Validierung von Übertragungsmodellen für ortsfeste und rotierende Schallquellen in Strömungskanälen durch drucksensitive Farbe

Maximilian Behn[1], Michael Hilfer[2], Christian Klein[2], Thomas Ahlefeldt[2], Lars Enghardt[1] & Ulf Tapken[1]

[1] *DLR, Institut für Antriebstechnik, Abt. Triebwerksakustik, 10623 Berlin, Deutschland, Email: Maximilian.Behn@dlr.de*

[2] *DLR, Institut für Aerodynamik und Strömungstechnik, Abt. Experimentelle Verfahren, 37073 Göttingen, Deutschland*

Einleitung

Die experimentelle Analyse von Schallfeldern in Strömungskanälen wird i.d.R. mit wandbündig installierten Mikrofonarrays unter Einsatz von Modellen zur Schallausbreitung umgesetzt [1]. Neben dem analytischen Modell der Ausbreitung von akustischen Kanalmoden in einer konstanten Hintergrundströmung existieren verschiedene numerische Eigenlösungsverfahren für die Berücksichtigung des Einflusses von Strömungsprofilen in radialer und Umfangsrichtung (z.B. [2]). Zur Untersuchung der Modenausbreitung in einer über den Kanalquerschnitt ungleichmäßigen Hintergrundströmung, wie sie z.B. durch Einsaugung der Rumpfgrenzschicht bei eingebetteten Triebwerken auftritt, entwickelten Klähn et al. [3] ein analytisches Modell. Die Validierung der Modenmodelle und der daraus abgeleiteten Quellmodelle in Form der Greenschen Funktion (siehe [1]) kann anhand von experimentell bestimmten Wellenzahlvektoren und hochaufgelösten Schalldruckverteilungen erfolgen. Diese lassen sich aufgrund der diskreten Abtastung durch Mikrofonarrays nur schwer realisieren, da für eine ausreichende Genauigkeit eine sehr hohe Mikrofonanzahl eingesetzt werden muss. Flächige Messungen des Schalldrucks mit optischen Verfahren bieten hier eine vielversprechende Alternative.

Das Verfahren der drucksensitiven Farbe (engl. pressure-sensitive paint, PSP) ermöglicht räumlich hochaufgelöste Druckmessungen [4]. Spezielle PSPs ermöglichen zudem zeitlich hochauflösende Druckmessungen und werden als iPSP bezeichnet (engl. instationary PSP). Die Einsatzfähigkeit von iPSP auch für akustische Anwendungen, bei denen die Druckniveaus bedeutend geringer sind als bei herkömmlichen Strömungsmessungen, konnte 2020 in [5] nachgewiesen werden. In dieser Studie wurde das Schallfeld in einem rechteckigen Resonanzkörper bei Lautsprecheranregung untersucht. Ähnliche Versuche wurden mit stehenden Wellen in rechteckigen Kanälen unter Einsatz von optischer Holografie-Interferometrie [6, 7] sowie von Speckle-Interferometrie [8] veröffentlicht.

In dieser Studie werden zwei Messaufbauten zum Einsatz der iPSP-Messtechnik vorgestellt. Der erste Aufbau dient zur Messung der Schalldruckverteilung der von einem Lautsprecher abgestrahlten, ausbreitungsfähigen Kanalmoden an der Kanalaußenwand. Mit dem zweiten Aufbau wird das akustische Nahfeld eines Lautsprechers untersucht. Den gewonnenen Messdaten werden Vergleichsmessungen mit einem Mikrofonarray gegenübergestellt. Abschließend wird der Einsatz der iPSP-Messdaten zur Validierung der Moden- und Quellmodelle diskutiert.

