

4 Zusammenfassung und Ausblick

4.1 Optimierung

Das Ziel dieses ersten Abschnittes der vorliegenden Diplomarbeit bestand darin, den mikrosystemtechnischen Herstellungsprozess bereits vorhandener kapazitiver Biegebalkensensoren zur Strömungsmessung hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Bauteile zu verbessern.

Der Aufbau der Cantilever, die als Kondensatoren fungieren und durch ihr Verbiegen eine Impedanzänderung hervorrufen sollten, erfolgte durch schräges Aufdampfen an den mäanderförmigen Lackfingern eines mittels IDK-Masken erzeugten Positivlackreliefs auf einem Laborglasträger (vergleiche Bild 4-1 und Bild 4-2).

Selbige, in [8] beschriebenen, Sensorexemplare durchliefen während ihrer Entstehung nur einen Metallisierungsschritt, so dass Anschlusspads und Außenleitungen gleichzeitig mit den erhabenen Balkenstrukturen aufgebracht wurden. Dadurch war es nicht möglich die Mäanderkehren abzudecken, so dass letztlich alle parallel angeordneten Kondensatoren miteinander leitend verbunden waren. Das nachträgliche Entfernen der Metallbrücken an den Rändern mittels Klebeband galt es nun durch eine weniger grobe und exakter definierte Methode zu ersetzen. Dazu erfolgte eine Umstellung des ursprünglichen Herstellungsprozesses auf ein Verfahren mit zwei Metallabscheidungsvorgängen. Zuerst wurde die Grundmetallisierung aus Pads und Zuleitungen aufgebracht, indem ein aluminuimbeschichteter Glasträger mit einer entsprechend der in Bild 4-2 dargestellten Maske strukturierten Positivlackschicht versehen und anschließend mit Aluminiumätze behandelt wird, woraufhin eine Kopie des Maskenbildes aus Aluminium übrig bleibt. Anschließend kommt es zu einer Wiederholung des Belackungsschrittes, mit dem Unterschied, dass die Lackfinger nun gegenüber den Aluminiumfingern um etwa eine halbe Fingerbreite, also rund 10 μm , verschoben werden, so dass die darauf aufzubauenden Balken einerseits Kontakt zur Anschlussleitung haben, andererseits aber auch Kurzschlüsse vermieden werden. Obendrein entsteht so ein größerer Überlappungsbereich als es durch einfaches Metallaufbringen realisierbar ist, was wiederum eine höhere Sensorempfindlichkeit verspricht. Der Balkenaufbau erfolgt in diesem Fall durch Abdecken der kritischen Randbereiche, so dass die einzelnen Kondensatoren von Beginn an vereinzelt sind und gar nicht erst die Notwendigkeit entsteht, Kurzschlüsse nachträglich entfernen zu müssen. Somit ist es gelungen, die angestrebte Optimierung tatsächlich zu verwirklichen.

Eine Schwachstelle im neuen Ablauf bildet allerdings das manuell und nach Augenmaß zu erfolgende Verschieben der Maskenfinger gegenüber den Aluminiumfingern unmittelbar vor der zweiten Belichtung, wodurch im Endergebnis variierende Abstände der Balken untereinander auftreten können. Somit sind auch weiterhin Schwierigkeiten vorhanden, was die exakte Reproduktion der Bauteile angeht. Das neuentwickelte Verfahren verlangt demzufolge einiges an Übung im Umgang mit Lichtmikroskop des Maskaligners, um das Ausmaß der Abweichungen in vertretbaren Grenzen zu halten.

