

Ist atmosphärisches Plasma potentialfrei?

In dem Beitrag soll die Frage geklärt werden, wie sich abschätzen lässt, ob eine atmosphärische Plasmabehandlung für auf Entladungseffekte empfindliche elektronische Baugruppen unbedenklich ist.

Einleitung

Atmosphärische Plasmabehandlung ist eine gängige und etablierte Methode zur Feinreinigung und Aktivierung von Oberflächen.

Bei Polymeren und Verbundwerkstoffen kann eine solche Aktivierung mit einem Atmosphärendruck-Plasma die effizienteste Methode und bei Betrieb mit Druckluft kostengünstig und kompatibel mit praktisch jedem Serienprozess sein.

Es müssen keine nasschemischen Primer eingesetzt werden. Hierdurch ist die Funktionalisierung mit dem atmosphärischen Plasma besonders umweltfreundlich und materialschonend. In einem Prozessschritt werden eine Feinreinigung, ein Ausgleich der statischen Oberflächenladung und eine Funktionalisierung erreicht.

Dies gilt auch für die Bearbeitung von kompletten elektronischen Baugruppen. Auf einer Platine ist eine hohe Bandbreite Materialien präsent: Thermoplastische Kunststoffe, Metalle, Keramische Oberflächen, Lötstopplacke, Leiterbahnen und das PCB-Trägermaterial. Soll so eine solche Baugruppe vergossen werden, ist eine Optimierung durch eine trockene atmosphärische Plasmabehandlung eine sehr effiziente Methode, die zu einer homogenen Vergussqualität führt. Lunker und Spalten werden vermieden und das Eindringen von Feuchtigkeit in die Baugruppe erheblich vermindert.

Der Underfill-Prozess in der Mikroelektronik ist ein Beispiel für die Anwendung von Kunstharz-Verguss. Bei der Flip-Chip-Montage wird der Chip direkt, mit dem aktiven Kontaktmuster nach unten zur Leiterplatte aufgelötet. Dies führt zu besonders geringen Abmessungen des Gehäuses und kurzen Leiterlängen. Zur Stabilisierung und zur Verbesserung der Wärmeleitung wird ein elastisches, temperaturbeständiges Kunstharz, der „Underfill“ in den Spalt zwischen Chip und Leiterplatte dosiert.

Typischerweise wird das Harz von der Seite des Chips dosiert und füllt den Spalt angetrieben durch den Kapillareffekt. Qualität und Geschwindigkeit dieses Prozesses werden über die Viskosität und die Benetzungsfreudigkeit des Kunstharzes bestimmt.

Eine entsprechende Vorbehandlung mit atmosphärischen Plasma erhöht die Fließgeschwindigkeit dabei erheblich und verbessert gleichzeitig die Qualität der Verbindung.

In der vorliegenden Betrachtung soll das Risiko einer Bauteilschädigung durch einen atmosphärischen Plasmaprozess abgeschätzt werden. Für Bauteile oder Baugruppen, die eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Aufladungseffekten haben, wird untersucht ob die Abschirmung gegenüber kritischen Ladungsübertragungsmechanismen ausreichend ist.

Atmosphärische Plasmadüsen mit strömungsstabilisierter Entladung

Eine vielfach verbreitete Methode ein hochreaktiven Plasmastrahl bei Atmosphärendruck und typischerweise mit Luft zu erzeugen gelingt, wenn aus einer heißen Entladungszone ein konzentrierter

Strahl ausgetragen wird, der alle oberflächenaktiven Spezies enthält und nach Möglichkeit in Summe elektrisch neutral ist.

Besonders kompakte und langzeitstabile Plasmaerzeuger in Düsenform werden bei der relyon plasma entwickelt. Durch Verwendung einer unipolaren gepulsten Hochspannungsquelle und einer Vortex Strömung in der Düse wird der Lichtbogen daran gehindert, sich an einem "hot spot" zu stabilisieren.

