

D. Blitzstoßströme und ihre Funktionen

In diesem Anhang sind die in der Arbeit verwendeten Blitzstoßstromfunktionen und ihre Parameter zusammengefasst. In Kapitel 7.1 sind die Berechnungen an der betrachteten Windenergieanlage (WEA) entsprechend der Norm DIN EN 62305-1 [17] mit der Heidler-Funktion durchgeführt worden. Damit können die natürlichen Blitzstoßströme nachgebildet werden [138, 139]:

$$i_B^H(t) = \frac{\hat{I}}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (\text{D.1})$$

wobei τ_1 und τ_2 die Stirn- und die Rückenzeitkonstante des Stoßstromes sind, n ist der Stromsteilheitsfaktor für den Anstieg (typisch $n = 10$) und η ist der Korrekturfaktor für den Stromscheitelwert (siehe **Tab. D.1**). Der Blitzstoßstromscheitelwert \hat{I} ist vom Gefährdungspegel (LPL) abhängig [17] und nach der Norm IEC 61400-24 [5] ist für den Blitzschutz von WEA stets Gefährdungspegel LPL I zu wählen (**Tab. D.2**).

Tab. D.1 Parameter für Blitzstoßstromfunktionen (τ in μs)

Blitzstoßströme	Heidler			Doppelt-exponentiell		
	τ_1	τ_2	η	τ_1	τ_2	η
Positiver Erstblitzstoßstrom PEB	18,8	485	0,93	4,064	470,107	0,951
Negativer Erstblitzstoßstrom NEB	1,826	285	0,988	0,374	284,328	0,99
Negativer Folgeblitzstoßstrom NFB	0,454	143,4	0,993	0,092	143,134	0,995

Tab. D.2 Kenngrößen der Blitzstoßströme für Gefährdungspegel LPL I

Blitzstoßströme	$T_1/T_2, \mu s/\mu s$	\hat{I}, kA	Q, C	$W/R, MJ/\Omega$	$\hat{I}/T_1, kA/\mu s$	$(di/dt)_{\max}$ (Heidler) $kA/\mu s$	k^*
PEB	10/350	200	100	10	20	27,3	1,365
NEB	1/200	100	28,7	1,44	100	139	1,39
NFB	0,25/100	50	7,2	0,18	200	279	1,395

* Die maximale Steilheit für beliebige Scheitelwerte der Heidler-Funktion kann einfach über den Faktor k berechnet werden: $(di/dt)_{\max} = k \cdot \frac{\hat{I}}{T_1}$; für Stoßstrom 8/20 μs $k = 1,561$.

In Kapitel 6.3.2 und im folgenden **Anhang E** wird noch eine weitere Funktion für die Nachbildung von künstlich erzeugten Stoßströmen (z.B. im Stoßstromlabor) erwähnt, nämlich die „doppelt-exponentielle“ Funktion, die den Stoßstromverlauf mit der Summe zweier e-Funktionen beschreibt:

$$i_B^{de}(t) = \frac{\hat{I}}{\eta} \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} - e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right) \quad (\text{D.2})$$

wobei τ_1 und τ_2 wiederum die Stirn- und die Rückenzeitkonstante des Stoßstromes und η der Stromausnutzungsfaktor sind. Die Parameter für die doppelt-exponentielle Funktion und für die Heidler-Funktion sind in der **Tab. D.1** aufgelistet. Der Stromausnutzungsfaktor η wird für beide Funktionen wie folgt ermittelt.

$$\begin{array}{ll} \text{Für Heidler Funktion:} & \text{Für doppelt-exponentielle Funktion:} \\ \eta = \exp \left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} \cdot \left(n \cdot \frac{\tau_2}{\tau_1} \right)^{\frac{1}{n+1}} \right) & \eta = \left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} \right) \cdot \left(\frac{\tau_2^{\tau_1}}{\tau_1^{\tau_2}} \right)^{\frac{1}{\tau_1 - \tau_2}} \end{array} \quad (\text{I.3})$$

Die Kenngrößen für die Blitzstoßströme entsprechend dem Blitzgefährdungspegel LPL I sind in **Tab. D.2** aufgelistet. Diese Grenzwerte weichen von jenen Kenngrößen ab, die für den Blitzgefährdungspegel LPL W in JIS C 1400-24 [33] definiert sind (siehe Abschnitt 3).

Die Stromsteilheit beginnt im Stromverlauf bei der Heidler-Funktion mit Null und erreicht etwas höhere Werte als mit der einfachen Abschätzung \hat{I}/T_1 (**Tab. D.2**) in der Stirn. Die induzierten Überspannungen sind proportional zur Stromsteilheit, die in benachbarten Leiterschleifen entstehen können. Der Scheitelwert von Überspannungen bei Blitzstoßströmen kann relativ einfach auf andere Blitzstoßströme umgerechnet werden. Dafür wird ein Umrechnungsfaktor (Steilheitsverhältnis f) eingeführt (**Tab. D.3**), welches für die Validierung des Berechnungsmodells in Kapitel 7.2 verwendet wurde.

