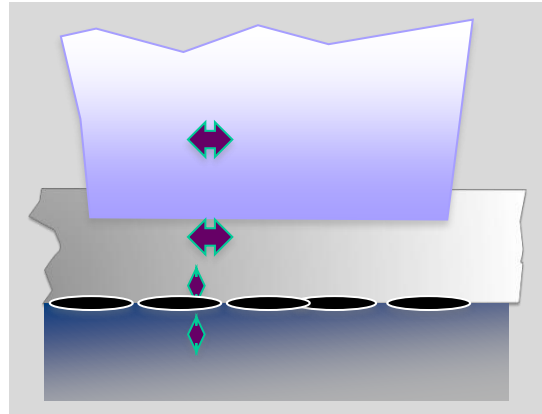


Welche Frequenz ist am besten zum Drahtbonden?

Technische Notiz 2015/01

Abstract

In der industriellen Praxis werden derzeit Ultraschallfrequenzen zwischen 40 und 160 kHz beim Drahtbonden eingesetzt, während experimentell niedrigere und höhere Frequenzen zwischen 25 kHz and 300 kHz diskutiert werden. Üblicherweise werden dicke Aluminiumdrähte und -bändchen bevorzugt bei niedrigeren Frequenzen von 40 bis 80 kHz gebondet, dünnere Aluminium- oder Golddrähte dagegen bei 100 bis 140 kHz.



Wir diskutieren im Folgenden die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Ultraschallfrequenzen anhand der Mechanik des Bondprozesses. Höhere Bondfrequenzen erlauben kürzere Bondzeiten und das Bonden auf empfindlicheren Oberflächen, bringen aber ein engeres Parameterfenster mit sich. Die Ursache dafür ist in erster Linie die kleinere Vibrationsamplitude an der Toolspitze, die bei höheren Frequenzen ausreicht. Der Hauptvorteil besteht bei vielen Anwendungen darin, dass eine höhere Bondqualität schon bei geringerer Drahtdeformation erreicht wird und dadurch noch zusätzlich ein stärkerer Bondheel entsteht. Auf der anderen Seite haben niedrigere Bondfrequenzen offenbar Vorteile bei rauerer Bondoberflächen, die vor dem Bonden eingeebnet und geglättet werden müssen. Gleichzeitig besteht hier ein höheres Risiko, den Bond nach seiner Ausbildung zu beschädigen.

Wie bildet sich ein normaler Bond aus?

Als Ausgangspunkt sollen die physikalischen Prozesse detaillierter betrachtet werden, die während der einzelnen Stufen der Bondausbildung ablaufen. Fig. 1 bis 3 zeigen schematisch die wichtigen Schritte beim Wedge-Bonden, die aber im Prinzip auch für das Ball-Bonden gelten.

Sobald das Bondwerkzeug und der Draht die zu bondende Fläche berührt haben, wird vom Bonder der Ultraschall (US) eingeschaltet und dadurch eine mechanische Schwingung mit einer charakteristischen Amplitude von 1 bis 2 μm bei Dünndrähten und etwa 3 bis 5 μm für Dickdraht angelegt.

Der entscheidende Aspekt ist hier, dass sich Draht und Bondtool gemeinsam bewegen und der Draht an der Bondoberfläche entlang schabst. Damit dies zuverlässig funktioniert, muss der Draht unmittelbar nach dem Touchdown-Schritt bedeutend besser am Tool haften als an der Bondoberfläche. Das ist üblicherweise durch eine matte Oberfläche des Bondtools sichergestellt, die von der Touchdown-Kraft (welche im Bondprogramm definiert ist) in die Oberseite des Bonddrahtes eingeprägt wird. (Beim Wedge-Bonden mit Golddraht weist der Fuß des Bondtools häufig eine Quer- oder Kreuzrinne auf, um die Haltung des Drahtes zu verbessern.)