Der Lichtbogen rotiert mit hoher Frequenz in der Brennkammer. Trotz der hohen Leistungsdichte erwärmt sich die Düse nur wenig und die Elektroden erodieren kaum. Die Plasmatemperatur kann über einen weiten Bereich frei eingestellt werden. Das Prinzip ist in Abbildung dargestellt.

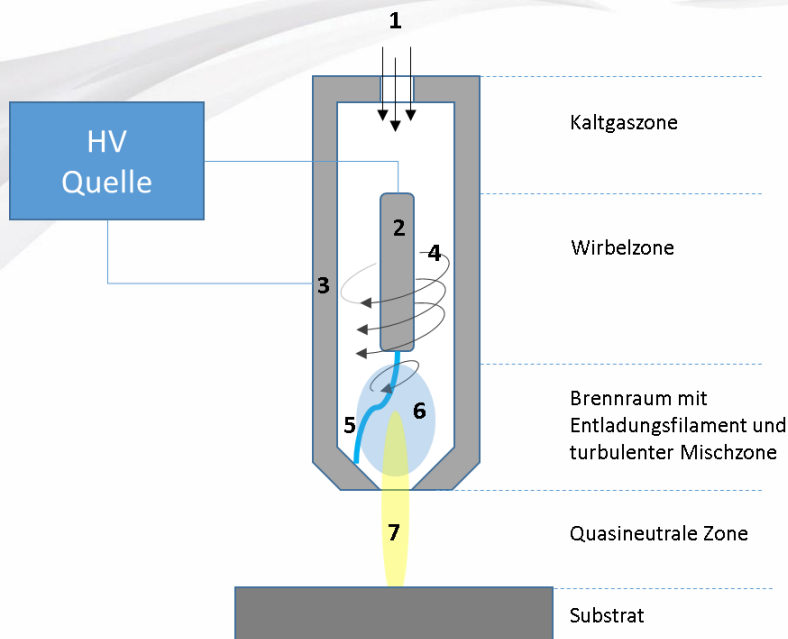


Abbildung 1: Schematischer Aufbau einer atmosphärischen Plasmadüse mit externer Hochspannungsquelle, innenliegender Anode und auf Masse liegender Kathode. Am Gaseinlass (1) wird das Prozessgas (z.B. Luft) zugeführt und in eine Wirbelströmung (4) gelenkt. Zwischen Anode (2) und Kathode (3) zündet eine Entladung (5) und erzeugt einen heißen Primärbereich (6), der dann über die Düsenöffnung als Jet (7) auf das Substrat geblasen wird.

Ausgewähltes Plasmasystem



Abbildung 2 Unipolare gepulste Hochspannungsquelle PS2000 mit Hochspannungskabel und Plasmaerzeuger

