

Bild A1: DSC-Kurven der PE-HD-K- und PE-HD-L-Werkstoffe sowie der PE-HD-Werkstoffe D350 und D500 (1. Heizlauf)

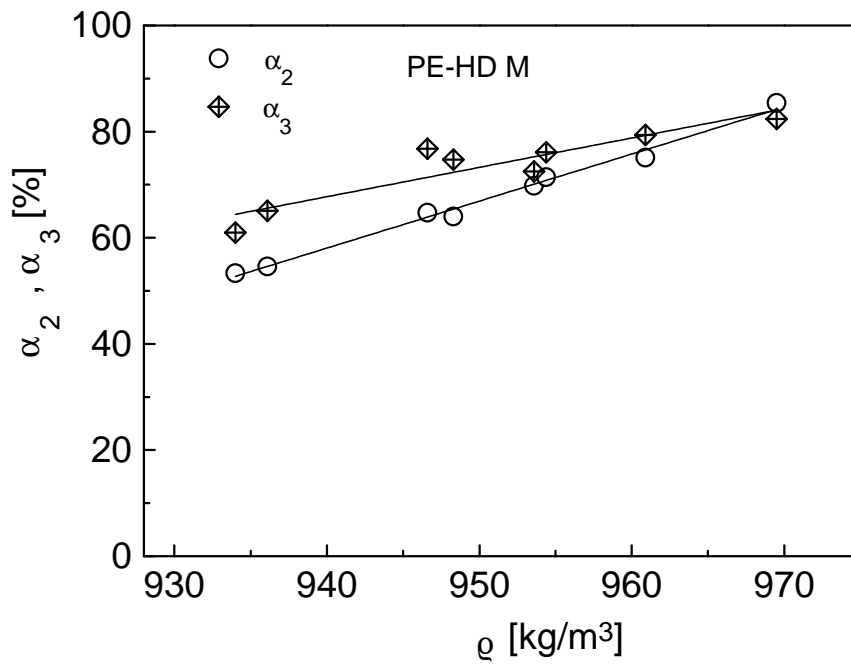


Bild A2: Kristallinitäten  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  für die PE-HD-M-Werkstoffe in Abhängigkeit von der Dichte

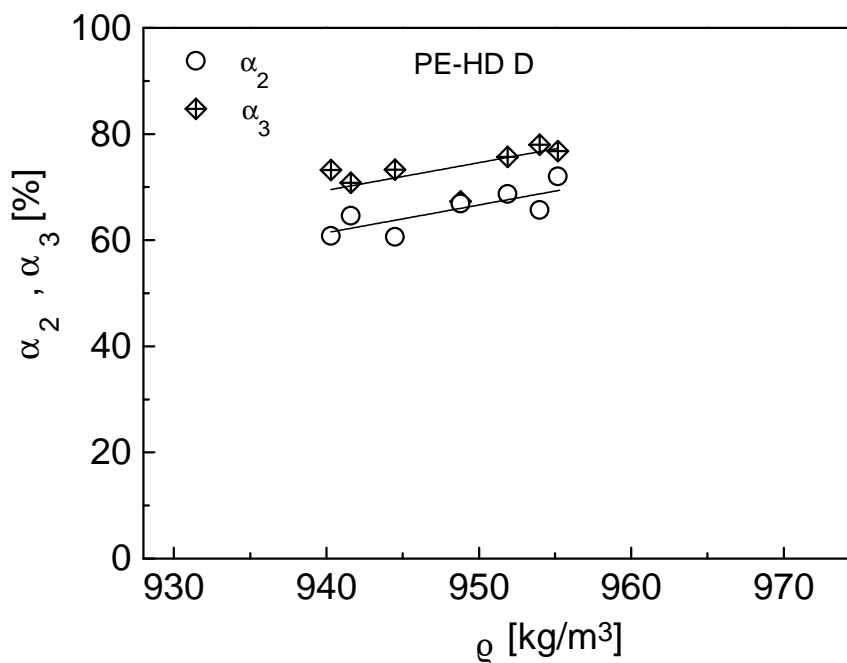


Bild A3: Kristallinitäten  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  für die PE-HD-D-Werkstoffe in Abhängigkeit von der Dichte



