

Beschreibung von mechatronischen Systemen mit SystemC-AMS

Erik Markert, Michael Schlegel, Göran Herrmann, Dietmar Müller

TU Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik,
Professur Schaltungs- und Systementwurf, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz
e-mail: erik.markert@etit.tu-chemnitz.de

Kurzfassung

Als Erweiterung des SystemC-Standards steht nun eine Testversion von SystemC-AMS zur Modellierung von analogen und Mixed-Signal-Schaltkreisen zur Verfügung. Zur Evaluierung dieser Bibliothek wird ein Mikrospiegel mit elektrostatischer Ansteuerung modelliert und die Simulationsergebnisse mit den vorhandenen Daten aus VHDL-AMS verglichen. Dabei werden kurz die verfügbaren Modellierungsmöglichkeiten von SystemC-AMS aufgezeigt.

1 Einleitung

Zur Simulation komplexer Systeme mit Hard- und Softwareanteilen existieren verschiedenste Ansätze und Beschreibungssprachen. Durch die weite Verbreitung der Programmiersprache C++ bietet SystemC eine für viele Entwickler einfach zu erlernende Möglichkeit, Hardware-/Software-Code-sign mit einem einzigen Werkzeug durchzuführen. Um auch analoge und Mixed-Signal-Systeme simulieren zu können, beschäftigt sich seit Februar 2002 eine OSCI-Arbeitsgruppe mit der Entwicklung von SystemC-AMS. Dazu wurde ein White Paper [1] mit einer ersten Strukturbeschreibung veröffentlicht. Eine Vorabversion der SystemC-Erweiterungsbibliothek steht nun zur Verfügung. Hierin wurden die in [2] beschriebenen Lösungsansätze umgesetzt.

Mit Hilfe der SystemC-AMS-Bibliothek soll das im Rahmen des SFB 379 entwickelte, elektrostatisch angesteuerte Mikrospiegelarray beschrieben und die Simulationsergebnisse mit den vorhandenen VHDL-AMS-Ergebnissen verglichen werden. Das Spiegel-Array besteht aus 25 quadratisch angeordneten Mikrospiegeln (siehe Bild 1). Jeder

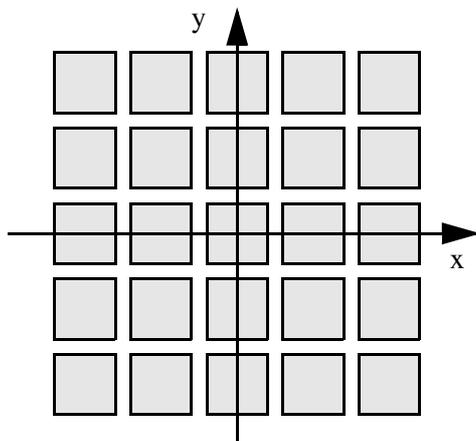


Bild 1: Feld-Anordnung der Mikrospiegel [5]

dieser Spiegel besitzt durch seine Aufhängung an vier Federbändern zwei nutzbare Auslenkungsmöglichkeiten (x- und y-Richtung) (siehe Bild 2).

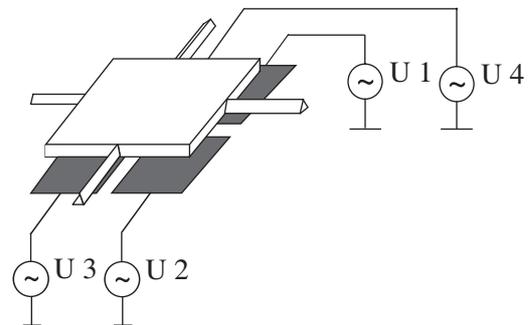


Bild 2: Aufbau eines Mikrospiegels [4], [5]

Die Rotationsmomente führen jedoch zusätzlich zu einer Verschiebung in z-Richtung, was zusammen mit der Auslenkung eine Änderung der Ansteuerkapazität zur Folge hat.

Bild 3 zeigt die vereinbarten Koordinatenrichtungen und Quadrantenbezeichnungen. Die Berechnungsgleichungen für das Spiegelverhalten werden in [4], [5] und [6] näher erläutert.

