

# Optische Verformungsmessungen an Mikrosystemen bei extremen Temperaturdifferenzen

Markus Fratz, Daniel Carl, Fraunhofer IPM, Freiburg  
Roderich Zeiser, Michael Berndt, Universität Freiburg

Die dynamische Messung schneller mikroskopischer Verformungen unter starken thermischen Belastungen stellt eine erhebliche technische Herausforderung dar. An einer Lösung besteht in vielen Bereichen der Industrie großes Interesse. Wir beschreiben im Folgenden ein erfolgreich umgesetztes Konzept zum Aufbau eines geeigneten Messsystems.

Wer würde sich nicht wünschen, den Benzinverbrauch um 30% reduzieren zu können? Ein vielversprechender Ansatz zur Erlangung dieses Ziels liegt in der Kompressionszündung mit ihrem deutlich höheren Wirkungsgrad. Allerdings ist bei Benzin aufgrund der hohen Reaktionskinetik eine homogene Flammfront (d.h. „Klopffreiheit“) und eine Langlebigkeit der Selbstzünder nur mit moderner Regelungstechnik und geeigneter Sensorik möglich.

An die noch zu entwickelnde Sensorik im Brennraum werden somit hohe Erwartungen gestellt. Temperaturdifferenzen von deutlich mehr als 500 K sind eine unbewältigte Herausforderung an eine zuverlässige Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT). Eine Schlüsselkompetenz zur Entwicklung und Optimierung neuartiger Sensorik in der AVT ist die flächenhafte Messung der tatsächlichen Form- und Dehnungsänderung mit hoher Orts- und Zeitauflösung unter thermischer Last.

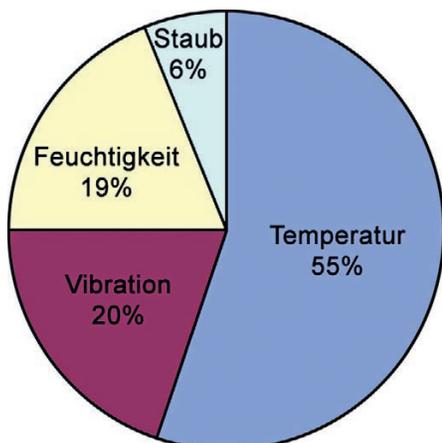


Bild 1: Ausfallursachen elektronischer Baugruppen [2]

## 1 Folgen hoher Temperaturdifferenzen

Die oben dargestellte Anwendung ist nur ein populäres Beispiel [1] für die Notwendigkeit, das Anwendungsspektrum und die Zuverlässigkeit von Sensoren und Aktoren deutlich zu steigern. Die Lebensdauer wird vor allem durch die Höhe der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  und die Anzahl der thermischen Lastwechsel bestimmt. Andere Ausfallursachen spielen nur eine untergeordnete Rolle (Bild 1).

Mikrosysteme bestehen meist aus einer Kombination verschiedener Werkstoffe, z.B. Siliziumkarbid (SiC) und Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), wie in Bild 2 dargestellt. Deren unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha_{\text{SiC}}$  und  $\alpha_{\text{Al}_2\text{O}_3}$  erzeugen mechanische Spannungen im Bauteil. Die daraus resultierenden Verformungen, beispielsweise ein Biegeradius  $R$ , führen nach einer endlichen Zeit zum

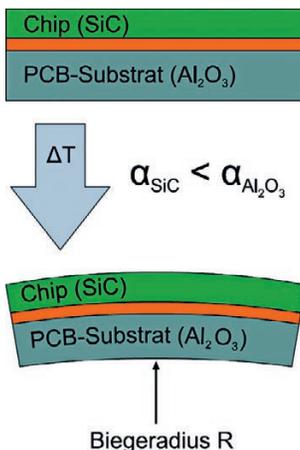


Bild 2: Wirkmechanismus der Verformung durch Temperaturänderung

strukturellen Versagen. Als erste Folge sind offene Kontakte (Risse) zu beobachten.

