

ENTWICKLUNGSMETHODIK FÜR DIE MIKROSYSTEMTECHNIK UNTER BESONDERER BERÜCKSICHTIGUNG VON QUALITÄTSASPEKTEN

Robert Watty, Hansgeorg Binz

Zusammenfassung

Mikrosystemtechnische Produkte, wie z. B. Sensoren, sind heute aus vielen Bereichen des Alltags nicht mehr wegzudenken. Durch Mikrosysteme wird oft ein Mehrwert für konventionelle Systeme erreicht oder diese werden ersetzt, um insbesondere Kostenvorteile zu erzielen und Bauraum zu verringern.

Aufgrund einer stark technologiegetriebenen Produktentwicklung, fehlender Standardisierung von Komponenten, Integration verschiedener Technikdomänen auf engstem Raum und einer großen Palette angewandeter Fertigungsverfahren unterscheidet sich die Mikrosystemtechnik deutlich von anderen Disziplinen. Durch die Neuheit von Produkten und Herstellungstechnologien und die starke Interdisziplinarität ist der Entwicklungsprozess bisher weder standardisiert noch ausreichend strukturiert und erprobt. Eine einfache Übertragung bewährter Entwicklungsmethodiken ist aufgrund der Besonderheiten der Mikrosystemtechnik ohne entsprechende Modifikationen nicht möglich.

Hohe Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit mikrosystemtechnischer Produkte, z. B. für Herzschrittmacher, müssen schon im Entwicklungsprozess für mikrosystemtechnische Produkte ausreichend berücksichtigt werden, um hochwertige Produkte zu entwickeln.

Dieser Beitrag beschreibt eine ganzheitliche Entwicklungsmethodik für die Mikrosystemtechnik, die um Qualitätsaspekte ergänzt ist, um die Entwicklung qualitativ hochwertiger und sicherer Produkte zu unterstützen.

1 Einleitung

Die Mikrosystemtechnik ist eine relativ junge Disziplin, die in den letzten Jahren mit Zuwachsraten von bis zu 20% einen enormen Aufschwung erlebt hat. Auch aufgrund eines enormen Potenzials in zahlreichen neuen Einsatzgebieten wird die Mikrosystemtechnik als eine Schlüsseltechnologie für das 21. Jahrhundert bezeichnet [1], [2].

Der Einsatz von mikrosystemtechnischen Produkten spielt in einer zunehmenden Anzahl von Bereichen des Alltags eine immer größere Rolle. Durch eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedenster physikalisch geprägter Disziplinen, wie z. B. Mikromechanik, Mikroelektronik, Mikroakustik, Mikrooptik und Mikrofluidik, aber auch der Mikrobiologie und Mikrochemie, Bild 1, sowie eine hohe Integrationsdichte können konventionelle Systeme ersetzt oder ergänzt werden. Gleichzeitig können der Bauraum verringert und die Kosten reduziert werden. Neben Anwendungen im Haushalt oder im Bereich der Computertechnik werden Mikrosysteme auch in hohem Maße in Bereichen eingesetzt, in denen ihr Ausfall durch mangelnde Zuverlässigkeit und Qualität hohe Schäden verursachen oder Menschenleben gefährden kann. Dazu zählen z. B. Sensoren für ABS und Airbagsysteme in Kraftfahrzeugen oder Medikamentendosiersysteme und Herzschrittmacher in der Medizintechnik.

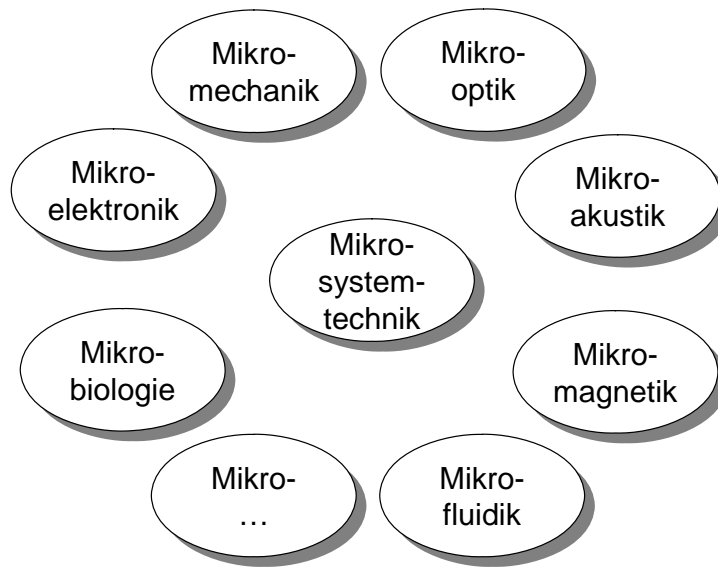


Bild 1: Disziplinen in der Mikrosystemtechnik [3], [4]

