

# Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung

## Geschichtlicher Überblick

Das heutige Institut für Elektrische Messtechnik und Messsignalverarbeitung wurde als Institut für Allgemeine Elektrotechnik und Elektrische Messtechnik im Jahr 1971 gegründet. Im November 1972 wurde dann Dipl.-Ing. Dr. Harald Weiß als Institutsvorstand ernannt. Nach längeren Verhandlungen mit dem Ministerium bezüglich Personal und Dotationen konnte dann im August 1973 der Institutsbetrieb aufgenommen werden.

Bis zu diesem Zeitpunkt wurden die Allgemeine Elektrotechnik und die Elektrische Messtechnik von den Instituten für Grundlagen der Elektrotechnik und Theoretische Elektrotechnik, Vorstand Prof. Dr. Peter Klaudy, und Elektromagnetische Energieumwandlung, Vorstand Prof. Dr. Gerhard Aichholzer, betreut.

Zunächst waren die Räumlichkeiten des Institutes sehr begrenzt (etwa 360 m<sup>2</sup>) und extrem ungünstig, nämlich etwa gleichmäßig über 4 Stockwerke des Gebäudes Kopernikusgasse 24 verteilt. Dazu kam die große Belastung, die die Planung und Einrichtung eines neu gegründeten experimentell orientierten Institutes für das Institutspersonal nun einmal bedingt. Zudem musste gleichzeitig auch der Vorlesungs- und Laborbetrieb aufgenommen werden. Dies alles war nur durch den beispiellosen Einsatz aller Mitarbeiter möglich.

Im Jahr 1980 erfolgte dann, entgegen dem einstimmigen Beschluss der Fakultät und trotz massiven Protestes der Institutsangehörigen, die Zusammenlegung des Institutes mit dem Institut für Regelungstechnik (Prof. Dr. Gert Schneider) in der Krenngasse zum Institut für „Allgemeine Elektrotechnik und Elektrische Mess- und Regelungstechnik“ durch das damalige Ministerium für Wissenschaft und Forschung. Diese Zusammenlegung führte zu Schwierigkeiten vor allem auch in der Verwaltung durch die große räumliche Trennung beider Institute. Erst durch den großen Einsatz der Fakultät und des damaligen Dekans, Prof. Dr. Kurt Richter, gelang es, die Zusammenlegung im Jahr 1984 wieder rückgängig zu machen.

Die räumliche Situation besserte sich erst etwas nach Auszug der Mathematik Institute und der Übernahme ihrer Räume im 4. Stock des Traktes Stremayrgasse (von insgesamt etwa 520 m<sup>2</sup>).

Trotz intensiver Bemühungen konnte das wissenschaftliche Personal von vier Assistentenplanstellen im Jahr 1974 nur auf sieben Stellen (je eine 1983, 1987 und 1991) erweitert werden. Zwei Planstellen für nichtwissenschaftliche Mitarbeiter sind bereits seit 1973

bewilligt. Eine Aufstockung war hier überhaupt nicht möglich. Mit 1.3.1999 begann Dipl.-Ing. Dr.techn. Georg Brasseur seine Tätigkeit am Institut, er wurde mit 1.4.1999 als neuer Ordinarius bestellt.

## Bemerkenswertes aus Lehre und Forschung

Die Lehre auf den Gebieten Allgemeine Elektrotechnik und Elektrische Messtechnik wurde bereits im Studienjahr 1973/74 mit 7 Vorlesungs- und Laborlehrveranstaltungen aufgenommen. Im Studienjahr 1984/85 wurde dann die Wahlfachgruppe „Grundlagenforschung, Schwerpunkt Elektrische Messtechnik“ eingeführt, wodurch die gesamte Lehrveranstaltungsanzahl auf 15 anstieg.

Ab dem Studienjahr 1985/86 betreut das Institut auch noch Hörer der Studienrichtung Telematik.

Nach Einrichtung der Laboratorien konnten bereits um 1975 auf den damaligen Forschungsschwerpunkten, wie Messung radioaktiver Aerosole und Kernreaktormess- und -schutztechnik einige grundlegende Ergebnisse erzielt werden. Im weiteren wurden insbesondere Untersuchungen über die Informationsgewinnung aus stochastischen Signalen von Nuklear-Messumformern unter Anwendung höherer Signalmomente durchgeführt, wobei auch nichtlineare Signalverarbeitung beachtet wurde.