Die ersten Millisekunden der US-Wirkung verrichten zunächst nur eine Schabe- oder Schmirgelwirkung des Drahtes am Bondpad. Sie reinigt die Oberfläche von Kontaminationen und Oberflächenoxiden, und bringt die Atomgitter von Draht und Substrat in Kontakt miteinander. Falls Bondpad und Bonddraht beide aus Aluminium sind, wird diese Kontaktbildung noch zusätzlich erleichtert, weil Aluminium immer von einer spontan gebildeten Oxidschicht bedeckt ist, die sowohl sehr dünn als auch sehr hart ist. Sie wirkt dadurch als Schmirgelpulver, welches die Atomgitter rasch und gründlich freilegt, aber gleichzeitig nur wenig Abfall erzeugt, weil das sehr dünne Oxid nur wenig störendes Schmirgelmaterial erzeugt. Dieses ist der tiefere Grund, warum sich Aluminiumdraht bei Raumtemperatur so leicht und ohne zusätzliche thermische Aktivierung bonden lässt, im Gegensatz zu Golddraht.

Sobald die Atomgitter miteinander in innigen Kontakt gekommen sind, bilden sich nach und nach intermetallische Bonds im atomaren Maßstab aus, zunächst in Gestalt kleiner Bondinseln (in Abb. 2 als kleine schwarze Ovale gezeigt.) Diese Inseln verändern nun aber das Verhalten des Drahts, der sich jetzt nicht mehr als starrer Körper bewegen kann, also mit Ober- und Unterseite gleichzeitig. Vielmehr haftet die Unterseite mehr und mehr am Untergrund und kann sich deshalb nicht mehr bewegen, während die Oberseite aber nach wie vor mit dem Bondtool oszilliert: der Draht wird jetzt nicht-elastisch deformiert und kaltverformt. (Kaltverfestigung, Versetzungen und andere Effekte, die daraus resultieren, werden in dieser Diskussion nicht näher betrachtet.) Es ist nun wichtig, festzuhalten, dass die Bewegung innerhalb des Drahtmaterials fast vollständig eine plastische Deformation und keine elastische ist, denn die Amplitudenunterschiede von etwa 1 µm über eine Drahtstärke von typisch 25 bis 30 µm sind weit jenseits der elastischen Deformationsgrenze von Aluminium. Daher findet jetzt eine Knet- und Verformungsbewegung statt. Die kurzen Doppelpfeile in den Fig. 1 bis 3 deuten ebenfalls die resultierende Amplitude an den unterschiedlichen Grenzflächen an. Dadurch lässt sich ablesen, dass im gleichen Maß, wie sich mehr und mehr Bondinseln bilden, die Amplitude an der Unterseite des Drahtes relativ zur Oberseite abnimmt. Auch die Gesamtamplitude, einschließlich der Toolspitze, nimmt wegen der Dämpfungswirkung des sich bildenden Bonds ab.

Mit der fortschreitenden US-Schwingung werden die Bondinseln größer und größer (im Idealfall bedecken sie die gesamte Kontaktfläche zwischen dem Draht und dem Bondpad), und in der Folge verschwindet die Relativbewegung zwischen Draht und Bondpad zusehends. Tatsächlich bewegen sich dann Draht und Bondpad gemeinsam und der Bondpad selbst beginnt mitzuschwingen, wenn auch mit deutlich geringerer Amplitude, wie in Abb. 3 gezeigt ist.

Gleichzeitig mit dem Anwachsen der Bondfläche drückt sich das Bondtool nach unten in den Draht und deformiert ihn, so dass er dünner und gleichzeitig breiter wird. Diese Deformation kann man in der Z-Achse sehr bequem und genau verfolgen, sogar zeitaufgelöst, und sie bietet daher eine hervorragende Qualitätskontrolle, indem die erreichte End-Deformation nach der programmierten Bondzeit angezeigt wird. Sogar noch mehr: auch der Verlauf der Deformation über die Zeit hinweg lässt sich beobachten. In einer weiter verfeinerten Entwicklungsform, wie sie von F&K Delvotec angeboten wird, lässt sich mit dem Verlauf der Deformationskurve ein Regelkreis speisen, der den Ultraschallpegel je nach Bedarf höher oder niedriger stellt, wenn die Deformation schneller oder langsamer anwächst als eine programmierte, vorgegebene Standardkurve. Dieses patentierte Bondprozessregelung (Bond Process Control BPC) ermöglicht also eine automatische Feinreglung des Bondvorgangs, um Unter- oder Überbonden zu vermeiden.

