

Technische Universität Dresden

Intermodale Displays auf Basis intrinsisch aktiver Polymere

Georgi Paschew

von der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der
Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur

(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

Vorsitzender	Prof. Dr. rer. nat. Stefan Mannsfeld	Tag der Einreichung:	30.09.2020
Gutachter	Prof. Dr.-Ing. Andreas Richter	Tag der Verteidigung:	07.12.2020
Gutachter	Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Czarske		

Danksagung

Die vorliegende Dissertation wurde an der Professur für Mikrosysteme und der Professur für Physikalische Chemie angefertigt.

Zuallererst möchte ich herzlichst meinem Doktorvater Prof. Andreas Richter für sein jederzeit offenes Ohr danken, für das Thema dieser Dissertation, die Betreuung, konstruktive Kritik und für die Unterstützung. Meinem Zweitgutachter Prof. Andrij Pich danke ich, dass er die Begutachtung der Arbeit so kurzfristig ermöglicht hat und für die Einführung in die Technologie der Gefriertrocknung.

Für diese Dissertation waren Vorarbeiten erforderlich, um grundlegende Funktionsprinzipien nachzuweisen. Insbesondere für die Thermographieausrüstung möchte ich meinen Dank an Prof. Gerald Gerlach und Dr. Helmut Budzieher vom Institut für Festkörperelektronik richten. Für die chemische Expertise und die Technik für UV-Polymerisation bedanke ich mich bei Prof. Dirk Kuckling.

Während der Leiterplattentechnologieentwicklung konnte ich immer auf die technische Expertise der Elektronikwerkstatt zurückgreifen, hierfür danke ich Herrn Dr. Gerald Hielscher. Für die Unterstützung bei der Geräteentwicklung bedanke ich mich bei der Werkstatt für Präzisionsmechanik der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik und insbesondere bei Meister Löper, der diese Arbeit mit konstruktiver Kritik und viel Erfahrung unterstützte.

Nicht selbstverständlich aber unvergesslich gut war die Atmosphäre und die gegenseitige Unterstützung im interdisziplinären Sonderforschungsbereich „Reaktive Polymere“ und die daraus entstandene gruppenübergreifende und persönliche Zusammenarbeit zwischen der Professur von Prof. Karl-Friedrich Arndt für Physikalische Chemie, der Professur von Prof. Hans-Jürgen P. Adler für Makromolekulare Chemie und dem Ingenieursteam von Professor Richter. In zahlreichen Gesprächen konnte ich auf das fachübergreifende Wissen zur Herstellung, Analyse und Anwendung polymerer Werkstoffe zurückgreifen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Kollegen Denise Gruner, Andreas Voigt, David Rupsch, Franziska Krahl, Rene Körbitz, Philipp Mehner, Anthony Beck, Markus Tietze, Tilo Köckritz, Stephan Klatt, Merle Allerdissen, Bernhard Ferse, Rene Luther. Besonderen Dank für unterstützende Arbeiten im Rahmen seiner Bachelorarbeit gilt Nicos Ölsner und Maelle Goubin im Rahmen ihres Praktikums.

Last but not least bedanke ich mich bei meinen Freunden und bei meiner Familie für die immerwährende Unterstützung.

Kurzfassung

Der menschliche Tastsinn leistet einen wesentlichen Beitrag zur Erkundung des Nahfelds, um die Realität zu erfassen und zu verstehen. Intermodalität als synchrone Wahrnehmung, die Tastsinn, visuelle und auditive Wahrnehmung einschließt, ermöglicht es dem Menschen, sein volles Potenzial zu entfalten. Die technische Wiedergabe von visuellen und auditiven Inhalten ist bereits hochpräzise und dreidimensional. Insbesondere der Tastsinn weist viele Submodalitäten auf und kann in der Mensch-Maschine-Interaktion nur eingeschränkt genutzt werden.

Aktuelle technische Systeme zur taktilen Darstellung bestehen aus vielen Einzelkomponenten. Folglich ist die Anzahl der Elemente nur schwer skalierbar oder große Systeme sind kostspielig. Dies schränkt die Verfügbarkeit und den Funktionsumfang ein.

Der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz ermöglicht die generelle Herstellung taktiler Displays mit fotolithographischen Methoden. Dabei werden alle Aktuatorelemente Schicht für Schicht und gleichzeitig während des Herstellungsprozesses erzeugt. Somit ist eine Miniaturisierung und Skalierung möglich, wie sie für Prozesse in der Halbleitertechnik üblich ist.

Stimulisensitive Hydrogele als Festkörper mit dem größtmöglichen nutzbaren Volumeneffekt sind die Materialbasis, auf der eine Plattform für Mikroaktoranwendungen entwickelt wurde. Erforderlich war die Realisierung eines UV-Belichtungssystems mit Reaktionskammer für die hydrogelspezifische Lithographie unter Schutzgasatmosphäre und mit definierter Reaktionstemperatur, welches für Aktorarrays mit einer Größe von $(50 \times 50) \text{ mm}^2$ geeignet ist. Die dauerhafte Aktoranbindung für die erforderliche mechanische Stabilität im Mehrschichtsystem wurde durch Oberflächenfunktionalisierung erreicht. Um die Aktorgröße jedes einzelnen Aktors zu kontrollieren, wurde das temperatursensitive Hydrogel PNIPAAm verwendet und zur Steuerung eine elektronikkompatible thermische Schnittstelle entwickelt. Dabei entsteht ein hochaufgelöstes thermisches Feld, welches aktorgenau den Zustand von jedem visuellen Pixel und taktilen Taxel einstellt. Es wurde ein System zur Wiedergabe von sowohl glatten als auch rauen Oberflächen und ein weiteres System zur Wiedergabe von Konturen aufgebaut. Da die Aktoren ihre optischen Eigenschaften verändern, haben die Displays damit zusätzlich auch eine visuelle, monochrome Funktionalität.

Mit dem verfolgten Ansatz wurden Systeme von bis zu 60×72 Aktoren bei einem Rastermaß von $580 \mu\text{m}$ realisiert, wobei der realisierte Aktorchip ein Large-Scale-Integration-System mit 4.320 Elementen darstellt.

Abstract

The human sense of touch makes a significant contribution to near-field exploration in order to grasp and understand reality. Intermodality as a synchronous interaction of the sense of touch with visual and auditory perception enables the human being to develop his full potential. The technical reproduction of visual and auditory content is already highly precise and three-dimensional. The sense of touch in particular has many submodalities and can only be used to a limited extent in human-machine interaction.

Current technical systems for tactile representation are made up of many individual components. As a result, scaling up the elements is difficult and large systems are costly. This limits the availability and the range of functions.

The approach used in this dissertation enables the general production of tactile displays using photolithographic methods. Thus, all actuator elements are produced layer by layer and simultaneously during the manufacturing process. Therefore a miniaturisation and scaling is possible, as it is usual for processes in semiconductor technology.

Stimuli-sensitive hydrogels as solids with the greatest possible usable volume effect are the material basis on which a platform for micro actuator applications was developed. It was necessary to realise a UV exposure system including a reaction chamber for hydrogel specific lithography under inert gas atmosphere and with defined reaction temperature, which is suitable for actuator arrays with a size of $(50 \times 50) \text{ mm}^2$. The permanent actuator bonding for the required mechanical stability in the multilayer system was achieved by surface functionalisation. To control the actuator size of each individual actuator, the temperature-sensitive hydrogel PNIPAAm was used and an electronically compatible thermal interface was developed for operation. The result is a high resolution thermal field, which precisely adjusts the state of each visual pixel and tactile taxel. A system for reproducing both smooth and rough surfaces and another system for reproducing contours was developed. Since the actuators change their optical properties, the displays also have an additional visual, monochrome functionality.

With the approach in this dissertation, systems of up to 60×72 actuators were realised with a grid size of $580 \mu\text{m}$, whereby the realised actuator chip represents a large scale integration system with 4.320 elements.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Präzisierte Problemstellung	3
3	Stand der Technik	4
3.1	Haptik	4
3.2	Kutane Displays	11
3.3	Taktile Wahrnehmung als Grundlage kutaner Displays	18
3.3.1	Frequenzabhängigkeit der Hautwahrnehmung	18
3.3.2	Sensortypen der Haut	18
3.3.3	Zusammengesetzte Wahrnehmung und Wahrnehmbarkeitsschwellen	21
3.3.4	Auswahl des Aktorfunktionsprinzips	25
3.4	Grundlagen stimulisensitiver Hydrogele	28
3.4.1	Arten von Gelen	28
3.4.2	Thermodynamisches Gleichgewicht der Gelquellung	29
3.4.3	Quellkinetik: Zeitliche Beschreibung der Quellung	33
3.4.4	Herstellung von Hydrogelstrukturen	36
3.5	Erzeugung eines Temperaturprofils zur Aktorsteuerung	39
4	Herstellung des Aktorchips und Elementansteuerung	40
4.1	Trägersubstratherstellung	40
4.1.1	Trägersubstrat-Schichtaufbau: vereinfachtes Modell	40
4.1.2	Projektionsschicht	42
4.1.3	Herstellung einer transparenten Schicht definierter thermischer Eigenschaften	43
4.2	Aktorarrays auf Hydrogelbasis	44
4.3	Fotolithografischer Prozess	45
4.3.1	Belichtungseinheit	46
4.3.2	Lichtleistung und Uniformität	48
4.3.3	Fotolithografische Maske	49
4.3.4	Proximity-Belichtung – 1:1 Schattenprojektion	50
4.4	Hydrogelsynthese	51
4.4.1	Vernetzergehalt	52
4.4.2	Fotoinitiator	53

4.4.3	Lösungsmittel- und Monomerkonzentration	53
4.4.4	Lösungsmittelqualität und Temperatur	54
4.4.5	UV-Intensität	56
4.4.6	Lithografische Hydrogelstrukturierung	58
4.4.7	UV-Belichtungszeit	61
4.4.8	Belichtungsprozess und Lichtleistung	62
4.4.9	Auswirkungen von Sauerstoff auf die Hydrogelstruktur	63
4.5	Strukturierungsgrenze	64
4.6	Haftvermittlung zwischen Hydrogelaktoren und Trägersubstrat	65
4.7	Thermische Aktorsteuerung	66
4.7.1	Temperatursteuerung im Quellungsgleichgewicht	66
4.7.2	Quellverhalten bei schneller Temperaturänderung und kurzer Quellzeit	69
4.8	Fertigungstechnologie für Großflächenmikrostrukturierung	75
4.8.1	Herstellung von Großflächenmaster	75
4.8.2	Elastische Displayabdeckung	77
4.8.3	Mikrofluidische Quellmittelversorgung des Aktorchips	79
5	Optoelektrothermischer Controller	80
5.1	Konzept Wärmesteuerung durch Licht	80
5.2	Aktorchip-Aufnahmeeinheit mit Licht-Wärme-Umwandlung	81
5.3	Mechanischer und optischer Aufbau	83
5.4	Zusatzoptik für Projektion auf 2,5 Zoll Displaydiagonale	84
5.5	Umlenkspiegel	84
5.6	Leistungsparameter der verwendeten Projektions-Systeme	84
5.7	Projektorcharakteristik	85
5.8	Setup der Thermografiecamera	87
5.9	Optimierung und Charakterisierung der Aktorsteuerung	87
5.9.1	Design-, Betriebs- und Messgrößen der thermischen Steuerung	87
5.9.2	Dimensionierung und Optimierung der thermischen Steuerung	91
5.9.3	Zeitliche und räumliche Auflösung der Aktorsteuerung	97
5.9.4	Optische Temperaturbestimmung durch Kontrastfunktion	100
6	Multimodales Display	102
6.1	Displayfunktionen	103
6.1.1	Basisaktorchip als Aktorarray mit Substrat und Abdeckung	103
6.1.2	Monochrome Displayfunktion	103

Inhaltsverzeichnis

6.1.3	Ausgabe taktiler Oberflächeneigenschaften	105
6.1.4	Taktile Kanten hervorhebung der Kontur	107
6.2	Kombinierte Monochrom und Displacementfunktionalität	109
7	Zusammenfassung	111
8	Ausblick	114

Abkürzungsverzeichnis

BIS	<i>N,N'</i> -Methylenbisacrylamid
DLP	Digital Light Processing
FI	Fotoinitiator
HG	Hydrogel
LCST	Lower Critical Solution Temperature (dt. untere kritische Entmischungstemperatur)
LOC	Lab-on-a-Chip
LSI	Large Scale Integration
LM	Lösungsmittel
MEMS	Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme
NIPAAm	<i>N</i> -Isopropylacrylamid
PC	Personalcomputer bzw. Polycarbonat
PÜT	Phasenübergangstemperatur
PDMS	Poly(dimethylsiloxan)
PET	Polyethylenterephthalat
PNIPAAm	Poly(<i>N</i> -Isopropylacrylamid)
SMD	Surface-mounted device (dt. oberflächenmontierte Bauelemente)
ITO	Indium-Tin-Oxide (Indium-Zinn-Oxid)
QM	Quellmittel
UV	Ultraviolett

Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung
α_{th}	Wärmeübergangskoeffizient
χ	Löslichkeitsparameter
ΔF	Freie Helmholtzsche Energie
δ_{ik}	Kronecker Delta Operator
ε	Dehnung
λ_{th}	Wärmeleitfähigkeit
∇	Nabla-Operator
ϕ	polymerer Volumenbruch
ρ	Dichte
σ	Materialspannung
τ	Zeitkonstante
\vec{r}	Richtungsvektor der Quellung
\vec{f}_r	Reibungskraft
\vec{r}_0	Teilchenradius im trockenen Zustand
\vec{r}_∞	Teilchenradius im Quellungsgleichgewicht
\vec{r}	Differenzvektor (Quellungszustand gegenüber Trockenzustand)
ζ	Reibungskoeffizient
A_{Fl}	Fläche
C_{sp}	spezifische Wärmekapazität
D_{coop}	kooperativer Diffusionskoeffizient
D_A	Aktordichte
G	Schubmodul
I	Lichtintensität bzw. Helligkeit
$K(I, I_{min})$	Kontrastfunktion (I ist die Lichtintensität)
k	Boltzmannkonstante
K	Elastizitätsmodul
m	Masse
n_c	Durchschnittliche Kettenlänge zwischen zwei dreidimensionalen Vernetzungspunkten im Gelkörper

Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Bedeutung
n_q	Stoffmenge des Quellmittels in <i>mol</i>
P_{Heiz}	Heizleistung
Q_m	Massenquellungsgrad
q_p	Lichtleistungsdichte des Projektors am Ort der Projektionsfläche ohne Zwischenschichten (optische Fenster, Temperierflüssigkeit)
Q_v	Volumenquellungsgrad
q	(Heiz-) Leistungsdichte
q	Wärmestromdichte
R_{th}	Wärmewiderstand (in Analogie zum ohmschen Widerstand)
R	Ohmscher Widerstand
t_F	Optische Transmission eines Objektes
T	Temperatur
T_T	Basistemperatur der Temperierflüssigkeit
u_{pp}	Polymer-Polymer-Wechselwirkung Interaktionsenergie
u_{pq}	Polymer-Lösungsmittel-Interaktionsenergie
u_{qq}	Lösungsmittel-Lösungsmittel Interaktionsenergie
\dot{V}	Volumenstrom (Temperierflüssigkeit)
V	Volumen

1 Einleitung

Im Zuge der Digitalisierung wächst auch die Notwendigkeit für haptische Interaktion mit Objekten der virtuellen Welt. Der Bedarf und die Lösungsansätze sind vielseitig, wobei auch der Markt eine hohe wirtschaftliche Relevanz erreicht hat.

Der Mensch ist am leistungsfähigsten, wenn er mehrere Sinneswahrnehmungen gleichzeitig benutzen kann. So forcieren Smartphones und Tablet-PCs, welche als Kernstücke der Digitalisierungswelle gelten können, den Haptik-Boom. So gibt es Bestrebungen von weltweit führenden Technologiekonzernen, Displays auch mit taktiler Funktionalität auszustatten, um die Möglichkeit zu schaffen u. a. die Position oder die Textur von Elementen zu erfühlen und damit das intuitive Bedienen zu verbessern. Bereits das sogenannte „haptische Feedback“, welches mit kurzen Vibrationen das Drücken einer Taste als grafisches Bedienelement sehr vereinfacht simuliert, führt zu einer schnelleren und robusteren manuellen Eingabe. Die Entwicklungen gehen jedoch noch nicht weit genug.

Einfache Ansätze bringen eine allgemeine Verbesserung der Mensch-Maschine-Interaktion, Aufwändigere können durch Krafrückkopplung auch die dynamische Interaktion mit Objekten ermöglichen. Das ferne Ziel ist, die Grundlagen für haptische Computerausgabe mit realistischen und anfassbaren Objekteigenschaften zu schaffen, um zum Beispiel Produkte aus Onlineshops visuell und taktil vor dem Kauf zu begutachten, Designern den Entwicklungsprozess zu vereinfachen und Ärzten die Diagnose und die Arbeit in der minimalinvasiven Chirurgie zu erleichtern.

Es gibt verschiedene Ansätze und Systeme, welche an der Mensch-Maschine-Schnittstelle taktile Eindrücke erzeugen und vermitteln. Das taktile Eigenschaftsprofil von realen Objekten besitzt Eigenschaften wie zum Beispiel Form, Gewicht, Oberflächentextur, Kontur, Härte, Wärmeleitfähigkeit und Nachgiebigkeit, welche von unterschiedlichen Submodalitäten des Tastsinns, des Temperatursinns und der Propriozeption erfasst werden. Insbesondere an taktilen Displays stellt man fest, dass Vereinfachungen vorgenommen werden, um einzelne, ausgewählte Modalitäten abzubilden. Mit den bisher verwendeten Materialien und Funktionsprinzipien sind taktile Geräte vergleichsweise schwer und komplex aufzubauen, wodurch der Herstellungsaufwand und die Kosten ansteigen. Aus diesem Grund besteht der Bedarf, Materialien und Funktionsprinzipien zu entwickeln, mit deren Einsatz der Systemaufbau vereinfacht wird. Eine hochauflösende multimodale Darstellung ist ebenso erwünscht, wie die Möglichkeit extrem leichte Geräte für den mobilen Einsatz zu entwickeln.

Die Klasse der stimulisensitiven Hydrogele, kurz „Smarte Hydrogele“, stellt eine sehr interessante Möglichkeit für neue Konzepte zur Realisierung einer taktilen Ausgabe dar. Diese Po-

lymere können ihr Gewicht und damit auch ihr Volumen durch die Aufnahme eines geeigneten Quellmittels (z. B. Wasser) um ein Vielfaches verändern. Ihre Größe hängt vom Quellungs-
zustand ab und ist bei stimulisensitiven Hydrogelen reversibel steuerbar. Bei einem Vergleich
mit den vielfältig angewendeten Festkörpereffekten, wie zum Beispiel Piezoeffekt oder Form-
gedächtnislegierungen, stellt man fest, dass diese im Anwendungsfall nur im unteren Prozent-
bzw. Promillebereich ihre Länge ändern, wogegen stimulisensitive Hydrogele mit geeigneter
Vernetzung ihr Volumen zwischen entquollenem und gequollenem Zustand zum Beispiel um
das Achtfache ändern können (Längenänderung um Faktor zwei). Die Veränderung des E-
Moduls bietet außerdem einen zweiten potentiellen Entwicklungsansatz zur Darstellung von
Objekt- bzw. Material- und Oberflächeneigenschaften.

Durch die Nutzung von Methoden der Mikrosystemfertigung und insbesondere der Batch-
Fabrikation zur Herstellung von Hydrogelaktoren lassen sich potenziell die Nachteile heutiger
taktiler feinmechanischer Hybrid-Systeme überwinden. Von bisherigen Systemen ausgehend,
bei denen viele mechanische Teile jedes einzelnen Aktors aufwändig zusammengebaut werden
müssen, ist das Ziel dieser Arbeit eine Konzeption und Realisierung von Mikroaktorarrays, bei
der im Batch-Prozess alle Aktoren simultan entstehen.

Die Erschließung der Batch-Prozesse aus dem Bereich der Massenherstellungstechnologien für
integrierte Mikroprozessoren bedeutet, dass die lithografischen Methoden der Halbleiter- und
Mikrosystemtechnik auf die Herstellung von Hydrogelaktoren angepasst und übertragen wer-
den. Die daraus entstehenden Vorteile sind hohe Integrationsgrade bei geringerem Herstellungs-
aufwand und Preis gegenüber den bisherigen auf dem Markt erhältlichen Aktortechnologien.
Das Ergebnis ist eine allgemeine Plattform für hydrogelbasierte Mikroaktorsysteme, mit deren
Hilfe vielfältige Aufgabenstellungen gelöst werden können.

Ein weiteres Ziel ist die Herstellung eines Aktorsystems, welches auch miniaturisiert ausrei-
chend viel Kraft zur Vermittlung taktiler Eindrücke bietet und die Stufe einer Large-Scale Tech-
nologie erreicht [1]. Vom Erreichen des Ziels hängt ab, ob diese Technologie allgemein auch
für andere Gebiete wie die Mikrofluidik ein großes Innovationspotential bietet [2].

2 Präzisierte Problemstellung

Am Beispiel eines intermodalen Displays, welches taktile und visuelle Inhalte darstellen kann, sollen in dieser Arbeit die Grundlagen einer hochintegrationsfähigen Plattform Mikroelektromechanischer Systeme (MEMS) auf Basis intrinsisch aktiver Polymere, insbesondere temperatursensitiver Hydrogele (HG) gelegt werden.

Zunächst ist die stoffliche Basis (Substratmaterialien, aktive Polymermaterialien und Verbindungsmittel) für den Einsatz in den integrierten MEMS-Strukturen und Schaltkreisen auszuwählen und anzupassen. Dazu müssen die Herstellungsparameter optimiert werden, um eine gezielte Einstellung der aktorischen, mechanischen, sensorischen und zeitlichen Eigenschaften zu gewährleisten. Dafür sind Konzepte zu deren Integration in das System erforderlich.

Eine zweite Herausforderung besteht in der Konzeption monolithischer Chiparchitekturen und Verfahren zu deren Fertigung. Dies umfasst erstens Aspekte einer lithografischen Batch-Fertigung. Sie soll die Herstellung großintegrierter MEMS ermöglichen, bei denen die Bauelemente über die gesamte Chipfläche geeignete Eigenschaften aufweisen. Zudem muss zweitens eine Technologie zur Strukturierung der Substrate und Mikrostrukturierung der intrinsisch-aktiven Materialien entwickelt und angepasst werden. Diese Integrationstechnologie berücksichtigt neben der Herstellung der aktiven Baugruppen und funktionsunterstützender Strukturen drittens auch die Aufbau- und Verbindungstechnologie. Viertens ist weiterhin eine makroskopische Struktur zu schaffen, die neben den Schnittstellen zur Mikroaktorchipumgebung auch einen mechanischen Rahmen beinhaltet.

Neben den eigentlichen Aktivmaterialelementen ist eine elektronikkompatible Schnittstelle zur Steuerung erforderlich. Aufgrund des Quellvorgangs, ist ein weiteres Konzept zur Gewährleistung der Quellmittelversorgung und des Massentransports notwendig.

Am intermodalen Display ist die Integration aller Aspekte in einem System zu realisieren, welches aus taktilem Sicht als hochauflösendes Großflächendisplay bezeichnet werden kann. Dabei sind insbesondere Aspekte der Großintegration (Large Scale Integration, LSI) hinsichtlich der Herstellung der aktorischen Elemente und deren Ansteuerung mit den Punkten Adressraum, Auflösung, Energiebilanz sowie der technischen Systemfunktion eines multimodalen Displays zu beachten. Die optisch-taktilen Modalitäten beinhalten die Volumenänderung, Elastizitätsänderung und die optische Eigenschaftsänderungen des Aktormaterials. Die Funktionsuntersuchungen sollen anhand eines zu realisierenden, großintegrierten multimodalen Displays erfolgen.

3 Stand der Technik

3.1 Haptik

Das Fachgebiet der Haptik befasst sich sowohl mit der berührungsbasierten Wahrnehmung der Außenwelt als auch mit der Selbstwahrnehmung des eigenen Körpers und beinhaltet ebenso die Lehre der berührungsbasierten Interaktion zwischen Mensch und Maschine. Die taktilen Displays sind ein Bestandteil des Letztgenannten. Die Grundlagen der Haptik zusammen mit den biologischen Gegebenheiten des Tastsinns bieten das Verständnis für die Möglichkeiten und Ausprägungen haptischer Systeme und taktiler Displays. Die haptischen Geräte werden so konstruiert, dass sie die Interaktion mit realen und mit virtuellen Objekten ermöglichen. So kann z. B. während einer Telemanipulation mit weit entfernten Objekten gearbeitet werden.

Die Bedeutung des Tastsinns wird durch folgendes Zitat deutlich: „Der Tastsinn trägt wesentlich zur Gestaltwahrnehmung von Gegenständen bei. Um eine klare Vorstellung von einem Gegenstand zu erhalten, führen wir die Finger über seine Oberfläche. Wenn wir z. B. den Inhalt unserer Hosentasche betasten, dann unterscheiden wir mit Leichtigkeit einen Schlüssel von einem Taschenmesser. In der Dunkelheit erhalten wir durch Betasten eine Vorstellung des umgebenden Raumes. Diese Fähigkeit ist besonders wichtig für Blinde, wahrscheinlich trägt sie aber übertragbar bei allen Menschen während der frühkindlichen Entwicklung wesentlich zur Entstehung der Raumvorstellung bei“ [3]. Der Tastsinn spielt eine wesentliche Rolle beim Erkunden des Nahfeldes.

Kinästhetik und taktile Displays

Auf der biologischen Seite fasst die Somatosensorik alle Empfindungen zusammen, welche durch Sensoren im Körper hervorgerufen werden. Das sind die *Kinästhetik*, die *Propriozeption* sowie die *Exterozeption* und die *Interozeption*.

Der Teilbereich der *Kinästhetik* vermittelt dem Benutzer die inneren, statischen und dynamischen Zustände von Körpern oder Systemen, mit denen er interagiert, wobei die Sinnesmodalitäten der Propriozeption angesprochen werden, wodurch eine Wahrnehmung der Tiefeninformation ermöglicht wird.

Die Rezeptoren des kinästhetischen Sinns werden in vier Kategorien unterteilt (**Tabelle 1**), von denen sich zwei in den Gelenken und zwei in den Muskeln befinden: Ruffini-Endungen in den Gelenkkapseln geben Informationen über die Dehnung und das Golgi-Sehnenorgan, welches in den Skelettmuskeln am Übergang von Sehne zu Muskel sitzt, liefert Information über das anliegende Moment. Die Muskelspindelendigungen in den Muskeln erfassen die statische Position

Tab. 1. Somatosensorische Rezeptoren mit der Submodalität Propriozeption [5].

Rezeptortyp	Adäquater Reiz	Antwortcharakteristik	Lage	Fasertyp	Sinneseindruck
Primäre Muskelspindelendigung	Dehnung	Phasisch und statisch	Muskel	Ia	Bewegung
Sekundäre Muskelspindelendigung	Dehnung	Statisch	Muskel	II(A β)	Lage
Golgi-Sehnenorgan	Aktive Kraft	Phasisch und statisch	Sehne	Ib	Kraft
Ruffini-Rezeptor	Dehnung	Phasisch und statisch	Gelenk	II(A β)	Lage

und die Bewegung. Alle Sensoren zusammen liefern die Information über die Gelenkwinkel und die Muskellänge, die anliegende Spannung und dessen Änderungsrate [4].

So informiert der Körper das Gehirn über die Position bzw. den Aktivitätszustand der Gelenke, Muskeln und Sehnen. Aus dieser komplexen Sinneswahrnehmung erfolgt über den Zwischenschritt zur Ermittlung von Gelenkbewegung, Bewegungsgeschwindigkeit und Dehnungszustand der Muskeln, welche die Gelenke kontrollieren, ein Gesamteindruck über den eigenen Körper und von den am Körper wirkenden Kräften. Im Gehirn erfolgt eine Ermittlung der statischen und dynamischen Zustandsgrößen des eigenen Körpers ähnlich wie in technischen Systemen, in denen nicht direkt messbare Größen in Echtzeit anhand eines vorher kalibrierten Modells simuliert werden. Es ist eine kognitive Leistung, ein komplettes Gesamtbild über den eigenen Körper entstehen zu lassen, so dass man ohne hinzuschauen eine Eigenwahrnehmung hat und weiß, wo sich alles befindet oder mit geschlossenen Augen einen Punkt im Raum berührt und ein Gewicht schätzen kann, welches man in der Hand hält [3], [4], [6].

Propriozeption umfasst in der Summe die Sensorik des Bewegungsapparates. Hierzu gehört die Tiefensensibilität als Sinneswahrnehmung für die Position des eigenen Körpers mit den Sinnesmodalitäten Kraft- und Widerstandssinn sowie mit der Wahrnehmung von Stellungen (*Positionssinn*) und von Bewegungen einzelner Teile des Körpers (*Kinästhesie*), wodurch eine Selbstwahrnehmung als Zustand des eigenen Körpers entsteht (*Propriozeption*) [3], [4].

Die *Ekterozeption* umschließt die Sensorik der Körperoberfläche und betrifft die in der Haut liegenden Sensoren, mit denen z. B. Druck (*Mechanorezeptoren*), Temperatur (*Thermorezeption*) und Schmerz (*Nozizeption*) wahrgenommen wird [7]. Die Wahrnehmung der Haut wird in Verbindung mit dem Tastsinn und dem taktilen Display im Unterkapitel 3.3 ausführlich dargestellt.

Der griechische Begriff „haptios“ liegt im Ursprung des Begriffes Haptik und bezeichnet etwas Greifbares. Auf der Seite der Ingenieurwissenschaften umfasst die *Haptik* angelehnt an die menschliche Physiologie die Teilgebiete der *Kinästhetik* (Geräte mit Ausgabe für die kinästhetische Wahrnehmung) und der *kutanen Displays* (Ausgabe für die Rezeptoren auf der Hautoberfläche).

In ihrem Buch „Entwicklung haptischer Geräte“ stellen die Autoren Folgendes fest: „Gleichzeitig stellt [die menschliche] Anpassungsfähigkeit und die Unschärfe der Systemgrenzen haptischer Interaktion ein Problem für den Entwurf des technischen Gerätes dar.“ Auch die Begriffsabgrenzung ist nicht einfach: „Trotz oder gerade ob der Vielfalt dieser mit haptischen Systemen arbeitenden Industrie ist das Verständnis der ”Haptik” und der damit direkt verknüpften Begriffe ”taktil” und ”kinästhetisch” mitnichten so eindeutig und unumstritten, wie es sein sollte“ [8].

Demnach verbindet der Bereich der Psychophysik alle Disziplinen miteinander. Dabei sind viele unterschiedliche haptische Geräte entstanden. So kann ein haptisches Gerät bereits die „perfekte Qualität“ haben, wenn es geeignete Rückmeldung über den Systemzustand liefert (Vibration, Tastenanschlag), bei Warnungen die Aufmerksamkeit anzieht oder es kann auch versuchen, so realistisch wie möglich eine virtuelle Umgebung zu simulieren und darzustellen [8].

Die Kinästhetik ermöglicht zum Beispiel Erkundung unzugänglicher Bereiche und die Manipulation von Objekten. Die Grundlagenforschung der haptischen Wahrnehmung und die angewandte Forschung an sich sind bereits die ersten Anwendungsgebiete der Haptik. Es gibt aber auch anwendungsnahe, bedeutende Applikationen wie z. B. die minimalinvasive (laproskopische) Chirurgie [9] und die Trainingssysteme für Chirurgen [10], die Telemanipulation [11], die Telepräsenz [12] und die Rehabilitation von Patienten, die einen Schlaganfall hatten [13].

Beispiele kinästhetischer Geräte mit Krafterückkopplung

In der Forschung weit verbreitet sind die haptischen Geräte vom Typ „PHANTOM“. Zur Interaktion hält der Nutzer einen Stift mit der Hand **Abbildung 1**. Mit der Spitze des Stiftes erfolgt die Erkundung von Objekten und Oberflächen. Dabei bringen die Motoren in der Aufhängung die erforderlichen Gegenkräfte auf, welche zur haptischen Interaktion erforderlich sind. In dem Beispiel in **Abbildung 2** kann der Nutzer nicht nur Oberflächen erkunden, sondern auch deren Oberfläche verformen.

Moderne Systeme nutzen neben der kinästhetischen Geräteausgabe auch die Darstellung von 3D Brillen und anderen 3D Ausgabegeräten, um für den Nutzer eine virtuelle Welt aufzubauen und eine bestmögliche Immersion zu ermöglichen. In **Abbildung 5** ist die NeuroTouch Plattform abgebildet, die im Forschungsbereich zur Simulation und des simulationsbasierten Trai-



Abb. 1. Kinästhetisches System PHANToM im Einsatz [10].

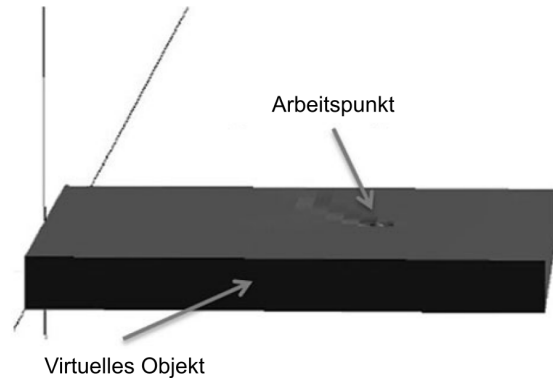


Abb. 2. Computersimulation eines virtuellen Objektes, dessen Oberflächen im Abtastbereich verformbar sind [10].

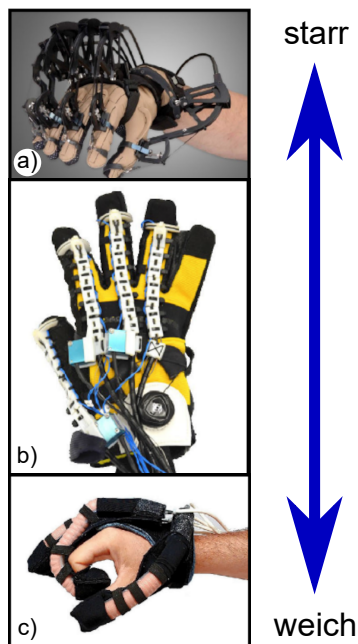


Abb. 3. Kinästhetische Systeme in der Ausführung als Exoskelett für die Hand mit Kräfteübertragung an die Finger. Realisierung a) und b) mit Handschuh und c) ohne Handschuh [14].



Abb. 4. Professor Massimo Bergamasco aus der Scuola Superiore di Studi Universitari in Pisa, Italien und sein Prototyp eines am Arm befestigten Exoskeletts als kinästhetisches Gerät in den Anfängen der Forschung [15].

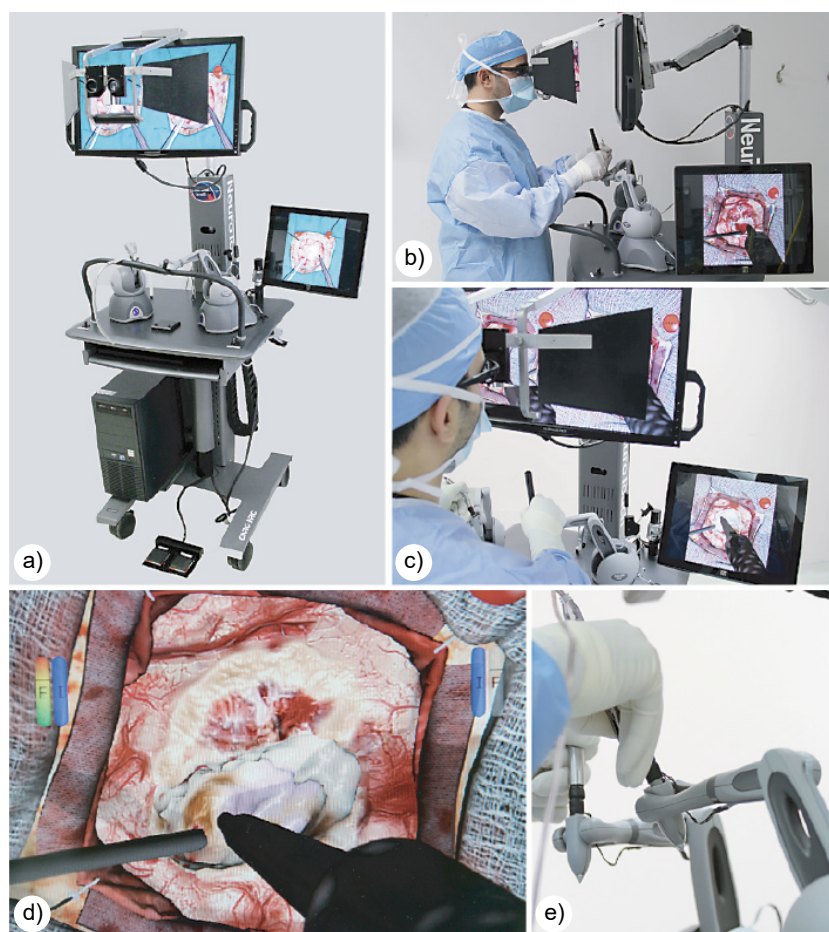


Abb. 5. NeuroTouch Plattform für Simulation und simulationsbasierte Trainings in der Gehirnchirurgie [16]. a) Gesamtgerät, b) Arzt bedient den Simulator c) Blick durch das Okular, d) Mikroskopdarstellung des Tumors, e) Taktiles Feedback für den Operator in einer Echtzeitanwendung.

nings in der Gehirnchirurgie verwendet wird. Diese sind sowohl bei der Planung einer Operation als auch in der präoperativen Simulation interessant [16].

Bei Interaktion und insbesondere bei Kollision im virtuellen Raum mit einem computersimulierten Objekt gibt es resultierende Kräfte, die dem Nutzer möglichst realitätsnah und auf natürliche Weise vermittelt werden müssen. Im Forcefeedbackmodus können am Körper angebrachte kinästhetische Systeme das Gefühl vermitteln, dass eine Kraft von außen kommt. Wie in **Abbildung 3** dargestellt, können die Kräfte entweder an den Fingern anliegen oder wie in **Abbildung 4** an den einzelnen Gelenken übertragen werden.

Applikationen mit kinästhetischen Systemen und taktilen (kutane) Displays

Kutane Displays sind auf die Wahrnehmung der Hautoberfläche spezialisiert. Um diese Aspekte für kinästhetische Systeme zu erschließen, werden taktile Displays in haptische Systeme integriert. Durch die Kombination beider Geräte übernehmen die taktilen Displays die Modalitäten der Oberfläche wie z. B. Textur und Kontur und das kinästhetische Modul die Darstellung der Tiefeninformation eines Körpers.

In der minimalinvasiven und robotergestützten Chirurgie hat der operierende Arzt zunächst keine Möglichkeit, seinen Tastsinn im Inneren des Patienten einzusetzen. Es gibt zahlreiche Arbeiten, welche kinästhetische und kutane Ausgabe kombinieren, um präzise Chirurgie zu ermöglichen [18]. Die Arbeit von C. R. Wottawa *et al.* ist ein Beispiel, welches zeigt, dass man die zufälligen Gewebeschäden während eines Greifvorganges reduzieren kann, wenn die Kräfte mit einem kutanen Display in Echtzeit dargestellt werden [17].

Die da Vinci Robotersysteme haben sich für den Einsatz in der minimalinvasiven Chirurgie etabliert. Das kinästhetische System wurde durch den wasserdichten Kraftsensor im Greifer erweitert (**Abbildung 6a**). Die Ausgabe der gemessenen Kräfte erfolgt auf einem kutanen Display an der Fingerkuppe. Die taktile Ausgabe ist als pneumatisch betriebener Ballonaktor (**Abbildung 6b**) ausgeführt. Die Kräfte werden in fünf unterschiedlichen Druckabstufungen quantisiert dargestellt. In **Abbildung 6c** ist das kutane Modul auf der Steuerung montiert und bereit für den Einsatz. Am Tierexperiment wurde durch das taktile Feedback eine Reduktion der Greifkraft erreicht und eine signifikante Reduktion der Gewebeschädigung während der Operation nachgewiesen (**Abbildung 6d**).



Abb. 6 a. Greifer eines da Vinci Systems mit integriertem, wasserdichten Sensor [17].



Abb. 6 b. Kutanes Ausgabegerät: taktiler, pneumatisches Ballon-Feedbacksystem [17].



Abb. 6 c. Kutanes Display montiert auf eine da Vinci Steuerung [17]. Der Sensor aus **Abbildung 6 a** gibt die Kraft vor, welche in fünf Stufen am taktilen Modul ausgegeben wird.

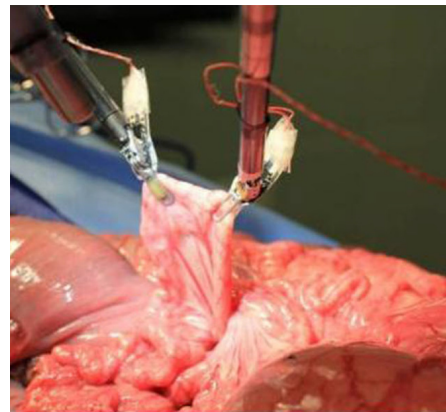


Abb. 6 d. Einsatz des Systems bei Operation als Tierexperiment und Nachweis der Reduktion von Gewebeschäden [17].

3.2 Kutane Displays

Insbesondere im Feld sehbehinderter und blinder Menschen besitzt die Oberflächenbeschaffenheit von Objekten eine wichtige Rolle für die Informationsaufnahme. In diesem Feld hat auch die Technik zur taktilen Informationsdarstellung eine langjährige Geschichte und man kann diese als Maßstab für die Leistungsfähigkeit von Geräten zur Darstellung von Oberflächenstrukturen verwenden.

In ihrem Buch „Blindenhilfen zum Lesen und Schreiben“ geben A. Maritzen und N. Kamps einen Einblick in die Möglichkeiten [19]. In **Abbildung 7** ist die BRAILLE-Schrift auf Papier dargestellt, in **Abbildung 8** ist die aufwändige Methode des manuellen Schreibens von Blindenschrift mittels Schablone und Punktschriftgriffel abgebildet. Auch in der Lehre werden grafische Darstellungen verwendet. In **Abbildung 9** ist eine mit 3D Druck hergestellte taktile Grafik zu sehen, welche Studenten das Verständnis erleichtert.

Damit die Schrift für sehbehinderte und blinde Menschen deutlich lesbar ist, hat die BRAILLE-

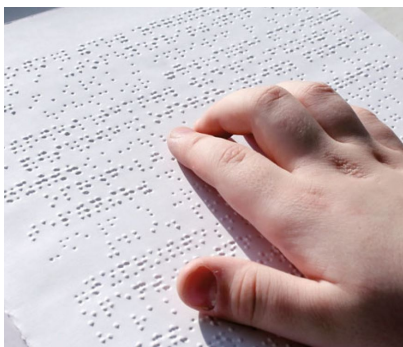


Abb. 7. In Papier geprägte BRAILLE Schrift [20].

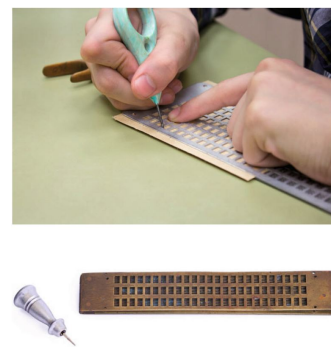


Abb. 8. Manuelles Prägen von BRAILLE Schrift [20].



Abb. 9. Taktile Grafik [21].



Abb. 10. BRAILLE-Zeile [20].

Spezifikation für den öffentlichen Raum nach DIN 32976 erhabene Punkte mit einem Durchmesser von 1,7 mm bis 1,9 mm, eine Höhe als näherungsweise Halbkugel mit 0,6 mm bis 0,65 mm und einen Abstand (horizontal und vertikal) von 2,6 mm bis 2,8 mm. Zwei Zeichen in einer Zeile haben den Abstand von 4 mm und Zeilen 5,2 mm bis 11 mm [22]. Diese Abmessungen sind so konzipiert, dass man die einzelnen Punkte deutlich getrennt voneinander wahrnehmen kann. In **Abbildung 10** ist die Arbeit mit einem BRAILLE-Gerät für die Computerausgabe von Text dargestellt.

Über die taktile Informationsdarstellung für sehbehinderte Menschen hinaus wurden zur taktilen Ausgabe elektronischer Geräte unterschiedliche Arten von Geräten entwickelt. In Abhängigkeit von der Art ihrer Darstellung können die Geräte in *dynamische*, *vibrotaktile* und in *wiederbeschreibbare*, *statische* Displays [23] unterteilt werden. Entsprechend ihres Wirkprinzips gibt es die Einteilung nach *thermischer Stimulation* zur Simulation von unterschiedlichen Materialien [24], [25], *elektrischer Stimulation* zur Darstellung voneinander unterscheidbarer Pulsmuster [26]–[28] und in *mechanischer Stimulation* [23], wobei diese (in der Literatur nicht einheitlich) noch weiter unterteilt werden können in Displays für laterale Hautdeformation d. h. Scherung und Dehnung [29], [30] und in Displays für taktile Form (tactile shape display), bei denen die Stimulation senkrecht zur Flächennormalen erfolgt z. B. durch Stiftmatrix [31]. Weitere Details und eine Zusammenfassung der Funktionsprinzipien folgt im nächsten Unterkapitel.

Die BRAILLE Displays als Vertreter der Geräteklasse für mechanische Stimulation haben eine Auflösung sehr nahe an der DIN 32976 Spezifikation, weil sie für das Lesen einzelner Zeichen optimiert sind. *Grafische taktile Displays* haben als Ziel, taktile Grafiken mit einer möglichst hohen Auflösung darzustellen, stoßen jedoch prinzipbedingt an die Grenzen des technischen und physikalischen Möglichen. F. Vidal-Verdú und M. Hafez stellen in ihrer Veröffentlichung fest, dass mit einem durchschnittlichen Preis je Zelle von 90 US\$ und einer Fläche von 32 cm x 24 cm das ideale taktile Grafikdisplay einen Preis von 3.000.000 US\$ hätte [23]. Kommerzielle Produkte realisieren aktuell einen Kompromiss aus gut leserlicher BRAILLE Ausgabe und einer hohen Anzahl an Aktoren mit der höchsten Dichte unter dem Gesichtspunkt der Prei-
soptimierung.

Kommerziell sind für die taktile grafische Darstellung sowohl Geräte mit statischer, wiederbeschreibbarer (**Tabelle 2**) als auch mit vibrotaktiler (**Tabelle 3**) Darstellung erhältlich. Durch die unterschiedlichen Anforderungen beider Darstellungsformen an Hub, Kraft und Frequenz für den Betrieb jedes einzelnen Pins, unterscheiden sich auch die Randbedingungen für die Gerätekonstruktion. Während die vibrotaktile Geräte bereits ab einem Aktorhub von 10 µm beginnen, haben Geräte mit Kompatibilität für statische BRAILLE-Schriftdarstellung einen Aktorhub von

Tab. 2. Kommerzielle wiederbeschreibbare Displays für die grafische taktile Ausgabe [32], [33].

