Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Geschäftsbereich Sicherheit und Strahlenschutz
Ungarische Akademie der Wissenschaften /
Institut für Kernforschung

Vergleichende Messungen an unterschiedlichen Thermolumineszenzmaterialien für die Dosimetrie in gemischten Strahlenfeldern

Jürgen Pillath, István Uray

Jül-4216

Vergleichende Messungen an unterschiedlichen Thermolumineszenzmaterialien für die Dosimetrie in gemischten Strahlenfeldern

Jürgen Pillath, István Uray

Berichte des Forschungszentrums Jülich ; 4216
ISSN 0944-2952
Geschäftsbereich Sicherheit und Strahlenschutz
Ungarische Akademie der Wissenschaften / Institut für Kernforschung Jül-4216

Zu beziehen durch: Forschungszentrum Jülich GmbH · Zentralbibliothek, Verlag
D-52425 Jülich · Bundesrepublik Deutschland
☎ 02461 61-5220 · Telefax: 02461 61-6103 · e-mail: zb-publikation@fz-juelich.de

Vergleichende Messungen an unterschiedlichen Thermolumineszenzmaterialien für die Dosimetrie in gemischten Strahlenfeldern

Auf LiF basierende Thermolumineszenz-Materialien (TL-Materialien) haben sich für die Dosimetrie seit vielen Jahre bewährt und etabliert. In Kombination mit geeigneten Filterungen oder Moderatoren ist es mit ihnen möglich, die Strahlungsdosen aller im Strahlenschutz relevanten Strahlenarten mit hoher Präzision zu messen. Mit der Entwicklung hochempfindlicher LiF-Materialien mit einer Dotierung aus Mg, P und Cu wurde die messtechnische Bestimmung von Dosen bis herab zu einem µSv möglich.

Die hier vorgestellten Messungen dienen speziell der phänomenologischen Analyse der Glowkurvenstruktur von normal- und hochempfindlichen LiF-TL-Materialien in gemischten Gamma-Neutronen-Strahlenfeldern. Untersucht wird die Empfindlichkeit der unterschiedlichen TL-Materialien für die verschiedenen Strahlenarten und der Einfluß der Strahlenarten sowie der Auswerteparameter auf die Struktur der Glowkurven. Es wird ersichtlich, wie sich durch eine Zerlegung der Glowkurve in ihre Einzelpeaks Informationen über die Zusammensetzung und die Dosen der Einzelkomponenten des Strahlenfeldes ermitteln lassen.

Comparative measurements on different thermoluminescence materials for the dosimetry in mixed radiation fields

LiF-based thermoluminescence materials (TL materials) have proved efficient and become established for dosimetry for many years now. In combination with suitable filtrations or moderators, they permit high-precision measurements of the radiation doses of all types of radiation relevant in radiation protection. The development of highly sensitive LiF materials with a doping of Mg, P and Cu has made it possible to measure doses down to one µSv.

The measurements presented here specifically serve to phenomenologically analyse the glow curve structure of normally and highly sensitive LiF-TL materials in mixed gamma-neutron radiation fields. The sensitivity of the different TL materials to different types of radiation and the influence of the radiation types and of the evaluation parameters on the structure of the glow curves is examined. It is made apparent how information about the composition and doses of the individual components of a radiation field can be obtained by decomposing the glow curve into its individual peaks.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **1**

1. Einleitung **3**

2. Technik und Geräte **5**

2.1. TLD-Auswertegerät 5

2.2. TLD-Temperofen 5

2.3. Quellen und Bestrahlungseinrichtungen 6

3. TL-Materialien **9**

4. Voruntersuchungen **11**

4.1. Auswertung und Standardverfahren 11

4.2. Empfindlichkeitsbestimmung der TL-Detektoren 16

5. Phänomenologische Analyse der Glowkurvenstruktur **19**

5.1. Normalempfindliche TL-Materialien, Einfluß der Auswertetemperatur 21

5.2. Hochempfindliche TL-Materialien, Einfluß der Auswertetemperatur 25

5.3. Normal-/hochempfindliche Materialien bis 240 °C 29

5.4. Normal-/hochempfindliche Materialien bis 400 °C 33

5.5. Normal-/hochempfindliche Materialien im Nenngebrauchsbereich 37

5.6. Normalempfindliche Materialien, Einfluß verschiedener Strahlenarten 41

5.7. Hochempfindliche Materialien, Einfluß verschiedener Strahlenarten 45

6. Schlußfolgerungen und Ausblick **49**

7. Literatur **51**

1. Einleitung

Die Dosimetrie ionisierender Strahlung mittels Thermolumineszenzdosimetern (TLD) hat sich seit ihren Anfängen vor ca. 50 Jahren zu einem Standardverfahren entwickelt, das vielfältige Anwendung findet /1,2/. Für die unterschiedlichsten Meßaufgaben steht eine Vielzahl von verschiedenen Thermolumineszenz-Materialien in unterschiedlichen mechanischen und geometrischen Ausführungen zur Verfügung /3/. In Kombination mit geeigneten Filterungen oder Moderatoren ist es damit möglich, fast alle im Strahlenschutz relevanten Strahlenarten (Röntgen- und Gammastrahlung, Betastrahlung, Neutronen und teilweise Alphastrahlung) über einen weiten Energie- und Dosisbereich in hoher Präzision zu messen. Speziell bei der Dosimetrie von Röntgen- und Gammastrahlung zeichnen sich annähernd gewebeäquivalente Phosphore, wie z.B. LiF- oder $Li_2B_4O_7$-basierende Materialien, auch ohne weitere Filterung durch eine gute Energieabhängigkeit aus. Die gute Empfindlichkeit von LiF:Mg,Ti (d.h. dotiert mit Mg und Ti), verbunden mit geringem Fading, guter Langzeitstabilität und Reproduzierbarkeit, geringer Lichtempfindlichkeit und relativ einfacher Handhabung bei der Auswertung und Regenerierung, macht LiF zu einem bevorzugten TL-Material für Messungen von Dosen im Bereich von ca. 10 µGy bis zu einigen Gy. Mit den vor einigen Jahren entwickelten hochempfindlichen LiF-Materialien mit einer Dotierung aus Mg, Cu und P (LiF:Mg,Cu,P) lassen sich darüber hinaus auch Dosen bis herab zu einem µSv bestimmen /4-6/.

Für die unterschiedlichen TL-Materialien haben sich im Laufe der Zeit Standardverfahren für das Auslesen (Reading, Auswertung) wie auch für die Regenerierung (Temperung, Annealing) etabliert /7,8/, mit denen in der Regel sichere Ergebnisse mit guter Reproduzierbarkeit erzielt werden. In diesen Standardverfahren sind insbesonders die zeitlichen Temperaturverläufe sowie die einzuhaltenden Temperaturgrenzen für die einzelnen Prozeduren der Regenerierung vor der Exposition, der Temperung vor der Auswertung und für den Ausleseprozeß festgelegt. Für besondere Meßaufgaben kann es jedoch manchmal hilfreich oder sogar notwendig sein, von diesen Standardverfahren abzuweichen.

Die hier vorgestellten Messungen dienen speziell der Untersuchung des Verhaltens von LiF-basierenden TL-Materialien in gemischten Strahlenfeldern sowohl bei Auswerte- und Regenerierungsverfahren unter Standardbedingungen wie auch abseits der üblichen Standardverfahren. Durch die Änderung der Glowkurvenstruktur in Abhängigkeit der Auswerte- und Regenerierungsparameter lassen sich Rückschlüsse auf das Strahlenfeld ziehen. Speziell in gemischten Gamma-Neutronen-Strahlenfeldern ergeben sich daraus Informationen über die einzelnen dosimetrischen Anteile des Strahlenfeldes.

2. Technik und Geräte

2.1. TLD-Auswertegerät

Alle Auswertungen der TL-Detektoren wurden mit einem TLD-Auswertegerät des Typs Solaro der Firma Vinten/NE Technology vorgenommen. Das Solaro ist ein Zweikanal-TLD-Auswertegerät, in dem ein Vielzahl unterschiedlicher TL-Detektoren in Form von einzelnen Pellets, Scheibchen oder Stäbchen und auch Detektorkarten mit mehreren Einzeldetektoren ausgelesen werden können. Die Aufheizung der Detektoren erfolgt unter Schutzgasatmosphäre (üblicherweise N_2) auf einem Planchet. Zwei Photomultiplier registrieren das ausgesandte TL-Licht der Detektoren in den zwei separaten Auslesestationen. Die Steuerung des Gerätes sowie die Datenerfassung, Meßwertermittlung und Ergebnisdarstellung wird durch einen internen Steuerungsrechner auf PC-Basis vorgenommen. Die Speicherung der Glowkurven erfolgt in 500 Kanälen mit einer Speichertiefe von 16 Bit. Vor Meßbeginn sowie in den Meßpausen wird das Gerät mittels der internen ^{14}C-Referenz-Lichtquellen automatisch in seiner Empfindlichkeit nachjustiert.

Technische Spezifikationen des SOLARO-Auswertegerätes

Typ:	SOLARO	
Hersteller:	Vinten / NE Technology	
Stationen:	2 unabhängige Auslesestationen, gleichzeitige Auswertung möglich	
Lichtmessung:	Photomultiplier	
Referenz-Lichtquelle:	^{14}C, Plastikszintillator (intern)	
Heizsystem:	Planchet-Heizung	
Vortemperung:	Preheat:	Einstellbarer Bereich: 0 .. 99 s, 25 °C .. 200 °C,
Auswertung:	Reading:	Einstellbarer Bereich: 1 .. 200 s, 25 °C .. 400 °C,
	Aufheizrate:	Einstellbarer Bereich: 1 °C/s .. 25 °C/s
Ausheizen:	Annealing:	Einstellbarer Bereich: 0 .. 99 s, 25 °C .. 400 °C
N_2-Durchfluß:	450 ± 50 ml/min, manuelle Einstellung	
Computer:	PC Intel 486DX 100 MHz, MS-DOS 6.22	
Software:	Standard TLD System Version 2.08	

2.2. TLD-Temperofen

Die Regenerierung der TL-Detektoren erfolgte jeweils kurz vor den Bestrahlungen in einem speziellen TLD-Temperofen. Spezielle Temperschälchen aus Keramik oder Temperplatten aus eloxiertem Aluminium oder Edelstahl dienen zur Aufnahme der TL-Detektoren. Der Ofen enthält eine

programmgesteuerte elektrische Heizung und einen Ventilator für die Umwälzung der erhitzten Luft, wodurch eine gleichmäßige Temperaturverteilung gewährleistet wird. Starke Temperaturgradienten innerhalb des Ofens werden dadurch vermieden. Die Heizzyklen einschließlich Aufheiz- und Abkühlphasen sind fest programmiert und werden exakt reproduzierbar durchfahren. Eine reproduzierbare Behandlung von Thermolumineszenz-Detektoren ist eine Voraussetzung für eine gleichbleibende Empfindlichkeit der Detektoren und niedrige Nulldosisanzeigen.

Technische Spezifikationen des TLD-Temperofens

Typ:	TLDO 1321
Hersteller:	PTW-Freiburg
Heizsystem:	Umluft
Maximaltemperatur:	400 °C
Temperaturregelung:	Mikroprozessorregelung, Meßfühler: Pt 100
Heizprogramme:	Auswahl aus jeweils 9 vorgegebenen Programmen in zwei Heizprofilen

2.3. Quellen und Bestrahlungseinrichtungen

Die unterschiedlichen Bestrahlungen der TL-Detektoren wurden im Bestrahlungsstand von S - MD in definierten Kalibrierstrahlungsfeldern durchgeführt.

Verwendete Quellen und Bestrahlungseinrichtungen

1. Gammabestrahlungen

   Quelle: E 158 ^{137}Cs, Punktquelle Aktivität: 428 GBq

   Quelle: 0033 GN ^{137}Cs, Punktquelle Aktivität: 12 GBq

   Gammaenergie: $E_\gamma \approx 662$ keV

   Bestrahlung frei in Luft gemäß den Vorgaben für die Meßgröße "Photonenäquivalentdosis" H_X[1]. Für die Umrechnung in die neue Meßgröße "Umgebungsäquivalentdosis" H*(10) gilt der Faktor: $H^*(10)/H_X = 1{,}07$ /9/.

[1] Die Meßgröße "Photonenäquivalentdosis" H_X war die gesetzliche Meßgröße für Umgebungsdosen und Personendosen in Deutschland bis zum Inkrafttreten der neuen Strahlenschutzverordnung im Jahr 2001. H_X ist über die Standardionendosis J_S definiert als: $H_X = J_S \cdot 38{,}76$ Sv C^{-1} kg (= 0,01 Sv R^{-1}).

2. Neutronenbestrahlungen

Quelle: AMN 3000 AM 17 ^{241}Am-Be, unmoderiert Aktivität: 347 GBq

Quellstärke: $1{,}97 \cdot 10^{7}$ Neutronen s^{-1}

Mittlere Neutronenenergie: 3,9 MeV

Bestrahlung der TL-Detektoren frei in Luft oder im Zentrum einer 12"-Moderatorkugel (Durchmesser: 30,5 cm) aus Polyethylen (PE). Meßgröße: Umgebungsäquivalentdosis H*(10).

3. Alphabestrahlungen

Quelle: KY 98 ^{241}Am, Flächenquelle Aktivität: 35,9 kBq

Mittlere Energie der Alphateilchen: $E_\alpha \approx 5{,}46$ MeV (Ursprungsenergie)

Bestrahlung in direktem Kontakt mit der aktiven Fläche der Quelle.

Das Radioisotop ^{241}Am ist in der Eloxalschicht einer 0,2 mm dicken Aluminiumfolie eingebettet. Die Dicke der mit ^{241}Am aktivierten Schicht entspricht dem Luftäquivalent von ca. 10 mm. Diese Folie ist in eine entsprechende Fassung mit einem Durchmesser von 50 mm und einer Dicke von 4 mm eingebaut. Der Durchmesser der aktiven Fläche beträgt 36 mm.

3. TL-Materialien

Sämtliche untersuchten TL-Detektoren wurden von der Firma Harshaw/Bicron bezogen. Das Basismaterial für alle Detektoren bildet LiF. Je nach Art des TL-Materials unterscheiden sie sich jedoch in der Dotierung bzw. im Verhältnis der Li-Isotope. So besteht die Dotierung der normalempfindlichen TL-Detektoren (TLD-100, TLD-600 und TLD-700) aus Mg und Ti (LiF:Mg,Ti), während die hochempfindlichen Materialien (TLD-100H, TLD-600H und TLD-700H) mit Mg, Cu und P dotiert sind (LiF:Mg,Cu,P). Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal der Materialien ist der Anreicherungsgrad der Lithium-Isotope ^{6}Li und ^{7}Li. Während die Materialien TLD-100 bzw. TLD-100H Lithium in natürlicher Isotopenzusammensetzung (ca. 7,5 % ^{6}Li, 92,5 % ^{7}Li) enthalten, ist in den Materialien TLD-600 bzw. TLD-600H zur Erhöhung der Neutronenempfindlichkeit ^{6}Li auf ca. 96 % angereichert. Die Materialien TLD-700 bzw. TLD-700H enthalten fast ausschließlich ^{7}Li (^{6}Li: < 0,1 %)[2], und sind damit für Neutronen sehr unempfindlich. LiF hat eine Dichte von ρ_{LiF} = 2,635 g/cm^3 /7/ und liegt mit einer effektiven Kernladungszahl für Photoabsorption von Z_{eff} = 8,14 nahe an den Werten für weiches Gewebe (Z_{eff} = 7,42) bzw. Luft (Z_{eff} = 7,64) /8/, wodurch es sich für die viele Gebiete der Dosimetrie als besonders geeignet erweist.
Eine Übersicht der verwendeten TL-Detektoren zeigt Tabelle I.

Tabelle I *Übersicht über die verwendeten TL-Detektoren*

TL-Detektoren	Bezeich-nung	Abmessungen	Fläche [mm^2]	Dicke [mm]	Volumen [mm^3]	Gewicht [a)] [mg]	Dichte ρ [b)] [g/cm^3]	Trans-parenz [c)]
TLD 100	Charge G.	3,20 × 3,20 mm^2	10,24	0,90	9,22	24,28	2,634	≈ 1,0 ± 0,07
TLD 600	DE-B	3,15 × 3,15 mm^2	9,92	0,90	8,93	22,54	2,524	0,93 ± 0,10
TLD 700	Charge 3	3,15 × 3,15 mm^2	9,92	0,90	8,93	23,59	2,642	0,70 ± 0,12
TLD 100H	—	Ø 4,85 mm	18,47	1,00	18,47	40,27	2,180	0,11 ± 0,02
TLD 600H	—	3,0 × 3,0 mm^2	9,00	0,80	7,20	16,06	2,231	0,33 ± 0,07
TLD 700H	Serie II	Ø 4,55 mm	16,26	0,85	13,82	36,07	2,610	0,93 ± 0,07

a) Ermitteltes mittleres Gewicht eines Einzeldetektors.

b) Berechnete Dichte eines Einzeldetektors aus Volumen und gemessenem Gewicht.
Zum Vergleich: Die Dichte von LiF beträgt: ρ_{LiF} = 2,635 g/cm^3.

c) Optische Transparenz der Detektoren für TL-Licht, experimentell ermittelt. Siehe Abschnitt 4.2.

[2] Alle Angaben zur Zusammensetzung der TL-Materialien sind der Produktinformation /3/ der Firma Harshaw/Bicron entnommen.

4. Voruntersuchungen

4.1. Auswertung mit den Standardverfahren

Für die Regenerierung der TL-Detektoren werden vom Hersteller folgende Standardverfahren empfohlen:

TLD-100/600/700:	400 °C für eine Stunde, anschließend 80 °C für 24 Stunden,
TLD-100H/600H/700H:	240 °C für 10 Minuten.

Dies entspricht im wesentlichen auch den Empfehlungen, wie sie sich in der aktuellen Literatur (z.B. /6,7/) finden. Hier werden für die Standardregenerierung im wesentlichen folgende Werte genannt:

TLD-100/600/700:	400 °C für eine Stunde, anschließend: 80 °C für 16 oder 24 Stunden oder alternativ: 100 °C für 2 Stunden,
TLD-100H/600H/700H:	240 °C für 10 Minuten bis zu einer Stunde, optional mit anschließend 80 °C für 16 oder 24 Stunden.

Die Parameter für den Ausleseprozeß sind teilweise abhängig von der geometrischen Ausführung der Detektoren und dem angestrebten Meßzweck. So benötigen größere Detektoren eine etwas längere Zeit zum Aufheizen als kleinere. Ferner ist eine höhere Maximaltemperatur notwendig, wenn z.B. für die Dosimetrie von Neutronenstrahlung auch die Hochtemperaturpeaks wie Peak VII bei TLD-600 ausgewertet werden sollen. Anhaltswerte für gängige Ausleseparameter sind z.B.:

TLD-100/600/700:	Preheat: 100 °C, 10 s	Reading: 250 °C, 30 s, 10 °C/s (bis Peak V)
	Preheat: 100 °C, 10 s	Reading: 350 °C, 30 s, 12 °C/s (bis Peak VII)
TLD-100H/600H/700H:	Preheat: 135 °C, 10 s	Reading: 240 °C, 30 s, 10°C/s.

Der kritische Parameter ist die Maximaltemperatur von 400 °C bei den normalempfindlichen Materialien TLD-100/600/700 bzw. von 240 °C bei den hochempfindlichen Materialien TLD-100H/600H/700H, die in der Regel nicht überschritten werden sollte. Speziell bei den hochempfindlichen Materialien wird bei Überschreitung der Maximaltemperatur im allgemeinen ein deutlicher Empfindlichkeitsverlust bei nachfolgenden Messungen beobachtet /10/. Zur Eliminierung der Niedertemperaturpeaks kann gemäß Herstellerempfehlung bei den normalempfindlichen Materialien noch eine Temperphase von 10 Minuten bei 100 °C dem Auslesen vorangestellt werden.

