

FILTER Ein mal Eins

Inhaltsverzeichnis

- FILTER Ein mal Eins
 - Inhaltsverzeichnis
 - Historie
- Allgemeines
 - Typische Frequenzen
 - Noise / Vibrationen
 - Oszillation
 - Harmonics
- Gyro-Data-Filtering
- Grundlage Filter-Arten
 - Lowpass-Filter
 - Notch-Filter
 - Static-Filter
 - Dynamic-Filter
- Betaflight-Filter
 - RPM-Filter
 - BF - Dynamic-Lowpassfilter
 - BF - Static Notchfilter
 - BF - Dynamic-Notchfilter
 - BF - Static-Lowpassfilter
 - PT1
 - BIQUAD
 - BF - Gyro-RPM-Filter
 - BF - Gyro-LowPass Filter
 - BF - DTerm LowPass Filter
- Appendix
 - Bilder in größerem Format

{{TOC}}

Historie

Version	Datum	Inhalt
0.1	August 2020	initial

Allgemeines

Typische Frequenzen

Vibrationen die am Copter auftreten lassen sich in verschiedene Frequenzbereiche unterteilen

- 0 ~ 20Hz: normaler Frequenzbereich während des Fliegens (keine Filterung der Signale)
- 20 ~ 80Hz: Vibrationen niedriger Frequenz (häufig Propwash)
- 80 ~ 1000Hz: hochfrequente Vibrationen (Noise) verursacht durch
 - Motorvibrationen & Prop-Resonanzen. Hier sieht man auch das typische Bild des Motor-Vibrations-Bandes Harmonics
 - Frame-Resonanzen
 - ...

Noise / Vibrationen

Ist eine Bezeichnung für Rauschen bzw. Gyro-Signale die nicht zu den gewünschten/benötigten Signalen sind, die durch den FC verarbeitet werden müssen. Dies entspricht demnach Messwerten, die irregulär sind und die Performance des Copters negativ beeinflussen.

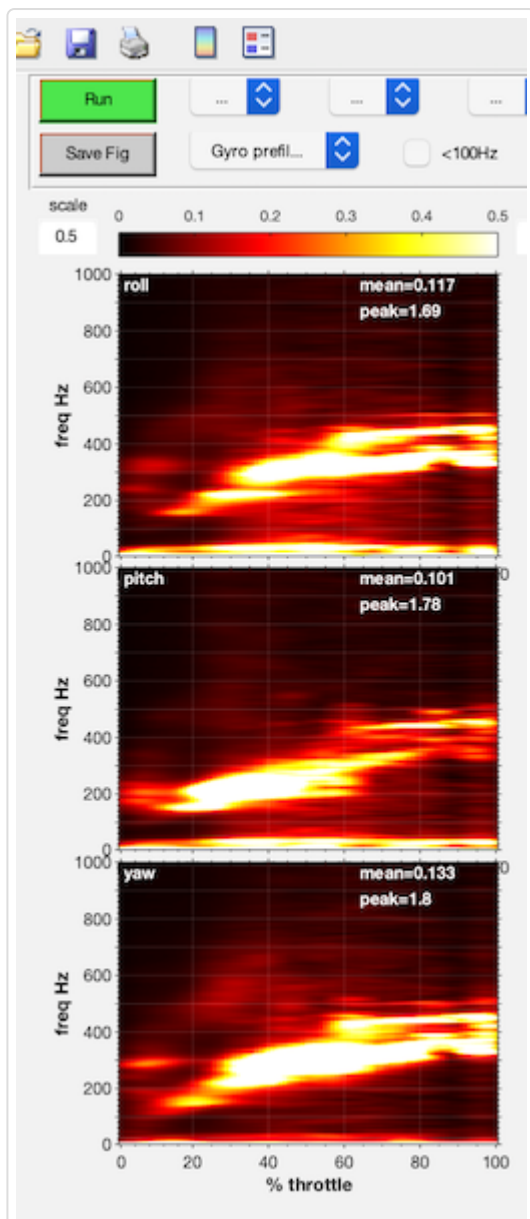
Noise (Rauschen) kann ausgelöst werden durch:

- äußere Einflüsse (z.B. Wind, Kontakte mit Ästen, ...)
- Vibrationen am Chassis (z.B. lose schrauben, dünne schwingende Arme, ...)
- Vibrationen durch Motoren (z.B. Lagerschäden, Unwucht, ...)
- Vibrationen durch Props (z.B. Unwucht, Prop-Wash, ...)
- Kombinationen aus allem •.

Noise wird durch den Gyro und anschließend durch den PID- Controller verarbeitet und kann zu fehlerhaften Verhalten führen.

Eingesetzte Filter LPF ⁵, NOTCH ⁴, RPM ¹, DTerm ⁶ versuchen dieses Rauschen zu eliminieren.

Eine Deiner Hauptaufgabe beim Tunen Deines Copters ist, dass du diese Vibrationen in den Griff bekommst ohne deutliche Delay zu bekommen.



Hinweis

Der DTerm-Anteil des PID-Controllers verstärkt Vibrationen deutlich. Daher ist eine Abstimmung der Filter mit dem DTerm ⁶ gut abzustimmen.

Um Vibrationen zu analysieren musst du eine Blackbox-Analyse durchführen oder Tools wie `Blackbox-Explorer`, `PIDToolbox` oder `Plasmatree` verwenden.

Um einen ersten Eindruck von Vibrationen zu erhalten empfehle ich eine Spektral-Analyse (<https://github.com/mrRobot62/PIDtoolbox/wiki/SpectralAnalyzer>) . Hier sieht man sehr deutlich in welchem Frequenzband Vibrationen an Deinem Copter auftreten.

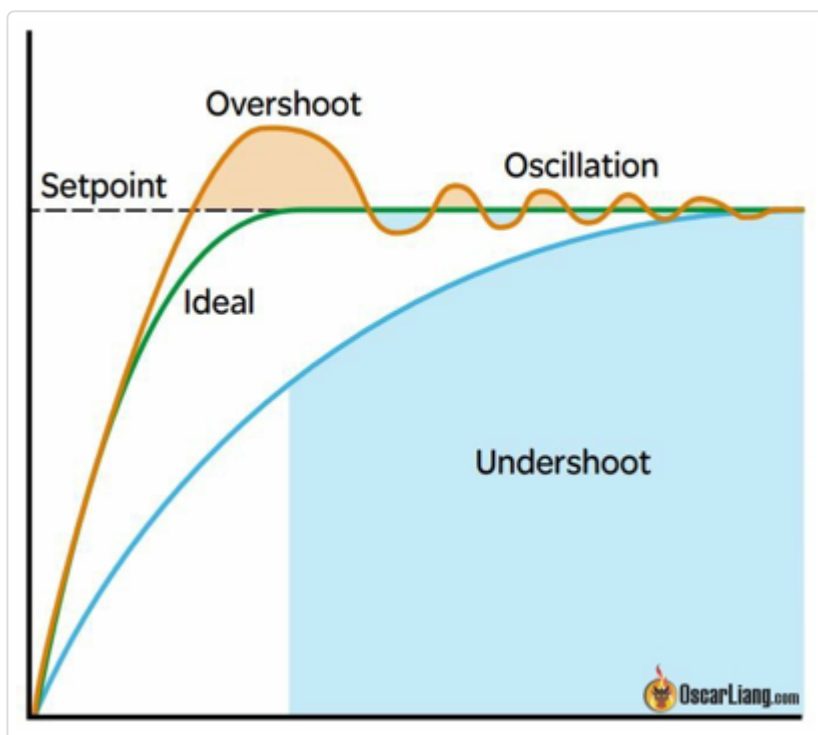
Filter helfen, diese Vibrationen möglichst aus den Signalen für den Flight-Controller herauszufiltern um anschließend den Motoren möglichst saubere Signale zu übermitteln.

Tip

Bevor du damit startetest die PID-Werte anzupassen, stelle Deine Filter optimal auf Deinen Copter ein. Erst dann fängst du mit den PID-Werten an. Versuche durch Deine Filter ein maximales Gyro & DTerm Delay von <5ms zu erreichen. Du kannst das sehr einfach mit `PIDToolbox` erkennen.

