

Trommel- und Scheibenbremsen Berechnungsgrundsätze

Power transmission engineering; principles for drum- and discbrakes, calculation

Inhalt

	Seite		Seite
1 Anwendungsbereich und Zweck	1	5.5 Verschleißwert der Bremsbeläge	13
2 Grundlagen	1	5.6 Ermittlung der Erwärmung von Bremsstrommeln und Brems Scheiben	14
3 Größenwerte, konstante Größen, Formelzeichen und Einheiten	2	5.6.1 Annahme von Temperaturwerten	16
4 Berechnung der Haltebremsen	10	5.6.2 Abführbarer Wärmestrom	16
5 Berechnung der Stoppbremsen	10	5.6.3 Entstehender Wärmestrom	19
5.1 Erforderliches Bremsmoment	10	5.6.4 Überprüfen des Bremsstrommel- oder Brems- scheibendurchmessers	19
5.2 Ermittlung des Bremsstrommeldurchmessers	11	5.7 Notaus-Stoppbremse	19
5.3 Ermittlung des wirksamen Brems Scheiben- durchmessers	12	6 Berechnung der Regelbremsen	23
5.4 Nachrechnen der Bremszeit und des Nachlaufweges	12	7 Sonstige Anforderungen	23
		Anhang A – Berechnungsbeispiele	23

1 Anwendungsbereich und Zweck

Die Festlegungen dieser Norm gelten für die Berechnung der Trommel- und Scheibenbremsen mit Außendoppelbacken im Bereich der Antriebstechnik.

Mit dieser Norm sollen einheitliche Begriffe und Grundsätze für die Berechnung von Trommel- und Scheibenbremsen allgemein gültig angewendet werden.

2 Grundlagen

Nach Bauart der mechanischen Reibungsbremsen werden Band-, Kegel-, Trommel- und Scheibenbremsen unterschieden. Ausführung, Anordnung und Wirkung der Bremsbelag-träger sind ebenfalls kennzeichnend für die Benennung nach Bauart. Der Begriff „Doppelbackenbremsen“ wurde bisher nur für Außendoppelbacken-Trommelbremsen angewendet. Seit Einführung der Außenbacken-Scheibenbremsen ist die Benennung nicht mehr kennzeichnend für die Bauart der Bremsen. Deshalb wurde der Begriff Trommel- und Scheibenbremse eingeführt, wobei die Anzahl der gleichzeitig wirksamen Außendoppelbacken in der Berechnung nach Abschnitt 5 zu berücksichtigen ist.

Bei Trommelbremsen sind in der Regel Doppelbacken auf einer Bremsstrommel und bei Scheibenbremsen ein, zwei oder auch mehr als zwei Doppelbacken gleichzeitig auf einer Brems Scheibe wirksam. Da Bandbremsen für Neukonstruktionen kaum noch angewendet werden, wird hier nur auf das Schrifttum [1] und [2] hingewiesen.

Mechanische Kegel-Reibungsbremsen mit axial wirkender Bremskraft werden z.B. bei Verschiebeankermotoren angewendet. Hierfür können die Festlegungen dieser Norm sinngemäß nach Angaben des Herstellers angewendet werden.

Die Benennung nach Funktion der Bremsen ist in Tabelle 1 zusammengefaßt und erklärt.

Tabelle 1. Benennung der Bremsen nach Funktion und Bedeutung

Benennung	Bedeutung
Haltebremse	Bremse, durch die das unbeabsichtigte Anlaufen einer Welle aus dem Stillstand verhindert wird.
Stoppbremse	Bremse, die eine umlaufende Welle in kurzer Zeit zum Stillstand bringt, ($n_2 = 0$). Dies gilt auch, wenn eine gewollte Notausschaltung erfolgt (Notaus-Stoppbremse).
Regelbremse (Manövrierbremse)	Bremse, die das Einhalten einer bestimmten Wellendrehzahl bewirkt.

Diese Berechnungsgrundsätze für Trommel- und Scheibenbremsen enthalten Verfahren für die Berechnung nach den Abschnitten 5 und 6. Die Benutzung der Verfahren erfordert für jeden Anwendungsfall die Erfassung aller wesentlichen Einflußfaktoren. Es ist zu beachten, daß die Anforderungen in den Anwendungsbereichen beträchtlich variieren können.

Deshalb sollen Bremsen- und Anlagenhersteller sowie Betreiber eng zusammenarbeiten, Erfahrungen austauschen und Einfluß auf betriebssichere und wirtschaftlich vertretbare Bremseinrichtungen nehmen. Die Art des rechnerischen Nachweises ist zu vereinbaren.

Die in diesen Berechnungsgrundsätzen enthaltenen Einflußfaktoren basieren auf Forschungsergebnissen, Konstruktions- und Betriebserfahrungen.

