

**Dynamische Spannungsmessungen an Submikrometerleitungen  
mittels der elektrischen Kraftmikroskopie**

Vom Fachbereich Elektrotechnik  
der Gerhard-Mercator-Universität - Gesamthochschule Duisburg

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs  
genehmigte Dissertation

von  
Diplom-Ingenieur  
Ulf Erich Behnke

aus  
Bremen

Referent: Prof. em. Dr.-Ing. E. Kubalek  
Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. F.J. Tegude

Tag der mündlichen Prüfung: 29. November 2002

---

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen	III
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Elektrische Kraftmikroskopie</b>	<b>6</b>
2.1. Prinzip der Rasterkraftmikroskopie	6
2.1.1. Der Kontaktmodus	8
2.1.2. Der Nichtkontaktmodus	10
2.2. Prinzip der elektrischen Kraftmikroskopie (EKM)	14
2.3. Verfahren zur Messung statischer elektrischer Größen	20
2.3.1. Messungen ohne Nullkraftregelung	21
2.3.2. Messungen mit Nullkraftregelung	24
2.4. Verfahren zur Messung dynamischer elektrischer Größen	28
2.4.1. Die heterodyne Mischtechnik	28
2.4.1.1. Qualitative Spannungsmessungen mittels der heterodynen Mischtechnik	29
2.4.1.2. Quantitative Spannungsmessungen mittels der heterodynen Mischtechnik	34
2.4.2. Die Samplingtechnik	35
2.4.2.1. Qualitative Spannungsmessungen mittels der Samplingtechnik	40
2.4.2.2. Quantitative Spannungsmessungen mittels der Samplingtechnik	44
2.5. Diskussion	47
<b>3. Messaufbau, Teststrukturen und Messsonden</b>	<b>49</b>
3.1. Das EKM-Testsystem	49
3.2. Die Teststrukturen	52
3.3. Verwendete Messsonden	55
<b>4. Systematische Untersuchung der EKM-Leistungsparameter bezüglich Messungen an Submikrometerleitungen</b>	<b>59</b>
4.1. Die Leistungsparameter der EKM	60
4.1.1. Die Messempfindlichkeit	60
4.1.2. Die Spannungsauflösung	61
4.1.3. Die Ortsauflösung	62
4.1.4. Die Zeitauflösung, Bandbreite und Frequenzauflösung	63
4.2. Der Geometriefaktor der elektrischen Kraft	65

---

4.3. Zwei-dimensionale Modellbeschreibung des Spitzeneinflusses	70
4.4. Experimentelle Untersuchung der elektrischen Ortsauflösung und Spannungsauflösung	74
4.4.1. Verwendete Messanordnung	74
4.4.2. Untersuchung der EKM-Spannungsauflösung	75
4.4.3. Untersuchung der elektrischen Ortsauflösung der EKM	79
4.5. Untersuchungen zur Optimierung der Messspitzengeometrie	82
4.5.1. Entwicklung einer Simulation zur Berechnung der elektrischen Kraft zwischen der Messspitze und der Probe	82
4.5.2. Simulationen zur elektrischen Orts- und Spannungsauflösung der EKM	85
4.5.3. Simulationen zur Optimierung der Messspitzengeometrie	87
4.6. Diskussion	91
4.7. Messungen mit dem Nadelsensor	94
<b>5. EKM an parallelen Submikrometerleitungen</b>	<b>99</b>
5.1. Überlegungen zum Übersprechen im EKM-Messsignal	99
5.2. Entwicklung eines Berechnungsmodells	102
5.3. Frequenz- und phasengleiche harmonische Leitungsspannungen	107
5.4. Frequenzgleiche gegeneinander phasenverschobene harmonische Leitungsspannungen	111
5.5. Frequenzverschobene Leitungsspannungen	115
5.6. Diskussion	118
<b>6. Messung digitaler Signale mittels heterodyner Mischung</b>	<b>128</b>
6.1. Theoretische Überlegungen	128
6.2. Grundwellendetektion periodischer digitaler Bitfolgen	132
6.2.1. Untersuchung hinsichtlich Mehrdeutigkeit	134
6.2.2. Leistungsgrenzen	138
6.2.3. Realisierung der Grundwellendetektion	141
6.3. Mehrwellendetektion periodischer digitaler Bitfolgen	142
6.3.1. Untersuchung hinsichtlich Mehrdeutigkeit	143
6.3.2. Leistungsgrenzen	147
6.3.3. Realisierung der Mehrwellendetektion	149
6.4. Übersprechen	150
6.5. Diskussion	151
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>154</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>159</b>

## Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Konstanten

$a$	Strukturbreite einer Leiterbahn
$A_0$	Gleichanteil der Fourierreihenentwicklung einer periodischen Einzelbitfolge
$A_{\text{ges},i}$	Amplitude des $i$ -ten dynamischen Terms einer periodischen Bitfolge
$\frac{A_{\text{ges},i}}{a_i}$	komplexer Zeiger des $i$ -ten dynamischen Terms einer periodischen Bitfolge
$a_i$	Strukturbreite der $i$ -ten Leiterbahn
$\Delta a_i$	Breite des EKM-Nutzsignalpeaks über der $i$ -ten Leitung
$A_i$	Amplitude des $i$ -ten dynamischen Terms einer periodischen Einzelbitfolge
$A_{ij}$	Flächenelement der Messspitze
$A_p$	auf die Probe projizierte Fläche des Messspitzenendes
$A_{p_{ij}}$	Projektion des Flächenelements $A_{ij}$ auf die Probenoberfläche
$A_s$	Fläche des Messspitzenendes
$\vec{B}$	Bitvektor
$B_i$	$i$ -te Komponente des Bitvektors
$c$	Federkonstante der Messsonde
$C$	Kapazität der Messsonden-Probenanordnung
$C_{Is}$	Kapazität zwischen Sonde und Probe
$C_{RLZ}$	Raumladungszonenkapazität
$C_{\text{Teil},1,2}$	Teilkapazitäten der Messsonden-Probenanordnung
$D_{1,2,3,4}$	Photodiodenströme im EKM-Detektionssystem
$e$	elektrische Elementarladung
$e$	Eulersche Zahl
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	Einheitsvektoren in $x$ -, $y$ - bzw. $z$ – Richtung
$f, f_1, f_2$	Funktionen
$\Delta f$	geringe Frequenzverschiebung
$f_{p1}, f_{p2}$	Frequenz der Leitungsspannungen $u_{p1}$ bzw. $u_{p2}$
$\vec{F}$	an der Messspitze angreifende Kraft
$\Delta \hat{F}_{2h}$	Differenzkraftamplitude bei der modifizierten 2-Höhenmessung mit anschließender Differenzzeigerbildung
$\Delta \hat{F}_{2h,dif}$	Differenzkraftamplitude bei der 2-Höhenmessung mit anschließender Differenzbildung
$\vec{F}_{\text{Atom}}$	atomare Kraft
$F_e$	externe auf ein Feder-Masse-System einwirkende Kraft
$\vec{F}_{\text{el}}$	elektrische Kraft
$\vec{F}_{\text{el}}(\omega)$	dynamischer Term der elektrischen Kraft bei der Frequenz $\omega$
$\hat{F}_{\text{el}}(\omega)$	Amplitude des elektrischen Kraftterms bei der Frequenz $\omega$
$\vec{F}_{\text{el},2D}$	elektrische Kraft im 2-dimensionalen Berechnungsmodell
$\vec{F}_{\text{el},3D}$	elektrische Kraft im 3-dimensionalen Simulationsmodell