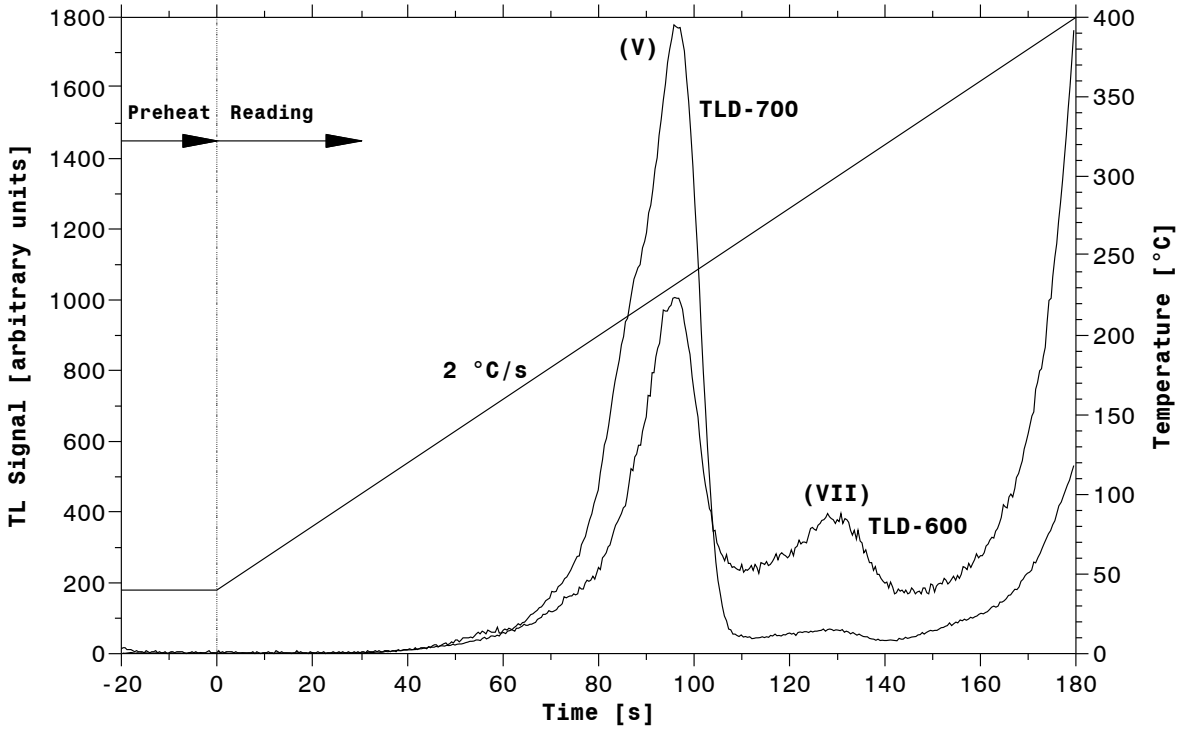


Abbildung 1 *Auswertung normalempfindlicher TL-Detektoren (TLD 600/TLD 700) mit geringer Aufheizrate. Beide Kurven sind auf gleiche integrale Impulszahl normiert. Die dosimetrischen Hauptpeaks sind mit (V) und (VII) gekennzeichnet.*

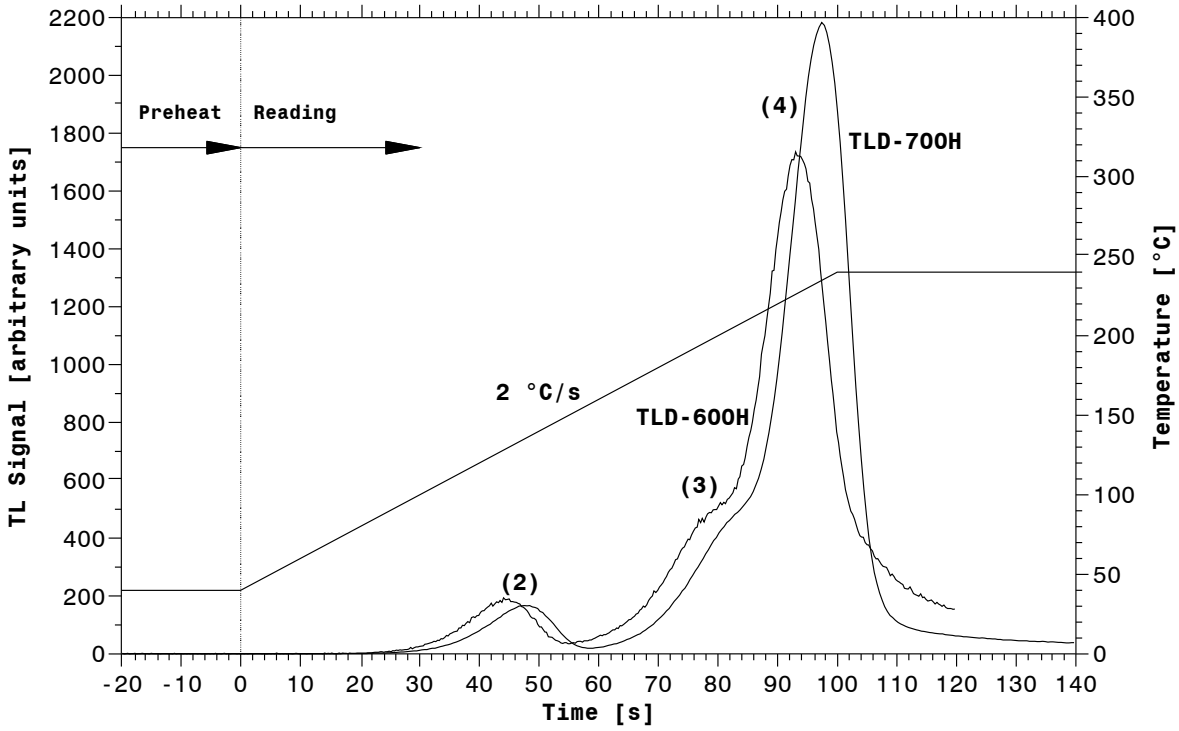


Abbildung 2 *Auswertung hochempfindlicher TL-Detektoren (TLD 100H/TLD 600H) mit geringer Aufheizrate. Beide Kurven sind auf gleiche integrale Impulszahl normiert. Die dosimetrischen Hauptpeaks sind mit (2) und (4) gekennzeichnet. Nebenpeak (3) bildet die Schulter von Peak (4).*

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen Glowkurven für normal- und hochempfindliche Phosphore, wie sie bei der Auswertung mit langsamer Aufheizrate gemessen wurden. Die geringe Aufheizrate läßt die Details in der Struktur der Glowkurven besonders deutlich hervortreten. Die Detektoren vom Typ TLD-700/700H wurden einen Tag vor der Auswertung mit 662 keV-γ-Strahlung einer ^{137}Cs-Quelle bestrahlt, während die TLD-600/600H-Detektoren in einer 12"-Moderatorkugel im Strahlungsfeld einer ^{241}Am-Be-Quelle exponiert wurden. Die integralen Intensitäten der Glowkurven (Flächen unterhalb der Kurven) wurden unabhängig von der Dosis für einen besseren Vergleich auf gleiche Werte normiert. Bei allen vier Detektortypen treten die dosimetrischen Hauptpeaks[3] (Peak V bei TLD-600/700 sowie Peak VII bei TLD-600, Peak 2 und Peak 4 bei TLD-600H/700H) klar hervor. Peak 3 von TLD-600H/700H ist als Schulter in Peak 4 zu erkennen.

Im allgemeinen zeigt sich eine Abhängigkeit der Glowkurvenstruktur von den Ausleseparametern und insbesonders von der Aufheizrate dT/dt, wobei T die Temperatur und t die Zeit darstellt. So beobachtet man sowohl ein "Ineinanderfließen" der Peaks mit zunehmender Aufheizrate als auch eine Verschiebung der Peakmaxima zu höheren Temperaturen.

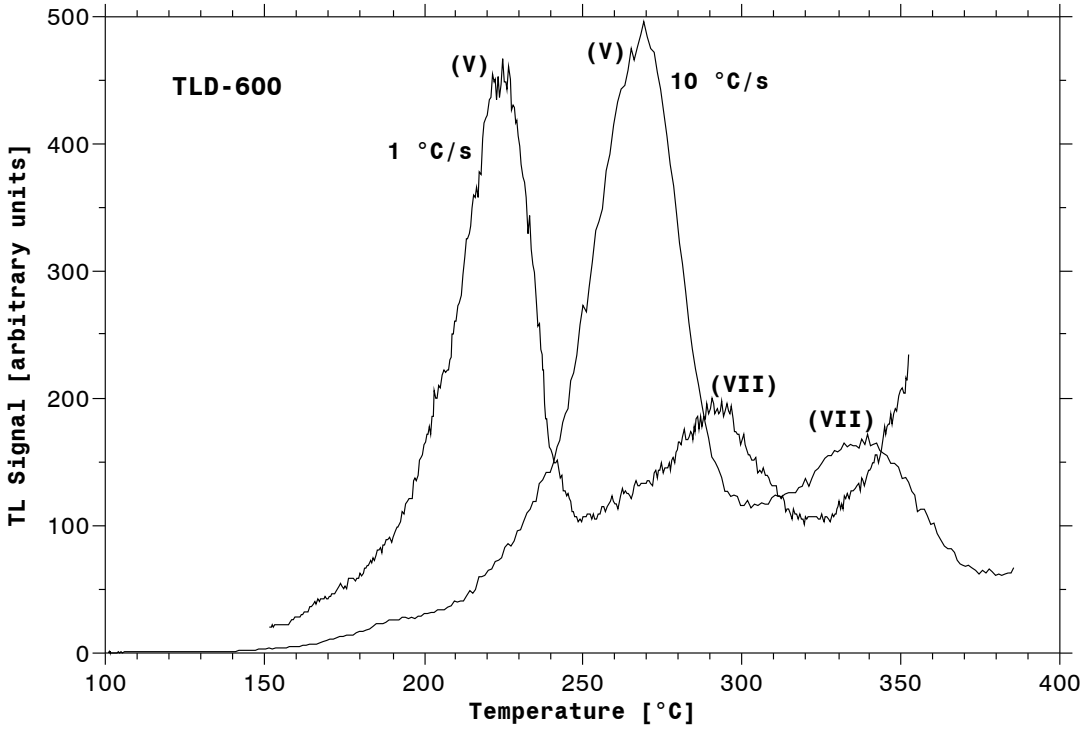


Abbildung 3 *Änderung der Peaklage in Abhängigkeit der Aufheizgeschwindigkeit bei der Auswertung. Gezeigt sind die Glowkurven von TLD-600-Detektoren, die zuvor in einer 12"-PE-Moderatorkugel mit Neutronen bestrahlt wurden.*

[3] Die Bezeichnung der Hauptpeaks der Glowkurven folgt den üblichen Angaben in der Literatur /6,11,12/. Zur Unterscheidung der Peaks von normal- bzw. hochempfindlichem TL-Material werden sie im vorliegenden Bericht mit römischen bzw. arabischen Ziffern numeriert.

Als Ursache dafür sind im wesentlichen zwei Effekte zu nennen. Zum einen sind die thermodynamischen Vorgänge der Thermolumineszenz, wie sie z.B. durch das Modell von Randall-Wilkins /13/ beschrieben werden, für die Peakverschiebung verantwortlich. Zum anderen werden die Glowkurven durch das Heizsystem des Auslesegerätes beeinflußt. So wird die Temperatur des Heizsystems nicht instantan auf den ganzen TL-Detektor übertragen. Bedingt durch den endlichen Wärmeübergang zwischen Heizsystem und TL-Detektor, die Wärmekapazität und -leitfähigkeit des TL-Detektors folgt die Temperatur des TL-Chips der des Heizsystems nur mit einer gewissen Verzögerung. Zudem kann sich gerade bei hohen Aufheizgeschwindigkeiten in Verbindung mit Planchet-Heizung auch ein Temperaturgradient innerhalb des TL-Detektors ausbilden, d.h. verschiedene Bereich im TL-Material können unterschiedliche Temperaturen aufweisen, wodurch sich die einzelnen Peaks überlappen und verwischen. Ein typisches Beispiel für die Änderung der Peaklage bei TLD-600 bei unterschiedlichen Aufheizraten zeigt Abbildung 3. Die Detektoren wurden wiederum in der 12"-PE-Kugel mit Neutronen aus einer ^{241}Am-Be-Quelle bestrahlt, so daß neben dem Hauptpeak V auch der Peak VII deutlich hervortritt. In Abschnitt 5 wird die Struktur der Glowkurven in Abhängigkeit der Parameter für Regenerierung und Auslesen, zusammen mit den Meßreihen für Messungen außerhalb der Standardparameter, detaillierter diskutiert.

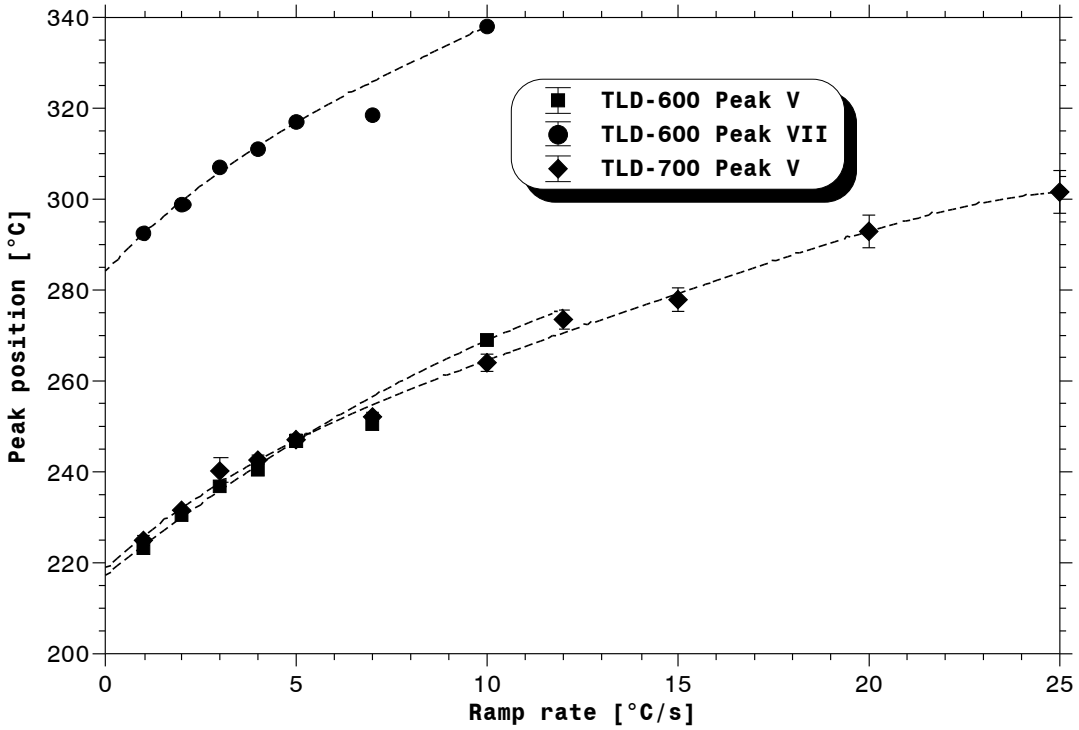


Abbildung 4 *Peaklagen der dosimetrischen Hauptpeaks V und VII für die normalempfindlichen Materialien TLD 600 und TLD 700 in Abhängigkeit der Aufheizrate dT/dt. Die Symbole repräsentieren die Meßwerte. Die durchgezogenen Kurven dienen zur Extrapolation auf die Aufheizrate dT/dt → 0.*

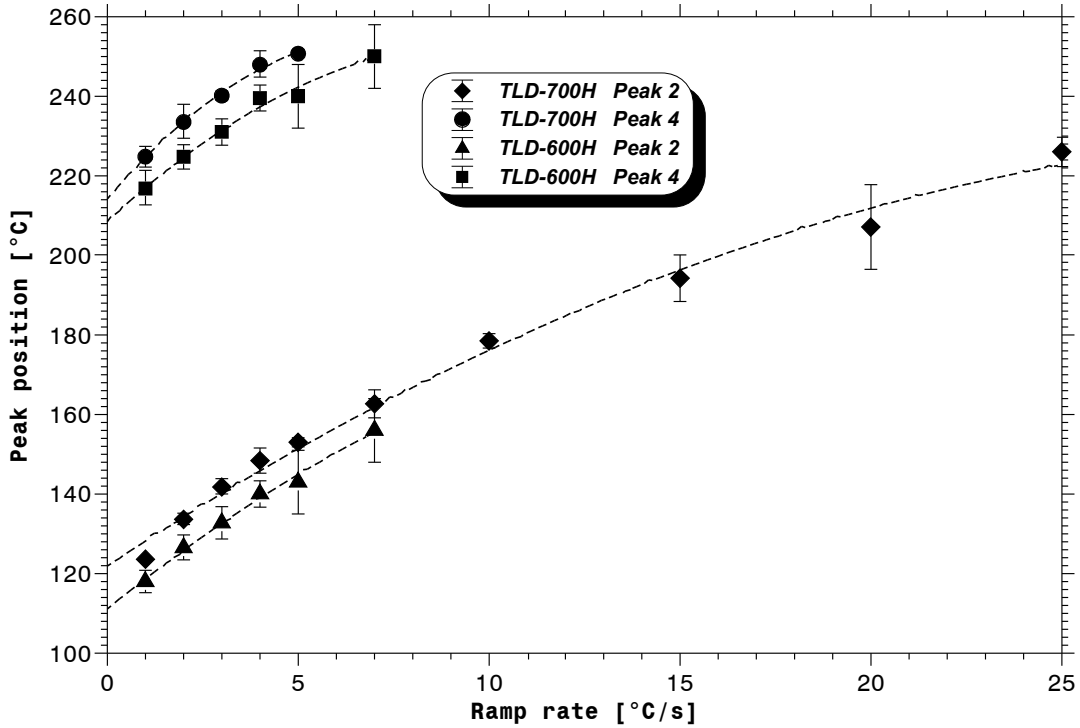


Abbildung 5 *Peaklagen der dosimetrischen Hauptpeaks 2 und 4 für die hochempfindlichen Materialien TLD 600H und TLD 700H in Abhängigkeit der Aufheizrate dT/dt. Die Symbole repräsentieren die Meßwerte. Die durchgezogenen Kurven dienen zur Extrapolation auf die Aufheizrate dT/dt → 0.*

Die Abhängigkeit der Peaklagen von der Aufheizgeschwindigkeit für die normal- und hochempfindlichen Materialien ist in den Abbildungen 4 und 5 dargestellt. Zu ihrer Bestimmung wurden die TL-Detektoren im Standardverfahren regeneriert (normalempfindlich: 400 °C, 1h; 80 °C, 16 h, hochempfindlich: 240 °C, 1h; 80 °C, 16h) und anschließend mit γ- bzw. Neutronen bestrahlt. Die Bestrahlungsparameter waren wie folgt:

TLD-600	H*(10) = 4,28 mSv	^{241}Am-Be-Neutronen	Bestrahlung in 12"-PE-Kugel
TLD-600H	H*(10) = 4,30 mSv	^{241}Am-Be-Neutronen	Bestrahlung in 12"-PE-Kugel
TLD-700	H_X = 21,4 mSv	662 keV-γ-Strahlung	^{137}Cs-Quelle frei in Luft
TLD-700H	H_X = 5,7 mSv	662 keV-γ-Strahlung	^{137}Cs-Quelle frei in Luft.

Nach einer Lagerzeit der Detektoren von 24 bis 48 Stunden zur Verringerung der Niedertemperaturpeaks (Fading) wurden jeweils mehrere TL-Detektoren mit unterschiedlichen Aufheizraten ausgewertet und die mittleren Lagen der Peakmaxima innerhalb der Glowkurven bestimmt. Extrapoliert man die erhaltenen Meßwerte für $dT/dt \rightarrow 0$, so erhält man die Peaklagen unbeeinflußt von der Detektorgeometrie und dem Aufheizsystem des TLD-Lesegerätes. Die so ermittelten Temperaturen sind gemäß den Standardtheorien zur Thermolumineszenz ein direktes Maß für die Energietiefe der Einfangzentren (Lumineszenzzentren) für die Elektronen. Tabelle II gibt eine Übersicht über die ermittelten Werte. Die Ergebnisse stehen in sehr guter Übereinstimmung mit den Literaturwerten /11,12/.

Tabelle II *Extrapolierte Peaklagen für $dT/dt \rightarrow 0$.*

	TLD-600	**TLD-700**		**TLD-600H**	**TLD-700H**
Peak V	217 °C	218 °C	**Peak 2**	116 °C	121 °C
Peak VII	284 °C	—	**Peak 4**	204 °C	217 °C

4.2. Empfindlichkeitsbestimmung der TL-Detektoren

Die Empfindlichkeit S_D der verschiedenen TL-Materialien (Index D) für durchdringende Gammastrahlung wird errechnet aus der Nettomeßwertanzeige M (Meßwert abzüglich Untergrund) bezogen auf eine aufgestrahlte Kalibrierdosis $H_{Kal.}$: $S_D = M/H_{Kal.}$. Kalibriert wurde im Strahlenfeld einer ^{137}Cs-Quelle (661,6 keV) bezüglich der Meßgröße H_X. Das Bruttomeßsignal wird durch die Impulssumme während der gesamten Lesephase (Reading) des TLD-Gerätes oder eines Bereiches (ROI: Region Of Interest) über dem dosimetrischen Hauptpeak gebildet. Intern wird durch die Gerätesoftware eine Korrektur bezüglich der Geräteempfindlichkeit (Abgleich über die interne Lichtquelle) und bezüglich des Dunkelstromes des Photomultipliers durchgeführt. Die Einheit des Meßsignales ist demnach *corrected counts* [cc]. Die Bestimmung des Untergrundes erfolgt über die Auswertung von Detektoren, die zusammen mit den Kalibrierdetektoren regeneriert, aber nicht bestrahlt wurden. Für einen direkten Vergleich der TL-Materialien untereinander bezüglich ihrer Empfindlichkeit gegenüber durchdringender Strahlung ist die direkte Nettoanzeige der TL-Detektoren (z.B. die Intensität des dosimetrischen Hauptpeaks) allein nicht ausreichend. So sollte die Anzeige proportional zur Masse der TL-Detektoren sein, sofern bei der Auswertung kein Licht innerhalb des Detektors absorbiert wird. Schon bei einfacher Betrachtung der TL-Detektoren fällt jedoch ein deutlicher Unterschied bezüglich ihrer Beschaffenheit und Transparenz auf. So sind z.B. die TLD-100-Detektoren hell-durchscheinend, während die TLD-100H-Detektoren eher undurchsichtig

erscheinen und mit ihrem matt-weißen Aussehen eher an ein keramisches Material erinnern. Die anderen verwendeten Detektortypen liegen zwischen diesen beiden Extremen.

