

# **Simulation des Underfill-Prozesses bei Flip Chip-Anwendungen**

Von der Fakultät Energie-, Verfahrens- und Biotechnik  
der Universität Stuttgart  
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

**Tanja Häußermann**  
aus Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. H.-G. Fritz  
Mitberichter: PD Dr.-Ing. habil. S. Schütz

Tag der mündlichen Prüfung: 8. September 2008

Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart

2009



---

# Danksagungen

Diese Arbeit ist durch die Zusammenarbeit der Robert Bosch GmbH und dem Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart entstanden.

Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Gerhard Fritz vom Institut für Kunststofftechnik der Universität Stuttgart für die bereitwillige Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung und Bewertung meiner Promotion.

Herrn PD Dr.-Ing. habil. Steffen Schütz vom Institut für Mechanische Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart danke ich für die Übernahme des Mitberichts, sein großes Engagement und zahlreiche wertvolle Ratschläge.

Ich möchte Herrn Dr. Gerhard Liebing von der Robert Bosch GmbH dafür danken, dass er mir die Durchführung dieser Arbeit bei CR/APP4 in Waiblingen ermöglicht hat, wie auch für sein immer großes Interesse an meinen Untersuchungen.

Herrn Ralf Mießner danke ich für seine wertvolle fachliche Unterstützung bei allen erdenklichen Fragen zur Aufbau- und Verbindungstechnik sowie sein Vertrauen in meine Arbeit und die mir gewährten Freiräume.

Ich danke Frau Barbara Holdgrün für die sehr gute Zusammenarbeit und zahlreiche fachliche Diskussionen während unserer gemeinsamen Zeit bei CR/APP und darüber hinaus.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei den anderen Teamkollegen, Herrn Ulrich Schaaf, Herrn Hartmut Rohde, Herrn Klaus Zeh und Herrn Marc Dreßler für die immer große Hilfsbereitschaft und das nicht zu übertreffende Arbeitsklima.

Herrn Dr. Patrick Stihler und Frau Elfriede Forkel danke ich für die Einführung in die Messung von Grenzflächenspannungen, Kontaktwinkeln und Viskositäten. Auch allen anderen Kollegen von CR/APP herzlichen Dank für die gute Zusammenarbeit. Weiterhin danke ich den Kollegen von CR/APJ3 in Schwieberdingen für die Hilfe bei der Flip Chip-Montage.

Schließlich danke ich meinen Freunden und Kollegen und vor allem meiner Familie und meinem Lebensgefährten Heiko für die seelische und moralische Unterstützung.

---

# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen.....	6
Abkürzungen.....	9
Kurzfassung.....	10
Summary.....	13
1 Einleitung.....	16
2 Flip Chip und Underfilling.....	19
2.1 Der Flip Chip-Prozess.....	19
2.2 Zuverlässigkeit von Flip Chip-Verbindungen.....	24
2.3 Underfilling.....	25
2.4 Fließblasen im Underfiller.....	28
3 Physikalische und numerische Grundlagen der Underfill-Simulation.....	33
3.1 Grenzflächenspannung.....	33
3.2 Analytische Betrachtung des kapillaren Fließens.....	35
3.3 Grundlagen der Strömungssimulation.....	41
4 Stoffeigenschaften.....	47
4.1 Reaktivität.....	47
4.2 Füllstoffe.....	48
4.3 Viskosität.....	48
4.4 Dichte.....	53
4.5 Grenzflächenspannung.....	54
4.6 Kontaktwinkel.....	55
5 Softwareauswahl.....	57
5.1 Kriterien für die Vorauswahl.....	57
5.2 Testfall 1: Befüllung einer Kavität über zwei Einlässe.....	58
5.3 Testfall 2: Kapillares Befüllen eines engen Spaltes.....	60
5.4 Bewertung.....	63
5.5 Implementierung eigener Unterroutinen.....	63
6 Grundsatzuntersuchungen.....	64
6.1 Fließtest am Glas-Testvehikel.....	64
6.2 Simulation des Fließens im ebenen Spalt.....	65
6.3 Innerer Strukturaufbau.....	66
6.4 Partikelmigration.....	69
7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips.....	77
7.1 Einflussgrößen im Underfill-Prozess und deren Zusammenhänge.....	78
7.2 Modellierung.....	82

## Inhaltsverzeichnis

---

7.3	Parametervariation periphere Bumps .....	98
7.4	Experimentelle Untersuchungen .....	104
7.5	Wechselwirkungen .....	112
7.6	Runde Lötstopplackaussparungen .....	119
7.7	Vakuumverguss: Blasenverhalten beim Belüften.....	120
8	Untersuchung flächig kontaktierter Flip Chips.....	124
8.1	Relevante Größen.....	125
8.2	Modellierung.....	126
8.3	Voruntersuchung: Einfluss der Vias.....	126
8.4	Voruntersuchung: Einfluss der Lötstopplackaussparungen.....	130
8.5	Untersuchungen an flächig kontaktierten Chips.....	133
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	137
	Quellen .....	140
	Anhang A - Unterroutinen (UDFs).....	147
A.1	Implementierung der UDFs.....	147
A.2	UDF Bewegte Dosiernadel.....	148
A.3	UDF Viskosität.....	150
A.4	UDF Partikelmigration .....	151

---

# Formelzeichen

## Lateinische Symbole

A	[m <sup>2</sup> ]	Fläche
a	[1]	Parameter der Carreau-Yasuda-Funktion
a	[m]	Partikelradius
B	[m]	Breite
b	[m]	Zellbreite
c	[mol/kg]	Konzentration
c	[m/s]	Schallgeschwindigkeit
D	[m]	Durchmesser
D		Diffusionskoeffizient
D <sub>C</sub>	[m <sup>2</sup> /s]	Diffusionskoeffizient (Funktion der Partikelkonzentration)
D <sub>S</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Diffusionskoeffizient (Funktion der Scherrate)
d	[m]	Charakteristische Abmessung
d <sub>p</sub>	[m]	Partikeldurchmesser
d <sub>50,0</sub>	[m]	Mittlerer Durchmesser
<u>F</u>	[N]	Kraftvektor
F <sub>G</sub>	[N]	Massenkraft im Erdschwerefeld
F <sub>P</sub>	[1]	Korrekturfaktor Fließwiderstand
F <sub>σ</sub>	[N]	Durch Grenzflächenspannung induzierte Kraft
f	[1/s]	Frequenz
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
<u>g</u>	[m/s <sup>2</sup> ]	Vektor der Erdbeschleunigung
H	[m]	Höhe
h	[J/kg]	Spezifische Enthalpie
L	[m]	Länge
L <sub>e</sub>	[m]	Einlauflänge
m	[kg]	Masse
m <sub>ein</sub>	[kg/s]	Einströmender Massenstrom
n	[1]	Parameter der Carreau-Yasuda-Funktion
n <sub>p</sub>	[1]	Partikelanzahl
P	[m]	Pitch
p	[bar]	Druck
pos	[m]	Koordinate der Position der bewegten Dosiernadel
Q		Quelle

## Formelzeichen

---

R	[m]	Radius
S		Senke
T	[m]	Tiefe
t	[s]	Zeit
$T_g$	[K]	Glasübergangstemperatur
V	[m <sup>3</sup> ]	Volumen
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	Volumenstrom
v	[m/s]	Geschwindigkeit
$\underline{v}$	[m/s]	Geschwindigkeitsvektor
$v_D$	[m/s]	Dosiernadelgeschwindigkeit
$v_{\text{ein}}$	[m/s]	Einströmgeschwindigkeit
W	[J]	Arbeit

## Griechische Symbole

$\alpha$	[1]	Phasenanteil
$\beta$	[1]	Formfaktor
$\Gamma$		Allgemeiner Transportkoeffizient
$\dot{\gamma}$	[1/s]	Schergeschwindigkeit
$\Delta$		Differenz
$\eta$	[Pas]	Viskosität
$\eta_0$	[Pas]	Nullviskosität
$\eta_\infty$	[Pas]	Viskosität bei sehr hohen Schergeschwindigkeiten
$\theta$	[°]	Kontaktwinkel
$\lambda$	[s]	Parameter der Carreau-Yasuda-Funktion
$\lambda$	[W/(Km)]	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda$	[m]	Wellenlänge
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\sigma$	[N/m]	Grenzflächenspannung
$\tau$	[s]	Periodendauer
$\underline{\tau}$	[N/m <sup>2</sup> ]	Spannungstensor
$\phi$		Allgemeine Bilanzgröße
$\phi$	[1]	Partikelkonzentration
$\phi_m$	[1]	Maximale Partikelkonzentration
$\omega$	[1/s]	Winkelgeschwindigkeit

**Indizes oben**

T                      Transponiert

**Indizes unten**

Bump	Bump
c	Komponente c
D	Dosiernadel
LB	Leiterbahn
LG	Flüssig-Gasförmig
Lot	Lot
LSL-Graben	Lötstopplackgraben
leer	Leer
m	Masse
max	Maximal
min	Minimal
mod	Modifiziert
n	Bei konstanter Stoffmenge
Pass	Passivierungsöffnung
p	Bei konstantem Druck
Quelle	Quelle
q	Phase q
rev	Reversibel
SG	Fest-Gasförmig
SL	Fest-Flüssig
Spalt	Spalt
T	Bei konstanter Temperatur
x	x-Komponente / in x-Richtung
y	y-Komponente / in y-Richtung
z	z-Komponente / in z-Richtung



---

# Abkürzungen

BGA	Ball Grid Array
C4	Controlled Collapse Chip Connection
CFD	Computational Fluid Dynamics
CSP	Chip Scale Package
CSR	Controlled Strain Rate
CSS	Controlled Shear Stress
DCA	Direct Chip Attach
DNP	Distance to Neutral Point
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EAS	Equi Angle Skew
FCIP	Flip Chip in Package
FCOB	Flip Chip on Board
FEM	Finite Elemente Methode
FMR	Flussmittelrückstände
FR4	Organisches Leiterplattensubstrat ( <i>Flame Retardant</i> Typ 4)
FR5	Organisches Leiterplattensubstrat (Hoch-T <sub>g</sub> -FR4)
FVM	Finite Volumen Methode
I/O	Input/Output
IC	Integrated Circuit
IR	Infrarot
LSL	Lötstopplack
MAC	Marker and Cell
SAM	Scanning Acoustic Microscope
UBM	Under Bump Metallisierung
UDF	User-Defined Function
UDS	User-Defined Scalar
UF	Underfiller
Via	Vertical Interconnect Access
VOF	Volume of Fluid

---

# Kurzfassung

Flip Chips sind elektronische Bauteile, zumeist Halbleiterbauelemente, die im Gegensatz zu drahtkontaktierten Chips über leitfähige Höcker, so genannte Bumps, mit der aktiven Seite nach unten (engl.: *flipped*) direkt auf dem Träger kontaktiert werden. Der Vorteil der Flip Chip-Technologie gegenüber anderen Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnik liegt in ihrer höheren Verbindungsdichte, wodurch geringere Packungsgrößen realisiert werden können, sowie in der höheren elektrischen Performance und größeren Schaltungsgeschwindigkeit der elektronischen Aufbauten. Da bei Flip Chip-Aufbauten alle Kontaktstellen simultan hergestellt werden, wird vor allem bei komplexen Aufbauten die Bearbeitungszeit gegenüber seriellen Verbindungstechniken signifikant verkürzt.

Am häufigsten in der Flip Chip-Technik werden die Chips mit Hilfe von Lotbumps mit organischen Substraten verbunden. In einem ersten Schritt wird Lotpaste auf den Anschlussmetallisierungen des Siliziumwafers aufgetragen. Der Wafer wird erhitzt und die Bumps werden aus der geschmolzenen Lotpaste gebildet. Anschließend wird der Wafer in separate Chips zersägt. Die Chips werden mit den Lotbumps partiell in Flussmittel eingetaucht und auf dem Substrat platziert. Anschließend wird die komplette Baugruppe in einem Umschmelzofen erhitzt, wodurch die elektrischen und mechanischen Verbindungen hergestellt werden. In einem letzten Schritt wird der Spalt zwischen Chip und Substrat komplett mit einem nicht leitfähigen Klebstoff, dem so genannten Underfiller, aufgefüllt. Der flüssige Underfiller wird entlang einer oder mehrerer Chipkanten appliziert, durch Kapillarwirkung in den Spalt gezogen und anschließend ausgehärtet. Die Hauptaufgabe des Underfiller ist es, mechanische Spannungen zu reduzieren, die bei Temperaturbelastung aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Flip Chip und organischem Substrat in den Lotbumps verursacht wird. Daher ist die Chipunterfüllung entscheidend für die Zuverlässigkeit des Verbunds. Blasen können während des Fließvorgangs eingeschlossen werden und sich negativ auf die Zuverlässigkeit der Lotstellen auswirken.

In dieser Arbeit wird die Entstehung von Fließblasen mit Hilfe von Strömungssimulationen und Experimenten untersucht. Dazu müssen Methoden zur Modellierung des Underfill-Prozesses und des Fließverhaltens des Underfillers entwickelt werden. Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Mechanismen zu verstehen, die zur Bildung von Fließblasen führen, und die Parameter zu identifizieren,

welche die Blasenbildung beeinflussen. Dadurch sollen in zukünftigen Flip Chip-Anwendungen die Geometrien von Flip Chip und Substrat sowie die Prozessführung im Hinblick auf die Underfill-Qualität optimiert werden können. In bestehenden Anwendungen können die Prozessparameter für die gegebenen Baugruppengeometrien optimiert werden.

Zuerst wird das für die experimentellen und numerischen Untersuchungen verwendete Underfill-Material charakterisiert. Der besagte Underfiller besteht aus einem anhydridhärtenden Einkomponenten-Epoxydharz, gefüllt mit einem relativ geringen Anteil von  $\text{SiO}_2$ -Füllstoffpartikeln. Die Viskosität des flüssigen Underfillers wird mit einem Kegel-Platte-Rotationsrheometer gemessen. Die Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit wird unter der Annahme einer homogenen Füllstoffverteilung im Underfiller mittels einer Carreau-Yasuda-Approximation beschrieben. Die Dichte des flüssigen Underfillers wird mit Hilfe einer Biegeschwingapparatur gemessen. Um das Benetzungsverhalten zu beschreiben, wird der Kontaktwinkel des Underfillers auf allen im Verbund relevanten Oberflächenmaterialien gemessen. Die Grenzflächenspannung des flüssigen Underfillers wird mit Hilfe der Pendant Drop-Methode gemessen.

Auf der Basis zweier Testfälle – dem Befüllen einer Kavität durch mehrere Einlässe und dem kapillaren Fließen in einem ebenen Spalt - wird ein geeignetes Strömungssimulationsprogramm ausgewählt. Anhand der vielfältigen zu erfüllenden Anforderungen werden die beiden kommerziellen CFD-Softwarepakete CFX 5.5.1 und Fluent 6.1 vorausgewählt. In beiden Testfällen liefert Fluent plausiblere Ergebnisse als CFX und wird daher für die weiteren Untersuchungen eingesetzt. Vor den Untersuchungen an realen Flip Chip-Aufbauten werden einige Grundsatzuntersuchungen durchgeführt. In Simulation und Experiment wird die Fließlänge über der Fließzeit des Underfillers in einem einfachen ebenen Spalt ermittelt. Diese Ergebnisse werden ebenfalls mit der Lösung der analytischen Beschreibung des kapillarinduzierten Fließens eines viskosen Mediums zwischen parallelen Platten von Schwiebert/Leong [ 1 ] verglichen. Experimente mit Glaschips, die über Bumps auf einem Substrat fixiert werden, zeigen bei bestimmten Strömungsverhältnissen einen Aufbau innerer Strukturen zwischen den Füllstoffpartikeln. Da diese Strukturen aber nur bei sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten auftreten und bei Beschleunigung der Strömung wieder aufbrechen ist dieses Phänomen für Strömungszustände, in denen Fließblasen entstehen, nicht relevant. Der Einfluss der Partikelmigration, wie er von Zhang und Acrivos [ 2 ] beschrieben wurde, kann über eine benutzerdefinierte Unteroutine in die Simulation implementiert werden. Für Underfiller mit hohem Füllstoffanteil stimmen bei Verwendung des Partikelmigrations-

modells numerische und experimentelle Ergebnisse besser überein als unter der Annahme einer homogenen Füllstoffverteilung. Für den in dieser Untersuchung verwendeten Underfiller kann nachgewiesen werden, dass aufgrund des relativ geringen Füllstoffgehalts der Einfluss der Partikelmigration vernachlässigt werden kann.

Im nächsten Schritt werden Untersuchungen an realen peripher kontaktierten Flip Chips durchgeführt. In der Simulation wird die bewegte Dosiernadel mit Hilfe einer benutzerdefinierten Unteroutine modelliert. Anhand einer Referenzrechnung kann gezeigt werden, dass die Simulationsergebnisse physikalisch plausibel sind, die Entstehung von Fließblasen und der so genannte Kanteneffekt können auf diese Weise visualisiert werden. Die Parameter, welche beim Flip Chip-Underfilling die Entstehung von Fließblasen beeinflussen, können in Materialparameter, Geometrieparameter und Prozessparameter unterteilt werden. In der vorliegenden Untersuchung wird immer das gleiche Material verwendet, die Prozesstemperatur wird konstant gehalten und der Underfiller wird immer einmal entlang einer Chipkante appliziert. Nach der Eliminierung voneinander abhängiger Parameter verbleibt ein Satz von acht unabhängigen Geometrie- und Prozessgrößen für die Untersuchung der peripher kontaktierten Flip Chips. In einer Parameterstudie auf der Basis von CFD-Ergebnissen wird der Einfluss dieser Faktoren auf die Entstehung von Fließblasen untersucht. Als blasenfördernd erweisen sich ein tiefer Lötstopplackgraben, eine geringe Spalthöhe, ein großer Abstand der Bumps von der Chipkante sowie ein nahe der Chipecte liegender Startpunkt der Dosiernadelbewegung. Die Simulationsergebnisse werden durch experimentelle Ergebnisse bestätigt.

In einer nachfolgenden Untersuchung wird auf potentielle Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen eingegangen. Neben den schon bekannten Haupteinflussgrößen haben auch die Wechselwirkung zwischen Nadelstartpunkt und Spalthöhe sowie die Wechselwirkung zwischen Nadelstartpunkt und Abstand von Bump zu Chipkante einen signifikanten Einfluss auf die Entstehung von Fließblasen. Mit Hilfe der Simulation kann nachgewiesen werden, dass durch den Ersatz des durchgängigen Lötstopplackgrabens durch einzelne runde Lötstopplackaussparungen das Risiko des Blaseneinschlusses verringert werden kann. Schließlich wird auch für flächig kontaktierte Flip Chips der Einfluss verschiedener Geometrieconfigurationen auf die Blasenbildung untersucht. An Durchkontaktierungen oder Micro-Vias steigt das Risiko der Blasenentstehung mit abnehmender Spalthöhe und zunehmender Tiefe der mit Lötstopplack abgedeckten Durchkontaktierung. An den Lötstopplackaussparungen steigt das Risiko der Blasenentstehung mit abnehmender Spalthöhe und zunehmender Tiefe der Aussparung sowie bei zunehmender Breite der Lötstopplackaussparungen.

---

# Summary

Flip Chips are electronic components, in most cases semiconductor devices, which are, unlike wire-bonded chips, connected to the carrier with their active side facing down, hence flipped. Since they are mounted directly to the substrate by means of conductive bumps, they are often referred to by the common term Direct Chip Attach (DCA). The advantage of this flip chip technology over other packaging technologies lies in its higher interconnect density. This leads to smaller package sizes, higher electrical performance and higher connection speeds. Furthermore, since all flip chip assembly connections are created simultaneously the processing time is significantly reduced when compared with serial bonding techniques, particularly for complex packages.

In Flip Chip packaging the chips are most commonly connected to organic substrates by means of solder bumps. As a first step the solder paste is deposited onto the bond pads of the silicone wafer. The wafer is heated and the solder bumps are formed from the molten solder paste. The wafer is then cut into separate chips and these bumped chips are dipped into flux and placed on the substrate. After placement, the whole assembly is reflowed in a furnace to form the electrical and mechanical connections. Lastly, any remaining gap between chip and substrate is completely filled with a non-conductive encapsulant, the so-called underfill. This liquid underfill is dispensed along one or several edges of the chip and is drawn into the gap between chip and substrate by means of capillary action and cured afterwards. The principal task of the underfill is to reduce the high stresses induced on the solder bumps due to thermal expansion differences between the chip and organic substrate during thermal cycling. Therefore the underfill is crucial for the reliability of the package. Voids can occur during underfill flow due to trapped air, causing negative effects for the solder joint reliability.

In this thesis the formation of voids during underfill flow is investigated by means of numerical fluid flow simulation and experimental studies. Therefore numerical methods for modeling the underfill process and the underfill material flow behavior had to be developed. The aim of this work was to understand the mechanisms and to identify the parameters which influence void formation. Thus, in future applications the design of flip chip, substrate, and underfill process can be optimized with regard to underfill quality. In present applications these process parameters can also be optimized for existing package geometries.

---

First the underfill material used for the experimental and numerical investigations had to be characterized. The underfill system in question consists of a single-component anhydride curing epoxy matrix filled with a relatively low content of spherical silicone oxide filler particles. The viscosity of the liquid underfill was measured using a cone-plate rotational rheometer. The shear rate dependence of the viscosity was determined by means of the constant shear rate method. Whether the liquid underfill possesses a significant yield stress was checked using the constant shear stress method. The shear-rate dependent viscosity was described by a Carreau-Yasuda approximation, assuming a homogenous filler particle distribution in the epoxy matrix. The density of the liquid underfill was measured using an oscillating U-tube density meter. To describe the wetting behavior of the package the contact angle of the liquid underfill was measured on all relevant surface materials like silicone, solder and solder mask. The surface tension of liquid underfill was measured using the pending drop method.

In the next step a suitable simulation tool had to be selected based on two relevant test cases. First, the filling of a cavity through several inlets was examined; in the second test case the capillary flow in a narrow gap between parallel plates was investigated. Because of the multiple requirements the simulation software had to fulfill, the commercial software packages CFX 5.5.1 and Fluent 6.1 were preselected. In both test cases the Fluent results were more plausible than the CFX results, so for the following investigations Fluent was used.

Prior to the investigations with real flip chip packages some base analysis were carried out. The flow length versus flow time of the liquid underfill in a simple parallel plates test vehicle was investigated by simulation and experiment. These results were also compared to the solution of the analytical description of viscous flow between parallel plates driven by capillary action by Schwiebert/Leong. [ 1 ]. Experiments using bumped glass dies showed the development of filler particle structures under certain flow conditions. But as these structures appear only at very slow flow velocities and are broken up in accelerating flows this phenomenon is not relevant under flow conditions which lead to voids. Finally, the potential influence of the filler particles on the flow behavior was investigated. The influence of particle migration on the flow behavior as described by Zhang and Acrivos [ 2 ] can be implemented in the simulation by means of a user-defined function. For underfill systems with high filler content the numerical results using the particle migration model showed better agreement with the experimental results than those of simulation assuming a homogenous filler distribution. It can be shown that in the underfill system used in this work particle migration can be neglected because of relatively low filler particle content.

## Summary

---

In the next step investigations concerning the void formation in peripheral bumped flip chip packages were conducted. The basic flow behavior of the capillary underfill in peripheral bumped flip chips was visualized through a reference simulation. The numerical results are plausible, void formation and the so-called edge effect can be visualized.

The parameters which possibly influence the void formation in flip chip underfilling can be classified in material, geometry, and process parameters. In the present work the same underfill material was used with the process temperature being held constant and the underfiller is dispensed only once along a single chip edge. After eliminating interconnecting parameters a set of eight independent geometry and process parameters remained for the investigation of peripheral bumped flip chips. In a parametric study the influence of these factors on the formation of voids during underfill flow was investigated by means of numerical simulations. Factors that promoted the formation of voids were a thick solder mask, low stand-off height, large distance between bumps on the chip edge, and the starting point of the dispensing needle movement being situated close to the corner of the chip. The simulations are confirmed by the experimental results.

In a subsequent parametric study potentially occurring interactions between influencing variables were examined. Besides the known main influencing factors the interaction of the starting point of the dispensing needle and the chip stand-off as well as the interaction of the starting point of the dispensing needle and the distance between bumps and chip edge had a significant effect on the void formation. Via simulation it can be demonstrated that by replacing the continuous solder mask trench by separate round solder mask openings around each bump the risk of void formation can be reduced.

Finally, the influence of geometry parameters on void formation in area array flip chip packages was investigated. The risk of void formation at throughplatings increases with decreasing stand-off and increasing throughplating depth. At solder mask openings the risk of void formation increases with decreasing stand-off and increasing depth as well as increasing width of the solder mask opening.

---

# 1 Einleitung

Die technologische und wirtschaftliche Bedeutung der Mikroelektronik nimmt ständig zu. Der VDE prognostizierte im Jahr 2003, dass der Weltmarkt für Mikroelektronik von 150 Mrd. US-Dollar im Jahr 2002 innerhalb von zehn Jahren auf 500 Mrd. US-Dollar ansteigen werde [ 3 ]. Gründe dafür sind der zunehmende Einsatz mikroelektronischer Komponenten in Konsumgütern und der immer weiter steigende Anteil der Elektronik im Automobilbereich [ 4 ]. Damit einher geht der anhaltende Trend zur Miniaturisierung [ 5 ] sowie die zunehmende Komplexität elektronischer Aufbauten, die eine immer größer werdende Anzahl der Anbindungen (I/O's) erforderlich macht [ 6 ]. Daraus resultiert die wachsende Bedeutung der Flip Chip Technologie [ 7 ].

Die Bezeichnung *Flip Chip* ist nach Lau [ 8 ] ein Überbegriff für alle Bauteile, die mit der aktiven Seite nach unten auf das Substrat montiert werden. Diese Definition deckt sich allerdings nicht mit der gängigeren Betrachtungsweise, in der Flip Chips diejenigen elektronischen Komponenten sind, die mit der aktiven Seite nach unten über leitfähige Höcker, so genannte Bumps, mit einem Substrat verbunden sind (z.B. [ 9 ]). In dieser Arbeit soll der Begriff Flip Chip ebenfalls auf über Lotbumps kontaktierte elektronische Bauteile beschränkt verwendet werden.

Die Flip Chip-Technologie bietet gegenüber älteren Techniken wie dem *Drahtkontaktieren* (dabei wird der Chip über Drähte statt über Lotkugeln mit dem Substrat verbunden) Vorteile im Hinblick auf Design, Prozess und Kosten: Flip Chip-Aufbauten sind deutlich kleiner und kompakter, zum einen, weil das Bauteil weniger peripheren Platz benötigt als bei drahtkontaktierten Chips [ 10 ], zum anderen lässt sich eine höhere Anbindungsichte realisieren, weil flächig statt nur peripher kontaktiert werden kann [ 9 ]. Das Flip Chip Konzept ermöglicht eine bessere Wärmeabfuhr, weil externe Wärmesenken, die beispielsweise in Form von Wärmeleitblechen realisiert werden, direkt über dem Flip Chip angebracht werden können [ 11 ]. Schließlich bietet das Flip Chip Konzept eine bessere elektrische Performance, da die Verbindung zwischen Leiterplatte und Substrat über Bumps statt z.B. Draht beim Drahtkontaktieren zustande kommt. Die kürzeren Verbindungen bringen einen geringeren inneren Widerstand sowie besseres Signalverhalten im Bereich hoher Frequenzen [ 12 ].

Der Hauptvorteil im Hinblick auf den Prozess liegt in den geringeren Taktzeiten: Alle Lotverbindungen können gleichzeitig gearbeitet werden, im Gegensatz zum Drahtkontaktieren, wo sequentiell Verbindung nach Verbindung hergestellt wird.



## 1 Einleitung

---

Dieser Vorteil wird umso signifikanter, je größer die Zahl der Verbindungen ist [ 11 ]. Es werden insgesamt weniger Prozessschritte benötigt [ 9 ]. Daher führt vor allem bei vielen Anschlüssen der schnellere Prozess bei der Verbindungsherstellung zu einer Reduktion der Prozesskosten. Bei komplexeren Bauteilen kann die Größe des Chips durch die höhere realisierbare Anbindungsichte reduziert werden, wodurch die Materialkosten verringert werden [ 12 ].

Der Einsatz von Flip Chip Technologien erfolgt entweder als *Flip Chip in Package* (FCIP) oder als *Flip Chip on Board* (FCOB) bzw. *Direct Chip Attach* (DCA) [ 8 ]. Beim FCIP wird der Flip Chip auf ein eigenes Trägermedium aufgelötet, welches dann z.B. in *Ball Grid Array* (BGA) oder *Chip Scale Package*<sup>1</sup> -Komponenten (CSP) eingesetzt wird. Im Gegensatz dazu wird bei FCOB-Anwendungen der Flip Chip direkt auf das Substrat gelötet.

Der erste Flip Chip wurde 1957 in den Bell Laboratories entwickelt und unter der Bezeichnung *leaded device* bekannt. IBM entwickelte 1964 einen Flip Chip-Prozess unter Verwendung von Kupferbumps und hochbleihaltigen Loten. Wegen der hohen Schmelztemperatur dieser Lote ( $>350^{\circ}\text{C}$ ) war dieses Verfahren jedoch für den Einsatz bei organischen Leiterplattensubstraten ungeeignet. In den späten 60er Jahren erfolgte dann der Übergang zu Lotbumps aus eutektischen Loten, die im Verbindungsprozess wieder vollständig aufschmelzen. Dieser Prozess wurde als *Controlled Collapse Chip Connection* (C4) bekannt [ 13 ]. Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung des Flip Chip-Prozesses wurde 1987 von Hitachi mit der Einführung organischer Substrate in der Flip Chip-Technologie erreicht [ 9 ]. Bis dahin konnten Flip Chips nur auf Silizium- oder Keramik-Substraten verwendet werden, die relativ teuer und daher für Massenprodukte unattraktiv sind. Die preiswerteren organischen Substrate unterscheiden sich in ihrem Wärmeausdehnungskoeffizient stark vom Silizium des Flip Chips, was bei thermischer Belastung zu Schädigungen der elektrischen Kontaktierungen führen kann [ 14 ]. Das Problem der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten ist bei direkt kontaktierten Bauteilen besonders groß, da der Abstand zwischen Bauteil und Substrat sehr klein und die Verbindung im Vergleich zu beispielsweise Drahtkontaktierungen relativ starr ist.

Die Einführung des Underfill-Prozesses hat es möglich gemacht, Flip Chips auch in Verbindung mit organischen Substraten einzusetzen (z.B. [ 11 ]). Der Underfiller füllt den Spalt zwischen Flip Chip und Substrat aus und fängt im Belastungsfall innere Spannungen auf. Der Underfiller ist somit ein Mittel zur

---

<sup>1</sup> Definition CSP: die Fläche des Packages ist kleiner als 1,2x die Fläche des Flip Chips

Zuverlässigkeitssteigerung. Um hohe Zuverlässigkeiten zu erreichen, muss der Chip blasenfrei unterfüllt sein, was eine gute Beherrschung des Prozesses voraussetzt.

In dieser Arbeit soll die Entstehung von Fließblasen beim Unterfüllen von Flip Chips mit Hilfe von Strömungssimulationen untersucht werden. Hierfür müssen Simulationsmethoden entwickelt werden, die den Underfill-Prozess und das Fließverhalten des Underfillers realitätsnah abbilden. Mit Hilfe dieser Methoden sollen die Mechanismen, die zur Bildung von Fließblasen führen, verstanden und die Parameter identifiziert werden, die eine Entstehung von Fließblasen begünstigen. Anhand dieser Erkenntnisse soll es möglich sein, in künftigen Anwendungen das Design von Flip Chip und Substrat sowie die Prozessführung optimal im Hinblick auf die Qualität der Unterfüllung zu gestalten. In schon bestehenden Anwendungen können mit Hilfe der Simulationstechnik die Prozessparameter des Underfill-Prozesses für die gegebene Geometrie optimiert werden.

## 2 Flip Chip und Underfilling

In diesem Kapitel wird der prinzipielle Aufbau eines Flip Chips sowie das Verfahren zur Kontaktierung von Flip Chips auf Substraten beschrieben. Die Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Flip Chip-Aufbauten sind in vielen Anwendungen sehr hoch und können oft nur durch den Einsatz von Underfillern erfüllt werden, sofern die Unterfüllung blasenfrei erfolgt. Der Standard-Underfill-Prozess sowie die erforderlichen Eigenschaften des Underfillers im flüssigen wie im ausgehärteten Zustand werden vorgestellt. Schließlich wird die Entstehung von Fließblasen sowie deren Relevanz für die Zuverlässigkeit des Verbundes diskutiert.

### 2.1 Der Flip Chip-Prozess

Abbildung 2-1 zeigt die aktive Seite eines Flip Chips. Die Basis für die Herstellung eines solchen Chips oder ICs (*Integrated Circuit*) ist eine dünne Scheibe eines Silizium-Einkristalls, ein so genannter Wafer. Der Wafer wird strukturiert, d.h. durch unterschiedliche Dotier-, Abtrag- und Metallisierungsprozesse werden Schaltkreise aus Bauteilen wie Transistoren, Widerstände oder Kondensatoren und verbindenden Leiterzügen erzeugt. In der Regel wird auf einem Wafer eine Vielzahl gleicher oder unterschiedlicher Schaltungsgruppen realisiert, die anschließend in Chips vereinzelt werden.