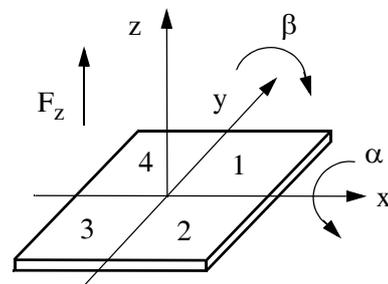


Bild 3: Koordinatenvereinbarungen am Mikrospiegel

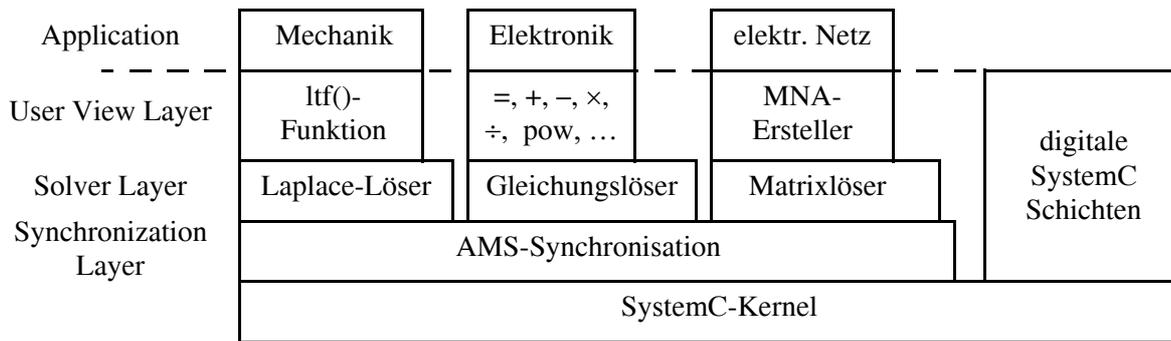


Bild 4: Einordnung in das SystemC-AMS-Schichtenmodell [1], [2]

2 Systemmodellierung

Zur Beschreibung von Systemen werden in SystemC-AMS Datenfluss-Netze (SDF, static dataflow) verwendet. Hier kommunizieren die Einzelelemente über gerichtete Datenströme miteinander. Jede Schnittstelle eines Moduls ist als Ein- oder Ausgang zu charakterisieren. Rückführungen im Signalfluss sind erlaubt, jedoch müssen sie durch das Einfügen eines Verzögerungsgliedes entkoppelt werden. Für die Beschreibung von Transferfunktionen und Differentialgleichungen steht eine Funktion zur Lösung von Laplace-Übertragungsfunktionen zur Verfügung.

Neben der Modellierung von Datenflussnetzen bietet SystemC-AMS die Möglichkeit der Beschreibung linearer elektrischer Netze, welche per MNA (Modified Nodal Analysis) gelöst werden. Dazu stehen 7 Bauelemente zur Verfügung: R, L, C, spannungsgesteuerte Strom- und Spannungsquellen sowie stromgesteuerte Spannungs- und Stromquellen. Zur Anbindung an Datenfluss-Netze stehen SDF-gesteuerte Strom- und Spannungsquellen sowie Widerstände bereit. Als Rückwandler fungieren elec2sdf-Signale, also konservative Knoten, deren Potentialwert als SDF-Signal abgegriffen werden kann.

Mischformen mit digitalem SystemC 2.0 und hierarchische Anordnungen sind durch Implementierung spezieller Konstruktoren ebenfalls gestattet.

3 Modellierung des Mikrospiegels

Zur Systembeschreibung wird der Mikrospiegel in eine elektrische (elektrostatische Ansteuerung) und eine mechanische Komponente (Bewegungsgleichung) aufgeteilt. Im elektrischen Teil werden die Eingangsspannungen sowie die momentanen Auslenkungen direkt in Gleichungen im Zeitbereich eingesetzt und die neuen Drehmomente bzw. Kräfte in z-Richtung berechnet. Die Implementierung der Bewegungsgleichung im mechanischen Teil erfolgt im Bildbereich bzw. durch eine elektrische Analogie. In Bild 4 sind die genutzten SystemC-AMS-Komponenten im Schichtenmodell [1], [2] dargestellt.