Faktoren, die durch Messung und/oder umfassende rechnerische Analyse und/oder gesicherte Betriebserfahrung begründet sind, dürfen angewendet werden.

In diesem Fall sind Genauigkeit und Zuverlässigkeit des gewählten Verfahrens sowie die Voraussetzungen nachzuweisen.

Fortsetzung Seite 2 bis 32

Normenausschuß Antriebstechnik (NAN) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
Normenausschuß Maschinenbau (NAM) im DIN

Jede Art der Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, gestattet.

3 Größenwerte, konstante Größen, Formelzeichen und Einheiten

In den Tabellen 2 und 4 stimmen die Zeichen mit den angegebenen Normen überein.

Alle in dieser Norm enthaltenen Gleichungen sind Zahlenwertgleichungen. Die in ihnen angegebenen Größenwerte und Zeichen gelten nur für die in den Tabellen 2 bis 7 angegebenen Einheiten.

Für die Zeichen d_1 in cm oder m und A_{11} in cm² oder m² sind in den Gleichungen jeweils die einzusetzenden Einheiten angegeben.

Tabelle 2. **Größenwerte für Trommelbremsen**

Zeichen	Einheit oder Einheitenverhältnis	Größenwert ¹⁾ ≈	Bedeutung	Maße in mm nach
b_1	m	$0,375 \cdot d_1$	Breite der Bremstrommel	DIN 15 431
b_2	cm	$0,355 \cdot d_1$	Breite des Bremsbelages	DIN 15 435 Teil 2 und Teil 3
b_3	m	$0,3 \cdot d_1$ ²⁾	Breite der Innenseite des Bremstrommelkranzes ohne Steg	—
c_1	cm	c_1 in cm = $0,1 \cdot c_1$ in mm	Dicke des neuen Bremsbelages	DIN 15 435 Teil 3
c_3	cm	c_3 in cm $\geq \frac{0,2 \cdot c_1 \text{ in mm}}{10}$	Dicke des verschlissenen aufgeklebten Bremsbelages	DIN 15 435 Teil 3
		c_3 in cm $\geq \frac{c_2 \text{ in mm} + 2}{10}$	Dicke des verschlissenen aufgenieteten Bremsbelages	
d_1	cm m	Zahlenwert für d_1 in cm oder m einsetzen	Außendurchmesser der Bremstrommel	DIN 15 431 DIN 15 435 Teil 1 bis Teil 3
d_2	m	$0,95 \cdot d_1$ ²⁾	Innendurchmesser des Bremstrommelkranzes	—
A_1	cm ²	$0,204 \cdot d_1^2$	Projektionsfläche eines Bremsbelages $A_1 = \pi \cdot d_1 \cdot \frac{\gamma^\circ}{360^\circ} \cdot K_1 \cdot b_2$	DIN 15 435 Teil 2 und Teil 3
A_{11}	cm ² m ²	$0,434 \cdot d_1^2$	Bremsfläche eines Bremsbelagpaares	DIN 15 435 Teil 2 und Teil 3
A_2	m ²	$3,644 \cdot d_1^2$	Oberfläche der gesamten Bremstrommel $A_2 = A_{21} + A_{22} + A_{23}$	—
A_{21}	m ²	$1,178 \cdot d_1^2$	Oberfläche der Außenseite des Bremstrommelkranzes $A_{21} = \pi \cdot d_1 \cdot b_1$	—
A_{22}	m ²	$0,895 \cdot d_1^2$	Oberfläche der Innenseite des Bremstrommelkranzes $A_{22} = \pi \cdot d_2 \cdot b_3$	—
A_{23}	m ²	$1,571 \cdot d_1^2$	Oberfläche der Seitenflächen der Bremstrommel $A_{23} = \frac{d_1^2 \cdot \pi}{2}$	—
K_1	1	0,939	$K_1 = \frac{\text{Sehne}}{\text{Bogen}}$ des Winkels γ = Konstante	DIN 15 435 Teil 2 und Teil 3
V_B	cm ³	$\leq 0,434 (c_1 - c_3) d_1^2$	Verschleißvolumen eines Bremsbelagpaares	DIN 15 435 Teil 2 und Teil 3
γ	Grad	70°	Umschlingungswinkel einer Bremsbacke	DIN 15 435 Teil 2 und Teil 3

¹⁾ Konstante Größen siehe Tabelle 3

²⁾ Die Größenwerte entsprechen den in der Praxis üblichen Abmessungen; bei wesentlichen Abweichungen sind die Werte nach Angabe des Herstellers einzusetzen.

