

## Entwicklung einer hardwarebeschleunigten LDA-Messdatenauswertung

### Development of a hardware accelerated LDA measurement data evaluation

**P. Wilhelm, M. Eggert**

Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Deutschland

LDA, Burst-Präprozessor, hardwarebeschleunigt, Messdatenauswertung

LDA, burst preprocessor, hardware accelerated, measurement data evaluation

### Zusammenfassung

Ein LDA-Burst-Präprozessor (*LDA-BPP*) wurde entwickelt, welcher als eigenständiges Gerät neben der reinen Digitalisierung von LDA-Burstsignalen auch eine Vorselektion anhand einer wahlweisen Analyse im Zeitbereich oder im Frequenzbereich vornimmt. Der Beitrag umfasst neben einer Beschreibung der Hardware und der Algorithmen auch einen Vergleich der unterschiedlichen Methoden hinsichtlich der Steigerung der Signalrate und der Signalintegrität. Die Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems wurde im Rahmen von Windkanalmessungen getestet.

### Einleitung

Die bislang in der PTB genutzte LDA-Signalauswertung umfasst eine Analog-Digital-Wandler-Karte im PC, welche oberhalb einer konfigurierten Signalamplitude anspricht. Um eine hohe Selektivität zu erreichen, wird konventionell eine analoge Bandpassfilterbank vorgeschaltet, welche jedoch eine geringe Filterordnung, eine relativ kleine Anzahl diskreter Grenzfrequenzen und die für analoge Filter üblichen Einschränkungen bezüglich Frequenz- und Phasengang aufweist. Nach erfolgter Triggerung wird der Auswertungs-Software ein Messdatenblock übergeben, wobei die Rechenleistung des PCs den Flaschenhals darstellt und eine obere Grenze der Anzahl detektierbarer Partikel pro Zeiteinheit impliziert. Insbesondere der hohe Anteil an Fehlsignalen bei niedriger Triggerschwelle durch Rauschspannungsspitzen, stellt hier ein Problem dar.

Zur Umgehung der genannten Limitierungen wurde auf ein preisgünstiges kommerzielles Entwicklungsmodul mit einem zweikanaligen 14-Bit-Analog-Digital-Wandler mit 125 MHz Abtastrate und einem System on Chip (SoC), bestehend aus einem frei programmierbaren FPGA (*field programmable gate array*) und einem ARM-Prozessor, zurückgegriffen (siehe Red Pitaya, 2017). Dieses Modul befindet sich mit der von der PTB entwickelten Software als LDA-Burst-Präprozessor im Signalpfad zwischen LDA-Empfängerdioden und Auswerte-PC. Neben selektierbarer Tiefpassfilterung (steile, linearphasige FIR-Filter) und Datenreduktion durch Unterabtastung wurden unterschiedliche Trigger-Algorithmen sowohl im Zeitbereich mit frei konfigurierbaren Bandpassfiltern (als verbesserte, digitale Umsetzung einer Bandpassfilterbank)

als auch alternativ im Frequenzbereich implementiert, um eine möglichst hohe Rate an LDA-Signalen bei einem möglichst kleinen Anteil an Fehlsignalen an den PC übergeben zu können.

### Aufbau des LDA-Burst-Präprozessors

Das entwickelte System besteht im Wesentlichen aus dem kommerziellen Modul *STEM-lab 125-14*, welches auf einer Adapterplatine montiert und mit den benötigten analogen sowie digitalen Anschlüssen in ein 1 HE 19-Zoll-Gehäuse integriert wurde; siehe Abbildung 1.

