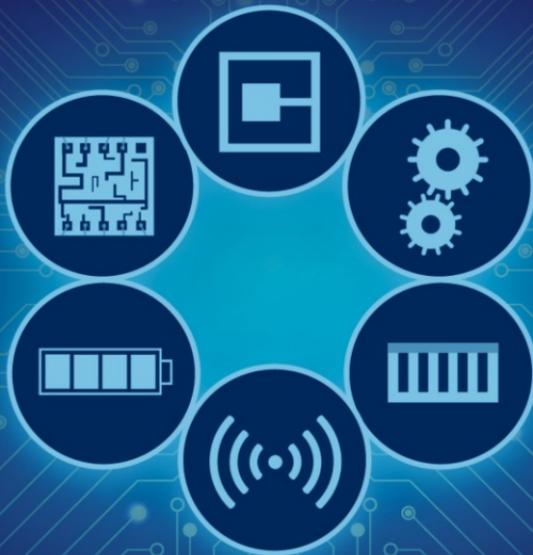


Stephanus Büttgenbach

Mikrosystem- technik – Vom Transistor zum Biochip



Springer

Technik im Fokus

Weitere Bände zur Reihe finden Sie unter
<http://www.springer.com/series/8887>

Stephanus Büttgenbach

Mikrosystemtechnik

Vom Transistor zum Biochip

 Springer

Stephanus Büttgenbach
Institut für Mikrotechnik,
Technische Universität Braunschweig
Braunschweig, Deutschland

„Konzeption der Energie-Bände in der Reihe Technik im Fokus: Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak, Institut für Regenerative Energiesysteme, Hochschule Nordhausen“

ISSN 2194-0770

Technik im Fokus

ISBN 978-3-662-49772-2

DOI 10.1007/978-3-662-49773-9

ISSN 2194-0789 (electronic)

ISBN 978-3-662-49773-9 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

Vorwort

In der Science-Fiction-Kultserie *Star Trek – Raumschiff Enterprise* aus den 1960er-Jahren benutzt der Schiffsarzt Dr. McCoy einen medizinischen Tricorder, um Verletzungen zu untersuchen, Krankheitserreger nachzuweisen und lebenswichtige Körperfunktionen seiner Patientinnen und Patienten zu überwachen. Der medizinische Tricorder ist ein handliches, multifunktionales Analysegerät und verfügt über eine Vielzahl von SENSOREN und einen Mikrocomputer, um biomedizinische Daten zu erfassen. Die *Star Trek*-Erzählungen bieten faszinierende Darstellungen fiktiver Technologien, die zumindest teilweise auf wissenschaftlichen Prinzipien beruhen. So ist es nicht verwunderlich, dass einige technische Visionen aus der Serie real wurden, wie beispielsweise die handlichen, aufklappbaren Kommunikatoren oder die Flachbildschirme für die Raumschiff-zu-Raumschiff-Kommunikation. Ein medizinischer Tricorder wurde bislang noch nicht realisiert, aber miniaturisierte, multifunktionale Analysegeräte für eine patientennahe Labordiagnostik sind ein Schwerpunkt aktueller Forschung in der MIKROSYSTEMTECHNIK.

Diese Beispiele zeigen zwei wichtige Trends der Technik auf: Multifunktionalität und Miniaturisierung. Beide Trends kennzeichnen die Entwicklung der Mikrosystemtechnik seit den 1980er-Jahren. Davon handelt dieses Buch. Es soll technikinteressierten Leserinnen und Lesern einen Einblick in das rasch wachsende Gebiet der Mikrosystemtechnik geben, das für die Zukunft unserer innovationsabhängigen Wirtschaft eine große Bedeutung hat. Es soll weder Lehrbuch noch systematische Übersichtsarbeit sein. Es stellt an Hand von zehn Meilensteinen die Entwicklung dar von der Erfindung des TRANSISTORS bis hin zu BIOCHIPS,

mit denen Laboruntersuchungen außerhalb eines Zentrallabors in unmittelbarer Nähe zum Patienten durchgeführt werden können.

