

Willi Kalender

# Wie Unsichtbares sichtbar wird

## Neuentwicklungen in der Röntgen-Computertomographie

Wir sehen heute Dinge, die wir früher nicht gesehen haben. Dazu verhilft beispielsweise die Computertomographie. Klinisch ist dieses bildgebende Verfahren schon seit drei Jahrzehnten in die radiologische Diagnostik eingeführt, in den letzten Jahren wurden aber erstaunliche Fortschritte erzielt und neue Entwicklungen umgesetzt. Für das Institut für Medizinische Physik (IMP) greifen wir zwei Innovationen heraus: die Bildgebung am Herzen als neue klinische Anwendung und die Mikro-Computertomographie, die Untersuchungen an Kleintieren und zerstörungsfreie Materialprüfung ermöglicht.

### Neuerungen in rascher Folge

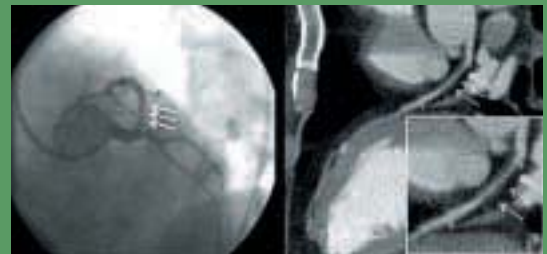
Forschung und Entwicklung im Bereich der Computertomographie (CT) haben in Erlangen eine lange Tradition. Dies ist insbesondere durch die umfangreichen Aktivitäten von Siemens Medical Solutions bedingt. Seit der Gründung des Institutes für Medizinische Physik an der Medizinischen Fakultät 1995 setzte Willi Kalender, der bis dahin bei Siemens in der Entwicklung gearbeitet hatte, einen neuen Schwerpunkt im Bereich der medizinischen Bildgebung. Eine wichtige Voraussetzung war die Kooperation mit dem ortsansässigen Medizintechnikhersteller: Siemens stellte Anfang 1996 den damals ersten schnellsten Computertomographen als Prototypen für Forschungsaktivitäten zur Verfügung. Erfahrungen in diesem Stadium konnten auch eine Verbesserung der Geräte für den kli-

nischen Einsatz bewirken. Es folgten mit den Jahren jeweils dem Stand der Technik entsprechende neue Installationen von Geräten, die zunächst vier und seit 2001 16 Schichten simultan erfassen können. Gleichzeitig wurde die Rotationszeit verkürzt, so dass sich Arbeiten zur Bildgebung des Herzens anboten.

Im Rahmen dieser Arbeiten konnte mit der Zeit ein kompetentes Team am IMP aufgebaut werden, und es wurden zahlreiche Drittmittel eingeworben. Dies führte auch dazu, dass eigene CT-Aufbauten entwickelt werden konnten. Sie dienten vorrangig zur Forschung auf dem Gebiet der Computertomographie, z.B. zum Test von Detektoren und anderen Komponenten und zur Entwicklung neuer Aufnahmeverfahren und Rekonstruktionsalgorithmen. Hieraus ergab sich aber auch die Entwicklung von Prototypen für die Mikro-Computertomographie, die zum verkaufsfähigen Produkt weiterentwickelt werden sollen.

### Bilder vom pulsierenden Herz

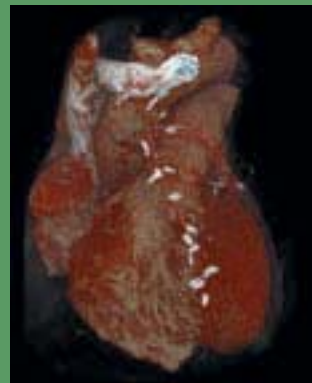
Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems gehören zu den häufigsten Todesursachen in der westlichen Welt. Insbesondere der Herzinfarkt, meist bedingt durch teilweise oder komplette Verschlüsse der Herzkranzgefäße, die eine



Konventionelle Angiographie

CT Angiographie

Abb. 1a: CT des Herzens wird inzwischen routinemäßig durchgeführt und liefert häufig Ergebnisse, die der konventionellen Angiographie gleichwertig sind. (Courtesy: Drs Achenbach und Ropers, Erlangen)



- Sensation 16 at
- 0.5 s rotation
- Pitch 0.3
- 140 kV, 300 mAs/eff
- 15 cm in 20 s
- 550 Images/phase
- Kymogram-correlated ASSR CI reconstruction

Abb. 1b: In Erlangen wurden kürzlich Verfahren entwickelt, mit denen solche 3D-Daten auch ohne EKG-Informationen errechnet werden können.

lebensbedrohliche Unterversorgung des Herzmuskels nach sich ziehen, ist ein häufig völlig unerwartetes Ereignis, da in vielen Fällen keine frühen Warnsignale wahrgenommen werden. Eine Verbesserung der Diagnostik, eine einfache und nichtinvasive Frühuntersuchung für Risikopatienten ist das Ziel. Die bisher überwiegend durchgeführten Herzkatheteruntersuchungen, bei denen unter Röntgenkontrolle ein Katheter bis zu den Herzkranzgefäßen vorgeschoben wird, werden von vielen Patienten als unangenehm empfunden und sind nicht zu vernachlässigbaren Risiken verbunden. Die Untersuchung mit CT ist sehr viel kürzer und schonender, sie war aber über lange Zeit nicht mit ausreichender Qualität durchführbar.

1995 war diese Herzuntersuchung mit CT, auch „Cardio-CT“ genannt, noch kein Thema. Es wurde noch ausschließlich auf die sogenannte Elektronenstrahl-CT gesetzt, ein sehr viel teureres und komplexeres Gerät, das viele Bildqualitätsmängel aufwies. Die Annahme war, dass nur bei Aufnahmezeiten im Bereich von ca. 100 ms pro Scan ausreichend scharfe Bilder erzeugt werden können. Der Ansatz von Prof. Kalender, den er zusammen mit Marc Kachelrieß umsetzen und bis 1997 zum Durchbruch bringen konnte, bestand darin, die Spiral-CT einzusetzen und die CT-Aufnahmedaten mit EKG-Daten zu markieren. Für die Bildrekonstruktion werden jeweils nur die mit der entsprechenden EKG-Phase markierten Daten herangezogen, um so selektiv für Diastole, Systole oder für andere Herzphasen Bilder zu rekonstruieren. Damit wird die vierte Dimension, die Zeit, für die CT-Bildgebung erschlossen: 3D-Darstellungen des Herzens können in zeitlicher Folge pulsierend, also in 4D, dargestellt werden.

### Rekord im Mikrometer-Maßstab

Anstelle der zeitlichen Auflösung kann auch die räumliche Auflösung mit Spezialaufbauten und entsprechenden Rekonstruktionsverfahren erheblich verbessert werden. Voraussetzung hierfür sind Strahlenquellen mit sehr kleinen Fokussdimensionen, sogenannte Mikrofokusröntgenröhren, und Detektoren mit sehr feiner Elementteilung. Die Mitarbeit in dem von der Bayerischen Forschungstiftung geförderten Forschungsverbund FORBILD führte am IMP zu einem Spezialaufbau für höchstauflösende Compu-

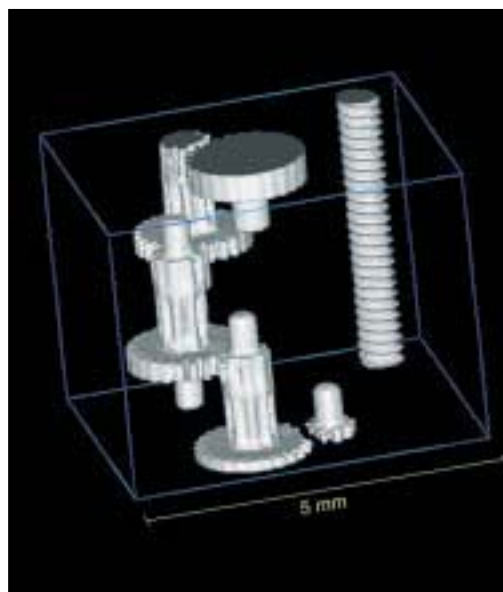


Abb. 2: Mikro-CT eines Miniaturantriebs

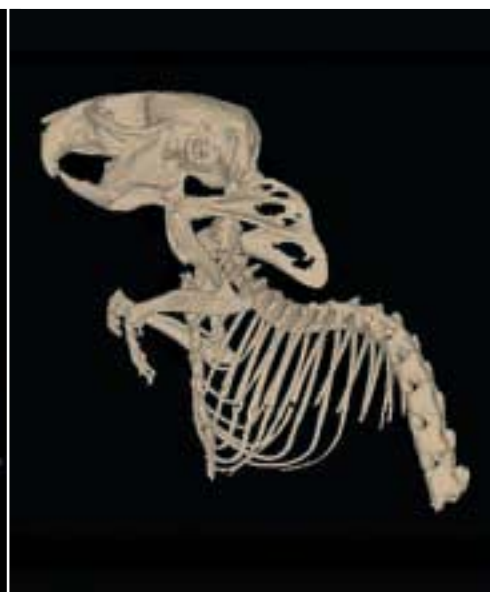


Abb. 3: 3D-Darstellung des Skeletts einer Maus

tertomographie, die Mikro-CT, die inzwischen routinemäßig eingesetzt wird. In einigen Doktorarbeiten konnte nachgewiesen werden, dass eine Ortsauflösung von besser als 10 µm erreicht werden kann – ein neuer Rekord für röntgenbasierte Systeme!