Modell	Aktualisierungszeit [s]	Rastermaß [mm]	Taktile Fläche (Taxelanzahl)	Hub [mm]	Technologie
Ideales Interface	<10 s	1	32 cm x 24 cm	0,7	nach [32]
BrailleDIS 7200 (METEC AG)	0,05 s	2,5	31,2 cm x 15 cm (7200 Taxel)	0,7-0,8	piezoelektrisch
DMD-12060 (METEC AG)	10 s	3,08	37,2 cm x 18,6 cm (7200 Taxel)	0,7	elektromagnetisch
KGS & NASDA	< 1s	3	19 cm x 14 cm (3072 Taxel)	0,7	piezoelektrisch
KGS DV-1	0,05	3	7,2 cm x 9,6 cm (24 x 32 Taxel)	0,7	piezoelektrisch
KGS DV-2	<1 s	2,4	7,7 cm x 11,5 cm (32 x 48 Taxel)	0,7	piezoelektrisch
TIM, ABTIM	0,04	2,5	4 cm x 4 cm (256 Taxel)	0,8	piezoelektrisch
NIST & NFB	k.A.	2,54	17,8 cm x 12,7 cm (3600 Taxel)	k.A.	k.A.
Video Tact	0,01	k.A.	768	k.A.	elektrotaktil

Tab. 3. Kommerzielle vibrotaktile Displays [32].

Modell	Rastermaß [mm]	Hub	Kraft [N]	Bandbreite	Fläche (Taxel)	Technologie
Ideales Interface	1	10 µm - 100 µm	10 mN	>30 Hz-50 Hz	1 cm x 1 cm (ein Finger)	[32]
Optacon	1,27 x 2,54	10 µm	6 mN	250 Hz	12,7 mm x 29,2 mm (26 x 6 Taxel)	piezo
VirTouch Mouse (VTM)	1,5	1 mm	100 mN	10 Hz	8 x 4 Taxel, x 3 Displays	piezo 3D
HAPTAC	2,5	k.A.	600 mN	10 Hz	3 x 3 Taxel	Formgedächtnislegierung, aktive Luftkühlung

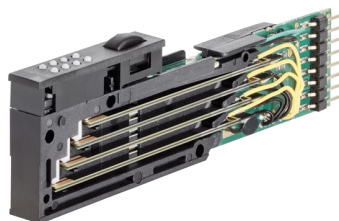


Abb. 11. BRAILLE-Modul der Firma Metec AG [34], [35].



Abb. 12. HyperBraille® Gerät der Firma Metec AG [20].

mindestens 0,6 mm. Die wichtigen Leistungsparameter für die Arbeit blinder Nutzer mit grafischen Geräten wurden in der Doktorarbeit von D. Prescher zum Thema „Taktile Interaktion auf flächigen BRAILLE-Displays“ ausgewählt und gegenübergestellt [33].

Gemessen an den Parametern in **Tabelle 4** zählen die grafischen, taktilen Geräten der Firma Metec AG zu den leistungsfähigsten kommerziell erhältlichen Geräten. Deshalb folgt eine kurze Vorstellung: In **Abbildung 11** ist ein einzelnes BRAILLE-Modul dargestellt, an dem man das piezoelektrischen Funktionsprinzip gut erkennen kann. Anders als das Prinzip in Reihe hinter-

Tab. 4. Technische Eigenschaften von Stiftplatten der Firma Metec AG als Beispiel für wichtige Leistungsparameter grafischer taktiler Displays, entnommen aus D. Prescher [33].

Eigenschaft	DMD12060	BrailleDis 9000	BrailleDis 7200
Maße (B x T x H) [mm]	510 x 400 x 85	410 x 235 x 95	410 x 255 x 60
Gewicht	ca. 20 kg	ca. 8 kg	ca. 5,5 kg
Anzahl Pins	7.200 (120 x 60)	7.200 (120 x 60)	7.200 (120 x 60)
Pin Abstand	3,08 mm	2,5 mm	2,5 mm
Hubhöhe	0,7 mm - 0,8 mm	0,7 mm	0,7 mm
Aktuatorik	elektromagnetisch	piezoelektrisch	piezoelektrisch
max. Darstellungsfrequenz (setzen gesamtes Display)	0,05 Hz (max. 21 s)	4-5 Hz	20 Hz
integrierte Bedienelemente	keine	10 Tasten (Navigation, BRAILLE)	14 Standardtasten, 2 Whippschalter, 2 Cursorkreuze, 1 Navigationsleiste
Gesteingabe	Blindenmaus	kapazitiv. Multitouch (720 Sensoren = 2,5 dpi)	kapazitiv. Multitouch (1.440 Sensoren = 5 dpi)

einander angeordneter Piezoelemente (Wirkung in einer Linie), haben die Piezobiegewandler mit Hilfe des Hebelgesetzes einen ausreichend großen Stellweg auf Kosten der verfügbaren Kraft. Im Arbeitspunkt sind sowohl der Stellweg als auch die Kraft für den Einsatzzweck optimiert.

Die Biegewandler bedürfen viel Raum und durch die L-Form der BRAILLE-Anordnung ist es schwierig, viele Zeilen nebeneinander zu platzieren (**Abbildung 11**). In der Geräteserie HyperBraille[®] sind die Piezobiegewandler senkrecht angeordnet. Dadurch wird die hohe Anzahl und Dichte von Aktoren erreicht, die zur grafischen Ausgabe erforderlich sind. HyperBraille[®] Geräte (**Abbildung 12**) sind bereits ab 45.000 € bis 50.000 € erhältlich [31], [36].

Prototypen für taktile Ausgabe in der akademischen Forschung

In ihrer Veröffentlichung stellen F. Vidal-Verdú und M. Hafez fest, dass die optimale taktile Darstellung mit 1 mm Taxelraster feiner ist, als die Auflösung der Geräte zulässt. Im akademischen Bereich werden für wissenschaftliche Untersuchungen oder als Machbarkeitsstudie des jeweiligen Funktionsprinzips einzelne Module oder auch Systeme hergestellt, die nicht immer komplette Geräte ergeben müssen. In diesem Umfeld sind auch Ansätze und Funktionsprinzipien zu finden, die eine höhere Darstellungsdichte haben.

Diese sind in **Tabelle 5** nach Aktordichte geordnet. Rein motorgetriebene Systeme, welche stärkeren Miniaturisierungsschwierigkeiten unterliegen sowie Systeme für die Modalitäten der Wärmerezeptoren, sind nicht in der Tabelle aufgeführt.

Systeme mit Rastermaß unterhalb von 2 mm erreichen die hohe Taxeldichte durch Übertragung der Positionsverschiebung von den Aktoren mit großem Bauvolumen zu der dichten Taxelanordnung mit Hilfe von Hebeln und Stäben [37], [39].

Die höchste Taxeldichte von 0,5 mm Rastermaß erreichen J. H. Killerbrew *et al.* [37]. Wie in **Abbildung 13** dargestellt, sind die elektromagnetischen Aktoren in mehreren Ebenen angeordnet und durch lange, nadelartige Stangen mit der Oberfläche zur taktilen Darstellung verbunden.

Eines der Kernprobleme der Aktorik ist, dass bei Miniaturisierung sowohl die Kraft als auch der Aktorhub reduziert wird. Diese müssen jedoch für die jeweilige Anwendung hinreichend groß sein, wodurch eine Miniaturisierungsgrenze entsteht (**Abbildung 14**).

Es gibt auch besondere Ansätze von Hybridsystemen. S. Hikaru *et al.* [38] erreichen ein Taxelrastermaß von 1,2 mm dadurch, dass eine elegante technische Lösung die Nutzung eines Schrittmotors für das ganze 4 x 4 Taxelfeld ermöglicht. Die Höhe jedes Taxels wird dadurch bestimmt, dass eine elektrostatische Kupplung zum richtigen Zeitpunkt die Position der Taxel

gegenüber der Motorposition fixiert und anschließend der Motor alle Taxel mit fest fixierter Kupplung nach oben hebt. So kann ein Motor im Modul mit 4,8 mm Kantenlänge 16 Taxel im feinen Rastermaß individuell anheben.

Für eine effiziente Fertigung sind besonders die Methoden gut geeignet, bei denen im Batchprozess in einem Schritt alle Aktoren hergestellt werden. R. Vitushinsky *et al.* zeigen ein Array aus bistabilen Formgedächtnislegierung(FGL)-Aktoren, die mit den Methoden der Dünnschichtfertigung gleichzeitig hergestellt werden [45]. Das Funktionsprinzip ist in **Abbildung 15** dargestellt. Durch das Profil der Temperaturänderung nutzt man das Zusammenwirken von zwei unterschiedlichen Legierungen aus, so dass man zwischen dem An- und dem Aus- Zustand umschalten kann. In **Abbildung 16** ist das Aktorarray am Ende der Prozessierung dargestellt.

Tab. 5. Leistungsparameter von Antrieben für taktile Displays, dargestellt nach Funktionsprinzip.

¹ hohe Dichte wird durch Übersetzung (Stäben bzw. Mehrlagenaufbau) erreicht

² elektrostatische Kupplung und Schrittmotor

Fehlende Angaben und nicht untersuchte Parameter sind mit "Keine Angaben"(k.A.) gekennzeichnet.

Prinzip	Frequenz [Hz]	Rastermaß [mm]	Hub [mm]	Kraft je Pin	Anzahl Pins	Quelle
Elektromagnetisch ¹	0-400	0,5	0,1 (250 Hz) 2 (0 Hz)	306 mN	400	[37],[32]
Elektrostatisch ²	k.A.	1,2	0,018	600 mN	16	[38]
Piezoelektrisch ¹	25-400	1	0,05	k.A.	100	[39], ([32])
Piezoelektrisch	k.A.	2	0,05	5 mN	100	[40]
Formgedächtnislegierung	1	2	6	1,3 N	16	[40]
Formgedächtnislegierung	10	2,1	3	1 N	24	[40]
Piezoelektrisch	k.A.	2,45	0,7	150 mN	48	[40]
Pneumatisch	0,2-150	2,5	0,6	80 mN	6	[41], ([42])
Pneumatisch	<5	2,5	0,6	180 mN	25	[40]
Pneumatisch	<11	k.A.	5	3 N	16	[40]
Phasenumwandlung	0,01-0,04	2,5	0,6	k.A.	6	[43], ([42])
Dielektrische Elastomeraktoren	<400	2,5	0,1 (250 Hz)	100 mN	8	[44]
Elektromagnetisch	k.A.	3	10	3 N	4096	[40]
Elektromagnetisch	<100	4	4	6 mN	9	[40]
Formgedächtnislegierung	bistabil	3 x 6	0,7	2,2 mN	100	[45]

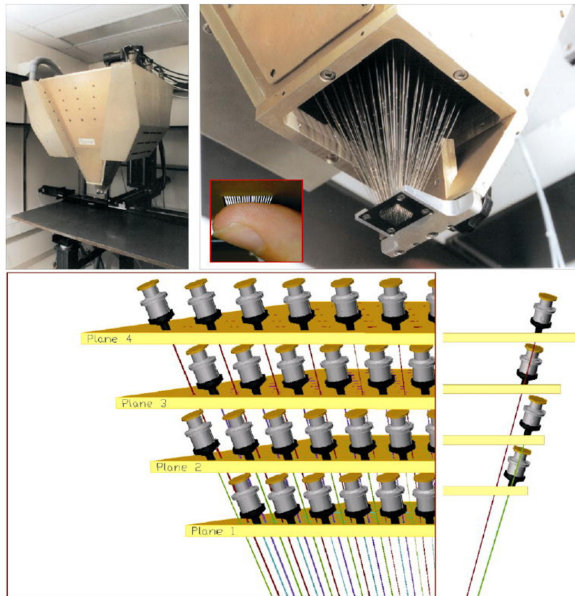


Abb. 13. Elektromagnetisches Nadelarray [37].

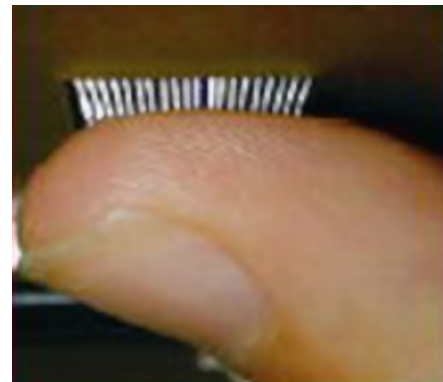


Abb. 14. Elektromagnetisches Nadelarray, Schnittstelle zum Finger des Users [37].

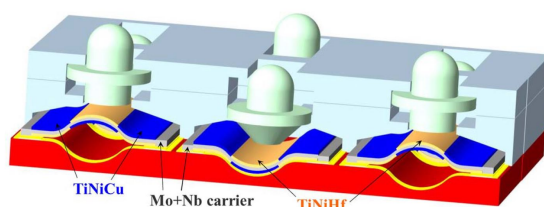


Abb. 15. Aufbau der FGL-Aktoren und Darstellung mit darüberliegendem Pin-Array [45].

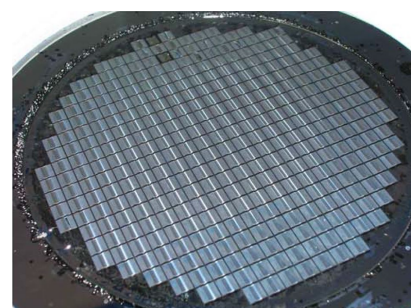


Abb. 16. Fertigung der FGL-Aktoren auf einem Träger [45].

3.3 Taktile Wahrnehmung als Grundlage kutaner Displays

Effiziente Informationsübertragung zwischen Computer und Mensch, verbesserte Leistungsfähigkeit der Nutzer und das ergonomische, natürliche Arbeiten können einige der Ziele von Schnittstellen für die Mensch-Maschine-Interaktion sein. Zum Erreichen der Ziele ist ein Verständnis für die menschliche Wahrnehmung erforderlich. Von der menschlichen Leistungsfähigkeit taktile Reize wahrzunehmen hängt ab, wie taktile Geräte zu gestalten sind, damit sie besonders gut das darstellen, was der Tastsinn auch besonders gut erfassen kann und in dem Parameterfenster, in dem er es erfassen kann.

3.3.1 Frequenzabhängigkeit der Hautwahrnehmung

Die taktile Wahrnehmung hat Frequenzbereiche und spezifische Frequenzen, denen man charakteristische Größen und eine Bedeutung zuordnen kann. Diese sind in **Tabelle 6** dargestellt. Obwohl die tastende Bewegung und Reaktion des Fingers mit bis zu 10 Hz relativ langsam erfolgt, entstehen dabei hohe Frequenzen. Bei der Frequenz von 230 Hz liegt die höchste Sensitivität senkrecht zur Hautebene vor, mit der bereits eine Vibration mit Hub von 1 μm erkannt werden kann.

Tab. 6. *Frequenzbereich des Stimulus und Bedeutung für die Wahrnehmung [46], [47].*

Frequenz [Hz]	Funktion
0	Langsames Dehnen der Haut
8-10	maximale Bandbreite, mit der ein Finger reagieren kann
10	Druckbelastung (wie bei einer sanften Berührung)
30	Hautbewegung, z. B. bei einer kontrollierten Berührung
50-400	Wahrnehmung von Vibrationen mit besonders kleiner Amplitude
230	Maximale Vibrationsempfindlichkeit
5000-10000	Detektion sehr feiner Vibrationen z. B. von der Oberflächentextur

3.3.2 Sensortypen der Haut

Bei genauerer Betrachtung stellt man fest, dass sich in der Haut mehrere Sensorarten befinden. Je nach Art des Reizes, Frequenz, Einwirkungsrichtung etc. werden die Reize einem bestimmten Sensortyp zugeordnet und dieser hat eine sensorspezifische Wahrnehmungscharakteristik. Die taktile Wahrnehmung der Haut ist ein zusammengesetztes Empfinden aus mehreren Reizararten. Der Aufbau der Haut ist in **Abbildung 17** dargestellt.

Die in der Lederhaut befindlichen Mechanorezeptoren erfassen mechanische Reize wie Druck und Dehnung, wohingegen die Thermorezeptoren sowie die freien Nervenendigungen auf Temperaturunterschiede reagieren. Auch für das Schmerzempfinden sind die an der Hautoberfläche liegenden freien Nervenendigungen verantwortlich. In **Abbildung 17** sind am Querschnitt der Haut die unterschiedlichen Sensorarten dargestellt.

Die genauere Betrachtung dieser Sensoren zeigt, dass die taktile Wahrnehmung der Haut ein zusammengesetztes Empfinden aus mehreren Arten von Reizen ist.

Im behaarten und unbehaarten Hautbereich unterscheidet sich die Dichte der Rezeptortypen. So sind weniger Meissner-Körperchen unter der behaarten Haut, dafür aber mehr Haarfollikel-Sensoren. Für die Erschließung des Nahfelds nutzt der Mensch sowohl die Sensoren des behaarten als auch des unbehaarten Hautbereiches. Über den unbehaarten Hautbereich z. B. an Fingerkuppen und Lippen können deutlich mehr taktile Informationen gesammelt werden, da die Dichte der Rezeptoren hier deutlich höher ist. Deshalb spielen wahrscheinlich bei takti-

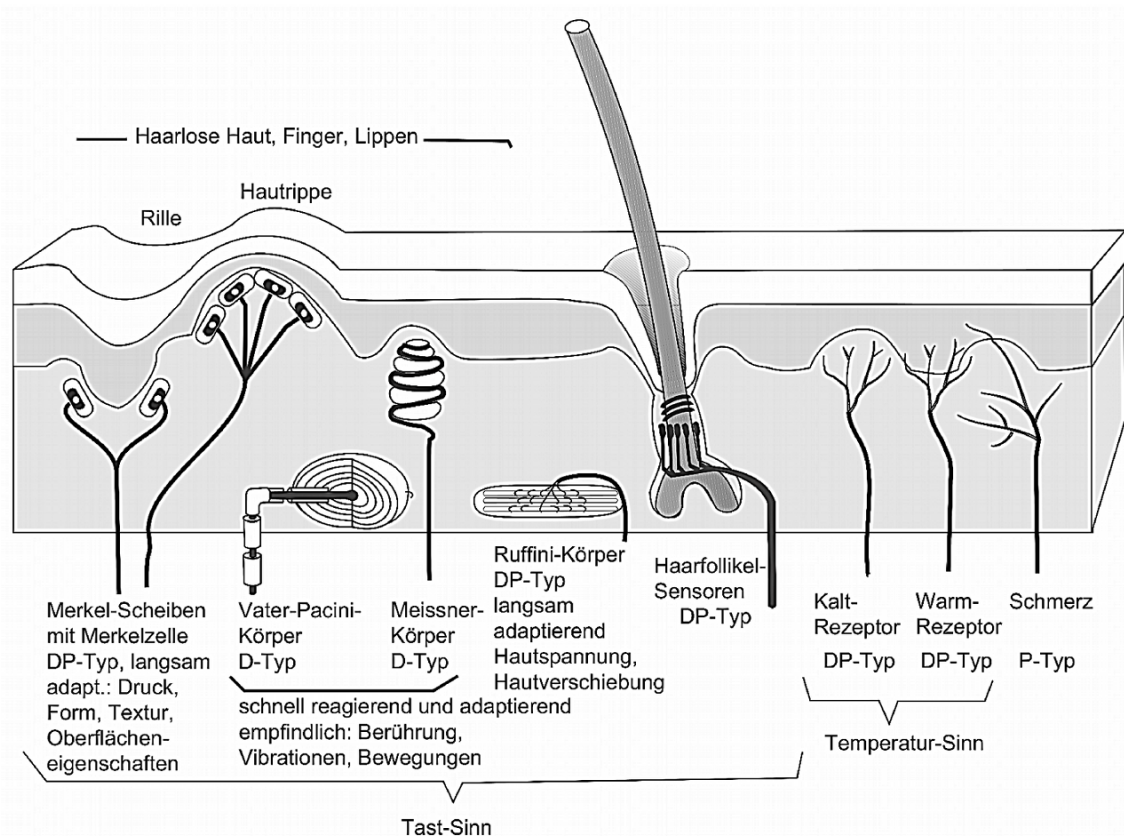


Abb. 17. Hautsensortypen für Tastsinn (Berührungs-, Druck-, Vibrationssinn), Temperatursinn (Warm-, Kalt-Sinn) und Schmerzsinne; P-Typ: Proportional-Fühler, D-Typ: Differential (Quotienten)-Fühler, DP-Typ: Differential-Proportional-Fühler [48].

len Displays die Haarfollikel-Sensoren, welche schon vor der „richtigen“ Berührung eine erste Objektwahrnehmung ermöglichen, kaum eine Rolle. Auch die Sensoren für das Schmerzempfinden werden für technische Systeme kaum genutzt, sondern nur bei ungewollter Überreizung angeregt.

Die bei einer Berührung wirkenden Kräfte verformen die Haut und werden von den Sensorzellen erfasst. Eine Rolle spielt sowohl die Topologie der abgetasteten Fläche als auch die Art, wie sie abgetastet wird (Kraft, Dynamik, etc.). Die Verformungseigenschaften der Haut sind ein Teil der charakteristischen Wahrnehmung. Sie wurde z. B. in [52] modelliert.

Die Merkel- und Ruffini- Nervenendungen erfassen vordergründig Konturen und zum Teil die Textur, wogegen Meissner- und Pacini- Nervenendungen auf Vibrationen spezialisiert sind. Vibrationen entstehen zum Beispiel beim Gleiten einer Fingerkuppe über eine Oberfläche. Dabei wird ein Teil der Oberflächentopologie in Vibrationen transformiert und von den Vibrationssensoren erfasst.

Mit Blick auf **Tabelle 6** kann festgestellt werden, dass bei der Texturerfassung auch hohe Fre-

Tab. 7. *Oberflächensensibilität: Somatosensorische Rezeptoren und Submodalitäten [5], [28], [49]–[51].*

Typ	Nervenendigung bzw. Qualität	Adäquater Reiz	Adaption	Empfindlichkeit (höchste) [Hz]	Auflösung lat. (Schwellwert senkrecht) [mm]	Dichte auf Fingerkuppe $\left[\frac{\text{Sensoren}}{\text{cm}^2} \right]$
<i>Submodalität Mechanorezeption</i>						
SA1	Merkel	Vertikaler Druck, Textur	langsam	0,4-100 (7)	0,5 (0,007-0,6)	70
SA2	Ruffini	Laterale Zugspannung, Scherkräfte, Verschiebung, Dehnung	langsam	7	7+ (0,04-1,5)	9
<i>Submodalität Mechanorezeption (Vibrotaktile Empfindung)</i>						
RA	Meissner	Geschwindigkeit, Vibration (niederfrequent), Bewegung	schnell	10-200	3-4 (0,004-0,5)	140
PC	Pacini	Beschleunigung, Vibration (hochfrequent), Bewegung	schnell	40-800 (200-300)	10+ (0,003-0,02)	21
<i>Temperatur, Submodalität Thermorezeption</i>						
	Kalt/Warm-Rezeptor	Temperatursinn	schnell			
SA <i>slowly adapting</i> : langsam adaptierend; RA <i>rapidly adapting</i> : schnell adaptierend; PC <i>Pacini</i>						

quenzen im Kiloherzbereich existieren. Hier kommt den Papillarleisten eine besondere Bedeutung zu. Bei dem Gleiten des Fingers über eine Oberfläche übersetzen die Papillarleisten feine Oberflächenstrukturen und Texturen in hochfrequente Vibrationen um und verstärken sie. Damit entsteht ein oberflächenspezifisches Frequenzbild [53], [54].

Ein weiterer Schlüssel zum Verständnis der Wahrnehmung sind die Unterschiede in der Wahrnehmungscharakteristik der Sensoren, die aus ihrem Aufbau, ihre Größe, Dichte u. a. resultieren. Neben Kraft-Wahrnehmungs-Charakteristik und Morphologie entscheiden die Empfindlichkeit und das Adaptationsverhalten, welche Reize wahrgenommen werden (**Tabelle 7**). Schnell adaptierende Rezeptoren (FA-Rezeptoren; „fast adapting“) reagieren nur bei Änderung des mechanischen Reizes. Die SA-Rezeptoren (Merkel-Scheiben und Ruffini-Körper) hingegen adaptieren langsam („slow adapting“) und bilden bei langandauernden mechanischen Hautreizen während der gesamten Reizdauer Aktionssignale. Da sie bei längerdauernden Reizen nicht nur die Reizdauer anzeigen, sondern sich die Frequenz der Aktionssignale proportional zur Reizstärke verhält, gehören sie zu den Proportionalfühlern. Die Differentialrezeptoren (z. B. Vater-Pacini- und Meissner-Körperchen) messen nur eine Reizänderung. Durch die anschließende Adaption werden leichte Berührungen, wie das Tragen eines Kleidungsstückes nach einer kurzen Zeit nicht mehr wahrgenommen. Bei den Differential-Potential-Rezeptoren handelt es sich um eine Mischform. Die meisten Rezeptoren der Haut zeigen ein DP-Verhalten, wie z. B. der Temperatursinn.

3.3.3 Zusammengesetzte Wahrnehmung und Wahrnehmbarkeitsschwellen

Kajimoto *et al.* schlagen vor, die taktilen Reize in Frequenzbereiche bzw. Anregungsarten zu unterteilen, so dass jede Sensorart spezifisch und eigenständig angesprochen, wie beim visuellen Rot- Grün- Blau- Farbkanal einen Darstellungsraum ergibt [55]. Was im Auge die einzelne Farbe ist, ergibt im vibrotaktilen Raum eine eigenständige Pulsart. In **Abbildung 18 a** ist durch Analogiebetrachtung der Wahrnehmungsraum Hautsensoren auf die Farbdarstellung abgebildet. Im Diagramm (**Abbildung 18 b**) sind die Empfindlichkeitsschwellenwerte in Abhängigkeit von der Frequenz dargestellt.

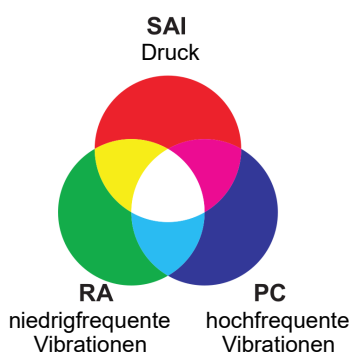


Abb. 18 a. Darstellungsraum vibrotaktile Geräte als Projektion auf den Farbraum [55].

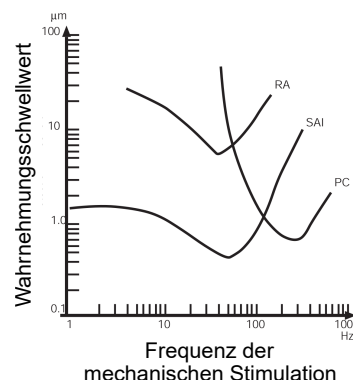


Abb. 18 b. Frequenzabhängiger Empfindlichkeitsschwellwert der Hautsensoren [55].

Die Strukturabmessungen, die von taktilen Displays zur Übermittlung von Informationen verwendet werden können, hängen davon ab, wie fein die Auflösung des Tastsinns ist. Die typische vibrotaktile Empfindlichkeitskurve ist ab ca. 10 Hz dargestellt und erreicht die höchste Empfindlichkeit zwischen 200 Hz und 300 Hz mit ca. 1 µm Reizschwelle. Die langsam adaptierenden SA1-Zellen bewegen sich bei der Empfindlichkeit von ca. 1 µm zwischen 0 Hz und 100 Hz.

Neben der im Diagramm dargestellten Empfindlichkeitscharakteristik gibt es auch weitere Methoden zur Bestimmung des Auflösungsvermögens des Tastsinns.

3.3.3.1 Wahrnehmungsschwelle quasistatischer Reize

Oberflächenunebenheiten von wenigen Mikrometern werden vom Tastsinn wahrgenommen, wenn sie mit einer geeigneten Frequenz ertastet werden oder vibrieren (**Abbildung 18 b**). Bei der Stimulation durch statische Reize auf einen unbewegten Finger ist der Tastsinn weniger empfindlich. Deshalb ist dieser Wert ein guter Anhaltspunkt, um die Wahrnehmbarkeit bei einem Systementwurf zu gewährleisten.

Im Experiment entsteht der *Quasistatische Zustand*, wenn ein Stimulus unverändert über einen längeren Zeitraum einwirkt d. h. wenn ein Finger etwas ertastet, ohne sich zu bewegen. Ein quasistatischer Zustand liegt vor, wenn die Änderung einer Größe gegenüber den charakteristischen Zeitkonstanten des Systems (Adaption der Sensoren, Nachgiebigkeit des Fingers) so langsam stattfindet, dass man sich in einem eingeschwungenen Systemzustand befindet.

Die taktile Wahrnehmung unterscheidet sich von Mensch zu Mensch und ist z. B. auch abhängig vom Alter. Die Schwellwerte, ab denen ein Reiz wahrnehmbar ist, liegen bei einer Amplitude

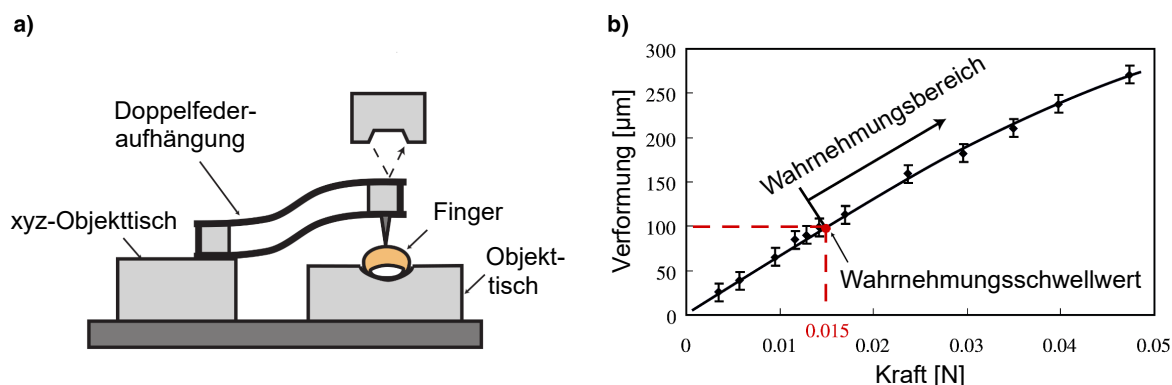


Abb. 19. Kraft-Verformungskennlinie der Fingerkuppe [57].

von 10 µm sowie bei einer punktuellen Kraft von 0,8 mN. Bezogen auf die Fläche entspricht das einem Druck von $0,2 \text{ Ncm}^{-2}$ [56]. Die Untersuchung mit eingespanntem Finger (passive Berührung) zeigt einen höheren Wert. Ab 100 µm Verformung der Haut und einer Kraft von 15 mN (**Abbildung 19**) erfolgte ein sicheres Erkennen des statischen Reizes [57].

3.3.3.2 Zweipunkt-Diskriminierungsschwelle

Eine der einfachsten Methoden zur Charakterisierung des räumlichen Auflösungsvermögens der Haut ist die Zweipunkt-Diskriminierungsschwelle. Sie wird durch simultane Berührung der Haut an zwei Punkten gemessen und kennzeichnet die kleinste Entfernung, bei der gerade noch zwei Berührungsstellen voneinander getrennt wahrnehmbar sind. An den Fingerkuppen liegt der Abstand bei 2-3 mm [56].

3.3.3.3 Sensorabhängige laterale Grenzwerte der Strukturgrößenwahrnehmung

Streicht ein Mensch über die Oberfläche eines Objektes, werden auch kleinere Oberflächenstrukturen erkannt, als die Zwei-Punkte Diskriminierungsschwelle vermuten lässt.

In **Abbildung 20** sind unterschiedliche Sensortypen der Haut dargestellt, mit denen die Lokalisierung der Oberflächeneigenschaften erfolgt. Im Experiment werden Stege mit der Breite von 0,5 mm ertastet, wobei die Abstände zwischen den Stegen von 0,5 mm bis 5 mm variiert werden. Die Impulse, welche die einzelnen Zellentypen liefern, werden ausgewertet. Die feinsten Details sind durch die SA1- (Merkel) Nervenendigungen erkennbar, wobei zwischen 0,5 mm und 0,75 mm Abstand ein deutlicher Unterschied in der Impulsanzahl feststellbar ist. Diese Art von Sensoren ist für langsamen, vertikalen Druck und Textur zuständig. Die Sättigung wird bei 1 mm Strukturhöhe erreicht [58].

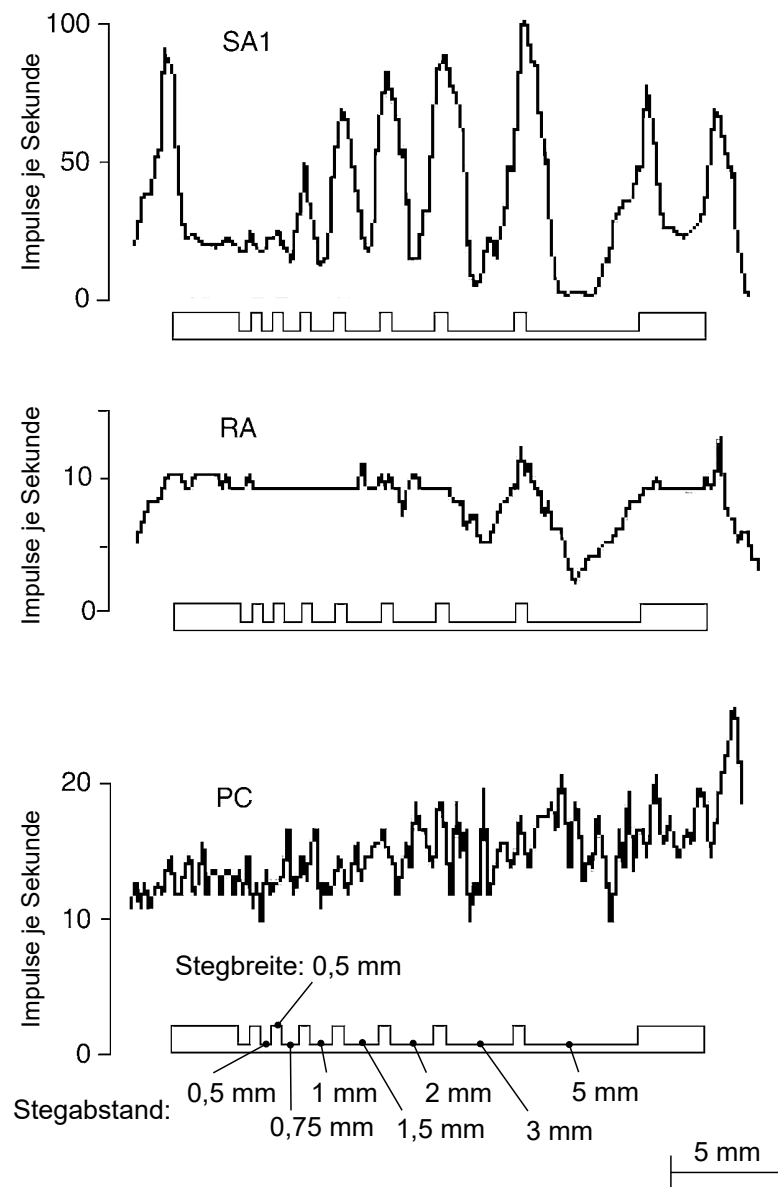


Abb. 20. Räumliches Auflösungsvermögen der Hautsensoren, Darstellung der Intensität der Sensorantwort in Abhängigkeit von der Spaltbreite [58].

Dagegen zeigen die für Vibrationen zuständigen RA (Meissner) und PC (Pacini) Nervenendigungen erst bei größeren Strukturen ab ca. 2 mm ein deutlicheres Signal.

Die Sensorzellen für die Detektion von Vibrationen haben gegenüber den Zellen für statische und quasistatische Signale eine schlechtere räumlichen Auflösung. In Bezug auf die räumliche Lokalisierbarkeit der Darstellung sind vibrotaktile bzw. elektrotaktile Displays im Nachteil gegenüber Displacement-Displays, mit denen auch eine statische taktile Ausgabe möglich ist.

3.3.4 Auswahl des Aktorfunktionsprinzips

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Displays für hochauflösende taktile Ausgabe, welches statische Bilder darstellen kann. Nachteile der bisherigen taktilen Displays wie z. B. ein großes Aktorvolumen (Gehäuse) und lange Biegebalken oder eine Übersetzung mit langen Pins sollen überwunden werden.

Im Idealfall besteht jedes taktile Pixel (*Taxel*) zur Reduktion des Herstellungsaufwandes aus wenigen Elementen, die gleichzeitig mit den anderen Taxeln z. B. schichtweise aufgebaut werden. Für eine gute Miniaturisierbarkeit sind alle Herstellungsprozesse skalierbar.

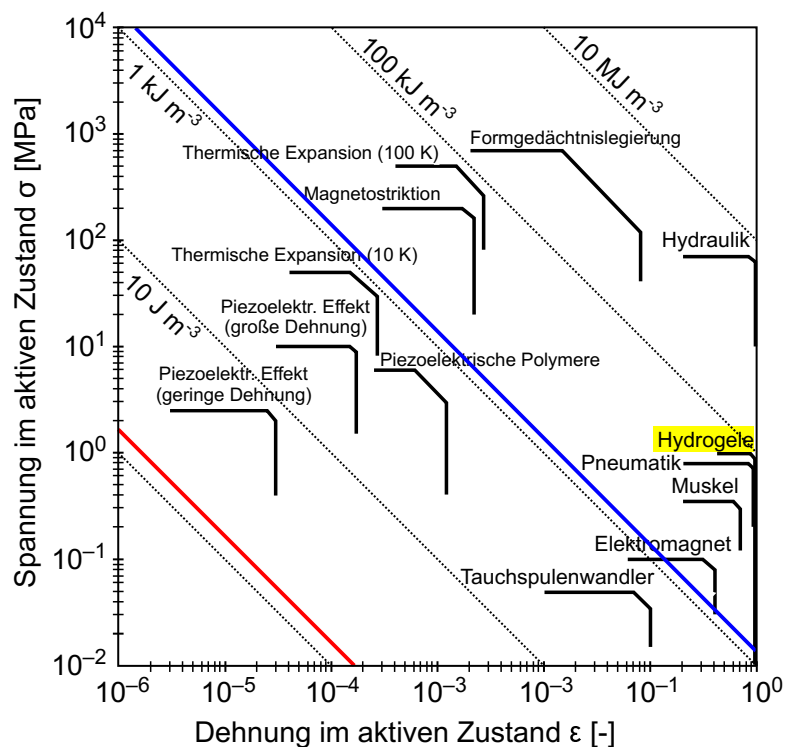


Abb. 21. Übersicht der Aktor-Funktionprinzipien: Leistungsdichte und Frequenzbereich [59], [60].

Huber *et al.* haben eine Methode zum systematischen und übersichtlichen Vergleichen einer Vielzahl von Aktor-Funktionsprinzipien anhand der Herstellerdatenblätter entwickelt, die häufig Maximalangaben liefern wie maximale Kraft und größter Aktorhub bzw. Frequenz. Durch Übereinstimmungen mit der Zielanwendung wird im frühen Stadium des Entwicklungsprozesses die Auswahl an Aktoren eingeengt [61].

In der **Abbildung 21** sind sowohl konventionelle Aktor-Prinzipien wie der elektromagnetische Antrieb als auch unkonventionelle Beispiele wie der menschliche Muskel dargestellt. Die Grafik der Funktionsprinzipien wurde stellvertretend für die Klasse der Hydrogele um das Polymer Polyacrylnitril erweitert [59].

Über die Zielanwendung ist Folgendes bekannt: Die *Wiederholeinheit* bzw. die *laterale Dimension* der Aktoren in Anlehnung an die grafischen Geräte von Metec AG ist max. 2,5 mm, wobei als Zielgröße 0,5 mm angestrebt werden. Damit ist auch die Darstellung der Oberflächentextur mit der höchsten Auflösung der SA1 Zellen möglich. Die *Kraft* bzw. der *Druck*, welcher durch die Aktoren ausgeübt werden soll, ist zum Erreichen des Wahrnehmungsschwellwerts mindestens 0,8 mN bzw. $0,2 \text{ Ncm}^{-2}$ und für die sichere Erkennung 15 mN. *Der Stellweg* des Aktors beträgt zur sicheren Erkennung mindestens 100 μm , damit ein Reiz wahrnehmbar ist.

Die *Zeit*, in der ein statisches, taktils Bildfeld aufgebaut werden soll, ist zunächst frei wählbar und soll nach Möglichkeit weniger als eine Minute betragen. Die Optimierung dieser Zielgröße ist weiteren Arbeiten vorbehalten.

Im nächsten Schritt wird ein Funktionsprinzip zum Erreichen der Zielgrößen unter der Maßgabe der Volumenminimierung gesucht. Wie in [61] empfohlen, wird der Performanceindex $\sigma_{max}\epsilon_{max}$ gebildet, welcher der volumenbezogenen Energiedichte eines einzelnen Hubs des Aktors entspricht. Für diese Abschätzung wird die Annahme getroffen, dass der Aktor ein Würfel ist und die gleiche Kantenlänge im Aktorquerschnitt und in der Höhe hat. Die zweite Annahme ist, dass sich der Aktor vollständig im Volumen eines Taxels befinden muss.

Die maximale Dehnung ϵ_{max} ergibt sich aus dem Aktorhub Δh und der Aktorhöhe h .

$$\epsilon_{max} = \frac{\Delta h_{max}}{h} \quad (3.1)$$

Die maximale Spannung σ_{max} ergibt sich aus der Aktorquerschnittsfläche A und der maximalen Kraft F_{max}

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} \quad (3.2)$$

Für die Volumenminimierung eines Aktors nach [61] wird die Randbedingungen aufgestellt,

Tab. 8. Aktoranforderungen und Performance-Index.

Raster [mm]	Hub [mm]	Kraft [mN]	Aktorhöhe [mm]	Aktorfläche [mm ²]	ϵ_{max}	σ_{max} [Pa]	$\epsilon_{max}\sigma_{max}$ [J m ⁻³]
2,5	0,1	0,8	2,5	6,25	0,04	128	5
0,5	0,1	15	0,5	0,25	0,2	60000	12000

dass der Performance Index $\sigma_{max}\epsilon_{max}$ mindestens so groß sein muss, wie das Produkt aus wirkende Kraft F und Auslenkung δ geteilt durch das Aktorvolumen (Aktorquerschnitt A und Aktorhöhe h).

$$\sigma_{max}\epsilon_{max} \geq \frac{F\delta}{hA} \quad (3.3)$$

In **Tabelle 8** wurde der Performance-Index jeweils für den Fall der kleinsten und der höchsten Anforderung berechnet. Die Mindestanforderungen wurden in **Abbildung 21** als rote und die höchsten Anforderungen als blaue Linie eingetragen. Das gesuchte Funktionsprinzip sollte sich oberhalb und rechts von der jeweiligen Linie befinden.

Unter der Bedingung, dass kleine Stellwege auf Kosten der Kraft in höhere übersetzt werden können, sind für das 2,5 mm Aktorraster fast alle Funktionsprinzipien möglich. Beschränkt man für die Annahme, dass der Aktor vollständig im Taxel enthalten sein muss, die Aktordehnung auf einen Wert größer als 0,04, reduziert sich das Lösungsfeld auf sechs Funktionsprinzipien: Tauchspulenwandler, Elektromagnet, Formgedächtniselemente sowie Hydraulik, Pneumatik und die stimulisensitiven Hydrogele.

Für einen Aktorrastermaß von 0,5 mm ergibt sich mit der höheren Kraft von 15 mN, welche bei 0,1 mm Hautverformung auftritt und mit der Maßgabe, dass der Aktor vollständig im Taxel-Volumen hineinpassen soll, dass nur noch die Hydraulik, die Pneumatik sowie die Hydrogelaktoren den Anforderungen genügen. Wenn der Aktorhub ohne Übersetzung in Aktordehnung übersetzt wird, entspricht das bei 0,5 mm Aktorhöhe und Aktorhub von mindestens 0,1 mm einer Dehnung ϵ von mindestens 0,2, die erfüllt sein muss.

Hierdurch umfasst das Lösungsfeld die drei Funktionsprinzipien Hydraulik, Pneumatik und stimulisensitive Hydrogele. Die Hydrogele als Funktionsprinzip werden gegenüber Pneumatik und Hydraulik bevorzugt, weil viele diskrete Bauteile wie die Ventile entfallen und die Anzahl von Schläuchen um ein Vielfaches kleiner ist. Beim Prinzip der stimulisensitiven Hydrogelaktoren wird lediglich das fehlende oder überschüssige Quellmittel zentral zu bzw. abgeführt.

3.4 Grundlagen stimulisensitiver Hydrogele

Gele sind dreidimensional vernetzte polymere Kettenstrukturen, die in Lösungsmittel gequollen sind. Die Vernetzung der Gele kann durch unterschiedliche Mechanismen erfolgen, z. B. physikalisch oder chemisch. Im Unterschied zu Polymeren aus linearen Ketten, welche durch Van-der-Waals-Kräfte zusammengehalten und im Lösungsmittel vollständig aufgelöst werden können, nehmen Gele das Quellmittel nur bis zu einem Gleichgewichtszustand auf. Im geeigneten Quellmittel können sie um ein Vielfaches ihres Trockenvolumens quellen [62].

Die charakteristischen Eigenschaften werden durch mehrere Faktoren bestimmt. Dazu gehören die Auswahl der Monomere (Anzahl, Verhältnis), die chemische Aufbaureaktion und die Synthesbedingungen während der Polymerisation. Die Eigenschaften resultieren sowohl aus ihrer stofflichen und stöchiometrischen Zusammensetzung als auch aus der reaktionsartspezifischen Polymerketten-Charakteristik. Die Netzwerkhomogenität ist ein Maß für die Qualität des Netzwerks.

3.4.1 Arten von Gelen

In Abhängigkeit vom Lösungsmittel kann man die Gele in *Organogele*, welche in organischen Lösungsmitteln quellen und in *Hydrogele*, welche Wasser als Quellmittel haben, einteilen. Stimulisensitive Hydrogele (HG) sind ein Sonderfall und werden auch „smarte Hydrogele“ genannt. Ihr Gleichgewichtszustand hängt von den thermodynamischen Gleichgewichtsbedingungen ab und kann mittels eines oder durch mehrere Stimuli gesteuert werden. Das können chemische Bestandteile des Quellmittels sein oder auch physikalische Größen wie Licht und Temperatur [63]. Die Quellung und Entquellung erfolgen reversibel, falls die Menge an Quellmittel ausreichend ist.

Berücksichtigt man die Basismaterialzusammensetzung, kann eine Klassifizierung in ionische- und nichtionische (neutrale) Gele erfolgen. Ein Beispiel für ionische Gele sind die Polyelektrolytnetzwerke. Im richtigen pH- Bereich und bei geeigneter Ionenstärke des Quellmittels können sie deutlich stärker als die nichtionischen Gele quellen. Ein Standardvertreter für ionische Interaktion sind z. B. die Alginat [64].

Eine Klassifizierung nach dem Vernetzungsmechanismus ermöglicht die Einteilung in chemisch vernetzte Gele mit dauerhaftem Charakter, wobei bei biochemisch vernetzten Netzwerken biologische Substanzen wie Enzyme oder Aminosäuren zur Vernetzung beitragen, sowie in Gele auf Basis physikalischer Bindung (physikalisch vernetzte Gele), welche aufgelöst werden können, z. B. die Götterspeise. Bei starker Temperaturerhöhung wird die physikalische Bindung

aufgebrochen. Der Vorgang ist reversibel [63], [65].

Eine Einteilung nach der Anzahl von Komponenten und Topologie führt zur Unterscheidung zwischen *Homopolymeren*, welche aus nur einer Monomerart aufgebaut sind, *Copolymeren*, welche aus zwei und mehr Monomerarten bestehen und *interpenetrierenden Netzwerken* (IPN). *Semi-interpenetrierende Netzwerke* bestehen aus einem linearen Polymer, welches ein bereits bestehendes Netzwerk penetriert ohne dabei eine chemische Bindung mit ihm einzugehen. *Interpenetrierende Netzwerke* sind die Kombination aus zwei oder mehreren polymeren Netzwerken, wobei jeweils ein Polymer in der Anwesenheit eines oder mehrerer bereits vorhandener Netzwerke vernetzt wird. Die Netzwerke durchdringen sich dabei ohne eine chemische Bindung zueinander einzugehen [66].

