

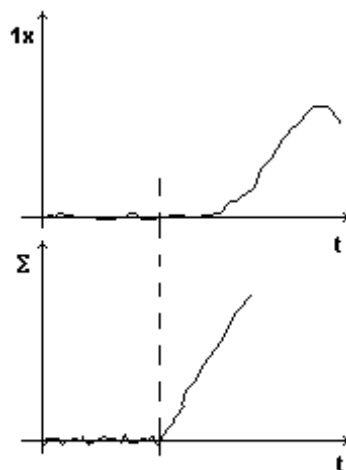
Walter Orlov

# Die Jagd nach dem Anfang des Pulses

November 2003

## Abstract

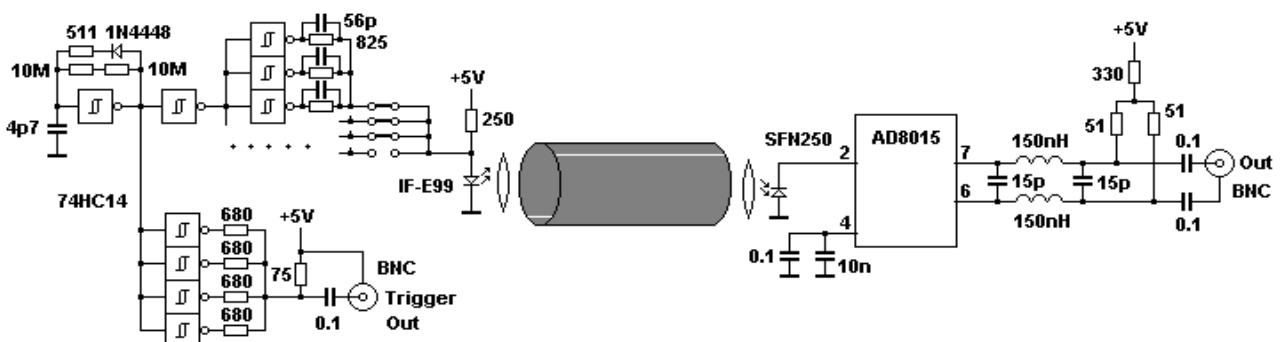
Einst habe ich gelesen, dass sich der Anfang des Lichtimpulses (elektromagnetischen Impulses) überall, d.h. durch jedes Medium, stets mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit fortpflanzen sollte. Diese Behauptung darf ziemlich plausibel aussehen, wenn man bedenkt, dass der Anfang des Pulses gerade noch keine Energie besitzt und dadurch keine Wechselwirkung mit der Materie hat. So könnte seine Bewegung unbehindert passieren. Da er noch keine Energie besitzt, ist auch der Grund dafür, dass er nicht registrierbar sei. Deshalb scheint es so, man könne diese Hypothese nicht überprüfen. Doch dann fiel mir eine Idee ein. Das Ziel kann mit Hilfe von digitalem Oscilloscope erreicht werden. Man führt mehrere Messungen durch, speichert die Messergebnisse und danach addiert sie. Wichtig ist zwar addieren, nicht den Mittelwert berechnen. Wenn man den Mittelwert findet, bleibt der Anfang des Pulses wieder klein und deswegen nicht erkennbar. Einfaches Addieren erlaubte jedoch, einerseits, dass sich zufällige Messwerte verstreut werden, und andererseits, dass an der Stelle, wo der Puls anfängt, eine steile Kurve entsteht, wie es folgende Skizze zeigt.



## Aufgabe

Man vergleicht die Lichtgeschwindigkeit in der Luft und im Wasser. Während sich die Geschwindigkeit von Maximum oder Front des Pulses vom Medium abhängig ist, darf die Geschwindigkeit vom Anfang des Pulses unverändert bleiben.

## Prüfaufbau



Als Lichtsender wurde LED von Typ IF-E99 mit Wellenlänge 650nm und Schaltzeit 3nS verwendet. Für übrige Schaltung reichte drei Bausteine 74HC14. Der erste Baustein diente für die Erzeugung der Pulse mit der Pulsbreite 18nS und Tastverhältnis 1:2000, die auch für den Triggerausgang benutzt wurden. Zwei andere Bausteine betrieben LED. Der Strom durch LED wurde mit der Stromzange gemessen; die Kurve unten zeigt den Spitzenstrom über 200mA.