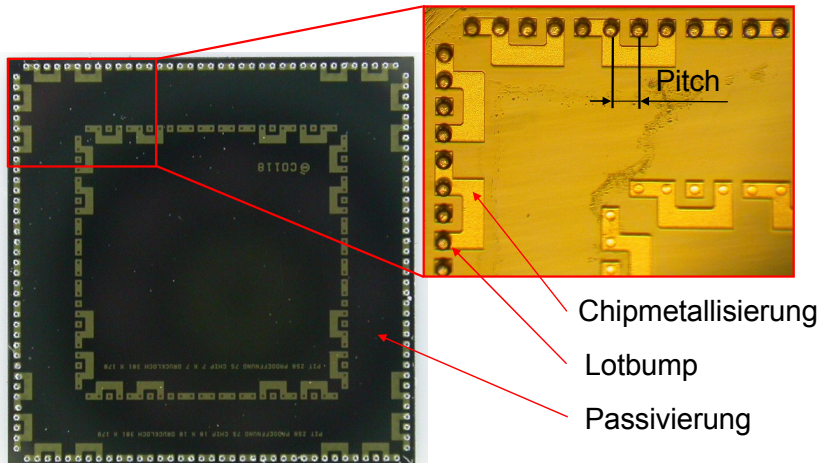
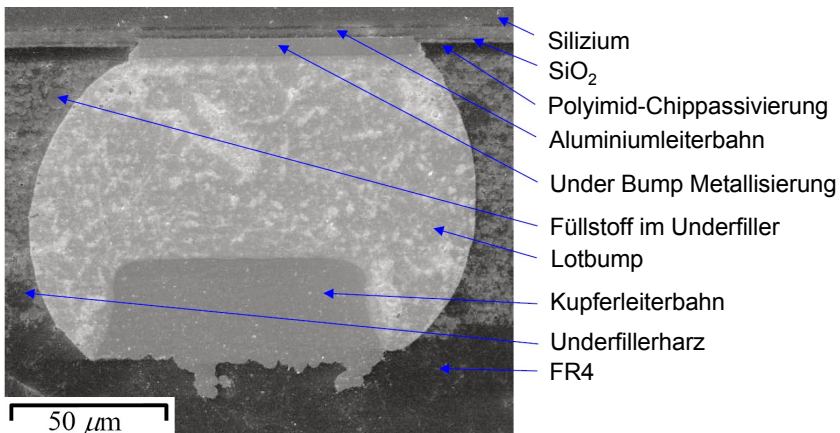


Abbildung 2-1: Flip Chip, Gesamt- und Nahaufnahme einer Ecke

Damit ein solcher IC als gelöteter Flip Chip eingesetzt werden kann, müssen allerdings vor dem Vereinzeln weitere Prozessschritte durchgeführt werden. Die elektrische Anbindung an das Substrat erfolgt über die *Anschlussmetallisierungen* des Chips, die so genannten *Bondpads*, welche in der Regel eine äußere Schicht aus Aluminium besitzen. Aluminium bildet an der Luft sofort eine elektrisch isolierende Aluminiumoxidschicht aus. Um mit leitfähigen Bumps eine elektrische Verbindung zum IC zu erzeugen, muss das nicht lötbare Aluminiumoxid durch eine geeignete Oberfläche ersetzt werden, die so genannte *Under Bump Metallisierung* (UBM).

Aufgrund der vielfältigen Anforderungen wie gute Leitfähigkeit, Funktion als Diffusionsbarriere und gute Lötbarkeit besteht die UBM in der Regel aus mehreren Schichten. Die äußerste Schicht, auf der gelötet wird, besteht im Allgemeinen aus Nickel oder Gold. Die einzelnen Schichten werden aufgedampft oder gesputtert [ 7 ]. Die gesamte aktive Fläche des Flip Chips mit Ausnahme der Bondpads wird mit einer Passivierungsschicht überzogen. Die Passivierung (siehe Abbildung 2-1 und Abbildung 2-2) besteht meist aus Polyimid oder Glas und dient dazu, die feinen Metallisierungsstrukturen vor chemischer oder mechanischer Schädigung zu schützen und die auf den Chip übertragenen mechanischen Spannungen zu dämpfen [ 15 ].

Zur Verdeutlichung des Aufbaus einer Flip Chip-Verbindung zeigt Abbildung 2-2 den Schnitt durch einen Lotbump.



**Abbildung 2-2:** Schnitt durch einen Lotbump (REM-Aufnahme) [ 16 ]

## 2 Flip Chip und Underfilling

---

Bei dem hier vorgestellten konventionellen Flip Chip-Prozess erfolgt die Herstellung der Lotbumps in der Regel mittels eines Schablonendruckverfahrens von Lotpaste auf den Wafer. Lotpaste besteht aus einem Pulver einer Weichlotlegierung, die fein dispergiert in Flussmittel vorliegt. In den letzten Jahren wurden hauptsächlich eutektische SnPb-Lote verwendet. Seit 2006 wird nach EU-Recht der Einsatz von bleihaltigen Loten eingeschränkt, weshalb in zunehmendem Maße auch bleifreie Lote (z.B. SnAg-Legierungen) eingesetzt werden [ 17 ].

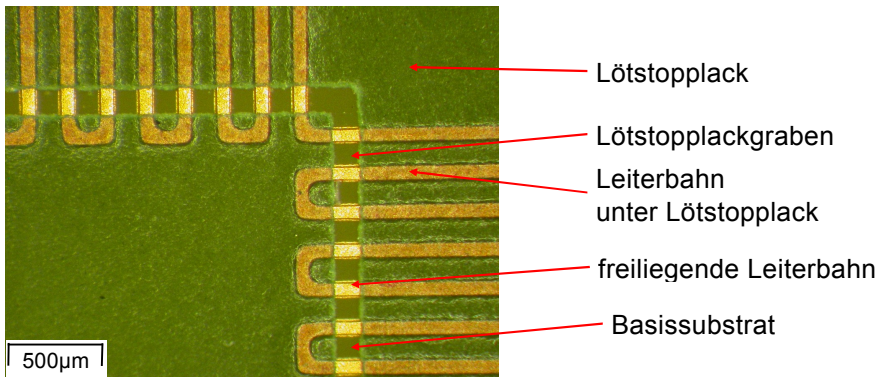
Die Aufgabe des Flussmittels besteht darin, die beteiligten Kontaktflächen auf den Lötprozess vorzubereiten. Dabei werden Metalloxide und andere Verunreinigungen an den zu lötenden Oberflächen und dem Lot selbst entfernt [ 18 ]. Die beteiligten Metalloberflächen müssen vom Flussmittel so lange sauber gehalten werden, bis der Lötvorgang abgeschlossen ist. Aus den gedruckten Lotpastendepots werden in einem Lötprozess die Bumps erzeugt. Beim Löten wird eine intermetallische Verbindung zwischen den Metallpads am Chip und dem Lot hergestellt. Diese Verbindung geschieht exotherm, die zugeführte Energie wird nur zum Aufschmelzen des Lotes benötigt [ 19 ]. Das Umschmelzen und Löten erfolgt im so genannten *Reflow-Prozess* in einem Konvektionsofen mit mehreren Heizzonen, die nacheinander durchfahren werden. Das flüssige Lot benetzt die Pads und formt sich aufgrund seiner Oberflächenspannung zu Kugeln. Die flüchtigen Bestandteile des Flussmittels verdampfen, an den Bumps können Rückstände zurückbleiben. Die realisierbare Bumpgröße hängt einerseits von den verwendeten Materialien – z.B. dem Anteil flüchtiger Komponenten in der Lotpaste – andererseits von der Fläche der zu benetzenden Pads und dem *Pitch* ab. Als Pitch wird der Abstand zwischen zwei Bumps bezeichnet. Er ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Die mit Bumps versehenen Chips werden anschließend durch Sägen vereinzelt.

In dieser Arbeit wird unterschieden zwischen peripher kontaktierten Flip Chips, bei denen die Bumps nur einreihig parallel zu den Chipkanten angeordnet sind, und zwischen flächig kontaktierten Flip Chips, bei denen die Kontakte über die ganze aktive Fläche verteilt sind. Diese flächig kontaktierten Flip Chips werden oft auch als *Area Array* Flip Chip bezeichnet.

Leiterplatten bestehen meist aus organischen, faserverstärkten Materialien. Das Standardmaterial für viele Anwendungen wird FR4 genannt und ist ein schwer entflammbares, glasgewebeverstärktes Epoxidharz mit einer Glasübergangstemperatur  $T_g$  von etwa 130-135°C. Sondermaterialien unterscheiden sich vom Standardmaterial funktional durch eine höhere Glasübergangstemperatur und können je nach Einsatzgebiet aus einem anderen Basispolymer bestehen. Das in

dieser Arbeit verwendete Hoch-T<sub>g</sub>-FR4 wird oft in Anlehnung an die Bezeichnung des Standardmaterials vereinfacht FR5 genannt (z.B. [ 20 ]).

Die elektrische Anbindung des Flip Chips erfolgt über so genannte *Leiterbahnen*, dargestellt in Abbildung 2-2 und Abbildung 2-3. Diese werden aus einer geschlossenen Kupferfläche herausgeätzt, oder es wird Kupfer galvanisch auf dem aktivierten Trägermaterial abgeschieden. Abhängig von der Komplexität der zu realisierenden Schaltung können Leiterplatten ein- oder mehrlagig aufgebaut sein. Bei mehrlagigen Leiterplatten werden die Verbindungen zwischen den verschiedenen Leiterbahn-Lagen über so genannte *Vias* („*Vertical Interconnect Access*“) oder *Durchkontaktierungen* hergestellt. Dafür werden an den zu verbindenden Stellen Löcher gebohrt, deren Wände chemisch aktiviert und stromlos verkupfert [ 21 ].



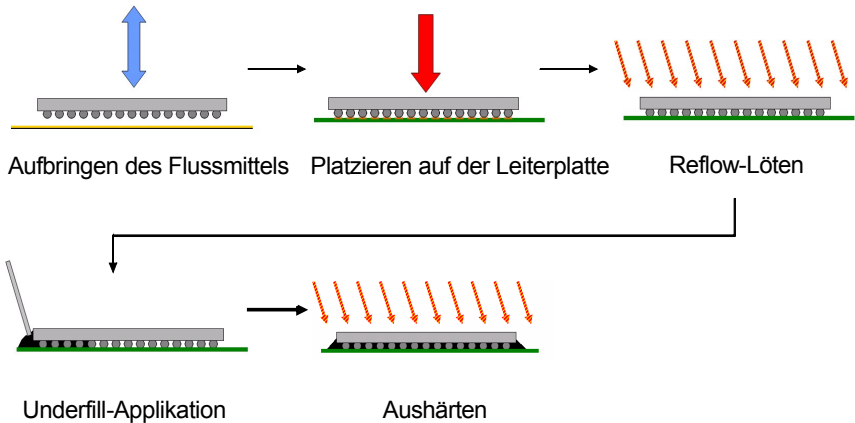
**Abbildung 2-3:** Leiterplatte (Ausschnitt)

Nach der Fertigstellung der Kupferstrukturen wird auf der Oberfläche der Leiterplatte die *Lötstopmmaske*, oft auch als *Lötstopplack* (LSL) bezeichnet, aufgebracht (siehe Abbildung 2-3). Dabei handelt es sich um einen temperaturbeständigen strukturierten Überzug [ 21 ]. Verwendet werden in der Regel fotostrukturierbare Lacke als Filmüberzug oder im Gießverfahren oder Folien, die auf laminiert werden. Die Lötstopmmaske dient dazu, die Leiterbahnen auf den Substraten zu schützen. Die Lötstopmmaske wird nicht vom Lot benetzt. Bei Leiterplatten werden daher die Bereiche, auf denen gelötet werden soll, durch Aussparungen in der Lötstopmmaske definiert, wodurch Kurzschlüsse und Lotbrücken vermieden werden. Bei peripher kontaktierten Flip Chips werden diese Aussparungen meist, wie in Abbildung 2-3 zu sehen, in Form eines durchgängigen Lötstopplackgrabens (LSL-Graben) realisiert, der die Leiter-

## 2 Flip Chip und Underfilling

bahnen an den zu kontaktierenden Stellen kreuzt und somit die lötbaren Bereiche auf den Leiterbahnen definiert. Die Lage der lötbaren Strukturen auf der Leiterplatte entspricht genau der Anordnung der Bumps auf dem Chip. Bei flächig kontaktierten Flip Chips werden die Lötstopplackaussparungen meist kreisförmig an der jeweiligen Lötstelle realisiert.

Schließlich beginnt der eigentliche Flip Chip-Prozess, der in Abbildung 2-4 schematisch dargestellt ist.



**Abbildung 2-4:** Prinzipieller Ablauf des Flip Chip-Prozesses

Der Flip Chip wird mit einem Bestückwerkzeug an der Chipoberseite gefasst und mit den Bumps voran in eine dünne Schicht aus Flussmittel getaucht, welches die Lotbumps benetzt. Wie schon in der Lotpaste hat das Flussmittel die Aufgabe, die beteiligten Metalloberflächen von Verunreinigungen zu befreien, um eine optimale Lötbarkeit zu gewährleisten. Außerdem dient das Flussmittel dazu, den Flip Chip vor dem Löten auf den Pads zu fixieren, d.h. das Flussmittel sollte eine gewisse Klebrigkeit mit sich bringen [ 19 ]. Anschließend wird der Flip Chip auf der Leiterplatte platziert. Das Löten der Chips auf der Leiterplatte erfolgt wieder in einem Reflow-Prozess. Aufgrund der Grenzflächenspannung des flüssigen Lotes werden die Chips auf den Pads in Position gezogen, wodurch kleinere Fehler in der Platzierung ausgeglichen werden [ 22 ]. Dieses so genannte *Self-Alignment* der Flip Chips auf den Pads macht den Prozess vor allem bei Verwendung von eutektischen Loten robuster. Der fertige Verbund von Flip Chip und Leiterplatte wird im Allgemeinen als *Package* bezeichnet. Nach dem Löten kann ein erneuter Reinigungsprozess erfolgen, um die Flussmittelrückstände (FMR) im Chipspalt zu entfernen.

Da der Underfill-Prozess das eigentliche Thema dieser Arbeit ist, wird auf diesen Prozessschritt gesondert in Abschnitt 2.3 eingegangen. Der abschließende Prozessschritt besteht im Aushärten des Underfillers im fertig unterfüllten Flip Chip.

Neben der oben beschriebenen Prozessvariante gibt es weitere Möglichkeiten, Flip Chips auf Leiterplatten zu kontaktieren. Statt der wieder aufschmelzenden Lotbumps können die Flip Chips beispielsweise mit *Gold Stud Bumps* versehen werden. Bei dieser Methode werden die Flip Chips entweder mit isotrop oder anisotrop leitfähigen Klebstoffen auf dem Substrat fixiert. Hochbleihaltige Lotbumps, wie sie früher oft verwendet wurden, können wegen der hohen Schmelztemperatur des Lotes von ca. 350°C nur dann auf organischen Substraten verwendet werden, wenn für die Verbindung zusätzlich eutektisches Lot verwendet wird, das beim Löten aufschmilzt, während der Bump selbst fest bleibt. Bei der Verbindung über elektrisch leitfähige Klebstoffe kann die Verbindung zwischen Flip Chip und Substrat über anisotrop leitfähige Klebstoffe ohne Bumps geschehen, oder der Chip wird mit Bumps aus leitfähigem Klebstoff versehen, die ausgehärtet werden, bevor der Chip wiederum mit leitfähigem Klebstoff auf dem Substrat fixiert wird [ 11 ].

## 2.2 Zuverlässigkeit von Flip Chip-Verbindungen

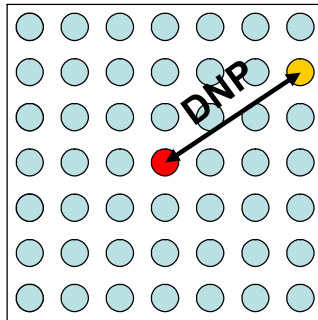
Ein Bauteil wird als zuverlässig bezeichnet, wenn es mindestens eine vorgegebene Zeit bei für die Anwendung typischen Belastungen ohne Funktionsverlust übersteht. Bei Kraftfahrzeugen liegen die erforderlichen Lebensdauern typischerweise bei 5000 bis 20000 Stunden [ 23 ]. Speziell im Automobilsektor ist der Anspruch an die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen sehr hoch, da es sich in vielen Fällen um sicherheitsrelevante Komponenten handelt, deren Ausfall im Betrieb unter Umständen fatale Folgen für die Fahrzeuginsassen haben kann. Komponenten, die im Motorraum verbaut werden, müssen Temperaturbelastungen von bis zu -40°C im Winter im Ruhezustand bis im Extremfall über 200°C in unmittelbarer Nähe des Motorblocks ertragen können [ 24 ]. Dazu kommen unter Umständen hohe Feuchtegehalte in der Luft sowie mechanische Belastungen wie Stöße oder Vibrationen.

Eine Größe, die im Zusammenhang mit Zuverlässigkeitsbetrachtungen von Flip Chip-Aufbauten oft genannt wird, ist der Abstand eines Lotbumps zum so genannten *neutralen Punkt* des Chips, kurz DNP (*Distance to Neutral Point*). Betrachtet wird dabei die Bumpenebene: Der neutrale Punkt ist der Punkt, der sich bei thermischer Belastung nicht in der Bumpenebene bewegt. Üblicherweise liegt



## 2 Flip Chip und Underfilling

der neutrale Punkt im geometrischen Mittelpunkt der betrachteten Ebene (siehe Abbildung 2-5) [ 15 ].



**Abbildung 2-5:** Definition: “Distance to Neutral Point” DNP

Der maximale DNP eines Chips ist somit näherungsweise proportional zur Chipgröße. Je größer der DNP ist, umso größer ist auch die durch die Wärmeausdehnung entstehende Spannung im Bump und umso gefährdeter ist der Bump, zu versagen [ 25 ]. Auf organischen Substraten sind wegen der großen Unterschiede der Wärmeausdehnungskoeffizienten zwischen Substrat und Chip zuverlässige Flip Chip-Aufbauten ohne Underfiller praktisch nicht möglich ([ 16 ], [ 26 ]).

Der positive Einfluss des Underfillers im Hinblick auf die Zuverlässigkeit des Verbunds von Flip Chip und Substrat ist unbestritten. In verschiedenen Untersuchungen konnte bestätigt werden, dass der Einsatz von Underfillern bei Flip Chip-Aufbauten auf organischen Trägermaterialien die Lebensdauer z.B. in Temperaturwechseltests um mindestens den Faktor 10 erhöht ([ 27 ], [ 28 ]). Der Effekt von Fließblasen und anderen Imperfektionen im Underfiller auf die Zuverlässigkeit der Flip Chip-Aufbauten wird in Abschnitt 2.4.1 vorgestellt.

## 2.3 Underfilling

### 2.3.1 Aufgaben des Underfillers

Die Hauptaufgabe des Underfillers ist es, innere Spannungen im Verbund von Flip Chip und organischem Substrat aufzufangen, die aufgrund der großen Unterschiede bei den Wärmeausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien bei Temperaturbelastung auftreten können. In Tabelle 2-1 sind die Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener für Flip Chip-Aufbauten relevanter Materialien aufgeführt:

**Tabelle 2-1:** Wärmeausdehnungskoeffizienten verschiedener am Flip Chip-Prozess beteiligter Materialien bei 25°C [ 15 ], [ 29 ]

Silizium	2,5 ppm/K
Keramik	4-10 ppm/K
FR4	16-24 ppm/K
FR5	30 ppm/K
Lot	24-29 ppm/K
reine Epoxide	> 80 ppm/K
Siliziumoxid	0,5 ppm/K

Neben dem Auffangen innerer Spannungen und dem Umverteilen der ursprünglich lokal an den Bumps auftretenden inneren Spannungen über die ganze Chipfläche erfüllt der Underfiller weitere Aufgaben im Verbund [ 30 ]: Durch „Umklammern“ der Bumps wird Lotextrusion oder Kriechen vermieden. An der Lot / Substrat-Grenzfläche wird die Initiierung von Rissen verhindert. Außerdem dient der Underfiller als Schmutz- und Feuchtebarriere [ 31 ].

### 2.3.2 Anforderungen an das Underfill-Material

Im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung des Underfillers ergeben sich folgende Anforderungen: Der Stoff sollte einen möglichst geringen Ionengehalt und eine niedrige Dielektrizitätskonstante besitzen [ 9 ]. Der Underfiller sollte chemisch mit Flussmitteln bzw. Flussmittelrückständen verträglich sein [ 32 ].

Die Hauptanforderung an den ausgehärteten Underfiller ist ein an das Lot angepasster Wärmeausdehnungskoeffizient und ein hoher E-Modul [ 33 ]. Für die Glasübergangstemperatur  $T_g$  wird im Allgemeinen gefordert, dass sie oberhalb der erwarteten Maximaltemperatur in der Verbindung liegt, da der Wärmeausdehnungskoeffizient unterhalb von  $T_g$  deutlich kleiner ist als oberhalb [ 34 ]. Es existiert aber auch eine gegenläufige Aussage: Eine niedrige Glasübergangstemperatur ist günstiger, weil dann für hohe Temperaturen der E-Modul des Underfillers sinkt und somit die gesamten Spannungen in Underfiller für hohe Temperaturen nicht höher werden; außerdem sind die eingefrorenen Spannungen nach dem Aushärten bei niedrigem  $T_g$  kleiner als bei hohem  $T_g$  [ 28 ]. Allerdings lässt damit auch die Gesamtwirkung des Underfillers im Hinblick auf die Ableitung der Spannungsspitzen an den Lotbumps nach. Weitere Anforderungen an den ausgehärteten Underfiller sind eine gute Haftung auf Chip und Substrat sowie eine geringe Neigung zur Feuchteaufnahme [ 29 ].

Im Hinblick auf die Verarbeitbarkeit muss der Underfiller gute Fließ-eigenschaften besitzen. Die Viskosität sollte bei Verarbeitungstemperatur relativ

## 2 Flip Chip und Underfilling

---

niedrig liegen und eine geringe Temperaturabhängigkeit aufweisen [ 34 ]. Die Härtedauer des Stoffes sollte möglichst gering, die *Topfzeit*, also die Zeit, in der der Stoff im Prozess verarbeitet werden kann, dagegen möglichst lang sein [ 29 ]. Um im Endzustand homogene Eigenschaften gewährleisten zu können, darf keine Sedimentation des Füllstoffes stattfinden [ 35 ], [ 36 ].

### 2.3.3 Übliche Zusammensetzung von Underfillern

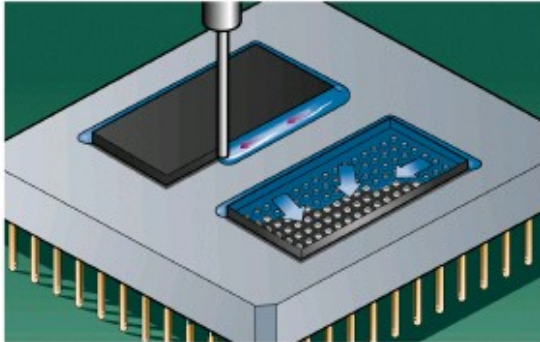
Als Basis werden meist Harze, beispielsweise Epoxid- oder Polyesterharze, verwendet. Sie dienen als Matrix und müssen ein gutes Adhäsionsverhalten auf allen beteiligten Oberflächen wie Chip-Passivierung, Lötstopplack und Lot aufweisen. Füllstoffe wie  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaCO}_3$  dienen der Steigerung des E-Moduls, erhöhen dabei aber auch die Viskosität des Underfillers. Dem entgegen wirken Lösungsmittel und Weichmacher, z.B. Butyl-Glycidyl Ether, Polysulfide, die zum einen die Viskosität wieder absenken, zum anderen die Haftung sowie die elektrischen Eigenschaften verbessern sollen. Die zugesetzten Härter, im allgemeinen Säureanhydrid, Amine oder Peroxide, beeinflussen den Gelpunkt und die Reaktionskinetik des Underfillers. Mittels eines Härtungsverzögerers – z.B. Dicyandiamid – wird die Topfzeit des Underfillers erhöht [ 29 ].

Die Vorteile der Underfiller auf Epoxidharzbasis liegen in ihrer chemischen Beständigkeit bzw. Korrosionsbeständigkeit sowie ihren guten elektrischen und mechanischen Eigenschaften. Sie zeigen eine sehr gute Haftung, eine gute Fließfähigkeit und sind relativ preiswert. Aufgrund des hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten des reinen Harzes sind Underfiller auf Basis von Epoxidharzen meist sehr hoch mit  $\text{SiO}_2$ -Partikeln gefüllt, woraus auch ihr geringer Härteschumpf resultiert [ 9 ].

### 2.3.4 Standard-Underfill-Prozess

Der Underfiller wird durch eine Dosiernadel in einer oder mehreren Linien an einer oder mehreren Kanten des Flip Chips entlang appliziert. Dabei muss der Underfiller in Kontakt mit der Chipkante treten. Aufgrund der Kapillarwirkung fließt der Underfiller in den Chipspalt (siehe Abbildung 2-6).

Um die Prozesszeit so gering wie möglich zu halten, sollte der Underfiller möglichst niederviskos sein. Da die Viskosität von Fluiden mit steigender Temperatur abnimmt, werden meist sowohl das Leiterplattensubstrat als auch der Underfiller selbst temperiert [ 37 ]. Allerdings darf die Temperatur auch nicht so hoch gewählt werden, dass bereits während der Spaltfüllung der Aushärteprozess einsetzt. Zur Underfiller-Dosierung werden in der Regel Zeit-Druck- oder Schneckendosiersysteme verwendet.



**Abbildung 2-6:** Underfill-Prozess [ 38 ]

Ist der Spalt vollständig gefüllt, bildet sich aufgrund der Oberflächenspannung des Underfillers an den Chipkanten ein Meniskus aus. Optional wird, wenn der Chip vollständig unterfüllt ist, eine umlaufende Linie an allen vier Kanten appliziert. Dadurch entsteht ein gleichmäßiger Underfill-Meniskus, wie er für eine gleichförmige Spannungsverteilung notwendig ist. Nach vollständiger Spaltfüllung wird der Underfiller in einem Ofenprozess ausgehärtet. Dabei bildet der Underfiller ein dreidimensionales Netzwerk aus, das fest mit Chip und Substrat verbunden ist. Abhängig vom Stoffsystem liegen typische Aushärtedauern im Bereich von 10 – 30 min bei einer Temperatur von 120 – 160°C.

### 2.4 Fließblasen im Underfiller

Blasen können in verschiedenen Phasen des Underfill-Prozesses und aus verschiedenen Gründen entstehen [ 39 ]. Beispiele dafür sind:

- Fließblasen während des Füllvorgangs,
- Ausgasen flüchtiger Bestandteile aus dem Underfiller vor oder während des Aushärtens,
- Gasentwicklung bei der Reaktion des Underfillers mit anderen Stoffen im System (z.B. Flussmittelrückstände) vor oder während des Aushärtens,
- Austreten gelöster Feuchte aus dem Leiterplattensubstrat durch die erhöhte Temperatur beim Aushärten.

Durch die Auswahl geeigneter und aufeinander abgestimmter Materialien kann die Gasentwicklung im Underfiller vermieden werden, sorgfältiges Trocknen der Substrate vor dem Underfill-Prozess verhindert das Austreten von Feuchte während des Aushärtens. In dieser Arbeit liegt der Fokus daher auf der

Entstehung bzw. der Vermeidung von Fließblasen. Grundsätzlich können zwei verschiedene Typen von Fließblasen unterschieden werden: Zum einen gibt es kleine Blasen mit einem Durchmesser in der Größenordnung  $< 200\mu\text{m}$ , die in der unmittelbaren Nähe der Bumps entstehen und die im Folgenden als „mikroskopische Fließblasen“ bezeichnet werden. Zum anderen können Blasen in der freien Fläche unter den peripher kontaktierten Chips entstehen, die in der Regel viel größer sind als die mikroskopischen Fließblasen und daher als „makroskopische Fließblasen“ bezeichnet werden. Deren Durchmesser bewegt sich in der Größenordnung  $\geq 500\mu\text{m}$ .

### 2.4.1 Bewertung der Relevanz von Blasen im Underfiller

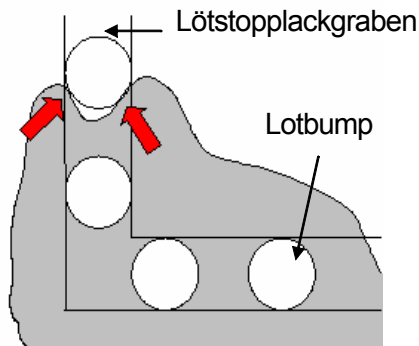
Mikroskopische Fließblasen sind relevant für die Zuverlässigkeit der elektrischen Kontakte und somit für die Funktion der Bauteile, sofern sie in direktem Kontakt zu einem Bump stehen. Von Lucero et al. [ 40 ] wurde das Fehlerbild der *Lot-extrusion* beschrieben, ein Effekt, der nur in Anwesenheit von Lufteinschlüssen in Bumpnähe auftreten kann. Bei Temperaturwechseln kommt es aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien zu einem „Ausquetschen“ des Lots aus den ursprünglichen Bumps in benachbarte kleine Lufteinschlüsse. Mit der Zeit können so Kurzschlüsse zwischen benachbarten Bumps oder offene Kontakte entstehen. Nach Schubert et al. [ 41 ] erwiesen sich Blasen im Underfiller neben Partikelsedimentationen und asymmetrischen Menisken als eine Haupteinflussgröße für die Abnahme der Zuverlässigkeit. Rzepka et al. [ 42 ] untersuchten den Einfluss von Imperfektionen im Underfiller auf die Zuverlässigkeit der Flip Chip-Verbindung anhand von Experimenten und FEM-Simulationen. Die größten Fehlerrisiken bestehen demnach bei Lufteinschlüssen im äußeren Bereich des Chips, wo der Abstand zum neutralen Punkt groß ist, sowie bei Flussmittelrückständen, die sowohl eine mechanische Schwächung sowie eine chemische Schädigung der beteiligten Materialien verursachen können.

Makroskopische Fließblasen können zwar um ein Vielfaches größer sein, sind aber, wenn sie nicht in unmittelbarer Nähe der Bumps auftreten, relativ unkritisch. Allerdings vermindern größere Blasen natürlich die Haftungsfläche des Underfillers, wodurch die Umverteilung der inneren Spannungen ebenfalls gestört wird. Daher sollten Blasen im Underfiller komplett vermieden werden.

## 2.4.2 Entstehungsmechanismen mikroskopischer Fließblasen

Grundsätzlich entstehen mikroskopische Fließblasen dadurch, dass zwei Teilfließfronten innerhalb einer kurzen Zeit einen Bump berühren und in ihrem Zwischenraum Luft einschließen.

Die meisten mikroskopischen Fließblasen entstehen an den Kanten senkrecht zur Chipkante, an der der Underfiller appliziert wird. Die Fließfront des Underfillers kann dabei als zweigeteilt betrachtet werden: Ein Teil des Underfillers fließt im Außenbereich des Spaltes zwischen der Chipkante und dem Lötstopplackgraben, der andere Teil fließt auf der anderen Seite des Lötstopplackgrabens im inneren Bereich des Chips. An den Kanten senkrecht zur Dosierkante bewegen sich diese Teilfließfronten näherungsweise parallel auf die Bumps zu. Der Lötstopplackgraben zwischen den beiden Teilfließfronten stellt ein zusätzlich zu befüllendes Volumen dar, die Befüllung der Bereiche zwischen den Bumps muss von den Seiten her geschehen. Folglich verlangsamt sich die Fließgeschwindigkeit aufgrund des Einflusses des Lötstopplackgrabens.



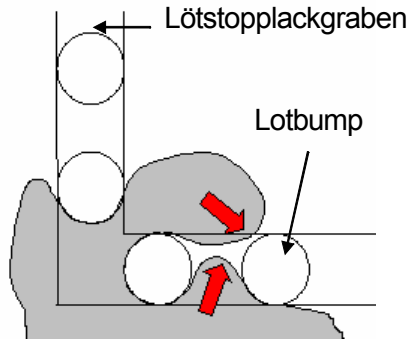
**Abbildung 2-7:** Entstehung mikroskopischer Fließblasen, Variante A. Der Lufteneinschluss entsteht im Lötstopplackgraben senkrecht zur Dosierkante

Die Fließfronten berühren den Bump auf beiden Seiten des Lötstopplackgrabens in etwa zeitgleich. Geschieht dies, bevor der Abschnitt des Lötstopplackgrabens vor dem Bump vollständig mit Underfiller gefüllt wurde, bleibt ein Lufteneinschluss zurück. Dieser Vorgang ist in Abbildung 2-7 schematisch dargestellt.

Eine Abwandlung dieses Mechanismus zeigt Abbildung 2-8. In diesem Fall wird eine Lücke zwischen den Bumps an der Dosierkante vollständig vom Underfiller aufgefüllt. Der Underfiller breitet sich im inneren Bereich des Spaltes tendenziell

## 2 Flip Chip und Underfilling

radial aus. Die benachbarte Bumplücke wird von beiden Seiten her mit Underfiller angeströmt. Erreichen beide Fließfronten den nächsten Bump, ohne sich vorher vollständig vereinigt zu haben, bleibt ein Lufteinschluss zurück.



**Abbildung 2-8:** Entstehung mikroskopischer Fließblasen, Variante B. Der Lufteinschluss entsteht im Lötstopplackgraben an der Dosierkante

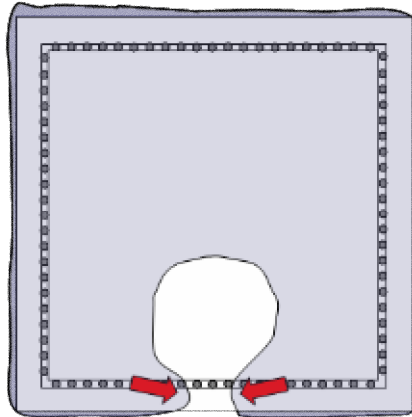
Lufteneinschlüsse nach Mechanismus A können immer, d.h. auch bei quasi idealen Verhältnissen entstehen. Mechanismus B tritt in erster Linie bei unterschiedlichen Fließwiderständen benachbarter Bumplücken auf, wie sie z.B. durch unterschiedliche Bumpabstände oder durch eine ungleichmäßige Verteilung von Flussmittelrückständen verursacht wird.

### 2.4.3 Entstehungsmechanismen makroskopischer Fließblasen

Auch für die Entstehung der makroskopischen Fließblasen sind zwei alternative Entstehungsmechanismen denkbar. Der Underfiller fließt im Außenbereich des Chips schneller als im Innern. Wenn die beiden Fließfronten an der Kante gegenüber der Dosierkante zusammentreffen, bevor die Kante von der Bulkphase erreicht wird, wird ein Luftpolster eingeschlossen. Der erste Mechanismus ist in Abbildung 2-9 dargestellt. Die Hauptursache für dieses Voraneilen der Fließfront im Außenbereich ist der so genannte *Kanteneffekt* oder *racing effect*. Dieser wird in Abschnitt 7.2.5 anhand einer Referenzrechnung erklärt.

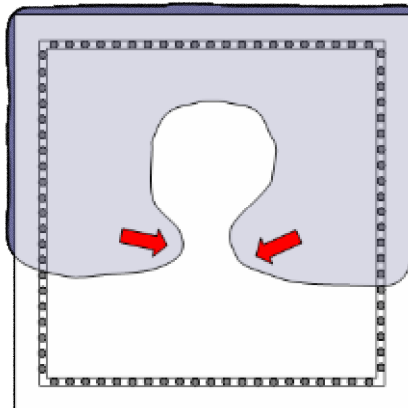
Abbildung 2-10 zeigt den anderen möglichen Mechanismus der makroskopischen Fließblasenbildung. In diesem Fall entstehen die Fließblasen nicht durch das lokale Voraneilen von Teilfließfronten, sondern durch das teilweise Abbremsen des Underfillers. Da das Fluid durch sein Bestreben zur Minimierung des Fließwiderstands eine Tendenz zur radialen Ausbreitung im Spalt zeigt, kann es auch

im Innern des Spaltes vorkommen, dass Luft durch Umfließen eingeschlossen wird.