Modellierung ohne Rückkopplung, statisches Verhalten

Bei der rückkopplungsfreien Modellierung des Spiegels erfolgt die Drehmomentberechnung ausschließlich auf Basis der angelegten Spannungen ohne Berücksichtigung der Position des Spiegels zu den Elektroden. Daher besitzt das Signalflussmodell keine Schleifen, sondern kann, wie in Bild 5 dargestellt, linear abgearbeitet werden.

Zur Untersuchung des statischen Verhaltens sind Spannungsänderungen der Signalquelle auf 1000 V/s beschränkt. In Tabelle 1 werden die Simulationsergebnisse in beiden Beschreibungssprachen gegenübergestellt, die nichtaufgeführten Elektroden befinden sich auf Massepotential.

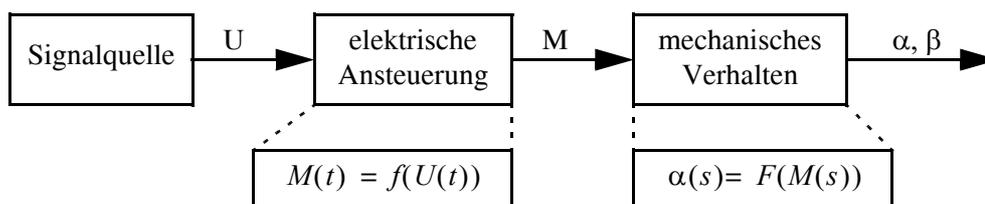


Bild 5: Rückkopplungsfreie Modellierung des Mikrospiegels

Tabelle 1: Simulationsergebnisse des rückkopplungsfreien Systems

Ansteuerung		SystemC-AMS		VHDL-AMS		Abweichung	
U1	U2	α	β	α	β	$\Delta \alpha$	$\Delta \beta$
300 V	150 V	-1,58 mrad	0,95 mrad	-1,58 mrad	0,95 mrad	0 %	0 %
300 V	300 V	-2,53 mrad	0	-2,53 mrad	0	0 %	0 %
500 V	0 V	-3,51 mrad	3,51 mrad	-3,51 mrad	3,51 mrad	0 %	0 %

Bei dieser einfachen Beschreibungsform sind keine Unterschiede zwischen der Simulation mit SystemC-AMS und VHDL-AMS feststellbar. Jedoch nimmt die Simulation mit VHDL-AMS auf einer SunBlade 2900 (2×Ultra-SPARC-III+900 MHz, 4 GB RAM, Solaris8) mit 3 min 20 s deutlich mehr Rechenzeit in Anspruch als mit SystemC-AMS (3 s) bei gleichen Parametern (Schrittweite 0,1 ms, Trapez-Integrationsalgorithmus).

Modellierung mit Rückkopplung, statisches Verhalten

Zur Verfeinerung der Simulation wird für die Drehmomentberechnung zusätzlich die Position des Spiegels zu den Elektroden und damit die Kapazitätsänderung berücksichtigt. In VHDL-AMS sind Iterationsschleifen erlaubt.

SystemC-AMS bietet diese Möglichkeit nicht,

Rückkopplungen sind wie in Bild 6 mit einem Verzögerungsglied von mindestens einem Deltazyklus zu versehen. Dies führt neben einer Verkürzung der Rechenzeit auch zu einer Ungenauigkeit in den Simulationsergebnissen. Grundlage der Beschreibung der elektrischen Teilkomponente in SystemC-AMS bildet der Algorithmus aus [6]. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Simulationsergebnisse mit Rückkopplung:

Hier zeigen sich deutliche Abweichungen in den Ergebnissen. Mögliche Ursache ist das Zwischenschalten des Verzögerungsgliedes in SystemC-AMS, während VHDL-AMS eine Iteration durchführt.

Modellierung mit Rückkopplung, dynamisch

Im Realbetrieb soll der Mikrospiegel für Bildprojektionen genutzt werden. Um die dabei notwendige

Tabelle 2: Simulationsergebnisse des Systems mit Rückkopplung

Ansteuerung		SystemC-AMS		VHDL-AMS		Abweichung	
U1	U2	α	β	α	β	$\Delta \alpha$	$\Delta \beta$
300 V	150 V	-1,62 mrad	0,98 mrad	-1,66 mrad	1,00 mrad	2,4 %	2,0 %
300 V	300 V	-2,61 mrad	0	-2,72 mrad	0	4,0 %	0 %
500 V	0 V	-3,79 mrad	3,79 mrad	-4,09 mrad	4,09 mrad	7,3 %	7,3 %

