

Phasensynchroner FPGA-Pulsgenerator für Particle-Image-Velocimetry Messungen an rotierenden Maschinen mit stark schwankender Drehzahl

Wolfgang Förster, Joachim Klinner, Melanie Voges, Chris Willert, Martin Elfert
Institut für Antriebstechnik, DLR, Köln

Kurzfassung

Ein Particle-Image-Velocimetry-Messgerät (PIV) zeigte beim Einsatz in einem Prüfstand für rotierende Kühlkanäle starke Schwankungen in der Position der aufgenommen Bilddaten, die durch das Arbeitskonzept der vorhandenen Ablaufsteuerung in Kombination mit Prüfstands bedingten Drehzahlschwankungen verursacht wurden. Mit Hilfe von NI FPGA-Komponenten sowie der Labview FPGA Software wurde eine neue Ablaufsteuerung entwickelt, die eine drastische Erhöhung der Positioniergenauigkeit des PIV-Systems in rotierenden Maschinen erreicht und darüber hinaus weitere Verbesserungen beim Messbetrieb ermöglicht.

Abstract

A Particle-Image-Velocimetry (PIV) measurement system showed strong fluctuations of the generated laser light sheets positions when used for measurements in a rotating test rig for new turbine cooling concepts. These were caused by the working principle of the standard programmable sequencer unit of the PIV system in combination with unsteady variations of the rig's rotation speed. Using NI FPGA components and the Labview FPGA software system a new sequencer device for the PIV system was developed which revealed a drastical increase for the stability of the light sheet position. Also, further enhancements for the operation of the PIV device could be achieved.

Einleitung

Die Particle Image Velocimetry (PIV) ist ein nicht-invasives, planares Messverfahren, das es erlaubt, Strömungsgeschwindigkeiten an vielen Punkten innerhalb einer Messfläche zeitgleich zu erfassen[1]. Das Prinzip dieser berührungslosen Messtechnik beruht auf der Erfassung des Versatzes von Streupartikeln, die mit zwei Lichtpulsen (wenige ns) in sehr kurzem, definiertem Abstand (wenige μ s) beleuchtet werden (Bild 1). Die Lichtpulse werden mit einem Doppelpuls-Laser erzeugt und über eine

geeignete Optik als Lichtschnitt in die gewählte Messebene in der Strömung geführt. Das Streulicht der Partikel aus beiden Lichtpulsen wird mit einer CCD- oder CMOS Kamera in zwei getrennten Bildern aufgenommen. Über den zeitlichen Abstand beider Lichtpulse und den Vergrößerungsfaktor der verwendeten Kamera-Optik kann der Partikelversatz in einen Geschwindigkeitsvektor umgerechnet werden. Die Steuerung des Doppelpuls-Lasers und der Kamera wird üblicherweise von einer hochgenauen programmierbaren Ablaufsteuerung übernommen, in der feste Zeitsequenzen für den Ablauf der einzelnen Verfahrensschritte vorgegeben werden.

Im Prüfstand für rotierende Kühlkanäle des DLR Köln (Bild 2) werden neuartige Kühlkonzepte für Turbinenschaufeln getestet[2]. Dabei wird u. a. das PIV-Verfahren zur berührungslosen Messung von Strömungsgeschwindigkeiten eingesetzt. Die PIV-Messeinrichtung steht außerhalb des rotierenden Prüfstandbereichs und die jeweils gewünschte Messebene muss exakt auf eine Umfangsposition des in einem Drehzahlbereich von $250-800 \text{ min}^{-1}$ rotierenden Versuchsträgers synchronisiert werden. Durch prüfstandsbedingte Geschwindigkeitsschwankungen des Rotors kommt es mit der bislang verfügbaren Ablaufsteuerung zu einer stochastischen Schwankung der tatsächlichen Messposition und somit zu einem Messfehler durch die ungenaue Ortsauflösung, da die eingesetzte PIV-Ablaufsteuerung nach dem Auslösen der Messsequenz auftretende Änderungen der Umfangsgeschwindigkeit nicht mehr berücksichtigen kann. Diese ist außerdem nicht in der Lage, das Lasersystem bei allen Versuchsdrehzahlen bei der optimalen Betriebsfrequenz von etwa 10-15 Hz zu betreiben, wenn der für den Betrieb im rotierenden System notwendige phasensynchrone Modus eingestellt ist.