Die Bondzeit wird meist so eingestellt, dass der Ultraschall etwas länger anliegt, als zum Ausformen des Bonds eigentlich notwendig wäre. Diese Extrazeit wird üblicherweise als „Temperzeit“ bezeichnet, während der die Bondzone ohne weitere vertikale Drahtdeformation weiter gewalzt und geknetet wird. Fig. 3 zeigt, dass die Schwingungen jetzt über das gesamte Bondsystem hinweg stattfinden, aber mit etwas größerer Amplitude am Tool und an der Oberseite des Drahtes und mit entsprechend kleinerer Amplitude an der Drahtunterseite und am Bondpad. Wichtig ist hier wiederum, festzuhalten, dass Bondtool und Draht sich

gemeinsam und in Tandem bewegen, und dass auch die Drahtunterseite und das Bondpad gemeinsam schwingen. Der Amplitudengradient über die Drahtdicke hinweg erzeugt die Knetwirkung des Metalls, welche als entscheidend dafür gilt, dass sich die Versetzungen aus der Bondzone in eine größere Grenzschicht verteilen. Dadurch erhöhen sich Stabilität und Lebensdauer des Bonds.

Von Interesse ist vielleicht, dass während dieser ganzen Diskussion keine Schmelzzone an der Grenzschicht erwähnt wurde, nicht einmal eine erhöhte Temperatur aufgrund der Reibung zwischen den Bondpartnern, also zwischen Draht und Bondpad. In der Tat ist nach einem solchen Temperaturanstieg lang und intensiv geforscht worden, ohne eindeutige Ergebnisse zu liefern. Genauso wenig ist es jemals gelungen, auch nur kleine Schmelzonen in mikrographischen Schnitten durch die Grenzschichten zu identifizieren. Man kann daraus den Schluss ziehen, dass solche Effekte, wenn sie überhaupt existieren, sehr gering sein müssen. Es mag an dieser Stelle von besonderem Interesse sein, dass sich Aluminiumdraht sogar bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff mit Erfolg bonden ließ – wenn es einen Temperatureffekt gibt, dann müsste er sich unter solch drastischen Bedingungen jedenfalls bemerkbar machen.

Natürlich kann man das oben dargestellte Modell in Frage stellen, besonders, was die Haftung des Drahtes am Bondtool zu jeder Zeit während des Bondens angeht, und man könnte ins Feld führen, dass doch zumindest während der letzten (oder Temper-) Phase das Bondtool über die Drahtoberfläche rutschen müsste, anstatt den Draht in der Tiefe zu kneten und zu walken. Drei Argumente lassen sich dagegen anführen: erstens ist gut bekannt, dass eine geringere Bondkraft für einen schlechteren Kontakt zwischen Tool und Draht verantwortlich ist, sobald der Bond hergestellt ist. Das Tool rutscht dann auf der Drahtoberfläche und schleift oder poliert diese, anstatt den gesamten Drahtquerschnitt zu walken, und hinterlässt eine beschädigte Oberfläche, die im Fachjargon als „verbrannt“ bezeichnet wird. Zweitens kann der Fall auftreten, dass die Bondpad-Metallisierung selber nicht ausreichend gut auf ihrer Unterlage haftet. Dann kann sie durch die Bondschwingung mitgenommen und abgerissen werden, was als Metallisierungsauriss bekannt ist. Drittens – und am aussagekräftigsten – wurden vor einiger Zeit eindrucksvolle Mikrofilmaufnahmen am Fraunhofer-IZM Institut in Berlin in der Gruppe von Lang und Schneider-Ramelow hergestellt, die den Bondprozess in hoher Vergrößerung und extremer Zeitlupe wiedergeben. Diese Mikrovideos zeigen klar die oben beschriebenen Schritte aus dem o.a. Modell, angefangen mit der Tandem-Bewegung von Tool und Draht in der Anfangsphase bis hin zur abnehmenden Amplitude von der Toolspitze hinunter durch den Draht bis ganz nach unten in das Bondpad während der Temperphase. Diese Ergebnisse wurden auch durch Messungen mit dem Laservibrometer bestätigt: dort zeigt die Schwingungsamplitude (und auch die Frequenz) an der Toolspitze, am Drahtende und an der Kante des Bondpads genau das oben beschriebene Verhalten.