Die Anwendungen liegen sowohl im medizinischen Bereich, z.B. für die Analyse von Knochenproben oder Gewebeprosen, als auch in der zerstörungsfreien Materialprüfung, z.B. zur Untersuchung von Elektronikkomponenten oder Materialproben. Die weiteren Arbeiten zielen darauf ab, ein Spezialgerät mit etwas verringerter Detailauflösung, dafür aber verbesserter Weichgewebstdarstellung zur Untersuchung von Kleintieren in vivo zu entwickeln. Untersuchungen an Mäusen, die heute in sehr großem Umfang durchgeführt werden, können damit ebenfalls nichtinvasiv und schonender durchgeführt werden. Die Beobachtung des Krankheitsverlaufes an einzelnen Tieren lässt außerdem zuverlässigere Ergebnisse erwarten als die Tötung und das Sezieren einzelner Tiere jeweils nur zu einem Zeitpunkt im Verlauf der Erkrankung.

Auch hier gilt also, dass wir mit Mitteln der nichtinvasiven Bildgebung heute mehr sehen, als wir früher sehen konnten. Und diese neuen Techniken werden auf breiter Front eingesetzt, von der Untersuchung an Patienten über Kleintiere bis hin zu Materialproben.

*Prof. Dr. Willi Kalender leitet seit 1995 das zu diesem Zeitpunkt gegründete Institut für Medizinische Physik an der Medizinischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg.*

Bildbeispiele zur vierdimensionalen Darstellung des Herzens können auf der Homepage des IMP unter <http://www.imp.uni-erlangen.de/forschung/cardio/cardio.htm> betrachtet werden.

Der Forschungsverbund FORBILD stellt sich unter <http://www.imp.uni-erlangen.de/forbild> vor.

Rudolf Kötter

# Licht und Farbe

## Goethes Farbenlehre als Phänomenologie der Farberscheinungen



Goethes Auseinandersetzung mit der Natur war geprägt durch sein, wie er es selbst nannte, „gegenständliches Denken“:

Die Erfassung und Ordnung der sinnlich erfahrbaren Welt wollte er mit Mitteln leisten, die ebenfalls sinnlichanschaulichen Charakter besitzen. Dieses gegenständliche Denken manifestierte sich besonders deutlich in seinen Vorstellungen zur Landschaftsmalerei. Es sei die Kunst des Landschaftsmalers, mit dem „geognostischen“ Blick den räumlichzeitlichen Ausschnitt einer Landschaft zu erfassen, der für diese charakteristisch ist. Das „gute“ Landschaftsbild steht also in einer Reihe mit möglichen anderen Bildern, zeichnet sich vor diesen nur durch die überlegte Wahl des Künstlers von Ort und Zeit aus.

Auch sein Interesse an Licht und Farbe ist zunächst erwachsen aus seiner Beschäftigung mit den Regeln und Techniken der Malerei. Auf seiner Italienreise ist ihm die Erkenntnis gekommen, „dass man den Farben, als physischen Erscheinungen, erst von der Seite der Natur beikommen müsse, wenn man in Absicht auf Kunst etwas über sie gewinnen wolle“. Dieses Interesse dehnte sich schnell über den Bereich der Kunst aus auf alle Bereiche unseres Lebens, in denen Farben und Farberscheinungen eine Rolle spielen. Die Farbe verbindet für Goethe

die innere Natur des Menschen mit seiner äußeren, und, da sie Trägerin mannigfaltiger Symbolik ist, die Natur mit der Kultur.

Goethes Hinwendung zur Farbenlehre war im Grunde genommen nur eine Konkretisierung seines allgemeinen Interesses an der Natur: Wie können wir

die Phänomene einer farbigen Welt ordnen und dadurch besser verstehen? Nun ist es eine Sache, sich der Bedeutung des Phänomenbereichs „Farbe“ bewusst zu sein, und eine ganz andere, sich einen systematischen Zugang zu seiner Erforschung zu verschaffen. Über dieses Problem dachte Goethe lange nach. Es war Goethe klar, dass die Bewältigung dieser Aufgabe nicht in eine bestimmte Disziplin gehört, auch nicht in eine, die man erst noch erfinden müsste. Von Anfang an hat er daran gedacht, in diesem Projekt unterschiedliche Disziplinen zur Lösung bestimmter Probleme zusammenzuführen. Erwähnt werden der Chemiker, der sich um die chemische Natur der Farbpigmente und um deren Verbindung mit anderen Stoffen kümmern soll; der Physiker, der insbesondere für Farberscheinungen, die durch Licht hervorgerufen werden, Erklärungen suchen soll; der Mathematiker, der dem Physiker behilflich sein soll; der Mechaniker, der Maler, der Naturhistoriker, der Historiker, der Anatom; und bei Bedarf sollen noch andere hinzu gerufen

werden können. Die Farbenlehre war als ein – modern gesprochen – interdisziplinäres Projekt konzipiert. Allerdings riet Goethes Schwager Schlosser dringend davon ab, so viele verschiedene Wissenschaftler unter einen organisatorischen Hut bringen zu wollen, weshalb Goethe seine Farbenlehre letztlich doch im Alleingang entwickelte.

Bei der Lektüre der Farbenlehre wird man erstaunt feststellen können, wie wenig „alternativ“ Goethe dieses Unternehmen hat voran bringen wollen. Weder wird nach einer neuen und gänzlich anderen Wissenschaft gerufen, noch den zu beteiligenden Wissenschaften eine grundsätzlich neue Sichtweise abverlangt. Neu ist allerdings der Gedanke, Wissenschaftler auf die gemeinsame Behandlung eines komplexen Problems hin auszurichten, und deshalb ist die Farbenlehre Goethes auch keine durch eine einheitliche Fragestellung und Methode ausgewiesene Wissenschaft, vielmehr werden bei ihm verschiedene Problemstellungen, die sich unter der Themenstellung „Farbe“ entwickeln lassen, den je einschlägigen Wissenschaften zur Erörterung zugewiesen.

Die interdisziplinäre Ausrichtung seines Anliegens wurde und wird häufig bei Anhängern wie bei Kritikern missverstanden. Immer wieder hat man versucht, den „eigentlichen“ Kern der Farbenlehre herauszuschälen, und dabei hat man sie dann der Sinnesphysiologie, der Physik, der Ästhetik, oder den Geisteswissenschaften im allgemeinen zugeschlagen. Vielleicht ist dies auch in der Absicht geschehen, Goethe in irgendeiner Disziplingeschichte einen ehrenvollen Platz zu sichern. Aber wie so oft, ist auch hier gut gemeint das Gegenteil von gut, denn bei diesem Bemühen gerät das eigentlich Originelle an Goethes Ansatz verloren, und übrig bleibt eine bunte Sammlung von Beobachtungen und Deutungen, die häufig, wenn nicht gerade als verfehlt, so doch als einigermaßen trivial angesehen werden müssen.

Damit man nun ein Phänomen, das in der Lebenswelt als erklärungsbedürftig erscheint, so in die Wissenschaften einbringen kann, dass es dort auch erklärungsfähig wird, muss man es unter besonderen und reproduzierbaren Bedingungen studieren. Goethe hat deshalb gefordert, die Phänomene im Versuch zu untersuchen. Ein Versuch muss einerseits so angelegt sein, dass er in wesentlichen Punkten die Bedingungen „nachbaut“, unter denen sich ein Phänomen natürlicher Weise zeigt. Andererseits soll dieser „Nachbau“ aber auch so beschaffen sein, dass der Anschluss an die Beschreibungs- und Erklärungsweisen der wissenschaftlichen Disziplinen erreicht wird, die als einschlägig hinzuzuziehen sind. Deshalb forderte Goethe von einem Versuch, dass er sich eng an die Alltagswelt anlehnt und sich gewissermaßen als Instrument darstellt, mit dem man Klarheit über die hier oft überraschend und unter unübersichtlichen Bedingungen auftretenden Phänomene erreicht. Der Versuch muss in wesentlichen Merkmalen, also etwa hinsichtlich der Größenproportionen, des Zeitablaufs, oder der stofflichen Zusammensetzung eine Ähnlichkeit zu den nachgestellten Sachverhalten besitzen. Wenn wir nach einem modernen Ausdruck suchen, um das auszudrücken, was Goethe mit „Versuch“ gemeint hat, dann sollten wir vielleicht am besten von „Realsimulation“ sprechen. Mit seinen Versuchen simuliert Goethe ein Stück Alltagswelt, er holt diese gewissermaßen in die Kammer, um sie dort in einer übersichtlichen Version zu studieren.

