

# Integration von Nanodrahtarrays in Mikrosysteme für die Gasflusssensorik

## Integration and Application of Nanowire Arrays in Microsystems for Gasflow Sensors

S. Quednau<sup>1)</sup>, F. Greiner<sup>1)</sup>, H. F. Schlaak<sup>1)</sup>, M. Rauber<sup>2),3)</sup>, R. Neumann<sup>2)</sup>, W. Ensinger<sup>3)</sup>

1) Technische Universität Darmstadt, Institut für Elektromechanische Konstruktionen

2) GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH, Abteilung Materialforschung

3) Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Materialanalytik

### Kurzfassung

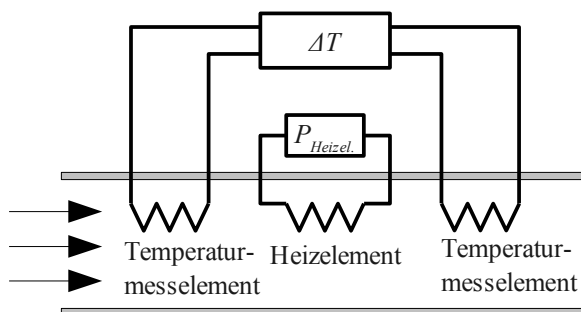
Nanodrähte sind durch ihr großes Oberflächen/Volumen-Verhältnis von hier etwa  $1,6 \cdot 10^7 \text{ m}^2/\text{m}^3$  ein interessantes Untersuchungsobjekt zur Minimierung der Ansprechzeit von Mikrogasflusssensoren. Diese Arbeit beschreibt die Modellierung von Nanodrahtarrays in Gasflüssen. Sie geht auf Temperatursprünge von 1 K bei Gasflüssen  $< 1 \text{ m/s}$  ein. Die Simulationsergebnisse legen nahe, dass bei Nanodrahtarrays Zeitkonstanten von  $< 10^{-3} \text{ s}$  und bei einzelnen Nanodrähten um mehr als drei Größenordnungen kleinere Zeitkonstanten möglich sind. Weiterhin beschreibt diese Arbeit einen Prozessablauf zur Integration von Nanodrahtarrays in ein Mikrosystem zur Gasflussanalyse. Die Bündelung von drei Nanodrahtarrays ist experimentell realisiert und vereinfacht die Handhabung bei der Montage. Sie ermöglicht eine beidseitige Kontaktierung der Nanodrahtarrays mit einer planaren Mikrostruktur.

### Abstract

The surface-area-to-volume ratio of about  $1,6 \cdot 10^7 \text{ m}^2/\text{m}^3$  makes the examined nanowires an interesting subject to analyze for the minimization of micro flow sensor's response time. This paper depicts the modeling of nanowire arrays in gas flows. It dwells on sudden temperature changes of 1 K at gas flows  $< 1 \text{ m/s}$ . The simulation results suggest time constants of  $< 10^{-3} \text{ s}$  for nanowire arrays and more than three orders of magnitude less ones for single nanowires. Furthermore, this paper discusses a process flow for the integration of nanowire arrays in a microsystem for gas flow analysis. The grouping of three nanowire arrays is experimentally realized and eases the handling during the assembly process. It enables double-sided interconnection of the nanowire arrays on a planar microstructure.

## 1 Mikrogasflusssensoren

Mikrotechnisch gefertigte Gasflusssensoren setzen hauptsächlich thermische Messprinzipien ein [1]. Hierbei unterscheidet man zwischen Hitzdraht bzw. Heißfilm-Sensoren und kalorimetrischen Sensoren. Hitzdraht- bzw. Heißfilm-Sensoren verwenden ein Heizelement, dessen Wärmeverlust bei Gasströmung gemessen wird. Für das kalorimetrische Messprinzip ordnet man symmetrisch vor und hinter dem Heizelement zwei Temperaturmesselemente an. Dabei ist das Heizelement konstant temperiert [1], s. Bild 1.



**Bild 1** Funktionsprinzip eines kalorimetrischen Gasflusssensors [1]

Ausgangsgröße des Sensors ist die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Temperaturmesselementen. Kalorimetrische Durchflusssensoren zeichnen sich durch eine höhere Sensitivität und Genauigkeit bei niedrigen Gasgeschwindigkeiten aus als Hitzdraht- bzw. Heißfilm-Sensoren [2]. Üblicherweise kommen als Temperaturmesselemente resistive Dünnschichtelemente zum Einsatz ([1], [3]), die mit Hilfe einer Wheatstone'schen Brücke ausgewertet werden. Zur thermischen Isolation positioniert man sowohl die Heiz- als auch die Messelemente auf einer Siliziummembran. Die Ansprechzeiten kalorimetrischer Mikrogasflusssensoren liegen bei einigen Millisekunden.