Aufgrund der Neuheit von Produkten und Herstellungstechnologien kann in der Mikrosystemtechnik nicht auf breite Erfahrungen vergangener Entwicklungen zurückgegriffen werden. Die Entwicklungsabläufe sind daher weder standardisiert noch ausreichend strukturiert und erprobt. Einige Ansätze zu einer systematischen Vorgehensweise sind bekannt, haben sich aber nicht durchgesetzt [5], [6]. Die Entwicklung wird oft basierend auf einer „genialen Idee“ begonnen, eine systematische Lösungssuche wird meist zugunsten einer kurzen Entwicklungszeit vernachlässigt. Das Produkt wird dann solange angepasst, bis die geforderten Eigenschaften erreicht sind.

Um die Potenziale der Mikrosystemtechnik voll auszuschöpfen und in möglichst kurzer Zeit marktreife und fehlerfreie Produkte zu entwickeln, ist es sinnvoll, den Entwicklungsablauf zu strukturieren und zu planen, wie es sich in anderen Bereichen, z. B. dem Maschinenbau, der Elektrotechnik oder der Informatik, bewährt hat. Dazu ist es unerlässlich, zunächst die Unterschiede zum Entwicklungsablauf in den genannten Bereichen zu untersuchen und die speziellen Anforderungen und Besonderheiten der Mikrosystemtechnik festzustellen, um dann darauf aufbauend einen Entwicklungsprozess für mikrosystemtechnische Produkte zu entwickeln.

Aufgrund der zahlreichen Einsatzgebiete, in denen hohe Anforderungen an Qualität und Zuverlässigkeit gestellt werden, müssen Qualitätsaspekte schon im Entwicklungsprozess für mikrosystemtechnische Produkte berücksichtigt werden. Dazu müssen zunächst Qualitätsaspekte identifiziert werden, die für die Mikrosystemtechnik von Bedeutung sind. Anschließend müssen diese in die Entwicklungsmethodik eingearbeitet werden, wobei eine ganzheitliche Sichtweise hilfreich ist, um Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Teilbereichen, die an der Entwicklung, aber auch am weiteren Verlauf des Lebenszyklus beteiligt sind, hinreichend zu berücksichtigen.

2 Mikrosystemtechnik

Der Begriff Mikrosystem stammt ursprünglich aus der Mikroelektronik und findet dort Verwendung für die Kombination mehrerer integrierter Schaltungen zu einem komplexen System. Die Mikroelektronik befasst sich mit rein elektronischen Bauteilen, deren zweidimensionale Struktur in der Regel voll automatisiert entworfen wird. Die neuere Definition

eines Mikrosystems schließt nun außer der Mikroelektronik auch Komponenten aus anderen Bereichen mit ein, die in der Regel dreidimensional strukturiert sind [3], [7].

Mikrosysteme setzen sich aus Komponenten wie Sensoren, Signalverarbeitung und Aktoren in miniaturisierter Bauform zusammen, die so zu einem Gesamtsystem verknüpft sind, dass sie "empfinden", "entscheiden" und "reagieren" können [8]. Hierbei ist entscheidend, dass die Funktionen eigenständig erfolgen. Die Komponenten bestehen wiederum aus Funktions- bzw. Formelementen wie z. B. Biegebalken, Membranen oder Lagern.

Bild 2 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Systems. Auf ein Substrat aus Silizium mit integrierten Strukturen sind z. B. elektronische Komponenten montiert, kontaktiert und mit einem Gehäuse umgeben.

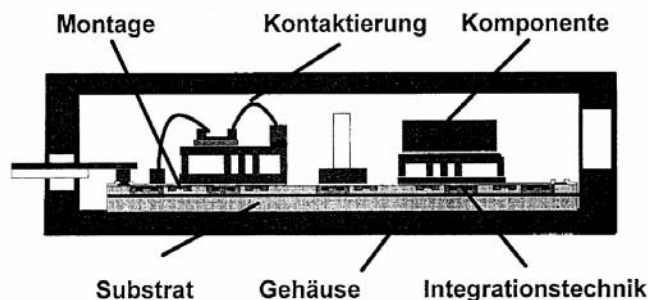


Bild 2: Aufbau eines Mikrosystems [5]

In der internationalen Literatur werden Mikrosysteme als integrierte mikromechanische und mikroelektronische Komponenten mit dem Ausdruck „Micro Electro Mechanical Systems“, oder kurz MEMS beschrieben [5].