Wenn wir uns unter dieser Orientierung wieder der Farbenlehre zuwenden, dann wird uns manches am Vorgehen Goethes verständlicher werden. Klar ist z.B., dass uns der Lichtstrahl als idealer Gegenstand der Optik im Alltag nicht begegnet. Hier haben wir es immer mit bestimmten Lichtquellen zu tun, deren Lichtschein sich in je bestimmter Form zeigt, als diffuses Licht, als Licht, das durch ein Loch oder einen Spalt fällt usw.; Brechungs- und Reflexionserscheinungen zeigen sich stets an konkreten Gegenständen und nur unter bestimmten Umständen. Wenn man also die in solchen Kontexten auftretenden Farberscheinungen studieren möchte, müssen die entsprechenden Versuche gewisse strukturelle Gemeinsamkeiten mit den Gegebenheiten der Alltagswelt haben und dies muss wiederum in der Versuchsbeschreibung zum Ausdruck kommen.

Der interdisziplinäre Ansatz und die methodologische Rolle, die dem Versuch zugewiesen wird, sind zweifellos das Originelle und Moderne an der Goetheschen Farbenlehre. Und die Einsicht, dass eine Farbenlehre immer ein interdisziplinäres Projekt ist, bei dem Physiologen, Physiker, Psychologen, Chemiker, oft auch Fotografen und Maler zusammenwirken müssen, und dass sich ihr empirischer Teil stark auf Simulationsversuche stützen muss, hat sich im Laufe der Zeit auf ganz unspektakuläre Weise durchgesetzt. Insoweit wandelt mancher der heutigen Farbforscher auf Goethes Spuren, ohne es zu ahnen.

Als Dilettant besaß Goethe die Freiheit, die Naturwissenschaften für seine Lebensgestaltung dienstbar zu machen. Die Naturwissenschaften sollten dazu beitragen, seine Welt – und das ist die sinnlich erfahrbare, anschauliche Welt, die Welt in der man sich bewegt, die Eindrücke vermittelt, Stimmungen auflöst oder zu Gedanken anregt – besser und tiefer verstehen zu können. Dazu müssen die Dinge in lebendige Beziehung zueinander gesetzt werden: nämlich als wechselweise aufeinander angewiesen und in einem steten historischen Prozess des Wandels und der Entwicklung befindlich. Idealerweise sollten sich Licht- und Farberscheinungen, jede Pflanze, jedes Gestein, jeder Landschaftsausschnitt als Zeugnisse für aktuelle wie für historische Vorgänge sowie für die Beziehungen, in denen der Betrachter zu seiner Umwelt steht, deuten lassen. Goethe wollte sich selbst verstehen können, als jemand, der die Welt versteht, und für dieses Lebensprojekt waren die Naturwissenschaften unverzichtbar.

*Dr. Rudolf Kötter ist als Akademischer Direktor am Institut für Philosophie der Universität Erlangen-Nürnberg tätig.*

Joachim Kaschta

# Mit neuen Werkstoffen gegen den grauen Star

## Intraokularlinsen mit Anpassungsfähigkeit an Ferne und Nähe

Anpassungsfähige künstliche Augenlinsen scheinen keine allzu komplizierten Implantate zu sein. Den durchsichtigen Plättchen von wenigen Millimetern Durchmesser, mit einem Strahlenkranz am Rand der kreisrunden Scheibe und einem eingepassten dehnbaren Mittelteil, ist die langwierige und detaillierte Forschungs- und Entwicklungsarbeit nicht ohne weiteres anzusehen. Was sie zu einem hochwertigen Ersatz für erkrankte, stark getrübte Linsen macht, wird als äußerlich unscheinbares „Plastikmaterial“ wahrgenommen: der Werkstoff, aus dem sie geformt sind.

Im Alter, beginnend etwa mit dem 50. Lebensjahr, leiden viele Menschen an einer Eintrübung der Augenlinse, dem sogenannten grauen Star (Katarakt). Diese Sehbehinderung, die unterschiedliche Ursachen haben kann, ist über die operative Entfernung der eingetrübten Linse und deren Ersatz durch eine künstliche Linse (Intraokularlinse) heute erfolgreich zu behandeln. So wurden allein in Deutschland im Jahr 2002 etwa 580.000 Kataraktoperationen durchgeführt. Stand der Technik sind heute neben starren Linsen aus Polymethylmethacrylat (Plexiglas) auch flexible Linsen aus Silikon-

und verschiedenen Acrylatwerkstoffen. Die flexiblen Werkstoffe erlauben dem Operateur eine schonendere Operationstechnik, da der Schnitt in die Hornhaut des Auges zur Einbringung der Linse nur noch 2 bis 3 mm betragen muss und somit ohne Naht heilen kann.

Ein Nachteil der heute eingesetzten Intraokularlinsen ist, dass diese Linsen nicht akkomodieren können, so dass der Patient eine Sehhilfe braucht, um die Sehschärfe an Nähe und Ferne anpassen zu können. Mit der Entwicklung von akkomodierbaren Intraokularlinsen kann dieses Problem behoben werden. Den Vorteilen dieser neuen komplex geformten Intraokularlinse für den Patienten stehen hohe Kosten für die Fertigung gegenüber, da die Linse mit hohem Aufwand spanend aus den am Markt zur Verfügung stehenden vernetzten weichen Acrylatwerkstoffen hergestellt werden muss. Abbildung 1 zeigt schematisch die Lage der Intraokularlinse im Auge.

Ein kostengünstiges Herstellungsverfahren für Teile aus polymeren Werkstoffen ist das Spritzgießen, mit dem über die Schmelze in einem Arbeitgang auch komplex geformte Bauteile gefertigt werden können. Aufgrund der chemischen

Vernetzung der Molekülketten sind die im Augenblick am Markt verfügbaren weichen Acrylatwerkstoffe jedoch nicht schmelzbar und damit für dieses Fertigungsverfahren nicht einsetzbar.

Ausgehend von diesen Fragestellungen, wird in einem von der Bayerischen Forschungsförderung geförderten Verbundprojekt zwischen der HumanOptics AG, Erlangen, als Linsenhersteller, dem Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe als Kompetenzzentrum für die Werkstoffcharakterisierung und -entwicklung sowie der polyMaterials AG, Kaufbeuren, als Partner für die Werkstoffsynthese ein neuartiger spritzgießbarer Polymerwerkstoff für Intraokularlinsen entwickelt. Beide Industriepartner im Projekt sind junge Start-Up Unternehmen.

### Elastisch und verträglich

Der zu entwickelnde neue Werkstoff muss eine Reihe von Anforderungen erfüllen. Neben der Biokompatibilität sind dies bestimmte mechanische Eigenschaften, die zum einen auf die Operationstechnik zurückgehen, zum anderen durch die im Auge herrschenden Umgebungsbedingungen und die geforderte Funktionsweise bedingt sind.

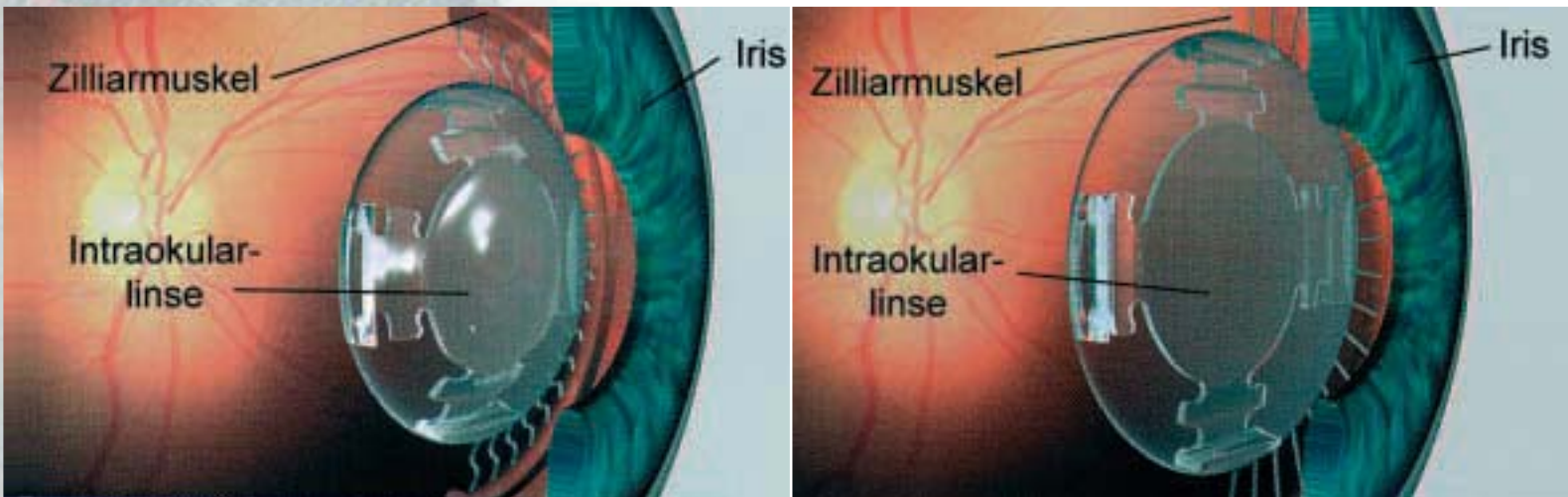


Abb. 1: Akkommodierbare Linse  
(Quelle: HumanOptics AG)

links: akkommodiert

rechts: nicht akkommodiert

Ausgangspunkt der Entwicklung ist die Forderung nach transparenten, weichen, hochelastischen, biokompatiblen Werkstoffen, die thermoplastisch verarbeitbar sind, ohne während der Verarbeitung zu degradieren. Aus Anwendersicht soll ein gummiartiges Material entwickelt werden, das nicht chemisch vernetzt ist, um die thermoplastische Verarbeitbarkeit zu erhalten. Mit der Klasse der thermoplastischen Elastomere sind solche Werkstoffe realisierbar. Die Polymermoleküle thermoplastischer Elastomere werden dabei aus zwei chemisch unterschiedlichen Bausteinen (Monomeren) aufgebaut, und zwar so, dass sich in der Kette Polymerblöcke, die aus dem gleichen Monomeren bestehen, statistisch abwechseln (Blockcopolymer). Aufgrund der für Polymere typischen Nichtmischbarkeit entsteht eine Dömanenstruktur, in der sich gleichartige Polymerblöcke zusammenlagern (Mikrophasenseparation).