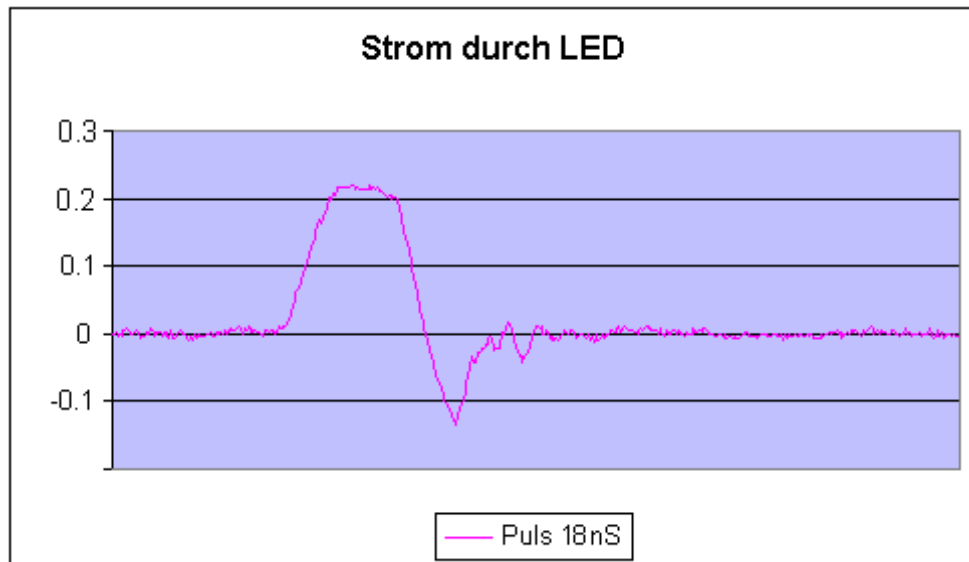
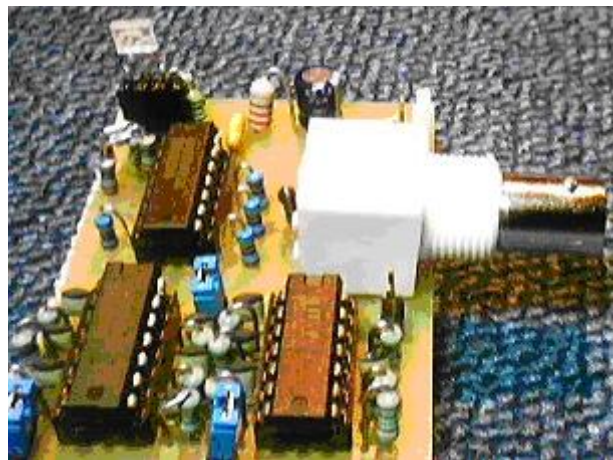
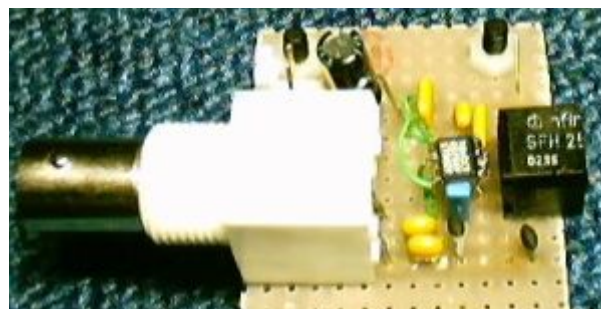


Foto vom Sender:



Für den Empfänger nahm ich die Fotodiode von Typ SFH250 mit Wellenlängebereich zwischen 400nm und 1100nm und Schaltzeit 10nS. Das Signal verstärkte AD8015 mit Bandbreite 240Mhz.

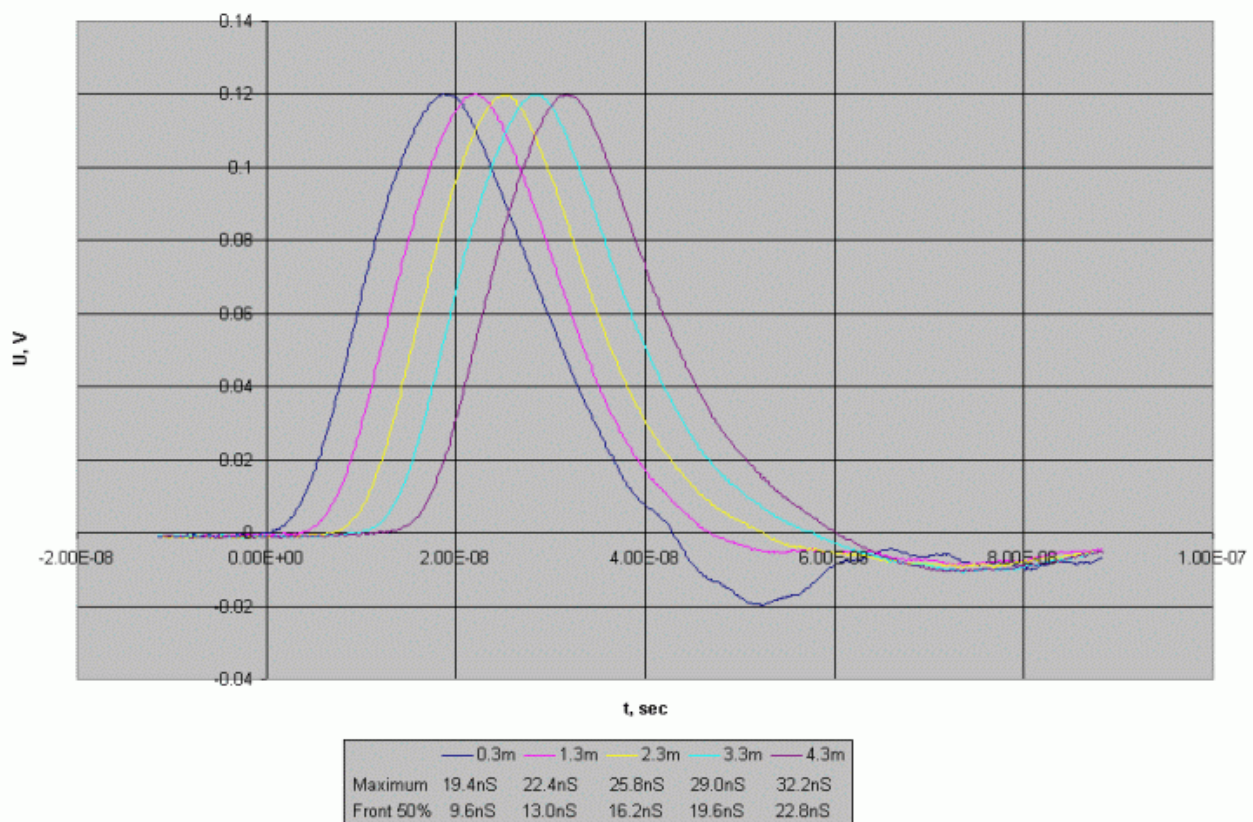
Foto vom Empfänger:



Um elektromagnetischen Rausch von Sender zu unterdrücken, wurden sowohl der Sender wie Empfänger in Blechboxen eingebaut. Für maximale Reichweite benutzte ich zwei Linsen. Eine fokussierte das Licht von LED zu parallelem Strahl und die andere fokussierte diesen Strahl direkt auf Fotodiode. Die Messungen wurden an digitalem Oscilloscope Tektronix TDS 3052B mit Bandbreite 500MHz (Anstiegszeit 0.7nS) und Messrate 5GS/s (Zeitschritt 0.2nS) ausgeführt. Triggerausgang vom Sender schließ ich über 4.5m-langen Koaxialkabel an "EXT TRIG" an und den Empfänger über 1m-langen Koaxialkabel an "CH1" (Eingangswiderstand 50Ohm). Die Erfassung passierte im Modus "Mittelwert" (16 einzelne Messungen). Die Daten speicherte ich als \*.CSV-Files auf Disketten und bearbeitete sie danach am Computer in EXEL.

## Versuch 1

Der Sinn dieses Versuches ist die Messung der Lichtgeschwindigkeit in der Luft auf "gewöhnliche" Weise. Um die Verformung der Pulse zu vermeiden, stellte ich gleiche Amplitude der Pulse durch partielles Zudecken der Linse vom Empfänger nach. Die Messungen wurden bei den Entfernungen 0.3m, 1.3m, 2.3m, 3.3m und 4.3m durchgeführt. Folgendes Diagramm zeigt das Ergebnis:



Das Oscilloscope hat zeitliche Auflösung von 0.2nS. Da wir für die Berechnung zwei Messpunkte brauchen, verdoppelt sich dieser Fehler. Dasselbe gilt für die Längebestimmung. Die konnte ich in schlimmstem Falle auf etwa 5mm schätzen und für Sender und Empfänger bringt das schon 0.01m zusammen. So konnte ich zugleich der Ermittlung der Lichtgeschwindigkeit auch prozentualen Fehler be-

rechnen. Maximum als Bezug:

Messpunkte	Zeitdifferenz	Fehler	Geschwindigkeit	Abweichung vom Tabellenwert 299 792 458 m/s
0.3m und 1.3m	3.0nS	$(0.4\text{nS}/3.0\text{nS} + 0.01\text{m}/1.0\text{m}) 100\%$ = 14.3%	$3.333 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	11.1%
0.3m und 2.3m	6.4nS	$(0.4\text{nS}/6.4\text{nS} + 0.01\text{m}/2.0\text{m}) 100\%$ = 6.8%	$3.125 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	4.2%
0.3m und 3.3m	9.6nS	$(0.4\text{nS}/9.6\text{nS} + 0.01\text{m}/3.0\text{m}) 100\%$ = 4.5%	$3.125 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	4.2%
0.3m und 4.3m	12.8nS	$(0.4\text{nS}/12.8\text{nS} + 0.01\text{m}/4.0\text{m}) 100\%$ = 3.4%	$3.125 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	4.2%

Außer letzter Messung liegen die Abweichungen von der Tabellengröße im Toleranzbereich. Der Grund für den Ausfall ist elektromagnetische Strahlung vom Sender, die durch Umschaltung vom LED-Treibern (74HC14) verursacht wird. Obwohl Sender und Empfänger in metallischen Gehäusen waren und von verschiedenen Netzteilen gespeist wurden, ließ sich diese Strahlung offensichtlich nicht vollständig abschirmen. Deswegen ist auch auffällig verzerrte Abfallflanke des Pulses bei der Messung für Abstand 0.3m. In Versuch 3 werde ich die Sache genauer klären, aber schon jetzt kann ich verraten, dass die Front des Pulses dabei fast unversehrt bleibt. Deshalb möchte ich noch die Datenauswertung für Front, Schwelle 50% vom Maximum, bieten. Front 50% als Bezug:

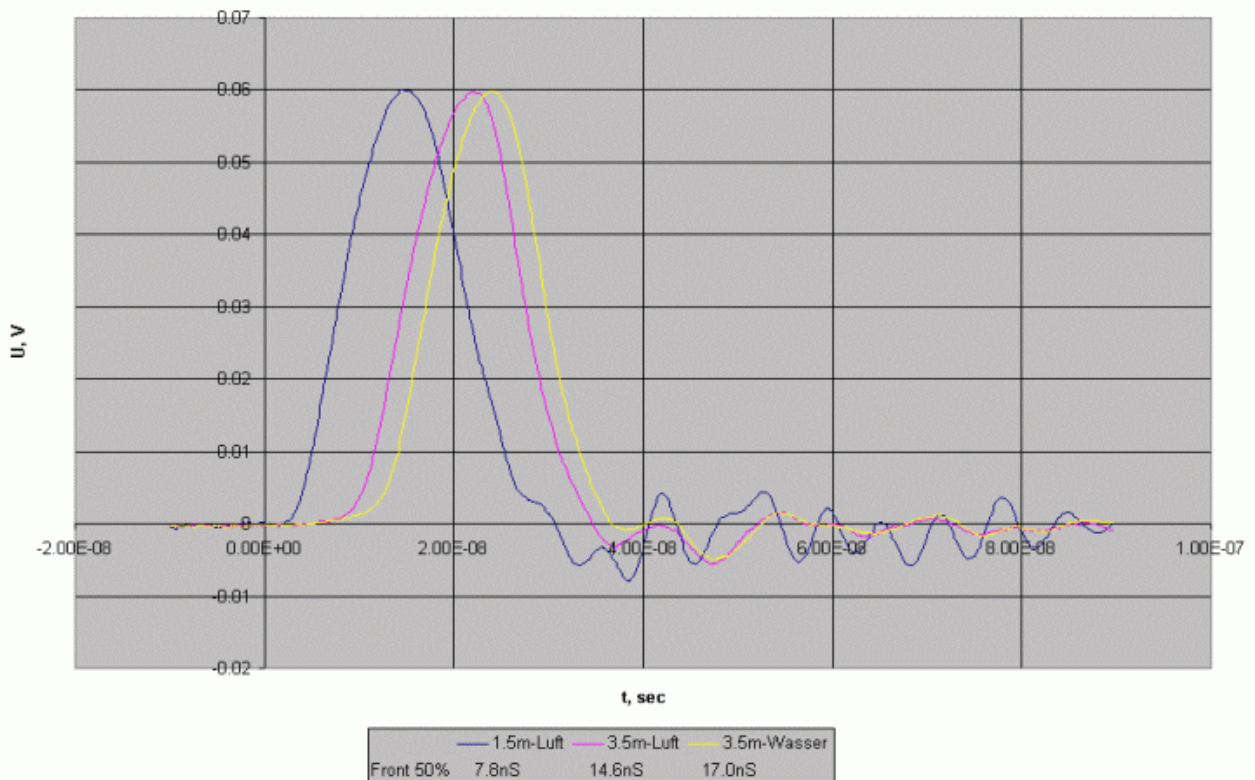
Messpunkte	Zeitdifferenz	Fehler	Geschwindigkeit	Abweichung vom Tabellenwert 299 792 458 m/s
0.3m und 1.3m	3.4nS	$(0.4\text{nS}/3.4\text{nS} + 0.01\text{m}/1.0\text{m}) 100\%$ = 12.8%	$2.941 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	1.9%
0.3m und 2.3m	6.6nS	$(0.4\text{nS}/6.6\text{nS} + 0.01\text{m}/2.0\text{m}) 100\%$ = 6.6%	$3.030 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	1.1%
0.3m und 3.3m	10.0nS	$(0.4\text{nS}/10.0\text{nS} + 0.01\text{m}/3.0\text{m}) 100\%$ = 4.3%	$3.000 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	0.1%
0.3m und 4.3m	13.2nS	$(0.4\text{nS}/13.2\text{nS} + 0.01\text{m}/4.0\text{m}) 100\%$ = 3.3%	$3.030 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	1.1%

Ich machte vier Messungen für jede Entfernung, doch das erwies sich als überflüssig. Beim Vergleich deckten sich die Kurven vollständig. Der Grund dafür sei in Stabilität gesendeter Lichtimpulse und im Erfassungsmodus, weil das Oscilloscope den Mittelwert schon berechnete.

## Versuch 2



Wiederum auf "gewöhnliche" Weise wurde die Lichtgeschwindigkeit sowohl in der Luft als auch im Wasser gemessen. Zwischen Sender und Empfänger stellte ich ein mit Wasser gefülltes Alurohr von Länge 2.0m auf. Vom Ende des Empfängers setzte ich die Blende aus der Pappe auf Rohr ein. Um Störung von Sender weiter zu reduzieren, entschied ich mich für kleinsten Abstand 1.5m, deshalb war die nächste Entfernung 3.5m. Einen exakten Wert von der Lichtgeschwindigkeit im Wasser gibt es nicht, weil diese Geschwindigkeit sehr stark von der Wellenlänge des Lichtes abhängig ist. Für das sichtbare Licht ist die Brechungszahl für Wasser  $n = 1.333$ . Daraus können wir gesuchte Größe berechnen:  $v = c/n = 2.25 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