3.4.2 Thermodynamisches Gleichgewicht der Gelquellung

Der Quellungszustand ist das Ergebnis der Kräftebilanz auf molekularer Ebene. Das Netzwerk eines Hydrogels quillt bis zum hydrostatischen Gleichgewichtszustand. Dieser wird bestimmt durch die expansiv wirkenden Polymer-Lösungsmittel-Wechselwirkungen und die entgegengesetzten, elastischen Polymer-Polymer- Wechselwirkungen, welche das Netzwerk zusammenhalten.

Der Faktor, um den ein Gel quillt, hängt von der Art und von der Quantität der dreidimensionalen Vernetzung ab. Je höher der Vernetzungsgrad ist, desto weniger quillt das Gel im geeigneten Quellmittel, weil die Polymerketten weniger elastisch sind. Dadurch hindern sie die in das Netzwerk diffundierenden Moleküle des Quellmittels stärker daran, das polymere Netzwerk auszudehnen.

Noch präzisere Aussagen erhält man durch die Einbeziehung energetischer Zusammenhänge, welche in einem Mehrphasensystem vorkommen. Diese entstehen durch die Existenz von Bereichen mit ausschließlich Polymerketten, Bereichen mit ausschließlich Quellmittel und durch die Bereiche mit einer Mischphase aus Polymerketten und Quellmittel. Die Verteilung der Phasen im Volumen beinhaltet die Enthalpie-Effekte im Mehrphasensystem und entspricht einem Gesamtsystem, welches den Zustand minimaler Energie anstrebt.

In der Literatur ist Poly(*N*-Isopropylacrylamid) (PNIPAAm) ein Standardbeispiel für ein temperatursensitives Hydrogel. Die im Verlauf des Kapitels folgenden Modelle basieren auf den Theorien von Flory, Huggins und Rehner, welche in den 1940er und 1950er Jahre entstanden sind. Das Hydrogelvolumen beinhaltet sowohl die reinen Polymerkettenbereiche als auch die Volumina mit einer Polymerketten-Quellmittel-Mischphase, wobei sich letztere im Zustand der Phasenseparation in eine polymerreiche und in eine quellmittelreiche Phase separiert.

Das Gesamtvolumen V_{gel} besteht aus dem trockenen Polymervolumen V_p und dem aufgenommenen Quellmittel V_q (3.4).

$$V_{gel} = V_p + V_q \quad (3.4)$$

Der Quellungszustand wird oft durch den Quellgrad definiert. Dieser ist in der volumetrischen Definition gegeben als (3.5):

$$Q_v = \frac{V_{gel}}{V_p} \quad (3.5)$$

Bezogen auf die Masse mit trockener Gelmasse m_p und Gesamtmasse im gequollenen Zustand m_{gel} ist der Quellungsgrad definiert als (3.6):

$$Q_m = \frac{m_{gel}}{m_p} \quad (3.6)$$

In diesem Zusammenhang wird häufig auch der polymere Volumenbruch ϕ verwendet (3.7).

$$\phi = \frac{V_p}{V_{gel}} = Q_v^{-1} \quad (3.7)$$

Eine gängige Beschreibung des Systemzustandes in Abhängigkeit von der Temperatur T wird durch die freie Helmholtzsche Energie $F(T, V_q)$ bereitgestellt [63]. Es ist praktisch mit Energiedifferenzen ΔF zu arbeiten (3.8).

$$\Delta F(T, V_q) = F(T, V_q) - F_0(T, V_q) \quad (3.8)$$

Hierzu wird als Referenzzustand $F_0(T, V_q)$ der Augenblick festgelegt, in dem das Polymer eingebracht wird und das Polymernetzwerk noch vollständig trocken umgeben von Quellmittel vorliegt. ΔF kennzeichnet die Energie $F(T, V_q)$, welche das Hydrogel gegenüber dem trockenen Zustand aufgenommen hat, wobei die 3D-Quellung ohne mechanische Beschränkungen betrachtet wird. Für die Systembeschreibung von Hydrogel (HG) in einem Quellmittel (QM) mit konstanten Gesamtvolumen (HG und QM) ergibt sich:

$$\Delta F = \Delta F_{mix} + \Delta F_{elast} (+\Delta F_{ion} + \Delta F_{bad}) \quad (3.9)$$

Es wechselwirken der expansive Beitrag ΔF_{mix} aufgrund der Quellmittelmoleküle, welche in das polymere Netzwerk eindringen und der Beitrag der elastischen Gegenkräfte ΔF_{elast} des polymeren Netzwerks. Falls ionische Gele berücksichtigt werden, kommt ein expansiver, ionischer Beitrag ΔF_{ion} und der Beitrag der im Quellmittelbad enthaltenen Ionen ΔF_{bad} hinzu.

Der Gleichgewichtszustand ist dadurch gekennzeichnet, dass in (3.9) ein Minimum vorliegt, d. h. der Quellungsgrad ändert sich so lange, bis ein energetisches Minimum erreicht ist. Das erfolgt z. B. bei temperatursensitiven Hydrogelen sowohl während der erstmaligen Quellung aus dem trockenen Zustand heraus als auch nach jeder weiteren Temperaturänderung.

Für die Erklärung, warum ein temperaturabhängiger Phasenübergang bei einer kritischen Phasenübergangstemperatur zur schlagartigen Quellung oder Entquellung führt, sind weitere Parameter erforderlich. Es gibt Bereiche, in denen Polymer-Polymer-Wechselwirkungen stattfinden und Volumina, in denen das Quellmittel nicht bis zum Polymer vordringen kann. Es gibt Bereiche, in denen Polymer-Lösungsmittel-Wechselwirkungen stattfinden und solche, in denen Lösungsmittel-Lösungsmittel-Wechselwirkungen passieren. Zur physikalischen Beschreibung werden statistische Anordnungskombinationen und Wechselwirkungsenergien verwendet. u_{pq} ist die Polymer-Lösungsmittel-Interaktionsenergie, u_{pp} die Polymer-Polymer und u_{qq} die Lösungsmittel-Lösungsmittel-Interaktionsenergie, alle werden als konstant angenommen. In der ursprünglichen Theorie von Flory ist der Löslichkeitsparameter χ definiert als (3.10):

$$\chi = \frac{3(2u_{pq} - u_{pp} - u_{ps})}{kT} \quad (3.10)$$

Die Boltzmannkonstante k ist definiert als $1,3806488 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$. Die Löslichkeit ändert sich in Abhängigkeit von der Temperatur T . Dadurch entsteht für jede Temperatur ein Gleichgewichtszustand.

Der expansive Term ΔF_{mix} , der zur Quellung führt und die Ketten dehnt, enthält neben dem Interaktionsbeitrag in der Mischphase auch einen entropischen Beitrag F_{entr} . Der energetische Beitrag der Mischphase zum Gleichgewichtszustand hat hiermit die folgende Form (3.11):

$$\Delta F_{mix} = \Delta F_{inter} + \Delta F_{entr} \quad (3.11)$$

Der temperaturabhängige Interaktionspart des Energiebeitrags ΔF_{inter} enthält (3.12):

$$\Delta F_{inter} = RTn_q\chi\phi = RT\frac{V_p}{V_q}(\phi^{-1} - 1)\chi\phi \quad (3.12)$$

Der entropische Part entsteht durch die statistischen Anordnungsmöglichkeiten zwischen den

Polymermolekülen und den häufig deutlich kleineren Quellmittelmolekülen für ein spezifisches Verhältnis zwischen dem Volumen des Polymers V_p und dem molaren Volumen des Quellmittels \tilde{V}_q . n_q ist die Stoffmenge des Quellmittels in *mol*. Der entropische Beitrag ist gegeben als (3.13):

$$\Delta F_{entr} = RTn_q \ln(1 - \phi) = RT \frac{V_p}{\tilde{V}_q} (\phi^{-1} - 1) \ln(1 - \phi) \quad (3.13)$$

Reale Systeme weichen vom Idealmodell ab, welches auf den Annahmen von Flory basiert. Für eine geeignete Beschreibung werden experimentell Kompensationsparameter ermittelt, wobei der Parameter A „entropischer Part“ und der Parameter B „enthalpischer Part“ genannt wird. Ausgehend von S. Hirotsu [67] erhält man (3.14). Der enthalpische Term B wird als volumenu-nabhängig modelliert.

$$\chi = A_1 + \frac{B}{T} + A_2 \phi. \quad (3.14)$$

T ist die absolute Temperatur in *K*. Für PNIPAAm gelten nach [63] die folgenden Parameter aus (3.17):

$$A_1 = 3,677 \quad (3.15)$$

$$A_2 = 0,259 \quad (3.16)$$

$$B = -903,12K \quad (3.17)$$

Die elastische Komponente ΔF_{elast} hat bei der Quellung einen wesentlichen Einfluss auf die Größe eines Gels, die erreichbar ist. Die Kraft, mit der sich die Polymerketten zusammenziehen, entsteht ähnlich wie beim Gummielastizitätsverhalten durch eine Änderung in der Entropie, welche zur Änderung in der freien Energie führt [68]–[71]. Die Quellung wird als isotropisch in allen drei Richtungen betrachtet. Dieses führt zu dem folgenden elastischen Beitrag der freien Energie:

$$\Delta F_{elast} = \frac{3}{2} RTn_c (\alpha^2 - 1 - \ln(\alpha)) \quad (3.18)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{RTV_p}{\tilde{V}_q} r \left(\phi^{-\frac{2}{3}} - 1 + \frac{1}{3} \ln(\phi) \right) \quad (3.19)$$

Der Einfluss der durchschnittlichen Kettenlänge zwischen zwei dreidimensionalen Vernetzungspunkten wird durch die Variable n_c beschrieben und in *mol* angegeben. Die Variable $\alpha = \phi^{-\frac{1}{3}}$ beschreibt das Längendehnungsverhältnis zwischen dem gequollenen und dem

trockenen Zustand und die Variable $r = \sqrt{V_s/V_c}$ ist das Verhältnis zwischen dem molaren Volumen des Quellmittels und dem Volumen der sich darin befindlichen Polymerketten.

3.4.3 Quellkinetik: Zeitliche Beschreibung der Quellung

In ihrer Arbeit zur Beschreibung zeitlicher Aspekte der Quellung von Gelen veröffentlichten Tanaka, Fillmore *et al.* in den Jahren 1973 und 1979 ihre Theorie, welche auf rein mechanischen Prozessen beruht [62], [72], [73]. Die Betrachtung der Größenänderung beim Quellen der Gele und insbesondere der Polymerstränge und ihrer Bewegung im Fluid führt zur mathematischen Herleitung und zur Einführung des kooperativen Diffusionskoeffizienten D_{coop} unter Berücksichtigung der auftretenden Reibung f (friction) und des Elastizitätsmoduls E . Der kooperative Diffusionskoeffizient beschreibt die gemeinsame Bewegung von Polymer und Lösungsmittel und ermöglicht in makroskopischen Systemen die Dimensionierung und die Charakterisierung.

Im folgenden Beispiel eines Hydrogelkörpers mit Kugelform werden in **Abbildung 22** die später verwendeten Vektoren grafisch dargestellt. Im allgemeinen Fall beziehen sich die Vektoren auf frei wählbare Punkte innerhalb der Netzwerketten und auf deren Verschiebung. Zur Vereinfachung der visuellen Darstellung zeigen die Vektoren auf Netzwerketten am äußeren Rand der Kugel und stimmen damit mit dem Radius des dargestellten runden Teilchens überein. Der Mittelpunkt der Kugel ist auch gleichzeitig der Koordinatenursprung des Systems.

Der Ortsvektor $\vec{r}(t)$ zeigt auf den ausgewählten Randbereich während der Quellung zum Zeitpunkt t und verändert sich zeitlich. Der Vektor \vec{r}_∞ kennzeichnet den Gleichgewichtszustand, der sich nach einer unendlich langen Quellzeit einstellt. Der zeitlich veränderliche Verschiebungsvektor $\vec{r}(t)$ stellt die Verschiebung gegenüber dem Gleichgewichtszustand \vec{r}_∞ dar. Der Vektor \vec{r}_0

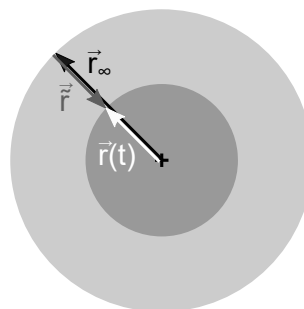


Abb. 22. Modellpartikel mit idealer Kugelform, $\vec{r}(t)$: Radius im Beobachtungszustand, \vec{r}_∞ : Radius im Gleichgewichtszustand, \vec{r} : Verschiebungsvektor gegenüber dem Gleichgewichtszustand.

ist in der Abbildung nicht dargestellt und entspricht $\vec{r}(t)$ zum Zeitpunkt $t = 0$ und kennzeichnet den trockenen Ursprungszustand.

Die weitere mathematische Ausführung beruht auf [63]. Im Ausgangspunkt befindet sich das Hydrogelpartikel im deformierten Zustand gegenüber dem Gleichgewichtszustand. Diese Deformation führt zu inneren Spannungen σ , welche mit dem Spannungstensor beschrieben werden [73]. Für die Berechnung einer (später zu verwendenden) 3 x 3 Matrix \mathbf{u} in karthesischen Koordinaten (3.20) sind die folgenden Schritte erforderlich, wobei jeweils die Indizes i und k in (3.21) den Wert für die x, y und z-Komponente annehmen. Matrizen sind fett dargestellt und ∇ ist der Nabla-Operator, K das Elastizitätsmodul, G das Schubmodul und δ_{ik} der Kronecker Delta Operator.

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_{x,x} & u_{x,y} & u_{x,z} \\ u_{y,x} & u_{y,y} & u_{y,z} \\ u_{z,x} & u_{z,y} & u_{z,z} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$u_{i,k} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \check{r}_k}{\partial r_{\infty,i}} + \frac{\partial \check{r}_i}{\partial r_{\infty,k}} \right) \quad (3.21)$$

$$\sigma_{ik} = K(\nabla \cdot \mathbf{u}) \delta_{ik} + 2G \left(u_{ik} - \frac{1}{3}(\nabla \cdot \mathbf{u}) \delta_{ik} \right) \quad (3.22)$$

Die durch diese mechanische Spannung verursachte Kraft \vec{f}_{sp} auf eine Volumeneinheit kann wie folgt berechnet werden:

$$\vec{f}_{sp} = \nabla \cdot \sigma \quad (3.23)$$

Die zum Quellen bzw. Entquellen erforderliche Bewegung zwischen Hydrogelnetzwerknetzen und Quellmittel führt zu Reibung. Diese auf ein Volumenelement bezogene Reibungskraft \vec{f}_r mit dem Reibungskoeffizient ζ lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$\vec{f}_r = -\zeta \frac{\partial \vec{r}}{\partial t} \quad (3.24)$$

Die Newtonsche Bewegungsgleichung für das Gel mit der Dichte ρ sieht hiermit wie folgt aus:

$$\rho \frac{\partial \vec{r}}{\partial t^2} = \vec{f}_{sp} + \vec{f}_r = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} - \zeta \frac{\vec{r}}{\partial t} \quad (3.25)$$

Aufgrund der hohen Reibung zwischen Polymerketten und Quellmittel kann die Massenträgheit vernachlässigt werden, womit man zur finalen Bewegungsgleichung kommt:

$$\frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = \frac{\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}}{\zeta} \quad (3.26)$$

Mit (3.22) erhält man die Partielle Differenzialgleichung (3.27).

$$\frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = \frac{K + \frac{1}{3}G}{\zeta} \nabla(\nabla \cdot \vec{r}) + \left(\frac{G}{\zeta} \right) \nabla \vec{r} \quad (3.27)$$

Im Fall von Partikeln mit idealer Kugelform kann man davon ausgehen, dass alle Vektoren in radiale Richtung zeigen und nur radiale Verschiebungsvektoren auftreten. Wird der Verschiebungsvektor \vec{r} in Abhängigkeit vom Radius im Gleichgewichtszustand r_∞ innerhalb des sphärischen Teilchens als skalare Funktion $\tilde{r}(r_\infty)$ dargestellt, so ergibt sich (3.28):

$$\vec{r}(\vec{r}_\infty) = \tilde{r}(r_\infty) \frac{\vec{r}_\infty}{r_\infty} \quad (3.28)$$

Bei der Vereinfachung der Gleichung wird ein Teil davon zum kooperativen Diffusionskoeffizienten D_{coop} zusammengefasst. Dieser ist charakteristisch für die gemeinsame Diffusion der Quellmittelmoleküle in das Hydrogel und für die Diffusion der Polymerketten innerhalb des Quellmittels.

$$D_{coop} = \frac{K + \frac{4}{3}G}{\zeta} \quad (3.29)$$

$$\frac{\partial \vec{r}}{\partial t} = D_{coop} \frac{\partial}{\partial r_\infty} \left\{ \frac{1}{r_\infty^2} \left[\frac{\partial}{\partial r_\infty} (r_\infty \cdot \vec{r}) \right] \right\} \quad (3.30)$$

Die Lösung für die Beschreibung der zeitlichen Prozesse kann als eine Summe von Eigenfunktionen nach dem Superpositionsprinzip dargestellt werden.

$$\tilde{r}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} F_n \exp\left(-n^2 \frac{D_{coop} \pi^2}{r_{\infty}^2} t\right) \quad (3.31)$$

Die Amplitude F_n wird mit steigendem n kleiner, wobei auch die Abklingzeit kleiner wird. Als grobe Näherung werden die Terme höherer Ordnung vernachlässigt (3.32).

$$r(t) = r_{\infty} + \tilde{r}(t) = r_{\infty} + (r_{\infty} - r_a) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (3.32)$$

r_{∞} ist der Gleichgewichtsradius, r_a ist der Radius im Anfangszustand und die charakteristische Zeitkonstante τ ist definiert als (3.33):

$$\tau = \frac{r_a^2}{\pi^2 D_{coop}} \quad (3.33)$$

Die Gleichung (3.32) kann sowohl für die Quellung als auch für die Entquellung genutzt werden. Im ersten Fall ist $(r_{\infty} - r_a) > 0$ und im zweiten Fall $(r_{\infty} - r_a) < 0$.

3.4.4 Herstellung von Hydrogelstrukturen

Hydrogele können durch Kettenwachstumsreaktionen aus ihren monomeren Einheiten in Gegenwart eines Vernetzers hergestellt oder z. B. durch die Vernetzung vorgefertigter linearer Ketten erzeugt werden. Die freie radikalische Reaktion wird insbesondere mit der lithographischen Strukturierung in dieser Arbeit verwendet. Durch die Art, wie die Radikale zum Start der Reaktion entstehen, kann eine grobe Unterteilung in die Unterklassen der radikalischen Reaktion vorgenommen werden. Bei der thermischen radikalischen Reaktion entstehen die Radikale im gesamten Volumen durch das thermische Zersetzen des Initiators. Bei der lithographisch kompatiblen fotoiniziierten radikalischen Reaktion zerfällt ein Fotoinitiator durch die Einwirkung von UV-Licht, wobei Radikale entstehen. Radikale können auch durch Energiezugabe mittels Elektronenstrahl oder Plasma erzeugt werden. Diese Verfahren werden jedoch in dieser Arbeit nicht behandelt.

Die Strukturierung kann sowohl während des Kettenwachstums entstehen z. B. durch die Form, in die die Polymere hineinwachsen oder durch die Bestimmung der Volumina, auf die ein Kettenwachstum beschränkt ist.

Bei einigen Verfahren entsteht die Partikelstrukturierung erst im anschließenden Prozess:

Mechanische Herstellung:

Große zusammenhängende Hydrogel „-Klumpen“ bzw. „-Platten“ werden Bulk-Polymere genannt. Sie können in größeren Gefäßen hergestellt und anschließend zermahlen werden. Nach einer Fraktionierung mittels Siebprozess erhält man Fraktionen ähnlicher Größenverteilung. Ein Vorteil der Methode ist die relativ einfache Handhabung. Zu den Nachteilen gehört die unregelmäßige Form der Partikel und die Schwierigkeit der reproduzierbaren Befüllung von Akto-
volumina.

Molding:

Wird die Präpolymerlösung in einer Kanalstruktur oder Form eingefüllt (gegossen), nimmt das Hydrogel beim Aushärten diese Form an. Es kann entweder so gestaltet werden, dass es fest auf die eine Seite angebunden wird oder dass die Partikel lose bleiben und anschließend ausgespült werden können. Dadurch können Strukturen bis hin zum Nanometerbereich hergestellt werden.

Mikrofluidik:

In mikrofluidischen Kanalstrukturen können z. B. in einer Lab-on-a-chip Anwendung oder als Schlauch-Mikrofluidik kleine Hydrogeltropfen gebildet werden, die dann in der vorhandenen Form als kleine Partikel aushärten. Mit dieser Methode können viele gleichartige Partikel erzeugt werden.

Emulsionspolymerisation:

Kleine Hydrogeltropfen können auch in einer Flüssigkeit als Emulsion vorliegen, wobei nach der Polymerisation ihre Form dauerhaft als Partikel fixiert ist.

E-Beam Lithografie und E-Beam-Direktschreiben:

Der Elektronenstrahl kann als eine große Elektronenstrahlquelle vorliegen. Das Hydrogel kann dann als ganzes Volumen vernetzt werden oder durch eine Maske. Oder die Elektronenstrahlquelle ist als fein fokussierte Quelle ausgestaltet und ermöglicht das Elektronenstrahlschreiben. Die Schicht ist dann ggf. dünn gestaltet und auf das Elektronenstrahlverfahren angepasst. Grundlegende Arbeiten hierzu erfolgten durch T. Schmidt *et al.* im Jahr 2006 mit Linienbreiten bis zu 250 nm [74].

Fotolithografische Strukturierung:

Wird ein UV-vernetzbares Polymer verwendet, können die Bereiche mit UV-Licht-Iniziiierung selektiv vernetzt werden. Die Auswahl der Bereiche zur Vernetzung kann durch eine Maske erfolgen oder durch ein z. B. mittels UV-Laser funktionierendes maskenloses Schreibverfahren. Grundlegende Arbeiten hierzu erfolgten an der TU Dresden bereits im Jahr 1999 durch D. Kuckling an der Professur für Makromolekulare Chemie und durch M. Plötner an der Professur für Mikrosysteme [75].

Stereolithographische Strukturierung:

Wie bei der fotolithographischen Strukturierung werden UV belichtete Bereiche polymerisiert und 3D vernetzt. Statt einer Maske wird ein fokussiertes Licht gezielt nur auf die Bereiche gerichtet, welche polymerisieren sollen.

Inkjet Printing:

Wie beim Druck mit einem Tintenfarbdrucker werden einzelne Tröpfchen gezielt an den Stellen abgesetzt, an denen Hydrogel polymerisieren soll. Die Initiierung der Polymerisation erfolgt anschließend u. a. durch UV-Licht.

3.5 Erzeugung eines Temperaturprofils zur Aktorsteuerung

In Kapitel 5 wird ein thermischer Controller zur Steuerung von temperatursensitiven Gelaktoren entwickelt. Sowohl bei der Realisierung als auch bei der Dimensionierung des thermischen Konzeptes wurde nach Anwendungen gesucht, bei denen bereits fertige Lösungskonzepte vorliegen.

Die Gasdetektion bietet einen ersten Ansatz, weil hierbei zeitlich- und örtlich definierte Temperaturänderungen durchgeführt werden [76]. Wie in **Abbildung 23** dargestellt, befindet sich unter dem gassensitiven Material (1) ein dünner Platin-Heizer (3) und eine dünne Membran (4). Heizer und Membran sind $0,5\ \mu\text{m}$ dick. Das Siliziumträgermaterial ist so gestaltet, dass es direkt unter dem temperierten Bereich offen ist. Die Gasdetektion erfolgt durch Modulation der Temperatur des gassensitiven Materials, wobei die Zeitkonstante t_{90} mit 5 ms angegeben ist.

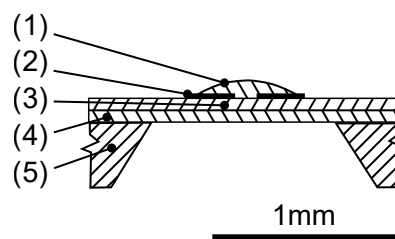


Abb. 23. Aufbau eines Gassensors nach [76]. (1) sensibles Material, (2) Goldelektroden, (3) Platinheizer (4) Membran, (5) Silizium Trägersubstrat.

Eine Arbeit auf dem theoretischen Gebiet der Simulation haben im Jahr 2002 Anton A. Darhuber und Sandra M. Trojan veröffentlicht, in der sie Heizstrukturen aus Dünnschicht-Elementen zur Erzeugung von örtlich definierten Temperaturprofilen modellieren. Im Unterschied zur oben genannten Lösung verwenden sie planare Schichten ohne Hohlräume. Zur Erhöhung des Wirkungsgrades setzen sie zwischen den Heizstrukturen und der tragenden Glasschicht eine dünne Polymerschicht ein [77].

In der Studie wird festgestellt, dass die sowohl thermische Auflösung als auch der Energieverbrauch durch Einbringung der dünnen, thermisch isolierenden Schicht verbessert wird.

4 Herstellung des Aktorchips und Elementansteuerung

In diesem Kapitel wird der *Aktorchip* als Baugruppe vorgestellt. Ein Aktorchip erfüllt sowohl die mechanische Funktion eines Trägersubstrates, welches stabil genug ist, vom Benutzer abgetastet zu werden als auch die Aufgabe der Unterbringung der aktiven Komponenten und der Quellmittelversorgung. Auf bzw. in dem Aktorchip ist das Array mit Hydrogelaktoren integriert. Darüber hinaus sind optische und thermische Designaspekte für das gesamte Gerät funktionsrelevant. Neben der Herstellung der einzelnen Komponenten wie Trägersubstrat, Hydrogelaktoren und Abschlussfolie werden ebenso die dafür erforderlichen technologischen Prozessschritte erklärt. Aspekte dieses Kapitels sind in [78], [79] enthalten.

4.1 Trägersubstratherstellung

Das Design des Trägersubstrates berücksichtigt thermische und optische Aspekte des Systems. Der Energieverbrauch, die Reaktionszeit bis zum Erreichen eines bestimmten Zustandes und die Auflösung sind eng mit der thermischen Charakteristik verbunden. Optische Anforderungen entstehen zusätzlich durch die aktuell eingesetzte elektronikkompatible optisch-thermische Ansteuerung. Um die vielseitigen Anforderungen zu erfüllen, besteht das Trägersubstrat aus einem Mehrschichtaufbau mit homogenen Schichtdicken, welche schichtweise einheitliche Stoffeigenschaften haben. Zunächst wurde ein vereinfachtes Modell entwickelt, welches im Folgenden beschrieben wird und Designrichtlinien für die Systemdimensionierung ermöglicht.

4.1.1 Trägersubstrat-Schichtaufbau: vereinfachtes Modell

Das Ziel der Aktorsteuerung ist ein zeitlich und örtlich definiertes Temperaturprofil, mit dem jeder Aktor einzeln und alle Aktoren gleichzeitig gesteuert werden können. Für einen zeitlich stabilen Betriebsmodus muss nach dem Einschaltvorgang eine schnelle Änderung des Temperaturfeldes bis zu dem gewünschten Zustand erfolgen, um eine bestimmte Aktorkombination abzubilden. Danach muss das Temperaturprofil auch über lange Zeiträume stabil sein.

Die gewünschte Temperatursteuerung wird dadurch erzielt, dass gleichzeitig erwärmt und gekühlt wird, wobei die Summe an zugeführter und abgeführter Energie gleich groß ist. Es entsteht ein stabiles, stationäres Temperaturprofil. Das Lösungsfeld bietet viele Möglichkeiten, von denen viele für eine Großintegration ungeeignet sind, weil der Herstellungsprozess oder die Regelung zu aufwändig sind. Zum Beispiel kann mit miniaturisierten Peltierelementen und integrierten Sensoren jedem Aktor eine eigenständige Temperatur als Regelkreis gegeben werden.

Deutlich einfacher wird es, wenn die Erwärmung gezielt lokal erfolgt und global gekühlt wird. Hierfür steht die zum Benutzer zugewandte Seite nicht zur Verfügung. Für die Kühlung bleiben die Abstände zwischen den Aktoren und die Unterseite des Aktorchips. Weil die Wärmeausbreitung zwischen den Aktoren nicht erwünscht ist, bleibt nur die Kühlung unterhalb des Substrates.

Modellbildung

In **Abbildung 24** sind alle Komponenten eines vereinfachten thermischen Modells dargestellt, reduziert auf die Funktionalität des Trägersubstrates:

Die Unterseite des Trägersubstrates (3) in **Abbildung 24** wird durch eine kontinuierliche Strömung mit definierter Basistemperatur gekühlt bzw. temperiert. Im abgeschalteten Zustand gibt diese Flüssigkeit dem System eine stabile und einheitliche Basistemperatur.

Um eine aktorgenaue lokale Erwärmung zu erreichen, wird Licht scharf fokussiert und die darin befindliche Energie mittels geeigneter Elemente absorbiert, um in Wärme umgewandelt zu werden. Hierfür erfüllt im thermischen Modell die obere Lage (1) die Aufgabe eines Projektionsschirms bzw. einer Absorptionsschicht. Je nach Ausführung befindet sich direkt unter den Aktoren eine schwarze und dünne Absorberschicht oder das (schwarz) gefärbte Quellmittel erfüllt im Aktorinnenraum die Aufgabe der Absorptionsschicht.

Wird die Wärmeenergie lokal abgegeben (4), erwärmt sich diese Stelle. Der darüberliegende Aktor wird warm und entquillt. Für die optische Steuerung muss die zwischen Heizung und Kühlung befindliche Wärmeisolationsschicht (2) transparent sein. Dadurch, dass die Oberseite für den Abtastvorgang frei zur Verfügung stehen muss, muss das Licht durch die transparente Flüssigkeit (3) und durch die Wärmeisolationsschicht (2) zur Absorptionsschicht (1).

Die eigentliche Dimensionierung des Energieverbrauchs und der Reaktionszeit für Ein-, Umschalt- und Ausschaltvorgänge erfolgt durch die Wahl der Schichtdicke der Wärmeisolationsschicht d_2 . Die Schichtdicke des Projektionsschirms d_1 ist so dünn wie möglich und

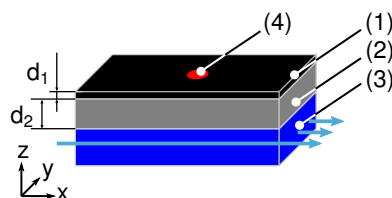


Abb. 24. Allgemeiner Aufbau der thermischen Ansteuerung 1. wärmeerzeugende Absorptionsschicht, 2. dünne Wärmeisolationsschicht, 3. Wärmeableitende Flüssigkeitsschicht, 4. punktuelle Erwärmung, d_1 Dicke der wärmeerzeugenden Schicht, d_2 Dicke der Wärmeisolationsschicht.

im Idealfall gegenüber d_2 vernachlässigbar. Eine minimale Schichtdicke entsteht durch die Anforderung der Lichtdichtheit. Das Licht darf nicht durchscheinen und muss vollständig in Wärme umgewandelt werden.

In Bezug auf die Substratfertigung hängt die Genauigkeit des Temperaturprofils von der Präzision ab, mit der die Schichtdicken hergestellt werden können und wie homogen die Stoffeigenschaften sind.

4.1.2 Projektionsschicht

Das Lösungsfeld, wie das Licht des Projektors in Wärmeenergie umgewandelt wird, beinhaltet mehrere Möglichkeiten: zum einen eine Umwandlung direkt im Aktor-Quellmittel-Volumen oder an der Fläche unter den Aktoren.

a) Funktionalisierung der Hydrogelaktoren mit Pigmenten zur Lichtabsorption. Die Wärme wird aktorgenau erzeugt. Das hat den Vorteil, dass in den Aktorzwischenräumen keine Wärme entsteht und benachbarte Aktoren weniger in ihrer Funktion gestört werden. Das ist zugleich ein Nachteil, weil aus der Aktorschicht Licht austreten und den Nutzer gefährden kann. Zu den weiteren Nachteilen zählen die reduzierte Haftung zwischen Aktoren und Substrat aufgrund von Sedimentationsprozessen sowie die Tenside, die zur Stabilisierung der Pigmente erforderlich sind und das Quellverhalten beeinflussen können. Diese Methode wurde nach dem Eignungstest nicht mehr weiter verfolgt.

b) Färbung des Quellmittels zur Absorption im Aktorvolumen. Bei Verwendung des Quellmittels als Projektionsschicht wurde dieses mit Indigoblau gefärbt. In den entquollenen Bereichen kann es passieren, dass intensives Licht austritt und den Nutzer gefährdet. Bei Beschädigung der elastischen Folie wird ein Nachteil dieser Methode deutlich: die austretende und gefärbte Flüssigkeit kontaminiert die Hände des Nutzers und seine Kleidung.

Die Lösungen a) und b) führen zur Wärmeerzeugung direkt im Aktorvolumen. Aufgrund der kleinstmöglichen Entfernung zum Wirkort, können diese Lösungen zum schnelleren Erwärmen der Aktoren im Vergleich zur nachfolgenden Lösung c) führen.

c) Die Fläche, auf der die Aktoren zum Substrat befestigt sind, ist als Projektionsschirm gut geeignet. Bei Erwärmung zieht sich der Aktor zur heißen Fläche zusammen und beschleunigt dadurch die Wärmediffusion in das Aktorvolumen. Diese Methode ist zudem die direkte Analogie zur Erzeugung von Wärme in Oberflächenschichtwiderständen. Die Ergebnisse von Lichtumwandlung in Wärme an der Oberfläche können auf resistive Schaltungen übertragen werden. Zum Schutz des Nutzers übernimmt die durchgängig schwarze Projektionsschicht zudem die

Funktion eines Lichtschutzes. Intensives Licht kann aus der optisch dichten Schicht nicht zum Benutzer austreten. Diese Methode wurde als finale Lösung für das Display verwendet.

Das Maskenmaterial, welches auch zur lithografischen Fotostrukturierung eingesetzt wird, setzte sich als erstes Material zur Lichtabsorption durch. Dabei wird das fotoempfindliche Material vollständig belichtet, wodurch alle Bereiche des Films schwarz werden. Bei der späteren Polymerisationsreaktion haften die Hydrogelaktoren an der Oberfläche ohne zusätzliche Oberflächenbehandlung. Als Maskenmaterial wurde TypoPhot TO-G der Firma Typon Graphic Systems AG verwendet.

Auch die Kombination aus einer dünnen, schwarzen PET Folie und einer Zweikomponentengussmasse setzte sich als besonders geeignete Lösung durch. Die dünne Folie wird vor dem Gießvorgang an einer der Gefäßwände befestigt, damit sie nach dem Festwerden zur obersten Schicht wird. Im Vergleich zum Maskenmaterial ist die Folie beständiger gegenüber mechanischen Beschädigungen, benötigt jedoch eine Oberflächenaktivierung für die feste Anbindung der Aktoren und ggf. zusätzlichen Haftvermittler. Für mehrmonatige Experimente ist die Aktivierung mit Ozon ausreichend. Wird eine dauerhafte Verbindung benötigt, führt der Haftvermittler 3-(dimethylchlorosilyl) propyl methacrylate (DPMA) zu einer kovalenten Anbindung der Aktoren an die Oberfläche.

4.1.3 Herstellung einer transparenten Schicht definierter thermischer Eigenschaften

In **Tabelle 9** sind einige der Möglichkeiten zur Herstellung der wärmeisolierenden Schicht des Trägersubstrates dargestellt. Einige Materialien werden als Folie oder Plattenmaterial geliefert, andere wie das PDMS werden gegossen bzw. mit dem Prozess des Spincoatens aufgebracht. Die Bewertung erfolgt aus Herstellungs- und aus funktionaler Sicht.

Transparente, selbstklebende Folien sind einfach handhabbar und gegenüber Dehnung mechanisch stabil. Sie eignen sich zum Schichtaufbau. Aufgrund der Klebstoffschicht zwischen den Schichten, führt diese Methode zu Nachteilen bei der optischen Transmission und bei der Homogenität des Wärmewiderstandes.

Gegossene PDMS-Schichten bringen die Vorteile einer frei wählbaren Schichtdicke und einer hohen optischen Transmission mit, wobei für Stabilität bei dünnen Schichten (100 μm) eine zusätzliche, mechanisch unterstützende Schicht erforderlich ist.

Die Plattenmaterialien sind im Bereich zwischen 50 μm und 1 mm nicht in einer feinen Abstufung erhältlich und schieden deshalb für die Grunduntersuchungen aus.

Für Experimente mit variabler Substratdicke setzten sich die PDMS Substrate durch. Bei der

Tab. 9. Vergleich der Trägersubstratwerkstoffe.

Methode	Wichtung	Maskenmaterial	Selbstklebende OHP-Folien	PDMS-Schicht	Kunststoffplatten
Optische Transmission	20 %	+++	++	+++	+++
Haftung Hydrogel	20 %	+++	++	±	++
Homogenität des Wärmewiderstandes	20 %	+++	++	+++	++
Präzision geometrischer Eigenschaften	15 %	+++	++	+++	+++
Einstellbarkeit der Dicke	25 %	±	+++	+++	±
Summe		++(+)	++	++(+)	+(+)

Fertigung der taktilen Displays ist die Kombination aus Maskenmaterial und PDMS Schicht zur variablen Einstellbarkeit der Schichtdicke am leistungsfähigsten.

4.2 Aktorarrays auf Hydrogelbasis

Der Stand der Technik bietet für die Strukturierung von Hydrogelaktoren vielseitige Möglichkeiten. Einen technologischen Vorteil haben Methoden, bei denen eine simultane Herstellung aller Aktoren der Aktormatrix erfolgt sowie diese nach der Herstellung mittels eines gemeinsamen Trägersubstrates gleichzeitig positioniert und ggf. dauerhaft fixiert werden können. Das Ziel ist ein großintegrationsfähiger Herstellungsprozess. Dieser soll für Systeme mit mehr als 1.000 bzw. 10.000 Hydrogelaktoren geeignet sein. Das ist die Schwelle, welche die Großintegration charakterisiert. Potentiell sollen durch diese Entwicklung viele Millionen Aktoren herstellbar und für Anwendungen verfügbar sein. Liegen nach der Herstellung die Partikel lose z. B. als Schüttgut vor, ist der Aufwand für Positionierung und Dosierung zu hoch. Methoden, bei denen sequentielle Prozesse vorkommen, sind nicht praktikabel.

Die Auswahl fällt auf die vielseitig einsetzbare fotolithografische Strukturierung. Die mittels Fotomaske und UV-Licht hergestellten Aktoren können auf Trägersubstrate, auf Folien sowie im Volumen zwischen Folie und Trägersubstrat strukturiert werden. Für die Wahl der Methode ist die Aktorstrukturierung in einer vorher geschlossenen Kammer aus Trägersubstrat und elastischer Folie von besonderer Bedeutung, wobei die Aktoren schon während des Prozesses an den vorgegebenen Positionen dauerhaft befestigt werden.

4.3 Fotolithografischer Prozess

Lithografische Prozesse werden in der Halbleitertechnik mit Hilfe von Maskaligner und Wafer-Stepper durchgeführt. Die Geräte ermöglichen eine Ausrichtung der Maske zur fotoempfindlichen Schicht und eine homogene Belichtung der Probe. Die Nutzung eines solchen Gerätes würde einen Umbau für die Handhabung von Flüssigkeiten, Schutzgas und die Entwicklung einer thermischen Einheit für die Strukturierung temperatursensitiver Hydrogele bei einer vorgegebenen, konstanten Temperatur erfordern. Dies ist aufgrund der Preislage dieser Geräte und der Reinraumanforderungen zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht möglich.

Die Minimalanforderungen für den lithografischen Prozess sind eine UV-Lichtquelle, eine fotolithografische Maske und eine Reaktionskammer mit der Möglichkeit einer sauerstofffreien Schutzgasatmosphäre. Um definierte Bedingungen zu erreichen, wird zusätzlich die Temperatur durch eine geeignete Vorrichtung kontrolliert. Die chemischen Komponenten werden als Präpolymerlösung vor der Reaktion hergestellt.

Während der UV-Belichtung ist beobachtbar, wie zunächst die Viskosität der Präpolymerlösung steigt und anschließend die belichteten Bereiche gelieren. Es ist davon auszugehen, dass die Reaktion an vielen Stellen gleichzeitig initiiert wird und dass die Ketten im verfügbaren Volumen wachsen. Die Monomere der thermisch sensitiven NIPAAm Komponenten werden statistisch mit der BIS Komponente während der Kettenwachstumsreaktion vernetzt. Im Umschlagpunkt zwischen flüssig und fest sind die Netzwerkketten so lang, dass sie sich berühren und im Überlappvolumen ein Makromolekül entsteht, wobei ebenfalls auch Verschlaufungen entstehen.

Während des lithografischen Prozesses führt die Polymerisation dazu, dass sich am Ende des Belichtungsvorganges in den belichteten Bereichen feste Strukturen ausbilden. Aufgrund von Streustrahlung und Diffusion der Radikale können auch nichtbelichtete Randbereiche polymerisieren. Die Belichtungszeit wird so eingestellt, dass in den dunklen Bereichen die Präpolymerlösung noch nicht den Umschlagpunkt von flüssig zu fest erreicht hat, d. h. der Gelpunkt ist nur in den belichteten Bereichen überschritten worden. Dadurch, dass in den nichtbelichteten Stellen die Präpolymerlösung als Flüssigkeit vorliegt, kann sie ausgespült werden.

Der Gelpunkt ist eine charakteristische Größe und wird in [80] mit Hilfe oszillierender rheologischer Untersuchungen an Systemen definiert, in welchen der Gelierungsprozess voranschreitet. Der Punkt wird als der Übergang zwischen flüssiger und fester Materie beschrieben [81], [82], an dem die Viskosität unendlich wird, während das Schermodul so klein ist, dass das Gleichgewichtsmodul Null ist. Dieser besondere Zustand wird als kritisches Gel bezeichnet.

Um die erwünschten Eigenschaften der Hydrogelaktoren zu erhalten (Elastizitätsmodul), muss beim Prozess gewährleistet sein, dass über dem Gelpunkt hinaus eine ausreichend lange Zeit

belichtet werden kann, so dass der gewünschte Vernetzungsgrad erreicht wird und dennoch am Ende des Prozesses die unbelichteten Bereiche sauber entfernt werden können.

Nach der Herstellung wird das unreaktierte Material (Sol) aus den vernetzten Bereichen (Gel) entfernt. Die Reinigung erfolgt durch Spülen mit einem guten Quellmittel z. B. mit destilliertem Wasser. Der Prozess kann durch das mehrfache Quellen und Entquellen unterstützt werden z. B. durch das ein- und Ausschalten der Aktoren. Bei den ersten Zyklen werden die Aktoren konditioniert, zu kurze Schlaufen reißen, die anderen Netzwerkketten finden eine optimale Stellung.

Die Reproduzierbarkeit wird durch die Parameter der Reaktion gesteuert. Die Hydrogelpolymerisation wird durch das Spektrum des UV-Lichtes, dessen Leistung, deren Einwirkzeit und durch die Temperatur beeinflusst. Weitere Parameter, die im Zusammenhang mit der Belichtungsstrecke stehen (Belichtungssystem, Maske und Reaktionskammer), beeinflussen die Homogenität der ausgeleuchteten Teilbereiche, die Breite des Überganges, sowie den Kontrast zwischen hellen und dunklen Bereichen. Die Temperatur wirkt in mehrfacher Weise: sie steuert die Homogenität des Netzwerkes und hat einen Einfluss auf den Quellungsgrad. Sie beeinflusst auch die Beweglichkeit der Radikale während der Polymerisation und damit die unerwünschte Diffusion dieser in die dunklen Bereiche. Neben der Qualität der sauerstofffreien Atmosphäre kann auch der Wellenlängenbereich der UV-Strahlung die Eigenschaften beeinflussen.

4.3.1 Belichtungseinheit

Zum Beginn dieser Arbeit stand der Gruppe vorübergehend eine UV-Belichtungsanlage mit 100 W UV-Lampe zur Verfügung. Die Arbeitsfläche von maximal 15 mm x 15 mm konnte mit einer Leistungsdichte im UV-Bereich (365 nm) von 50 mWcm^{-2} strukturiert werden.

Die Voruntersuchungen mit dieser Anlage ergaben, dass bei den erforderlichen Leistungsparametern die Strukturierungsmaske schmilzt, da die spektralen Anteile der Hg bzw. HgXe Lampe im sichtbaren Licht und im IR Bereich eine zu hohe Intensität haben. Durch Kühlung der Maske wurde das Schmelzen verhindert. Die Erwärmung führt jedoch zu einer nicht reproduzierbaren Polymerisationstemperatur. Bereiche mit mehr schwarzen Flächenanteilen auf der Maske erwärmen sich stärker als transparente Bereiche.

In Absprache mit der Firma LOT-Oriel (aktuell LOT-QuantumDesign) wurde ein neues und leistungsfähigeres System zusammengestellt. Mit der Anlage wurde sowohl die Erwärmungsproblematik gelöst als auch die Arbeitsfläche vergrößert. Die UV-Lampe im System verfügt über eine elektrische Leistung von 1.000 W. Mit Hilfe eines dichroitischen Spiegels wird bis zu 99 % des sichtbaren Lichts selektiv in einer Lichtfalle zu Wärme umgewandelt. Der Anteil

der UV-Strahlung wird durch den Spiegel reflektiert und auf die Probe gerichtet. Mit dieser Anordnung konnte die thermische Belastung der Probe stark reduziert werden. Eine ähnliche Anlage des gleichen Herstellers ist in **Abbildung 25** dargestellt. Der dichroitische Spiegel (Modell LSZ172) hat einen Arbeitsbereich zwischen 280 nm und 400 nm. Er leitet den sichtbaren und den infraroten Bereich des Lichtes mit einer Wellenlänge größer als 400 nm in die Lichtfalle.

Die neu aufgebaute Anlage kann eine Fläche von 50 mm x 50 mm mit ca. 25 mWcm⁻² strukturieren, wobei auch größere Flächen mit geringerer Bestrahlungsstärke möglich sind.

Für die Belichtung wird der Hauptintensitätspeak der Quecksilber-Kurzbogenlampe (365 nm) genutzt. Zur Filterung des kurzwelligen Lichtes, welches polymere Netzwerketten zerstört, wurde eine Linse aus N-BK7 Glas eingesetzt. Das Material N-BK7 hat einen Sperrbereich zwischen 350 nm und 300 nm. Es wurde weiterhin ein Modell der Quecksilber-Kurzbogendampflampe im System gewählt, welches kurzwellige UV-Strahlung unterhalb 200 nm bereits in der Lampe absorbiert und damit die Bildung von Ozon vermeidet.

Aufgrund des finanziellen Rahmens zum Zeitpunkt der Anlagenbestellung musste auf den Strahlhomogenisator verzichtet werden. Die Verwendung eines parabolischen Reflektors statt eines elliptischen Reflektors verbesserte die Homogenität.