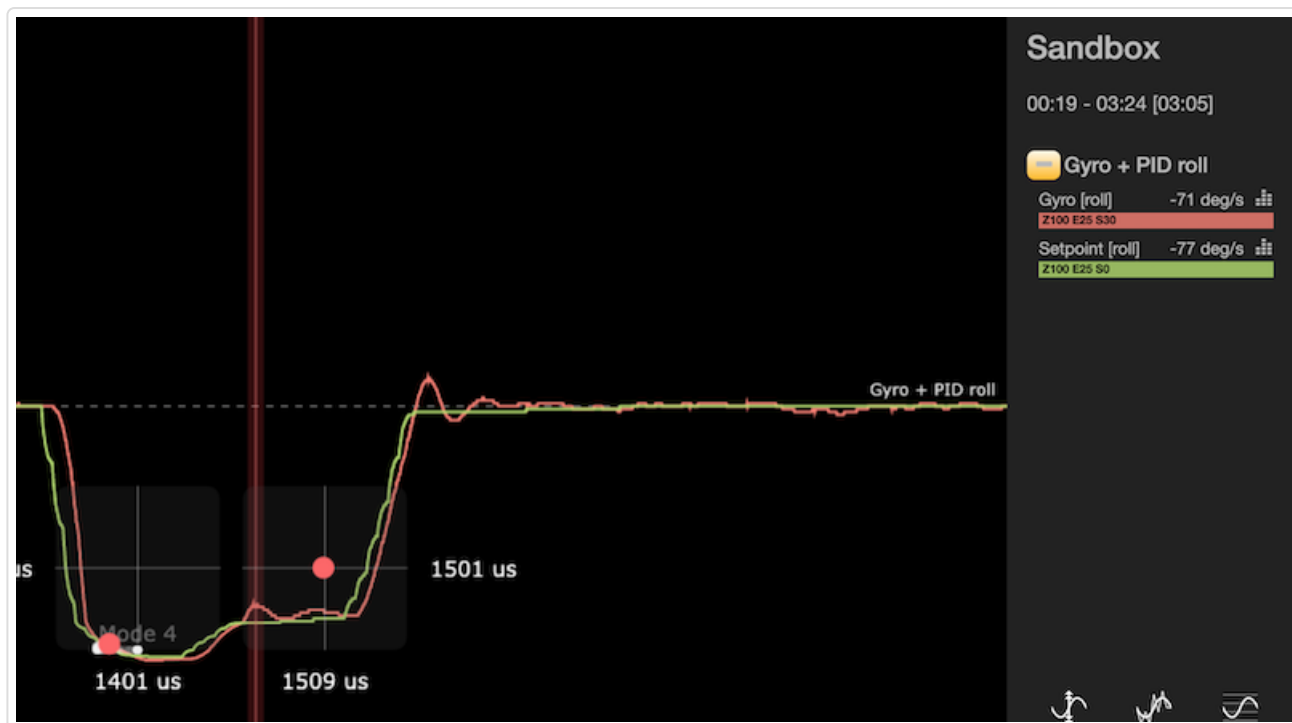
Oszillation

Eine Oszillation ist eine Schwingung. In Bezug auf den PID-Controller ist es ein Über- und Unterschwingen zur Ideallinie.

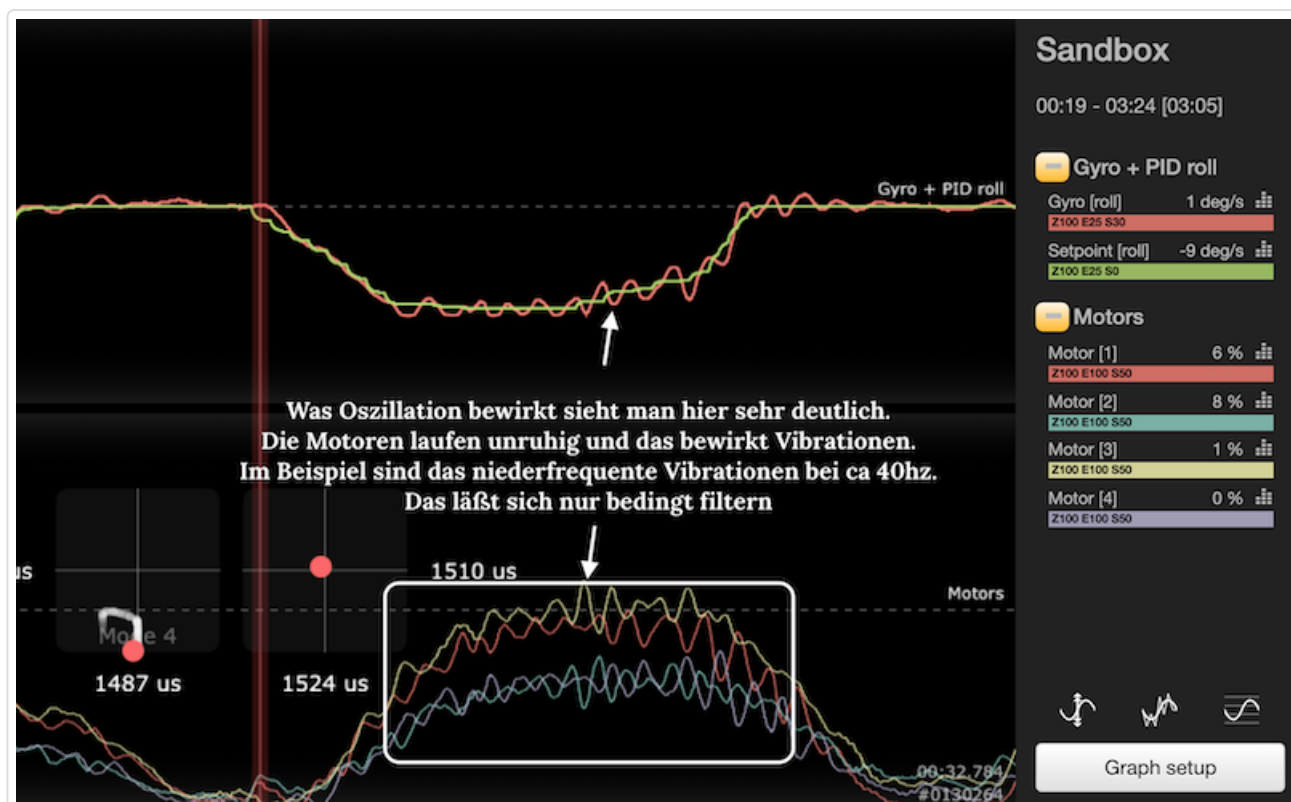


- **SetPoint** = SOLL-Wert = gestrichelte Linie (das ist das RC-Kommando z.B. 700deg/sec)
- **Orangene-Linie** ein Versuch sich möglichst schnell an den Soll-Wert heranzutasten. Man überschießt den Soll-Wert korrigiert und fällt unter den Soll-Wert, korrigiert dann wieder überschießt man usw. bis man irgendwann den Sollwert Erreicht.
- **Ideal** ist es, wenn man die **grüne Linie**) möglichst schnell ohne bzw. geringer Oszillation den Sollwert erreicht
- **Blauer Bereich** Schafft es der PID-Controller überhaupt nicht den Soll-Wert zu erreichen dann bewegt man sich in diesem Bereich. Schnelles Oszillieren wird als Vibration empfunden.