Tabelle 3. Konstante Größen für Trommelbremsen

d_1	A_1 ≈	A_{11} ≈	V_B ≈ cm ³		A_2 ≈	$A_{21} - A_{11}$ ≈
mm	cm ²	m ²	Klebung	Nietung	m ²	m ²
200	82	0,0174	111	69	0,1458	0,0298
250	128	0,0271	174	109	0,2278	0,0465
315	202	0,0431	345	215	0,3616	0,0738
400	326	0,0694	556	347	0,5830	0,1190
500	510	0,1085	1042	760	0,9110	0,1860
630	810	0,1723	1654	1206	1,4463	0,2953
710	1028	0,2188	2625	2188	1,8369	0,3751

Tabelle 4. Größenwerte für Scheibenbremsen

Zeichen	Einheit	Größenwert ¹⁾ ≈	Bedeutung	Maße in mm nach
b_1	m	0,015; 0,030; 0,042; 0,080; 0,112 in m	Breite der Bremsscheibe	DIN 15 432
b_3	m	≈ 0,5 · b_1 in m	Breite des Belüftungsspalt	2)
c_1	cm	c_1 in cm = 0,1 · c_1 in mm	Dicke des neuen Bremsbelages	DIN 15 433 Teil 2 *)
c_3	cm	c_3 in cm ≥ $\frac{0,2 \cdot c_1}{10}$ in mm	Dicke des verschlissenen Bremsbelages	DIN 15 433 Teil 2 *)
d_1	m	$d_1 = f(d_2)$ Zahlenwert von d_1 in m einsetzen	wirksamer mittlerer Reibungsdurchmesser	DIN 15 433 Teil 1 *) und Teil 2 *)
d_2	m	d_2 in m = $d_2 \cdot 10^{-3}$ in mm	Außendurchmesser der Bremsscheibe	DIN 15 432
d_3	m	≈ $\frac{d_2}{1,8}$	Innendurchmesser der Bremsscheibe	DIN 15 432 oder 2)
A_1	cm ²	$A_1 = f(d_2)$	Bremsfläche eines Bremsbelages	DIN 15 433 Teil 2 *)
A_{11}	cm ²	$A_{11} = 2 \cdot A_1$	Bremsfläche eines Bremsbelagpaares $k = 1$	DIN 15 433 Teil 2 *)
	m ²	$A_{11} = 2 \cdot A_1 \cdot 10^{-4}$	Bremsfläche eines Bremsbelagpaares $k = 1$	—
	m ²	$A_{11} \cdot k$	Bremsfläche von k Bremsbelagpaaren	—
A_2	m ²	$A_2 = A_{21} + A_{22} + A_{23}$	Oberfläche der gesamten Bremsscheibe mit Innenbelüftung	2)
		$A_2 = A_{21} + A_{23}$	ohne Innenbelüftung (massiv)	
A_{21}	m ²	≈ 1,086 · d_2^2 $A_{21} = 2 \cdot (d_2^2 - d_3^2) \cdot \frac{\pi}{4}$	Stirnflächen der Bremsscheibe	
A_{22}	m ²	≈ 1,2 · d_2^2 $A_{22} \approx 2 \cdot (d_2^2 - d_3^2) \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 1,1$	Stirnflächen im Belüftungsspalt (10% Zuschlag für Querrippen)	
A_{23}	m ²	$b_1 \cdot d_2 \cdot \pi$	Vorhandene Oberfläche der Bremsscheibe im Bereich des Außendurchmessers d_2 ohne Innenbelüftung (massiv)	
		$(b_1 - b_3) \cdot d_2 \cdot \pi$	mit Innenbelüftung	
V_B	cm ³	≤ 1,6 · $c_1 \cdot A_1$	Verschleißvolumen eines Bremsbelagpaares $V_B = 2 \cdot A_1 (c_1 - c_3)$	DIN 15 433 Teil 2*)

*) Z. Z. Entwurf

1) Konstante Größen siehe Tabelle 5

2) Genauere Werte nach Angabe des Herstellers einsetzen.

Die für die Berechnung von Scheibenbremsen zutreffenden Größenwerte für

A_1 in cm^2

A_{11} in m^2

V_B in cm^3 und

d_1 in m

sind nach den Festlegungen in DIN 15 433 Teil 1 und Teil 2 (z. Z. Entwürfe) einzusetzen. Die Stirnflächen der Bremsscheibe A_{21} in m^2 abzüglich der Bremsbelagflächen $A_{11} \cdot k$ in m^2 können somit nach Tabelle 4 und 5 berechnet werden.