Zur quantitativen Bestimmung ihrer Transparenz für ihr eigenes TL-Licht wurden spezielle Versuchsreihen durchgeführt. Jeweils zwölf Detektoren eines Typs wurden auf einer ^{241}Am-Flächenquelle (Nr. KY 98) für drei Stunden (normalempfindliches Material) bzw. einer Stunde (hochempfindliches Material) in direktem Kontakt mit der aktiven Fläche exponiert. Die Eindringtiefe der α-Strahlung ($E_\alpha \approx 5{,}5$ MeV) in LiF beträgt ca. $5{,}6 \cdot 10^{-3}$ g/cm^2 entsprechend 0,02 mm /14/ und ist damit wesentlich geringer als die Dicke der TL-Detektoren (0,8 .. 1,0 mm). Gegenüber der hohen α-Energie, die vollständig im Material absorbiert wird, können die Beiträge der durchdringenden γ-Strahlung (vornehmlich 26 keV und 60 keV) vernachlässigt werden. Bei der anschließenden Auswertung wurden dann jeweils sechs Detektoren eines Typs mit der bestrahlten Seite auf dem Planchet untenliegend und sechs Detektoren mit der bestrahlten Seite obenliegend ausgewertet. Während das TL-Licht bei obenliegender Bestrahlungsseite praktisch ungehindert den Photomultiplier des Auslesegerätes erreicht, wird es bei untenliegender Bestrahlungsseite durch optische Absorption im Detektor selbst geschwächt. Unter der vereinfachenden Annahme, daß die optische Absorption im Bereich der Eindringtiefe der α-Strahlung vernachlässigt werden kann, läßt sich die Transparenz Λ eines Detektors definieren als:

$$\Lambda := \frac{\text{Nettomeßwert } M_U \text{ bei untenliegender Bestrahlungsseite}}{\text{Nettomeßwert } M_O \text{ bei obenliegender Bestrahlungsseite}} .$$

Aus der gemessenen Transparenz der TL-Detektoren läßt sich ein Korrektionsfaktor k_T zur Berücksichtigung der Absorptionsverluste ableiten. Geht man vom idealen Schwächungsgesetz aus, so gilt:

$$\Lambda = \frac{M_U}{M_O} = e^{-\lambda d} ,$$

wobei d die Dicke des Detektors bezeichnet. Daraus folgt für den Absorptionskoeffizienten λ:

$$\lambda = \frac{1}{d} \ln\frac{M_O}{M_U} = \frac{1}{d} \ln\frac{1}{\Lambda} .$$

Bei Exposition des Detektors zu durchdringender Strahlung wird bei anschließender Auswertung im gesamten Detektorvolumen TL-Licht emittiert, das jedoch in Abhängigkeit des Emissionsortes von den darüberliegenden Schichten teilweise absorbiert wird. Der Anteil I' des nicht-absorbierten Lichtes ergibt sich der Integration über die Detektordicke:

$$I' = \frac{\int_0^d e^{-\lambda x}\, dx}{\int_0^d dx} = \frac{1 - e^{-\lambda d}}{\lambda d} .$$

Damit ergibt sich der Korrektionsfaktor für die Detektortransparenz zu:

$$k_T = \frac{\lambda \ d}{1 - e^{-\lambda d}} = \frac{\ln \Lambda}{\Lambda - 1} \ .$$

Zur Bestimmung der relativen Empfindlichkeit eine TL-Materials gegenüber durchdringender Strahlung wird die spezifische Empfindlichkeit $s_D = S_D/m_D$ gebildet. Sie berücksichtigt die unterschiedlichen Massen der Detektoren. Mit dem Korrektionsfaktor k_T für die Transparenz der Detektoren ergibt sich die korrigierte spezifische Empfindlichkeit $s_D' = k_T \cdot s_D$. Tabelle III gibt eine Übersicht über die ermittelten Werte für die verwendeten TL-Detektortypen.

Tabelle III *Detektorempfindlichkeiten und Korrektionsfaktoren für durchdringende γ-Strahlung*

	m_D [mg]	Λ	λ [mm]	k_T	S_D [cc / µSv]	s_D [cc / µSv mg]	s_D' [cc / µSv mg]
TLD-100	24,28	1,000	0,000	1,000	5,93	0,244	0,244
TLD-600	22,54	0,933	0,077	1,035	4,48	0,199	0,206
TLD-700	23,59	0,704	0,390	1,186	4,55	0,193	0,229
TLD-100H	40,27	0,110	2,207	2,480	29,2	0,725	1,80
TLD-600H	16,06	0,326	1,401	1,663	74,6	4,65	7,72
TLD-700H	36,07	0,931	0,084	1,036	175	4,85	5,03

Ohne Berücksichtigung der Transparenzkorrektion sind, mit Ausnahme von TLD-100H, die hochempfindlichen Materialien ca. 22-fach empfindlicher gegenüber den Standardmaterialien. Die ermittelten Werte für die Transparenz Λ korrespondieren mit der augenscheinlichen Durchsichtigkeit der Detektoren. Die relativ geringe Empfindlichkeit von TLD-100H läßt sich jedoch nicht allein durch die geringe Transparenz des Materials erklären. Es bleibt festzustellen, daß die verschiedenen hochempfindlichen Materialien sowohl in ihrer spezifische Empfindlichkeit wie auch in ihrer bezüglich der Transparenz korrigierten Empfindlichkeit, und auch in ihrer Transparenz selbst, eine wesentlich höhere Streuung aufweisen als die entsprechenden normalempfindlichen Materialien.

5. Phänomenologische Analyse der Glowkurvenstruktur

Zur Analyse der Glowkurvenstrukturen wurden jeweils einige Detektoren aus allen Chargen mit Gamma-Strahlung, unmoderierten Neutronen der ^{241}Am-Be-Quelle, quasi-thermischen Neutronen (exponiert in 12"-PE-Kugel) und Alpha-Teilchen (in Kontakt mit der Flächenquelle) bestrahlt. Die Regeneration der Detektoren erfolgte vor der Bestrahlung nach den Standardparametern. Da zum Teil zwischen Regenerierung und Auswertung mehrere Tage lagen, ist bei einer quantitativen Auswertung der Untergrundanteil durch natürliche Umgebungsstrahlung zu berücksichtigen. Leider wurde nicht in allen Fällen der Untergrundanteil separat bestimmt, so daß im folgenden hauptsächlich eine qualitative Analyse der Glowkurvenstruktur erfolgen soll. Ferner wurde auch die Dosis nicht in allen hier aufgeführten Fällen exakt bestimmt. Speziell für die Bestrahlung mit thermischen Neutronen und mit Alpha-Strahlung kann eine Dosis nur sehr eingeschränkt abgeschätzt werden. Die Dosiswerte für die Gamma-Bestrahlung lagen mit etwa H_X = 4,5 mSv etwa gleich hoch wie die Dosis $H^*(10)$ = 4,5 mSv für die Bestrahlung mit unmoderierten Neutronen. Für die Bestrahlung der Detektoren in der 12"-PE-Kugel mit Neutronen war die berechnete Dosis, ohne Berücksichtigung der Moderatorkugel, am Ort der Detektoren $H^*(10)$ = 2,2 mSv.

Für alle Detektoren wurden im wesentlichen zwei verschiedene Auswerteprozeduren eingesetzt, die sich lediglich in der Endtemperatur von 240 °C bzw. 400 °C unterscheiden. Die übrigen Parameter für Preheat (150 °C, 10 s) und den Auslesevorgang (30 s, 10 °C/s) waren in beiden Fällen identisch. Hierbei ist darauf hinzuweisen, daß die hochempfindlichen TL-Materialien lediglich bis auf 240 °C aufgeheizt werden sollen, um eine irreversible Empfindlichkeitseinbuße zu vermeiden. Aus Gründen der eingehenden Analyse der Glowkurvenstruktur wurde jedoch von dieser Vorgabe in einigen Fällen abgewichen. Die Effekte, die nach einer derartig hohen Auswertetemperatur bei den hochempfindlichen Materialien auftreten sowie Untersuchungen der Empfindlichkeitsänderungen und die Möglichkeiten zur Wiederherstellung und Stabilisierung der Empfindlichkeiten sollen zu einem späteren Zeitpunkt weiter untersucht werden.

Für eine erste Abschätzung der Empfindlichkeiten der unterschiedlichen TL-Materialien für die verschiedenen Strahlenarten wurde die relative Empfindlichkeit der TL-Materialien bezüglich TLD-100 bestimmt. Diese ergibt sich aus der integralen Nettoimpulszahl über den gesamten Auswertebereich (Bruttoimpulszahl abzüglich Untergrund), dividiert durch die Nettoimpulszahl von TLD-100 bei einer maximalen Auswertetemperatur von 240 °C. Die relativen Werte der Empfindlichkeit sind jeweils für eine maximale Auswertetemperatur von 240 °C bzw. 400 °C in Tabelle IV aufgeführt. Korrektionen bezüglich der Detektormassen und der Transparenz wurden hierbei nicht vorgenommen.

Tabelle IV *Relative integrale Empfindlichkeiten der TL-Materialien für verschiedene Strahlenarten*

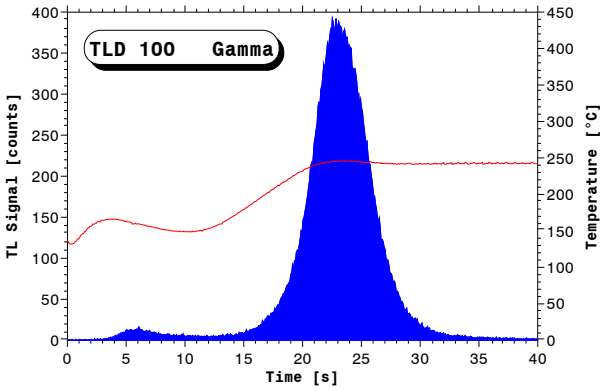
	Auswertung bis 240 °C						**Auswertung bis 400 °C**					
	TLD-100	**TLD-600**	**TID-700**	**TLD-100H**	**TLD-600H**	**TLD-700H**	**TLD-100**	**TLD-600**	**TID-700**	**TLD-100H**	**TLD-600H**	**TLD-700H**
γ-Strahlung	1,00	0,77	0,77	4,19	12,22	34,12	1,02	0,77	0,78	7,44	15,41	38,64
^{241}Am-Be-Neutronen (unmoderiert)	1,00	1,77	0,25	1,99	13,84	9,16	1,16	2,35	0,20	3,27	17,38	12,10
thermische Neutronen	1,00	1,45	0,04	1,28	12,37	1,58	1,21	2,21	—	2,51	17,13	2,54
α-Strahlung (unten) [a)]	1,00	0,55	0,73	0,15	1,74	4,53	1,40	0,74	0,90	0,29	2,52	7,72
α-Strahlung (oben) [b)]	1,00	0,51	0,50	0,15	3,37	7,33	1,19	0,69	0,94	4,05	5,47	11,64

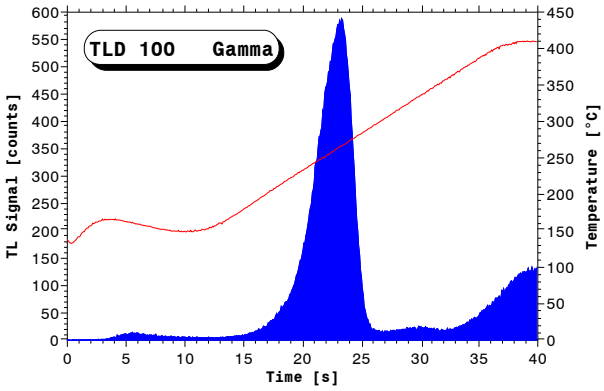
[a)] Bestrahlte Seite bei Auswertung untenliegend, d.h. vom Photomultiplier abgewandt.
[b)] Bestrahlte Seite bei Auswertung obenliegend, d.h. dem Photomultiplier zugewandt.

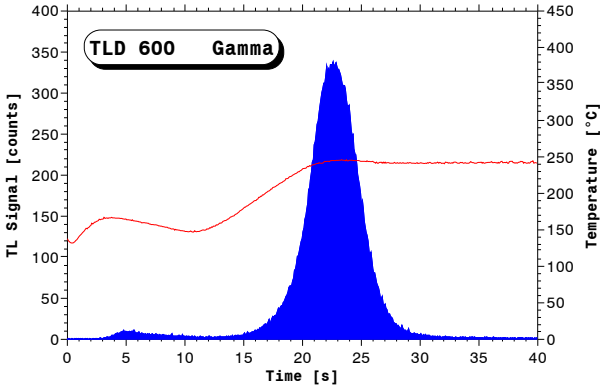
Im folgenden wird durch verschiedene Gegenüberstellungen von Glowkurven unterschiedlicher TL-Materialien und bei verschiedenen Maximaltemperaturen bei der Auswertung der Einfluß der einzelnen Strahlenarten auf die Glowkurvenstruktur dargestellt. Hierdurch wird ersichtlich, wie sich bei den verschiedenen TL-Materialien durch die Aufspaltung der Glowkurven in einzelne Peaks Informationen über die Einzelkomponenten des Strahlungsfeldes gewinnen lassen. Dargestellt ist jeweils eine typische Glowkurve aus mehreren Messungen an Einzeldetektoren.

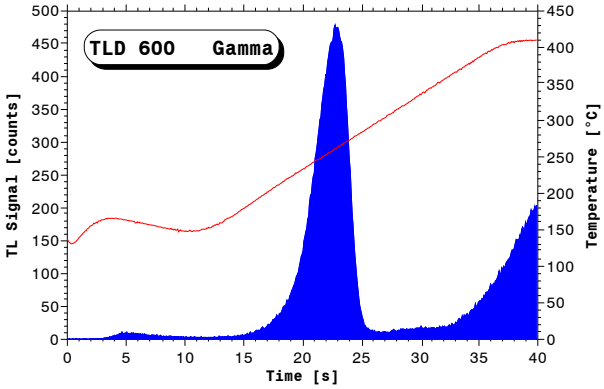
5.1. Normalempfindliche TL-Materialien, Einfluß der maximalen Auswertetemperatur

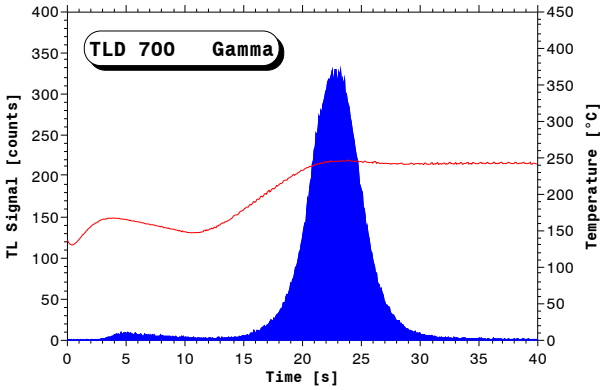
5.1.1. Gamma-Bestrahlung

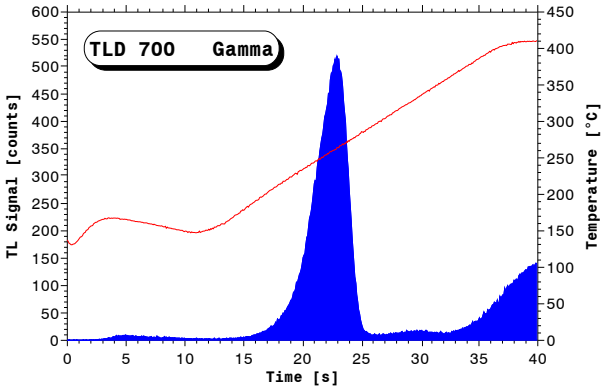




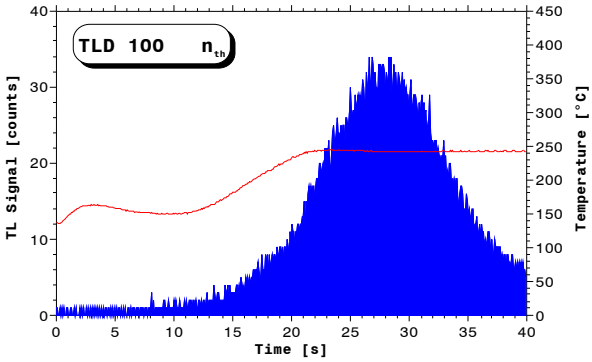


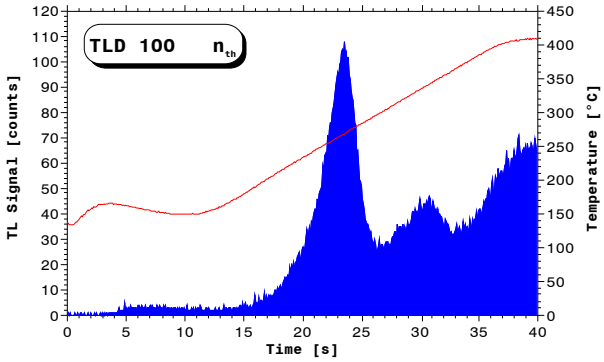


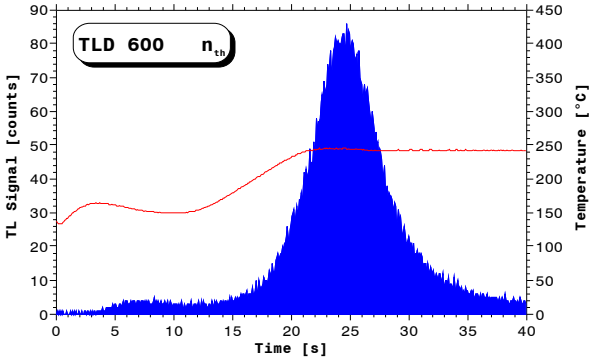


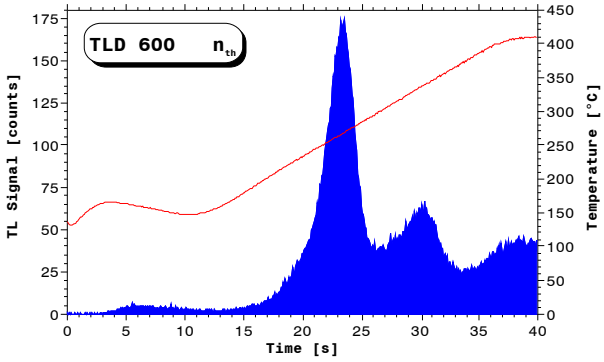


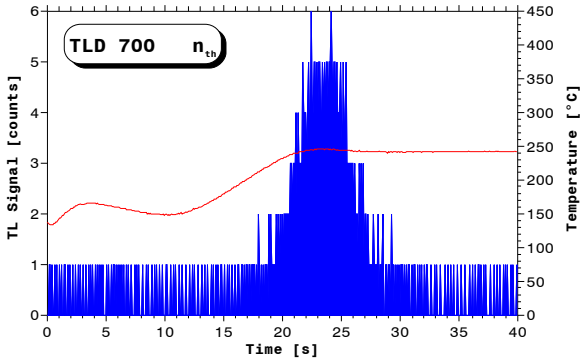
5.1.2. Bestrahlung mit thermischen Neutronen



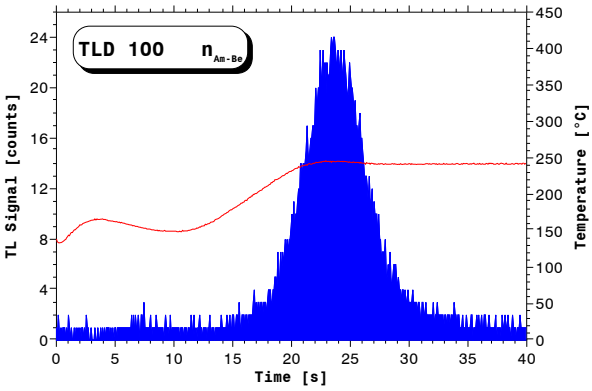


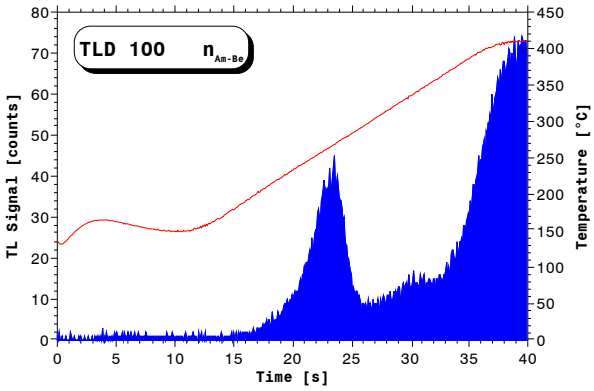


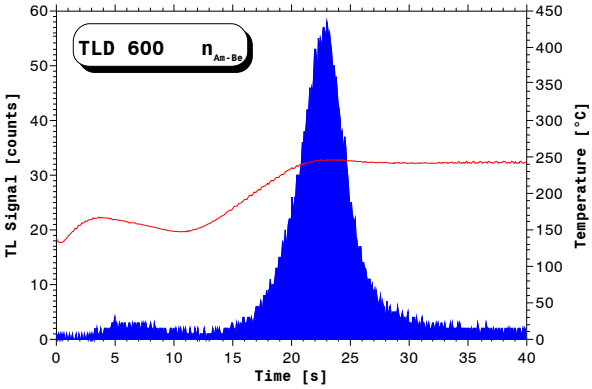


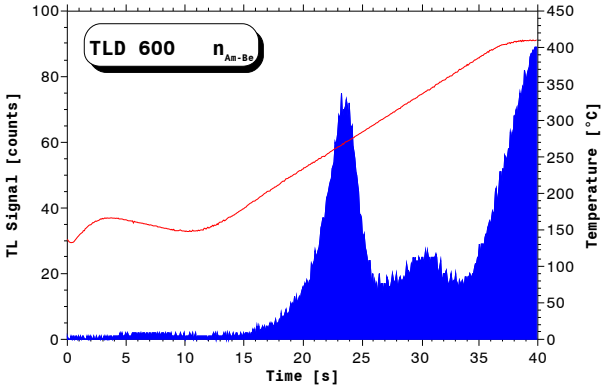


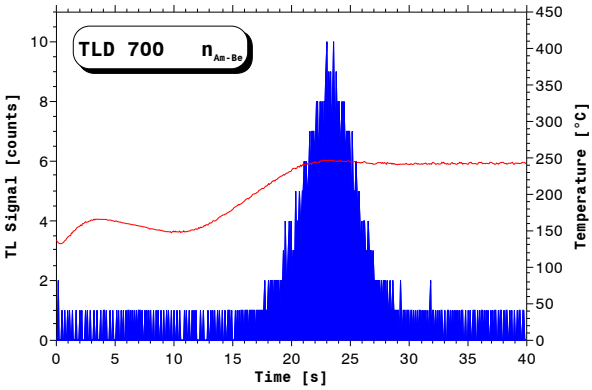
5.1.3. Bestrahlung mit ^{241}Am-Be-Neutronen (unmoderiert)