**Abbildung 2-9:** Entstehung makroskopischer Fließblasen, Variante A

Ursachen für die Verlangsamung sind meistens Inhomogenitäten oder Imperfektionen in der Geometrie. Es kann beispielsweise beobachtet werden, dass die Fließfront durch eine innere auf der Chipunterseite aufgebraute Metallisierung abgebremst wird. Des Weiteren können auch Verunreinigungen am Chip oder am Substrat oder Oberflächenrauigkeiten zu einer Verzögerung des Fließvorgangs führen.



**Abbildung 2-10:** Entstehung makroskopischer Fließblasen, Variante B



---

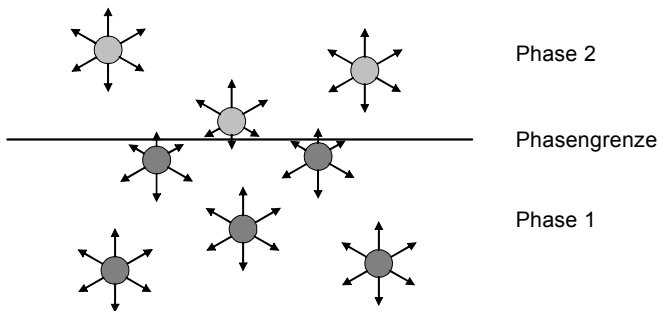
# 3 Physikalische und numerische Grundlagen der Underfill-Simulation

In diesem Kapitel wird die physikalische Grundlage des Underfill-Prozesses, die Grenzflächenspannung zwischen zwei Phasen, beschrieben. Es wird ein gängiges analytisches Modell zur Beschreibung des kapillaren Fließens in einem ebenen Spalt unendlicher Ausdehnung dargestellt und die Eignung dieses Modells für die Beschreibung des Underfill-Prozesses diskutiert. Schließlich werden noch die Grundlagen der Strömungssimulation und der numerischen Berechnung von Strömungen mit freien Oberflächen erklärt.

## 3.1 Grenzflächenspannung

Die Grenzflächenspannung ist eine Eigenschaft der Grenzfläche zwischen zwei Phasen. Die Grenzflächenspannung von Flüssigkeiten gegen eine Gasphase wird als Oberflächenspannung bezeichnet.

Eine Phasengrenzfläche ist grundsätzlich nur dann stabil, wenn die Grenzflächenspannung  $\sigma$  einen Wert  $\sigma > 0$  besitzt. Um eine Phasengrenzfläche zu vergrößern, müssen Moleküle aus der Bulkphase in Richtung Phasengrenze transportiert werden. Im Bulk liegen die Moleküle im Gleichgewicht vor, aber dieses Gleichgewicht wird gestört, wenn sich die Moleküle der Phasengrenze nähern, siehe Abbildung 3-1.



**Abbildung 3-1:** Wirkung der Grenzflächenspannung

### 3 Physikalische und numerische Grundlagen der Underfill-Simulation

Die resultierende Kraft auf ein Molekül in der Nähe der Phasengrenze wirkt in Richtung der Bulkphase, daher muss Energie aufgewendet werden, um die Phasengrenzfläche  $A$  zu vergrößern [ 43 ].

Formal kann die Grenzflächenspannung sowohl als flächenbezogene freie Energie als auch als eine Kraft pro Länge betrachtet werden. Dies lässt sich anhand der in Gleichung ( 3.1 ) aufgeführten Beziehung zur Berechnung der zur Vergrößerung einer Phasengrenze benötigten Arbeit erkennen:

$$W = \sigma dA . \quad ( 3.1 )$$

Die fundamentale Beziehung zur Betrachtung der Grenzflächenspannung ist Gleichung ( 3.2 ). Die so genannte Laplace-Young-Gleichung [ 44 ] beschreibt den Zusammenhang zwischen der Krümmung einer Phasengrenze und der Druckdifferenz über die Phasengrenze.

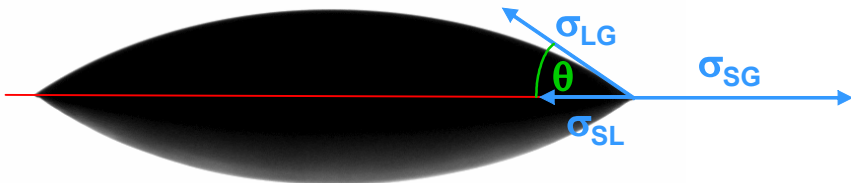
$$\Delta p = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) . \quad ( 3.2 )$$

$R_1$  und  $R_2$  sind die zueinander senkrecht stehenden Krümmungsradien der Phasengrenzfläche.

Für den Kontaktwinkel  $\theta$  eines Tropfens auf einem Substrat gilt die in Gleichung ( 3.3 ) dargestellte Young-Dupré-Beziehung [ 44 ]:

$$\sigma_{LG} \cos \theta = \sigma_{SG} - \sigma_{SL} . \quad ( 3.3 )$$

Dabei steht  $\sigma_{LG}$  für die Oberflächenspannung des Fluid gegen die Gasphase,  $\sigma_{SG}$  ist die Grenzflächenspannung zwischen Substrat und Gas und  $\sigma_{SL}$  die Grenzflächenspannung zwischen Substrat und Fluid. Diese Beziehung lässt sich anhand des Kräftegleichgewichts im Dreiphasenkontakt, wie es in Abbildung 3-2 dargestellt ist, leicht nachvollziehen.



**Abbildung 3-2:** Kontaktwinkel, Kräftegleichgewicht im Dreiphasenkontakt

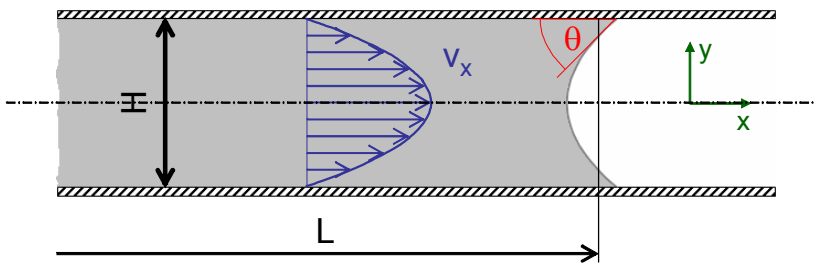
## 3.2 Analytische Betrachtung des kapillaren Fließens

Der bisher in weiten Bereichen der den Underfill-Prozess beschreibenden Literatur verwendete Ansatz zur analytischen Beschreibung des kapillaren Fließens von Underfiller im Spalt unter dem Flip Chip wurde 1996 von Schwiebert und Leong [ 1 ] hergeleitet. Im Folgenden wird dieser Ansatz vorgestellt und bewertet.

### 3.2.1 Ansatz nach Schwiebert / Leong

Ausgangsbasis für die Herleitung des analytischen Fließmodells war das Zweiplattenmodell, schematisch dargestellt in Abbildung 3-3. Die Grundgeometrie ist ein unendlich langer und unendlich breiter ebener Spalt der Höhe  $H$ . Es liegt ein unbegrenzter Vorrat an Fluid vor. Durch die große Breite  $B \gg H$  können Randeffekte vernachlässigt werden, es findet damit ein eindimensionales Fließen in einem zweidimensionalen Spalt statt. Durch die Annahme des unendlich langen Spaltes und des unbegrenzten Fluidvorrates können Einlaufeffekte vernachlässigt werden, man betrachtet einen quasistationären Fließvorgang. Das Fluid fließt ausschließlich horizontal, dadurch kann der Einfluss der Schwerkraft vernachlässigt werden. Die Fließgeschwindigkeit an einer Koordinate  $x$  ist nur eine Funktion der Höhenkoordinate  $y$ , d.h.  $v_x = v_x(y)$ .

Des Weiteren wird das Fluid als homogen, rein newtonsch und inkompressibel definiert, die Strömung ist laminar und isotherm. Die beiden Platten bestehen aus demselben Wandmaterial, d.h. es liegt ein einheitlicher und konstanter Kontaktwinkel  $\theta$  vor.



**Abbildung 3-3:** Zweiplattenmodell (ruhende Platten)

Der sich in dieser Geometrieconstellation einstellende Volumenstrom hängt unter anderem von der anliegenden treibenden Druckdifferenz ab. Bei druckgesteuerten Strömungsvorgängen wie z.B. Rohrströmungen wird diese treibende Druckdifferenz von außen angelegt. Im Gegensatz dazu ist der Underfill-Prozess

kapillarinduziert, d.h. die Druckdifferenz an der Phasengrenze verursacht das Fließen des Underfillers im Spalt. Für die Druckdifferenz wird daher die Beziehung aus der Laplace-Gleichung ( 3.2 ) eingesetzt.

Der Volumenstrom im idealen ebenen Spalt berechnet sich mit der Fließweglänge L und der treibenden Druckdifferenz  $\Delta p$  zu

$$\dot{V} = \frac{BH^3}{12\eta L} \Delta p . \quad ( 3.4 )$$

Daraus ergibt sich eine mittlere Geschwindigkeit im Spalt von

$$v = \frac{H^2}{12\eta L} \Delta p . \quad ( 3.5 )$$

Die Druckdifferenz an der Phasengrenze aufgrund der Kapillarwirkung lässt sich mit Hilfe der Laplace-Gleichung ( 3.2 ) für den idealen ebenen Spalt herleiten. In dieser „Sonderform“ eines Strömungskanals liegen nur zwei feste Wandungen vor, es stellt sich somit nur in einer Ebene ein endlicher Krümmungsradius ein. Der geometrische Zusammenhang zwischen Spalthöhe H, Krümmungsradius  $R_1$  und Kontaktwinkel  $\theta$  lautet:

$$\frac{H}{2} = R_1 \cos \theta . \quad ( 3.6 )$$

Mit  $R_1$  aus Gleichung ( 3.6 ) und  $R_2 \rightarrow \infty$  wird Gleichung ( 3.2 ) zu

$$\Delta p = \frac{2\sigma \cos \theta}{H} . \quad ( 3.7 )$$

Unter Berücksichtigung der am Anfang des Abschnitts aufgeführten Annahmen und Vereinfachungen ergeben sich aus den Gleichungen ( 3.5 ) und ( 3.7 ) mit

$$v = \frac{dL}{dt} . \quad ( 3.8 )$$

folgende Zusammenhänge für Fließgeschwindigkeit v, Fließlänge L und Fließdauer t [ 1 ]:

$$v = \frac{\sigma H \cos \theta}{6L\eta} , \quad ( 3.9 )$$

$$L = \sqrt{\frac{\sigma H t \cos \theta}{3\eta}} , \quad ( 3.10 )$$

$$t = \frac{3\eta L^2}{H\sigma \cos\theta} . \quad ( 3.11 )$$

### 3.2.2 Bewertung dieser Annahmen

Zunächst wird die Annahme der laminaren Strömung überprüft. Dabei wird anfangs von den Strömungsverhältnissen im Scherspalt eines Platte-Platte-Rheometers ausgegangen. Der parallele Scherspalt habe eine Spalthöhe von  $H = 0,2 \text{ mm}$ , die Schergeschwindigkeit im Rheometerspalt betrage  $\dot{\gamma} = 50 \text{ s}^{-1}$ . Die maximale Geschwindigkeit liegt am äußeren Rand der bewegten Platte vor und beträgt

$$v_{\max} = r \cdot \omega = r \cdot \dot{\gamma} \cdot \frac{H}{r} = 10 \text{ mm/s} . \quad ( 3.12 )$$

Bei einer angenommenen minimalen Viskosität von  $\eta_{\min} = 0,05 \text{ Pas}$  ergibt sich eine maximale Spalt-Reynoldszahl von

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot v_{\max} \cdot H}{\eta_{\min}} = 0,14 < 1 . \quad ( 3.13 )$$

Es handelt sich somit um eine schleichende Strömung.

Die Verhältnisse beim kapillaren Fließen des Underfillers im ebenen Spalt wie auch im Spalt unter einem Flip Chip sind sehr ähnlich: Die Höhe des Spaltes liegt mit etwa  $50 \text{ }\mu\text{m}$  unter dem hier angenommenen Wert im Rheometerspalt, und auch die Fließgeschwindigkeit ist in der Praxis deutlich kleiner. Die resultierende Spalt-Reynoldszahl liegt damit eher noch niedriger, der Fließvorgang ist somit eindeutig laminar.

Wegen der vorliegenden kleinen Fließgeschwindigkeiten, und weil es keine von außen aufgeprägten Druckunterschiede gibt, ist auch die Annahme, dass beide Fluide als inkompressibel betrachtet werden können, zulässig. Zwischen der Einlaufänge  $L_e$  in einer Rohr- oder Kanalströmung, der charakteristischen Länge  $d$  in der Strömung und der Reynoldszahl der Strömung gilt für eine laminare Rohrströmung folgende Beziehung [ 45 ]:

$$\frac{L_e}{d} \approx 0,03 \text{ Re} . \quad ( 3.14 )$$

Betrachtet man die Strömungsverhältnisse im Scherspalt eines Rheometers unter Verwendung der in Gleichung ( 3.13 ) berechneten Reynoldszahl und der Spalthöhe  $H$  als charakteristischer Länge, lässt sich die Einlaufänge  $L_e$  zu  $0,8\mu\text{m}$

abschätzen. Beim kapillaren Fließen im Chipspalt ist die Einlauflänge wegen der geringeren Spalthöhe und der kleineren Fließgeschwindigkeiten sogar noch geringer, somit sind Einlauffeffekte im Fließkanal irrelevant. Der Einfluss der Schwerkraft kann vernachlässigt werden, da selbst beim Anlegen eines Fluiddepots an der Dosierkante der hydrostatische Druck auf Höhe des Spalts sehr viel geringer ist als die treibende Druckdifferenz an der Phasengrenze.

In realen Flip Chip-Aufbauten hat der Spalt zwischen Chip und Leiterplatten-substrat keine konstante Höhe. Dadurch ist die Strömung zumindest lokal drei-dimensional. Außerdem wird der Underfiller in der Regel in Form einer Linie entlang der Chipkante appliziert und tritt somit mit einem „zeitlichen Versatz“ in den Spalt ein und fließt entsprechend nicht parallel zur Dosierkante. Daher ist der Fließvorgang im realen Chipspalt instationär. Aus Experimenten ist bekannt, dass der Underfiller dazu neigt, entlang der Chipkanten schneller zu fließen als in der Spaltmitte. Somit dürfen auch Randeffecte nicht ohne genauere Überprüfung vernachlässigt werden. Der Lötstopplackgraben stellt eine plötzliche starke Vergrößerung des Fließquerschnitts dar. Durch dieses zusätzlich zu befüllende Volumen tritt zum einen eine starke Richtungsänderung im Strömungsfeld auf, zum anderen verändern sich die lokalen Geschwindigkeiten entsprechend der Kontinuitätsgleichung. Die Bumps stellen eine Verengung des Fließquerschnitts im Lötstopplackgraben dar. Diese Verengung führt einerseits zu einem höheren Fließwiderstand, zum anderen ist in diesen verengten Bereichen der Kapillareffekt stärker. Die Welligkeit der Substratoberfläche aufgrund der Leiterbahnen, die unter dem Lötstopplack verlaufen, führt zu lokalen Unterschieden in der Fließgeschwindigkeit und auch der Fließrichtung.

Bei den Stoffeigenschaften bestehen größere Unterschiede zwischen dem analytischen Modell und dem Realfall. Beim Underfill-Prozess tritt eine ganze Reihe verschiedener Oberflächen mit dem Underfiller in Kontakt, die in der Regel alle verschieden mit dem Underfiller interagieren und somit über unterschiedliche Kontaktwinkel einbezogen werden müssen. Des Weiteren kann unter Umständen die Oberflächenrauigkeit so groß werden, dass sie für das Fließverhalten eine Rolle spielt. Schließlich können im Prozess auch lokale Verunreinigungen wie z.B. durch Flussmittelrückstände auftreten. Der Underfiller selbst verhält sich meist nicht wie ein newtonsches Fluid, sondern besitzt eine von der Schergeschwindigkeit abhängige Viskosität.

Die Einflüsse der Füllstoffpartikel auf das Fließverhalten werden in dieser Arbeit über die Viskositätsfunktion im Stoffmodell berücksichtigt; solange das Verhältnis von Spalthöhe zu Partikeldurchmesser ausreichend groß ist ( $H/d_p > 10$  [46]), kann der Underfiller somit näherungsweise als homogen

betrachtet werden. In Abschnitt 6.4.4 wird mit Hilfe der Strömungssimulation und Vergleichsmessungen nachgewiesen, dass diese Annahme für den verwendeten Underfiller zulässig ist.

Die Gültigkeit der Annahme einer isothermen Strömung lässt sich folgendermaßen begründen: Bei den betrachteten sehr geringen Spalthöhen erfolgt die Aufheizung des Underfillers im Spalt innerhalb kürzester Zeit. Zudem ist für den viskosen Druckverlust nur die Viskosität in den äußeren, stark gescherten Bereichen des Fluids relevant, die in direktem Kontakt mit der Wand stehen und deren Temperatur sofort annehmen.

#### 3.2.3 Zweiplattenmodell mit Flankeneinfluss

Das Zweiplattenmodell, das bereits in Abschnitt 3.2 vorgestellt und diskutiert wurde, dient dazu, das globale Fließverhalten des Underfillers unter dem Chip zu analysieren. Ebenfalls von Interesse ist eine detaillierte Analyse des Fließvorgangs im Lötstopplackgraben zwischen den Bumps. Dort gilt allerdings die Annahme eines unendlich breiten, seitlich offenen Spaltes nicht mehr.

Statt des bisher verwendeten offenen Zweiplattenmodells wird nun als Ausgangsbasis ein modifiziertes Zweiplattenmodell aus der Literatur [ 47 ] gewählt. Bei diesem Ansatz wird der durchflussvermindernde Einfluss der seitlichen Kanalflanken über den Korrekturfaktor  $F_p$  berücksichtigt. Gleichung ( 3.4 ) wird damit modifiziert zu Gleichung ( 3.15 ):

$$\dot{V} = \frac{BH^3}{12\eta L} \Delta p F_p . \quad ( 3.15 )$$

Der Korrekturfaktor  $F_p$  ist eine reine Funktion der Spalthöhe  $H$  und der Fließkanalbreite  $B$  und berechnet sich gemäß Gleichung ( 3.16 ) [ 48 ]:

$$F_p = 1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{H}{B} \sum_{p=1,3,5..} \frac{1}{p^5} \tanh \frac{p\pi B}{2H} . \quad ( 3.16 )$$

Der treibende Druckgradient  $\Delta p$  an der Phasengrenze ergibt sich im seitlich begrenzten Fall zu

$$\Delta p = 2\sigma \cos \theta \left( \frac{B+H}{BH} \right) . \quad ( 3.17 )$$

Durch Zusammenfassen und Umformen der Gleichungen ( 3.15 ) - ( 3.17 ) können die Zusammenhänge zwischen Fließgeschwindigkeit  $v$ , Fließlänge  $L$  und Fließdauer  $t$  folgendermaßen beschrieben werden:

$$v = \frac{H^2}{6} \frac{\sigma \cos \theta}{\eta L} \left( \frac{B+H}{BH} \right) F_p, \quad (3.18)$$

$$L = \sqrt{\frac{H^2}{3} \frac{\sigma \cos \theta}{\eta} \left( \frac{B+H}{BH} \right) F_p t}, \quad (3.19)$$

$$t = \frac{3\eta L^2}{\sigma \cos \theta} \frac{B}{H(H+B)} \frac{1}{F_p}. \quad (3.20)$$

### 3.2.4 Vergleich der Modelle

Vergleicht man die resultierenden mittleren Fließgeschwindigkeiten aus dem Ansatz von Schwiebert/Leong [1] mit denen aus dem modifizierten Zweiplattenmodell, zeigt sich, dass die Abweichung durch einen Faktor K abhängig von B und H beschrieben werden kann:

$$K = \frac{v_{\text{mod. Zweiplattenmodell}}}{v_{\text{Schwiebert/Leong}}} = \left( 1 + \frac{H}{B} \right) F_p. \quad (3.21)$$

In Abbildung 3-4 ist dieser Faktor K über B/H aufgetragen dargestellt.

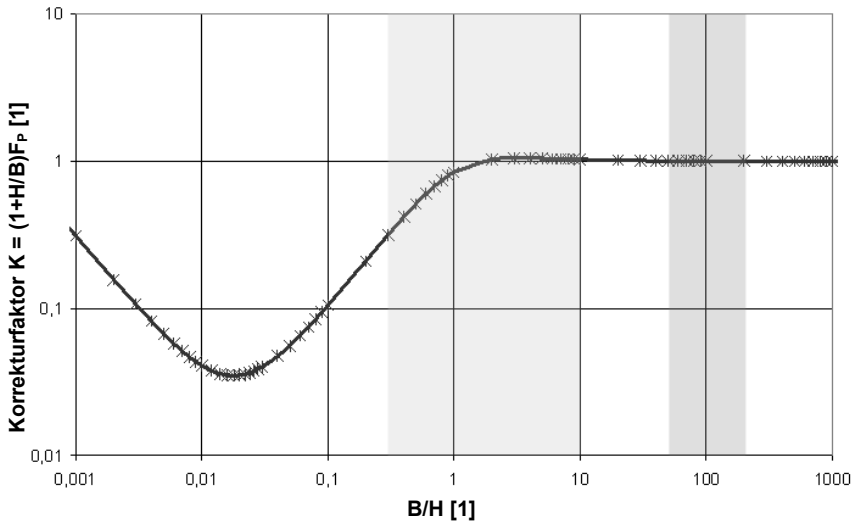


Abbildung 3-4: Korrekturfaktor K als Funktion von B/H



Der für den Underfill-Prozess relevante Bereich von  $B/H$  liegt bei Betrachtung des gesamten Chipspaltes in der Größenordnung 50 bis 200, was im Diagramm dem rechten der grau hinterlegten Bereiche entspricht. Bei der Betrachtung des Fließens im Spalt zwischen den Lotbumps liegt der relevante Bereich von  $B/H$  etwa bei 0,3 bis 10, im Diagramm dargestellt durch den linken grau hinterlegten Bereich.

Für den gesamten Chip ist die Annahme einer Strömung zwischen unendlich breiten ebenen Platten somit gerechtfertigt, zumal keine seitlich begrenzende Wand existiert. Wird das Durchströmen einer Lücke zwischen zwei Bumps betrachtet, variiert der Korrekturfaktor  $K$  stark, der Flankeneinfluss darf nicht vernachlässigt werden. In diesem Wertebereich findet auch ein Übergang des Korrekturfaktors von Werten  $K < 1$  zu Werten  $K > 1$  statt, d.h. der resultierende Volumenstrom kann kleiner oder größer werden als im idealisierten Modell nach Schwiebert und Leong [ 1 ]. Abhängig vom Verhältnis  $B/H$  überwiegt entweder der durch die Flanken verursachte zusätzliche Fließwiderstand, der sich mindernd auf die Fließrate auswirkt, oder die höhere treibende Kraft der Grenzflächen-spannung im verengten Kanal, die eine Erhöhung der Fließrate bewirkt.

### 3.3 Grundlagen der Strömungssimulation

Strömungsvorgänge werden mit Hilfe von Differentialgleichungen beschrieben. Diese sind aber nur in Spezialfällen analytisch lösbar. Daher werden zur Lösung dieser Gleichungen *CFD*-Methoden (*Computational Fluid Dynamics*) eingesetzt. Dazu müssen diese Differentialgleichungen diskretisiert werden, also durch algebraische Gleichungen angenähert werden, welche dann numerisch gelöst werden können [ 49 ]. Das Rechengebiet wird über ein Rechengitter in kleine Bereiche unterteilt, auf die die algebraischen Gleichungen jeweils angewandt werden; als Lösung erhält man Werte der Zustandsgrößen an diskreten Orten zu diskreten Zeitpunkten. Durch die Diskretisierung der beschreibenden Gleichungen und des Rechengebiets entstehen Fehler, das numerische Ergebnis ist nicht die exakte Lösung der zugrunde gelegten Differentialgleichungen, sondern eine Näherungslösung, deren Qualität von der Diskretisierung der Gleichungen und des Rechengebiets wie auch von eventuell getroffenen Annahmen und verwendeten Stoffmodellen abhängt.

Zur Diskretisierung der beschreibenden Differentialgleichungen von Strömungsvorgängen werden in vielen Fällen Finite Volumen-Verfahren verwendet. Bei der Finite Volumen-Methode wird das Rechengebiet in kleine Kontrollvolumen unterteilt. Die diskretisierten Bilanzgleichungen werden über die Kontrollvolumen integriert; die Zustandsgrößen werden formal für die Mitte des

Kontrollvolumens berechnet, wobei ihr Wert für das ganze Kontrollvolumen als konstant angenommen wird. Durch die Verwendung der integralen Bilanzgleichungen ist das Finite Volumen-Verfahren grundsätzlich konservativ, im Gegensatz zu z.B. den *Finite Elemente*- oder *Finite Differenzen*-Verfahren, die auf der differenziellen Form der Bilanzgleichungen basieren [ 50 ].

### 3.3.1 Bilanzgleichungen

Sämtliche Berechnungsansätze in der numerischen Strömungsmechanik beruhen auf dem physikalischen Erhaltungsprinzip. Unabhängig von der zu bilanzierenden Größe lässt sich eine Bilanzgleichung formal in der Form von Gleichung ( 3.22 ) darstellen. Dabei bezeichnet  $\phi$  eine allgemeine Bilanzgröße,  $\Gamma$  ist ein allgemeiner Transportkoeffizient für molekulare Transportmechanismen, die Terme  $Q$  und  $S$  bezeichnen Quellen bzw. Senken im Kontrollvolumen:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = -\underline{\nabla} \cdot (\rho\underline{v}\phi) + \underline{\nabla} \cdot (\Gamma\underline{\nabla}\phi) + Q - S. \quad ( 3.22 )$$

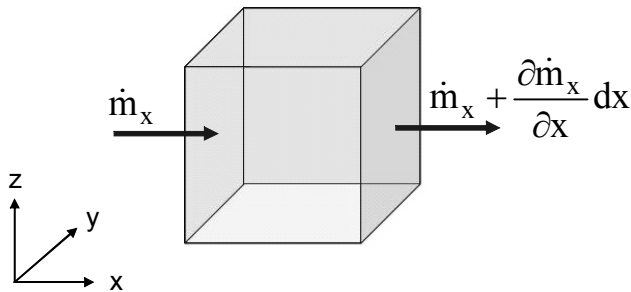
Der Term auf der linken Seite beschreibt die zeitliche Änderung von  $\phi$  im Bilanz-element. Die Terme der rechten Seite beschreiben den konvektiven und den molekularen Transport sowie eine Quelle und eine Senke von  $\phi$  im Bilanz-element. Aus dieser allgemeinen Konvektions-Diffusions-Gleichung lassen sich die verschiedenen im Folgenden vorgestellten Bilanzgleichungen ableiten.

#### 3.3.1.1 Massenerhaltung

Die Massenbilanz in differentieller Form lässt sich folgendermaßen darstellen:

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = -\underline{\nabla} \cdot (\rho\underline{v}) + Q_m - S_m. \quad ( 3.23 )$$

Die Masse ist eine skalare Größe und kann deshalb in einer Gleichung bilanziert werden. Die Gleichung enthält einen Term für den instationären und den konvektiven Transport sowie einen Quell- und einen Senkenterm. Der molekulare Anteil entfällt in der Massenbilanz. In Abbildung 3-5 sind schematisch die Massenströme in x-Richtung in einem Kontrollvolumen dargestellt.



**Abbildung 3-5:** Massenbilanz im Kontrollvolumen in x-Richtung

### 3.3.1.2 Impulserhaltung

Gleichung (3.24) beschreibt die differentielle Form der Impulsbilanz in tensorieller Schreibweise:

$$\frac{\partial(\rho \underline{v})}{\partial t} = -\underline{\nabla} \cdot \rho \underline{v} \underline{v}^T - \underline{\nabla} \cdot \underline{\underline{\tau}} - \underline{\nabla} p + \rho \underline{g}. \quad (3.24)$$

Da es sich beim Impuls um eine vektorielle Größe handelt, wird der Impuls in der Regel in alle drei Raumrichtungen bilanziert, d.h. es werden drei Bilanzgleichungen aufgestellt.

### 3.3.1.3 Energieerhaltung

Die Energiebilanz wird in differentieller Form durch Gleichung (3.25) beschrieben:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = -\underline{\nabla} \cdot \rho \underline{v} h - \underline{\nabla} \cdot (\lambda \underline{\nabla} T) + Q_h - S_h. \quad (3.25)$$

Bilanziert wird die massenspezifische Enthalpie  $h$  im Kontrollvolumen, welche wie die Masse eine skalare Größe ist und deshalb in einer Gleichung erfasst werden kann.  $\lambda$  ist die Wärmeleitfähigkeit des Fluids, der Energietransport im Medium aufgrund eines Temperaturgradienten erfolgt somit auf molekularem Weg.

### 3.3.1.4 Komponentenmengenbilanz

Enthält eine Strömung mehrere Komponenten, so muss für diese ebenfalls eine Bilanz aufgestellt werden. Die Menge  $\rho c$  der jeweiligen Komponente wird als Partialdichte oder volumenspezifische molare Konzentration angegeben:

$$\frac{\partial(\rho c)}{\partial t} = -\underline{\nabla} \cdot (\rho \underline{v} c) + \underline{\nabla} \cdot (D \underline{\nabla} c) + Q_c - S_c \quad (3.26)$$

Auch bei der Konzentration handelt es sich um eine skalare Größe, d.h. für jede Komponente muss nur eine Gleichung gelöst werden. Die Summe aller Komponentenmengenbilanzen ergibt die globale Massenbilanz aus Gleichung (3.23)  $Q_c$  und  $S_c$  beschreiben Stoffströme, wie sie z.B. durch chemische Reaktionen im Kontrollvolumen entstehen können.  $D$  ist der Diffusionskoeffizient.

### 3.3.2 Mehrphasige Strömungen mit freien Oberflächen

Die Schwierigkeit bei der Simulation mehrphasiger Strömungen mit freien Oberflächen besteht in der Verfolgung der freien Oberfläche während des Strömungsvorgangs. Die Position der freien Oberfläche ist nur beim Start der Rechnung bekannt, im Verlauf der Rechnung verändert sie sich und wird dadurch ein Teil der Lösung. Kann der Phasenübergang an der freien Oberfläche vernachlässigt werden, gelten folgende Randbedingungen [ 49 ]:

- Kein Fluss über die freie Oberfläche, d.h. die Normalkomponente der Geschwindigkeiten an der Phasengrenzfläche entspricht der Normalkomponente der freien Oberfläche.
- An der Phasengrenzfläche herrscht ein Kräftegleichgewicht; die Kräfte senkrecht zur Phasengrenze sind in jedem Punkt gleich groß und einander entgegengesetzt, die Tangentialkräfte sind gleich groß und gleich gerichtet:

Die Verfolgung der freien Oberfläche im Verlauf der Rechnung kann über zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze erfolgen [ 51 ]:

- Verwendung konturangepasster Gitter; bei jedem Zeitschritt wird das Rechengitter der bewegten Kontur der freien Oberfläche angepasst.
- Methoden mit fixen Gittern, bei denen die freie Oberfläche durch Zellen definiert ist, die Anteile beider Phasen enthalten.

Da der Einsatz konturangepasster Gitter in der Regel rechnerisch sehr aufwendig ist, werden in den meisten Fällen die Methoden mit starren Gittern bevorzugt. In diesen Fällen müssen zusätzliche Methoden gegeben sein, mit denen die Form der freien Oberfläche verfolgt werden kann. Ein möglicher Ansatz zur Bestimmung der Form der freien Oberfläche ist die Zugabe masseloser Tracerpartikel (z.B. *Marker-and-Cell-Methode* MAC, [ 52 ]), die sich im Verlauf der Rechnung schlupffrei mit der freien Oberfläche mitbewegen. Der Nachteil dieser Methode

### 3 Physikalische und numerische Grundlagen der Underfill-Simulation

---

ist, dass zur Berechnung komplexer bzw. sich stark vergrößernder freier Oberflächen eine große Anzahl von Tracerpartikeln verwendet werden muss (im Schnitt etwa 16 Partikel je Zelle [ 53 ]), wodurch der Rechenaufwand sehr groß werden kann. Ein weiterer Ansatz zur Verfolgung der freien Oberfläche ist die *Volume-of-Fluid-Methode* (VOF) [ 54 ]; bei dieser Methode wird eine zusätzliche Transportgleichung für den Phasenanteil gelöst, die Impulsbilanz wird dabei phasenübergreifend gerechnet. Der Nachteil dieser Methode ist die grundsätzlich verschwommene Phasengrenze, deren „Schärfung“ unter Umständen recht kompliziert sein kann. Trotzdem hat sich diese Methode in den verbreiteten kommerziellen Softwarepaketen durchgesetzt.

Für jede Phase  $q$  im System wird ein Phasenanteil  $\alpha_q$  eingeführt. Dabei gilt eine Zelle als leer (bezüglich der Phase  $q$ ), wenn  $\alpha_q = 0$  ist und als voll, wenn  $\alpha_q = 1$  ist. Im Fall  $0 < \alpha_q < 1$  enthält die Zelle Anteile mehrerer Phasen und somit eine Phasengrenze.

Die Transportbedingung für den Phasenanteil  $\alpha_q$  der Phase  $q$  lautet:

$$\frac{\partial(\rho_q \alpha_q)}{\partial t} = -\underline{v} \cdot \underline{\nabla}(\rho_q \alpha_q) + Q_{\alpha_q} - S_{\alpha_q} . \quad ( 3.27 )$$

Die zugehörige Schließbedingung lautet:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 . \quad ( 3.28 )$$

Die Bilanzgleichungen für Masse und Impuls werden über das gesamte Strömungsgebiet hinweg wie für ein Fluid gelöst, dessen Eigenschaften  $\phi$  abhängig vom lokalen Phasenanteil variieren:

$$\phi = \sum_{q=1}^n \alpha_q \phi_q . \quad ( 3.29 )$$

Für die freie Oberfläche werden keine Randbedingungen definiert, da es sich formal um eine Diskontinuität der Fluideigenschaften handelt.