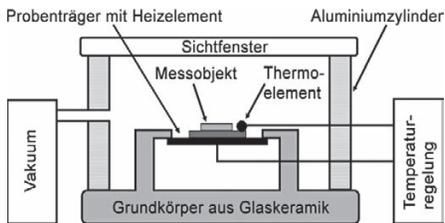
## 2 Grenzen der Simulation

Eine Herausforderung an die Ingenieure besteht darin, nicht nur die reine Funktionalität abzubilden, sondern auch deren Zuverlässigkeit gemäß den Erwartungen aus der Anwendung zu gestalten. Simulationswerkzeuge unterstützen die Lösung dieser Aufgabe, benötigen jedoch präzise Materialkennwerte. Nun ist gerade der Wärmeausdehnungskoeffizient eine von der Temperatur abhängige Größe; und je höher die Temperatur angesetzt wird, desto weniger Koeffizienten sind bekannt. Auch bei bekannten Werten kann bei inhomogenen Bauteilen nicht auf das reale Verhalten geschlossen werden.

Somit sind grundsätzlich die Vorhersagen aus den Simulationen durch Experimente zu bestätigen. Dabei genügt es nicht, mittels thermischer Lastwechsel die charakteristische Lebensdauer [3] zu bestimmen, da bei dieser Vorgehensweise das ursächliche Versagen wie bei einer „Black Box“ im Verborgenen bleibt. Aufklärung bieten hier nur Werkzeuge der flächenhaften Form- und Dehnungsmessung, die mit hinreichender Orts- und Zeitauflösung zusätzlich neue Materialkennwerte generieren [4].

## 3 Typischer Messaufbau

In einem Experiment zur optischen Erfassung der wärmeinduzierten Verformung eines Bauelements wird z.B. eine Platine (PCB-Substrat) mit einem darauf verlöteten elektronischen Schaltkreis (Low-profile Fine-pitch Ball Grid Array, LFBGA) thermisch belastet. Die Belastung erfolgt zyklisch zwischen Raum-



**Bild 3: Vakuummesskammer für optische Messungen bei hohen Temperaturen**

temperatur und bis zu 500°C. Die auf der Platine angeordneten elektrischen Anschlüsse ermöglichen die sofortige Erfassung von Unterbrechungen (Rissen) der Lötstellen zwischen dem Schaltkreis und der Platine. Die Untersuchungen werden in einer Vakuummesskammer (**Bild 3**) durchgeführt, denn in Luft würde die Erwärmung zu Schlieren um das Bauteil führen und die optische Formmessung negativ beeinflussen oder verhindern.

Die Temperatur der Probe wird in dieser Kammer durch Konduktion verändert. Das Aufheizen gelingt derzeit innerhalb einer Minute, wogegen die passive Kühlung einen Abkühlprozess von ca. 20 Minuten bedingt. Das Heizelement (2000 W) kann sich nach unten frei ausdehnen, wodurch seine Oberseite bei Temperaturänderung positionsstabil bleibt. Eine Glaskeramik mit vernachlässigbarer thermischer Ausdehnung dient als Werkstoff für den Grundkörper und die Halterung. Eine Starrkörperverschiebung des Messaufbaus ist somit bestmöglich minimiert. Die Beobachtung des Messobjekts erfolgt durch das Sichtfenster. Die maximal erreichbare Temperatur von 600°C ist derzeit durch die Stabilität der elektrischen Kontaktierung des Heizelements begrenzt.

## 4 Stand der Technik

Die bestehenden Verfahren zur präzisen Verformungsmessung in einem Aufbau wie oben beschrieben lassen sich in zwei Gruppen gliedern: Für den höchsten Genauigkeitsbereich werden in der Regel Verfahren aus dem Bereich der Interferometrie eingesetzt, während für einfachere Messaufgaben triangulatorische Verfahren zum Einsatz kommen.

### 4.1 Triangulation

Aus der Gruppe der triangulatorischen Verfahren wird neben Streifenprojektions- und Lichtschnittverfahren die digitale Grauwertkorrelation häufig zur Messung von Form und Verformung genutzt. Die Funktionsweise eines solchen Systems entspricht der einer Stereokamera mit automatisierter Auswertung: Zwei Kameras nehmen synchron Bilder des gleichen Objekts aus leicht unterschiedlichen Richtungen auf. Anhand

der Unterschiede zwischen den beiden Bildern kann die 3D-Form ebenso wie die Verformung des Prüflings durch Vergleich mehrerer Messungen bestimmt werden.