Messaufbau

Für beide iPSP-Messaufbauten standen zwei Hochgeschwindigkeitskameras (Phantom V2640) sowie acht am DLR Göttingen entwickelte miniaturisierte UV-LEDs zum Einsatz an einem zylindrischen Kanal mit einem Durchmesser von 0,5 m zur Verfügung. Die iPSP-Beschichtung besteht aus einer wasserbasierten Polymer-Keramik-Basisschicht, auf welche eine aktive Schicht aus in Toluol gelöstem PtTFPP (Luminophor) aufgetragen wird [9]. Sowohl die Basis- als auch die aktive Schicht wurden mittels Druckluftsprühpistole aufgetragen. Die Gesamtschichtdicke beträgt ca. 30 µm mit einer Rauigkeit von etwa 5-7 µm. Der lineare Messbereich der hier eingesetzten iPSP-Beschichtung wurde in [5] mit 6 kHz bestimmt. Die iPSP-Beschichtung wird mit Licht bei 395 nm angeregt und emittiert im roten Wellenlängenbereich bei 650 nm. Im angeregten Zustand können die Luminophore der iPSP-Beschichtung mit den in der Umgebung befindlichen Sauerstoffmolekülen wechselwirken (engl. oxygen quenching) und einen strahlungslosen Übergang der Luminophore bewirken. Demnach variiert die messbare Lichtintensität in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration: hohe Intensität entspricht geringer Sauerstoffkonzentration und niedrige Intensität entspricht höherer Sauerstoffkonzentration [4]. Bei einem akustischen Feld führen die Druckschwankungen zu lokalen Änderungen des Sauerstoffpartialdruckes und damit zu einer zeitlichen und räumlichen Änderung des von der iPSP-Beschichtung abgestrahlten Lichts, welche als Intensitätsänderung mit den o.g. Kameras detektierbar ist. Die Hochgeschwindigkeitskameras erfassten die iPSP-Daten mit einer Bildrate von 10000 fps über 2 Sekunden. Zusätzlich wurden Vergleichsmessungen mit einem Mikrofonarray zur Realisierung der Radialmodenanalyse durchgeführt (siehe [1]), das aus insgesamt 38 G.R.A.S. 40BP-S Kondensatormikrofonen besteht, aufgeteilt auf ein Linienarray mit sechs axialen Positionen und ein Ringarray mit 33 Umfangspositionen. Die Mikrofonsignale sowie Temperatur- und Wellentriggersignale wurden mit einer Samplingrate von 250 kHz über eine Messdauer von 15 s aufgezeichnet.

Messung einzelner Kanalmoden

Die Anregung einzelner Kanalmoden wurde mittels einer Lautsprecherscheibe realisiert, die auf einer Antriebswelle

angebracht ist (siehe Abb. 1). Durch Rotation des Lautsprechers vom Typ BMS 4540ND werden die angeregten Moden aufgrund des Doppler-Effekts in Abhängigkeit ihrer Azimutalmodenordnung m gemäß $f_m = f - mf_{rot}$ um Vielfache der Rotationsfrequenz f_{rot} auf diskrete Frequenzen verteilt. Dabei wurde die Lautsprecheransteuerung mit der Wellenrotation synchronisiert, um eine Dekorrelation aufgrund stochastischer Drehzahlschwankungen zu verhindern. Durch den am Kanalende angebrachten, reflexionsarmen Abschluss wird die Ausbildung stehender Wellenfelder unterdrückt.

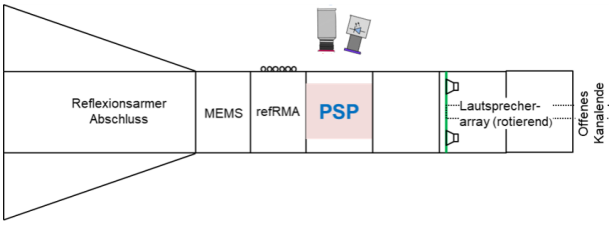

Abbildung 1: Aufbau zur Untersuchung einzelner, dominant angeregter Kanalmoden mittels iPSP-Messtechnik und Radialmodenanalyse

Der Aufbau der iPSP-Messung ist in Abb. 2 dargestellt. Die beiden Kameras und die Lichtquellen erfassen gleichmäßig das iPSP-Messfeld mit einer axialen Breite von 0,5 m und einer Höhe von 160° in Umfangsrichtung. Im Zentrum des Bildbereichs jeder Kamera ist jeweils ein Referenzmikrofon (Brüel & Kjær Typ 4944) angebracht.