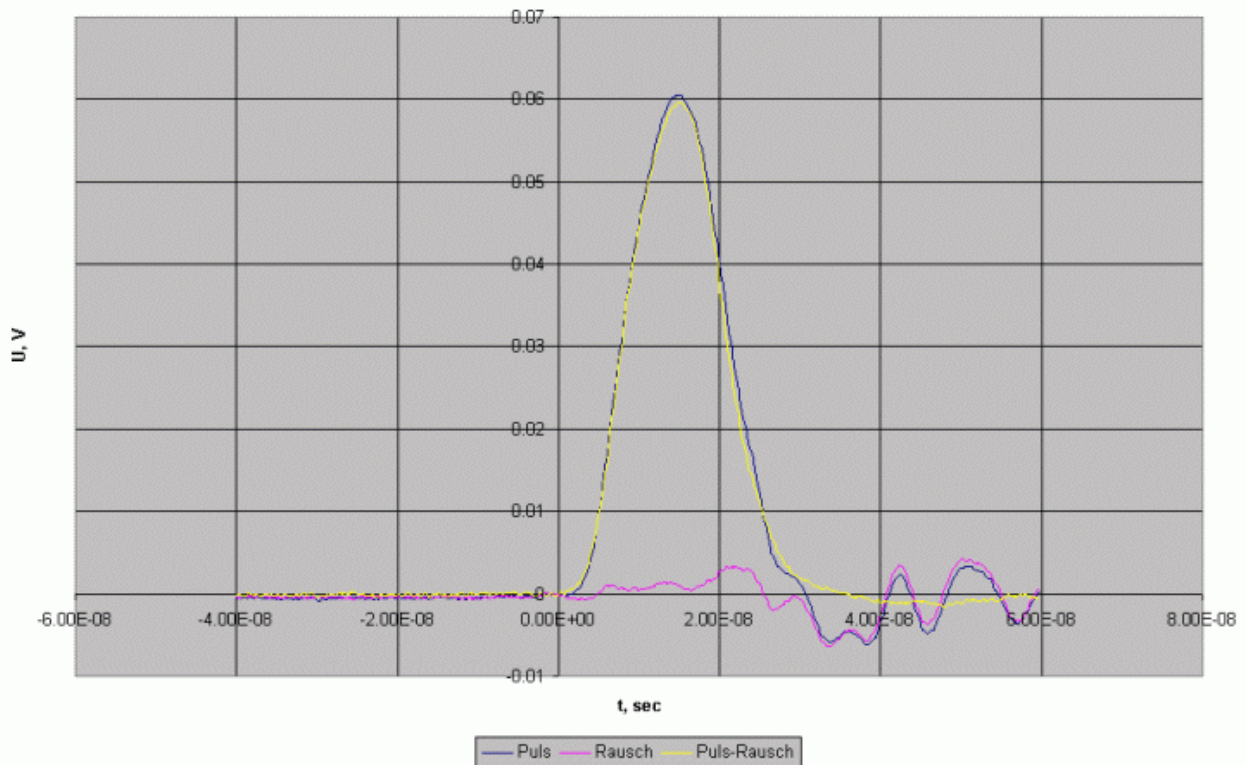


Messpunkte	Zeitdifferenz	Fehler	Geschwindigkeit	Abweichung von Tabellenwert
1.5m und 3.5m Luft	6.8nS	$(0.4\text{nS}/6.8\text{nS} + 0.01\text{m}/2.0\text{m}) \cdot 100\% = 6.4\%$	$2.941 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	1.9%
1.5m und 3.5m Wasser	9.2nS	$(0.4\text{nS}/9.2\text{nS} + 0.01\text{m}/2.0\text{m}) \cdot 100\% = 4.9\%$	$2.174 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	3.4%