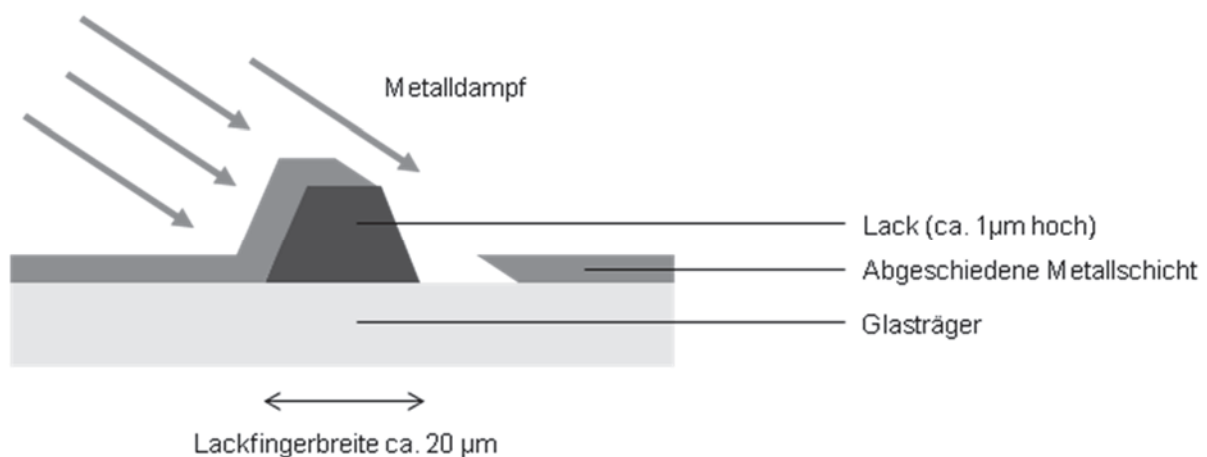


Bild 4-1: Prinzipskizze der Balkenherstellung

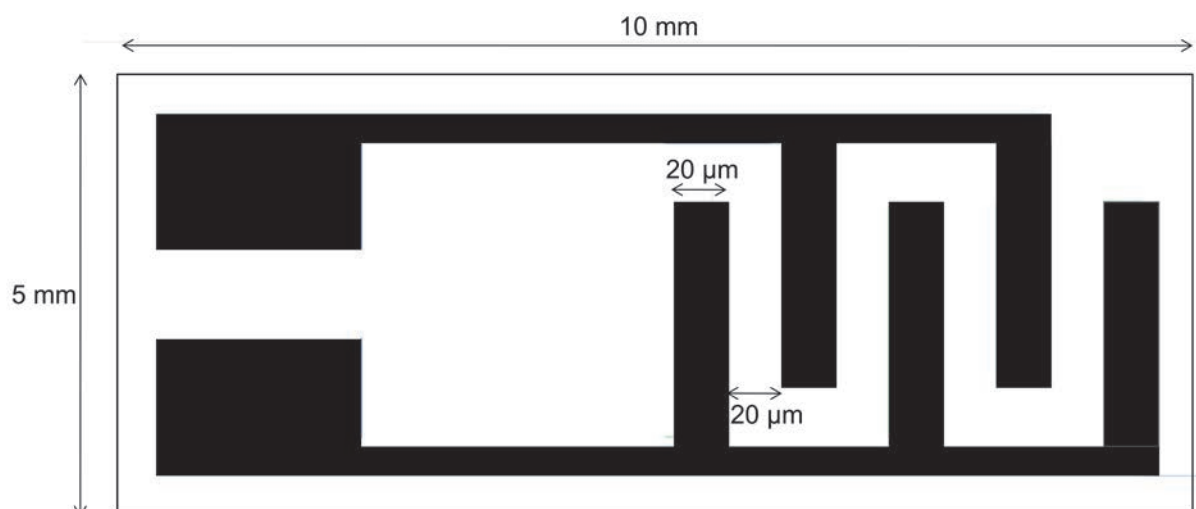


Bild 4-2: Schematische Darstellung des Maskendesigns (2. Generation)

4.2 Charakterisierung

Die Strömungsversuche wurden in einem eigens zu diesem Zweck konstruierten Kanal bestehend aus einem senkrechten Kunststoffrohr mit Druckluftanschluss und einer darunter platzierten Fassung zur horizontalen Sensorpositionierung durchgeführt. Die Anströmung des Biegebalkenfeldes erfolgte demgemäß stets vertikal von oben.

Wie schon die Bauteile aus [8], reagieren auch die im Zuge der vorliegenden Diplomarbeit entwickelten und optimierten Sensoren, unter der Annahme es handle sich bei ihnen näherungsweise um parallele RC-Glieder, auf steigende Strömungsstärken mit wachsenden Widerstands- und sinkenden Kapazitätswerten. Dieses in nennenswertem Umfang nur im niederfrequenten Bereich beobachtbare Verhalten konnte aufgrund der nun vorhandenen Balkenüberlappungen nicht mehr mit entsprechenden mikromechanischen Geometrieänderungen in Einklang gebracht werden (vergleiche [8], [18]).