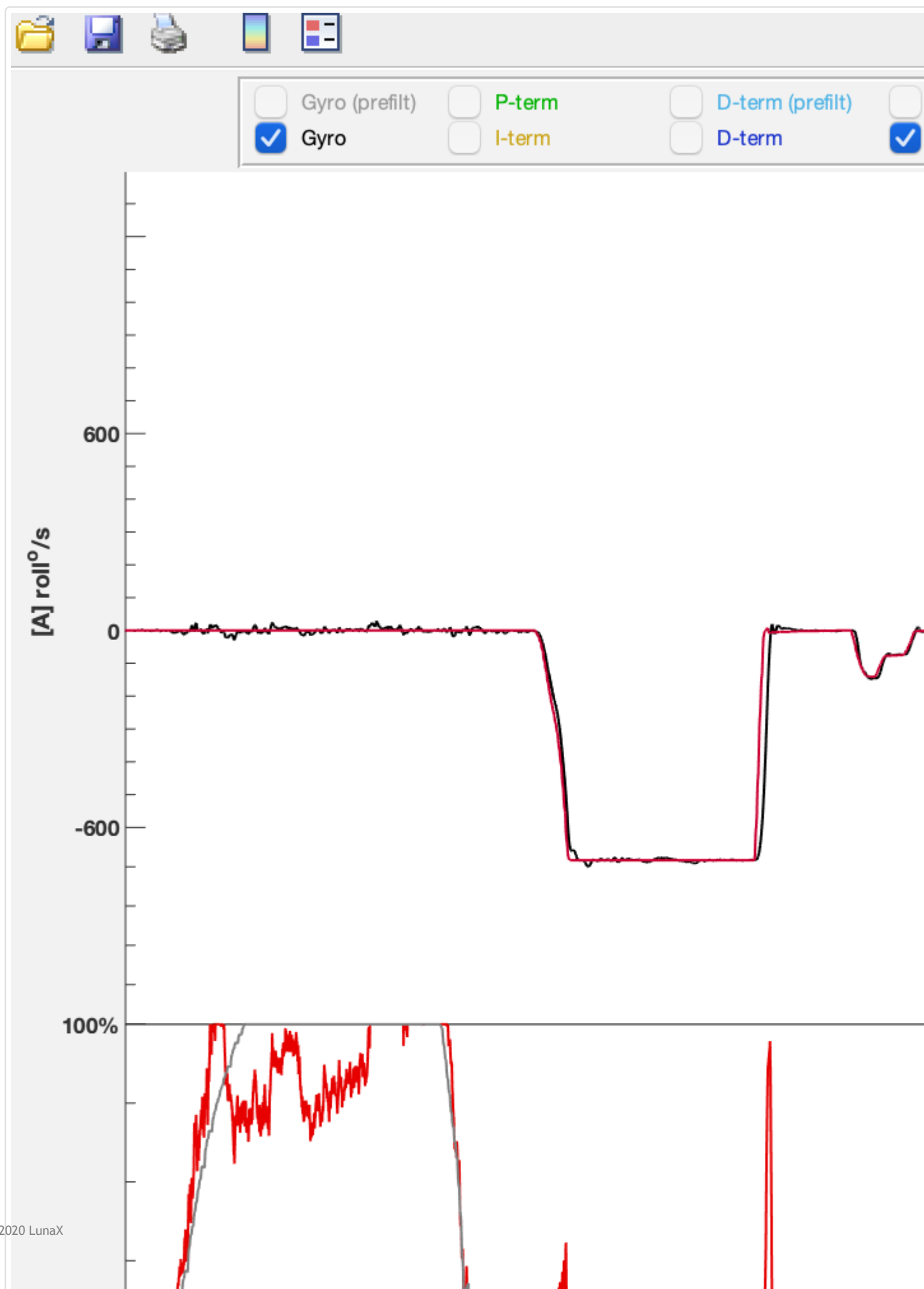
Nachfolgend ein Bild aus dem Blackbox-Explorer bei dem man sehr deutlich diese Oszillation sehen kann