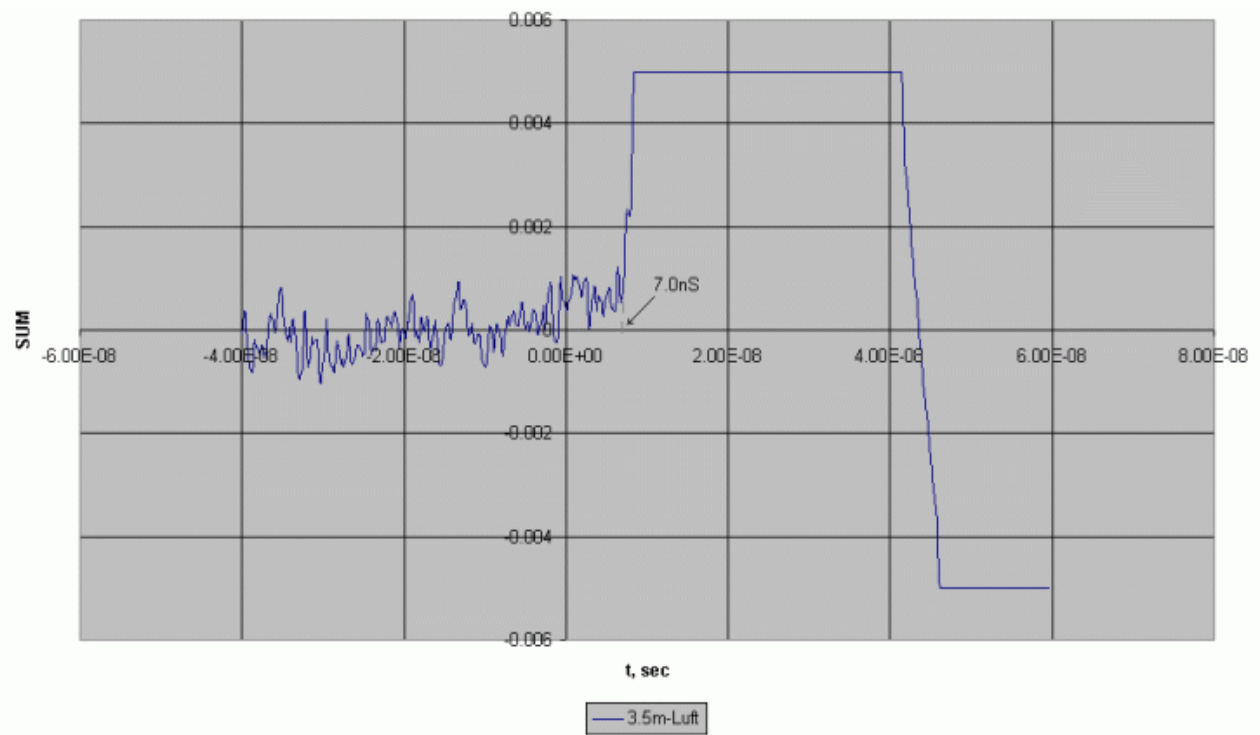
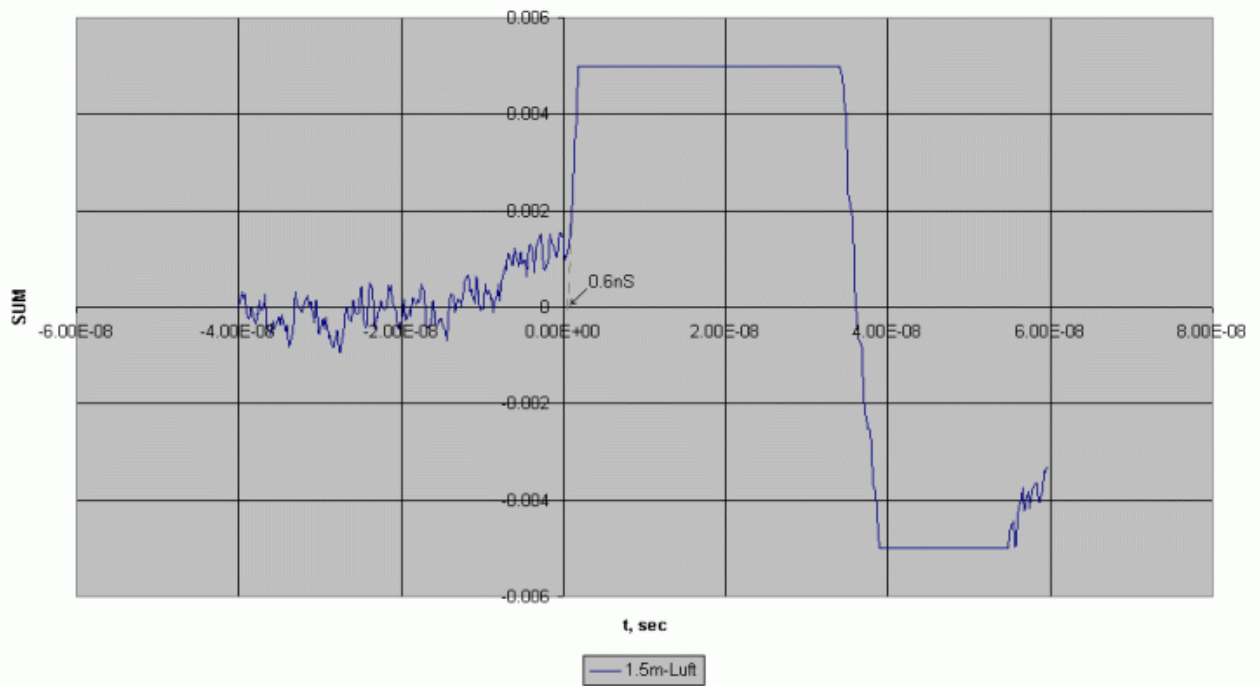
Wie man sieht, stimmen meine Messungen mit Tabellenwerten überein.

