



Ion Tail Cancellation Filter

Small Introduction



Schaltungstechnik
und Simulation

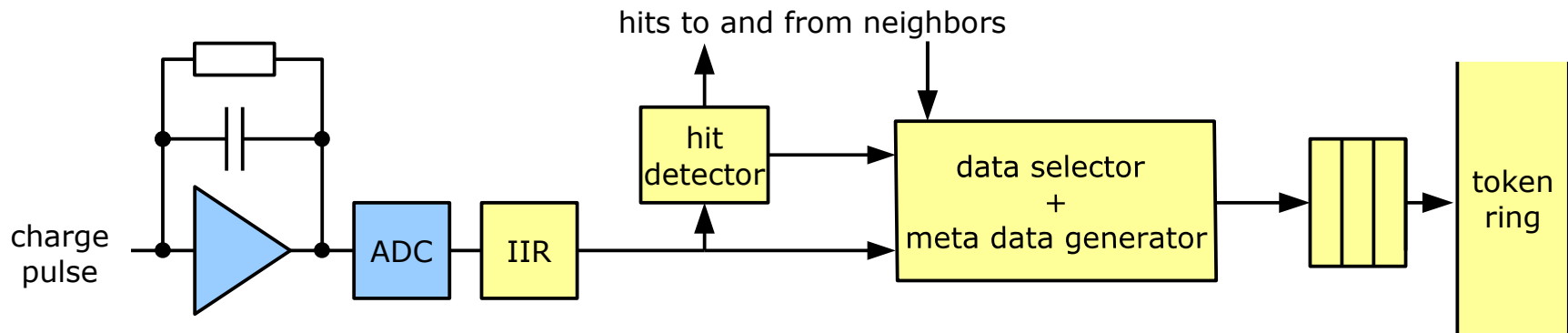
Tim Armbruster

tim.armbruster@ziti.uni-heidelberg.de

Juni 2010

1. Introduction

Readout Concept



Preamp, Shaper, ADC

- Analoge Ladungsverstärkung → $V_{out} \sim Q/C_{in} +$ kontinuierliche Entladung mit Zeitkonstanten T
- Bandbegrenzung (hier nicht explizit gezeigt) → Verbesserung S/N
- Digitalisierung

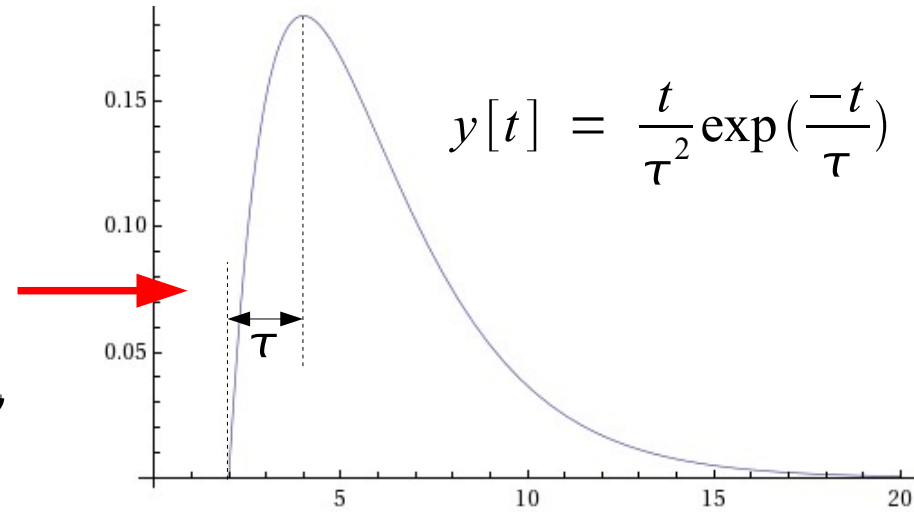
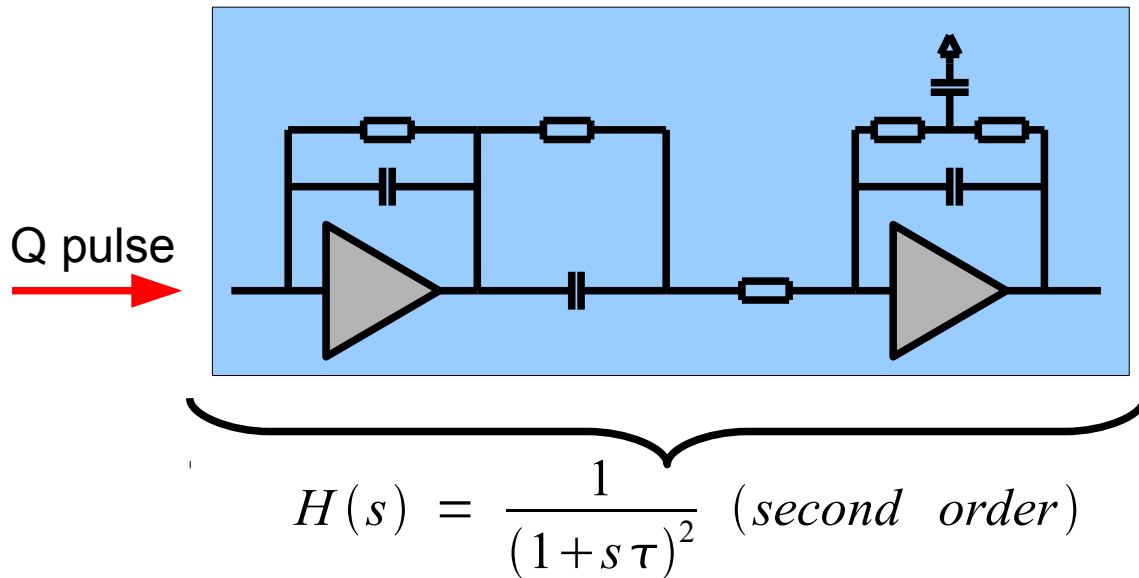
Hit detector, data generator and token ring

- Automatische Hit-Erkennung
- Nachbar-Kopplung
- Paketerzeugung (Daten + Metadaten)

Thema hier: Infinite Impulse Response Filter

- Signalaufbereitung, z.B.:
 - *Ion-Tail Cancellation*
 - Baseline Correction
 - Zusätzliches Shaping

Impulse Response Preamp/Shaper



- Detektor-Signal ist in erster Näherung Ladungspuls
- Preamp/Shaper kann als Tiefpass 2ter Ordnung beschrieben werden
- Ausgangssignal entspricht dann gerade Impulsantwort
 - Rise-Time: T
 - Maximum: $1/T$
 - Exponentielle Entladung (\rightarrow Continuous Reset in Preamp)

=> Alle wesentlichen Puls-Eigenschaften allein von Zeitkonstante T abhängig!

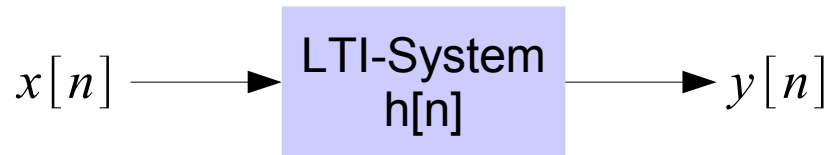
2. Discrete Considerations

Reminder: Linear Time-Invariant System (LTI)