Bild A4: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes M36

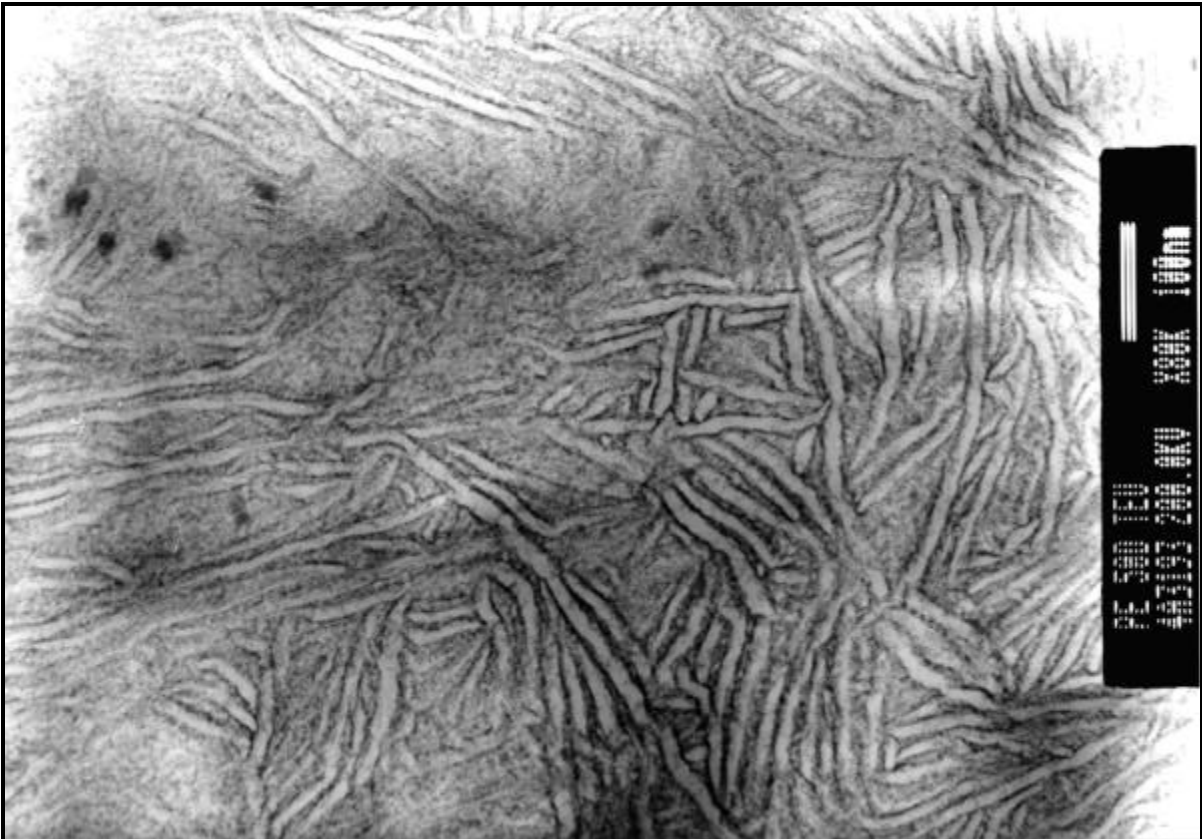


Bild A5: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes M48

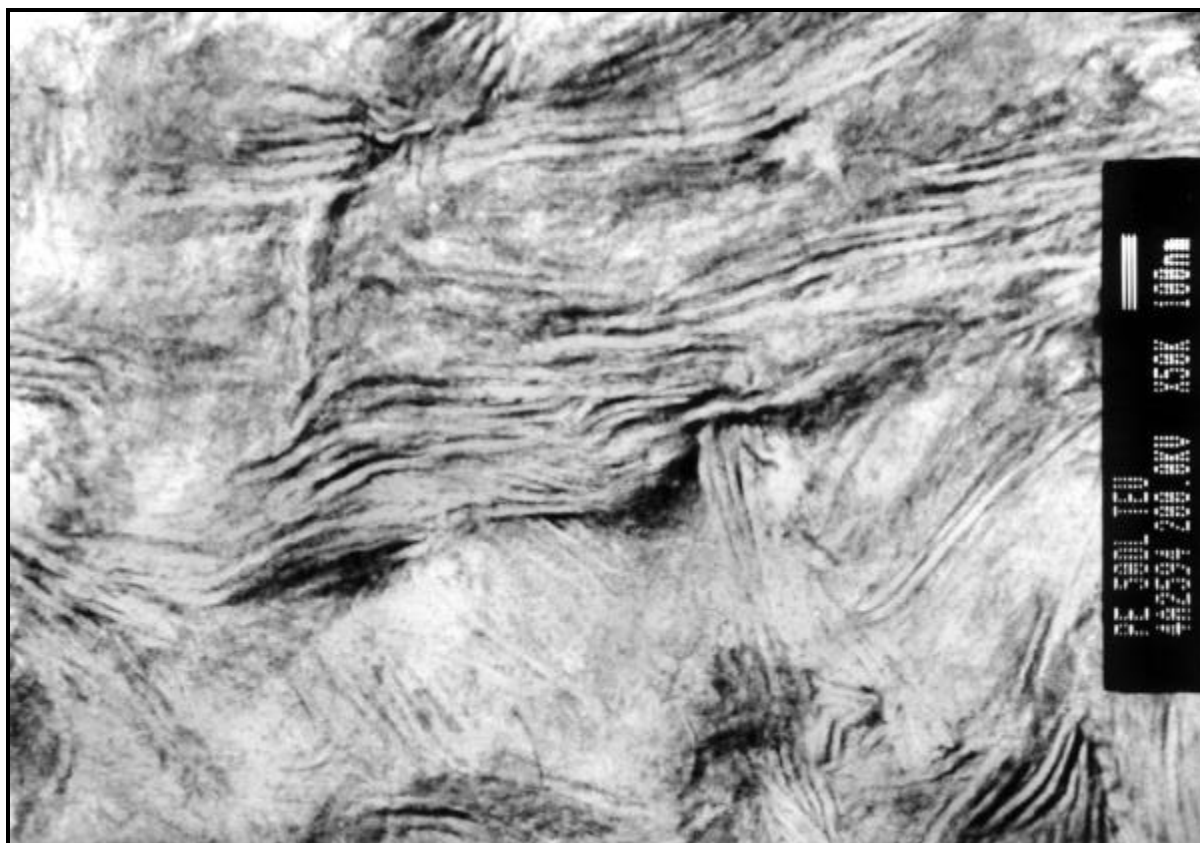


Bild A6: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes M48L

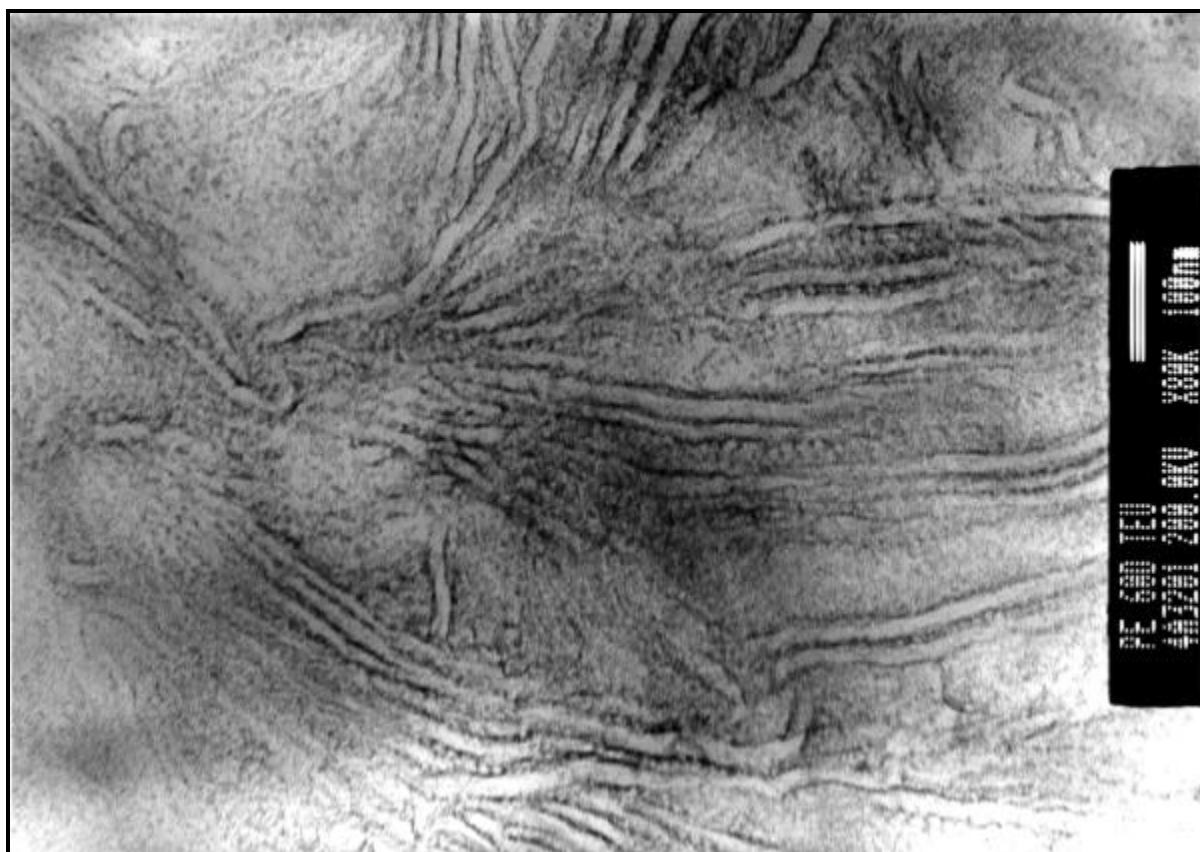


Bild A7: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes M60

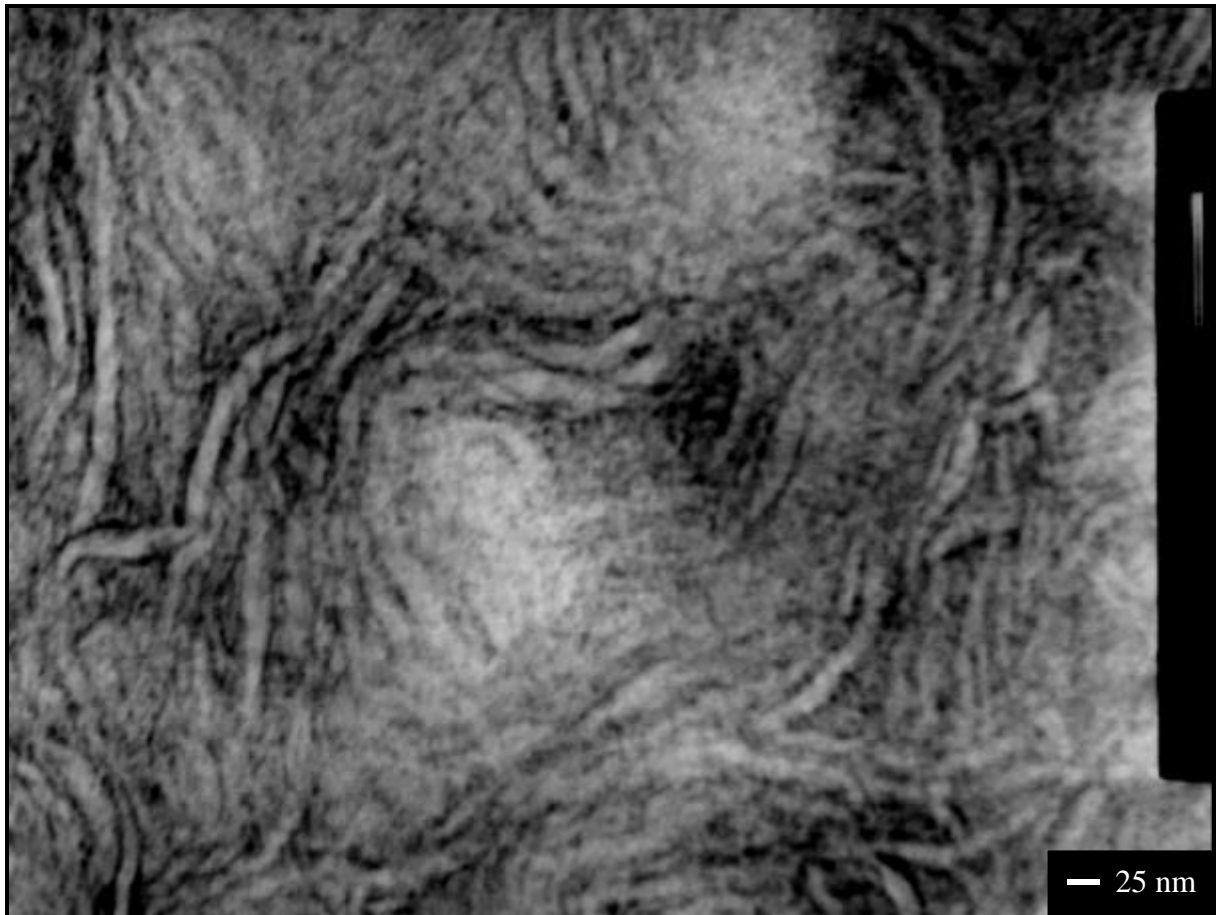


Bild A8: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes M60L



Bild A9: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes D90

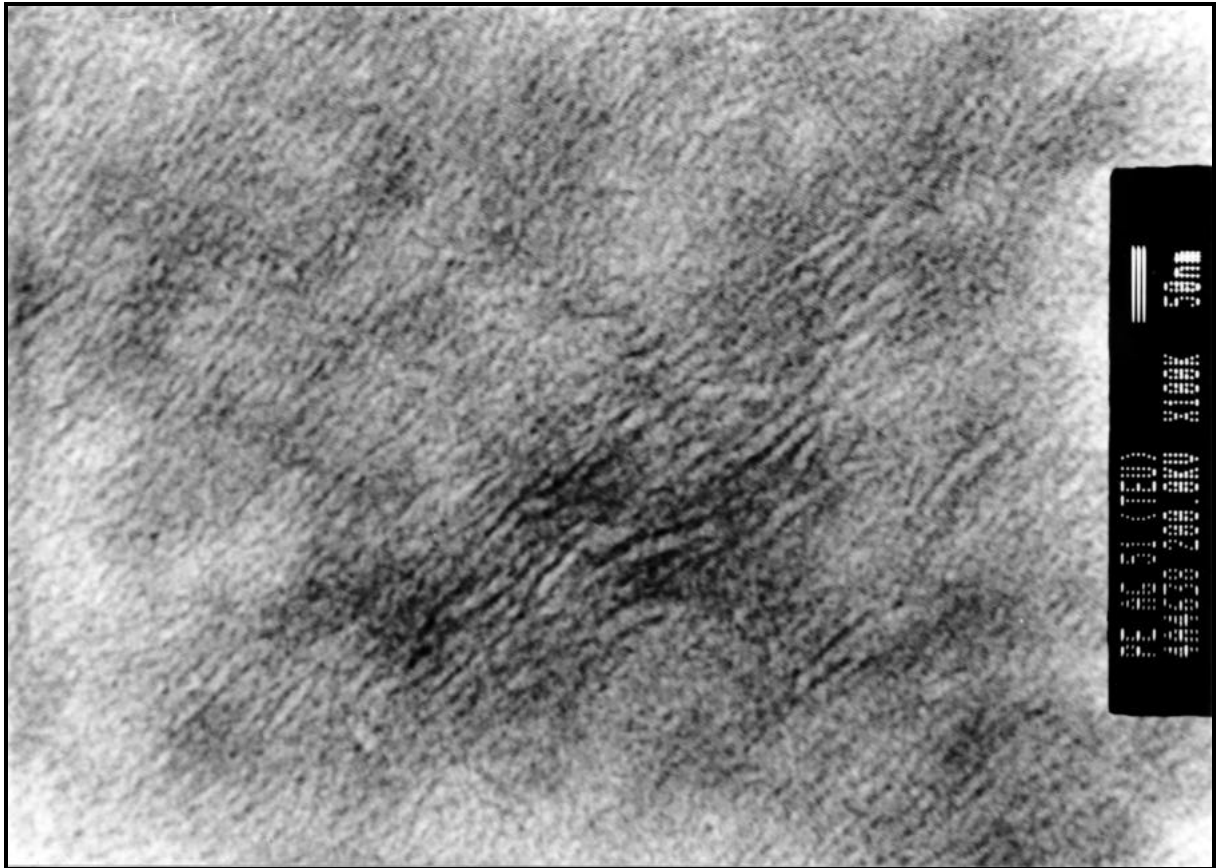


Bild A10: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes D350

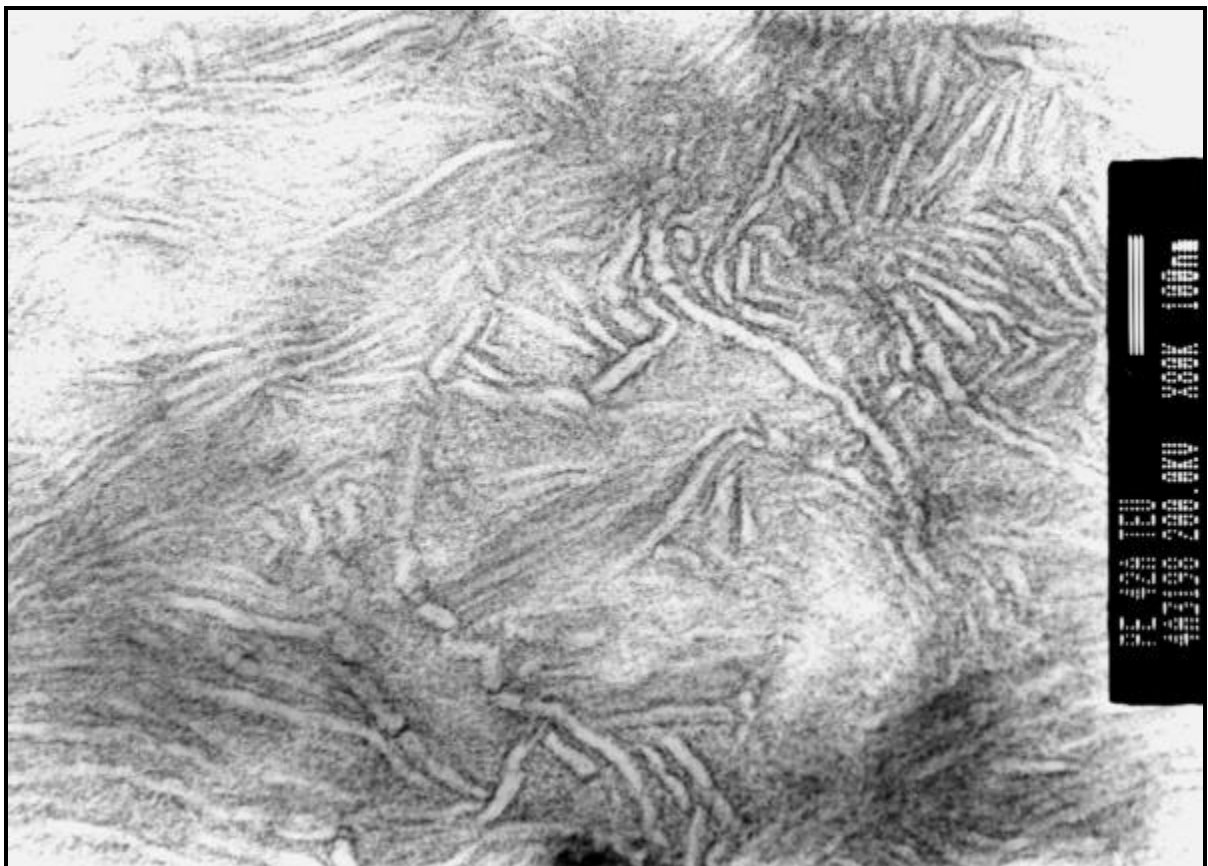


Bild A11: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes D360

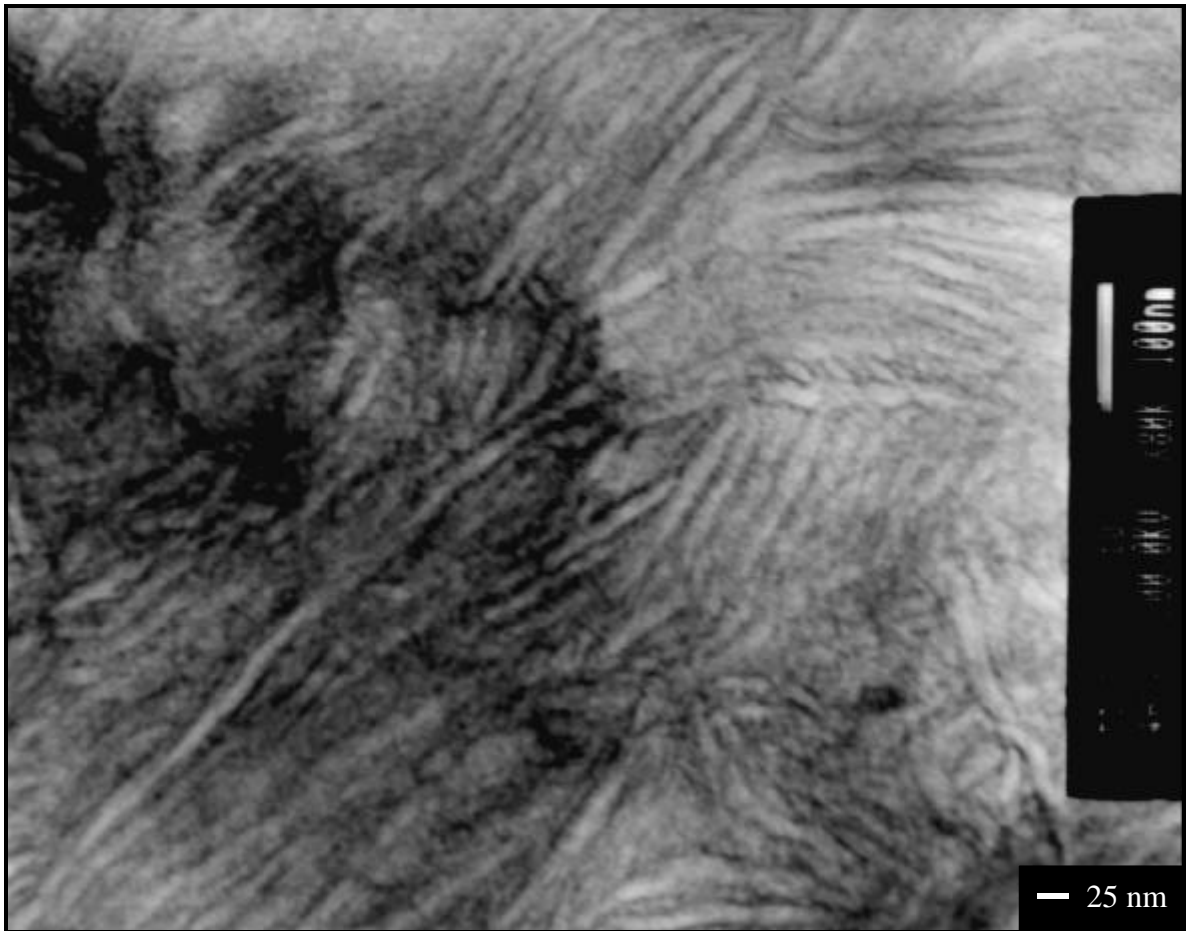


Bild A12: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes D500

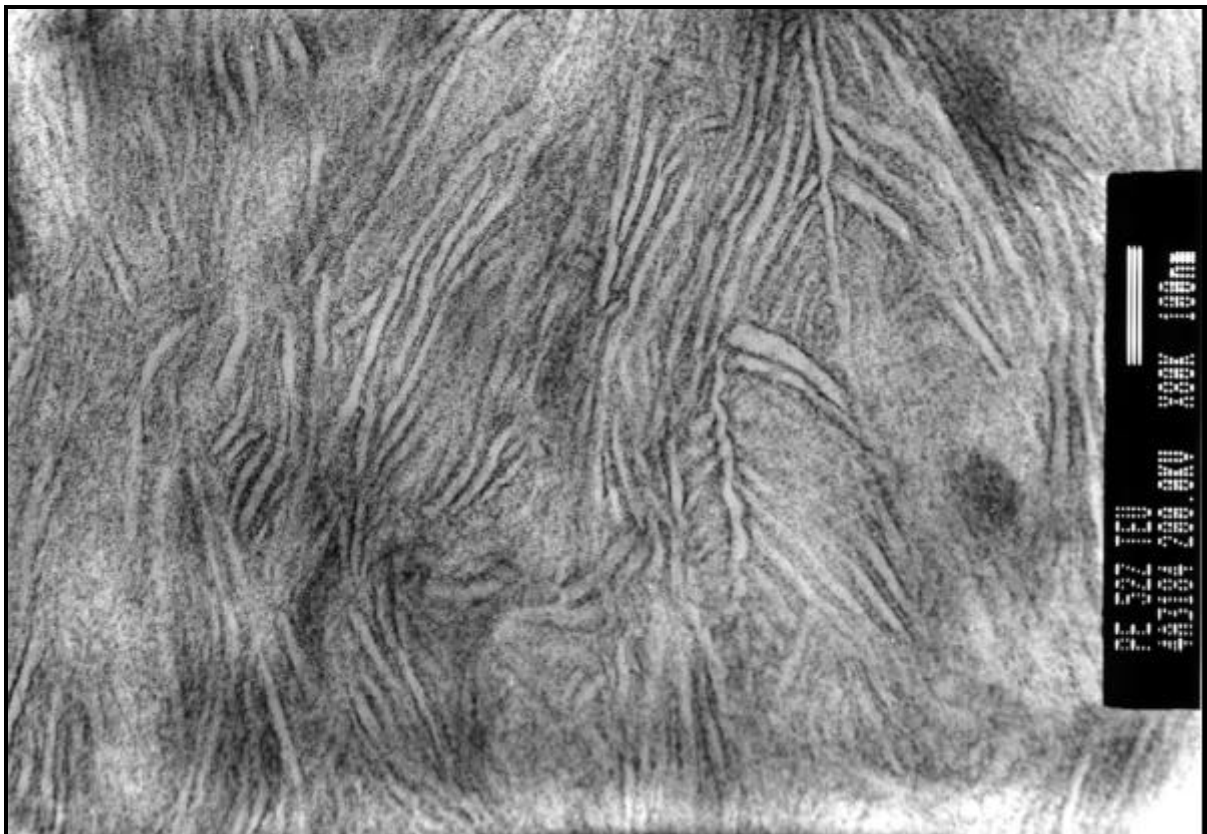