Mikrosysteme sind durch eine Reihe von Besonderheiten gekennzeichnet, die bei der Entwicklung berücksichtigt werden müssen:

- Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen in einem Produkte integrierten Disziplinen (Bild 1) müssen insbesondere aufgrund der geringen Abmessungen, die für die kleinsten Strukturen im Bereich weniger Mikrometer liegen, und des hohen Integrationsgrades berücksichtigt werden.
- Es wird eine große Bandbreite an Herstellungstechnologien für die meist aus Silizium oder Kunststoffen bestehenden Bauteile eingesetzt. Diese reichen von Technologien der Mikroelektronik, wie z. B. LIGA oder Dickschichttechnik, bis hin zu mechanischer Mikrofertigung oder der MID-Technik, bei der mit Metalloberflächen beschichtete Kunststoffe zum Einsatz kommen.
- Der Zusammenhang zwischen der Entwicklung von Produkt und Herstellungstechnologie ist weit enger als im Makrobereich. Die Entwicklung ist sehr technologiegetrieben, da die Realisierungsmöglichkeit oft von parallel entwickelten neuen oder weiterentwickelten Herstellungstechnologien abhängt.

Die Vielfalt und der hohe Integrationsgrad der Komponenten erfordern die Zusammenarbeit von Spezialisten aus verschiedenen Wissensbereichen. Erfahrungen aus anderen Bereichen zeigen, dass Effektivität und Effizienz der Entwicklung durch einen sorgfältig geplanten und auf die speziellen Bedürfnisse der Produkte abgestimmten Ablauf erheblich verbessert werden können. Für die Mikrosystemtechnik ist insbesondere eine ausgeprägte Systembetrachtung bei der Entwicklung, die klare Definition und Abstimmung interdisziplinärer

Schnittstellen und die parallele Betrachtung der Herstellungstechnologie eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung qualitativ hochwertiger Produkte. Eine einheitliche Vorgehensweise erscheint angesichts der Vielfalt der Mikrosystemtechnik, der unterschiedlichen Entwicklungsprozesse in den Teildisziplinen und der unterschiedlichen Struktur und Größe der beteiligten Unternehmen nur schwer möglich. Eine Methodik für die Mikrosystemtechnik kann einen Rahmen für die Vorgehensweise bilden, der dann an die speziellen Bedürfnisse des Unternehmens, des Produktes oder sonstiger Rahmenbedingungen angepasst werden muss.

3 Qualität in der Mikrosystemtechnik

Nach der allgemein anerkannten Definition in DIN 55350 ist Qualität die Beschaffenheit einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen [9]. Darauf aufbauend lassen sich eine ganze Reihe von Qualitätsmerkmalen aufstellen [10], von denen nachfolgende für technische Systeme relevant sind:

- Funktionsfähigkeit (Korrektheit)
- Zuverlässigkeit (Korrektheit auf Dauer)
- Verfügbarkeit (Korrektheit zur Zeit)
- Prüfbarkeit (Einfachheit des Zuverlässigkeits-/Korrektheitsnachweises)
- Sicherheit
- Brauchbarkeit (Bedienbarkeit im Gegensatz zur Bedienfehleranfälligkeit)
- Wirtschaftlichkeit (Effizienz)
- Umweltverträglichkeit
- Übertragbarkeit (Portabilität)
- Schönheit
- Wiederverwendbarkeit
- Instandhaltbarkeit, Wartbarkeit
- Erweiterbarkeit
- Änderbarkeit

Bei Betrachtung des Lebenszyklus und der Einsatzgebiete von Mikrosystemen wird klar, dass eine Reihe dieser Kriterien nicht relevant sind. In der Mikrosystemtechnik wird ein „Produkt“ in der Regel nicht geändert oder erweitert, sondern gleich ein komplett neues Nachfolgeprodukt entwickelt. Dies hängt zusammen mit der schnellen Weiterentwicklung der Technologie, kurzen Produktlebenszyklen im Markt und den vielen Auswirkungen, die auch einfache Änderungen schon auf Herstellungswerkzeuge und die Systemfunktion haben. Aufgrund der kompakten Bauweise und der relativ geringen Kosten einzelner Mikrosysteme werden diese in der Regel auch nicht repariert, gewartet oder wieder verwendet. Damit entfallen die letzten vier Punkte ebenso wie die Schönheit, die bei in der Regel nicht von außen

sichtbaren Komponenten eine geringere Rolle spielt. So ergeben sich eine Reihe von Kriterien, die die vorliegende Qualität eines Mikrosystems kennzeichnen.

Wichtig ist zunächst einmal die Korrektheit des Systems, alleine schon aufgrund der zahlreichen Anwendungen, bei denen anderenfalls Menschenleben gefährdet wären. Ein gutes Beispiel ist hier der Herzschrittmacher, von dessen korrekter Funktion im Bedarfsfall ein Menschenleben direkt abhängt.