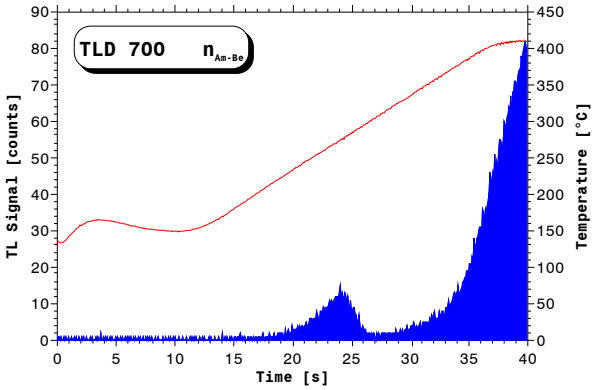




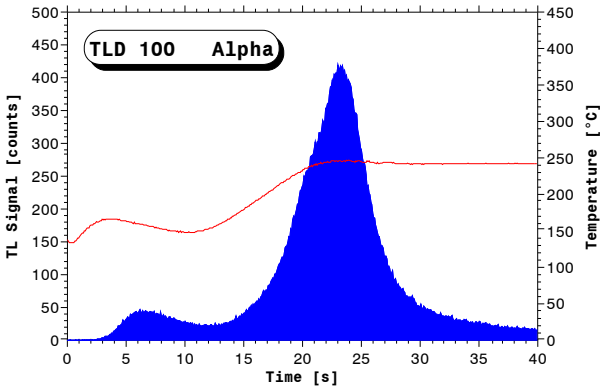


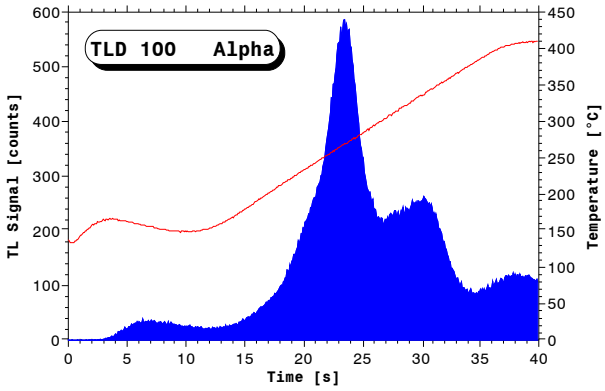


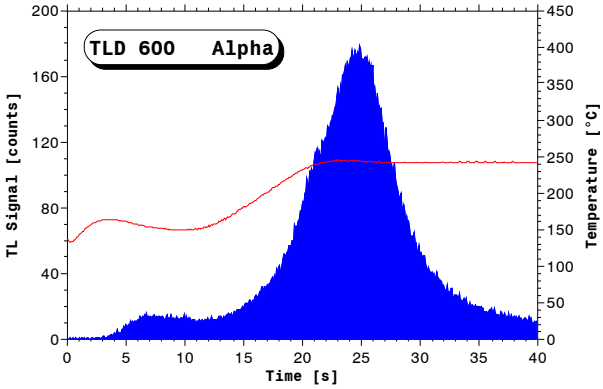


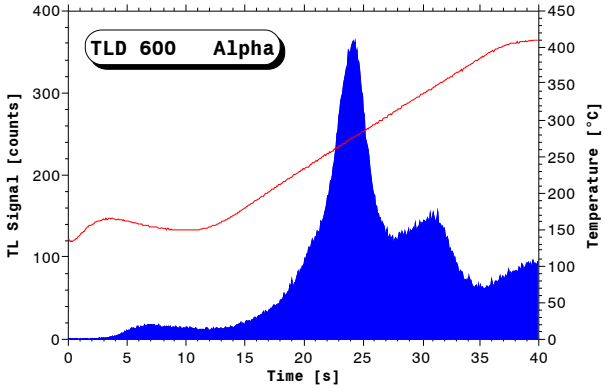


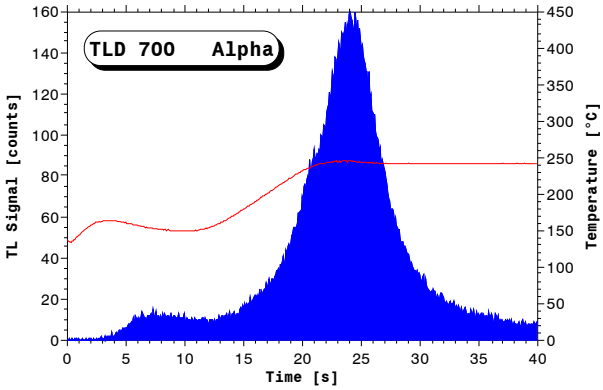
5.1.4. Bestrahlung mit ^{241}Am-Alpha-Teilchen

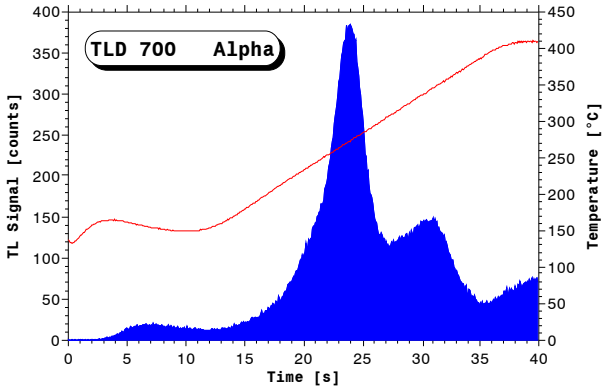






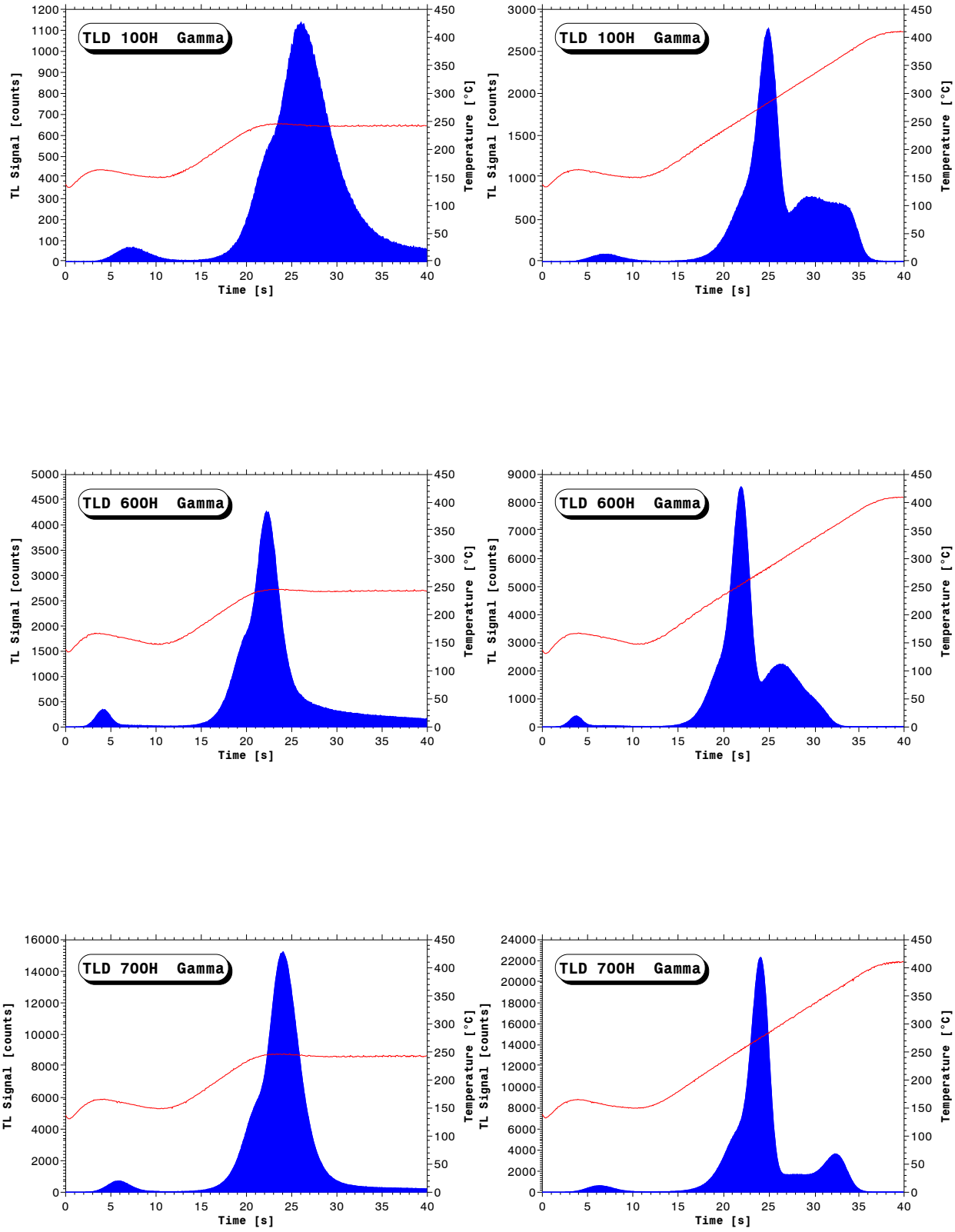




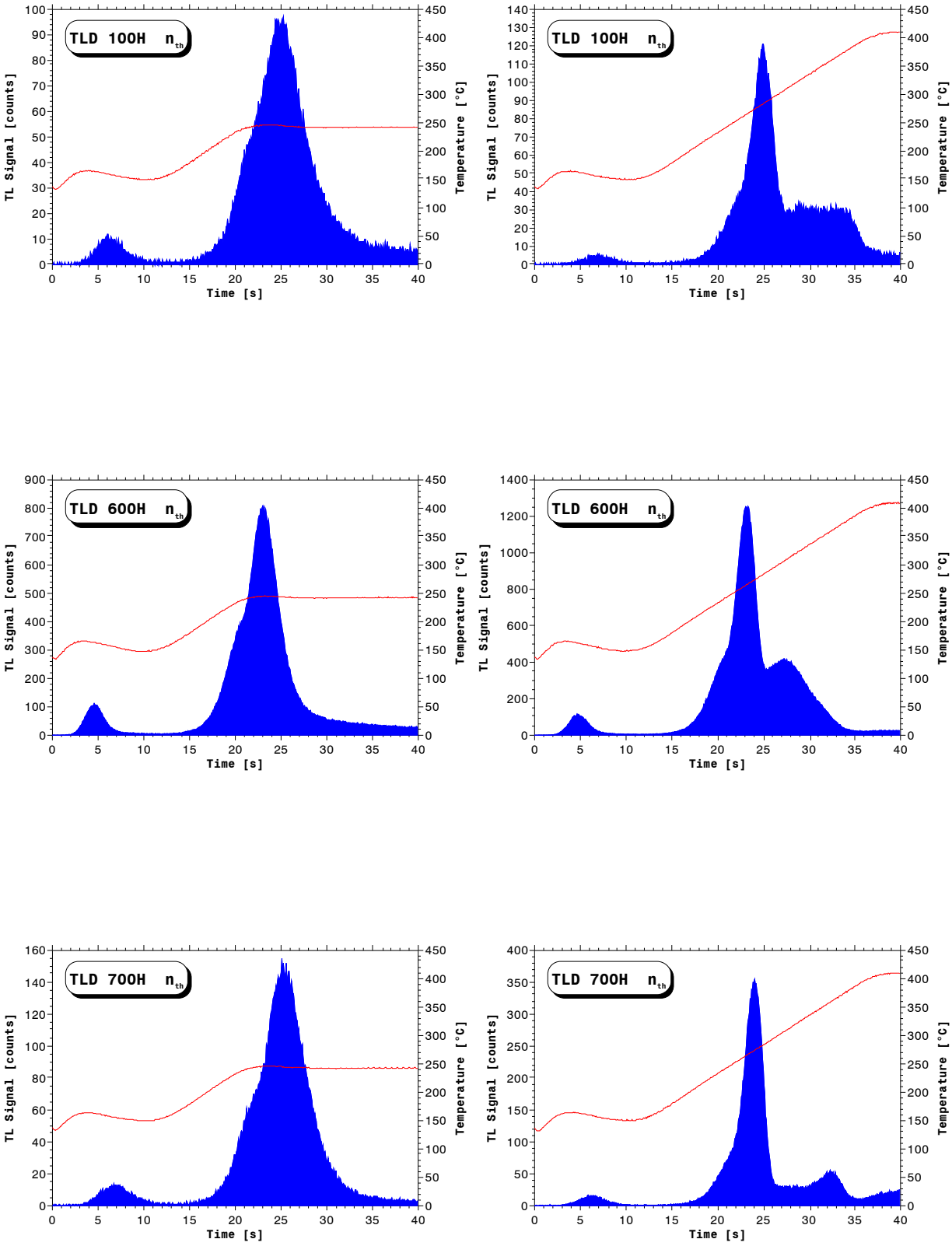


5.2. Hochempfindliche TL-Materialien, Einfluß der maximalen Auswertetemperatur

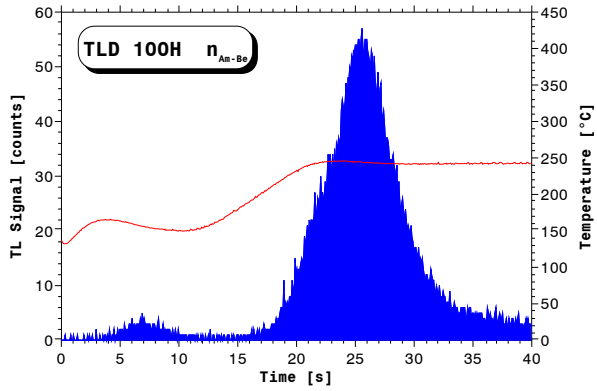
5.2.1. Gamma-Bestrahlung

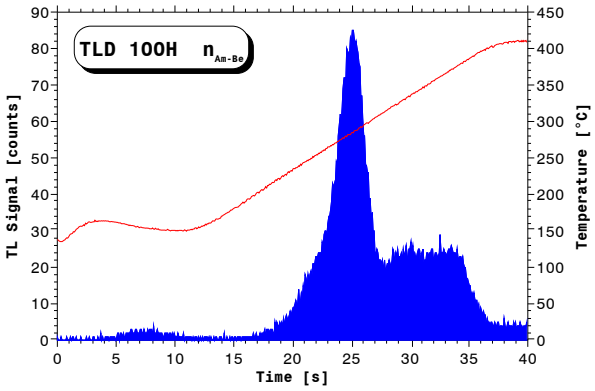


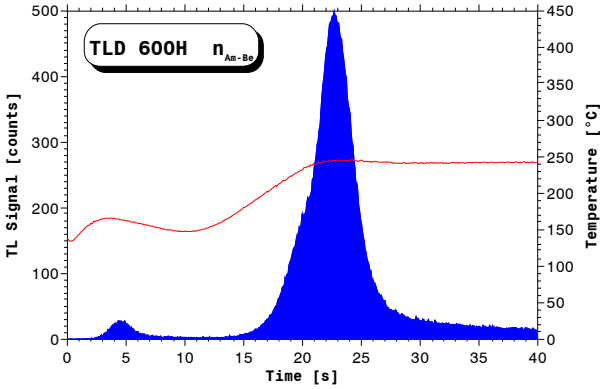
5.2.2. Bestrahlung mit thermischen Neutronen

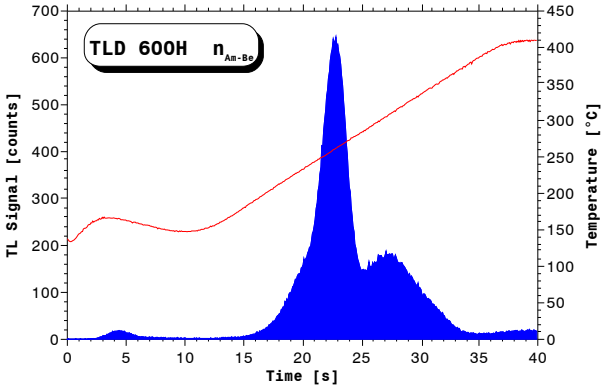


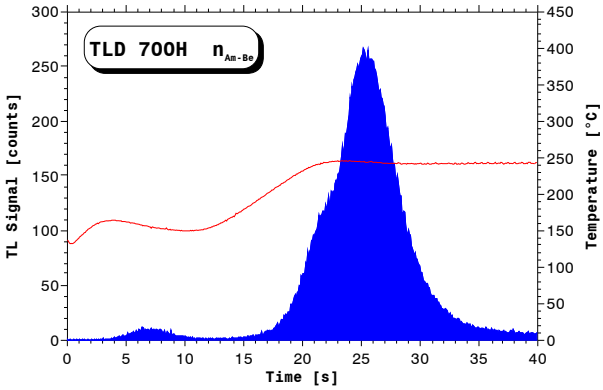
5.2.3. Bestrahlung mit ^{241}Am-Be-Neutronen (unmoderiert)

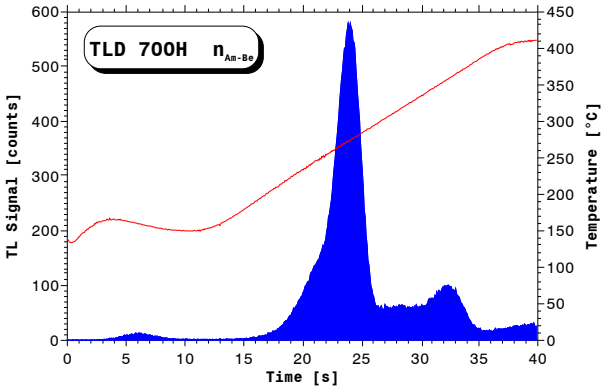




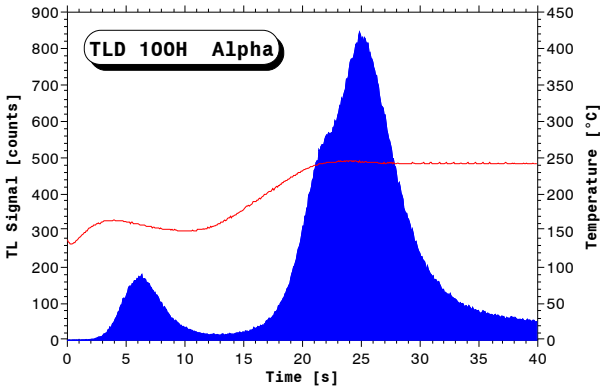


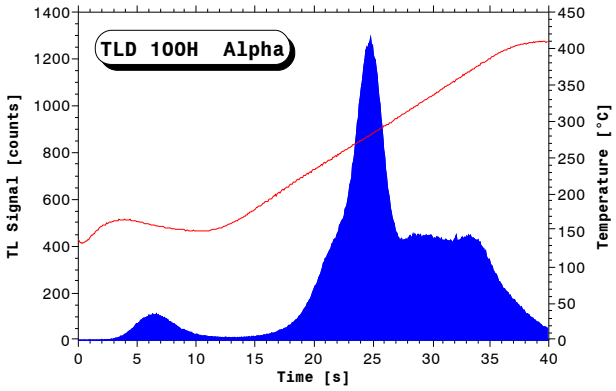


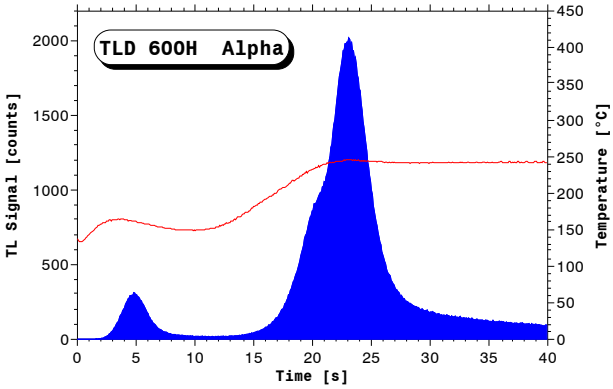


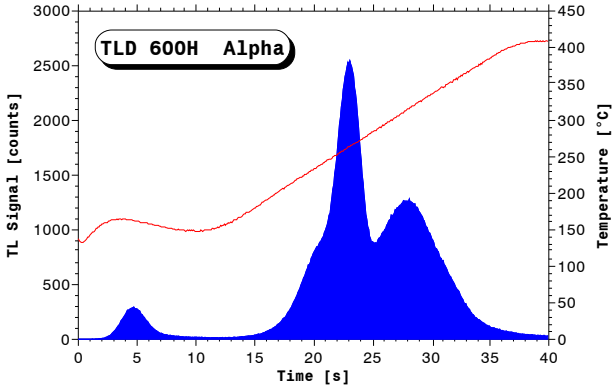


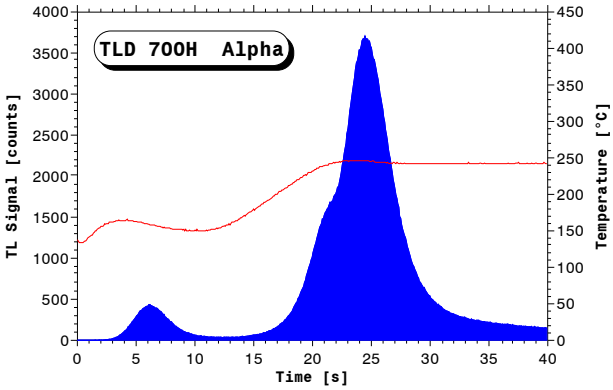
5.2.4. Bestrahlung mit ^{241}Am-Alpha-Teilchen