Ein weiteres Arbeitsgebiet befasste sich mit Zuverlässigkeits- und Sicherheitsfragen in der Messtechnik. So wurden Fehlereffekt- und Ausfallbetrachtungen an dynamischen Reaktorschutzsystemen vorgenommen. In diesem Zusammenhang waren Mitarbeiter des Institutes auch an der Überprüfung der Sicherheits- und Schutzsysteme des Kernkraftwerkes Zwentendorf beteiligt.

Die digitale Messsignalverarbeitung ist schon über 15 Jahre ein weiterer wichtiger Schwerpunkt der Institutsforschung. Die ersten Untersuchungen bezogen sich auf Überwachung von digitalen Signalverarbeitungsstrukturen und später wurden auch Signale von Messumformern für die verschiedensten Messgrößen betrachtet. Gegen Ende der 80er Jahre begannen dann Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Laseranwendungen in der Messtechnik, wobei zunächst Laser-Doppler-Anemometer zur Strömungsgeschwindigkeitsmessung untersucht wurden.

Die berührungslose Messung von Dehnungen an Materialproben mittels Laser-Speckle-Interferometrie und Laser-Speckle-Korrelationstechnik ist seither zu einem wesentlichen Arbeitsgebiet des Institutes geworden. In

diesem Zusammenhang besteht eine intensive Kooperation mit den Instituten für Materialphysik und Physikalische Chemie-Werkstoffwissenschaften der Universität Wien vor allem im Rahmen des internationalen Projektes COST 510 „Laser Techniques for Non-contacting Strain Measurements at High Temperatures“, an dem auch mehrere deutsche Partner beteiligt sind. Es zeigte sich bald, dass diese Forschungsvorhaben besonders aktuell für Messungen von Dehnungen an Materialproben mit extrem kleinen Abmessungen bis in den Mikrometerbereich und deren Einsatz in der Mikrosystemtechnik sind. In diesem Rahmen ist auch das vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung bewilligte Projekt „The Development and Application of Laser-Optical-Sensors for the Study of Macro- and Micro-deformation Parameters of Advanced Material“ zu sehen.

Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit mit der Universität Wien konnten Prototypen von Laser-Speckle-Dehnungsmessgeräten entwickelt werden, die nun im Zuge eines Projektes mit der Firma Meßphysik Ges.m.b.H., Fürstenfeld, das durch den Forschungsförderungsfonds der gewerblichen Wirtschaft gefördert wird, zu einem „Laser-Speckle-Extensometer“ für kommerzielle Anwendungen weiterentwickelt werden sollen.

### **Einige spezielle Forschungsschwerpunkte des Instituts**

#### **Hybrid optisch-digitale Signalverarbeitung in der Laser-Speckle-Messtechnik**

Berührungslos arbeitende Laser-Speckle-Messtechniken werden am Institut und den oben genannten Partnerinstituten der Universität Wien unter anderem zur Ermittlung von Werkstoffparametern neuer Materialien bei Betriebstemperaturen höher als 1000 °C eingesetzt. Dabei sind Verschiebungen und Dehnungen mit großen Auflösungen zu erfassen. Aufgrund der sehr hohen Temperaturen der zu untersuchenden Materialproben sind herkömmliche berührende Messverfahren nicht einsetzbar. Bei Verwendung optischer Laser-Speckle-Messverfahren sind zur Messwertgewinnung aus den mit Hilfe von CCD-Flächenkameras erfassten Signalen geeignete, zweidimensionale (Bild-) Verarbeitungsalgorithmen erforderlich. Selbst bei Einsatz von schnellen Berechnungsmethoden (wie z.B. der numerisch sehr effizienten Fast-Fourier-Transformation) und extrem leistungsfähigen Signalprozessoren oder PCs benötigt – speziell bei einer größeren Anzahl von Bildpunkten – die Auswertung eine nicht unerhebliche Zeit. Der Einsatz von kommerziell verfügbaren

Highspeed-Kameras ist deshalb unmöglich, selbst bei videonormkompatiblen Signalen ist man weit von einer „Echtzeitverarbeitung“ innerhalb des zeitlichen Rahmens der Vollbildwechsel entfernt. Alle Arten von Realtime-Anwendungen, z.B. belastungsdynamischen Materialuntersuchungen, sind dieser eleganten optischen Messmethode nicht zugänglich.

