

# Das Zeitverhalten von Licht Emittierenden Dioden (LEDs)

© Juli 2000, Rolf Bombach

Diese Publikation unterliegt der Berner Copyrightkonvention

Alle Angaben ohne Gewähr

Version 5-Aug-00

1	Die untersuchten LEDs .....	1
2	Der LED Pulser .....	2
3	Der Aufbau des Experiments .....	2
4	Superhelle LEDs .....	3
	4.1 Die Superhelle weisse LED .....	3
	4.2 Superhell Rot, Orange, Grün und Blau .....	4
5	Oszilloskop-Timing und Datenaufnahmedetails .....	4
	5.1 Trigger-Timing .....	4
	5.2 Anstiegszeiten .....	5
	5.3 Datenmittelung der Fotomultipliersignale .....	5
6	LEDs älterer Bauart .....	6
	6.1 Pulsformen der Lichtabgabe .....	6
	6.2 Zeitkonstanten des Aufleuchtens .....	7
	6.3 Dunkelrote miniatur LED .....	8
	6.4 Infrarot LED .....	8
13	Winword lernt schreiben .....	9

## 1 Die untersuchten LEDs

Kurzbeschreibung	Flussspannung bei 20 mA <sup>d</sup>	Wellenlänge/nm <sup>a</sup>
Infrarot	1.165 V	(950) <sup>e</sup>
dunkelrote miniatur LED	1.76 V	634 - <u>650</u> - 661
rot standard	1.98 V	608 - <u>622</u> - 640
gelb standard	2.36 V	572 - <u>585</u> - 597
grün standard	2.13 V	550 - <u>559</u> - 570
Superhell rot	1.86 V	604 - <u>618</u> - 626
Superhell orange	1.92 V	582 - <u>593</u> - 600
Superhell grün	3.16 V	500 - <u>518</u> - 541
Superhell blau	3.17 V	456 - <u>465</u> - 477
Superhell weiss (blau) <sup>b</sup>	3.40 V	452 - <u>461</u> - 472
Superhell weiss (gelb) <sup>b</sup>	"	<sup>c</sup> - <u>538</u> - 587

<sup>a</sup> Wellenlänge des Emissionsmaximums (mittlerer Wert), sowie der 50% Punkte. Durch die Wellenlängenabhängigkeit des Detektors und des Spektralapparates sowie durch verschiedene Definitionen der Helligkeit (Watt oder Quanten/s; pro nm oder pro Hz) können diese Werte verzerrt werden. Dies gilt insbesondere für den roten Spektralbereich, in welchem die Detektorempfindlichkeit rasch nachlässt. Bei uniformer Empfindlichkeit beziehen sich die Angaben auf Watt pro nm bei einem Beobachtungsfenster von 1.2 nm.

<sup>b</sup> Bei den superhell weissen LEDs gibt es bauartbedingt 2 Maxima, einmal im blauen durch die eigentliche LED und einmal im gelben Spektralbereich durch den Leuchtstoff ("Phosphor").

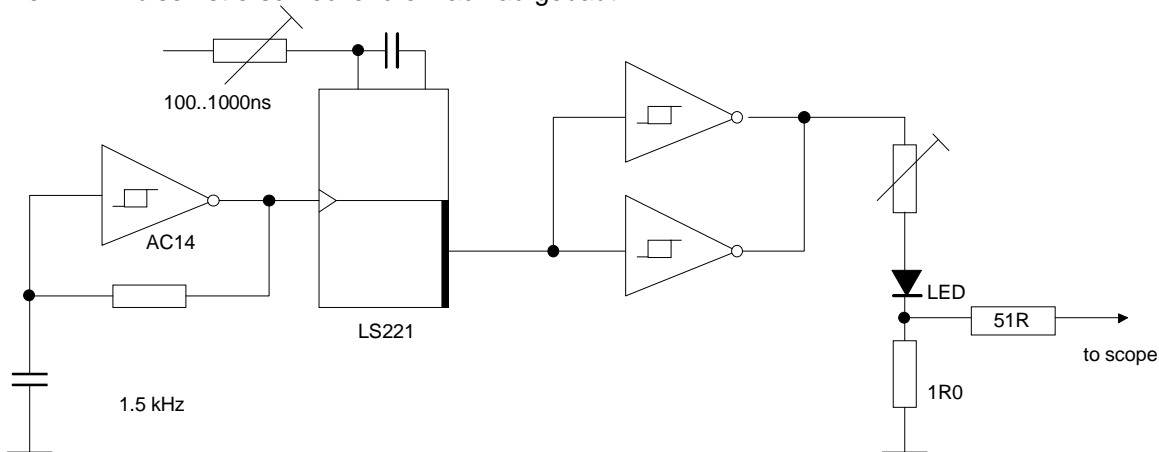
<sup>c</sup> Kein 50% Punkt bezgl. 538 nm vorhanden, zu rascher Anstieg nach 461 nm.