Um gummiartige Eigenschaften zu erhalten, müssen die Monomere so gewählt werden, dass die Erweichungstemperatur des einen Polymers oberhalb der Anwendungstemperatur liegt (Hartphase), die der zweiten Komponente je-

doch unterhalb dieser Temperatur. Die Hartphase sorgt dann bei der Anwendungstemperatur für eine physikalische Vernetzung der Weichphase und für die hohe Elastizität. Oberhalb der Erweichungstemperatur der Hartphase liegt eine thermoplastisch verarbeitbare Schmelze vor. Für den Anwendungsfall im Auge bedeutet dies, dass die Eigenschaften auf die Körpertemperatur von rund 37°C optimiert werden müssen.

Ausgehend von der Forderung nach Transparenz und Biokompatibilität, konzentriert sich die Entwicklung auf verschiedene Acrylatcopolymer, wobei neben Blockcopolymeren auch statistische Copolymer untersucht werden. Die bei polyMaterials zunächst im Grammaßstab synthetisierten Produkte werden am Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe eingehend charakterisiert und im Hinblick auf die Anforderungen bewertet. Die Molmasse sowie deren Verteilung werden über die Gelpermeationschromatographie bestimmt. Damit ist unter anderem eine Überprüfung der Reproduzierbarkeit der Synthese möglich. Über die Thermogravimetrie werden Informationen über flüchtige Bestandteile im Polymer gewonnen, bei denen es sich um Wasser,

Restlösemittel und Monomer aus der Synthese handeln kann. Letztere müssen vor der Verarbeitung und dem Einsatz aufgrund ihrer möglichen toxischen Wirkung aufgrund ihrer möglichen toxischen Wirkung entfernt werden. Eine Charakterisierung des Fließverhaltens ermöglicht die Beurteilung des Verarbeitungsverhaltens im Spritzgussprozess und der thermischen Stabilität des Polymeren. Über die Differentialthermoanalyse werden die Erweichungstemperaturen der Polymere ermittelt, die mit der Zusammensetzung der Polymere zu korrelieren sind und damit Aufschluss über den Einbau der Monomere während der Polymerisation geben. Die Ergebnisse fließen als wertvolle Hinweise in die Steuerung der Synthese ein.

### Gummiartig statt spröde

Eine wichtige Eigenschaft stellt das mechanische Verhalten der verschiedenen Polymere dar. Zu seiner Charakterisierung werden die Bestimmungen des Moduls und der mechanischen Dämpfung als Funktion der Temperatur mit Hilfe der dynamisch-mechanischen Analyse eingesetzt. In Abbildung 2 ist der Modul als Funktion der Temperatur für verschie-

dene Acrylatcopolymere gezeigt. Der anwendungsrelevante Temperaturbereich ist grau hinterlegt. Der Modul fällt mit steigender Temperatur ab, wobei der steilere Abfall des Moduls bei tiefer Temperatur das Ende des Übergangsbereichs vom spröden, glasartigen Materialverhalten zum gewünschten gummielastischen Verhalten zeigt. Der gummielastische Bereich ist durch die geringere Temperaturabhängigkeit des Moduls gekennzeichnet. Von Material 1 zu Material 5 steigt dabei der Anteil an Methylmethacrylat im System an, wodurch die Modulkurven zu höherer Temperatur verschoben werden. Während sich Material 5 mit dem höchsten Methylmethacrylatanteil im Bereich der Anwendungstemperatur noch im Übergangsbereich sprödgummiartig befindet, zeigen die Materialien 1 bis 3 bereits gummielastisches Verhalten. Es ist deutlich zu sehen, dass der Beginn des gummielastischen Bereichs (Ende des Steilabfalls) mit der Zusammensetzung variiert werden kann

und so Polymere mit einer angepassten Lage des gummielastischen Bereichs maßgeschneidert werden können.

Zugversuche bei 37°C geben Aufschluss über die maximale Dehnbarkeit und die Festigkeit des Materials im Bereich der Körpertemperatur. Versuche mit wiederholter Be- und Endlastung (Hystereseversuche) zeigen bleibende Deformationen im Material auf und erlauben die Einschätzung der Reversibilität von aufgetragenen Verformungen.

Während der bisherigen Projektlaufzeit wurden Beziehungen zwischen dem molekularen Aufbau, der chemischen Zusammensetzung und den Materialkenngrößen wie dem Modul und der Dämpfung erarbeitet, so dass Eigenschaften der Polymeren in einem bestimmten Zusammensetzungsbereich vorhergesagt werden können. Die mittlerweile reproduzierbar herstellbaren Materialien sind ausreichend thermisch stabil und liegen in einem für den Mikrospritzguss geeigneten Viskositätsfenster.

Die notwendige Bruchdehnung von 250% wird erreicht, und der Modul der Produkte liegt im Bereich der für Intraokularlinsen eingesetzten, aber vernetzten Acrylatwerkstoffe. Die Verarbeitungsversuche deuten allerdings auf Probleme bei der Formstabilität der Linsen hin. Erste Biokompatibilitätstests zeigen die Wirksamkeit der eingesetzten Aufarbeitungsschritte und eine mit am Markt befindlichen Intraokularlinsen vergleichbare Verträglichkeit. Weitere Optimierungsschritte werden mit dem Ziel durchgeführt, Materialien für Implantationsversuche zur Verfügung zu stellen.

*Dr. Joachim Kaschta ist Akademischer Oberrat am Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe (Prof. Dr. Helmut Münstedt).*

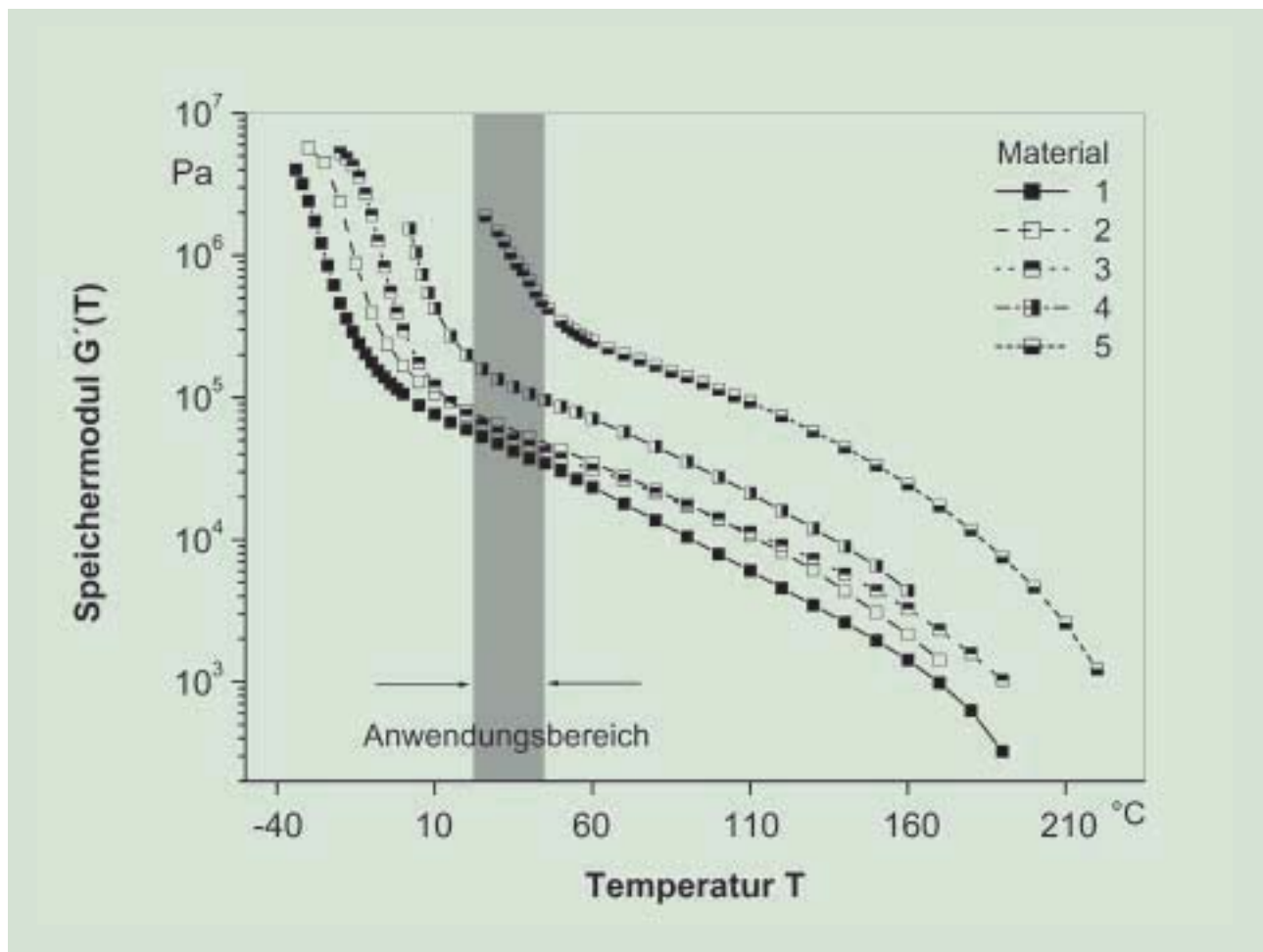


Abb. 2: Speichermodul  $G'$  als Funktion der Temperatur für unterschiedliche Acrylatcopolymere