Deshalb wurde versucht, die notwendige Signalverarbeitung – zumindest teilweise – auf optischem Weg extrem schnell (mit Lichtgeschwindigkeit) durchzuführen. Da dies in der Laser-Speckle-Korrelationsmesstechnik einen völlig neuen Ansatz darstellte, musste die bestehende Theorie zur Fourieroptik entsprechend adaptiert und im Zusammenhang mit der Laser-Speckle-Theorie betrachtet werden. Hauptansatzpunkt der Forschungsarbeit war die Reduzierung der zweidimensionalen, statistischen Speckle-Signale bzw. Bilder auf eindimensionale Signale, aus denen die für bestimmte Aufgabenstellungen gleichen Informationen extrahiert werden können. Eindimensionale digitale Signalverarbeitungsalgorithmen können um den Faktor  $n^2$  schneller als zweidimensionale ausgeführt werden, wobei  $n^2$  die Anzahl der Bildpunkte im zu verarbeitenden zweidimensionalen Bildsignal ist. Äußerst günstig auf die Reduzierung von Messabweichungen wirkt sich eine möglichst hohe Anzahl von Bildpunkten aus. Deshalb steigt der Geschwindigkeitsvorteil des entwickelten Messverfahrens im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren mit zweidimensionaler digitaler Signalverarbeitung besonders bei hoch qualitativen Messungen stark an. Die Reduzierung des zweidimensionalen Problems auf ein eindimensionales wird mit Hilfe der sogenannten kohärenten optischen Fourierfilterung vorgenommen. Fouriertransformationslinsen bzw. -objektive liefern in der sogenannten Fourierebene (zweidimensionale) Fouriertransformationen, wobei jeweils vor Rücktransformation in die Bildebene das Spektrum der Raumfrequenzen (auch Ortsfrequenzen genannt) mittels geeigneter räumlicher Filterung entsprechend verändert wird. Die Wahl der Filterfunktion beeinflusst in hohem Maße die zu erzielenden Messergebnisse bzw. deren Standardabweichung. In diesem Zusammenhang ist auch der übertragbare Raumfrequenzgehalt zu sehen: Zur Erzielung hoher Ortsauflösungen in der Bildebene ist es i.a. notwendig, hohe Raumfrequenzen bzw. Signalbandbreiten zuzulassen.

Das auf elektrischer Basis weiterzuverarbeitende eindimensionale Signal kann vielfältigen (digitalen) Signalverarbeitungsmethoden zur Bestimmung der gesuchten Verschiebungen bzw. Dehnungen unterzogen werden. Eine

der robustesten ist die Korrelationsanalyse, sie stellte den Ausgangspunkt der Bemühungen dar. In Bezug auf verbesserte Auflösung und höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit wurde eine optimale digitale Signalverarbeitung entwickelt und auf ihr Verhalten im praktischen Einsatz getestet, wodurch eine äußerst zufriedenstellende Funktionsweise des Gesamtsystems nachgewiesen werden konnte.



Abb.1: Laboraufbau

Oben abgebildet befindet sich ein erster Laboraufbau während der Entwicklung des neuen Messverfahrens.

### Störsignalkompensationsverfahren in der Laser-Speckle-Korrelation

Wird eine optisch raue Oberfläche von einem kohärenten Lichtbündel beleuchtet, so zeigt das reflektierte Licht eine granulare Struktur. Ist die Lichtquelle ein Laserstrahl, so spricht man dabei von Laser-Speckles. Die kohärenten Wellen, die an den einzelnen unebenen Oberflächenelementen gestreut werden, interferieren im Raum und bilden beim Betrachter das Specklemuster. Dieses Muster hat zwar eine Beziehung zu den makroskopischen Eigenschaften der Oberfläche, es scheint aber chaotisch und ungeordnet zu sein. Nur mit Methoden der Statistik und Wahrscheinlichkeitstheorie lässt es sich einfach beschreiben. Der Nutzen, den dieses räumliche Rauschsignal mit sich bringt, liegt in der Realisierung rein optischer Verfahren zur Bestimmung von Oberflächendeformationen für eine große Gruppe von Objektmaterialien und ohne sie vorbehandeln zu müssen. Dabei werden zwei Bilder von der beleuchteten Oberfläche aufgenommen, eines vor und eines während der Objektmanipulation. Die Auswertung dieser beiden Bilder erfolgt mit der Kreuzkorrelationsanalyse, die die Größe der Verschiebung des Specklemusters und somit der Oberfläche feststellt. Aus diesem Grund wird das Verfahren als Laser-Speckle-Korrelation (LSK) bezeichnet,