Im Fortgang der Untersuchung stellte sich heraus, dass der Sensor neben der Durchflusssensitivität auch bezüglich weiterer physikalischer Größen eine Empfindlichkeit aufweist. Da ihm unter normalen Raumbedingungen kein eindeutiger strömungsfreier Nullpunkt zugeordnet werden konnte, sondern das Messsignal in ständiger Bewegung war, wurde der Messfühler abgedeckt, um den eventuell vorhandenen Störfaktor Zugluft auszuschließen. Dabei wurde deutlich, dass verschiedentlich erwärmte Deckel erhebliche Abweichungen der Ausgangsgrößen verursachten, ergo eine Temperaturempfindlichkeit vorhanden ist. Zur Beschreibung derselben wurden im Folgenden Messungen in einer temperierbaren Messkammer durchgeführt. Per Temperatursprung sollte die Zeitkonstante als charakteristischer und aussagekräftiger Parameter identifiziert werden. Man beschränkte sich dabei auf geringe Temperaturdifferenzen von lediglich 5 °C in einem Bereich, der sich im Wesentlichen von 30 °C bis 45 °C erstreckte. Folgende Erkenntnisse ergaben sich daraus:

Mit zunehmender Erwärmung verringert sich zunächst der jeweilige Widerstandswert (vergleiche Bild 4-3), während innerhalb des gewählten Ersatzschaltbildes die Kapazität in der Regel ein näherungsweise gegensätzliches Verhalten aufweist. Entsprechend des unsymmetrischen Balkenaufbaus aus sechs abwechselnden Schichten zweier unterschiedlicher Metalle, Chrom und Aluminium beziehungsweise in einer weiteren Variante Chrom und Kupfer, kann der genannte Effekt auf thermisch induzierte, bimetallische Biegung der Cantilever zurückgeführt werden, wohingegen die Ionenleitfähigkeit im Glas für den betrachteten Temperaturbereich als mögliche Ursache ausgeschlossen wurde. Es zeigt sich jedoch keine Annäherung an einen stabilen Endwert, sondern nach gewisser Zeit kommt es zu einem Übergang in einen entgegen gerichteten Trend hin zu höheren Widerstandswerten. Somit offenbart sich, dass neben der Temperatur noch mindestens ein weiterer

Einflussfaktor zum Tragen kommt. Es bildete sich die Theorie heraus, dass durch eine Abnahme der auf den Glassubstraten vorhandenen molekularen Wasserschicht die elektrische Leitfähigkeit sinkt, bis sich schließlich ein der Endtemperatur entsprechender Gleichgewichtszustand einstellt.