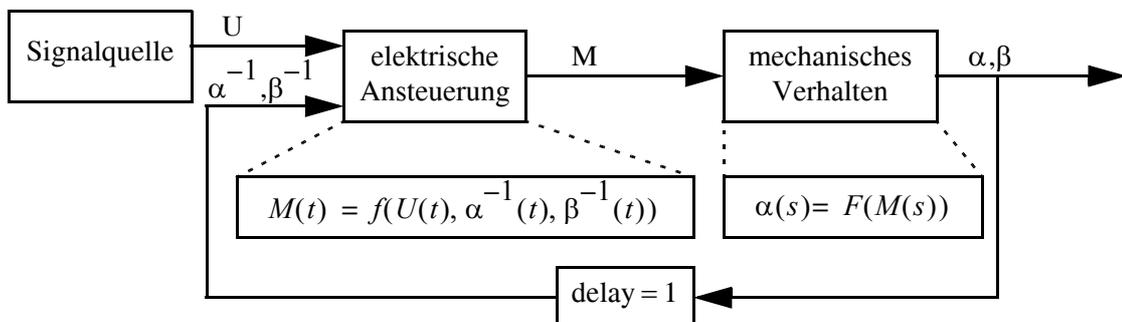


Bild 6: Modellierung des Spiegels mit Rückkopplung

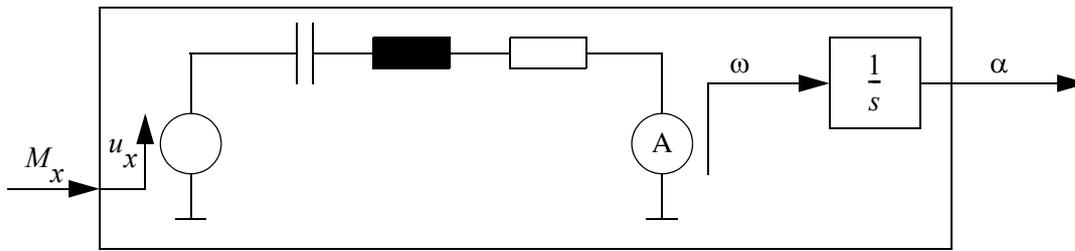


Bild 7: Modellierung des mechanischen Teils mit einer elektrischen Analogie

gen schnellen Auslenkungsänderungen zu erreichen wird der Spiegel im Resonanzbereich betrieben. Als Eingangsspannungen fungieren modulierte Sinusschwingungen.

Zunächst wird wie im statischen Fall die Bildbereichsbeschreibung des mechanischen Teils genutzt. Dabei zeigt sich bei der Simulation mit SystemC-AMS im Zeitbereich keinerlei Resonanzüberhöhung. Eine Kontrollsimulation im Frequenzbereich bestätigt jedoch die Korrektheit der Parameter der Bewegungsgleichung, um die Resonanzfrequenz ist das charakteristische Anwachsen der Amplitude zu beobachten. In einem anderen Projekt trat bei Nutzung der ltf-Funktion derselbe Fehler auf. Das korrekte Verhalten dieser konnte daher für Funktionen größer 1. Ordnung nicht nachgewiesen werden.

Als Alternative zur Bildbereichsimplementierung bietet sich die elektrische Analogie zur Bewegungsgleichung, der Serienschwingkreis, an. Dazu wird, wie in Bild 7 dargestellt, in die mechanische Teilkomponente pro Auslenkungsrichtung ein elektrisches Netz mit nachgeschaltetem Laplace-Differenzierglied eingefügt.

Es wird die Geschwindigkeits-Strom-Analogie („widerstandstreu“) benutzt. Aus der Bewegungsgleichung:

$$M_x = J_x \frac{d\omega}{dt} + k_x \omega + c_x \int \omega dt$$

und der Maschengleichung des elektrischen Serienschwingkreises:

$$u_x = L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt$$

ergeben sich die Bauelementegrößen:

$$L = J_x, R = k_x, C = \frac{1}{c_x}$$

Der nachgeschaltete Differenzierer wandelt die erhaltene Kreisfrequenz in eine Auslenkung um.