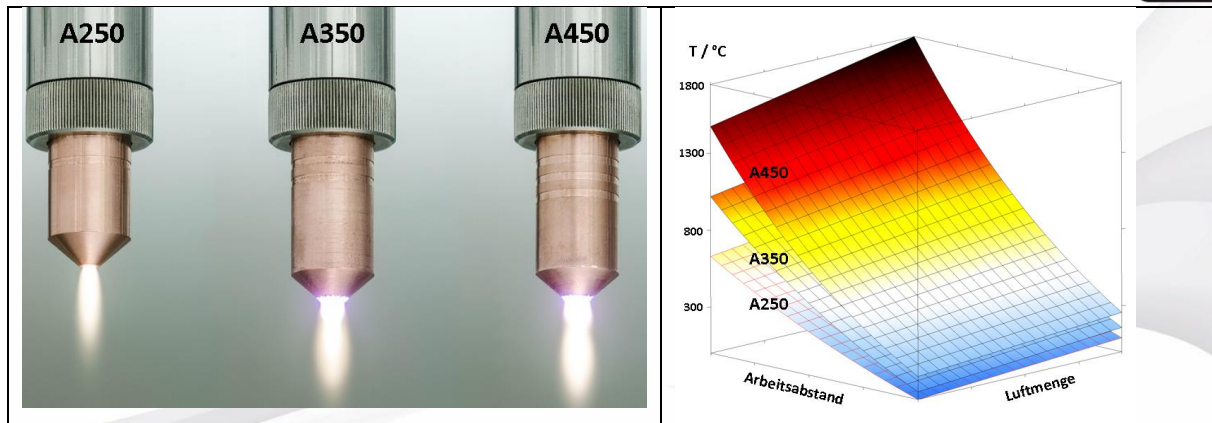


Abbildung 3: Wechseldüsenbaureihe in Reihenfolge steigender Leistungsdichte und entsprechend steigender statischer Temperatur. Die Düse A250 ist auf geringe Ladungsübertragung optimiert. Die Düse A450 auf maximale Leistungsdichte.

Für die vorliegende Untersuchung sind 2 verschiedene Düsenvarianten ausgewählt worden die Anforderungen an die Ladungsneutralität herauszustellen. Beide ausgewählte Düsen werden im PAA[®] Modus betrieben und einander gegenübergestellt. Die A 450 Düse ist auf hohe Leistungsdichte optimiert und zeigt deutlich 2 Zonen in der Plasmaflamme. Die A250 Düse ist auf geringen Ladungsträgertransfer optimiert.

Die Wirkung der Plasmabehandlung auf der Oberfläche ist thermischer, chemischer und elektrischer Natur und hängt von den eingestellten Prozessparametern ab. Dabei spielen Arbeitsabstand, Art des Prozessgases, eingestellte Anregungsleistung und Bearbeitungsgeschwindigkeit, aber auch die Eigenschaften des Substrates eine wichtige Rolle. Die thermischen Effekte sind bereits in einer gesonderten Betrachtung genau analysiert worden (Nettesheim, Korzec, & Burger, 2015). In der folgenden Betrachtung fokussieren wir auf die elektrische Ladungsübertragung und deren Wirkung auf empfindliche elektronische Bauteile oder Baugruppen.

Mechanismen für die Ladungsübertragung

Direkte Ladungsübertragung

Die atmosphärische Plasmabehandlung ist ein Prozess, bei dem in der Entladungszone hohe elektrische Felder auftreten. Allerdings ist das austretende sekundäre Plasma in Summe elektrisch neutral und entfaltet seine Wirkung auf die Oberfläche (anders als eine Corona-Entladung) eher durch die angeregten chemischen Spezies als durch Feldeffekte an der Oberfläche selbst. Trotzdem werden häufig Bedenken geäußert, dass empfindliche Bauteile durch unzulässige Potentiale geschädigt werden könnten.

Bei atmosphärischen Plasmen mit Anregung durch gepulste Lichtbögen, kann die Elektronentemperatur der Kernfilamente bei 10.000K liegen, die mittlere Temperatur der Neutralteilchen und massebehafteten Ionen im Brennraum kann dabei bereits unter 1000K liegen. Diese Temperatur sinkt durch Expansion, Strahlungsverlust und turbulente Durchmischung am Düsenausgang schnell weiter ab. Im Brennraum nahe am heißen Kernbereich liegen die Teilchendichten für geladene Teilchen bei bis zu $10^{13}/\text{cm}^3$. Ladungsungleichgewichte in dieser Phase existieren damit auf einer Längenskala, die durch die Debyelänge gegeben ist (Liebermann & Lichtenberg, 2005).

$$\lambda_D \approx \lambda_{De} = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}}$$

Bei einer angenommenen Elektronentemperatur von 10TK und einer Dichte von $10^{13}/\text{cm}^3$ ergibt sich eine Länge von $< 0,2\text{mm}$ auf der substantielle Ladungsungleichgewichte auftreten.