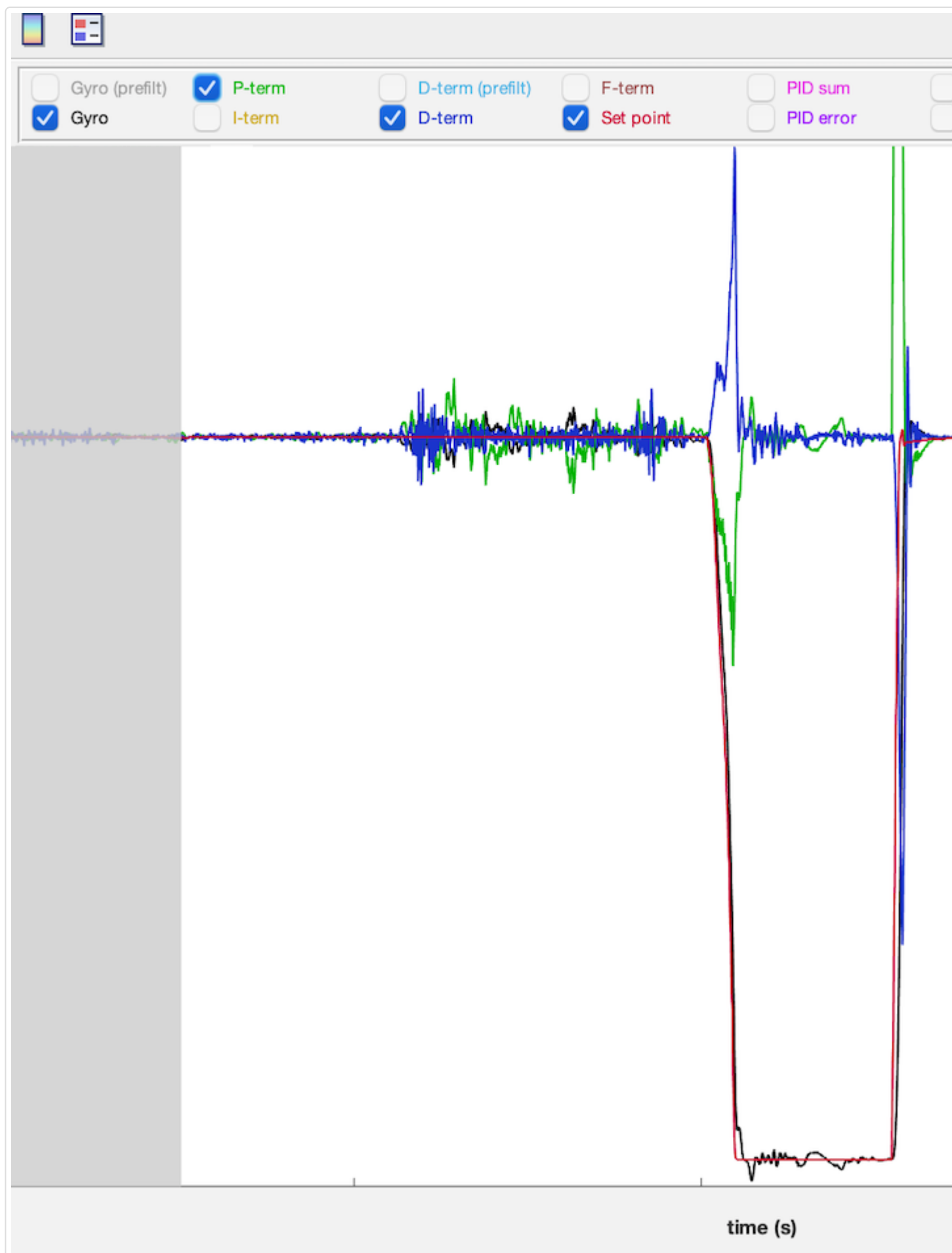


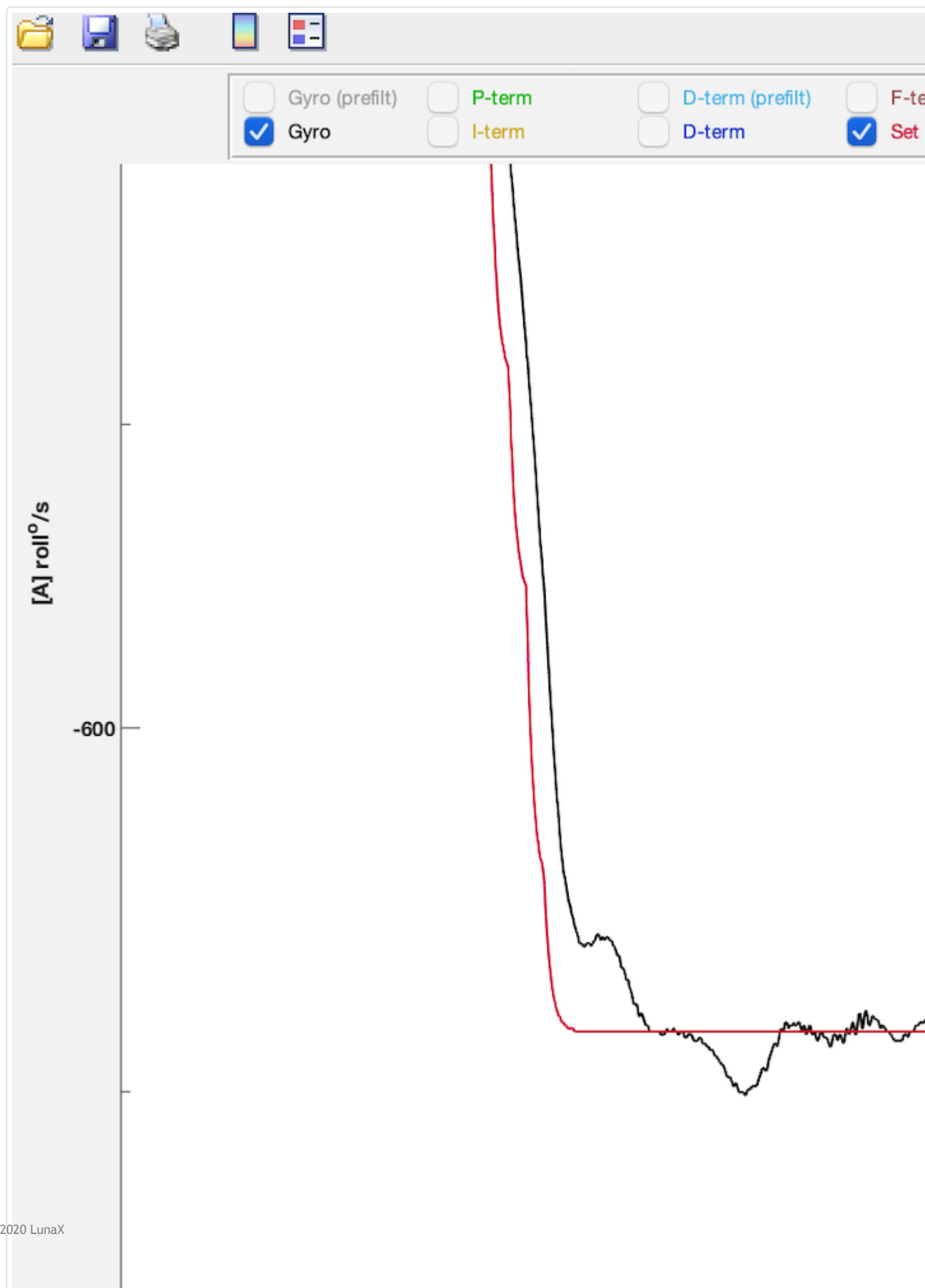
Im nachfolgenden Bild sieht man im oberen Graphen die Oszillation auf der Roll-Achse und welche Auswirkungen diese auf die Motoren haben. Dies lässt sich nur bedingt durch Filter bereinigen, sondern über die PID-Einstellungen.

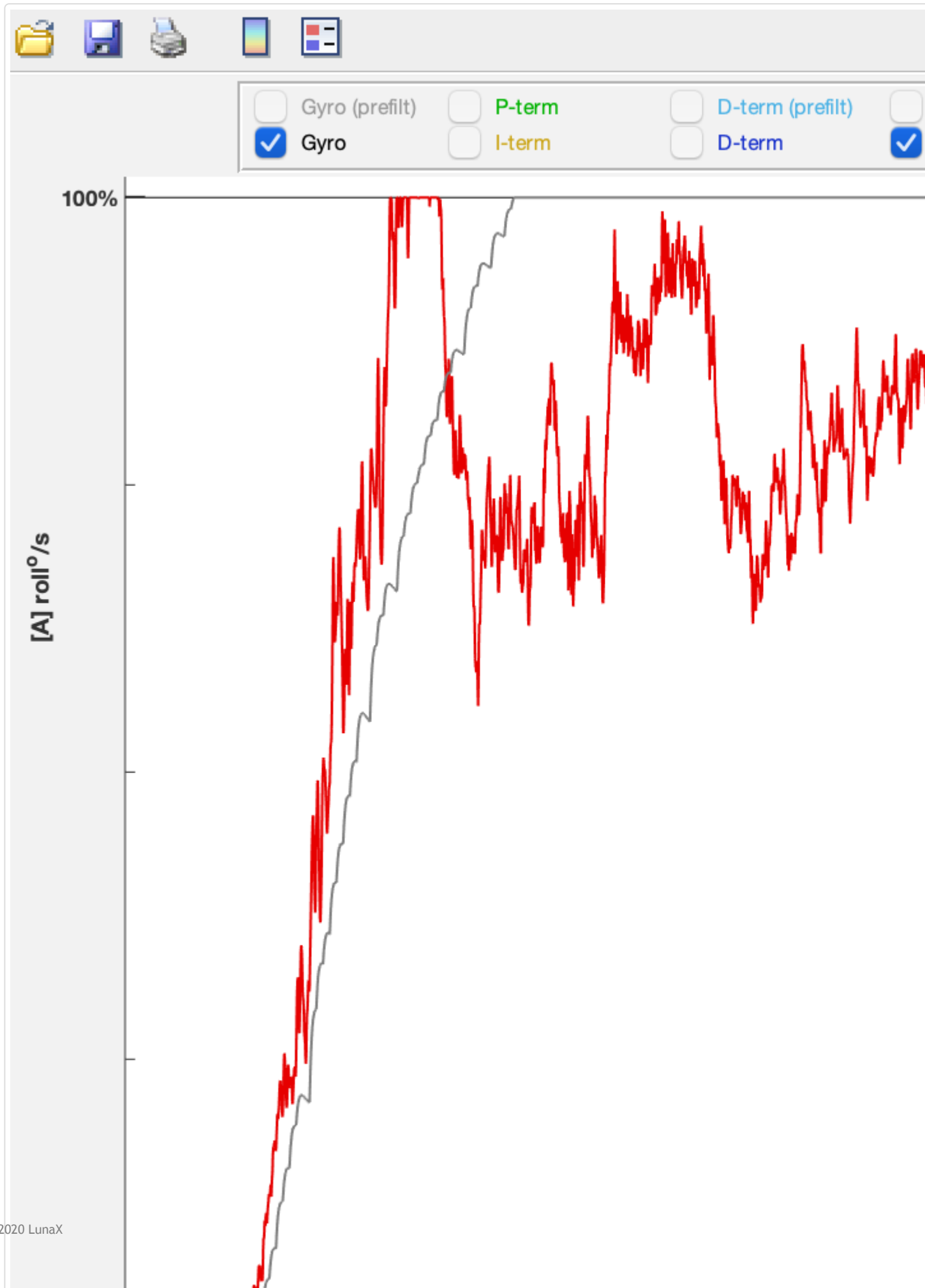


Nachfolgende Bildfolge zeigt die obigen beschriebenen Vibrationen der Motoren bei einem Punch. Analyse über PIDToolbox[[^]PDT]