$\vec{F}_{\text{Grav}}$	Gravitationskraft
$\vec{F}_{\text{el,Hebel}}$	elektrische Kraft auf den Hebelarm
$\vec{F}_{\text{el},i}$	elektrische Kraft, die von der $i$ -ten Leitung auf die Messsonde ausgeübt wird
$\hat{F}_{\text{el},i}(\omega)$	elektrische Kraftamplitude bei der Frequenz $\omega$ , die von der $i$ -ten Leitung auf die Messsonde ausgeübt wird
$\vec{F}_{\text{el},ij}$	elektrische Kraft auf ein Flächenelement $A_{ij}$ der Messspitze
$\vec{F}_{\text{M}}$	Magnetkraft
$F_{\text{el,max}}$	maximale elektrische Kraft über einer signalführenden Leitung
$\vec{F}_{\text{mech}}$	mechanische Rückstellkraft des Hebelarms
$F_{\text{el,min}}$	minimale elektrische Kraft zwischen zwei signalführenden Leitungen
$\vec{F}_{\text{el,min}}$	minimal aus dem Rauschen detektierbare elektrische Kraft
$F_{\text{el,mod}}$	nachgebildete elektrische Kraft
$\hat{F}_{\text{el,mod}}$	Amplitude der nachgebildeten elektrischen Kraft
$\hat{F}_{\text{el,mod}}$	komplexer Zeiger der nachgebildeten elektrischen Kraft
$\underline{F}_{\text{el,mod}}$	komplexe nachgebildete elektrische Kraft
$F_{\text{el,mod},i}$	nachgebildete elektrische Kraft, welche von der $i$ -ten Leitung auf die Messsonde ausgeübt wird
$\hat{F}_{\text{el,mod},i}$	Amplitude von $F_{\text{el,mod},i}$
$\underline{F}_{\text{el,mod},i}$	komplexer Zeiger der nachgebildeten, elektrischen Kraft, welche von der $i$ -ten Leitung auf die Messsonde ausgeübt wird
$\vec{F}_{\text{el,offset}}$	ortsunabhängiger Anteil der elektrischen Kraft
$F_{\text{el,rausch}}$	Rauschen in der elektrischen Kraft
$\vec{F}_{\text{res}}$	auf die Messspitze einwirkende Gesamtkraft
$\vec{F}_{\text{el,signal}}$	ortsabhängiger Anteil der elektrischen Kraft
$\vec{F}_{\text{el,Spitze}}$	elektrische Kraft auf die Messspitze
$\vec{F}_{\text{el,Teil1}}$	elektrische Kraft auf das Messspitzenende
$\vec{F}_{\text{el,Teil2}}$	elektrische Kraft auf den Hebelarm sowie den oberen Teil der Messspitze
$g$	Funktion
$\Delta h$	Messsondenauslenkung
$\hat{\Delta h}$	Amplitude der Messsondenauslenkung
$\Delta h'$	Auslenkung der Messsonde aus der Horizontalen
$\Delta h_0$	Grundauslenkung der Messsonde durch die Gravitationskraft $\vec{F}_{\text{Grav}}$
$\Delta h_{\text{ist}}$	Istauslenkung der Messsonde
$\Delta h_{\text{soll}}$	Sollauslenkung der Messsonde bei Verwendung einer Abstandsregelung
$h_{\text{SP}}$	Höhe der Messspitze
$i$	Laufindex, ganze Zahl
$i_0$	Photostrom des Detektorsystems
$i_{\text{ind}}$	induzierter Strom beim Kelvinsondenverfahren
$i_{\text{rausch}}$	Rauschstrom im Detektionssystem