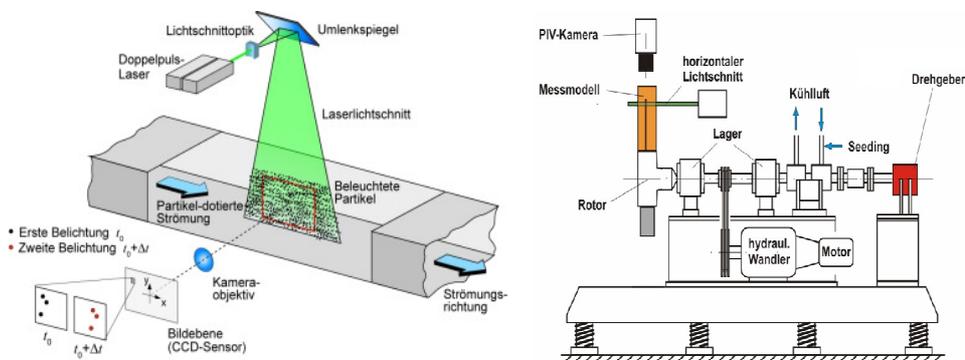


Bild 1: Grundprinzip der PIV-Technik Bild 2: Rotierender Kühlkanal

Hardwarekonzept des FPGA-Pulsengenerators

Zur Erzeugung der Laserlichtschnitte werden beim PIV-Verfahren Blitzlampen-gepumpte Festkörperlaser (Neodym-YAG) verwendet, die über jeweils 2 TTL-Triggenerpulse (Blitzlampe und Güteschalter zur Erzeugung des Laserpulses) gesteuert werden. Die Intensität des Lichtschnitts wird über den zeitlichen Abstand (typ. ca. 70-300µs) zwischen Blitzlampen- und Güteschalter (=Laserpuls) bestimmt. Der zeitliche Versatz (hier: 5 µs) zwischen den beiden Lichtschnitten wird auf die erwartete Strömungsgeschwindigkeit angepasst. Zur Ansteuerung der Kamera wird ein weiterer TTL-Puls benötigt, der genau auf die Lage der beiden Güteschalterpulse abgestimmt sein muss. Für den Einsatz in einem rotierenden System ist zu beachten, dass die Auslösung der Blitzlampenpulse mit entsprechendem Vorlauf zur Auslösung der eigentlichen Güteschalterpulse erfolgen muss. Ändert sich in dieser Phase die Drehzahl des rotierenden Systems, so bewirkt dies einen Versatz der Umfangsposition, in der die Messung erfolgt und damit eine entsprechend reduzierte Ortsauflösung der gemessenen Geschwindigkeitsdaten.