Bild A13: Lamellenstruktur des PE-HD-Werkstoffes D550

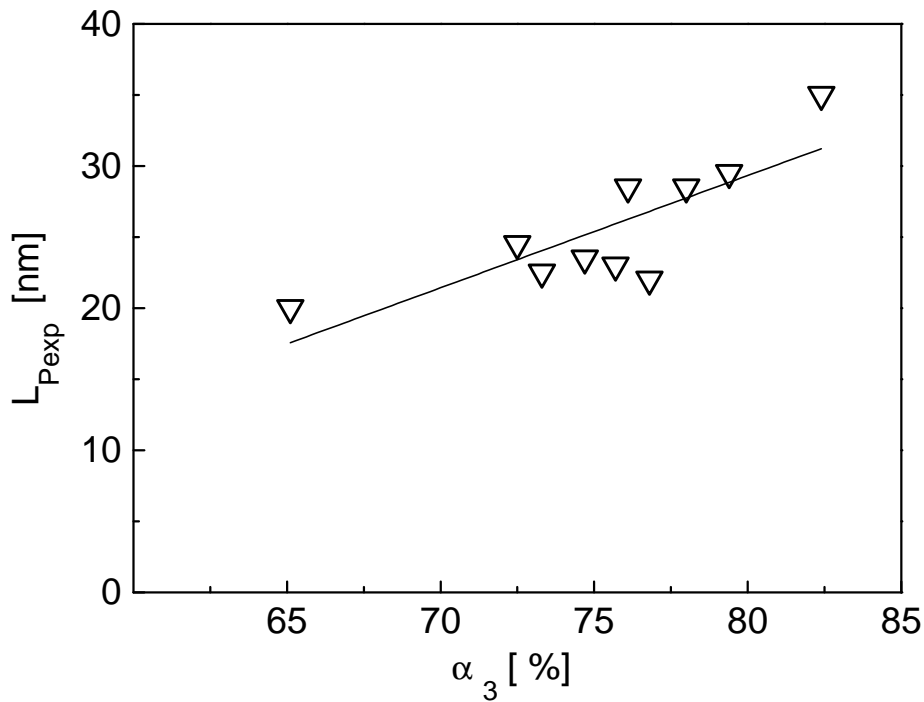


Bild A14: Langperiode in Zusammenhang mit der Kristallinität, beide mittels Röntgenmessungen bestimmt

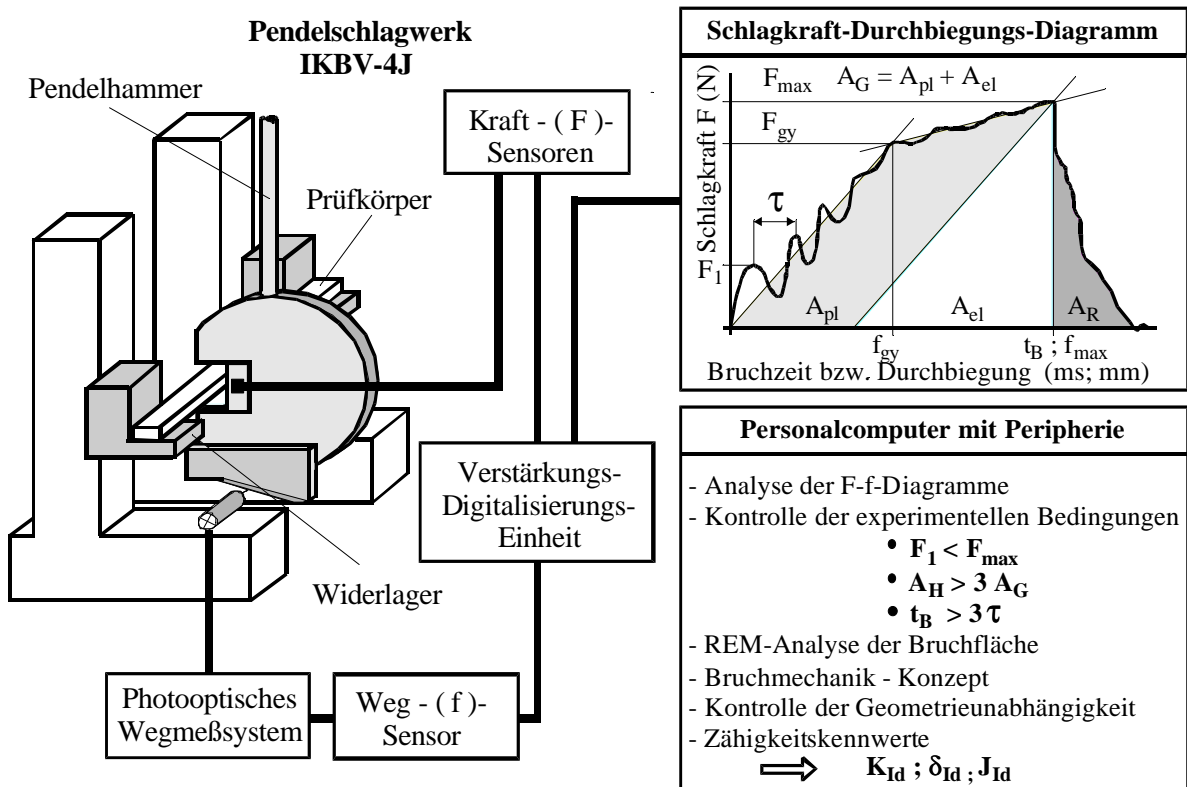


Bild A15: Schema der Prüfanordnung des instrumentierten Kerbschlagbiegeversuches



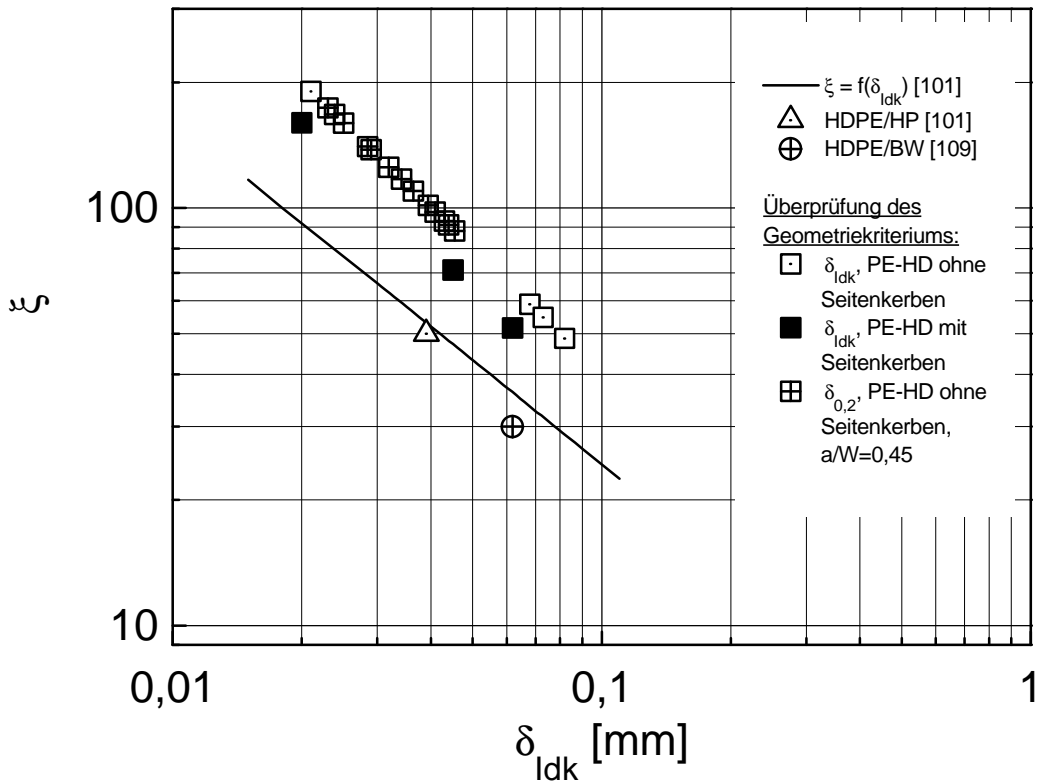


Bild A16: Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie bei der Bestimmung von kritischen Rissöffnungsverschiebungen  $d_{idk}$  bei instabiler Rissausbreitung und  $d_{0,2}$  bei stabiler Rissausbreitung

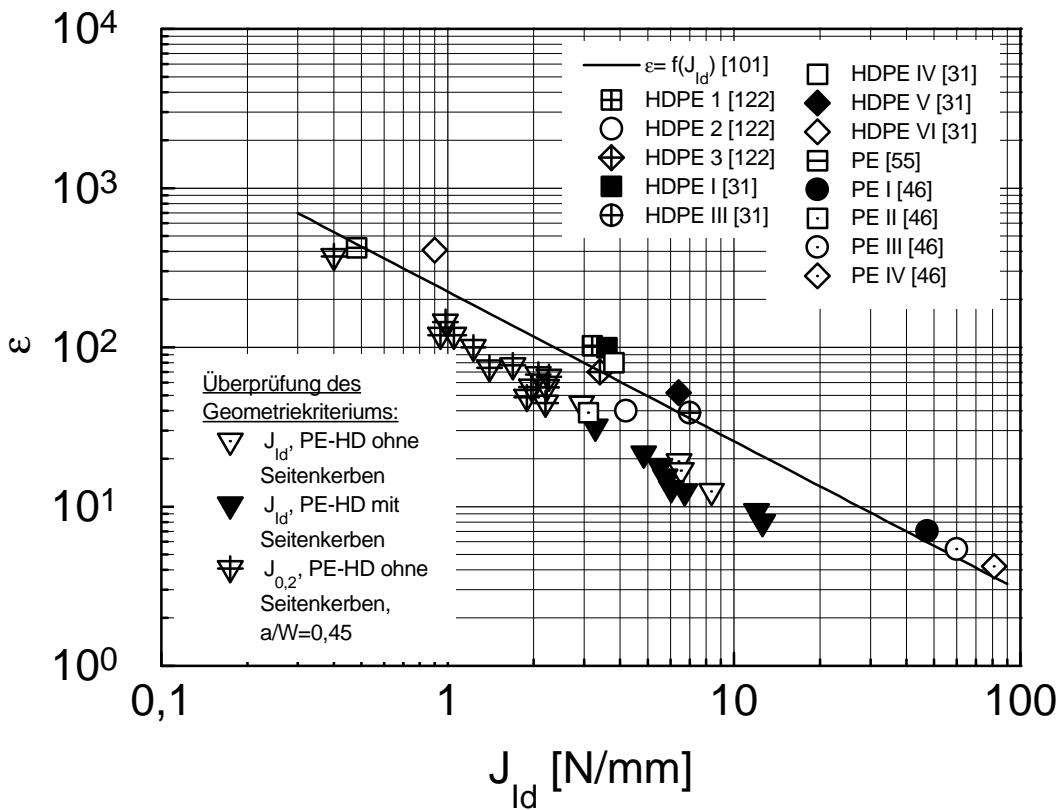


Bild A17: Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie bei der Bestimmung von J-Integral-Werten  $J_{id}$  bei instabiler Rissausbreitung und  $J_{0,2}$  bei stabiler Rissausbreitung

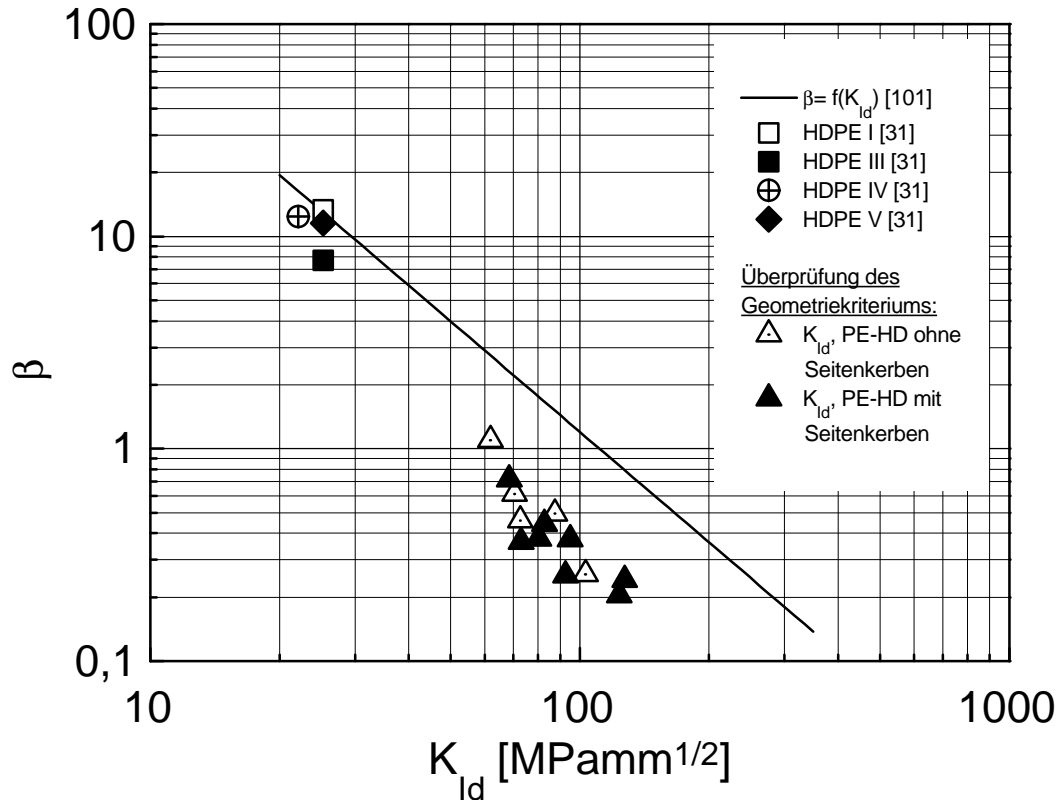


Bild A18: Anforderungen an die Prüfkörpergeometrie bei der Bestimmung der dynamischen Bruchzähigkeit  $K_{Id}$  bei instabiler Rissausbreitung