Heinrich Niemann

# Elektronische „Augen“

## Mustererkennung und Bildverarbeitung

Von informationsverarbeitenden Systemen wird erwartet, dass sie Bilder konstruieren und Bilder verwerten. Sie sollen den Benutzern Anschaulichkeit bieten und ihnen Dinge zeigen, die sich ohne ihre Hilfe der Anschauung entziehen, und sie sollen agieren und sich orientieren können, als ob sie selbst Augen hätten. So entsteht ein wechselseitiger fließender Übergang: Aus Daten werden Bilder, aus Bildern werden Daten.

In der Mustererkennung geht es im Allgemeinen um die Klassifikation von Sensorsignalen, die üblicherweise als Muster bezeichnet werden. Sensorsignale sind z.B. Sprache, Bilder oder Bildfolgen. In der (hier nicht behandelten) Spracherkennung ist das Ziel die Ermittlung der gesprochenen Wörter oder Sätze. Bei der Objekterkennung geht es darum, in einem Bild, aufgenommen z.B. mit einer Digitalkamera, vorhandene Objekte zu erkennen und gegebenenfalls zu lokalisieren, d.h. ihre Lage relativ zu einem Referenzkoordinatensystem zu bestimmen. Die Kenntnis auch der Lage ist z.B. nützlich, wenn ein Roboter ein Objekt greifen und positionieren soll. Im Allgemeinen geht es um die Zuordnung eines Musters zu einer von einer vorgegebenen Anzahl von Klassen. Aus den zahlreichen Spezialfällen wird einer exempla-

risch herausgegriffen, nämlich die Erkennung von Mimik.

Das Ziel der Bildverarbeitung ist, verkürzt gesagt, die Verbesserung und Manipulation von Bildinhalten mit dem Zweck, einem Anwender eine leichter erfassbare oder mit zusätzlicher Information versehene Darstellung zu liefern. Der Bereich Bildverarbeitung umfasst inzwischen zahlreiche Teildisziplinen, von denen wir hier exemplarisch eine herausgreifen, nämlich die Berechnung von Lichtfeldern und deren Nutzung bei laparoskopischen Operationen.

### Lichtfelder für beliebige Ansichten

In Kooperation mit der Chirurgischen Universitätsklinik (Leitung: Prof. Dr. Werner Hohenberger) und dem Lehrstuhl für Graphische Datenverarbeitung (Leitung: Prof. Dr. Günther Greiner) wurde im Rahmen des SFB 603 „Modellbasierte Analyse und Visualisierung komplexer Szenen und Sensordaten“ ein Teilprojekt begonnen, dessen Ziel die Unterstützung des Chirurgen bei laparoskopischen Operationen ist. Bei diesen wird minimal-invasiv z.B. im Bauchraum operiert, wobei die Bildinformation über eine Kamera für den Chirurgen auf einen Monitor übertragen wird. Dabei kann es zu unter-

schiedlichen Störungen der Bildqualität kommen. Beispiele sind Spiegelungen, die als weißer Lichtfleck im Bild 1 links sichtbar sind; Verdeckungen, die durch Blutungen verursacht werden; Beeinträchtigungen durch Dampf oder Rauch, die durch Schneiden mit Hitze kurzzeitig auftreten. Mit Methoden der Bildverarbeitung sollen diese Effekte reduziert werden, wofür unter anderem Lichtfelder als Hilfsmittel genutzt werden.

Ein Lichtfeld gibt die Lichtintensität an, die an einem bestimmten Punkt des Raumes in eine bestimmte Richtung emittiert wird; es ist eine spezielle Form der aus der Optik bekannten so genannten plenoptischen Funktion. Wenn das Lichtfeld bekannt ist, lassen sich perspektivische Bilder aus beliebigen Ansichten, insbesondere auch aus einer Ansicht, die die Kamera gerade nicht sieht, berechnen. Weiter lassen sich in diese Bilder andere überlagern, z.B. Blutgefäße, die aus einem (digital vorliegenden) anatomischen Atlas entnommen wurden. Ein Lichtfeld lässt sich im Prinzip aus einer Folge von Bildern berechnen, die den darzustellenden Bereich aus unterschiedlichen Ansichten zeigen. Da eine Kamera für die Operation benutzt und auch bewegt wird, entsteht eine solche Bildfolge ohnehin.

Die bei der automatischen Berechnung von Lichtfeldern zu lösenden Probleme bestehen darin, dass die Lage der Kamera nicht bekannt ist, dass über möglichst viele Bilder der Bildfolge einige korrespondierende Bildpunkte bestimmt werden müssen und dass mit bewegten bzw. verformbaren Objekten gerechnet werden muss, wobei letzteres Problem derzeit erst in Ansätzen behandelt wird. Die Berechnung geometrischer Information über Objekte, die von einer bewegten Kamera mit unbekannter relativer Lage der Kamera aufgenommen worden sind, ist ein Problem, das in der Bildverarbeitung seit kurzem gelöst wurde; die Voraussetzungen und Einschränkungen sowie die Algorithmen dafür sind also bekannt. Die automatische und zuverlässige Berechnung und Verfolgung korrespondierender Bildpunkte ist Voraussetzung für die Rekonstruktion der Objektgeometrie. Im Prinzip werden zunächst auffällige oder interessante Bildpunkte ermittelt. Das sind solche, bei denen die

Grauwerte in einer kleinen Umgebung eines Bildpunktes charakteristische Änderungen aufweisen. In Abb. 1 oben sind diese durch weiße Kreuze markiert. Im nächsten Bild werden ebenfalls solche auffälligen Bildpunkte bestimmt und dann ermittelt, welcher auffällige Bildpunkt in dem einen Bild vom gleichen Objektpunkt stammt wie ein auffälliger Bildpunkt in dem anderen Bild, d.h. mit diesem korrespondiert; man sieht im Bild, dass dieses kein triviales Problem ist, da in der Regel eine Vielzahl auffälliger Bildpunkte vorliegt. Die Kriterien für die Ermittlung von Korrespondenzen sind zum einen, dass die Grau- bzw. Farbwerte in einer kleinen Nachbarschaft der Bildpunkte sich nur wenig unterscheiden und dass mit den über mehrere Bilder ermittelten Korrespondenzen eine konsistente Geometrie der Objekte berechnet werden kann. Dieses erfordert umfangreiche iterative numerische Optimierungen.

Wenn das Lichtfeld vorliegt und z.B.

in einer Ansicht eine Spiegelung auftritt wie in Abb. 1 oben, so kann aus dem Lichtfeld eine dicht benachbarte Ansicht berechnet werden, in der keine Spiegelung auftritt; der durch Spiegelung überstrahlte Bereich wird dann entsprechend ersetzt, wie es Abb. 1 unten zeigt. Dieses ist ein Beispiel für die dadurch ermöglichte Verbesserung der Bildqualität.

**Typisch ärgerliches Gesicht**

Nach wie vor werden Rechner überwiegend von Menschen durch Benutzung formalisierter Kommandos genutzt. Für den breiten und mühelosen Einsatz ist es jedoch wichtig, eine dem Menschen – und nicht dem Rechner – angepasste Schnittstelle zur Mensch-Maschine-Kommunikation bereitzustellen. Daran wird zur Zeit intensiv an verschiedenen Stellen gearbeitet. Ziel ist es, die in der menschlichen Kommunikation üblichen Modalitäten wie Sprache, Gestik und Mimik durch Mikrophon und Kamera zu erfassen und durch geeignete Algorithmen



Abb. 1: Das obere Bild zeigt eine Gallenblase mit überlagerten automatisch detektierten Punktmerkmalen sowie einem starken spiegelnden Anteil (weißer Lichtfleck). Unten wurde ein Bild aus dem Lichtfeld rekonstruiert und der spiegelnde Anteil durch die Ansicht aus einem etwas anderen Blickwinkel ersetzt



**HUMANscan**

biometrie  
 gesichtserkennung  
 sprechererkennung  
 bildverarbeitung  
 multimodalität  
 identifikation  
 zutrittskontrolle  
 schutz

Wetterkreuz 19a  
 91058 Erlangen  
 Deutschland

www.humanscan.de

Fon +49 (0) 9131 610 2400  
 Fax +49 (0) 9131 610 2409

eMail info@humanscan.de

**sicherheit**

**BioID<sup>®</sup>**

zur Erkennung gesprochener Sätze, Zeigegebenen und Emotionen auszuwerten, um letztendlich eine Dialogführung mit dem Rechner zu ermöglichen, die dem natürlichen Kommunikationsverhalten weitgehend entspricht. Anwendungen werden insbesondere bei Auskunft-, Beratungs- und Verkaufsdialogen gesehen sowie bei der Bedienung komplexer werdender technischer Systeme, wie Heimelektronik oder Haussteuerung.