Die Messraten solcher Systeme sind technisch durch die maximale Bildrate der verwendeten Kameras begrenzt, so dass beispielsweise 40 Messungen pro Sekunde realisiert werden. Die erreichbaren Messgenauigkeiten begrenzen allerdings den Einsatz in der Vermessung mikroskopischer Verformungen. Moderne Systeme ermöglichen Verformungsmessungen mit Genauigkeiten im unteren Mikrometerbereich. Mit solchen Auflösungen lassen sich bereits Versagensursachen lokalisieren [5]. Zur sorgfältigen Erschließung des Themas „Hochtemperaturtechnik“ sind die Anforderungen an die Messgenauigkeit aber mindestens um eine Größenordnung höher.

### 4.2 Specklemuster-Interferometrie

Für Messaufgaben, die höhere Präzision verlangen, kommen in der Regel interferometrische Verfahren zum Einsatz. Das sicherlich meistgenutzte Verfahren aus dieser Gruppe ist die klassische elektronische Specklemuster-Interferometrie (ESPI). Damit werden typische Verformungsmessgenauigkeiten < 100 nm erreicht.

Klassische ESPI-Verfahren nutzen allerdings häufig zeitliche Phasenschiebe-Verfahren. Für die Erfassung aller benötigten Informationen des aktuellen Verformungszustands ist daher stets die Aufnahme einer Folge von Kamerabildern nötig. Während der Aufnahmezeit dieser Bilder muss das zu vermessende Objekt bezüglich Position und Form absolut stabil sein, da ansonsten die Messung verfälscht wird. Das heißt, dass die Messungen nur im thermisch stabil eingeschwungenen Zustand erfolgen können. Die Gesamtzeit, die für eine Versuchsreihe zur Untersuchung der mechanischen Verformung aufgrund thermischer Last benötigt wird, würde dadurch extrem

lang. Die Untersuchung der Folgen dynamischer thermischer Prozesse, wie Lastwechselzyklen, ist praktisch unmöglich.

### 4.3 Mehrwellenlängen-Holographie kombiniert mit ESPI

Als äußerst schnelles und präzises Verfahren zur 3D-Verformungsmessung technischer Oberflächen hat sich in den letzten Jahren die digitale Mehrwellenlängen-Holographie etabliert [6]. Genau wie ESPI-Verfahren beruht die digitale Mehrwellenlängen-Holographie auf Methoden der Interferometrie. Dazu wird Laserlicht der Wellenlänge  $\lambda$  in eine Objekt- und eine Referenzwelle aufgeteilt. Die Objektwelle beleuchtet die zu vermessende Oberfläche (**Bild 4**). Das rückgestreute Licht wird anschließend mit der Referenzwelle überlagert. Das dabei entstehende Interferenzbild wird mit einer Digitalkamera aufgenommen.

Im Gegensatz zu vielen etablierten interferometrischen Verfahren wird hier ein single-shot-Ansatz verfolgt, d.h. nur ein Kamerabild ist erforderlich, um die volle Information über die Objektwelle zu erhalten. Möglich wird dies dadurch, dass die Referenzwelle nicht senkrecht auf den Kamerachip fällt, sondern unter einem kleinen Winkel. Das entstehende Interferenzmuster wird dadurch mit einer räumlichen Trägerwelle beaufschlagt und als räumlich phasengeschobenes Interferogramm bezeichnet.

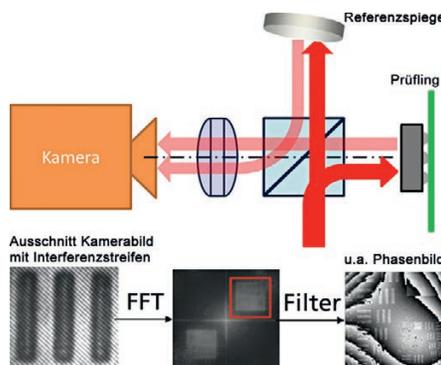
Die räumliche Trägerfrequenz ermöglicht die anschließende Rekonstruktion der komplexen Objektwelle durch zweidimensionale Fouriertransformation, spektrale Filterung und anschließende Rücktransformation [7]. Die komplexe Objektwelle enthält sowohl die Amplitudeninformation, also ein Helligkeitsbild des Objekts, als auch die Phase in jedem Bildpunkt. Die Phase  $\varphi$  trägt dabei die Information über die Form und Verformung  $\Delta z$  des Objekts:

$$\Delta z = \frac{\varphi}{2\pi} \lambda \quad (\text{Gl.1})$$

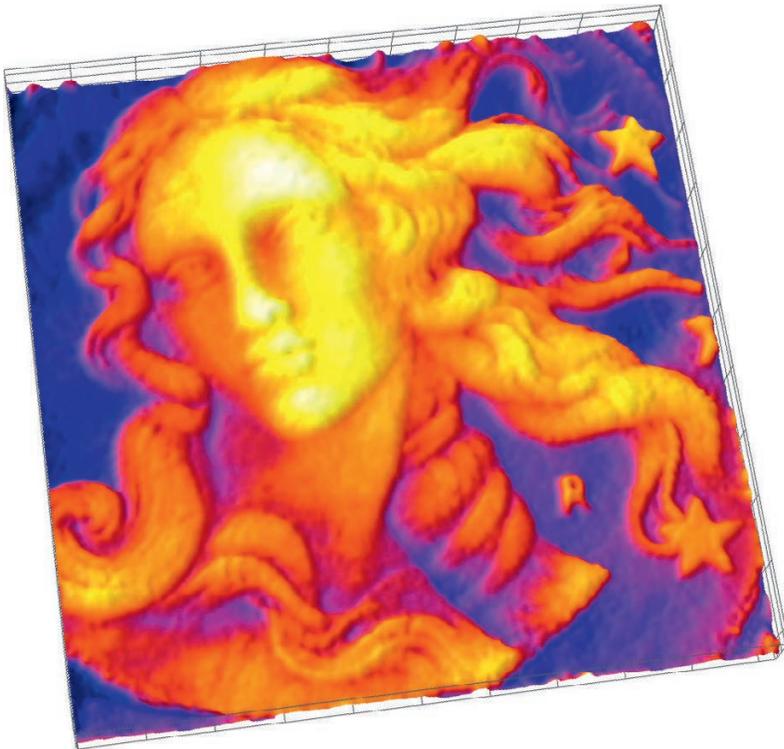
Klassische ESPI-Ansätze sind in ihrem eindeutigen Messbereich in der Regel durch die Wellenlänge  $\lambda$  limitiert, denn nur für Verformungen  $< \lambda/2$  ist das Messergebnis eindeutig einem Verformungsweg zuzuordnen. Diese Einschränkung wird in der digitalen Mehrwellenlängen-Holographie durch die Verwendung mehrerer unterschiedlicher Wellenlängen überwunden. Der eindeutige Messbereich der Verformungsmessung wird dabei auf die sogenannte synthetische Wellenlänge  $\Lambda$  erweitert:

$$\Lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (\text{Gl.2})$$

Dabei kann die synthetische Wellenlänge  $\Lambda$  um mehrere Zehnerpotenzen größer sein



**Bild 4: Prinzipieller Aufbau des digital-holographischen Interferometers mit räumlichem Phasenschieben durch verkippete Referenzwelle**



**Bild 5:** Mit digitaler Mehrwellenholographie können technische Oberflächen mit Mikrometernaflösung vermessen werden (Beispiel: Ausschnitt einer 10-Cent-Münze)

als die Einzelwellenlängen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ , und damit auch der eindeutige Messbereich der Verformungsmessung. Für die 3D-Messtechnik ist die digitale Mehrwellenlängen-Holographie ein durchaus etabliertes Verfahren. Auch an rauen Oberflächen wie z.B. in **Bild 5** sind damit Messauflösungen bis in den Sub- $\mu\text{m}$ -Bereich mühelos erreichbar [6,8]. Durch die Kombination der digitalen Mehrwellenlängen-holographie mit dem Ansatz der elektronischen Speckle-Interferometrie ergeben sich aber darüber hinaus ganz neue Möglichkeiten. So werden Genauigkeiten in der Verformungsmessung im sub-100-nm-Bereich erzielt, während der eindeutige Messbereich weiterhin in der Größenordnung von 10  $\mu\text{m}$  und mehr liegen kann. Durch Verwendung sehr schneller Kameras können mit dieser Methode auch dyna-

mische Verformungsprozesse untersucht werden. So werden in einem bereits realisierten Sensor typische Messraten von 250 Verformungsmessungen pro Sekunde erzielt. Jede der Einzelmessungen besteht dabei aus 1000 x 1000 Messpunkten innerhalb des Messfeldes. Dessen geometrische Größe kann im Bereich einiger Millimeter eingestellt werden.