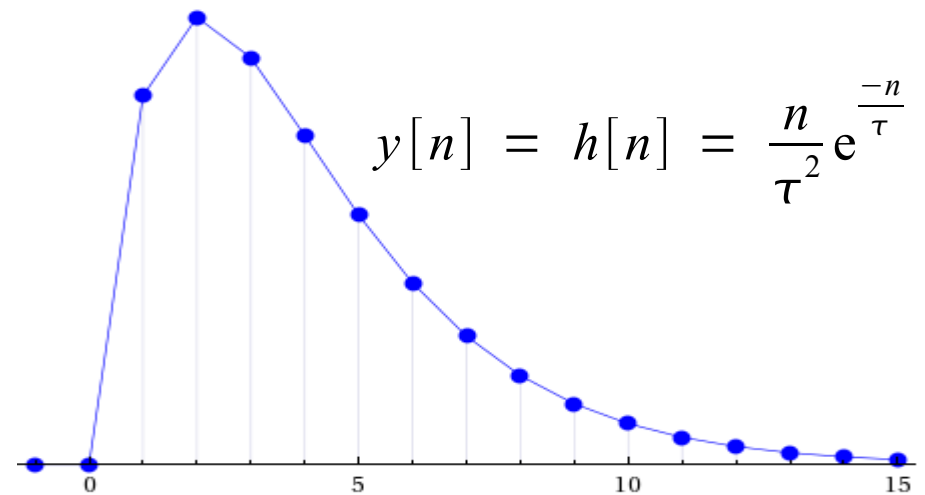
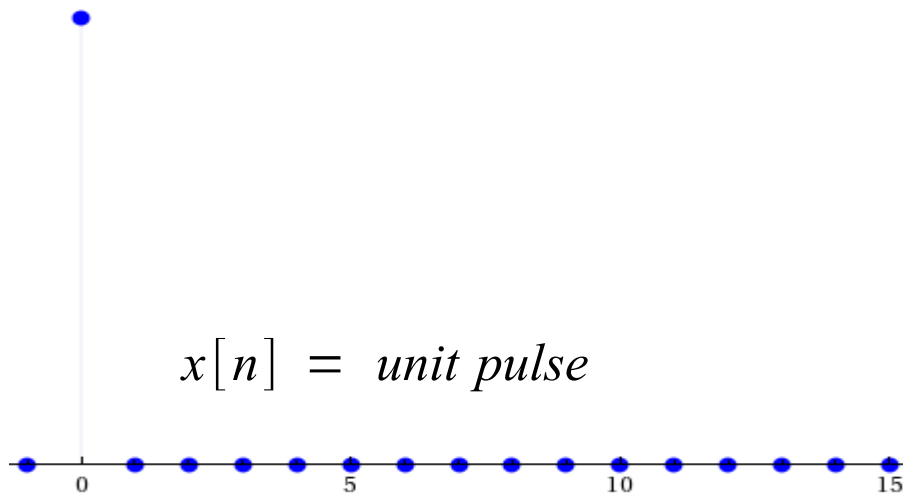
- Jede Ausgangsfolge kann als Linearkombination von verzögerten Impulsantworten dargestellt werden (Faltung).

$$y[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} x[k]h[n-k]$$

- Mit der Impulsantwort ist deshalb das komplette System bestimmt.

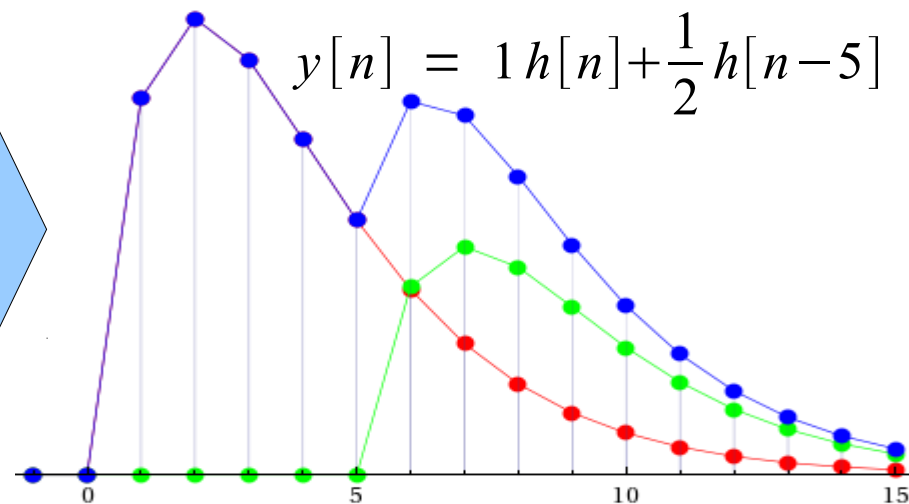
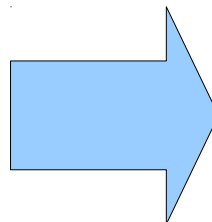
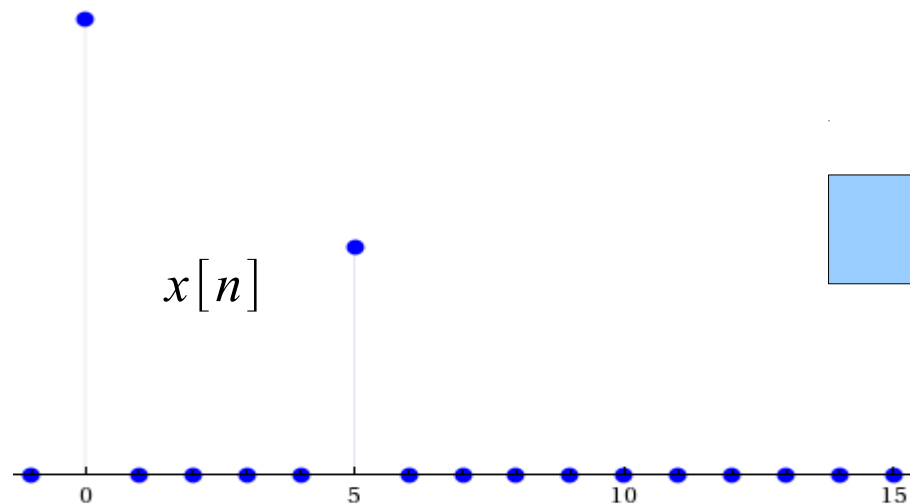


Beispiel:

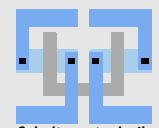
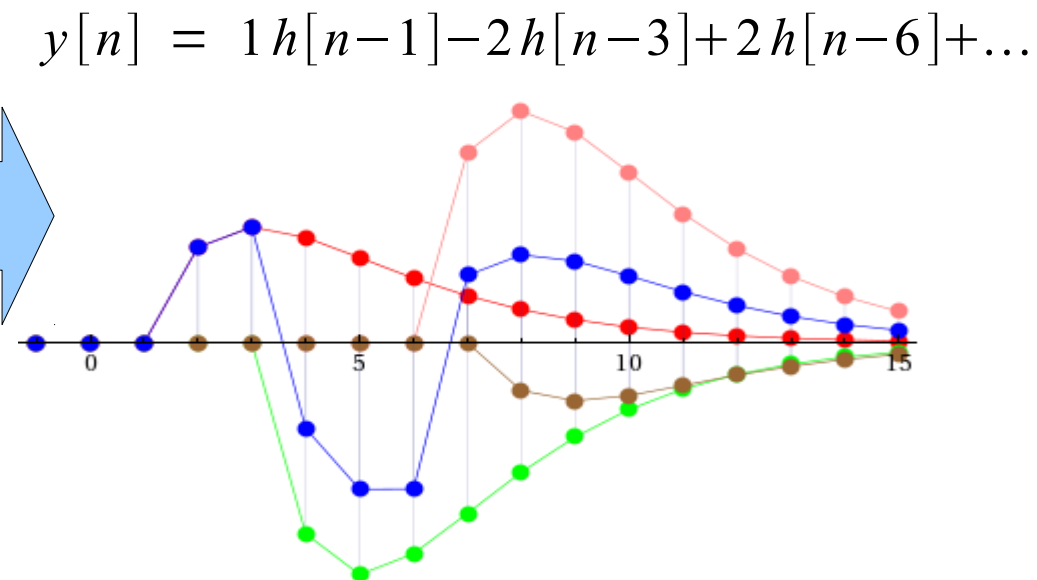
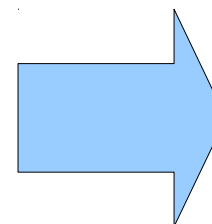
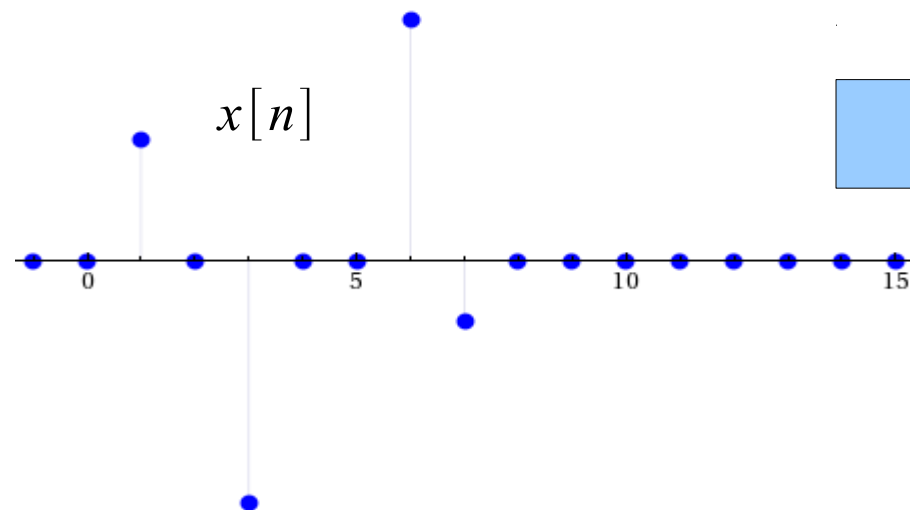