---

$i_{\text{signal}}$	Nutzsignalstrom im Detektionssystem
$j$	imaginäre Zahl
$j$	Laufindex, ganze Zahl
$k$	Geometriefaktor der elektrischen Kraft (potenzialunabhängiger Faktor)
$k_{\text{abstoß}}$	werkstoffabhängige Konstante in der Atomkraft $\vec{F}_{\text{Atom}}$
$k_{\text{anzieh}}$	werkstoffabhängige Konstante in der Atomkraft $\vec{F}_{\text{Atom}}$
$k_i$	Geometriefaktor der elektrischen Kraft, welche von der $i$ -ten Leitung auf die Messsonde ausgeübt wird
$k_{\text{mod},i}$	nachgebildeter Geometriefaktor der elektrischen Kraft, welche durch die $i$ -te Leitung auf die Messsonde ausgeübt wird
$k_{\text{offset}}$	ortsunabhängiger Teil des Geometriefaktors
$k_{\text{signal}}$	ortsabhängiger Nutzsignalanteil des Geometriefaktors
$k_{\text{signal,max},i}$	maximaler Nutzsignalanteil über der $i$ -ten Leitung
$k_{\text{Teil1,2}}$	durch die Teilkapazität $C_{\text{Teil1,2}}$ erzeugter Anteil des Geometriefaktors
$M$	Modulationsgrad
$m$	Masse
$m_{\text{SP}}$	Steigung der Messspitzenrandkurve $z(r)$
$N, n$	ganze Zahlen
$N^+$	positive, ganze Zahl
$Q$	Güte eines Schwingungssystems
$R$	maximaler Radius der Messspitze
$R_{\text{AUS}}$	Ausgangswiderstand des Nadelsensors
$R_{\text{EIN}}$	Eingangswiderstand des Nadelsensors
$r_{ij}$	Abstand des Flächenelements $A_{ij}$ zur $z$ -Achse
$r_{\text{S}}$	minimaler Radius der Messspitze
$s_{\text{abt}}$	Abtastsignal bei der Samplingtechnik
$\hat{s}_{\text{abt}}(t)$	Amplitude des Abtastsignals
$S_{\text{CCD}}$	Signal für die CCD-Kamera
$S_{\text{el}}$	Detektorausgangssignal
$\hat{S}_{\text{el}}$	Amplitude des Detektorausgangssignals
$S_{\text{el,signal}}$	vom Abtastzeitpunkt abhängiger Anteil des Detektorausgangssignals bei der Samplingtechnik
$S_{\text{el,offset}}$	zeitlicher Mittelwert aller vom Abtastpunkt $t_0$ unabhängigen Spannungsprodukte bei der Samplingtechnik
$S_{\text{mess}}$	Ausgangssignal eines Messgerätes
$S_{\text{mess,max}}$	maximales Ausgangssignal des Messgerätes bei einer Linienrasterung über einen abrupten Sprung der Messgröße
$S_{\text{real}}$	Messgröße
$S_{\text{P}}$	hochfrequentes, periodisches Probensignal