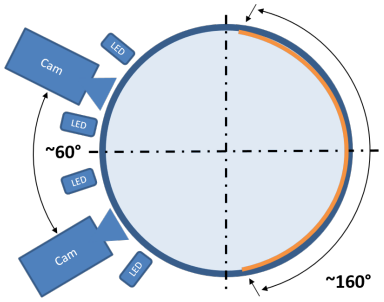

Abbildung 2: Aufbau der iPSP-Messung

Messung des akustischen Nahfeldes

Um das akustische Nahfeld des Lautsprechers auf der Scheibe zu untersuchen, wurde der Kanal verkürzt, wie in Abb. 3 gezeigt. Die iPSP-Beschichtung wurde direkt auf die Lautsprecherscheibe aufgetragen (siehe Abb. 4) und die LEDs sowie die Kamera direkt auf die Scheibe ausgerichtet. Zur Kalibration der Messdaten sowie zu Vergleichszwecken wurde zusätzlich das Mikrofonarray eingebaut. Die Messungen wurden mit und ohne Rotation der Lautsprecherscheibe durchgeführt.

Signalaufbereitung

Mit der hier aufgebauten iPSP-Messtechnik werden relative Intensitätsschwankungen bzgl. Referenzbedingungen erfasst (engl. intensity method [4]). Zunächst wird die Intensität I_{ref} bei Referenzbedingungen, in diesem Fall der atmosphärische Druck bei Raumtemperatur, ermittelt. Anschließend wird die zeitlich und räumlich schwankende Intensität I bei eingeschalteter Schallquelle gemessen.

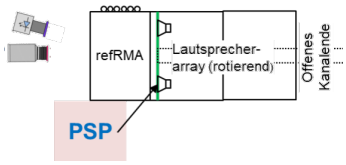

Abbildung 3: Aufbau zur Untersuchung des akustischen Nahfeldes eines Lautsprechers mittels iPSP-Messtechnik und Radialmodenanalyse

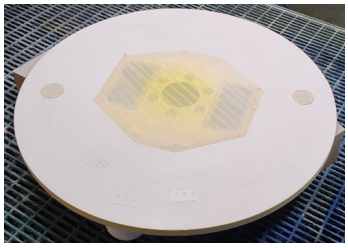

Abbildung 4: Lautsprecherscheibe mit iPSP-Beschichtung

Das iPSP-Signal weist ein signifikantes Bildrauschen in den Rohbildern auf, das durch die folgenden Signalaufbereitungsschritte reduziert wird:

- Berechnung der Kameramatrizen anhand von Markern auf der iPSP-Oberfläche und Projektion der Daten auf ein 3D-Modell des Kanals (Projektionsgenauigkeit $< 0{,}9$ mm),
- pixelweise Bandpassfilterung zwischen 1 und 5 kHz,
- Anwendung der Robust Principal Component Analysis (RPCA) [10] auf die Bildmatrix mit anschließender Rekonstruktion auf Basis der 20 stärksten RPCA-Komponenten,
- Kompensation der linearen Temperaturdegradation der LEDs mittels linearer Regression.

Abschließend erfolgt die Umrechnung der Lichtintensitätsverteilung in eine räumliche Druckverteilung durch energetische Normierung der Signale an Referenzpunkten auf dem iPSP-Messfeld mit den Signalen der Referenzmikrofone im Bildbereich der Kameras.

Ergebnisse

Visualierung einzelner Kanalmoden

Zur Anregung einzelner Azimutalmoden bei diskreten Frequenzen wurde der Lautsprecher bei einer Rotationsfrequenz $f_{rot} \approx 10$ Hz mit der Drehordnung 200 angeregt. Aufgrund des Dopplereffekts werden so mehrere, benachbarte Drehordnungen angeregt, wie in Abb. 5 gezeigt. Die Schalldruckpegel steigen von der Drehordnung 200 zunächst zu höheren und tieferen Drehordnungen an und fallen dann schlagartig ab. Abbildung 6 zeigt das mit dem Ringarray ermittelte Azimutalmodenspektrum, das die Anregung einzelner Modenordnungen bei diskreten Drehordnungen nachweist. Die angeregten Moden liegen jeweils mindestens 20 dB über den Pegeln der sonstigen Moden bei der selben Drehordnung. Der Bereich der ausbreitungsfähigen Moden liegt in diesem Fall zwischen $m = -7$ und $m = +7$.
Das iPSP-Ergebnis für die Mode $m = 6$ bei der Dreh-