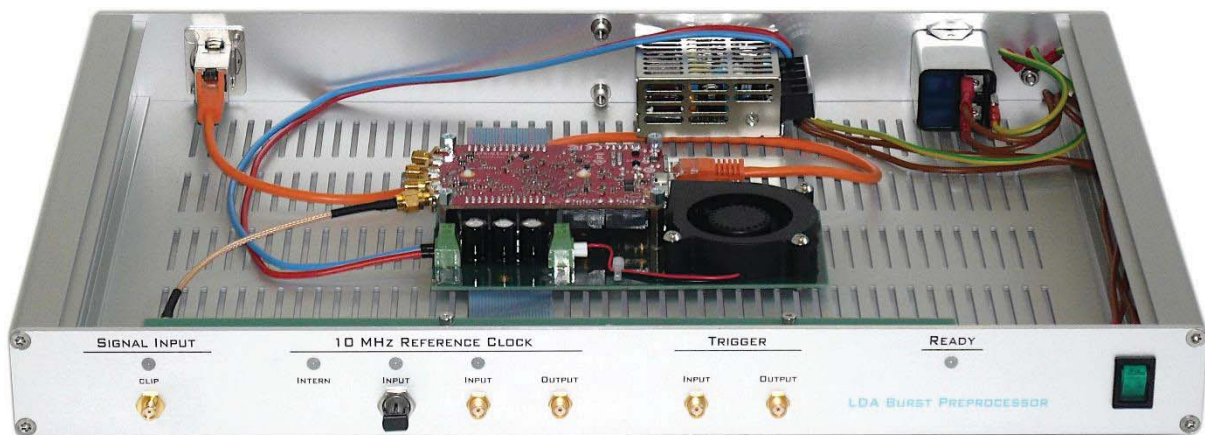


Abb. 1: LDA-Burst-Präprozessors im 19-Zoll-Gehäuse

Das Messsignal von der LDA-Empfängerdiode erreicht den LDA-Burst-Präprozessor zunächst durch ein 48 MHz-Tiefpassfilter, bevor es mit einer Auflösung von 14 Bit auf dem *STEM-lab 125-14* digitalisiert, mithilfe des FPGA vorverarbeitet und bei Erfüllung der konfigurierten Triggerbedingung an den ARM-Prozessor weitergeleitet wird.

FPGA und ARM-Prozessor sind auf dem *STEMlab 125-14* über einen gemeinsamen Speicherbereich (*Shared Memory*) gekoppelt; diese SoC-Architektur kombiniert die FPGA-typischen Vorteile hoher Parallelisierung bzw. Echtzeitfähigkeit mit der Flexibilität eines Linux-fähigen ARM-Prozessors.

Nach erfolgter Triggerung auf dem FPGA werden Messdatenblöcke (2 K Samples, 16 Bit) aufgezeichnet und zunächst im Hauptspeicher des ARM-Prozessors zwischengepuffert. Die auf einem PC unter LabVIEW implementierte Messdatennachverarbeitung fragt den Status der Messdatenaufzeichnung periodisch ab, fordert die Messdatenblöcke an und überträgt zudem die vom Anwender in LabVIEW festgelegte Konfiguration an den LDA-Burst-Präprozessor.

Die Kommunikation zwischen LDA-Burst-Präprozessor und Auswerte-PC erfolgt via Ethernet über ein selbstentwickeltes, verbindungsorientiertes Protokoll (TCP/IP); der LDA-Burst-Präprozessor agiert hierbei als Server, mit dem sich der Auswerte-PC als Client verbindet. Eine dynamische Bibliothek (DLL) dient als Bindeglied zwischen der Ethernet-basierten Kommunikation und dem LabVIEW-Programm.

Zur Rückführung der Signalverarbeitungskette auf die PTB-intern verteilte 10 MHz-Normalfrequenz wurden entsprechende Referenztakteingänge vorgesehen; zur Kaskadierung mehrerer parallel arbeitender LDA-Burst-Präprozessoren wurde zudem ein Referenztaktausgang vorgesehen. Ein Potentiometer auf der Adapterplatine erlaubt die manuelle Justage des internen, temperaturstabilisierten Oszillators zum Abgleich gegenüber dem Frequenznormal.