Da der Zeitpunkt des Bedarfes nicht vorhersagbar ist und Mikrosysteme weitgehend autonom arbeiten, ist es hier offensichtlich auch erforderlich, dass die Korrektheit auf Dauer angelegt und jederzeit verfügbar ist. Damit spielt die Zuverlässigkeit für Mikrosysteme eine besonders wichtige Rolle. Schlechte Zugänglichkeit, wie im Beispiel des Herzschrittmachers, aber auch der Vielzahl von Mikrosystemen, die beispielsweise in einem Fahrzeug eingesetzt werden, machen es erforderlich, dass die Korrektheit einfach zu überprüfen ist. Das System muss von selbst oder auf Anforderung Auskunft über seinen Zustand geben und im Idealfall ein nicht korrektes Arbeiten signalisieren. Dies kann z. B. durch eine geeignete Ausfallerkennung realisiert werden [11].

Darüber hinaus dürfen auch keine Gefahr und kein Risiko vom System ausgehen, es muss also eine hohe Sicherheit aufweisen. In den Fällen, in denen die Ansteuerung manuell erfolgt, muss die Bedienbarkeit gewährleistet sein, bei automatischer Ansteuerung muss gewährleistet sein, dass keine unklaren oder undefinierten Zustände auftreten können.

Gerade in der Mikrosystemtechnik, in der Produktlebenszyklen kurz sind und in der Regel die Notwendigkeit zur deutlichen Reduktion der Kosten mit jedem neuen Produkt besteht, gehört sowohl eine wirtschaftliche Gestaltung des Entwicklungsablaufes als auch der Produkte zum Marktumfeld. Die Entwicklung von wenigen Varianten, z. B. Sensoren, die einfach an verschiedene Einsatzbereiche angepasst werden können, erhöht die Zahl der möglichen Einsatzfelder und steigert damit die Wirtschaftlichkeit durch höhere Losgrößen und geringere Herstellkosten. Auch die Umweltverträglichkeit bekommt z. B. durch die gesetzliche Verpflichtung zur Rücknahme am Ende der Lebensdauer eine wirtschaftliche Komponente, die zum reinen Umweltschutzaspekt hinzutritt.

4 Methodik zur Entwicklung mit Qualitätsaspekten

Alle vorgenannten Qualitätskriterien müssen im Rahmen einer Produktentwicklung bedacht werden. Durch ihre Vielzahl wird der Entwicklungsablauf erheblich komplexer und die Sicherstellung der Produktzuverlässigkeit ist durch ausgereifte Konstruktionsmethoden allein nicht gewährleistet. Es müssen vielmehr zusätzlich spezielle analytische Zuverlässigkeitsmethoden zum Einsatz kommen [12]. Ziel muss es sein, den Qualitätsgedanken in den gesamten Ablauf zu integrieren und in einem ganzheitlichen Ansatz ständig mit zu berücksichtigen.

Zur Unterstützung der Entwicklung mikrosystemtechnischer Produkte wird zunächst eine Methodik benötigt, die die speziellen Anforderungen dieses Technikfeldes berücksichtigt [13], [14]. Bild 3 zeigt einen Vorschlag für eine grundsätzliche Vorgehensweise bei der Entwicklung in der Mikrosystemtechnik, der auf der Vorgehensweise in der VDI-Richtlinie 2206 für die Mechatronik [15] aufbaut.

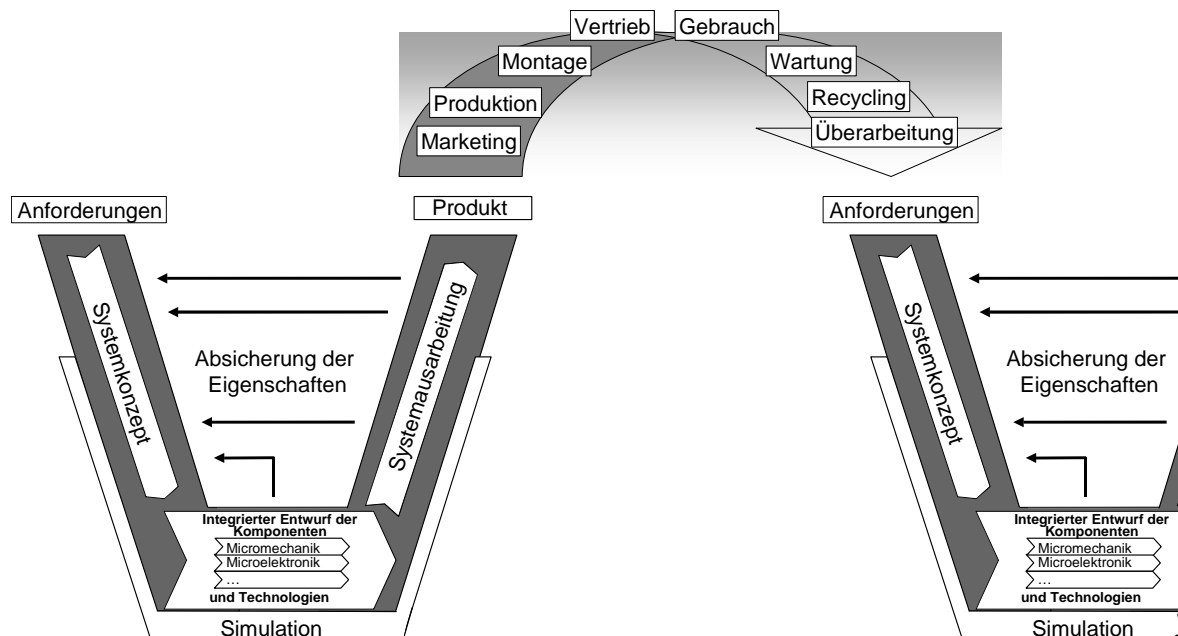
Die dargestellte generelle Vorgehensweise beginnt aufbauend auf den Anforderungen mit der Generierung eines Konzeptes für das interdisziplinär aufgebaute Gesamtsystem. Die benötigten Komponenten der Teildisziplinen werden anschließend entworfen. Dies geschieht integriert, also unter ständiger Berücksichtigung und Überprüfung des Systemzusammenhanges [16] und wird bei paralleler Entwicklung oder Weiterentwicklung der Herstellungs-