---

$\hat{s}$	Signalhub bei einem digitalen Signal
$s_{Bi}$	periodische Einzelbitfolge, bei der das $i$ -te Bit gesetzt ist
$t$	Zeit
$T$	Periodendauer
$t_0$	fester Zeitpunkt
$\Delta T$	Periodendauer der Frequenzverschiebung bei der Samplingtechnik, durch welche der Abtastpuls über das hochfrequente Signal geschoben wird
$T_{\text{abt}}$	Periodendauer des Abtastsignals
$\Delta T_{\text{abt}}$	Pulsbreite des Abtastsignals
$\Delta T_{\text{abt},0}$	Basispulsbreite bei einem pulswertenmodulierten Signal
$\Delta T_{\text{abt},1}$	Amplitude der zeitlichen Pulsbreitenveränderung bei einem pulswertenmodulierten Signal
$T_B$	zeitliche Bitlänge
$T_P$	Periodendauer eines hochfrequenten Messsignals
$T_P^*$	skalierte Periodendauer des mittels der Samplingtechnik abgetasteten hochfrequenten Signals
$T_r$	Periodendauer der Messsondenresonanzfrequenz
$t^*$	skalierter Zeitbereich bei der Samplingtechnik
$U$	elektrische Spannung
$\hat{u}$	Amplitude einer elektrischen Wechselspannung
$\Delta \hat{u}_{\text{AUS}}$	Amplitudenänderung der Ausgangsspannung beim Nadelsensor
$u_{\text{AUS}}$	Ausgangsspannung des Nadelsensors
$u_{\text{EIN}}$	Anregungsspannung des Nadelsensors
$u_{\text{NF}}$	niederfrequente Spannung
$U_P$	Gleichspannung an der Probe
$u_P$	dynamische Probenspannung
$u_{P0111}$	periodische digitale Probenspannung der Bitfolge 0111
$u_{P,AM}$	amplitudenmodulierte Probenspannung
$u_{Pi}, u_{Pj}$	dynamische Probenspannung der $i$ -ten bzw. $j$ -ten Leitung
$\hat{u}_{Pi}, \hat{u}_{Pj}$	Amplitude der dynamischen Probenspannung $u_{Pi}$ bzw. $u_{Pj}$
$U_{\text{Piezo},xyz}$	Piezospansungen
$U_{\text{Piezo},z}$	Piezospannung des $z$ -Piezos
$U_{Pij}$	elektrische Spannung zwischen $A_{ij}$ und $A_{Pij}$
$u_{P,\text{min}}$	minimal detektierbare Probenspannung
$\hat{u}_{P,\text{min}}$	minimal detektierbare Probenspannungsamplitude
$u_S$	dynamische Messsondenspannung
$\hat{u}_S$	Amplitude der dynamischen Messsondenspannung $u_S$
$U_S$	Gleichspannung an der Messsonde
$u_{S,\text{abt}}$	Abtastspannung bei der Samplingtechnik

$\hat{u}_{S,F=0}$	Messsondengleichspannung, welche den detektierten Kraftterm zu Null werden lässt
$U_{SP}$	Messsonden-Probengleichspannung: $U_S - U_P$
$U_{SPi}$	Spannung zwischen der $i$ -ten Leitung und der Messsonde
$W_0$	Vakuumentenergieniveau
$W_{el}$	elektrische Energie
$W_F$	Fermienergie
$W_{F,P}$	Fermienergie der Probe
$W_{F,S}$	Fermienergie der Sonde
$W_{0,P}$	Vakuumentenergie der Probe
$W_{0,S}$	Vakuumentenergie der Messsonde
$W_{L,P}$	Leitungsbandniveau der Probe
$W_{V,P}$	Valenzbandniveau der Probe
$x$	Raumrichtung
$x_{1,A}$	$x$ -Position der linken Kante einer Leitung
$x_{1,E}$	$x$ -Position der rechten Kante einer Leitung
$x_{Ende}$	$x$ -Position des Endpunkts einer Linienraasterung
$x_i$	$x$ -Position des Mittelpunkts der $i$ -ten Leitung
$x_{Start}$	$x$ -Position des Startpunkts einer Linienraasterung
$y$	Raumrichtung
$z$	Raumrichtung
$Z$	Anzahl der Bits pro Periode bei einem periodischen digitalen Signal
$z(r)$	Messspitzenrandkurve
$z_0$	Messspitzen–Probenabstand
$z_{0i}$	Messspitzen–Probenabstand der $i$ -ten Leitung
$z_h(t)$	homogene Lösung der inhomogenen DGL einer erzwungenen Schwingung
$z_{offset}$	am PC eingestellte, statische Position der Messsonde
$z_p(t)$	partikuläre Lösung der inhomogenen DGL einer erzwungenen Schwingung
$\hat{z}_p$	Schwingungsamplitude von $z_p(t)$
$z_{regel}$	Regelsignal für die $z$ -Position der Messsonde am Ausgang des PID-Reglers
$z_T$	$z$ -Position des Messsondenträgerkörpers
$\delta$	Abklingkoeffizient einer gedämpften Schwingung
$\epsilon$	Permittivität
$\epsilon_0$	Vakuumentpermittivität
$\epsilon_r$	relative Permittivität
$\Phi$	Phase des detektierten elektrischen Kraftterms
$\Delta\Phi_{2H,dif}$	Phase der Differenzkraft bei der 2-Höhenmessung mit anschließender Differenzbildung