Tab. D.3 *Steilheitsverhältnis zwischen unterschiedlichen Blitzstoßströmen*

Blitzstoßströme	Steilheitsverhältnis f		
	PEB	NEB	NFB
PEB	1	5	10
NEB	0,2	1	2
NFB	0,1	0,5	1

Zum Beispiel bei der Umrechnung der Stromsteilheit bzw. der resultierenden Überspannung bei einem NEB auf einen NFB wird $f_{\text{NEB} \rightarrow \text{NFB}} = 2$ genutzt und es ergibt sich $(di/dt)_{\text{NEB}} \cdot f_{\text{NEB} \rightarrow \text{NFB}} = 139 \text{ kA}/\mu\text{s} \cdot 2 \approx 279 \text{ kA}/\mu\text{s} \approx (di/dt)_{\text{NFB}}$.

E. Frequenzbereich von Blitzströmen

Für die graphische Darstellung des Frequenzbereichs eines Blitzstoßstromes, der mit der Heidler-Funktion repräsentiert wird (siehe Kapitel 7.1), muss eine Fourier-Transformation der Stromfunktion durchgeführt werden. Es gibt allerdings keine analytische Transformation für die Heidler-Funktion in den Frequenzbereich, da sie nicht integrierbar ist. Daher werden unterschiedliche Approximationen für die Heidler-Funktion benutzt. Die Betrachtung wird hier mit zwei Approximationen durchgeführt.

Die erste Approximation wurde von Heidler und Hopf vorgeschlagen [140, 139]:

$$I_H(\omega, t) = \frac{\hat{I}}{\eta} \cdot (A(\omega) - B(\omega)) \cdot \exp\left(-\frac{\tau_1}{\tau_2} - j\omega\tau_1\right) \quad (\text{E.1})$$

mit

$$A(\omega) = \frac{1}{\frac{1}{\tau_2} + j\omega} \cdot \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\omega\tau_1}{20}\right)^2\right]^5} \quad (\text{E.2})$$

und

$$B(\omega) = \frac{0,07}{\frac{4,2}{\tau_1} + j\omega} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{j\omega\tau_1}{9}\right)}{\left[1 + \left(\frac{\omega\tau_1}{50}\right)^2\right]^5} \quad (\text{E.3})$$

wobei τ_1 und τ_2 die Stirn- und die Rückenzeitkonstante des Stoßstromes und η der Stromausnutzungsfaktor sind (siehe Anhang D).

Die zweite Approximation für die Heidler-Funktion wurde von Terespolsky [141] entwickelt, kann mit einer einfachen Gleichung dargestellt werden und benötigt weniger Rechenleistung:

$$I_T(\omega) = \frac{\hat{I}}{\eta} \cdot \frac{1}{j\omega + \frac{1}{\tau_2}} \cdot \frac{1}{\left(\frac{j\omega + \frac{1}{\tau_2}}{\omega_0} + 1\right)^n} \quad (\text{E.4})$$

wobei τ_2 sind wieder die Rückenzeitkonstante des Stoßstromes und η der Stromausnutzungsfaktor sind, ω_0 ist eine Anstiegsfrequenzkonstante und n der Steilheitsfaktor. Die Parameter ω_0 und n werden empirisch ermittelt [141, 142] und die Parameter τ_2 und η stimmen mit den entsprechenden Parametern der Heidler-Funktion überein (siehe **Tab. E.1**).

Zum Vergleich wird noch die bekannte doppelt-exponentielle Funktion (Summe zweier e-Funktionen) betrachtet. Für diese Stromfunktion existiert eine analytische Fourier-Integraltransformation, weil die Funktion integrierbar ist:

$$\begin{aligned} I_{\text{dexp}}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} i_e(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = \int_0^{\infty} i_e(t) \cdot e^{-j\omega t} dt = \\ &= \frac{\hat{I}}{\eta} \cdot \frac{\tau_2 - \tau_1}{(1 + j\omega \cdot \tau_2) \cdot (1 + j\omega \cdot \tau_1)} \end{aligned} \quad (\text{E.5})$$

und die Amplitudendichte ist damit:

$$|I_{\text{dexp}}(\omega)| = \frac{\hat{I}}{\eta} \cdot \frac{\tau_2 - \tau_1}{\sqrt{(1 + \omega^2 \cdot \tau_2^2) \cdot (1 + \omega^2 \cdot \tau_1^2)}} \quad (\text{E.6})$$