### Versuch 3

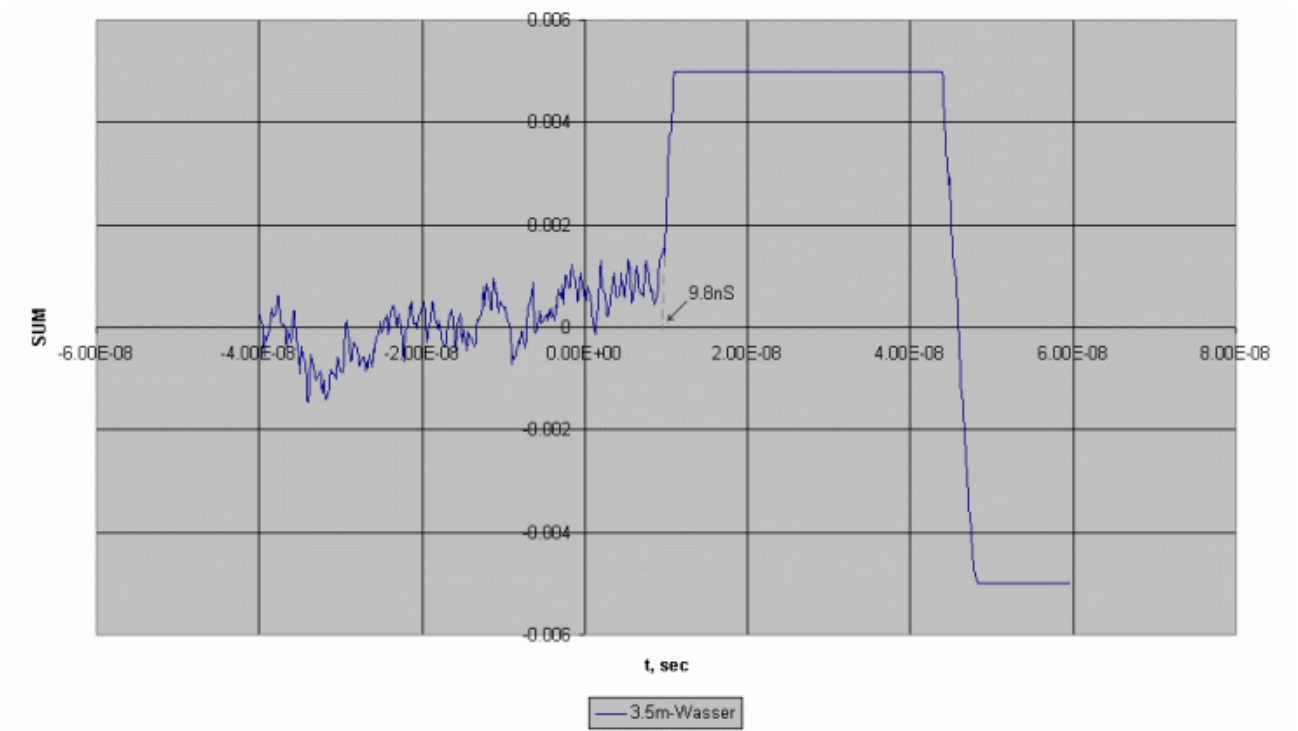
Erst klären wir die Sache mit den Störungen vom Sender. Ich führte eine Messung mit Lichtimpuls und eine mit vollständig ausgeblendetem Empfänger. Das Diagramm unten zeigt beide Kurven und die dritte Kurve (gelbe Farbe) ist das Resultat der Subtraktion.



Es ist deutlich zu sehen, dass die Front des Pulses von der Störung kaum gefährdet ist. Über das Maximum kann man das schon nicht sagen. Das war zwar die Fehlerquelle bei der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit durch Zeitdifferenz zwischen den Maximums. Und mittels mathematischer Beseitigung der Störung können wir beinahe idealen Puls erwerben. Diesen Trick will ich auch bei der Suche nach dem Beginn des Pulses verwenden. Das ist besonders wichtig, elektromagnetische Störung vom Sender zu beseitigen, weil sie die Wellenlänge in Meter-Bereich hat und das Wasserrohr einfach umgeht. So würde das Resultat des Versuches verfälscht. Der Prüfaufbau war derselbe wie im Versuch 2. Es wurden 20 Messungen bei  $1.5\text{m}$ ,  $3.5\text{m}$  in der Luft und  $3.5\text{m}$  im Wasser mal für Puls mal für Rausch, d.h. 10 Messungen für Puls und 10 Messungen für Rausch durchgeführt. In EXCEL zog ich den Rausch von Puls ab. So bekam ich drei Diagramme:







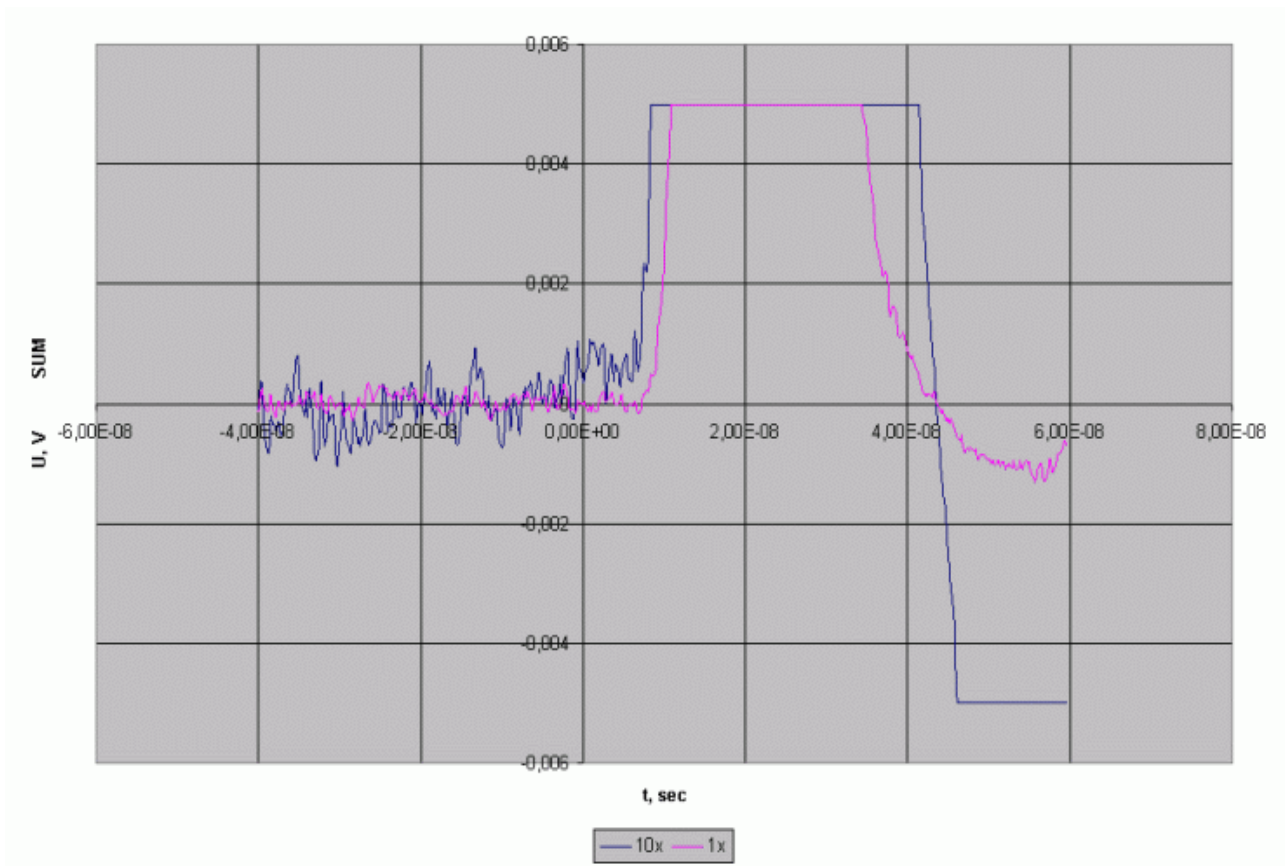
Führen wir die Linien der Front bis zur X-Achse und entnehmen die Werte, bekommen wir folgende Tabelle:

Messpunkte	Zeitdifferenz	Geschwindigkeit	Abweichung von Tabellenwert
1.5m und 3.5m Luft	6.4nS	$3.125 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	4.2%
1.5m und 3.5m Wasser	9.2nS	$2.174 \cdot 10^8 \text{ m/S}$	3.4%

Also, gemessene Geschwindigkeiten entsprechen wiederum den Tabellenwerten der Lichtgeschwindigkeit in Vakuum und Wasser. Hellhörig macht allerdings das, dass der Rausch, bevor der Puls anfängt, hebt sich ein wenig hoch. Nun sei es wieder unser nervtötende elektromagnetische Strahlung vom Sender am Werk. Daran deutet es, dass bei der Entfernung 1.5m diese Anhebung am höchsten ist.

## Diskussion

Eigentlich waren erste zwei Versuche nur dazu gedacht, die Fähigkeit von mir gebauter Messapparatur zu überprüfen und der Test wurde mit bester Genauigkeit von 3.3% offensichtlich überstanden. Meine Hoffnung, dass der Anfang des Pulses gut zu erkennen wird, wurde bestätigt. Im Allgemein galt: Für 10 Summanden fand nur etwa 5-malige Steigerung der Rauschen-Amplitude statt. Vergleicht man eine Messung und die Summe von zehn Messungen, sieht man, dass die Front der Summe nach vorn gerückt hat, zur Stelle, die wir bei einzelner Messung für den Anfang nur vage halten könnten:



Das Verfahren, durch Addieren den Anfangspunkt des Pulses deutlicher zu machen, hat sich also bewährt. Jedoch die Hypothese, dass sich der Anfang des Pulses überall mit Vakuumlichtgeschwindigkeit fortpflanzen sollte, wurde durch mein Experiment nicht bestätigt. Es wird viel über die Überlichtgeschwindigkeit diskutiert. Da dabei mit den Wellenpaketen experimentiert wird, ist der Zankapfel, die Geschwindigkeit welches Teils des Wellenpaketes – Front, Maximum, irgendeine Schwelle – in Betracht gezogen werden muss. Für die Klärung des Problem könnte man wohl mit oben vorgeschlagenem Verfahren genau nach dem Anfang des Pulses suchen.

## Quellen

IF-E99

<http://www.i-fiberoptics.com/leds/IFE99.pdf>

SFH250

[http://www.infineon.com/cmc\\_upload/documents/037/238/SFH250\\_020314.pdf](http://www.infineon.com/cmc_upload/documents/037/238/SFH250_020314.pdf)

AD8015

[http://www.analog.com/UploadedFiles/Data\\_Sheets/217002439ad8015.pdf](http://www.analog.com/UploadedFiles/Data_Sheets/217002439ad8015.pdf)