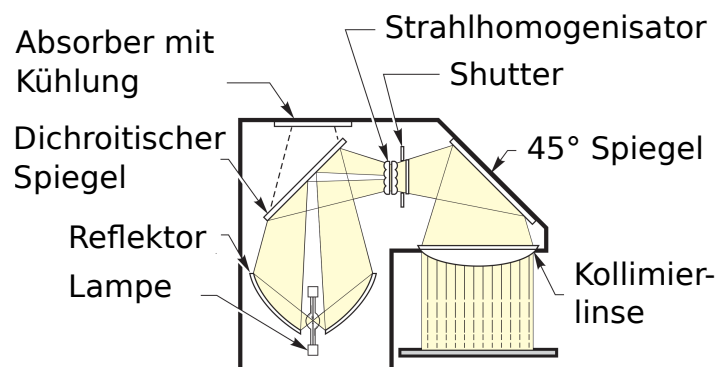


Abb. 25. Abbildung einer Masken-Belichtungsanlage der Firma LOT-Oriel, die einen Strahlhomogenisierer und einen Shutter enthält. Die Abbildung wurde dem Herstellerdatenblatt entnommen.

4.3.2 Lichtleistung und Uniformität

Das UV-Licht gibt die Initiierungsenergie für den chemischen Prozess. Die Homogenität des UV-Lichts beeinflusst dadurch die Eigenschaften und die Reproduzierbarkeit der Hydrogelaktoren.

Das Herstellerdatenblatt zeigt die Uniformität im Belichtungsfeld am Beispiel einer 500 W Kurzbogen Quecksilber-Dampf Lampe. Die in **Abbildung 26 a)** dargestellte Figur des Lichtbogens wird im Reflektor reflektiert, so dass der ursprüngliche Lichtbogen links und das von dem im Lampengehäuse eingebauten Reflektor zurückgeworfene Abbild rechts von der optischen Achse erkennbar ist. Der Kondensator kollimiert anschließend den Strahl. Ohne Strahlhomogenisator ist die Abbildung des Lichtbogens maßgeblich für die Homogenität im bestrahlten Bereich verantwortlich und kann durch die Reflektor- und Kondensoreinstellung optimiert werden. Aufgrund des Lichtbogens hat die Homogenität in horizontaler Richtung und in vertikaler Richtung unterschiedliche Charakteristika (**Abbildung 26 b)** und **26 c)** sowie **Abbildung 27)**.

Die in **Abbildung 28** dargestellte Intensitätsverteilung ergibt sich bei den realisierten Belichtungsangaben. Bei einem Durchmesser von 70 mm erreicht die Anlage eine durchschnittliche Intensität von ca. 37 mWcm^{-2} . Die Intensität verhält sich indirekt proportional zur belichteten Fläche.

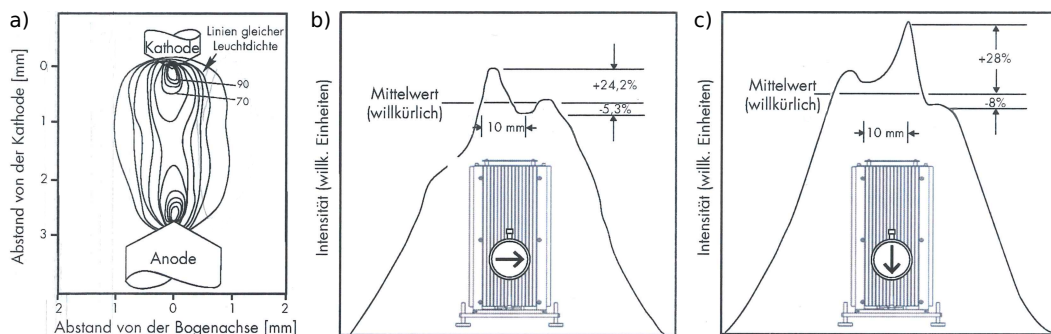


Abb. 26. Auszug aus dem Herstellerdatenblatt mit Angaben zur Homogenität. a) Form des Lichtbogens und Helligkeit, welche durch das optische System abgebildet wird, b) Intensitätsverteilung entlang der horizontalen Achse, c) Intensitätsverteilung entlang der vertikalen Achse.

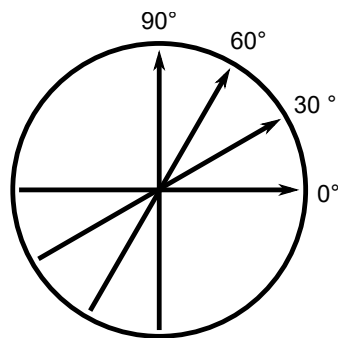


Abb. 27. Messpfade im belichteten Bereich: 0 ° ; 30 ° ; 60 ° ; 90 ° .

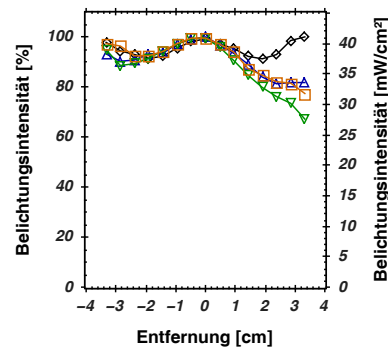


Abb. 28. Gemessene Intensität im belichteten Bereich auf vier Pfade.
 —□— 0 ° ; —◇— 30 ° ; —△— 60 ° ;
 —▽— 90 ° .

4.3.3 Fotolithografische Maske

Die Maskenanforderungen sind verbunden mit der abzubildenden Strukturgröße, Strukturgenauigkeit und den optischen Anforderungen z. B. an die Wellenlänge [83].

Die Maske wird nach den Anforderungen an Auflösung und Präzision ausgewählt. Metallschablonen werden nicht betrachtet, weil mit ihnen keine Insel-Strukturen realisiert werden können. Die einfachsten Fotomasken sind Masken auf Polymerträger wie z. B. die TypoPhot TO-G Masken der Firma Typon Graphic Systems AG. Diese haben zwei Einschränkungen: Stark vergrößert erkennt man innerhalb des transparenten Polymer-Trägermaterials eine Körnung, die jedoch bei Strukturen größer als 100 µm vernachlässigt werden können. Als zweite Einschränkung kann die Absorption von UV-Licht eine Rolle spielen, die unterhalb von 350 nm berücksichtigt werden muss.

Masken mit höherer Qualität sind auf einem Glas-Träger aufgebracht und zeigen weniger Streuung im Durchlassbereich im Vergleich zu den Polymermasken. Die Gesamtauflösung der Maske ergibt sich aus der Maskenmaterialauflösung und der Auflösung des Belichtungsgerätes. Auf Polymermasken ist die Belichtungstoleranz mit 10 % und auf Glasmasken mit 5 % angegeben. In **Tabelle 10** sind die Herstellerangaben zur Körnigkeit des Maskenmaterials als dpi-Angabe zusammengefasst, wobei die Hersteller-Toleranzangaben einen Einblick auf die erreichbare Toleranzen nach dem Belichtungsprozess ermöglicht.

Für eine Preisvorstellung wird in **Tabelle 11** die Maskenart im Zusammenhang mit der Maskengröße und der verwendeten Auflösung des Belichtungsgerätes dargestellt.

Aus den Anforerungen ergibt sich, dass für eine Strukturgröße, die größer als 300 µm ist, die günstigsten Masken auf Polymerbasis verwendet werden können. Die Belichtung und Entwicklung der Maske erfolgt in der Professur für Aufbau- und Verbindungstechnik (TU-Dresden) mit

Tab. 10. Maskenart und Toleranz [84].

Auflösung [dpi]	16k	32k	64k	128k	250k	500k
Polymer [μm]	4,8-9,6	2,4-4,8	1,2-2,4	0,6-1,2		
Glas [μm]			0,8-1,4	0,6-0,8	0,4-0,42	0,2-0,21

Tab. 11. Übersicht der Maskenarten, Quelle: Produkte und Preise von Photo Data sowie Produktinformationen [84], (*) der höhere Preis beinhaltet auch größere Masken.

Trägermaterial	Maskenart	Maskengröße	Druckerauflösung [dpi] / Pixelraster [μm]	Preis [€]
Polymerfilm (PET)	Photo-Emulsion	12"x 18"	4k / 6	24
Polymerfilm (PET)	Photo-Emulsion	12"x 18"	8k / 3	35
Kalk-Natron-Glas	Photo-Emulsion	3"x 3"	16k-128k / 0,2-1,6	>180
Kalk-Natron-Glas oder Quarz	Chrom Oxid	3"x 3"	128k / 0,2	227-10.000(*)

einem *TypoPhot TO-G* Gerät der Firma Typon Graphic Systems AG.

4.3.4 Proximity-Belichtung – 1:1 Schattenprojektion

Die flüssige Präpolymerlösung muss sich in einer Kammer befinden, in die kein Sauerstoff gelangen kann und die Aktoren entstehen zwischen Trägersubstrat und der elastischen Abdeckfolie. Prinzipbedingt kann die Kontaktbelichtung eine bessere Auflösung als die Schattenprojektion erreichen, jedoch bedingt die Abdeckfolie einen Abstand zwischen Maske und Aktorkammer. Weitere Nachteile im Zusammenhang mit einer Fertigung im Kontaktmodus sind die Reinigung der Maske und die Beeinträchtigung der Aktorqualität durch das „Abziehen“ einer Maske.

Durch die Fertigung mittels Proximity-Belichtung und Vorbehandlung der Oberflächen entsteht eine beidseitige Haftung des Aktors – sowohl an das Substrat, als auch an die elastische Folie. Der Abstand zwischen Maske und Präpolymerlösung, der auch weitere Abdeckglassubstrate beinhalten kann, wurde bei den Realisierungen in dieser Arbeit minimiert.

Die Nachteile der Proximity-Belichtung können mittels Projektionsbelichtungssystemen überwunden werden, wodurch auch Strukturen im Sub-Mikrometerbereich möglich sind. Ein Beispiel für solche Systeme ist der DSC Projection Scanner von SÜSS MicroTec in der Anwendung von Displays und Sensoren, mit einem Arbeitsbereich für Substrate bis 450 mm und Positioniergenauigkeit von kleiner als 1 μm bei 3 μm Strukturgröße.

4.4 Hydrogelsynthese

Die Synthese zur lithografischen Strukturierung des Modellhydrogels PNIPAAm wurde im Jahr 2006 mit Hilfe von Dipti Singh entwickelt [85]. Die optimierte Konfiguration [85] wurde ausgewählt und wird in der weiteren Arbeit als *Standardsynthese* bezeichnet:

Alle Stoffe werden abgewogen und in Wasser gelöst. In der fertigen Lösung hat das *Monomer* *N*-Isopropylacrylamid eine Konzentration von $1,26 \text{ mol l}^{-1}$, der *Vernetzer* *N,N*-Methylenbisacrylamid (BIS) eine Konzentration von $18,5 \text{ mmol l}^{-1}$ und der *Fotoinitiator* 2-Hydroxy-4'-(2-hydroxyethoxy)-2-methylpropiophenon die Konzentration von $12,7 \text{ mmol l}^{-1}$. Typischerweise wurden Ansätze zwischen 3 ml und 12 ml hergestellt. Vor der Zugabe von Wasser wird die Probe lichtgeschützt eingepackt. Sofort nach der Flüssigkeitszugabe wird die Lösung mit Schutzgas (Argon) gespült und mindestens 15 Minuten gerührt.

Die Vernetzerkonzentration entspricht 1,5 mol % bezogen auf das Monomer. Das polymerisierte Hydrogel trägt die Bezeichnung BIS 1,5.

Die radikalische Polymerisation wurde als Kettenaufbaureaktion verwendet. Die Vorteile dieser Methode sind die Verfügbarkeit und die Kosten der Ausgangsstoffe, die Einfachheit der Herstellungsmethode und die Robustheit der Synthese sowie die Möglichkeit einer UV-initiierten Reaktionskinetik. Die Schwächen dieser radikalischen Polymerisation sind die relativ schlechte Kontrolle der molaren Kettenlänge und der Homogenität des Netzwerkes. Das Ergebnis ist eine im Verhältnis zu anderen chemischen Reaktionsmechanismen breitere Verteilung der Netzkettenmolmasse. Die Molmasse kann mit einer Kettenlänge verglichen werden, die nebeneinanderliegende dreidimensionale Vernetzungspunkte verbindet.

Die größere Molmassenverteilung wirkt sich als Schwächung der mechanischen Eigenschaften aus und reduziert die Schärfe des Phasenüberganges. Besonders kurze bzw. verschlaufte Ketten neigen dazu, bei den ersten Zyklen zu reißen. Dadurch wird eine Einarbeitungszeit der Hydrogelaktoren von ca. 10 Zyklen erforderlich. Homogene Netzwerke (gleiche Kettenlänge, Ketten- und Vernetzungspunkt-Dichte) haben demgegenüber Vorteile.

Die *stofflichen Parameter* einer Polymerisation sind die verwendeten Monomere, Vernetzer und Fotoinitiator sowie das Lösungsmittel. Zum einen ist die Auswahl der Stoffe wichtig, zum anderen das Verhältnis zwischen den Komponenten zueinander. Eine wichtige Rolle für die Qualität der Struktur spielt auch die Restmenge an Radikalfänger, in diesem Fall Sauerstoff.

Die *physikalischen Parameter* sind die Temperatur und bei lithografischen Prozessen die Intensität der UV-Strahlung sowie die Zeit, in der die Reaktion abläuft. Diese Einflussfaktoren sind im Folgenden näher erläutert.

4.4.1 Vernetzergehalt

Der Einfluss der Vernetzerkonzentration auf die Quellung des Netzwerkes ist in **Abbildung 29** dargestellt. Der Vernetzer beeinflusst die Dichte an dreidimensionalen Knotenpunkten, welche für die Stabilität des Netzwerkes verantwortlich sind. Ein dichtes Netzwerk ist steifer und quillt weniger stark. Auch hier interagiert der Parameter der Netzwerkhomogenität mit der Netzwerkdichte. Ein heterogenes Netz mit vielen verknäulten Ketten wirkt einer steifen Netzwerkstruktur entgegen.

Ein dichteres Netzwerk ist typischerweise auch gleichzeitig ein homogeneres Netzwerk. Die Synthese wurde bei 20° C durchgeführt. Die kleinere Vernetzerkonzentration (BIS 1) führt aufgrund der kleineren Anzahl von Vernetzungspunkten zu elastischeren Gelen mit höherem Quellungsgrad. Eine höhere Vernetzerkonzentration macht das Netzwerk mechanisch stabiler und weniger quellfähig (BIS 6). Weitere Steigerung der Vernetzerkonzentration führt zu einem inhomogeneren Netzwerk und damit zu einem höheren Quellungsgrad (BIS 10). Eine gute Kombination aus mechanischer Stabilität und Quellfähigkeit bieten Gele zwischen 2 mol % und 4 mol % Vernetzergehalt.

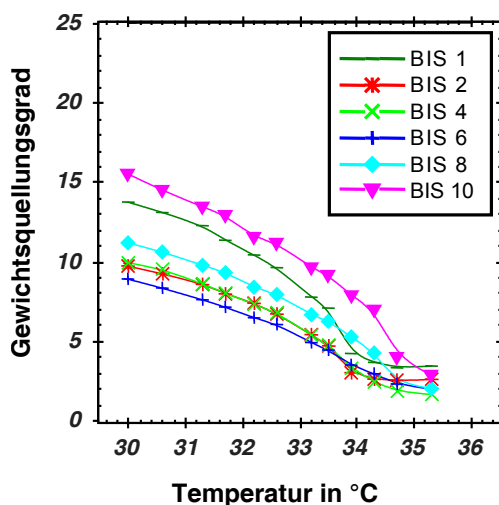


Abb. 29. Einfluss des Vernetzergehaltes auf den Quellungsgrad.

4.4.2 Fotoinitiator

Die Menge an Fotoinitiator (FI) beeinflusst die Reaktionszeit und wechselwirkt mit der Intensität der UV-Belichtung. Im Reaktionsvolumen wird die Vernetzungsreaktion an den Stellen initiiert, an denen ein einfallendes Photon ein Fotoinitiatormolekül trifft und die Energie ausreicht, um die Umwandlung in ein Radikal zu bewirken. Die Häufigkeit an Initiierungen beeinflusst die Geschwindigkeit und die Homogenität bzw. die Struktur des polymeren Netzwerks. Eine langsame Reaktionszeit ermöglicht Ausgleichs-Diffusionsprozesse und steht allgemein für homogenere Netzwerkeigenschaften. Für Fotostrukturierung ist dagegen die Diffusion in nicht-belichtete Bereiche nicht erwünscht, so dass eine Belichtungszeit von wenigen Minuten bis wenigen Sekunden eingestellt wird.

Die maximale Menge an Fotoinitiator ist durch dessen Löslichkeit im Wasser vorgegeben. Die Konzentration ist so hoch eingestellt, dass bei Lagerung und bei der UV-Reaktion nahe an 0° C der Fotoinitiator nicht ausfällt und einen Bodensatz bildet. Um den Einfluss des Fotoinitiators zu untersuchen, wurde dessen Konzentration variiert. Während eine Verringerung des FI auf 90 % bis 10 % gegenüber der Standardsynthese die Reaktionszeit verlängert, wurde bei einer Verringerung auf 1 % wieder eine kurze Belichtungszeit festgestellt. Das Verhalten kann darauf zurückgeführt werden, dass bei der Standardsynthese die Dichte an Radikale so hoch ist, dass bei der vorliegenden Diffusion ein Teil der Radikale gegenseitig rekombiniert.

4.4.3 Lösungsmittel- und Monomerkonzentration

Bei den Experimenten wurde die Lösungsmittelmenge im Verhältnis zur Monomerkonzentration variiert, das Verhältnis aus Vernetzer und Fotoinitiator bezogen auf das Monomer bleibt unverändert. In Abhängigkeit von der Dichte der Moleküle wachsen die Ketten mit einer unterschiedlichen Reaktionsgeschwindigkeit zusammen und mit einer unterschiedlich großen Anzahl von Verschlaufungen. In Laborexperimenten wurde weiterhin festgestellt, dass eine Änderung der Monomerkonzentration auch das Sol-Gel-Verhältnis ändert. Bei der verwendeten Standardprozedur liegt ein Maximum vor, bei dem die geringste Menge an Sol während des Reinigungsschrittes entfernt wird. Sowohl eine Erhöhung, als auch eine Reduktion der Monomerkonzentration um 50 % führt zu einem höheren Sol-Anteil. Eine höherer Menge an ausgespülten und nichtreagierten Bestandteilen reduziert die effektive Netzkettendichte und erhöht den Quellungsgrad.

Aufgrund des konstanten Verhältnisses zwischen Fotoinitiator, Vernetzer und Lösungsmittel, können die Beobachtungen auf die unterschiedliche Dichte während der Polymerisationszeit zurückgeführt werden.

4.4.4 Lösungsmittelqualität und Temperatur

Bei der Herstellung hängt die Qualität des polymeren Netzwerkes davon ab wie gut das Lösungsmittel während der Polymerisation ist. Zudem beeinflusst es den Gleichgewichtszustand des Hydrogels im späteren Betriebszustand.

Die Qualität von Wasser als Lösungsmittel hängt von dessen Temperatur ab. Ist die Temperatur höher wird die Qualität des Lösungsmittels schlechter und es entstehen bei PNIPAAm inhomogenere Netzwerke. Wird nach der Fertigung in das polymere Netzwerk ein Quellmittel mit besserer Lösungsmittelqualität eingebracht, quillt dieses stärker. Es kommt zum Nachquellen. Ein weiteres Beispiel für die Variation der Lösungsmittelqualität ist die Zugabe von Ethanol, wodurch ein Ethanol-Wasser-Gemisch entsteht, welches typischerweise eine schlechtere Lösungsmittelqualität als destilliertes Wasser besitzt [80].

Die Homogenität des Netzwerkes wirkt sich auf den kooperativen Diffusionskoeffizienten und auf die mechanischen Eigenschaften aus. Wird ein PNIPAAm Hydrogel bei einer höheren Temperatur synthetisiert, entsteht ein inhomogeneres Netzwerk. Das resultierende Gel ist mechanisch instabiler d. h. es ist elastischer bzw. es zerreißt bei einer kleineren Zugspannung.

Wird die Temperatur während der Polymerisation so weit erhöht, dass sie oberhalb der Phasenübergangstemperatur (PÜT) liegt, werden die Polymerketten in einem inhomogenen Zustand fixiert. Neben der stärkeren Quellung erscheint das Hydrogel im Betriebsfall selbst nach einer Abkühlung unterhalb der Phasenübergangstemperatur und nach einer Reinigung von nichtreagiertem Material opak-weiß.

In **Abbildung 30** ist das Phasenübergangsverhalten für die Synthese bei unterschiedlichen Temperaturen unterhalb der Phasenübergangstemperatur dargestellt. Das Diagramm wurde aus [86] entnommen. Es zeigt die thermische Polymerisation von BIS 4 Hydrogelen, welche einen Vernetzergehalt von 4 mol % enthalten.

Methodik zur Charakterisierung der Polymerisationszeit

Um die Parameter der Polymerisation bei Bedingungen zu untersuchen, die den Einsatzbedingungen während der späteren Proximity-Maskenbelichtung entsprechen, darf zwischen UV-Quelle und der Präpolymerlösung nur ein dünnes Glas liegen. Diese Bedingung ist bei einem Standard Rheologie-Messgerät nicht gegeben. Die Untersuchungen erfolgten mit einem Messaufbau, der für diese Aufgabenstellung neu entworfen wurde.

Die Präpolymerlösung wird bei dem Experimentaufbau durch ein Schlauchsystem geführt, welches UV-Licht geschützt ist. An einer Stelle ist der Schlauch durch eine Glaskapillare mit 5 mm

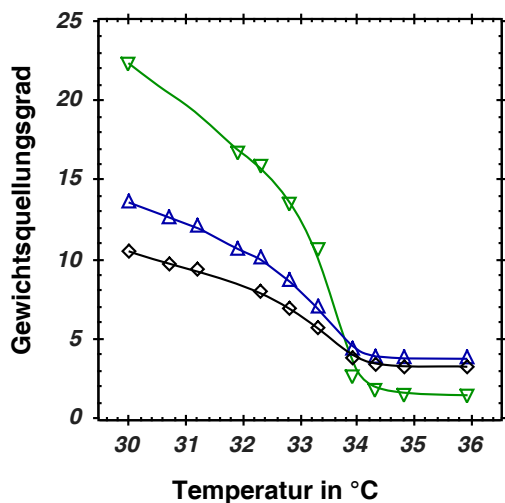


Abb. 30. Abhängigkeit des Quellungsgrades von der Herstellungstemperatur: \blacklozenge 10°C, \blacktriangle 20°C, \blacktriangledown 30°C [86].

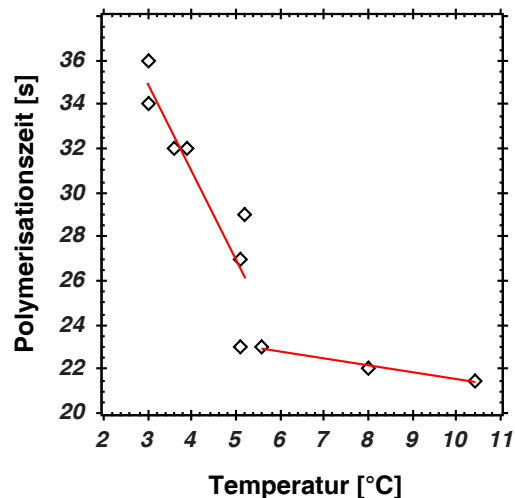


Abb. 31. Abhängigkeit der Polymerisationszeit von der Herstellungstemperatur (Synthesetemperatur).

Außendurchmesser unterbrochen. Dieser Ausschnitt wird durch das UV-Licht belichtet. Während der Polymerisationsreaktion wird die Lösung manuell mit Hilfe einer feinen Spritze zwischen zwei Punkten periodisch bewegt. Im dünnen Kanal liegt bei der langsamen Bewegung eine laminare Strömung vor.

Im Anfangszustand ist die Präpolymerlösung flüssig. Während der UV-Belichtung werden die Monomere statistisch zu dreidimensionalen Netzketten verbundenen. Die Kettenstränge benachbarter Moleküle können sich am Anfang der Reaktion noch nicht berühren, das Reaktionsprodukt ist löslich. Während der UV-Polymerisation wird die Lösung immer viskoser. Wird die Lösung fest, liegt der Gelpunkt vor. Der fluidische Widerstand in der Glaskapillare erhöht sich schlagartig. Die Schutzgasluftblase, die zur Beobachtung genutzt wird, hört auf sich zu bewegen. Durch die Druckänderungen variiert ihre Größe. Der Gelpunkt lässt sich dadurch einfach feststellen. Dieser Zeitpunkt wird bei dem Versuch festgehalten.

In **Abbildung 31** sind zwei Trend-Linien erkennbar: der Bereich zwischen 0°C und 5°C zeigt eine stärkere Abhängigkeit zwischen Reaktionszeit und Temperatur. Im Bereich oberhalb von 6°C konnte eine kleinere Abhängigkeit beobachtet werden. Die Bedeutung dieser Beobachtung wird unter anderem wichtig, wenn das Volumen eines Aktors verkleinert wird: die Polymerisation ist eine exotherme Reaktion. Untersuchungen in Reaktionscontainern mit 3 mm Glaswand auf der einen Seite und 0,5 mm Kunststoffwand auf der anderen Seite zeigen, dass bei einer Hydrogelschicht von 0,3 mm eine Anhebung der Temperatur gegenüber der kühlenden Umgebungsflüssigkeit um ca. 5 K erfolgt.

Methodendiskussion

Im Schlauchsystem und in der Glaskapillare wurde die Präpolymerlösung manuell bewegt, um den Zeitpunkt der Polymerisation festzustellen. Die Genauigkeit des Verfahrens hängt von der Reproduzierbarkeit des zyklischen Volumenstromverlaufs ab. Eine Erhöhung des Volumenstroms führt zu einer höheren Gesamtreaktionszeit aufgrund einer zusätzlichen mechanischen Einwirkung während des Kettenwachstums.

In dieser Entwicklungsstufe der Messanordnung wurde dieser Einfluss dadurch minimiert, dass eine Person die Versuche in einem zusammenhängenden, möglichst kurzen Zeitabschnitt durchgeführt hat. Die Ergebnisse ermöglichen Aussagen zum Feststellen eines Trends. In der Weiterentwicklung wird die Fehlerquelle Mensch durch Prozessautomatisierung minimiert, wodurch quantitative Messungen möglich werden.

4.4.5 UV-Intensität

Der Einfluss der UV-Intensität auf die Belichtungszeit wurde mit dem gleichen rheologischen Experimentaufbau wie der Temperatureinfluss untersucht. Wird der Gelpunkt erreicht, wird das Hydrogel im Volumen des 5 mm dicken Röhrchens unbeweglich, die Zeit bis zu diesem Zeitpunkt wird festgehalten. In **Abbildung 32** ist der Zusammenhang dargestellt.

Das Experiment wurde in Eis-gekühltem Wasser durchgeführt. Im Diagramm ist ein linear interpolierter Verlauf eingezeichnet, der die Abhängigkeit zwischen Belichtungszeit und Intensität darstellt. Umfangreichere Messwerte würden eine genauere Charakterisierung durch einen nichtlinearen Verlauf erlauben.

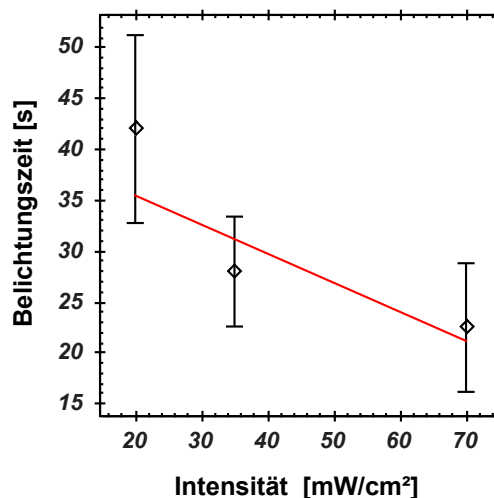


Abb. 32. Einfluss der Belichtungsintensität auf die Polymerisationszeit. Der Fehlerbalken stellt die Wurzel der Standardabweichung dar und wurde jeweils aus acht bis zehn Messwerten errechnet.

Ergebnis und Methodendiskussion

Die Messungen geben Anhaltspunkte für einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen Intensität und Belichtungszeit, wobei es mehrere Gründe für dieses Verhalten geben kann:

Bei starkem Radikalüberschuss wird die Reaktion an vielen Orten gleichzeitig gestartet. Die Zeitkomponente, wann ein Radikal auf ein reaktionsfähiges Molekül trifft, spielt eine untergeordnete Rolle. Bei wenigen Radikalen tritt die Beweglichkeit in den Vordergrund und verändert die Charakteristik. Die Zeit bis zum Auftreffen eines Radikals auf ein reaktionsfähiges Molekül tritt gegenüber des Molekülwachstums in den Vordergrund. Je weniger Initiierungspunkte es gibt, desto mehr fällt ins Gewicht, wie beweglich die Moleküle und die Radikale sind.

Die zweite Begründung steht im Zusammenhang mit der Restmenge an Sauerstoff in der Lösung. Sauerstoff als Radikalfänger wirkt reaktionshemmend. Bei einem hohen Radikalüberschuss sind die Radikale im Zeitverhalten dominierend. Sie reagieren mit sich selbst und neutralisieren sich, wobei sie schnell auch den Restsauerstoff verbrauchen. Sind aufgrund einer kleineren UV-Intensität nur wenige Radikale vorhanden, wird der Sauerstoffrestgehalt für die Zeit bis zum Start der eigentlichen Polymerisationsreaktion ausschlaggebend. Die Reaktion startet erst, wenn die Sauerstoffatome verbraucht sind. Bei diesem Erklärungsansatz ist eine Änderung des Grundverhaltens für die Nichtlinearität verantwortlich.

4.4.6 Lithografische Hydrogelstrukturierung

Die Strukturierung der Hydrogelaktoren ist erforderlich, um Aktorzwischenräume zur Quellmittelversorgung zu ermöglichen. In diesen wird das Quellmittel im Vergleich zum Quellmitteltransport innerhalb eines Gelkörpers mit geringem fluidischen Widerstand zu und abgeführt. Dabei entstehen auch weitere Vorteile. Durch die kleinere Aktorgröße werden beim Quellen und Entquellen die Spannungen zwischen jeden Aktor und dem Substrat reduziert, an dem er angebunden ist. Beim Quellen sind die Spannungen proportional zur Kantenlänge der Strukturen d. h. ohne Strukturierung maximal groß und können zu Delamination oder Rissen führen. Auch für die taktile Funktionalität sind viele kleine Aktoren vorteilhafter als ein großer Gelkörper (Bulk). Eine raue Oberflächentextur entsteht durch kleine und harte Aktoren, eine glatte Oberfläche durch weiche und gequollene Aktoren. Die Kante einer Kontur wird im Bereich zwischen kleinen und großen Aktoren fühlbar.

Im Moment der Belichtung ist die Präpolymerlösung flüssig und erfordert eine Reaktionskammer. Voraussetzung für eine reproduzierbare Polymerisation ist eine sauerstofffreie Umgebung mit transparenter Abdeckung für das UV-Licht, wie weiter unten beschrieben. Die lithografische Strukturierung kann mit Hilfe von drei Teilschritten beschrieben werden: a) die blasenfreie Befüllung unter Schutzgasatmosphäre, b) die anschließende Fotopolymerisation sowie c) die Entwicklung der Strukturen d. h. das Ausspülen flüssiger Bereiche und die Reinigung.

Befüllungsprozedur

Wie in **Abbildung 33** dargestellt, befindet sich in einem Kolben (1) die Präpolymerlösung (2). Der Kolben ist mit einem Septum (3) dicht abgeschlossen. Ein Schlauchsystem (6) verbindet alle Gefäße und ermöglicht zuerst die Spülung mit Schutzgas (5) (20 Minuten oder länger) und anschließend die Befüllung mit Präpolymerlösung (2). Das Umschalten von Schutzgas auf Befüllung erfolgt durch eine bewegliche Kanüle (7), welche durch das Septum in den Kolben (1) geschoben wird. Damit wird realisiert, dass in der Zwischenzeit kein Sauerstoff in das System gelangt.

Eine vollständige und blasenfreie Kammerbefüllung nur durch den Gasdruck konnte nicht erreicht werden. Deshalb wird zuerst eine modifizierte Spritze befüllt (9). Die anschließende Befüllung nach Abklemmen des Gasdrucks erfolgt manuell. Die vertikale Aufstellung der Reaktionskammer trägt zum Befüllen ohne Blasen und Einschlüssen bei. Nach dem Abklemmen der Schläuche auf beiden Seiten der Kammer ist diese vor Sauerstoff aus der Umgebungsluft geschützt.

Über dem Trägersubstrat (14) entsteht eine Reaktionskammer (10), wobei die Dichtungsele-

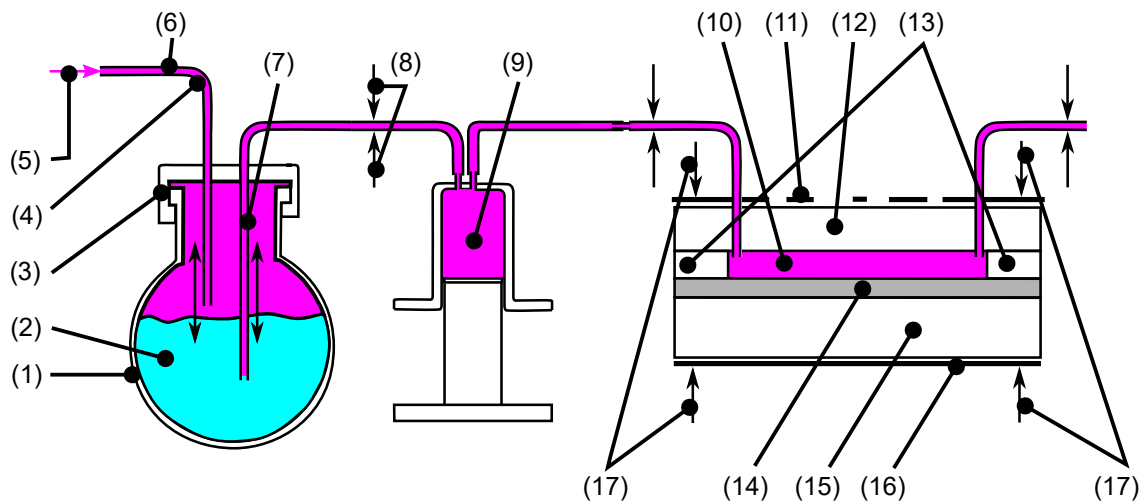


Abb. 33. Anordnung zur Kammerbefüllung mit Präpolymerlösung unter Schutzgasatmosphäre. (1) Rundkolben, (2) Präpolymerlösung, (3) Septum, (4) Einlasskanüle, (5) Schutzgas, (6) Schlauchsystem, (7) Auslasskanüle, (8) Stelle zum Abklemmen des Schlauchsystems, (9) Modifizierte Spritze, (10) Reaktionskammer, (11) UV-Maske, (12) Transparente Abdeckung, (13) Abstandhalter und Dichtung, (14) Trägersubstrat, (15) Zusätzliches Glassubstrat zur Stabilisierung, (16) Schwarzes Maskenmaterial zur UV-Absorption gegen Rückreflexe.

mente (13) als Abstandhalter zum Einstellen der Kammerhöhe genutzt werden und die transparente Abdeckung (12) die Kammer nach oben abschließt. Auf dieser wird die Fotomaske (11) geeignet positioniert. Unter dem Trägersubstrat befindet sich je nach Ausführung ein Glassubstrat (15) zur Stabilisierung. Um die Rückreflexion von UV-Strahlung stark zu reduzieren, befindet sich unter dem transparenten Substrat eine schwarze Schicht Maskenmaterial.

Als Deckelmaterial sind Polystyrol (PS) und Glas besonders geeignet. PS ermöglicht das leichte Abheben des Deckels von den Hydrogelstrukturen. Glas ist mechanisch stabiler und ebener als das PS Plattenmaterial. Es benötigt jedoch deutlich intensivere Reinigung, um das Anhaften von Hydrogelaktoren an den Deckel bei mehrfacher Verwendung zu vermeiden. Oberflächenbeschichtung mit Teflon und anderen hydrogelabweisenden Schichten ermöglichen ein besonders leichtes Abheben der Abdeckschicht nach der Polymerisation, ohne einzelne Hydrogelaktoren zu beschädigen.

UV-Belichtung

Nach der Befüllung wird die Reaktionskammer in einem Flüssigkeitsbad auf eine definierte Temperatur gebracht. Bei den Experimenten wird Eis verwendet. Die Temperatur des Wassers ist näherungsweise 0°C . Messungen in der Reaktionskammer zeigen eine Temperaturerhöhung auf 5°C . Die Reaktionskammer wird während der ganzen Reaktionszeit temperiert.

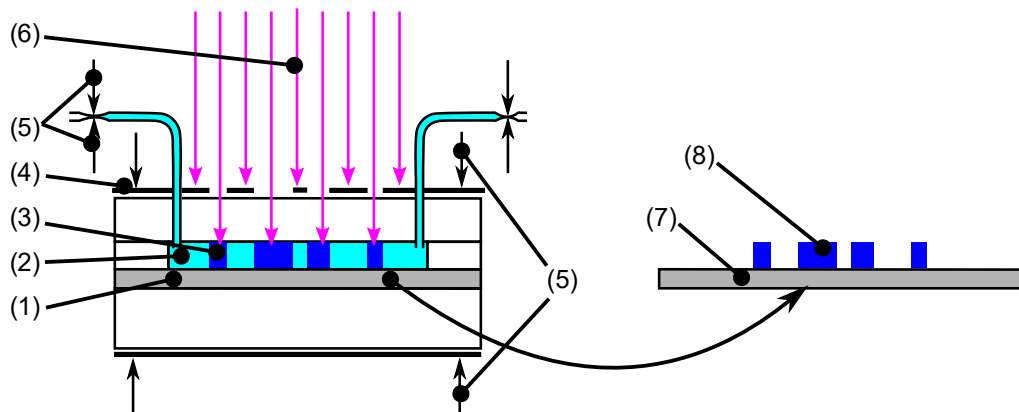


Abb. 34. Anordnung zur UV-Belichtung. (1) Trägersubstrat, (2) Präpolymerlösung, (3) Hydrogelaktor, (4) Maske, (5) Schlauchklemmen, (6) UV-Licht, (7) Trägermaterial, (8) Hydrogelaktor nach der Entwicklung.

Wie in **Abbildung 34** dargestellt, befindet sich über dem Trägersubstrat (1) die befüllte Kammer (2). Das UV-Licht (6) wird durch das Maskenmaterial (4) nur an den Stellen durchgelassen, an denen ein Hydrogelaktor entstehen soll (Negativstruktur). Das UV-Licht startet die Polymerisationsreaktion. Mechanische Klemmungen halten die Reaktionskammer geschlossen und das Schlauchsystem dicht (5). Nach der Reaktion werden Spacer, Deckel und unterstützendes Glas entfernt und das Substrat mit destilliertem Wasser gespült. Am Ende der Prozedur steht die fertige Struktur, welche sich auf dem Substrat befindet.

Wird ein kompletter Aktorchip gefertigt, so befindet sich unterhalb der Abdeckplatte während der ganzen Prozedur die dünne Abdeckmembran, welche später das Quellungsmittel im Aktorbereich zurückhält. Die Aktoren werden fest an Substrat und an Membran angebunden. Um die Membran an den Deckel anzupressen und eine definierte Aktorhöhe zu garantieren, wird während der gesamten Prozedur ein leichter Überdruck aufrechterhalten, der auch das Eindringen von Sauerstoff reduziert.

4.4.7 UV-Belichtungszeit

Eine Entwicklung der Strukturen beruht darauf, dass die flüssige Lösung aus den Zwischenräumen ausgespült werden kann und die belichteten Aktorbereiche bereits fest sind. Das ist

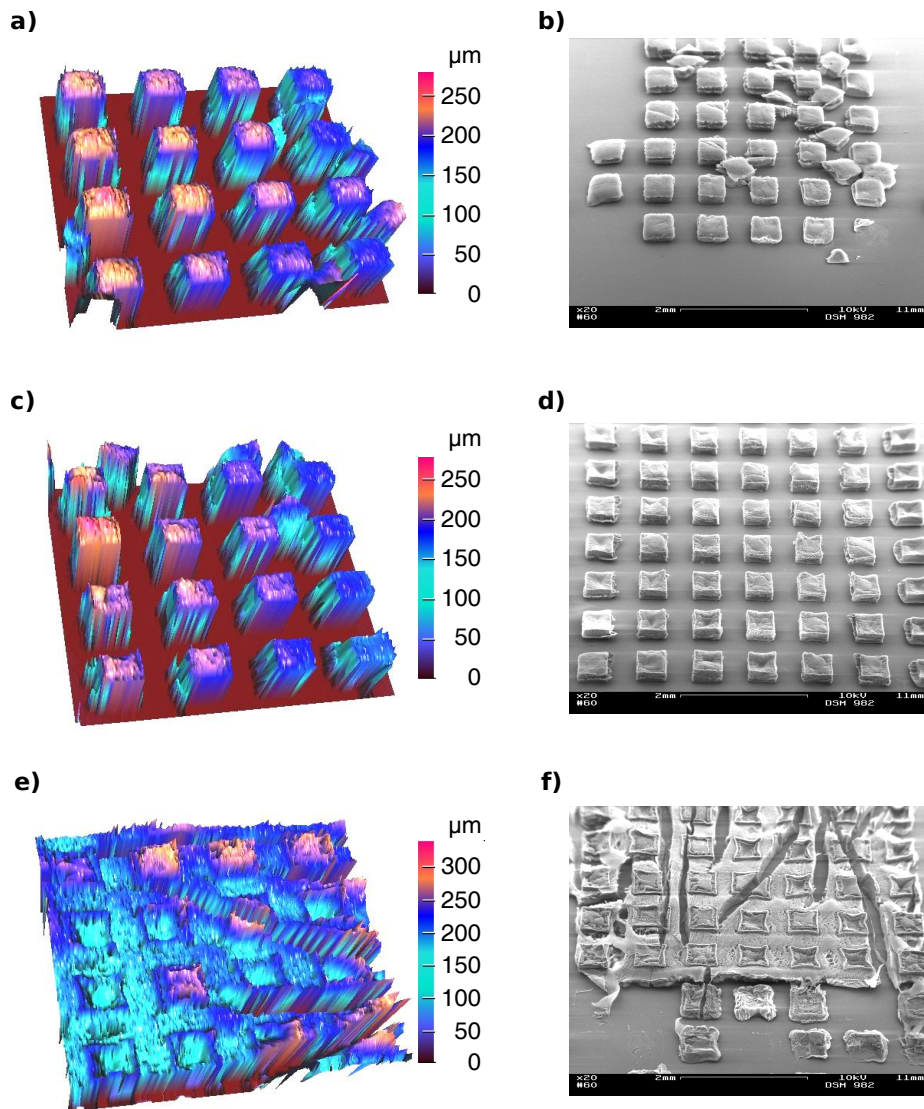


Abb. 35. Einfluss der Belichtungszeit auf die Entwicklung einer Struktur mit Kantenlänge von $500\ \mu\text{m}$ und einer Höhe von bis zu $300\ \mu\text{m}$ [87]. a) Laserprofilometer-Aufnahme einer 20 s lang UV-belichteten Probe. b) REM-Aufnahme. Die Probe weist abgerundete Kanten und schlechte Haftung zum Boden auf, Zeichen einer Unterbelichtung. c) Laserprofilometer-Aufnahme einer 30 s UV-belichteten Probe. d) REM-Aufnahme der Probe. Aktorform und Haftung entsprechen einer guten Polymerisationszeit. e) Laserprofilometer-Aufnahme einer 80 s lang belichteten Probe. f) REM-Aufnahme der Probe. Bereiche im nicht belichteten Bereich weisen Polymerisationserscheinungen auf, ein Zeichen von zu lange Polymerisationszeit.

nur möglich, wenn die Belichtungszeit optimal gewählt wurde. Eine zu kurze Zeit wird mit *Unterbelichtung* bezeichnet, die zu lange mit *Überbelichtung*. Einige der Erscheinungen von Unterbelichtung und Überbelichtung sind in **Abbildung 35** dargestellt. Die Bilder wurden aus [87] entnommen.

Die linke Seite der Bilder wurde mit einem 3D Laserscansystem erfasst. Auf der rechten Seite sind Bilder mit einem Elektronenmikroskop angefertigt. Vor den Aufnahmen wurde die Probe mit Gold-Palladium beschichtet, um eine Aufladung der Oberfläche zu vermeiden und eine gute Bildqualität zu erreichen.

Bei Unterbelichtung, wie in a) und b) dargestellt, sind die Strukturen verrundet und zeigen gegenüber der Soll-Form Abweichungen. Es ist auch eine schlechtere Haftung an den Boden zu beobachten, wobei bei diesen Strukturen das UV-Licht durch die Maske von oben kommt und die Strukturen nach unten zum Substrat wachsen. Eine Belichtung durch das Substrat verbessert die Haftung.

Die Abbildungen c) und d) zeigen eine optimale Polymerisationszeit, die 30 s beträgt. Die Zeit wurde bis auf 1 s optimiert. D. h. das optimale Zeitfenster beträgt $30 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$.

Die Abbildungen in e) und f) zeigen deutliche Überbelichtungserscheinungen. Die Polymerisation findet auch in nicht belichteten Bereichen statt, was zu einer ungewünschten Verbindung der Hydrogelaktoren führt. Wegen der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zwischen Hydrogel und Substrat wirken auf den großen und zusammenhängenden Bereichen höhere Kräfte. Die Strukturen bei c) und d) sind rissfrei, wogegen während der Gefriertrocknung bei e) und f) im Material Risse entstehen.

4.4.8 Belichtungsprozess und Lichtleistung

Die Zielsetzung, immer größere Substrate zu prozessieren, kann man entweder durch Nutzung einer stärkeren UV-Quelle lösen oder durch Anpassung des Prozesses. Bei Nutzung der vorhandenen Anlagen verhält sich die Intensität der UV-Strahlung indirekt proportional zur bestrahlten Fläche d. h. je größer die bestrahlte Fläche, desto kleiner die Intensität. In diesem Zusammenhang wurde untersucht, wie weit man die UV-Intensität während der lithographischen Strukturierung von Hydrogelen (PNIPAAm) reduzieren kann.

Die Intensität der UV-Strahlung kontrolliert, wo und wann wie viele Radikale entstehen und die Kettenpolymerisationsreaktion initiieren. Das führt zur Steuerung, wie schnell und wie lange die Reaktion stattfindet und wie viel Wärme dabei entsteht. Nach einer Reduktion der UV-Intensität kann die UV-Dosis durch längere Belichtungszeit kompensiert werden, falls die chemischen Zusammensetzung unverändert bleibt. Eine Erhöhung des Fotoinitiatoranteils in der

chemischen Zusammensetzung ermöglicht im Prozess geringere UV-Intensität bei gleich bleibender Belichtungszeit. Weil die Löslichkeit die maximale Konzentration an Fotoinitiator im Wasser beschränkt, sind diesem Kompensationsmechanismus Grenzen gesetzt.

Die Anordnung wie in Kapitel 4.4.6 beschrieben, zeigt einen unteren Schwellwert der Intensität für 365 nm bei 3 mWcm^{-2} . Unterhalb von diesem Wert konnten keine Strukturen erzeugt werden. Eine mögliche Erklärung ist, dass trotz Schutzgasatmosphäre entweder die Reinheit vom Argon nicht ausreicht oder durch die Schläuche Kleinstmengen von Sauerstoff in die Präpolymerlösung gelangen. Aktuelle Arbeiten mit Probenpräparation in einer Glovebox anstelle des Schlauchsystems bestätigen, dass die Polymerisation auch bei kleinerer Intensität möglich ist, wobei die Sauerstoffkonzentration während der Probenpräparation kleiner als 0,5 ppm ist und das Schutzgas diese geringe Sauerstoffkonzentration erst nach einer mehrstündigen bzw. mehrtägigen Aufbereitung und Filterung erreicht.