technologie und z. B. durch Simulation unterstützt. Die abschließende Systemausarbeitung sichert die Eigenschaften des Produktes und seine Funktionsfähigkeit ab. Dieser generelle Prozess ist in den Lebenszyklus des Produktes eingebettet, um Anforderungen und Wissen aus den verschiedenen Phasen in die Entwicklung einzubeziehen, die dann für das nächste Produkt als Eingangsdaten zur Verfügung stehen. Unter Lebenszyklus ist hier sowohl im engeren Sinne der eigentliche Lebenslauf eines bestimmten Produktes von der Idee bis zum Recycling als auch die Betrachtung einer Produktgeneration bis zu ihrer Ablösung durch die nachfolgende zu verstehen.

Bild 3: Vorschlag einer Methodik für die Mikrosystemtechnik [ICED]

Der dargestellt Vorgang kann im Entwicklungsablauf mehrfach schleifenartig durchlaufen werden, Bild 4.

Mit jeder Schleife nimmt der Reifegrad des Produktes, das vor Beginn der nächsten Schleife



auf Funktion und Zuverlässigkeit getestet wird, und der Herstellungstechnologie zu. Die Endprodukte der jeweiligen Schleife sind dabei zunächst abstrakter, um z. B. als Labormuster oder Demonstrator die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des Prinzips zu überprüfen. Mit Annäherung an die Fertigstellung werden sie, z. B. in Form eines Vorserienproduktes, konkreter und beziehen die Herstellungstechnologie immer genauer ein, bis am Ende das fertig entwickelte Serienprodukt mit der benötigten Herstellungstechnologie vorliegt.