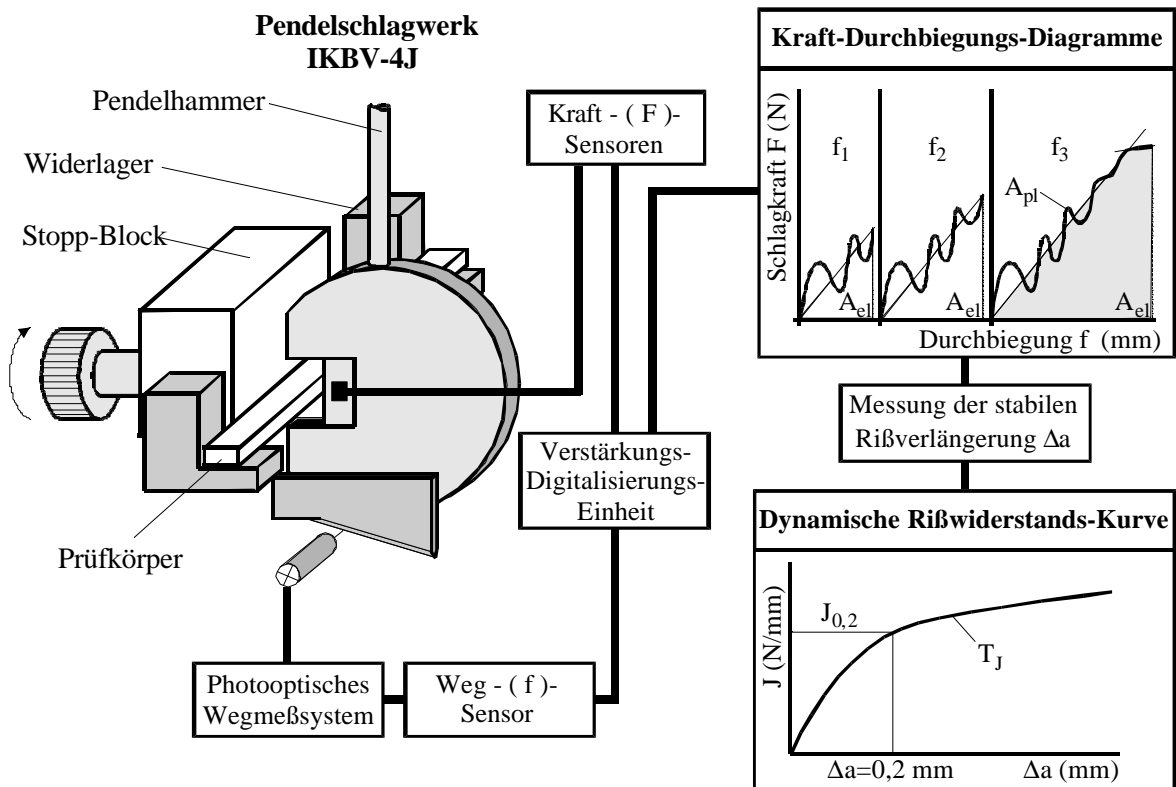


Bild A19: Schema der Stopp-Block-Prüfanordnung für den instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch

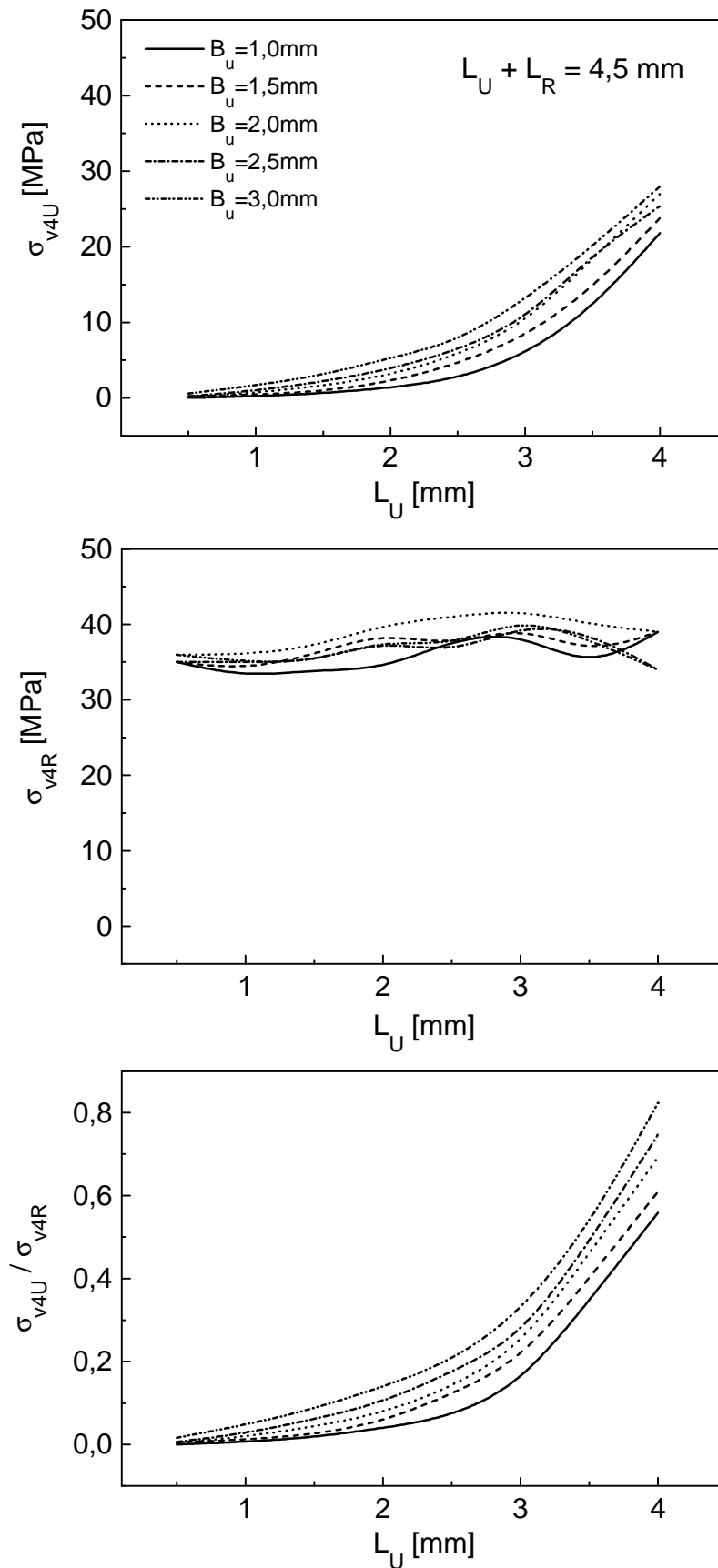


Bild A20: Einfluss von U-Kerb-Breite  $B_U$  und U-Kerb-Länge  $L_U$  auf das Spannungsverhalten vor der Rissspitze ( $L_R$  – Rasierklingenkerblänge, Vergleichsspannungen am U-Kerb  $\sigma_{v4U}$  und am Rasierklingenkerb  $\sigma_{v4R}$ )

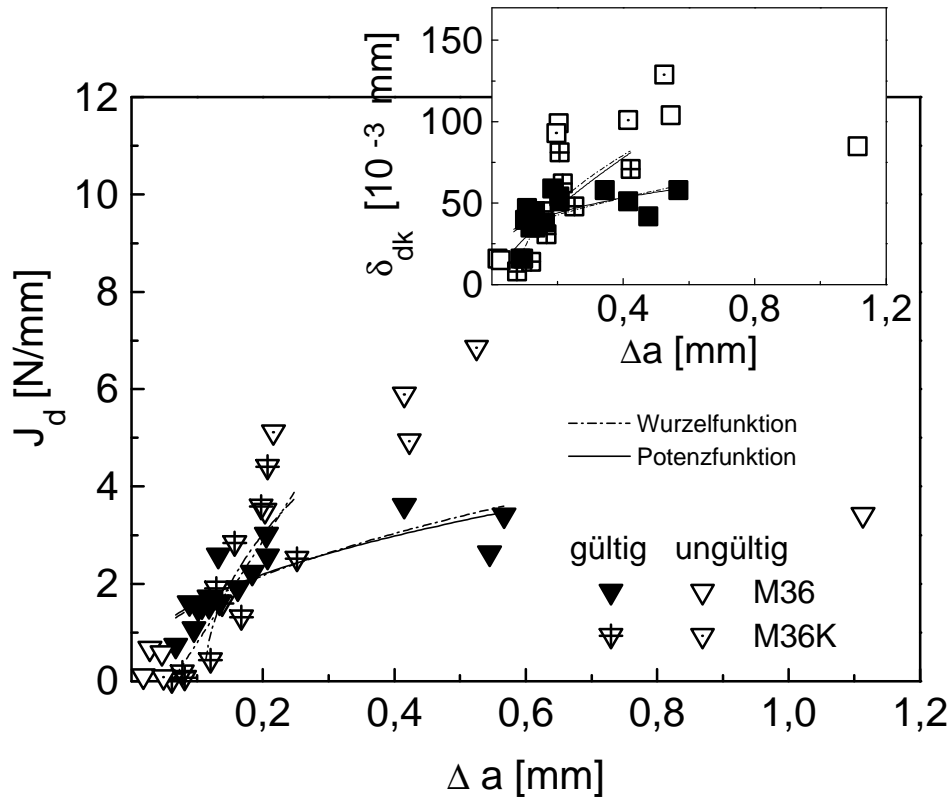


Bild A21:  $J_d$ - und  $d_{dk}$ -R-Kurven der PE-HD-Werkstoffe mit einer Kristallinität von 53,3 % und 54,6 % (PE-HD M36 und M36K) bei konstantem Molekulargewicht von 220 kg/mol

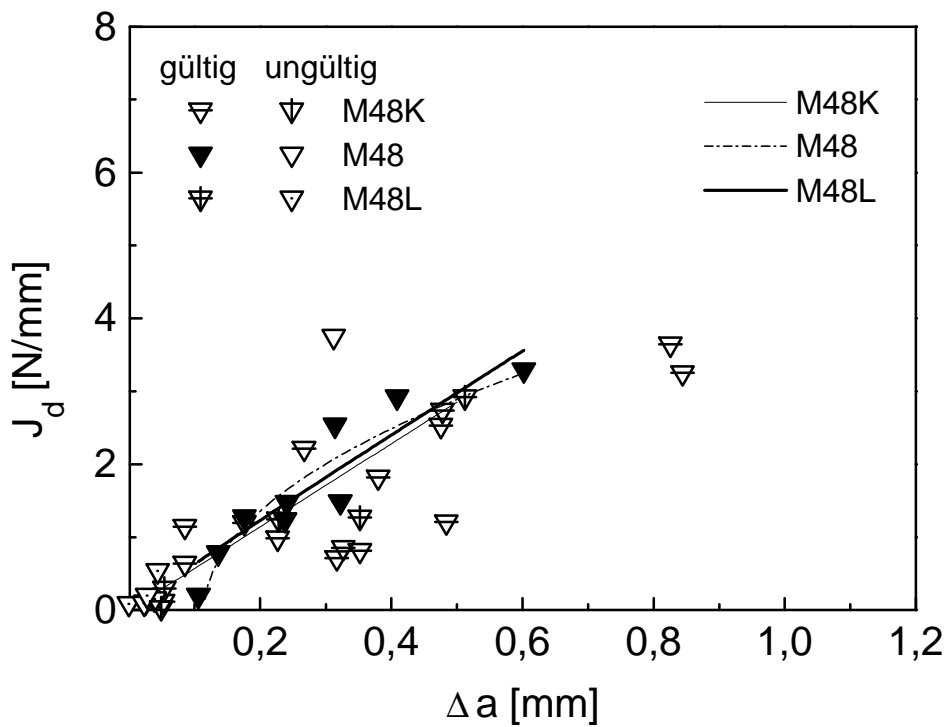


Bild A22:  $J_d$ -R-Kurven der PE-HD-Werkstoffe mit einer Kristallinität von 64,7 bis 71,4 % (PE-HD M48, M48K und M48L) bei konstantem Molekulargewicht von 220 kg/mol

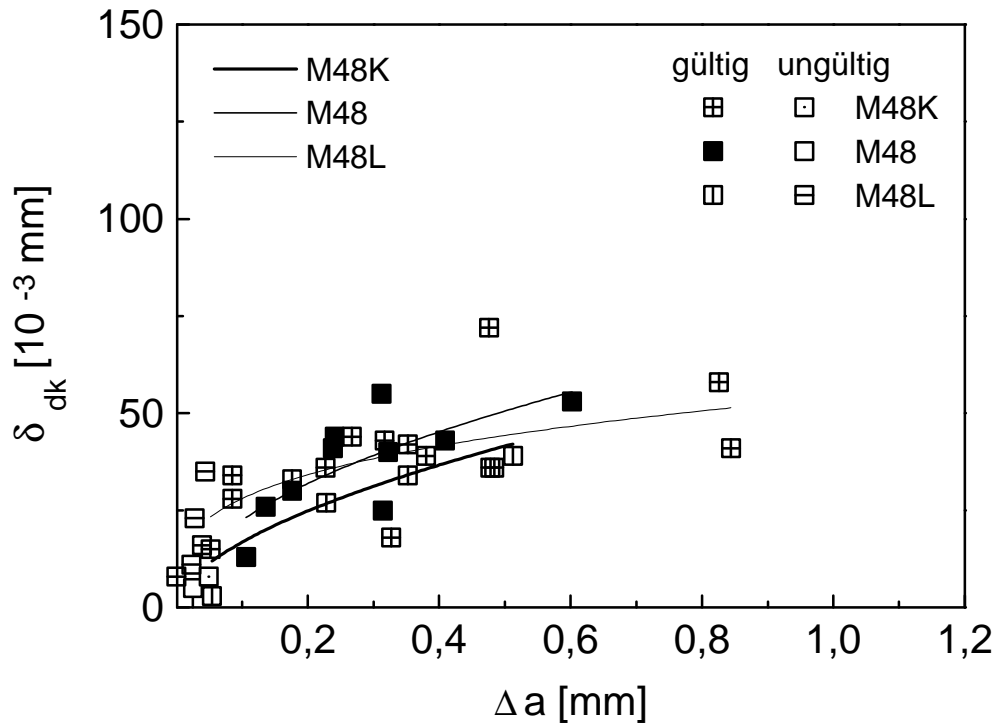


Bild A23:  $d_{dk}$ -R-Kurven der PE-HD-Werkstoffe mit einer Kristallinität von 64,7 bis 71,4 % (PE-HD M48, M48K und M48L) bei konstantem Molekulargewicht von 220 kg/mol

