fällen können Bremsprüfungen auch aus grösserer Ausgangsgeschwindigkeit durchgeführt werden.

## Beispiel

Nachfolgende graphische Darstellung zeigt das Ergebnis einer derartigen Überprüfung der Bremswirkung in Abhängigkeit von der Zeit.



## Überprüfung von Anhängerbremsanlagen im Fahrversuch

Zur Feststellung der Wirkung der Anhängerbremsanlage sind, falls wegen der Bauart des Anhängers auf Bremsprüfständen nicht geprüft werden kann, Fahrversuche mit dem Zug durchzuführen, wobei nur der Anhänger gebremst wird. Der Anhänger muss hierbei bis zum zul. Gesamtgewicht beladen sein.

Die Abbremsung des Anhängers errechnet sich dann aus:

$$z_A = (z_Z - f_R) \frac{G_A + G_K}{G_A} + f_R (\%)$$

## Index

- $z_A$  = Abbremsung des Anhängers in %
- $z_Z$  = Abbremsung des Zuges nur mit der Anhängerbremse in %
- $G_A$  = Gewichtskraft des Anhängers (N)
- $G_y$  = Gewichtskraft des ziehenden Fahrzeugs (N)
- $f_y$  = Zuschlag für Rollwiderstand (= 2 %)



Hersteller der Bremsanlage ..... Prüfgewicht des Fz. (P<sub>M</sub>) ..... daN  
 Art der Bremsanlage ..... Zul. Achslasten 1/2/3/4 ..... daN  
 Berechnungsdruck bzw. max. Bremsdruck für das Fz. / Zul. Gesamtgewicht G<sub>z</sub> (bei Sattelanhängern Summe  
 die Einzelachsen p<sub>N</sub> ..... / ..... / ..... / ..... bar der zul. Achslasten) ..... daN

**Abgelesene Werte vom Bremsenprüfstand**

	Betriebsbremsanlage						Feststell- bremse Bremskraft (daN)	Fz-Gewicht/ Achslasten (Prüfgewicht) (daN)
	Bremskräfte (daN)			Zylinder- druck p (bar)	i = $\frac{p_N - 0,4}{p - 0,4}$	F × i		
	links	rechts	Summe F					
Achse 1								
Achse 2								
Achse 3								
Achse 4								
Summe								

**Abbremsung bezogen auf das Prüfgewicht (nur, wenn Prüfgewicht bekannt)**

$$z_{PM} = \frac{F_1 + F_2 + \dots + F_n}{P_M} \times 100[\%] = \dots\dots\dots \%$$

**Abbremsung bezogen auf das zul. Gesamtgewicht des Fahrzeugs (Hochrechnung)**

$$z = \frac{F_1 \times i_1 + F_2 \times i_2 + \dots + F_n \times i_n}{G_z} \times 100[\%] = \dots\dots\dots \%$$

**Abbremsung mit der Feststellbremse (bezogen auf das zul. Gesamtgewicht)**

$$z_{FBA} = \frac{F_{FBA}}{G_z} \times 100[\%] = \dots\dots\dots \%$$

oder: Überschreiten der Blockiergrenze

**Differenz der Bremskräfte**

$$\frac{\text{Differenz der Bremskräfte einer Achse}}{\text{größte Bremskraft einer Achse}} \times 100 \leq \dots[\%]$$

BBA: ..... %  
FBA: ..... %

Die Gewichtskraft (N) erhält man durch Multiplikation der Gesamtmasse (kg) mit dem Faktor 10 (Erdbeschleunigung g gerundet auf 10 m/s<sup>2</sup>). Damit entspricht 1 daN (10 N) Kraft etwa 1 kg Masse.

**Hinweis:**

Für Sattelanhänger oder Anhängfahrzeuge ähnlicher Bauart: anstelle der Gewichtskraft Summe der Achskräfte einsetzen!