Meist ist die ausschließliche Darstellung der Phasengrenze über den Phasenanteil  $\alpha_q$  zu unscharf. Die Form und Krümmung der Phasengrenze kann mit Hilfe spezieller Oberflächenrekonstruktionsverfahren ermittelt werden. Ein für instationäre Strömungen häufig verwendetes Verfahren ist das iterative *Geometric Reconstruct Scheme* [ 55 ]. Dabei wird die Phasengrenze in jeder

Zelle, die die Bedingung  $0 < \alpha_q < 1$  erfüllt, mit einer konstanten Steigung approximiert.

Die Position der Phasengrenze relativ zum Zellmittelpunkt wird anhand des Phasenanteils  $\alpha_q$  ermittelt. Auf Basis der Geschwindigkeitsverteilung an den Zelloberflächen und der Steigung der approximierten Phasengrenze werden dann die Flüsse zwischen benachbarten Zellen berechnet, und in einem letzten Schritt wird der Phasenanteil  $\alpha_q$  anhand der im vorigen Schritt berechneten Flüsse zwischen den benachbarten Zellen korrigiert.

Die Implementierung der Grenzflächenspannung erfolgt über den Ansatz von Brackbill et. al. [ 56 ], in dem an der Phasengrenze eine zusätzliche Impulsquelle definiert wird.

---

## 4 Stoffeigenschaften

Der verwendete Underfiller (UF) ist ein kommerzielles Produkt. Es handelt sich um ein  $\text{SiO}_2$ -gefülltes anhydridhärtendes Einkomponenten-Epoxidharzsystem. Der Underfiller wird bei 70-80°C verarbeitet.

Die relevanten Stoffgrößen zur Beschreibung des kapillaren Fließens eines Fluids in einem Spalt und insbesondere für die Simulation des Fließvorgangs sind

- die Viskosität des Fluids,
- die Grenzflächenspannung gegen die umgebende Phase (hier: Luft),
- die Kontaktwinkel des Fluids auf den verschiedenen Oberflächen,
- die Dichte des Fluids.

Zusätzlich zur Ermittlung der genannten Stoffeigenschaften muss überprüft werden, ob im verwendeten Harzsystem im relevanten Prozessfenster bereits die Vernetzungsreaktion einsetzt. Ist dies der Fall, so müssen die daraus resultierenden Veränderungen der oben genannten Stoffeigenschaften entsprechend modelliert werden.

### 4.1 Reaktivität

Mit Hilfe der Differential Scanning Calometry (DSC) wird überprüft, ob die Aushärtereaktion schon während der Fließphase des Underfillers im Prozess merklich einsetzt. Dazu werden eine kleine Probe des zu untersuchenden Materials sowie eine Referenzprobe (ein leerer Tiegel) einem bestimmten Temperaturprogramm unterzogen. Gemessen wird der Wärmestrom bzw. die Temperaturdifferenz zwischen den beiden miteinander im Kontakt stehenden Proben. Mit dieser Methode kann zum einen die Wärmekapazität des untersuchten Stoffes, zum anderen der Verlauf einer potentiellen Härtingsreaktion ermittelt werden.

Die erste Messung erfolgt mit einer definierten Aufheizrate von 10 K/min. Die Hauptreaktion setzt bei etwa 110°C ein. Die zweite Messung wird isotherm an der oberen Grenze des Prozesstemperaturfensters bei 80°C durchgeführt. Selbst nach einer halben Stunde kann keine Härtingsreaktion verzeichnet werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass in dem für den Underfill-Prozess relevanten Zeitraum von wenigen Sekunden kein Einfluss etwaig auftretender Härtingsreaktionen auf das Fließverhalten zu erwarten sind.

## 4.2 Füllstoffe

Der Underfiller ist mit kugelförmigen  $\text{SiO}_2$ -Partikeln gefüllt. Der Massenanteil des Füllstoffes beträgt 30%, was bei der Dichte von  $\text{SiO}_2$  von  $2650 \text{ kg/m}^3$  einem Volumenanteil von  $\phi = 16\%$  entspricht. Die Partikelgrößenverteilung ist monomodal mit einem mittleren Durchmesser  $d_{s,0}$  von  $2,6 \mu\text{m}$ . Der Zusammenhang zwischen Feststoffvolumen  $V_{\text{SiO}_2}$  und Partikelanzahl  $n_p$  lautet bei einem einheitlichen Partikeldurchmesser  $d_p$ :

$$V_{\text{SiO}_2} = n_p \frac{\pi}{6} d_p^3. \quad (4.1)$$

Mit

$$V_{\text{SiO}_2} = \phi V_{\text{UF}} \quad (4.2)$$

ergibt sich unter der Annahme einer einheitlichen Partikelgröße  $d_p = d_{0,5}$  die auf das Gesamtvolumen bezogene Anzahl der Füllstoffpartikel zu

$$\frac{n_p}{V_{\text{UF}}} = 1,74 \cdot 10^{16} \text{ m}^{-3}. \quad (4.3)$$

Bei einem Chip mit 10 mm Kantenlänge und einer Spalthöhe von  $50 \mu\text{m}$  beträgt das Fließspaltvolumen  $V \approx 5 \text{ mm}^3$ . Wird dieser Chipspalt vollständig gefüllt, enthält er somit  $n_p \approx 8,7 \cdot 10^7$  Partikel. Damit ist die Partikelanzahl im praxisrelevanten Volumen so hoch, dass die Partikel in der Simulation nicht diskret modelliert werden können.

## 4.3 Viskosität

Die Messung der Viskosität erfolgt mit einem Rotationsrheometer vom Typ MC200 der Firma physica. Mit diesem Gerät lassen sich sowohl Messungen nach der CSR-Methode (*Controlled Strain Rate*, Vorgabe einer definierten Schergeschwindigkeit) als auch nach der CSS-Methode (*Controlled Shear Stress*, Vorgabe einer definierten Schubspannung) durchführen. Als Messkörper wird das Kegel-Platte-System MK21 mit einem Probenkörperdurchmesser von 25 mm, einem Kegelspitzenwinkel von  $2^\circ$  und einem minimalen Abstand zwischen Kegel und Platte von  $50 \mu\text{m}$  verwendet. Bei der Viskositätsmessung kann im Bereich kleiner Schergeschwindigkeiten ein Anstieg der Viskositätswerte über der Zeit beobachtet werden. Eine mögliche Ursache dieses Effekts ist der sukzessive Aufbau innerer Strukturen der Füllstoffe im Underfiller; dieses Phänomen wird in Abschnitt 6.3 ausführlicher diskutiert. Um das Risiko, dass die Messwerte durch ein solches Phänomen verfälscht werden, zu minimieren, wird im Bereich niedriger Schergeschwindigkeiten zwischen den einzelnen Stufen die



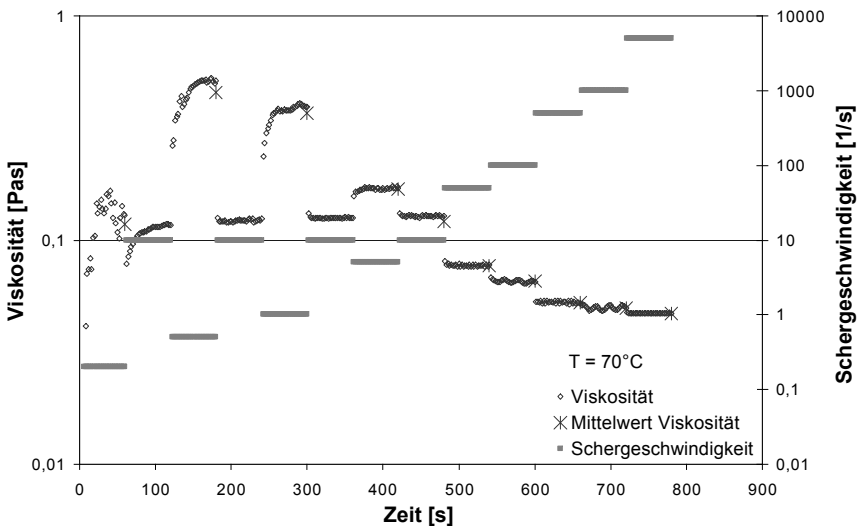
#### 4 Stoffeigenschaften

Schergeschwindigkeit auf  $10 \text{ s}^{-1}$  eingestellt. Das komplette Messprofil über der Zeit ist in Tabelle 4-1 dargestellt:

**Tabelle 4-1:** Zeitliches Messprofil zur Messung der Viskosität

Zeit [s]	Schergeschwindigkeit [ $\text{s}^{-1}$ ]	Zeit [s]	Schergeschwindigkeit [ $\text{s}^{-1}$ ]
0	10	420	5
60	0,2	480	10
120	10	540	50
180	0,5	600	100
240	10	660	500
300	1	720	1000
360	10	840	5000

Die gemessenen Viskositäten sind in Abbildung 4-1 zusammen mit dem in der Messung verwendeten Schergeschwindigkeitsprofil über der Zeit aufgetragen.



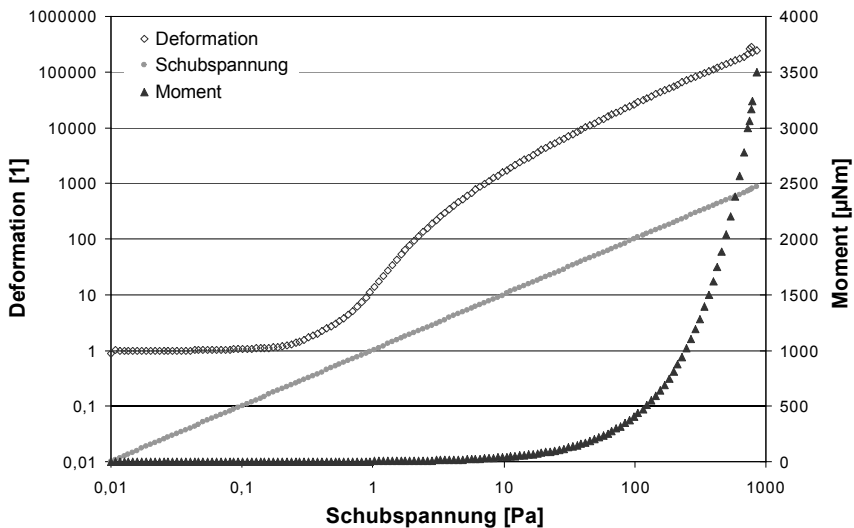
**Abbildung 4-1:** Viskositätswerte des Underfillers bei  $70^\circ\text{C}$  und Schergeschwindigkeitsprofil

Im Bereich hoher Schergeschwindigkeiten tritt ein Viskositätsplateau auf. Messungen bei verschiedenen Temperaturen zeigen, dass sich die Viskosität im

für den Prozess vorgegebenen Temperaturbereich von 70 - 80°C nicht signifikant verändert.

Zur Messung der Fließgrenze wird das Rheometer im CSS-Modus betrieben. Bei der Messung wird eine logarithmische Schubspannungsrampe angefahren und die Deformation der Probe aufgezeichnet. Wird in der doppeltlogarithmischen Darstellung die Deformation als Funktion der Schubspannung aufgetragen, kann aus dem Kurvenverlauf die Fließgrenze des Stoffes abgelesen werden. Im Bereich unterhalb der Grenzscherubspannung verhält sich das Medium elastisch, es tritt noch kein Fließen ein; der zugehörige Kurvenabschnitt ist eine Gerade. Beim Überschreiten der Fließgrenze beginnt die Probe zu fließen, die Kurve geht von einer Geraden in ein Polynom höherer Ordnung über [ 57 ].

Die Schubspannung wird innerhalb von 300 s von 0,01 Pa auf 1000 Pa gesteigert. Das Ergebnis der gesamten Messung ist in Abbildung 4-2 dargestellt, Abbildung 4-3 zeigt vergrößert den Nahbereich der Erfassungsgrenze des Messsystems.

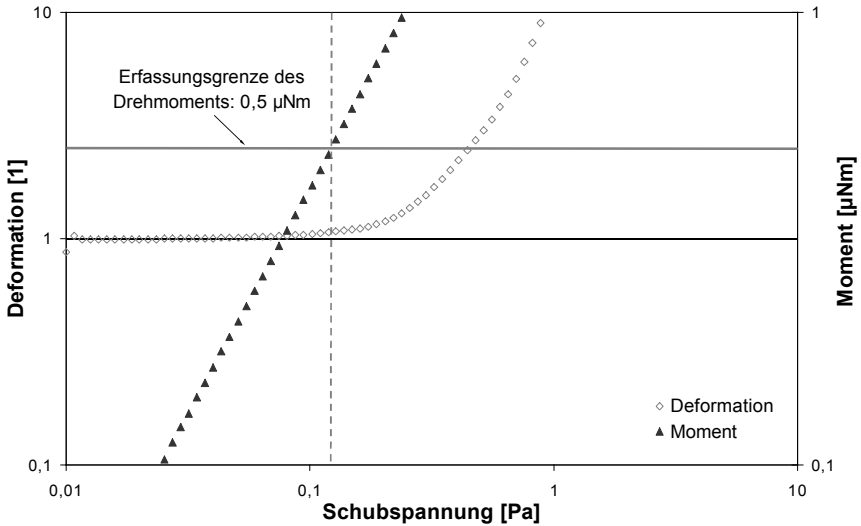


**Abbildung 4-2:** Ermittlung der Fließgrenze des Underfillers: Verlauf von Deformation und Moment

Aufgetragen sind jeweils die Verläufe von Deformation und Moment über der Schubspannung. Bei den Messungen stellt sich nur für sehr geringe Schubspannungen ein näherungsweise linearer Bereich ein; in diesem Bereich

#### 4 Stoffeigenschaften

liegen allerdings die aufgenommenen Momente unterhalb der Erfassungsgrenze des Rheometers von  $0,5 \mu\text{Nm}$ . Daher können die gemessenen Deformationen nicht betrachtet werden. Wie Abbildung 4-3 verdeutlicht, folgt die Deformationskurve im tatsächlich messbaren Datenbereich nicht mehr dem linearen Verlauf, folglich besitzt der Stoff keine messbare Fließgrenze.



**Abbildung 4-3:** Verlauf von Deformation und Moment des Underfillers im Nahbereich der Erfassungsgrenze; der tatsächlich messbare Datenbereich liegt rechts der senkrechten gestrichelten Linie

In Tabelle 4-2 sind die Messwerte der Viskosität  $\eta$  bei verschiedenen Schergeschwindigkeiten  $\dot{\gamma}$  bei einer Temperatur von  $70^\circ\text{C}$  aufgeführt, auf deren Grundlage die Ermittlung der Parameter der Viskositätsfunktion erfolgt:

**Tabelle 4-2:** Datenbasis zur Ermittlung der Parameter der Viskositätsfunktion des Underfillers. Messung bei  $70^\circ\text{C}$ .

$\dot{\gamma}$ [ $\text{s}^{-1}$ ]	0,5	1	5	10	50	100	500	1000	5000
$\eta$ [Pas]	0,264	0,236	0,157	0,12	0,076	0,064	0,052	0,048	0,047

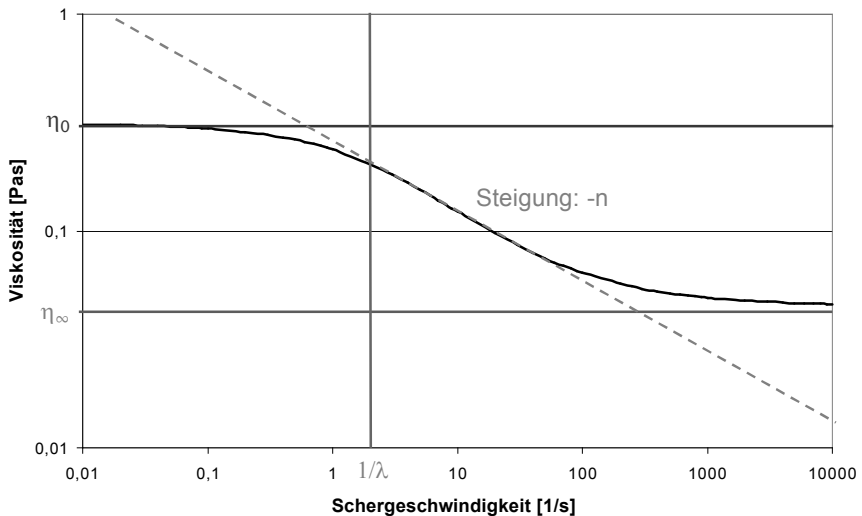
Zur analytischen Beschreibung des Zusammenhangs von Viskosität und Schergeschwindigkeit wird die Carreau-Yasuda-Approximation aus Gleichung (4.4) [58] verwendet:

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \left[ 1 + (\dot{\gamma}\lambda)^a \right]^{\frac{n-1}{a}} \quad (4.4)$$

Dieses Viskositätsmodell zur Beschreibung des strukturviskosen Verhaltens von Fluiden enthält insgesamt fünf Parameter und zeichnet sich durch jeweils ein Viskositätsplateau bei sehr niedrigen und sehr hohen Schergeschwindigkeiten aus.  $\eta$  steht für die Scherviskosität des Stoffes,  $\dot{\gamma}$  für die angelegte Schergeschwindigkeit. Die Parameter der Funktion haben folgende Bedeutungen:

- $\eta_{\infty}$ : Grenzviskosität bei sehr hohen Schergeschwindigkeiten,
- $\eta_0$ : Nullviskosität, tritt bei sehr niedrigen Schergeschwindigkeiten auf,
- $\lambda$ : Zeitfaktor, der die Lage der „Knicke“ zwischen den Viskositätsplateaus beschreibt,
- $a$ : Formfaktor für den Bereich mittlerer Schergeschwindigkeiten,
- $n$ : beschreibt die Steigung des abfallenden Bereichs.

Abbildung 4-4 zeigt die aus den Messwerten ermittelte Carreau-Yasuda-Viskositätsfunktion.



**Abbildung 4-4:** Gemessene Viskositätskurve und Parameter der Carreau-Yasuda-Viskositätsfunktion

## 4 Stoffeigenschaften

---

In Tabelle 4-3 sind die resultierenden Parameter der Carreau-Yasuda-Viskositätsfunktion aufgelistet:

**Tabelle 4-3:** Parameter der Carreau-Yasuda-Viskositätsfunktion des Underfillers bei 70°C

$\eta_{\infty}$	0,0451 Pas
$\eta_0$	0,3101 Pas
$\lambda$	0,4682 s
a	0,8738
n	0,3195

Für die Anpassung der Funktionsparameter an den gemessenen Viskositätsverlauf werden im Bereich der niedrigen Schergeschwindigkeiten, wo sich die Viskosität mit der Zeit verändert, immer die Anfangswerte verwendet. Der Nachweis, dass die zeitunabhängige Betrachtung der Viskosität gerechtfertigt ist, folgt in Abschnitt 6.3.

### 4.4 Dichte

Die Dichte des Underfillers bei Raumtemperatur und bei 70°C wurde mit der Biegeschwingapparatur DMA 512P von Anton Paar ermittelt. Bei diesem Dichtemessverfahren wird die Probenzelle, meist ein U-Rohr, mit dem zu untersuchenden Medium gefüllt und zum Schwingen angeregt. Die Eigenfrequenz der Probenzelle hängt von ihrer Masse ab, und da das Innenvolumen der Messzelle konstant ist, von der Dichte des zu untersuchenden Stoffes. Über die Beziehung

$$\rho = (\tau^2 - B) / A \quad (4.5)$$

lässt sich von der gemessenen Periodendauer  $\tau$  auf die Dichte  $\rho$  des Fluids schließen. A und B sind dabei Gerätekosten der Apparatur, die mit Hilfe von Kalibriermessungen mit zwei Referenzstoffen (meist Luft und Wasser) für jede Temperatur ermittelt werden können. Die Biegeschwinger arbeiten hochgenau – die Genauigkeit beträgt bis zu 0,001 kg/m<sup>3</sup> – allerdings hängt die erreichte Ergebnisqualität von der Sorgfältigkeit ab, mit der das Gerät kalibriert wurde, da die Messung relativ zu den Vergleichsstoffen erfolgt.

Die Dichte des Underfillers bei Raumtemperatur beträgt 1400 kg/m<sup>3</sup>, bei 70°C wird eine Dichte von 1370 kg/m<sup>3</sup> gemessen.

## 4.5 Grenzflächenspannung

Die Grenzflächenspannung zwischen Underfiller und Luft wird mit Hilfe der *Pendant Drop*-Methode gemessen. Die Kontur eines hängenden Tropfens in einem umgebenden Medium – hier in Luft – wird durch das Zusammenwirken der Massenkraft des Tropfens im Erdschwerefeld und der durch die Grenzflächenspannung induzierte Kraft bestimmt. Die Massenkraft eines hängenden Tropfens kann durch Gleichung ( 4.6 ) beschrieben werden:

$$F_G = \Delta\rho Vg . \quad ( 4.6 )$$

Dabei beschreibt  $\Delta\rho$  die Dichtedifferenz von Underfiller und Luft und  $V$  das Volumen des Underfillertropfens.

Die durch die Grenzflächenspannung induzierte Kraft lässt sich wie in Gleichung ( 4.7 ) darstellen:

$$F_\sigma = \sigma\pi D . \quad ( 4.7 )$$

$D$  steht hier für den Außendurchmesser der verwendeten Dosiernadel. Im Gleichgewicht sind diese beiden Kräfte gleich groß und entgegengesetzt gerichtet. Durch Gleichsetzen der Gleichungen ( 4.6 ) und ( 4.7 ) und Umformen erhält man folgende Beziehung für die Grenzflächenspannung:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho Vg}{\pi D} . \quad ( 4.8 )$$

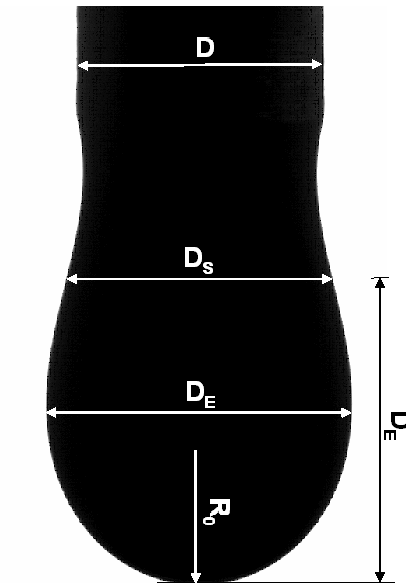
Anhand der resultierenden Tropfenform und bekanntem Außendurchmesser  $D$  kann auf das Tropfenvolumen und bei bekannter Dichtedifferenz  $\Delta\rho$  der Dosiernadel auf die Grenzflächenspannung am Tropfen geschlossen werden [ 59 ]:

$$\sigma = \frac{\Delta\rho g R_0^2}{\beta} . \quad ( 4.9 )$$

Die dafür zu erfassenden Geometriegrößen sind in Abbildung 4-5 dargestellt.  $R_0$  ist der Radius der Tropfenkontur am Scheitelpunkt;  $\beta$  ist ein Formfaktor, der in Abhängigkeit des Verhältnisses  $D_S/D_E$  aus Tabellen oder mit Hilfe einer Näherungsfunktion bestimmt werden kann. Dabei steht  $D_E$  für den maximalen waagrechten Tropfendurchmesser,  $D_S$  ist der Durchmesser des Tropfens im Abstand  $D_E$  vom Scheitel. Je größer der Tropfen ist, umso stärker ist der Schwerkrafteinfluss auf die Kontur des Tropfens und umso besser kann die Grenzflächenspannung ermittelt werden.

## 4 Stoffeigenschaften

Um die zur Berechnung erforderlichen Größen  $R_0$ ,  $D_E$  und  $D_S$  zu erhalten, muss das Bild des Tropfens mit Hilfe einer Bildanalysesoftware digitalisiert werden, um die Tropfenkontur zu bestimmen. Das dafür verwendete Messgerät ist das Kontaktwinkelmessgerät OCA 20 der Firma *dataphysics*. Der bekannte Außendurchmesser  $D$  der Dosiernadel dient zur Kalibrierung der Aufnahme.



**Abbildung 4-5:** Grenzflächenspannung: relevante Geometrieparameter

Bei  $70^\circ\text{C}$  wird eine Grenzflächenspannung des Underfillers gegen Luft von  $0,0375\text{ N/m}$  gemessen.

## 4.6 Kontaktwinkel

Auch für die Messung der Kontaktwinkel auf verschiedenen Substraten wird das Messgerät OCA 20 von *dataphysics* verwendet. Ein Tropfen einer bekannten Testflüssigkeit (zur Bestimmung der Grenzflächenspannung von Substraten) oder der in der interessierenden Stoffpaarung vorliegenden Flüssigkeit wird auf das Substrat aufgegeben. Um den Einfluss der Schwerkraft auf die Tropfenform bestmöglich zu eliminieren, sollte der Tropfen möglichst klein sein. Mit Hilfe der Bildanalysesoftware wird das Bild des liegenden Tropfens aufgenommen und die Tropfenkontur ermittelt. Der Tropfen wird an der Horizontalen gespiegelt, durch

die dabei entstehenden Ecken wird die Basislinie zur Winkelbestimmung definiert (siehe Abbildung 3-2). Die Kontaktwinkel (linksseitig und rechtsseitig) werden vom Programm automatisch ausgemessen, zusätzlich wird der mittlere Kontaktwinkel ausgegeben.

Gemessen werden die Kontaktwinkel des Underfillers auf allen für den Underfill-Prozess relevanten Oberflächen bei der Prozesstemperatur von 70°C. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-4 aufgeführt.

**Tabelle 4-4:** Kontaktwinkel des Underfillers auf verschiedenen Substraten bei 70°C

Substrat	Kontaktwinkel $\theta$ [°]
Glas	39
Lot	30
Chip-Passivierung	25
reines FR5	46
FR5 mit Flussmittelrückständen	32
Lötstopplack	36
Silizium	30



---

# 5 Softwareauswahl

Im Folgenden wird das Vorgehen zur Evaluierung eines geeigneten Software-Tools für die Untersuchung des Underfill-Prozesses beschrieben.

## 5.1 Kriterien für die Vorauswahl

Anhand der Anwendung ergeben sich folgende zwingend zu erfüllende Anforderungen an die Softwarepakete:

- Der Einfluss von Grenzflächenspannung und Kontaktwinkel muss realistisch wiedergegeben werden können.
- Das Fließen höherviskoser, nicht-newtonscher Medien muss simuliert werden können.
- Die Berechnung freier Oberflächen muss – auch bei sich stark vergrößernden Phasengrenzflächen – zuverlässig möglich sein.
- Das drucklose Befüllen von Kavitäten, d.h. das freie Einströmen ohne Unterstützung einer anliegenden Druckdifferenz, muss simuliert werden können.
- Es muss die Möglichkeit gegeben sein, eigene Stofffunktionen und Fließgesetze zu implementieren.
- Die Position des Fluideinlasses und die Einströmmenge müssen als Funktion der Zeit vorgegeben werden können.
- Es muss möglich sein, Profile für Geschwindigkeiten, Temperaturen, Drücke usw. zu definieren.

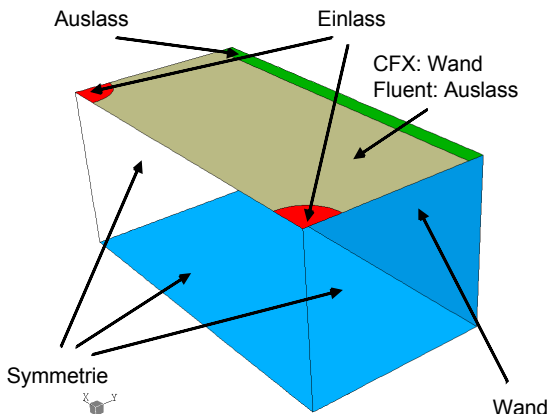
Abgesehen davon sollen die Rechnungen stabil laufen und in möglichst kurzer Zeit abgeschlossen werden können.

Die Untersuchungen sollen mittels einer kommerziell verfügbaren Software durchgeführt werden. Anhand der genannten Kriterien wird die Menge der möglichen Programme auf die beiden weit verbreiteten Strömungssimulationspakete Fluent 6.1 und CFX 5.5.1 eingegrenzt. Die Eignung der beiden Tools wird anhand zweier Testfälle untersucht.

## 5.2 Testfall 1: Befüllung einer Kavität über zwei Einlässe

Das Ziel bei diesem Testfall ist es, die Eignung der Programme für die Simulation des drucklosen Befüllens einer Kavität mit einer höherviskosen Flüssigkeit über mehrere Einlässe zu evaluieren. Bewertet wird, wie realistisch das Fließverhalten insgesamt wiedergegeben wird; insbesondere wird das Vereinigen der Teilströme und die Benetzung der Wandungen beurteilt.

Bei der zu befüllenden Kavität handelt es sich um einen quaderförmigen Behälter, der über zwei kreisrunde Öffnungen von oben mit Flüssigkeit befüllt werden soll. Der Quader ist 1,7 mm hoch, 7 mm breit und 3,4 mm tief, die Einströmflächen haben einen Radius von 0,35 mm. Um Rechenzeit zu sparen, werden die Symmetrien in der Geometrie ausgenutzt. Die Diskretisierung erfolgt über ein hexaedrisches Gitter mit etwa 20.000 Zellen. Das Rechengebiet ist unten und außen durch Wände begrenzt; in der oberen Fläche tritt das Fluid über die Einlassflächen mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit von 0,1 m/s in die Form ein. Der Rest der oberen Fläche wurde in Fluent als offen (mit einer Druckauslass-Randbedingung) modelliert, in CFX musste aus Gründen der numerischen Stabilität ein großer Teil der Fläche als Wand modelliert werden, der Druckausgleich erfolgt dabei nur über einen schmalen Streifen, der weit von den Einlässen entfernt liegt. Diese Maßnahme beeinflusst aber das grundsätzliche Simulationsergebnis nicht. Abbildung 5-1 zeigt schematisch die verwendete Geometrie und die jeweiligen Randbedingungen.



**Abbildung 5-1:** Testfall 1: Geometrie und Randbedingungen

## 5 Softwareauswahl

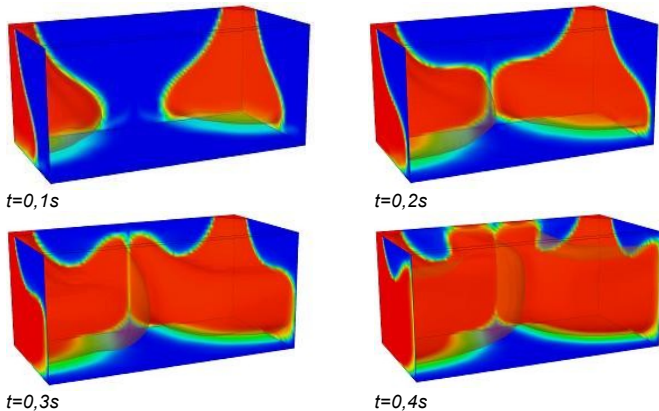
Die Luft wird in der Rechnung als inkompressibel betrachtet. Für das einströmende Medium wurde folgende Viskositätsfunktion vorgegeben (mit  $A = 12$ ,  $B = 39,5467$ ,  $C = 1,283376$ ):

$$\eta = \frac{A}{\left( \frac{1}{B^C} + \frac{A}{B \cdot \dot{\gamma}} \right)^{C-1}} \quad (5.1)$$

Das Fluid hat eine Dichte von  $1660 \text{ kg/m}^3$ ; die Grenzflächenspannung zur Luft beträgt  $0,025 \text{ N/m}$ , der Kontaktwinkel vom Fluid zur Wand liegt bei  $20^\circ$ .

### 5.2.1 Rechnung in CFX

Abbildung 5-2 zeigt das Fließverhalten in der Simulation mit CFX. Dargestellt ist die Verteilung des Phasenanteils  $\alpha$  des Fluids: Blau entspricht der reinen Luft ( $\alpha = 0$ ), rot der reinen Flüssigkeit ( $\alpha = 1$ ), die Phasengrenze liegt per Definition bei  $\alpha = 0,5$  und ist grün dargestellt. Das Fluid strömt in die Kavität ein, die Stränge treffen auf dem Behälterboden auf und breiten sich von dort aus annähernd radial aus. Beim Aufeinandertreffen der beiden Stränge vereinigen sich die Fließfronten nicht. Nach dem Zusammentreffen wachsen die Stränge nicht mehr in radialer Richtung, sondern nur noch in die Höhe. Selbst beim Erreichen der Behälteroberkante ist die Bodenfläche nur teilweise von der Flüssigkeit bedeckt. Zu keiner Zeit zeigen die Fließfronten eine Tendenz, miteinander zu verschmelzen.

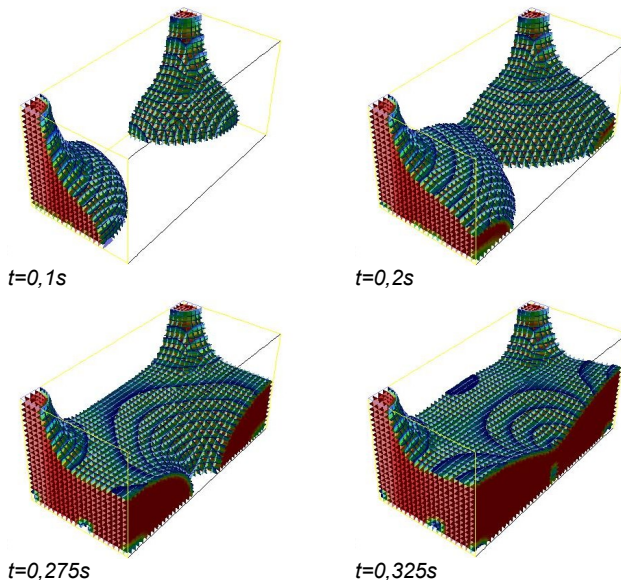


**Abbildung 5-2:** Testfall 1: Ergebnisse CFX (rot: reine Flüssigphase, blau: reine Gasphase, grün: Phasengrenze mit  $\alpha = 0,5$ )

### 5.2.2 Rechnung in Fluent

Die Ergebnisse mit Fluent sind in Abbildung 5-3 dargestellt. Blau entspricht hier der Phasengrenze zwischen Luft und Fluid ( $\alpha = 0,5$ ), das reine Fluid ist rot eingefärbt ( $\alpha = 1$ ).

Das Fluid strömt ein, die Stränge treffen auf dem Behälterboden auf und breiten sich von dort aus annähernd radial aus. Die beiden Stränge vereinigen sich beim Zusammentreffen und bilden somit eine zusammenhängende Fließfront. Der Behälterboden wird zuerst vollständig benetzt, dann erst steigt der Flüssigkeitsspiegel an. In den unteren Ecken des Rechenraums sammeln sich einzelne Luftblasen. Der Fließvorgang wird also physikalisch sinnvoll abgebildet.