der ausgeführte LSK-Sensor besteht im Wesentlichen aus Laserlichtquelle, Abbildungsoptik und Kamera. Anwendung findet diese Messtechnik bei Zugprüfmaschinen der Werkstoffprüfung mit besonders hohen Temperaturen. Das zu untersuchende Material erfährt bei Temperaturen über 1000°C mit oder ohne äußere Kraft eine mechanische Verformung, deren Größe Auskunft über seine mechanischen Eigenschaften gibt. Aufgrund der hohen Temperaturen scheiden herkömmliche, kontaktbehaftete Sensoren wie etwa Dehnungsmessstreifen aus, so dass in erster Linie nur optische Verfahren, wie das Laser-Speckle-Korrelationsverfahren ihren Einsatz rechtfertigen.

Nachteilig bei speziell dieser Anwendung sind jedoch die optischen Eigenschaften des Mediums zwischen Oberfläche und Kamera. Durch den großen Temperaturunterschied entstehen Brechungsindexschwankungen, die eine fehlerfreie Abbildung der Oberfläche auf die Kamera nicht mehr ermöglichen. Dieser Störeffekt, der bei besonders hohen Proben temperaturen bemerkbar ist, bildet eine physikalische Grenze der LSK-Messtechnik. Ziel dieser Forschungsarbeit ist es, die Wirkung der Hochtemperatureinflüsse der Laser-Speckle-Korrelation bei hohen Proben temperaturen zu kompensieren. In erster Linie handelt es sich dabei um Temperaturströmungsvorgänge zwischen Werkstoff und Aufnahmekamera. Diese besitzen zusätzlich zeitlich veränderliches Verhalten, was die Korrelations-Messmethode zur Dehnungsmessung besonders beeinträchtigt. In einfachen Versuchen sind am institutseigenen Hochtemperaturofen Messungen durchgeführt worden. Dadurch konnte erstmals eine grobe Abschätzung der Auswirkungen erhalten werden. Geeignete Darstellungen lassen erkennen, dass der Strömungseinfluss sich in erster Näherung wie eine reine In-Plane-Verschiebung der Probe in zufälliger Richtung verhält. Zeitverlauf und

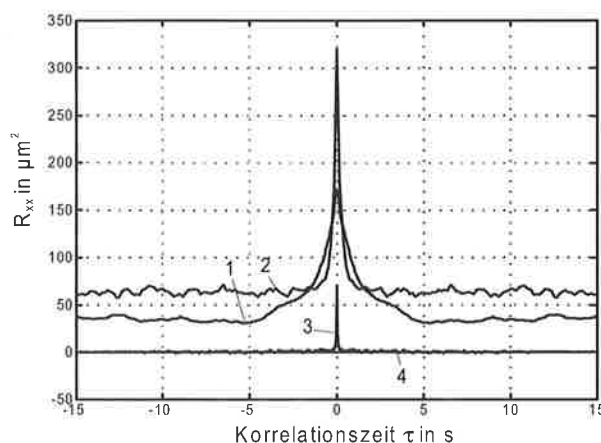
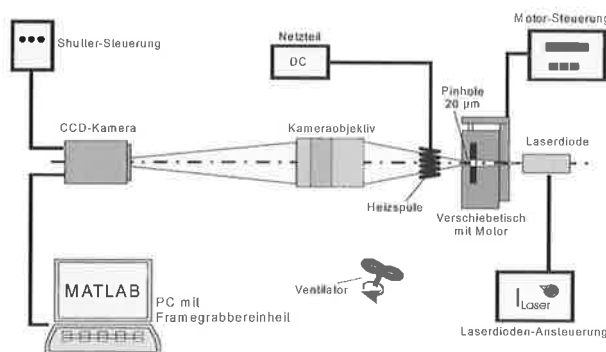