Nur innerhalb dieser geringen Länge ergeben sich Potenzialdifferenzen, die nicht mehr unmittelbar durch Ladungsbewegung abgeschirmt werden und die u.U. durch die Strömung bis zum Düsenaustritt bzw. bis zu empfindlichen Substrat mitgerissen werden können.

Schwankungen in der freien Ladungsträgerdichte

Bei einer gepulsten oder stochastisch fluktuierenden Bogenintensität schwankt die Ladungsträgerdichte im Plasmajet. Das Frequenzspektrum der Fluktuation liegt bei gepulsten Bogenentladungen typischerweise zwischen 20 und 100 kHz. Die Austrittsgeschwindigkeiten an der Düse liegen bei ca. 50m/s und damit sind Schwankungen in der Ladungsträgerdichte auf einer Längenskala von ca. 1mm zu erwarten. Zusätzliche Fluktuationen werden über die turbulente Austragung aus dem Brennraum induziert. Die Summe dieser Fluktuationen überträgt sich auf die Ladungsträgerdichte und damit die Leitfähigkeit des emittierten Plasmastrahls. Allerdings mitteln sich diese Fluktuationen auf dem Weg von Düsenaustritt zum Substrat, wenn diese Distanz erheblich länger ist als die Längenskala der Fluktuationen.

Induktive (magnetische) Kopplung

Eine magnetische oder induktive Energiekopplung in leitfähige Strukturen auf einem Substrat werden in der Betrachtung komplett vernachlässigt, da die magnetischen Feldstärken bei den geringen Strömen ($< 1A$) und dem relativ hohen Abstand der Stromschleife von $>20mm$ in der Entladungszone zum Substrat vernachlässigbar sind.

Hochfrequente elektromagnetische Kopplung

Hochfrequente elektromagnetische Felder werden von einem Sender zu einem Empfänger nur dann effizient übertragen, wenn die Antennenstrukturen in der Größenordnung der elektromagnetischen Wellenlänge liegen. Im Plasmaerzeuger und auf den Substraten liegen die Längen im Bereich von einigen Zentimetern. Das Powerspektrum im Nahfeld der Plasmadüse zeigt nur Frequenzen im Bereich von 100kHz entsprechend Wellenlängen von ca. 3000m mit einer relevanten Amplitude. Um diesen Frequenzbereich effektiv zu übertragen sind sehr große Antennenstrukturen erforderlich. Darüber hinaus werden Öffnungen, die erheblich kürzer als die Wellenlänge sind, nicht durchdrungen.

Kapazitive (elektrische) Kopplung

Neben der direkten Ladungsübertragung ist auch eine kapazitive AC Entkopplung durch den Austrittsspalt der Düse denkbar. Durch die teilweise stochastische Natur der atmosphärischen Entladung zwischen zwei Elektroden treten hochfrequente Transienten auf der innenliegenden Anode auf. (Bild des Grundlagenaufbaus).