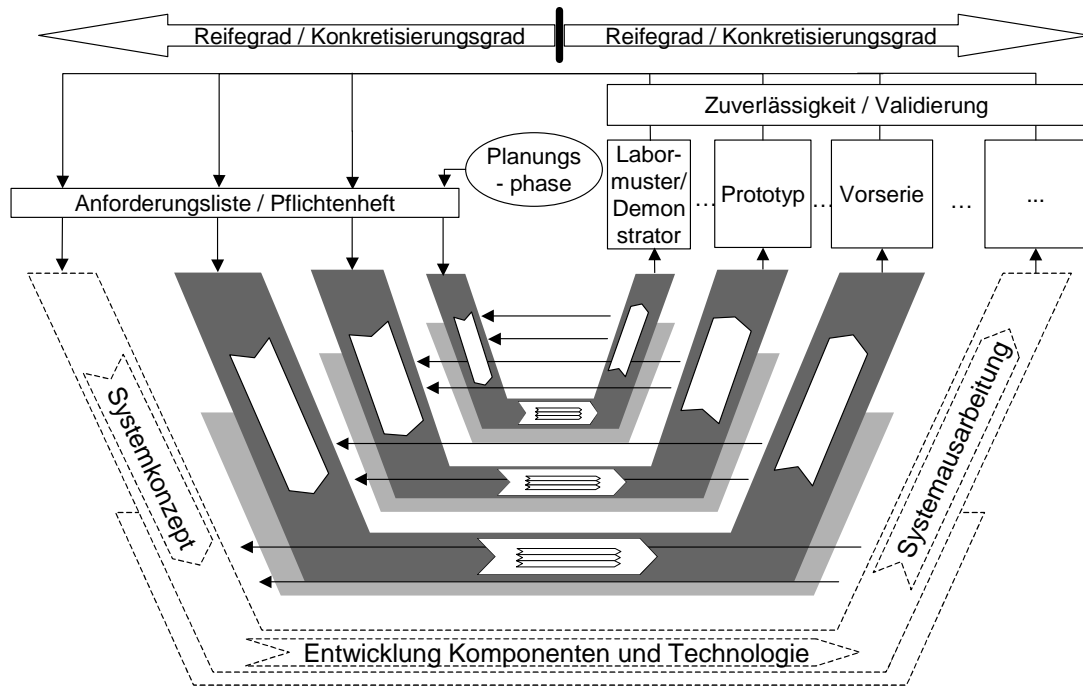


Bild 4: Gesamtablauf der Entwicklung

Dieser Entwicklungsprozess im engeren Sinne kann überlagert werden von einer Sichtweise aus verschiedenen Blickwinkeln, z. B. aus Sicht der Fertigungstechnologie oder der Betriebswirtschaft, Bild 5.

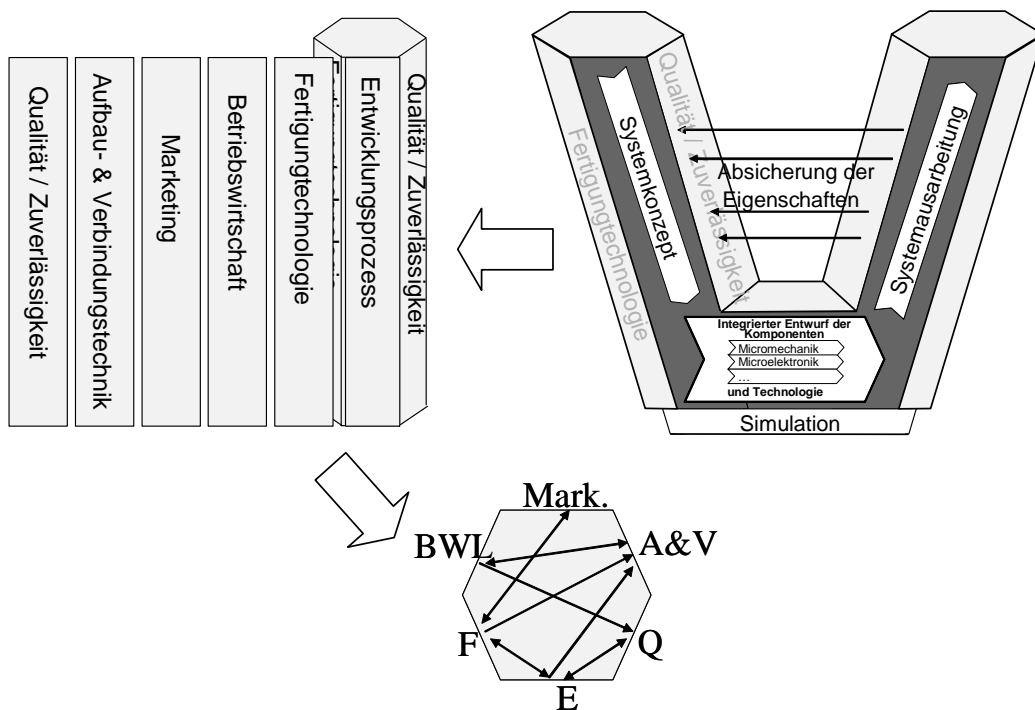


Bild 5: Ganzheitliche Entwicklungsmethodik für die Mikrosystemtechnik

Der bereits beschriebene (Bild 3) und in Methodiken üblicherweise allein betrachtete vorgeschlagene Entwicklungsablauf für Mikrosysteme bildet eine von in diesem Falle sechs Seiten eines Volumenkörpers. In der Abwicklung ist jede Seite des Körpers mit der Sicht auf einen

Teilaspekt belegt, der für die Entwicklung eines Produktes von Bedeutung ist. Betrachtet werden hier für die Mikrosystemtechnik neben dem Entwicklungsprozess im engeren Sinne noch die Fertigungstechnologie, die Betriebswirtschaft, das Marketing, die Aufbau- und Verbindungstechnik und die Qualität / Zuverlässigkeit.

Im Schnitt durch den Volumenkörper lassen sich für jeden beliebigen Zeitpunkt des Ablaufes die Wechselwirkungen der einzelnen Aspekte betrachten. So wirkt sich der Entwicklungsprozess im dargestellten Schnitt beispielsweise auf die Aufbau- und Verbindungstechnik aus und hat darüber hinaus wechselseitige Abhängigkeiten mit der Fertigungstechnologie und der Qualität / Zuverlässigkeit.

Diese Sichtweise erweitert die üblicherweise verwendete zweidimensionale Darstellung und ermöglicht so die ganzheitlichere und in der Realität notwendige Betrachtung der Produktentwicklung über den Produktentwicklungsprozess hinaus.