Bondmaterialien verhalten sich bei unterschiedlichen Bondfrequenzen unterschiedlich

Bisher wurde die Ultraschallfrequenz nicht erwähnt. In der Praxis werden Frequenzen zwischen 40 und 160 kHz eingesetzt, mit einem klaren Vorzug für niedrigere Frequenzen um die 60 kHz für Dickdrahtbonden und höhere (100 und 140 kHz) für Dünndrahtbonden, sowohl mit Wedge- als auch mit Ball-Bond-Verfahren. In der Vergangenheit gab es intensive und breite Diskussionen über das Bonden mit höheren US-Frequenzen bis zu 300 kHz. Für das Gold-Ball-Bonden schienen solch hohe Frequenzen besonders attraktiv, weil man erwartete, damit bei Raumtemperatur oder knapp darüber mit hoher Qualität bonden zu können. Man hätte also gewissermaßen Temperatur durch US Frequenz ersetzt. In der Tat gab es einige erfolgreiche Versuche, aber die Prozesse litten immer darunter, dass das Prozessfenster unbequem eng wurde und damit der Bondprozess mehr an Robustheit verlor als er an Kosten wegen der wegfallenden Heizung einsparte. Heute wird dieses Thema kaum mehr diskutiert.

Im Gegensatz dazu wird jedoch sehr viel über die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Ultraschallfrequenzen diskutiert. Zunächst ist natürlich eine höhere Frequenz attraktiv, weil sie eine kürzere Bondzeit erlaubt. Der Grund ist einfach: ein Bond erfordert eine gewisse Anzahl von Schwingungen (oder Reib-Bewegungen) zur Herstellung, in der Größenordnung von 1000 bis 3000, wenn man eine typische Bondzeit von 20 ms bei 100 kHz zugrundelegt. Eine höhere US-Frequenz erreicht diese Anzahl in einer proportional kürzeren Zeit. Während dieser Effekt einen gewissen Einfluss auf die Produktivität hat, ist die Bondzeit selbst für höchstens die halbe Zykluszeit verantwortlich, so dass dieser Einfluss begrenzt ist.

In der Praxis ist wichtiger, dass allem Anschein nach eine höhere US-Frequenz es erlaubt, die Schwingungsamplitude herunterzusetzen, welche zu einer erfolgreichen Bondverbindung notwendig ist. (Dies heißt nicht, dass höhere Frequenzen automatisch niedrigere Amplituden erzeugen; es ist lediglich eine Frage der Parametereinstellung.) Die Physik bringt es ebenso mit sich, dass bei höherer US-Frequenz die Bewegung an der Toolspitze (und alle anderen damit zusammenhängenden Bewegungen) proportional schneller ablaufen. Diese beiden Aspekte sollen nacheinander betrachtet werden.