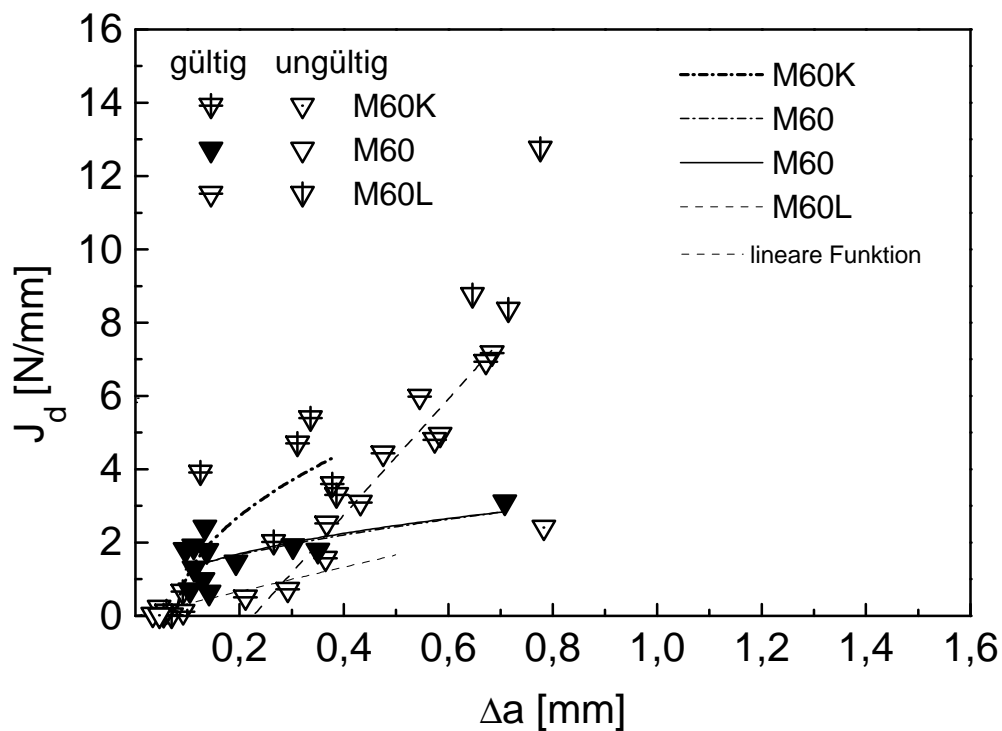


Bild A24:  $J_d$ -R-Kurven der PE-HD-Werkstoffe mit einer Kristallinität von 69,8 % bis 85,4 % (PE-HD M60K, M60 und M60L) bei konstantem Molekulargewicht von 220 kg/mol

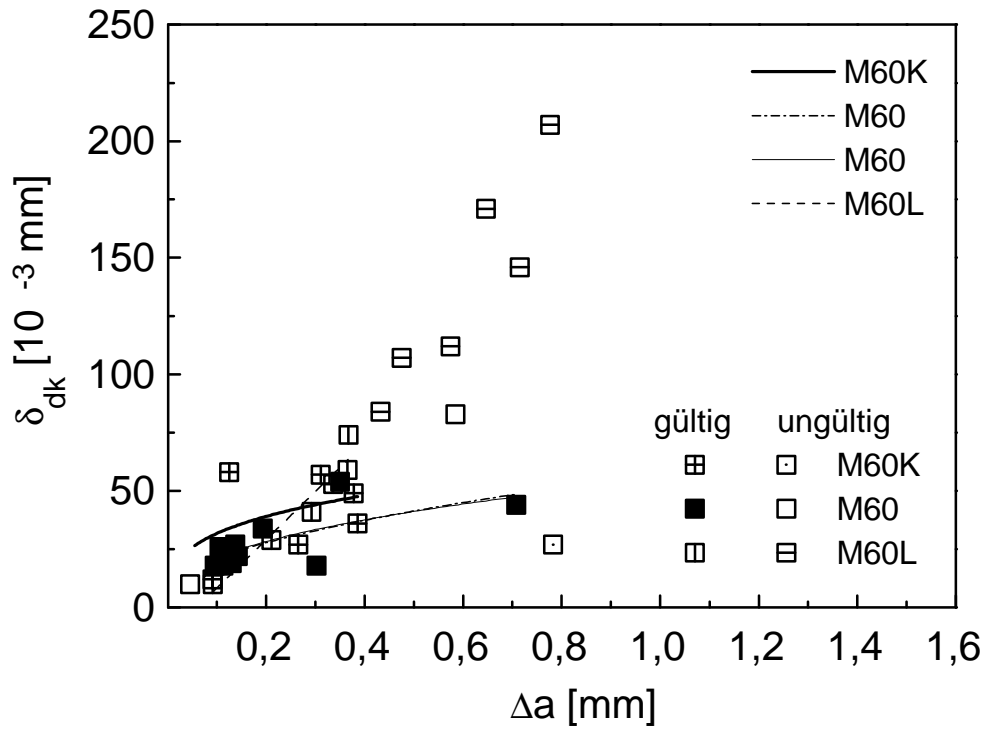


Bild A25:  $d_{dk}$ -R-Kurven der PE-HD-Werkstoffe mit einer Kristallinität von 69,8 % bis 85,4 % (PE-HD M60K, M60 und M60L) bei konstantem Molekulargewicht von 220 kg/mol

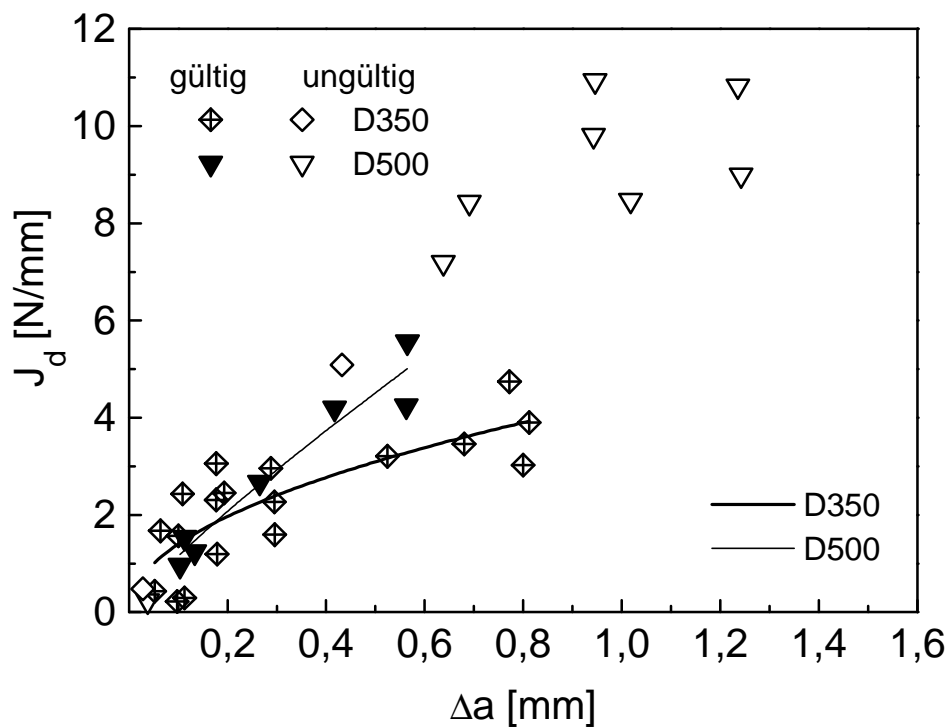


Bild A26:  $J_d$ -R-Kurven der PE-HD-Werkstoffe mit einem Molekulargewicht von 350 kg/mol bzw. 500 kg/mol (PE-HD D350 und D500)

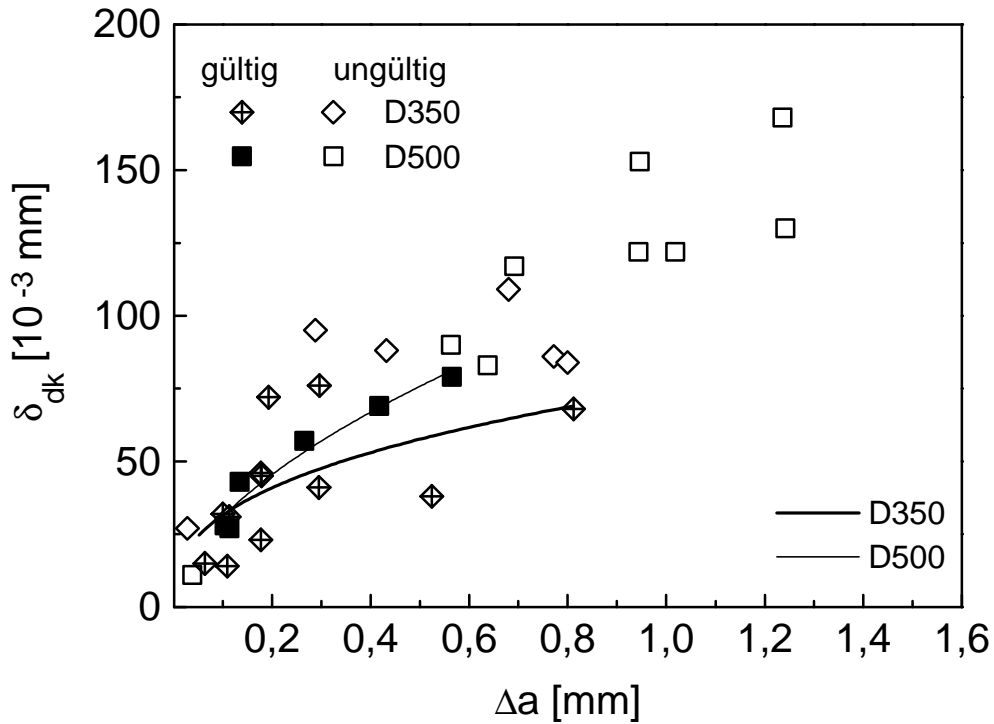


Bild A27:  $d_{dk}$ -R-Kurven der PE-HD-Werkstoffe mit einem Molekulargewicht von 350 kg/mol bzw. 500 kg/mol (PE-HD D350 und D500)

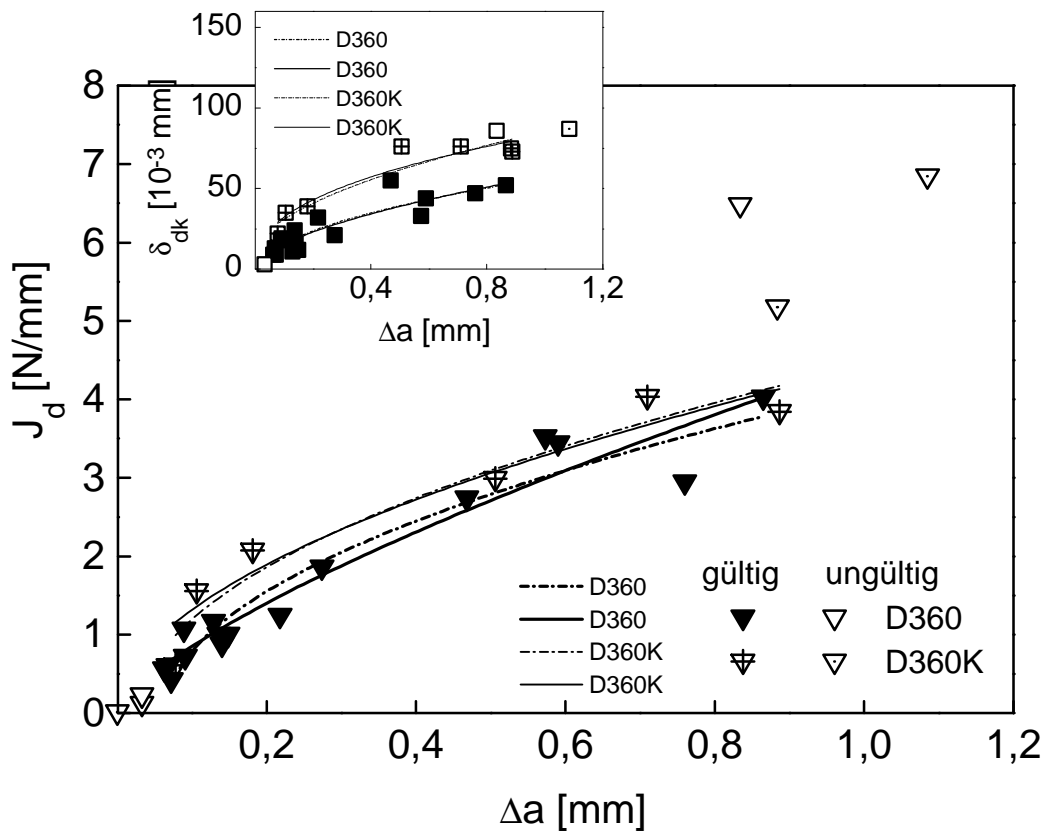


Bild A28:  $J_d$ - und  $d_{dk}$ -R-Kurven der PE-HD-Werkstoffe mit einem Molekulargewicht von 360 kg/mol (PE-HD D360 und D360K)

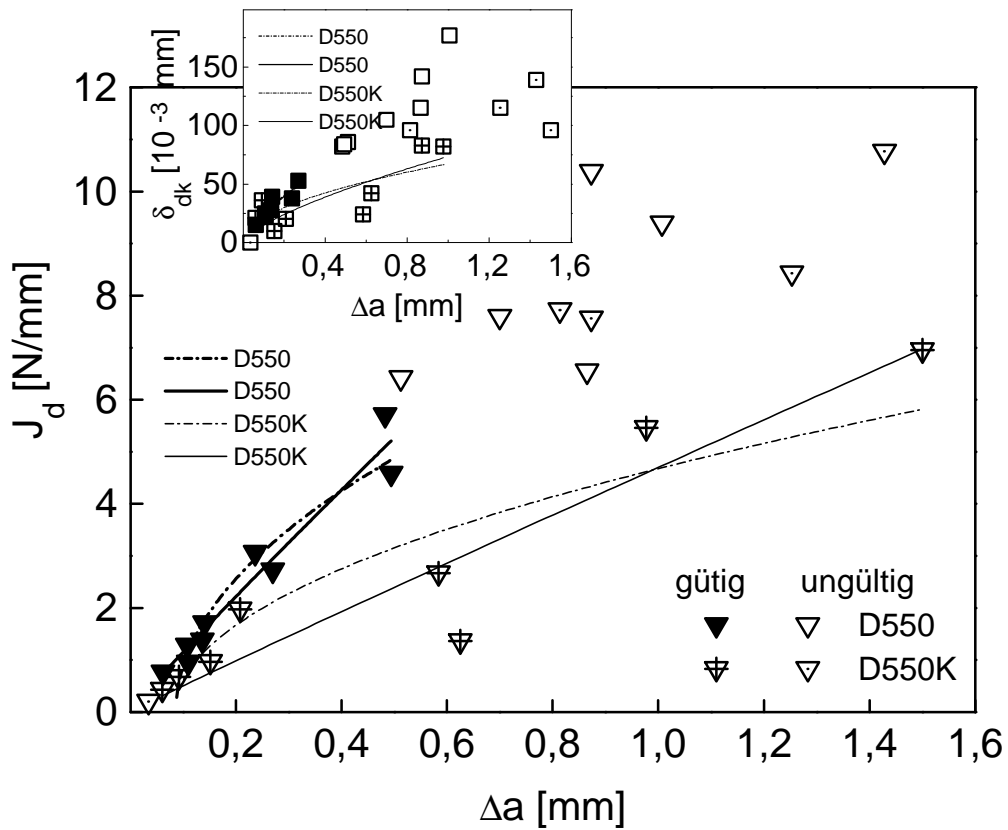


Bild A29:  $J_d$ - und  $d_{dk}$ -R-Kurven der PE-HD-Werkstoffe mit einem Molekulargewicht von 550 kg/mol (PE-HD D550 und D550K)