Linear Time-Invariant System (LTI)

Beispiel 1:

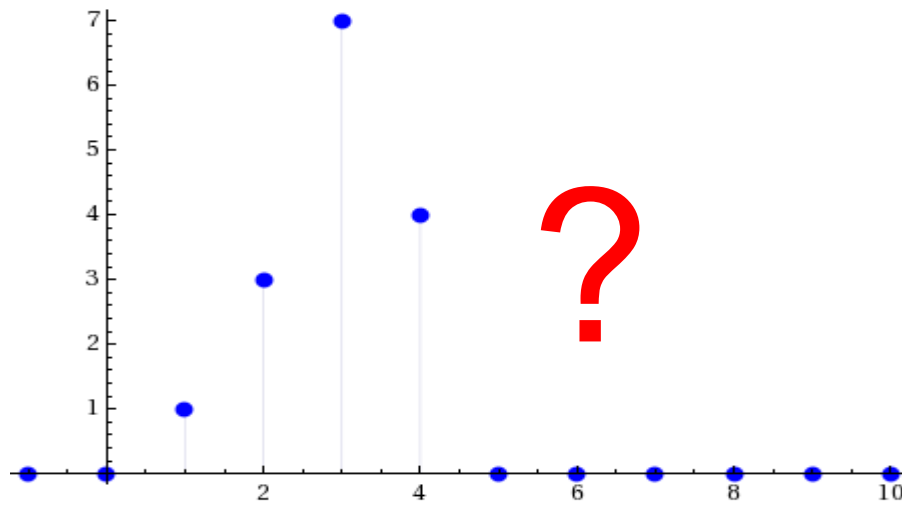


Beispiel 2:

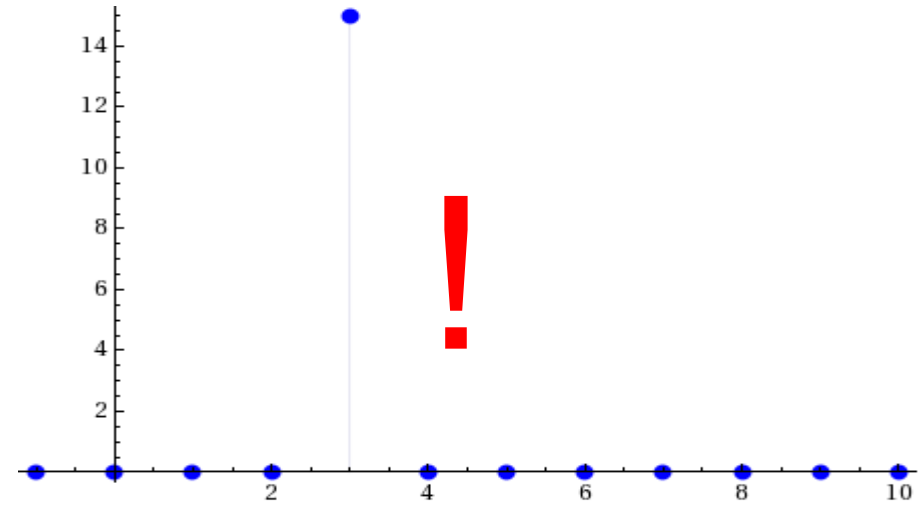


Realistic Hit Signal

- Genaue Form eines realistischen Eingangssignals ist schwer zu ermitteln
 - stark abhängig von Detektor-Typ und -Geometrie
 - analytische Rechnung schwer oder nicht möglich
 - Simulationen im Allgemeinen aufwändig
 - aber: wenn Signallänge kurz (gegenüber Systemgeschwindigkeit), gute Näherung über (skalierten) Impuls möglich
 - Systemgeschwindigkeit: Bandbegrenzung, Zeitkonstante
 - Beispiel Silicon: Signallänge $< 1\text{ns}$, Shaping-Time $\approx 100\text{ns}$

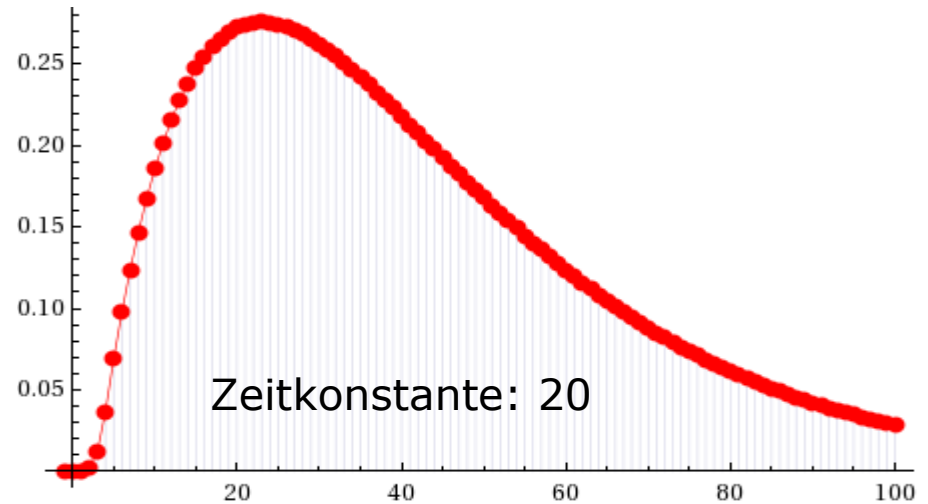
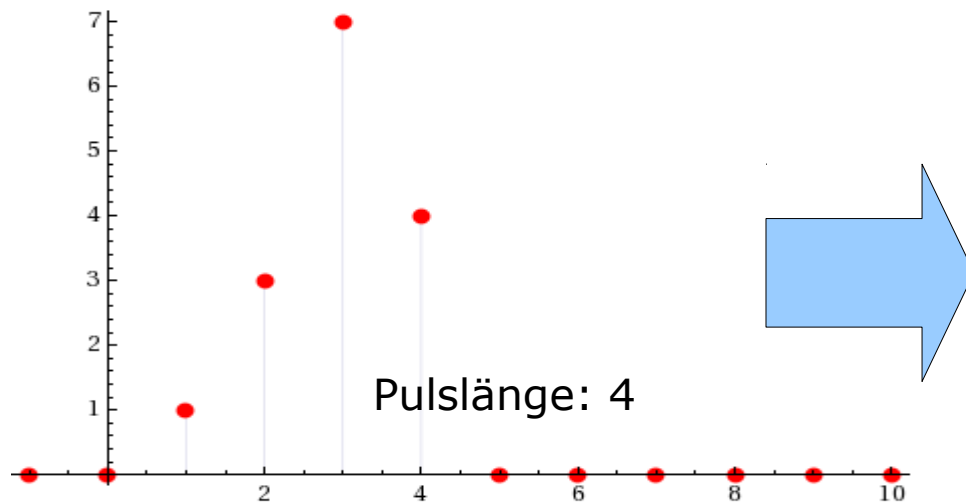