Abb. 2 zeigt ein Beispiel zur Erkennung von Mimik, wobei die vier Typen „Freude, Neutral, Unsicherheit und Ärger“ unterschieden werden. Der Gesichtsausdruck bei jeder dieser Typen wird durch eine Stichprobe von Gesichtsbildern mit dem betreffenden Ausdruck trainiert, d.h. dem Rechner bekannt gemacht. Dafür gibt es unterschiedliche algorithmische Ansätze, von denen hier die so genannten „Eigengesichter“ verwendet werden. Mathematisch handelt es sich um die ca. 10-20 Eigenvektoren der Kovarianzmatrix der Stichprobe von Bildern; anschaulich kann man sich darunter „typische“ Gesichter vorstellen. Hier wurden zum Training Bilder von einer Frau verwendet. Ein neues Gesicht, dessen Mimik klassifiziert werden soll, wird mit den Eigengesichtern der vier trainierten Typen verglichen, indem es in den jeweiligen Eigenraum projiziert wird. Bild 2 zeigt rechts ein Gesicht eines Mannes. Der kleine gelbe Rahmen dient der automatischen Lokalisation des Gesichts. Dafür werden hautfarbige Bildpunkte bestimmt, die im Bild rechts unten zu sehen sind. Für die Mimikererkennung wird der Ausschnitt im größeren blauen Rahmen verwendet. Im Bild links sieht man das Ergebnis, wenn das neue Gesicht mit den ersten zehn Eigenvektoren in den Raum der jeweiligen Eigengesichter projiziert wird. Die Erkennung erfolgt, indem zu dem neuen Gesicht das ähnlichste aus den trainierten Eigengesichtern berechnet wird; es ist das mit dem violetten Rechteck markierte Eigengesicht „Ärger“. Man erkennt die Generalisierungsfähigkeit des Verfahrens, das zwar mit den Gesichtsausdrücken einer Frau trainiert wurde, aber auch den eines Mannes korrekt erkennt.

Es ist zu erwähnen, dass auch oder gerade für automatisierte Verfahren der Grundsatz gilt: „Wer Entscheidungen trifft, der macht auch manchmal Fehler“; die Entscheidungen des Systems sind meistens richtig, aber nicht immer. Ziel

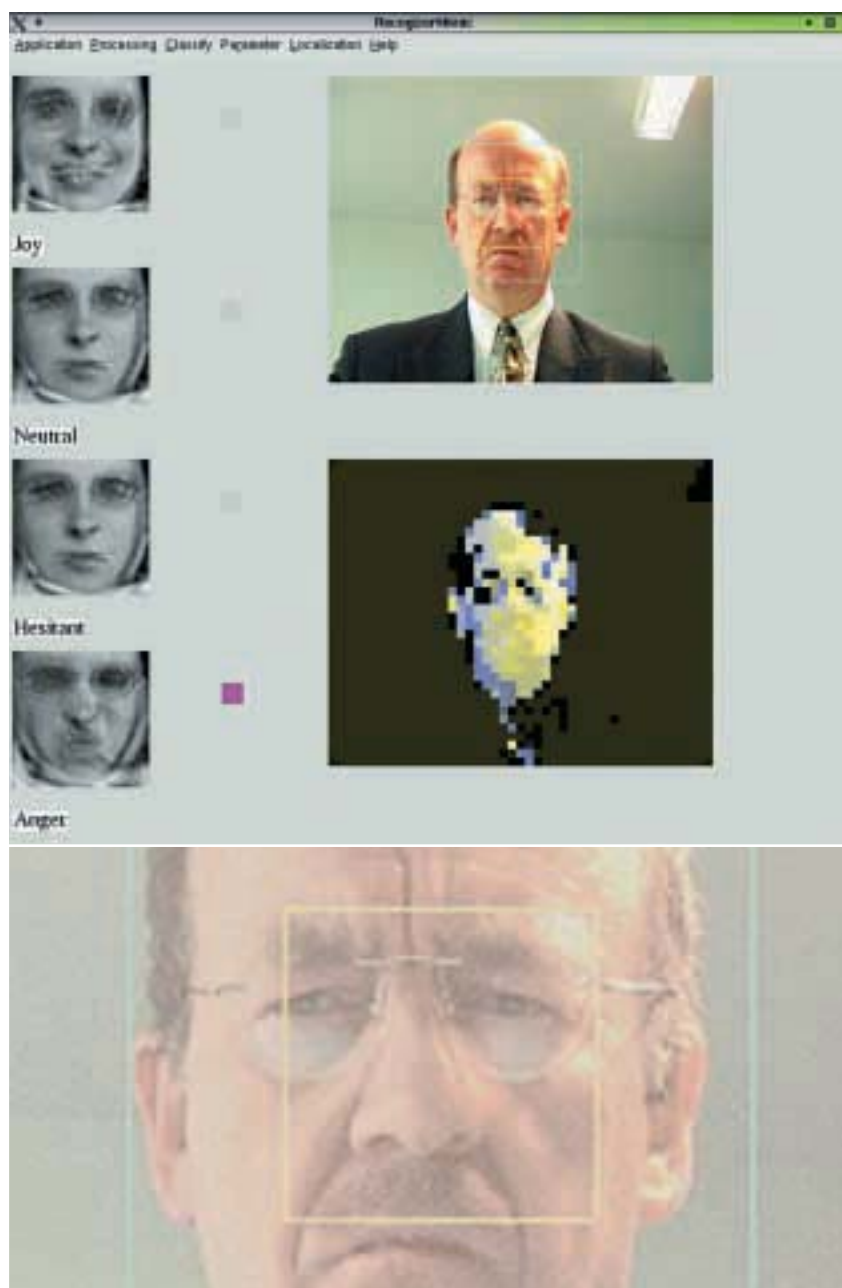


Abb. 2: Emotionserkennung

weltweiter Forschungsarbeiten ist es, die Algorithmen zur Erkennung ständig weiter zu verbessern, so dass die Zahl der Fehlentscheidungen immer weiter reduziert wird. Diese Arbeiten werden im Rahmen des BMBF-Leitprojektes SmartKom zusammen mit Partnern aus Wirtschaft und Forschung durchgeführt. Der Bundespräsident ließ sich das Leitprojekt bei einem Besuch des DFKI (Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz), das die Konsortialführerschaft hat, im August 2002 demonstrieren.

*Prof. Dr. Heinrich Niemann ist seit 1975 Inhaber des Lehrstuhls für Mustererkennung (Informatik 5) und seit 1988 Leiter der Forschungsgruppe Wissensverarbeitung am Bayerischen Forschungszentrum für Wissensbasierte Systeme (FORWISS); dieses wurde inzwischen durch den Bayerischen Forschungsverbund für Situierung, Individualisierung und Personalisierung in der Mensch-Maschine-Interaktion (FORSIP) abgelöst. Er fungiert außerdem als Sprecher des 1998 errichteten Sonderforschungsbereichs 603 „Modellbasierte Analyse und Visualisierung komplexer Szenen und Sensordaten“.*

Gerd Häusler / Gerd Leuchs

# Ist „Technisches Sehen“ gleich „Kamera + Computer“?

## Optische Sensoren für neuartige Anwendungsmöglichkeiten

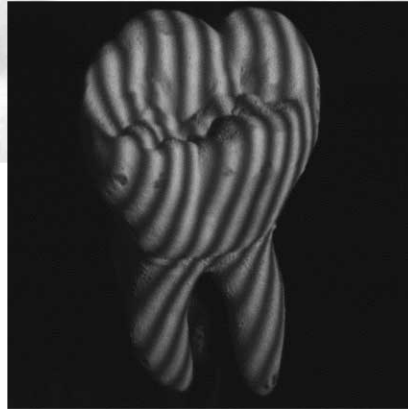
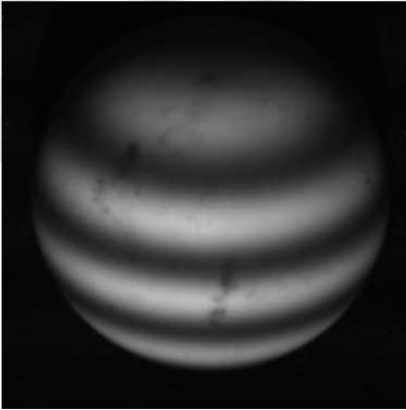


Abb. 1: Prinzip der aktiven Triangulation mit Projektion von Sinusstreifen.

Es wird hier eine Serie von sinusförmigen Streifen aus einer Richtung auf das Objekt projiziert. Aus einer anderen Richtung wird mit einer Fernsehkamera das so beleuchtete Objekt beobachtet. Schon aus einer Aufnahme kann man bereits die Form eines einfachen Objektes ahnen. Aus einer Serie von (mindestens drei) Aufnahmen kann man die Oberflächengestalt genau bestimmen.