Die Darstellung legt großen Wert auf die Prozesstechnologien, die in hohem Maße Funktion und Qualität der MIKROSYSTEME bestimmen. In Boxen werden die im Haupttext besprochenen Inhalte durch Beispiele verdeutlicht. Am Ende eines jeden Kapitels wird der Inhalt kurz zusammengefasst und spezielle Literatur angeführt. Die Literaturangaben verweisen zum einen auf verwendete Quellen. Zum anderen geben sie für Leserinnen und Leser, die das besprochene Thema weiter vertiefen wollen, Hinweise auf entsprechende Publikationen. Dabei handelt es sich zumeist um englischsprachige Originalveröffentlichungen. Bei Internetquellen ist das Datum des letzten Aufrufs angegeben. Gelöschte Internetlinks können häufig in Archiven wiedergefunden werden wie zum Beispiel <https://archive.org/web/>. Ein Glossar, das Erläuterungen zu wichtigen Begriffen enthält, und eine Auswahl von Lehrbüchern und weiterführender Literatur finden sich am Ende des Buches. Glossar-begriffe sind bei ihrem ersten Auftreten im Text in Kapitälchen gesetzt.

Dem Springer-Verlag und insbesondere Frau Eva Hestermann-Beyerle und Frau Birgit Kollmar-Thoni danke ich für die Anregung zu dieser Monographie und die kooperative und hervorragende verlegerische Betreuung. Herzlich bedanke ich mich bei Frau Dr.-Ing. Stefanie Demming und Frau Dr.-Ing. Monika Leester-Schädel für die kritische Lektüre des Manuskriptes und viele äußerst wertvolle Anmerkungen. Für verbleibende Fehler und Mängel bin natürlich ausschließlich ich selbst verantwortlich.

Braunschweig, im Mai 2016

Stephanus Büttgenbach

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
	Literatur	11
2	Transistoren und Siliziumtechnologie	13
	Literatur	34
3	Der piezoresistive Effekt	37
	Literatur	41
4	Volumenmikromechanik	43
	Literatur	53
5	LIGA-Verfahren	55
	Literatur	63
6	Oberflächenmikromechanik	65
	Literatur	73
7	Reaktives Ionentiefenätzen	75
	Literatur	80
8	Softlithografie	81
	Literatur	87
9	Mikrofluidische Chips und Chip-Labore	89
	Literatur	104

10	Direkte Methoden der Mikrostrukturierung	107
	Literatur	115
11	Mikro-Nano-Integration	117
	Literatur	125
12	Ausblick	127
	Literatur	133
	Glossar	137
	Weiterführende Literatur	145
	Sachverzeichnis	147

Die Anforderungen an technische Produkte steigen stetig. Sie sollen bezüglich Funktionalität, Zuverlässigkeit und Energieeffizienz innovativ, wettbewerbsfähig und gleichzeitig kostengünstig sein. Dies ist nur möglich, wenn Mechanik, Elektronik und Informationstechnik interdisziplinär zusammenwirken. Für dieses Zusammenwirken hat sich seit den 1970er-Jahren ausgehend von Japan das Kunstwort Mechatronik (zusammengesetzt aus **Mechanik** und **Elektronik**) durchgesetzt. Eindrucksvolle Beispiele für die Leistungsfähigkeit der Mechatronik sind elektronische Stabilitätsprogramme in der Fahrzeugtechnik, Roboter in der Automatisierungstechnik, CD/DVD-Player und Digitalkameras im Konsumgüterbereich und Videoendoskope in der Medizintechnik.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts wurden mechanische Komponenten in rein mechanischen Produkten zunehmend durch elektrische und elektronische Komponenten ersetzt. Ein Beispiel hierfür ist der manuelle Filmtransport mit einem Aufzugshebel in Analogkameras, der zunehmend von einem elektronisch gesteuerten Motorantrieb verdrängt wurde. Die Entwicklung der Mikrocomputertechnik seit den 1970er-Jahren erlaubte überdies, Funktionen von der Elektronik in die Software zu verlagern. In Box 1.1 ist am Beispiel vollmechanischer und elektronischer Uhren die Entwicklung von der Mechanik zur Mechatronik dargestellt.