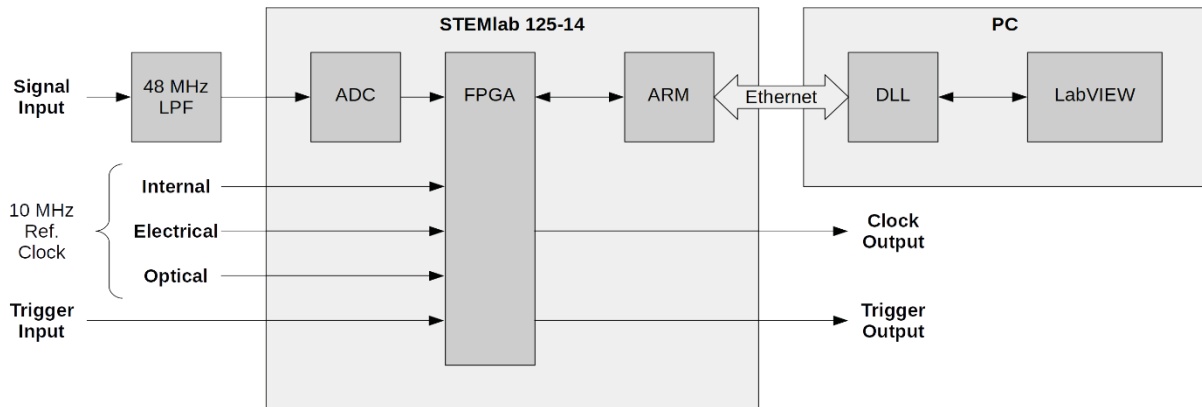


Abb. 2: Blockschaltbild des LDA-Burst-Präprozessors

Abbildung 2 zeigt das Blockschaltbild des LDA-Burst-Präprozessors auf höchster Ebene. Die Datenvorverarbeitung und Triggerung im FPGA kann entweder im Zeit- oder im Frequenzbereich erfolgen; für beide Varianten wurde jeweils ein FPGA-Image implementiert, zwischen denen wahlweise umgeschaltet werden kann. Der Datenfluss im FPGA ist in Abbildung 3 den für den Zeit- und in Abbildung 4 für den Frequenzbereichstrigger dargestellt. Ein FPGA-interner Samplepuffer (*FIFO*) kann zwei Messdatenblöcke zwischenspeichern, bevor diese vom ARM abgeholt werden.

In beiden Fällen beginnt die FPGA-interne Signalkette mit einer Kaskade von Abtastraten-Dezimierern (2:1) mit jeweils vorgeschalteten linearphasigen FIR-Tiefpassfiltern zur Unterdrückung von Alias-Effekten im Nutzfrequenzbereich (32 Koeffizienten, 100 dB Dämpfung). Der erste Abgriff der Filterkette (125 MHz Abtastrate) schleift das ADC-Signal ungefiltert durch. Gemäß der zu erwartenden Burstfrequenz kann nun einer der insgesamt 10 Abgriffe mit passender Abtastrate aus der LabVIEW-Programm heraus selektiert werden.

Um in der *Zeitbereichstrigger*-Variante ein sicheres Ansprechen des Triggers zu gewährleisten, wurde der Nutzfrequenzbereich auf die halbe Nyquistfrequenz beschränkt. Der dadurch entstehende weite Übergangsbereich ermöglicht eine effizientere Implementierung der neun Filter in der Kaskade, welche dann jedoch außerhalb des Nutzbereichs noch Artefakte der Dezimierung im Signal belassen. Das nachgeschaltete Spiegelfrequenzfilter (*Mirror-Filter*) zur Unterdrückung dieser Artefakte wurde in Form zweier hintereinandergeschalteter Teilfilter implementiert, um den Einfluss der Quantisierung der Filterkoeffizienten zu reduzieren.

Der entsprechend einer analogen Filterbank zur Vorfilterung des Burstsignals genutzte einstellbare Bandpass wurde als *Interpolated-Filter* implementiert, welcher in (zwingender) Kombination mit dem vorgeschalteten *Mirror-Filter* weniger Ressourcen als ein regulärer FIR-Bandpass benötigt. Der Bandpass wurde mit 163 Koeffizienten dimensioniert, welche aus dem LabVIEW-Programm heraus zur Laufzeit umkonfiguriert werden können. Die Berechnung der

Bandpasskoeffizienten erfolgt mittels numerischer Minimierung der Restwelligkeit (McClellan et al., 1973).