4.4.9 Auswirkungen von Sauerstoff auf die Hydrogelstruktur

Der Einfluss von Sauerstoff auf die Hydrogelstruktur während der UV-Polymerisation wurde in Zusammenarbeit mit Sebastian Häfner untersucht. Die Präpolymerlösung wurde bei allen Experimenten gleich hergestellt. Es wurden Proben miteinander verglichen, deren Reaktionsgefäße jeweils unter Schutzgasbedingungen in der Glovebox bzw. an der offenen Luft im Labor befüllt wurden. Bei der Befüllung ohne Schutzgasatmosphäre wurde die Dauer des Befüllens so kurz wie möglich gehalten (unterer Sekundenbereich).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Proben bei durchgängiger Schutzgasbehandlung eine engere statistische Verteilung des Quellungsgrades in Abhängigkeit von der Belichtungszeit haben, wodurch die Reproduzierbarkeit verbessert wird. Im Vergleich stellte sich auch heraus, dass der kooperative Diffusionskoeffizient unter durchgängigen Schutzgasbedingungen größer ist. Die Ergebnisse wurden in [88] publiziert.

4.5 Strukturierungsgrenze

Funktionsbedingt erforderlich sind Strukturen mit 300 μm Kantenlänge. Um die Miniaturisierungsgrenze für die aktuelle Technologie der Polymerisationskammeranordnung abzuschätzen, wurden kleinere Strukturen hergestellt.

Als Belichtungsverfahren wird die Proximitybelichtung mit einer Maske auf der Abdeckung der Reaktionskammer verwendet. Die Kontaktbelichtung ist nicht geeignet, weil die Präpolymerlösung die Maske verunreinigen würde und die Strukturen an der Maske haften. Physikalische Faktoren, welche die maximale Auflösung beschränken, sind der Abstand zwischen Maske und Struktur, die Höhe der Strukturen und die verwendete Wellenlänge. Die Qualität der Maske, der Abdeckung und der Lichtquelle sind systemspezifische Limitierungen.

Die **Abbildung 36** zeigt eine Struktur nahe an der Machbarkeitsgrenze mit dem gegenwärtigen Setup. Die 100 μm großen Strukturen brauchten eine Belichtungszeit von 60 s. Mit Aufwand können bis zu 50 μm große Strukturen realisiert werden, eine weitere Miniaturisierung erfordert einen Technologiewechsel.

Die größte Limitation im verwendeten System entsteht durch das Maskenmaterial und durch die Dicke der Abdeckung der Reaktionskammer (**Abbildung 33**). Das Maskenmaterial *Typo-Phot TO-G* weist im transparenten Bereich Polymerkörnchen auf, die als Streuzentren wirken und die Parallelität des UV-Lichts beeinträchtigen. Die Abdeckung hat aus mechanischen Stabilitätsgründen bei einem 50 mm x 50 mm Aktorarray die Mindestdicke von 500 μm hat. Die Strukturgröße von 100 μm zum Abstand zwischen Maske und Struktur ergibt ein Verhältnis von 5:1.

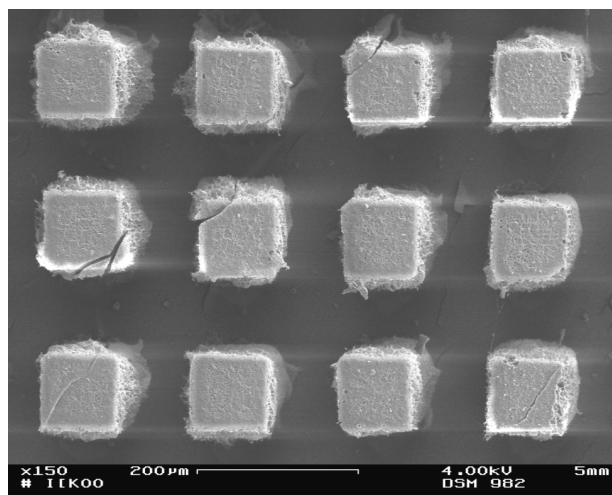


Abb. 36. REM-Aufnahme: gefriergetrocknete Probe mit 100 μm Strukturen und 100 μm Abstand sowie 100 μm Höhe.

Eine weitere Reduzierung der Strukturgröße erfordert den Einsatz von Glasmasken, z. B. Masken auf Emulsionsbasis oder Chrommasken. Insbesondere durch Verkleinerung des Abstandes zwischen Maske und Struktur oder mit Projektionslithographie kann man Strukturen erzeugen, die mehrere Größenordnungen kleiner sind. Neben der Maskenfertigung wurden in einigen Arbeitsgruppen auch mit Direktschreibverfahren Hydrogelstrukturen im unteren Mikrometerbereich gefertigt.

4.6 Haftvermittlung zwischen Hydrogelaktoren und Trägersubstrat

Die Stabile Oberflächenhaftung der Aktoren entsteht durch kovalente chemische Anbindung und erfordert eine Kombination geeigneter Werkstoffe und ggf. eine Oberflächenmodifikation vor der Synthese. Deshalb ist zwischen Hydrogelaktoren und PDMS Abdeckung für die taktile Displayfunktion eine Grenzflächenfunktionalisierung erforderlich. Die Prozedur der Vorbehandlung von Substraten basiert im Wesentlichen auf Arbeiten von Dipl. Chem. M. Tietze.

Das Substrat wird in einer Ozonatmosphäre für die Dauer von 60 Minuten aktiviert. Bei empfindlichen PDMS-Strukturen erfolgt eine Aktivierung mit Sauerstoffplasma. Die Behandlungszeit konnte zur Materialschonung von ursprünglich 45 min [78] auf 60 s bei 80 % O_2 reduziert werden. Das Substrat wird unmittelbar nach der Aktivierung in einer Bicyclohexyl-Lösung mit 0,1 wt % (3-Methacryloyloxy propyl)dimethyl-chlorosilan gegeben und für eine Stunde darin gehalten.

Anschließend wird das Substrat mit Isopropanol gespült, mit Argon getrocknet und ist für den Polymerisationsprozess der Hydrogelstrukturen bereit, der zeitnah stattfindet.

4.7 Thermische Aktorsteuerung

Das Aktorhydrogelmaterial wurde so ausgewählt, dass seine Sensitivität gegenüber der Umgebungstemperatur genutzt wird, um den Quellungszustand und damit das Aktorverhalten sowie die Aktorgeometrie zu steuern. Im folgenden Kapitelabschnitt wird das Verhalten im Quellungsgleichgewicht vorgestellt, im zweiten Teil wird auch das Aktorverhalten bei extrem schneller Temperaturänderung untersucht, bei dem die Hydrogelaktoren in einem dynamischen Bereich am Rand der technischen Möglichkeiten arbeiten.

4.7.1 Temperatursteuerung im Quellungsgleichgewicht

Für jede Temperatur kann der Hydrogelaktuator einen Quellungsgleichgewichtszustand erreichen, ab welchem keine weitere Größenänderung stattfindet, falls man die Temperatur ausreichend lange konstant hält. Quasistatische Untersuchungen gehören zu den Standardanalyseverfahren, die zur Charakterisierung von Hydrogelmaterialien genutzt werden. Dabei wird entweder die Temperatur so langsam verändert, dass sich das Hydrogel die ganze Zeit nahezu im Gleichgewichtszustand befindet oder nach jeder Temperaturänderung wird die Wartezeit so groß gewählt, dass die Gele bis zum Gleichgewichtszustand quellen können. Als Maßstab für die Wartezeit wird häufig die Zeitkonstante der Quellung bzw. der Entquellung verwendet, so dass die Wartezeit als ein Vielfaches dieser Zeitkonstante gewählt wird.

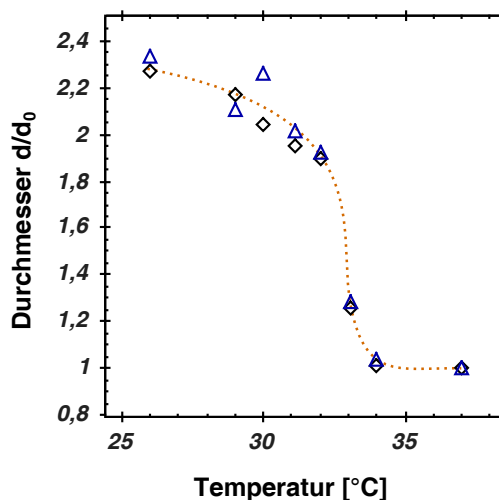


Abb. 37. Quellungsgleichgewichtsmessung von zylindrischen Hydrogelscheiben mit Durchmesser d , normiert auf dem Durchmesser im entquollenen Zustand d_0 . \diamond Messpunkte für Probe mit 45 s Polymerisationszeit, \triangle Messpunkte für Probe mit 120 s Polymerisationszeit, \cdots Spline mit drei Stützpunkten zur Verdeutlichung der Funktion.

Die Standardmethoden sind jedoch zur Untersuchung von mikroskopisch kleinen Hydrogelaktoren ungeeignet. Die Bestimmung der exakten Masse eines Hydrogelarrays im trockenen Zustand funktioniert sehr gut, nicht jedoch die Bestimmung der Masse im gequollenen Gleichgewichtszustand. Bei den Standardanalysen sind die Hydrogelkörper typischerweise so groß, dass sie gut mit der Hand oder mit einer Pinzette angefasst und gewogen werden können. Bei den mikroskopisch kleinen Hydrogelstrukturen führt bereits das Abtupfen mit einem saugfähigen Material oder ein kurzes Auspusten des Quellmittels aus den Aktorzwischenräumen mit Druckluft zu unzulässigen Messabweichungen, weil bei diesem Vorgang das Quellmittel aus der Hydrogelmatrix entweicht, verdunstet und sich die Form und das Gewicht der Aktoren ändern. Weil das Entfernen von überschüssigem Wasser aus den Aktorzwischenräumen nicht möglich, aber zwingend erforderlich für die exakte Gewichtsmessung ist, kann die Methode der Bestimmung des Massenquellungsgrades nicht angewendet werden.

Die volumetrische Messung des Quellungszustandes verhält sich entgegengesetzt. Unter dem Mikroskop ist die Bestimmung des Aktorvolumens zwar aufwändig, aber möglich. Dafür ist die Volumenbestimmung im trockenen Aktorzustand aufgrund der extrem unregelmäßigen Form, die während der Trocknung entsteht, nicht mit der notwendigen Präzision erreichbar. Eine Normierung des Volumenquellungsgrades auf die Trockenmasse, wie in vielen Arbeiten üblich, kann nicht durchgeführt werden.

Eine neue Methode zur Normierung wurde auf Basis der Arbeitspunktgrößen eingeführt. Arbeitspunktgrößen sind davon abhängig, in welchem Temperaturbereich man einen Aktor verwenden will. Bei PNIPAAm wurde der Bereich einer 6 K Temperaturänderung zwischen 29°C und 35°C als Arbeitsbereich definiert, weil hier der steilste Kurvenverlauf und die stärkste Abhängigkeit des Hydrogelvolumens von der Temperatur gegeben ist. Ab 35°C erfolgt nur noch wenig Änderung des Volumens. Der kleinste Zustand ist im Anwendungsfall erreicht. Dieser Wert wurde als kleinster Wert für die Normierung des Volumenquellungsgrades ausgewählt.

Der Vorteil der Methode ist, dass man sofort anhand der Kurve (**Abbildung 37**) erkennt, dass zwischen dem kleinsten und dem größten Zustand des Aktors in linearer Richtung eine Quellung auf das 2,2-fache vorliegt, welche einer Änderung im Volumenquellungsgrad von 10,6 entspricht. Der Nachteil der Methode ist, dass man die Ergebnisse nicht direkt mit den Standardwerken vergleichen kann und dass alle Ergebnisse nur im Zusammenhang mit dem festgelegten Arbeitsbereich uneingeschränkt gültig sind. Ein anderer Arbeitsbereich ergibt einen anderen Normierungsfaktor und macht im ungünstigsten Fall eine Neuherstellung der Diagramme erforderlich.

Aktorpräparation

Um einen Zusammenhang zwischen dem Volumen und dem Durchmesser als gemessene Größe herzustellen, wurden Zylinder aus dem Hydrogelmaterial mit Durchmesser-Höhe-Verhältnis von 10:1 hergestellt (1 mm Durchmesser : 0,1 mm Höhe), bei Nutzung der Standard-UV-Prozedur zur Herstellung. Die erste Probe in **Abbildung 37** wurde während des lithografischen Prozesses 45 s lang belichtet, die zweite 120 s.

Methode der Bestimmung des Volumenquellungsgrades

Die Durchmesser der frei quellenden Zylinder wurden in der temperierten Kammer bei ausreichender Quellmittelversorgung untersucht. Die Quellungsänderungen sind bei 100 µm Dicke nach 20 Minuten so weit abgeklungen, dass keine weitere Änderung beobachtet werden kann.

Zur Sicherheit wurde nach jeder Änderung der Temperatur eine halbe Stunde gewartet. In **Abbildung 37** ist der Zusammenhang zwischen Gleichgewichts-Quellungsgrad und Ansteuer-temperatur dargestellt.

Ergebnisse

Die Quellung im Arbeitsbereich (29° C - 35° C) und im Quellgleichgewicht ergibt einen linearen Faktor von 2,2 und damit einen Volumenquellungsgrad von 10,6. Im Anwendungsfall und einer 90 % Quellung kann in linearer Richtung der Faktor 2 genutzt werden. Bezogen auf die Hydrogelaktoren im größten Zustand, werden die Aktoren auf die Hälfte ihrer Ausgangshöhe zurückgehen und das Volumen wird sich um das Achtfache verkleinern.

Die Quellzeit wurde für die Messung sehr hoch gewählt, um eine besonders hohe Präzision in Bezug auf die Messung des Gleichgewichtszustandes und des Volumenquellungsgrades zu erreichen. Im Anwendungsfall wird eine schnellere Zustandsänderung genutzt, in dieser Arbeit typischerweise 20 s bis 3 Minuten.

4.7.2 Quellverhalten bei schneller Temperaturänderung und kurzer Quellzeit

Um die Dynamik des Systems abzuschätzen, ist nach den Untersuchungen zur statischen Ansteuerung (Quellungsgleichgewicht) auch die Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Interesse. Der Fokus liegt einerseits auf einem möglichst einfachen Experimentaufbau zur Charakterisierung und andererseits auf einem definierten Arbeitsbereich, indem die Arbeitspunktgrößen bekannt sind und die Hydrogelcharakteristik ermittelt wird.

Experimentaufbau für schnelle Temperaturänderungen

Um die diffusionsbasierten Hydrogel-Konstanten möglichst unabhängig vom Stimulus zu untersuchen, wurde ein Messaufbau auf Peltierelementbasis entwickelt, der die Temperaturänderungen besonders schnell durchführen kann. Die Zeitkonstanten für den thermischen Stimulus sind damit viel kleiner als die Zeitkonstanten vom System des Stofftransportes im Hydrogel. Damit können für den Fall schlagartiger Temperaturänderung die Vorgänge des Stofftransportes fast unabhängig vom Stimulus beobachtet und charakterisiert werden.

Für den Versuchsstand wurde eine Schaltung entwickelt, die das Peltierelement betreibt und mit Spannungen zwischen 12 V und 100 V sowie mit der Stromstärke von bis zu 15 A arbeiten kann. Nach einer Boost-Phase für schlagartige Temperaturänderung folgt eine Phase mit moderater Heiz- bzw. Kühlleistung, um die Temperatur konstant zu halten. Die Heizleistung am Peltierelement ist aufgrund ohmscher Verluste prinzipbedingt höher als die Kühlleistung. Die Optimierung des Arbeitspunktes erfolgte durch Einstellung der Spannung (auf 20 V), wobei die maximale Abkühlrate für das Peltierelement erreicht wurde. Damit ist bei gleichbleibender Versorgungsspannung die in der Summe schnellstmögliche Temperaturänderung für dieses eingesetzte Peltierelement erreicht. Die Versorgungsspannung ist sowohl beim Heizprozess als auch bei dem Abkühlprozess konstant.

Das Temperaturregime ist in **Abbildung 38** dargestellt. Die Temperaturwechsel erfolgen mit einer Temperaturanstiegszeit von 1,9 s (Heizrate $4,2 \text{ Ks}^{-1}$) und mit einer Abkühlzeit von 2,6 s (Abkühlrate $3,1 \text{ Ks}^{-1}$).

Die Verweilzeit im entsprechenden Zustand ist 50 s, in der die Reaktion des thermisch sensitiven Polymers beobachtet wird. Die Temperaturgrenzen wurden so gewählt, dass die untere Grenze unterhalb von 29°C und die obere oberhalb von 35°C liegt. Der Bereich der größten Volumenänderung des Phasenübergangsbereichs befindet sich im Messbereich. Die Temperaturvariation von 8 K, die statt der erforderlichen 6 K-Differenz verwendet wird, macht das Experiment robuster gegenüber kurzzeitigen äußeren Störungen, wobei der Phasenübergang symmetrisch im Messbereich liegt.

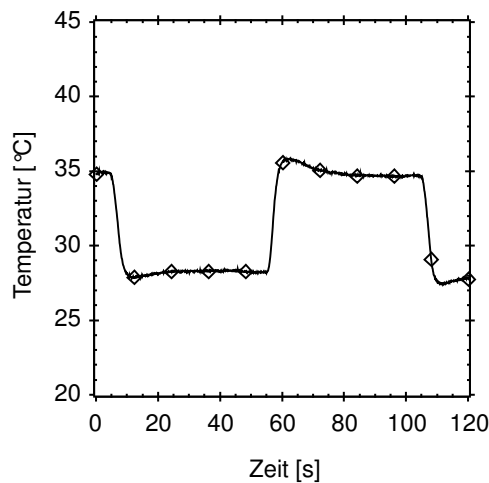


Abb. 38. Charakteristischer Temperaturverlauf der Ansteuerung \diamond gefüllt mit Quellmittel Wasser. Die eingetragenen Punkte sind zur Graphenkennzeichnung, zwischen zwei Punkte liegen 120 Messwerte.

Probenpräparation

Für die schnellen Quell- und Entquellversuche wurden Proben mit quadratischen Hydrogelstrukturen verwendet. Wie bei dem späteren Einsatz sind die Aktoren am Substrat angebunden. Der feste Beobachtungsort erleichtert die Auswertung unter dem Mikroskop.

Arbeitspunkt und Steuerparameter

Im Unterschied zur quasistatischen Steuerung im hydrostatischen Gleichgewicht erreicht ein Hydrogelaktor bei den schnellen, periodischen Änderungen nicht das maximale bzw. das minimale Volumen, welches er bei langsamen Zyklen erreichen würde. Es bilden sich zwei Arbeitspunkte aus, zwischen denen umgeschaltet wird.

Weiterhin kann man bei einer ausreichend leistungsstarken Steuerung die Temperatur im warmen Bereich deutlich weiter erhöhen, als dies im kalten Bereich möglich ist. Ausgehend von einer kritischen Phasenübergangstemperatur von 32°C führt zum Beispiel eine Erhöhung um 32 K zu einer Gesamttemperatur von 64°C . Die Entquellprozesse funktionieren sehr gut und schnell. Im Gegensatz führt eine Erniedrigung um 32 K zu einer Gesamttemperatur von 0°C . Das Quellmittel (Wasser) gefriert, es findet keine Entquellung statt, der Zustand bleibt unverändert. Mit der Temperatur als Steuergröße kann man asymmetrisch zur Erhöhung der Aktorgeschwindigkeit beitragen.

Wie weiter unten dargestellt, unterscheiden sich die Zeitkonstanten zwischen Quellung und Entquellung. Unter Einbeziehung dieser Konstanten kann im Betrieb eine Optimierung der Be-

triebsparameter erfolgen. Man kann z. B. die Entquellzeit verkürzen und damit der Quellung mehr Zeit zur Verfügung stellen. Bei der Experimentanordnung als allgemeine Untersuchungsmethodik wurden gleich große Zeiten für Quellung und Entquellvorgang ausgewählt.

Charakterisierung der dynamischen Aktoreigenschaften

Die wahrscheinlich einfachste Form der Beschreibung einer quellenden Hydrogelstruktur stellt die Exponentialfunktion mit einer einzigen Zeitkonstante dar [89]. Die Beschreibung der Queldynamik kann auch mit Hilfe von Reihenbildung und mehreren Zeitkonstanten erfolgen [62], [80]. Ein Beispiel für diese Beschreibung wurde im Stand der Technik mit der Gleichung (3.31) aufgeführt, wobei die Anzahl von Koeffizienten bzw. die Anzahl der Glieder ein Kompromiss zwischen Aufwand und erforderliche Präzision darstellt. Die Basischarakterisierung erfolgt mittels Gleichung (3.32) mit nur einer Zeitkonstanten.

In den **Abbildungen 39 b** bis **39 d** wird der dynamische Bereich untersucht. Es werden Bereiche aus der Quell- und Entquellkurve getrennt betrachtet und die arbeitspunktabhängigen Größen bestimmt. Der Quellvorgang wird vereinfacht mit nur einer Zeitkonstanten in Gleichung (4.1) dargestellt, der Entquellvorgang in Gleichung (4.2). Die Exponentialglieder höherer Ordnung werden hierbei weggelassen. Die Form der erhaltenen Funktionen wird in der jeweiligen Abbildung als durchgängige Linie dargestellt, die Zeitkonstanten sind in **Tabelle 12** aufgelistet.

$$h(t) = (h_{max} - h_{min}) \cdot (1 - e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}) + h_{min} \quad (4.1)$$

$$h(t) = (h_{max} - h_{min}) \cdot (e^{-\frac{t-t_0}{\tau}}) + h_{min} \quad (4.2)$$

Die Größen h_{min} und h_{max} sind die kleinste und die größte Aktorhöhe im ausgewählten Arbeitsbereich, Δh ist der Hub, den ein Aktor im eingestellten Betriebsmodus nutzen kann. Die Zeit t_0 kennzeichnet den Anfangszeitpunkt (0 s) und die spezifische Zeitkonstante τ spezifiziert den Verlauf der Exponentialfunktion.

Die Aktorhöhe variiert zwischen ca. 300 μm und ca. 550 μm . Die periodischen Quell- und Entquellvorgänge erfolgten zwischen 106 % und 123 % bezogen auf die kleinste Aktorhöhe von 300 μm . Der Zustand des Quellungsgleichgewichts entspricht 183 % der entquollenen Größe und man verwendet ca. 20 % des verfügbaren Aktorhubes. Das ist einer der Gründe, warum auch eine einzige Zeitkonstante das Verhalten hinreichend gut charakterisiert.

In den Quell- und Entquellverläufen erkennt man, dass die Zeitkonstanten des Quellens und des Entquellens unterschiedlich sind. Während die Quellung einheitlich mit einer Konstante τ von 20 s stattfindet, erfolgt die Entquellung zunächst schneller und anschließend langsamer. Es kann

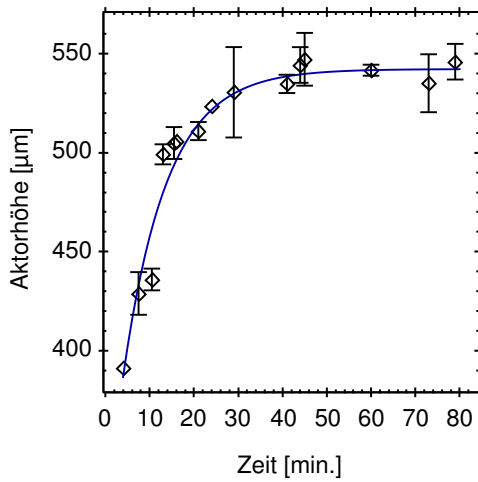


Abb. 39 a. Quellverhalten eines Aktors aus entquollenem Zustand bis zum Gleichgewichtszustand bei 28 °C.
 ◇ Messdaten, — exponentieller Verlauf mit Modellparametern.

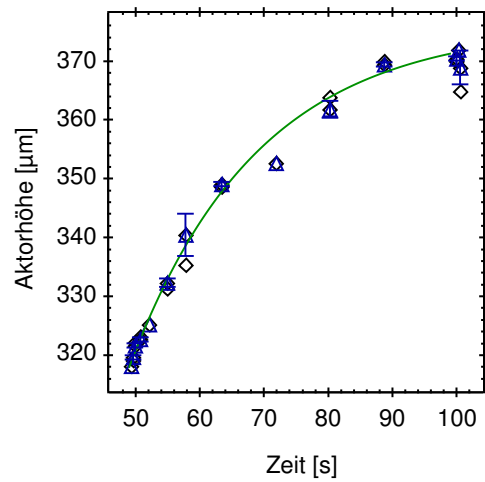


Abb. 39 b. Quellverhalten des Aktors bei periodischer Ansteuerung mit Quellzeit von 50 s.
 ◇ Messdaten, △ Messdaten, — exponentieller Verlauf mit Modellparametern.

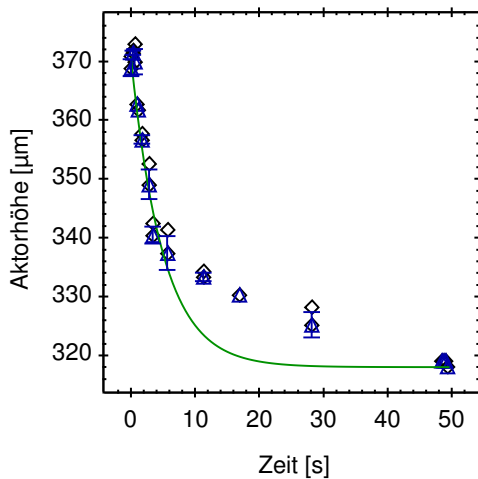


Abb. 39 c. Entquellverhalten des Aktors bei periodischer Ansteuerung mit entquellzeit von 50 s.
 ◇ Messdaten, △ Messdaten, — exponentieller Verlauf mit Modellparameter für den ersten Teil der Entquellung.

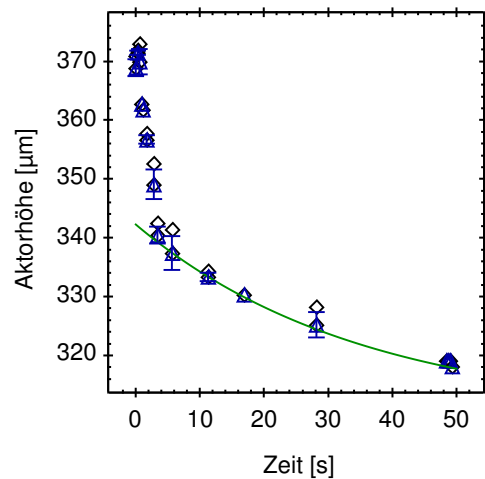


Abb. 39 d. Entquellverhalten des Aktors bei periodischer Ansteuerung mit entquellzeit von 50 s.
 ◇ Messdaten, △ Messdaten, — exponentieller Verlauf mit Modellparameter für den zweiten Teil der Entquellung.

Tab. 12. *Beispiel dynamischer Parameter eines Hydrogelaktors.*

Charakteristik	τ [s]	h_{max} [μm]	h_{min} [μm]
Quellung bis zum Gleichgewicht	593	542	375
Quellung mit 50 s Quellzeit	20	376	318
Entquellung mit 50 s Entquellzeit, schneller Modus	5	376	318
Entquellung mit 50 s Entquellzeit, langsamer Modus	39	340	309

davon ausgegangen werden, dass hier das Phänomen des Skineffektes beobachtet wird, welches in [86] beschrieben wurde. Dieses wird beim Entquellen bei schnellen Temperaturwechseln beobachtet. Dabei kollabiert die Hülle des Aktors schneller, als der ganze Volumenkörper des Hydrogels im Durchschnitt. Dadurch ändert sich die Durchlässigkeit für das austretende Quellmittel und auch die Zeitkonstante. Für den Effekt ist ausschlaggebend, wie schnell die Temperaturänderung stattfindet.

Der Effekt vergrößert im dargestellten Beispiel die Zeitkonstante etwa um den Faktor von 8. In den ersten 5 s wirkt eine kleinere Zeitkonstante, wie in **Abbildung 39 c** dargestellt ist, während der zweite Teil (Tabelleneintrag „Entquellung mit 50 s, langsamer Modus“) mit der langsameren Konstante in **Abbildung 39 d** dargestellt ist. Der gesamte Entquellvorgang kann durch die Näherung des „schnelle[n] Modus“ beschrieben werden (siehe **Tabelle 12**).

Zusammenfassung

Die Aktorfertigung wurde in dem für taktile hoch auflösende Displays interessanten Bereich zwischen 500 μm und 100 μm realisiert. Durch besonders sauberen Aufbau der Synthese und Reduktion des Sauerstoffs im Optimalfall unter 0,5 ppm wurde die höchste Reproduzierbarkeit des Quellungsgrades in Abhängigkeit von der UV-Belichtungszeit erreicht.

Im quasistatischen Zustand können durch Einstellen einer definierten Temperatur unterschiedliche Aktorzustände eingestellt werden.

Durch schnelle Änderungen der Temperatur können die Hydrogelaktoren auch im dynamischen Bereich gesteuert werden.

Eine Berücksichtigung unterschiedlich langer Quell- und Entquellzeit als ein Tastverhältnis, bei dem die warme Phase kürzer ist und dafür die kalte Phase für die Hydrogelquellung verlängert wird, würde einen größeren Volumenhub erlauben. Insbesondere in Verbindung mit einer in Echtzeit berechneten Aktorzustandsmodellierung kann in zukünftigen Arbeiten eine Steuerung implementiert werden, die den Aktorzustand in diesem Betriebszustand schneller einstellen und

auch bestimmte Aktorhöhen stufenweise zwischen der minimalen und der maximalen Aktorhöhe ermöglichen kann.

Verbesserungen der Hydrogelaktoreigenschaften und der Quell/Entquellcharakteristik lassen sich in zukünftigen Arbeiten durch stoffliche, geometrische und prinzipbedingte Optimierung erreichen. Es existieren viele Ansätze, welche für unstrukturierte Polymersynthese nachgewiesen worden sind.

Durch Variation in der Zusammensetzung der verwendeten Standardsynthese kann die Quelldynamik optimiert werden. In [90] wird gezeigt, dass bei bestimmten Verhältnissen aus Vernetzer und Monomer eine zeitlich optimierte Entquellung stattfindet. Weitere Modifikationen können durch Hinzugabe von hydrophilen oder hydrophoben Copolymeren sowie von Tensiden während der Polymerisation erfolgen [91]–[93].

Eine besonders interessante Modifikation der Netzwerkstruktur wird in [94] vorgestellt. Dabei wird in einer Vorreaktion mit einer Temperatur von 60° C weit oberhalb des Phasenübergangstemperatur ein Nanogel als Emulsion hergestellt. Das Nanogel besteht aus NIPAAm und BIS, welche zu PNIPAAm-Nanopartikeln reagieren und kleiner als 100 nm sind. In einem zweiten Schritt werden die Nanopartikel als Vernetzer mit NIPAAm-Monomer bei 0° C unterhalb der Phasenübergangstemperatur zu makroskopischem Gel synthetisiert. Das Vorgehen verbessert die Quelldynamik und gleichzeitig die mechanischen Eigenschaften, ohne die Elastizität herabzusetzen.

Eine Optimierung der Quellkinetik durch Erhöhung der Porosität d. h. durch Reduktion der Diffusionslänge, setzt prinzipbedingt das Elastizitätsmodul herab. Es ist ein Tausch von reduzierter Festigkeit gegen schnellere Quellung. Beispiele solcher Systeme sind die Kryogele [95] oder die Synthese unter reduziertem Druck (Vakuum) [96]. Weitere interessante Beispiele für Porenvergrößerung sind in [97], [98] dargestellt.

Weitere Beispiele für die Beschleunigung der Quelldynamik und für Verbesserung der mechanischen Eigenschaften sind die Verwendung von Clay-Nanopartikeln [98], [99] oder von Silika-Nanopartikeln [100].

4.8 Fertigungstechnologie für Großflächenmikrostrukturierung

Der Begriff *rapid prototyping* bezeichnet Prototypenfertigungsverfahren mit besonders schnellen Herstellungsmethoden für den Labormaßstab. In 1998 wurde von G. Whitesides *et al.* erstmals die Soft-Lithografie eingeführt. Das ist eine Rapid-Prototyping-Technologie, die Mikrofabrikation von Mikro- und Nanometerstrukturen in dem gummielastischen Stoff Polydimethylsiloxan (PDMS) ermöglicht. Bei dieser Technologie wird der Abdruck eines 3D strukturierten Siliziummasters in PDMS abgeformt [101].

Das Verfahren der Soft-Lithografie wird bei dem intermodalen Display für eine Quellmittelversorgung benötigt, welche als ein mikrofluidisches Kanalsystem ausgeführt ist. Weiterhin ist das Verfahren für eine oberflächenfunktionalisierte, elastische Folie zwischen Benutzer und Aktorarray erforderlich.

Eine Fläche von ca. 50 mm x 50 mm ist als aktive Oberfläche des Displays erforderlich. Mit fluidischen Anschlüssen und Randbereich für mechanische Befestigung ergibt sich ein System, das die Größe von ca. 120 mm x 120 mm hat. Eine *Großflächenmikrostrukturierung* sollte mindestens diese Master- und Strukturaußenabmessungen beherrschen. Für die siliziumbasierte Technologie würde man eine 8 Zoll-Technologiestrecke benötigen, wobei bereits die Fertigung eines 2 Zoll Wafers mit 150 µm tiefen Mikrostrukturen dreistellige Eurobeträge erfordert. Damit ist die Technologie für die Prototypenfertigung wesentlich teurer als das angestrebte Preissegment.

Als Grundlage für größere Experimenteserien wird sowohl in dieser Arbeit als auch im Bereich der Mikrofluidik eine geeignete Technologie zur Masterherstellung benötigt. Vergleicht man die Siliziummaster-Technologie mit den Anforderungen an das benötigte System, stellt man fest, dass die Strukturtreue der Silizium-Technologie extrem hoch ist. Im Gegenzug ist in dieser Arbeit die Anforderung an die Mastergröße hoch und an die Präzision gering. Für diese Anforderungen wurde eine möglichst einfache und kostengünstige Realisierung gesucht.

4.8.1 Herstellung von Großflächenmaster

Als Lösungsansatz zur Großflächen-Strukturierungstechnologie kommen die Verfahren in Frage, mit denen man Master mit Strukturgrößen zwischen 100 µm und 500 µm herstellen kann wie z. B. maskenbasierte lithografische Prozesse bzw. Fotolack-Technologien. Als Auftragungsart für Lacke kann z. B. Sprühen, Vorhanggießen, Spincoaten, Siebdrucken bzw. auch das Laminiieren mit Trockenfilmresist (dry film resist, *DFR*) verwendet werden.

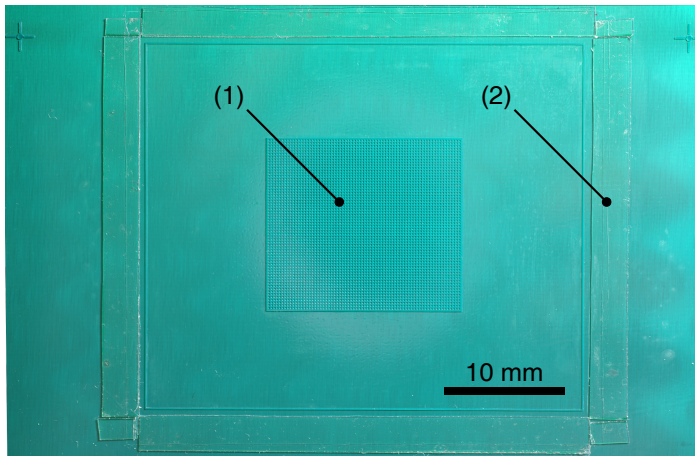


Abb. 40. Master für die Herstellung funktionalisierter Folien. (1) Bereich mit Noppen, (2) Abstandhalter, der die Dicke der durchgängigen Folie einstellt.

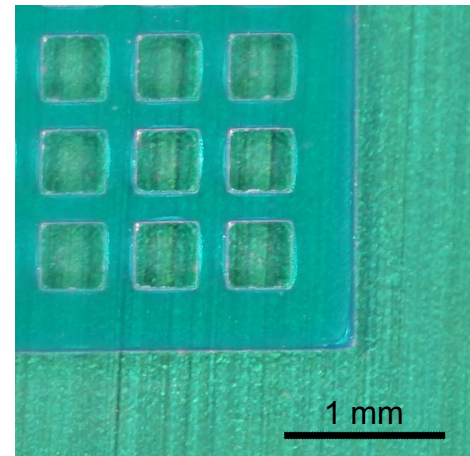


Abb. 41. Vergrößerung des fein strukturierten Bereiches.

In dieser Arbeit wurden als Fertigungstechnologie Standard- Schichtprozesse aus der Leiterplattenfertigung adaptiert, welche die benachbarte Arbeitsgruppe *Aufbau- und Verbindungstechnik* (AVT) als Prozess in der Leiterplattenfertigung verwendet. Es handelt sich um eine *DFR* Technologie.

Leiterplatten mit der Größe des Doppel-Euro-Formates (233,35 mm x 160 mm nach DIN 41494, IEC 60297 bzw. DIN IEC 249) sind für die Masterherstellung in dieser Arbeit geeignet groß. Diese Größe wird im Folgenden als *Großflächenformat* bezeichnet. Für den Schichtaufbau stehen Ätzstopp-Schichten mit jeweils 40 μm Schichtdicke und Lötstopp-Schichten mit jeweils 70 μm Schichtdicke zur Verfügung. Verwendet wurden die Lötstopp-Schichten aus dem Fotopolymer *Trockenfilmresist Dynamask 5030*. Dieser wurde auf *FR4* Leiterplattenträgermaterial Bungard RLM 419P bei 105° C laminiert.

Um die Haftung an das Trägermaterial reproduzierbar und dauerhaft zu ermöglichen, wird vor der Beschichtung die Kupferfläche mit einem Reinigungsschritt maschinell durch Bürsten angeraut. Dieser Teil entspricht der Standardfertigungsvorschrift.

Die Rauigkeit der Kupferfläche ist jedoch zu hoch für die Anforderungen an die Abformmaster. Stellen, an denen bis zur untersten Lage alles offen ist, können nicht genutzt werden. Zur Verbesserung der Oberflächenqualität wurde in der untersten Lage deshalb eine durchgehende Filmschicht laminiert und belichtet, auf der alle weiteren Schichten aufgebaut werden. Am Ende des Prozesses werden auch diese Schichten belichtet und entwickelt.

Gefertigt wurden Systeme mit bis zu drei aufeinanderliegenden Strukturschichten. Zwei Schichten je $70\ \mu\text{m}$ ergeben nach Prozessende $120\ \mu\text{m}$. Drei Schichten entsprechen $180\ \mu\text{m}$. Die erforderliche $300\ \mu\text{m}$ Strukturauflösung wurde erreicht. Das Ergebnis ist in **Abbildung 40** dargestellt.

Der Master für die Funktionalisierung von elastischen Folien mit Noppen hat eine zweilagige Struktur auf einem unstrukturierten Layer. Die Strukturhöhe ist $120\ \mu\text{m}$. Die Breite der Stege ist $180\ \mu\text{m}$ und die rechteckigen Löcher haben eine Kantenlänge von $400\ \mu\text{m}$. Durch die unterste (grüne) Lage sieht man in der vergrößerten Ansicht in **Abbildung 41** das Durchschimmern der rauhen Kupferoberfläche.

4.8.2 Elastische Displayabdeckung

Die Abdeckschicht wird direkt vom Benutzer abgetastet. Sie hat die Aufgabe, die taktile Information des Aktorzustandes so deutlich wie möglich an die Finger des Nutzers zu übermitteln und das Quellmittel im Aktorraum zurückzuhalten. Unter ihr befinden sich die Mikrokanäle, welche das Quellmittel zu- und abführen.

Bei der ersten Generation elastischer Folien handelt es sich um handelsübliche PE Folien im Bereich zwischen $10\ \mu\text{m}$ und $30\ \mu\text{m}$. Diese Foliendicke ist ausreichend dünn, um durch die Folie den Aktorzustandes zu ertasten. Diese Folien waren jedoch zu empfindlich gegenüber Verletzungen und ermöglichten nicht das selektive Ertasten von Konturen, wie im Kapitel 6.1.4 beschrieben wird. Insbesondere durch den Einsatz von Noppen konnte diese taktile Kanteninformation von Konturen hervorgehoben werden. Die hergestellte Folie ist in **Abbildung 42** dargestellt.

Die Herstellung einer elastischen Folie mit Noppen auf der Oberseite wurde wie folgt durchgeführt. Als Elastomer wurde RTV 615 A/B verwendet, im Folgenden mit *PDMS* bezeichnet. Es besteht aus den zwei Komponenten A und B. Diese werden im Verhältnis von 3:1 gemischt, um an den weiteren Schichten (Mischungsverhältnis 30:1) dauerhaft anbinden zu können. Die Anbindung entsteht durch Diffusionsprozesse an den Grenzflächen.

Eine gute Durchmischung der Masse wurde durch Rühren erreicht. Nach dem Durchmischungsprozess enthält die flüssige Masse Lufteinschlüsse, welche die weitere Prozessierung stören würden. Mit Hilfe von Vakuum wurden diese unterhalb von $50\ \text{mbar}$ in einer Vakuumkammer entfernt.

Im nächsten Schritt wurde der Master mit Kavitäten für die Noppen mit der noch flüssigen PDMS-Masse bedeckt und die Lufteinschlüsse mit Hilfe von Unterdruck in der Vakuumkammer

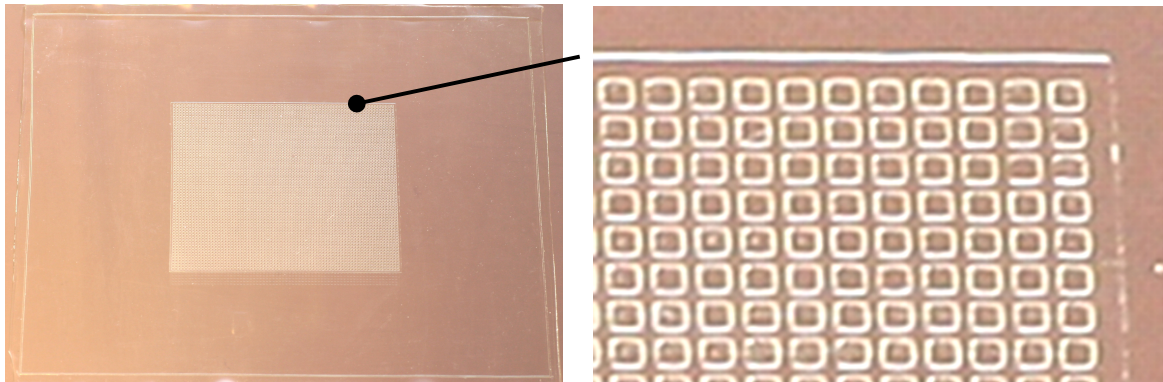


Abb. 42. *Elastische Folie nach der Herstellung als Gesamtansicht (links) und als vergrößerte Darstellung (rechts).*

entfernt. Um die noch flüssige Masse mit einer definierten Schichtdicke abzuschließen, wurde ein Glassubstrat als Abdeckung verwendet. Die Kavität bildet sich hierbei zwischen Master und Glassubstrat aus.

Die Einstellung der Folienschichtdicke zwischen 50 μm und 100 μm erfolgte durch die Nutzung eines Abstandshalters zwischen Master und Glassubstrat. Die Vernetzung erfolgte im Wärmeschrank bei 80° C für die Dauer von 1,5 Stunden. Ein schnelles Aushärten ist bei 120° C innerhalb von einer Stunde möglich. Bei kürzerer Prozesszeit wurde jedoch geringere Reproduzierbarkeit erreicht.

Es konnte ebenfalls experimentell gezeigt werden, dass bis zu 10 μm dicke Folien durch das Beschweren mit einem Gewicht (2 kg) und einer 30 stündigen Vernetzung bei Raumtemperatur hergestellt werden können.

Dünnere Membranen im Bereich unterhalb von 50 μm können mit mehreren Verfahren reproduzierbar hergestellt werden, wie z. B. durch Rotationsbeschichtung oder durch Schichtziehverfahren mittels Rakel. Weitere Untersuchungen der letztgenannten Variante wurden im Projekt CANDELA in Zusammenarbeit mit Rene Luther und Tilo Köckritz durchgeführt [102], wobei auch leitfähige Membranen mittels Einbringung von Kohlenstoff-Nanoröhren hergestellt wurden.

4.8.3 Mikrofluidische Quellmittelversorgung des Aktorchips

Das Aktorarray befindet sich als Herzstück des taktile Displays auf einem polymeren Träger-substrat. Trägersubstrat, Aktorschicht, elastische Abdeckschicht und die Quellmittelversorgung ergeben zusammen den vollpolymeren Aktorchip.

Beim Quellen und Entquellen verändert sich die Höhe und das Volumen von jedem Aktor. Dieses Volumen muss als Quellmittel entsprechend zu- bzw. abgeführt werden. Wird z. B. im Extremfall das ganze taktile Display vom Zustand des höchsten Hubs in den Zustand des geringsten Aktorhubs gebracht, wird überschüssiges Quellmittel aus den Aktoren frei. Dieses wird durch die Aktorzwischenräume wie durch ein Rohrsystem abgeführt.

Bei der technischen Realisierung wurde auch eine weitere Herausforderung gelöst: Die Wahr-scheinlichkeit ist gegeben, dass ein einzelner Aktor im Randbereich aus der Aktormatrix abge-trennt werden könnte. Diese Hydrogelmasse könnte einen für die Quellmittelversorgung vorge-sehenen Kanal verstopfen, was zum Totalausfall führen würde, falls nur ein einziger Kanal die Flüssigkeit in die Aktorkammer oder aus der Kammer führt. Der verschlossene Chip kann nicht mehr für eine Reparatur geöffnet werden.

In **Abbildung 43 a** ist die mikrofluidische Struktur zur Quellmittelversorgung (obere linke Ecke) vergrößert dargestellt. Eine feine Verzweigung der fluidischen Kanäle (1) vor der Aktor-kammer (2) ermöglicht selbst im Ausnahmefall ein ungestörtes Befüllen bzw. das Entleeren. Das komplette fluidische Layout ist in **Abbildung 43 b** dargestellt.

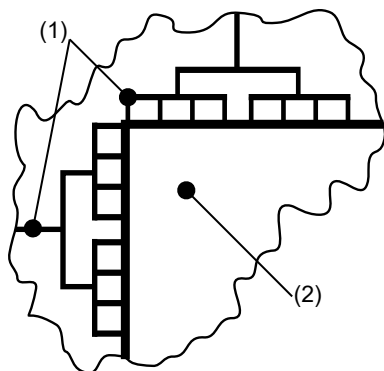


Abb. 43 a. Ausschnitt der fein verzweigten mikrofluidischen Struktur zur Quellmittelversorgung. (1) mikrofluidische Struktur, (2) Aktorkammer. Die Vergrößerung zeigt die linke obere Ecke.

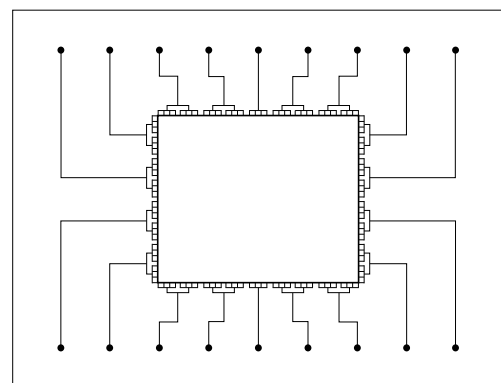


Abb. 43 b. Gesamtansicht des mikrofluidischen Layers des intermodalen Displays.