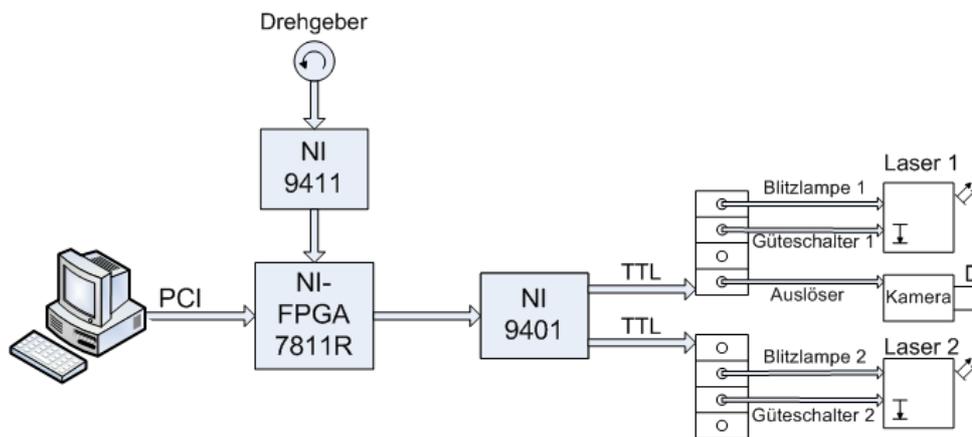


Bild 3: Prinzipaufbau des FPGA-Sequenzers

Mit Hilfe der NI-FPGA Technik wurde ein neue Ablaufsteuerung aufgebaut, welche zunächst speziell für die Anforderungen im rotierenden Kühlkanal ausgelegt ist, aber daraus an Anlagen mit ähnlicher Rotationsdynamik Anwendung finden kann (Bild 3). Die Signale eines bereits am Prüfstand installierten Drehgebers (Inkremental-Encoder, 14400 Schritte) werden über ein NI-9411-Digitaleingangsmodul dem NI-FPGA Modul 7811R zugeführt. Hiermit wird die Umfangsposition des Rotorarms kontinuierlich mit einer Genauigkeit von 0.025° ermittelt und daraus die jeweilige momentane Umfangsgeschwindigkeit bestimmt. Die hohe Taktfrequenz des FPGA-Moduls erlaubt es, in Echtzeit alle relevanten Positionsinformationen zu überwachen und unmittelbar auf eintretende Änderungen zu reagieren. Somit können für jede gewünschte Umfangs-

position die notwendigen Auslözeitpunkte für die Blitzlampen- und Güteschaltpulse sowie die Kamera extrem genau ermittelt und entsprechend exakte TTL-Steuersignale sowie zusätzliche Monitorsignale (z.B. Encoderpulse) über ein Hochgeschwindigkeits-Digital-I/O Modul NI-9401 ausgegeben werden.

Bild 4 zeigt für typische PIV-Messungen die mit dem FPGA-Pulsgenerator erreichte Verbesserung der Bildpositionsstabilität im Vergleich mit der Standard-Ablaufsteuerung. Bezogen auf eine Gesamtbildhöhe von etwa 600 Bildpunkten konnte die Schwankung der Bildposition damit von über 5% auf ca. 0,5% verbessert werden.

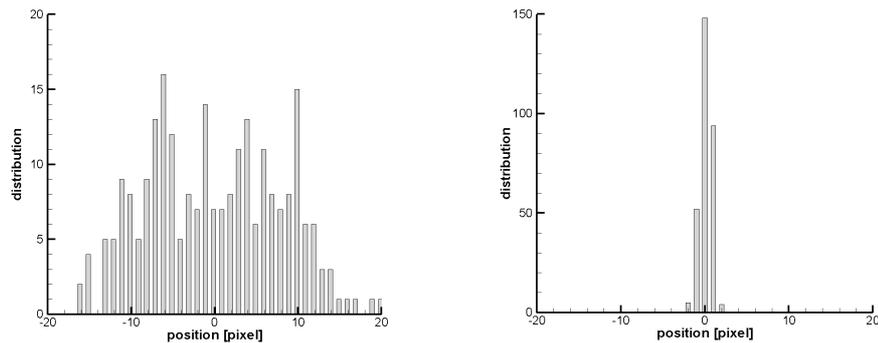


Bild 4: Schwankung der Bildposition bei PIV-Messungen mit Standard-Ablaufsteuerung (links) und FPGA-Pulsgenerator (rechts)

Software-Struktur

Die Programmierung des NI-FPGA-Moduls erfolgt mit dem speziellen LABVIEW-FPGA Programmiersystem. Unter weitgehender Verwendung von Standardelementen der LABVIEW-Sprache sowie einiger spezifischer Zusatzelemente wird hiermit der zum Betrieb des FPGA's notwendige VHDL-Code erzeugt und auf das FPGA-Modul übertragen. Ein für die Pulsgenerator-Steuerung sehr hilfreiches Element von LABVIEW-FPGA ist der Single-Cycle-Timed-Loop (SCTL). Mit dieser Struktur können (geeignete) Logiksequenzen erzeugt werden, die jeweils garantiert in einem vorher definierten Zeitfenster von z.B. 25ns ablaufen und so die sehr schnelle Echtzeitfähigkeit des Programms sicherstellen. Mit der SCTL-Technik wird die aktuelle Geschwindigkeit des Rotorarms mit einer Taktfrequenz von 40 MHz überwacht und die Auslösung des Doppelpuls-Laser (je 2 Blitzlampen und Güteschalter) und der Kamera an die aktuelle Geschwindigkeit angepasst, so dass eine exakte Positionierung der gewünschten Messebene gewährleistet ist. Trotz des nicht unerheblichen Logikaufwandes konnte der Pulsgenerator mit der einfachsten Version der

NI-FPGA-Reihe realisiert werden und damit zugleich auch eine kostengünstige Lösung mit vertretbarem Programmieraufwand erstellt werden. Durch den modularen Aufbau des FPGA-Blockdiagramms ist die Anpassung der Ablaufsteuerung an andere Versuchsaufbauten mit geringem Aufwand möglich. So kann das Doppelpuls-Lasersystem optional so eingestellt werden, dass bei niedrigen Drehzahlen Zwischenauslösungen der Laserblitzlampen ausgeführt werden oder bei hohen Drehzahlen das Messsignal nur nach Warteumdrehungen generiert und die Blitzlampen so in einem weiten Drehzahlbereich im optimalen Arbeitspunkt von 10-15 Hz betrieben werden können. Eine integrierte Simulatorschaltung für den Drehgeber erlaubt ein bequemes Austesten von Programmfunktionen ohne die Notwendigkeit eines aufwendigen Prüfaufbaus.