Dem Anwender stehen vier verschiedene Triggermodi zur Auswahl: Der Flankentrigger reagiert auf das Überschreiten eines Schwellwerts und entspricht damit dem Triggermodus der bislang genutzten Messkarten. Naturgemäß spricht dieser bei niedrigem eingestellten Schwellwert nicht nur auf Burstsignale, sondern auch auf viele einzelne Spannungsspitzen an. Um bei niedrigem Schwellwert den Anteil fälschlich getriggert Signale zu reduzieren, wurde der sogenannte Burst-Trigger entwickelt: In diesem Modus muss das Signal einen festgelegten Hysteresebereich innerhalb eines definierten Zeitfensters mehrfach über- und unterschreiten, um als LDA-Burst identifiziert zu werden. Ein weiterer alternativer Trigger-Modus analysiert die in einem definierten Zeitfenster detektierte Signalenergie, berechnet aus dem Integral des Quadrats der Amplitude. Letztlich wurde zur Synchronisation mehrerer Systeme auch ein externer Triggereingang implementiert.

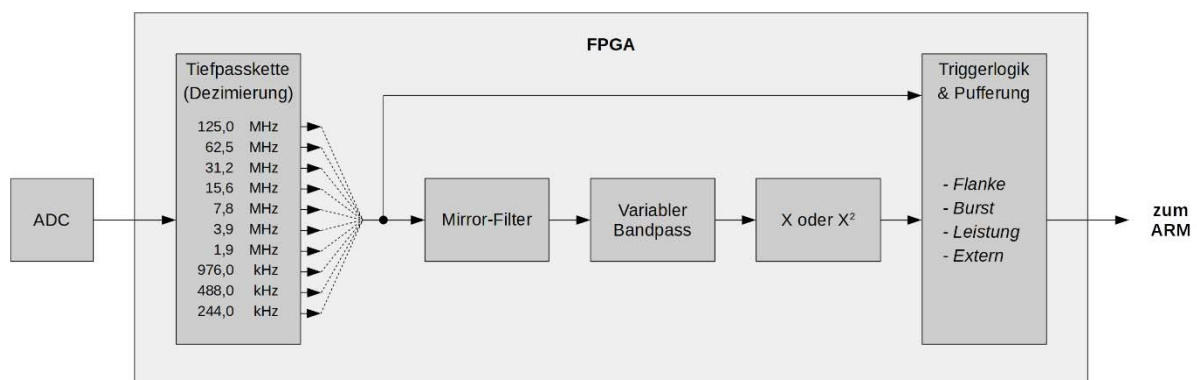


Abb. 3: Datenfluss im FPGA (Zeitbereichstrigger)

Bei der *Frequenzbereichstrigger*-Variante durchläuft das Messsignal nach der Dezimierung eine Verarbeitungslogik, welche auf dem FPGA vierfach parallel implementiert wurde; diese Parallelisierung erlaubt bei gegenüber der internen Sequenzierung ungünstig verschobenen Burstpeaks ein zuverlässigeres Ansprechen der Triggerlogik und eine bessere Zentrierung der Bursts im Messdatenblock.

Die parallelisierte Logik umfasst zunächst eine schnelle Fouriertransformation (*FFT*) mit 256 Punkten, welche mit dem reellwertigen Messsignal gespeist wird. Aus dem komplexwertigen Spektrum wird anschließend das reellwertige Leistungsdichtespektrum berechnet. Anschließend erzeugt ein gleitender Mittelwert über bis zu sieben Frequenzbins ein geglättetes Spektrum, um den Einfluss von nicht exakt auf den FFT-Bin-Frequenzen liegenden Frequenzkomponenten auf die Amplitude zu dämpfen.

Um das zu hohen Partikelgeschwindigkeiten abfallende (gemittelte) Betragsspektrum zu entzerren, also einen weitestgehend Geschwindigkeits-unabhängigen Einfluss der Triggerschwelle realisieren zu können, wurde ein Linearisierer implementiert, welcher das Betragsspektrum mit einer Geraden der Steigung 1 und einem wählbaren Y-Achsen-Abschnitt multipliziert.