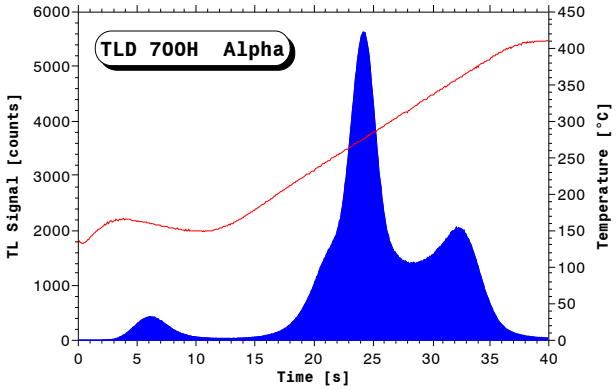






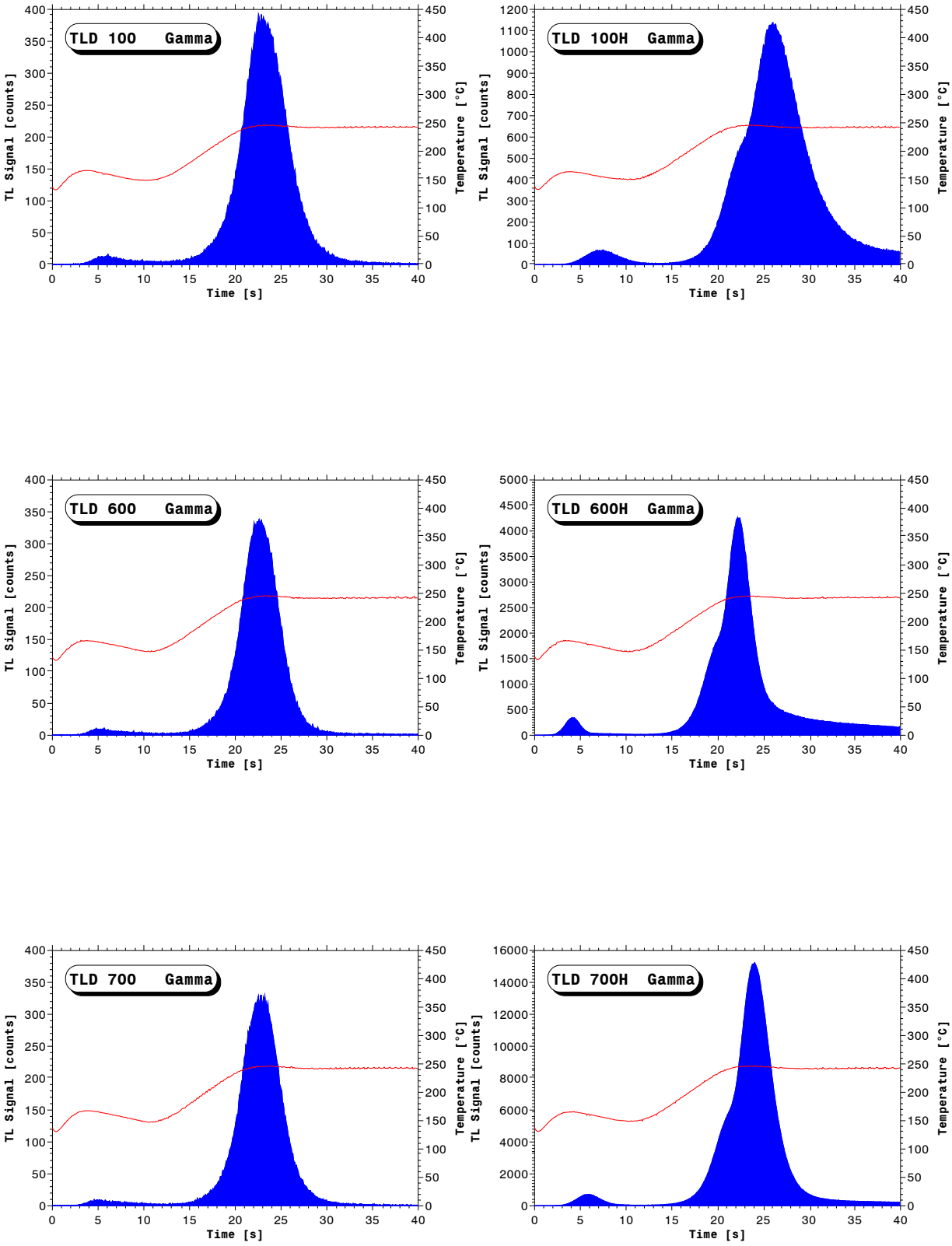




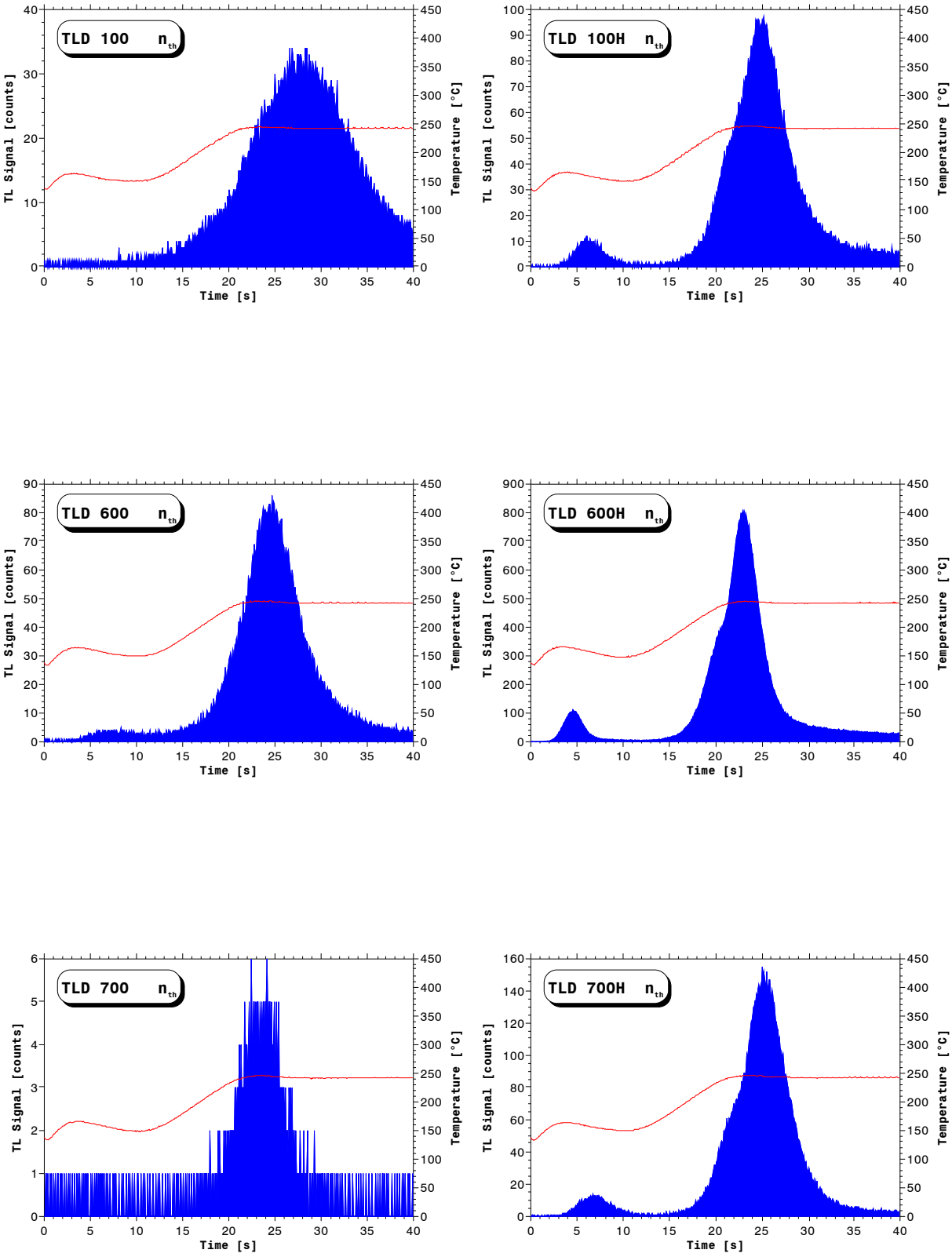


5.3. Normal-/hochempfindliche Materialien bis 240 °C

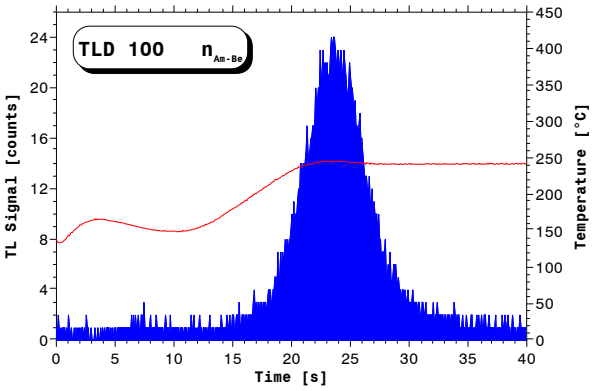
5.3.1. Gamma-Bestrahlung

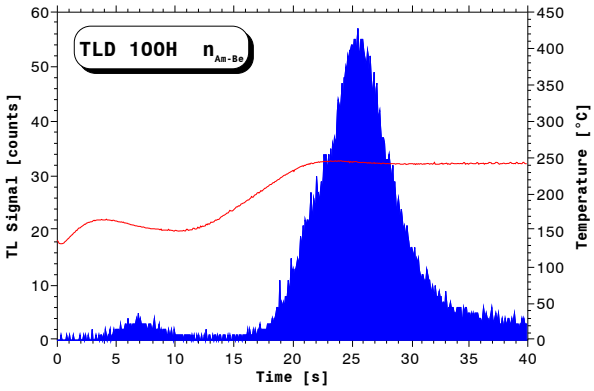


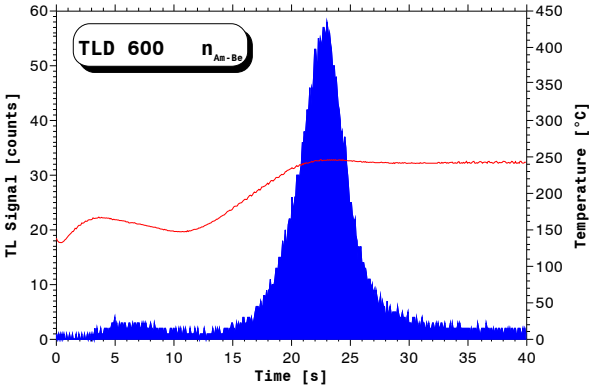
5.3.2. Bestrahlung mit thermischen Neutronen

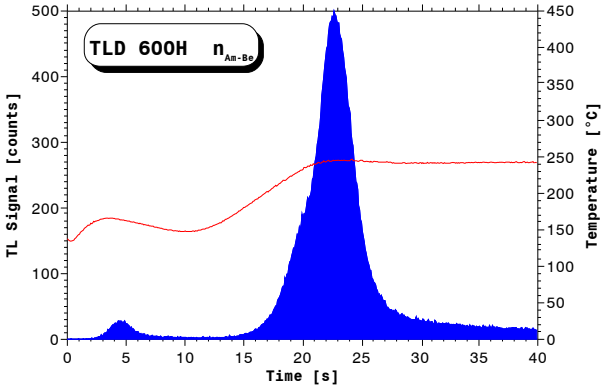


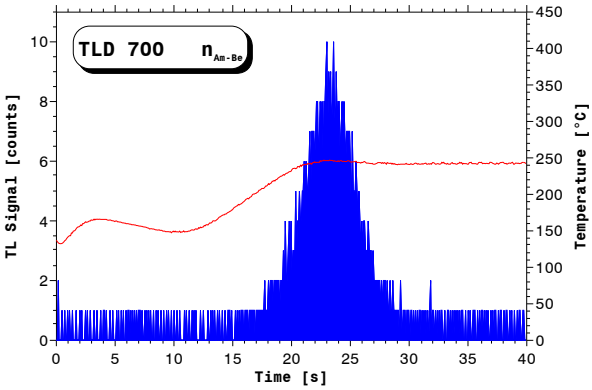
5.3.3. Bestrahlung mit ^{241}Am-Be-Neutronen (unmoderiert)

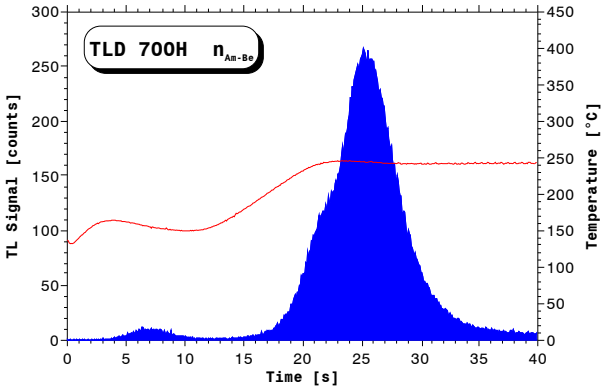




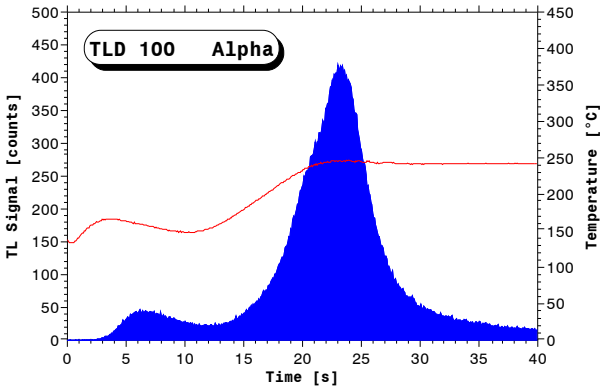


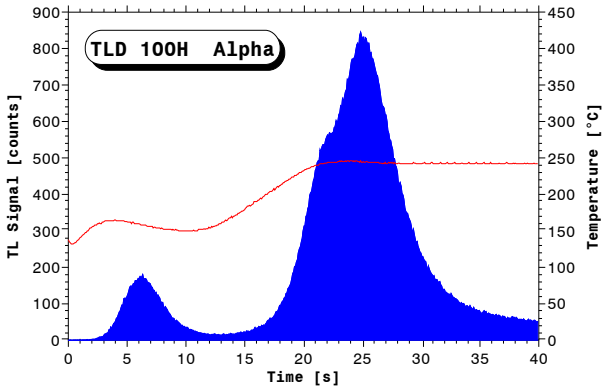


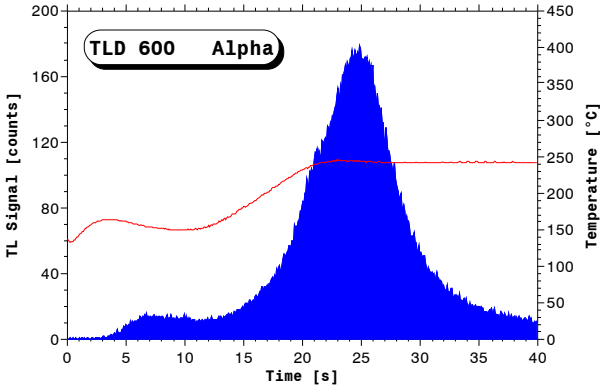


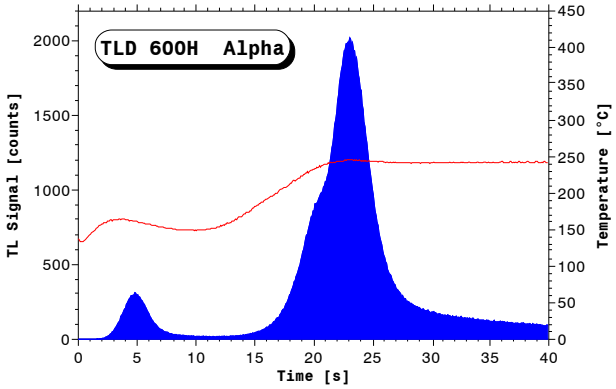


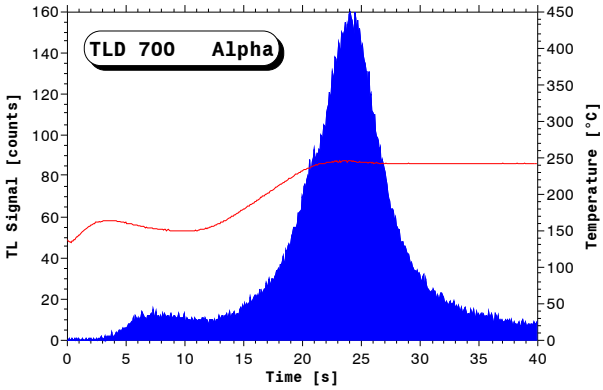
5.3.4. Bestrahlung mit ^{241}Am-Alpha-Teilchen

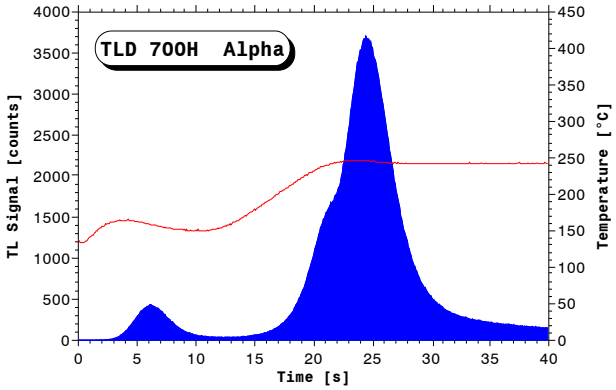






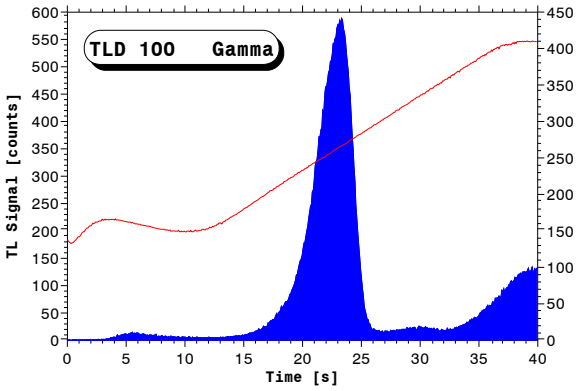


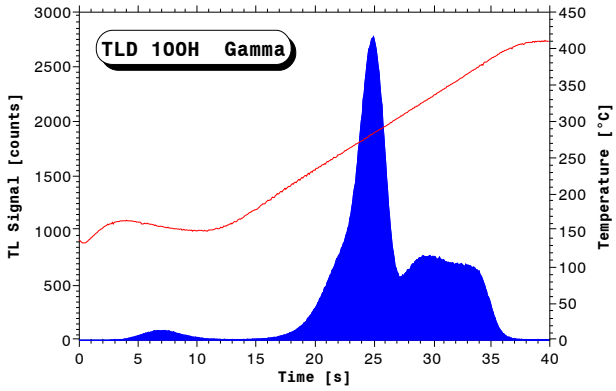


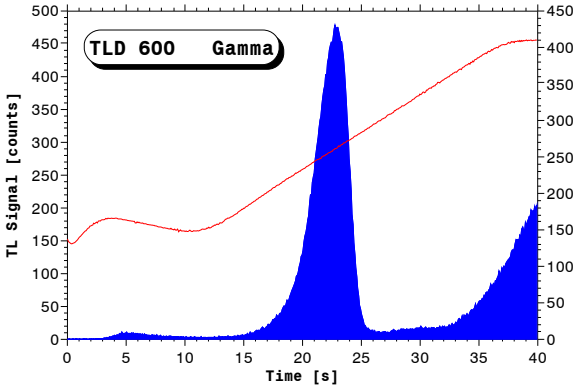


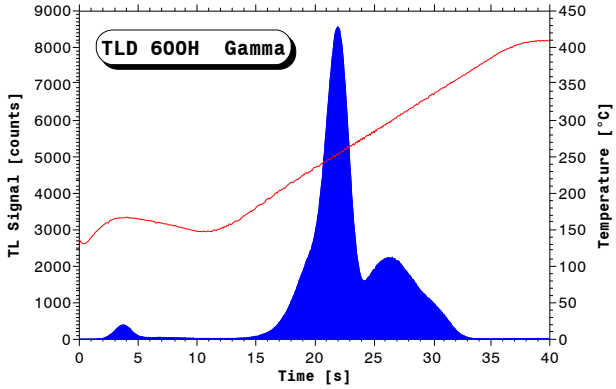
5.4. Normal-/hochempfindliche Materialien bis 400 °C