Box 1.1 Von der mechanischen Uhr zur Funkuhr

Eine Uhr besitzt vier wesentliche Teile, was auch in Abb. 1.1 dargestellt ist. Die Abbildung lehnt sich an eine ähnliche Darstellung der Entwicklung von der mechanischen zur digitalen Spiegelreflexkamera in der Arbeit von Jansen 2007 [1] an. Der Gangregler bildet mit seinen regelmäßigen Schwingungen die Grundlage der Zeitmessung. Aus dem Energiespeicher wird dem Gangregler Energie zugeführt. Damit werden die unvermeidlichen Reibungsverluste kompensiert. Die Übersetzung überträgt die Energie vom Energiespeicher zum Schwingungssystem. Die Zahl der Schwingungen wird schließlich analog oder digital angezeigt. Diese vier Funktionen sind in einer mechanischen Uhr durch Unruh und Feder oder durch Pendel und Gewicht, durch das Räderwerk und durch die Zeiger mit Zifferblatt realisiert. Die elektronische Uhr (Quarzuhr) nutzt einen Schwingquarz als Gangregler, wobei die schnellen Schwingungen des Quarzkristalls (32.768 pro Sekunde) mit Hilfe einer elektronischen Schaltung auf eine Schwingung pro Sekunde heruntertransformiert werden. Eine Batterie bildet den Energiespeicher, ein Schrittmotor dient als Übersetzung und die Anzeige erfolgt wie bei der mechanischen Uhr mit Zeigern und Zifferblatt. Bei einer digitalen Uhr mit Flüssigkristallanzeige (LCD, Liquid Crystal Display) entfallen Zeiger und Zifferblatt.

Eine Funkuhr empfängt das Signal eines Zeitzeichensenders, zum Beispiel des Langwellensenders DCF-77 in Mainflingen bei Frankfurt, der die gesetzliche Zeit für Deutschland sendet. Das Zeitsignal wird mit Hilfe eines Mikrocontrollers entschlüsselt und zur Anzeige verwendet. Außerhalb des Empfangsbereiches des Zeitzeichensenders oder bei gestörtem Signal läuft die Funkuhr weiter wie eine normale Quarzuhr. Eine Funkuhr mit analoger Anzeige basiert also auf mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Funktionen. Durch den Ersatz mechanischer durch elektronische und informationstechnische Prinzipien ergeben sich deutlich verbesserte Eigenschaften, wie eine geringere Gangabweichung, kleinerer Bauraum, weitgehende Wartungsfreiheit, kein Nachstellen oder Umstellen von Sommer- auf Winterzeit (Funkuhr). Bei Quarz- und Funkuhren, die mit Solarzellen be-

trieben werden, entfällt der „lästige“ Austausch der Batterie. Ein Energiespeicher ermöglicht den Lauf und die Zeitanzeige auch bei Dunkelheit, wobei Dunkellaufzeiten von über einem Jahr Stand der Technik sind.