Tab. E.1 Parameter für die betrachteten Approximationen

Amplitudendichte-Funktion	$\tau_1, \mu\text{s}$	$\tau_2, \mu\text{s}$	n	$\omega_0, \text{rad/s}$	\hat{I}, kA	η
Erster positiver Stoßstrom 10/350 μs						
$I_H(\omega)$	18,8	485	10	-	200	0,93
$I_T(\omega)$	-	485	33	1768211	200	0,93
$I_{\text{dexp}}(\omega)$	4,064	470	-	-	200	0,951
Erster negativer Stoßstrom 1/200 μs						
$I_H(\omega)$	1,826	285	10	-	100	0,988
$I_T(\omega)$	-	285	33	18350000	100	0,988
$I_{\text{dexp}}(\omega)$	0,374	284	-	-	100	0,99
Negativer Folgestoßstrom 0,25/100 μs						
$I_H(\omega)$	0,454	143,4	10	-	50	0,993
$I_T(\omega)$	-	143,4	33	$74 \cdot 10^6$	50	0,993
$I_{\text{dexp}}(\omega)$	0,092	143,1	-	-	50	0,995

Die Funktion in Gleichung (E.6) lässt sich in drei Bereiche unterteilen (siehe **Tab. E.2**), die mit Eckfrequenzen f_τ definiert sind.

Tab. E.2 Frequenzbereiche der doppelt-exponentiellen Funktion

Frequenzbereich	Amplitudendichte $ I_{\text{dexp}}(\omega) $	Funktionswert
$f < f_{\tau 1} = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_2}$	$\frac{\hat{I}}{\eta} \cdot (\tau_2 - \tau_1)$	A
$\frac{1}{2\pi \cdot \tau_2} < f < \frac{1}{2\pi \cdot \tau_1}$	$\frac{\hat{I}}{\eta} \cdot \frac{1 - \frac{\tau_1}{\tau_2}}{2\pi \cdot f}$	B
$\frac{1}{2\pi \cdot \tau_1} = f_{\tau 2} < f$	$\frac{\hat{I}}{\eta} \cdot \frac{\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2}}{(2\pi \cdot f)^2}$	C

In **Tab. E.3** sind diese Eckfrequenzen für alle untersuchten Impulsformen mit deren Funktionswerten angegeben.

Tab. E.3 Parameter der Blitzstoßströme für den Frequenzgang der doppelt-exponentiellen Funktion

Stromform	\hat{I}, kA	$f_{\tau 1}$	$f_{\tau 2}$	A , A/Hz	B , A/Hz	C , A/Hz
10/350 μs	200	339 Hz	39,2 kHz	≈ 98	$\approx 33182/f$	$\approx 1299467176/f^2$
1/200 μs	100	560 Hz	426 kHz	≈ 29	$\approx 16055/f$	$\approx 6832241362/f^2$
0,25/100 μs	50	1,11 kHz	1,73 MHz	$\approx 7,2$	$\approx 8000/f$	$\approx 13831694966/f^2$

Die Amplitudendichte-Spektren sind für alle betrachteten Approximationen in **Abb. E.1 a)** für den positiven Erstblitzstoßstrom mit 200 kA gezeigt. Die Eckfrequenzen $f_{\tau 1}$ und $f_{\tau 2}$ für alle drei Approximationen sind gleich. Die höchste interessierende Frequenz f_h stimmt hier mit der zweiten Eckfrequenz überein ($f_h \approx f_{\tau 2}$). Gleiche Darstellungen wurden auch für den ersten negativen Stoßstrom 1/200 μs mit 100 kA in **Abb. E.1 b)** und für den negativen Folgestoßstrom 0,25/100 μs mit 50 kA in **Abb. E.1 c)** erstellt. Die Approximationen für alle betrachteten Stoßströme stimmen bis zur zweiten Eckfrequenz $f_{\tau 2}$ sehr gut überein, die als höchste interessierende Frequenz f_h angenommen werden kann.