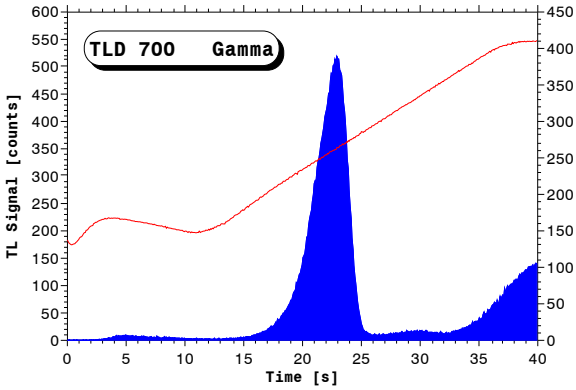
5.4.1. Gamma-Bestrahlung

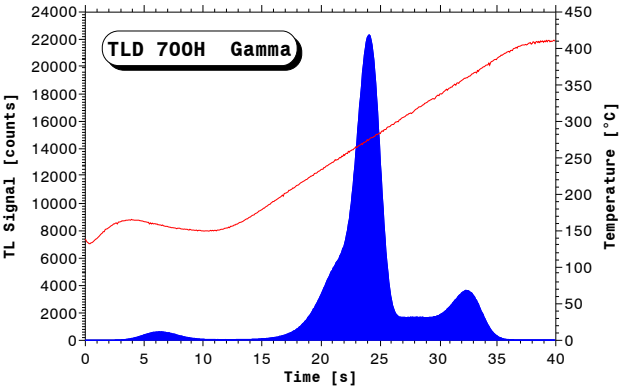




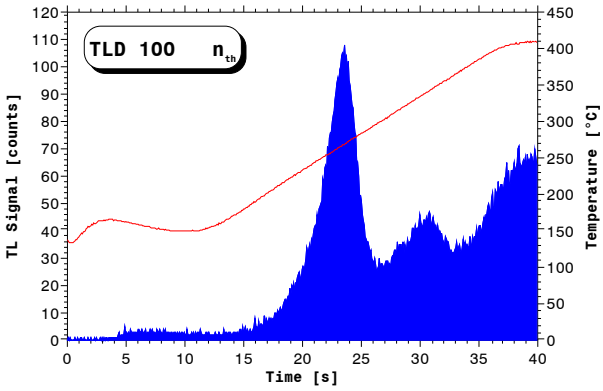


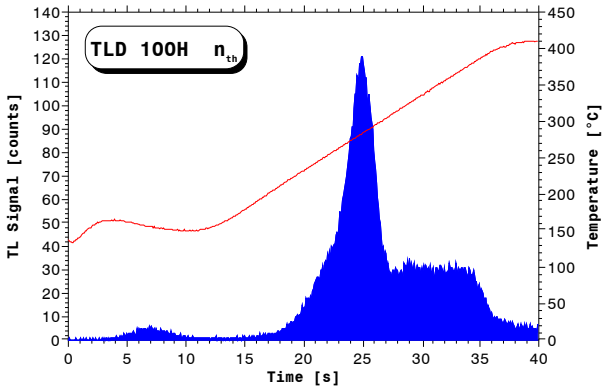


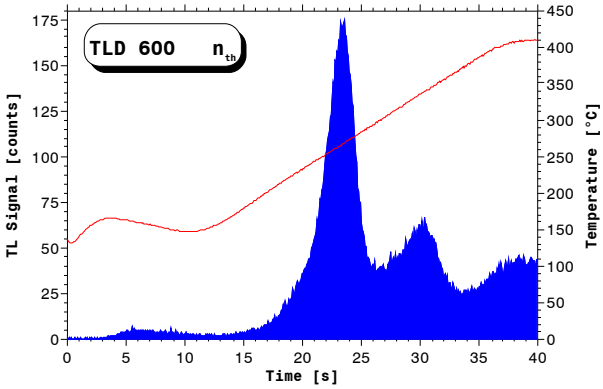


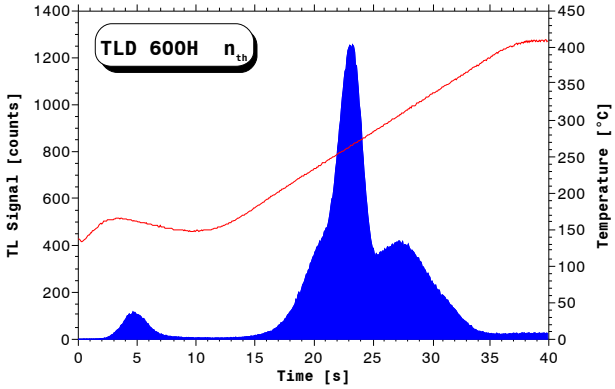


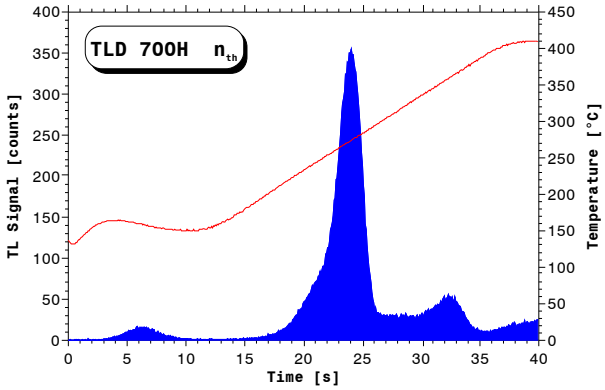
5.4.2. Bestrahlung mit thermischen Neutronen



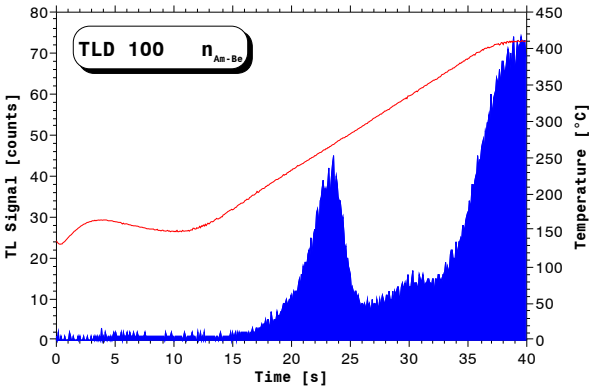


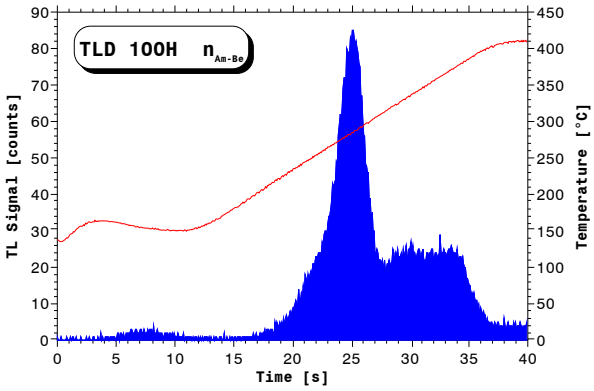


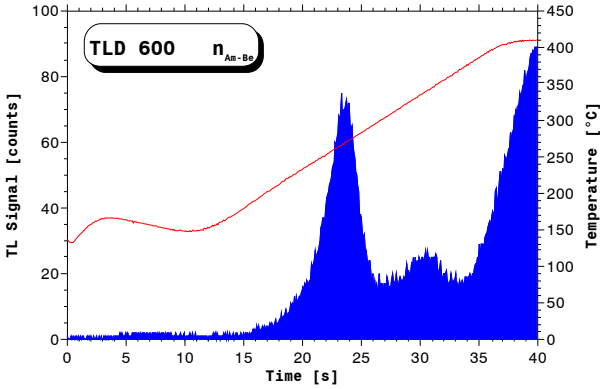


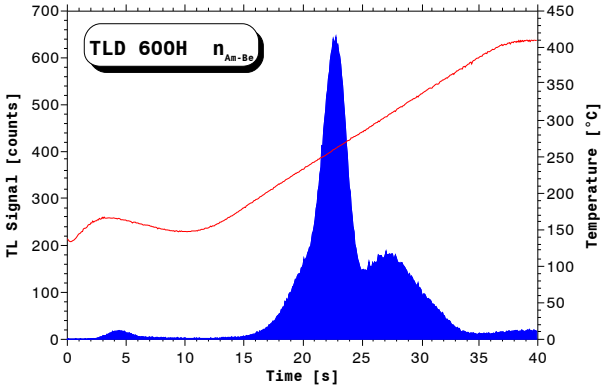


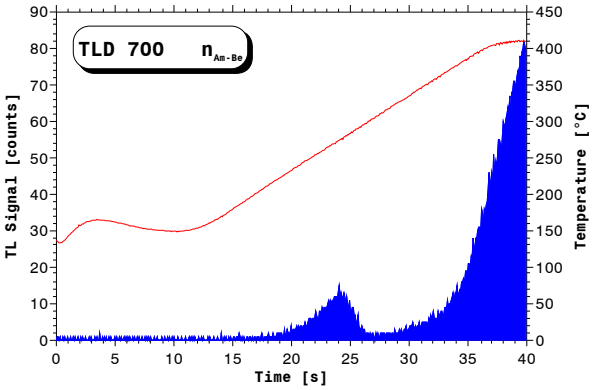
5.4.3. Bestrahlung mit ^{241}Am-Be-Neutronen (unmoderiert)

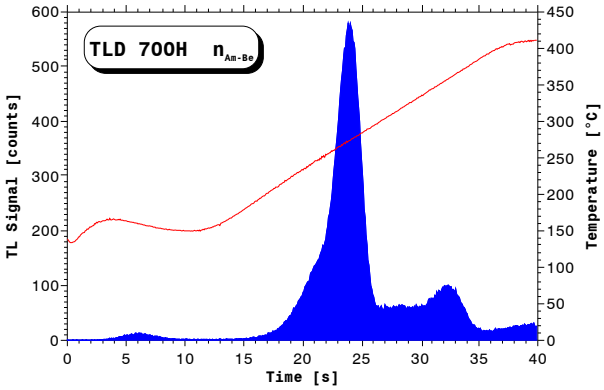




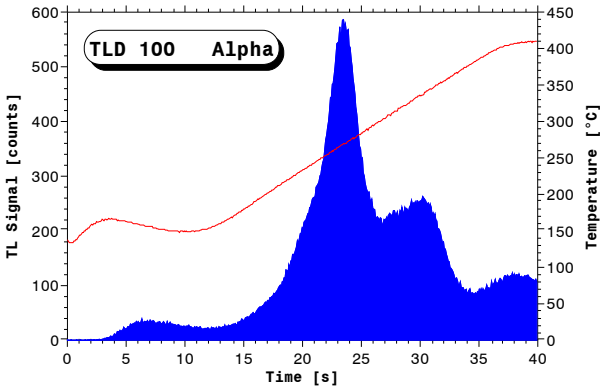


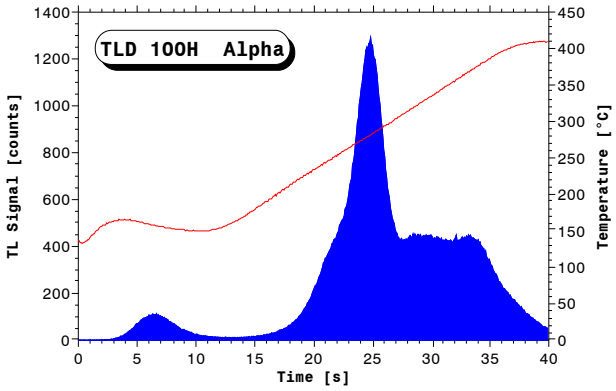


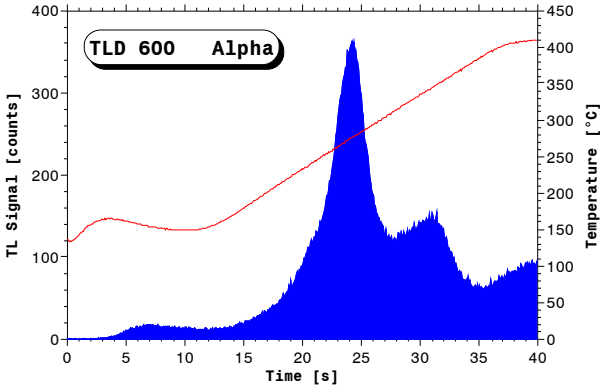


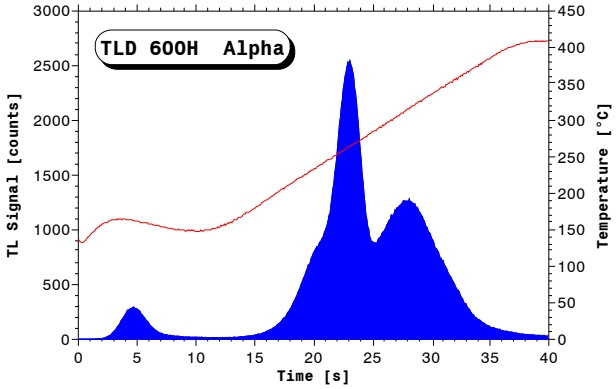


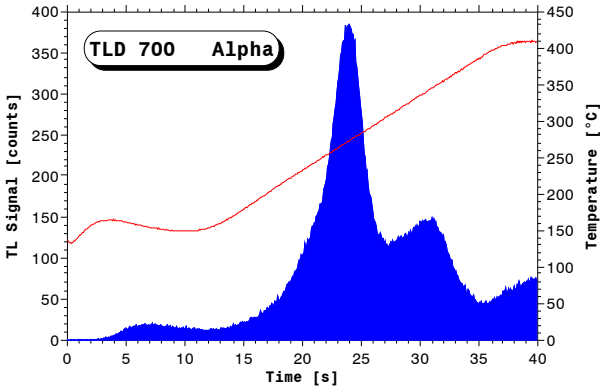
5.4.4. Bestrahlung mit ^{241}Am-Teilchen

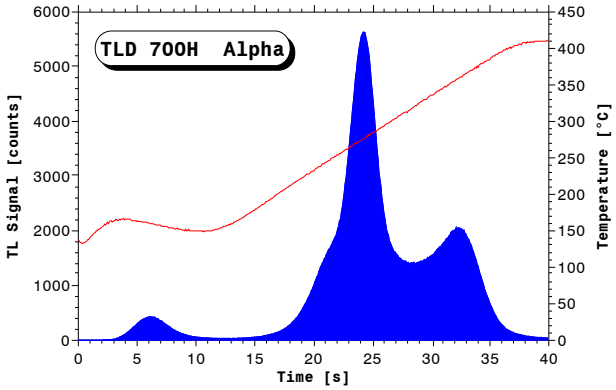






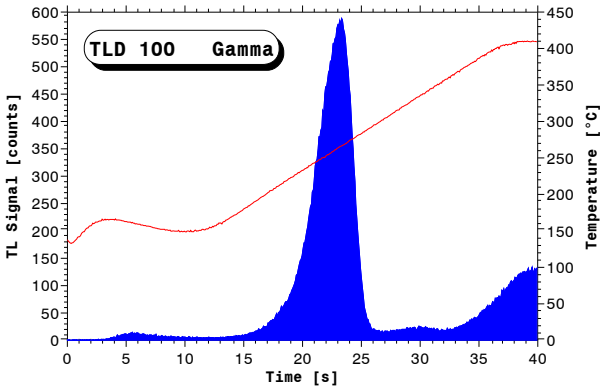


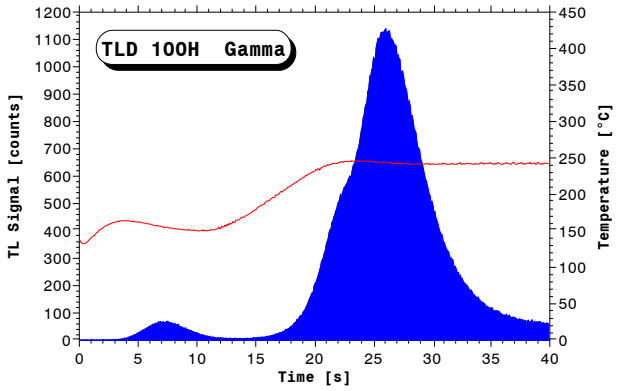


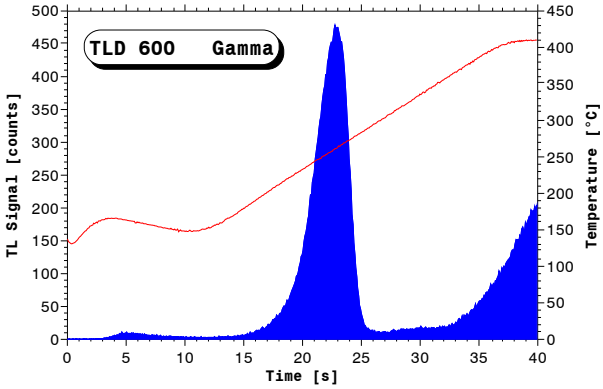


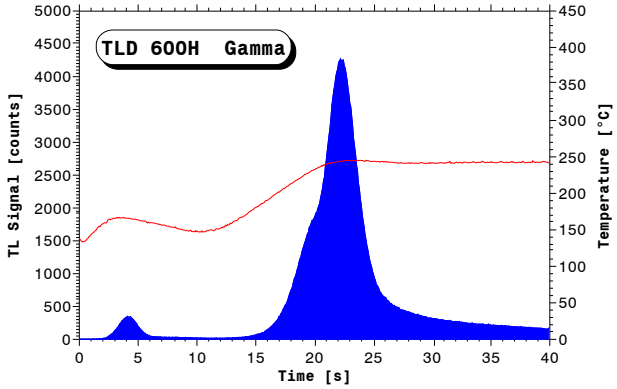
5.5. Normal-/hochempfindliche Materialien im Nenngebrauchsbereich