\approx



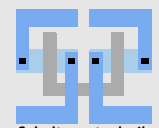
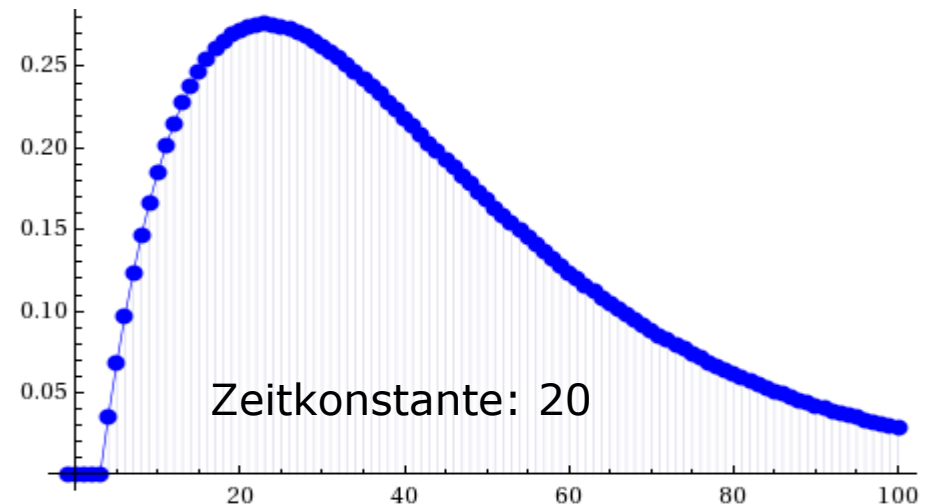
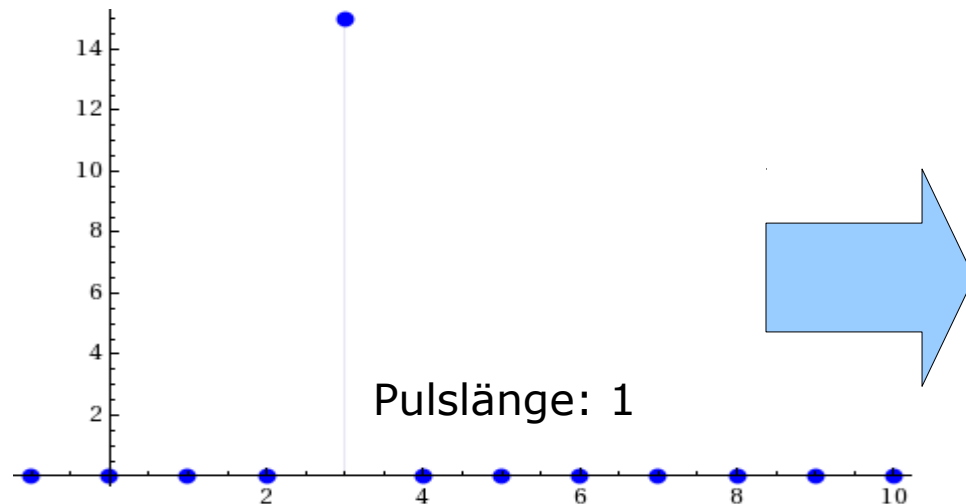
Realistic Shaper Output Signal

Kurzer, realistischer Eingangspuls:



=> Signalform von kurzen Eingangssignalen vernachlässigbar

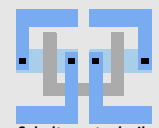
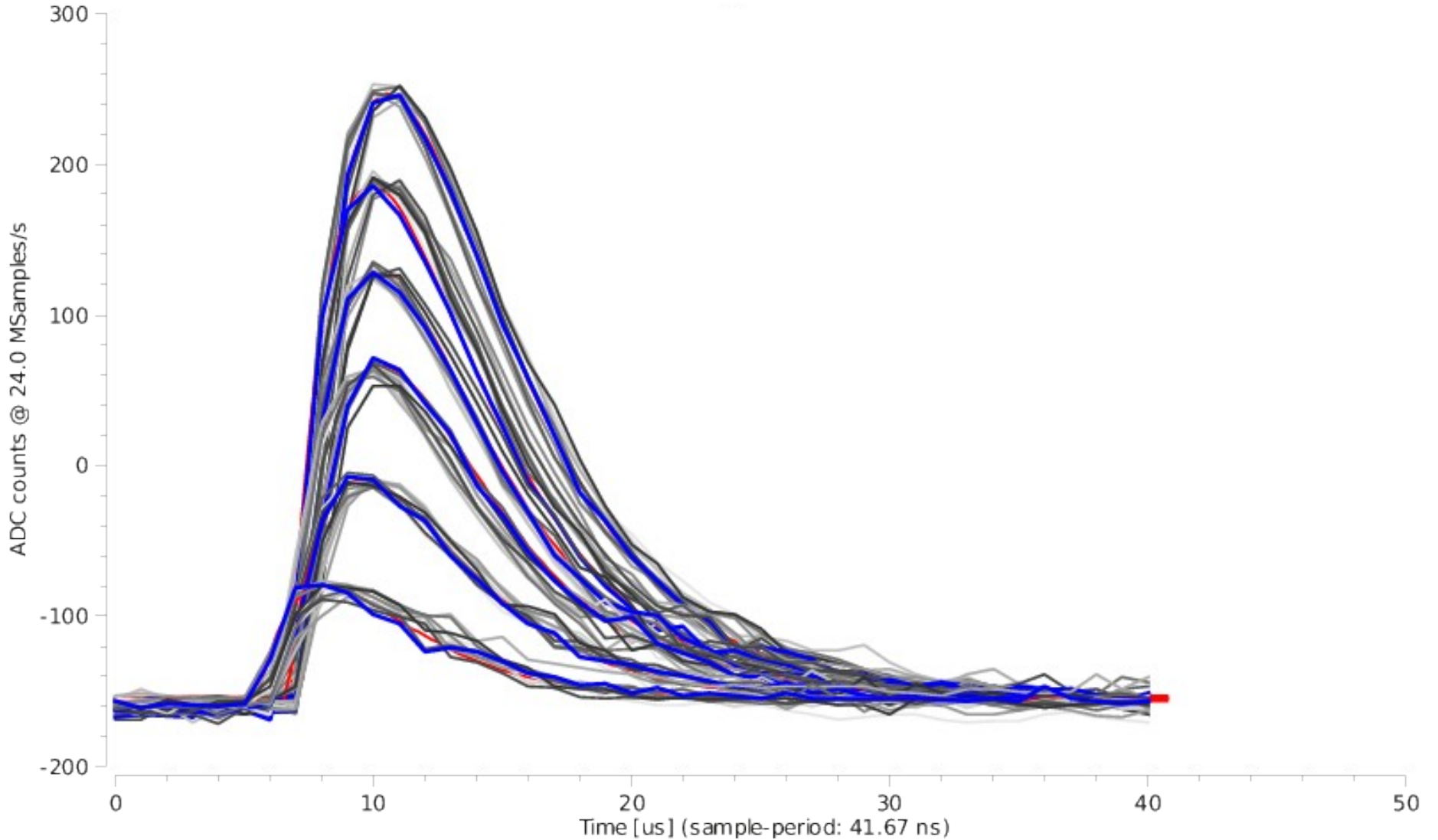
Annäherung durch skalierten Impuls:



Example: Measured Pulses

-Fit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -Fit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -Fit -hit
-hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -Fit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -Fit -hit -hit -hit
-hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -Fit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit -hit