Versuchsaufbau und Durchführung

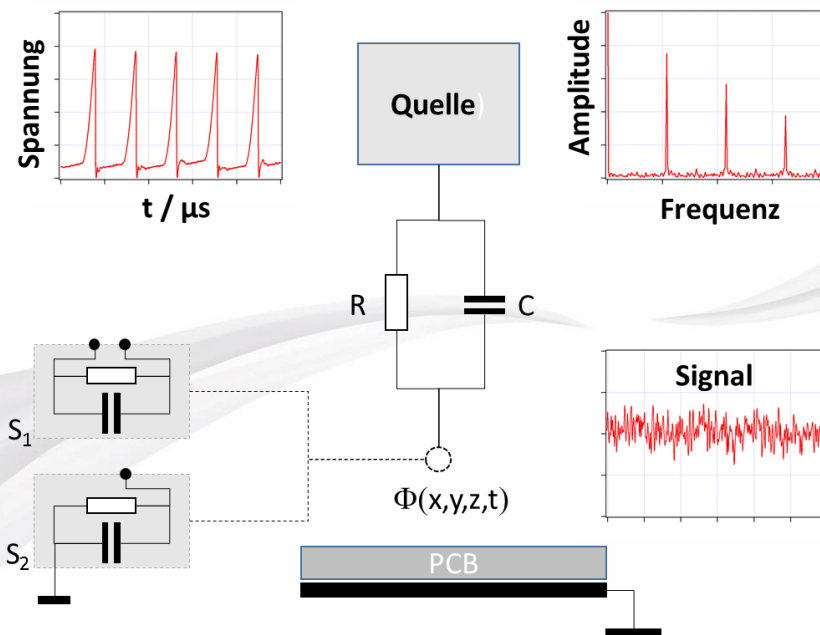


Abbildung 4 Messprinzip und Ersatzschaltbild. Die Spannungsquelle ist charakterisiert durch Amplitude, Frequenz und Pulsform, wahlweise dargestellt als Pulszug (links) oder Amplitudenspektrum im Frequenzraum (rechts). Die Potentialmessung wird entweder mit einer differentiellen Sonde S1 oder einer einfachen Sonde S2 durchgeführt.

Das gemessene lokale elektrische Potential hängt selbstverständlich von der gewählten Versuchsanordnung ab und für die spätere Betrachtung zur konkreten Belastung eines Bauteils ist es wichtig, die Messsonde genau zu charakterisieren. Prinzipiell besteht im Raum zwischen der inneren Elektrode, die auf Arbeitsspannung liegt, durch den Düsenaustritt bis zum Substrat (z.B. einer Leiterplatte) eine leitfähige Verbindung. Ein Plasma enthält frei bewegliche Ladungsträger!

Entscheidend für das Messergebnis sind der Innenwiderstand und die Kapazität der Messsonde und die Bandbreite des erfassten Frequenzspektrums. Für die Interpretation in der Praxis kann noch unterschieden werden zwischen einem absoluten lokalen Potential und einer lokalen Potentialdifferenz, die sich zwischen zwei beabstandeten Sonden aufbaut (Differentielle Messung S1, Messung bezogen auf Masse S2).

Wir haben nun mit einem Speicheroszilloskop (Tektronix) und einem hochwertigen Messkopf ($10\text{M}\Omega$, 8pf) das absolute und das differentielle Spannungssignal orts aufgelöst gemessen und jeweils eine Spektralanalyse durchgeführt.

Unterbrechung der Plasmaflamme durch eine dielektrische Platte aus Al_2O_3 senkt den DC Anteil des Messsignals, aber ändert den AC Anteil des Signals kaum. Die Pulsarbeitsfrequenz der Hochspannungsquelle ist weiterhin im Powerspektrum sichtbar. Das heißt, dass auch bei vollständiger Isolation des Substrates von der Plasmaquelle eine elektrische Leistung übertragen wird, die zu Bauteilbelastungen führen kann.

Aus diesen Messwerten lassen sich jeweils bei bekannter Anregungsspannung die Werte für das als Ersatzschaltbild angenommene RC Element ableiten.