Abb.2: In-Plane-Verschiebung bei unterschiedlichen Strömungen

Stärke dieser Verschiebungen sind direkt mit der laminaren bzw. turbulenten Temperaturströmung (entsprechend den strömungstechnischen Gegebenheiten) zwischen Objekt und Linse verknüpft. Eine detaillierte Analyse des zeitlichen Verhaltens ist dabei notwendig, um die Verschiebungseinflüsse zumindest statistisch beschreiben zu können. Die oben stehende Abbildung zeigt das zeitliche Korrelogramm der In-Plane-Verschiebung bei unterschiedlichen Strömungsverhältnissen: 1) schwach turbulente Strömung, 2) gemäßigt turbulente Strömung, 3) stark turbulente Strömung und 4) kein Strömungseinfluss. Die wesentlichen Einflussfaktoren sind Temperaturverteilung (eigentlich Temperaturgradientenverteilung) und die geometrische Anordnung (Abstand Probe zur Linse, optischer Vergrößerungsmaßstab, Objektgröße, Blendendurchmesser). Letztere ist maßgebend für die Anwendung der oben angeführten Näherung. Bei Überschreiten gewisser geometrischer Bedingungen lässt sich die reine Gesamtobjekt-In-Plane-Verschiebung nicht mehr feststellen, sondern eine unterschiedliche In-Plane-Verschiebung unterschiedlicher Objektsektoren der Objektoberfläche tritt auf. Bei noch stärkerer Überschreitung erkennt man Effekte wie Defokussierung (virtuelle Out-Of-Plane-Verschiebung) sowie Aberrationen höherer Ordnung. Ab diesem Zustand lassen sich keine „passiven“ Kompensationsmethoden mehr anwenden, Abhilfe schafft hier nur mehr die Anwendung „aktiver“ Systeme, welche dem Gebiet der



**Abb.3: Messanordnung aus optischen, mechanischen und elektrischen Komponenten**

adaptiven Optik zuzuordnen sind.

Ein Teil dieser Forschungsarbeit behandelt die wesentlichen Störeffekte, die für die Laser-Speckle-Korrelation speziell an bestehenden Zugprüfmaschinen in Frage kommen. Hierzu wurde, wie in der Abbildung skizziert, eine geeignete Anordnung aus optischen, mechanischen und elektronischen Komponenten aufgebaut, die im Gegensatz zum institutseigenen evakuierbaren Heizofen auch unterschiedliche Strömungsvorgänge zu erzeugen

und untersuchen erlaubt. Ebenso sind Simulationen, die diese Effekte durch Näherungsformalismen berechnen, im Einsatz. Mit geeigneten Kenngrößen, wie z.B. dem Signal-Rauschverhältnis (SNR) bei aktivierter und deaktivierter Kompensation lässt sich die Qualität der Verfahren einfach beurteilen. Im Prinzip handelt es sich bei diesem Verfahren um Methoden zur Auffindung und Positionsbestimmung bestimmter Merkmale, die zusätzlich auf die speckleerzeugende Oberfläche projiziert werden. Diese Bilder enthalten dadurch zwei Arten von Informationen: einerseits die Verschiebung des Specklemusters durch Objektbewegung und Temperaturgradienten, andererseits die Verschiebung des Projektionsmusters ausschließlich durch den Temperaturgradienten. Das Ziel, die reine Objektbewegung zu extrahieren, ist bei Kenntnis dieser beiden Information in gewissen Bereichen möglich. Die Verschiebung des Specklemusters wird mit der zweidimensionalen Korrelationsanalyse festgestellt, die Positionsbestimmung des Projektionsmusters erfolgt mit üblichen bildverarbeitenden Verfahren. Gängige Methoden wie etwa Schwerpunktsbestimmung, Schwellwertüberschreitung bei scharfen Kantenübergängen oder auch Methoden aus der Optimierung wie z.B. Parameterschätzverfahren bilden dabei den Kern dieser Ausführungen. Einen wesentlichen Beitrag liefern auch Bildbearbeitungsalgorithmen wie einfache Tiefpassfilter, morphologische Graustufenoperatoren oder aufwendigere Verfahren, die gezielt statistische Größen des aufgenommenen Bildes (z.B. Varianz) modifizieren.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist es, Lösungen vorzustellen, wie bereits bestehende Laser-Speckle-Korrelationssysteme mit nur geringem zusätzlichem Hardwareaufwand ergänzt werden müssen, um das Anwendungsgebiet dieses Messverfahrens wesentlich erweitern zu können.