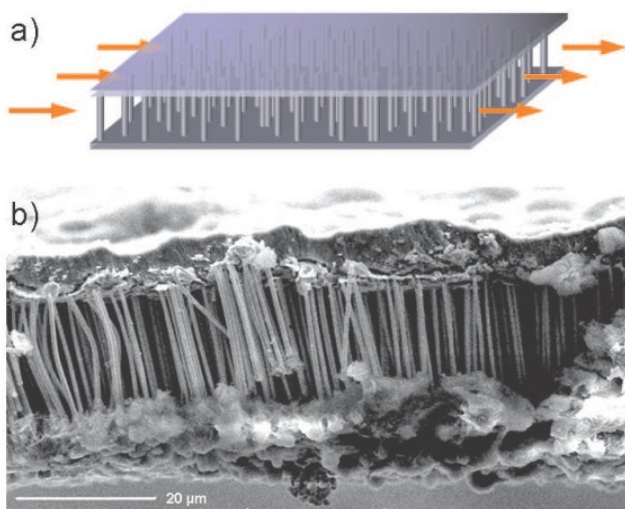
### 1.1 Nanodrahtarrays als Temperaturmesselemente

Ziel der Arbeit ist es, die resistiven Temperaturmesselemente durch Nanodrahtarrays zu ersetzen. Nanodrähte verfügen, verglichen mit Dünnschichten, über ein höheres Oberflächen/Volumen-Verhältnis. Dies beschleunigt den Temperaturaustausch mit dem umgebenden Gas. Im Gegensatz zu Dünnschichtmesselementen sind die Nanodrähte nur über die sehr kleinen Stirnflächen mit dem Substrat verbunden. Daher ist die thermische Isolierung gegenüber

Substrat deutlich besser als bei Dünnschichtwiderständen (vgl. [2]).

## 2 Eigenschaften der Nanodrahtarrays

Die in dieser Arbeit verwendeten Nanodrahtarrays entstammen einer Zusammenarbeit der Abteilung Materialforschung am Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung Darmstadt (GSI) und dem Fachgebiet Materialanalytik der TU Darmstadt. Dazu wird eine ionenspurgeätzte Templatfolie aus Polycarbonat (Makrofol, Bayer) elektrochemisch mit Platin gefüllt [1]. Durch gezieltes Überwachsen der Nanodrähte auf der Ober- und Unterseite der Membran entstehen Verbände aus Nanodrähten, die als Nanodrahtarrays (Nanowire Array *NWA*) bezeichnet werden [5], s. Bild 2. Eine metallische Lochmaske wäh-

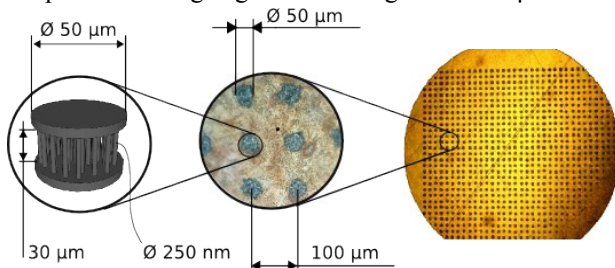


**Bild 2** a) Schematische Darstellung eines geschlossenen Nanodrahtarrays b) REM-Aufnahme eines geschlossenen Nanodrahtarrays [4]

rend der Schwerionenbestrahlung der Templatfolie bestimmt die laterale mikroskopische Form der Nanodrahtarrays.

### 2.1 Geometrische Eigenschaften

Die hier verwendeten Nanodrahtarrays haben einen lateralen Durchmesser von ca.  $50\ \mu\text{m}$ . In der Templatfolie sind sie mit einem Abstand von  $100\ \mu\text{m}$  angeordnet (siehe Bild 3). Die Länge der Nanodrähte ist durch die Dicke der Templatfolie festgelegt und beträgt hier  $30\ \mu\text{m}$ . Den



**Bild 3** Matrixartig in einer Templatfolie angeordnete Nanodrahtarrays

Durchmesser bestimmen die Ätzparameter und er beträgt hier ca.  $250\ \text{nm}$ . Mit dem gleichen Prozess lassen sich auch dünnere Nanodrähte bis minimal  $30\ \text{nm}$  herstellen. Es ergibt sich, stark vereinfacht geometrisch berechnet, ein Oberflächen/Volumen-Verhältnis von  $1,6 \cdot 10^7 \frac{\text{m}^2}{\text{m}^3}$  für einen Nanodraht mit  $250\ \text{nm}$  Durchmesser. Methoden zur Messung der tatsächlichen Oberfläche von Nanodrahtarrays finden sich in [6].