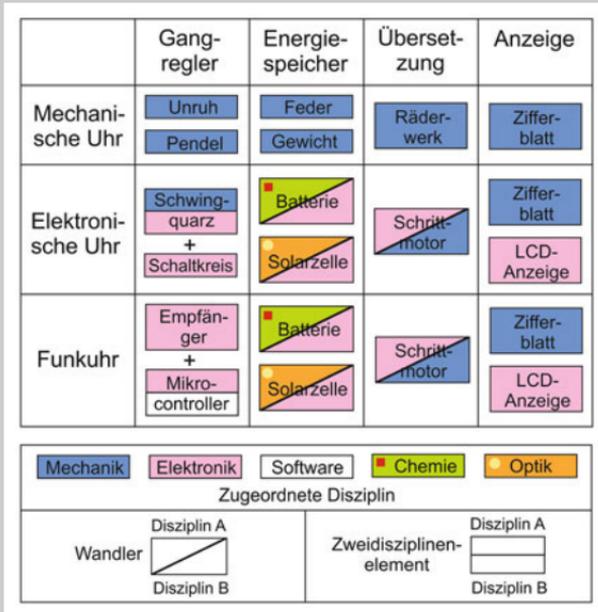


Abb. 1.1 Komponenten mechanischer und elektronischer Uhren

Bei der Entwicklung mechatronischer Systeme [2] wird zunächst die Gesamtfunktion des Systems in Teilfunktionen aufgegliedert. Die Teilfunktionen werden mit mechanischen, elektrischen und elektronischen sowie informationsverarbeitenden Bauelementen realisiert. Daneben werden auch Lösungsprinzipien anderer Disziplinen genutzt, zum Beispiel Linsen (Optik) und Filme (Chemie) im Fotoapparat. Werden auch die räumlichen Zusammenhänge zwischen den Komponenten berücksichtigt, so entstehen technische Systeme, in denen mechanische, elektrische und elektronische sowie informationstechni-

sche Komponenten funktional und räumlich integriert sind. Durch diesen mechatronischen Ansatz ergeben sich verbesserte technische Produkteigenschaften, wie zum Beispiel geringerer Energiebedarf oder höhere Zuverlässigkeit. Außerdem erhöht sich die Wirtschaftlichkeit, weil der Aufwand bei der Fertigung und Montage und in der Nutzungsphase des Produkts reduziert wird.

Die erweiterte Funktionalität der Produkte führt jedoch häufig zu einem Bauraummangel. Diesem kann durch Miniaturisierung der Funktionselemente begegnet werden. Auch der Trend zur Steigerung der Portabilität von Geräten setzt die Möglichkeiten der Miniaturisierung voraus. Dies führt zur Mikro-Mechatronik, die MIKROTECHNOLOGIEN nutzt, um mechatronische Systeme oder Teilsysteme zu miniaturisieren.

Umgekehrt wurde die Mechatronik entscheidend durch die Entwicklung der MIKROELEKTRONIK beeinflusst, die mit hochintegrierten Schaltkreisen (IC, Integrated Circuit) Elemente für regelungstechnische und informationsverarbeitende Funktionen in mechatronischen Systemen zur Verfügung stellt. In der Folge wurden die Fertigungstechnologien der Mikroelektronik genutzt, um mikromechanische, mikroelektronische, mikrooptische, mikrofluidische und gegebenenfalls auch chemische Funktionen auf engstem Raum zu integrieren. Diese funktionelle Erweiterung mikroelektronischer Systeme führt gleichfalls zu mikro-mechatronischen Systemen. Äquivalente Begriffe sind: Mikrosysteme/Micro Systems (Europa), Micromachines (Japan) und MEMS (**M**icro **E**lectro **M**echanical **S**ystems) (USA).

Mikrosysteme haben je nach Anwendung Abmessungen von bis zu einigen 10 mm. Dabei besitzen typische funktionsbestimmende Komponenten Strukturgrößen im Bereich von einigen 10 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) bis zu einigen 100 μm ($1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$). Sie bestehen im Allgemeinen aus mehreren miniaturisierten Funktionselementen, wie Sensoren zur Messung physikalischer oder chemischer Größen, AKTOREN zur Wandlung von elektrischer, thermischer oder chemischer Energie in mechanische Arbeit und signal- und informationsverarbeitenden Komponenten.