Tabelle 5. Konstante Größen für Scheibenbremsen

d_2 mm	b_1 mm	A_{21} $\approx$ m^2	A_{22} $\approx$ m^2	A_{23} $\approx$		A_2 $\approx$	
				innenbelüftet m^2	massiv m^2	innenbelüftet m^2	massiv m^2
250	15	0,0679	0,0750	—	0,0012	—	0,0691
315	15	0,1078	0,1191	—	0,0148	—	0,1226
	30			0,0148	0,0297	0,2417	0,1375
355	15	0,1369	0,1512	—	0,0167	—	0,1536
	30			0,0167	0,0335	0,3048	0,1704
400	15	0,1738	0,1920	—	0,0188	—	0,1926
	30			0,0188	0,0377	0,3846	0,2115
	80			0,0503	—	0,4161	—
450	15	0,2199	0,2430	—	0,0212	—	0,2411
	30			0,0212	0,0424	0,4841	0,2623
500	15	0,2715	0,3000	—	0,0236	—	0,2951
	30			0,0236	0,0471	0,5951	0,3186
	80			0,0628	—	0,6343	—
560	15	0,3406	0,3763	—	0,0264	—	0,3670
	30			0,0264	0,0528	0,7433	0,3934
630	15	0,4310	0,4763	—	0,0297	—	0,4607
	30			0,0297	0,0594	0,9370	0,4904
	112			0,1108	—	1,0181	—
710	30	0,5475	0,6049	0,0335	0,0669	1,1859	0,6144
800	30	0,6950	0,7680	0,0377	0,0754	1,5007	0,7704
	42			0,0528	—	1,5158	—
	112			0,1407	—	1,6037	—
900	30	0,8797	0,9720	0,0424	0,0848	1,8941	0,9645
	42			0,0593	—	1,9110	—
1000	30	1,0860	1,2000	0,0471	0,0942	2,3331	1,1802
	42			0,0660	—	2,3520	—

Die für die Berechnung von Trommel- und Scheibenbremsen zutreffenden Formelzeichen, Einheiten und deren Bedeutung sind für den Bereich der Technischen Mechanik in Tabelle 6 und für den Bereich der Thermodynamik in Tabelle 7 enthalten.

Diese Festlegungen gelten für alle Zahlenwertgleichungen nach Abschnitt 5.

Anmerkung: Zahlenwertgleichungen sind Gleichungen, in denen die Formelzeichen Zahlenwerte bedeuten. Bei den Zahlenwertgleichungen ist stets anzugeben, in welchen Einheiten die in ihnen vorkommenden Größen einzusetzen sind. Die „Einheitenprobe“ ist Nachprüfung einer Gleichung auf richtiges Einsetzen der Größen und Einheiten.

Tabelle 6. Formelzeichen für den Bereich der Technischen Mechanik

Zeichen	Einheit oder Einheitenverhältnis	Bedeutung
a	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Bremsverzögerung $a = \frac{v_{T1} - v_{T2}}{t_B}$, für Stoppbremsen $v_{T2} = 0$
d_1	m oder cm	Bremstrommel-Außendurchmesser bei Trommelbremsen oder wirksamer Reibungsdurchmesser der Bremsscheiben bei Scheibenbremsen
d_R	m	Lauferraddurchmesser abgebremster Räder bei Fahrwerken
d_T	m	Seiltrommel-Durchmesser – auf Mitte Seil bezogen – bei Hubwerken
g	$\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	Fallbeschleunigung $g = 9,81$
i	1	Übersetzung zwischen Bremswelle und Abtriebswelle $i = \frac{n_1}{n_{\text{Abt}}}$
i_F	1	Übersetzung eines Flaschenzuges, entspricht der Anzahl der tragenden Seilstränge in einem Flaschenzug eines Seiltriebes $i_F = \frac{v_T}{v_h} = \frac{n_S}{n_F}$ (siehe DIN 15 020 Teil 1, hierbei beträgt $i_F = n$)
i_{ges}	1	Gesamtübersetzung zwischen Bremswelle und Last $i_{\text{ges}} = i \cdot i_F$
k	1	Anzahl der auf eine Bremsscheibe gleichzeitig wirkenden Bremsbelagpaare Für Trommelbremsen beträgt $k = 1$
m_1	kg	Die Last (Masse), auch Tragfähigkeit oder Traglast genannt, ist die Summe des Gewichtes aus: Nutzlast, Anschlagmittel und Lastaufnahmemittel (siehe DIN 15 003)
m_2	kg	Eigengewicht (Masse) des Tragmittels, z.B. Unterflasche, Traverse oder Gehänge (siehe DIN 15 003)
n	min^{-1}	Drehzahl der Bremswelle
n_1	min^{-1}	Drehzahl der Bremswelle bei Bremsbeginn bezogen auf Nenndrehzahl des Motors
n'_1	min^{-1}	Drehzahl der Bremswelle bei Bremsbeginn bezogen auf übersynchrone Drehzahl des Motors, bedingt durch die Lastbeschleunigung während der Totzeit t_0 , z.B. bei Hubwerken
n_2	min^{-1}	Drehzahl der Bremswelle bei Bremsende, für Stoppbremsen $n_2 = 0$
n_{Abt}	min^{-1}	Drehzahl der Abtriebswelle
n_{Ant}	min^{-1}	Drehzahl der Antriebswelle
n_B	1	Anzahl der Seilstränge, die auf eine Bremse wirken
n_F	1	Anzahl der Flaschenzüge eines Seiltriebes ($n_F = 1; 2$ oder 4)
n_S	1	Anzahl der Seilstränge eines Seiltriebes $n_S = i_F \cdot n_F$
n_T	min^{-1}	Drehzahl der Seiltrommel $n_T = \frac{v_T}{d_T \cdot \pi}$
p	$\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}$	Rechnerische Pressung zwischen Bremsbelag und Bremstrommel oder Bremsscheibe