Eine größere Amplitude glättet rauere Oberflächen, bringt aber andererseits das Risiko mit sich, empfindliche Oberflächen zu beschädigen. Daher ist es in unserer Erfahrung häufig vorteilhaft, Bondpads mit rauer Oberfläche wie Hybrid-Pasten, mit einer größeren Amplitude bei niedrigerer US-Frequenz von 60 kHz zu glätten. Im Gegensatz dazu lassen sich sehr dünne, empfindliche und glatte Bondpads wie etwa die Metallisierungen von SAW (Oberflächenwellenfiltern), die herunter bis zu 40 nm dünn sein können, vorteilhaft mit höheren Frequenzen von 140 kHz bonden. Insgesamt scheint eine US-Frequenz von 100 kHz ein günstiger Mittelwert zu sein, der für die meisten Anwendungen gut geeignet ist, und tatsächlich werden die meisten unserer Drahtbonder mit dieser Frequenz ausgeliefert.

Bei höheren US-Frequenzen bewegen sich, wie oben erwähnt, die Toolspitze und alle anderen Elemente des Bondsystems mit höherer Geschwindigkeit, denn bei Sinusschwingungen ist die maximale Bewegungsgeschwindigkeit proportional zur Frequenz. Empirisch stellt man fest, dass die meisten Bondmaterialien einschließlich des Bonddrahts sich unter höherer US-Frequenz benehmen, als wären sie steifer oder härter als bei niedrigeren Frequenzen. In der Praxis stellt sich das so dar, als würde die Bondfrequenz weniger tief in das Bulk-Material eindringen. Wir haben daher die Erfahrung gemacht, dass sich weiche Materialien wie Kapton-Folie häufig mit höheren Frequenzen bedeutend besser bonden lassen. Das gleiche zeigt sich bei einigen Sensoren oder SAW-Filtern, wo zwar der Chip hart ist, aber auf einem weichen oder sehr weichen Silikonkleber montiert ist, um ihn mechanisch vom Untergrund zu entkoppeln. Nach der reinen Lehre wäre zu erwarten, dass diese Chips sich überhaupt nicht bonden lassen – aber im krassen Gegensatz sind sie mit den richtigen Bondparametern sehr gut bondbar, und zwar wiederum meist bei höheren Frequenzen.

Was den Bonddraht angeht, erscheinen Drähte typischerweise bei niedrigen Frequenzen weicher und lassen sich damit leichter formen und der Bondoberfläche anpassen, was bei den oben erwähnten Fällen wie Dickschichtpasten die Bondqualität verbessert. Tabelle 1 gibt einen kurzen Überblick über die in der Praxis bevorzugten Kombinationen.

Im Falle von...	Frequenz
Weiche Substrate (Kevlar)	höher
Beweglicher Chip (Sensoren)	höher
Raue Oberfläche (Dickfilm)	niedriger
Dünne Metallisierung	höher
Harte Metallisierung	höher
Dünnerer Draht	höher
Härterer/weicherer Draht	----

Tabelle 1: Typische Kombinationen von Material und US-Frequenz

Ein zusätzlicher und nicht unwichtiger Vorteil höherer US-Frequenzen ist, dass bei sonst unveränderten Bedingungen ein guter Bond bereits mit niedrigerer Drahtdeformation erreicht wird. Diese Beobachtung passt gut dazu, dass bei höherer US-Frequenz der Draht sich verhält, als wäre er härter. Ein Bond mit niedrigerer Deformation ist einem höher deformierten immer vorzuziehen, selbst wenn er die selbe Scherkraft hat, weil der geringer deformierte Bond auch einen weniger geschädigten Heel aufweist, was die Langzeitqualität und Lebensdauer verlängert. Bestätigt wird diese Beobachtung dadurch, dass zumindest bei Alu-Drähten die Pullwerte mit zunehmender Drahtdeformation abnehmen.

Obwohl höhere Bondfrequenzen dem Voraufgegangenen nach sehr häufig vorteilhaft sind, bringen sie doch einen entscheidenden Nachteil mit sich: das Parameterfenster ist normalerweise kleiner als für niedrigere Frequenzen. Dies kann mehr oder weniger zutreffen und muss jeweils sorgfältig gegen die Vorteile abgewogen werden.