Produkte der Mikrosystemtechnik werden heute erfolgreich in vielen Anwendungsfeldern, zum Beispiel in der Fahrzeugtechnik, der Biomedizintechnik, der Kommunikationstechnik, der Luft- und Raumfahrttechnik, im Maschinen- und Anlagenbau und im Konsumgüterbereich, eingesetzt. Dabei werden nicht nur konventionelle Produkte durch mi-

krosystemtechnische ersetzt, sondern es entstehen auch völlig neue Anwendungen und Märkte:

- In Kraftfahrzeugen bilden Beschleunigungs- und Drehratensensoren die Basis für Airbags und elektronische Stabilitätsprogramme. Mikrodrucksensoren (Kap. 3) überwachen den Reifendruck.
- In der Fernbedienung von Spielkonsolen und in Smartphones registrieren mikrotechnische Beschleunigungs- und Drehratensensoren Bewegungen und Rotationen. Dadurch wird das Bedienen von Knöpfen oder Joysticks bei der Spielesteuerung ersetzt. In Smartphones wird das Display automatisch an die jeweilige Orientierung (Hoch- oder Querformat) angepasst. Die Drehraten- und Beschleunigungssensoren (Kap. 4 und 6) basieren auf der Massenträgheit und werden daher auch als TRÄGHEITSENSOREN (Inertialsensoren) bezeichnet. Die Kombination mehrerer solcher Sensoren in einer Messeinheit („Combo“-Sensoren) erlaubt die Erfassung mehrachsiger Bewegungen wie beispielsweise bei der Bewegungskontrolle von Roboterarmen. Ergänzt werden diese Sensor-Kombinationen häufig durch miniaturisierte Magnetfeldsensoren, die das Erdmagnetfeld zur Bestimmung der Himmelsrichtung nutzen (digitale Kompass).
- In Druckköpfen für Tintenstrahldrucker sind Mikroprozessoren mit Mikrokanälen auf einem CHIP integriert. Über Mikrokanäle wird mehreren Hundert Düsen (Kap. 4) mit einem Durchmesser unter $30\ \mu\text{m}$ die Tinte zugeführt.
- In Videoprojektoren werden Mikrospiegel in matrixförmiger Anordnung (Arrays) genutzt (Kap. 6). Für jeden der beispielsweise 1024×768 Bildpunkte reflektiert ein elektrisch steuerbarer Mikrospiegel mit einer Kantenlänge von etwa $15\ \mu\text{m}$ den einfallenden Lichtstrahl. Die Vorteile dieser Projektionstechnik sind sehr hohe Geschwindigkeit und hoher Kontrast.
- In Hörgeräten, Mobiltelefonen und Tablet-Computern wandeln MEMS-Mikrofone (Kap. 6) Schallschwingungen mit Hilfe einer mikrotechnisch hergestellten Membran in elektrische Signale um. Ein IC konvertiert diese analogen Signale anschließend in digitale Signale.

In allen diesen Beispielen sind die Mikrosysteme zentral für die Funktion des Produktes. Von ausschlaggebender wirtschaftlicher Bedeutung

ist, dass die Mikrosysteme ein Vielfaches ihres eigenen Wertes an Wertschöpfung ermöglichen: Mikrokomponenten, wie Sensoren und Aktoren, sind Bestandteile von Baugruppen, die wiederum in Maschinen, Geräten und Apparaten eingesetzt werden und deren Leistungsfähigkeit erhöhen.

Mark Weiser legt in seinem 1991 erschienenen grundlegenden Aufsatz *The computer for the 21st century* [3] dar, dass die tiefsten Technologien diejenigen sind, die Teil der alltäglichen Umwelt werden und den Menschen unauffällig unterstützen. Die Mikrosystemtechnik steht am Beginn einer solchen Entwicklung. Erste Beispiele sind Automobile und Smartphones. Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer in schwierigen Fahrsituationen. Grundlage vieler Assistenzsysteme sind mikrosystemtechnische Komponenten, zum Beispiel Mikrosensoren. Auch in Smartphones werden zunehmend kaum wahrgenommene mikrosystemtechnische Bauelemente eingesetzt (Box 1.2).