## 5 Experimentelle Umsetzung und Ergebnisse

In einem Kooperationsprojekt zwischen dem Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) und dem Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg, Fachgebiet Aufbau- und Verbindungstechnik, wird ein System zur Verformungsmessung an Hochtemperaturbauteilen entwi-

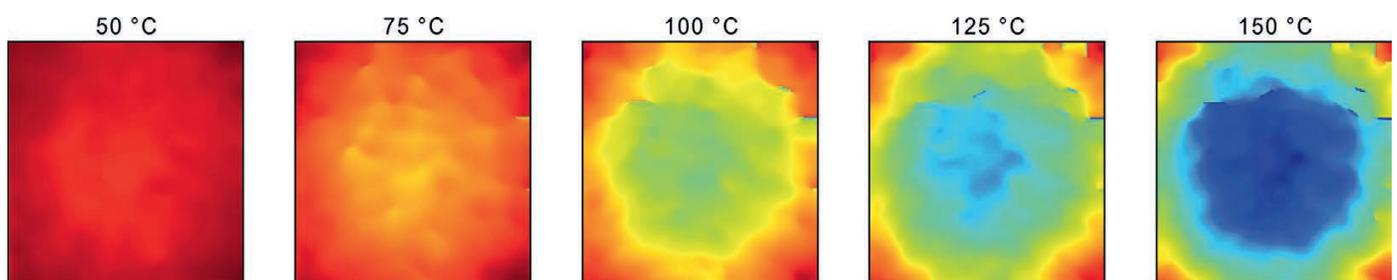


**Bild 6:** Laborsystem zur Form- und Verformungsmessung bei thermischer Beanspruchung

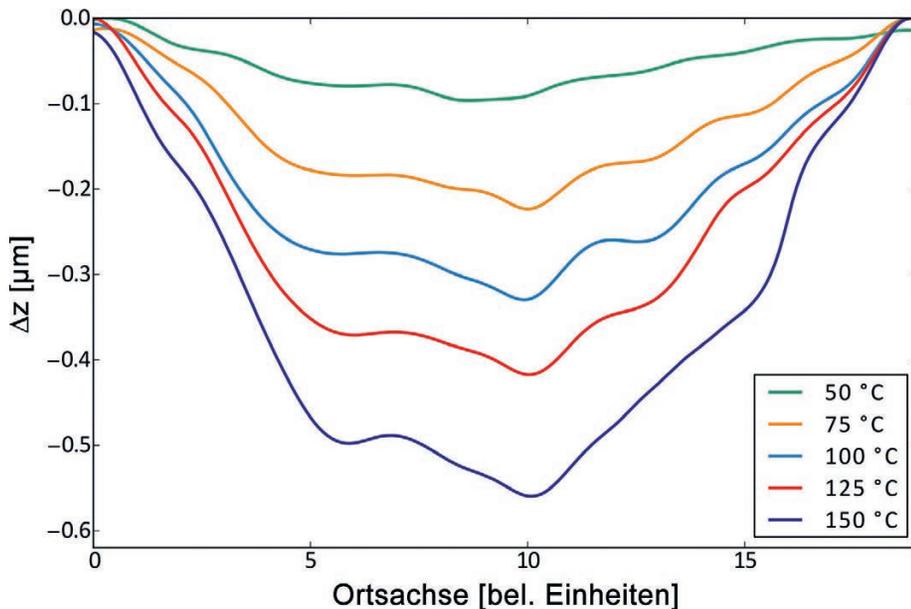
ckelt. Der Laboraufbau ist in **Bild 6** zu sehen. In der oben beschriebenen Vakuumkammer (Bild 3) wird dabei der Prüfling auf einer Heizplatte definiert auf Temperaturen bis 500°C erhitzt. Die Verformung des Prüflings wird optisch mit Hilfe des digitalholographischen Sensors erfasst.

Als Beispiel für die Anwendbarkeit der Methode wurde ein Mikrochip (Micronas Daisy Chain 1031SU0A) auf einem PCB-Substrat thermisch belastet. Die Versuchsanordnung mit dem Prüfling ist in Bild 6 dargestellt. Innerhalb von 10 Sekunden wurde der Chip von 20°C Umgebungstemperatur auf 150°C erhitzt.