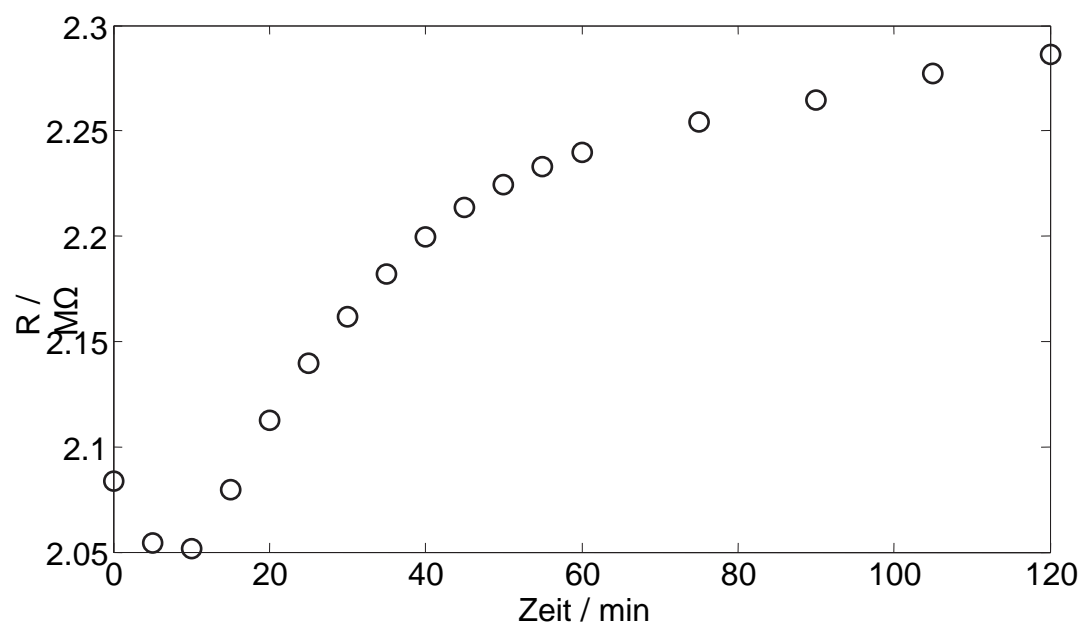


Bild 4-3: Widerstandsmesswerte des Bauteils Cr-Cu-II-1 in Abhängigkeit von der Zeit nach einem Temperatursprung von 30 °C auf 35 °C, $f = 352$ Hz

Folgender Modellansatz, der Temperatur- und Feuchtigkeitseffekt in Form zweier PT1-Glieder beinhaltet, wurde erstellt und an den Messpunkteverlauf angepasst:

$$y = y_0 + [K_0 + K_1 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_T}})] \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau_F}}) \quad (4-1)$$

Das Ausgangssignal einiger Sensorexemplare über die Zeit ließ sich sehr gut durch oben genannte Beziehung (Typ A) beschreiben (siehe beispielhaft Bild 4-4). In anderen Fällen hingegen erstreckte sich der rechte Kurvenast auch über lange Zeiträume näherungsweise linear, ohne einem erkennbaren Grenzwert entgegenzusteuern (vergleiche hierzu Bild 4-5). Unterschiede zwischen den Bauteilen konnten im Übrigen zu keinem Zeitpunkt durch die verschiedenartigen Materialkombinationen erklärt werden.

Somit wurde geschlussfolgert, dass neben Temperatur- und Feuchtigkeitseffekt noch ein weiterer Einflussfaktor in das Gesamtbild einbezogen werden muss, wobei offenbar je nach Zustand des jeweiligen Bauteils die Gewichtung der einzelnen Effekte mitunter erheblich variiert. Dass letztere aber immer vorhanden sind, zeigte eine Abwandlung des obigen Modellansatzes (Typ B), der nunmehr auch einen Übergang der Messwerte aus Bild 4-3 in ein lineares Driftverhalten offenlegte (Bild 4-6). Die im Vergleich zur Kurve vom Typ A über die verschiedenen Temperatursprünge deutlich einheitlicheren Zeitkonstanten untermauerten den Anspruch, dass das Modell um einen weiteren Faktor erweitert werden muss, um die Sensorreaktion realitätsnah abzubilden. Diese mathematische Anpassung muss jedoch weiterführenden Untersuchungen vorbehalten bleiben.

Physikalisch liegt die Ursache der kontinuierlich steigenden Widerstands- und gleichzeitig sinkenden Kapazitätswerte vermutlich darin, dass die einzelnen Schichten über eine zu schlechte Anbindung untereinander verfügen beziehungsweise diffusionsbedingte Atombewegungen den Verbund destabilisieren, so dass ab einem gewissen Punkt keine weitere Kraftübertragung mehr möglich ist und die infolge des Bimetalleffekts aufgebauten Spannungen nach und nach durch innere Materialbewegungen eliminiert werden.