Einstellbare Skalierungsfaktoren bei der Betragsbildung und dem Linearisierer erlauben eine optimierte Ausnutzung des Dynamikbereichs der Auswertung, welcher durch diese beiden Operationen stark erweitert wird. Die Triggerlogik erlaubt es, entweder auf den Pegel des Betragsspektrums oder auf den externen Triggereingang zu reagieren.

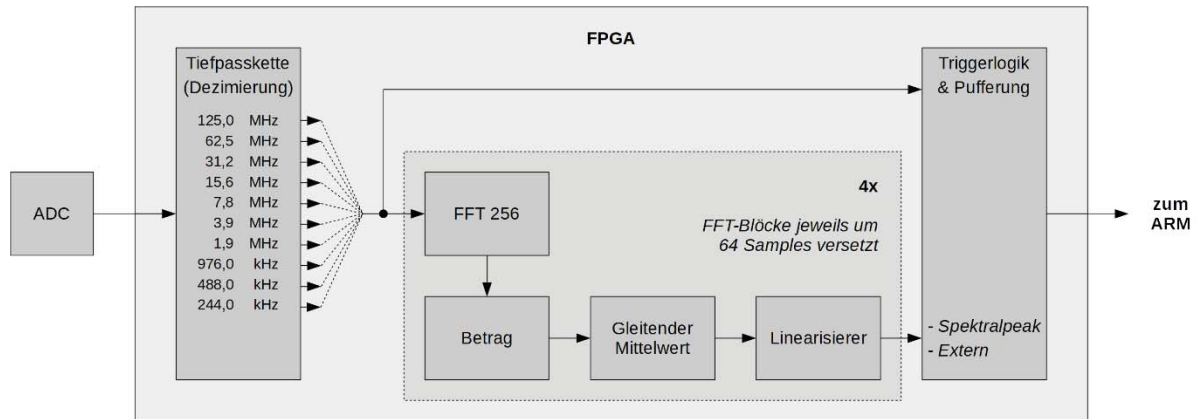


Abb. 4: Datenfluss im FPGA (Frequenzbereichstrigger)

## Methoden zur Steigerung von Signalrate und Signalintegrität

Neben der im vorigen Abschnitt erläuterten Implementierung der hardwarebeschleunigten Vor-selektion – insbesondere der parallelisierten und zeitlich versetzten Frequenzbereichstrigge-rung – übt auch die Implementierung der PC-seitigen Auswertung gleichermaßen einen Ein-fluss auf die erreichbare Signalrate und Signalintegrität aus. Im Folgenden wird die Funktionsweise der LabVIEW-Messdatenauswertung erläutert, welche einen Messdatenblock des LDA-Burst-Präprozessors bearbeitet.

Zunächst wird, nach Durchführung einer FFT über die gesamte Sequenz von 2048 Abtastwer-ten, ein Maximum im Frequenzbereich oberhalb der niederfrequenten Anteile des Bursts ge-sucht. Rund um dieses Maximum wird anschließend ein erster Gaußfit im Frequenzbereich durchgeführt. Der Gaußfit am Leistungsdichtespektrum liefert die ungefähre Frequenz und Breite des Peaks. Ab einem voreingestellten SNR von beispielsweise 4 (6 dB) erfolgt die wei-tere Auswertung, ansonsten wird der Messdatenblock verworfen.

Anschließend wird im Frequenzbereich um  $\pm\sigma$  des soeben ermittelten Peaks eine Gerade an den Phasenverlauf angepasst. Die Steigung dieser Geraden liefert den Zeitpunkt des Bursts innerhalb der aufgezeichneten Sequenz.

Nachdem die ungefähre Frequenz und Breite des Peaks bekannt sind, wird dieser auf ein Vielfaches seiner Breite beschnitten und danach in den Zeitbereich zurücktransformiert, so dass ein um die Mittenfrequenz gefiltertes Signal entsteht, welches anschließend auch im Zeitbereich anhand seiner ermittelten Lage auf  $\pm 3\sigma$  begrenzt wird.