Bei einer Porendichte von  $10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$  im Templatmaterial besteht ein Array aus ca. 2000 einzelnen Drähten, die statistisch angeordnet sind. Wird der statistische Charakter der Drahtverteilung vernachlässigt und eine äquidistante Verteilung angenommen, lässt sich ein mittlerer Drahtabstand von  $1\ \mu\text{m}$  ermitteln.

### 2.2 Physikalische Eigenschaften

Mit dem spezifischen Widerstand des Bulkmaterials  $\rho_{\text{Pt, Bulk}} = 105,8 \cdot 10^{-3} \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$  ergibt sich für den Widerstand eines Nanodrahtes  $R_{\text{Draht}} = 64,4\ \Omega$  und für den eines Arrays aus 2000 Drähten  $R_{\text{ges}} = \frac{R_{\text{Draht}}}{2000} = 32\ \text{m}\Omega$ . Bei Drahtdurchmessern  $< 1\ \mu\text{m}$  müssen die Streuwiderstände an den Korngrenzen berücksichtigt werden [7]. Im Experiment ist daher mit einem weniger als eine Größenordnung größeren Widerstand  $R_{\text{ges}}$  der Nanodrahtarrays zu rechnen.

Da die Nanodrähte nur über die Stirnflächen mit den Kappen thermisch gekoppelt sind, können die Kappen bei der Berechnung der Wärmekapazität vernachlässigt werden. Mit vereinfachenden Annahmen ( $c_{\text{Pt, Bulk}} = 130 \cdot 10^{-3} \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{g}}$ ) ergibt sich eine Wärmekapazität für einen einzelnen Nanodraht von  $C_{\text{Draht}} = 4,1 \cdot 10^{-8} \frac{\text{J}}{\text{K}}$  und für ein Nanodrahtarray von  $C_{\text{ges}} = 2000 \cdot C_{\text{Draht}} = 8,2 \cdot 10^{-5} \frac{\text{J}}{\text{K}}$ .

## 3 Wärmeaustausch zwischen Gas und Nanodrähten

Für die mittlere freie Weglänge  $\lambda$  gilt [8]:

$$\lambda = \frac{\mu}{\rho} \sqrt{\frac{\pi}{2RT}} \quad \text{Mittlere freie Weglänge} \quad (1)$$

Bei Standardbedingungen beträgt  $\lambda$  für Luft etwa  $60\ \text{nm}$  und liegt damit in der Größenordnung der funktionsbestimmenden Abmessungen im Nanodrahtarray. Die bei makroskopischen Strukturen verwendete Behandlung des Gases als Kontinuum ist deshalb nicht ohne weiteres zulässig [9].

Ein Maß für den Zustand der Strömung, und damit die Gültigkeit mathematischer Modelle ist die Knudsenzahl  $Kn$  [10]:

$$Kn = \frac{\lambda}{L} \quad \text{Knudsenzahl} \quad (2)$$

Mit ihr lassen sich die Strömungsbereiche und die damit verbundenen Modelle nach Tabelle 1 einteilen.

Nomenklatur			
$a$	Abstand zwischen Nanodrähten (m)	$\lambda$	mittlere freie Weglänge
$c$	spezifische Wärmekapazität (J/K kg)	$\mu$	dynamische Viskosität (kg/m s)
$C$	Wärmekapazität (J/K)	$\rho$	Dichte (kg/m <sup>3</sup> ), spez. elektrischer Widerstand ( $\Omega$ m)
$d$	Durchmesser der Nanodrähte (m)	$\sigma_v$	Momentenakkommodationskoeffizient
$k$	Verhältnis der spez. Wärmekapazitäten	$\sigma_T$	thermischer Akkommodationskoeffizient
$Kn$	Knudsenzahl	DSMC	Direkte Monte Carlo Simulation
$L$	charakteristische Länge des Systems (m)	MD	Molekulardynamische Simulation
$n$	Normalenkoordinate		
$R$	spezifische Gaskonstante		
$p$	Druck (N/mm <sup>2</sup> )		
$Pr$	Prandtlzahl		
$t$	Zeit (s)		
$T$	Temperatur (K)		
$\vec{v}$	Gasgeschwindigkeit (m/s)		
$\kappa$	spez. Wärmeleitfähigkeit (W/m K)		

$$\nabla T = \begin{pmatrix} \frac{\partial T}{\partial x} \\ \frac{\partial T}{\partial y} \\ \frac{\partial T}{\partial z} \end{pmatrix} \quad \Delta \vec{v} = \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{v}}{\partial z^2}$$

$$\vec{v} \cdot \nabla = v_x \cdot \frac{\partial}{\partial x} + v_y \cdot \frac{\partial}{\partial y} + v_z \cdot \frac{\partial}{\partial z}$$