Box 1.2 Mikrosysteme in Smartphones

Mikrosysteme sind bereits heute wichtige Komponenten von Smartphones und bieten dem Nutzer viele zusätzliche Funktionen [4]. Marktanalysten sagen voraus, dass in naher Zukunft bis zu 30 MEMS-Komponenten in ein Smartphone integriert werden (Abb. 1.2):

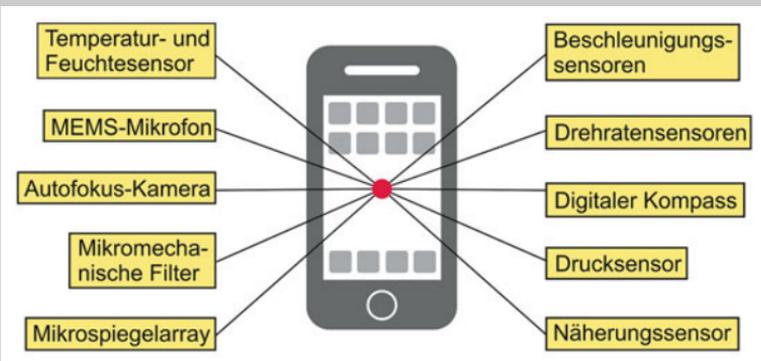


Abb. 1.2 Mikrosystem-Komponenten im Smartphone

- Bekanntestes Beispiel sind Beschleunigungs- und Drehratensensoren, die räumliche Bewegungen des Gerätes erkennen. Sie sorgen für die Anpassung des Displays an die jeweilige Orientierung (Hoch- oder Querformat), dienen als Schrittzähler und können für Spiele mit Steuerung durch Bewegungssensoren genutzt werden.
- Digitale Kompassse auf Basis von Magnetfeldsensoren unterstützen die Navigation mit dem Smartphone.
- Drucksensoren messen den Luftdruck und können so die Höhe über dem Meeresspiegel bestimmen.
- Näherungssensoren sperren den Bildschirm beim Telefonieren mit dem Smartphone am Ohr. So werden ungewollte Aktionen durch Berührung des Touchscreens mit dem Ohr verhindert.
- Temperatur- und Feuchtigkeitssensoren stellen eine mobile Wetterstation dar.
- MEMS-Mikrofone dienen der Spracheingabe.
- Miniaturisierte Autofokus-Kameras nutzen Mikroaktoren zur schnellen Linsenbewegung.
- Mikromechanische Filter sind wichtige Komponenten im Hochfrequenzteil des Smartphones. Sie verbessern das Senden und den Empfang der Signale.
- Mikrospiegelarrays sind Schlüsselkomponenten für Videoprojektion.

Eine Marktstudie [4] schätzt den Weltmarkt für Mikrosysteme im Jahr 2017 auf 21 Mrd. US-Dollar. In Abb. 1.3 ist der erwartete Markt nach Produkten aufgeschlüsselt. Neben den bereits auf dem Markt befindlichen mikrosystemtechnischen Produkten gibt es eine Reihe neuer Produkte, die an der Schwelle zum Markteintritt stehen. Dazu zählen Mikrosysteme zur Energiegewinnung aus der Umgebung (Energy Harvesting) (Kap. 12), die beispielsweise in Herzschrittmachern oder Hörimplantaten Anwendung finden können, Mikrobrennstoffzellen (Kap. 12), die zukünftig zur Energieversorgung mobiler Endgeräte wie Smartphones oder Digitalkameras eingesetzt werden können, oder LAB-ON-A-CHIP-(LOC-)Systeme (Kap. 9). Dies sind mikrofluidische Systeme.