5 Optoelektrothermischer Controller

Die *elektronikkompatible Aktorsteuerung* ist ein Modul, welches am Computer angeschlossen die komplette thermische Steuerung der Hydrogelaktoren vornimmt. Im Unterschied zum *Adressraum* der Informationstechnik, welcher für sequentielle Zugriffe ausgelegt ist und die Elemente des Massenspeichers bzw. des Gesamtspeichersystems umfasst [103], erfordert die Aktorsteuerung des Displays das gleichzeitige Beschreiben der Zustände von 4.320 oder mehr Aktorelementen (Kapitel 6). Die Zielsetzung ist ehrgeizig, weil die Steuerung thermisch erfolgt.

Die im Stand der Technik (Kapitel 3.5) dargestellte erste Lösung ist für den Zweck einer potentiellen Temperatursteuerung von Hydrogelaktoren zu aufwändig, weil ein Ätzprozess für die funktionsgebende 3D Geometrie erforderlich ist. Zudem führt die Herstellung dazu, dass die Mechanische Stabilität zu stark herabgesenkt wird, um den Kräften standzuhalten, die beim Abtastvorgang durch einen Benutzer auftreten. Die zweite präsentierte Studie ist besonders interessant, weil sie die erforderliche mechanische Stabilität gewährleistet. Die Angaben aus der Publikation reichen jedoch nicht aus, um ein komplettes System zu dimensionieren. Hierfür erfolgen im Folgenden ausgehend vom Konzept Schritt für Schritt die Realisierung.

5.1 Konzept Wärmesteuerung durch Licht

Resistive Elektrodenanordnungen zur gleichzeitigen und unabhängigen Steuerung jedes einzelnen Aktors würden einen mehrdimensionalen, wasserdichten Schichtaufbau erfordern. Eine sequentielle Steuerung als Alternative würde zur Reduktion der Temperaturschwankungen eine hohe Wiederholrate erfordern und damit hohe Spannungen. Mehr als 1.000 Elemente in einer resistiv-thermischen Steuerung zu integrieren, würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen.

Deshalb erfolgte die Suche nach Alternativen. Zunächst sind Laserschreibsysteme prinzipiell möglich, jedoch u. a. wegen Sicherheitsaspekten nicht einfach umzusetzen. Auch DLP (Digital Light Processing) sind als Entwicklungskits erhältlich. Die Geräteentwicklung mit der erforderlichen hohen Güte hat sich jedoch als unrealistisch erwiesen. Die Optik, die Elektronik und u. a. die effiziente Erzeugung homogener Lichtintensität über das gesamte Bildfeld erfordern einen hohen Entwicklungsaufwand.

Die Alternative sind Beamer als Projektionssystemkomplettlösung mit Umwandlung von Licht in Wärme. Sie ermöglichen die Nutzung von Bilddaten zur Wärmesteuerung. Eine entscheidende Rolle spielt dabei die Maximalleistung, die ein Beamer liefern kann. Die Analyse hat gezeigt, dass es eine Beamerklasse gibt, die den Anforderungen eines Systems mit LSI Integrationsgrad genügt. Deren Umsetzung wird im Folgenden beschrieben.

5.2 Aktorchip-Aufnahmeeinheit mit Licht-Wärme-Umwandlung

Für eine langzeitstabile Temperaturfeldsteuerung und schnelle Zustandsänderungen ist neben einer aktorgenaue Erwärmung auch ein Mechanismus zur Abführung der Wärmeenergie erforderlich. Die aktorgenaue Erwärmung entsteht durch die exakte Fokussierung des Projektorlichts auf die Projektionsebene in Aktornähe und die Umwandlung in Wärme nach der Absorption.

Die Wärmeenergie würde ohne weitere Vorkehrungen von einem warmen Aktor zum benachbarten Aktor übergehen und dessen Funktionsfähigkeit beeinträchtigen. Um das zu verhindern, wird die Unterseite des Hydrogelaktor-Trägersubstrats aktiv gekühlt (**Abbildung 44**).

Braun hervorgehoben sind die Fenster auf beiden Seiten der Temperierflüssigkeit. Das untere Fenster ist Bestandteil der mechanischen Aufnahmeeinheit. Das obere Glas, sofern im jeweiligen Experiment eingesetzt, ist wie in Kapitel 5.9.2 beschrieben aus Saphir, um den Wärmestau zu reduzieren und gehört je nach Aufbau entweder zum Chip oder zur mechanischen Aufnahmeeinheit. Der Aufbau ist über dem Aktorchip nach oben frei, so dass der Benutzer die aktive Oberfläche sehen und abtasten kann.

Das Licht des Projektors tritt durch die Temperierflüssigkeit auf den darüberliegenden Projektionsschirm. Um Verwirbelung, Kavitation und andere Störungen der optischen Abbildung zu vermeiden, wurde bei der Konstruktion der Aktorchip-Aufnahmeeinheit auf eine große Einlauflänge und laminaren Fluss der Temperierflüssigkeit geachtet. Der Winkel, in dem die Flüssigkeit an die zu temperierende Glasfläche herangeführt wird, wurde so flach wie technologisch möglich realisiert.

Als weitere Bedingung zur Dimensionierung der Kanalhöhe für die Temperierflüssigkeit wurde die Annahme getroffen, dass eine Maximierung des Volumenflusses benötigt wird, um die Erwärmung der Flüssigkeit entlang der Strecke zu reduzieren. Die Temperierung der Flüssig-

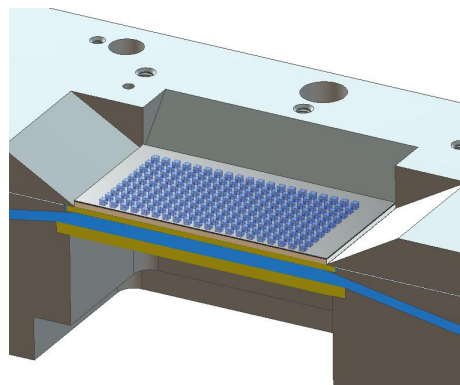


Abb. 44. *Schnittbild einer Ausführung der mechanischen Aktorchip- Aufnahmeeinheit mit Temperiermedium und Mikroaktorarray. Zur besseren Sichtbarkeit sind die Aktoren ohne elastische Folie als oberste Schicht dargestellt.*

keit erfolgt mit einem Thermostat. Als Grundüberlegung zur Dimensionierung des Volumensstroms für die konvektive Temperierflüssigkeit wurde die thermische Kapazität der Flüssigkeit herangezogen, um die Erwärmung bei Voll-Ansteuerung (Heizquellen aller Aktoren sind angeschaltet) entlang des Trägersubstrates abzuschätzen und die Nutzung laborüblicher Thermostate abzuwägen.

Die Leistungsdichte q an der Oberfläche unter Voll-Ansteuerung beträgt 4 W cm^{-2} . Die Breite b_K des Kanals beträgt 60 mm, um auch im Randbereich der Glasfläche hohe Geschwindigkeit zu ermöglichen. Der Kanal hat eine Länge l_K von 50 mm. Die Höhe h_K beträgt 1,5 mm.

Für Wasser als Temperierflüssigkeit wurde in die Dimensionierungsgleichung eine spezifische Wärmekapazität C_{sp} von $4,18 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ eingesetzt. Um die Temperaturdifferenz zwischen Einlaufstelle und dem Ausgang abschätzen zu können, wurde angenommen, dass der gesamte Querschnitt der Flüssigkeit zur Kühlung beiträgt. Zur Berücksichtigung der reduzierten Effektivität wurde in die Gleichung der Korrekturfaktor $C_{Korrektur}$ hinzugefügt.

$$\Delta T = \frac{q \cdot b_K \cdot l_K}{\rho \cdot C_{Korrektur} \cdot \dot{V} \cdot C_{sp}} \quad (5.1)$$

Nach (5.1) (ohne Korrekturfaktor) ergibt sich eine Temperaturdifferenz ΔT zwischen Einlass und Abfluss der Aktorchip-Aufnahmeeinheit von 0,3 K bei 6 l min^{-1} und von 0,04 K bei der höchsten Fördermenge, die laut Herstellerdatenblatt des Umwälzthermostats 40 l min^{-1} beträgt. Nach der Herstellung der Aktorchip-Aufnahmeeinheit war im Einsatz keine Optimierung notwendig. Im worst-case Test am Gerät wird die gesamte Displayfläche mit der höchstmöglichen Lichtleistung angestrahlt. Mit dem Volumenstrom von 6 l min^{-1} , konnte zwischen den beiden Seiten des Chips ein Temperaturunterschied von 0,5 K festgestellt werden. Hieraus ergibt sich ein Korrekturfaktor für die Geometrie der Aktorchipaufnahmeeinheit von:

$$C_{Korrektur} = 0,58 \quad (5.2)$$

Wird der gesamte Querschnitt der durchfließenden Temperierflüssigkeit effektiv für den Abtransport der Wärme genutzt, ist der Korrekturfaktor gleich Eins. Aus dem kleineren Faktor kann man schlussfolgern, dass tiefere Flüssigkeitsschichten aufgrund des Wärmewiderstandes der Flüssigkeit nicht vollständig genutzt werden.

5.3 Mechanischer und optischer Aufbau

Projektor und Temperiereinheit wurden mit Item-Profileschienen an einer optischen Bank angebracht. Dabei wird die Stabilität der optischen Bank ausgenutzt, so dass ein starres System mit exakter optischer Länge zwischen Projektor und Abbildungsschirm entsteht, wobei mechanische Schwingungen reduziert werden, welche zur Unschärfe führen können.

Die Information für die thermische Steuerung ist bei dem verwendeten System in Bildern gespeichert. Jedes Pixel wird in die Aktorebene projiziert und scharf fokussiert, entsprechend seiner Helligkeit ergibt sich eine definierte Heizleistung. Der Projektor übernimmt den ersten Teil der elektronikkompatiblen Schnittstelle zur Aktorsteuerung. Die Bilder werden über eine Powerpoint-Präsentation von dem Computer an den Projektor geschickt. Wie in **Abbildung 45** dargestellt, befindet sich direkt nach dem Projektor (1) und seinem Originalobjektiv (1a) eine externe Optik (2). Diese dient zur Anpassung der Projektionsfläche an die Größe des Projektionsschirms und an die verkürzte optische Weglänge des aufzubauenden Systems. Als Zielgröße für die Gesamtgröße des Bildes dient die Substratfläche des Aktorchips. Ohne externe Optik kann das Bild nur an eine Leinwand projiziert werden, die mehrere Meter Kantlänge hat.

Der Umlenkspiegel (3) ist optional und wurde eingesetzt, weil der horizontale Betrieb für die meisten Anwendungen geeigneter ist. Die Umwandlung der Lichtenergie in Wärmeenergie erfolgt, wie im letzten Kapitel erwähnt, im Aktorchip unmittelbar in Aktornähe. Der Aktorchip befindet sich innerhalb der ihn umschließenden mechanischen Einheit, der *Aktorchip-Aufnahmeeinheit mit Projektionsschirm*.

Der Steuerrechner, die Leitungen zur Quellmittelversorgung und für die Temperierflüssigkeit sowie das Thermostat sind in der Abbildung nicht dargestellt, gehören jedoch selbstverständlich zum Aufbau.

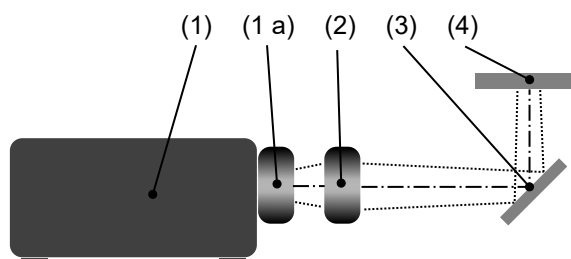


Abb. 45. Experimentaufbau der optischen Aktorsteuerung. (1) Projektor, (1a) Objektiv des Projektors, (2) Zusatzoptik für Projektionsfeldverkleinerung, (3) Umlenkspiegel, (4) Aktorchip-Aufnahmeeinheit mit Projektionsschirm.

5.4 Zusatzoptik für Projektion auf 2,5 Zoll Displaydiagonale

Um eine scharfe und verzerrungsarme Projektion auf einer Fläche mit einer Diagonalen von 4,5 cm bis 12 cm zu erreichen, wurde sowohl das im Projektor eingebaute Objektiv auf die kürzestmöglichen Entfernung eingestellt, als auch eine Zusatzoptik eingesetzt.

Die Brennweite wurde experimentell ermittelt. Bei der Veröffentlichung [78] wurde eine Vorversion des Versuchsstandes verwendet und eine Linse mit einer Brennweite von 300 mm eingesetzt.

Im finalen Messstand wird als Zusatzoptik ein Objektiv mit 500 mm Brennweite eingesetzt, welches gegenüber der Einzellinse durch den Einsatz mehrerer Linsen eine bessere Dispersionscharakteristik und in der Summe ein besseres Auflösungsvermögen hat. Die Optik wurde so befestigt, dass sie am Gerät ausgerichtet werden kann und die Vibrationen minimiert sind.

5.5 Umlenkspiegel

Für die meisten Anwendungen ist ein Aufbau von Vorteil, bei dem der Aktorchip horizontal steht. Das ist sowohl bequemer für die Beobachtung, als auch für das Ertasten des taktilen Displays. Um das vom Projektor ankommende Licht vertikal umzulenken, wurde ein Umlenkspiegel eingebaut. Um Mehrfachreflexionen zu vermeiden, kommt ein Vorderflächenspiegel zum Einsatz. Er reduziert die Lichtleistung um 5 %. Eine Verbesserung des Aufbaus kann mit preisintensiveren und entspiegelten Spiegeln erreicht werden, die eine höhere Oberflächenvergütung aufweisen. In diesem Fall ist ein Wirkungsgrad des Spiegels von über 99 % möglich. Nach Abschätzung von Kosten und Nutzen wurde zu diesem Zeitpunkt darauf verzichtet.

5.6 Leistungsparameter der verwendeten Projektions-Systeme

Es werden zwei Konfigurationen mit zwei unterschiedlichen Projektorsystemen untersucht. Das leistungsschwächere System basiert auf einem EPSON EMP820 Projektor. Das ist die Leistungsklasse portabler Geräte, die häufig für Vorträge in kleinen Konferenzräumen eingesetzt werden. Im Datenblatt sind 2.500 Ansi Lumen und eine 200 W Lampe angegeben.

Das zweite Setup basiert auf einem Gerät des Herstellers Christie vom Typ Roadster 20K. Im Datenblatt sind 20000 Ansi Lumen und eine 3 kW Xenon Lampe spezifiziert.

Die Größe eines Projektorpixels ergibt sich rechnerisch aus der 1920 x 1080 Pixel FullHD Auflösung und einer Displayfläche mit Seitenlänge von 50 mm. Die Größe eines einzelnen Pixels in der Bilddatei, welche über das Projektorsystem ausgegeben wird, beträgt dabei ca. 46 μm bei 1080 Pixel Bildbreite.

Die tatsächliche Größe der Pixel ist durch das Gesamtsystem beschränkt und dessen Fähigkeit, kleine und thermisch stabile Spots zu erzeugen. Unter Anderem wirkt der optische Pfad wie ein Tiefpassfilter auf die Auflösung. Die kleinste messbare Pixelgröße ergibt sich aus der physikalischen Auflösung der Thermografiekamera.

5.7 Projektorcharakteristik

Die Projektionssysteme sind auf die Wahrnehmung der menschlichen Augen optimiert und nutzen ein nichtlineares Kennfeld zur Darstellung von Helligkeitsstufen in Bezug auf die Leistungsdichte des emittierten Lichtes. Zur Kennfeldcharakterisierung wurde an der Position des Aktorarrays ein radiometrisches Lichtleistungsmessgerät positioniert. Die Korrelation ist in **Abbildung 46** abgebildet und die quadratische Näherungsgleichung in Gl. (5.3) dargestellt. Normiert auf die Höchstwerte, ist auf der Abszisse die Graustufe als Helligkeit in Prozent angegeben (in Gl. (5.3) die Variable y) und auf der Ordinate die Leistungsdichte in Prozent (in Gl. (5.3) die Variable x). Der Wert der Variable y steht im direkten Zusammenhang mit der später erreichten Temperatur in Aktornähe. Bei dem Experiment wird das Licht des Projektors Christie Roadster 20K auf eine Fläche mit Abmessungen von 50 mm x 50 mm fokussiert. Die maximale Leistungsdichte an der Oberfläche beträgt 4 Wcm^{-2} .

$$y = 0,0114 \cdot x^2 - 0,145 \cdot x + 0,17 \quad (5.3)$$

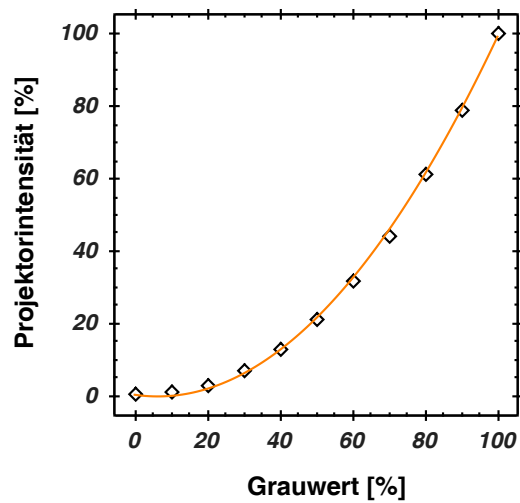


Abb. 46. Abhängigkeit zwischen dem Wert der Graustufen (Grauwert) und der relativen Intensität auf der Projektionsfläche. Weiß entspricht Grauwert 100 %. Schwarz entspricht Grauwert 0 %. Projektorintensität 100 % entspricht 4 Wcm^{-2} .

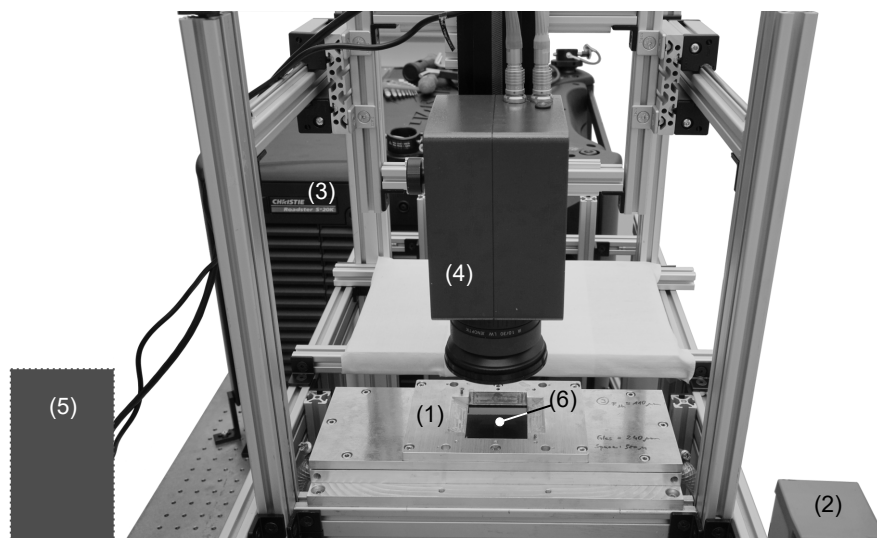


Abb. 47. Messaufbau mit Darstellung der Einzelkomponenten. (1) thermische Steuereinheit, (2) Thermostat zur Einstellung von Arbeitspunkt und Wärmeabtransport, (3) Projektor, (4) Thermografie Kamera, (5) schematische Darstellung des Steuerrechners, der den Projektor steuert und die Wärmebilder aufnimmt, (6) Fläche mit Temperaturprofil. Die verschiebbare Kamera-Aufhängung entstammt der Doktorarbeit von Rene Körbitz .

5.8 Setup der Thermografiekamera

Für die Bestimmung des Temperaturprofils, welches durch die thermische Steuerung entsteht, wurde der Messaufbau so angeordnet, dass eine Infrarotkamera (4) die temperierte Oberfläche (6) direkt beobachten kann, wie in **Abbildung 47** dargestellt. Die Oberfläche steht nach dem Zusammenbau des Demonstrators in direktem Kontakt mit den Hydrogelaktoren und gibt deren Temperatur vor. Das Modell der verwendeten Kamera ist VarioCAM[®] HR 600 von der Firma Infratec. Mit der genutzten Optik können Strukturen ab einer Größe von 150 μm aufgelöst werden (Herstellerangabe).

5.9 Optimierung und Charakterisierung der Aktorsteuerung

Im folgenden Teilkapitel erfolgt die Dimensionierung und Optimierung der Aktorsteuerung und insbesondere der Wärmeisolationsschicht, welche maßgeblich für die Leistungsfähigkeit der Steuerung verantwortlich ist.

5.9.1 Design-, Betriebs- und Messgrößen der thermischen Steuerung

Wie in Kapitel 4.1.1 vorgestellt, befinden sich die Hydrogelaktoren auf einem polymeren Substrat. Die Festlegung der zu verwendenden Schichten einschließlich des Trägersubstrates ist ein Teil des Designprozesses, welcher die thermische Charakteristik des Systems festlegt. Zunächst erfolgt die Definition von Design-, Betriebs- und Messgrößen. Anschließend werden die erforderlichen Zusammenhänge experimentell ermittelt, welche zur Dimensionierung der Wärmeisolationsschicht und zur Feststellung der Auflösungsgrenze notwendig sind.

Rastermaß

In dieser Arbeit bezieht sich das geometrische Rastermaß auf eine Matrixanordnung, dessen Elemente in Zeilen und Spalten angeordnet sind, wobei die Wiederholeinheit als Rastermaß bezeichnet wird. In **Abbildung 48** kennzeichnen x_p bzw. y_p das Rastermaß (Englisch pitch). Für die Bestimmung wird der Abstand zum Beispiel von der Pixelmitte des ersten Pixels bis zur Pixelmitte des darauffolgenden Pixels gemessen. Matrixaufbau und Temperatursteuerung werden so aufeinander abgestimmt, dass im gegebenen Raster jeder Aktor einzeln und unabhängig gesteuert werden kann.

In dieser Arbeit werden gleiche Aktorgrößen und Abstände in x- und in y-Richtung verwendet. Das Rastermaß x_p, y_p ergibt sich aus Aktorabstand a_x, a_y und Aktorgröße b_x, b_y nach Gleichung

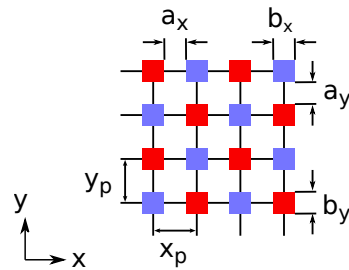


Abb. 48. Rastermaß von Aktoren und Ansteuerung in der Draufsicht. a_x und a_y sind die Abstände zwischen den Aktoren, b_x und b_y sind die Aktorabmessungen. Das Koordinatensystem auf dem Substrat ist mit x und y gekennzeichnet .

(5.4).

$$x_p = a_x + b_x \quad (5.4)$$

$$y_p = a_y + b_y \quad (5.5)$$

Die verwendeten Aktoren haben eine quadratische Querschnittsfläche und sind in beiden Richtungen (x und y , **Abbildung 48**) auf dem Substrat gleich groß. Die Aktordichte D_A ergibt sich aus Gleichung (5.6).

$$D_A = \frac{1}{x_p \cdot y_p} \quad (5.6)$$

Temperaturhub

Mit Temperaturhub wird die Temperaturdifferenz zwischen der Höchsttemperatur eines angeschalteten Aktors und der minimalen Temperatur eines ausgeschalteten Nachbaraktors bezeichnet.

Hydrogelspezifischer Mindesttemperaturhub

Die Temperaturdifferenz, die als Arbeitsbereich zum Betrieb einer Aktormatrix erforderlich ist, hängt von der eingesetzten Hydrogelart ab. Für das in dieser Arbeit eingesetzte Hydrogel *PNIPAAm* ist ein Mindesttemperaturhub von 6 K erforderlich (Kapitel 4.7.1).

Thermische Auflösungsgrenze

Um den Mindestabstand benachbarter Aktoren zu bestimmen, bei dem sie unabhängig voneinander angesteuert werden können, werden Methoden der Optik zur Bestimmung des *Auflösungsvermögens* abgewandelt und angewendet. Optische Tests beruhen darauf, dass je kleiner

die Teststrukturen sind, umso weniger kontrastreich sie erscheinen. Die optische Limitierung reduziert den Kontrast kleiner Strukturen. Für die Bestimmung der thermischen Auflösungsgrenze wird eine ähnliche Methode angewendet. Je kleiner das Rastermaß wird, desto geringer wird auch der Temperaturhub, welcher zwischen benachbarte Aktoren zur Verfügung steht. Der hydrogelspezifische Mindesttemperaturhub wird zur Festlegung der Grenze genutzt, bei der gerade noch zwei benachbarte Aktoren unter Vernachlässigung ihrer räumlichen Ausdehnung voneinander unabhängig in den maximalen bzw. minimalen Quellungs Zustand gebracht werden können. In **Abbildung 49** ist ein Temperaturverlauf dargestellt, welcher an der thermischen Auflösungsgrenze liegt. Die untere Temperatur T_U für das eingesetzte Hydrogel ist 29°C , die obere Temperatur T_O ist 35°C . Im Diagramm ist auch die Basistemperatur T_T dargestellt. Das ist die Temperatur der Kühlflüssigkeit, welche durch das Thermostat zur Verfügung gestellt wird.

Testmuster zur Bestimmung der Auflösung

Die Tests zur Feststellung des Auflösungsvermögens optischer Geräte gehören zum Stand der Technik. Hierbei wird kohärente und monochromatische Beleuchtung von optischen Gittern mit unterschiedlichen Gitterkonstanten genutzt, um aus der Beobachtung der Beugungsmuster die folgende Grenzwertbedingung zu formulieren: zwei benachbarte Linien des Gitters müssen so abgebildet sein, dass sie gerade noch voneinander unterscheidbar sind. Es folgt der funktionelle Zusammenhang, welcher die Öffnungsblende (Apertur) des Mikroskopobjektives, die Wellenlänge des Lichtes und den Abstand zum Objekt mit der kleinsten auflösbaren Strukturgröße verknüpft. Die Bestimmung der tatsächlich erreichbaren Auflösung optischer Geräte erfolgt anhand von Testmuster-Schablonen [104], [105]. Weiterhin werden zur Messung der Auflösungsgrenze periodische Linien- bzw. Balkenstrukturen verwendet. Die Siemens-Stern Struktur ist ein weiterer, häufig eingesetzter Test in der Fotografie [106]. Der systemtheoretische Ansatz der Bildentstehung ist in [105] dargestellt.

Für die Dimensionierung und Optimierung der thermischen Steuerung werden zur Bestimmung der thermischen Auflösung in Kapitel 5.9.2 als Testmuster parallele hell-dunkel-Linien (Balken bzw. Streifen) verwendet, bei denen die Dicke und der Abstand variiert werden, wobei die Dicke und der Abstand gleich groß gewählt werden. Die Balkenlänge ist um ein Vielfaches größer als die Balkenbreite, um eine Beeinträchtigung zwischen Breite und Länge im Test auszuschließen. Dieses Verfahren bietet im Vergleich zum Siemensstern eine bessere Auswertbarkeit, weil an mehreren Stellen gemessen werden können. In Kapitel 6.1.2 erfolgt der Auflösungstest für die Monochromdisplaysteuerung mittels Siemensstern, weil die Auflösung mit einem einzigen Bild bestimmt und dargestellt werden soll.

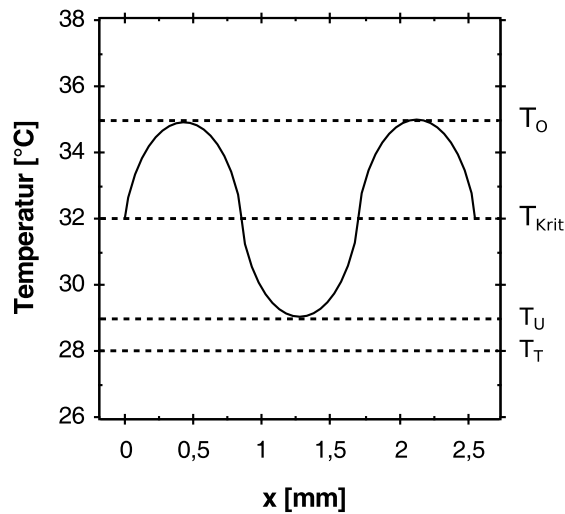


Abb. 49. Beispiel für ein Temperaturprofil mit 6 K Temperaturhub. T_T ist die Temperatur der Temperierflüssigkeit, welche durch einen Thermostat eingestellt wird und den Arbeitspunkt definiert. T_U ist die untere Temperatur, welche an Aktoren anliegt, die gequollen sein sollen. T_O ist die obere Temperatur, welche an Aktoren mit warmer Ansteuerung angelegt wird. Bei richtiger Systemeinstellung befinden sich T_U und T_O annähernd symmetrisch um die kritische Phasenübergangstemperatur T_{Krit} .

Tab. 13. Spezialfälle: Gebräuchliche Muster für Auflösungs-tests.

Art Muster	Vorteile	Nachteile	Bemerkung
Sprung	Systemparameter leichter bestimmbar	Auflösungsgrenze nicht direkt ablesbar	die Hälfte des Displays ist an, die andere Hälfte ist aus
Balken bzw. Streifen	gute Auswertbarkeit bei Experimenten	viele Experimente: ein Experiment je Strukturgröße erforderlich	Temperatur entlang einer Achsenrichtung konstant
Schachbrett	gute Auswertbarkeit bei Experimenten	viele Experimente: ein Experiment je Strukturgröße erforderlich	
Siemens Stern	ein Test - schnelle Bestimmung der Auflösungsgrenze	schwerer auswertbar	
USAF-Auflösungstafel 1951	Kombination aus Balken und Zahlen horizontal und vertikal	nur an speziellen Stellen im Bildfeld auswertbar	

Die USAF-Auflösungstafel (USAF-Chart 1951) ist ein besonderes Beispiel für einen kombinierten Auflösungstest, der mehrere Balkenmuster auf einer Darstellung vereint. In **Tabelle 13** ist eine Zusammenfassung gebräuchlicher Testmuster dargestellt.

5.9.2 Dimensionierung und Optimierung der thermischen Steuerung

In den folgenden Abschnitten erfolgt die experimentelle Optimierung und Dimensionierung der wärmeisolierenden Substratschichtdicke, dargestellt in **Abbildung 50** als (1). Ziel der Optimierung ist das Erreichen der höchstmöglichen thermischen Auflösung mit der verfügbaren Leistung der Lichtquelle sowie die experimentelle Bestimmung der Auflösungsgrenze für das Hydrogel PNIPAAm.

Abschätzung der wirksamen Leistungsdichte

Im ersten Experiment wird der Projektionsschirm innerhalb der Aktormatrix einheitlich und vollflächig mit der gleichen Heizleistungsdichte angesteuert, d. h. die Heizquellen aller Aktoren sind angeschaltet. Ziel des Experimentes ist neben der Bestimmung erster Systemparameter auch die Vergleichbarkeit zwischen einer vereinfachten Berechnungsvorschrift und dem Experiment.

Hierbei wird auf dem Projektor ein weißes Bild dargestellt, so dass an jedem einzelnen Punkt die maximal mögliche Heizleistung anliegt. Im Folgenden wird die einheitliche Oberflächentemperatur als *homogene Temperatur* bezeichnet. Diese ermöglicht, bezogen auf die Darstellung in **Abbildung 50**, die Betrachtung ausschließlich des vertikalen Energieflusses zur Berechnung der gesuchten Temperaturdifferenz.

Im eindimensionalen Modell wird ein Segment modelliert, welches aus einem Material einheitlicher Dicke d_S besteht und eine einheitliche Wärmeleitfähigkeit λ_{th} hat. Auf der Unterseite

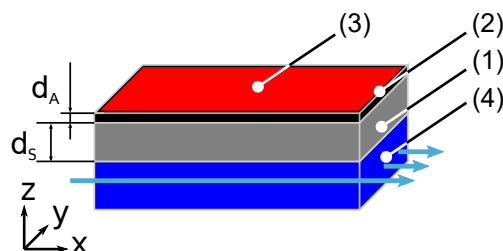




Abb. 50. Schichtmodell der thermischen Steuerung. 1. dünne Wärmeisolationsschicht, 2. lichtabsorbierende, wärmeerzeugende Schicht, 3. einheitliche Erwärmung, 4. wärmeableitende Flüssigkeitsschicht, d_A Dicke der wärmeerzeugenden Schicht, d_S Dicke der Wärmeisolationsschicht.

des Substrates führt die Flüssigtemperierung (4) (**Abbildung 50**) zu einer einheitlichen Temperatur, während an der Oberseite des Substrates an allen Orten die gleiche Heizleistungsdichte vorliegt. Somit erfolgt eine einheitliche Erwärmung. Durch die gleichzeitige Erwärmung und Kühlung wird ein stationärer Zustand erreicht. Zum Zeitpunkt der Messungen ist die Temperatur konstant.

Mit Hilfe des Modells kann die Temperaturdifferenz zwischen oberer und unterer Seite mit den Gleichungen (5.7) und (5.8) beschrieben werden. ΔT_O ist die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der Unterseite. Die Unterseite hat im Idealfall die Temperatur der Kühlflüssigkeit. Die Dicke der lichtabsorbierenden Schicht d_A wird im Modell als sehr dünn gegenüber der Wärmeisolationsschichtdicke d_S angenommen und vernachlässigt. Die funktionsbestimmende Wärmeleitung erfolgt innerhalb des festen Wärmeisolationsmediums (Schichtdicke d_S). Für die Berechnung wird ein beliebiges Segment aus dem Material verwendet. Es hat die Oberfläche A_{Fl} auf der oberen und unteren Seite. Durch das Segment fließt eine konstante Wärmestromdichte q . Der Wärmeübergang zwischen Wärmeleitung im Feststoff und der Kühlflüssigkeit wird durch den Wärmeübergangskoeffizient α_{th} modelliert. Die Formel wird in (5.8) weiterhin in einer Form dargestellt, welche am Ohmschen Widerstand der Elektrotechnik angelehnt ist. R_{th1} ist der Wärmewiderstand des Wärmeüberganges zwischen Wärmeisolationsschicht und Flüssigkeit, R_{th2} der Wärmewiderstand im festen Medium der Wärmeisolationsschicht und P_{Heiz} die Leistung der Wärmequellen an der Oberfläche, welche zum ausgewählten Oberflächenausschnitt A_{Fl} gehören.

$$\Delta T_O = \left(\underbrace{\frac{1}{\alpha_{th} \cdot A_{Fl}}}_{R_{th1}} + \underbrace{\frac{d_S}{\lambda_{th} \cdot A_{Fl}}}_{R_{th2}} \right) \cdot \underbrace{q \cdot A_{Fl}}_{P_{Heiz}} \quad (5.7)$$

$$\Delta T_O = (R_{th1} + R_{th2}) \cdot P_{Heiz} \quad (5.8)$$

In **Abbildung 51** ist der Zusammenhang zwischen Oberflächentemperatur T_O und Substratschichtdicke d_S dargestellt. Die Gleichung (5.9) zeigt als lineare Interpolation  im Diagramm den Sachverhalt als bestmöglichen Fit (Methode der kleinsten Quadrate), bezogen auf die Messdaten. Die Gerade hat einen Offset, welcher charakteristisch für den Wärmeübergang zwischen Substrat und Temperierflüssigkeit ist. Um den Anteil der reinen Wärmeleitung im Wärmeisulationsmaterial hervorzuheben, ist in der linearen Funktion  der funktionelle

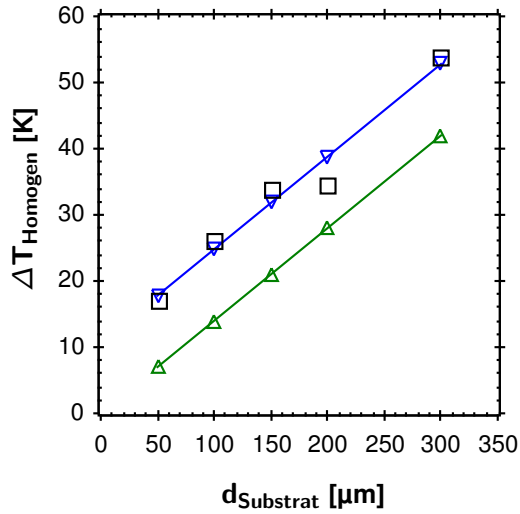


Abb. 51. Temperaturhub bei maximaler Leistung in Abhängigkeit von der Substratdicke.
 Symbole: \square Messdaten \blacktriangledown Beitrag der Wärmeleitung ohne Wärmeübergang,
 \blacktriangle thermischer Gesamtwiderstand aus Wärmeleitung und Wärmeübergang.

Zusammenhang dargestellt, der bei Vernachlässigung des Wärmeüberganges in die Temperierflüssigkeit und der Nullpunktverschiebung entsteht. Es ist die direkte Proportionalität zwischen Substratdicke d_{Substrat} und maximaler Oberflächentemperatur T_O dargestellt.

$$\frac{\Delta T_O}{\text{K}} = 0,14 \cdot \frac{d_S}{\mu\text{m}} + 10,7 \quad (5.9)$$

$$\Delta T_O = \frac{q}{\lambda_{th}} \cdot d_{\text{Substrat}} + \frac{q}{\alpha_{th}} \quad (5.10)$$

Der gemessene Wert der Lichtleistung des Projektors q_p in der scharf fokussierten Ebene beträgt 4 Wcm^{-2} . Zwischen Projektor und Projektionsschicht befindet sich die Aktorchipaufnahme, in welcher das Licht durch mehrere Stoffe mit unterschiedlichem Brechungsindex durchläuft. Anschließend wird es nicht zu 100 % absorbiert, weil selbst schwarze Farbe und jede reale Oberfläche einen Teil des Lichtes reflektiert. Als grobe Schätzung für die einzelnen Faktoren wird je Stoffübergang von Luft in Wasser und von Wasser in Polymersubstrat die Transmission einer unbeschichteten Glasplatte (optisches Fenster) von t_F 0,93 angenommen [107] und für die Absorption der schwarzen Schicht ein Wert von A_B 0,9 (Boron Black [108]).

Die effektiv wirksame Heizleistungsdichte q von $3,1 \text{ Wcm}^{-2}$ ergibt sich nach Gleichung (5.11), wobei dies einem Wirkungsgrad von ca. 78 % entspricht. Die Abschätzung lässt Effekte wie Transmissionsverluste innerhalb der einzelnen Stoffe (Absorption) und Streuung (Reflexionsverlust) unberücksichtigt.

$$q = 6t_F^2 \cdot A_B \cdot q_p \quad (5.11)$$

Der zweite Teil der Abschätzung ergibt sich aus den Materialkonstanten und der erreichten Temperaturdifferenz zwischen Oberseite und Unterseite der Wärmeisolationsschicht. Aus Gleichung (5.9) und (5.10) folgt (5.12). Nach dem Einsetzen des Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten der eingesetzten Polymere ($0,2 \text{ WK}^{-1}\text{m}^{-1}$ für PET, PDMS) ergibt sich eine effektive Leistungsdichte von $2,8 \text{ Wcm}^{-2}$ und ein Wirkungsgrad von 70 %.

$$q = 0,14 \frac{\text{K}}{\mu\text{m}} \cdot \lambda_{th} \quad (5.12)$$

Aus der Abschätzung geht hervor, dass bei dem Demonstrator ein Wirkungsgrad in Bezug auf die eingesetzte Lichtleistung zwischen 70 % bis 80 % zu erwarten ist. Verbesserung des Wirkungsgrades können durch Entspiegelung aller optischen Grenzflächen stattfinden, um transmissions- und Reflexionsverluste zu reduzieren. Die Verluste je Element können von 7 % [107] auf bis zu 0,1 % reduziert werden [109]. Verbesserung der Absorption kann ebenfalls stark den Wirkungsgrad erhöhen. Durch den Einsatz von speziellen Farben und Nanomaterialien für die lichtabsorbierende Schicht kann die Absorption auf bis zu 99 % erhöht werden [108]. Weitere Optimierung kann durch Brechungsindexanpassung der Kühlflüssigkeit erfolgen.

Optimierung der Wärmeisolation als freitragende Schicht

In Abhängigkeit von der Schichtdicke der Wärmeisolation verändert sich auch die Auflösung des dargestellten thermischen Musters. Einerseits führt eine Erhöhung der Schichtdicke zu einer Erhöhung der maximalen homogenen Temperatur, jedoch auch zur Erhöhung der lateralen Wärmeausbreitung. Die Optimierung der Schichtdicke führt zur bestmöglichen Ausnutzung der verfügbaren Heizleistung mit der Maßgabe, dass die thermische Auflösungsgrenze bei Beachtung des Mindesttemperaturhubes von 6 K maximiert wird.

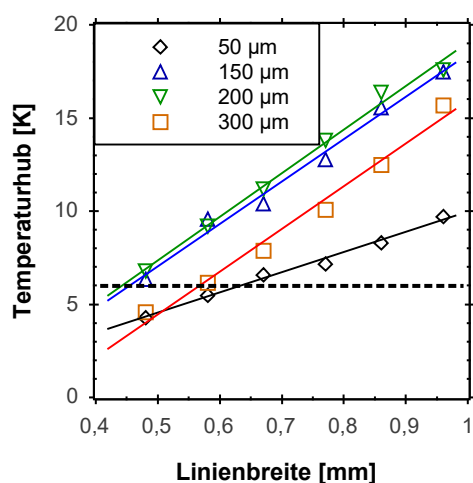


Abb. 52. Temperaturhub in Abhängigkeit von der Polyestersubstrat-Isolationsschichtdicke und Grenztemperaturbedingung von 6 K.

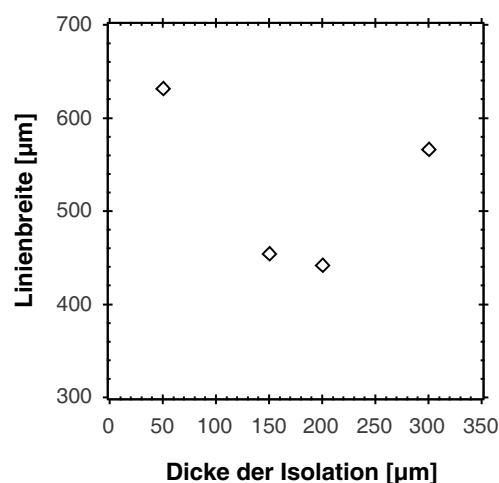


Abb. 53. Linienbreite der Grenzauflösung in Abhängigkeit von der Polyestersubstrat-Isolationsschichtdicke.

In **Abbildung 52** ist der Temperaturhub in Abhängigkeit von der Linienbreite (Rastermaß) und von der Substratdicke dargestellt. Der Schnittpunkt mit der 6 K Markierung kennzeichnet die Auflösungsgrenze. Dies ist in **Abbildung 53** dargestellt.

Die Untersuchung zeigt, dass für diese Experimenteanordnung bei der verwendeten „Heiz“-Leistungsdichte von ca. 4 W cm^{-2} ein Optimum der transparenten Isolations-Schichtdicke zwischen $100 \mu\text{m}$ und $250 \mu\text{m}$ liegt und die Steuerung ein Rastermass von ca. $440 \mu\text{m}$ darstellen kann.

Die Temperaturdifferenz zwischen zwei benachbarten Punkten von 6 K ist die Maßgabe zur Bestimmung der Auflösungsgrenze des Systems. Diese sind erforderlich, um an den Hydrogelaktoren eine deutliche Quellungszustandsänderung hervorrufen zu können. Die zweite Randbedingung ist die verfügbare Leistungsdichte von ca. 4 W cm^{-2} zur Erzeugung des fein aufgelösten Temperaturprofils. Das Optimum für die Dicke der Isolationsschicht liegt zwischen $150 \mu\text{m}$ und $200 \mu\text{m}$. Die kleinste Strukturgröße mit 6 K Differenz zwischen benachbarten Feldern beträgt $480 \mu\text{m}$.

Mechanische Stabilisierung der Aktorfläche

Eine Hauptanforderung an die mechanische Stabilität entsteht durch das aktive Abtasten des Nutzers. Sie darf die Projektionsfläche nicht undefiniert aus der optischen Fokusebene auslenken. Obwohl der Abtastvorgang bei deutlich geringerer Gesamtkraft erfolgt, charakterisieren viele wissenschaftliche Studien die maximale Kraft an den Fingerkuppen mit bis zu 10 N [110],

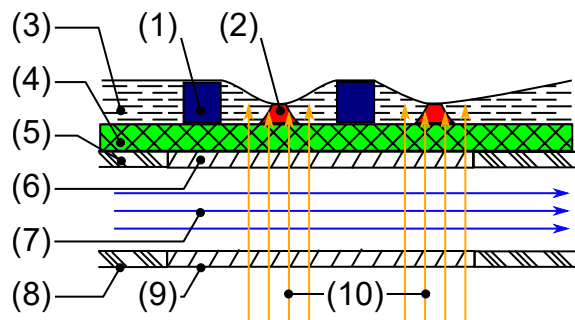


Abb. 54 a. Schnittbild der mechanischen Aktorchipaufnahmeeinheit mit Temperiermedium und Mikroaktorarray, Generation 1. (1) kalter Hydrogelaktor im gequollenen Zustand, (2) warmer Hydrogelaktor im entquollenen Zustand, (3) Quellmittel mit Farbstoff, (4) transparente Wärmeisolationsschicht bzw. Trägersubstrat des Aktorchips, (5) u. (8) Trägerrahmen (Metall), (6) Glas (Saphir), (7) Temperierflüssigkeit, (9) Glas, (10) fokussierter Lichtstrahl.

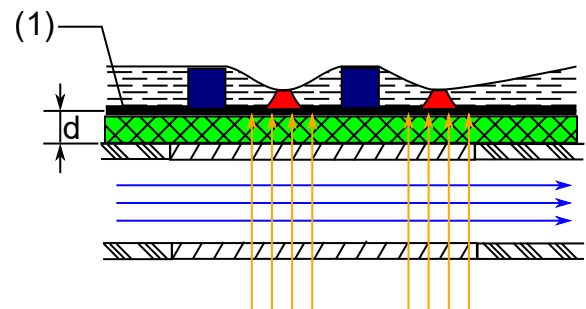


Abb. 54 b. Schnittbild der mechanischen Aktorchipaufnahmeeinheit mit Temperiermedium und Mikroaktorarray, Generation 2. (1) schwarzer Projektionsschirm unter den Aktoren, d Dicke der Wärmeisolationsschicht.

[111]. Die Dimensionierung des Gerätes berücksichtigt, dass die kurzzeitige Einwirkung von einem Vielfachen dieser Kraft (50 N) das System nicht beschädigen darf. Bei der Erstdimensionierung mit freitragender Wärmeisolationsschicht als Folie wurde eine optimale Dicke zwischen 100 μm und 250 μm ermittelt, welches ausschließlich aus Polymer besteht. Diese Schicht allein als Substrat kann die erforderliche mechanische Festigkeit nicht erfüllen. Die Lösung ist ein kompletter Neuaufbau mit mechanischer Unterstützung.

Die Erhöhung der Stabilität erfolgt durch eine Glasplatte direkt unterhalb der Wärmeisolationsschicht (**Abbildung 54 a**).