Tabelle 6. (Fortsetzung)

Zeichen	Einheit oder Einheitenverhältnis	Bedeutung
p_{zul}	$\frac{N}{cm^2}$	zulässige Pressung zwischen Bremsbelag und Bremstrommel oder Bremsscheibe
$p \cdot v_1 \cdot \mu$	$\frac{N}{cm^2} \cdot \frac{m}{s} = \frac{W}{cm^2}$	flächenbezogene Reibleistung der Reibpaarung
q	$\frac{cm^3}{kWh}$	Verschleißwert des Bremsbelages
s_0	m	Nachlaufweg einer geradlinig bewegten Masse während der Totzeit
s_B	m	Nachlaufweg einer geradlinig bewegten Masse während der Bremszeit
s_{ges}	m	gesamter Nachlaufweg zwischen Bremsbefehl und Stillstand $s_{ges} = s_0 + s_B$
t_0	s	Totzeit zwischen Abgabe des Bremsbefehls und Beginn der Bremsverzögerung abhängig von Zeitverhalten des Bremslüftgerätes nach Abschaltung und Einstellung der Bremse
t_B	s	bei Stoppbremsen Bremszeit von Beginn der Bremsverzögerung bis zum Stillstand. bei Regelbremsen Bremszeit von Beginn der Bremsverzögerung bis zur Erreichung der Geschwindigkeit bei Bremsende.
t_{ges}	s	Gesamtzeit zwischen Bremsbefehl und Stillstand $t_{ges} = t_0 + t_B$
v_1	$\frac{m}{s}$	Umfangsgeschwindigkeit bei Bremsbeginn bezogen auf d_1 und Nenndrehzahl des Motors
v'_1	$\frac{m}{s}$	Umfangsgeschwindigkeit bei Bremsbeginn aus übersynchroner Drehzahl n'_1 bezogen auf d_1
v_2	$\frac{m}{s}$	Umfangsgeschwindigkeit bei Bremsende bezogen auf d_1
v_{31} v_{32} $v_{3...}$ v_{3n}	$\frac{m}{s}$	mittlere Umfangsgeschwindigkeit für Bremstrommel oder Bremsscheibe bezogen auf verschiedene unterteilte Durchmesser, z.B. von Ringflächen bei der Drehzahl n_1 der Bremswelle
v_{T1}	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit einer geradlinig bewegten Masse (Translation) bei Bremsbeginn, wenn keine Beschleunigung während der Totzeit eintritt.
v'_{T1}	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit einer geradlinig bewegten Masse im Senksinn bei Bremsbeginn aus übersynchroner Drehzahl n'_{T1} des Motors bedingt durch die Lastbeschleunigung während der Totzeit t_0 , z.B. bei Hubwerken
v_{T2}	$\frac{m}{s}$	Geschwindigkeit einer geradlinig bewegten Masse (Translation) bei Bremsende. Für Stoppbremsen gilt $v_{T2} = 0$
v_h	$\frac{m}{min}$	Hubgeschwindigkeit der Last
v_T	$\frac{m}{min}$	Geschwindigkeit des Drahtseiles auf der Seiltrommel $v_T = v_h \cdot i_F = d_T \cdot \pi \cdot n_T$
z	h^{-1}	Anzahl der Bremsungen je Stunde

Tabelle 6. (Fortsetzung)