Mit Hilfe dieser Schaltung kann das dynamische Verhalten des Mikrospiegels simuliert werden. Dabei tritt jedoch im engeren Resonanzbereich eine geringfügig größere Überhöhung als bei der VHDL-AMS-Vergleichssimulation auf. Im Bereich außerhalb der Resonanz wird Deckungsgleichheit zwischen den SystemC-AMS-Simulationsergebnisse und den Referenzdaten erreicht. Auch im dynamischen Fall nimmt die Rechenzeit bei gleicher minimaler Auflösung (10 ns) mit SystemC-AMS (1 min 36s) gegenüber VHDL-AMS (24 min) deutlich ab. Bild 8 zeigt die Simulationsergebnisse beider Beschreibungssprachen bei einer konstanten Schrittweite von 1 ns, Bild 9 eine Ausschnittsvergrößerung des

Tabelle 3: Simulationsergebnisse bei dynamischer Ansteuerung

Ansteuerungsfrequenz	Auslenkung		
	SystemC-AMS	VHDL-AMS	Δ
15000 Hz	1,90 mrad	1,90 mrad	0 %
17500 Hz	3,60 mrad	3,60 mrad	0 %
19000 Hz	9,00 mrad	8,97 mrad	0,3 %
19500 Hz	18,15 mrad	18,11 mrad	0,2 %
19850 Hz	27,20 mrad	27,10 mrad	0,4 %
20000 Hz	26,40 mrad	26,17 mrad	0,9 %
20150 Hz	22,10 mrad	21,91 mrad	0,8 %
20500 Hz	12,30 mrad	12,30 mrad	0 %
21000 Hz	7,00 mrad	7,00 mrad	0 %
22500 Hz	2,90 mrad	2,90 mrad	0 %
25000 Hz	1,40 mrad	1,40 mrad	0 %

Bereiches um die Resonanzfrequenz. Die Resonanzüberhöhung im VHDL-AMS-Simulator ist stark abhängig von der eingestellten maximalen Schrittweite (bei konstanter minimaler Schrittweite). Hier sind Schwankungen von bis zu 30 % feststellbar.