Um die wärmeisolierende Polymerschicht des Trägermaterials als das maßgebliche Element zur konstruktiven Dimensionierung der thermischen Charakteristik zu erhalten, muss der Wärmerwiderstand der Glasschicht gegenüber der Wärmeisolationsschicht vernachlässigbar sein. Die meisten Glasarten (BOROFLOAT[®], N-BK7[®], Suprasil[®] etc.) haben für die erforderliche Dicke einen viel zu hohen Wärmewiderstand. Diamant und Saphir erfüllen die Anforderungen, falls die Dicke des Glassubstrates minimiert wird. Aus Kosten und Verfügbarkeitsgründen wurde Saphir ausgewählt, welches eine ca. 400-fach höhere Wärmeleitfähigkeit gegenüber polymeren Werkstoffen hat. Als Dicke wurde ein Wert von 500 μm gewählt, um die erforderliche Stabilität zu gewährleisten.

In den **Abbildungen 54 a** und **54 b** ist der Aufbau der Aktorchip–Aufnahmeeinheit mit mechanischer Unterstützung und aufgelegtem Chip als Querschnitt dargestellt, wobei die Lichtabsorption entweder durch den im Quellmittel (3) vorhandenen Farbstoff erfolgt (**Abbildung 54 a**) oder durch die separate, schwarze Lichtabsorptionsschicht ((1) in **Abbildung 54 b**) stattfindet. Durch die Lichtleistung aktiv gesteuerte Aktortemperatur ist als kalter- (1) und warmer Hydrogelaktor (2) dargestellt. Die temperierte Flüssigkeit (7) fließt zwischen dem Saphirglas (6) und dem transparenten Fenster aus Kunststoff oder aus Glas (9). Der Trägersubstrat des Aktorchips (4) befindet sich direkt auf dem Saphirglas. Der Metallrahmen (5) + (8) gehört zur Aktorchip-Aufnahmeeinheit.

5.9.3 Zeitliche und räumliche Auflösung der Aktorsteuerung

Wie bereits beschrieben, wird das Temperaturprofil direkt auf der Oberfläche der Projektionsfläche ohne Quellmittel oder Hydrogelschicht aufgenommen (**Abbildung 55**). In diesem Aufbau befindet sich direkt unter der Wärmeisolationsschicht die mechanisch unterstützende Saphirglasschicht. Anhand der Aufnahmen wurde sowohl die zeitliche als auch die örtlich-laterale thermische Charakterisierung der Steuerung durchgeführt.

Die Temperatur zeigt sowohl bei der Erwärmung als auch bei der Abkühlung einen exponentiellen Zeitverlauf. Für die Funktionalität der Hydrogelaktoren ist das Erreichen der oberen Zieltemperatur von 35°C entscheidend. Beim Umschalten, um einen Aktor in den entquollenen Zustand zu bringen, ist die Zieltemperatur auf der Oberfläche der Aktorsteuerung von 35°C in unter 400 ms erreicht (**Abbildung 56 a**). Bei der Abkühlung, welche zum Prozess des

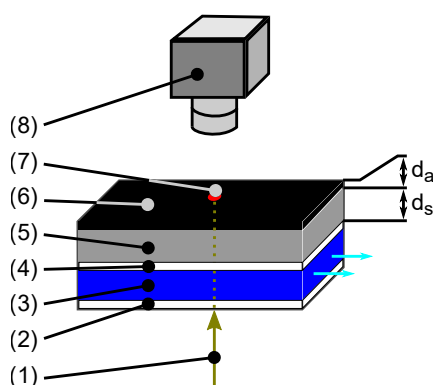


Abb. 55. Messanordnung zur Systemcharakterisierung: (1) fokussiertes Projektorlicht, (2) untere Glasschicht, (3) Temperier- bzw. Kühlflüssigkeit, (4) Saphirglasplatte, (5) Wärmeisolationsschicht, (6) Lichtabsorbierende Schicht (Projektionsschirm), (7) Temperaturprofil, (8) Thermografiekamera, d_s Dicke der wärmeisolationsschicht (Substratdicke), d_a Dicke der lichtabsorbierenden Schicht.

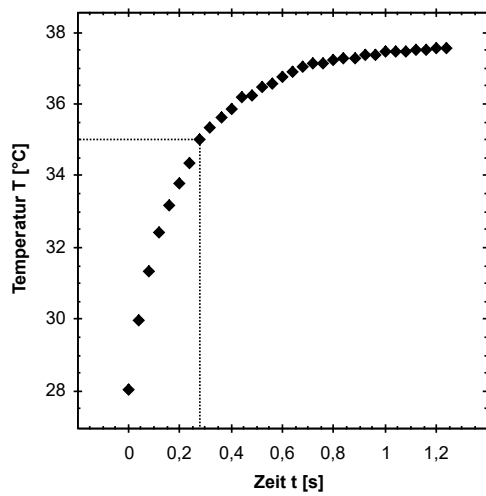


Abb. 56 a. Zeitverlauf der Erwärmung nach dem Einschalten, gemessen auf der Oberfläche der Aktorsteuerung.

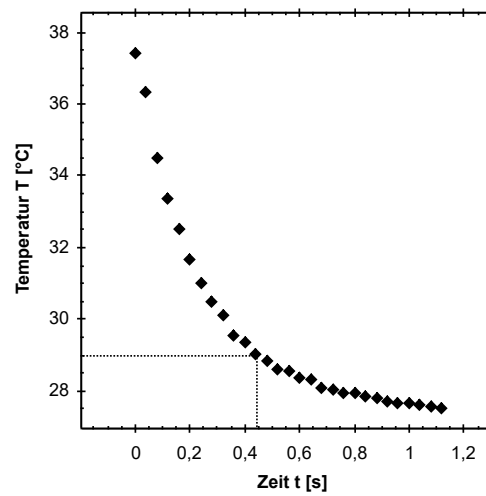


Abb. 56 b. Zeitverlauf der Abkühlung nach dem Ausschalten, gemessen auf der Oberfläche der Aktorsteuerung.

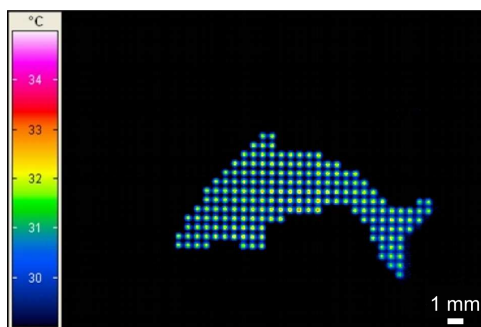


Abb. 57 a. Temperaturprofil der Wärme- steuerung zum Zeitpunkt $t = 40$ ms bereits erkennbar [78].

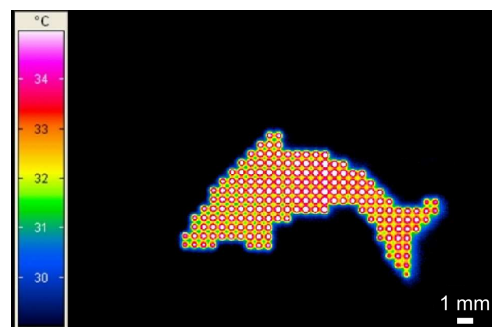


Abb. 57 b. Temperaturprofil der Wärme- steuerung zum Zeitpunkt $t = 200$ ms [78].

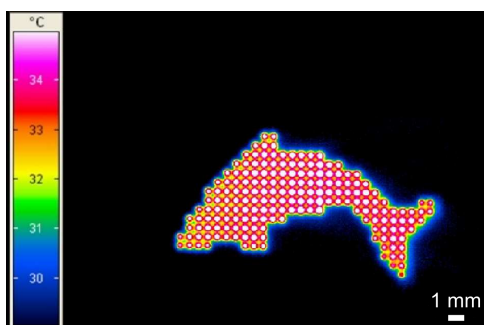


Abb. 57 c. Temperaturprofil der Wärme- steuerung zum Zeitpunkt $t = 400$ ms vollständig ausgebildet und stationär [78].

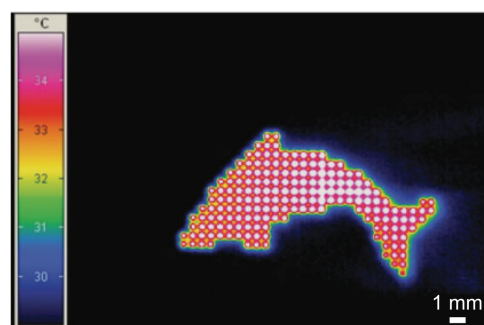


Abb. 57 d. Temperaturprofil der Wärme- steuerung zum Zeitpunkt $t = 65$ s. Steuerung ist im stationären Zustand dauerhaft stabil [78].

Umschaltens in den gequollenen Aktorzustand gehört, ist das Erreichen einer Temperatur von 29°C (oder weniger) entscheidend. Diese wird in ca. 420 ms erreicht (**Abbildung 56 b**).

Die Bildabfolge **Abbildung 57 a** bis **Abbildung 57 d** zeigt als Momentaufnahmen das örtlich-laterale Temperaturprofil der Steuerung zu den entsprechenden Zeitpunkten.

Nach 40 ms ist die Entstehung des Temperaturbildes erkennbar (**Abbildung 57 a**). Nach 200 ms hat sich das Temperaturbild fast vollständig ausgebildet (**Abbildung 57 b**). Nach 400 ms erscheint das thermische Bild bereits stabil im eingeschwungenen, stationären Zustand (**Abbildung 57 c**). Das thermische Bild nach 65 Sekunden (**Abbildung 57 d**) ist stellvertretend für eine beliebig lange Zeit und zeigt die Langzeitstabilität der Steuerung. Die erforderliche Temperaturdifferenz für die Aktorsteuerung von 6 K, die zwischen benachbarten angeschalteten und ausgeschalteten Aktoren erforderlich ist, wird erreicht. Die maximal erreichbare thermische Auflösung der Steuerung für 6 K Aktoren-Temperaturdifferenz mit diesem Setup liegt bei einem Rastermaß von $420\ \mu\text{m}$ vor.

Das Temperaturprofil zeigt die Form eines Delfins, der aus vielen einzelnen pixelartig angeordneten Teilflächen besteht. In Kapitel 6.2 wird ein Aktorarray eingeführt, in dem zu jeder dieser Teilflächen ein Aktor zugeordnet ist und die warme Teilfläche (rot) die darüberliegenden Aktoren zum Entquellen bringen. Kalte Bereiche (schwarz) sind gequollen.

Energieverbrauch

Die Aktorsteuerung erfordert für die Konfiguration von Kapitel 5.9.3 und 6.2 eine Heizleistung von bis zu $4\ \text{W cm}^{-2}$ d. h. bis zu 13,5 mW je Aktor. Die Leistungsbilanz bezieht sich auf die optische Lichtleistung und ist direkt auf zukünftige resistive Systeme übertragbar. Auf der aktiven Aktorfläche von $14,5\ \text{cm}^2$ ergibt es eine Gesamtheizleistung von 58 W, wobei die aufgebaute Aktorsteuerung auf einer Fläche von bis zu $24\ \text{cm}^2$ nutzbar ist.

5.9.4 Optische Temperaturbestimmung durch Kontrastfunktion

Als Vorbereitung für Kapitel 6.1.2 erfolgt im Folgenden die Bestimmung des funktionellen Zusammenhangs zwischen Temperatur und Graustufe der monochromen Displayfunktion.

Hochauflösende Darstellungen mittels Monochromfunktion am Display ergeben ein so fein verteiltes Temperaturfeld, dass es nicht unverfälscht durch eingebrachte Sensoren gemessen werden kann. Im Gegensatz dazu ist die Temperatur bei großflächiger Ansteuerung des Displays an allen Orten konstant und stimmt mit der am Sensor gemessenen Temperatur überein. Der funktionelle Zusammenhang der Kontrastfunktion $K(I, I_{min})$ entsteht durch Vergleich zwischen dem vom Hydrogel temperaturabhängig reflektierten Licht (**Abbildung 58**, (5)) und einem Referenzpunkt als konstant schwarzen Bereich (**Abbildung 58**, (4)), in dem das Licht von dem dahinterliegenden schwarzen Projektionsschirm absorbiert wird. Im Experiment ist die Lichtquelle so angeordnet, dass das Licht schräg einfällt. Ist das Polymermaterial bei einer höheren Temperatur opak, wird das Licht gestreut (5). Im Unterschied zu den Messwerten in Trübungsmessgeräten ermöglicht die Kontrastfunktion die thermische Auswertung von optischen Bildern und Videos, spezifisch am monochromen Display.

Die Kontrastfunktion hat u. a. den Vorteil, dass Schwankungen der Lichtquellenintensität unterdrückt werden. Die Kontrastfunktion $K(I, I_{min})$ aus Gleichung (5.13) verknüpft die optischen Eigenschaften der Hydrogemodulatoren mit der Temperatur im Inneren der Kammer. Sie entsteht durch Vergleich der Helligkeit I im untersuchten Bereich mit einem Referenzwert I_{min} - dem schwarzen und kalten Bereich. In **Abbildung 59** ist der funktionale Zusammenhang (Gleichung (5.13)) dargestellt. Hierfür wurde die Temperatur stufenweise variiert, so dass der gesamte Messbereich charakterisiert wird. Im Unterschied zu örtlich veränderlichen Temperaturfeldern, kann die Temperatur in einem großen homogenen Bereich mittels eingebrachten Temperatursensoren genau gemessen werden.

$$K(I, I_{min}) = \frac{I - I_{min}}{I + I_{min}} \quad (5.13)$$

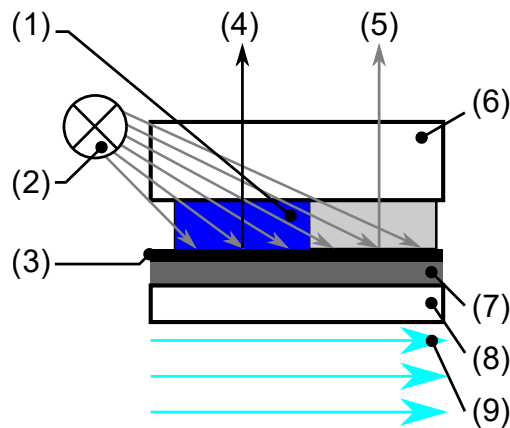


Abb. 58. Experiment zur Kontrastermittlung. (1) Aktorkammer, links transparent, rechts opak, (2) Lichtquelle mit schräg einfallendem Licht, (3) schwarze Fläche, (4) Betrachtung im transparenten, schwarzen Bereich, (5) Betrachtung im opaken Hydrogelbereich, (6) Abdeckplatte, (7) dünne Wärmeisolationsschicht, (8) Saphirglas.

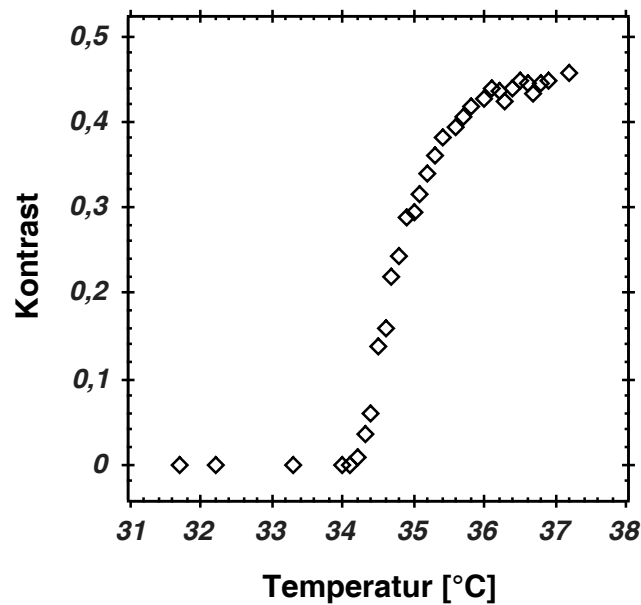


Abb. 59. Kontrastfunktion K eines temperaturgesteuerten Bereichs im Reflexionsmodus: rückreflektierte Lichtintensität in Abhängigkeit von der Temperatur. Ein transparenter, schwarzer Bereich dient als Referenz für den Kontrast.

6 Multimodales Display

Wie in den Kapiteln 1 und 3 vorgestellt, gibt es Anwendungen im taktilen Bereich, deren Realisierung im Gegensatz zu akustischen und optischen Anwendungen heute noch nicht möglich ist oder erst durch neue Massenfertigungstechnologien erschlossen werden können.

Sind für die taktile Wahrnehmung und Erkennung von BRAILLE Zeichen wie Buchstaben und Zahlen wenige Tastpunkte im Rastermaß von typischerweise 2,5 mm ausreichend, erfordert die Darstellung von taktilen Grafiken den Einsatz von höherer Auflösung auf einer größeren Fläche. Das sind Randbedingungen, die in diesem Anwendungsfeld zu einer deutlichen Erhöhung der Aktoranzahl führen. Falls die Abmessungen des Gerätes nicht um ein Vielfaches wachsen sollen, kann diese Aufgabe nur durch die Reduktion des Bauvolumens je Aktors erreicht werden. Beschreibt man ausgehend von Kapitel 3 ein ideales System zur realistischen Darstellung von Oberflächen, so hätte dieses nicht nur eine Aktordichte, die so hoch ist, dass man sie mit bisherigen Systemen nicht erreichen kann, sondern auch mehrere Modalitäten wie z. B. Elastizität und Temperatur neben der Darstellung von Form, Kontur, Textur und Vibration.

Gemessen an der Anzahl bisheriger Realisierungen aktorischer Systeme und an deren Integrationsgrad, erscheint eine aktorische Hochintegration deutlich schwieriger zu sein als in der Halbleitertechnik. Eines der wenigen Beispiele von Mikroaktorhochintegration wird als Mikrospiegelarray bei Projektorsystemen eingesetzt, um die Modulation der optischen Ausgabe jedes einzelnen Pixels durchzuführen. Der Umstand, dass in diesem Beispiel die Aktoren prinzipbedingt nicht für größere, externe mechanische Kräfte ausgelegt sind, begünstigt die Hochintegration. Die elektromechanischen taktilen Displays HyperBraille[®] der Firma Metec-AG basieren auf piezoelektrischen Biegeschwingern und sind ein zweites Beispiel für ein Serienprodukt, allerdings zum Preis eines Mittelklassewagens.

Der neue Ansatz hydrogelbasierter Aktorik löst die Schwachpunkte bestehender Aktorsysteme. Die HG-Aktoren bestehen aus einem monolithischen Material, wobei die HG-Aktorintegration mittels lithographischer Batchprozesse erfolgt. Die Entwicklung des multimodalen Displays erfolgte in mehreren Entwicklungsschritten, bezogen auf Kombinationen aus Aktorsteuerung, Aktoraufbau und abschließender elastischer Folie. Gemessen an den Definitionen der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik, werden in diesem Kapitel Module mit Aktorgroßintegration (Large Scale Integration LSI) vorgestellt, definiert als Chip mit mehr als 1.000 und bis zu 10.000 Funktionselementen [1].

6.1 Displayfunktionen

Innerhalb der taktilen Modalität ermöglicht das Display die Darstellung von Höhendifferenzen sowie von Weichheit und Härte. Die monochrome Funktionalität ermöglicht eine multisensorische Wahrnehmung.

6.1.1 Basisaktorchip als Aktorarray mit Substrat und Abdeckung

Der Verbund aus Trägersubstrat, Hydrogelarray und Abdeckfolie ist so transparent, dass man darunterliegende Farben erkennt, sofern sich kein Farbstoff im Quellmittel befindet oder ein schwarzer Absorptionsschirm eingebaut ist (**Abbildung 60**).

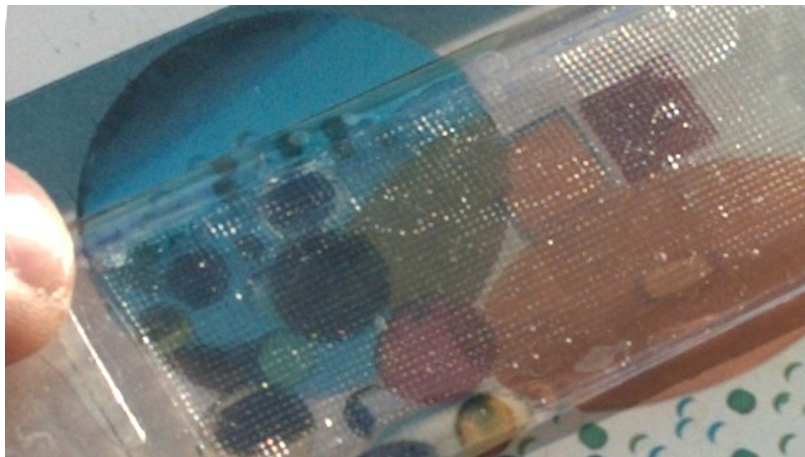


Abb. 60. *Transparenter Basisaktorchip mit Quellmittel über einer mehrfarbigen Abbildung.*

6.1.2 Monochrome Displayfunktion

Für die monochrome Displayfunktion hat der Aktorchip die Konfiguration von Kapitel 5.9.4. Direkt hinter dem aktiven Aktormaterial befindet sich die schwarze Projektionsschicht, welche darauf einfallendes Licht absorbiert. Die Charakterisierung der Temperaturverteilung ist angelehnt am Siemenssternestmuster, welches typisch für Auflösungstests optischer Systeme ist.

Um die höchstmögliche Auflösung der Monochromsteuerung feststellen zu können, wurde eine durchgängige, unstrukturierte Hydrogelschicht verwendet. Diese ist mit einer Abdeckung aus PET verschlossen. Die Zeit zwischen Zustandsänderung und der optisch sichtbaren Änderung wurde mit Hilfe von Video-Auswertung ermittelt. Ausgewählte Aufnahmen daraus sind in **Abbildung 61** dargestellt. Die Temperaturmessung erfolgt sensorlos d. h. indirekt über die

thermochrome Eigenschaften des Aktormaterials, um Verfälschungen durch zusätzlich eingebrachte Sensoren zu vermeiden.

Aus dem Ruhezustand sind die ersten Änderungen der Helligkeit 0,5 s nach dem Anschalten der Temperatursteuerung beobachtbar (a). Der Vorgang ist nach 3,1 s abgeschlossen (c). Es erscheint ein stabiles und konstantes Bild, welches dem stationären Zustand entspricht. Beim Ausschalten ist nach 0,5 s bis 0,8 s eine Änderung feststellbar (e). Das Verschwinden der weißen Farbe beginnt an den dünnsten Stellen und setzt sich in den dickeren Bereichen fort. Der Vorgang erreicht bereits nach 1,5 s einen stationären Zustand (f). Es ergibt sich eine Taktzeit von 4,6 s. Die Differenz in der Reaktionszeit zwischen Einschalt- und Ausschaltvorgang trotz gleicher thermischer Zeitkonstanten kann man dadurch erklären, dass der Erwärmungsprozess bei 26° C beginnt und bis zur deutlich sichtbaren Reaktion (Phasenübergang 34° C) eine Temperaturdifferenz von 8 K überwunden werden muss. Dagegen sind es beim Abkühlen aus der Starttemperatur von 37° C lediglich 3 K. Für den Ausschaltvorgang gilt der Zusammenhang entgegengesetzt. Die Auflösung in den Spitzen des Siemens-Sterns im eingeschwungenen Zustand hat den Temperaturbereich 34° C bis 36° C (Kapitel 5.9.4) und liegt bei 300 µm. Die Ergebnisse wurden in [79], [112] publiziert.

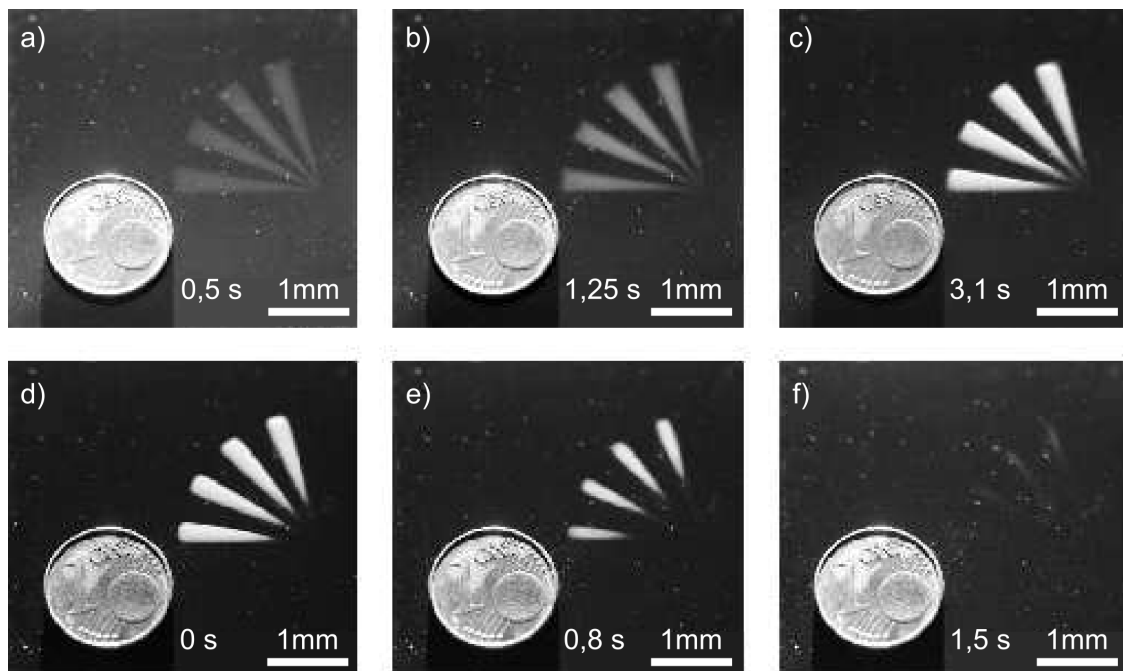


Abb. 61. *Optische Auswertung des Einschalt- und des Ausschaltvorganges im geschlossenen System mit Hilfe der thermochromen Eigenschaften der hydrogelbasierten, optischen Modulation [79].*

6.1.3 Ausgabe taktiler Oberflächeneigenschaften

Mit Hydrogelaktoren können sowohl die Kanten angrenzender Flächen als auch die Oberflächenrauigkeit dargestellt werden. Ausgehend von einer Aktormatrix, wie in **Abbildung 63** dargestellt, erfolgt die Untersuchung der taktilen Wahrnehmung zunächst direkt auf den Aktoren. Für die Konfiguration der Pilotstudie wurde gefärbtes Quellmittel zur Absorption der Lichtleistung eingesetzt (Kapitel 5.9.2, **Abbildung 54 a**).

Eine glatte, 20 μm dicke Polyethylenfolie hält das gefärbte Quellmittel im Aktorraum zurück und befindet sich zwischen den Aktoren und der abtastenden Hand des Nutzers. Somit wird ein Dreischichtaufbau realisiert: Trägersubstrat, Aktorkammervolumen mit Quellmittel und die Abschlussfolie, wie in **Abbildung 62** dargestellt.

In der rechtwinkligen Anordnung der Aktormatrix sind bei der Aktordimensionierung drei wesentliche Designparameter zur Variation des Tasteindrucks gegeben: die Aktorgröße, der Aktorabstand und die Härte jedes einzelnen Aktors. Die Parameter wurden so gewählt, dass raue und glatte Oberflächen gut unterscheidbar wiedergegeben werden können. In **Abbildung 62** sind die zwei Zustände dargestellt, die zur taktilen Ausgabe mit dieser Matrix genutzt wurden.

In **Abbildung 62a** und in **Abbildung 64 a** ist der Fall dargestellt, bei dem die Aktoren in einem relativ großen Abstand zueinander stehen. Als Aktorabstand wurde bei dieser Anordnung der Schwellwert für laterale Strukturgröße gewählt. Ab einem Abstand zwischen benachbarten Erhebungen von ca. 0,5 mm nehmen die Fingerkuppen eine deutliche Oberflächenstruktur wahr. Im Experiment wurden Aktoren mit Abmessungen von (b x h x t) 500 μm x 500 μm x 500 μm und mit Abständen von 500 μm verwendet.

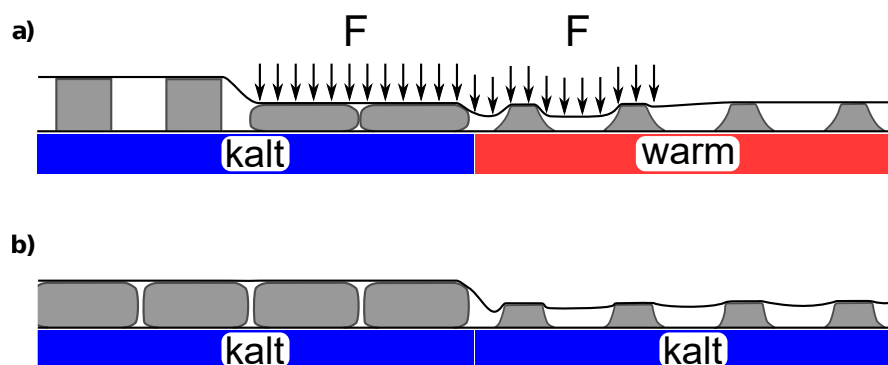


Abb. 62. Funktionsprinzip und funktionsunterstützende Möglichkeiten für Betriebsmodi a) entspricht M1 und M2 und b) M3. Abgetastete Bereiche sind durch die externe Kraft F gekennzeichnet.

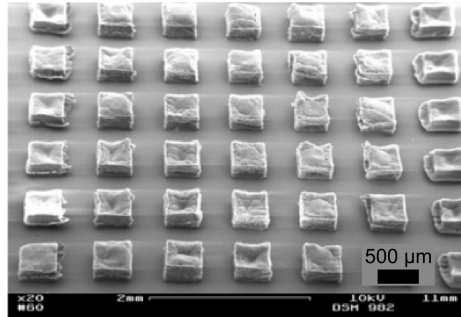


Abb. 63. REM Aufnahme der Aktormatrix mit $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ Dimensionen und $500\ \mu\text{m}$ Aktorabstand auf einem Trägersubstrat ohne Abdeckfolie [78].

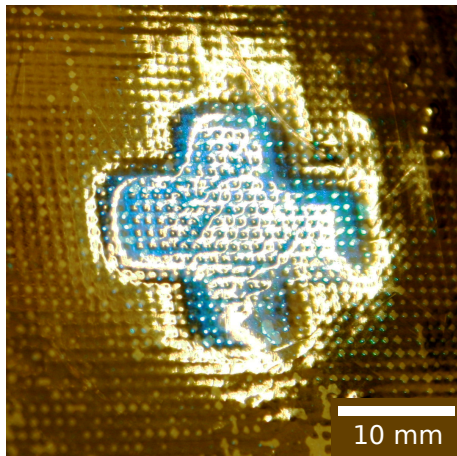


Abb. 64 a. Taktiles Display mit glatter Folie ohne Anbindung an die Aktoren im angesteuerten Zustand.

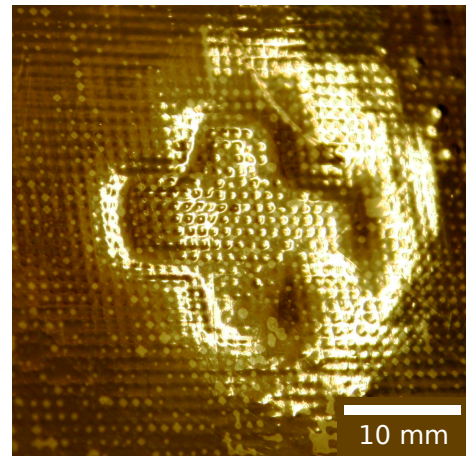


Abb. 64 b. Taktiles Display mit glatter Folie ohne Anbindung an die Aktoren im ausgeschalteten Zustand, Unterdruck friert den Zustand ein.

Zur unterscheidbaren Darstellung von glatt und rau wird technisch ausgenutzt, dass die Aktoren beim Anpressdruck eines Tastprozesses wegen ihrer Elastizität deformiert werden und der Abstand zwischen ihnen reduziert wird (in **Abbildung 62** linke Hälfte, kalter Bereich), die Oberfläche fühlt sich glatt an. Im warmen Bereich sind die Aktoren dagegen entquollen und hart. Durch die pyramidenstumpfförmige Form, die sie annehmen, erhöht sich der Abstand zwischen den Aktorspitzen auf bis zu 750 μm und sie sind als raue Fläche deutlich gegenüber der glatten Fläche unterscheidbar.

Der „Beschreibprozess“ des Displays beginnt mit Befüllung der Aktorkammer mit Quellmittel. Im zweiten Schritt wird das Quellmittel so weit evakuiert, dass die Abdeckfolie die Aktoren berührt und die Aktorsteuerung angeschaltet wird. Nur mit Evakuierung des überschüssigen Quellmittels d. h. ohne zusätzlichen Quellmittelunterdruck entspricht das einem Betriebsmodus *M1*.

Eine aktorunterstützende Funktion entsteht durch Applikation von Unterdruck an die Quellmittelversorgung, solange die Aktorsteuerung entquollene Bereiche heizt. Die Folie schmiegt sich dadurch an die Aktoren an und verbessert die Tastbarkeit. Dies entspricht dem Betriebsmodus *M2*.

Eine Funktionalität, die potentiell den Energieverbrauch reduzieren kann, entsteht durch Beibehaltung des Unterdrucks nach Abschaltung der lokalen Aktorerwärmung. Alle Bereiche kühlen ab. Wegen des Quellmittelentzugs haben die entquollenen Aktoren keine Möglichkeit zum Quellen, der Zustand ist wie eingefroren. Sowohl die gequollenen als auch die entquollenen Aktoren erweichen. Dadurch tritt der Tasteindruck der Rauheit zurück, zugunsten der lateralen Nachgiebigkeit und der Höhenunterschiede. Das entspricht dem Betriebsmodus *M3*, wie in den **Abbildungen 62b** und **64b** dargestellt.

Besonders gut spürbar sind die Eigenschaften rau und glatt sowie im erhabenen Bereich die laterale Nachgiebigkeit d. h. die Oberfläche ist etwas verschiebbar. Aufgrund der Weichheit des Hydrogelmaterials im gequollenen Zustand ist selbst eine grobe Lokalisierbarkeit der Kantenposition sehr schwierig, das Ertasten der exakten Kantenlage nicht möglich. Um die Tastbarkeit eines erhöhten Bereiches darzustellen, sind mehrere nebeneinanderliegende Zeilen (Reihen) gequollener Hydrogelaktoren erforderlich.

6.1.4 Taktile Kanten hervorhebung der Kontur

Werden benachbarte Flächen mit einer Höhendifferenz dargestellt, ist es wünschenswert, die Kante deutlich zu fühlen. Die Pilotstudie zeigt, dass eine weitere Verbesserung der Kantendarstellung erforderlich ist. Die Kanten sind sichtbar aber kaum taktil lokalisierbar. Insbesondere

um die Kantendarstellung auch bei dickeren und mechanisch stabileren Abdeckfolien zu erreichen, ist eine weitere technische Lösung erforderlich: die rechteckigen Noppen auf der Folienoberseite. Im Verhältnis zu den Hydrogelaktoren im gequollenen Zustand sind die Ecken der Noppen hart und ermöglichen die deutliche Kantenfühlbarkeit.

Die Einführung von Noppen auf der Folie führt gleichzeitig zu einer weiteren Randbedingung: eine eindeutige Aktor-Noppe Zuordnung wird erforderlich, um sicher zu stellen, dass bei taktilen Darstellungen die Stufe genau zwischen zwei Noppen platziert ist und somit die taktile Darstellung optimal ist. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde die Folie mit Haftvermittler vorbehandelt (Kapitel 4.6). Die Maske für den Lithografieprozess wurde anhand der Folie so ausgerichtet, dass die Aktoren unter den Noppen entstehen.

Die Aktor-Noppe Zuordnung ist in **Abbildung 65** dargestellt. Eine mit Noppenfolie hergestellte Probe wurde luftgetrocknet und anschließend so präpariert, dass der Aktorinnenraum sichtbar wird. Die Folie wurde entlang einer Linie abgeschnitten und der vordere Teil der Folie von den Aktoren abgetrennt (**Abbildung 66**). Die besonders gute Haftung zwischen Folie und Aktoren erkennt man unter anderem an den Bereichen, in denen Teile des Folienmaterials nicht an der Verbindung zwischen Aktormaterial und Folienmaterial, sondern ausschließlich im Folienmaterial abgerissen sind. Man erkennt an den Spitzen der Aktoren in diesen Bereichen kleine Überreste der Folie.

Die beidseitige Anbindung der Aktoren führt zu einem weiteren Vorteil: es entsteht ein definiertes Aktorkammervolumen für das Quellmittel, weil die Aktoren nach unten am Trägersubstrat und nach oben an der Folie angebinden sind und als Abstandhalter ein definiertes Quellmittelvolumen vorgeben. Das beim Entquellen freiwerdende Quellmittelvolumen wird aus der Aktorkammer herausgedrückt.

Eine weitere Verbesserung der taktilen Kantentastbarkeit von Konturen wurde durch die Reduzierung des Abstandes zwischen benachbarten Aktoren erzielt. Mit diesem Setup wurde erreicht, dass die Empfindung der Kontur gegenüber des Oberflächeneindrucks in den Vordergrund tritt.

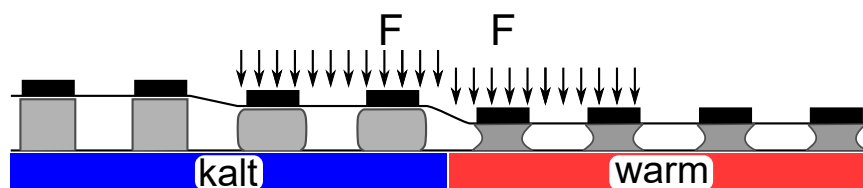


Abb. 65. Funktionsprinzip und funktionsunterstützende Möglichkeiten für Betriebsmodi M2 und M3. Folie mit funktionsunterstützenden Noppen, die Aktoren sind an Substrat und an Folie kovalent angebinden. Abgetastete Bereiche sind durch die externe Kraft F gekennzeichnet.

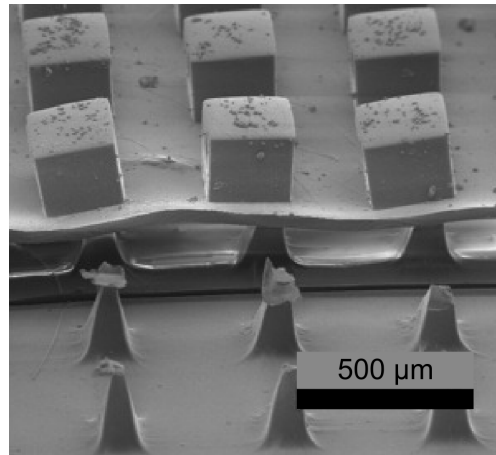


Abb. 66. Luftgetrocknete Probe. Aktorarray mit kovalenter Anbindung an Trägermaterial und an genoppte Folie mit 1:1 Zuordnung zwischen Aktor und Noppen der Folie. Im vorderen Bereich wurde die Folie für die Sichtbarkeit der Aktorebene entfernt [78].

6.2 Kombinierte Monochrom und Displacementfunktionalität

Die intermodale Wahrnehmung entsteht durch das Zusammenführen von zeitgleichen Informationen mehrerer Sinneswahrnehmungen [113]. Die gleichzeitige Nutzung von optischen und volumetrischen Eigenschaften der HG-Aktoren ermöglicht hierfür ein kombiniertes taktiles und optisches Display. Die Veränderung der Hydrogelaktorfarbe im Bereich zwischen transparent und weiß-opak ist unter der Noppenfolie sichtbar und verursacht die Monochromfunktion.

In **Abbildung 67** ist der Zustand direkt nach dem Einschaltvorgang festgehalten, bei dem das Hydrogelvolumen der warmen Bereiche in den opaken Zustand übergegangen ist. Die Delphinform ist gut erkennbar.

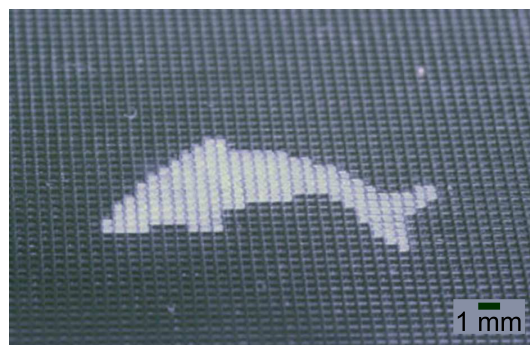


Abb. 67. Aktorarray mit Noppenfolie unmittelbar nach dem Übergang in den opaken Zustand [78].

Zum Nachweis des 3D Hubes von Aktoren wurde die Aktorgeometrie im angesteuerten Zustand vermessen. Aufgrund der geometrischen Gegebenheiten kann das Display nicht in das 3D Messgerät eingelegt werden. Für die Vermessung wurde deshalb ein Teil des Aktorarrays herausnehmbar gestaltet und auf die Methode der Gefriertrocknung zurückgegriffen. Dazu wurde es im angesteuerten Zustand in Bruchteilen einer Sekunde in Flüssigstickstoff getaucht und der Zustand eingefroren. Während der Gefriertrocknung verdunstet das Wasser, ohne in den flüssigen Zustand überzugehen d. h. die Aktorform bleibt unverändert. Im trockenen Zustand ist das Aktorvolumen dann auch bei Raumtemperatur formstabil und für 3D Untersuchung geeignet (**Abbildung 68 a**).

Die erreichte Höhendifferenz zwischen der hohen Fläche und der abgesenkten Fläche beträgt $150\ \mu\text{m}$ bei einer maximalen Aktorhöhe von $300\ \mu\text{m}$. Dieser Aktorhub ist in Verbindung mit den Noppen für die taktile Wahrnehmung der Konturkanten ausreichend.

Die Höhendifferenz zwischen der erhabenen und der abgesenkten Fläche ist auch optisch erkennbar. Die Noppen der Abdeckfolie tragen bei der optischen Betrachtung zur besseren Unterscheidbarkeit der Konturdarstellung an der Stufe zwischen den zwei unterschiedlich hohen Ebenen bei (**Abbildung 68 b**).

Das realisierte Aktivmatrixkonzept als ein Display mit mehreren Konfigurationen ist eine monolithische, oberflächenformveränderliche, multimodale Oberfläche. Mit einem Rastermaß von $580\ \mu\text{m}$ hat das Display eine Aktordichte (Gleichung (5.6)) von 297 Aktoren je Quadratzentimeter. Das vorgestellte Array hat 60×72 Aktoren, erreicht damit eine Gesamtaktorzahl von 4.320 und ist gemessen am Integrationsgrad ein LSI System. Die Ergebnisse wurden in [78], [112], [114] veröffentlicht.

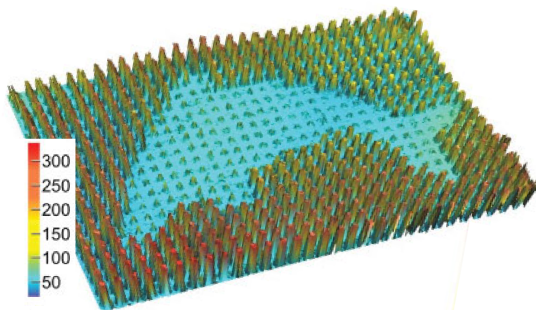


Abb. 68 a. Aktorarray im angesteuerten Zustand, Höhenmessung mittels Laserprofilometer [78].

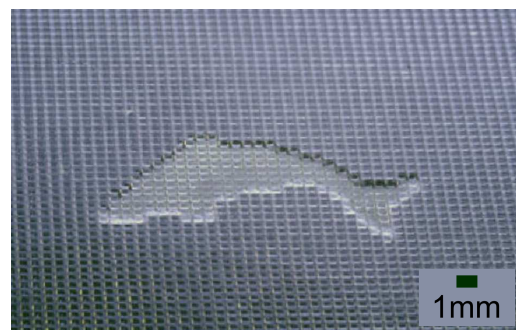


Abb. 68 b. Taktiles Display mit kovalent angebundener Noppenfolie im angesteuerten Zustand kurz nach dem Ausschalten [78].

7 Zusammenfassung

Großintegrierte aktorische Mikrosysteme konnten bislang nur für spezielle Problemstellungen realisiert werden, sind dort aber außerordentlich wirkmächtig. So bilden digitale Spiegelarrays die technische Grundlage für die leistungsfähigsten Projektionssysteme etwa in Kinos und die maskenlose Lithografie oder ermöglichen als großintegrierte Labs-on-a-Chip biochemische Analysen mit einem bislang unerreichten Durchsatz.

Ein weiteres relevantes Einsatzgebiet solcher Systeme sind Mensch-Maschine-Schnittstellen und multimodale Displaytechnik, welche in den letzten Jahren enorme Entwicklungssprünge erfuhr. Visuelle Displays sind flach und riesig, 3D-Displays Technikstand, Dolby Surround kein Problem. In den letzten Jahren rückt der haptische Datenkanal immer stärker in den Interessensfokus. Hier sind u. a. taktile Displays interessant, welche vielfältige Impressionen zu den Oberflächeneigenschaften virtueller Objekte vermitteln können. Diese sind technologisch jedoch sehr schwierig zu realisieren. Das aktuelle Spitzensystem ist das BRAILLE-Display HyperBraille[®] mit 120 x 60 (7.200) BRAILLE-Stiften und einem Stiftraster von 2,5 mm. Dies ist ein grafisches Display für Sehbehinderte und kostet so viel wie ein Mittelklassewagen. Die Kosten- und Integrationsprobleme mechatronischer Konzepte lassen sich potenziell durch monolithische Schaltkreistechnologien lösen, da dort die Vorteile einer Batchfertigung zum Tragen kommen. Die vorliegende Dissertation leistet einen Beitrag zu den materiellen, technologischen und systemtechnischen Grundlagen einer monolithischen Großflächen-Schaltkreis-Technologie auf Basis stimuli-sensitiver Hydrogele, welche die Festkörpermaterialien mit der größten technisch nutzbaren Volumenänderung sind.

In Arbeiten zur Materialbasis wurden die wesentlichen Syntheseparameter, mit denen man die mechanischen, aktorischen und dynamischen Eigenschaften des Hydrogels Poly(*N*-Isopropylacrylamid) (PNIPAAm) beeinflussen kann, hinsichtlich ihrer Relevanz untersucht und Optimierungsansätze für das aktive Material abgeleitet. Dabei spielen neben der Präpolymerlösungszusammensetzung besonders die Syntheseparameter Polymerisationszeit, Polymerisationstemperatur und Restsauerstoffgehalt wesentliche Rollen.

Für die Batch-Fabrikation tausender Hydrogelaktoren auf einem Substrat ist die Leistungsfähigkeit des Mikrostrukturierungsverfahrens von herausragender Bedeutung. Anders als bei stark vernetzten Resistmaterialien führen bei der Strukturierung von Hydrogelschichten schon geringe Belichtungsinhomogenitäten und Temperaturschwankungen zu bedeutenden, inakzeptablen Schwankungen der Aktoreigenschaften über die Substratfläche. Deshalb wurde eine Belichtungsanlage konzipiert und realisiert, welche bei reduzierter Wärmebeeinträchtigung für ein rechteckiges Belichtungsfeld von 5 cm Kantenlänge eine Belichtungshomogenität von bis zu

99 % Homogenität ermöglicht. Dies erwies sich als geeignete Basis für die Realisierung von Aktorarrays mit reproduzierbaren und homogenen Aktoreigenschaften über die gesamte Substratfläche. Dabei konnte ein minimales Rastermaß von 200 μm bei minimalen Aktorabmessungen von 100 μm erreicht werden.