Für ein Nanodrahtarray ergibt sich in erster Näherung mit der Annahme der charakteristischen Systemlänge als mittlerer freier Abstand zwischen zwei Nanodrähten:

$$Kn = \frac{\lambda}{a-d} = \frac{60 \text{ nm}}{750 \text{ nm}} \approx 0,08 \quad (3)$$

Nach Tabelle 1 beschreiben Navier-Stokes-Gleichungen mit Gleitrandbedingungen die Gasströmungen im Nanodrahtarray.

**Tabelle 1** Strömungsbereiche nach [10] und [11]

Strömungsbereich	Knudsenzahl	Modell
Kontinuumsströmung	$0 < Kn < 10^{-2}$	Navier-Stokes-Gleichungen
Gleitströmung (Slip-Flow)	$10^2 < Kn < 10^{-1}$	Navier-Stokes-Gleichungen mit Gleitrandbedingungen
Nahezu freie Molekülströmung	$10^{-1} < Kn < 10$	DSMC, MD
Freie Molekülströmung	$10 < Kn < \infty$	MD

### 3.1 Inkompressible Navier-Stokes-Gleichungen mit Slip-Randbedingungen

Da bei Mikrogasflusssensoren Gasgeschwindigkeiten von weit unterhalb der Schallgeschwindigkeit auftreten, kann das Gas als inkompressibel angesehen werden [12]. Damit beschreiben folgende Gleichungen den Gasfluss:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad \text{Äquivalenzgleichung} \quad (4)$$

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \cdot \Delta \vec{v} \quad \text{Impulserhaltungsgleichung} \quad (5)$$

Die Temperaturverteilung lässt sich beim inkompressiblen Modell entkoppelt mit folgender Gleichung berechnen:

$$\rho c \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla T \right) - \kappa \cdot \Delta T = 0 \quad \text{Wärmetransportgleichung} \quad (6)$$

### 3.1.1 Maxwell'scher Geschwindigkeitssprung

Im Folgenden bezeichnen alle mit  $S$  indizierten Größen die jeweilige Größe an der Grenzfläche zwischen Festkörper und Gas. Für die Differenz  $\Delta \vec{v}_S$  zwischen der Geschwindigkeit der Festkörperfläche  $\vec{v}_{S, \text{Wand}}$  und der Gasgeschwindigkeit an der Grenzfläche  $\vec{v}_{S, \text{Gas}}$  gilt in makroskopischen Skalen  $\Delta \vec{v}_S = 0$ . Bei Abmessungen in der Größenordnung der mittleren freien Weglänge von Luft gilt diese Annahme nicht mehr, sondern [8]:

$$\Delta \vec{v}_S = \lambda \frac{2 - \sigma_v}{\sigma_v} \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial n} \right)_S \quad \text{Maxwell'sche Slip-Randbedingung} \quad (7)$$

Die Momentenakkommodationskoeffizienten  $\sigma_v$  können nicht genau angegeben werden, was eine exakte quantitative Betrachtung unmöglich macht. Die derzeit einzigen Messungen der Momentenakkommodationskoeffizienten wurden in [13] durchgeführt. Sie sind für verschiedene Materialpaarungen in [3] angegeben.

Grundsätzlich wirkt sich der Effekt des Geschwindigkeitsslips positiv auf den Temperaturtransport durch erzwungene Konvektion im Array aus.

### 3.1.2 v. Smoluchowski'scher Temperatursprung

Für die Temperatur an Grenzflächen zwischen Festkörper und Gas gelten die gleichen Annahmen wie für die Geschwindigkeit bei  $10^2 < Kn < 10^{-1}$ . Die Temperatur des Gases an der Grenzfläche  $T_{S, \text{Gas}}$  unterscheidet sich von der des Festkörpers  $T_{S, \text{Wand}}$  [8]:

$$\Delta T_S = \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \frac{2k}{k+1} \frac{\lambda}{Pr} \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_S \quad \text{v. Smoluchowski Temperatursprung} \quad (8)$$

Auch die thermischen Akkommodationskoeffizienten  $\sigma_T$  lassen sich nicht genau quantifizieren, jedoch nach [3] und [13] abschätzen.