Eine Reihe der aufgenommenen Verformungs-Bilder ist in **Bild 7** zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, wie sich das Bauteil während der Erwärmung durchbiegt. Mit größer werdender Temperatur wölbt sich die Mitte des Chips nach unten. **Bild 8** zeigt zu dieser Messung Profilschnitte durch die gemessene Oberflächenverformung. Während der Erwärmung biegt sich das Bauteil im Maximum um 550 nm nach unten durch. Die Messunsicherheit



**Bild 7:** Verformungsmessungen an einem Mikrochip (Micronas Daisy Chain 1031SU0A) auf PCB-Substrat unter thermischer Last bei unterschiedlichen Temperaturen



**Bild 8:** In den Profilschnitten zu Bild 7 ist die Verformung deutlich zu erkennen

der einzelnen Messpunkte liegt dabei deutlich unter 100 nm.

## 4 Fazit und Ausblick

Mithilfe des neuartigen Konzepts lässt sich das mechanische Verhalten von Hochtemperatur-Mikrosystemen unter thermischer Last in höchster Präzision messen. Durch den großen abgedeckten Temperaturbereich bis 500°C lassen sich z.B. Hochtemperatursensoren unter realistischen Umgebungsbedingungen prüfen. Die mechanische Verformung und die damit einhergehenden Belastungen der untersuchten Sensoren, insbesondere der mechanischen Verbindung von Sensorik und Peripherie, lassen sich mit deutlich gesteigerter räumlicher und zeitlicher Auflösung quantitativ erfassen. Das System eignet sich als wichtiges Werkzeug für weitere Entwicklungen in der Aufbau- und Verbindungstechnik.

## 5 Danksagung

Besonderer Dank der Autoren gilt der Baden-Württemberg-Stiftung gGmbH, deren Finanzierung diese Arbeit ermöglicht.

## Literaturhinweise:

- [1] VDI-Nachrichten, 07.12.2012, Seite 8
- [2] B. Güttler, *Wenn's der Elektronik zu heiß wird*, Automotive Electronic Systems H.1-2 S.59, (Originalquelle: US Air Force Avionics Integrity Program), 2004
- [3] Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V., *Das Lebensdauermetz: Leitfaden zur grafischen Bestimmung von Zuverlässigkeitskenngrößen der Weibullverteilung*, ISBN 3-410-32835-1, Beuth-Verlag, 1995
- [4] R. Zeiser, S. Ayub, J. Hempel, M. Berndt, J. Wilde, *Mechanical Stress Analyses of Packaged Pressure Sensors for Very High Temperatures*, 46<sup>th</sup> Intl. Symposium on Microelectronics (IMAPS), Orlando, 2013

- [5] R. Zeiser, L. Lehmann, V. Fiedler, J. Wilde, *Reliability of Flip-Chip Technologies for SiC-MEMS operating at 500°C*, Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Las Vegas, 2013
- [6] D. Carl, M. Fratz, M. Pfeifer, D. Giel, H. Höfler, *Multiwavelength digital holography with autocalibration of phase shifts and artificial wavelengths*, Appl. Opt. 48, H1-H8 (2009)
- [7] T. Kreis, W. Jüptner (Hrsg.), W. Osten (Hrsg.), *Series in Optical Metrology. Bd. 1: Holographic Interferometry: Principles and Methods*, Akademie-Verlag, 1996
- [8] M. Fratz, D. Carl, *Novel industry ready sensors for shape measurement based on multi wavelength digital holography*, FRINGE, 2013

## Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Markus Fratz  
 Fraunhofer-Institut  
 für Physikalische  
 Messtechnik IPM  
 Heidenhofstr. 8  
 D-79110 Freiburg  
 Tel. 0761/8857-178  
 Fax 0761/8857-223  
 eMail:



markus.fratz@ipm.fraunhofer.de  
 Internet: www.ipm.fraunhofer.de

Roderich Zeiser  
 Albert-Ludwigs-  
 Universität Freiburg  
 IMTEK – AVT  
 Georges-Köhler-  
 Allee 103  
 D-79110 Freiburg  
 Tel. 0761/203-7295  
 Fax 0761/203-7392  
 eMail: roderich.zeiser@imtek.de



Internet: www.imtek.de