<sup>d</sup> Die Messung der Spannung ist nicht ganz einfach, da sie temperaturabhängig ist. Im gepulsten Betrieb ist insbesondere die Spannung an der miniatur-LED deutlich höher.

<sup>e</sup> Wellenlängenmessung nicht möglich, da ausserhalb des Bereiches des verwendeten Spektralapparats.

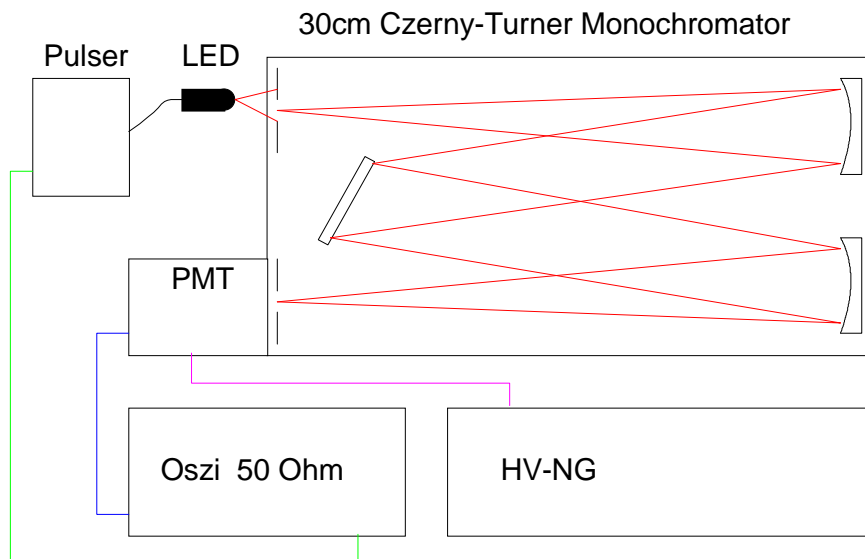
## 2 Der LED Pulser

Der LED Pulser ist erschreckend einfach aufgebaut:



Die 1.5 kHz Pulsrepetitionsfrequenz sind ein Kompromiss zwischen Fotomultiplierchonung einerseits und noch sichtbarem Strahl auf standard-(Kathodenstrahl-) Oszilloskop andererseits.

## 3 Der Aufbau des Experiments



Die LED steht ohne weitere Optik direkt vor dem Monochromator. Das erlaubt die Verwendung eines Bouguertschen Abschwächers (bissel weiter wegrücken, falls Signal zu stark für Fotomultiplier).

Der Monochromator ist ein f/8 30cm Czerny-Turner Aufbau (Instrumentation Laboratory, Inc). Die Schlitzbreite beträgt etwa 0.8mm, die spektrale Bandbreite 1.2 nm FWHM.

Der Photomultiplier (PMT) ist ein Hamamatsu R928, ein extended red Multialkali 28mm side-on Typ. Ein normaler Sb-Cs oder Bialkali (1P28 etc.) hätte zuwenig Empfindlichkeit für die (dunkel-) roten standard LEDs. Die Verstärkung des PMT schätze ich auf  $2E6$  bei den verwendeten 800 V. Die Signalanstiegszeit dürfte um 2.5 ns, die Signal-(Elektronen-) Laufzeit um 28 ns liegen.