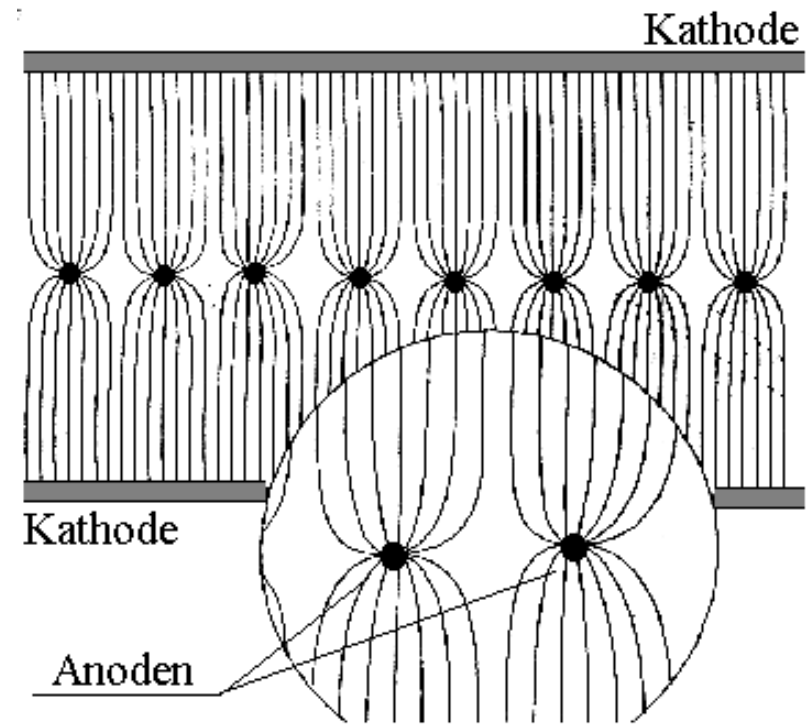
Digitized Hit



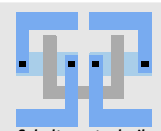
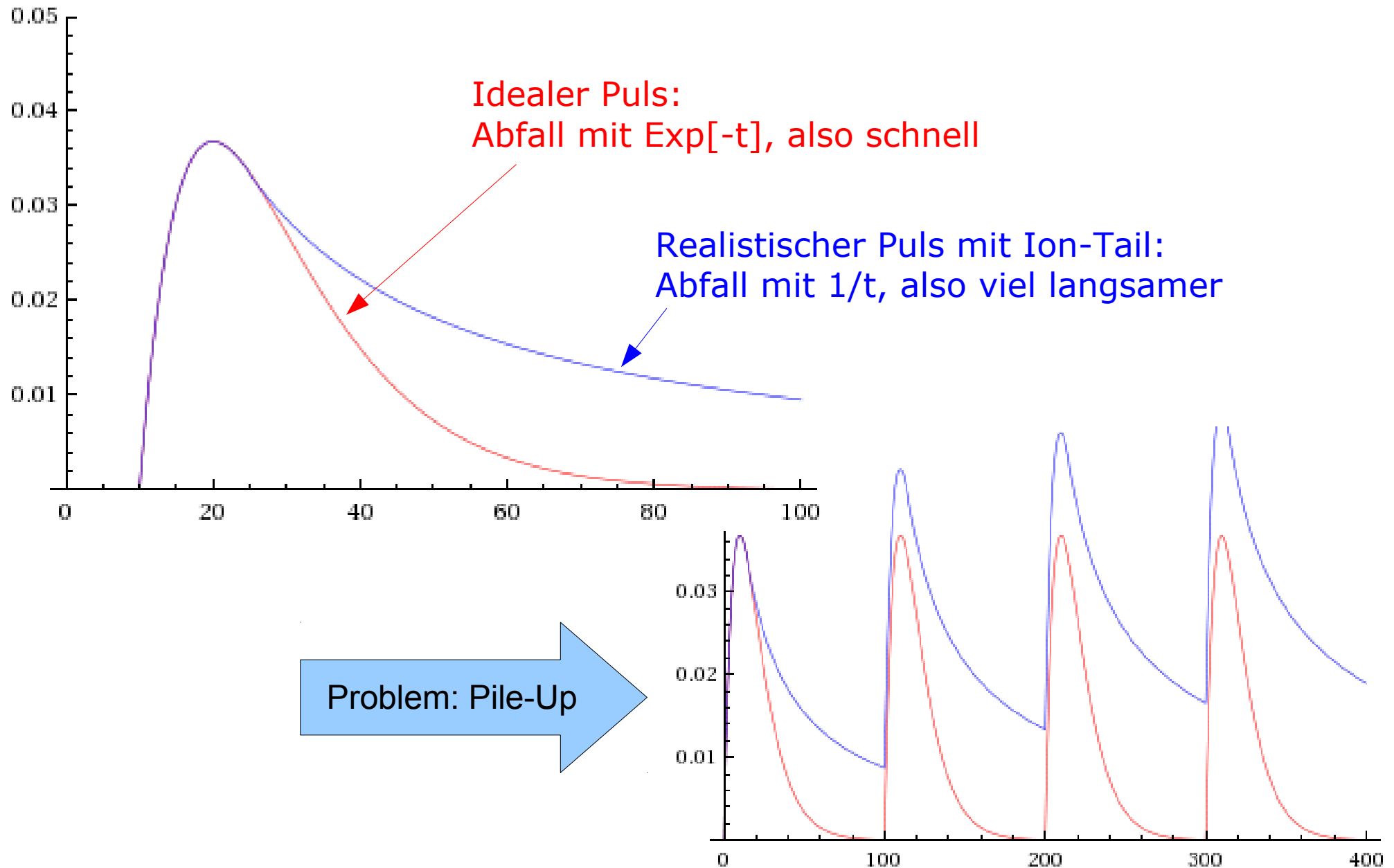
3. Problem: Ion Tail

Application: MWPC

- Ziel: Auslese von "Vieldrahtproportionalitätskammern" oder multi wire proportional chamber (MWPC)
- So funktioniert (vereinfacht):
 - Geladene Teilchen erzeugen Ionisationsspur in Gas-Volumen (Vergleichbar mit Silizium-Ionisation)
 - Freie Elektronen driften zu (positiven) Anodendrähten
 - Lawineneffekt in unmittelbarer Umgebung der Drähte ($E\text{-Feld} \sim 1/r$, sehr groß für kleine r) \rightarrow lokal sehr hohe Verstärkung
 - Zurück bleiben Ionen, die nun vom Draht wegdriften
 - Problem Ionen-Drift induzieren langsam abfallenden Ion-Tail der das Signal unerwünscht "verlängert"
- **Problem: Ion-Tail verschiebt Baseline**
- **Mögliche Lösung: Analoges oder Digitales Filter**

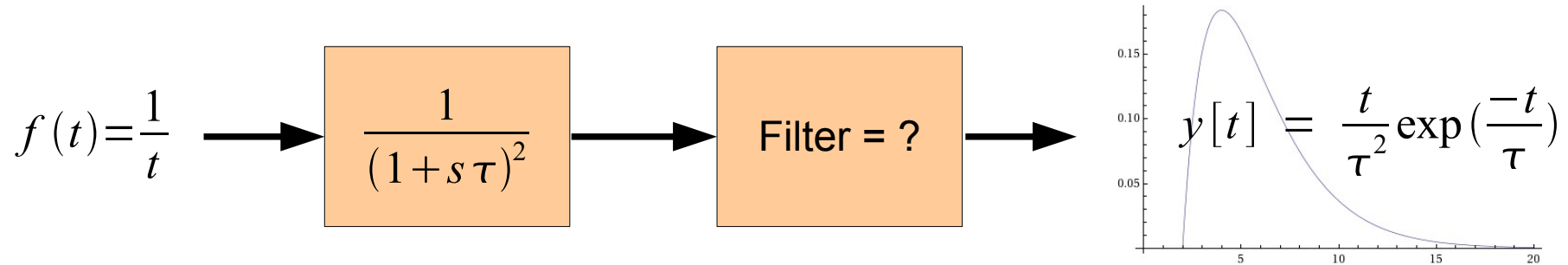


Ion-Tail Problem

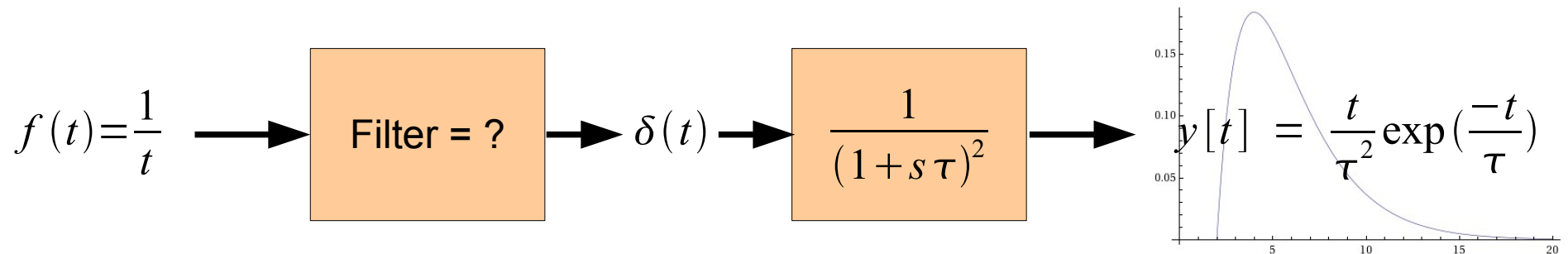


Conceptual Formulation

- Ion-Tail hat in etwa die Form $f(t)=1/t \rightarrow$ **und den wollen wir wegschneiden!**
- Wir haben also folgende Situation:



- Oder in Worten: wie muss das Filter gewählt werden, damit aus dem Eingangssignal mit unerwünschtem Ion-tail $f(t)$ am Ende der Kette wieder „nur“ die Impulsantwort des Shapers wird?
- Die Reihenfolge der Komponenten ist aus Sicht der Transfer-Funktion egal (Faltung entspricht Multiplikation der Transfer-Funktionen). Das Problem vereinfacht sich also zu:



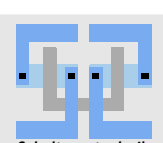
- Oder in Worten: Das Filter muss den Ion-Tail gerade so wegfiltern, dass nur noch ein Dirac-Delta übrig bleibt.