„Technisches Sehen“ stellt sich die Aufgabe, bildhafte Information über die Welt um uns herum zu gewinnen und zu verarbeiten. Objekte werden beleuchtet, streuen oder reflektieren die Strahlung in den Raum und prägen der Strahlung dabei Information auf. Optische Sensoren sammeln die Strahlung und versuchen, möglichst viel Objektinformation aufzufangen. Die Nachverarbeitung (im Computer oder Gehirn) soll die aufgefangene Information dekodieren und die wesentlichen von den unwesentlichen Anteilen befreien. Am Ende sollen (oft nur scheinbar einfache) Fragen nach der Qualität beantwortet werden: „Ist ein Bauteil montiert, ist eine Bohrung an der richtigen Stelle, ...?“ Aber auch komplexere Fragen werden an technische Sichtprüfungssysteme gestellt: „Ist ein Brillenglas gut geschliffen, ist die Gussform für eine Zahnkrone fehlerfrei, wie dick ist ein Hauttumor, ...?“

Technisches Sehen bedient sich optischer Sensoren („hardware“) zur Akquisition der Information und von Algorithmen für die Nachverarbeitung („software“). Es ist interessant, dass unser Gehirn mit seinen 10 Milliarden parallel arbeitenden Neuronen für qualitative Aufgaben wie die schnelle Erkennung von

Objekten in einer komplexen Umgebung bis jetzt nicht vom Computer ersetzt werden kann. Umso wichtiger ist es für technische Sichtprüfungsaufgaben, durch gute optische Sensoren die Information a priori so vollständig aufzunehmen und aufzubereiten, dass sie ein Computer a posteriori auf einfache Weise auswerten kann. Vorteile der technischen Sensoren sind, dass sie nicht nur wie das Auge Intensität sondern je nach Bauart auch Polarisation und Phase des Lichts messen können. Aus all dem wird klar, dass eine Fernsehkamera mit angehängtem Computer nur ein einfaches Beispiel für ein technisches Sicht-System darstellt. Die technische Optik und die Theorie der optischen Informationsübertragung stellen aber Werkzeuge zur Verfügung, die weit über die Möglichkeiten einer einfachen Fernsehkamera (oder des Auges) hinausgehen.

Es gibt z.B. hochwertige Mikroskope, die Auflösungen im Bereich 0,1 Mikrometer erlauben. Es gibt Interferometer, mit denen man die Ebenheit von Flächen mit der Genauigkeit eines Atombereichs bestimmen kann, es gibt optische 3D-Sensoren, mit denen man die Gestalt von komplexen Objekten wie der menschlichen Haut oder von Kunst-

gegenständen messen kann. In der Halbleiterherstellung werden Silizium-Wafer von 30 cm Durchmesser mit Strukturen von 0,1  $\mu\text{m}$  Breite belichtet. Die so übertragene Information ist etwa zehnmillionenmal so groß wie die Information in einem Videobild oder auf einem Netzhautbild. Wie funktionieren diese Instrumente? Das kann hier in der Kürze nicht erklärt werden, aber nach einigen allgemeinen Betrachtungen werden wir aktuelle Anwendungen aus dem Zentrum für Moderne Optik demonstrieren.

### Die Überlegenheit der Glühlampe

Die Qualität eines optischen Systems hängt aber nicht nur vom Nachweis des Lichts ab, auch der richtigen Auswahl der Beleuchtung kommt eine entscheidende Bedeutung zu. Es steht ein großer Wellenlängenbereich zur Verfügung, vom „Röntgenlicht“ bis zum fernen Infrarot oder sogar zu Radarwellen. Die systemtheoretischen Konzepte sind dabei gleich, aber die Information, die das Objekt der gestreuten, reflektierten oder gebrochenen Strahlung aufträgt, kann unterschiedlich sein. Die Beleuchtung kann auch unterschiedlich auf das Objekt gebracht werden, z.B. diffus oder gerich-

tet, homogen oder strukturiert, kohärent oder inkohärent. Es zeigt sich z.B., dass man mit Laserbeleuchtung oft wesentlich weniger Information akquirieren kann, als mit Glühlampenbeleuchtung. Die Wechselwirkung des Objektes mit dem einfallenden Licht kann ebenfalls unterschiedlich sein: Objekte können Licht brechen und spiegelnd oder diffus reflektieren, sie können Oberflächenstreuer (z.B. Metall) oder Volumenstreuer (z.B. Haut) sein. Die Information, die durch den Raum zum optischen Sensor übertragen wird, kann auf verschiedene Weise genutzt werden: Man kann ein Videobild aufnehmen, also nur die lokale reflektierte Intensität nutzen. Man kann aber auch die komplexe Lichtamplitude und Phase mit einem Hologramm oder einem Interferometer speichern. Natürlich lassen sich auch Farbe und Polarisation ausnutzen.

In den letzten Jahren wurden am Lehrstuhl für Optik mit Hilfe dieser Überlegungen Sensoren für neuartige Anwendungen entwickelt. So war es möglich,

Sensoren so zu bauen, dass sie nahe an der Grenze des physikalisch Möglichen arbeiten, dass sie also nicht „technologiebegrenzt“ sind. Hier sollen beispielhaft einige Ergebnisse für optische 3D-Sensoren beschrieben werden, die die „Form“ von Objekten erfassen. Der erste Sensor kann die Gestalt von großen Objekten wie Menschen oder Skulpturen sehr schnell und genau messen. Das Messprinzip, das in Abbildung 1 illustriert ist, nennt sich „aktive Triangulation“. Abbildung 2 zeigt Messungen an einer Skulptur.

Eine verkleinerte Version kann sogar im Mund Zähne dreidimensional erfassen. Das führt zu einer weiteren, interessanten Anwendung der „reverse-engineering“ Kette bei der Herstellung von Zahnersatz ebenfalls über ein virtuelles Modell. Die inzwischen aus dem Zentrum ausgegründete Firma 3D-Shape GmbH entwickelt und vermarktet Sensoren und Software für die optische 3D-Messung und die Verarbeitung der 3D-Daten. Die

Sensoren wird inzwischen u.a. auch in der Erlanger Universitätsklinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie verwendet.

### Sensor gleicht dem Insektenauge

Ein Beispiel für die hochgenaue Vermessung von sogenannten asphärischen Flächen, die für moderne Hochleistungsobjektive, aber auch für Brillengläser verwendet werden, ist der sogenannte Shack-Hartmann Sensor. Hier trifft das vom Prüfling kommende Licht auf ein Feld von Mikrolinsen. Diese Anordnung hat eine gewisse Ähnlichkeit mit einem Insektenauge. Aus der Abweichung der einzelnen Brennpunkte von der jeweiligen optischen Achse kann man die Krümmung der Wellenfront des Lichts und damit die Wirkung der optischen Fläche, insbesondere deren Fehler, hochgenau bestimmen. Diese Messtechnik ist eine Spezialität der ebenfalls kürzlich aus dem Zentrum ausgegründeten Firma Optocraft GmbH.

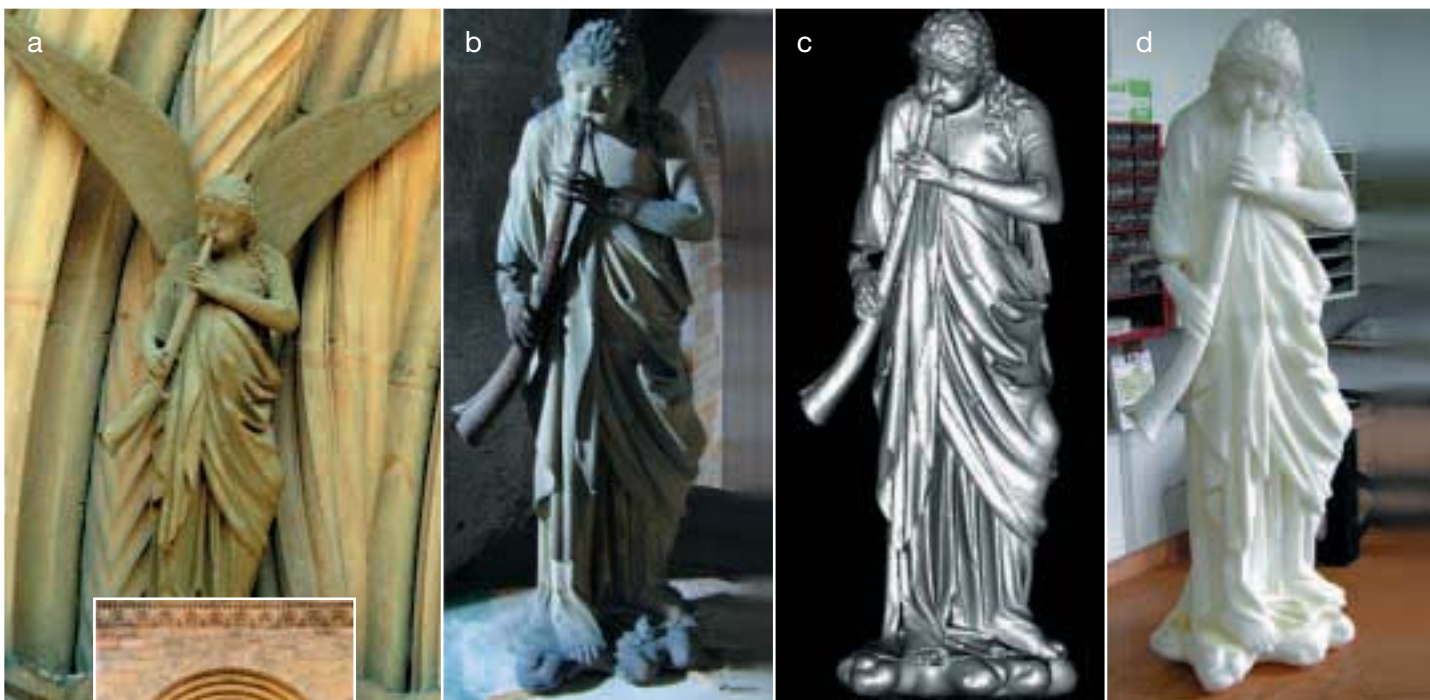


Abb. 2: Reverse-engineering Kette vom virtuellen 3D-Modell zur 3D-Kopie.