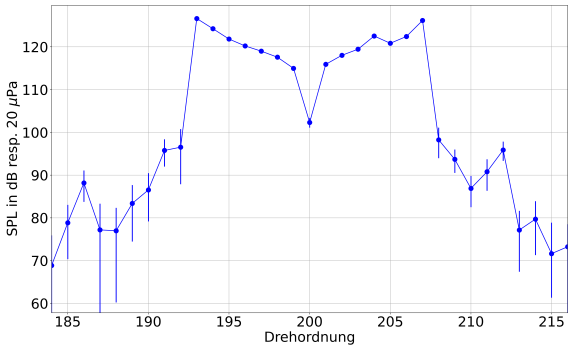

Abbildung 5: Rotorsynchron gemitteltes Schalldruckspektrum bei Anregung mit Drehordnung 200, gemessen mit dem Mikrofonarray

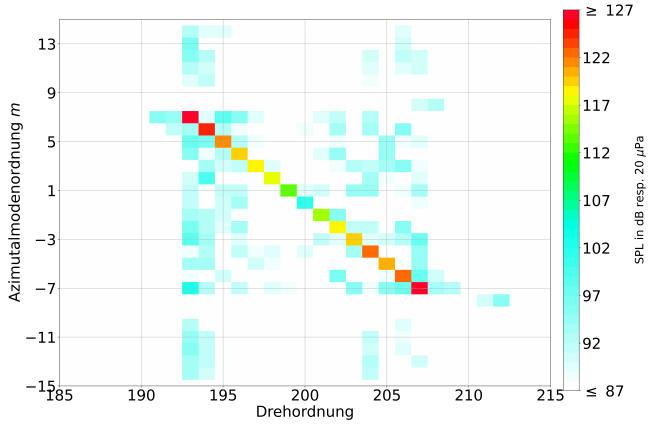

Abbildung 6: Azimutalmodenspektrum bei rotorsynchroner Anregung mit Drehordnung 200, ausgewertet mit dem Ringarray

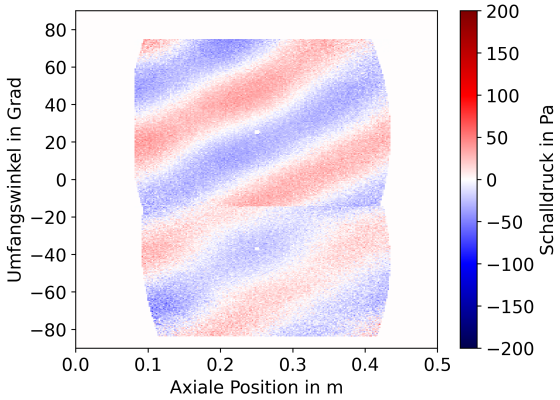

Abbildung 7: Schalldruckverteilung des iPSP-Ergebnisses bei Drehordnung 194 mit der einzelnen Mode (6,0)

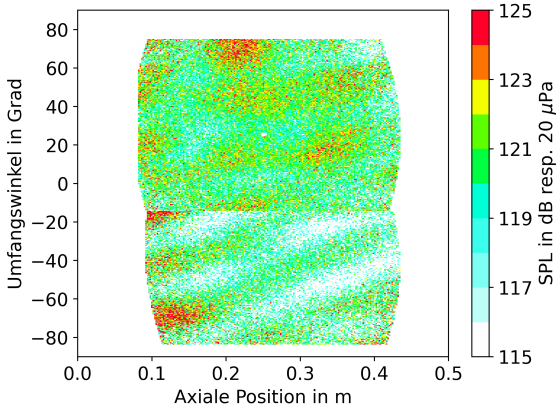

Abbildung 8: Pegelverteilung des iPSP-Ergebnisses bei Drehordnung 194 mit der einzelnen Mode (6,0)

ordnung 194 ist in Abb. 7 dargestellt. Die Wellenfronten sind klar erkennbar. Ebenso ist ein kontinuierlicher Übergang zwischen dem oberen und unteren Bildbereich erkennbar. Das iPSP-Ergebnis weist gewisse Störungen in Form einer leichten Welligkeit der Wellenfronten sowie einer ungleichmäßigen Pegelverteilung auf (siehe Abb. 8), obwohl eine einzelne Mode zu einer gleichmäßigen Pegelverteilung führen sollte. Diese Störungen können zum einen auf schwächere, reflektierte Schallfeldanteile sowie Schwingungen des Rohres und zum anderen auf Artefakte der RPCA-Filterung zurückgeführt werden.