Conceptual Formulation

- Problem bei $1/t$ Ion-Tail:
 - Digitales Filter das $f(t) = 1/t$ exakt cancelt ist kaum zu realisieren
 - Außerdem ist $f(t) = 1/t$ auch nur eine Näherung, tatsächlicher Tail stark abhängig von Detektoraufbau, Betriebsparametern, ...
- Idee: Annäherung von $f(t)$ durch abfallende Exponentialfunktionen mit unterschiedlichen (programmierbaren) Zeitkonstanten und Vorfaktoren, formal:

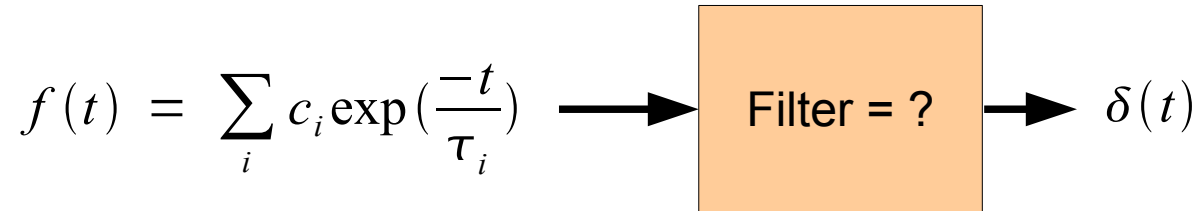
$$f(t) = \frac{1}{t} \approx \sum_i c_i \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) = c_0 \exp\left(\frac{-t}{\tau_0}\right) + c_1 \exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) + \dots$$

- Vorteile
 - Mit Exponentialfunktionen lässt sich in der DSV gut umgehen
 - Durch geeignete Wahl der Koeffizienten kann das Filter flexibel an die jeweilige Situation adaptiert werden.
- In der Praxis langen tatsächlich schon einige wenige Summanden um „echte“ Tails ausreichend abzuschneiden. Zielkriterium ist hier, wie nahe der Tail nach einer festgelegten Zeit wieder der Baseline kommen muss.



Conceptual Formulation

Das Problem reduziert sich mit diesen Überlegungen auf:



was sich direkt z.B. in den Z-Raum übersetzen lässt (mit Z-Transformation) als:

$$\sum_i^N \frac{z c_i e^{\frac{1}{\tau_i}}}{-1 + z c_i e^{\frac{1}{\tau_i}}} \cdot H_{IIR}(z) = 1$$

Die Übertragungsfunktion eines Filters, das gerade N Exponenten cancelt lautet damit:

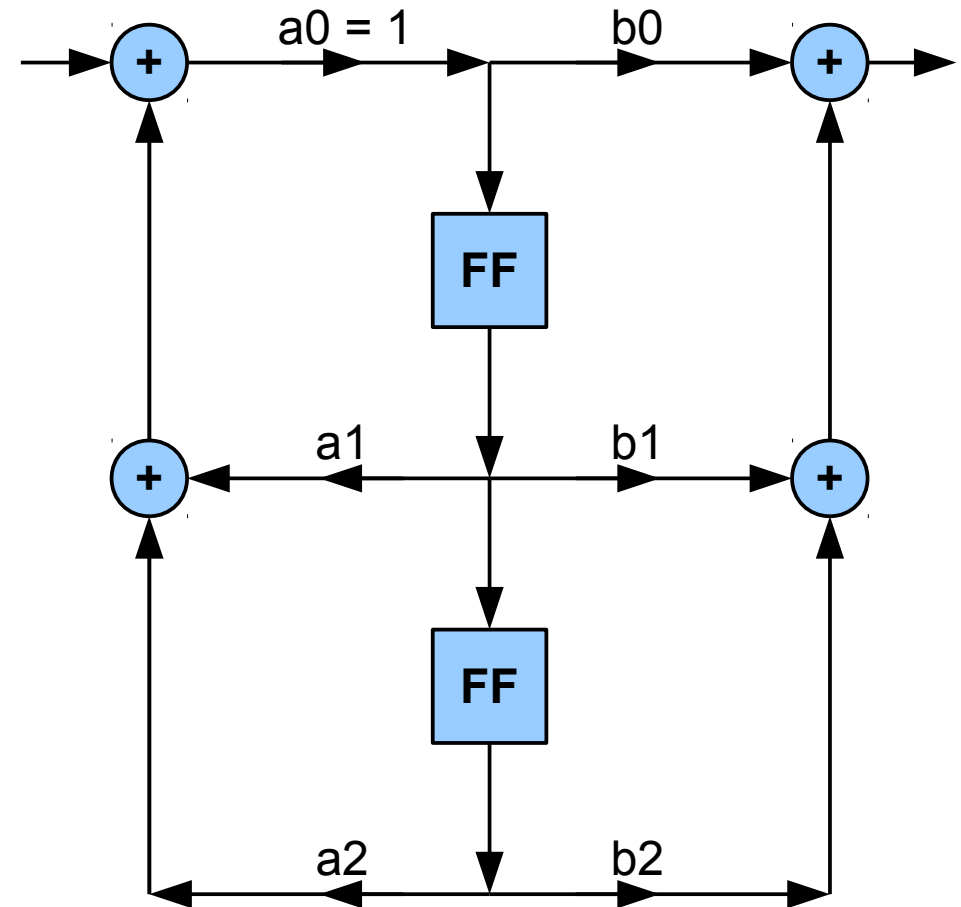
$$H_{FILTER}^N(z) = \left[\sum_i^N \frac{z c_i e^{\frac{1}{\tau_i}}}{-1 + z c_i e^{\frac{1}{\tau_i}}} \right]^{-1}$$

4. Realization with IIR Filter

Overview: IIR Filter

- IIR Filter salopp: Digitales Filter mit Feedback-Schleife(n)
- Viele mögliche Strukturen (im Prinzip unendlich viele). Wahl der geeignetsten von vielen Faktoren abhängig, z.B.:
 - Form der Übertragungsfunktion
 - Charakter des Datenflusses: Quantisierungseffekte, Überlauf interner Knoten, Konvergenz, ...
 - Realisierbarkeit: Platzbedarf nach Synthese, Parallelisierbarkeit, ...
- Beispiel: IIR filter 2-ter Ordnung in sog. direkter Form 2, siehe Skizze rechts
- Zugehörige Übertragungsfunktion:

$$H_{IIR}^N(z) = \frac{\sum_{i=0}^N b_i z^{-i}}{1 - \sum_{i=1}^N a_i z^{-i}}$$



Simple Example: 1st Order IIR

Einfaches Beispiel: Es soll nun ein $1/t$ Tail durch zwei Exponenten angenähert werden. Die langsamere Komponente soll dann mit dem Filter entfernt werden. Die gesuchte Filter-Funktion 1-ter Ordnung lautet (nach vorheriger Formel):

$$H_{FILTER}^1(z) = \frac{-1 + z c_0 e^{\frac{1}{\tau_0}}}{z c_0 e^{\frac{1}{\tau_0}}} = \frac{-c_0^{-1} e^{\frac{-1}{\tau_0}}}{z} + \frac{z}{z}$$

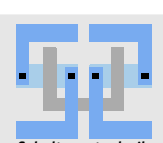
Vergleiche dazu die Übertragungsfunktion eines IIR Filters in direkter Form 2 erster Ordnung:

$$H_{IIR}^1(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 - (a_1 z^{-1})} = \frac{b_1}{z - a_1} + \frac{b_0 z}{z - a_1}$$

Die (gesuchten) Koeffizienten ergeben sich direkt aus Koeffizientenvergleich zu:

$$a_1 = 0, \quad b_0 = 1, \quad b_1 = -c_0^{-1} e^{\frac{-1}{\tau_0}}$$

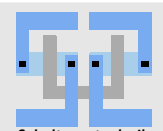
Zum Verständnis: Zum Canceln einer langsamen Exponentiellen Komponente eines bel. Tails muss der Tail nur durch geeignete Wahl von zwei Exponentialfunktionen (Wahl von T0 und T1) angenähert werden, der Filter löscht dann den T0-Anteil.