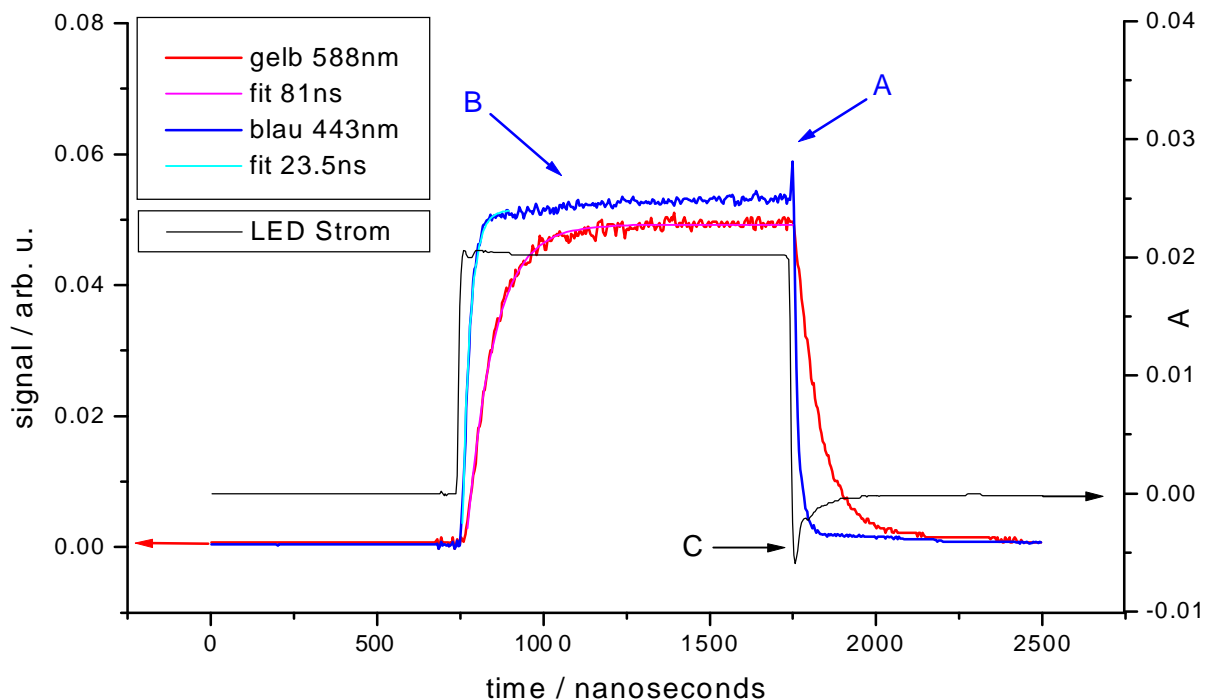
Warum ein PMT? Bei den superhellen LED hätte in der Tat eine Fotodiode gereicht. Bei den normalen LED ist das Fotodiodensignal an 50 Ohm sehr klein, man hätte einen Vorverstärker verwenden müssen, Frequenzbereich DC...100 MHz. Spätestens bei den schmalbandigen Messungen im blauen Spektralbereich wäre das Signal zu klein gewesen. Der PMT bietet eine einigermaßen rauscharme Verstärkung von bis zu  $1E7$  bei einer Bandbreite von ca. 100 MHz. Dies entspricht einem Gain-Bandwidth Produkt von 1000000 GHz, da kann man lange nach einem passenden OpAmp suchen.... Ein weiterer Vorteil eines PMTs ist die praktisch beliebig grosse lichtempfindliche Fläche. Schnelle Fotodioden sind sehr klein, oft unter 0.5 mm im Durchmesser. PMTs gibt es bis 500 mm Durchmesser. Die Aufzählung der Nachteile der Fotomultiplier würde hier das Textverarbeitungsprogramm überfordern.

Das Anodensignal wurde Oszilloskopseitig mit 50 Ohm abgeschlossen. Als Spannungsversorgung wurde ein garantiert elektronikfreies Netzgerät Landis&Gyr EES1e verwendet. Als DSO kam ein Tektronix TDS220 zum Einsatz. Das Digitaloszilloskop war das einzige ausgeliehene Teil des Aufbaus, die LEDs die einzigen gekauften Teile, der Rest - Monochromator, PMT und Netzgerät - stammt vollumfänglich vom Müllplatz.

#### 4 Superhelle LEDs

##### 4.1 Die Superhelle weisse LED

Das Emissionsspektrum der superhellen weissen LED hat 2 Maxima. Das erste stammt von der blauen "Treiber" LED, das zweite vom Phosphor. Wie zu erwarten, zeigt der Phosphor eine zeitliche Verzögerung zur Anregungsstrahlung.



Die blaue Linie zeigt die Emission bei 443 nm, das ist deutlich unterhalb des Emissionsmaximums im blauen Bereich. Damit soll vor allem die Emission der LED erfasst werden. Die rote Linie zeigt die Emission bei 588 nm; oberhalb des Emissionsmaximums im gelben Spektralbereich. Mit dieser Detektionswellenlänge soll vor allem die Emission des Phosphors erfasst werden. Die längeren Zeitkonstanten, sowohl beim Aufleuchten wie beim Nachleuchten sind eindeutig zu erkennen.

Hier wurden die beiden Spektralbereiche mit einem Spektrografen getrennt. Sie lassen sich übrigens auch gut mit einem Balzers Color Cube (Farbkombinierwürfel für Beamer) trennen. Diese Würfel (Ausschuss) gibt es bei Besucherführungen bei Balzers umsonst.

Der schleichende Anstieg "B" scheint echt zu sein und konnte mit Fotodiodenmessungen bestätigt werden. Eine Zeitkonstante des Fotomultipliers scheint es nicht zu sein. Die kurze Emissionserhöhung beim Ausschalten "A" scheint ebenfalls kein Messartefakt zu sein, wurde aber nur bei dieser LED beobachtet. Spekulative Annahme ist, dass die Absorption des Phosphors abnimmt, sobald dieser die volle Helligkeit angenommen hat.

Die schwarze Linie gibt den Diodenstrom an. Da er mit einem gewöhnlichen bedrahteten 1 Ohm Widerstand gemessen wurde, gibt es starke Überschwinger. Eine Herabsetzung der Eingangsbandbreite des Oszilloskops von 100 MHz auf 20 MHz bügelt das in etwa aus, wie man sehen kann. Neuere Aufnahmen, bei welchen ein neuer Spannungsteiler mit Mini-Melf-Widerständen zum Einsatz kam, zeigen einen kurzen Peak beim Einschalten; wahrscheinlich hat diese Diode eine etwas grössere Kapazität als andere. In der Diode ist auch zu erkennen, dass sie zwei Bonddrähtchen verwendet.