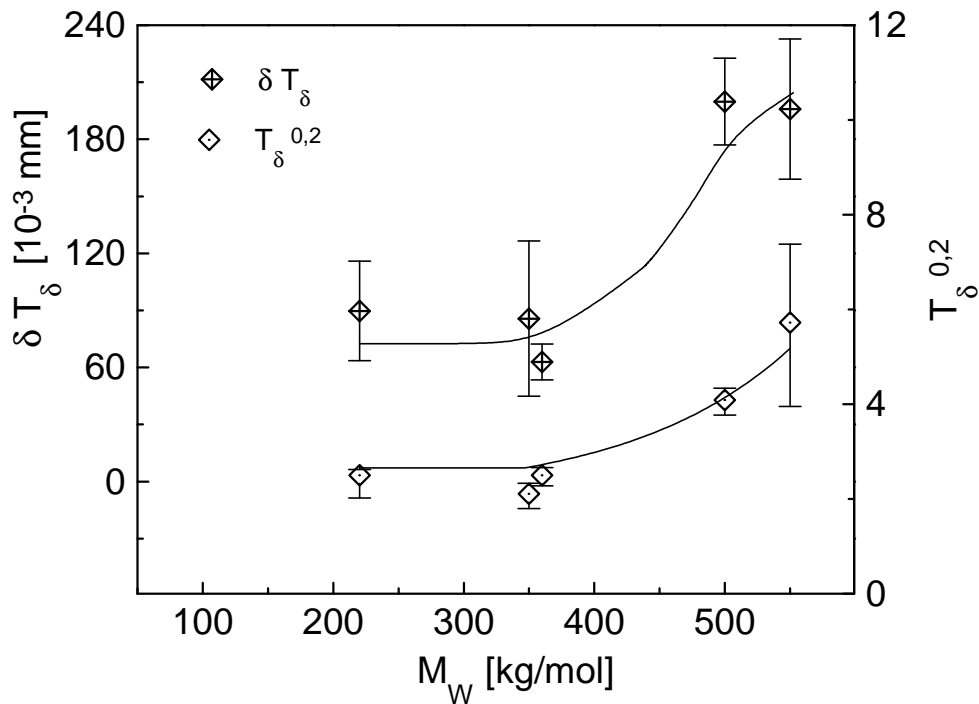


Bild A30:  $dT_\delta$ -Wert und Tearing-Modul  $T_\delta$  bei einer Rissverlängerung von 0,2 mm in Abhängigkeit vom Molekulargewicht



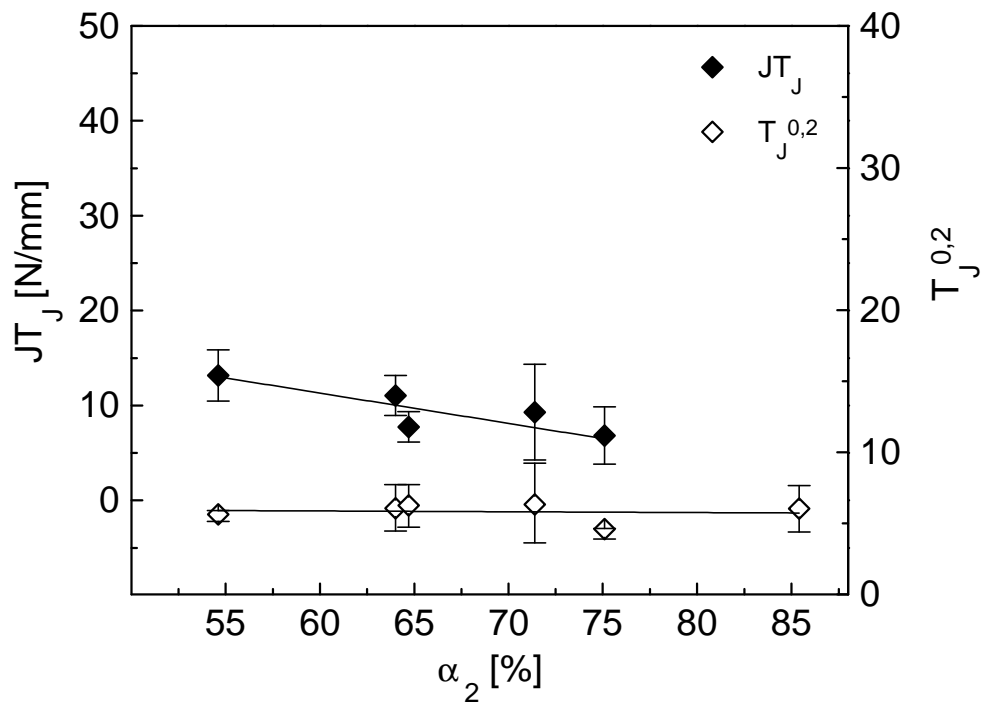


Bild A31:  $JT_J$ -Wert und Tearing-Modul  $T_J$  bei einer Rissverlängerung von 0,2 mm in Abhängigkeit von der Kristallinität  $a_2$

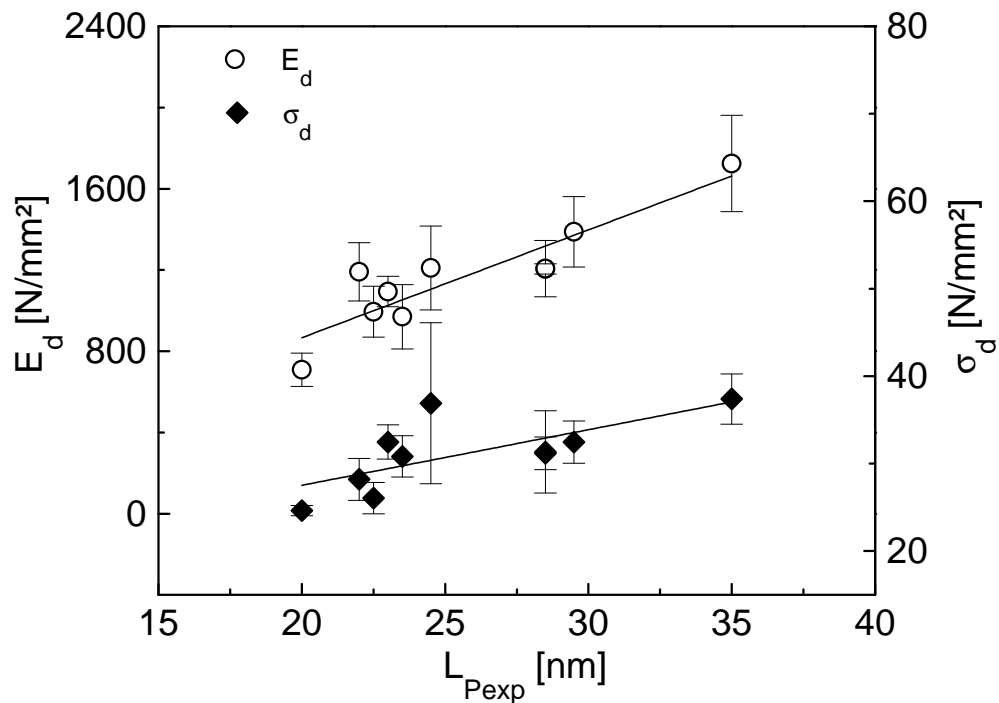


Bild A32: E-Modul und Streckgrenze bei Schlagbeanspruchung in Abhängigkeit von der Langperiode  $L_{Pexp}$

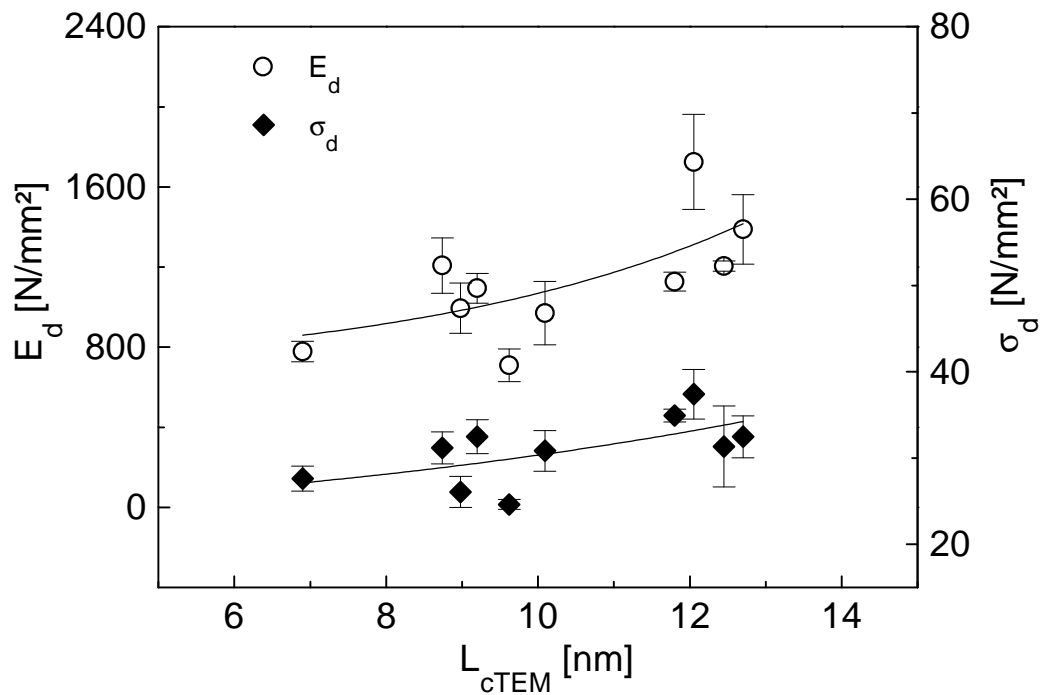


Bild A33: E-Modul und Streckgrenze bei Schlagbeanspruchung in Abhängigkeit von der Lamellendicke  $L_{cTEM}$

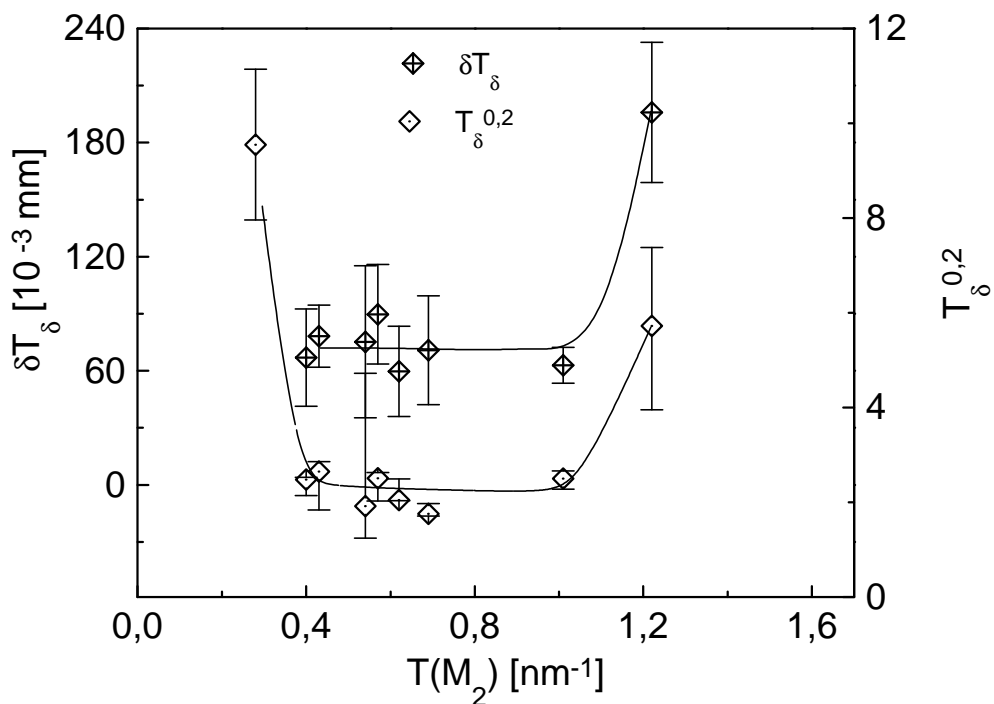


Bild A34:  $dT_\delta$ -Wert und Tearing-Modul  $T_\delta$  bei einer Rissverlängerung von 0,2 mm in Abhängigkeit der Anzahl der Tie-Moleküle  $T(M_2)$