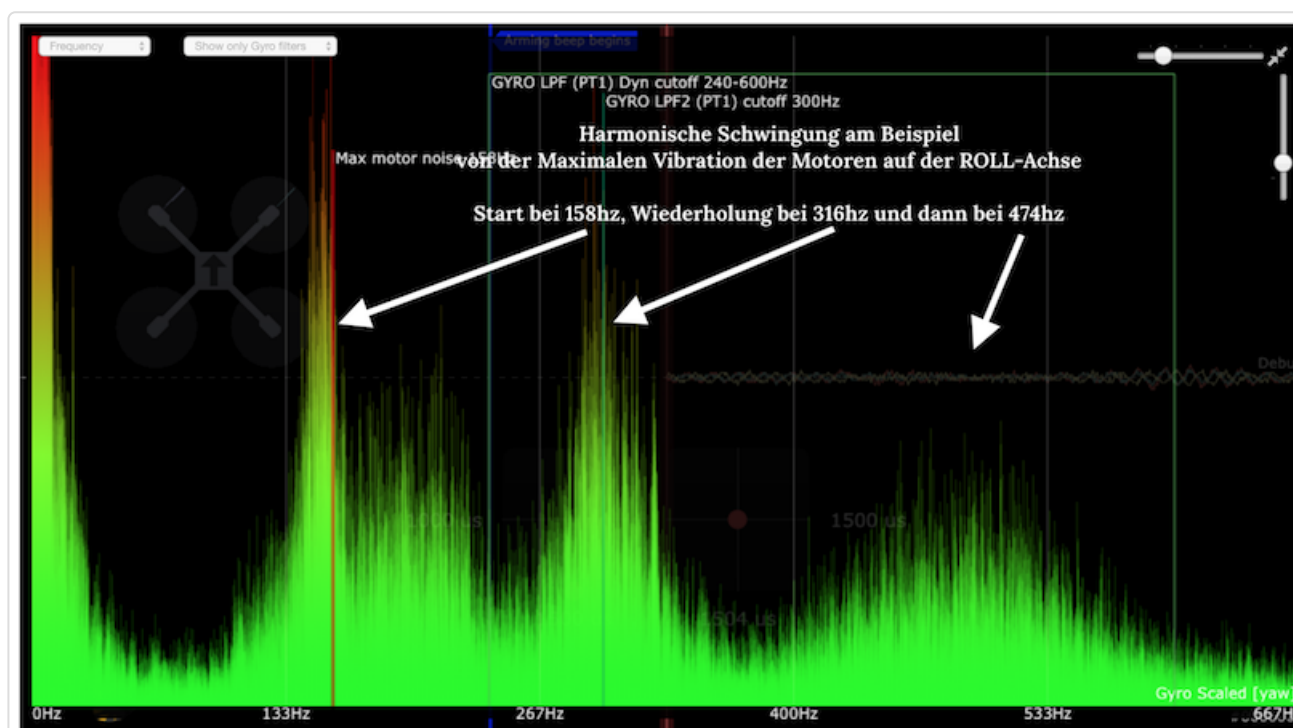


Harmonics

Harmonics oder Harmonische sind wiederkehrende Amplituden (Vibrationen) in den gleichen Frequenzabständen.

Das nachfolgende Bild zeigt deutlich drei sich im gleichen Abstand wiederholende Frequenz-Peaks von Vibrationen (Motor Vibrationen)

Beginnend mit dem Motor-Noise-Peak bei 158hz, dann die erste Harmonische Amplitude bei 316hz ($2 \times 158\text{hz}$) und die dritte Amplitude bei 474hz (3×158).



Gyro-Data-Filtering

Signal & Prozessfluß zur Filterung

```
graph LR
    classDef dbg fill:#ddd
    classDef LP fill:#f96
    LS((Loop-Start<br>d/t)) --> LP
    LP --> GY[Gyro]
    GY --> DBG1[DebugMode<br>Gyro_Raw<br>Notch<br>FFT]
    DBG1 --> DNF[Dynamic Notch Filter]
    DNF --> DBGFFT[DebugMode<br>FFT]
    DBGFFT --> SNF[Static Notch Filter]
    SNF --> GLPF[GLPF]
    GLPF --> DBGGY[DebugMode<br>Gyro]
    DBGGY --> GLPF
    GLPF --> PID[PID Loop]
    PID --> DBGDF[DebugMode<br>DFilter]
    DBGDF --> DTLPF[DTLPF]
    DTLPF --> DTNF[DTerm<br>Notch Filter]
```

```
graph LR
    classDef dbg fill:#ddd
    classDef LP fill:#f96
    DTNF(DTerm<br>Notch Filter) --> M(Motoren)
    M --> LE((Loop-End)):::LP
```

Grundlage Filter-Arten

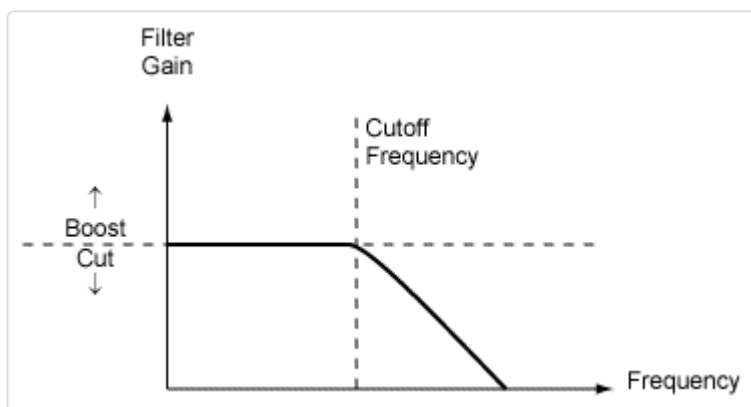
Lowpass-Filter

Niedrige Frequenzen werden durch den Filter durchgelassen, hohe Frequenzen werden gedämpft.

Hohe Frequenzen sind in der Regel im System nur Rauschen bzw. Vibrationen und werden für die Flugdaten nicht benötigt, daher versucht man sie herauszufiltern.

Mit dem LPF⁵ wird eine Grenzfrequenz (`cutoff`) angelegt und der FC reduziert die Signale die oberhalb dieser Grenzfrequenz liegen.

Die Dämpfungskurve ist eine Steigung. d.h. je höher die Signalfrequenz desto stärker die Dämpfung



Für den Einsatzbereich des Quadcopters ist der Frequenzbereich von 0-80Hz relevant, alles darüber sollte möglichst effizient weg gefiltert werden.

Beachten

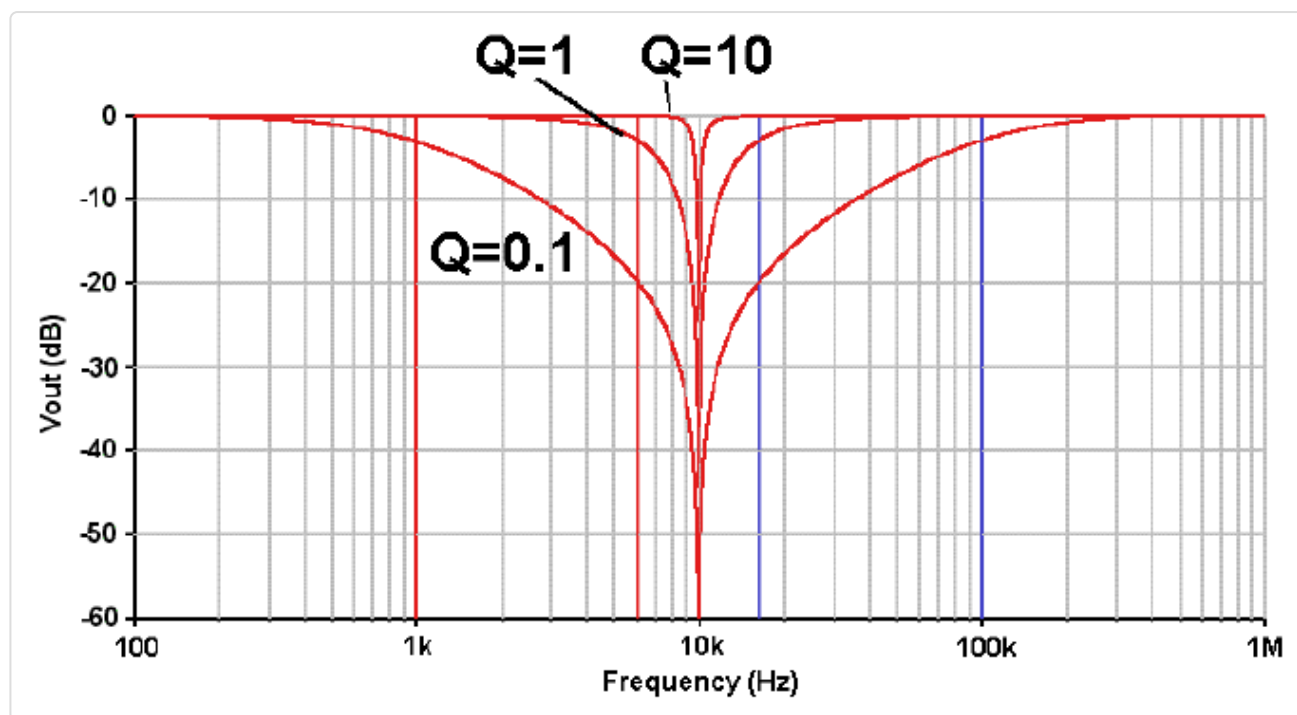
Ein fundamentaler Aspekt ist, je niedriger der die Grenzfrequenz (`cutoff frequency`) für den Lowpass Filter ist - umso mehr muss gefiltert werden. Das wirkt sich auf dem Gesamtperformance aus. Daher gibt es mehrere andere Filter, die andere Algorithmen verwenden und das System effizienter gestalten.