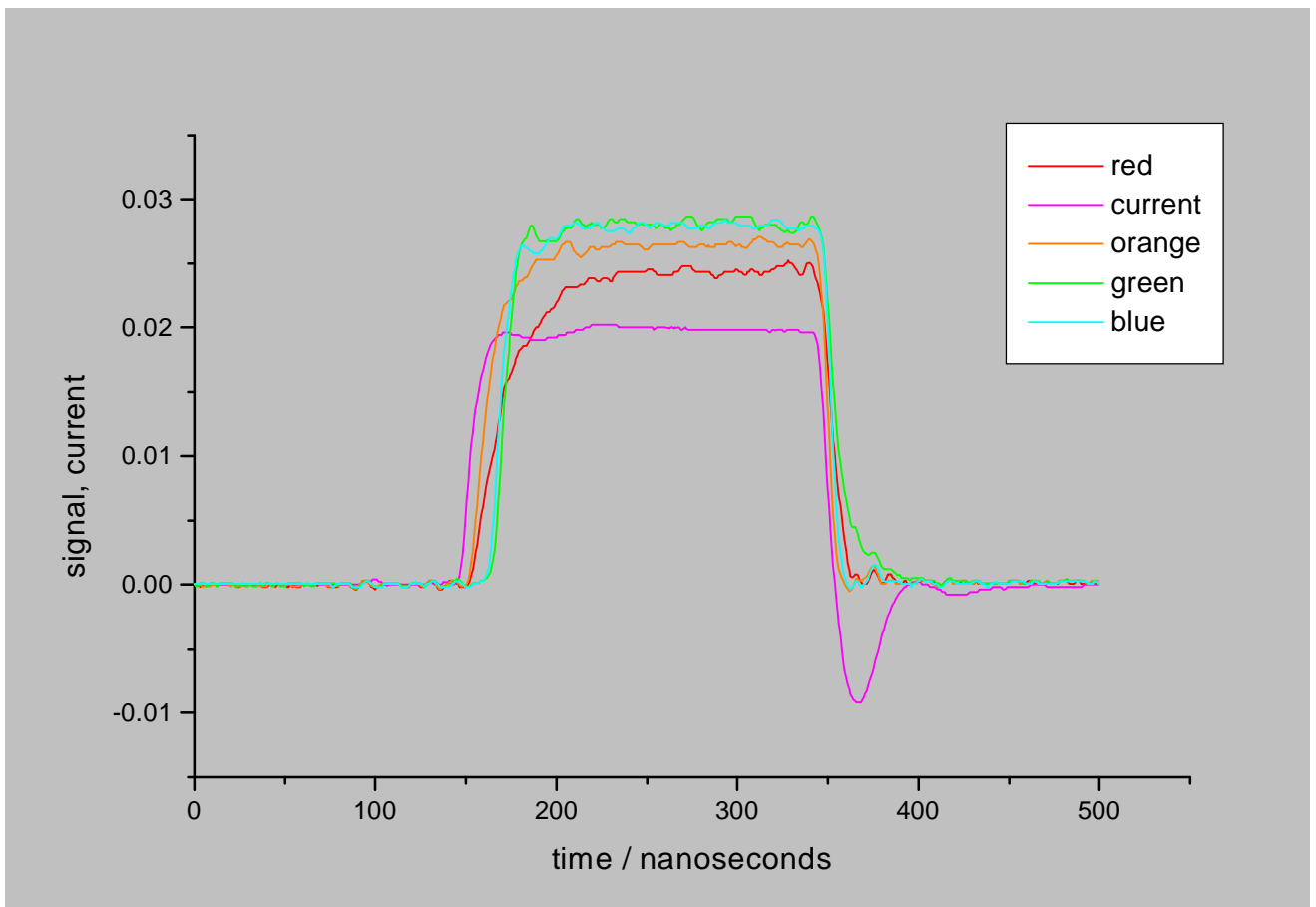
Bei "C" ist ein Rückstrom erkennbar, er ist von LED zu LED stark verschieden. Er ist bei den klassischen "alten" LEDs besonders ausgeprägt, siehe Kapitel 6.

## 4.2 Superhell Rot, Orange, Grün und Blau

Diese Dioden haben sich überraschenderweise als sehr schnell herausgestellt. Die beobachteten Zeitkonstanten für das Aufleuchten und die 10% → 90% Zeiten waren:

Farbe	Zeitkonstante	$t_{on}(10-90)$ / ns	$t_{off}(90-10)$ / ns
rot	20.0 ns	50	14
orange	11.8 ns	27	10
grün	6.5 ns	15	30
blau	7.0 ns	20	10

Die "Oszilloskop-Anstiegszeiten" sind 10% nach 90% und daher "langsamer" als die 1/e Zeiten, allerdings viel ungenauer abzulesen. Die blaue Diode scheint ein besonders "rechteckiges" Signal abzugeben. Die anderen Dioden geben zum Teil auch unerwartete Zeiten bei der abfallenden Flanke, dies liegt aber an der besonderen Form der Pulse (schleichende Annäherung an Endwert oder eher "rechteckig"), welche diesen Zeitangaben wenig Aussagekraft geben, siehe folgendes Diagramm:



Achtung, die Stromkurve gilt nur für die rote LED, die anderen Dioden haben etwas unterschiedliche Ansteuerung erfahren.