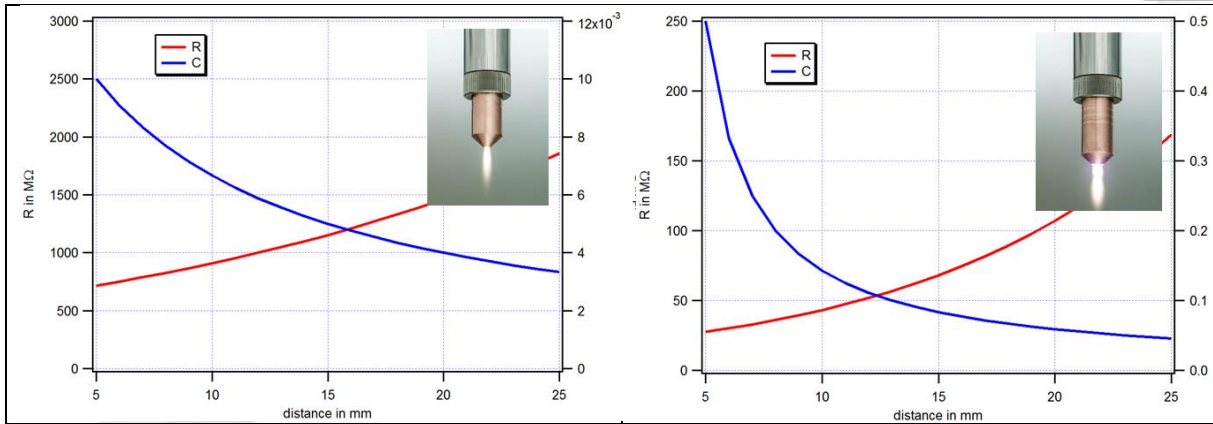


Abbildung 5 Ortsabhängigkeit der aus den Messungen berechneten RC Kenngröße, die die Ladungsübertragung des Plasmastromes beschreibt.

Die dargestellte Tendenz ist intuitiv plausibel: Mit steigendem Abstand sinkt die Kapazität, die sich zwischen dem Ausgangsbereich der Plasmadüse und der Oberfläche der Messsonde ausbildet. Gleichzeitig rekombinieren im sekundären Plasmajet freie Ladungsträger und die Plasmaflamme kühlt ab. Damit erhöht sich der elektrische Widerstand mit steigendem Abstand sehr schnell.

Für einen typischen Arbeitsprozess mit der potentialarmen Düse A250 und einen Arbeitsabstand von 20mm ist in Abbildung 6 Ortsabhängiges Potential gemessen mit einem Messfühler mit 100MΩ gegen Masse (links) bzw. 100MΩ differentiell gemessen zwischen zwei in der waagerechten um 1mm beanstandeten Messpunkten (rechts). Ortsabhängiges Potential auf einer Fläche von 25x25mm² gezeigt. Die maximale Potentialdifferenz auf der gesamten Fläche beträgt ca. 3V. Die lokalen Potentialdifferenzen gemessen mit einer Differentialsonde mit 1mm Messpunkt Abstand liegt auf der gesamten betrachteten Fläche bei weniger als 300mV.