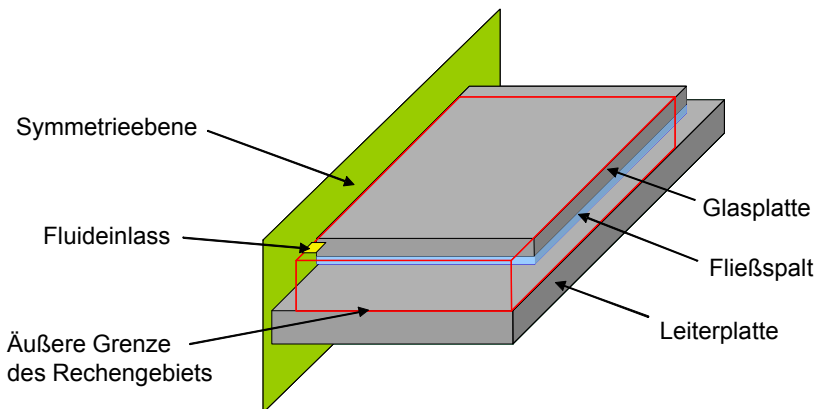
**Abbildung 5-3:** Testfall 1: Ergebnisse Fluent (rot: reine Flüssigphase, blau: Phasengrenze mit  $\alpha = 0,5$ )

### 5.3 Testfall 2: Kapillares Befüllen eines engen Spaltes

Mit diesem Testfall wird überprüft, ob sich die Programme zur Simulation des kapillarinduzierten Befüllens enger Spalte eignen, wie es beim Underfill-Prozess auftritt. Bewertet wird, wie realitätsnah der Fließvorgang nachgestellt wird.

Befüllt werden soll der Spalt zwischen einer ebenen Leiterplatte und einer ebenen Glasplatte mit Underfill-Material. Das Fluid wird als Tropfen dicht am Spalteintritt aufgegeben und wird dann durch Kapillarwirkung in den Spalt hineingezogen. Die Glasplatte hat die Abmessungen  $1 \times 10 \times 10 \text{ mm}^3$ , der Spalt ist  $50 \mu\text{m}$  hoch. Das Rechengebiet umfasst den eigentlichen Spalt sowie einen begrenzten Bereich des umgebenden Gebietes (3 mm Länge vor dem Spalteintritt, 1 mm Breite neben dem Spalt, jeweils bis zur Oberkante der Glasplatte).

Um Rechenkapazität einzusparen, wird die Symmetrie zur Mittelache genutzt und nur eine Hälfte der Geometrie betrachtet. Der Rechenraum ist über ein hexaedrisches Gitter diskretisiert, welches insgesamt rund 260.000 Zellen enthält. Die Dosierung des Fluids erfolgt über eine rechteckige Einlauffläche, durch die das Fluid während der ersten 0,2 s des Prozesses mit einer Einlaufgeschwindigkeit von 0,2 m/s einströmt. Geometrie und Randbedingungen sind in Abbildung 5-4 dargestellt.



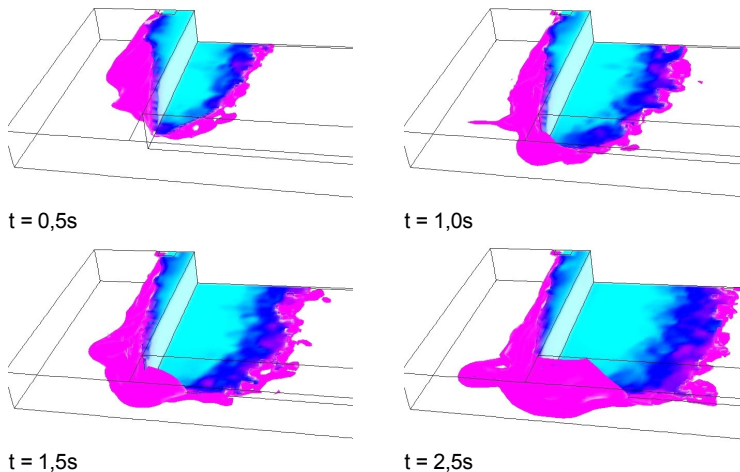
**Abbildung 5-4:** Testfall 2: Geometrie und Randbedingungen

Die Luft wird wieder als inkompressibles Medium angenommen. Für das Underfillmaterial wird eine Dichte von  $1400 \text{ kg/m}^3$  und eine konstante Viskosität von  $100 \text{ mPas}$  angenommen. Die Grenzflächenspannung des Underfillers gegenüber der Luft beträgt  $0,025 \text{ N/m}$ , der Kontaktwinkel zum Glas wird auf  $20^\circ$ , der Kontaktwinkel zur Leiterplatte auf  $40^\circ$  gesetzt.

### 5.3.1 Rechnung in CFX

Abbildung 5-5 zeigt die Ergebnisse der Simulation mit CFX. Die Phasengrenze zwischen Unterfiller und Luft ( $\alpha = 0,5$ ) ist in Pink dargestellt, der reine Unterfiller ( $\alpha = 1$ ) in Türkis.

Der Tropfen bildet von Anfang an keine „sinnvolle“ Oberfläche, es entstehen „Finger“, die um den Tropfen herum schwingen. Die Fließfront bewegt sich im Spalt nicht kontinuierlich in eine Richtung, sondern schwingt ebenfalls und bildet keine klare Kante aus. Der Übergangsbereich zwischen den Phasen ist sehr breit.



**Abbildung 5-5:** Testfall 2: Ergebnisse CFX (türkis: reiner Unterfiller, pink: Phasengrenze)

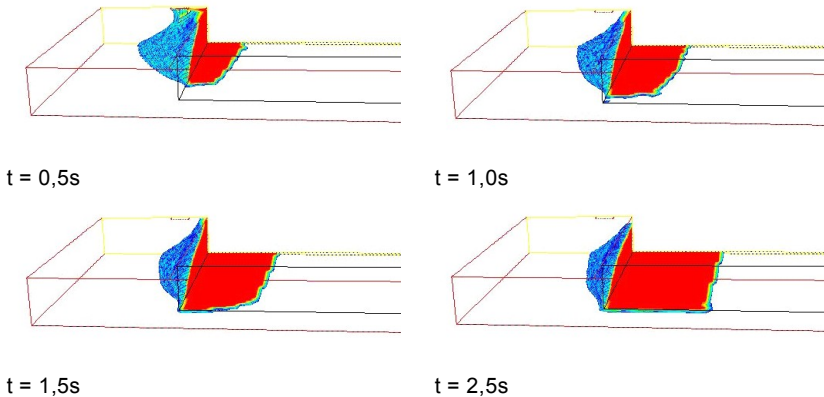
### 5.3.2 Rechnung in Fluent

Abbildung 5-6 zeigt die Simulationsergebnisse aus Fluent. Die Phasengrenze zwischen Unterfiller und Luft ist in Blau dargestellt ( $\alpha = 0,5$ ), der reine Unterfiller ( $\alpha = 1$ ) in Rot.

Der Unterfiller bildet einen kugelförmigen Tropfen, der bei Kontakt mit den Wänden die vorgegebenen Kontaktwinkel ausbildet. Die Fließfront, die sich im Spalt bewegt, ist gleichmäßig und bewegt sich gleichförmig. Bevor die Fließfront die ganze Spaltbreite einnimmt, treten quer zur Hauptfließrichtung teilweise erhöhte Geschwindigkeiten auf, da die Fließfrontlänge in dieser Richtung geringer ist und somit ein kleinerer Fließwiderstand auftritt. An der Glaskante

## 5 Softwareauswahl

bilden sich Flüssigkeitsmenisken aus, wie sie auch im Experiment zu beobachten sind.



**Abbildung 5-6:** Testfall 2: Ergebnisse Fluent (rot: reiner Underfiller, blau: Phasengrenze)

## 5.4 Bewertung

Im Hinblick auf die Funktionsfähigkeit der für die Füllsimulation benötigten physikalischen Modelle sind die Ergebnisse der Rechnungen mit Fluent denen der CFX-Rechnungen eindeutig überlegen. Daher werden alle folgenden Simulationen mit Fluent 6.1 durchgeführt.

## 5.5 Implementierung eigener Unterroutinen

Einige Anforderungen, die sich aus der Aufgabenstellung ergeben, wie z.B. die Darstellung der bewegten Dosiernadel, können nicht direkt in Fluent umgesetzt werden. Allerdings bietet das Programmpaket die Möglichkeit, eigene Unterroutinen, so genannte *User-Defined Functions* (UDFs), in Form von Makros an bestimmten Schnittstellen in den Programmcode einzubinden [ 55 ]. Der Ablauf bei der Berechnung eines einzelnen Zeitschritts und die Stellen, an denen die einzelnen Komponenten der im Folgenden verwendeten UDFs implementiert werden, ist im Anhang in Abbildung A-1 dargestellt. Die Beschreibung der verschiedenen UDFs erfolgt in den inhaltlich zugehörigen Kapiteln.

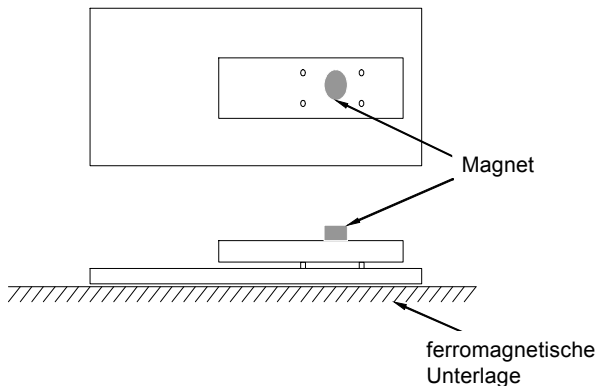
---

## 6 Grundsatzuntersuchungen

Vor der eigentlichen numerischen Untersuchung des Underfill-Prozesses werden einige Voruntersuchungen anhand der Basisgeometrie des ebenen, planparallelen Spaltes durchgeführt. Es wird ein Abgleich numerischer und experimenteller Ergebnisse durchgeführt. Dieser dient zum einen zur Überprüfung der erfassten Stoffwerte, zum anderen wird die Simulationemethode an sich geprüft. Der ebene Spalt eignet sich besonders gut als Testgeometrie, da die Testvehikel zur experimentellen Untersuchung einfach aufgebaut werden können, der numerische Aufwand relativ gering ist und die Strömungsvorgänge analytisch erfassbar sind (siehe Abschnitt 3.2.1). Des Weiteren wird der potentielle Einfluss der Füllstoffpartikel auf das Fließverhalten des Underfillers untersucht.

### 6.1 Fließtest am Glas-Testvehikel

Für die Evaluation der Fließgeschwindigkeit des Underfillers werden Testvehikel aus zwei parallel zueinander in definiertem Abstand fixierten Glasplatten verwendet. Die Fixierung erfolgt mittels eines mit Spacerpartikeln vom Durchmesser 50  $\mu\text{m}$  gefüllten UV-Klebstoffes. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 6-1 dargestellt.



**Abbildung 6-1:** Aufbau der Testvehikel

Um eine möglichst genaue Zuordnung der Fließlänge zur Fließdauer zu erhalten, wird die untere Glasplatte mit Millimeterpapier unterlegt. Der Underfiller wird mittels einer Zeit-Druck-Dosiereinheit an der vorderen Kante als Tropfen appliziert. Zur Auswertung wird der gesamte Fließvorgang auf Video



aufgezeichnet. Sobald sich eine gerade Fließfront ausgebildet hat – in der Regel etwa zwei bis drei Millimeter von der Vorderkante entfernt – wird an jeder Millimetermarke die zugehörige Fließdauer erfasst.

### 6.2 Simulation des Fließens im ebenen Spalt

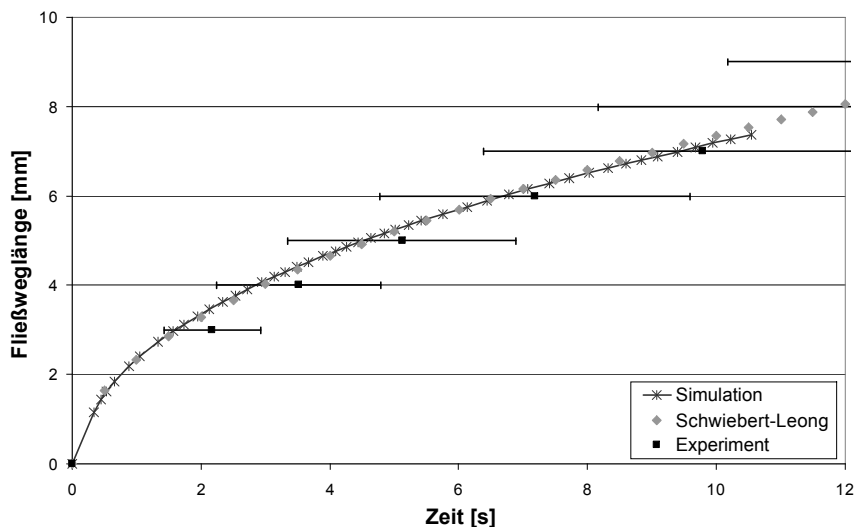
Der Fließvorgang im Glas-Testvehikel wird simuliert und die Ergebnisse mit denen aus dem Experiment verglichen. Einerseits soll damit gezeigt werden, dass die gemessenen Stoffeigenschaften im Hinblick auf das kapillare Fließen tatsächlich relevant sind; andererseits soll die Eignung der Software überprüft werden, mit Hilfe der gemessenen Stoffparameter ohne weitere Anpassung qualitativ richtige Ergebnisse zu liefern.

Der Simulation wird die in Abbildung 5-4 vorgestellte Geometrie zugrunde gelegt. Die Randbedingungen weichen allerdings insofern ab, dass anstelle der Zugabe des Underfillers mittels einer Dosieröffnung der Underfiller zum Zeitpunkt  $t = 0 \text{ s}$  an der Vorderkante des ebenen Spaltes in Form eines Flüssigkeitsdepots im Rechenggebiet vorliegt. Um Rechenzeit zu sparen, wird auch hier die Symmetrie des Rechengebiets ausgenutzt und nur der halbe Fließspalt gerechnet. Die Rechnung erfolgt unter Annahme von Isothermie. Die schergeschwindigkeitsabhängige Viskosität wird wie in Abschnitt 4.3 beschrieben modelliert und mittels einer benutzerdefinierten Unteroutine (siehe Abschnitt A.3 im Anhang) implementiert.

Für die Messung der Fließlänge in Abhängigkeit von der Zeit werden die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Fließtestvehikel mit einer Fließspalthöhe von  $50 \mu\text{m}$  verwendet. Das Testvehikel wird auf  $70^\circ\text{C}$  temperiert. In Abbildung 6-2 sind die experimentellen und numerischen Ergebnisse zusammengestellt. Aufgetragen ist die Fließlänge im ebenen Spalt über der Fließdauer. Bei den experimentellen Ergebnissen sind die mittlere Zeit, die zum Erreichen einer Fließmarke benötigt wird, und die jeweiligen Standardabweichungen der Messergebnisse aufgetragen. Neben dem Simulationsergebnis wird der analytisch ermittelte Fließweg-Verlauf nach Schwiebert / Leong nach Gleichung ( 3.10 ) mit einer konstanten Viskosität aufgetragen, die im Carreau-Yasuda-Ansatz mit den in Tabelle 4-3 aufgeführten Parametern der mittleren Schergeschwindigkeit im Fließspalt von  $25 \text{ s}^{-1}$  entspricht.

Bei den experimentellen Ergebnissen treten starke Streuungen auf. Diese lassen sich durch lokale Störstellen im Fließspalt, verursacht durch Unebenheiten in den Oberflächen oder evtl. vorliegende lokale Verschmutzungen erklären, durch die die Fließfront abgebremst wird. Das Ergebnis der Simulation liegt an allen Messstellen nah am Mittelwert und innerhalb des Streubereichs der

Experimente. Somit kann das reale Fließverhalten mit den ermittelten Kennwerten numerisch gut nachgestellt werden.



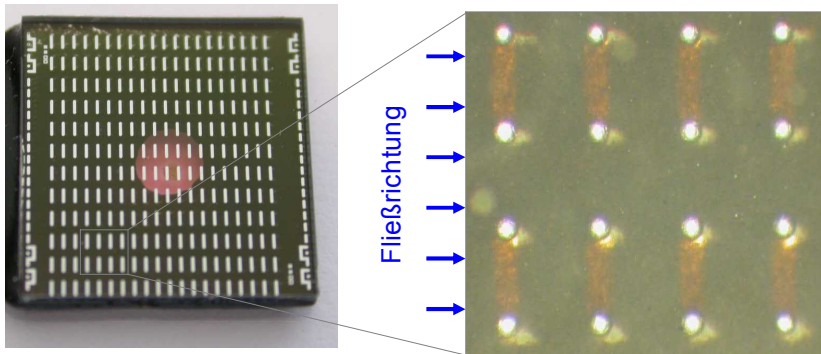
**Abbildung 6-2:** Fließlänge im ebenen Spalt über der Zeit: Vergleich von Simulation, analytischer Betrachtung und Experiment

Die im Underfiller enthaltenen Füllstoffpartikel haben einen großen Einfluss auf das Fließverhalten des Underfillers. Für monodisperse, homogen verteilte Partikel kann dieser Einfluss wie in Abschnitt 4.3 vereinfacht in die Viskositätsfunktion des gesamten Stoffsystems integriert werden. Oft ergeben sich aber auch Situationen, in denen die Partikel im System ungleichmäßig verteilt vorliegen oder sich gegenseitig beeinflussen. Im Folgenden werden zwei dieser Phänomene, die unter Umständen beim Underfill-Prozess relevant werden können, beschrieben und bewertet.

### 6.3 Innerer Strukturaufbau

Wie schon in Abschnitt 4.3 dargestellt, kann bei der Messung der Viskosität bei kleinen Schergeschwindigkeiten ein starker Anstieg der Viskositätswerte mit der Zeit festgestellt werden (siehe Abbildung 4-1). Um dieses Phänomen besser zu verstehen und seine Relevanz für die Spaltbefüllung zu bewerten, werden Fließversuche an Glaschips durchgeführt. Die Glaschips sind mit einem flächigen Muster von Lotkugeln versehen und werden für diese Untersuchung mittels eines Klebpunkts auf einer ebenen Glasfläche fixiert. Der Underfiller wird an der

Chipkante appliziert und der Fließvorgang mittels einer Videokamera mit Makro-Objektiv aufgezeichnet. Abbildung 6-3 zeigt einen vollständig unterfüllten Glaschip (links) sowie in einem Ausschnitt den Nahbereich der Bumps dieses Chips (rechts).



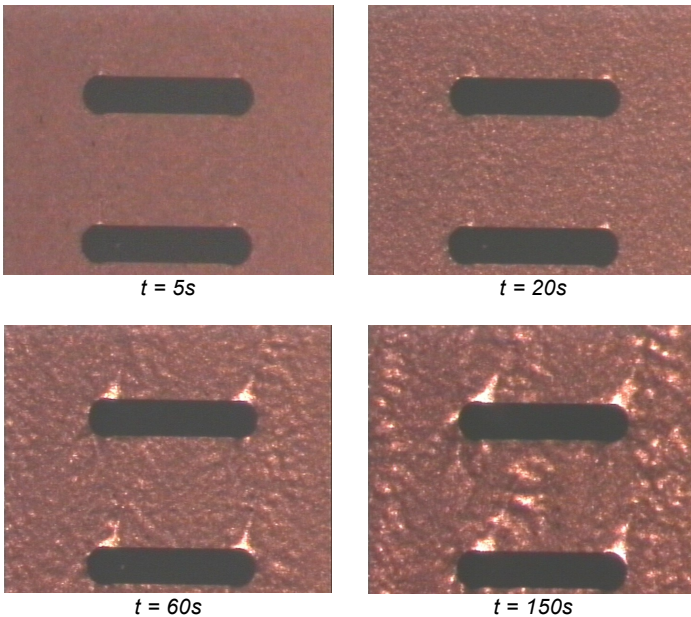
**Abbildung 6-3:** Glaschip zur Untersuchung des inneren Strukturaufbaus im Underfiller

Hinter den Bumps entstehen keilförmige transparente Bereiche, die sich mit der Zeit verstärken und die auf den Aufbau innerer Strukturen im Underfiller hindeuten.

Um diesen Vorgang zu untersuchen, wird der Chip in einem ersten Schritt nur teilweise unterfüllt. Das Verhalten des Stoffes und der darin enthaltenen Füllstoffpartikel wird sowohl während des Fließvorgangs als auch im ruhenden Zustand beobachtet. Anschließend wird in einem weiteren Schritt erneut Underfiller appliziert, um den Übergang vom ruhenden zum wieder bewegten System zu beobachten.

In der Phase des Fließvorgangs, in der der Chipspalt noch nicht vollständig gefüllt und die Fließgeschwindigkeit entsprechend hoch ist, kann man an den Bumps keine Anzeichen innerer Strukturen erkennen (Abbildung 6-4,  $t = 5$  s). Ist der Spalt, so weit es die zudosierte Menge an Underfiller zulässt, gefüllt, reduziert sich die Fließgeschwindigkeit erheblich. Solange jedoch die Fluidspiegel nicht im Gleichgewicht sind, kommt es auch nach dem Füllvorgang zu kleinen konvektiven Bewegungen (Abbildung 6-4,  $t = 20$  s). In dieser Phase des Fließvorgangs entstehen an den Staupunkten der Bumps kurze kettenförmige Strukturen, die mit der Zeit länger und dichter werden. Diese Ketten breiten sich an den Bumps strahlenförmig in alle Richtungen aus. In Fließrichtung hinter den Bumps entstehen keilförmige ungefüllte Zonen, die im Durchlicht hell

erscheinen. Wie Abbildung 6-4 zeigt, wachsen diese Bereiche mit der Zeit an ( $t = 60$  s bzw.  $t = 150$  s).



**Abbildung 6-4:** Innerer Strukturaufbau in verschiedenen Stadien des Unterfüllvorgangs

Neben dem Entstehungsprozess der inneren Strukturen muss noch die Frage untersucht werden, ob es sich um einen reversiblen oder einen irreversiblen Vorgang handelt. Im reversiblen Fall können sich die Strukturen z.B. aufgrund mechanischer Wechselwirkungen ausbilden. Ist der Entstehungsvorgang irreversibel, kann er z.B. durch das Einsetzen der Härtingsreaktion verursacht worden sein. Um diese Frage zu klären, wird an der Kante des teilunterfüllten Chips nach einer Ruhephase in der Größenordnung mehrerer Minuten eine zweite Portion Unterfüller zugegeben. Durch den Nachschub an Fluid wird das kapillare Fließen im Chipspalt fortgesetzt, die Fließgeschwindigkeiten erhöhen sich beträchtlich. Die Strukturen werden von den Bumps abgelöst und mit der Strömung mitgeschleppt. Durch die Scherung im Fluid bzw. durch die Wirkung der Bumps als feststehendes Hindernis brechen die Strukturen auf und verteilen sich im Fluid. Dieser Aufbau innerer Strukturen wie auch deren Auflösung lässt sich durch Verringern bzw. Erhöhen der Fließgeschwindigkeit im Spalt beliebig

oft reproduzieren. Damit steht fest, dass es sich tatsächlich um einen reversiblen Vorgang handelt, wie er auch bei der Viskositätsmessung beobachtet wird.

Das Basisharz des Underfillers besteht fast ausschließlich aus kurzkettigen Molekülen. Daher ist es unwahrscheinlich, dass Wechselwirkungen zwischen den Molekülketten wie Verschlaufungen die Ursache der entstehenden Strukturen darstellen. Vielmehr ist die Ursache der Strukturausbildung in der Wechselwirkung zwischen Füllstoffpartikeln unter Einfluss des Scherfeldes zwischen den Bumps zu suchen. Im Scherfeld zwischen zwei Bumps bewegen sich Partikel auf benachbarten Bahnlinien unterschiedlich schnell. Aufgrund dieser Relativgeschwindigkeit bewegen sich die Teilchen auseinander, es kommt zu keiner Strukturausbildung. Strukturen aus zwei oder mehreren Partikeln können sich nur dann ausbilden, wenn die Anziehungskräfte zwischen den Partikeln den Einfluss die Strömungskräfte überwiegen, also bei geringen Relativgeschwindigkeiten.

Die inneren Strukturen entstehen also erst nach der im Hinblick auf die Ausbildung von Fließblasen relevanten Phase. Zudem hat sich diese Strukturausbildung als reversibel erwiesen. Daher kommt es auch dann nicht zu Störungen des Fließvorgangs, wenn der Underfiller in mehreren Zügen appliziert wird. Diese Form der Prozessführung wird beispielsweise bei großen Chips angewandt, bei denen die benötigte Menge des Underfillers nicht auf einmal aufgebracht werden kann. Somit ist die Beschreibung des Fließverhaltens mittels der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Carreau-Yasuda-Funktion gerechtfertigt.

### 6.4 Partikelmigration

Neben dem in Abschnitt 6.3 beschriebenen Effekt der Strukturausbildung ist aus der Literatur ein weiterer Mechanismus bekannt, über den Füllstoffpartikel einen Einfluss auf das Fließverhalten des Underfillers haben können (z.B. [ 60 ], [ 2 ]). Auch im vollständig dispergierten Zustand beeinflussen Partikel das Fließverhalten über die Viskosität des gesamten Systems.

In der Regel wird davon ausgegangen, dass die Partikel gleichmäßig über das gesamte Fluid verteilt vorliegen. Tatsächlich kann es aber in der Praxis zu starken Abweichungen von dieser Gleichverteilung kommen. In Strömungen konzentrierter Suspensionen mit hohem Schergefälle treten oft lokale Unterschiede in der Partikelkonzentration auf. Aufgrund von Partikel-Partikel-Wechselwirkungen sowie der Interaktion der Partikel mit der umgebenden Fluidphase ergibt sich ein Partikelstrom von Bereichen hoher Schergeschwindigkeiten zu Bereichen niedriger Schergeschwindigkeiten sowie von Bereichen hoher Partikelkonzentration zu Bereichen niedriger Partikelkonzentration [ 61 ]. Man spricht in diesem Zusammenhang von *Partikelmigration*. Des Weiteren kann

es zur Sedimentation oder zum Aufschwimmen von Partikeln aufgrund von Dichteunterschieden zwischen Feststoff und Fluidmatrix kommen.

### 6.4.1 Herleitung der Bilanzgleichungen zur Partikelmigration

Einen allgemeinen theoretischen Ansatz zur Beschreibung des Phänomens der Partikelmigration lieferten Zhang und Acrivos [ 2 ]. Ausgangspunkt ist eine Suspension sphärischer Kugeln mit einheitlichem Radius in einem newtonschen Trägermedium. Der lokale Volumenanteil der Partikel in der Suspension wird mit  $\phi$  bezeichnet und im Folgenden Partikelkonzentration genannt. Statt nun die Wechselwirkungen zwischen den Partikeln bzw. die Wechselwirkungen zwischen Partikeln und Strömungsfeld explizit zu modellieren, wird die Suspension insgesamt als newtonsches Medium mit konzentrationsabhängigen effektiven Eigenschaften betrachtet.

Gleichung ( 6.1 ) beschreibt die Verteilung der Partikelkonzentration  $\phi$  in der Suspension:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \underline{\nabla} \cdot (\rho \underline{v} \phi) = \underline{\nabla} \cdot (D_C \underline{\nabla} \phi) + \underline{\nabla} \cdot (D_S \underline{\nabla} \dot{\gamma}) + S. \quad ( 6.1 )$$

Im ersten Term ist die instationäre Änderung der Partikelkonzentration dargestellt, Term 2 beschreibt den konvektiven Transport. Die beiden nächsten Terme beschreiben jeweils einen diffusiven Transport der Partikelkonzentration. Der erste der beiden Diffusionsterme beschreibt den diffusiven Transport aufgrund von Konzentrationsunterschieden, der zweite stellt den diffusiven Transport in Abhängigkeit des Schergeschwindigkeitsgefälles dar; durch diesen Term unterscheidet sich Gleichung ( 6.1 ) von der allgemeinen Bilanzgleichung ( 3.22 ). Der letzte Term von Gleichung ( 6.1 ) beschreibt schließlich die Sedimentation bzw. den Auftrieb der Partikel in der Suspension.

$D_C$  ist der Diffusionskoeffizient des Terms, der die konzentrationsabhängige Diffusion beschreibt:

$$D_C = a^2 \dot{\gamma} \left[ \frac{1}{3} \phi^2 \left( 1 + \frac{1}{2} e^{8.8\phi} \right) + 0.6 \phi^2 \frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \right]. \quad ( 6.2 )$$

$\eta$  bezeichnet die Viskosität der Suspension,  $a$  ist der Partikelradius. Die Berechnung der Suspensionsviskosität in Abhängigkeit von der vorhandenen Partikelkonzentration erfolgt mittels eines empirischen Ansatzes von Leighton und Acrivos [ 61 ]:

$$\eta = \eta_1 \left( 1 + \frac{1.5\phi}{1 - \frac{\phi}{\phi_m}} \right)^2. \quad (6.3)$$

$\eta_1$  ist die Viskosität der reinen Flüssigkeit.  $\phi_m$  steht für die maximale Partikelkonzentration, bei der eine Suspension noch fließfähig ist. Der Betrag dieser maximalen Partikelkonzentration wird in der Literatur mit Werten zwischen 0,58 (z.B. Leighton und Acrivos [ 61 ]) und 0,68 (z.B. Krieger [ 62 ]) angegeben.

Der Diffusionskoeffizient  $D_S$  der schergeschwindigkeitsinduzierten Diffusion berechnet sich zu

$$D_S = 0,6a^2\phi^2. \quad (6.4)$$

Der Quellterm S lautet:

$$S = \frac{\partial}{\partial z} \left( -\frac{2}{9} \frac{a^2(\rho_2 - \rho_1)}{\eta_1} f(\phi)\phi g_z \right). \quad (6.5)$$

$\rho_1$  ist die Dichte des reinen Fluids,  $\rho_2$  die Dichte der Partikel. Über die Funktion f wird die gegenseitige Behinderung der Partikel im Strömungsfeld berücksichtigt:

$$f \cong \frac{\eta_1}{\eta} (1 - \phi). \quad (6.6)$$

Eine Übertragung dieses allgemein für hochkonzentrierte Suspensionen gültigen Modells auf die Anwendung des Underfill-Prozesses wurde z.B. in [ 63 ] und [ 64 ] vorgestellt. Darin werden die Grundgleichungen aus dem Ansatz von [ 2 ] beibehalten und um einen Term zur Berücksichtigung der Kapillarkraft erweitert.

### 6.4.2 UDF zur Partikelmigration

Im Folgenden wird die Implementierung des Migrationsansatzes in Fluent mittels einer benutzerdefinierten Unterroutine (UDF) erklärt. Das Modell weicht vom Ansatz von Zhang und Acrivos [ 2 ] dadurch ab, dass nicht die Viskosität des reinen Fluids, sondern die Viskosität der homogenen Suspension als Ausgangsgröße dient. Außerdem wird eine Abhängigkeit der Gesamtviskosität von der Schergeschwindigkeit zugelassen, wobei der Einfluss der Partikel als nicht von der Schergeschwindigkeit abhängig angenommen wird. Statt der real vorliegenden polydispersen Partikelgrößenverteilung werden vereinfacht

gleichförmige sphärische Partikel betrachtet, deren Durchmesser und Konzentration bekannt sind.

Die Implementierung in Fluent erfolgt über eine Transportgleichung für benutzerdefinierte Skalare (UDS), die zusätzlich zu den üblichen Bilanzgleichungen im Rechengebiet gelöst wird. Die allgemeine Form einer solchen skalaren Transportgleichung entspricht der allgemeinen Konvektions-Diffusions-Gleichung, wie sie in Gleichung ( 3.22 ) dargestellt ist.

Da die Form des Migrationsmodells nicht der der allgemeinen Konvektions-Diffusions-Gleichung entspricht, sind bei der Implementierung einige Anpassungen vorzunehmen. Die allgemeine Transportgleichung für die benutzerdefinierte skalare Größe  $\phi$  sieht nur einen Diffusionsterm vor, der eine Funktion des Gradienten der Konzentration von  $\phi$  ist. Der Term zur Berechnung der scher- geschwindigkeitsabhängigen Diffusion von  $\phi$  wird daher einfach in den allgemeinen  $\phi$ -Quellterm integriert, für den keine formalen Vorgaben bestehen. Gleichung ( 6.1 ) wird somit zu

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \underline{\nabla} \cdot (\rho\underline{v}\phi) = \underline{\nabla} \cdot (D_C \underline{\nabla}\phi) + S^* \quad ( 6.7 )$$

mit

$$S^* = S + \underline{\nabla} \cdot (D_S \underline{\nabla}\dot{\gamma}). \quad ( 6.8 )$$

Zur Berechnung der konzentrationsabhängigen Diffusion genügt es, den Diffusionskoeffizienten  $D_C$  zu berechnen und an den Solver zu übergeben, die Berechnung der Gradienten erfolgt dann im Rahmen des Lösungsprozesses.

Aus Gründen der numerischen Stabilität wird der zulässige Wertebereich von  $\phi$  auf Werte zwischen 0 und 0,55 eingegrenzt, die Partikelkonzentration erreicht somit nie die gesetzte maximale Partikelkonzentration  $\phi_m$  von 0,58.

Der Quellcode der UDF ist im Anhang A.4 aufgeführt.

#### 6.4.2.1 Stofffunktionen

Die konzentrationsabhängige Viskosität berechnet sich aus der von der Schergeschwindigkeit abhängigen Viskosität der reinen Harzmatrix und der Partikelkonzentration. Die Viskosität der reinen Harzmatrix wird hier aus der gemessenen Viskositätsfunktion (siehe Abschnitt 4.3) über den Ansatz aus Gleichung ( 6.3 ) mit der mittleren Partikelkonzentration im Underfiller rückgerechnet. Dieses Vorgehen ist zulässig, da bei der Viskositätsmessung im



## 6 Grundsatzuntersuchungen

---

Rotationsrheometer eine konstante Schergeschwindigkeit vorherrscht und somit die Partikel in der Suspension homogen verteilt vorliegen.

Die resultierenden Carreau-Yasuda-Parameter sind in Tabelle 6-1 aufgeführt.

**Tabelle 6-1:** Carreau-Yasuda-Parameter der reinen Harzmatrix

$\eta_{\infty}$	0,0255 Pas
$\eta_0$	0,1755 Pas
$\lambda$	0,4638 s
a	0,8658
n	0,3169

Die konzentrationsabhängige Dichte berechnet sich zu

$$\rho = \rho_F + (\rho_S - \rho_F)\phi. \quad (6.9)$$

### 6.4.2.2 Konzentrationsabhängige Diffusion

Zur Berechnung des Diffusionskoeffizienten der konzentrationsabhängigen Diffusion  $D_C$  müssen zuerst die Schergeschwindigkeit sowie die Abhängigkeit der Viskosität von der Partikelkonzentration ermittelt werden.