Im letzten Schritt erfolgt ein Burst-Fit im Zeitbereich; an den gefilterten und im Zeitbereich beschnittenen Burst wird die entsprechende Funktion angepasst. Aufgrund der höheren An-zahl an Unbekannten ist die Anpassung im Zeitbereich zwar rechenintensiver als eine Anpas-sung im Frequenzbereich, jedoch relativiert sich der erhöhte Aufwand durch die gute



Vorselektion und durch die aus den Ergebnissen der Vorverarbeitung nutzbaren Startwerte der Kurvenanpassung. Zukünftig soll untersucht werden, inwiefern die Anpassung im Zeitbereich gegenüber dem Frequenzbereich eine bessere Unterscheidbarkeit von Burstsignalen mit mehreren überlagerten Partikeln bietet.

## Messung am Windkanal

Das entwickelte System wurde in der Frequenzbereichstrigger-Variante (*LDA-BPP FFT*) an einem Windkanal der PTB evaluiert, indem es mit der bislang sowohl an diesem Messplatz als auch für die LDA-Kalibrierung an der rotierenden Scheibe verwendeten Messdatenauswertung *WinLDA* verglichen wurde (Strunck et al., 2008). Als Signalquelle dient das am Windkanalmessplatz fest installierte Kreuzstrahl-LDA, dessen verstärktes Ausgangssignal mittels eines 50:50-Leistungsteilers in beide Auswertungen parallel eingespeist wurde.

Es wurden Messungen über jeweils 1 Minute bei den nominellen Strömungsgeschwindigkeiten 0,5 m/s, 1 m/s, 2 m/s, 5 m/s, 10 m/s, 20 m/s, 30 m/s, 40 m/s und 50 m/s durchgeführt. Hierbei zeigt der LDA-Burst-Präprozessor in der Frequenzbereichstrigger-Variante gegenüber der *WinLDA*-Auswertung einen um ca. eine Größenordnung verbesserten Datendurchsatz, wie in Abbildung 5 dargestellt. Diese signifikante Verbesserung wird insbesondere auf die hardwarebeschleunigte Triggerung zurückgeführt, welche eine Entlastung der PC-Messdatenauswertung durch effektive Vorselektion der Burstsignale bewirkt, sodass weniger PC-Rechenzeit für Fehlsignale verwendet wird.

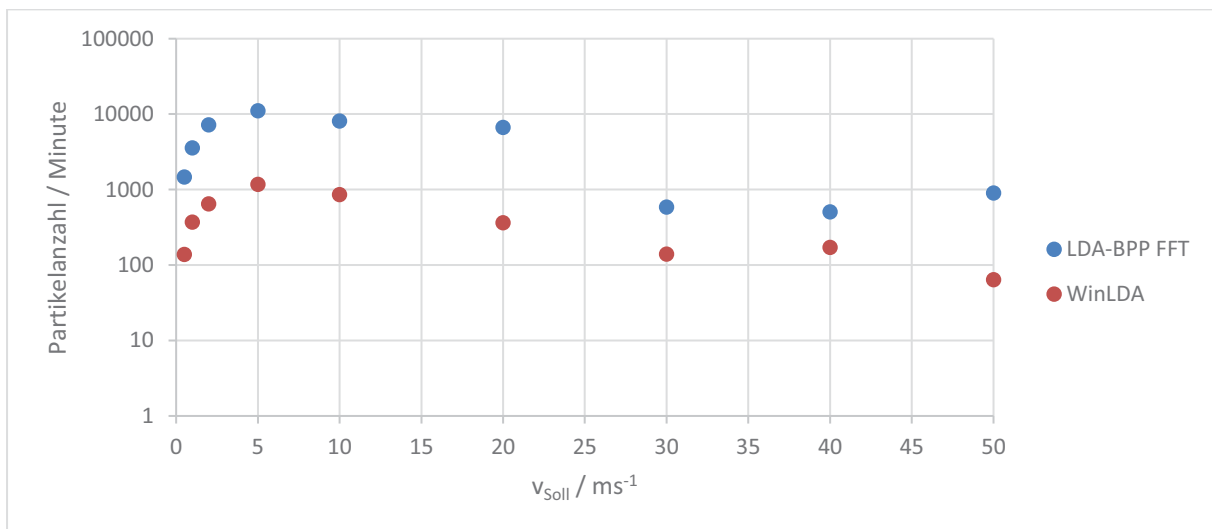


Abb. 5: Anzahl der von beiden Systemen ausgewerteten Partikel binnen einer Minute Messdauer