Bemerkenswert ist, dass die superhelle blaue Diode deutlich schneller ist als die weiße LED. Es scheinen doch unterschiedliche Dioden zu sein; auch die Spannung ist unterschiedlich.

## 5 Oszilloskop-Timing und Datenaufnahmedetails

### 5.1 Trigger-Timing

Die Herabsetzung der Bandbreite des Kanals, welcher den Diodenstrom aufzeichnet, bewirkt eine Pulsflankenverschiebung von ca. 8ns. Sie wurde durch ein entsprechend verkürztes Koaxkabel kompensiert. Weitere Kompensationen betreffen:

- 28 ns Elektronenflugzeit im Fotomultiplier
- 4 ns Photonenflugzeit im Monochromator
- 9 ns PMT-Verkabelung.

Trotzdem ist nicht davon auszugehen, dass Strom- und Lichtsignal zeitlich genau abgestimmt sind.

## 5.2 Anstiegszeiten

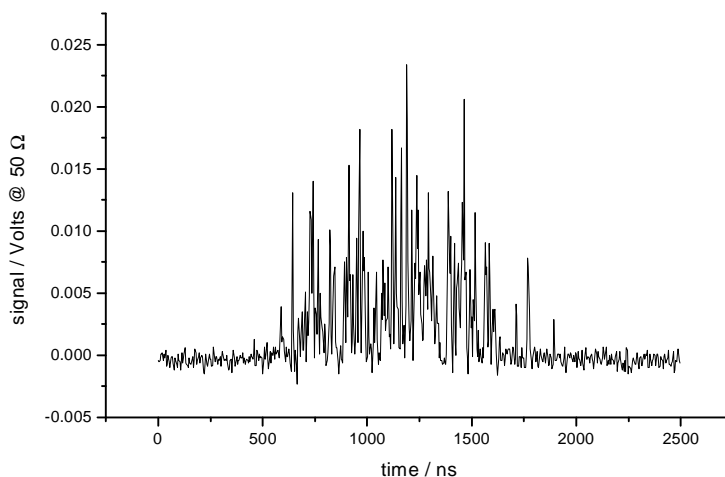
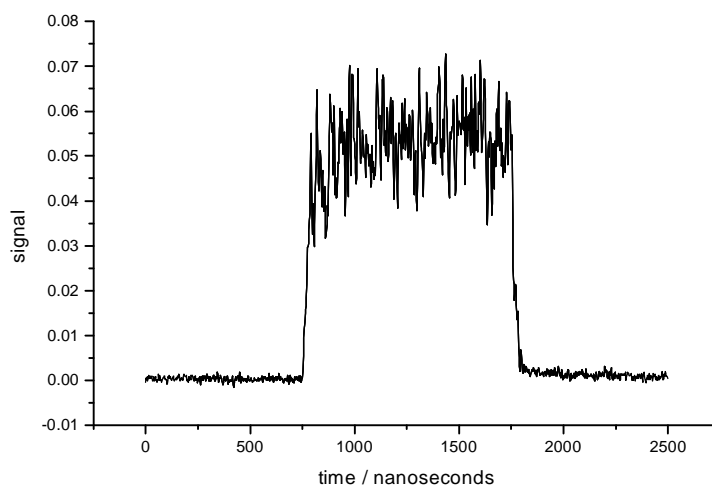
Die Anstiegszeit des Detektionssystems ist eine Überlagerung von Anstiegszeiten von:

- Fotomultiplier ca. 2.5 ns
- Oszilloskop " < 3.5 ns" (Herstellerangabe)
- Verkabelungsverluste bei hohen Frequenzen (?)

Diese Zeiten spielen wohl nur bei den schnellsten LEDs mit Reaktionszeiten unter 10 ns eine gewisse Rolle.

## 5.3 Datenmittelung der Fotomultipliersignale

Die abgebildeten Signale stellen Mittelwerte aus 128 Oszillografenaufnahmen dar, was mit einem DSO ja einfach und mit einem herkömmlichen Oszilloskop überhaupt nicht geht. Das folgende Bild stellt eine "Einzelschuss"-Aufnahme dar. Das Signal ist stark verrauscht. Es ist shot noise durch die Fotoelektronenstatistik. Es kommen halt pro Nanosekunde nur wenige Photonen (Fotonen?) an, von welchen dann auch noch nur etwa 10% in Fotoelektronen umgesetzt werden. Der Kathodenstrom war etwa 500 pA, entsprechend etwa 3000 Elektronen pro Mikrosekunde.