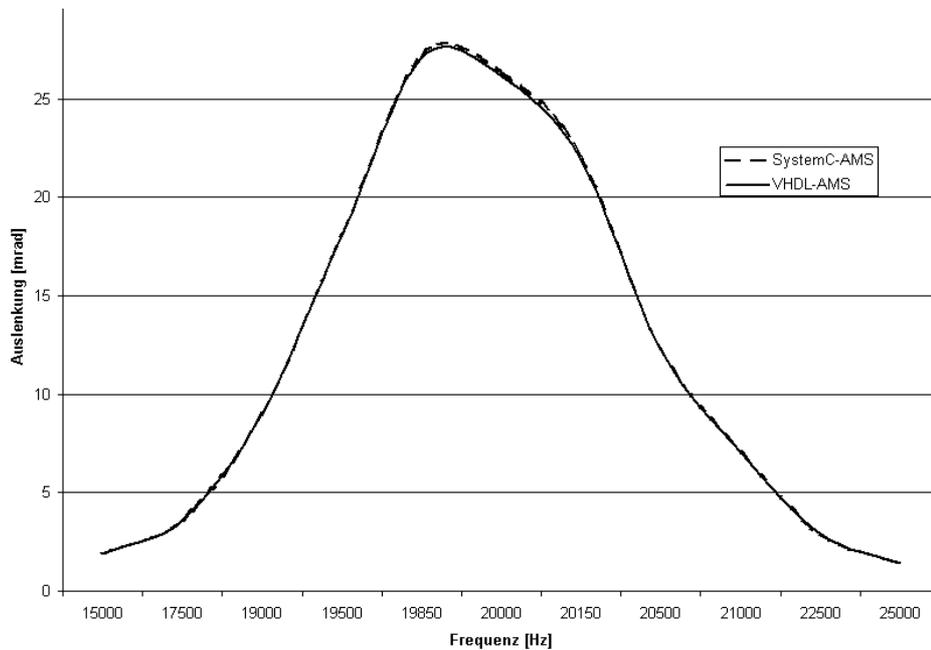


Bild 8: Vergleich der dynamischen Simulationsergebnisse

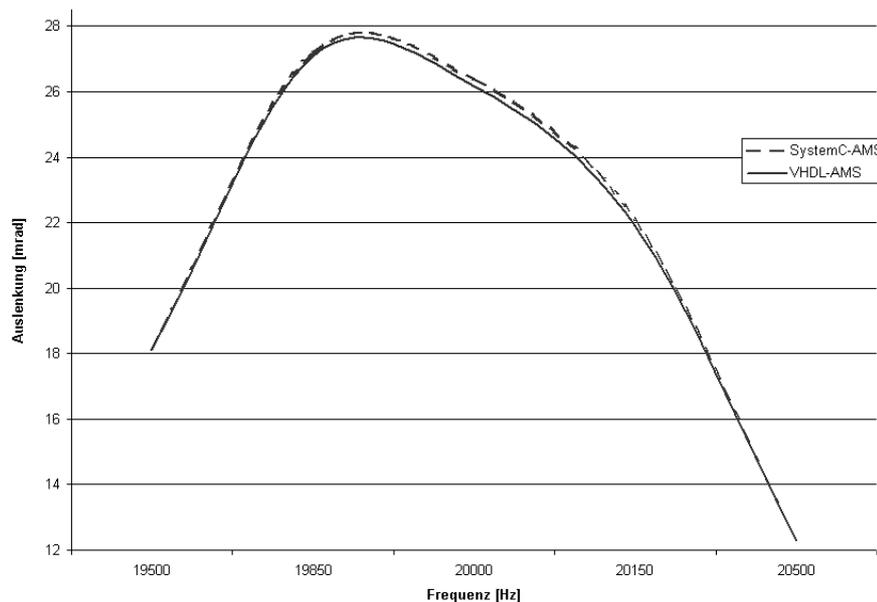


Bild 9: Vergleich der dynamischen Simulationsergebnisse, Resonanzüberhöhung

4 Zusammenfassung

Mit der Verfügbarkeit einer ersten SystemC-AMS-Bibliothek können nun Stärken und Schwächen dieses Konzeptes in der Anwendung geprüft werden. Durch das Unterbinden von Iterationschleifen und das strikt lineare Abarbeiten der Signalflussdiagramme verringern sich die Simulationszeiten gegenüber VHDL-AMS deutlich. Damit einher geht, wie in Tabelle 2 dargestellt, ein Verlust an Genauigkeit. Eine

dynamische Simulation mit Laplace-Elementen (ltf) ist im Zeitbereich mit den verwendeten Parametern nicht möglich gewesen, obwohl eine Simulation im Frequenzbereich die Richtigkeit der Parameter bestätigte. Die Simulation mit Ersatzschaltung weist im Resonanzbereich eine geringe Abweichung zur VHDL-AMS-Referenz auf. Jedoch steigt hier der Beschreibungsaufwand gegenüber der Laplace-Funktion von vier Anweisungen auf über 100 an.

5 Dank

Die hier vorgestellte Arbeit entstand im Rahmen des Teilprojektes A2 „Systementwurf“ des von der DFG geförderten SFB 379 „Mikromechanische Sensor- und Aktorarrays“.

Ein spezieller Dank gilt Herrn Karsten Einwich (FHG Dresden) für die Zusendung der SystemC-AMS-Bibliothek, Version 0.12.

6 Literatur

- [1] Einwich, K. et. al.: *White Paper SystemC-AMS Study Group*.
<http://mixsigc.eas.iis.fhg.de/>
- [2] Einwich, K.: *SystemC-AMS Steps towards an Implementation*. Proceedings Forum on Specification & Design Languages FDL '03, Frankfurt/Main 2003, ISSN 1636-9874
- [3] Open SystemC Initiative (OSCI): *SystemC 2.0.1 Language Reference Manual*. 2003, <http://www.systemc.org>
- [4] Seidel, R.: *Modellierung und Simulation mechatronischer Systeme*. Journal of The Mittweida University of Technology and Economics Vol. II, III/1996, ISSN 1430-3698
- [5] Melzer, L.: *Bildprojektion mit 2D-Torsionsaktorarrays*. Diplomarbeit, TU Chemnitz, 21.05.1997
- [6] Seidel, R.; Müller, D.: *Ansätze zur Drehmomentberechnung bei Mikrospiegeln*. it+ti – Informationstechnik und Technische Informatik, 41. Jahrgang 1999, Heft 4, ISSN 0944-2774