Notch-Filter

Notch-Filter⁴ eignen sich hervorragend zur Unterdrückung von Rauschen in einem sehr spezifischen Frequenzband.

Notch-Filter sind in der Regel effektiver zur Reduzierung von Motorrauschen als LPF- Filter aber ggf. müssen manuelle Abstimmungen durchgeführt werden um die Bandbreite und die Mittenfrequenz zu bestimmen (Notch=Kerbe)

Weiterhin können Notch-Filter zur Reduzierung von Propwash genutzt werden.



Der **Q-Faktor** (Quality-Factor) gibt die Güte des Notch-Filters an und beschreibt die Weite des Filters. Je größer der Q-Faktor, desto schmaler der Notch-Filter.

Beispiel

Du stellst fest, dass eine Vibrationsspitze bei ca 260Hz auftritt (z.B. hervorgerufen durch Propwash), dann kann der Notch-Filter **cutoff** bei ca. 200Hz beginnen und bei 300Hz enden. Der Peak soll in der Mitte des Notch-Filters liegen, somit werden auch Frequenzen etwas unter und über dieses Peaks gefiltert.

Static-Filter

Im Rahmen von Betaflight werden statische Filter als LowPass-Filter oder als Notch-Filter genutzt

Dynamic-Filter

Dynamic Filter reduzieren ebenfalls Rauschen, vorausgesetzt die entsprechenden Parameter richtig eingestellt sind. Schwingungen, Motorgeräusche, etc. können durch die Dynamic-Filter reduziert werden.

Ein Dynamic-Filter ist ein Algorithmus, der die Frequenz des Rauschens erkennen kann und er kann den Notch-Filter verwenden, um ihn automatisch zu reduzieren.

Nachteil

von Dynamic-Filters ist die Erhöhung der CPU-Last und die Delays.

Betaflight-Filter

RPM-Filter

RPM-Filter ¹ sind eine besondere Filtertechnik in Betaflight und wurden mit BF 4.0 () eingeführt. Die RPM-Filter können über eine Vielzahl an Parameter ² konfiguriert werden. Eine detaillierte Beschreibung findet man im BF-Wiki BF-RPMFilter (<https://github.com/betaflight/betaflight/wiki/Bidirectional-DSHOT-and-RPM-Filter>) .

RPM-Filter basieren auf mehreren Notch-Filter die präzise darauf ausgerichtet sind Motorvibrationen und ihre `Harmonics` zu filtern und möglichst komplett zu eliminieren. Für jeden Motor können bis zu drei Notch-Filter (max 3 Harmonics) generiert werden (Pro Achse). Das heißt insgesamt steht eine Bank von 36 Notch-Filtern zur Verfügung. $3 \text{ Achsen} * 3 \text{ Harmonics} * 4 \text{ Motoren} = 36 \text{ Notch-Filter}$.

Die RPM-Filter basieren auf die Drehzahl der Motoren und dem bidirektionalen DShot-Protokoll in Zusammenspiel mit den Gyrodaten - daher auch `Gyro-RPM-Filter`

Wichtig

RPM-Filter benötigen für BLHeli32 ESC die aktuellste Firmware `>= 32.7` . Für BLHeli_S ESCs empfehle ich die FW von (auch wenn sie Geld kosten) JFlight ³

Tip

Durch die Einführung der RPM-Filter ist es möglich andere Filter (z.B. LPF) zu reduzieren bzw. komplett auszuschalten, dies geht zu Gunsten der Gesamtperformance des Copters und die Delays können dadurch weiter reduziert werden.

BF - Dynamic-Lowpassfilter

Neu ab [BF 4.0 - DLPF] (<https://github.com/betaflight/betaflight/wiki/4.0-Tuning-Notes#Dynamic-lowpass-filtering>). BF bietet nun die Möglichkeit, die Grenzfrequenz des LPF ⁵ bei Vollgas im Vergleich zu 0-Throttle sanft auf einen höheren Wert zu verschieben. Die dem ersten Gyro und dem D-Lowpass-Filter zugewiesene Grenzfrequenz steigt nun dynamisch mit zunehmender Drosselung entlang einer Kurve an, die effektiv die Motordrehzahl beeinflusst. Dadurch wird die Verzögerung bei Vollgas verringert, und der Dynamische-Notch Filter ⁴ kann die Motor-Vibrations-Peaks besser verfolgen.

BF - Static Notchfilter

Statische Notchfilter werden explizit mit der Center-Frequenz auf die Herzzahl der höchsten Vibrationen (Peak) gesetzt. In BF kann man zwei dieser Notch-Filter aktivieren. Angegeben werden jeweils die cutoff-Frequenz und die Center-Frequenz.

BF - Dynamic-Notchfilter

Ab `BF 3.1` kann man auch `Dynamic Notch Filter` ⁴ einsetzen. Dieser hocheffiziente Dynamische Notch-Filter setzt sich automatisch auf den Motor-Peak - also den aktuelle höchste Frequenz der Motor-Vibrationen, basieren auf die jeweils aktuelle FFT-Analyse. Hierdurch wirkt dieser Notch-Filter in allen Throttle-Stellungen und wandert demnach durch das Frequenzband.

Dynamische Notch-Filter haben eine geringere Latenzzeit als LP-Filter. Notch-Filter sind sehr effektiv und bei einer guten Abstimmung kann man sogar auf LPF-Filter verzichten. Dadurch steigert sich die Gesamtperformance des Copters.

LP-Filter aber einfach abschalten sollte wirklich mit bedacht gemacht werden.

Der Dyn-Notch-Filter ist per default eingeschaltet.

Es gibt zwei Notch-Filter für den GYRO. Einer oder beide können bei Bedarf abgestellt werden.

Default-Values sind auf 200Hz-400Hz. Diese Grenzfrequenzen arbeiten sehr gut und funktionieren bei den meisten Coptern.

Für eine Feinabstimmung ist es notwendig eine Blackbox- Auswertung durchzuführen (Blackbox-Explorer, PIDToolbox, Plasmacree)

BF - Static-Lowpassfilter

In Betaflight wird zwischen zwei Static-LPF Filtern unterschieden

- PT1
- BIQUAD

Um einen LPF-Filter zu nutzen muss grundsätzlich die untere Grenzfrequenz (`cutoff`) angegeben werden. Der Filter beginnt dann ab dieser Frequenz zu arbeiten. Die Cutoff-Frequenz sollte **nicht** unter 80Hz liegen, da hier die normalen Flugfrequenzen liegen.

PT1

Dieser Filter hat eine etwas sanftere Kurve und ist ein LPF-Filter 1. Ordnung und hat dadurch eine geringere Latenzzeit. Der Nachteil dieses Filters, er filtert nicht so stark Vibrationen aus dem Signal (bedingt durch seine Kurvenausprägung)

Tip

verwende für den ersten LPF-Filter die Einstellung **PT1** , denn er ist der schnellere Filter.

BIQUAD

Dieser Filter hat eine deutliche steilere Kurve und filtert besser als ein PT1. Er ist ein Filter 2. Ordnung. Dadurch ist die Latenzzeit schlechter, das Filterergebniss besser.

BF - Gyro-RPM-Filter

Ein mächtiges neues Feature, das mit BF 4.0 eingeführt wurde und in den nachfolgenden Releases weiter verbessert wurde. Die RPM Filter wurden weiter oben schon beschrieben, nachfolgend eine Reihe von Detailinformationen.

Siehe auch die dazugehörigen Parameter (siehe `bf_tuning_parameters` Kapitel `gyro-filter-gyro-rpm-notch-filter`)

BF - Gyro-LowPass Filter

BF - DTerm LowPass Filter

Der DTerm verstärkt alles - auch Vibrationssignale - somit können ungefilterte DTerm Werte die direkt zu den Motoren gesendet werden dazu führen, dass die Motoren heiß werden oder sogar überhitzen und zerstört werden.