### 3.1.3 2-Regionen-Simulation mit Slip-Randbedingungen

Analytisch lassen sich die oben beschriebenen Gleichungen nicht umfassend lösen, weshalb man das Erwärmungsverhalten der Nanodrahtarrays mit numerischer Simulation betrachtet. Der Simulationsraum lässt sich in zwei Regionen einteilen:

1. Gasraum: Die Gleichungen (4) - (6) werden mit den Randbedingungen (7) und (8) gelöst.
2. Festkörper: Die Wärmeleitungsgleichung (9) wird gelöst.

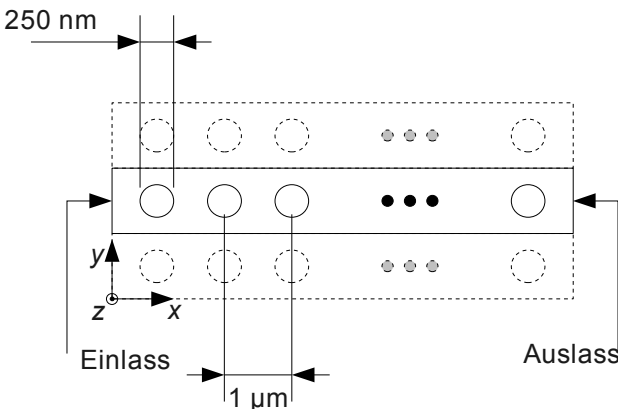
$$\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \kappa_{\text{Solid}} \cdot \Delta T = 0 \quad \text{Wärmeleitungsgleichung (9)}$$

Die Kopplung der beiden Regionen findet dabei explizit statt [14]. Im aktuellen Zeitschritt berechnet man zunächst die Temperaturverteilung in der Gasregion. Dann folgt die Berechnung des Wärmeflusses in den Festkörper. Dieser dient als Randbedingung für die Berechnung der Temperaturverteilung im Festkörper. Nachdem die Temperaturverteilung im Festkörper bestimmt ist, werden die Randbedingungen für die Gasregion angepasst, die der Berechnung im nächsten Zeitschritt zugrunde liegen.

Derzeit bietet keine kommerzielle Software die Implementierung der in Abschnitt 3.1.1 und 3.1.2 beschriebenen Sprünge in eine 2-Regionen-Simulation an. Daher kommt zur Berechnungen die OpenSource Software OpenFOAM zum Einsatz. In OpenFOAM kann der Quellcode der Gleichungslöser in geeigneter Weise modifiziert werden.

### 3.2 Modellierung eines Nanodrahtarrays

Eine exakte Modellierung der Nanodrahtarrays ist wegen der dafür benötigten immensen Rechnerressourcen nicht möglich. Wir betrachten daher einen Auszug aus einem idealisierten Nanodrahtarray. Dazu gehen wir von einer Reihe aus 50 Nanodrähten mit einem homogenen Abstand von je 1  $\mu\text{m}$  aus und erstellen ein zweidimensionales Modell, s. Bild 4. Wegen der wesentlich größeren Ausdehnung der Nanodrähte in z-Richtung als in x- bzw. y-Richtung



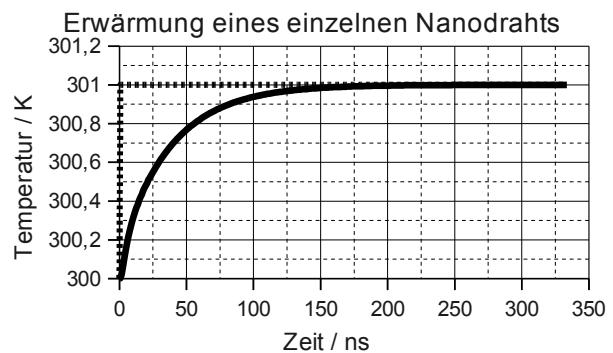
**Bild 4** 2D-Modell für ein Nanodrahtarray: Durch zyklische Randbedingung in y-Richtung fortgesetzter Streifen aus Nanodrähten.

tung verwenden wir zur Reduzierung der Rechenzeit ein zweidimensionales Modell.