Da die angestrebten Displays zu groß für normale 3 oder 4-Zoll-Standardwafer-Prozesse waren, mussten Alternativtechnologien zur Strukturierung der Kanäle in großformatige Substrate entwickelt werden. Letztlich konnte eine Mehrlagen-Replikationstechnologie auf Basis großformatiger Printed Circuit Boards entwickelt werden, mit der auch komplizierte Kanalstrukturen bestehend aus bis zu vier gestapelten Resistebenen einer maximalen Substratgröße von (200 x 150) mm^2 mit verfügbaren Inhouse-Equipment gefertigt werden konnten. Der Technologieknoten dieser Technik liegt bei 150 μm .

Von zentraler Bedeutung für großintegrierte Systeme ist ein leistungsfähiges Steuerungssystem mit einem genügend großen Adressraum, um tausende Aktoren individuell steuern zu können. Da der aktorische Werkstoff PNIPAAm ein temperatursensitives Hydrogel mit LCST-Charakteristik ist, wurde ein elektrothermischer, genauer einen optoelektrothermischer Controller konzipiert und umgesetzt. Dieser besteht aus einem Starklicht-Projektionssystem, welches das Licht auf ein schwarzes Substrat projiziert, sodass es in Wärme umgewandelt wird, und einem aktiven Kühlungssystem, welches leistungsstark genug ist, entstehende überschüssige Wärme zuverlässig abzuführen. Aufgrund des Volumenphasenübergangs-Verhaltens der Hydrogelaktoren reicht eine Temperaturdifferenz von 6 K aus, um diesen vom vollständig gequollenen zum völlig entquollenen Zustand zu schalten. Damit konnte ein Rastermaß von 480 μm bei einem maximalen Adressraum für bis zu 10.416 Aktoren realisiert werden. Für die visuelle Monochromfunktion des Displays im Rastermaß von 300 μm kann der Adressraum der thermischen Steuerung bis zu 26.667 Pixel steuern.

Zur Fertigung des kompletten Displays wurde eine Packaging-Technologie für die verschiedenen Funktionsebenen entwickelt. Letzte technische Herausforderung war aber die eigentliche Nutzerschnittstelle des Displays in Form einer dünnen, elastischen strukturierten Abdeckfolie. Aus funktionellen und Stabilitätsgründen musste diese kovalent an die Aktoren des aktiven Arrays angebunden werden, was mit Einsatz eines Haftvermittlers gelang. Als Resultat liegt ein Display mit 60 x 72 (4.320) Taxel, einem Rastermaß von 580 μm und einer Aktordichte von 297 Taxel pro cm^2 vor.

Die Anwendungsuntersuchungen ergaben, dass das Display deutlich mehr Modalitäten aufweist als jedes bisherige taktile Display. Obwohl es ein statisches Displacement-Display ist, besitzt es eine visuelle Monochromfunktion und bietet Impressionen zur Oberflächenweichheit, Texturen,

Reliefs und Kanten, die sämtlich sehr gut fühlbar sind. Dies liegt zum einen an seinem Prinzip als statisches Displacement-Display, welches die Oberflächeneigenschaften realistisch nachbildet, und zum anderen an seiner bislang für taktile Displays unerreichten Taxeldichte.

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass auf Grundlage temperatursensitiver Hydrogele großintegrierte Mikroaktordisplays mit monolithischem Aufbau und den resultierenden Vorteilen einer Batchfertigung realisierbar sind. Es weist die mit Abstand größte Integrationsdichte taktiler Displays auf und kann hinsichtlich des Integrationsgrades sehr gut skaliert werden. Es ist zudem hinsichtlich der darstellbaren Modalitäten das bislang vielseitigste Konzept taktiler Displays.

8 Ausblick

Die geschilderten Arbeiten dienen hauptsächlich der Prinzipientwicklung monolithischer großintegrierter Aktorschaltkreise. Wesentliche Funktionsgruppen sind deshalb noch nicht weit genug entwickelt, um dem vorgestellten Konzept tatsächliche Anwendungsrelevanz zu verleihen. Wesentlicher Schwerpunkt weiterführender Arbeiten sollte die drastische Reduzierung der Leistungsaufnahme des Aktorcontrollers sein, die gegenwärtig 5 kW für den Videoprojektor beträgt und einer breiten Nutzbarkeit im Wege steht. Eine direkte Taxelsteuerung über Heizelementmatrizen z. B. in Transistorform würde diese um mindestens eine Größenordnung senken können, auch deutlich größere Integrationsdichten wären damit erreichbar.

Für die taktile Displayfunktion ist zudem die Konstruktion einer robusten Nutzerschnittstelle erforderlich. Die bisherige 35 μm dicke strukturierte PDMS-Folie besitzt nicht die erforderliche Resistenz gegenüber einer Dauernutzung.

Darüber hinaus wurden die Modalitäten des Displays nur oberflächlich untersucht. Um sein reales Potenzial zuverlässig abschätzen zu können, sind weiterführende tiefgründige Untersuchungen in Zusammenarbeit mit Wahrnehmungspsychologen notwendig.

Können die genannten Probleme erfolgreich gelöst werden, so eröffnen großintegrierte Großflächendisplays vielfältige neue Möglichkeiten. Aufgrund ihrer prinzipiellen Transparenz lassen sie sich mit herkömmlichen Farbdisplays kombinieren und führen dort den letzten noch fehlenden Datenkanal, den haptischen Kanal, ein, was die Darstellungs- und Präsentationsmöglichkeiten noch einmal stark erweitert. Die Fähigkeit, in Echtzeit Impressionen zu Oberflächeneigenschaften virtueller Objekte zu vermitteln, ist insbesondere für Ansätze der Virtuellen und Erweiterten Realitäten von Interesse. In parallelen Arbeiten bilden taktile Oberflächen zentrale Bausteine sogenannter haptischer 4D-Displays, die virtuelle Objekte in Echtzeit so materialisieren können, dass die Realität von der Virtualität vom Menschen nicht mehr unterschieden werden kann. Solche Mensch-Maschine-Interaktionssysteme bieten in vielfältigen Anwendungsfeldern inklusive Medizintechnik, Teleoperation, Raum- und Luftfahrt sowie Robotik völlig neue Möglichkeiten.

Sowohl die leistungsfähige Temperaturfeldsteuerung als auch das Konzept aktorischer Großflächenarrays sind für wichtige Wachstumstechnologien der Lebenswissenschaften hochinteressant. Sie ermöglichen u. a. die Realisierung frei programmierbarer Labs-on-a-Chip, die aufgrund ihrer extremen Flexibilität für vielfältige analytische und diagnostische Anwendungen, aber auch für Untersuchungen an Zellkulturen prädestiniert sind. Sie sind Gegenstand der parallel laufenden Dissertation von R. Körbitz.

Auch die Organ-on-Chip-Plattform kann von den Möglichkeiten einer frei programmier- und jederzeit adaptierbaren Mikrofluidik profitieren. Bislang ist es kaum möglich, die Konfiguration entsprechender Chips während des Experiments zu verändern. Mit aktorischen Größflächenarrays lassen sich dynamische Vorgänge in das Experiment integrieren und erlauben so das Design gänzlich neuer Versuchskonzepte.

An letzter Stelle, aber nicht zuletzt bietet der Temperaturfeld-Controller u. a. die Möglichkeit, anspruchsvolle dynamische Versuchsszenarien für mikrorobotische Strukturen und Mikroschwimmer zu kreieren, indem stabile, frei geformte oder veränderliche Temperaturgradienten erzeugt werden.

Literatur

- [1] K. Wüst, “Halbleiterbauelemente”, in *Mikroprozessortechnik: Grundlagen, Architekturen, Schaltungstechnik und Betrieb von Mikroprozessoren und Mikrocontrollern*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2011, S. 19–30, ISBN: 978-3-8348-9881-4. DOI: 10.1007/978-3-8348-9881-4_3.
- [2] J. Melin und S. R. Quake, “Microfluidic large-scale integration: the evolution of design rules for biological automation”, *Annu. Rev. Biophys. Biomol. Struct.*, Jg. 36, Nr. 1, S. 213–231, Juni 2007. DOI: 10.1146/annurev.biophys.36.040306.132646.
- [3] H. O. Handwerker und M. Schmelz, *Physiologie des Menschen*. Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 273–295, Editor: Schmidt, Robert F. and Lang, Florian. DOI: 10.1007/978-3-540-32910-7_13.
- [4] A. El Saddik, M. Orozco, M. Eid und J. Cha, *Haptics technologies: bringing touch to multimedia*. Springer Science & Business Media, 2011, S. 145–182. DOI: 10.1007/978-3-642-22658-8_6.
- [5] R.-D. Treede, *Physiologie des Menschen*. Springer Berlin Heidelberg, 2007, S. 296–323, Editor: Schmidt, Robert F. and Lang, Florian. DOI: 10.1007/978-3-540-32910-7_14.
- [6] M. Grunwald, *Human haptic perception: Basics and applications*. Springer Science & Business Media, 2008, Bd. 5. DOI: 10.3389/fpsyg.2014.00292.
- [7] H. Handwerker, *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 203–228, Editor: Schmidt, F. and Schaible, H.-G. DOI: 10.1007/978-3-642-01651-6_13.
- [8] B. Benoist und T. Kosler, *Entwicklung Haptischer Geräte: Ein Einstieg für Ingenieure, ein innovatives Konzept für den Elementarbereich*. Springer-Verlag, März 2008, S. 91–106. DOI: 10.2307/j.ctvddzxxz4.8.
- [9] K. Miller und M. Curet, “Intuitive Surgical: An Overview”, in *Robotic-Assisted Minimally Invasive Surgery : A Comprehensive Textbook*. Cham: Springer International Publishing, 2019, Bd. 12, S. 3–11, ISBN: 978-3-319-96866-7. DOI: 10.1007/978-3-319-96866-7_1.
- [10] T. Tokuyasu, K. Yufu, T. Shuto, N. Abe und A. Marui, “Development of an inheritance assist system for experiencing operation skills by using a haptic function of PHAN-ToM”, *Artificial Life and Robotics*, Jg. 15, Nr. 2, S. 195–198, 2010. DOI: 10.1007/s10015-010-0789-4.

- [11] A. Peer, B. Stanczyk und M. Buss, “Haptic telemanipulation with dissimilar kinematics”, in *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, IEEE, Bd. 20, 2005, S. 3493–3498. DOI: 10.1163/156855306778792461.
- [12] L. Massari, J. D’Abbraccio, L. Baldini, F. Sorgini, G. A. Farulla, P. Petrovic, E. Palermo und C. M. Oddo, “Neuromorphic haptic glove and platform with gestural control for tactile sensory feedback in medical telepresence applications”, in *2018 IEEE International Symposium on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, IEEE, 2018, S. 1–6. DOI: 10.1109/memea.2018.8438597.
- [13] A. Stilli, A. Cremoni, M. Bianchi, A. Ridolfi, F. Gerii, F. Vannetti, H. A. Wurdemann, B. Allotta und K. Althoefer, “AirExGlove—A novel pneumatic exoskeleton glove for adaptive hand rehabilitation in post-stroke patients”, in *2018 IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, IEEE, 2018, S. 579–584. DOI: 10.1109/robosoft.2018.8405388.
- [14] C. G. Rose und M. K. O’Malley, “Hybrid Rigid-Soft Hand Exoskeleton to Assist Functional Dexterity”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Jg. 4, Nr. 1, S. 73–80, 2019. DOI: 10.1109/lra.2018.2878931.
- [15] R. J. Stone, “Haptic feedback: a brief history from telepresence to virtual reality”, in *Haptic Human-Computer Interaction*, S. Brewster und R. Murray-Smith, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001, S. 1–16, ISBN: 978-3-540-44589-0. DOI: 10.1007/3-540-44589-7_1.
- [16] M. Hong, J. W. Rozenblit und A. J. Hamilton, “Virtual Reality Surgical Simulation: Implications for Resection of Intracranial Gliomas”, in *Intracranial Gliomas Part I-Surgery*, Bd. 30, Karger Publishers, 2018, S. 106–116. DOI: 10.1007/s10055-020-00469-z.
- [17] Y.-Y. Juo, A. Abiri, J. Pensa, S. Sun, A. Tao, J. Bisley, W. Grundfest und E. Dutton, “Evaluating tactile feedback in robotic surgery for potential clinical application using an animal model”, *Surgical Endoscopy*, Jg. 30, Nr. 8, S. 3198–3209, Aug. 2016. DOI: 10.1007/s00464-015-4602-2.
- [18] A. Hamed, S. C. Tang, H. Ren, A. Squires, C. Payne, K. Masamune, G. Tang, J. Mohammadpour und Z. T. H. Tse, “Advances in haptics, tactile sensing, and manipulation for robot-assisted minimally invasive surgery, noninvasive surgery, and diagnosis”, *Journal of Robotics*, Jg. 2012, S. 1–14, 2012. DOI: 10.1155/2012/412816.

- [19] A. Maritzen und N. Kamps, “Blindenhilfen zum Lesen und Schreiben”, in *Rehabilitation bei Sehbehinderung und Blindheit*, Springer, 2013, S. 173–200. DOI: 10.1007/978-3-642-29869-1_8.
- [20] A. Maritzen und N. Kamps, *Rehabilitation bei Sehbehinderung und Blindheit*. Springer-Verlag, 2013, S. 75–105. DOI: 10.1007/978-3-642-29869-1_5.
- [21] W. Jo u. a., “Introduction of 3D Printing Technology in the Classroom for Visually Impaired Students.”, *Journal of Visual Impairment & Blindness*, Jg. 110, Nr. 2, S. 115–121, 2016. DOI: 10.1177/0145482x1611000205.
- [22] G. Loeschcke, L. Marx und D. Pourat, *Barrierefreies Bauen Band 1: Kommentar zu DIN 18040-1, Kommentar zu DIN EN 1994-1-1 Ausgabe Dezember 2010*. Beuth Verlag, 2011, Bd. 1, S. 87–329. DOI: 10.1002/9783433607701.ch2.
- [23] F. Vidal-Verdú und M. Hafez, “Graphical tactile displays for visually-impaired people”, *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, Jg. 15, Nr. 1, S. 119–130, 2007. DOI: 10.1109/tnsre.2007.891375.
- [24] S. Ino, S. Shimizu, T. Odagawa, M. Sato, M. Takahashi, T. Izumi und T. Ifukube, “A tactile display for presenting quality of materials by changing the temperature of skin surface”, in *Robot and Human Communication, 1993. Proceedings., 2nd IEEE International Workshop on*, Bd. 30, 1993, S. 220–224. DOI: 10.9746/sicetr1965.30.345.
- [25] A. Yamamoto, B. Cros, H. Hashimoto und T. Higuchi, “Control of thermal tactile display based on prediction of contact temperature”, in *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004*, IEEE, Bd. 2, IEEE, 2004, S. 1536–1541. DOI: 10.1109/robot.2004.1308042.
- [26] H. Kajimoto, N. Kawakami, T. Maeda und S. Tachi, “Tactile feeling display using functional electrical stimulation”, in *Proc. 1999 ICAT*, Bd. 85, 1999, S. 133. DOI: 10.1002/ecjb.10056.
- [27] M. Tyler, K. Kaczmarek und P. Bach-y-Rita, “A microfabricated electrocutaneous tactile display”, Magisterarb., University of Illinois at Urbana-Champaign, Juni 2000, S. 169–186. DOI: 10.1201/9781410608888.pt2.
- [28] K. A. Kaczmarek, J. G. Webster, P. Bach-y-Rita und W. J. Tompkins, “Electrotactile and vibrotactile displays for sensory substitution systems”, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, Jg. 38, Nr. 1, S. 1–16, 1991. DOI: 10.1109/10.68204.

- [29] V. Levesque, J. Pasquero und V. Hayward, “Tactile display device using distributed lateral skin stretch”, in *Proceedings of the haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems symposium*, Citeseer, Bd. 69, IEEE, März 2000, S. 1309–1314. DOI: 10.1109/whc.2007.25.
- [30] Y. Gaffary, F. Argelaguet, M. Marchal, A. Girard, F. Gosselin, M. Emily und A. Lé-cuyer, “Toward Haptic Communication: Tactile Alphabets Based on Fingertip Skin Stretch”, *IEEE Transactions on Haptics*, Jg. 11, Nr. 4, S. 636–645, Okt. 2018. DOI: 10.1109/TOH.2018.2855175.
- [31] S. O’Modhrain, N. A. Giudice, J. A. Gardner und G. E. Legge, “Designing media for visually-impaired users of refreshable touch displays: Possibilities and pitfalls”, *IEEE transactions on haptics*, Jg. 8, Nr. 3, S. 248–257, 2015. DOI: 10.1109/toh.2015.2466231.
- [32] F. Vidal-Verdu und M. Hafez, “Graphical Tactile Displays for Visually-Impaired People”, *Neural Systems and Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on*, Jg. 15, Nr. 1, S. 119–130, 2007. DOI: 10.1109/tnsre.2007.891375.
- [33] D. Prescher, “Taktile Interaktion auf flächigen Brailledisplays, Taktile Benutzungsoberflächen für blinde Menschen”, *Informatik-Spektrum*, Jg. 40, Nr. 6, S. 573–581, Sep. 2016. DOI: 10.1007/s00287-017-1067-9.
- [34] *Modul B11 der Firma Metec.*
- [35] N. Blattner, *Modul P16 der Firma Metec*, 1977. DOI: 10.1007/978-3-642-66750-3_2.
- [36] N. Torras Andrés, “Smart Opto-mechanical actuators for tactile applications, Gas-Pressure Molding-Based Fabrication of Smart LCE Actuators”, *Macromolecular Materials and Engineering*, Jg. 299, Nr. 10, S. 1163–1169, Mai 2014. DOI: 10.1002/mame.201300462.
- [37] J. H. Killebrew, S. J. Bensmaïa, J. F. Dammann, P. Denchev, S. S. Hsiao, J. C. Craig und K. O. Johnson, “A dense array stimulator to generate arbitrary spatio-temporal tactile stimuli”, *Journal of neuroscience methods*, Jg. 161, Nr. 1, S. 62–74, März 2007. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2006.10.012.
- [38] H. Sasaki, M. Shikida und K. Sato, “A force transmission system based on a tulip-shaped electrostatic clutch for haptic display devices”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Jg. 16, Nr. 12, S. 2673, 2006. DOI: 10.1088/0960-1317/16/12/021.

- [39] I. R. Summers und C. M. Chanter, “A broadband tactile array on the fingertip”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, Jg. 112, Nr. 5, S. 2118–2126, 2002. DOI: 10.1121/1.1510140.
- [40] M. Matysek, P. Lotz und H. F. Schlaak, “Miniaturised electrostatic tactile display with high structural compliance”, in *Proceedings of the Conference Eurohaptics*, Y. Bar-Cohen und T. Wallmersperger, Hrsg., SPIE, März 2002. DOI: 10.1117/12.819217.
- [41] X. Wu, H. Zhu, S.-H. Kim und M. G. Allen, “A Portable Pneumatically-Actuated Refreshable Braille Cell”, in *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, 2007. TRANSDUCERS 2007. International*, IEEE, 2007, S. 1409–1412. DOI: 10.1109/sensor.2007.4300407.
- [42] H. Ishizuka und N. Miki, “MEMS-based tactile displays”, *Displays*, Jg. 37, S. 25–32, 2015. DOI: 10.1016/j.displa.2014.10.007.
- [43] J. S. Lee und S. Lucyszyn, “A micromachined refreshable braille cell”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Jg. 14, Nr. 4, S. 673–682, Aug. 2005. DOI: 10.1109/JMEMS.2005.845415.
- [44] M. Matysek, P. Lotz und H. F. Schlaak, *Tactile display with dielectric multilayer elastomer actuators*, Y. Bar-Cohen und T. Wallmersperger, Hrsg., März 2009. DOI: 10.1117/12.819217.
- [45] R. Vitushinsky, S. Schmitz und A. Ludwig, “Bistable Thin-Film Shape Memory Actuators for Applications in Tactile Displays”, *Journal of Microelectromechanical Systems*, Jg. 18, Nr. 1, S. 186–194, Feb. 2009. DOI: 10.1109/JMEMS.2008.2009816.
- [46] J. M. Loomis, “Tactile pattern perception”, *Perception*, Jg. 10, Nr. 1, S. 5–27, Feb. 1981. DOI: 10.1068/p100005.
- [47] D. Wood, “Editorial Tactile displays: present and future”, *Displays*, Jg. 18, Nr. 3, S. 125–128, 1998. DOI: 10.1016/s0141-9382(98)00012-2.
- [48] W. Müller, S. Frings, W. Müller und S. Frings, *Tier- und Humanphysiologie*. Springer Berlin Heidelberg, 2009, S. 403–420. DOI: 10.1007/978-3-642-00462-9_12.
- [49] F. Lang und P. Lang, “Basiswissen Physiologie”, in *Springer-Lehrbuch*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007, Kap. Somatoviszzerale Sensorik, S. 367–387. DOI: 10.1007/978-3-540-71402-6_16.
- [50] V. G. Chouvardas, A. N. Miliou und M. K. Hatalis, “Tactile displays: Overview and recent advances”, *Displays*, Jg. 29, Nr. 3, S. 185–194, Juli 2008. DOI: 10.1016/j.displa.2007.07.003.

- [51] K. Li, Y. Fang, Y. Zhou und H. Liu, “Non-invasive stimulation-based tactile sensation for upper-extremity prosthesis: a review”, *IEEE Sensors Journal*, Jg. 17, Nr. 9, S. 2625–2635, 2017. DOI: 10.1109/jsen.2017.2674965.
- [52] A. P. Sripathi, S. J. Bensmaia und K. O. Johnson, “A continuum mechanical model of mechanoreceptive afferent responses to indented spatial patterns”, *Journal of neurophysiology*, Jg. 95, Nr. 6, S. 3852–3864, Juni 2006. DOI: 10.1152/jn.01240.2005.
- [53] M. Biet, F. Giraud und B. Lemaire-Semail, “Squeeze film effect for the design of an ultrasonic tactile plate”, *Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, IEEE Transactions on*, Jg. 54, Nr. 12, S. 2678–2688, 2007. DOI: 10.1109/tuffc.2007.596.
- [54] J. Scheibert, S. Leurent, A. Prevost und G. Debregeas, “The Role of Fingerprints in the Coding of Tactile Information Probed with a Biomimetic Sensor”, *Science*, Jg. 323, Nr. 5920, S. 1503–1506, März 2009. DOI: 10.1126/science.1166467.
- [55] H. Kajimoto, “Electro-tactile display with tactile primary color approach”, *Graduate School of Information and Technology, The University of Tokyo*, S. 79–96, 2004. DOI: 10.1007/978-4-431-55772-2_5.
- [56] M. Tyler, K. Kaczmarek und P. Bach-y-Rita, “Tactile displays”, *Virtual environments and advanced interface design*, S. 349–414, Juni 1995. DOI: 10.1201/9781410608888.pt2.
- [57] M. Shikida, T. Imamura, S. Ukai, T. Miyaji und K. Sato, “Fabrication of a bubble-driven arrayed actuator for a tactile display”, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Jg. 18, Nr. 6, S. 065 012, Juni 2008. DOI: 10.1088/0960-1317/18/6/065012.
- [58] K. Johnson, “The roles and functions of cutaneous mechanoreceptors”, *Current opinion in neurobiology*, Jg. 11, Nr. 4, S. 455–461, Aug. 2001. DOI: 10.1016/s0959-4388(00)00234-8.
- [59] K. Choe, K. J. Kim, D. Kim, C. Manford, S. Heo und M. Shahinpoor, “Performance Characteristics of Electro-chemically Driven Polyacrylonitrile Fiber Bundle Actuators”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Jg. 17, Nr. 7, S. 563–576, Juli 2006. DOI: 10.1177/1045389x06059074.
- [60] S. Bhansali und A. Vasudev, *Mems for Biomedical Applications (Woodhead Publishing Series in Biomaterials)*. Woodhead Publishing, 2012, ISBN: 978-0857091291. DOI: 10.1533/9780857096272.

- [61] J. E. Huber, N. A. Fleck und M. F. Ashby, “The selection of mechanical actuators based on performance indices”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Jg. 453, Nr. 1965, S. 2185–2205, 1997. DOI: 10.1098/rspa.1997.0117.
- [62] T. Tanaka und D. J. Fillmore, “Kinetics of swelling of gels”, *The Journal of Chemical Physics*, Jg. 70, Nr. 3, S. 1214–1218, Feb. 1979. DOI: 10.1063/1.437602.
- [63] A. Voigt und A. Richter, “Polymer Gels as EAPs: Fundamentals”, *Electromechanically Active Polymers: A Concise Reference*, S. 3–26, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-31530-0_1.
- [64] M. Ebara, Y. Kotsuchibashi, K. Uto, T. Aoyagi, Y.-J. Kim, R. Narain, N. Idota und J. M. Hoffman, “Smart Biomaterials”, in. Tokyo: Springer Japan, 2014, Kap. Smart Hydrogels, S. 9–65, Smart Hydrogels Kapitel bookchapter, ISBN: 978-4-431-54400-5. DOI: 10.1007/978-4-431-54400-5_2.
- [65] M. Bahram, N. Mohseni und M. Moghtader, “An introduction to hydrogels and some recent applications”, in *Emerging concepts in analysis and applications of hydrogels*, IntechOpen, 2016. DOI: 10.5772/64301.
- [66] N. Das, “Preparation methods and properties of hydrogel: A review”, *Int. J. Pharm. Pharm. Sci.*, Jg. 5, Nr. 3, S. 112–117, Jan. 2013. DOI: 10.3139/146.110895.
- [67] S. Hirotsu, “Softening of bulk modulus and negative Poisson’s ratio near the volume phase transition of polymer gels”, *The Journal of Chemical Physics*, Jg. 94, Nr. 5, S. 3949–3957, März 1991. DOI: 10.1063/1.460672.
- [68] F. T. Wall, “Statistical thermodynamics of rubber”, *The Journal of Chemical Physics*, Jg. 10, Nr. 2, S. 132–134, Dez. 1942. DOI: 10.5254/1.3543168.
- [69] F. T. Wall, “Statistical thermodynamics of rubber. III”, *The Journal of Chemical Physics*, Jg. 11, Nr. 11, S. 527–530, Juni 1943. DOI: 10.5254/1.3546659.
- [70] J. J. Hermans, “Deformation and swelling of polymer networks containing comparatively long chains”, *Transactions of the Faraday Society*, Jg. 43, S. 591–600, 1947. DOI: 10.1039/tf9474300591.
- [71] F. T. Wall und P. J. Flory, “Statistical thermodynamics of rubber elasticity”, *The Journal of Chemical Physics*, Jg. 19, Nr. 12, S. 1435–1439, Dez. 1951. DOI: 10.1063/1.1748098.

- [72] T. Tanaka, L. O. Hocker und G. B. Benedek, "Spectrum of light scattered from a visco-elastic gel", *The Journal of Chemical Physics*, Jg. 59, Nr. 9, S. 5151–5159, Nov. 1973. DOI: 10.1063/1.1680734.
- [73] E. M. LIFSHITZ, A. M. KOSEVICH und L. P. PITAEVSKII, "Chapter I-Fundamental equations", *Theory of elasticity*, S. 1–37, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-25521-8>.
- [74] T. Schmidt, J. I. Mönch und K.-F. Arndt, "Temperature-Sensitive Hydrogel Pattern by Electron-Beam Lithography", *Macromolecular Materials and Engineering*, Jg. 291, Nr. 7, S. 755–761, 2006. DOI: 10.1002/mame.200600057.
- [75] D. Kuckling, H.-J. P. Adler, K.-F. Arndt, J. Hoffmann, M. Plötner und T. Wolff, "Photocrosslinking of thin films of temperature-sensitive polymers", *Polymers for Advanced Technologies*, Jg. 10, Nr. 6, S. 345–352, Juni 1999. DOI: 10.1002/(sici)1099-1581(199906)10:6<345::aid-pat885>3.0.co;2-n.
- [76] A. Heilig, N. Bârsan, U. Weimar, M. Schweizer-Berberich, J. W. Gardner und W. Göpel, "Gas identification by modulating temperatures of SnO₂-based thick film sensors", *Sensors and Actuators B: Chemical*, Jg. 43, Nr. 1, S. 45–51, Sep. 1997. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(97\)00096-8](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(97)00096-8).
- [77] S. M. T. Anton A. Darhuber, "Generation of high-resolution surface temperature distributions", *American Institute of Physics*, Jg. 91, S. 5686–5693, 2002. DOI: 10.1063/1.1465506.
- [78] A. Richter und G. Paschew, "Optoelectrothermic Control of Highly Integrated Polymer-Based MEMS Applied in an Artificial Skin", *Advanced Materials*, Jg. 21, Nr. 9, S. 979–983, 2008. DOI: 10.1002/adma.200802737.
- [79] G. Paschew, R. Körbitz und A. Richter, "Multimodal, High-Resolution Imaging System Based on Stimuli-Responsive Polymers", *Advances in Science and Technology*, Jg. 82, S. 44–49, Sep. 2012. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.82.44.
- [80] K. Deng, M. Rohn und G. Gerlach, *Hydrogel sensors and actuators: engineering and technology*. Springer Science & Business Media, Nov. 2009, Bd. 6, S. 900–908. DOI: 10.1016/j.snb.2016.03.060.
- [81] H. H. Winter, "The critical gel", in *Structure and Dynamics of Polymer and Colloidal Systems*, Springer, Okt. 2002, S. 439–470. DOI: 10.1002/0471440264.pst476.

- [82] Y. Liu, B. Momani, H. H. Winter und S. L. Perry, “Soft polymeric materials near the transition from liquid to solid state”, *Korea-Australia Rheology Journal*, Jg. 11, Nr. 4, S. 275–278, 1999. DOI: 10.1039/c7sm01285c.
- [83] G. Whitesides und D. Wolfe, “Rapid prototyping of functional microfabricated devices by soft lithography”, *Nanolithography and Patterning Techniques in Microelectronics*, S. 76–119, Okt. 2005. DOI: 10.1201/9781439823651.ch3.
- [84] N. J. D. Wright, *The Photo-Mask Guide*, 1. Lulu Press, Inc., Feb. 2013, Bd. 1, S. 1–8. DOI: 10.24966/ppp-5649/100001.
- [85] D. Singh, D. Kuckling, V. Choudhary, H.-J. Adler und V. Koul, “Synthesis and characterization of poly (N-isopropylacrylamide) films by photopolymerization”, *Polymers for advanced technologies*, Jg. 17, Nr. 3, S. 186–192, 2006. DOI: 10.1002/pat.713.
- [86] A. Richter, “Quellfähige Polymernetzwerke als Aktor-Sensor-Systeme für die Fluidtechnik”, Diss., Technische Universität Dresden, 2002, S. 66–68. DOI: 10.1515/bmt.2005.011.
- [87] G. Paschew, “Entwicklung eeine hochaufgelösten taktilen Displays”, Magisterarb., Technische Universität Dresden, März 2006.
- [88] S. Haefner, M. Rohn, P. Frank, G. Paschew, M. Elstner und A. Richter, “Improved PNIPAAm-Hydrogel Photopatterning by Process Optimisation with Respect to UV Light Sources and Oxygen Content”, *Gels*, Jg. 2, Nr. 1, S. 10, 2016. DOI: 10.3390/gels2010010.
- [89] A. Richter, G. Paschew, S. Klatt, J. Lienig, K.-F. Arndt und H.-J. Adler, “Review on Hydrogel-based pH Sensors and Microsensors”, *Sensors*, Jg. 8, Nr. 12, S. 561–581, Jan. 2008. DOI: 10.3390/s8010561.
- [90] T. Okajima, I. Harada, K. Nishio und S. Hirotsu, “Kinetics of volume phase transition in poly (N-isopropylacrylamide) gels”, *The Journal of chemical physics*, Jg. 116, Nr. 20, S. 9068–9077, 2002. DOI: 10.1063/1.1473655.
- [91] A. B. Imran, T. Seki und Y. Takeoka, “Recent advances in hydrogels in terms of fast stimuli responsiveness and superior mechanical performance”, *Polymer journal*, Jg. 42, Nr. 11, S. 839–851, 2010. DOI: 10.1038/pj.2010.87.
- [92] W. Xue, S. Champ und M. B. Huglin, “New superabsorbent thermoreversible hydrogels”, *Polymer*, Jg. 42, Nr. 5, S. 2247–2250, März 2001. DOI: 10.1016/s0032-3861(00)00550-4.

- [93] Y. Kaneko, S. Nakamura, K. Sakai, T. Aoyagi, A. Kikuchi, Y. Sakurai und T. Okano, “Rapid deswelling response of poly (N-isopropylacrylamide) hydrogels by the formation of water release channels using poly (ethylene oxide) graft chains”, *Macromolecules*, Jg. 31, Nr. 18, S. 6099–6105, 1998. DOI: 10.1021/ma971899g.
- [94] L.-W. Xia, R. Xie, X.-J. Ju, W. Wang, Q. Chen und L.-Y. Chu, “Nano-structured smart hydrogels with rapid response and high elasticity”, *Nature communications*, Jg. 4, 2013. DOI: 10.1038/ncomms3226.
- [95] X.-Z. Zhang und C.-C. Chu, “Synthesis of temperature sensitive PNIPAAm cryogels in organic solvent with improved properties”, *Journal of Materials Chemistry*, Jg. 13, Nr. 10, S. 2457–2464, 2003. DOI: 10.1039/b304429g.
- [96] X.-Z. Zhang, F.-J. Wang und C.-C. Chu, “Thermoresponsive hydrogel with rapid response dynamics”, *Journal of Materials science: Materials in medicine*, Jg. 14, Nr. 5, S. 451–455, 2003. DOI: 10.1007/s00396-003-0983-1.
- [97] N. Morimoto, T. Ohki, K. Kurita und K. Akiyoshi, “Thermo-Responsive Hydrogels with Nanodomains: Rapid Shrinking of a Nanogel-Crosslinking Hydrogel of Poly (N-isopropyl acrylamide)”, *Macromolecular Rapid Communications*, Jg. 29, Nr. 8, S. 672–676, 2008. DOI: 10.1002/marc.200700864.
- [98] Y. Liu, M. Zhu, X. Liu, W. Zhang, B. Sun, Y. Chen und H.-J. P. Adler, “High clay content nanocomposite hydrogels with surprising mechanical strength and interesting deswelling kinetics”, *Polymer*, Jg. 47, Nr. 1, S. 1–5, Jan. 2006. DOI: 10.1016/j.polymer.2005.11.030.
- [99] B. Ferse, S. Richter, F. Eckert, A. Kulkarni, C. M. Papadakis und K.-F. Arndt, “Gelation Mechanism of Poly (N-isopropylacrylamide)- Clay Nanocomposite Hydrogels Synthesized by Photopolymerization”, *Langmuir*, Jg. 24, Nr. 21, S. 12 627–12 635, Nov. 2008. DOI: 10.1021/1a802162g.
- [100] T. Serizawa, K. Wakita und M. Akashi, “Rapid deswelling of porous poly (N-isopropylacrylamide) hydrogels prepared by incorporation of silica particles”, *Macromolecules*, Jg. 35, Nr. 1, S. 10–12, 2002. DOI: 10.1021/ma011362+.
- [101] S. Brittain, K. Paul, X.-M. Zhao und G. Whitesides, “Soft lithography and microfabrication”, *Physics World*, Jg. 11, Nr. 5, S. 31, 1998. DOI: 10.1088/2058-7058/11/5/30.

- [102] T. Köckritz, R. Luther, G. Paschew, I. Jansen, A. Richter, O. Jost, A. Schönecker und E. Beyer, “Full Polymer Dielectric Elastomeric Actuators (DEA) Functionalised with Carbon Nanotubes and High-K Ceramics”, *Micromachines*, Jg. 7, Nr. 10, S. 172, 2016. DOI: 10.3390/mi7100172.
- [103] C. Schünemann, “Grundlegendes zur Speicherhierarchie”, in *Data Base Systems*, H. Hasselmeier und W. G. Spurth, Hrsg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1976, S. 114–138, ISBN: 978-3-540-38130-3. DOI: 10.1007/3-540-07612-3_4.
- [104] G. de Villiers und E. R. Pike, *The Limits of Resolution*. CRC Press, 2016. DOI: 10.1201/9781315366708.
- [105] G. Hauske, *Systemtheorie der visuellen Wahrnehmung*. Springer-Verlag, 2013, S. 49–60. DOI: 10.7788/9783412501754.49.
- [106] W. Jaklitsch, *Handbuch der Laufbildfotografie*. Springer-Verlag, 2011, S. 383–390. DOI: 10.1007/978-3-642-19844-1_37.
- [107] F. Tao, P. Hiralal, L. Ren, Y. Wang, Q. Dai, G. A. J. Amaratunga und H. Zhou, “Tuning the peak position of subwavelength silica nanosphere broadband antireflection coatings”, *Nanoscale Research Letters*, Jg. 9, Nr. 1, S. 361, Juli 2014. DOI: 10.1186/1556-276X-9-361.
- [108] N. Bahlawane, “Carbon Nanotube-Based Super Black coatings for Stray Light Mitigation”, *Juniper Online Journal Material Science*, Jg. 3, Nov. 2017. DOI: 10.19080/JOJMS.2017.03.555609.
- [109] Ö. Duyar, F. Placido und H. Z. Durusoy, “Design and preparation of antireflection and reflection optical coatings”, *Turkish Journal of Physics*, Jg. 28, Nr. 2, S. 139–144, 2004. DOI: 10.1364/oic.2007.tuepdp1.
- [110] Y. Sun, J. M. Hollerbach und S. A. Mascaro, “Measuring fingertip forces by imaging the fingernail”, in *2006 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, IEEE, Bd. 55, Institute of Electrical und Electronics Engineers (IEEE), Okt. 2006, S. 125–131. DOI: 10.1109/tbme.2008.925691.
- [111] A. Cirillo, F. Ficuciello, C. Natale, S. Pirozzi und L. Villani, “A conformable force/tactile skin for physical human–robot interaction”, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Jg. 1, Nr. 1, S. 41–48, 2015. DOI: 10.1109/lra.2015.2505061.

- [112] G. Paschew, R. Körbitz und A. Richter, “Multimodal, High-Resolution Imaging System Based On Stimuli-Responsive Polymers”, in *Advances in Science and Technology*, Trans Tech Publ, Bd. 82, 2013, S. 44–49. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AST.82.44.
- [113] K. Hille, P. Evanschitzky und A. Bauer, *Das Kind-die Entwicklung in den ersten drei Jahren*. hep der Bildungsverlag, 2016, S. 131–148. DOI: 10.1515/9783110532609-007.
- [114] G. Paschew und A. Richter, “High-resolution tactile display operated by an integrated Smart Hydrogel actuator array”, in *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2010*, International Society for Optics und Photonics, Bd. 7642, 2010, S. 764 234. DOI: 10.1117/12.848811.

Abbildungsverzeichnis

1	Kinästhetisches System PHANToM im Einsatz [10]	7
2	Computersimulation eines virtuellen Objektes, dessen Oberflächen im Abtastbereich verformbar sind [10]	7
3	Kinästhetische Systeme in der Ausführung als Exoskelett für die Hand mit Kräfteübertragung an die Finger [14]	7
4	Professor Massimo Bergamasco aus der Scuola Superiore di Studi Universitari in Pisa, Italien und sein Prototyp eines am Arm befestigten Exoskeletts [15]	7
5	NeuroTouch Plattform für Simulation und simulationsbasierte Trainings in der Gehirnchirurgie [16]	8
6a	Greifer mit integriertem, wasserdichten Sensor [17]	10
6b	Kutanes Ausgabegerät: taktiles, pneumatisches Ballon-Feedbacksystem [17][17]	10
6c	Kutanes Display montiert auf eine da Vinci Steuerung [17]	10
6d	Einsatz des Systems bei Operation als Tierexperiment und Nachweis der Reduktion von Gewebeschäden [17]	10
7	In Papier geprägte BRAILLE-Schrift [20]	11
8	Manuelles Prägen von BRAILLE-Schrift [20]	11
9	Taktile Grafik [21]	11
10	BRAILLE-Zeile [20]	11
11	BRAILLE-Modul der Firma Metec AG [34], [35]	14
12	HyperBraille® Gerät der Firma Metec AG [20]	14
13	Elektromagnetisches Nadelarray [37]	17
14	Elektromagnetisches Nadelarray, Schnittstelle zum Finger des Users[37]	17
15	Aufbau der FGL-Aktoren und Darstellung mit darüberliegendem Pin-Array [45]	17
16	Fertigung der FGL-Aktoren auf einem Träger [45]	17
17	Sensoren der Haut	19
18a	Darstellungsraum vibrotaktile Geräte als Projektion auf dem Farbraum [55]	22
18b	Frequenzabhängiger Empfindlichkeitsschwellwert der Hautsensoren [55]	22
19	Kraft-Verformungskennlinie der Fingerkuppe [57]	23
20	Räumliches Auflösungsvermögen der Hautsensoren, Darstellung der Intensität der Sensorantwort (Anzahl Impulse) in Abhängigkeit von der Spaltbreite [58]	24
21	Übersicht der Aktor-Funktionprinzipien [59], [60]	25
22	Modellpartikel mit idealer Kugelform	33
23	Aufbau eines Gassensors nach [76]	39
24	Allgemeiner Aufbau der thermischen Ansteuerung	41
25	Textbeschreibung Inhaltsverzeichnis	47
26	Herstellerangaben zur Homogenität	48

Abbildungsverzeichnis

27	Messpfade im belichteten Bereich: 0 °, 30 °, 60 °, 90 °	49
28	Gemessene Intensität im belichteten Bereich	49
29	Einfluss des Vernetzergehaltes auf den Quellungsgrad	52
30	Temperaturabhängigkeit der Synthese	55
31	Abhängigkeit der Synthese-Polymerisationszeit von der Temperatur	55
32	Einfluss der Belichtungsintensität auf die Polymerisationszeit	56
33	Anordnung zur Kammerbefüllung unter Schutzgasatmosphäre	59
34	Anordnung zur UV-Belichtung	60
35	Einfluss der Belichtungszeit auf die Struktur	61
37	Quellungsgleichgewichtsmessung einer zylindrischen Hydrogelscheibe	66
38	Charakteristischer Temperaturverlauf der Ansteuerung gefüllt mit Quellmittel Wasser . .	70
39 a	Quellverhalten eines Aktors aus entquollenem Zustand bis zum Gleichgewichtszustand bei 28° C	72
39 b	Quellverhalten des Aktors bei periodischer Ansteuerung mit Quellzeit von 50 s	72
39 d	Quellverhalten von PNIPAAm dargestellt als Volumenquellungsfaktor normiert auf die entquollene Größe bei 34° C	72
40	Master für die Herstellung funktionalisierter Folien	76
41	Vergößerung des fein strukturierten Bereiches	76
42	Folie nach der Herstellung	78
43 a	Ausschnitt der fein verzweigten mikrofluidischen Struktur zur Quellmittelversorgung . .	79
43 b	Gesamtansicht des mikrofluidischen Layers des intermodalen Displays	79
44	Schnittbild einer Ausführung der mechanischen Aktorchip- Aufnahmeeinheit mit Temperiermedium und Mikroaktorarray	81
45	Experimentaufbau der optischen Aktorstuerung	83
46	Abhängigkeit zwischen dem Wert der Graustufen (Grauwert) und der relativen Intensität auf der Projektionsfläche	86
47	Messaufbau mit Darstellung der Einzelkomponenten	86
48	Rastermaß von Aktoren und Ansteuerung	88
49	Beispiel für ein Temperaturprofil mit 6 K Temperaturhub	90
50	Schichtmodell der thermischen Steuerung	91
51	Homogene Temperaturansteuerung	93
52	Temperaturhub vs. Isolationsschichtdicke	95
53	Grenzauflösung und Isolationsschichtdicke	95
54 a	Schnittbild der mechanischen Aktorchipaufnahmeeinheit mit Temperiermedium und Mikroaktorarray, Generation 1	96
54 b	Schnittbild der mechanischen Aktorchip- Aufnahmeeinheit mit Temperiermedium und Mikroaktorarray, Generation 2	96

Abbildungsverzeichnis

55	Messanordnung zur Systemcharakterisierung	97
56 a	Zeitverlauf der Erwärmung nach dem Einschalten, gemessen auf der Oberfläche der Aktorstuerung	98
56 b	Zeitverlauf der Abkühlung nach dem Ausschalten, gemessen auf der Oberfläche der Aktorstuerung	98
57 a	Temperaturprofil der Wärmesteuerung zum Zeitpunkt $t = 40$ ms bereits erkennbar [78] .	98
57 b	Temperaturprofil der Wärmesteuerung zum Zeitpunkt $t = 200$ ms [78]	98
57 c	Temperaturprofil der Wärmesteuerung zum Zeitpunkt $t = 400$ ms vollständig ausgebildet und stationär [78]	98
57 d	Temperaturprofil der Wärmesteuerung zum Zeitpunkt $t = 65$ s, beliebig lange stabil im statilären Zustand [78]	98
58	Experiment zur Kontrastermittlung.	101
59	Kontrastfunktion K eines temperaturgesteuerten Bereichs im Reflexionsmodus	101
60	Transparenter Basisaktorchip mit Quellmittel über einer mehrfarbigen Abbildung	103
61	Optische Auswertung des Einschalt- und des Ausschaltvorganges im geschlossenen System mit Hilfe der thermochromen Eigenschaften der hydrogelbasierten, optischen Modulation [79]	104
62	Funktionsprinzip und funktionsunterstützende Möglichkeiten	105
63	REM Aufnahme der Aktormatrix mit $500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m} \times 500 \mu\text{m}$ Dimensionen und $500 \mu\text{m}$ Aktorabstand auf einem Trägersubstrat ohne Abdeckfolie [78]	106
64 a	Taktiler Display mit glatter Folie ohne Anbindung an die Aktoren im angesteuerten Zustand	106
64 b	Taktiler Display mit glatter Folie ohne Anbindung an die Aktoren im ausgeschalteten Zustand, Unterdruck friert den Zustand ein	106
65	Funktionsprinzip und funktionsunterstützende Möglichkeiten für Betriebsmodi M2 und M3. Abgetastete Bereiche sind durch die externe Kraft F gekennzeichnet	108
66	Luftgetrocknete Probe. Aktorarray mit kovalenter Anbindung an Trägermaterial und an genoppte Folie mit 1:1 Zuordnung zwischen Aktor und Noppen der Folie [78]	109
67	Aktorarray mit Noppenfolie unmittelbar nach dem Übergang in den opaken Zustand [78]	109
68 a	Aktorarray im angesteuerten Zustand, Höhenmessung mittels Laserprofilometer[78] . . .	110
68 b	Taktiler Display mit kovalent angebundener Noppenfolie im angesteuerten Zustand [78]	110

Tabellenverzeichnis

1	Somatosensorische Rezeptoren mit der Submodalität Propriozeption [5]	5
2	Kommerzielle wiederbeschreibbare Displays für die grafische taktile Ausgabe [32], [33]	13
3	Kommerzielle vibrotaktile Displays [32]	13
4	Technische Eigenschaften von Stiftplatten der Firma Metec AG als Beispiel für wichtige Leistungsparameter grafischer taktiler Displays, entnommen aus D. Prescher [33]	14
5	Leistungsparameter von Antrieben für taktile Displays, dargestellt nach Funktionsprinzip	16
6	Frequenzbereich des Stimulus und Bedeutung für die Wahrnehmung [46], [47]	18
7	Oberflächensensibilität: Somatosensorische Rezeptoren und Submodalitäten [5], [28], [49]–[51]	20
8	Aktoranforderungen und Performance-Index	27
9	Vergleich der Trägersubstratwerkstoffe	44
10	Maskenart und Toleranz [84]	50
11	Übersicht der Maskenarten, Quelle: Produkte und Preise von Photo Data sowie Produkt- informationen [84], (*) der höhere Preis beinhaltet auch größere Masken	50
12	Beispiel dynamischer Parameter eines Hydrogelaktors	73
13	Spezialfälle: Gebräuchliche Muster für Auflösungsstests	90