Hier kommen jetzt die DTerm-Lowpass Filter -> Einstellung wie bei den Static-Lowpassfilter

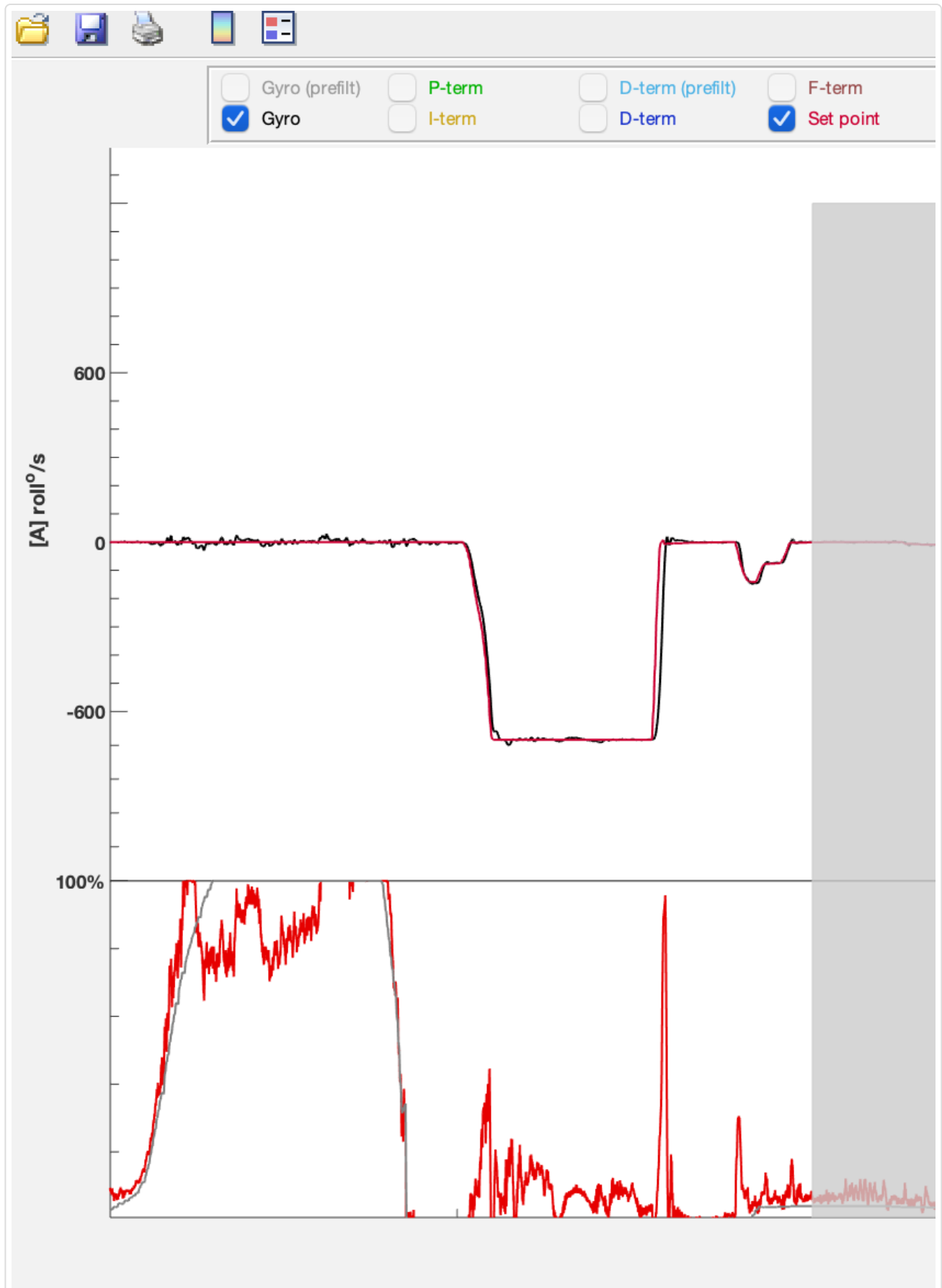
Allgemeinen ist ein Biquad-Filter das sinnvolle Minimum an Filterung mit einer Frequenz um 100 Hz bis hinunter zu 80 Hz, wenn man heiße Motoren hat.