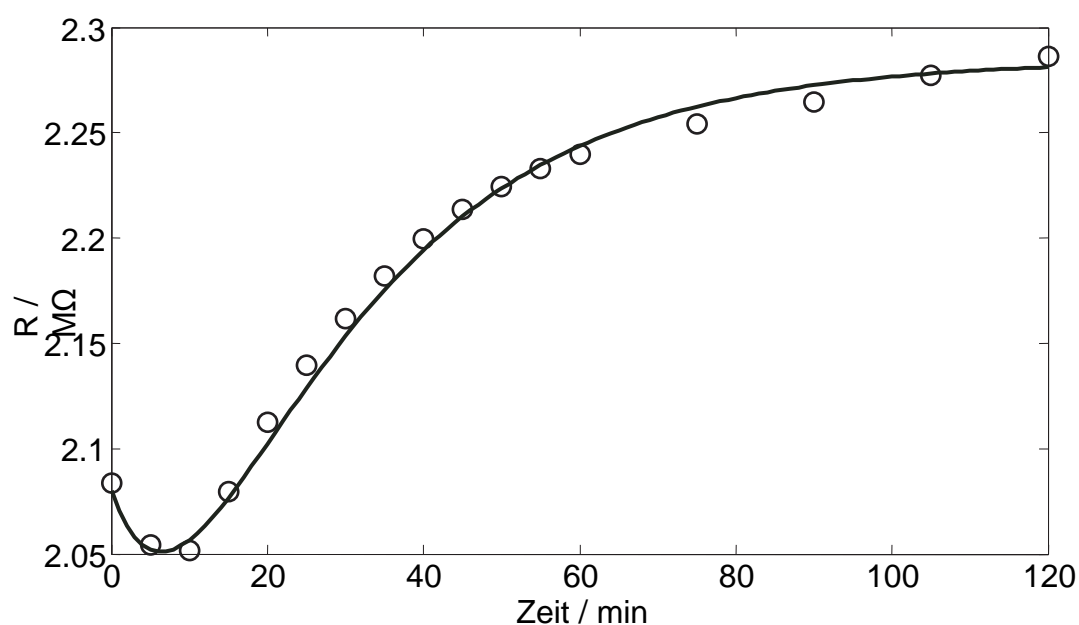


Bild 4-4: Widerstandsmesswerte des Bauteils Cr-Cu-II-1 in Abhängigkeit von der Zeit nach einem Temperatursprung von 30 °C auf 35 °C mit Modellkurve (Typ A), $f = 352$ Hz

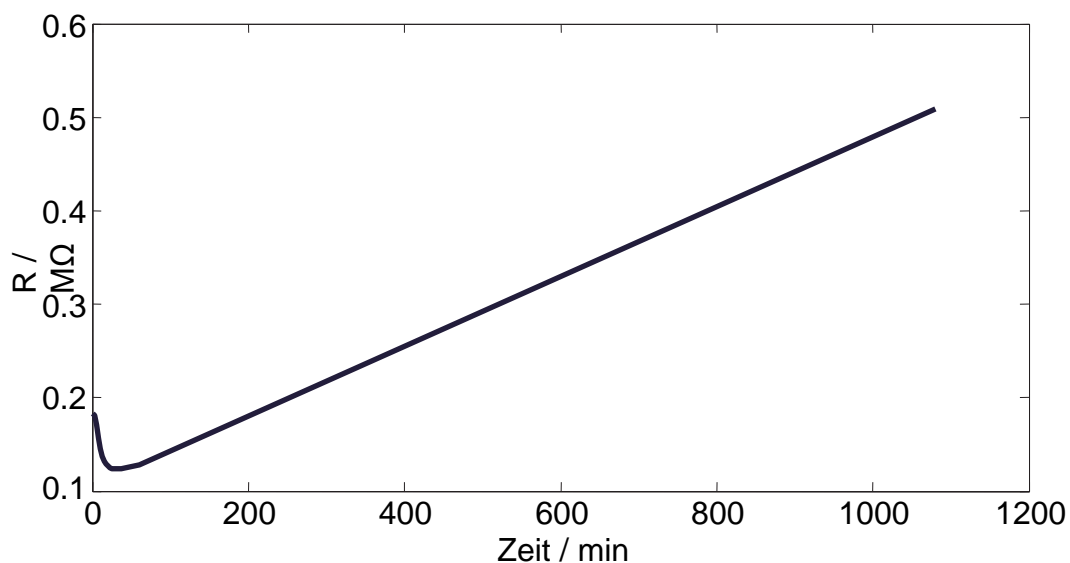


Bild 4-5: Widerstandsmesskurve des Bauteils Cr-Al-II-3 in Abhängigkeit von der Zeit nach einem Temperatursprung von 40 °C auf 45 °C, $f = 352$ Hz