Als Hersteller von Drahtbondern finden wir es deswegen von Vorteil, dem Kunden eine ganze Reihe von unterschiedlichen US-Frequenzen zur Auswahl anbieten zu können. In der Tab. 2 sind die in der Praxis bevorzugten Frequenzen zusammengestellt. Zusätzlich gibt es noch einige „exotische“ Frequenzen, die auf dem Markt aber keine Rolle spielen. Zu bemerken ist noch, dass man bei modernen Drahtbondern zur Änderung der US-Frequenz nur den Transducer zu wechseln braucht, denn dieser muss eine mechanische Resonanz bei der gewünschten Bondfrequenz haben, weshalb sich Transducer mit unterschiedlichen Frequenzen auch mechanisch unterscheiden. Der US-Generator dagegen ist meist voll digital und die Frequenzen werden daher frei programmiert. Insgesamt kann also die US-Frequenz ohne großen Kostenaufwand durch den Bediener gewechselt werden.

Gold-Ball		60	100	120	140
Thin Wedge		60	100	120	140
Heavy Wire	40	60	90	120	

Tabelle 2: Typische US-Frequenzen bei unterschiedlichen Drahtbondverfahren (in kHz)

Empfehlungen

Ganz allgemein gesagt sollte man eine Frequenz benutzen, die so hoch wie möglich und so niedrig wie nötig liegt. Höhere Frequenzen ermöglichen kürzere Bondzeiten und das Bonden auf empfindlicheren Oberflächen, leiden aber gleichzeitig unter einem kleineren Parameterfenster. Raue Oberflächen lassen sich dagegen häufig mit niedrigen Frequenzen besser verarbeiten.

Weitere Informationen oder konkrete Probleme können gerne mit den Spezialisten von F&K Delvotec diskutiert werden.