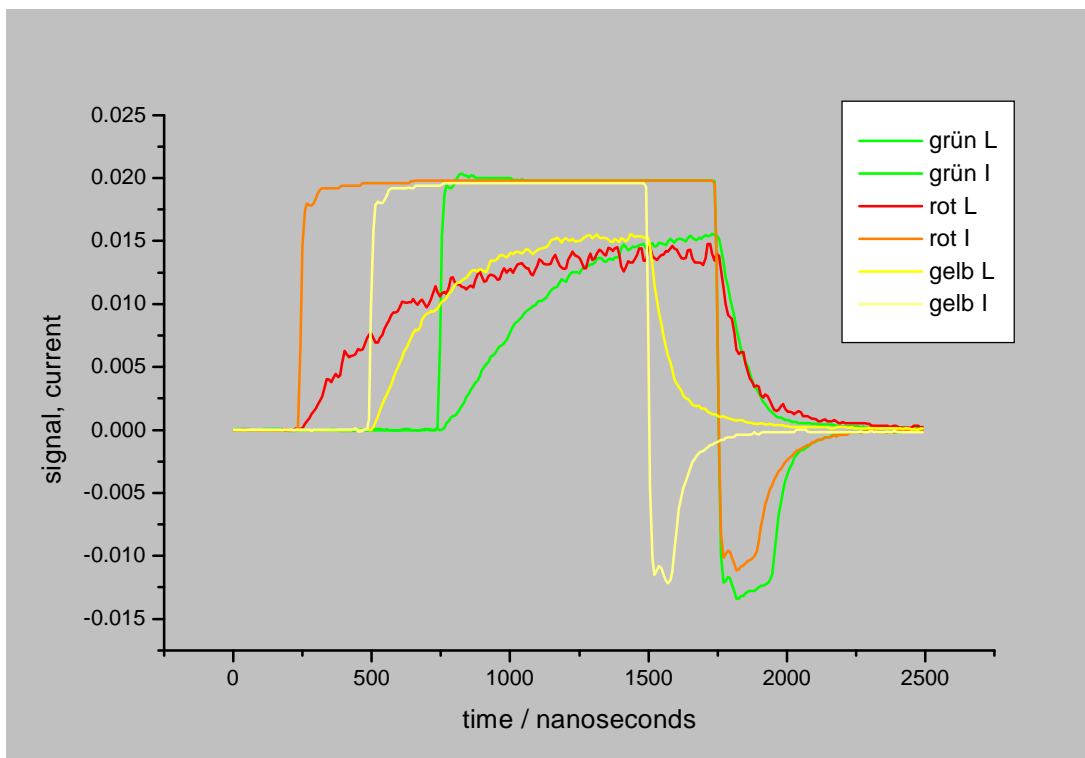
Hier ist das Problem noch auffälliger. Bei diesem Signal einer standard Rot LED musste die Betriebsspannung des PMT auf 1000 V erhöht werden, nicht zuletzt wegen der geringen Empfindlichkeit in diesem Spektralbereich. Der Kathodenstrom betrug etwa 20 pA, d.h. etwa 125 Fotoelektronen pro Mikrosekunde. Die Spikes sind also die Signale einzelner Fotoereignisse! Ohne Signalmittelung ist die Pulsform nicht erkennbar; diese ist im nächsten Kapitel angegeben.

## 6 LEDs älterer Bauart

### 6.1 Pulsformen der Lichtabgabe

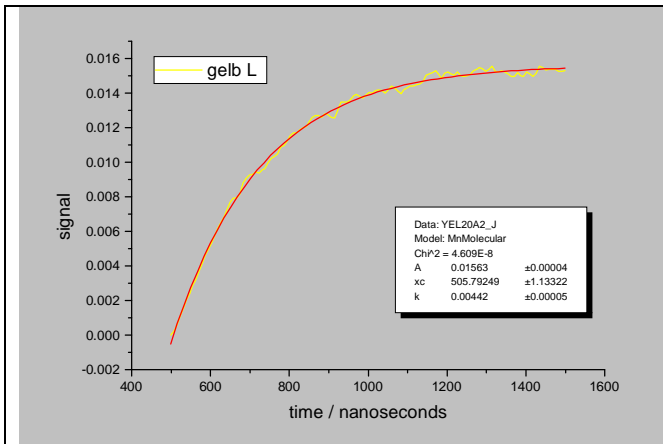
Die älteren LEDs scheinen generell sehr langsam zu sein. Auffällig ist eine grosse gespeicherte Ladung. Allerdings wird während der Entladephase kein "zusätzliches" Licht mehr abgegeben, die Helligkeit nimmt unverzögert und rasch ab. Letztendlich ist also das Aufleuchten langsamer als das Verlöschen. Die Zeitkonstanten scheinen für eine schnelle Datenübertragung ungünstig. Wirklich bedenklich ist auch die geringe Lichtausbeute. Alle Messungen mussten mit erhöhter PMT Spannung (1000 V statt 800 V), erhöhter Oszilloskopempfindlichkeit (2 mV/div statt 10 mV/div) und vergrößerter Schlitzbreite gemacht werden. Dies entspricht etwa 30 bis 100 fach höherer Empfindlichkeit. Dies lässt allerdings keine direkten Rückschlüsse auf die Lichtmenge zu, da diese Dioden einen höheren Abstrahlwinkel und z.T. ein trübes Kunststoffmaterial verwenden. Konstruktionen mit Ulbrichtkugeln oder so lagen zeitlich nicht drin. Bei der roten LED wurde eine längere Pulsdauer von 1.5  $\mu\text{s}$  gewählt.