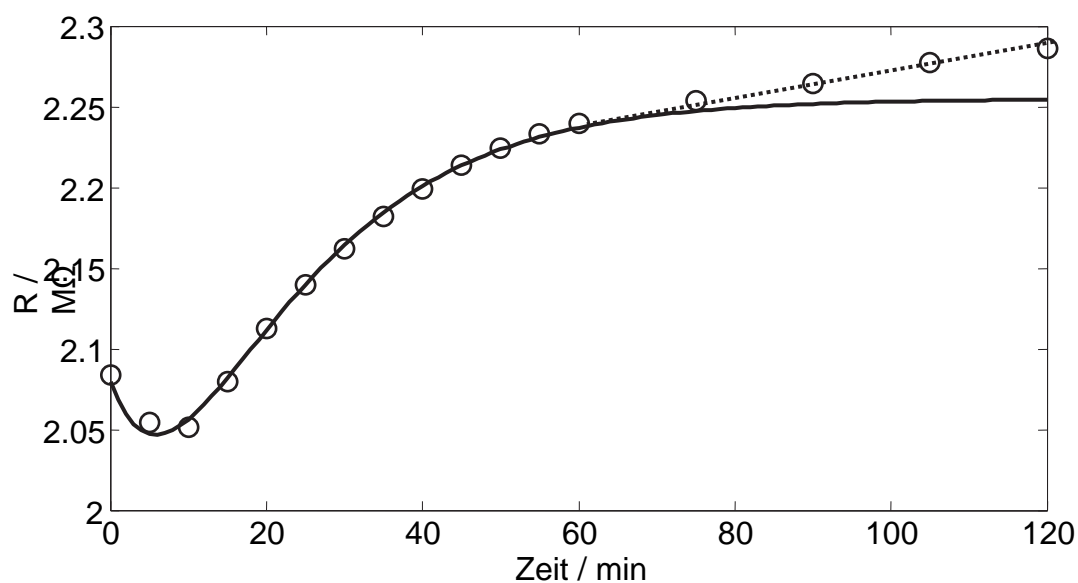


Bild 4-6: Widerstandsmesswerte des Bauteils Cr-Cu-II-1 in Abhängigkeit von der Zeit nach einem Temperatursprung von 30 °C auf 35 °C mit Modellkurve (Typ B) zur Verdeutlichung eines linearen Kurvenanteils (gestrichelt), $f = 352$ Hz

Ergänzend wurden diverse Sensoren in eine Gasmesskammer eingesetzt und diese in einen Ofen integriert, um bei gleichzeitiger Kontrolle der Umgebungslufttemperaturerhöhungen über ein Intervall von 50 °C bis 100 °C durchführen zu können.

Dabei hielt man während der Temperatursteigerung die absolute Feuchtigkeit des zugeführten Stickstoffstromes konstant.

Beabsichtigt wurde, die Gewichtung der einzelnen Einflussfaktoren bei größeren Temperaturunterschieden zu erkunden und dabei weitere Belege für die im Vorfeld entwickelten Thesen zu erbringen.

Es zeigte sich trotz erheblich größerer Wärmezufuhr kein stärker ausgeprägter fallender Kurvenanteil am Anfang, was die Theorie von der begrenzten Kraftübertragung stützt (vergleiche Bild 4-7). Dahingegen weist der rechte Kurvenast einen steileren Anstieg und einen deutlich früheres Erreichen der neuen Gleichgewichtslage auf, was damit zu erklären ist, dass der wärmere Messfühler beschleunigten Desorptions- und Entspannungs Vorgängen unterworfen ist.