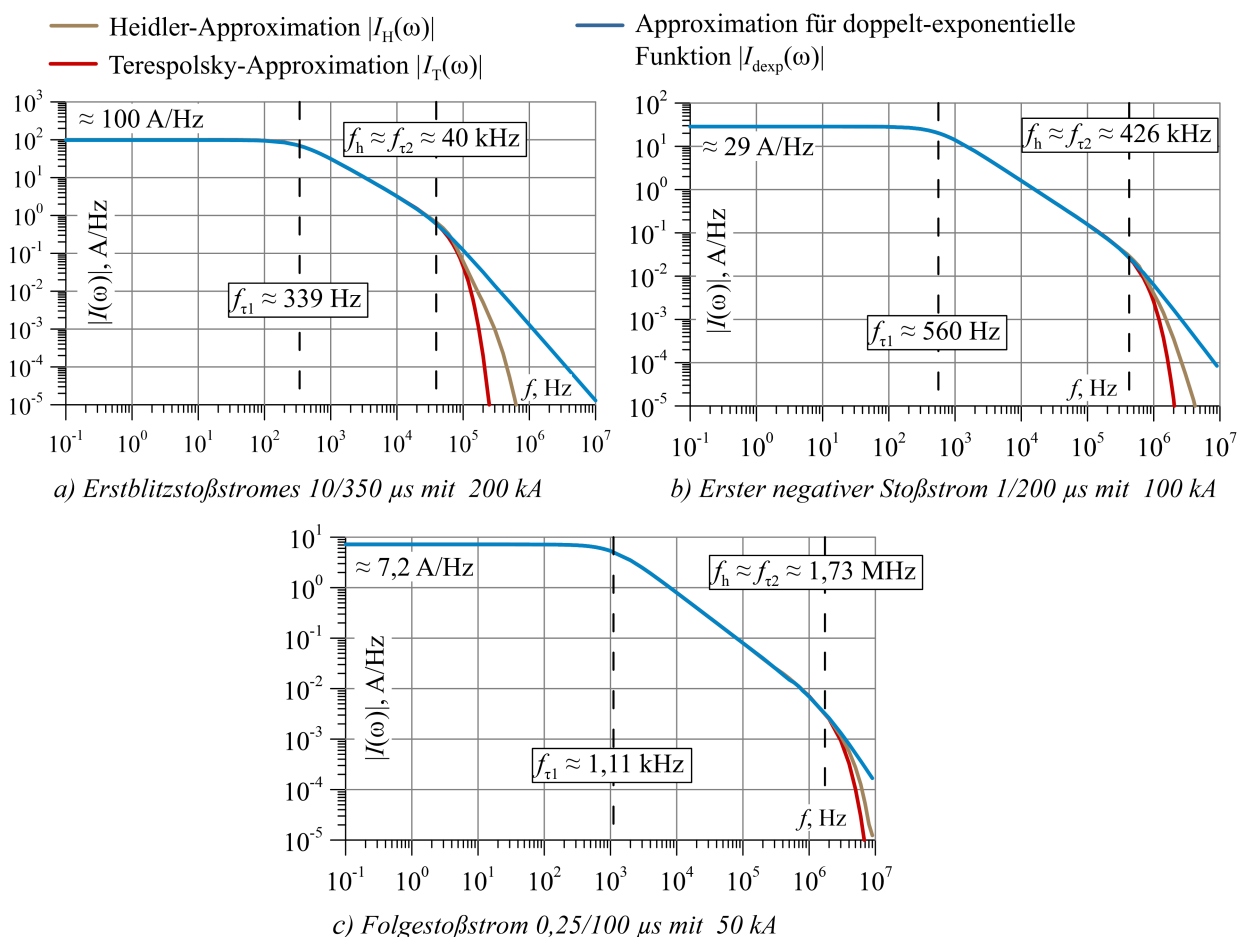


Abb. E.1 Amplitudendichte-Spektren der aperiodischen Blitzstoßströme (Eckfrequenzen exakt für doppelt-exponentielle Darstellung angegeben)

Die **Tab. E.4** zeigt einfach zu bestimmende Frequenzwerte für die verwendeten Blitzstoßstromformen. Grundsätzlich entspricht die höchste interessierende Frequenz f_h [57] der 2. Eckfrequenz. Zum Vergleich sind in der **Tab. E.4** die höchsten interessierenden Frequenzen f_h und die mittleren Stirnfrequenzen $f_{\text{äq}}$ (Äquivalenzfrequenzen) zusammengestellt. Die höchste interessierende Frequenz, die den Messbereich für die Blitzstrommesseinheit bestimmen soll, kann über den Faktor $5/\pi \approx 1,6$ aus der Äquivalenzfrequenz berechnet werden.

Tab. E.4 Frequenzwerte der untersuchten Blitzstoßströme

Stromform T_1/T_2	Stirnzeit T_1 , μs	$f_h = \frac{1,25}{\pi \cdot T_1}$, kHz	$f_{\text{äq}} = \frac{1}{4 \cdot T_1}$, kHz
10/350 μs	10	40	25
1/200 μs	1	400	250
0,25/100 μs	0,25	1600	1000

Die Bandbreite der Messeinheit sollte den Frequenzbereich von $f = 0$ bis zur 2. Eckfrequenz aller zu betrachteten Blitzströme abdecken, worin sich die „Blitzstromenergie“ hauptsächlich konzentriert.

Die erhaltenen Amplitudendichte-Spektren sind auch für den Blitzschutz bzw. den LEMP-Schutz von Bedeutung, da die Verläufe für die Amplitudendichte der Blitzströme (A/Hz) mit dem der Amplitudendichte des Magnetfeldes (A/m/Hz) im „Nahfeldbereich“ identisch sind.