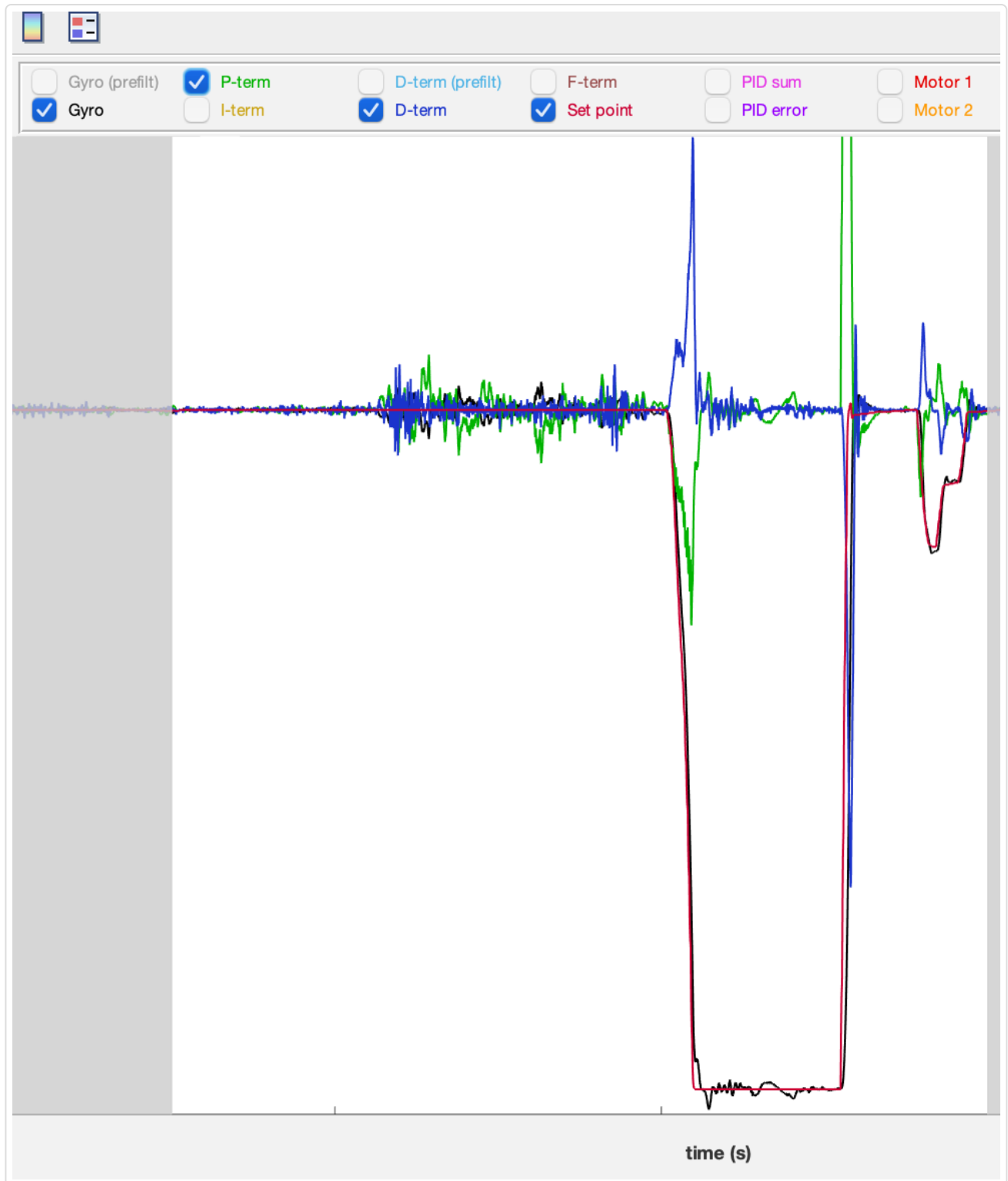
Beachten

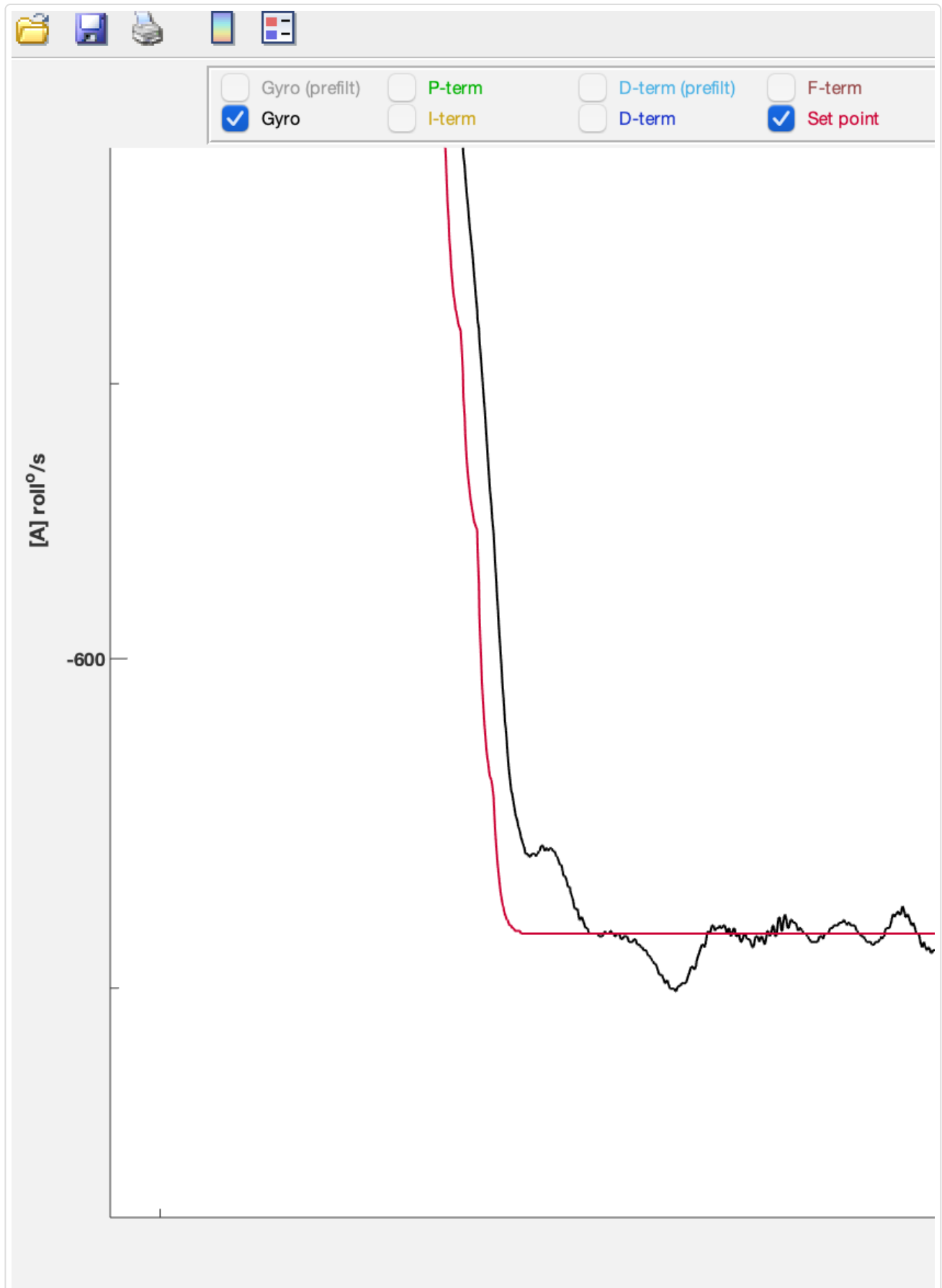
Den DTERM-LPF solltet ihr grundsätzlich **nicht** in Eurem Setup entfernen!

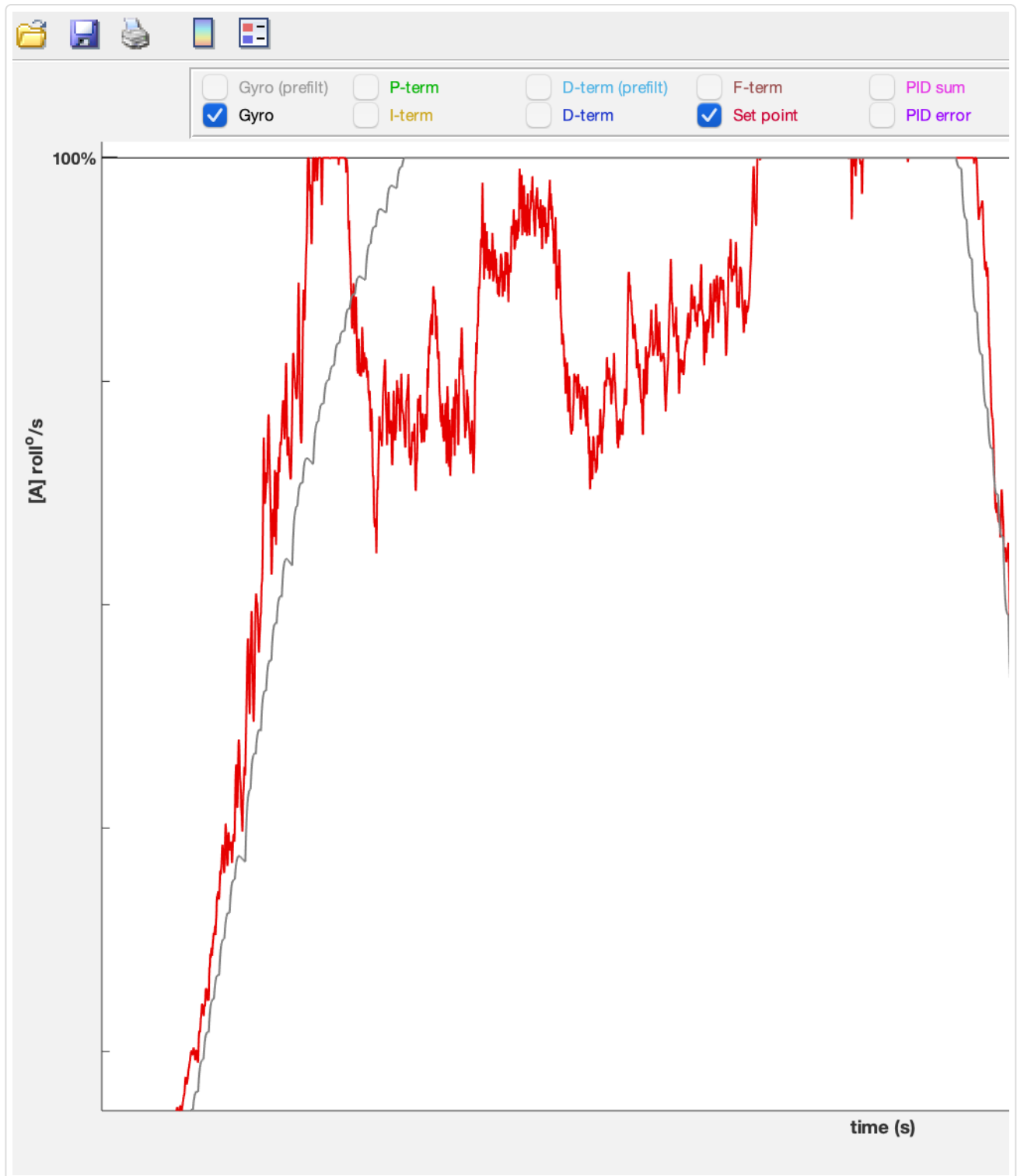
Appendix

Bilder in größerem Format









1. BF-Wiki RPM-Filter (<https://github.com/betaflight/betaflight/wiki/Bidirectional-DSHOT-and-RPM-Filter>) ↔ ↔

2. siehe bf_tuning_parameters ↩
3. [JFlight ESC FW]: (<https://jflight.net/index.php>) ↩
4. Notch-Filter = Kerb-Filter ↩ ↩ ↩ ↩
5. Lowpass-Filter (Tiefpassfilter) ↩ ↩ ↩
6. Filter auf den DTerm-Wert ↩ ↩

Hsgyq i r x s s r f y n { n Q o H s g w , l x t s s { { 2 q o h s g w 2 s k 3 y w n k [m h q n p , l x t w 3 k n y f 2 g s q 3 k v w e f w 3 q o h s g w l
 { m h q n p x i q i f } K v w e f w 2