Betrachtet man den Zusammenhang zwischen Entwicklungsprozess und Qualität / Zuverlässigkeit, so ergeben sich beispielhaft die in Bild 6 dargestellten Zusammenhänge für die Zuverlässigkeit des Produktes.

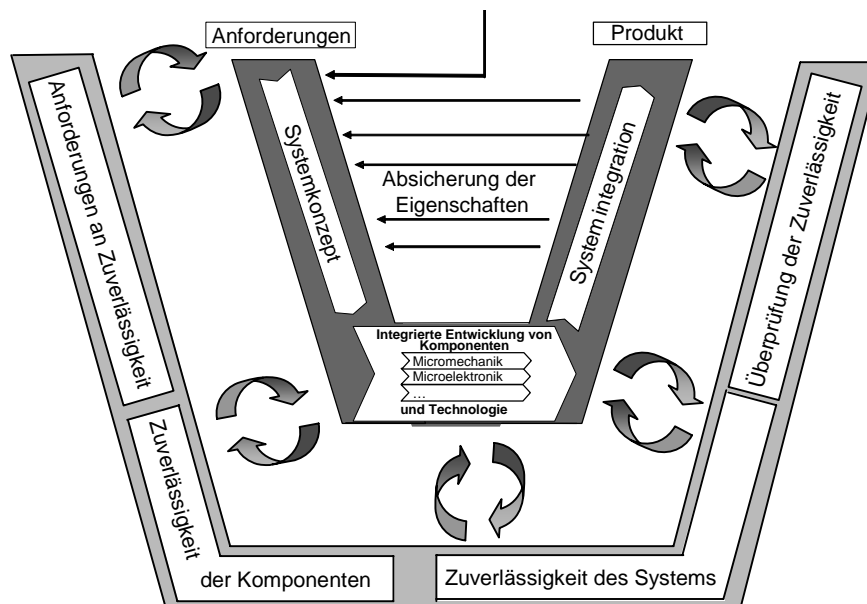


Bild 6: Zusammenhang zwischen Entwicklungsprozess und Qualität / Zuverlässigkeit

Zu Beginn der Entwicklung sind Anforderungen an die Zuverlässigkeit des Systems, also seine Funktionserfüllung auf Dauer, zu stellen. Dazu sind zunächst Zuverlässigkeitsmerkmale z. B. aufgrund relevanter Normen festzulegen und dann die zugehörigen Zuverlässigkeitskenngrößen, z. B. Ausfallhäufigkeiten, mit Zuverlässigkeitsforderungen bezüglich der gewünschten Produkteigenschaften zu belegen. Grundlegend dafür sind Kriterien für den Ausfall, also die Beendigung der Funktionsfähigkeit der Einheit, festzulegen.

Parallel zum weiteren Entwicklungsablauf kann die jeweilige Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten betrachtet und durch geeignete Gestaltung möglichst günstig beeinflusst werden. Im Sinne einer integrierten Entwicklung müssen auch dabei auftretende Widersprüche im Systemzusammenhang betrachtet werden, um letztendlich eine möglichst hohe Zuverlässigkeit für das Gesamtsystem zu erreichen. Dies lässt sich z. B. mit Checklisten zur Entwurfsüberprüfung oder Richtlinien für die Bauteilgestaltung erreichen.

Um zu überprüfen, ob die geforderte Zuverlässigkeit erreicht wurde, müssen mit dem System anschließend Tests durchgeführt werden [17]. Dazu gehören Tests, bei denen Ausfälle unerwünscht sind, die also die Funktionserfüllung des Systems unter verschiedensten Umwelt- und Randbedingungen überprüfen. Für die Zuverlässigkeit entscheidender sind aber Tests, bei denen der Ausfall beabsichtigt ist und die Zeitdauer bis zum Ausfall gemessen und überprüft werden soll. Das Zuverlässigkeitsprogramm muss alle Faktoren umfassen, denen das Produkt in seiner späteren Verwendung ausgesetzt ist. Dazu gehören beispielsweise äußere Belastungen durch Temperatur, Vibrationen, Stoß, Feuchtigkeit, Schmutz oder den Menschen, aber auch innere Belastungen durch elektromagnetische Einflüsse, elektrostatische Kräfte oder Temperatur. Für Mikrosysteme haben innere Faktoren aufgrund der hohen Integration eine besondere Bedeutung.

Für diese Einflüsse muss jeweils ein Testprogramm mit den einwirkenden Größen, ihren Beträgen, Änderungen und Einwirkdauern festgelegt werden, aufgrund dessen dann die statistische Zuverlässigkeit des Mikrosystems ermittelt wird.

Unterstützt wird die Erreichung der geforderten Zuverlässigkeit durch geeignete Methoden, die zum Teil in Normen zum Zuverlässigkeitsmanagement zusammengestellt und beschrieben sind [18].