Zeichen	Einheit oder Einheitenverhältnis	Bedeutung
ED	%	wirklich vorhandene relative Einschaltdauer des Motors
F	N	Anpreßkraft je Bremsbacke
G	N	Gewichtskraft einer waagrecht geradlinig bewegten Masse (z. B. Kran oder Laufkatze)
J_B	kg m^2	Trägheitsmoment der Bremsscheibe oder Bremsstrommel einschließlich Motorkupplung und anderer mitdrehender Massen, z. B. Wirbelstrombremse
J_G	kg m^2	Trägheitsmoment des Getriebes reduziert auf die Bremswelle
J_M	kg m^2	Trägheitsmoment des Motorläufers reduziert auf die Bremswelle
ΣJ	kg m^2	Summe aller Trägheitsmomente auf die Bremswelle reduziert
L_B	h	Gebrauchsdauer eines Bremsbelages
$M_{B \text{ erf}}$	Nm	erforderliches Bremsmoment bezogen auf eine Bremsscheibe oder -trommel
$M_{B \text{ vorh}}$	Nm	vorhandenes Bremsmoment bezogen auf eine Bremsscheibe oder -trommel
$M_{B \text{ zul}}$	Nm	zulässiges Bremsmoment bezogen auf eine Bremsscheibe oder -trommel
M_L	Nm	Moment der ruhenden Last und der Widerstände, z. B. aus Reibung und Wind, bezogen auf die Bremswelle (Last)
M_N	Nm	Nennmoment des Motors
M_R	Nm	Verzögerungsmoment der umlaufenden Masse bezogen auf die Bremswelle (Rotation)
M_T	Nm	Verzögerungsmoment der geradlinig bewegten Masse bezogen auf die Bremswelle (Translation)
P_N	kW	Nennleistung des Motors
Q	N	Hubkraft ist die Gewichtskraft einer senkrecht bewegten Masse. Für Hubwerke gilt: $Q = (m_1 + m_2) \cdot g$
S	N	Statische Seilzugkraft an der Seiltrommel zur Berechnung der Seilkraft nach DIN 15 020 Teil 1 beim Heben der Nennlast (Motor treibt an) $S = \frac{Q}{i_F \cdot n_F \cdot \eta_F}$
S_T	N	Seilzugkraft an der Seiltrommel zur Berechnung von M_L bei ruhender Nennlast (Last treibt an) $S_T = \frac{Q \cdot \eta_F}{i_F \cdot n_F} = S \cdot \eta_F^2$
V_B	cm^3	verschleißbares Volumen eines Bremsbelagpaares
W_B	kWh	Bremsarbeit je Bremsung
W_F	N	Fahrwiderstandskraft an den Laufrädern
W_w	N	Reaktionskraft des Winddruckes an den Laufrädern
β	Grad	Steigungswinkel der Fahrbahn
ε	$\frac{1}{\text{s}^2}$	Winkelverzögerung $\varepsilon = \frac{\omega_1 - \omega_2}{t_B}$, für Stoppbremsen $\varepsilon = \frac{\omega_1}{t_B}$
ψ_B	1	dynamischer Beiwert bei Notbremsung
η	1	mechanischer Wirkungsgrad des Triebwerkes

Tabelle 6. (Fortsetzung)

Zeichen	Einheit oder Einheitenverhältnis	Bedeutung
η_F	1	mechanischer Wirkungsgrad eines Flaschenzuges (siehe DIN 15 020 Teil 1)
η_{ges}	1	mechanischer Gesamtwirkungsgrad $\eta_{ges} = \eta \cdot \eta_F$
μ	1	Gleitreibungszahl zwischen Bremsbelag und Gegenwerkstoff (siehe DIN 15 436)
μ_m	1	Mittelwert der Gleitreibungszahl zwischen Bremsbelag und Bremstrommel oder Bremsscheibe
μ_{max}	1	größter Einzelwert der Gleitreibungszahl zwischen Bremsbelag und Bremstrommel oder Bremsscheibe
μ_{min}	1	kleinster Einzelwert der Gleitreibungszahl zwischen Bremsbelag und Bremstrommel oder Bremsscheibe
ω	$\frac{1}{s}$	Winkelgeschwindigkeit der Bremswelle
ω_1	$\frac{1}{s}$	Winkelgeschwindigkeit der Bremswelle bei Bremsbeginn $\omega_1 = \frac{\pi \cdot n_1}{30}$
ω_2	$\frac{1}{s}$	Winkelgeschwindigkeit der Bremswelle bei Bremsende $\omega_2 = \frac{\pi \cdot n_2}{30}$, bei Stoppbremsen $\omega_2 = 0$

Tabelle 7. Formelzeichen für den Bereich der Thermodynamik

Zeichen	Einheit oder Einheitenverhältnis	Bedeutung
a	$\frac{m^2}{s}$	Temperaturleitfähigkeit $a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$
c	$\frac{J}{kg \cdot K}$	spezifische Wärmekapazität $c = \frac{C^*}{m}$
m	kg	Masse $m = V \cdot \rho$
$\dot{q}$	$\frac{W}{m^2} = \frac{J}{s \cdot m^2}$	Wärmestromdichte = Wärmestrom pro Fläche
q_A	$\frac{J}{cm^2}$	flächenbezogene Reibarbeit
$\dot{q}_A$	$\frac{W}{cm^2} = \frac{J}{s \cdot cm^2}$	flächenbezogene Reibleistung $\dot{q}_A = p \cdot v_1 \cdot \mu$
q_v	$\frac{J}{cm^3}$	volumenbezogene Reibarbeit
$\dot{q}_v$	$\frac{W}{cm^3} = \frac{J}{s \cdot cm^3}$	volumenbezogene Reibleistung
t	s	Zeit
A	$m^2; cm^2$	Fläche des Wärmestromes an der Bremstrommel oder Bremsscheibe
C	$\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$	Strahlungskonstante für Wärmestrom zwischen Bremstrommel oder Bremsscheibe und Umgebung