Das Verhältnis der vom LDA-Burst-Präprozessor und von der *WinLDA*-Auswertung gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten ist in Abbildung 6 dargestellt und zeigt eine gute Übereinstimmung mit ca. 0,3 %o erweiterter Messunsicherheit. Wie in Abbildung 7 anhand der Messunsicherheiten im Vergleich dargestellt ist, kann aufgrund der guten Vorselektion des LDA-Burst-Präprozessors eine Vielzahl kleiner Partikel mit ausgewertet werden, was letztendlich zu einer deutlichen Reduzierung der Messunsicherheit führt.

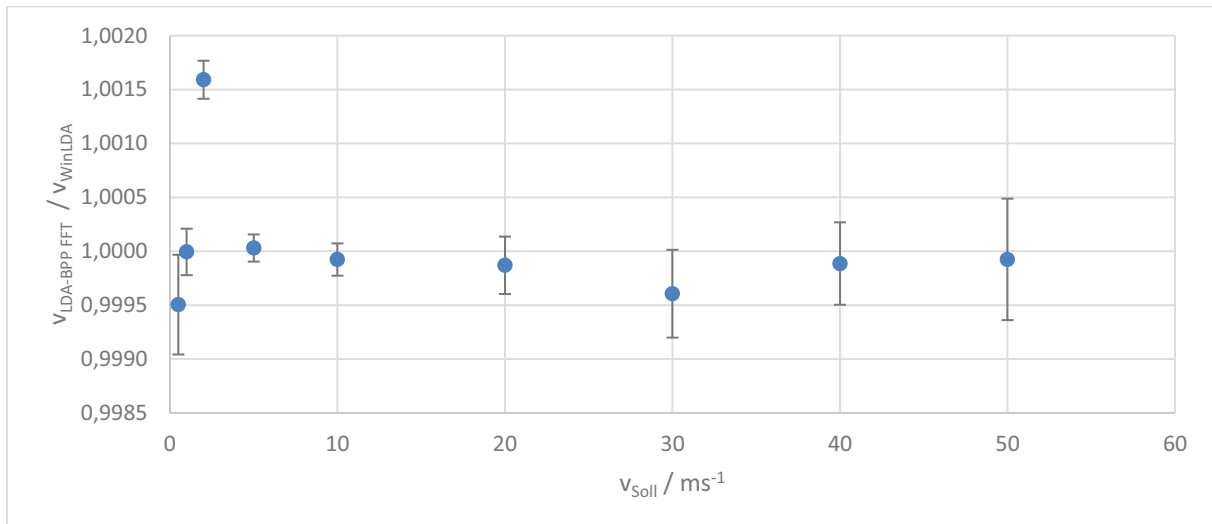


Abb. 6: Strömungsgeschwindigkeitsquotient und erweiterte Messunsicherheit

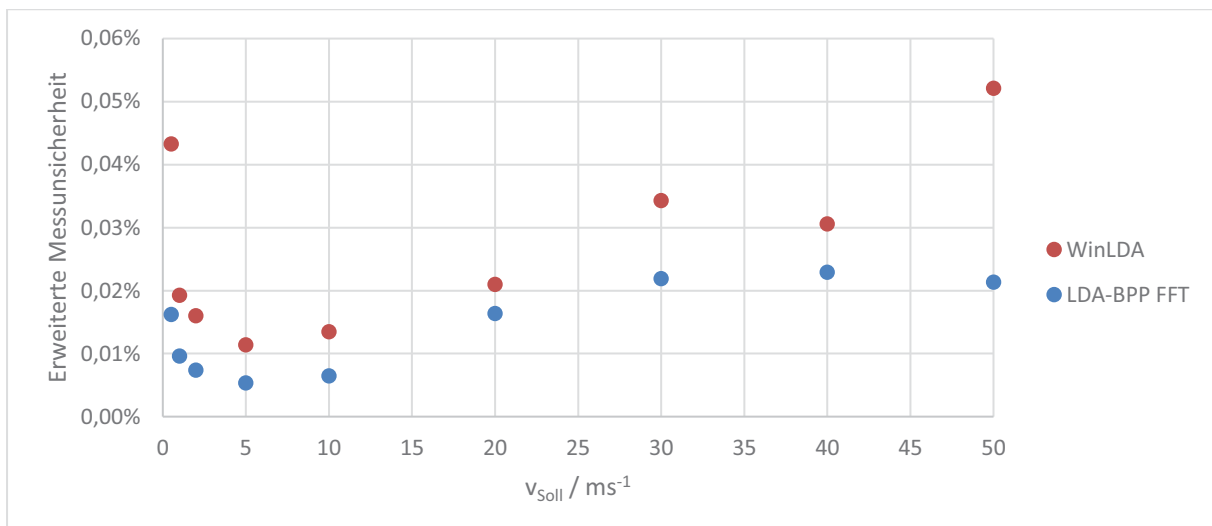


Abb. 7: Erweiterte Messunsicherheiten beider Systeme

## Zusammenfassung und Ausblick

Der entwickelte LDA-Burst-Präprozessor erzielt mit der bislang getesteten Vorselektion im Frequenzbereich eine signifikant höhere Burstrate als die bisher verwendete Signalauswertung mit analoger Filterung, PC-Messkarten und der Software WinLDA. Signalraten bis über 150 ausgewertete LDA-Bursts pro Sekunde wurden beobachtet. Durch die somit gegenüber der bisherigen Signalauswertung erhöhte Anzahl besonders auch kleinerer Partikel weist das entwickelte System eine deutliche Reduzierung der Messunsicherheit auf.

Zukünftig soll auch die bereits implementierte alternative Vorselektion mit digitaler Filterung und den unterschiedlichen Möglichkeiten der Triggerung im Zeitbereich charakterisiert und mit den anderen bestehenden Auswertungen verglichen werden. Die weiteren Schritte bei der Erprobung des entwickelten LDA-Burst-Präprozessors umfassen die systematische