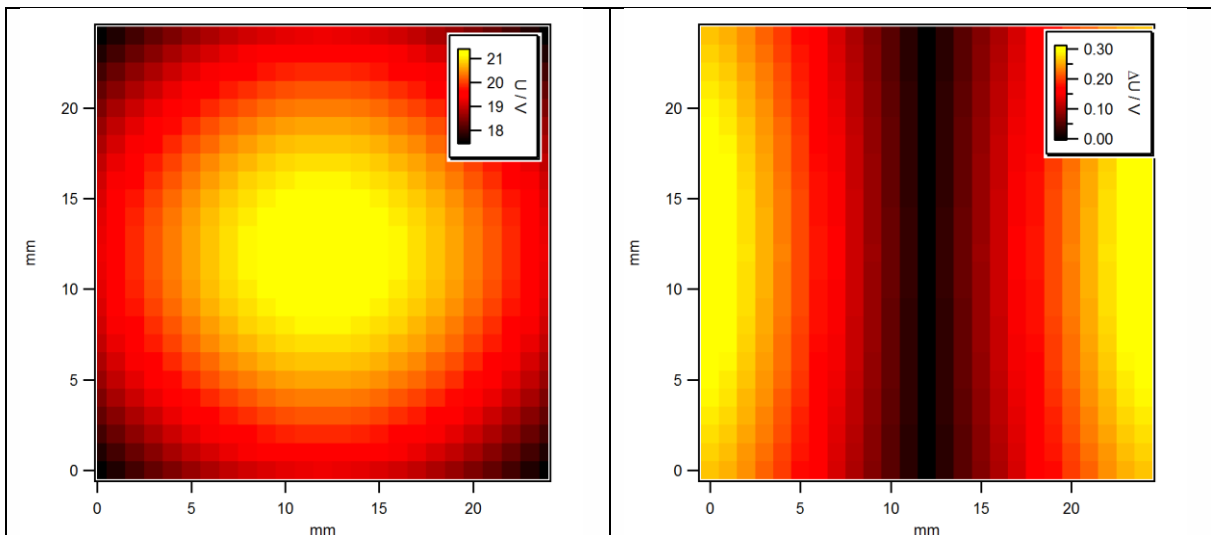


Abbildung 6 Ortsabhängiges Potential gemessen mit einem Messfühler mit 100MΩ gegen Masse (links) bzw. 100MΩ differentiell gemessen zwischen zwei in der waagerechten um 1mm beanstandeten Messpunkten (rechts).

Praktisches Modellsystem

Als Modellsystem soll ein einfaches CMOS Gatter (Complementary metal-oxide-semiconductor) betrachtet werden, da die meisten digitalen ICs (Sensoren, Prozessoren, Arbeitsspeicher) zurzeit in dieser Technik hergestellt werden. Bei typischen Strukturstärken von weniger als 1µm liegen die Durchschlagsspannungen unterhalb von 20V.

Die Verlustleistung im Ruhezustand beträgt üblicherweise ca. 10 nW. Dynamisch werden pro Gattern ca. $10\mu\text{W}$ - $100\mu\text{W}/\text{MHz}$ umgesetzt, das bedeutet, dass die Einzelemente Eingangsimpedanzen von ca. 1GOhm und typische Kapazitäten von ca. 1pF aufweisen. CMOS-Eingänge sind empfindlich gegenüber statischen Aufladungen und Überspannungen, weshalb vor CMOS-Eingänge, wenn technisch möglich, ein- oder zweistufige Schutzschaltungen (zum Beispiel Dioden gegen die beiden Betriebsspannungen) gesetzt werden. Typischerweise reduziert sich der Widerstand von Pin zu Pin am integrierten Baustein daher auf $<100\text{M}\Omega$.

In der Praxis werden die einzelnen Gatter zu Logikstrukturen verknüpft, an die diskrete Bauteilgrenze geführt und dort auf die Platine aufgelötet. Hier sind die Strukturen im mm-Bereich. Die korrekte Fragestellung lautet also, ob über eine Distanz von einigen Millimetern die Plasmaflamme eine Potentialdifferenz induzieren kann, die auf einem diskreten CMOS-Gatter zu einem Durchschlag der Sperrschicht führen kann. Hierzu kann eine einfache Sonde definiert werden, mit der praktische Messungen durchgeführt werden können.

Fazit:

Wird bei atmosphärischen Plasmaprozessen das Substrat nicht in unmittelbare Nähe der heißen Zone geführt, und wird ein Düsentyp verwendet, der ein gutes Confinement der primären Entladungszone sicherstellt, kann die direkte Ladungsübertragung sehr niedrig gehalten werden. Schädigungen auch sehr empfindlicher Bauteile wie CMOS Gatter können damit ausgeschlossen werden.

Wichtig für die Betrachtung ist die Kenntnis von Bearbeitungsprozess und des eingesetzten Plasmasystems. Auch ohne detaillierte Einzelfallbetrachtungen kann über ein einfaches Ersatzschaltbild für die Plasmaflamme abgeschätzt werden, welche Risiken durch Aufladungseffekte entstehen können.

Literaturverzeichnis

Liebermann, M. A., & Lichtenberg, A. (2005). *Principles of Discharges and Materials Processing*. New Jersey: Wiley.

Nettesheim, S., Korzec, D., & Burger, D. (2015). Plasmaaktivierung von Rolle. *Adhäsion*, 20-25.