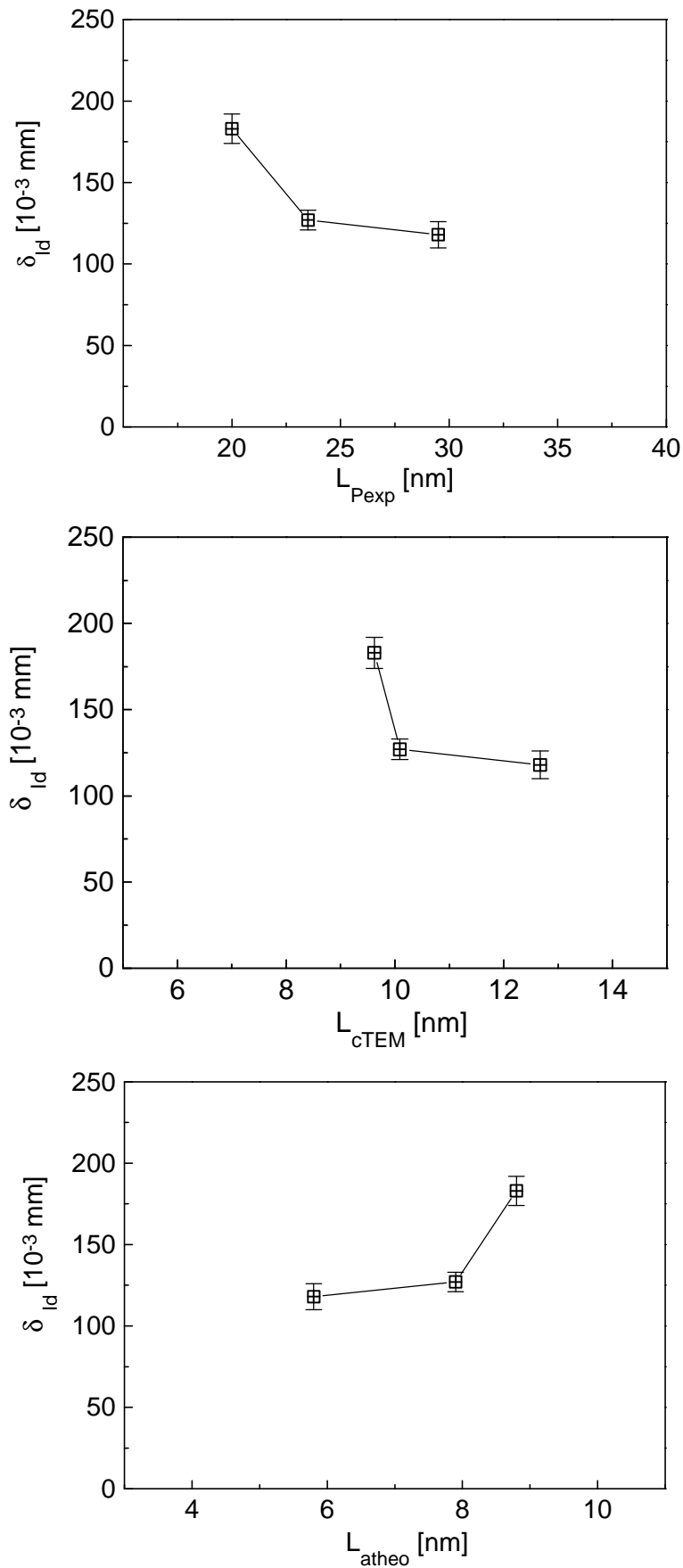


Bild A35: Rissöffnungsverschiebung  $d_{ld}$  in Abhängigkeit von strukturellen Größen im Nanometerbereich

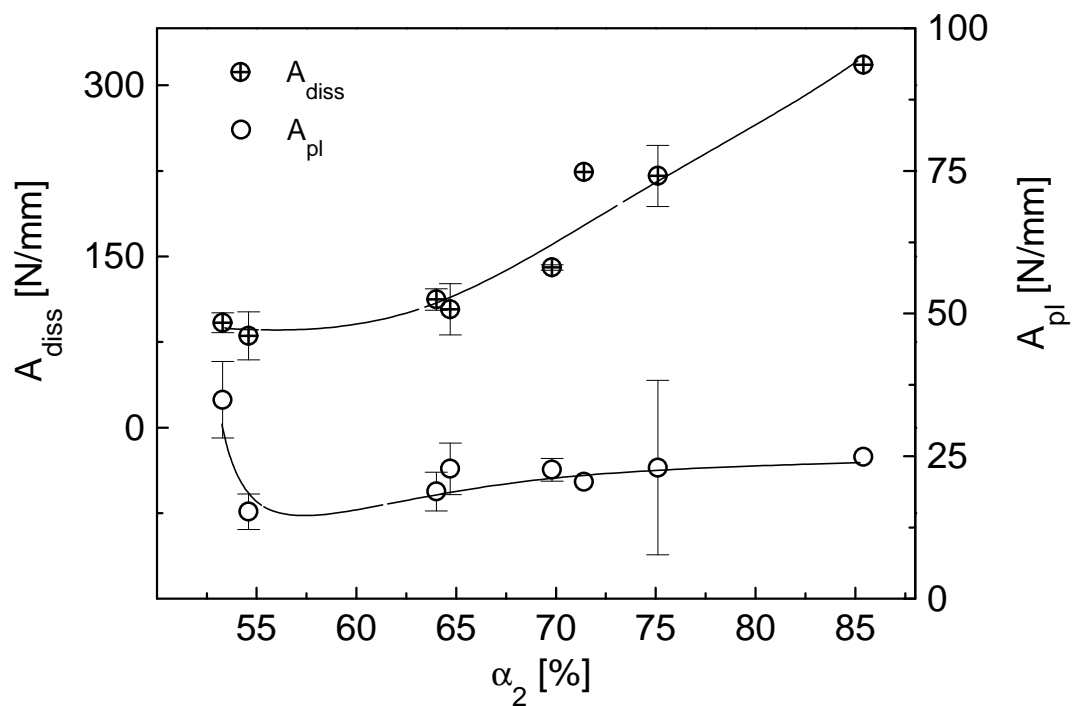


Bild A36: Dissipierte Energie und plastischer Energieanteil in Abhängigkeit von der Kristallinität ( $a/W = 0,45$ ; ohne Seitenkerben)

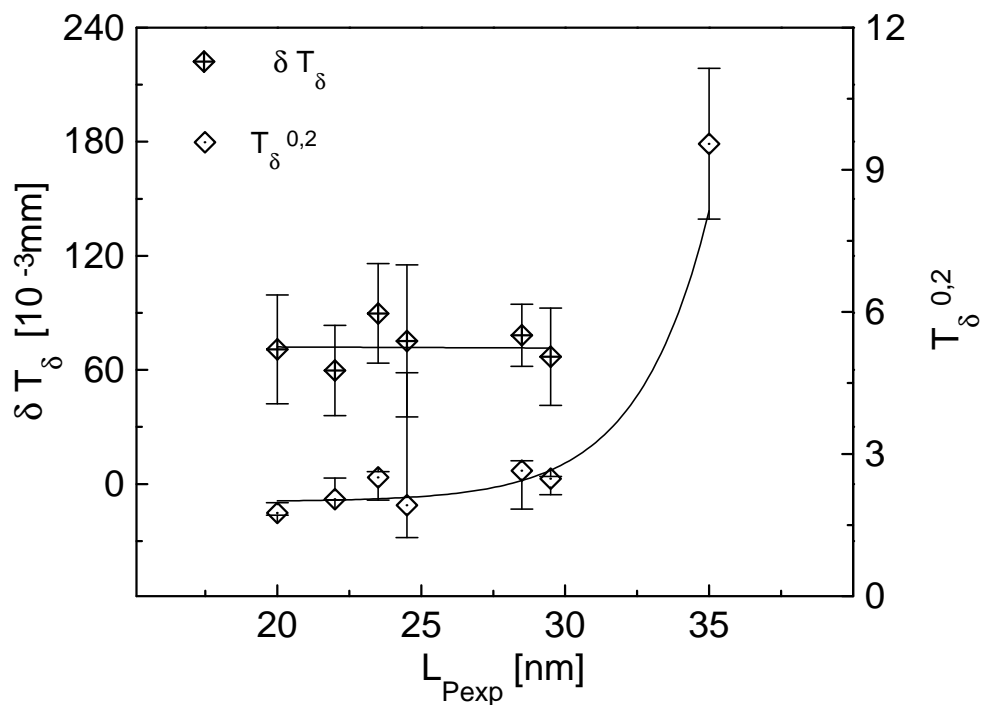


Bild A37: Verformungsaufnahmevermögen  $\delta T_\delta$  und Risswiderstand gegenüber stabiler Rissausbreitung  $T_\delta^{0,2}$  in Abhängigkeit von der Langperiode

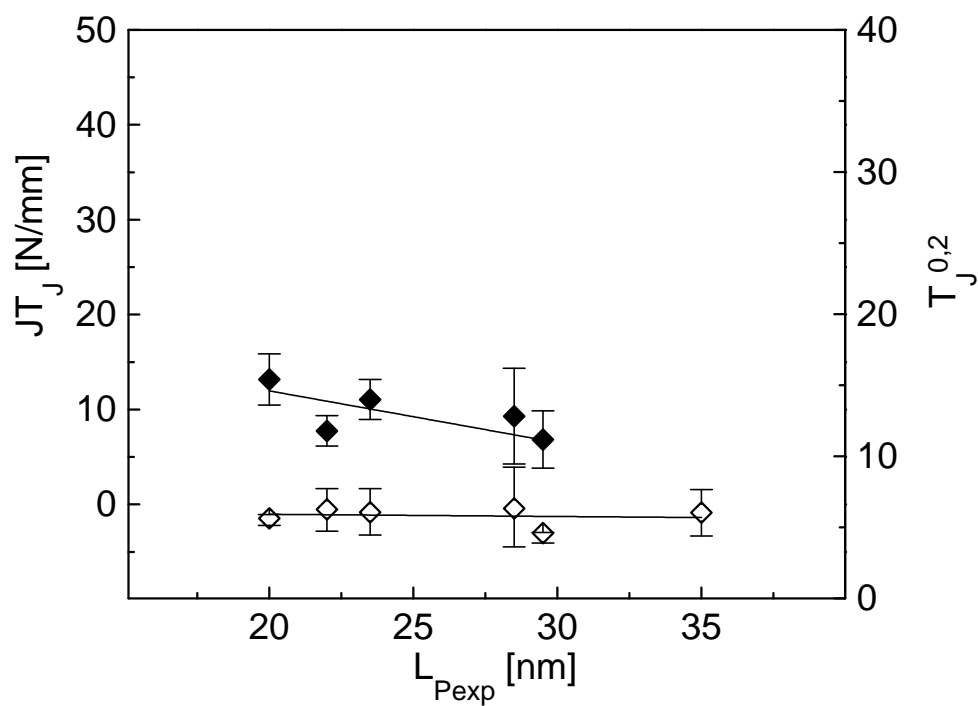


Bild A38: Einfluss der Langperiode auf das Energieaufnahmevermögen und den Risswiderstand gegenüber stabiler Rissausbreitung  $T_J^{0,2}$  der PE-HD-Werkstoffe

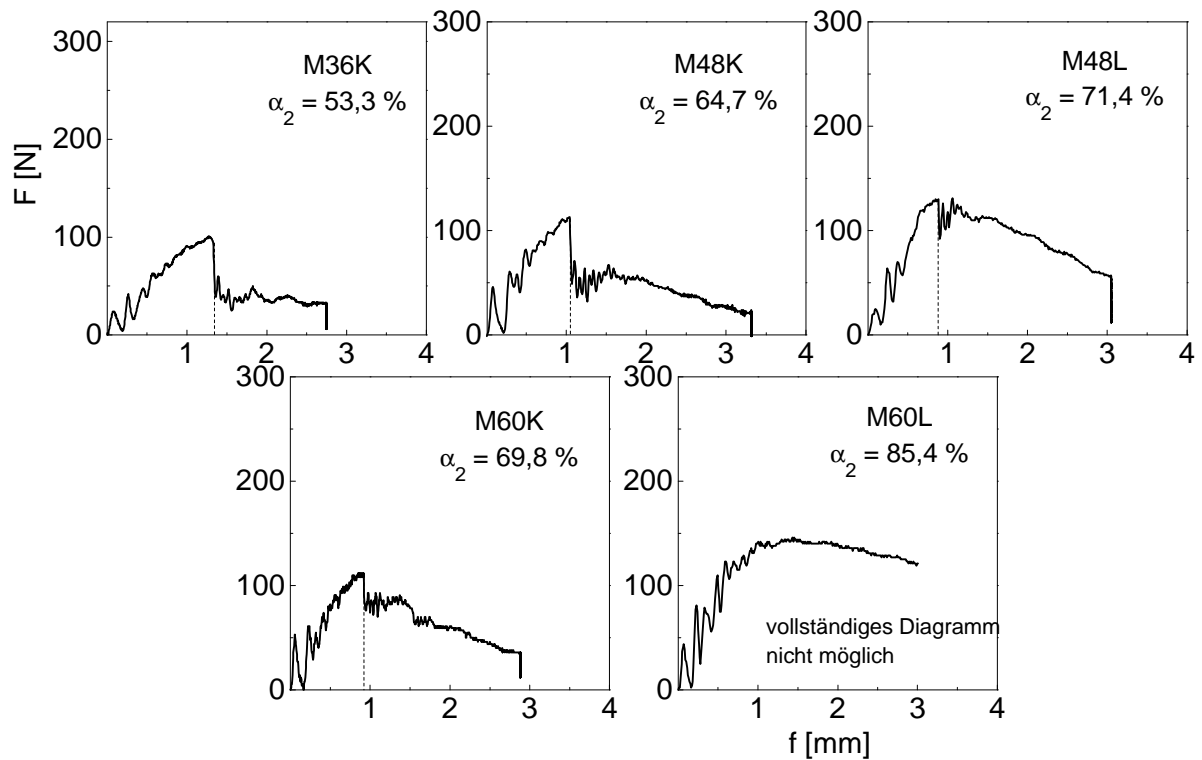


Bild A39: Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramme der PE-HD-K- und PE-HD-L-Werkstoffe in Abhängigkeit von der Kristallinität ( $a/W = 0,45$ ; ohne Seitenkerben)

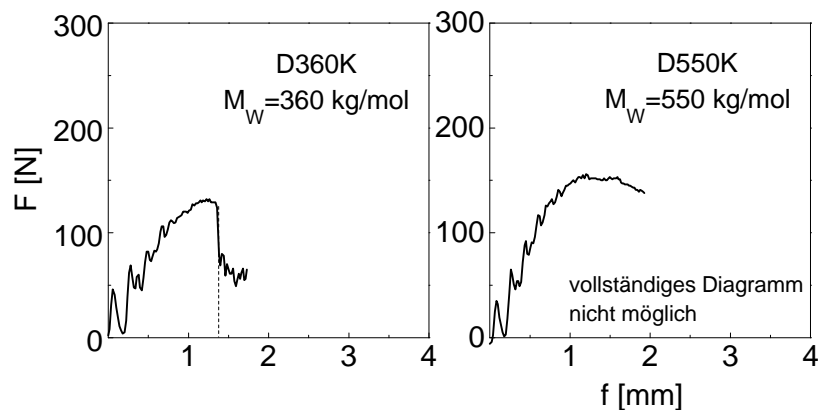


Bild A40: Schlagkraft-Durchbiegungs-Diagramme der PE-HD-K-Werkstoffe in Abhängigkeit vom Molekulargewicht ( $a/W = 0,45$ ; ohne Seitenkerben)

Strukturparameter, die nach der Polymerisation beeinflusst werden können

<b>Strukturparameter</b>	
<i>chemische Struktur</i>	<i>physikalische Struktur</i>
nach der Polymerisation:	
nicht beeinflussbar	beeinflussbar
⇒ chemischer Aufbau, Monomere ⇒ Taktizität ⇒ Verzweigungsgrad, Art der Verzweigung ⇒ mittlere relative Molmasse und deren Verteilung (durch starke mechanisch-thermische Beanspruchung z.B. Walzen und Kneten veränderbar)	⇒ Kristallinität ⇒ Anordnung der Lamellen, Lamellendicke, Langperiode ⇒ Größe der Sphärolithe, Ausbildung der Sphärolithgrenzen ⇒ Gitterstruktur der kristallinen Bereiche ⇒ räumliche Orientierung der Polymermoleküle