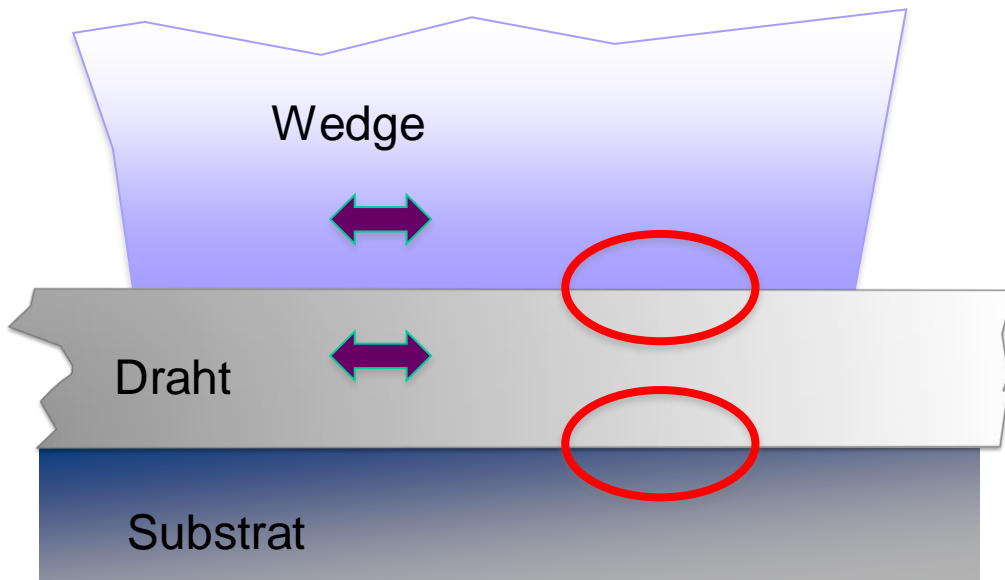


Fig. 1 Erste oder Reinigungsphase beim Wedgebonden

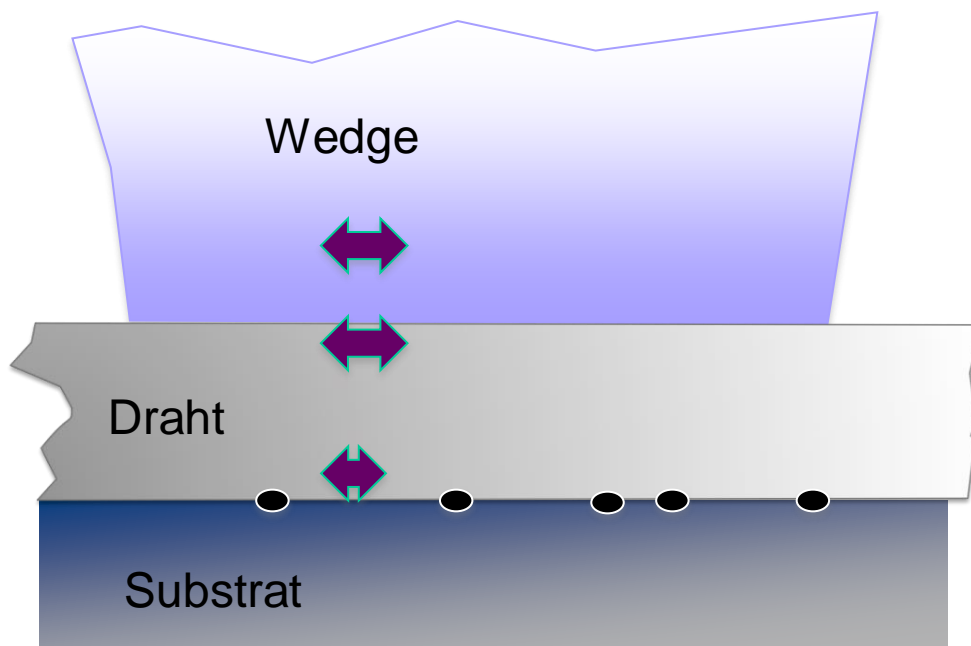


Fig. 2 Zweite Phase, beginnende Bond-Bildung beim Wedge-Bonden

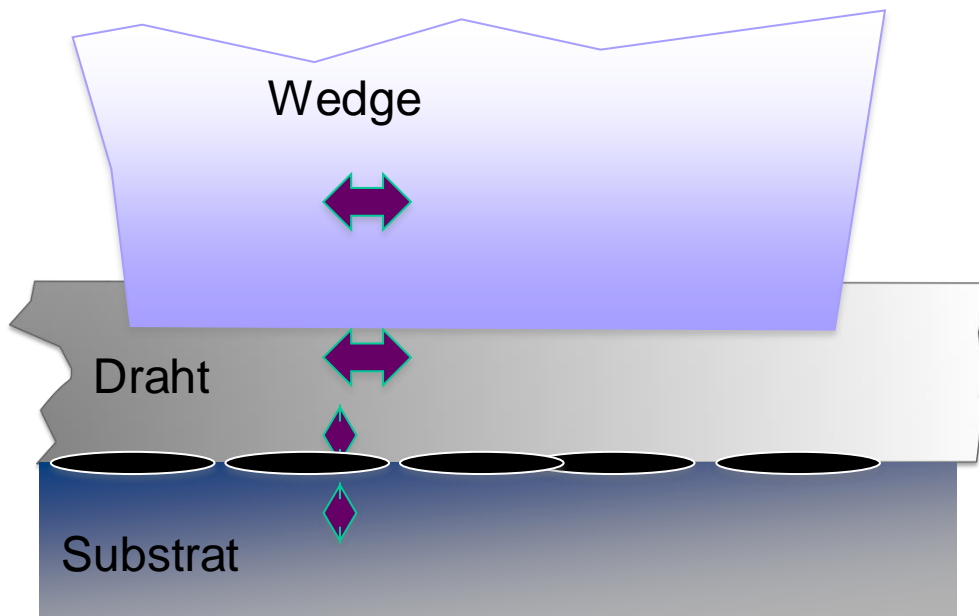


Fig. 3 Bondwachstums-Phase beim Wedge-Bonden