Tabelle 7. (Fortsetzung)

Zeichen	Einheit oder Einheitenverhältnis	Bedeutung	
C^*	$\frac{\text{J}}{\text{K}}$	Wärmekapazität	
Q	J	Wärmemenge	das Joule ist die kohärente Einheit für Wärmemenge, Energie und Arbeit $1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2}$
E_B	J	Bremsenergie	
W_B	J	Bremsarbeit	
Nu	1	Ähnlichkeits-Kennzahl nach Nusselt $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$	
T	K	thermodynamische Temperatur	
$\Delta T = \Delta \vartheta$	K; °C	Temperaturdifferenz	
T_0	K	$T_0 = 273,15 \text{ K} = 0 \text{ °C}$ $0 \text{ K} = - 273,15 \text{ °C}$	
T_1	K	thermodynamische Temperatur der strahlenden Fläche der Bremsstrommel oder Bremsscheibe $T_1 = \vartheta_1 + T_0$	
T_2	K	thermodynamische Temperatur der Umgebung einer Bremsvorrichtung $T_2 = \vartheta_2 + T_0$	
V	$\text{m}^3; \text{cm}^3$	Volumen	
W^*	$\frac{\text{W}}{\text{m}^3} = \frac{\text{J}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}}$	Ergiebigkeit (Wärmemenge je Raum- und Zeiteinheit) $W^* \triangleq \dot{q}_v$	
α	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} = \frac{\text{J}}{\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}}$	Wärmeübergangskoeffizient $\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}$	
ϑ_1	°C	Beharrungstemperatur der Bremsstrommel oder Bremsscheibe bezogen auf den Bremsstrommelkranz oder die Bremsscheibenstege	
$\vartheta_1 \text{ vorh}$	°C	vorhandene Beharrungstemperatur	
$\vartheta_1 \text{ zul}$	°C	zulässige Beharrungstemperatur	
ϑ_2	°C	durchschnittliche Raumtemperatur in der Umgebung einer Bremsvorrichtung	
$\vartheta_s \text{ zul}$	°C	zulässige Spitzentemperatur im Beharrungszustand während des Bremsens	
$\vartheta_0 \text{ zul}$	°C	zulässige Oberflächenspitzentemperatur während des Bremsens	
λ	$\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} = \frac{\text{J}}{\text{m} \cdot \text{K} \cdot \text{s}}$	Wärmeleitfähigkeit	
ϱ	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Dichte	
Φ	W	Wärmestrom; das Watt ist die kohärente Einheit für Wärmestrom, Energiestrom und Leistung $1 \text{ W} = 1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = 1 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^3}$	
Φ_A	W	abführbarer Wärmestrom	

Tabelle 7. (Fortsetzung)

Zeichen	Einheit oder Einheitenverhältnis	Bedeutung
Φ_{A1}	W	abführbarer Wärmestrom aus Strahlung
Φ_{A2}	W	abführbarer Wärmestrom aus freier Strömung während des Stillstandes der Bremswelle
Φ_{A3}	W	abführbarer Wärmestrom aus erzwungener Strömung des Laufes der Bremswelle
$\Phi_{A\text{ ges}}$	W	gesamter abführbarer Wärmestrom
Φ_E	W	entstehender Wärmestrom
$\Phi_{E\text{ ges}}$	W	gesamter entstehender Wärmestrom
Λ_{th}	$\frac{W}{K}$	Wärmeleitwert = Wärmeübergangskoeffizient mal Fläche $\Lambda_{th} = \alpha \cdot A$
∇	$\frac{1}{m}$	Laplacescher Differentialoperator in rechtwinkligen kartesischen Koordinaten
$\frac{dT}{dt}$	$\frac{K}{s}$	zeitabhängiger Temperaturgradient

4 Berechnung der Haltebremsen

Wenn feststeht, daß die Bremse nur bei Stillstand der Bremscheibenwelle wirksam ist, dann muß das vorhandene Bremsmoment bei kleinster betriebsmäßig auftretender Gleitreibungszahl $\mu_{\min}$ größer sein als das größte auftretende Lastmoment einschließlich aller dynamischen Wirkungen (z. B. Ausleger-Haltebremsen Kräfte aus Schwingungen des Auslegers beim Fahren). Aus sicherheitstechnischen Gründen wird hierfür nicht die Haftreibungszahl μ_0 eingesetzt. Auf ausreichende Bemessung aller Übertragungsglieder zwischen Lastangriff und Bremse ist dabei zu achten. Somit gilt $M_{B\text{ vorh}} > M_{B\text{ erf}}$; wenn nicht anders vereinbart, gilt $M_{B\text{ vorh}} \geq 2 \cdot M_{B\text{ erf}}$.