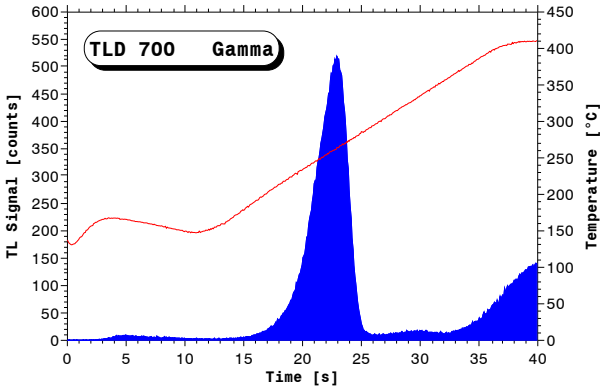
5.5.1. Gamma-Bestrahlung

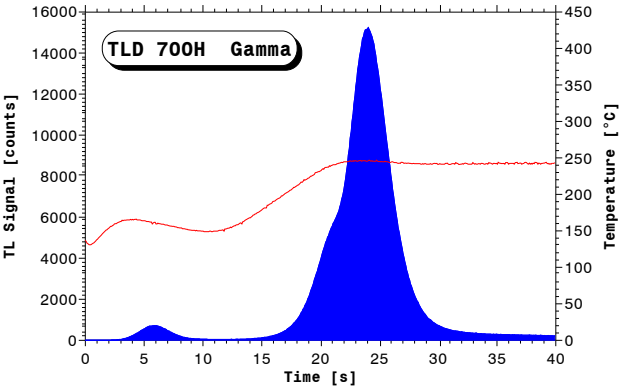




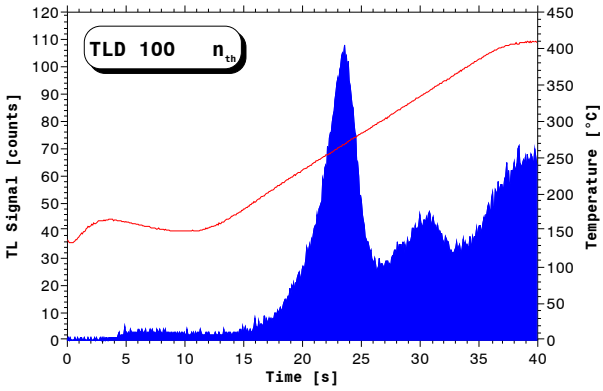


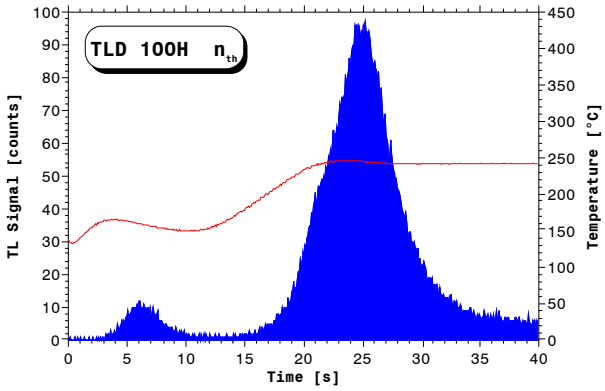


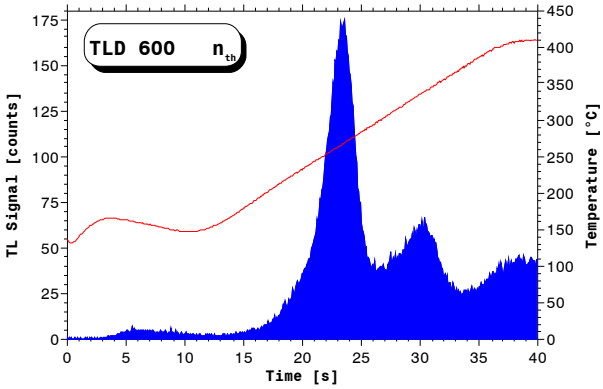


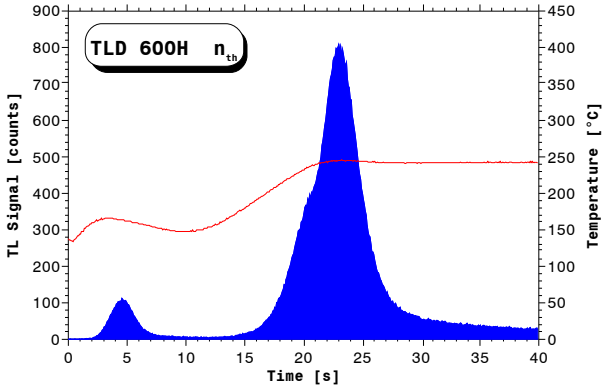


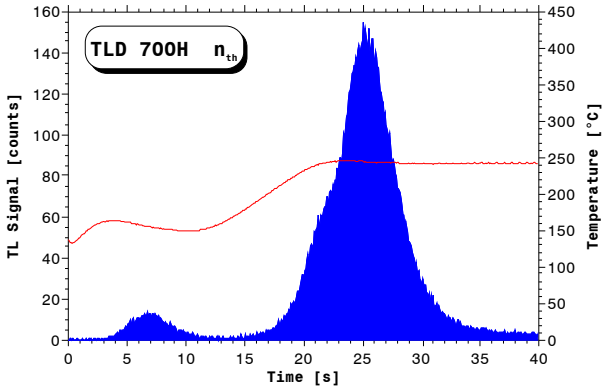
5.5.2. Bestrahlung mit thermischen Neutronen



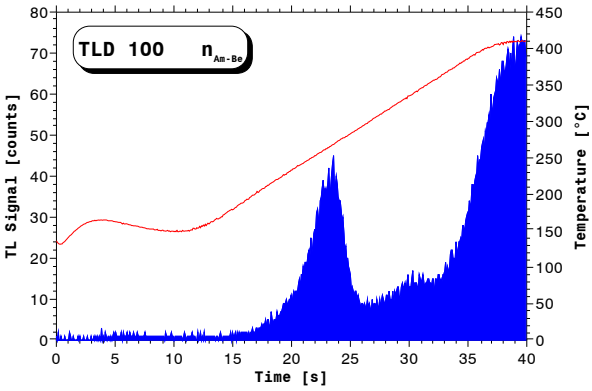


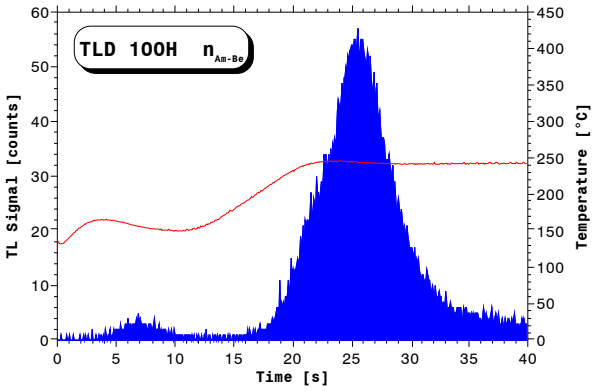


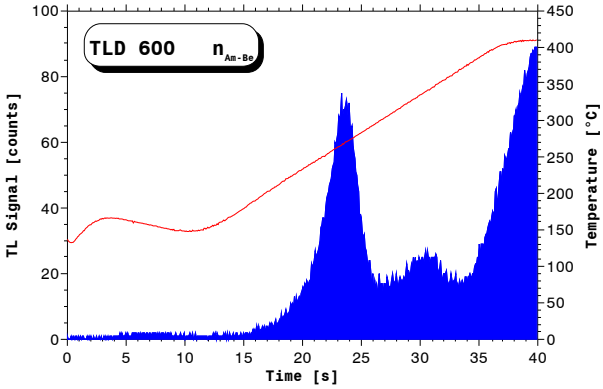


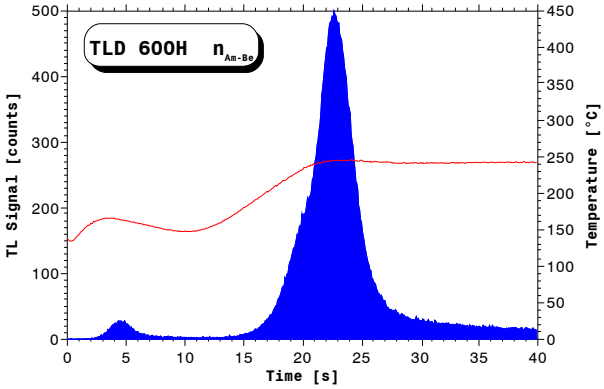


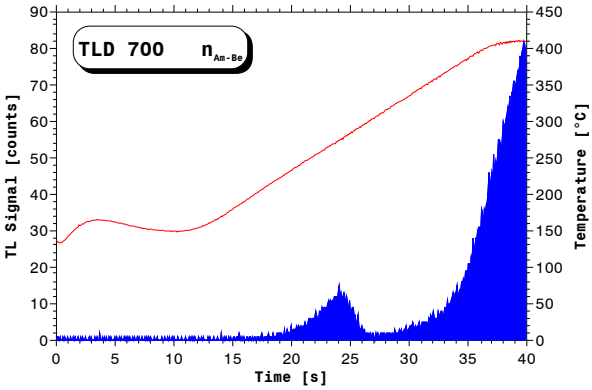
5.5.3. Bestrahlung mit ^{241}Am-Be-Neutronen (unmoderiert)

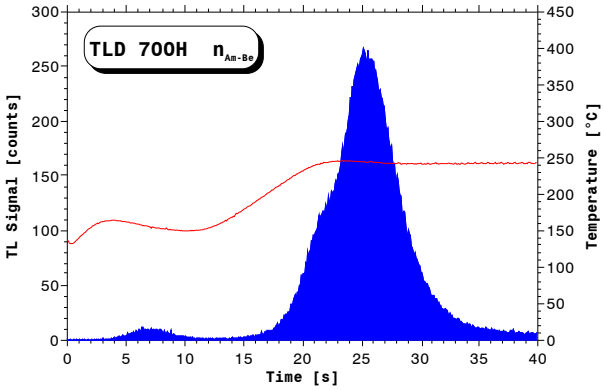




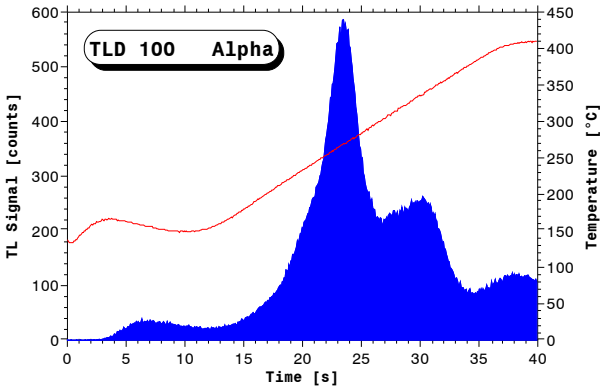


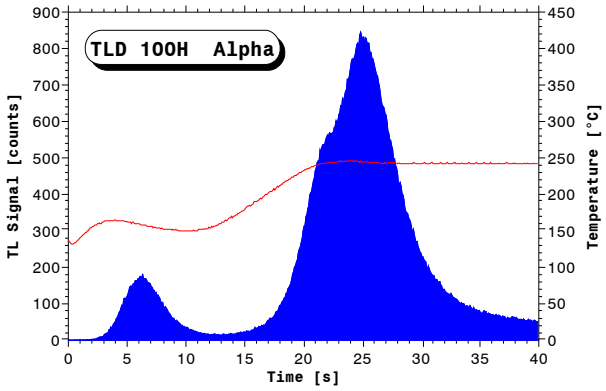


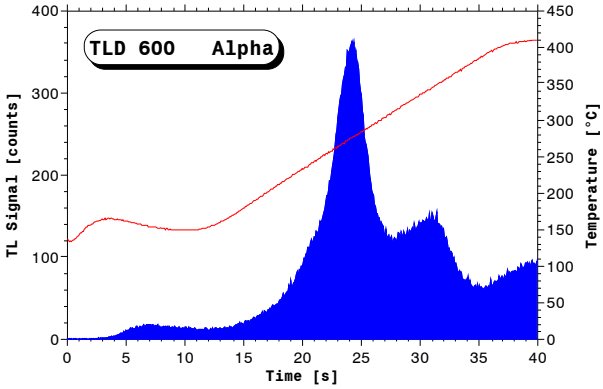


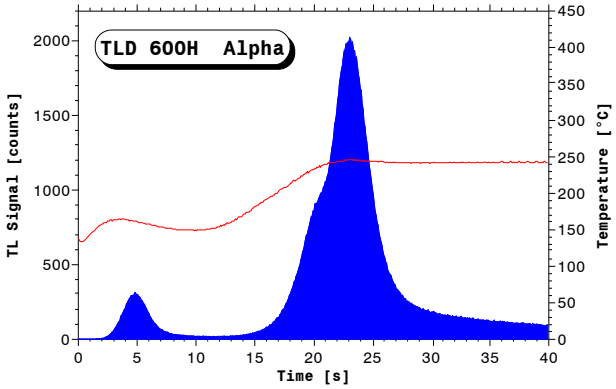


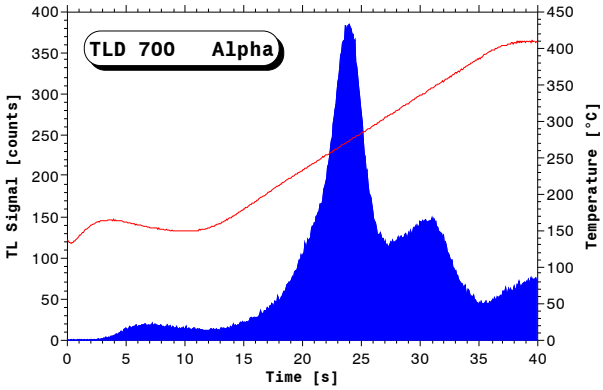
5.5.4. Bestrahlung mit ^{241}Am-Alpha-Teilchen