Dies ist eine Anwendung, bei der die Kette vom Objekt über ein virtuelles Modell zu einer 3D-Kopie demonstriert wird. Am Fürstenportal des Bamberger Domes wurden Figuren vor etwa 100 Jahren entfernt (Abb. 2a), um sie vor dem Wetter zu schützen. Der so genannte „Posaunenengel“ (Abb. 2b) wurde von uns dreidimensional vermes-

sen, wozu etwa 200 3D-Aufnahmen aus verschiedenen Richtungen gemacht wurden, die dann zu einem „3d-Rundum-Modell“ (Abb. 2c) zusammengesetzt wurden. Daraus wurde mit Hilfe eines „rapid-prototyping-Verfahrens“ eine Kunststoffkopie (Abb. 2d) hergestellt. Von dieser wiederum wurde ein Silikonabdruck gemacht, und davon schließlich ein „Steinguss“ aus Epoxidharz und Sand.

Schließlich noch ein Beispiel für die 3D- Vermessung von nahezu beliebigen Materialien mit einer Genauigkeit von etwa 1 Mikrometer: Triangulationsmethoden zeigen eine zu große physikalisch bedingte Messunsicherheit. Deshalb wird hier die sogenannte Weißlichtinterferometrie verwendet, wir haben das Verfahren „Kohärenzradar“ genannt: Man ersetzt in einem Interferometer einen Spiegel durch das (optisch rau!) Objekt. Damit geht die sonst verwendete Phaseninformation über das Objekt zwar verloren, aber wegen der kurzen Kohärenzlänge ist eine hochgenaue Messung der Oberflächengestalt über die Lokalisation von Interferenzen möglich. Das Verfahren zeigt eine erstaunliche Besonderheit: Die Messunsicherheit ist nicht mehr durch das Instrument, sondern nur durch die Rauigkeit des Objekts begrenzt.

Statt der Interferometrie mit weißem Licht kann man auch Laserlicht benutzen, bei dem zwei oder drei verschiedene Wellenlängen überlagert werden (Abb. 4). Hierfür wurde am Zentrum für Moderne Optik ein spezielles Verfahren zur Unterdrückung des störenden Speckle-Rauschens entwickelt, das in ähnlicher Weise bereits aus der Funktechnik bekannt war. Dort erzeugt die raue Unterseite der Ionosphäre Speckle der Radiowellen, was ohne Gegenmaßnahme zu unerwünschten Signalausfällen führt. Dies sind nur einige Beispiele aus der Forschungsarbeit des Zentrums für Moderne Optik, das versucht, den weiten Bogen von der Grundlagenforschung zu den Anwendungen zu spannen.

*Prof. Dr. Gerd Leuchs ist seit 1994 Inhaber des Lehrstuhls für Experimentalphysik/Optik am Physikalischen Institut der Naturwissenschaftlichen Fakultät I der Universität Erlangen-Nürnberg.*

*Prof. Dr. Gerd Häusler hat seit 1987 eine außerplanmäßige Professur am Lehrstuhl für Optik inne.*

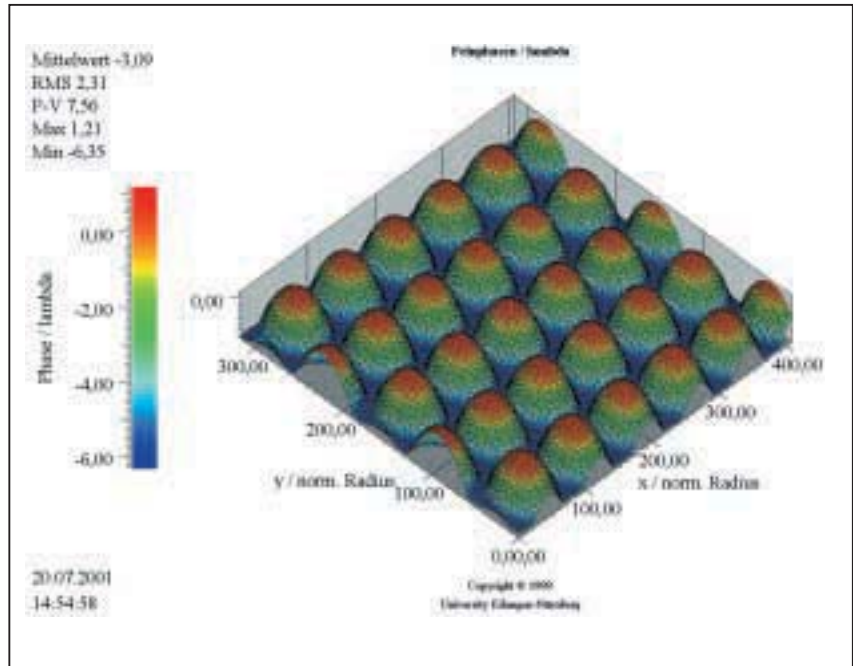


Abb. 3: Shack-Hartmann Sensor zur Messung von Lichtwellenfronten. Die Abbildung zeigt das Ergebnis einer interferometrischen Oberflächenmessung an einem refraktiven Mikrolinsenfeld, dem Herzstück eines

Shack-Hartmann Sensors. Die refraktiven Mikrolinsen wurden im Zentrum für Moderne Optik hergestellt. Der Durchmesser einer einzelnen Linse entspricht in etwa dem Durchmesser eines Haars (ca. 60 Mikrometer).

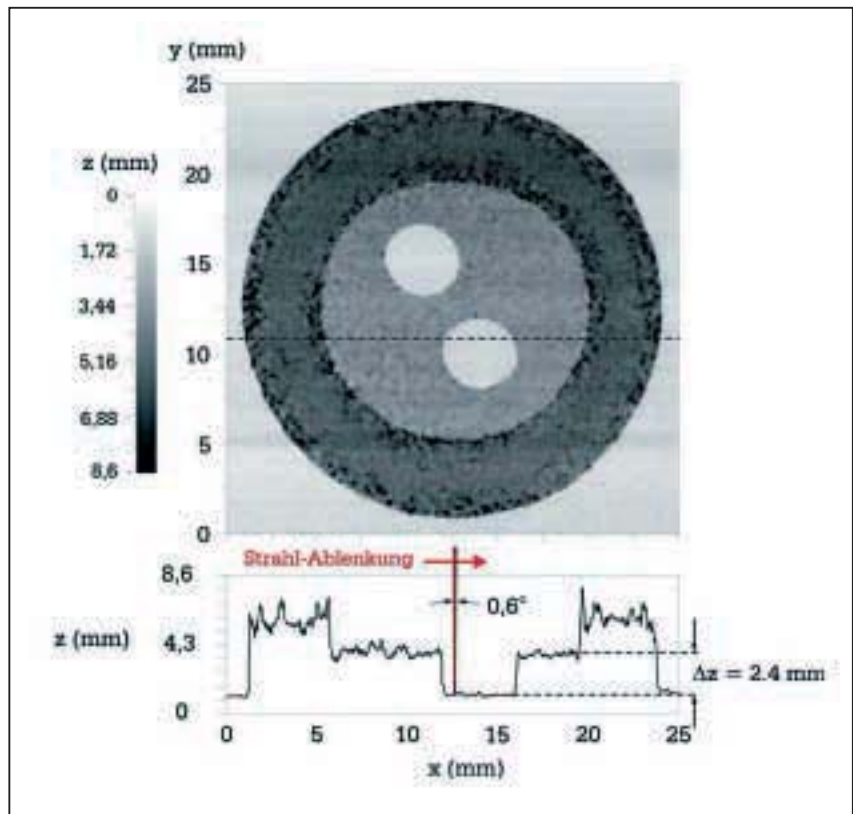


Abb. 4: Messungen mit dem „Mehrwellenlängen-Interferometer“. Mit einem neuartigen interferometrischen 3D-Sensor wurde die Topographie eines Holzknopfes auf einer Metalloberfläche aus einer Entfernung von einem Meter vermessen. Der Knopf wurde mit einem schlanken Messstrahl Punkt für Punkt

abgetastet. Aufgrund des geringen Öffnungswinkels des Messstrahls von nur 0,66° können auch unzugängliche Stellen, wie z.B. die Ecken am Boden der Knopflocher, erfasst werden. Zur Veranschaulichung wurde der Messstrahl maßstäblich in das gemessene Profil eingezeichnet.