5 Ergebnis und Ausblick

Die Produktentwicklung in der Mikrosystemtechnik unterscheidet sich bedingt durch den hohen Integrationsgrad und die kleinen Abmessungen deutlich von anderen Bereichen und erfordert nicht nur einen angepassten Entwicklungsprozess, sondern auch eine ganzheitlichere Betrachtungsweise und geeignete Methoden, um qualitativ hochwertige Produkte wirtschaftlich zu entwickeln.

In diesem Beitrag wurden zunächst die Besonderheiten der Mikrosystemtechnik dargestellt und dann im Hinblick auf den Teilaspekt Qualität weiter vertieft.

Es wurde eine Methodik zur Entwicklung in der Mikrosystemtechnik vorgeschlagen, die von den Verfassern bei der Entwicklung von Sensoren in mehreren Hochschul- und einem Industrieprojekt erfolgreich angewendet und erprobt wurde. Insbesondere die ganzheitliche Herangehensweise hat sich dabei als für die Mikrosystemtechnik unabdingbar herausgestellt.

Die dargestellte Betrachtung der Qualität und der Zuverlässigkeit erfordert weitere und vertiefte Beschäftigung von methodischer Seite. So sollten z. B. vorhandene Methoden auf ihre Verwendbarkeit in der Mikrosystemtechnik hin untersucht und die umfangreiche Sicht auf den Entwicklungsablauf unter Qualitätsaspekten vervollständigt werden. Darüber hinaus ist insbesondere auch die technologische Seite interessant, um bisher nicht untersuchte Verschleißmechanismen für Mikrobauteile und daraus resultierende Ausfallursachen zu überprüfen.

Damit gewinnt das relativ neue und sich ständig erweiternde Gebiet der Mikrosystemtechnik stückweise an Struktur, lässt aber auch noch viele weiße Flecken für künftige Forschungsarbeiten.

6 Literatur

- [1] Nexus: The NEXUS product-technology roadmap for Microsystems. Grenoble: The NEXUS Association 2003

- [2] Cui, Z.; Leach, R; Flack, D; Brenner, W. et al.: Microsystems Technology Standardisation Roadmap. Teddington, UK: National Physical Laboratory 2003
- [3] Gerlach, G., Dötzel, W.: Grundlagen der Mikrosystemtechnik. Hanser Verlag, München, Wien, 1997
- [4] Binz, H.; Watty, R.: Anforderungen an den Entwicklungsprozess in der Mikrosystemtechnik. 2. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik, Dresden 2004
- [5] Kasper, M.: Mikrosystementwurf. Springer Verlag, Berlin, 2000
- [6] Mehner, J.: Entwurf in der Mikrosystemtechnik. Dresden university press, 2000
- [7] Lang, M.: Entwurfsmethoden und Rapid Prototyping integrierter Mikrosysteme. Shaker Verlag, Aachen, 1998
- [8] Mikrosystemtechnik 1994 - 1999. Programm des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie im Rahmen des Zukunftskonzeptes Informationstechnik. Jahresbericht 1994, 1995
- [9] DIN 55350-11: Begriffe zu Qualitätsmanagement und Statistik - Teil 11: Begriffe des Qualitätsmanagements. Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [10] Grams, T.: Grundlagen des Qualitäts- und Risikomanagements. Vieweg Verlag, Braunschweig / Wiesbaden, 2001
- [11] Birolini, A.: Qualität und Zuverlässigkeit technischer Systeme. Springer, Berlin, 1997
- [12] Krolo, A.: Planung von Zuverlässigkeitstests mit weitreichender Berücksichtigung von Vorkenntnissen. Dissertation, Universität Stuttgart, 2004
- [13] Klaubert, H.: Tiny design: A study of the design of microelectromechanical systems. PhD-thesis, Cambridge University 1998
- [14] da Silva, M.: Design For Manufacturability for 3D MicroDevices. NSF Workshop on Three-Dimensional Nanomanufacturing: Partnering with Industry. Birmingham, Alabama, January 5-6, 2003
- [15] VDI-Richtlinie 2206: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. Beuth Verlag, Berlin, 2004
- [16] Watty, R., Binz, H.: Design for Manufacturing and Integration of Micro-Electro-Mechanical-Systems. Proceedings ICED 05, Melbourne, 2005
- [17] O'Connor, P.: Zuverlässigkeitstechnik. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1990
- [18] DIN EN 60300-3-1: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-1: Anwendungsleitfaden - Verfahren zur Analyse der Zuverlässigkeit. Beuth Verlag, Berlin, 2005

Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz
Dipl.-Ing. Dipl.-Kfm. Robert Watty
Institut für Maschinenkonstruktion und Getriebbau
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 9, D-700569 Stuttgart
Tel: +49-711-685-6040
Fax: +49-711-685-6219
Email: watty@imk.uni-stuttgart.de
URL: <http://www.imk.uni-stuttgart.de>