Die kleinste betriebsmäßige Haftreibungszahl kann auch aus experimentellen Versuchen ermittelt werden. Es ist dann der kleinste Einzelwert $\mu_{\min}$ nach DIN 15 436 einzusetzen.

5 Berechnung der Stoppbremsen

Für Stoppbremsen kann der Mittelwert der Gleitreibungszahl μ_m nach DIN 15 436 in die Bremsenberechnung ohne Beiwert eingesetzt werden, wenn der kleinste Einzelwert 80% des Mittelwertes nicht unterschreitet. Hierbei dürfen Prüf- und Betriebsbedingungen nicht in wesentlichen Einflüssen voneinander abweichen (siehe hierzu auch DIN 15 436).

5.1 Erforderliches Bremsmoment

$$M_{B\text{ erf}} = M_L + M_R + M_T \text{ in Nm} \quad (1)$$

M_L Moment der ruhenden Last und der Widerstände, z. B. aus Reibung und Wind

M_L bei Fahrwerksbremsen:

$$M_L = [\pm (G + Q) \sin \beta \pm W_w - W_F] \frac{d_R \cdot \eta}{2 \cdot i} \text{ in Nm} \quad (2)$$

Hierzu Vorzeichenregel:

- + $(G + Q) \sin \beta$ beim Bremsen in Richtung Fahrbahnneigung
- $(G + Q) \sin \beta$ beim Bremsen in Richtung Fahrbahnsteigung
- + W_w beim Bremsen mit Rückenwind
- W_w beim Bremsen mit Gegenwind

Das maximale Lastmoment beim Bremsen tritt somit auf bei Fahrbahnneigung und Rückenwind:

$$M_{L\text{ max}} = [(G + Q) \sin \beta + W_w - W_F] \frac{d_R \cdot \eta}{2 \cdot i} \text{ in Nm} \quad (3)$$

Bei Betrieb in geschlossenen Hallen ist die Reaktionskraft des Winddruckes an den Laufrädern mit $W_w = 0$ einzusetzen. Wenn nicht anders vereinbart, kann eine horizontale Fahrbahn angenommen werden.

Bei horizontaler Fahrbahn und bei Rückenwind gilt:

$$M_L = (W_w - W_F) \frac{d_R \cdot \eta}{2 \cdot i} \text{ in Nm} \quad (4)$$

Es ist darauf zu achten, daß das auf die Laufräder übertragene Bremsmoment kleiner ist als das Rutschmoment des Laufrades, in der Regel bei kleinster Radlast berechnet.

M_L bei Hubwerksbremsen:

Für die Berechnung von M_L je Bremse ist die Anzahl der Seilstränge n_B , die auf eine Bremse wirken, einzusetzen. Für die am häufigsten vorkommenden Anwendungsfälle, z. B. $i_F = 2$ oder 4 und $n_F = 2$ sind eine oder zwei Seiltrommeln und eine Bremse vorhanden. Hierfür ist $n_B = 2$ einzusetzen.

Somit gilt an der Bremswelle bei ruhender Nennlast:

$$M_L = \frac{n_B \cdot S_T \cdot d_T \cdot \eta}{2 \cdot i} \text{ in Nm} \quad (5)$$

Hierbei ist zu beachten, daß die Seilzugkraft an der Seiltrommel zur Berechnung von M_L bei ruhender Nennlast

$$S_T = \frac{Q \cdot \eta_F}{n_s} = \frac{Q \cdot \eta_F}{n_F \cdot i_F} \text{ in N}$$

und die Hubkraft

$$Q = (m_1 + m_2) \cdot g \text{ in N}$$

einzusetzen sind.

Nur bei voll ausgenutztem Hubmotor $P_{\text{erf}} = P_N$ folgt bei $n_{\text{Antr}} = n_1$ aus

$$M_L = M_N \cdot \eta_{\text{ges}}^2$$

$$P_N = \frac{Q \cdot v_h}{1000 \cdot 60 \cdot \eta_{\text{ges}}} = \frac{M_N \cdot \omega}{1000} \text{ in kW und } \omega = \frac{\pi \cdot n_1}{30} \text{ in } \frac{1}{s}$$