Der größte Einfluss der Scherung liegt in z-Richtung vor, der Höhenkoordinate des Spalts. Daher reicht es aus, die Schergeschwindigkeit über die Geschwindigkeitsgradienten der Hauptgeschwindigkeitskomponenten in z-Richtung zu definieren:

$$\dot{\gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)^2}. \quad (6.10)$$

Die Berechnung der Ableitung der Viskosität nach der Partikelkonzentration erfolgt einfach anhand von Gleichung ( 6.3 ).  $D_C$  selbst berechnet sich nach der in Gleichung ( 6.2 ) dargestellten Beziehung.

### 6.4.2.3 Kumulierter Quellterm

Wie bei der Berechnung des Diffusionskoeffizienten  $D_C$  werden zunächst die Schergeschwindigkeit und die Ableitung der Viskosität nach der Partikelkonzentration bestimmt.

Gleichung ( 6.6 ) und ( 6.9 ) in Gleichung ( 6.5 ) eingesetzt und umgeformt ergibt

$$S = \frac{2}{9} a^2 g_z \rho_1 \left( \frac{1}{\eta} \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{2\phi}{\eta} \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\phi - \phi^2}{\eta^2} \frac{\partial \eta}{\partial z} \right) + \frac{2}{9} a^2 g_z (\rho_2 - \rho_1) \left( \frac{2\phi}{\eta} \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{3\phi^2}{\eta} \frac{\partial \phi}{\partial z} - \frac{\phi^2 - \phi^3}{\eta^2} \frac{\partial \eta}{\partial z} \right) \quad ( 6.11 )$$

Die Ableitung der Viskosität nach der Koordinate z lässt sich mit Hilfe der folgenden Beziehung berechnen:

$$\frac{\partial \eta}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad ( 6.12 )$$

Der zweite Summand aus Gleichung ( 6.8 ) wird zu

$$0,6a^2 \rho_1 \left[ 2\phi \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial z} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \phi^2 \left( \frac{\partial^2 \dot{\gamma}}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \dot{\gamma}}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 \dot{\gamma}}{\partial z^2} \right) \right] + 0,6a^2 (\rho_2 - \rho_1) \left[ 3\phi^2 \frac{\partial \dot{\gamma}}{\partial z} \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial \phi}{\partial y} + \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + \phi^3 \left( \frac{\partial^2 \dot{\gamma}}{\partial x \partial z} + \frac{\partial^2 \dot{\gamma}}{\partial y \partial z} + \frac{\partial^2 \dot{\gamma}}{\partial z^2} \right) \right] \quad ( 6.13 )$$

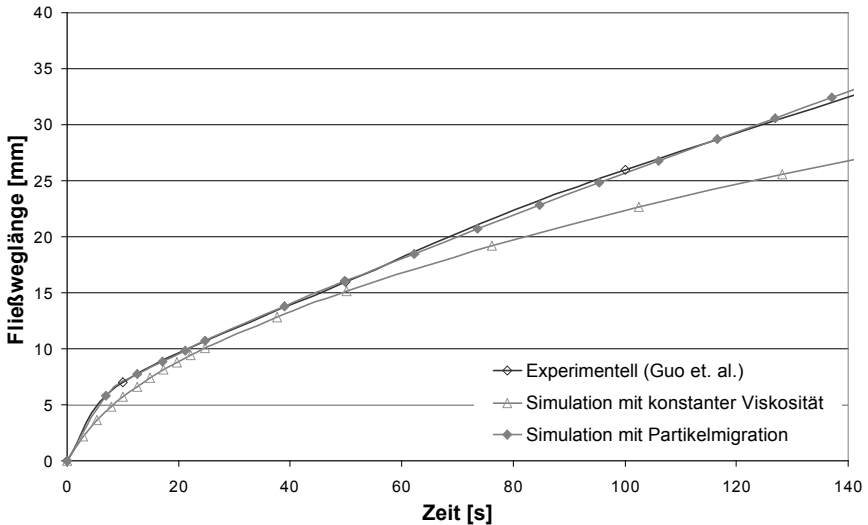
### 6.4.3 Verifikation

Das vorgestellte Migrationsmodell wurde z.B. von Tso et. al [ 65 ] anhand des Fließvorgangs einer Testsuspension in einem ebenen Spalt überprüft. Das Testmaterial ist eine Suspension von Polystyrolpartikeln in Propylenglykol mit einer Partikelkonzentration von  $\phi = 0,45$  und einem Partikelradius von  $a = 5 \mu\text{m}$ . Da Polystyrol und Propylenglykol die gleiche Dichte haben, wird damit die Sedimentation des Füllstoffs verhindert. Das Testvehikel ist ein 60 mm langer Spalt mit einer Höhe von  $254 \mu\text{m}$ . Die simulierten Geschwindigkeiten der Modelle mit und ohne Partikelmigration wurden mit den im Experiment von Guo et. al. [ 63 ] ermittelten Geschwindigkeiten verglichen. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung des Experiments mit dem Modell mit Partikelmigration, die resultierenden Geschwindigkeiten aus dem homogenen Modell liegen deutlich darunter.

Um die hier vorgestellte Implementierung dieses Modells in Fluent zu überprüfen werden ebenfalls die experimentellen Ergebnisse von Guo [ 63 ] numerisch nachgestellt. Allerdings wurde in [ 65 ] fälschlicherweise die Viskosität des reinen Propylenglykols  $\eta_0$  mit 0,724 Pas angegeben. Dieser Wert entspricht vielmehr der Viskosität der homogenen Suspension bei der Partikelkonzentration

## 6 Grundsatzuntersuchungen

von  $\phi = 0,45$ . In einer anderen Veröffentlichung einer der Autoren von [ 65 ] wurde für das gleiche Stoffsystem die Viskosität des Propylenglykol mit 0,045 Pas statt 0,724 Pas angegeben (Lehmann et. al. [ 66 ]). Diese Werte werden für den Test des in Fluent implementierten Partikelmigrationsmodells verwendet.



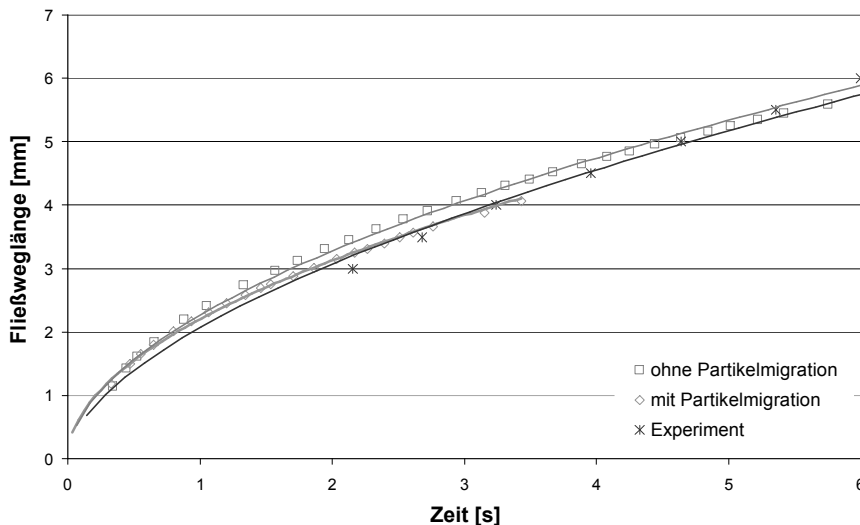
**Abbildung 6-5:** Simulation des Fließens einer Testsuspension im ebenen Spalt mit und ohne Berücksichtigung der Partikelmigration. Vergleich des berechneten Zusammenhangs von Fließweglänge und Zeit mit experimentellen Ergebnissen von Guo et. al. [ 63 ].

Die in Abbildung 6-5 gezeigten Ergebnisse werden wie in [ 66 ] mit der maximalen Partikelkonzentration von  $\phi_m = 0,68$  aus dem Krieger-Ansatz ermittelt. Die unter Berücksichtigung der Partikelmigration bestimmte numerische Fließwegkurve zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem experimentellen Verlauf.

### 6.4.4 Anwendung auf den Modell-Underfiller

Der Einfluss der Partikelmigration auf die Viskosität und somit auf das Fließverhalten eines Underfillers ist umso größer, je höher die Füllstoffkonzentration im System ist. Der in dieser Arbeit verwendete Modell-Underfiller ist mit einem Füllstoffgehalt von 16 Vol-% verhältnismäßig gering gefüllt, entsprechend klein ist der Einfluss der Partikelmigration auf das Fließverhalten.

In Abbildung 6-6 werden die simulierten Fließgeschwindigkeiten im ebenen Spalt mit und ohne Partikelmigrationsmodell mit einem experimentellen Fließwegverlauf verglichen.



**Abbildung 6-6:** Simulation des Fließens der Modell-Underfillers im ebenen Spalt mit und ohne Berücksichtigung der Partikelmigration. Vergleich des berechneten Zusammenhangs von Fließweglänge und Zeit mit experimentellen Ergebnissen

Wegen des nachgewiesenermaßen geringen Einflusses der Partikelmigration auf das Fließverhalten des Modell-Underfillers werden die weiteren numerischen Untersuchungen mit dem homogenen Viskositätsmodell durchgeführt.

---

## 7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips

Aus der Literatur sind diverse Arbeiten zur numerischen Simulation des Fließens von Underfillern bekannt. Im einfachsten Fall wurden Füllvorgänge mit einphasigen Strömungen in 2D oder über Mittelflächen-Ansätze (*Hele-Shaw*) simuliert (z.B. Han et. al. [ 67 ], Young et. al. [ 68 ] - [ 70 ]). Des Weiteren wurden einphasige Strömungen in 3D sowohl mittels FEM (z.B. Lai et. al. [ 47 ]) als auch mittels CFD untersucht (z.B. Venkataraman [ 71 ]). Das Ziel dieser Untersuchungen war jeweils, die Beeinflussung der Fließgeschwindigkeit des Underfillers bzw. der Füllzeit des Chipspaltes durch Stoff- und Geometrie Größen sowie Prozessparameter zu quantifizieren. Eine Aussage zur Qualität der Füllung kann mit Hilfe dieser Ansätze nicht gemacht werden. Auch unter Berücksichtigung der Luft als zweite Phase wurde vereinfacht mit 2D- oder Hele-Shaw-Ansätzen gearbeitet (z.B. Ni et. al. [ 72 ], Tay et. al. [ 73 ]), dabei wurden aber ebenfalls nur die Einflüsse von Prozessparametern und Stoffeigenschaften auf die Fließgeschwindigkeit untersucht.

Young et. al [ 74 ] stellten die Simulation des Underfill-Prozesses mittels des 3D-FEM-Programms PLICE-CAD vor. Die freie Oberfläche des Underfillers wurde dabei über einen VOF-Ansatz verfolgt, der Underfiller wurde als homogenes newtonsches Medium approximiert. Betrachtet wurde ein Ausschnitt aus einem Area Array Flip Chip, in dem die Lotpumps als abgeschnittene Kugeln modelliert wurden und das Harz an einer oder mehreren Kanten in den Spalt eintrat. Das grundsätzliche Fließverhalten des Underfillers zwischen den Bumps wurde gut wiedergegeben. Eine weitere Untersuchung des Underfill-Prozesses mit der Software PLICE-CAD wurde von Nguyen et. al [ 75 ] vorgestellt. Modelliert wurde ein kompletter Area Array Flip Chip mit 25x25 Bumps inklusive des Chip-Außenbereiches. Das Fließen des Underfillers im Innenbereich des Spaltes wurde gut nachgebildet, der Kanteneffekt (siehe Abschnitt 7.2.5) trat allerdings in der Simulation überhaupt nicht auf. Auch Chang et. al. [ 76 ] stellten einen Finite-Volumen-basierten Ansatz zur Underfill-Simulation vor. Die Reaktionskinetik sowie die Abhängigkeit der Viskosität von der Schergeschwindigkeit wurden mit berücksichtigt. Untersucht wurden der Einfluss der Prozesstemperaturen, der Anordnung der Bumps und der Anzahl der Kanten, an denen der Underfiller in Form eines Depots vorgegeben wird, auf die Fließfrontverläufe und die resultierenden Füllzeiten.

Zumindest mit den vorgestellten 3D-Methoden wäre es zwar denkbar, die Entstehung von Fließblasen zu simulieren; dies wurde aber in keiner der vorgestellten Arbeiten durchgeführt.

## **7.1 Einflussgrößen im Underfill-Prozess und deren Zusammenhänge**

Die Parameter, die das Fließverhalten des Underfillers im Prozess beeinflussen, können prinzipiell in die Kategorien Stoffparameter, Geometrieparameter und Prozessparameter unterteilt werden.

### **7.1.1 Stoffparameter**

Die für das kapillare Fließen relevanten Stoffgrößen sind, wie in Kapitel 4 aufgeführt, die Viskosität des Underfillers, die Grenzflächenspannung des Underfillers gegenüber Luft sowie der Kontaktwinkel des Underfillers gegenüber den beteiligten Feststoffoberflächen. Diese Größen hängen wiederum alle von der Prozessgröße Temperatur ab. Die Viskosität ist zusätzlich eine Funktion der Schergeschwindigkeit, welche allerdings eine resultierende Feldgröße des Systems ist und nicht von außen vorgegeben werden kann. In der vorliegenden Untersuchung wird immer derselbe Underfiller verwendet, d.h. der Einfluss der Stoffparameter wird nicht betrachtet.

### **7.1.2 Geometrieparameter**

Zu den Geometrieparametern der peripher kontaktierten Flip Chips gehören die Spalthöhe unter dem Chip, Tiefe, Breite und Form des Lötstopplackgrabens sowie die Höhe und der Verlauf der Leiterbahnen unter dem Lötstopplack, welche eine Welligkeit der Lötstopplackoberfläche verursachen. Im Hinblick auf die Bumps ist der *Pitch* (Bumpabstand) zu nennen, die Anzahl der Bumps und deren Abstand von der Chipkante, ihre Höhe und ihr Durchmesser sowie der freie Querschnitt zwischen den Bumps, der durchflossen wird.

In Abbildung 7-1 sind die wichtigsten Geometrieparameter dargestellt. Diese Größen hängen wiederum teilweise von Parametern des früher stattfindenden Herstellungsprozesses der Bumps auf dem Wafer ab, wie z.B. vom gedruckten Lotvolumen und der Zusammensetzung der verwendeten Lotpaste, da das resultierende Lotvolumen vom flüchtigen Anteil der Lotpaste abhängt. Des Weiteren spielen Chipfläche und -Gewicht sowie die Größe der Padöffnungen am Chip eine Rolle.

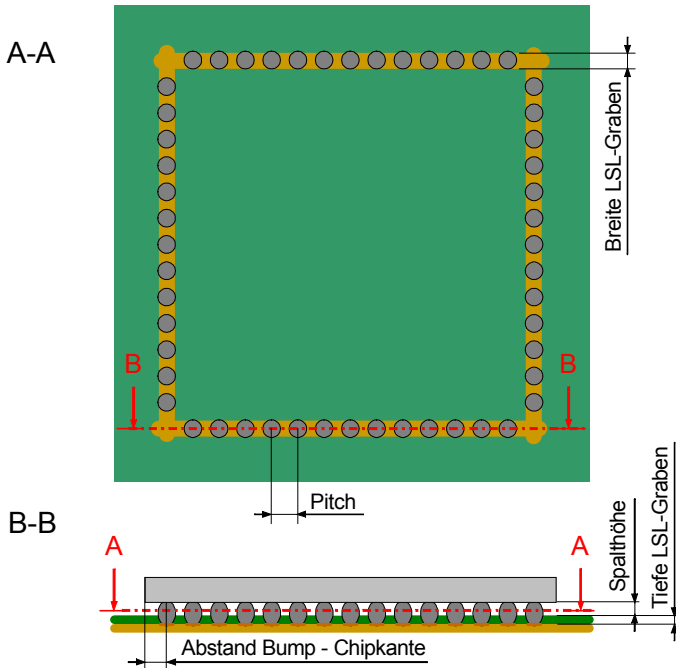


Abbildung 7-1: Geometrieparameter beim Flip Chip-Underfilling

### 7.1.3 Prozessparameter

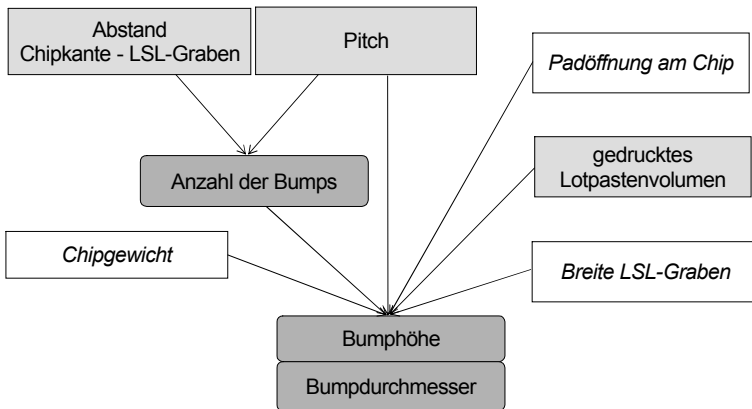
Die Prozessparameter sind im Allgemeinen die Größen, die am flexibelsten variiert und demzufolge auch angepasst werden können. Relevante Prozessparameter sind zum einen die Temperatur von Unterfiller und Substrat, zum anderen die Größen, die den Dosiervorgang charakterisieren. Dazu zählen u.a. das so genannte *Dispensmuster*, also die Linienform, in der der Unterfiller an den Chipkanten appliziert wird, die Länge(n) der applizierten Linie(n) des Unterfillers und die jeweiligen Nadelgeschwindigkeiten. Eine weitere Einflussgröße ist die relative Position der Dosiernadel zum Chip in allen drei Raumrichtungen. Schließlich können noch der (Innen-)Durchmesser der Dosiernadel und die pro Zeiteinheit applizierte Underfillermenge variiert werden.

### 7.1.4 Zusammenhänge

Für eine systematische Untersuchung der Einflüsse auf das Fließen des Unterfillers muss gewährleistet sein, dass alle untersuchten Parameter

voneinander unabhängig sind. Unter den bisher aufgezählten Einflussgrößen gibt es einige, deren Wert sich in Abhängigkeit von anderen Größen ergibt. Im Folgenden wird daher die Parameterschar auf einen Satz voneinander unabhängiger Einflussgrößen reduziert.

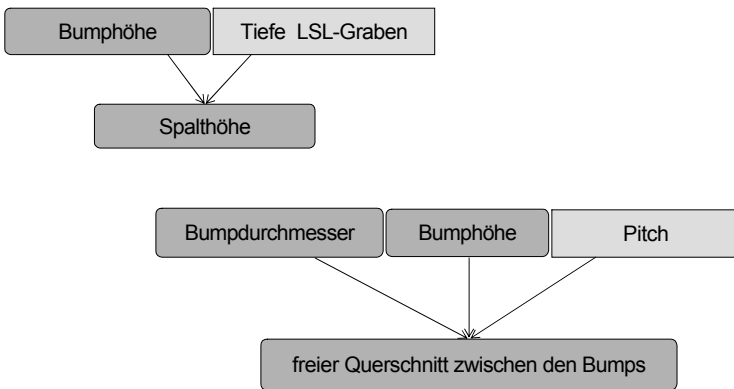
Für die Reduktion der Einflussgrößen wird von folgender Grundannahme ausgegangen: Es wird in allen Fällen ein Chip mit gleichen Abmessungen verwendet, d.h. die Chipfläche und die Chiphöhe und demzufolge das Chipvolumen und das Chipgewicht sind immer konstant. Außerdem wird angenommen, dass die Größe der Padöffnung am Chip und die Breite des Lötstopplackgrabens konstant gehalten werden. Es wird immer die gleiche Lotpaste verwendet, daher ist das resultierende Lotvolumen direkt proportional zum gedruckten Lotpastenvolumen.



**Abbildung 7-2:** Zusammenhang zwischen Geometriegrößen

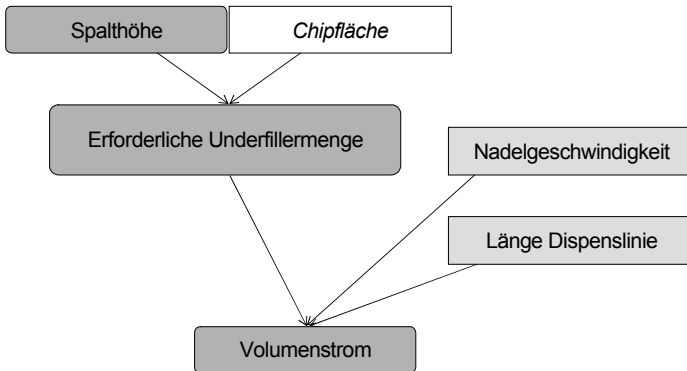
In Abbildung 7-2 und Abbildung 7-3 sind die Zusammenhänge zwischen den Geometriegrößen, in Abbildung 7-4 die Zusammenhänge zwischen Geometrie- und Prozessgrößen dargestellt. Die hellgrauen Felder enthalten Größen, die (innerhalb gewisser Grenzen) unabhängig von den anderen Parametern variiert werden können. Die dunkelgrauen Felder zeigen Größen, deren Werte sich aus den frei wählbaren Parametern ergeben. Die Größen in den weißen Feldern werden in dieser Untersuchung als konstant angenommen.





**Abbildung 7-3:** Zusammenhang zwischen Geometriegrößen

Der Parameter *gedrucktes Lotpastenvolumen* ist wenig anschaulich und geht, wie dargestellt, nur indirekt in die Geometrie des Chipspaltes ein. Daher wird stattdessen in der folgenden Untersuchung der Parameter *Spalthöhe* als unabhängige Variable verwendet.



**Abbildung 7-4:** Zusammenhang zwischen Prozess- und Geometriegrößen

Bei den Prozessparametern wird vereinfacht angenommen, dass der Underfiller jeweils nur einmal entlang einer Kante appliziert wird und dass die Linie, entlang der der Underfiller appliziert wird, gerade und symmetrisch zum Chip ausgerichtet ist, d.h. der Abstand des Linienstartpunkts zur nächst liegenden Chipecke entspricht dem Abstand des Linienendpunkts zur nächst liegenden Chipecke. Außerdem wird mit konstanter Prozesstemperatur gearbeitet.

## 7.2 Modellierung

### 7.2.1 Bewegte Dosiernadel

Beim Underfill-Prozess wird während des Dosiervorgangs die Nadel in der Regel an einer oder mehreren Kanten entlang bewegt. In der Simulation muss somit der Einströmort des Fluids in Abhängigkeit von der Prozesszeit definiert werden.

Die Implementierung der bewegten Dosiernadel erfolgt über eine benutzerdefinierte Unterroutine (*User-Defined Function*, UDF). Definiert wird ein Volumen innerhalb eines gewissen Koordinatenbereichs, dessen Position mit der Zeit veränderlich ist, und in dem mittels einer Massenquelle der Underfiller in das Rechengebiet eingebracht wird. Auf diese Weise kann die fertige UDF einfach an andere Modelle bzw. Prozessbedingungen angepasst werden. Außerdem ist die Nachstellung der Nadelbewegung sehr flexibel handhabbar. Neben einfachen Linien können auch komplexere Dispensmuster realisiert werden, z.B. das L-förmige Applizieren des Underfillers oder das mehrfache Aufbringen des Underfillers entlang einer Linie. Der größte Nachteil besteht darin, dass die Dosiernadel nicht explizit, also als realer Körper dargestellt wird. Die erforderliche Zeitschrittweite wird nicht beeinflusst, allerdings erhöht sich die Rechenzeit pro Zeitschritt geringfügig.

Beim Applizieren des Underfillers entlang einer Linie wird das Koordinatensystem günstigerweise so definiert, dass die Bewegung der Dosiernadel entlang einer der Achsen erfolgt. Der zeitabhängige Abstand der Nadel vom Startpunkt in Bewegungsrichtung kann dann als Funktion der Dosiernadelgeschwindigkeit  $v_D$  und der Zeit  $t$  über die folgende Beziehung beschrieben werden:

$$\text{pos}_D = v_D t . \quad ( 7.1 )$$

Bei einer Bewegung der Dosiernadel entlang der  $x$ -Achse, ausgehend von einem Startpunkt mit den Koordinaten  $(x_0 | y_0 | z_0)$  zum Zeitpunkt  $t = 0$  s, wird die Position der Nadel über die Koordinaten  $(x_0 + \text{pos}_D | y_0 | z_0)$  beschrieben.

Als Quellzone werden die Zellen des Rechengebiets definiert, die sich innerhalb eines gewissen Abstands  $D$  zur Dosiernadel befinden. Diese werden bei jedem Zeitschritt entsprechend der Nadelbewegung neu festgelegt. In den Zellen, die diese Bedingung erfüllen, wird ein bestimmter, auf das Volumen der Quellzone  $V_{\text{Quelle}}$  bezogener Massenstrom  $\dot{m}_{\text{ein}}$  definiert, der über einen Massenquellterm in die Rechnung integriert werden kann:

$$S_m = \frac{\dot{m}_{\text{ein}}}{V_{\text{Quelle}}} . \quad ( 7.2 )$$

Entsprechend werden im selben Quellvolumen Impulsquellen definiert, die den Impuls des einströmenden Mediums beschreiben:

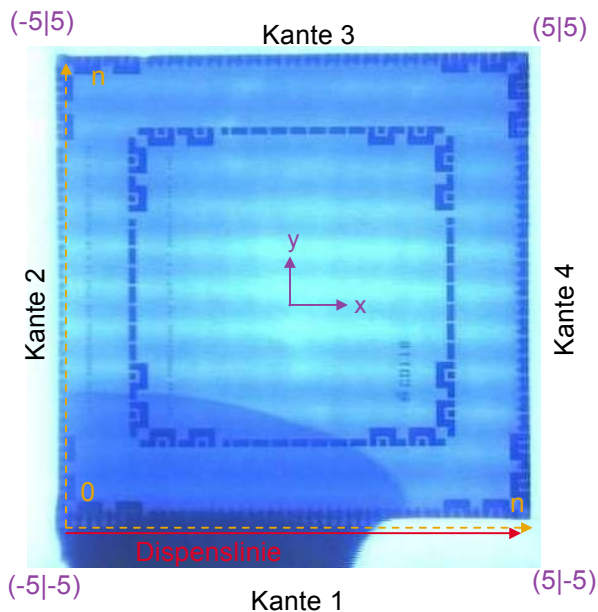
$$S_{i,k} = \frac{\dot{m}_{\text{ein}} V_{\text{ein},k}}{V_{\text{Quelle}}} . \quad ( 7.3 )$$

Der Index k steht dabei für die verschiedenen Raumrichtungen, in die der Gesamtimpuls je nach Lage im Raum aufgeteilt wird.

Der Quellcode der UDF ist in Anhang A.1 aufgeführt.

### 7.2.2 Begriffsdefinitionen

Anhand von Abbildung 7-5 werden die im Folgenden in den Auswertungen verwendeten Begriffe zur Beschreibung von Koordinaten, Kanten und Lücken definiert.

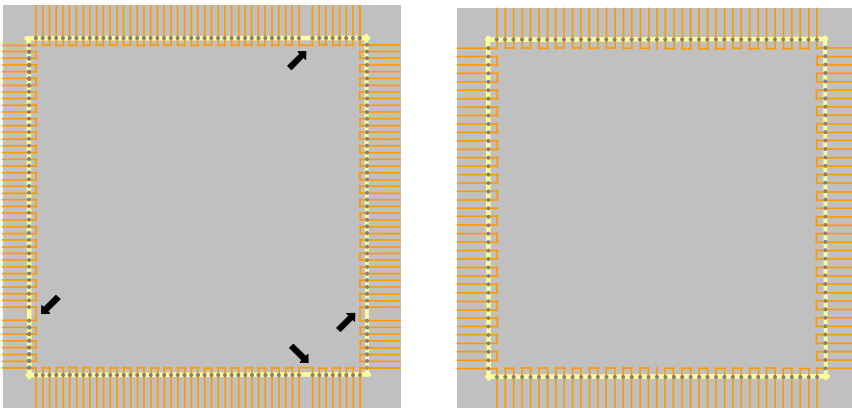


**Abbildung 7-5:** Begriffsdefinitionen zur Auswertung der Ergebnisse

Der Koordinatenursprung liegt im Chipmittelpunkt. Kante 1 ist die Kante, entlang der der Underfiller appliziert wird, Kante 2 die dazu senkrechte Kante am Startpunkt der Dosiernadelbewegung. Kante 3 und Kante 4 folgen entsprechend im Uhrzeigersinn. Die Nummerierung der Bumplücken erfolgt ausgehend von der Startecke der Dosiernadelbewegung jeweils in Koordinatenrichtung, wobei die Ecke als Lücke 0 definiert ist. Die Dosiernadel bewegt sich vom Startpunkt ausgehend in die positive x-Richtung.

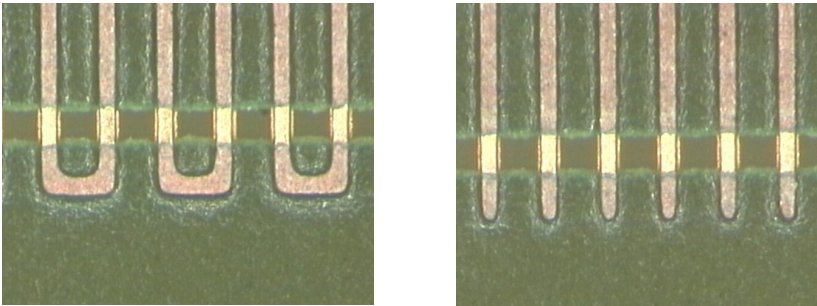
### 7.2.3 Geometrien und Randbedingungen

Die Untersuchungen werden an Testchips mit quadratischer Fläche und einer Kantenlänge von 10 mm und einer Dicke von 400  $\mu\text{m}$  durchgeführt. Es werden Chips mit einem Pitch von 200  $\mu\text{m}$  und 250  $\mu\text{m}$  verwendet. Die Chips mit einem Pitch von 250  $\mu\text{m}$  sind symmetrisch aufgebaut, die Chips mit dem Pitch von 200  $\mu\text{m}$  haben an jeder Kante eine asymmetrisch angeordnete Lücke zwischen den Kontaktstellen der Breite 250  $\mu\text{m}$ , siehe Abbildung 7-6.



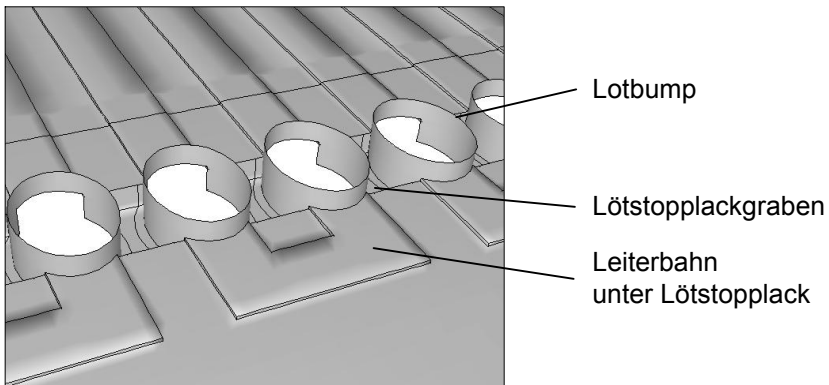
**Abbildung 7-6:** Schematische Darstellung des Layouts der Testchips mit geschlossener Leiterbahn-Konfiguration (Vgl. Abbildung 7-7): links: Testchip mit 200 $\mu\text{m}$  Pitch, die Pfeile markieren die asymmetrisch angeordneten Lücken der Breite 250 $\mu\text{m}$ , rechts: Testchip mit 250 $\mu\text{m}$  Pitch

Bei den unter dem Lötstopplack verlaufenden Leiterbahnen werden, wie in Abbildung 7-7 dargestellt, zwei verschiedene Konfigurationen des Leiterbahn-Auslaufes betrachtet, eine offene sowie eine geschlossene Variante.



**Abbildung 7-7:** Leiterbahn-Konfigurationen: links geschlossen / „zu“, rechts: offen

Für die Simulation muss die reale Geometrie des Flip Chip-Aufbaus auf geeignete Weise aufbereitet und an einigen Stellen vereinfacht werden. Die Leiterbahnstrukturen, die unter dem Lötstopplack verlaufen und eine Welligkeit der Oberfläche verursachen, werden als Erhebungen mit einer konstanten Höhe von  $5\ \mu\text{m}$  über dem Grundniveau des Lötstopplacks modelliert. Der Querschnitt des Lötstopplackgrabens wird vereinfacht als rechteckig angenommen. Die Bumps werden vereinfacht als Zylinder mit elliptischer Grundfläche modelliert. Eventuelle Oberflächenrauigkeiten, z.B. an den Sägekanten der Flip Chips, können nicht berücksichtigt werden. Abbildung 7-8 zeigt das geometrische Modell in einem Ausschnitt am Lötstopplackgraben.

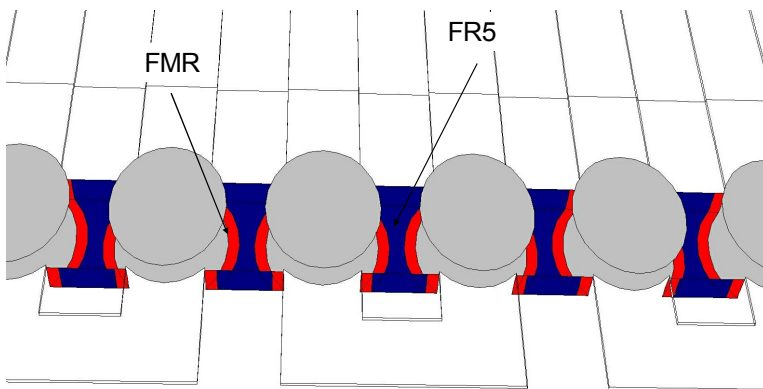


**Abbildung 7-8:** Geometrie: Bumps im Lötstopplackgraben, Leiterbahn-Strukturen unter dem Lötstopplack

Die Bumps werden dabei günstig im Hinblick auf die anschließende Vernetzung der Geometrie dimensioniert. Die Radien der elliptischen Grundflächen sind so ausgewählt, dass die Zylinder den Lötstopplackgraben in den Kanten schneiden, in denen auch die Leiterbahnen auf die Bumps stoßen. In Folge dessen stehen die Bumps an den Stirnseiten über den Rand des Lötstopplackgrabens hinaus und der freie Querschnitt zwischen den Bumps ist kleiner als in der Realität. Die Quantifizierung dieser Abweichung erfolgt in Abschnitt 7.2.7.2.