$\Delta\Phi_{2H}$	Phase des Differenzkraftzeigers bei der modifizierten 2-Höhenmessung mit anschließender Differenzbildung
$\Phi_{\text{mod}}$	Phase der nachgebildeten, elektrischen Gesamtkraft
$\Delta\phi$	Differenz der Austrittsarbeiten von Probe und Sonde
$\phi_P$	Austrittsarbeit der Probe
$\phi_S$	Austrittsarbeit der Sonde
$\varphi_1$	Phase der Grundwelle der Einzelbitfolge $s_{B1}$
$\varphi_{\text{ges},i}$	Phase des $i$ -ten dynamischen Terms einer periodischen Bitfolge
$\Delta\varphi_{Bn,\text{min}}$	minimal auftretende Phasendifferenz zwischen zwei Einzelbitfolgen gleicher Periodendauer
$\varphi_{\text{NF}}$	Phasenwinkel einer niederfrequenten Spannung
$\varphi_P$	Phase der Probenspannung
$\varphi_{Pi}$	Phase der Probenspannung auf der $i$ -ten Leitung
$\Delta\varphi$	Phasenverschiebung zwischen zwei Leitungsspannungen
$\Delta\varphi_i$	Phasenverschiebung zwischen der Messsondenspannung und der $i$ -ten Probenspannung
$\Delta\varphi_{i+1/1}$	Phasenverschiebung zwischen der $i$ -ten Oberwelle und der Grundwelle einer periodischen Bitfolge
$\pi$	Pi
$\omega$	Kreisfrequenz
$\Delta\omega$	Differenzfrequenz
$\omega_0$	Eigenfrequenz
$\omega_e$	externe Anregungsfrequenz, die eine Schwingung des Feder-Masse-Systems erzwingt
$\omega_{el}$	elektrische Anregungsfrequenz
$\omega_h$	Frequenz einer homogenen Differenzialgleichung
$\omega_m$	mechanische Anregungsfrequenz
$\omega_{\text{NF}}$	niederfrequente Kreisfrequenz
$\omega_P$	Frequenz der Probenspannung
$\omega_{Pi}$	Frequenz der harmonischen Probenspannung auf der $i$ -ten Leitung
$\omega_r$	Messsondenresonanzfrequenz
$\omega_S$	Frequenz der Messsondenspannung
$\xi$	Position des Leitungsmittelpunkts auf der $x$ -Achse
$\Delta\Psi$	Phasenverschiebung zwischen der Anregungsspannung und der Schwingung des Nadelsensors
$\Delta\Psi_0$	$\Delta\Psi$ neben einer signalführenden Leitung
$\Delta\Psi_{0-L}$	Nutzsignalhub beim Nadelsensor: $\Delta\Psi_0 - \Delta\Psi_L$
$\Delta\Psi_L$	$\Delta\Psi$ über einer signalführenden Leitung

---

**Abkürzungen:**

2-D:	zweidimensional
3-D:	dreidimensional
a.u.:	ohne Einheiten
cm:	Zentimeter
DGL:	Differenzialgleichung
EKM:	elektrische Kraftmikroskopie
GHz:	Gigahertz
HF:	hochfrequent oder Hochfrequenz
Hz:	Hertz
KPFM:	Kelvin Probe Force Microscopy
MIS:	Metall-Isolator-Halbleiter (Metal-Insulator-Semiconductor)
m:	Meter
mm:	Millimeter
mV:	Millivolt
nm:	Nanometer
NF:	niederfrequent oder Niederfrequenz
$\Omega$ :	Ohm
PID-Regler:	Proportional Integral Differenzial-Regler
REM:	Rasterelektronenmikroskop
RKM:	Rasterkraftmikroskop
RLZ:	Raumladungszone
SMSM:	Scanning Maxwell Stress Microscopy
UHV:	Ultra Hochvakuum
V:	Volt