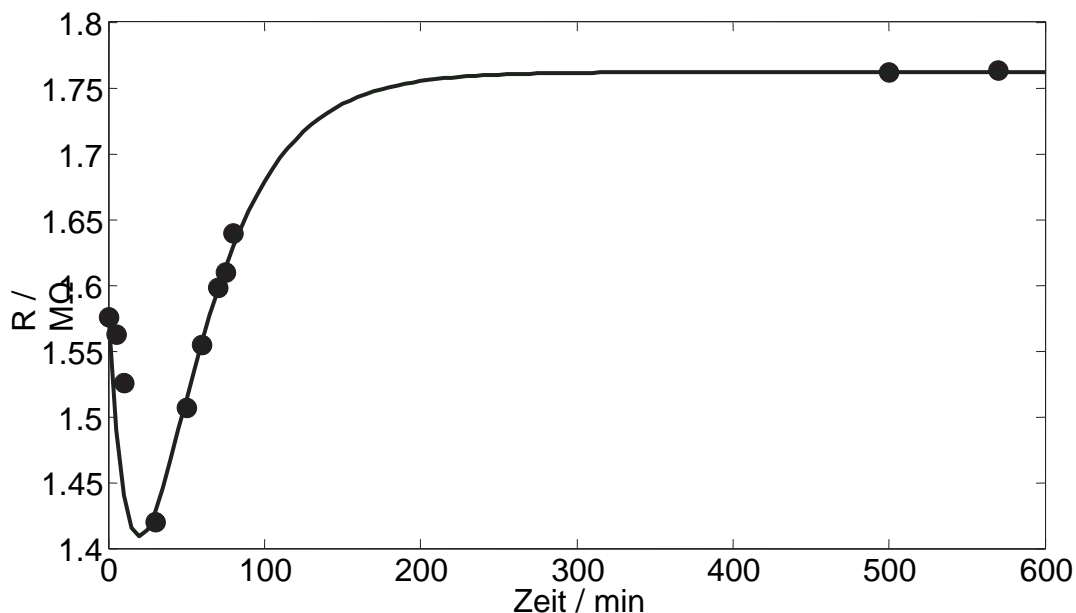


Bild 4-7: Widerstandsmesspunkte des Bauteils Cr-Al-II-3 in Abhängigkeit von der Zeit nach einer Temperaturerhöhung von 50 °C auf 100 °C (vergleiche Bild 3-36) mit eingepasstem Kurvenverlauf, $f = 352$ Hz

Nach mehreren Stunden Angleichzeit an das Temperaturniveau von 100 °C wurde die relative Feuchtigkeit der Stickstoffatmosphäre auf den Wert angepasst, der bei der Ausgangstemperatur von 50 °C vorherrschte, um so den Einfluss der Feuchtigkeit isoliert betrachten zu können. Dies bedeutete eine erhebliche Befeuchtung des Gases wodurch sich die Wasserdesorption in eine -adsorption umkehrte und dementsprechend eine exponentielle Widerstandssenkung bis zum neuen feuchtigkeitskonformen Gleichgewicht erfolgte (vergleiche Bild 4-8). Hiervon abweichende Ergebnisse für andere Sensorexemplare

begründeten den Verdacht, dass in diesem Experiment tatsächlich nicht unbedingt ausschließlich ein Feuchteffekt zu Tage tritt.