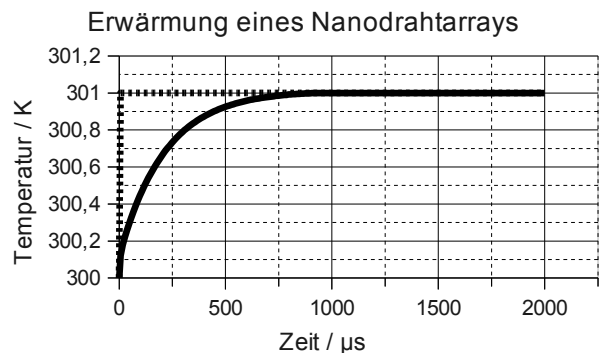
An der Ober- und der Unterseite des Nanodrahtstreifens nehmen wir eine zyklische Randbedingung an [15]. Dadurch verhält sich das Modell so, als würde es nach oben und unten unendlich oft fortgesetzt. Mit diesem Vorgehen lassen sich viele Nanodrähte simulieren, obwohl das Modell selbst nur aus 50 Nanodrähten besteht. An den Grenzflächen zwischen Nanodraht und Gasraum nehmen wir die in den Abschnitten 3.1.1 und 3.1.2 beschriebenen Randbedingungen an. Am Einlass (vgl. Bild 4 links) geben wir die Gasflussgeschwindigkeit  $\vec{v}$  in m/s und die Temperatur  $T$  in K vor. Am Auslass setzen wir für beide Größen den Gradienten zu 0.

### 3.3 Reaktion eines Nanodrahtarrays auf einen Temperatursprung

Die Reaktion eines Nanodrahtarrays bei einem Temperatursprung lässt sich übertragen auf die Reaktion eines Nanodraht-Gasflusssensors bei einer Gasflussänderung. Für kleine Gasflüsse von  $\vec{v} < 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  liegt der Temperatursprung üblicherweise im unteren einstelligen  $^{\circ}\text{C}$ -Bereich [16]. Deshalb sei ein Temperatursprung am Einlass (vgl. Bild 4) von 300 K auf 301 K angenommen. Bei einem solch geringen Temperaturanstieg wird die Temperatur hauptsächlich durch Konvektion transportiert. Zunächst berechnen wir die Sprungantwort eines einzelnen Nan-



**Bild 5** Durchschnittstemperatur eines einzelnen Nanodrahts nach einem Temperatursprung von 300 K auf 301 K und einer Gasgeschwindigkeit  $\vec{v}$  von  $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

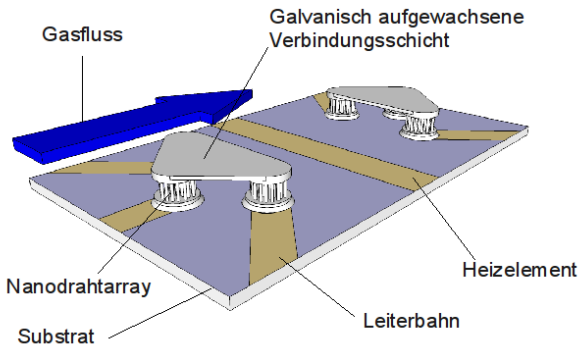


**Bild 6** Durchschnittstemperatur eines Nanodrahtarrays nach einem Temperatursprung von 300 K auf 301 K und einer Gasgeschwindigkeit  $\vec{v}$  von  $0,1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

odrahtes. Dabei wird das Modell in Bild 4 auf einen einzelnen Nanodraht reduziert, und die Erwärmung des Drahtes berechnet. Bild 5 zeigt die Sprungantwort eines einzelnen Nanodrahtes. Bei einem Nanodrahtarray erwärmen sich die Nanodrähte nacheinander, sodass die Reaktionszeit wesentlich steigt, s. Bild 6.

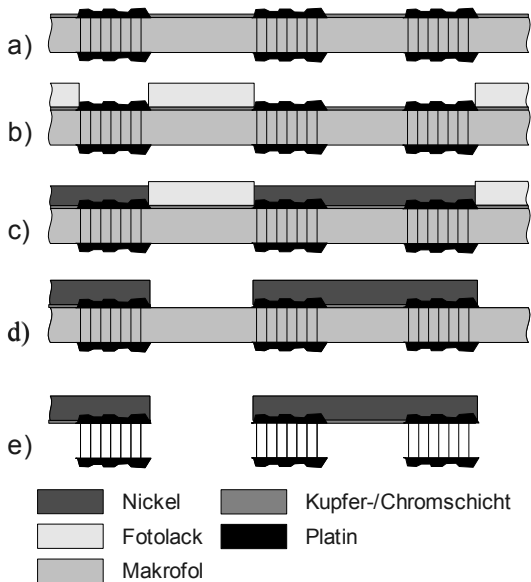
#### 4 Prozess zur Integration der Nanodrahtarrays

Die Nanodrahtarrays liegen in einer Templatfolie vor und müssen in das Mikrosystem montiert werden. Ein Ver-



**Bild 7** 3D-Modell des Mikrosystems mit integrierten Nanodrahten als Funktionsmuster für ein Nanodraht-Gasflussensensor

bund aus drei Nanodrahtarrays mit metallischen Verbindungselementen erlaubt die Kontaktierung von nur einer Seite und steht stabil auf dem Substrat. Das komplette System als dreidimensionales Modell zeigt Bild 7.