Der Einfluss des Abstands der Bumps zur Chipkante wird anhand von zwei verschiedenen Geometrien untersucht. Im einen Fall beträgt der Abstand der Bumpreihe zur Chipkante  $175\mu\text{m}$  („klein“), im anderen  $1660\mu\text{m}$  („groß“).

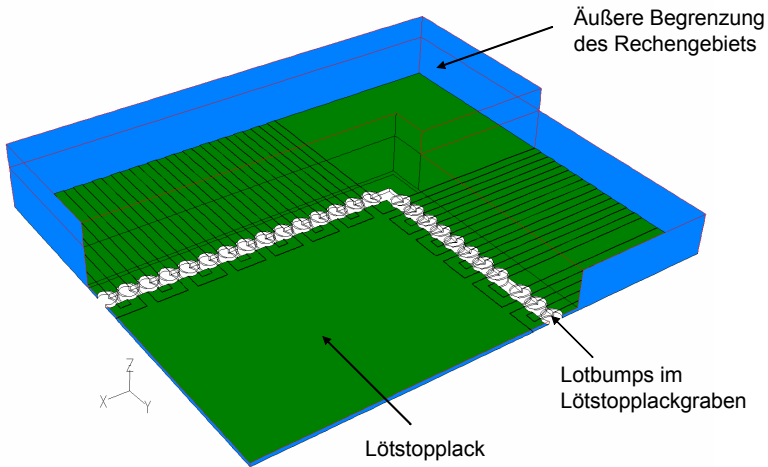
Abbildung 7-9 zeigt das Geometriemodell des Lötstopplackgrabens im Detail. Bei den Flussmittlrückständen (FMR) wird angenommen, dass sie in Form eines Rings an den Bumps vorliegen. Der Einfluss der Flussmittlrückstände auf das Fließen wird über die veränderten Benetzungseigenschaften berücksichtigt.



**Abbildung 7-9:** Lötstopplackgraben – Geometrie und Randbedingungen

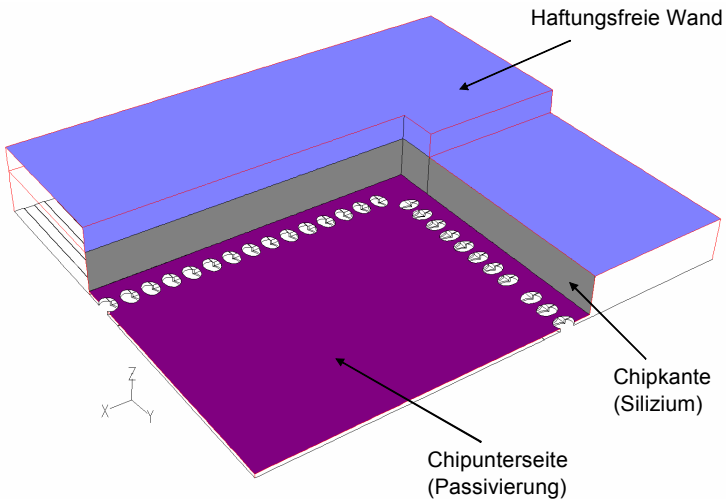
In Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 sind die übrigen Randbedingungen der Simulation dargestellt.

Die Lötstopplackoberfläche, die Lotbumps, das Silizium an der Chipaußenkante sowie die Passivierung an der Chipunterseite werden als feste Wände modelliert und mit den jeweils zugehörigen Kontaktwinkeln versehen. An den äußeren vertikalen Begrenzungen des Rechengebiets wird als Randbedingung ein konstanter Druck vorgegeben.



**Abbildung 7-10:** Randbedingungen

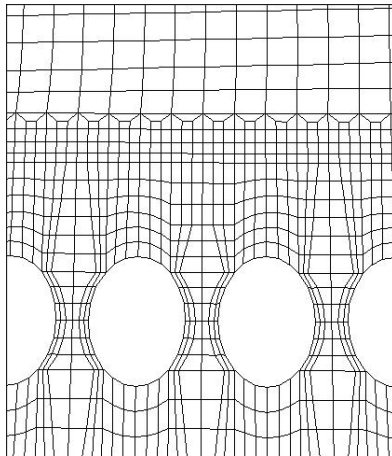
An der Oberseite des äußeren Rechengebiets und im Bereich oberhalb des Chips wird angenommen, dass es sich bei den Begrenzungen um haftungsfreie Wände handelt. Dadurch kann verhindert werden, dass der eventuell in der Anfangsphase der Dosierung vorliegende Überschuss an Underfiller sich an der Chipseite hochzieht und aus dem Rechengebiet austritt.



**Abbildung 7-11:** Randbedingungen

### 7.2.4 Gitter

Abbildung 7-12 zeigt das Gitter im Bereich der Bumps in der Draufsicht. Die Stirnflächen der Bumps sind über sechs Zellen aufgelöst. Der Bereich zwischen den Bumps wird ebenfalls mit sechs Zellen aufgelöst, wobei jeweils zwei Zellen auf die Bereiche mit und den Bereich ohne Flussmittelrückstände entfallen. Das Gitter wird auf beiden Seiten des Lötstopplackgrabens mit Hilfe von Übergangs-Randzellen vergrößert. In der Höhe wird der Spalt mit sechs Zellen, der Lötstopplackgraben mit vier Zellen aufgelöst. Die Strukturen, die die Leiterbahnen unter dem Lötstopplack verursachen, werden mit drei Zellen aufgelöst.



**Abbildung 7-12:** Gitter im Bereich des Lötstopplackgrabens

Im Rahmen einer Gitterstudie wird überprüft, ob eine weitere Vergrößerung des Gitters ohne Einbußen in der Ergebnisqualität möglich ist. Verwendet wird in allen Varianten die gleiche Testgeometrie (200  $\mu\text{m}$  Pitch, Spalthöhe 40  $\mu\text{m}$ ) und die gleichen Prozessbedingungen (70°C, Start der Nadelbewegung bei  $x = -5$  mm, Nadelgeschwindigkeit 5,5 mm/s). Variiert wird die Anzahl der Zellen zwischen den Bumps und der Zellen, die das Rechengebiet in der Höhe auflösen. In Tabelle 7-1 sind die einzelnen Varianten aufgeführt. In Variante 1 entstehen an Kante 2 Blasen in den Lücken 0, 1 und 2. In den anderen Varianten ist die Auflösung zu gering, um entstehende Blasen erfassen zu können. Eine Reduktion der Gitterauflösung ausgehend von Variante 1 ist somit nicht möglich.



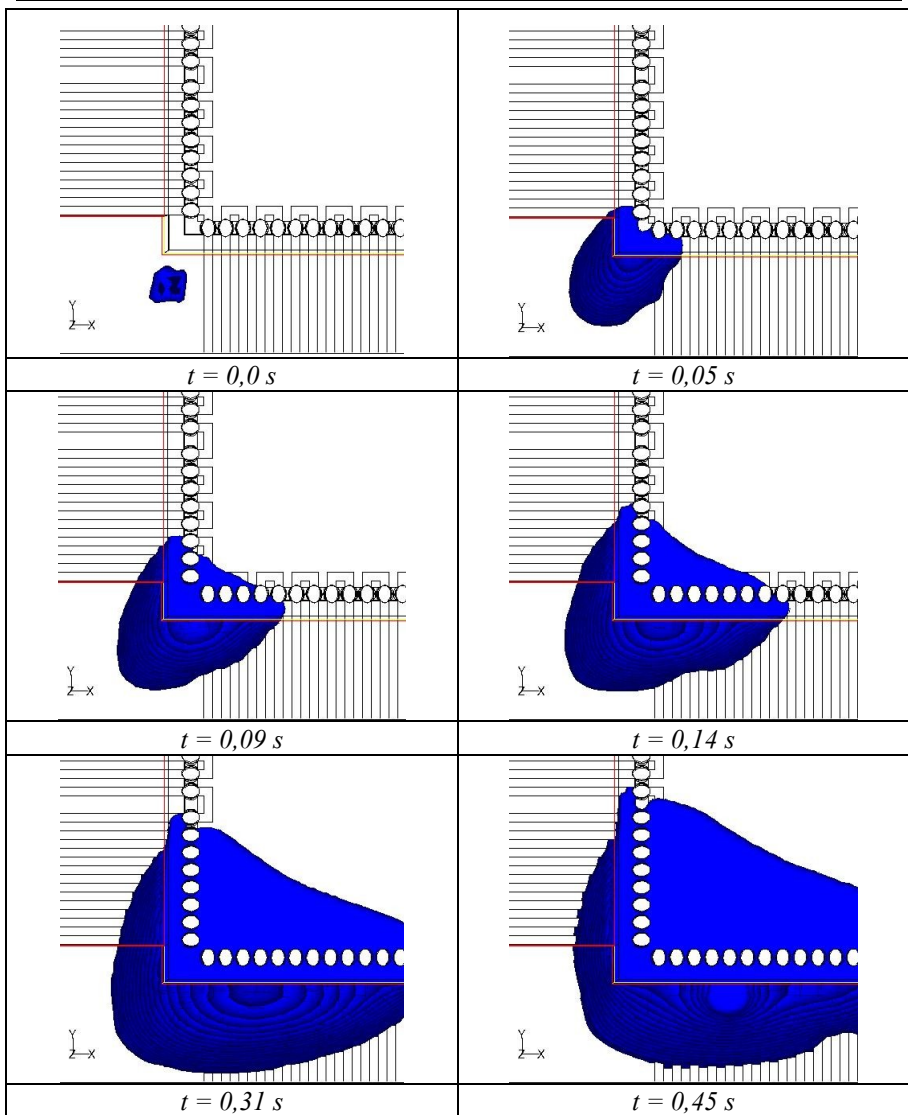
**Tabelle 7-1:** Parameter der Gitterstudie: Anzahl der Zellen auf den Kanten der einzelnen Bereiche

Var.	FR5 mit FMR	FR5 rein	z: Spalt	z: LSL-Graben	Blase
1	2	2	6 (4+2)	4	ja
2	1	4	6 (4+2)	4	nein
3	1	2	6 (4+2)	4	nein
4	2	2	4 (3+1)	3	nein

### 7.2.5 Referenzrechnung

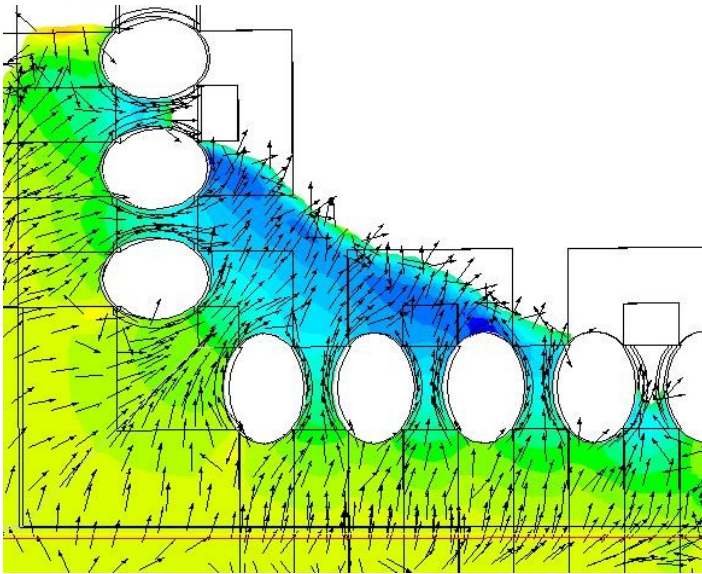
Das prinzipielle Fließverhalten soll anhand einer Referenzrechnung dargestellt werden. Verwendet wird ein Chip mit 200 µm Pitch und kleinem Abstand zwischen den Bumps und der Chipkante. Die Spalthöhe beträgt 40 µm, der Lötstopplackgraben ist 40 µm tief. Unter dem Chip verlaufen geschlossene Leiterbahnen, der Höhenunterschied des Lötstopplacks über den Leiterbahnen gegenüber dem Grundniveau beträgt 5 µm. In der Simulation werden die in Kapitel 4 vorgestellten Stoffeigenschaften verwendet.

Abbildung 7-13 zeigt die Spaltfüllung zu Beginn des Unterfüllvorgangs zu verschiedenen Zeitpunkten. Der Dosiervorgang startet – wie in der Abbildung zum Zeitpunkt  $t = 0$  s zu sehen – an der Chipecke bei  $x = -5$  mm. Während der Applikation des Underfillers wird die Nadel in x-Richtung mit einer Nadelverfahrgeschwindigkeit von 5,5 m/s parallel zur Einströmkante bewegt. Zu Beginn des Füllvorgangs fließt der Underfiller von der Startecke aus näherungsweise radial in den Chipspalt ein. Durch die Bewegung der Dosiernadel entlang der Chipkante wird die radiale Einströmung mit der Transversalbewegung des Einströmpunkts überlagert, die Füllung wird zunehmend asymmetrisch. Die Abbildung zum Zeitpunkt  $t = 0,05$  s zeigt die Hemmung des Underfillers, in den Lötstopplackgraben einzutreten. Der Underfiller breitet sich zuerst ein Stück entlang der Chipkanten aus, bevor der Lötstopplackgraben penetriert wird. Das letzte Bild zum Zeitpunkt  $t = 0,45$  s zeigt die Entstehung einer Fließblase an Kante 2. Der Underfiller hat die Lücke zwischen den beiden vordersten beteiligten Bumps an der Außenseite abgeschlossen, aber noch nicht begonnen, den Lötstopplackgraben zu füllen. Gleichzeitig ist die innere Teilfließfront kurz davor, die Lücke von innen her abzudichten. Geschieht dies, bevor der Lötstopplackgraben von außen her mit Underfiller befüllt wurde, bleibt eine Blase zurück.



**Abbildung 7-13:** Fließfrontfortschritt zu verschiedenen Zeitpunkten

In Abbildung 7-14 sind der Druckverlauf im Underfiller im Fließspalt und die sich daraus ergebenden lokalen Fließrichtungen dargestellt (zur Verbesserung der Übersichtlichkeit wurden Vektoren konstanter Länge verwendet).



**Abbildung 7-14:** Druckverlauf und Geschwindigkeitsvektoren einheitlicher Länge ( $t = 0,09\text{s}$ ). Farbskala: gelb-rot: 1bar, blau: 0,8bar

Im Spalt tritt an der Phasengrenze zwischen Underfiller und Luft ein Druckminimum (blau) von ca. 0,8bar auf. Am Spalteintritt herrscht näherungsweise Umgebungsdruck (gelb – rot). Die Grenzflächenspannung verursacht an der Phasengrenze einen Unterdruck, der das Fluid in den Spalt hinein zieht. Zwischen Spalteintritt und Fließfront fällt der Druck kontinuierlich ab.

Der Underfiller fließt näherungsweise radial in den Spalt, da sich die Dosiernadel noch dicht an ihrem Startpunkt an der Chipecke befindet. An beiden Kanten zeigen die Vektoren des Geschwindigkeitsfelds nicht senkrecht zur Kante, sondern haben eine Komponente in Kantenrichtung. Das Voraneilen der Fließfront an der Chipkante verglichen mit dem inneren Bereich ist unter der Bezeichnung *Kanteneffekt* bereits aus experimentellen Untersuchungen bekannt ([ 77 ], [ 75 ]) und lässt sich folgendermaßen erklären: Das Fluid nimmt grundsätzlich den Weg des geringsten Widerstandes. Der Fließwiderstand aufgrund der viskosen Reibung wird umso größer, je länger der Weg ist, den der Underfiller unter dem Chip zurückzulegen hat. Underfillmaterial, das von außen unter den Chip strömt, erfährt demzufolge weniger Reibungsdruckverluste als der

Underfiller, der schon ein größeres Stück unter den Chip geflossen ist. Aufgrund des Kräftegleichgewichts an der Dreiphasengrenze bildet sich an der Chipkante ein abgeschrägter Meniskus aus, d.h. es steht immer ein gewisser Vorrat an Underfiller zur Verfügung, der quer zur Fließrichtung seitlich in den Spalt eintreten kann. Da der Underfiller, der seitlich zufließt, eine kürzere Fließstrecke im Spalt zu bewältigen hat, sind seine Reibungsdruckverluste entsprechend kleiner.

## 7.2.6 Rechenzeiten

Bei der instationären Berechnung mehrphasiger Strömungen mit freien Phasengrenzen wird die maximal zulässige Zeitschrittweite der Simulation meist durch die Bilanzierung des Phasenanteils begrenzt. Die Kenngröße ist dabei die so genannte Courant-Zahl  $Co$  einer Zelle:

$$Co = \frac{\Delta t}{\Delta x_{\text{Zelle}} / v_{\text{Fluid}}} \quad (7.4)$$

Dabei steht  $\Delta t$  für die Zeitschrittweite, das Verhältnis  $\Delta x_{\text{Zelle}}/v_{\text{Fluid}}$  beschreibt die charakteristische Zeit, die ein Fluidelement benötigt, um eine Zelle zu durchqueren. Aus numerischen Gründen darf die Courant-Zahl nicht größer als eins werden; um die numerische Stabilität zu erhöhen, wird die maximal zulässige Courant-Zahl oft auf 0,3 bis 0,25 begrenzt [ 54 ].

Im Bereich der Phasengrenze wird die charakteristische Zeit  $\Delta x_{\text{Zelle}}/v_{\text{Fluid}}$  für alle Zellen ermittelt und die Zeitschrittweite entsprechend der maximal zulässigen Courant-Zahl begrenzt. Die maximal zulässige Zeitschrittweite ergibt sich also in Abhängigkeit von der Gitterfeinheit und den Geschwindigkeiten des Fluids. Vor allem im Nahbereich der Lotbumps ist eine sehr feine räumliche Diskretisierung notwendig, wie in der Gitterstudie in Abschnitt 7.2.4 nachgewiesen werden konnte.

Die notwendigen Zeitschrittweiten liegen bei der Referenzrechnung und vergleichbaren Modellen in der Größenordnung von  $1 \cdot 10^{-4}$  -  $5 \cdot 10^{-4}$  s. Die Rechenzeit für einen Zeitschritt liegt bei einem Gitter mit etwa 100 000 Zellen, was ungefähr einem Viertel eines Chipmodells entspricht, bei etwa einer Minute<sup>1</sup>. Für eine Sekunde Füllzeit ist daher eine Rechenzeit von zwei Tagen bis zu einer Woche zu erwarten. Aus diesem Grund werden die nachfolgenden Untersuchungen durchweg an einem Ausschnitt eines Flip Chip-Modells, meist einem Viertel, durchgeführt.

---

<sup>1</sup> Seriell, Prozessortyp Intel Xeon 3,06 GHz

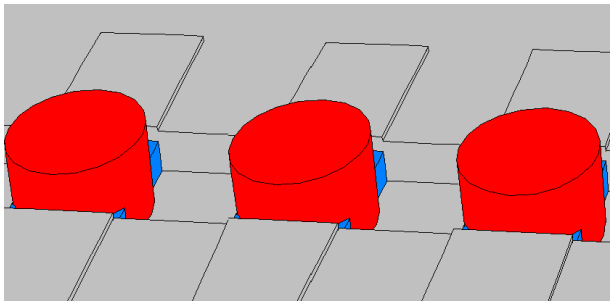
### 7.2.7 Vergleich mit detaillierterem Modell

Wie schon in Abschnitt 7.2.3 beschrieben, ist in den bisher betrachteten Simulationsgeometrien der Bereich des Lötstopplackgrabens und der Bumps im Hinblick auf die Vernetzbarkeit optimiert. Diese Geometrie unterscheidet sich vom normalen Aufbau zum einen durch das geringere freie Volumen im Bereich zwischen den Bumps, zum anderen durch das teilweise Überstehen der Lotbumps über den Bereich des Lötstopplackgrabens hinaus.

Um den Einfluss dieser Abweichungen auf die Simulationsergebnisse bewerten zu können, wird zum Vergleich ein höher detailliertes Chipmodell entworfen.

#### 7.2.7.1 Detailliertes Modell

Die modellierte Bumpgeometrie ist zweigeteilt: der Bump wird wie bisher als Zylinder mit elliptischer Grundfläche modelliert, allerdings ohne dass der Zylinder über den Lötstopplackgraben hinausragt. Im unteren Bereich der Höhe  $H_{LB}$  wird teilweise noch die Leiterbahn, auf der der Bump sitzt, in Form eines Quaders mitmodelliert. Dadurch wird die reale Bumpgeometrie deutlich besser nachgebildet als in der bisherigen Geometrie. Diese zweigeteilte Modellierung ist in Abbildung 7-15 dargestellt.



**Abbildung 7-15:** Zweiteilung der Lotbumps beim detaillierteren Modell: rot: zylinderförmiger Anteil, blau: quaderförmiger Anteil der Höhe  $H_{LB}$

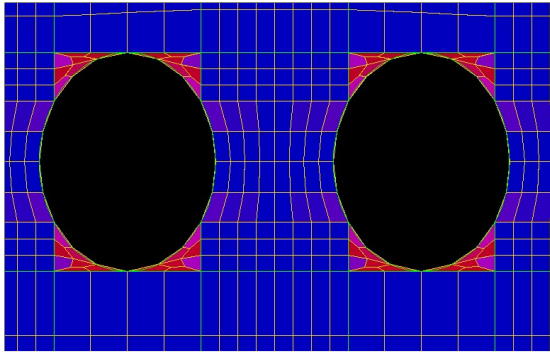
Abgesehen davon werden die in Abschnitt 7.2.3 aufgeführten Annahmen und Vereinfachungen beibehalten. Der Nachteil des detaillierteren Modells liegt darin, dass der Zwickelbereich an den zylindrischen Bumps nur mit sehr stark verzerrten Zellen vernetzt werden kann. Abbildung 7-16 zeigt die Gitterqualität im Nahbereich der Bumps. Das Bewertungskriterium ist der Grad der Verzerrung der Zellen EAS (*Equi Angle Skew*). Bei diesem Kriterium wird, wie in Gleichung

(7.5) dargestellt, die maximale Abweichung der Winkel in einer Zelle vom Idealfall einer gleichwinkligen Zelle quantifiziert:

$$\text{EAS} = \max \left[ \frac{q_{\max} - q_e}{180^\circ - q_e}, \frac{q_e - q_{\min}}{q_e} \right]. \quad (7.5)$$

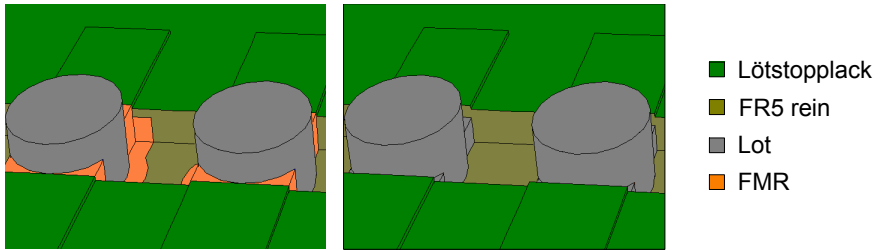
Dabei stehen  $q_{\max}$  und  $q_{\min}$  für den größten und kleinsten Winkel in einer Zelle,  $q_e$  für die Winkel einer gleichwinkligen Zelle, z.B.  $90^\circ$  in einer Hexaederzelle. Bei einem EAS von 0 ist die Zelle gleichwinklig, ein EAS von 1 ergibt sich bei einer komplett degenerierten Zelle.

Die rot gekennzeichneten Zellen in Abbildung 7-16 liegen bei einem EAS von etwa 0,9 und können den Verlauf der Rechnung negativ beeinflussen. Die schlechte Gitterqualität beeinflusst die Simulation merklich, was sich zum einen in abnehmender Stabilität der Rechnung, zum anderen in einer deutlich verringerten mittleren Zeitschrittweite äußert.



**Abbildung 7-16:** Gitterqualität (Equi Angle Skew) im Nahbereich der Bumps.  
Farbskala: blau: EAS nahe 0, rot: EAS ca. 0,9

Als zusätzliche Annäherung des neuen Modells an die realen Gegebenheiten werden die Flussmittlrückstände FMR nicht mehr nur mittels des veränderten Kontaktwinkels modelliert, sondern es wird zusätzlich ein mechanisches Fließhindernis im Nahbereich der Bumps eingeführt. Abbildung 7-17 zeigt den Vergleich der Umgebung der Bumps mit und ohne Flussmittlrückstände in der detaillierten Geometrie.



**Abbildung 7-17:** Vergleich der Geometrie mit (links) und ohne (rechts) FMR

### 7.2.7.2 Quantifizierung der Abweichungen vom realen Aufbau

Um die Übereinstimmung der beiden Simulationsmodelle untereinander bzw. mit den realen Aufbauten zu bewerten, werden die freien Volumina zwischen jeweils zwei Bumps verglichen. Das Leerraumvolumen des Lötstopplackgrabens in einem Abschnitt in der Länge des Pitches berechnet sich mit der Breite  $B$  des Lötstopplackgrabens, dem Pitch  $P$  und der Summe von Spalthöhe  $H_{\text{Spalt}}$  und der Tiefe des Lötstopplackgrabens  $H_{\text{LSL-Graben}}$  zu

$$V = (H_{\text{LSL-Graben}} + H_{\text{Spalt}})BP. \quad (7.6)$$

Im einfachen Modell werden die Bumps, wie in Abschnitt 7.2.3 beschrieben und in Abbildung 7-8 dargestellt, durch zylindrische Bumps mit elliptischer Grundfläche modelliert. Das Volumen  $V_{\text{Bump}}$  des Bumps im Lötstopplackgraben (der überstehende Bereich wird abgezogen) berechnet sich nach Gleichung (7.7):

$$V_{\text{Bump}} = \left[ \pi R_1 R_2 - 2 \left( R_1 R_2 \arccos \frac{x}{R_1} - xy \right) \right] (H_{\text{LSL-Graben}} + H_{\text{Spalt}}). \quad (7.7)$$

Der Schnittpunkt der Ellipse mit der Begrenzung des Lötstopplackgrabens wird durch die Koordinaten  $x$  und  $y$  definiert.

Im detaillierteren Modell setzen sich die Bumps, wie in Abbildung 7-15 dargestellt, aus einem quaderförmigen Sockel und einem zylindrischen Bereich mit elliptischem Querschnitt, der teilweise über den quaderförmigen Sockel herausragt, zusammen. Das Volumen des Bumps im Lötstopplackgraben beträgt

$$V_{\text{Bump}} = \pi R_1 R_2 H_{\text{Bump}} + H_{\text{LB}} \left( B_{\text{LB}} B + R_1 R_2 \arccos \frac{x}{R_1} - xy \right). \quad (7.8)$$

Dabei beschreiben die Koordinaten  $x$  und  $y$  den Schnittpunkt der Ellipse mit der Leiterbahn.

Bei der Berechnung des Bumpvolumens im realen Aufbau muss anders vorgegangen werden als bei den Simulationsmodellen. Die reale Form des Lotbumps im Flip Chip-Aufbau kann nicht über einfache geometrische Grundkörper beschrieben werden. Stattdessen wird das Volumen eines Bumps am ungelöteten Flip Chip ermittelt.

Die Berechnung erfolgt unter der Annahme, dass der Lotbump auf der runden Passivierungsöffnung an der Chipunterseite als angeschnittene Kugel betrachtet werden kann. Der Radius der Passivierungsöffnung  $R_{\text{Pass}}$  ist bekannt, die Höhe des Lotbumps  $H_{\text{Lot}}$  kann leicht gemessen werden.

Über die Beziehungen

$$R_{\text{Pass}}^2 = h(2R - h) \quad (7.9)$$

und

$$h = 2R - H_{\text{Lot}} \quad (7.10)$$

lässt sich der Kugelradius  $R$  und daraus das Volumen  $V_{\text{Lot}}$  der gekappten Lotkugel berechnen:

$$R = \frac{R_{\text{Pass}}^2 + H_{\text{Bump}}^2}{2H_{\text{Bump}}}, \quad (7.11)$$

$$V_{\text{Lot}} = \frac{4}{3} \pi R^3 - \frac{1}{3} \pi (2R - H_{\text{Lot}}) (R + H_{\text{Lot}}). \quad (7.12)$$

Im Verbund mit der Leiterplatte muss aber zusätzlich zum Lotvolumen das Volumen der Leiterbahn berücksichtigt werden. Das Gesamtvolumen des Bumps beträgt also

$$V_{\text{Lot}} = \frac{4}{3} \pi R^3 - \frac{1}{3} \pi (2R - H_{\text{Lot}}) (R + H_{\text{Lot}}) + B_{\text{LB}} H_{\text{LB}} B. \quad (7.13)$$

Ein sinnvoller Vergleich der freien Volumen ist nur für Parameterkombinationen möglich, die auch in der Realität auftreten. Der Vergleich wird daher für die folgenden beiden Varianten durchgeführt:

- A.: Pitch  $200\mu\text{m}$ , Padöffnung am Chip  $100\mu\text{m}$ , Tiefe des Lötstopplackgrabens  $40\mu\text{m}$ , Spalthöhe  $40\mu\text{m}$ .



## 7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips

- B.: Pitch 250 $\mu\text{m}$ , Padöffnung am Chip 75 $\mu\text{m}$ , Tiefe des Lötstopplackgrabens 40 $\mu\text{m}$ , Spalthöhe 80 $\mu\text{m}$ .

Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-2 aufgeführt.

**Tabelle 7-2** Vergleich der freien Volumen zwischen zwei Bumps

	A	B
Einfache Geometrie	7,85 10 <sup>5</sup> $\mu\text{m}^3$	2,07 10 <sup>6</sup> $\mu\text{m}^3$
Detaillierte Geometrie	1,16 10 <sup>6</sup> $\mu\text{m}^3$	2,67 10 <sup>6</sup> $\mu\text{m}^3$
Realer Aufbau	1,01 10 <sup>6</sup> $\mu\text{m}^3$	2,36 10 <sup>6</sup> $\mu\text{m}^3$

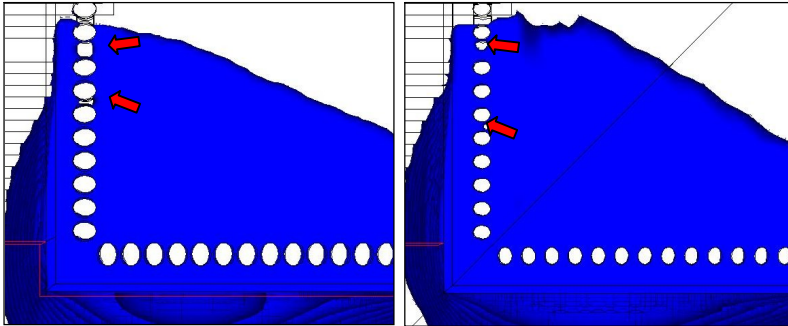
In beiden Fällen liegt das freie Grabenvolumen des realen Aufbaus zwischen den Werten der Simulationsgeometrien. Im nächsten Abschnitt werden die beiden Modelle anhand von Simulationsergebnissen miteinander verglichen.

### 7.2.7.3 Vergleich der Modelle

Für den Vergleich der Rechenergebnisse wurde exemplarisch die Variante 2 der bisherigen Untersuchungen herangezogen (Parameter siehe Tabelle 7-3). Das berechnete Fließverhalten stimmt bei beiden Modellen überein: Das Fluid tritt direkt an der Ecke des Chips in den Lötstopplackgraben ein und durchfließt ihn vollständig. In der Anfangsphase des Füllvorgangs fließt der Underfiller außen am Lötstopplackgraben schneller als innen. Der Übergang zum parallelen Fließen der beiden Fließfronten erfolgt schnell.

Abbildung 7-18 zeigt die Füllung beider Modellvarianten zum Zeitpunkt  $t = 0,715 \text{ s}$  im Vergleich. Beim vereinfachten Modell wird die erste Blase in Lücke 6, beim detaillierten Modell in Lücke 5 eingeschlossen. Im Modell mit dem detaillierten Gitter werden auch in den folgenden Lücken Blasen eingeschlossen, die Blasen in Lücke 6 und 7 vereinen sich und werden ausgeschwemmt. Bei beiden Varianten wird in Lücke 8 eine Blase eingeschlossen.

Insgesamt stimmen die Ergebnisse aus den beiden Modellen gut überein; für die Bewertung des Risikos der Blasenentstehung in einer bestimmten Parameterkonstellation ist die genaue Lage der entstehenden Blasen nicht relevant. Daher kann im Hinblick auf das Ergebnis keinem der beiden Modelle der Vorzug gegenüber dem anderen gegeben werden. In Sachen Rechenzeit und numerischer Stabilität der Simulationen bringt das einfachere Modell deutliche Vorteile, daher werden auch die weiteren Untersuchungen auf der Basis dieser Modellierung durchgeführt.



**Abbildung 7-18:** Entwicklung von Phasengrenzen und Einschlüssen, Vergleich: links ursprüngliches Modell, rechts detailliertes Modell (nach  $t = 0,715 \text{ s}$ )

## 7.3 Parametervariation periphere Bumps

Das Ziel dieser Untersuchung ist es, die Einflüsse der einzelnen Geometrie- und Prozessparameter auf die Qualität der Chipunterfüllung zu ermitteln. Außerdem dienen diese ersten Ergebnisse mit realen Chip-Geometrien zum Abgleich der Ergebnisse aus Simulation und Experiment.

### 7.3.1 Untersuchte Größen

Bei dieser Untersuchung werden ausgehend von einer Referenz-Parameterkombination sukzessive einzelne Geometrie- und Prozessparameter variiert. Die simulierten Parameterkombinationen sind in Tabelle 7-3 aufgeführt.

Variante 1 ist die Referenzgröße der Untersuchung, die schon in Abschnitt 7.2.5 vorgestellt wurde. Die in der Tabelle grau hinterlegten Felder markieren die Parameter, die gegenüber dem Referenzmodell variiert werden. In allen Varianten werden die Prozesstemperatur auf  $70^\circ\text{C}$  konstant gehalten und die in Kapitel 4 vorgestellten Stoffeigenschaften verwendet. In allen Varianten wird ebenso angenommen, dass an den Bumps Flussmittlrückstände vorliegen, deren Einfluss durch die Anpassung der Kontaktwinkel im Nahbereich der Bumps berücksichtigt wird.