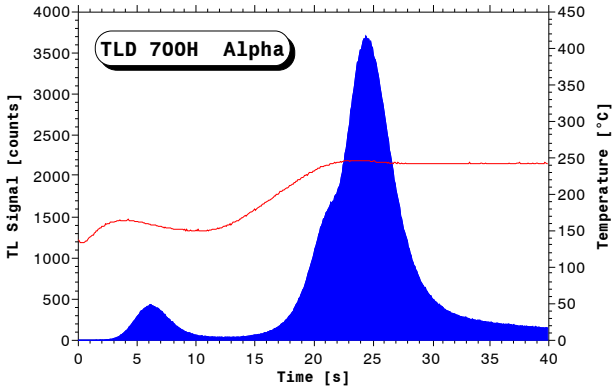






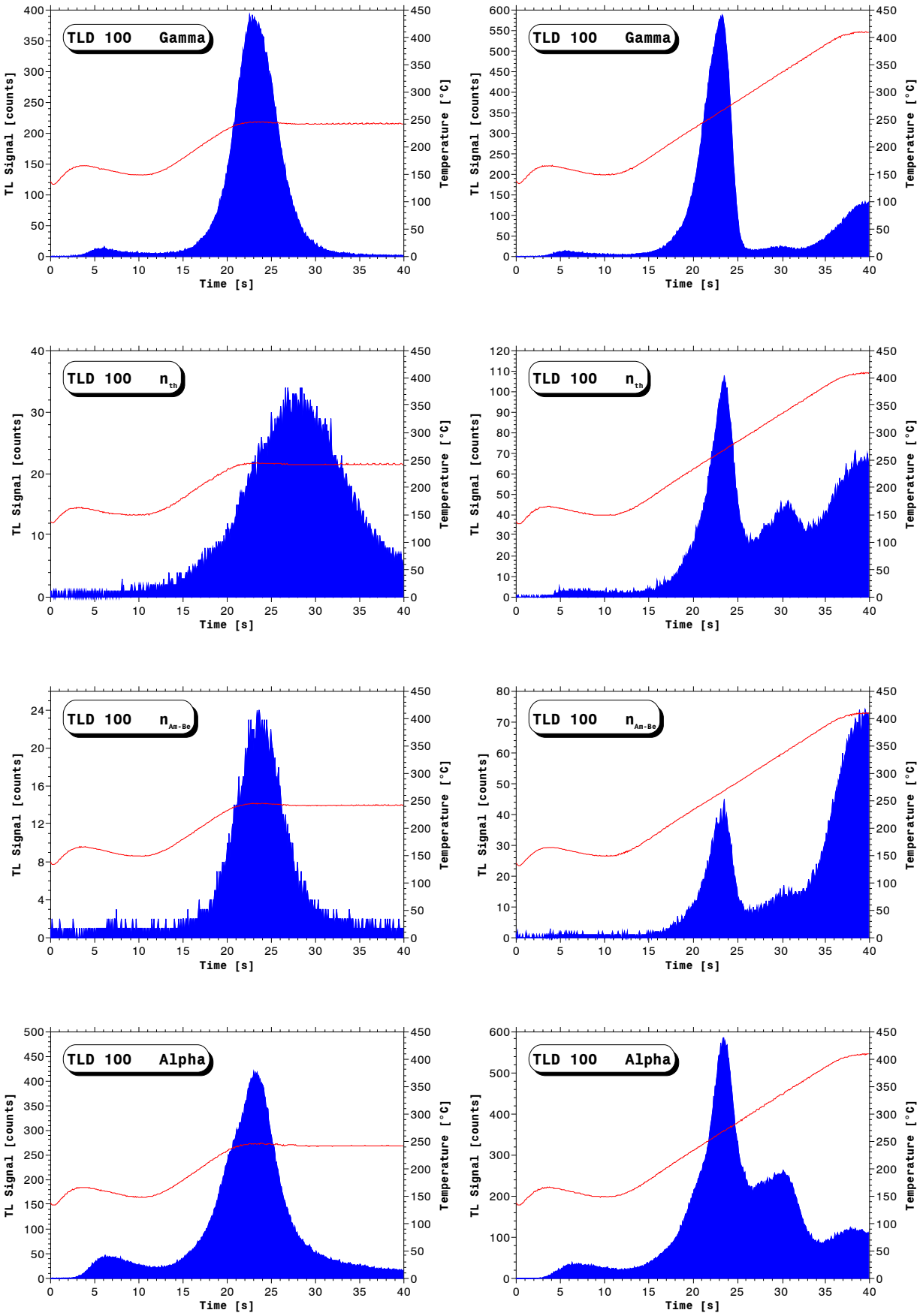




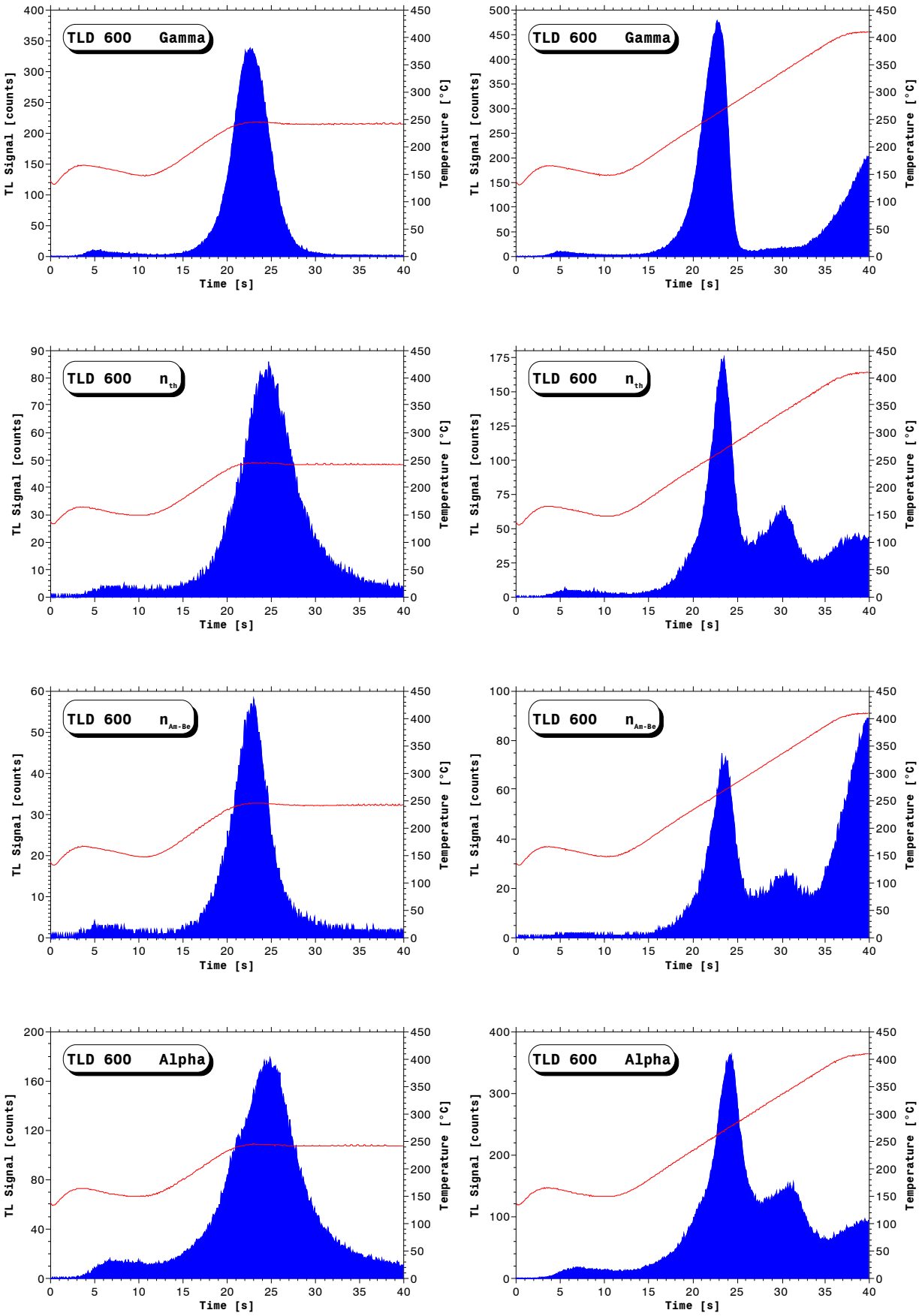


5.6. Normalempfindliche Materialien, Einfluß verschiedener Strahlenarten

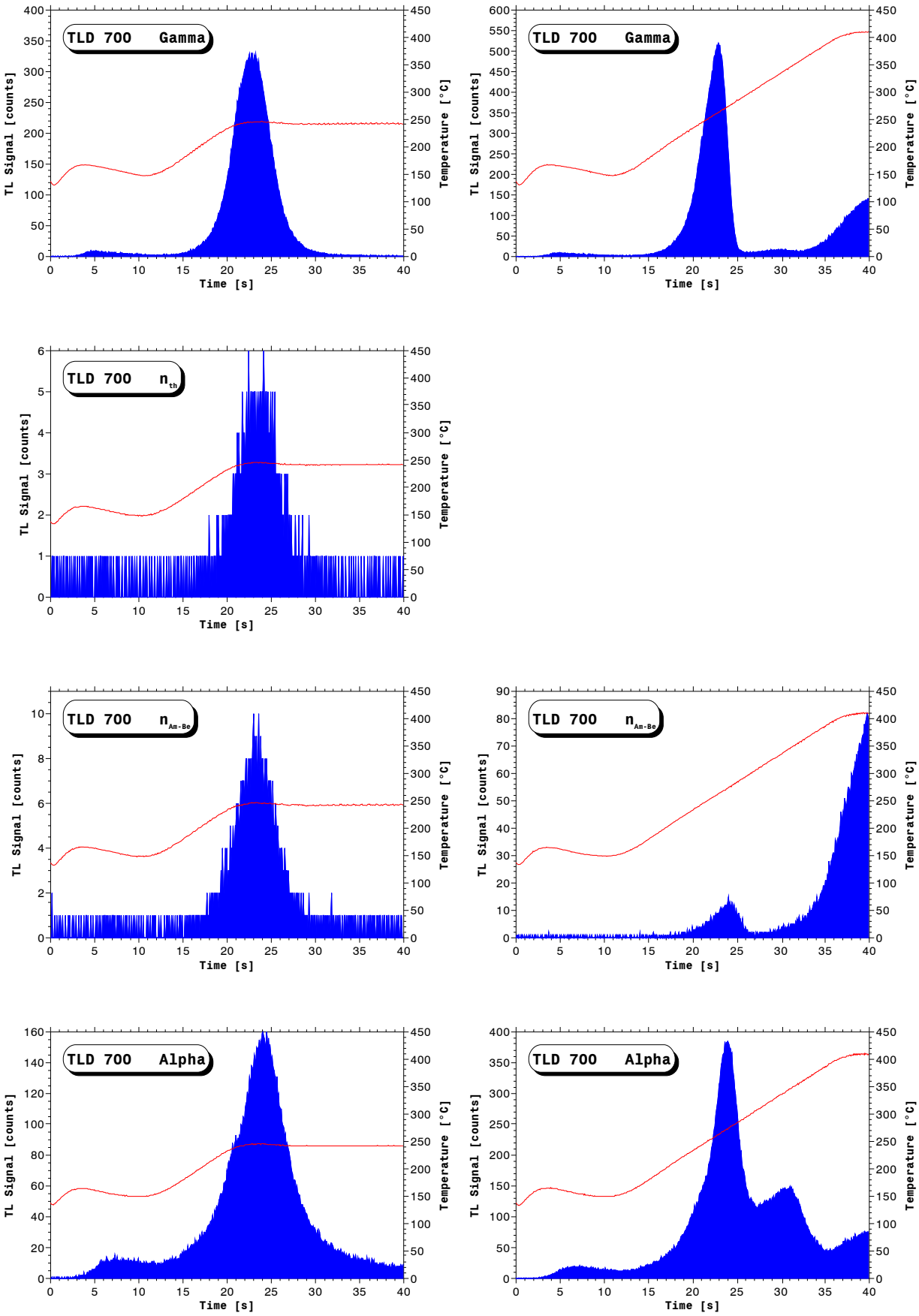
5.6.1. TLD 100



5.6.2. TLD 600

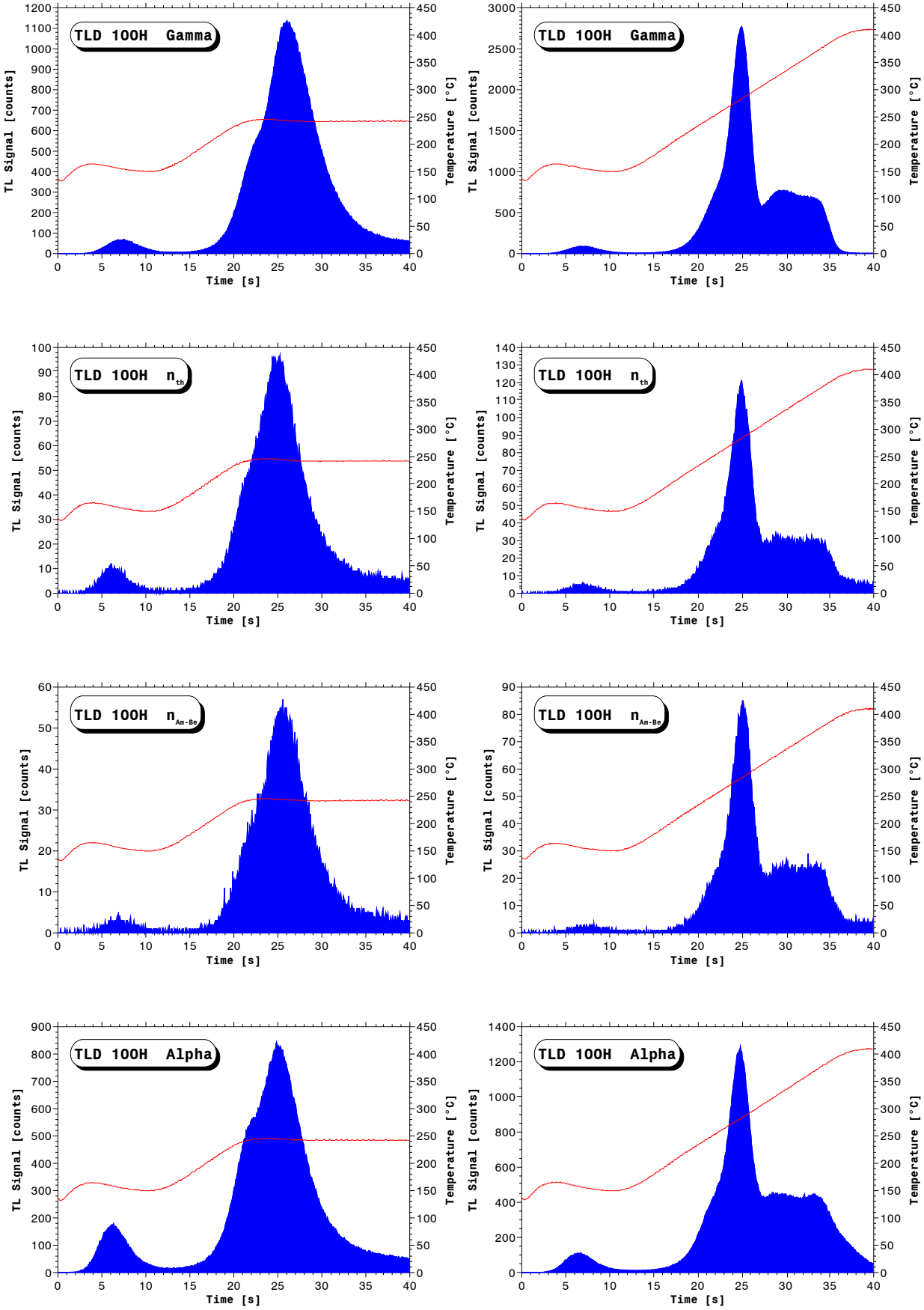

TLD 600 Gamma
TLD 600 Gamma
TLD 600 n_{th}
TLD 600 n_{th}
TLD 600 n_{Am-Be}
TLD 600 n_{Am-Be}
TLD 600 Alpha
TLD 600 Alpha
TL Signal [counts]
Temperature [°C]
Time [s]

5.6.3. TLD 700

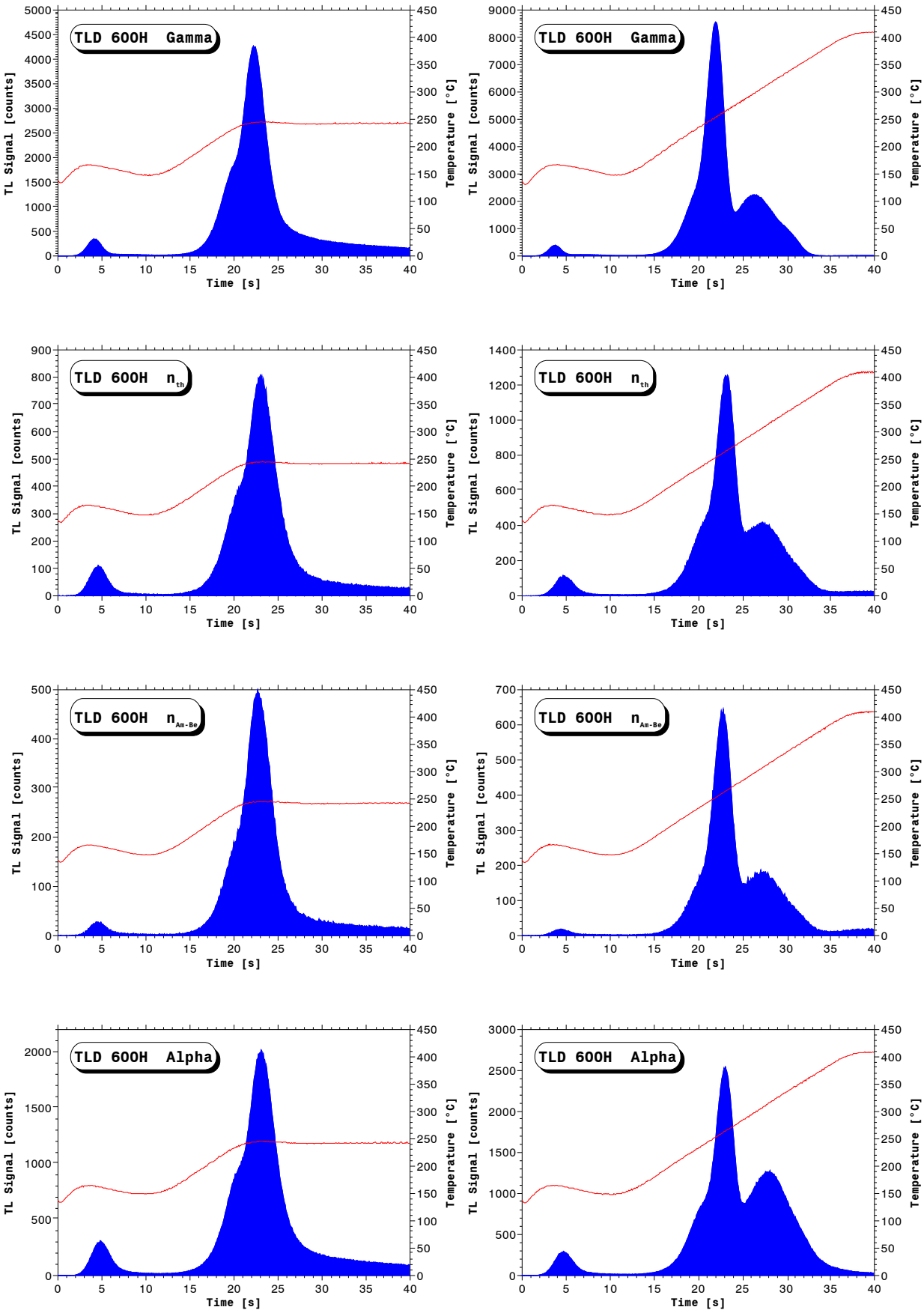

TLD 700 Gamma
TLD 700 Gamma
TLD 700 n_{th}
TLD 700 n_{Am-Be}
TLD 700 n_{Am-Be}
TLD 700 Alpha
TLD 700 Alpha
TL Signal [counts]
Temperature [°C]
Time [s]

5.7. Hochempfindliche Materialien, Einfluß verschiedener Strahlenarten

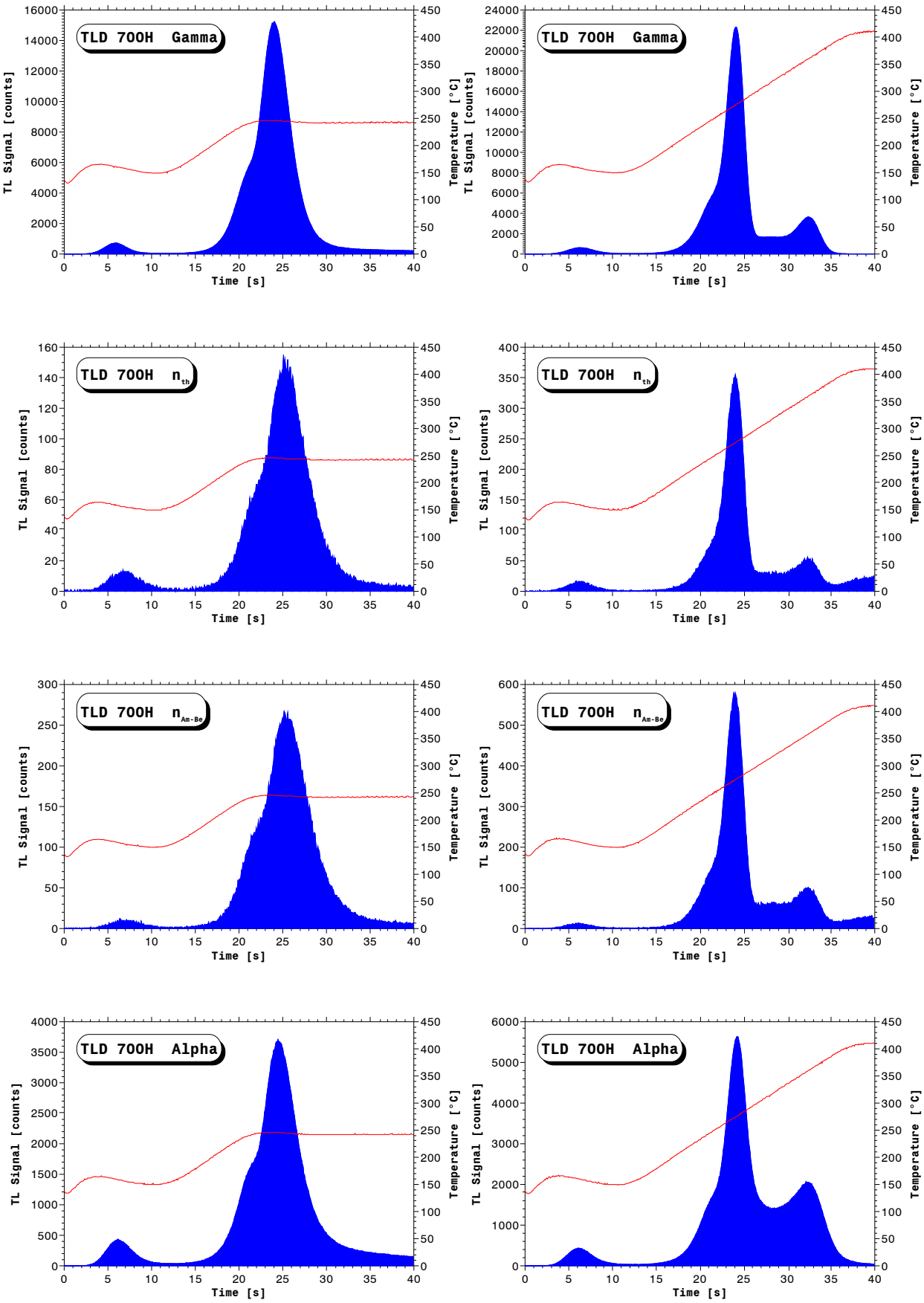
5.7.1. TLD 100H



5.7.2. TLD 600H


TLD 600H Gamma
TLD 600H Gamma
TLD 600H n_{th}
TLD 600H n_{th}
TLD 600H n_{Am-Be}
TLD 600H n_{Am-Be}
TLD 600H Alpha
TLD 600H Alpha
TL Signal [counts]
Temperature [°C]
Time [s]

5.7.3. TLD 700H


TLD 700H Gamma
TLD 700H Gamma
TLD 700H n_{th}
TLD 700H n_{th}
TLD 700H n_{Am-Be}
TLD 700H n_{Am-Be}
TLD 700H Alpha
TLD 700H Alpha
TL Signal [counts]
Temperature [°C]
Time [s]

6. Schlußfolgerungen und Ausblick

Das Ziel unserer Arbeiten ist die Entwicklung eines Meßsystems aus einem oder mehreren TL-Detektoren, das es gestattet in einem gemischten Strahlenfeld quantitative Aussagen über seine Zusammensetzung und seine einzelnen Dosisanteile machen zu können.

Unsere bisherigen Messungen dienten zunächst der qualitativen Analyse der Abhängigkeiten der Glowkurvenstruktur von der Strahlenart und den Auswerteparametern sowie einer ersten Abschätzung der relativen Empfindlichkeiten der unterschiedlichen Materialen für verschiedene Strahlenarten. Die unterschiedlichen Empfindlichkeiten der verschiedenen TL-Materialien bezüglich der Strahlungsart erlauben prinzipiell den Aufbau eines Detektorsystems für gemischte Strahlenfelder aus mehreren unterschiedlichen Detektoren. Nachteilig an diesem Verfahren ist jedoch, daß die Empfindlichkeit der unterschiedlichen Detektoren nicht nur von der Art des TL-Materials abhängt, sondern zusätzlich auch von der Transparenz und der Masse der Detektoren beeinflußt wird. Die Parameter eines solchen Detektorsystems wären somit nicht nur von den verwendeten TL-Materialien abhängig und müßten immer für die speziellen vorliegenden Detektortypen bestimmt werden.

Durch die detaillierte Analyse der einzelnen Peaks der Glowkurve eines TL-Materials — d.h. Bestimmung der Einzelintensitäten der dosimetrischen Peaks und ihr Verhältnis untereinander — bietet sich ein anderer Weg zur Bestimmung der Einzelkomponenten des Strahlenfeldes an. Speziell bei höheren Auswertetemperaturen bis zu 400 °C weisen die Strukturen der Glowkurven zum Teil eine ausgeprägte Abhängigkeit von der Strahlenart auf. Eigenschaften der Detektoren wie z.B. Masse und Transparenz beeinflussen die einzelnen Peaks in erster Näherung gleichermaßen und werden durch die Kalibrierung berücksichtigt. Erste Untersuchungen zur Entfaltung der Glowkurven in ihre einzelnen Peaks mit Hilfe des Fastglow-Programms waren bereits sehr vielversprechend. Diese Ergebnisse sollen in einem späteren Bericht dargestellt werden.

Die zukünftigen Aufgaben bestehen nun darin, geeignete TL-Detektoren bzw. Zusammenstellungen von verschiedenen Detektorarten auszuwählen und ihre Empfindlichkeiten bezüglich der Strahlenarten, sowohl bezüglich ihrer integralen Empfindlichkeit wie auch im Hinblick auf ihre dosimetrischen Einzelpeaks, genauer zu quantifizieren. Erste Tests mit einem derartigen Detektorsystems in verschiedenen Strahlenfeldern sollen schon bald die praktische Einsetzbarkeit dieser Meßmethode demonstrieren. Parallel dazu sind auch weitere Arbeiten zur Entfaltung der Glowkurven wie auch die Weiterentwicklung des Fastglow-Programms geplant.

7. Literatur

/1/ A. C. Lukas, *The History and Direction of TL Instrumentation*
Radiat. Prot. Dosim., **47** (1993) 451 - 456

/2/ K. Mahesh, P. S. Weng, C. Furetta, *Thermoluminescence in Solids and its Applications*
Nuclear Technology Publishing, Ashford, Kent TN25 4NW, England (U.K.), 1989

/3/ TLD Systems and Materials. Performance Specifications.
Produktinformation der Firma Harshaw/Bicron, Thermo Electron Corporation

/4/ S. Wang, G. Chen, F. Wu, Y. Li, Z. Zha, J. Zhu, *Newly Developed Highly Sensitive LiF(Mg,Cu,P) TL Chips with High Signal-to-Noise Ratio*
Radiat. Prot. Dosim., **14** (1986) 223 - 227

/5/ Z. Zha, S. Wang, W. Shen, J. Zhu, G. Cai
Preparation and Characteristics of LiF:Mg,Cu,P Thermoluminescent Material
Radiat. Prot. Dosim., **47** (1993) 111 - 118

/6/ C. Bacci, L. D'Angelo, C. Furetta, S. Giancola
Comprehensive Study on LiF:Cu,Mg,P (GR-200 A)
Radiat. Prot. Dosim., **47** (1993) 215 - 218

/7/ C. M. H. Driscoll, J. R. Barthe, M. Oberhofer, G. Busuoli, C. Hickman
Annealing Procedures for Commonly Used Radiothermoluminescent Materials
Radiat. Prot. Dosim., **14** (1986) 17 - 32

/8/ T. -C. Chena, T. G. Stoebea
Influence of annealing on kinetic trapping parameters in LiF:Mg,Cu,P thermoluminescent phosphors
Radiation Measurements, **29** (1998) 39 - 44

/9/ W. G. Alberts, P. Ambrosi, J. Böhm, G. Dietze, K. Hohlfeld, W. Will
Neue Dosis-Meßgrößen im Strahlenschutz
PTB-Bericht PTB-Dos-23, Braunschweig, Juli 1994

/10/ Kaiyong Tang, Hongying Zhu, Wenxiu Shen
Thermal Loss and Recovery of Thermoluminescence Sensitivity in LiF:Mg,Cu.P
Radiat. Prot. Dosim., **90** (2000) 449 - 452

/11/ S.W.S. McKeever
Thermoluminescence in LiF: Analysis of the Glow-Curves
Nuclear Instruments and Methods, **175** (1980) 19 - 20

/12/ Y.S. Horowitz
LiF:Mg,Ti versus LiF:Mg,Cu,P: The Competition Heats up
Radiat. Prot. Dosim., **47** (1993) 135 - 141

/13/ J.T. Randall, M.H.F. Wilkins
Proc. R. Soc. A, **184** (1945) 347, 366, 390

/14/ National Institute of Standards and Technology
Physical Reference Data: Radiation Dosimetry Data: Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions. www.physics.nist.gov, Dec. 2004.

Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft

Jül-4216
Mai 2006
ISSN 0944-2952