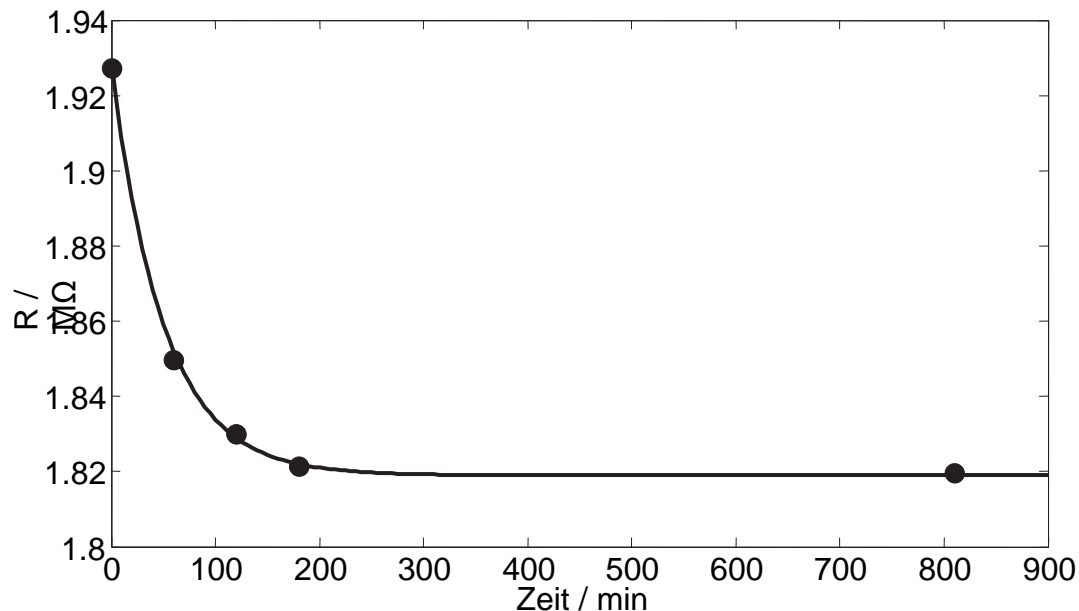


Bild 4-8: Widerstandsmesspunkte des Bauteils Cr-Al-II-4 in Abhängigkeit von der Zeit nach Anpassen der relativen Feuchtigkeit im Gas bei 100 °C an das Niveau des Ausgangspunktes (50 °C) mit eingepasstem Kurvenverlauf, $f = 352$ Hz

In weiterführenden Untersuchungen gilt es nun, die erstellten Erklärungsansätze zu den einzelnen Einflussfaktoren umfassend zu prüfen. Hierzu empfiehlt es sich die vermuteten Effekte getrennt voneinander zu beobachten. Folgendes Vorgehen wäre in diesem Zusammenhang denkbar:

Ob die Reaktion auf eine Temperaturerhöhung tatsächlich mit dem Bimetalleffekt in Verbindung gebracht werden kann, lässt sich am einfachsten dadurch klären, dass man Sensorexemplare mit symmetrischer Schichtenfolge produziert und anschließend eine Wiederholung der oben erörterten Temperatursprünge vornimmt. Eine thermisch induzierte Balkenbiegung kann dann nicht mehr stattfinden, wodurch im Fall der beobachteten Widerstandswerte der fallende Kurvenabschnitt verschwinden müsste. Eine zusätzliche Möglichkeit bestünde darin, die unsymmetrisch aufgebauten Bauteile bei 400 °C auszuheizen, um damit diffusionsbedingt die zunächst mehr oder minder separaten Lagen zu homogenisieren. Gleichzeitig würde dadurch ein Ausgleichsdriften der Metallatome während des Betriebes unterbunden und demzufolge das Ausgangssignal stabilisiert. Zur

Unterstützung dieser Maßnahme ist es auch vorstellbar, die Biegebalken aus noch mehr und dafür noch dünneren Schichten herzustellen.

Im Hinblick auf die Wasserhautproblematik könnte zum Vergleich ein hydrophobes Substratmaterial herangezogen werden, beispielsweise Silizium. Auf diese Weise wäre der Einfluss von Oberflächenfeuchtigkeit eliminierbar, man müsste dann jedoch mit der temperaturabhängigen Leitfähigkeit des Halbleiters einen anderen Nebeneffekt in Kauf nehmen.

Darüber hinaus bestünde Interesse daran, herauszufinden, woher die teilweise eklatanten Unterschiede zwischen den Bauteilen herrühren, was die Absolutwerte von Widerstand und Kapazität angeht. Wahrscheinlich liegt dies in Geometrieabweichungen, insbesondere in abgebrochenen, geknickten oder nach unten gebogenen Balkendächern, begründet. Dreidimensionale vergleichende Vermessungen der Cantileverfelder mittels geeigneter Mikroskoptechnologie böte die Chance, diesbezüglich präzisere Aussagen tätigen zu können. Eventuell ließe sich im Zuge solcher Aufnahmen auch der Bimetalleffekt untersuchen, zum Beispiel durch Beobachtung der stationären Balkenabsenkung unterschiedlich warmer Sensoren.

Die beobachteten Reaktionen des Sensors auf aufgebrauchte Luftströmungen scheinen momentan, eher auf Kühlungs- und Trocknungseffekten zu beruhen. Zur Extraktion der angestrebten mikromechanisch getriebenen Impedanzänderung kann das Beschreiten der angeführten Entwicklungswege einen entscheidenden Beitrag leisten.

Ferner besteht die Option, die Bauteile auch bezüglich der vorhandenen Querempfindlichkeiten gezielt einer sensorischen Nutzung, etwa als Temperatur- oder Feuchtigkeitssensor, zuzuführen.