Die Steuerung des FPGA-Moduls erfolgt mittels einer Standard-Labview-Anwendung (Bild 5) über eine PC-Host Kommunikation. Hiermit kann der Benutzer die Einstellungen des Pulsgenerators an die jeweilige Messaufgabe anpassen und aktuelle Arbeitsparameter kontinuierlich abfragen. Die PC-Host Kommunikation arbeitet unabhängig von den Echtzeitmodulen der Pulssteuerung und hat keinerlei Einfluss auf deren Arbeitsgeschwindigkeit. Durch die freie Programmierbarkeit kann die Bedienoberfläche optimal auf die Wünsche des Anwenders ausgelegt werden und so neben dem eigentlichen Einsatzbetrieb auch bei der Einrichtung des PIV-Systems hilfreiche Unterstützung bereitstellen.

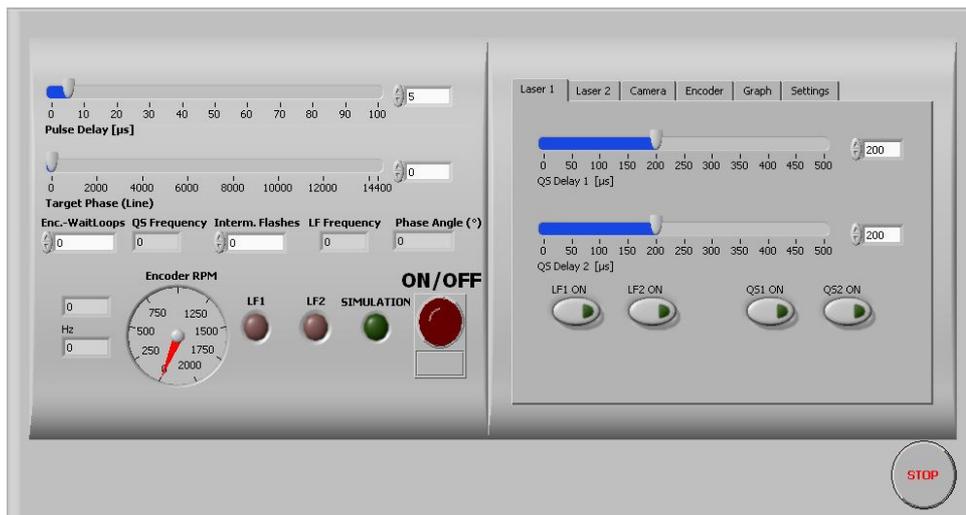


Bild 5: Bedienoberfläche des FPGA-Ablaufsteuerung

Zusammenfassung

Mit der LABVIEW-FPGA Technik wurde eine neuartige Ablaufsteuerung für Messungen mit der Particle-Image-Velocimetry Methode realisiert. Hiermit wird deren Anwendungsbereich und Messgenauigkeit insbesondere beim Einsatz in rotierenden Maschinen mit typischen Drehzahlschwankungen deutlich verbessert. Da wesentliche Elemente der Steuerung in Software realisiert sind, kann die Ablaufsteuerung optimal auf die Messtechnik eingestellt werden sowie eine auf den Benutzer abgestimmte Bedienoberfläche realisiert werden. Die Übertragung des Konzeptes auf ähnlich gelagerte Anwendungen ist mit geringem Aufwand möglich.

Literatur

- [1] Raffel M, Willert C, Wereley S, Kompenhans J (2007) Particle image velocimetry – a practical guide (second edition). Springer Verlag - Berlin Heidelberg NewYork, ISBN 978-3-540-72307-3
- [2] Elfert M, Voges M, Klinner J (2008): Detailed Flow Investigation Using PIV in a Rotating Square-Sectioned Two-Pass Cooling System with Ribbed Walls. In: ASME-Paper, GT2008-51183, ASME Turbo Expo 2008, Berlin, Germany