Messung des akustischen Nahfeldes

Das Ergebnis der Nahfeldmessung mit der iPSP-Messtechnik bei einer Anregungsfrequenz von 3 kHz ist in Abb. 9 gezeigt. Hierbei ist zu beachten, dass der mittlere Bereich nicht mit iPSP beschichtet wurde, siehe maskierter Bereich in Abb. 4. In der Nähe des aktiven Lautsprechers (horizontale Position: -0.2; vertikale Position: -0.05) treten die höchsten Intensitätsquotienten, welche den größten Druckamplituden entsprechen, auf. Der gegenüberliegende Lautsprecher wurde hier nicht betrieben. Über die gesamte Lautsprecherscheibe verteilt, stellt sich ein ausgeprägtes, stehendes Wellenfeld ein, dass aus der gleich starken Anregung positiver und negativer Azimutalmodenordnungen resultiert. Es ist kein eindeutiges Modenmuster zu beobachten, obwohl die Cut-on-Frequenz der Mode $(\pm 12, 0)$ nur ca. 30 Hz oberhalb der Anregungsfrequenz liegt und somit eine erhöhte Anregung zu erwarten wäre.

Diskussion

Die hochaufgelösten iPSP-Ergebnisse ermöglichen eine Validierung der Radialmodenanalyse und des zugrundeliegenden Modenmodells. Das Maximum der räumlichen Fourier-Transformation in axiale Richtung liefert zum einen die Radialmodenamplitude der Mode (6,0) von ca. 115,9 dB und zum anderen die axiale Wellenzahl von ca. 21,1 rad/m. Das analytische Modenmodell berechnet eine axiale Wellenzahl der Mode (6,0) von 19,4 rad/m, was einer Abweichung von ungefähr acht Prozent entspricht. Die zugehörige Modenamplitude aus der Radialmodenanalyse entspricht ca. 116,2 dB. Die Radialmodenanalyse liefert darüber hinaus die Amplitude der am Kanalende reflektierten Mode mit ca. 93,9 dB. Der große Pegelabstand zwischen der abgestrahlten und der reflektierten Mode von mehr als 22 dB lässt die reflektierten Schallfeldanteile als Ursache der in Abb. 7 beobachteten Welligkeit der Wellenfronten als unwahrscheinlich erscheinen.
Die Schalldruckverteilung im Nahfeld des Lautsprechers kann mit der anhand des Quellmodells für einen Monopol nach [1] analytisch berechneten Schalldruckverteilung in Abb. 10 verglichen werden. Der Bereich des höchsten Schalldrucks um die Position des aktiven Lautsprechers

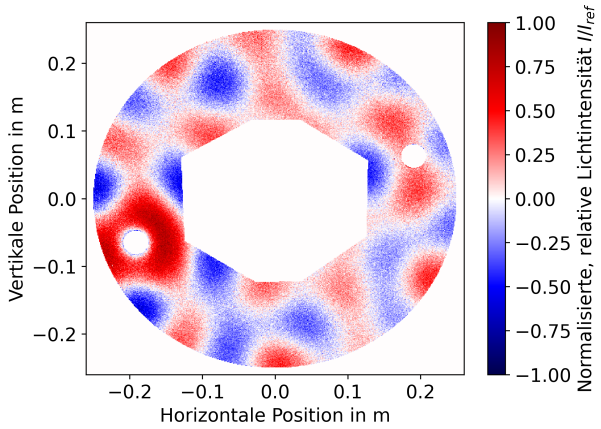

Abbildung 9: Normalisierte Lichtintensitätsverteilung des iPSP-Ergebnisses

stimmt sehr gut überein. Die mit dem Modell berechneten Verteilungen der Wellenmaxima und -minima passen ebenfalls sehr gut zu den mit der iPSP-Messtechnik gemessenen Verteilungen.