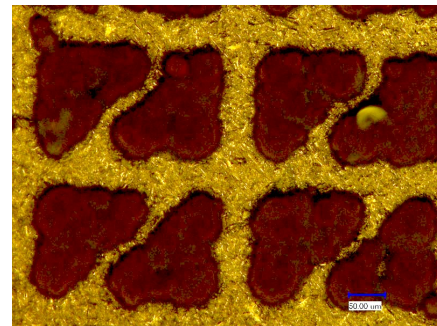


**Bild 8** Prozessablauf zum Strukturieren von Verbindungselementen zwischen Nanodrahtarrays  
a) PVD der Galvanikstartschicht (20 nm Cr + 50 nm Cu)  
b) Photolithographie (AZ 9260, 10 µm) und galvanisches Wachsen (Ni, 8 µm) der Verbindungselemente  
c) Photoresists und Startschicht entfernen  
d) Templatfolie entfernen (Trockenätzen / Lösungsmittel)

#### 4.1 Fertigung der Nanodrahtverbünde

Bild 8 beschreibt einen mikrotechnischen Prozess zur Fertigung von Nanodrahtarrays mit dreieckigen Verbindungselementen. Dabei ist zu beachten, dass das Lösungsmittel PGMEA (Propylenglykolmonomethylethylacetat) im Photoresist AZ 9260 die Templatfolie aus Polycarbonat angreift. Kurze Prozesszeiten erlauben den Prozessablauf dennoch.

Ein Durchlichtverfahren hilft bei der Ausrichtung der Belichtungsmaske zu den Nanodrahtarrays in der Templatfolie. So wachsen die Dreieckstrukturen wie in Bild 9 dargestellt direkt auf den Überwachsungen der Nanodrahtarrays.

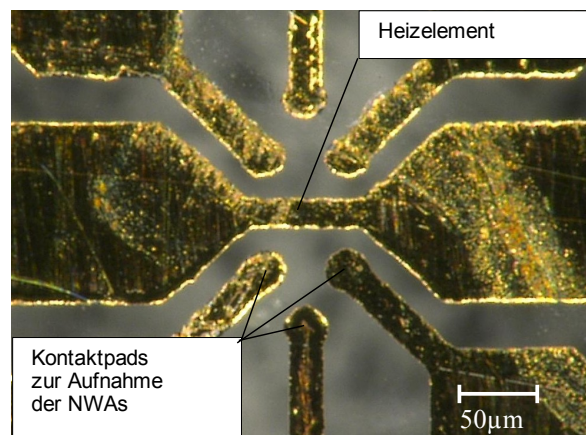


**Bild 9** Strukturierte Verbindungselemente auf der Templatfolie. Die Nanodrahtarrays liegen darunter.

Beim Lösen der Templatfolie mit Dichlormethan quillt das Polycarbonat bevor es in Lösung geht. Dies kann die Nanodrahtverbünde zerstören. Trockenätzen mit Tetrafluormethan (CF<sub>4</sub>) zeigt bei moderaten Prozesstemperaturen einen geringen Ätzangriff von etwa 60 nm/min. Eine Kombination aus Trockenätzen und nasschemischem Auflösen der Folie ist zielführend.

#### 4.2 Herstellung des Substrats

Bild 10 zeigt die technologische Umsetzung des in Bild 7 skizzierten planaren Trägersubstrats mit vergoldeten Leiterstrukturen auf Glas. Der zentral angeordnete Heizleiter ist symmetrisch umgeben von Kontaktpads. Auf ihnen



**Bild 10** Glassubstrat (170 µm) mit Kontakten und Leiterbahnen (PVD 20 nm Cr + PVD 100 nm Ni + galvanisch 100 nm Au).

können geringe Leitklebstoffmengen mit hoher Ortsauflösung platziert werden. Ihre Goldoberfläche erlaubt eine zuverlässige Kontaktierung der Verbände aus drei Nanodrahtarrays mit dreieckförmiger Überwachsung. Für den elektrischen Test des Gesamtsystems sind die Leiterbahnen auf große Kontaktflächen am Rand des Substrats herausgeführt.