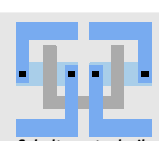
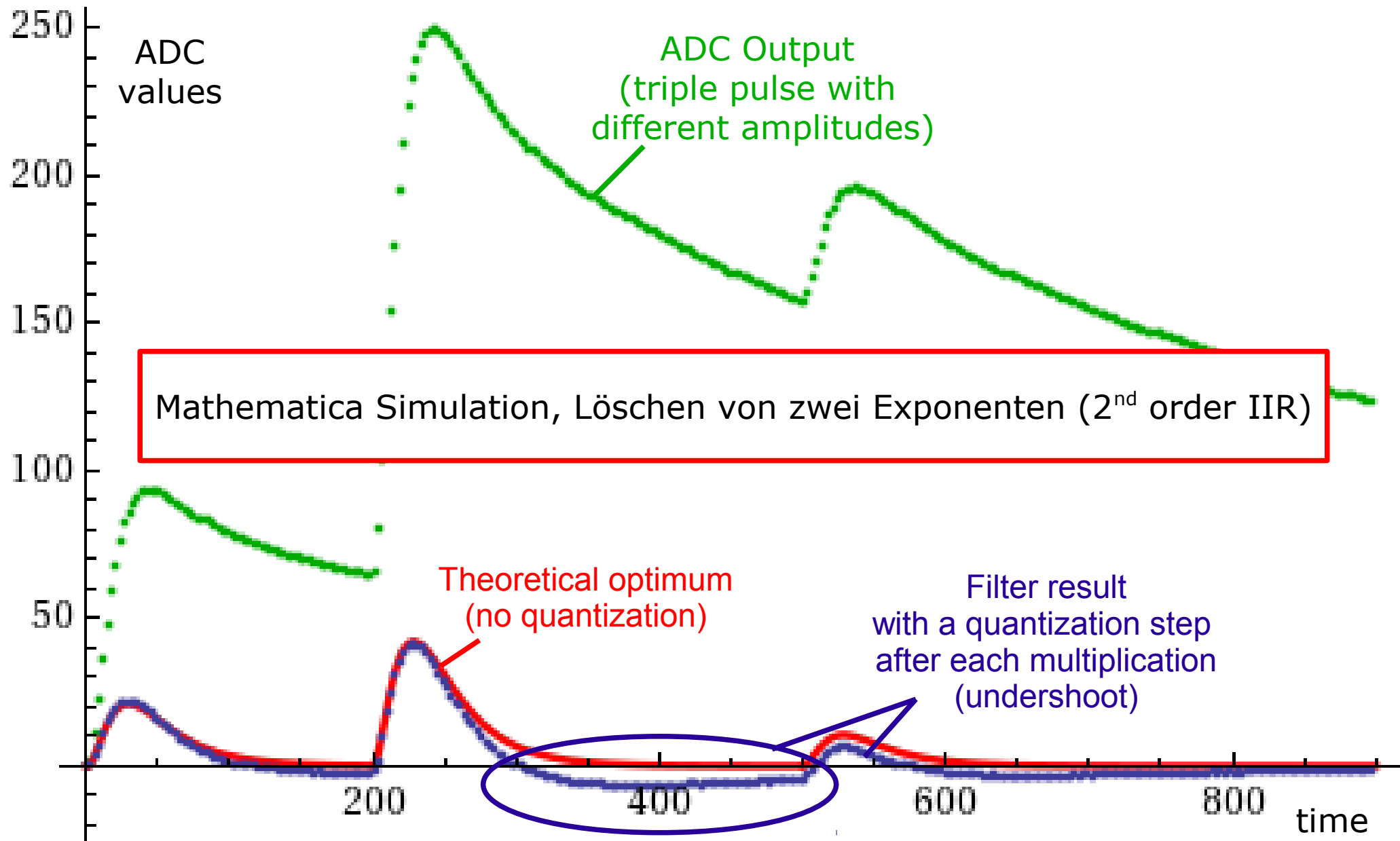
Simple Example: Plotted Result

TODO

- TODO -



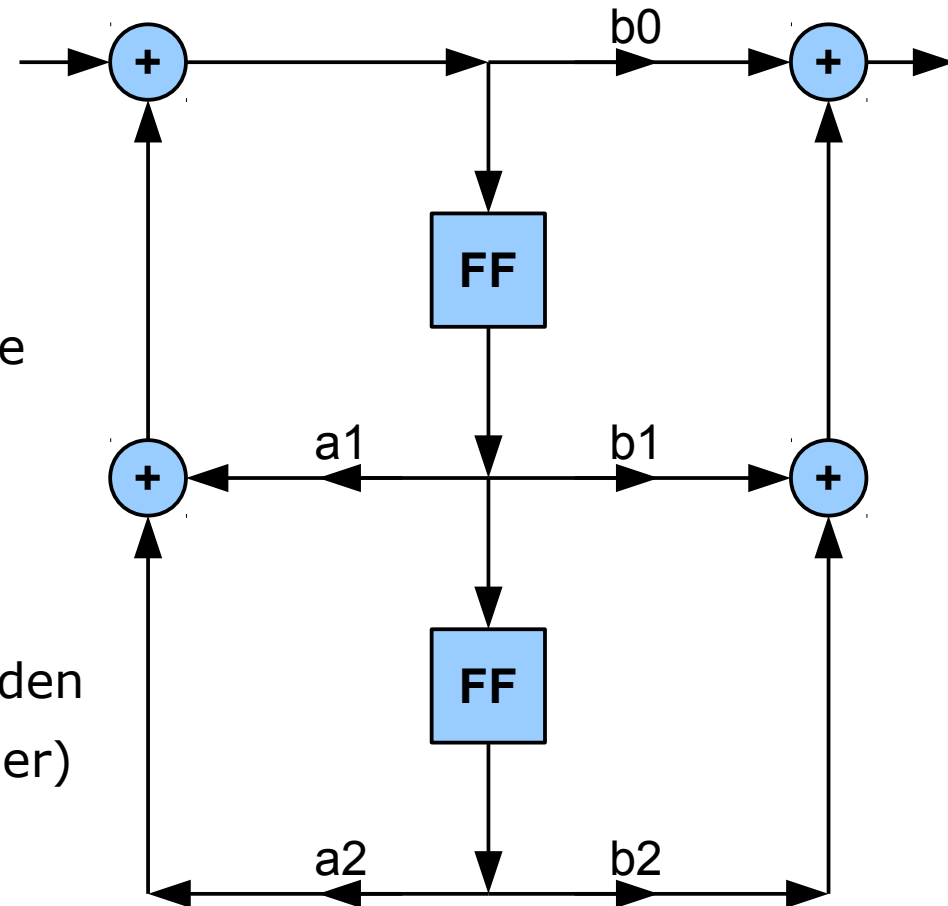
Mathematica Simulation: 2nd order IIR Filter