Die höhere Oszilloskopempfindlichkeit ist gekoppelt mit einer Bandbreitenreduktion von 100 MHz auf 20 MHz, was aber bei den vorliegenden Zeitkonstanten keine Rolle spielt.

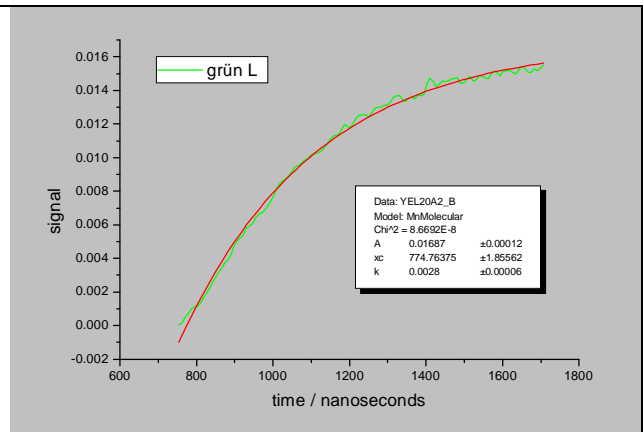


## 6.2 Zeitkonstanten des Aufleuchtens

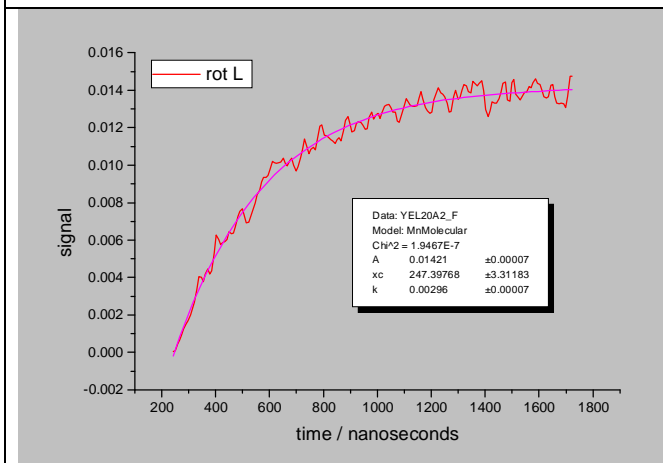
Das Aufleuchten folgt sehr genau einer e Funktion. Das Verlöschen scheint eine komplexere Funktion aufzuweisen. Hier die Fits an eine e Funktion:



Fit mit Zeitkonstante 223 ns



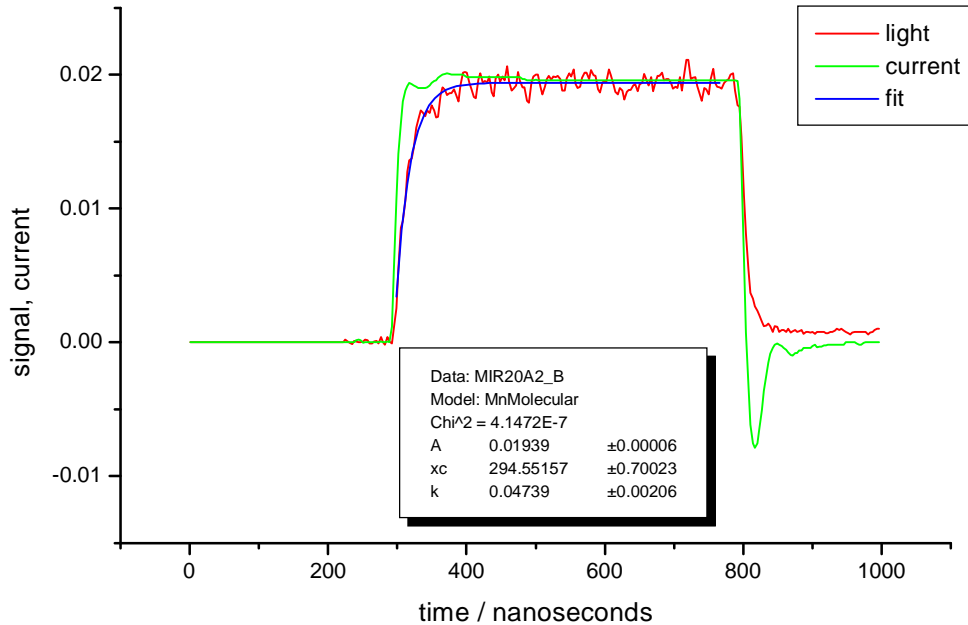
Fit mit Zeitkonstante 311 ns



Fit mit Zeitkonstante 335 ns

### 6.3 Dunkelrote miniatur LED

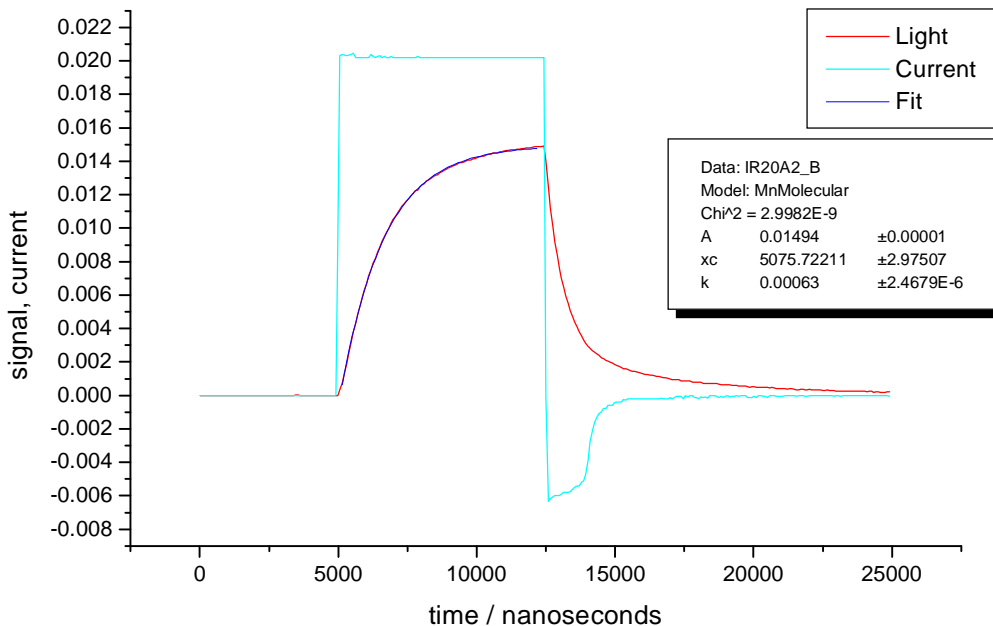
Diese LED, Stanley BR2202S, ist insofern eine Ausnahme, als dass sie erstaunlich rasch reagiert. Mit Zeitkonstanten um 20 ns wäre sie für schnelle Datenübertragungsexperimente geeignet.



### 6.4 Infrarot LED

Naheliegenderweise würden sich IR LEDs für schnelle Optokoppler aufdrängen. Sie haben viel höheren Wirkungsgrad als LEDs im Sichtbaren, ihre spektrale Emission ist gut an Silizium Empfänger angepasst und sie vertragen in der Regel einen viel höheren Strom, z.B. 100 mA statt 20 mA. Untersucht wurde eine CQY90. Als Lichtempfänger wurde eine BPW34 Si-PIN Diode mit 15 V Vorspannung verwendet. Diese Diode ist in punkto Geschwindigkeit nicht optimal, aber schnellere Dioden wie die ebenfalls getestete SFH202 haben eine viel kleinere lichtempfindliche Fläche und lieferten zu wenig Signal. PMTs, welche in diesem Spektralbereich (950 nm) empfindlich sind, sind rar und standen nicht zur Verfügung. Wie es sich herausstellte, war - leider - eine gute Zeitauflösung nicht nötig.

Die Infrarot-LED CQY90, das Schlusslicht: Die blaue Kurve ist eine e-Funktion mit  $\tau \approx 1.6 \mu\text{s}$ . Die gespeicherte Ladung ist ebenfalls enorm. Spezielle IR-LED für die Datenübertragung sind viel schneller.





13 Winword lernt schreiben

nicht gefunden	Bill Gates empfiehlt
Emittierende	Emigrierende
Pulser	Pulver
Winword	[no suggestions]
gepulsten	gepausten gepellten gepufften gepumpten gepustet geputzten
spektrale	Spektakel
rauscharme	rascherem
Beamer	Beamter
bedrahteten	befrachteten beratenden betrachteten gedrahteten
Dioden	Idioten
Überlagerung	Überalterung
Silizium	[no suggestions]
verrauscht	verraucht verramscht vertauscht vertuscht
Photonen	Protonen
Fotonen	Fotogen
unverzögert	unterzöget
Stanley	Satteln
PMTs	Amts
Gates	Gatten Gatter Gares Gases Gastes Grates Gutes Rates

Jaja, Gates Gutes Rates...