Tabelle A2: Einflüsse der Strukturparameter auf Festigkeit und Zähigkeit von Polyethylen

<b>Strukturparameter</b> <b>Erhöhung von:</b>	<b>Festigkeit</b> (Fließpunkt, innewohnende Festigkeit, Bruchfestigkeit)	<b>Deformierbarkeit</b> (Duktilität, Zähigkeit)
Molmasse	↑	↑
Molmassenverteilung breiter		↓ ↑ bimodal [43]
Verzweigungsgrad	↓	↑
Länge der Kurzketten- verzweigungen	↓	↑
Tie-Molekül-Dichte	↑ wenn Anteil tragender Tie-Moleküle ↑ ↓ weil Langperiode ↓	↑
Mobilität der Tie-Moleküle	↓	↓
Kristallinität	↑ im Temperaturbereich des Fließens [45]	↓ ↑ [41] ↑ Maximum bei 70 % [28] ↑ Risswiderstand gegenüber stabilem Risswachstum [37,47]
Abkühlrate bei Homopolymeren bei Copolymeren	↑ ↑ [36]	↓ [48,58] ↑ [59]
Lamellendicke	↑ Festigkeit der Kristalle [48,50] ↓ Festigkeit des Kristall-Tie- Molekül-Netzwerk [37]	↓ [48], ↑ [27] ↑ bei geraden, gut gepackten Lamellen [50]
Perfektion der Lamellen	↑	↓
Lamellenlänge		↑ bei geraden, gut gepackten Lamellen [50]
Dicke der amorphen Störschicht	↓	↑
Sphärolithgröße	↑ od. ↓ je nach Ausbildung der Grenzen	↑ od. kein Einfluss [53]
Kompaktheit der Sphärolithe	↑	↓
breite und schwache Sphärolithgrenzen	↓	↓

erhöht (↑) oder erniedrigt (↓) die Eigenschaft



Tabelle A3: *MFR*-Bestimmung nach DIN 53735 vor und nach dem Walzen

PE-HD	<i>MFR</i> 190/21,6	<i>MFR</i> 190/21,6
	<i>vor dem Walzen</i>	<i>nach dem Walzen</i>
	[g/10min]	[g/10min]
M36	20	14
M48	20	16
M60	20	17
D360	6,0	5,8
D550	1,7-2,3	1,3

Tabelle A4: Molekulare Strukturparameter der PE-HD-Werkstoffe

PE-HD	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$L_{\text{Pexp}}^{\text{①}}$ [nm]	$L_{\text{c}}^{\text{②}}$ [nm]	$L_{\text{a}}^{\text{②}}$ [nm]	$L_{\text{Ptheo}}^{\text{④}}$ [nm]	$L_{\text{ctheo}}^{\text{a③}}$ [nm]	$L_{\text{atheo}}^{\text{④}}$ [nm]	$L_{\text{PTEM}}^{\text{⑥}}$ [nm]	$L_{\text{cTEM}}^{\text{⑤}}$ [nm]	$L_{\text{aTEM}}^{\text{⑥}}$ [nm]
<i>Ermittlung der Strukturparameter:</i>		<sup>①</sup> mit Röntgen bestimmt <sup>②</sup> aus <sup>①</sup> und $\mathbf{a}_3$ berechnet			<sup>③</sup> mit DSC bestimmt <sup>④</sup> aus <sup>③</sup> und $\mathbf{a}_2$ berechnet			<sup>⑤</sup> mit TEM bestimmt <sup>⑥</sup> aus <sup>⑤</sup> und $\mathbf{a}_2$ berechnet		
M36K	934	-	-	-	21,8	11,6	10,2	-	-	-
M36	936	20,0	13,0	7,0	19,3	10,5	8,8	17,2	9,6	7,6
M48K	947	22,0	16,9	5,1	22,7	14,7	8,0	-	-	-
M48	948	23,5	17,5	5,9	21,8	13,9	7,9	15,6	10,1	5,5
M48L	954	28,5	21,7	6,8	24,2	17,3	6,9	17,6	12,6	5,0
M60K	954	24,5	17,8	6,7	28,7	20,0	8,7	-	-	-
M60	960	29,5	23,4	6,1	23,3	17,5	5,8	17,4	12,7	4,7
M60L	970	35,0	28,8	6,2	26,5	22,6	3,9	14,1	12,0	2,1
D90	952	23,0	17,4	5,6	20,7	14,2	6,5	13,4	9,2	4,2
D350	942	-	-	-	19,2	12,4	6,8	10,7	6,9	3,8
D360K	940	-	-	-	23,5	14,3	9,2	-	-	-
D360	945	22,5	16,5	6,0	21,1	12,8	8,3	14,9	9,0	5,9
D500	955	-	-	-	22,8	16,4	6,4	18,1	11,7	6,4
D550K	949	-	-	-	28,1	18,8	9,3	-	-	-
D550	954	28,5	22,2	6,3	25,1	16,5	8,6	12,8	8,7	4,1

<sup>a</sup> berechnet nach Gl. 9 [94], - keine Messungen

Tabelle A5: Wahrscheinlichkeiten zur Bildung von Tie-Molekülen und Tie-Molekül-Dichten der PE-HD-Werkstoffe

PE-HD	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$P_1^b$	$P_2^c$	$T_1(M)^d$	$T_2(M)^e$	$T(M_2)^f$
M36K	934	-	-	-	-	-
M36	936	0,24	0,20	0,14	49,6	0,69
M48K	947	0,21	0,17	0,11	47,5	0,62
M48	948	0,19	0,15	0,09	45,9	0,57
M48L	954	0,13	0,09	0,04	39,5	0,43
M60K	954	0,18	0,14	0,07	44,7	0,54
M60	960	0,11	0,08	0,03	38,2	0,40
M60L	970	0,06	0,04	0,01	30,5	0,28
D90	952	0,06	0,03	0,01	11,7	0,16
D350	944	-	-	-	-	-
D360K	940	-	-	-	-	-
D360	945	0,26	0,23	0,17	85,3	1,01
D500	954	-	-	-	-	-
D550K	949	-	-	-	-	-
D550	954	0,25	0,22	0,17	129,7	1,22

<sup>b</sup> berechnet nach Gl. 12 [5], <sup>c</sup> berechnet nach Gl. 12 [98],

<sup>d</sup> berechnet nach Gl. 20 [42], <sup>e</sup> berechnet nach Gl. 22 [42],

<sup>f</sup> berechnet nach Gl. 24 [59]

- keine Berechnungen

Tabelle A6: Kenngrößen der Risswiderstandskurven für die Festlegung der Gültigkeit und Constraint-Faktoren der PE-HD-Werkstoffe

PE-HD	$s_d$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$E_d$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$J_{\max}^h$ [N/mm]	$m$	$w$ $w > 10$	$w_\delta$	$w_{\exp}$ $w_{\exp} \gg 1$	$w_{\exp\delta}$
M36K	23	755	4,6	0,29	28,9	7,3	19,5	7,9
M36	25	709	4,9	0,28	2,3	1,2	4,8	3,8
M48K	28	1191	5,6	0,16	5,5	1,4	3,5	2,7
M48	31	970	6,2	0,09	8,5	2,8	5,6	4,8
M48L	31	1205	6,3	0,11	10,2	3,2	6,2	5,9
M60K	37	1210	7,4	0,16	14,1	1,2	9,0	5,4
M60	32	1388	6,5	0,18	2,1	2,1	3,5	3,6
M60L	37	1725	7,5	0,09	10,7	14,4	7,9	10,3
D90	32	1094	-	-	-	-	-	-
D350	28	778	5,5	0,25	2,7	1,9	3,4	3,2
D360K	23	989	4,6	0,26	2,9	2,2	3,2	3,0
D360	26	994	5,2	0,17	4,2	3,2	3,4	3,3
D500	35	1127	7,0	0,15	7,0	3,3	6,1	5,1
D550K	35	1090	7,1	0,12	3,6	5,1	1,9	2,9
D550	31	1207	6,2	0,19	9,7	7,9	6,7	12,1

<sup>h</sup>  $\delta_{\max} = \text{konstant} = 80 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$ , - nicht relevant

Tabelle A7: Anpassungsfunktionen für die Risswiderstandskurven der Belastungsparameter  $J_d$  und  $d_{dk}$  der PE-HD-Werkstoffe

PE-HD	Potenzfunktion				Wurzelfunktion			
	$J = C_1 \Delta a^{C_2}$ [N/mm]		$d_{dk} = C_6 \Delta a^{C_7}$ [10 <sup>-3</sup> mm]		$J = (C_4 + C_5 \Delta a)^{1/2}$ [N/mm]		$d_{dk} = (C_8 + C_9 \Delta a)^{1/2}$ [10 <sup>-3</sup> mm]	
	$C_1$	$C_2$	$C_6$	$C_7$	$C_4$	$C_5$	$C_8$	$C_9$
M36K	-	-	151	0,72	-	-	-	-
M36	4,5	0,44	69	0,28	0,19	22,5	846	4915
M48K	4,0	0,90	54	0,28	-0,52	10,4	513	2827
M48	5,8	0,97	71	0,50	-2,49	21,7	-170	5704
M48L	5,1	0,98	60	0,55	-1,69	15,2	-200	4064
M60K	-	-	63	0,30	-4,14	59,7	537	4588
M60	3,3	0,41	55	0,41	0,72	10,4	146	3132
M60L	-	-	-	-	-	-	-	-
D90	*	*	*	*	*	*	*	*
D350	4,4	0,49	74	0,37	-0,15	19,6	336	6077
D360K	4,4	0,52	83	0,41	-0,58	20,3	250	7050
D360	4,5	0,78	58	0,57	-1,05	17,8	-100	3299
D500	8,1	0,85	111	0,56	-6,05	53,5	-376	12373
D550K	4,7	0,98	75	0,78	-2,01	23,9	-24,6	4543
D550	10,1	0,95	132	0,75	-5,79	61,9	-433	10117
PE-HD	Lineare Funktion							
	$J = C_4 + C_5 \Delta a$ [N/mm]		$d_{dk} = C_8 + C_9 \Delta a$ [10 <sup>-3</sup> mm]					
	$C_4$	$C_5$	$C_8$	$C_9$				
M36K	-1,3	20,8	-	-				
M60K	-0,6	13,1	-	-				
M60L	-0,5	4,9	-12,3	207,0				

- nicht relevant, \* R-Kurve nicht bestimmbar

Tabelle A8/A: Bruchmechanische Kennwerte als Risszähigkeiten gegenüber instabiler  
Rissausbreitung der PE-HD-Werkstoffe

instabile Rissausbreitung; $a/W = 0,2$ ; PK mit SK			
PE-HD	$K_{Qd} \pm S$ [MPa·mm <sup>1/2</sup> ]	$J^{ST} \pm S$ [N/mm]	$d_{Id} \pm S$ [10 <sup>-3</sup> mm]
M36K	-	-	-
M36	73,0 ± 3,6	6,0 ± 0,6	183 ± 9,0
M48K	-	-	-
M48	82,8 ± 2,7	5,5 ± 0,3	127 ± 6,0
M48L	-	-	-
M60K	-	-	-
M60	94,9 ± 4,1	4,8 ± 0,8	118 ± 8,0
M60L	-	-	-
D90	68,5 ± 4,9	3,3 ± 0,4	93 ± 8,0
D350	80,3 ± 5,2	5,7 ± 0,7	161 ± 11,9
D360K	-	-	-
D360	92,6 ± 4,7	6,7 ± 0,3	183 ± 25,1
D500	127,2 ± 9,0	12,0 ± 1,3	229 ± 14,9
D550K	-	-	-
D550	123,5 ± 11,1	12,6 ± 2,0	235 ± 15,0

- keine Messungen, \* nicht bestimmbar

Tabelle A8/B: Bruchmechanische Kennwerte als Risszähigkeiten gegenüber stabiler  
Rissausbreitung der PE-HD-Werkstoffe

stabile Rissausbreitung; $a/W = 0,45$ ; Prüfkörper (PK) ohne SK										
PE-HD	$J_{0,2}$ [N/mm]	$+S_o$ $-S_u$	$d_{0,2}$ [ $10^{-3}$ mm]	$+S_o$ $-S_u$	$T_J^{0,2}$	$+S_o$ $-S_u$	$T_{\delta}^{0,2}$	$+S_o$ $-S_u$	$JT_J \pm S$ [N/mm]	$dT_{\delta} \pm S$ [ $10^{-3}$ mm]
M36K	2,9	+1,7 -1,7	47	+47 -27	29,6	+6,7 -6,7	5,6	+1,9 -2,4	*	*
M36	2,2	+0,6 -0,5	44	+16 -12	5,6	+0,3 -0,5	1,8	+0,2 -0,5	$13,2 \pm 2,7$	$71 \pm 29$
M48K	0,9	+0,5 -0,4	34	+13 -10	6,3	+1,4 -1,5	2,0	+0,4 -0,1	$7,7 \pm 1,6$	$60 \pm 24$
M48	1,2	+0,7 -0,5	32	+19 -13	6,1	+1,7 -1,6	2,5	+0,1 -0,5	$11,1 \pm 2,1$	$90 \pm 26$
M48L	1,05	+1,1 -0,6	25	+22 -13	6,3	+2,9 -2,7	2,6	+0,2 -0,8	$9,3 \pm 5,0$	$78 \pm 16$
M60K	2,0	+1,1 -1,1	29	+78 -24	11,7	+2,1 -2,1	1,9	+2,8 -0,7	$26,5 \pm 7,9$	$75 \pm 75$
M60	1,7	+0,8 -0,6	28	+13 -10	4,6	+0,1 -0,7	2,5	+0,1 -0,3	$6,8 \pm 3,0$	$67 \pm 26$
M60L	0,5	+0,6 -0,6	29	+17 -17	6,0	+1,6 -1,6	9,6	+1,6 -1,6	*	*
D90	*		*		*		*		*	*
D350	2,0	+0,6 -0,5	41	+24 -17	5,0	+0,2 -0,4	2,1	+0,2 -0,3	$10,0 \pm 2,0$	$86 \pm 41$
D360K	1,9	+0,5 -0,4	43	+8 -7	9,3	+0,3 -0,6	38	+65 -70	$19,0 \pm 2,6$	$152 \pm 23$
D360	1,3	+0,2 -0,2	23	+6 -5	7,2	+0,5 -0,5	2,5	+0,2 -0,2	$13,0 \pm 1,1$	$63 \pm 9$
D500	2,1	+0,8 -0,6	46	+10 -8	8,1	+1,4 -1,4	4,1	+0,2 -0,3	$24,7 \pm 3,8$	$200 \pm 23$
D550K	1,0	+0,5 -0,3	22	+20 -11	4,1	+0,8 -0,9	2,6	+0,4 -0,8	$10,3 \pm 2,9$	$70 \pm 27$
D550	2,2	+0,7 -0,5	39	+25 -17	13,0	+2,1 -2,1	5,7	+1,7 -1,8	$38,4 \pm 4,8$	$196 \pm 37$

\* nicht bestimmbar