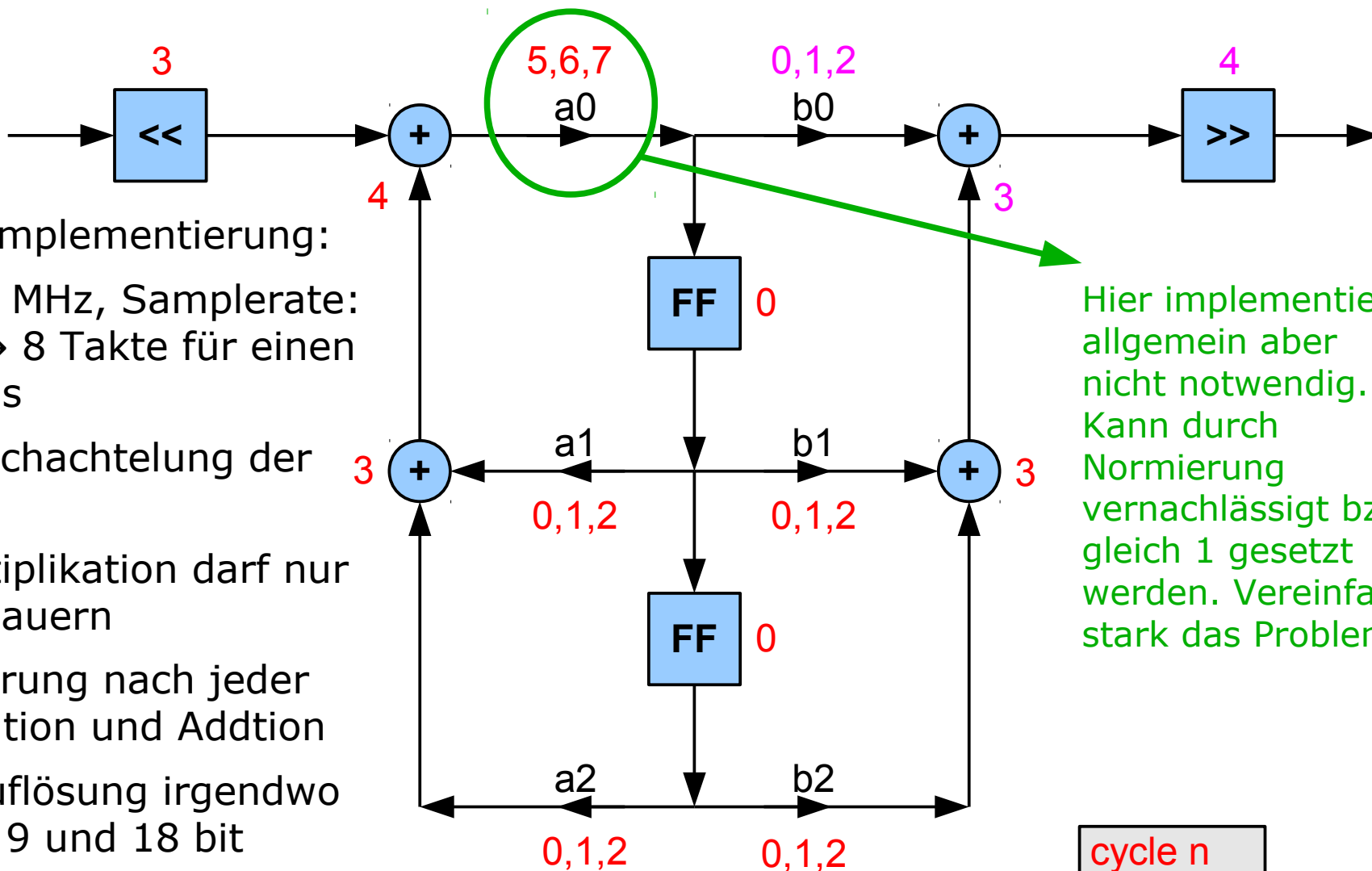
5. Implementation

Necessary Building Blocks + General Problems

- Man benötigt:
 - Addierer (relativ einfach)
 - Verzögerungen (sehr einfach, FF)
 - Multiplizierer (aufwändig)
- Viele Schwierigkeiten:
 - Addierer und Multiplizierer vergrößern Wortbreite → Mehrere Quantisierungsschritte nötig (wo?)
 - Komma-Arithmetic mit Vorzeichen in Binärdarstellung nicht intuitiv
 - Ungünstige Struktur: Wg. Feedback muss immer auf Zwischenergebnis gewartet werden
 - Überläufe in internen Speicherknoten (Power)
 - Oszillationen möglich (durch schlechte Quantisierung)
 - Wahl der Filterstruktur beeinflusst Vieles
 - Notwendige Genauigkeit 8bit, 10bit, ...?
 - ...



IIR Filter (Ion Tail Cancellation) Diagram



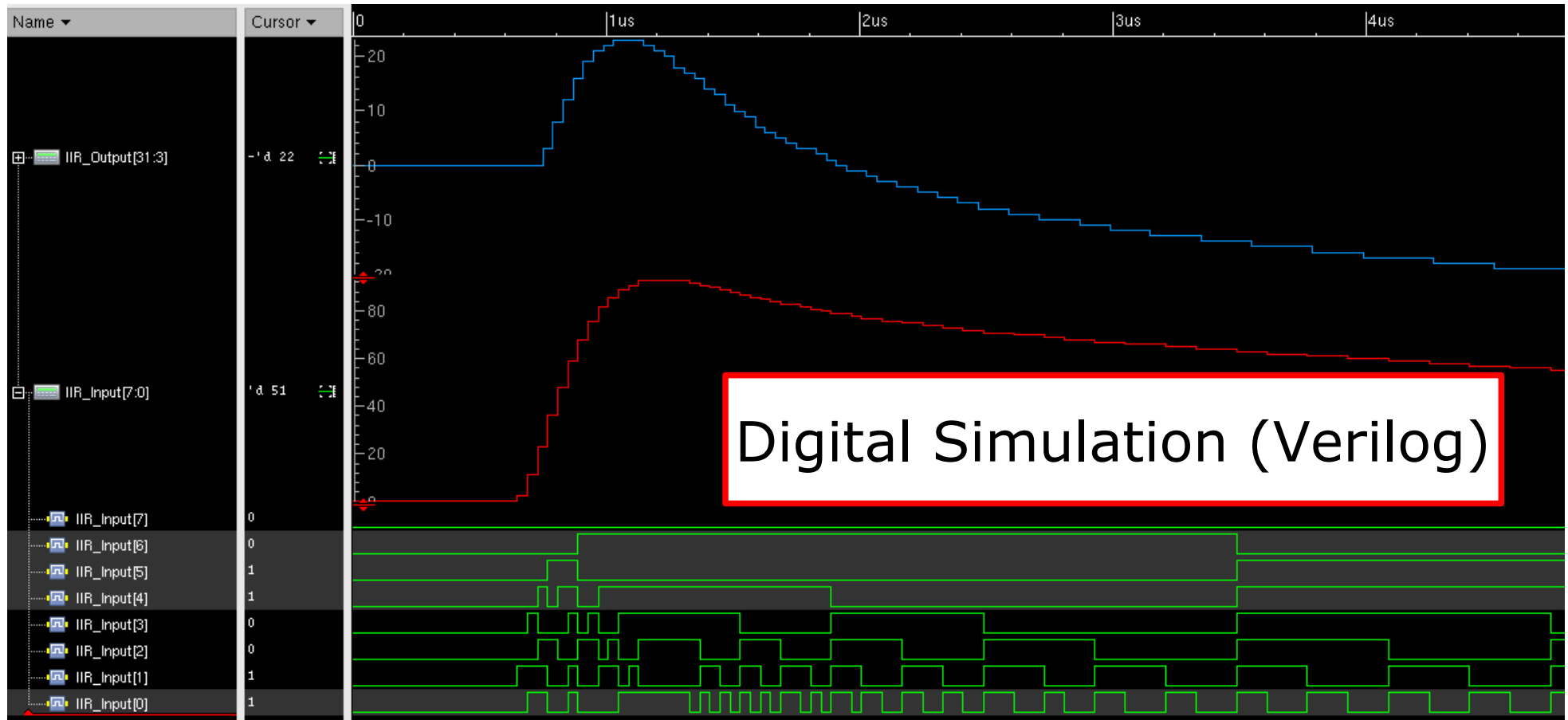
Bisherige Implementierung:

- CLK: 200 MHz, Samplerate: 25 MHz → 8 Takte für einen IIR-Zyklus
- Rot: Verschachtelung der Takte
- Jede Multiplikation darf nur 3 Takte dauern
- Quantisierung nach jeder Multiplikation und Addition
- Nötige Auflösung irgendwo zwischen 9 und 18 bit
- Größtes Problem: Schnelle Fixed-Width Multiplizierer.

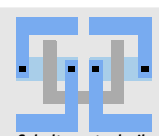
Hier implementiert, allgemein aber nicht notwendig. Kann durch Normierung vernachlässigt bzw. gleich 1 gesetzt werden. Vereinfacht stark das Problem.

cycle n
cycle n+1

Digital Simulation: IIR Filter (Ion Tail Cancellation)



- **RED**: IIR filter input pulse with very long ion tail
- **BLUE**: IIR output after ion tail cancellation (preliminary results)
 - strong overcompensation, but probably due to quantization (compare to Mathematica results)
 - adjustment of filter factors should lead to better results



Largest Construction Site: Multiplier

- Abschließend noch ein paar Überlegungen zu Fixed-Width Mul.
- → Vielleicht extra Talk?
 - TODO!!!
 - (PeFI): 40ns für eine Multiplikation + 2 Additionen → reine Gatter-Durchlaufzeit scheint klein genug (siehe auch Paper)
 - Kombination aus Wallace-Trees, ausreichender Radix, fixed-width Bedingung (halbiert # Gatter)
 - Verschachtelung Mul. + Add
 - Möglicherweise KEIN Pipelining..
 - Genauigkeit irgendwo zwischen 10 und 20 bit... (9 bit input width)
 -

TODO