## 5 Diskussion

Nanodrahtarrays sind ein interessantes Untersuchungsobjekt zur Integration von Nanodrähten in Mikrosysteme, da sie als Verbund mechanisch stabil und handhabbar sind. Die elektrische Parallelschaltung vieler Nanodrähte erhöht durch Redundanz die Zuverlässigkeit eines Mikrosystems mit Nanodrähten. Für den Einsatz im Mikrogasflusssensor lässt sich die Geometrie der Nanodrahtarrays hinsichtlich eines kleineren Strömungswiderstands weiter verbessern. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verringerung der Drahtdichte eine technologische Herausforderung darstellt. Eine optimierte Formgebung der Überwachsung birgt hohes Potential bei begrenztem technologischen Aufwand. Die hier beschriebene Simulation geht von einem stark vereinfachten geometrischen Modell des Nanodrahtarrays aus. Weiterhin sind die Akkommodationskoeffizienten der Materialpaarungen auf der Nanometerskala derzeit noch unbekannt. Die berechneten Ergebnisse sind daher qualitativer Natur, können jedoch das grundsätzliche Verhalten der Nanodrahtarrays bei Temperatursprüngen beschreiben. Diese prinzipiellen Ergebnisse lassen sich auf die Funktion eines Mikrogasflusssensors übertragen.

Die theoretischen Untersuchungen beschreiben ein großes Potential einzelner Nanodrähte für den Einsatz im Mikrogasflusssensor. Für die technologische Integration ist ein Prozess ohne Fügenschritt und ohne wesentliche mechanische Belastung der Drähte nötig. Ein mikrotechnischer Prozessablauf zur Nanodrahtarrayintegration ist entwickelt und in seinen Einzelschritten erfolgreich erprobt. Aufbau und Test des Gesamtsystems werden gegenwärtig untersucht.

## 6 Literatur

- [1] RASMUSSEN, A. AND ZAGHLOUL, ME: *In the flow with MEMS* In: IEEE Circuits and Devices Magazine (1998), Nr. 4, S. 12-25
- [2] SHIN, WC AND BESSER, RS: *A micromachined thin-film gas flow sensor for microchemical reactors* In: Journal of Micromechanics and Microengineering (2006), Nr. 4, S. 731-741
- [3] NAM-TRUNG NGUYEN AND STEVEN T. WERELEY: *Fundamentals and applications of microfluidics*:Artech House,2006
- [4] RAUBER, M. AND CORNELIUS, TW AND ENSINGER, W. AND MULLER, S. AND NEUMANN, R. AND PICHT, O.: *Closed Pt nanowire arrays as nanostructured microreactors for catalysis* In: GSI Scientific Report 2007 (2008), S. 352

- [5] Schutzrecht Offenlegungsschrift, *Nanodraht-Strukturelement*, PCT/EP2009/001778, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GmbH (Anmelder/Inhaber), März 2008, Aktenzeichen DE 10 2008 015 333.8
- [6] MARKUS RAUBER: *Herstellung und Charakterisierung von Edelmetall-Nanodraht-Arrays*, Diplomarbeit, Phillips Universität Marburg,2007
- [7] BIETSCH, A. AND MICHEL, B.: *Size and grain-boundary effects of a gold nanowire measured by conducting atomic force microscopy* In: Applied Physics Letters (2002), Nr. , S. 3346
- [8] O'HARE, L. AND SCANLON, T.J. AND EMERSON, D.R. AND REESE, J.M.: *Evaluating constitutive scaling models for application to compressible microflows* In: International Journal of Heat and Mass Transfer (2008)
- [9] QUING FAN AND HONG XUE AND CHANG SHU: *DSMC Simulations Of Gaseous Flows In Microchannels*,, 1999
- [10] GAD-EL-HAK, M.: *The MEMS Handbook: MEMS, design and fabrication*:CRC press,2006
- [11] DIETER HÄNEL: *Molekulare Gasdynamik*:Springer Verlag,2004
- [12] SCHÄFER, M.: *Computational engineering: introduction to numerical methods*:Springer Verlag,2006
- [13] ERROL ARKILIC: *Measurement of the Mass Flow and Tangential Momentum Accomodation Coefficient in Silicon Micromachined Channels*, Diplomarbeit, Massachusetts Institute of Technology,,1997
- [14] DUCHAINE, F. AND MENDEZ, S. AND NICLOUD, F. AND CORPRON, A. AND MOUREAU, V. AND POINSOT, T.: *Coupling heat transfer solvers and large eddy simulations for combustion applications* In: (2008), Nr. , S. 113
- [15] OpenCFD Ltd. : *OpenFOAM User Guide : 2009*
- [16] ABBASPOUR-SANI, E. AND JAVAN, D.: *Analytical study of resistive MEM gas flow meters* In: Microsystem Technologies (2008), Nr. 1, S. 89-94