Untersuchung von Biasing-Effekten der Selektion auf die generierten Messwerte sowie die Modellierung und Abschätzung der damit verbundenen Messunsicherheit.

Insbesondere ist hierzu die Entwicklung eines LDA-Burstsignalgenerators geplant, welcher frei parametrisierbare Signale mit festgelegten statistischen Eigenschaften synthetisiert und mittels einer DAC-Karte oder gegebenenfalls eines weiteren FPGA-Boards ausgibt. Die so erzeugten Signale sollen der Charakterisierung und dem Vergleich der bisherigen Auswertung mit Messkarten und WinLDA, dem neu entwickelten LDA-Burst-Präprozessor, aber auch kommerziellen LDA-Datenauswertungen dienen.

Anhand der aus dieser Synthese-Analyse-Kette gewonnenen Untersuchungsergebnisse soll der LDA-Burst-Präprozessor – der Verbund aus hardwarebeschleunigter Burstsignalerkennung und LabVIEW-Messdatenauswertung – im Hinblick auf die zu erwartende Verbesserung der Messunsicherheit charakterisiert werden.

## Literatur

**Red Pitaya d.o.o., 2017:** "STEMlab 125-10 vs. STEMlab 125-14 (originally Red Pitaya v1.1)", URL: <https://redpitaya.readthedocs.io/en/latest/developerGuide/125-10/vs.html> (abgerufen am 14.06.2019)

**McClellan, J. H., Parks, T. W., Rabiner, L. R., 1973:** "A Computer Program for Designing Optimum FIR Linear Phase Digital Filters", IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, Vol. AU-21, No. 6

**Strunck, V., Kampe, J., Pape, N., Müller, H., 2008:** "Messung der Streuteilchenbeschleunigung mit LDA und Quadratursignalanalyse", 16. Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", Shaker-Verlag Aachen, S. 8 ff.