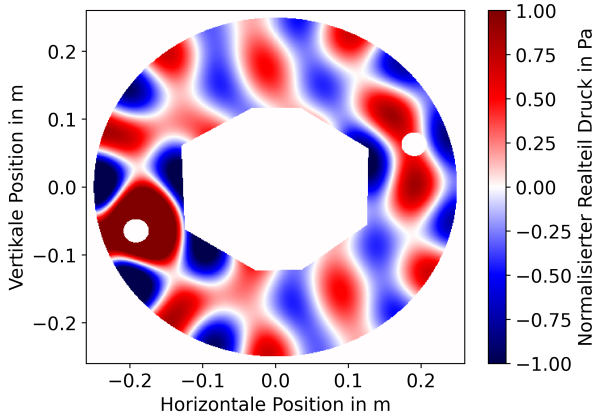

Abbildung 10: Normalisierte Schalldruckverteilung auf der Lautsprecherscheibe, mit einem analytischen Quellmodell berechnet [1]

Fazit

In zwei Messserien wurde die iPSP-Messtechnik zur Realisierung zeitlich und räumlich hochaufgelöster Schalldruckmessungen in für die Turbomaschinenakustik relevanten Messumgebungen eingesetzt. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass die iPSP-Messtechnik die Schalldrucksignatur der Kanalmoden und das stehende Wellenfeld im Nahfeld des Lautsprechers sauber auflösen kann. Durch gleichzeitige Messung mit einem Mikrofonarray und der anschließenden Durchführung der Radialmodenanalyse konnten die iPSP-Ergebnisse zur Validierung des analytischen Modenmodells eingesetzt werden. Eine Validierung des Modells der Modenanregung durch eine Monopolquelle wird durch Vergleich der gemessenen und der berechneten Schalldruckverteilung auf der Lautsprecherscheibe ermöglicht, die eine sehr gute Übereinstimmung aufweisen.

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass die iPSP-Messtechnik für den Einsatz in der Turbomaschinenakustik gut geeignet ist und insbesondere für Detailuntersuchungen zur Schallanregung in der Nähe der Quellgebiete sowie zur Schallausbreitung eingesetzt werden kann.

Danksagung

Die technische Unterstützung von Tobias Kleindienst, Carsten Fuchs und Tobias Herrmann (alle DLR Göttingen) bei der Integration der LED- und Kameratechnik an die Versuchsanlage wird ausdrücklich dankend hervorgehoben.

Literatur

[1] Tapken, U.: Analyse und Synthese Akustischer Interaktionsmoden von Turbomaschinen. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin (2016), DOI: 10.14279/depositonce-5124

[2] Weckmüller, C.; Guérin, S.; Enghardt, L.; Hurst, J.: Acoustic eigenmode analysis for ducted inhomogeneous mean flow. 20th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (2014), DOI: 10.2514/6.2014-3117

[3] Klähn, L.; Behn, M.; Enghardt, L.: Messtechnische Analyse von Schallmoden in Strömungen mit Umfangsinhomogenitäten. DAGA 2020 - 46. Jahrestagung für Akustik (2020)

[4] Liu, T.; Sullivan, J.P.; Asai, K.; Klein, C.; Egami, Y.: Pressure and Temperature Sensitive Paints. Springer International Publishing, 2021, DOI: 10.1007/978-3-030-68056-5

[5] Gößling, J.; Ahlefeldt, T.; Hilfer, M.: Experimental validation of unsteady pressure-sensitive paint for acoustic applications. Exp. Therm. Fluid Sci. 112 (2020), DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2019.109915

[6] Salant, R.F.; Alwang, W.G.; Cavanaugh, L.A.; Sammartino, E.: Visualization of Standing Acoustic Waves Using Time-Averaged Optical Holographic Interferometry. J. Acoust. Soc. Am. 44 (1968), DOI: 10.1121/1.1911321

[7] Russell, D.A.; Parker, D.E.; Hughes, R.S.: Analysis of standing sound waves using holographic interferometry. Am. J. Phys. 77 (2009), DOI: 10.1119/1.3147683

[8] Park, J.: Visualization of Acoustic Standing Waves in a Closed Pipe Based on an Electronic Speckle Pattern Interferometer. J. Korean Phys. Soc. 77 (2020), DOI: 10.3938/jkps.77.229

[9] Scroggin, A.M.; Slamovich, E.B.; Crafton, J.W.; Lachendro, N.; Sullivan, J.P.: Porous polymer/ceramic composites for luminescence-based temperature and pressure measurement. MRS Online Proceedings Library 560(1) (1999), DOI: 10.1557/PROC-560-347

[10] Candès, E.J.; Li, X.; Ma, Y.; Wright, J.: Robust principal component analysis? J. ACM 58(3) (2011), DOI: 10.1145/1970392.1970395