**Tabelle 7-3:** Untersuchte Prozessvarianten

Variante	Pitch [ $\mu\text{m}$ ]	Abstand Chipkante – LSL- Graben [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe LSL-Graben [ $\mu\text{m}$ ]	Spalthöhe [ $\mu\text{m}$ ]	LB-Konfiguration	Startkoordinate der Nadel (x)	Abstand Nadel – Dosierkante (y)	Nadel- geschwindigkeit [mm/s]
1	200	klein	40	40	zu	-5	0,2	5,5
2	200	klein	40	40	zu	-5	0,2	2
3	200	klein	40	40	zu	-6	0,2	5,5
4	200	klein	40	40	zu	-3	0,2	5,5
5	200	klein	40	40	zu	-5	0,4	5,5
6	200	klein	20	40	zu	-5	0,2	5,5
7	200	klein	0	40	zu	-5	0,2	5,5
8	200	klein	40	80	zu	-5	0,2	5,5
9	250	klein	40	40	zu	-5	0,2	5,5
10	200	groß	40	40	zu	-5	0,2	5,5
11	200	klein	40	40	offen	-5	0,2	5,5
12	250	klein	40	80	zu	-5	0,2	5,5
13	250	groß	40	80	offen	-5	0,2	5,5

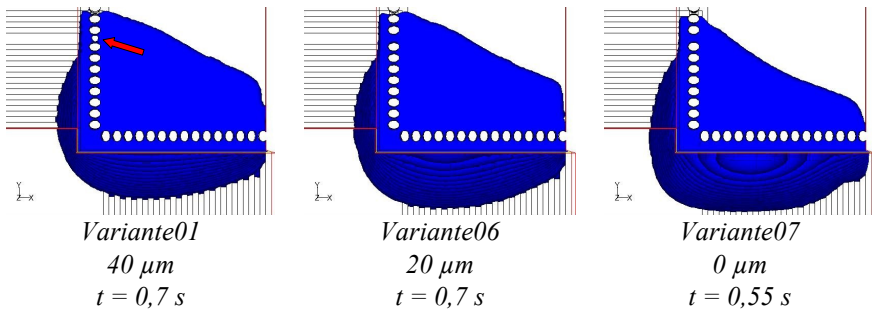
### 7.3.2 Ergebnisse der Simulationen

Bei der Auswertung der Parametervariation werden immer die Ergebnisse der Varianten, bei denen dieselbe Größe variiert wurde, miteinander verglichen. Anhand dieses Vergleichs wird der Einfluss des jeweiligen Parameters bewertet und die mögliche Ursache für dieses Verhalten dargestellt.

#### 7.3.2.1 Tiefe des Lötstopplackgrabens

Variiert wird die Tiefe des Lötstopplackgrabens mit 40  $\mu\text{m}$ , 20 $\mu\text{m}$  und 0  $\mu\text{m}$ . Bei 40 $\mu\text{m}$  entsteht eine Blase in Lücke 8, die beiden anderen Varianten sind blasenfrei (siehe Abbildung 7-19). Im Hinblick auf die Blasenfreiheit ist somit ein möglichst flacher Lötstopplackgraben anzustreben. Kritisch im Hinblick auf Luftschlüsse ist es, wenn der Underfiller innerhalb eines gewissen Zeitfensters beide Seiten des Lötstopplackgrabens erreicht. Je tiefer der Lötstopplackgraben

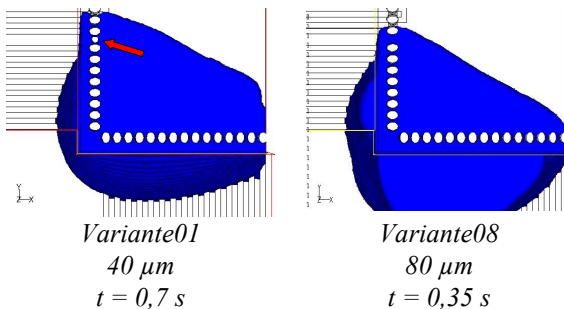
ist, umso größer ist das zu füllende Volumen, d.h. umso größer ist das kritische Zeitfenster, in dem es zu einem Lufteinschluss kommen kann.



**Abbildung 7-19:** Einfluss der Geometrie: Variation der Lötstopplackgraben-Tiefe

### 7.3.2.2 Spalthöhe

Die Spalthöhe wird einmal auf 40  $\mu\text{m}$  und einmal auf 80  $\mu\text{m}$  gesetzt. In der Variante mit 40  $\mu\text{m}$  Spalthöhe tritt in Lücke 8 eine Blase auf, beim 80  $\mu\text{m}$ -Spalt erfolgt die Füllung blasenfrei (siehe Abbildung 7-20). Zudem ist die Füllgeschwindigkeit im 80  $\mu\text{m}$ -Spalt deutlich höher. Daraus kann gefolgert werden, dass ein höherer Spalt für die Füllung günstiger ist.



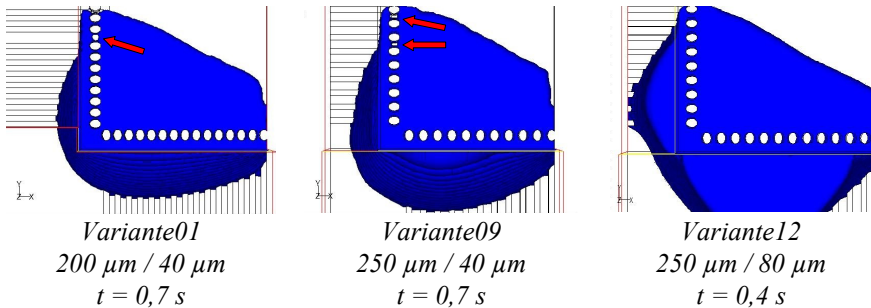
**Abbildung 7-20:** Einfluss der Geometrie: Variation der Spalthöhe

### 7.3.2.3 Pitch

Verglichen werden Varianten mit einem Pitch von 200  $\mu\text{m}$  bei einer Spalthöhe von 40  $\mu\text{m}$  und einem Pitch von 250  $\mu\text{m}$  bei einer Spalthöhe von 40  $\mu\text{m}$ . In beiden Fällen entsteht in Lücke 8 eine Blase, beim größeren Pitch tritt in Lücke 6 eine weitere Blase auf. Eine reine Vergrößerung des Pitches verbessert die Qualität der Füllung demnach nicht.

## 7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips

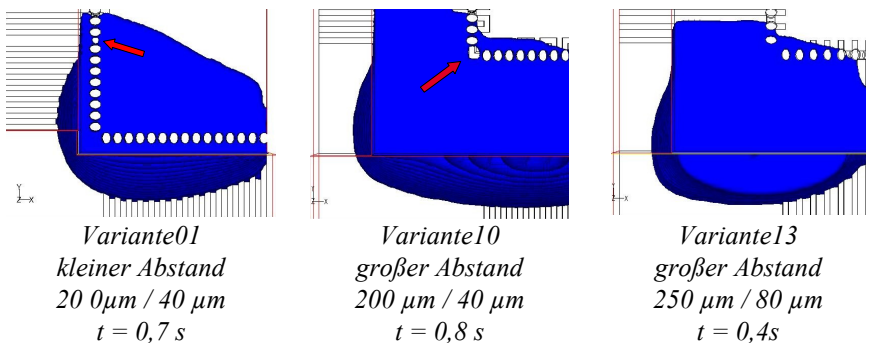
In der Praxis beeinflusst der Pitch die Lotmenge je Bump und damit auch die resultierende Spalthöhe, d.h. bei größerem Pitch steigt auch die Höhe des Fließspalts. Wird dies in der Simulation nachgestellt, indem gleichzeitig der Pitch und die Spalthöhe erhöht werden, erfolgt die Füllung blasenfrei (siehe Abbildung 7-21).



**Abbildung 7-21:** Einfluss der Geometrie: Variation des Pitches

### 7.3.2.4 Abstand Bump – Chipkante

Der Abstand der Bumps zur Chipkante wird auf zwei Stufen betrachtet. In der Variante mit dem großen Abstand zwischen Bumpreihe und Chipkante kann deutlich ein Voraneilen des Underfillers an der Kante beobachtet werden. Dadurch entsteht eine L-förmige Fließfront. Der Underfiller erreicht die beiden an der Startecke der Dosiernadel senkrecht aufeinander stehenden Bumpreihen gleichzeitig, wodurch an der Ecke Luft eingeschlossen wird (siehe Abbildung 7-22).

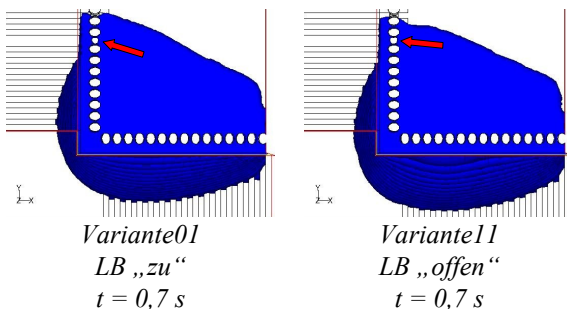


**Abbildung 7-22:** Einfluss der Geometrie: Variation des Abstands von Bump und Chipkante

Generell wird es umso schwieriger, den Fortschritt der Fließfront zu kontrollieren, je größer der Abstand des Lötstopplackgrabens zur Chipkante ist. Daher ist ein möglichst kleiner Abstand anzustreben. Wird ein größerer Pitch mit entsprechend größerer Spalthöhe verwendet, erfolgt die Füllung wie beim kleinen Abstand der Bumps zur Chipkante blasenfrei (siehe Abbildung 7-22).

### 7.3.2.5 Leiterbahnstrukturen unter dem Lötstopplack

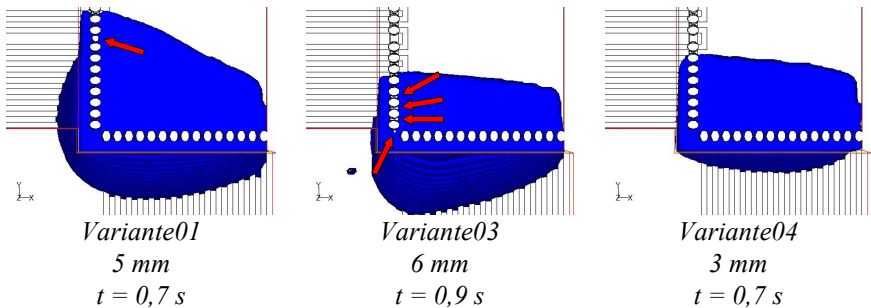
Beim Unterfüllen der beiden Varianten kann kein wesentlicher Unterschied festgestellt werden (siehe Abbildung 7-23). Grundsätzlich fließt der Unterfiller bevorzugt auf den erhöhten Strukturen, geschlossene Strukturen sind daher kritischer.



**Abbildung 7-23:** Einfluss der Geometrie: Variation der Leiterbahnstrukturen unter dem Lötstopplack

### 7.3.2.6 Startpunkt des Nadelverfahrens (x-Koordinate)

Der Startpunkt der Dosiernadel wird auf drei verschiedenen Stufen variiert: Im Referenzfall beginnt der Dosiervorgang direkt an der Chipecke, also bei der Koordinate  $x = -5 \text{ mm}$ . In den beiden anderen Varianten wurde der Nadelstartpunkt einmal um einen Millimeter nach außen auf die Koordinate  $x = -6 \text{ mm}$  und einmal um zwei Millimeter weiter nach innen auf die Koordinate  $x = -3 \text{ mm}$  verlegt. Im Referenzfall tritt die Blase in Lücke 8 auf. Beim Startpunkt  $x = -6 \text{ mm}$  tritt der Unterfiller nicht sofort mit dem Chipspalt in Kontakt, sondern es wird zuerst eine Unterfiller-Raupe parallel zur Chipkante aufgetragen, die für den anschließenden Fließvorgang wie ein Fluiddepot wirkt. Dadurch fließt der Unterfiller quasi parallel zur Dosierkante und schließt im Lötstopplackgraben gleich in den ersten Lücken mehrere Blasen ein. Startet die Dosiernadel dagegen erst an der Koordinate  $x = -3 \text{ mm}$ , erfolgt die Füllung blasenfrei (siehe Abbildung 7-24).

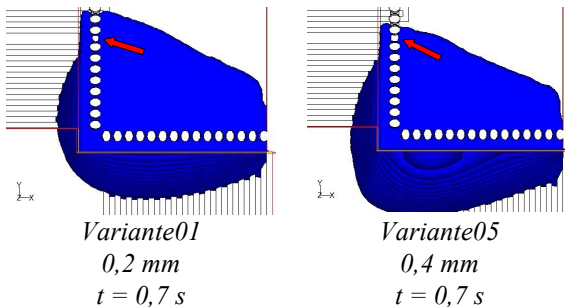


**Abbildung 7-24:** Einfluss der Prozessgrößen: Variation des Startpunkts der Nadel (x)

Es ist somit vorteilhaft, die Bewegung der Dosiernadel nicht zu dicht an der Ecke beginnen zu lassen. Der Lötstopplackgraben wird dann immer von innen nach außen durchströmt, es kommt zu keinem kritischen Übergang in der „Reihenfolge“ der Teil-Fließfronten. Beim weit außen liegenden Startpunkt ist dagegen der Eintrittspunkt des Underfillers in den Spalt schwer zu beeinflussen, d.h. die vorherrschenden Fließbedingungen sind undefiniert.

### 7.3.2.7 Abstand Nadel – Dosierkante (y-Koordinate)

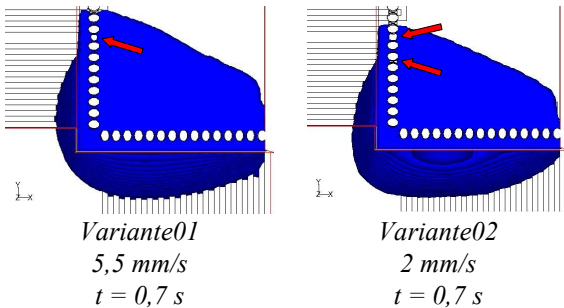
Der Abstand der Dosiernadel zur Chipkante wird vom Referenzwert von  $y = 0,2 \text{ mm}$  ausgehend auf  $y = 0,4 \text{ mm}$  erhöht. Zwischen diesen beiden Varianten ist kein Unterschied zu erkennen (siehe Abbildung 7-25). Der Abstand muss aber in jedem Fall so klein sein, dass der Eintrittspunkt des Underfillers in den Spalt kontrollierbar ist; wird der Abstand zu klein gewählt, fließt der Underfiller auf die Chipoberseite.



**Abbildung 7-25:** Einfluss der Prozessgrößen: Variation der Nadelposition (y)

### 7.3.2.8 Nadelverfahrensgeschwindigkeit

Im letzten Vergleich wird die Nadelverfahrensgeschwindigkeit vom Ausgangswert 5,5 mm/s auf 2 mm/s abgesenkt. Bei der hohen Geschwindigkeit entsteht die erste Blase in Lücke 8, bei der niedrigen Geschwindigkeit schon in Lücke 6 (siehe Abbildung 7-26).



**Abbildung 7-26:** Einfluss der Prozessgrößen: Variation der Nadelverfahrensgeschwindigkeit

Dies lässt sich folgendermaßen erklären: Die Nadel entfernt sich langsamer von ihrem Startpunkt, daher steht an der Bumpreihe 2 innen mehr Unterfiller zur Verfügung und die innere Teilfront erreicht schon früher die gleiche Fließdistanz wie die äußere Teilfront. Die Nadelgeschwindigkeit hat sicher zusammen mit Pitch, Spalthöhe und Startpunkt der Nadel einen Einfluss auf das Fließverhalten des Unterfillers. Allerdings wird dadurch nur beeinflusst, wo die Blasen entstehen und nicht, ob sie auch tatsächlich entstehen.

## 7.4 Experimentelle Untersuchungen

Für die experimentelle Untersuchung des Fließvorgangs und der Qualität der resultierenden Unterfüllung werden zwei verschiedene Methoden verwendet, die Infrarot-Mikroskopie und die Ultraschall-Mikroskopie.

### 7.4.1 Infrarot-Mikroskopie

Poliertes Silizium ist für Infrarotstrahlung durchlässig [ 78 ]. Um diese Eigenschaft zur Analyse der Qualität der Unterfüllung nutzen zu können, werden Testchips verwendet, die keine durchgängigen Metallisierungen aufweisen.

Wird der unterfüllte Flip Chip an der Unterseite mit einer IR-Quelle bestrahlt, können mit einer über dem Chip positionierten IR-Kamera der Spaltbereich zwischen Chip und Leiterplatte und der darin enthaltene Unterfiller sichtbar

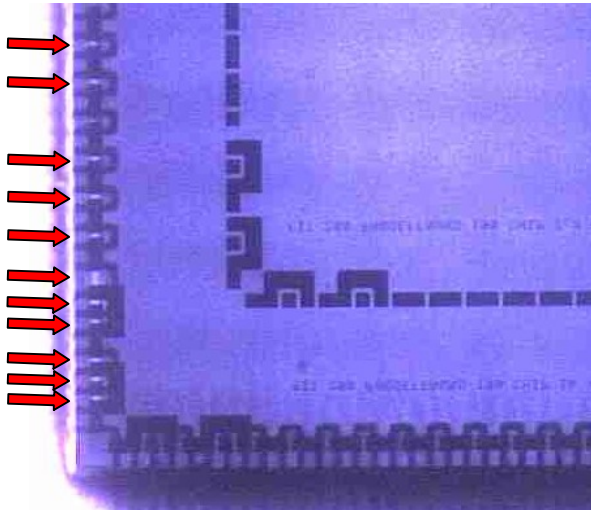


## 7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips

---

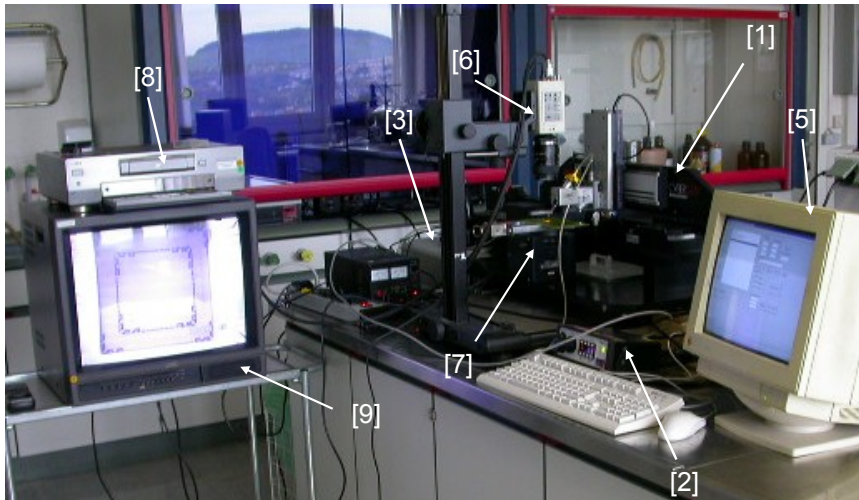
gemacht werden. Die mit Unterfillmaterial gefüllten Bereiche erscheinen aufgrund der Füllstoffe und der Rußpartikel, mit denen der Stoff eingefärbt ist, deutlich dunkler als die ungefüllten Bereiche.

Abbildung 7-27 zeigt exemplarisch den Nahbereich der Ecke eines Flip Chips mit einem Pitch von  $200\mu\text{m}$  in der IR-Aufnahme. An Kante 2 sieht man mehrere Lufteinschlüsse. Der Vorteil dieser Methode besteht darin, dass nicht nur der Endzustand der Unterfüllung, sondern der Fließvorgang direkt während und nach dem Applizieren des Unterfillers beobachtet werden kann. Wird ein fertig unterfüllter Chip untersucht, muss berücksichtigt werden, dass Bereiche, in denen sich Füll- bzw. Farbstoffe von der Harzmatrix trennen bzw. Bereiche, in denen Flussmittelrückstände vom Unterfiller angelöst und mitgeschleppt werden, ebenfalls transparent erscheinen und daher im Durchlicht ähnlich wie Lufteinschlüsse als helle Bereiche auftreten.



**Abbildung 7-27:** IR-mikroskopische Aufnahme einer Ecke eines unterfüllten  $200\mu\text{m}$ -Testchips mit Lufteinschlüssen an Kante 2

Zur Beobachtung der Entstehungsweise von Fließblasen wird die in Abbildung 7-28 dargestellte Versuchsanlage eingesetzt.



**Abbildung 7-28:** Versuchsanlage zur Beobachtung des Fließvorgangs beim Underfill-Prozess mittels IR-Mikroskopie

Der Aufbau enthält folgende Komponenten:

1. Dreiachsroboter zum Applizieren des Underfillers
2. Zeit-Druck-Dosiereinheit
3. Steuerung
4. PC (nicht im Bild)
5. PC-Monitor
6. IR-Kamera
7. Beheizte Durchlichteinheit
8. Videorecorder
9. Fernsehmonitor

Der Dreiachsroboter und die Zeit-Druck-Dosiereinheit werden über den PC gesteuert. Der Verbund von Flip Chip und Leiterplatte wird von unten beheizt und im Bereich des Chips durchleuchtet, die IR-Kamera ist auf die Chipoberseite gerichtet. Das von der Kamera erfasste Bild wird auf den Monitor und auf das Videogerät übertragen und kann so gegebenenfalls aufgezeichnet werden.

## 7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips

---

Der Nachteil dieser Versuchsanlage gegenüber den in der Industrie üblichen Dosieranlagen für Underfiller liegt darin, dass weder eine z-Höhenerkennung noch ein optisches System zur Erfassung und automatischen x-y-Korrektur der Nadelposition relativ zum Chip integriert ist. Dazu kommt die systembedingte Positionierungsgenauigkeit des Dreiachsroboters von  $\pm 20 \mu\text{m}$ . Eine weitere Unsicherheit ergibt sich daraus, dass der Dosierdruck auf die Kartusche direkt vom Druckniveau der Versorgungsleitungen abhängt und eventuelle Schwankungen im Druckniveau direkte Auswirkungen auf die Dosiermenge haben, wohingegen Prozessanlagen in der Regel mit Dosierschnecken zur volumetrischen Dosierung des Underfillers arbeiten. Das alles führt zu Ungenauigkeiten im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der eingestellten Prozessparameter. Somit ist dieser Versuchsaufbau zwar gut zur Beobachtung der grundsätzlichen Vorgänge im Underfiller während und nach dem Fließprozess geeignet, nicht aber zur Generierung reproduzierbarer Parametereinstellungen, die für die Verifikation der numerischen Ergebnisse erforderlich sind.

Für den Abgleich von Simulation und Experiment im Hinblick auf Lage und Anzahl der entstandenen Fließblasen wird daher eine Dosieranlage der Firma Camalot von Typ 3700 eingesetzt. Dieses System bietet die automatische Korrektur der Nadelposition durch die optische Erfassung der Chipecke oder von Passermarken auf der Leiterplatte. Die softwareseitig mögliche Positionierungsgenauigkeit liegt bei  $12,7 \mu\text{m}$ . Zum volumetrischen Zumessen des Underfillers wird eine Dosierschnecke eingesetzt. Sowohl die Leiterplatte als auch der Underfiller können auf eine definierte Temperatur vorgeheizt werden. Dies alles trägt dazu bei, die Streuung der experimentellen Ergebnisse infolge zufälliger Prozessschwankungen zu minimieren.

### 7.4.2 Ultraschall-Mikroskopie

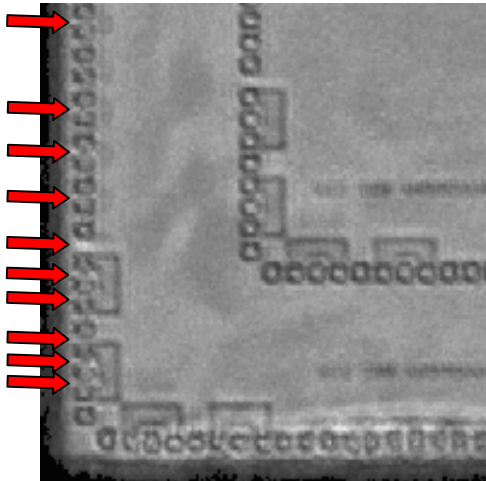
Die Ultraschall-Mikroskopie (Scanning Acoustic Microscopy – SAM) ist ein zerstörungsfreies Verfahren zur Analyse von Defekten in einem Bauteil. Phasengrenzen innerhalb eines Bauteils werden dabei anhand der Unterschiede in der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in verschiedenen Medien erfasst [ 79 ]. Mittels eines Piezo-Prüfkopfes werden Schallimpulse einer bestimmten Frequenz in den Prüfkörper eingeleitet und die reflektierten Echos erfasst. Zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Schallwellen im Medium  $c$ , der Wellenlänge  $\lambda$  und der Anregungsfrequenz  $f$  besteht folgender Zusammenhang:

$$c = \lambda f . \quad ( 7.14 )$$

Da die Schallgeschwindigkeit eine reine Materialeigenschaft ist, muss zur Erhöhung der Auflösung mit höheren Frequenzen gearbeitet werden. Gleichzeitig verringert sich aber die erzielbare Eindringtiefe im Medium.

Zur Analyse wird der Prüfkopf rasterförmig über den Prüfkörper bewegt und an jedem Punkt die reflektierte Welle erfasst. Als Koppelmedium wird in der Regel Wasser verwendet. Lokale Unterschiede der vorhandenen Phasengrenzen wie Lufteinschlüsse oder Delaminationen können so erkannt werden. Je heller ein Punkt dargestellt wird, umso höher ist die Intensität der empfangenen Welle.

Abbildung 7-29 zeigt denselben Chip wie Abbildung 7-27, aufgenommen im Ultraschall-Mikroskop. Die eindeutige Zuordnung mikroskopischer Blasen ist hier aufgrund der begrenzten Auflösung schwieriger als in der IR-Aufnahme, insbesondere in den engeren Bumpplücken. Der helle Bereich an Kante 1 wird durch eine dünne Schicht von Underfiller verursacht, der beim Auftragen des Underfillers auf die Chipoberfläche geraten ist und somit eine weitere Phasengrenze darstellt.



**Abbildung 7-29:** Beispiel US-Mikroskopie: Aufnahme einer Ecke eines unterfüllten 200µm-Testchips mit Lufteinschlüssen an Kante 2

Im Unterschied zur Infrarot-Mikroskopie kann die Ultraschall-Mikroskopie nicht zur Beobachtung des Fließvorgangs genutzt werden. Dafür kann die Ultraschall-Mikroskopie auch bei Bauteilen angewandt werden, die optisch nicht transparent sind, z.B. bei flächigen Metallisierungen in Chip oder Leiterplatte.

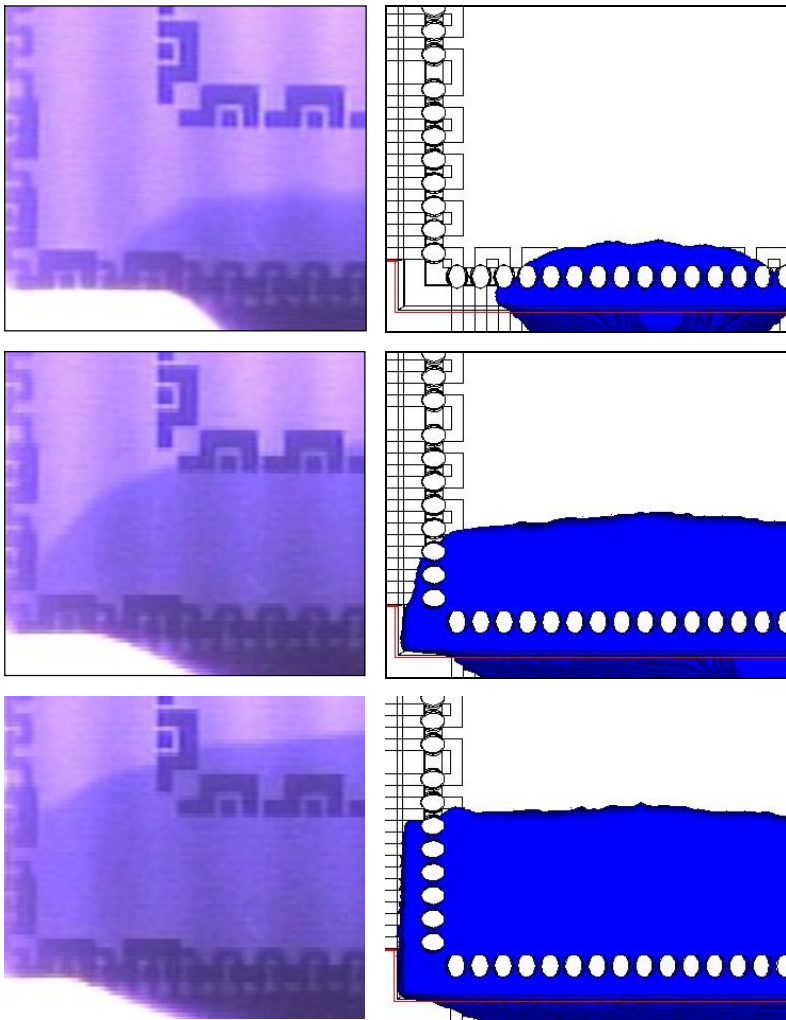
### 7.4.3 Vergleich Simulation - Experiment

Zur Verifikation der numerischen Ergebnisse werden geeignete Parameterkombinationen im Experiment nachgestellt. Die ausgewählten Varianten sind in Tabelle 7-4 aufgeführt.

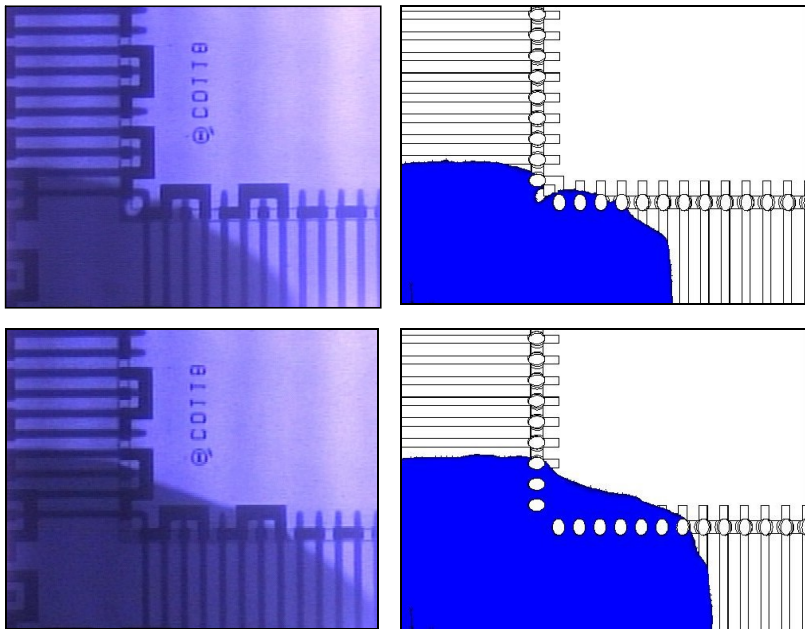
**Tabelle 7-4:** Vergleich Simulation – Experiment: Ausgewählte Varianten

Variante	Pitch [ $\mu\text{m}$ ]	Abstand Chipkante – LSL- Graben [ $\mu\text{m}$ ]	Tiefe LSL-Graben [ $\mu\text{m}$ ]	Spalthöhe [ $\mu\text{m}$ ]	Höhe der LB- Strukturen [ $\mu\text{m}$ ]	LB-Konfiguration	Startkoordinate der Nadel (x) [mm]	Abstand Nadel – Chipkante (y) [mm]	Nadel- geschwindigkeit [mm/s]
1	200	klein	40	40	5	zu	-5	0,2	5,5
2	200	klein	40	40	5	zu	-5	0,2	2
4	200	klein	40	40	5	zu	-3	0,2	5,5
11	200	klein	40	40	5	offen	-5	0,2	5,5
12	250	klein	40	80	5	zu	-5	0,2	5,5
13	250	groß	40	80	5	offen	-5	0,2	5,5

Für die Untersuchung werden Testaufbauten verwendet, bei denen IR-durchlässige Testchips auf FR5 gelötet wurden. Insgesamt zeigen Versuch und Simulation somit eine gute Übereinstimmung. Der qualitative Vergleich der Fließfrontverläufe aus Experiment (aufgenommen im IR-Verfahren) und Simulation ist im Anhang exemplarisch für die Varianten 4 (Abbildung 7-30) und 13 (Abbildung 7-31) dargestellt. Tabelle 7-5 zeigt den vollständigen Vergleich der Ergebnisse aus Simulation und Experiment.



**Abbildung 7-30:** Vergleich der Fließfrontverläufe in Experiment und Simulation (Variante 4)



**Abbildung 7-31:** Vergleich der Fließfrontverläufe in Experiment und Simulation (Variante 13)

**Tabelle 7-5:** Vergleich von Simulation und Experiment bezüglich der Entstehung von Fließblasen

Variante 1	Simulation: Blase in Lücke 8
	Experiment: Blasen in den ersten 6 Lücken
Variante 2	Simulation: Blasen in Lücken 6 und 8
	Experiment: Blasen gleichmäßig verteilt
Variante 4	Simulation: Keine Blase
	Experiment: Keine Blase
Variante 11	Simulation: Blase in Lücke 8
	Experiment: Blasen fast nur in den ersten Lücken
Variante 12	Simulation: Keine Blase
	Experiment: Keine Blase
Variante 13	Simulation: Keine Blase
	Experiment: Keine Blase

## 7.5 Wechselwirkungen

Bisher wurden die Einflüsse der verschiedenen Parameter dadurch ermittelt, dass, ausgehend von einer Basis-Konstellation, jeweils eine Größe verändert und das Ergebnis ausgewertet wurde. Dieser Ansatz ist sinnvoll, um ein grundlegendes Verständnis für die Wirkung der einzelnen Größen zu bekommen. Allerdings kann auf diese Weise weder quantifiziert werden, ob ein einzelner Parameter für das System signifikant ist, noch können Aussagen über möglicherweise auftretende Wechselwirkungen zwischen Parametern gemacht werden. Aus diesem Grund wird für die weitere Untersuchung auf die Methoden der statistischen Versuchsplanung zurückgegriffen [ 80 ].

Zur vollständigen Erfassung eventueller Wechselwirkungen werden so genannte faktorielle Versuchspläne verwendet. Dabei werden alle denkbaren Parameterkombinationen untersucht und ausgewertet. Allerdings steigt der Aufwand exponentiell mit der Anzahl der Faktoren, die untersucht werden sollen – wenn  $k$  Parameter auf  $n$  Stufen untersucht werden sollen, müssen  $n^k$  Versuche durchgeführt werden. Ein großer Teil des Aufwands fällt dabei auf die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen drei und mehr Faktoren ab. Diese sind in den meisten Fällen jedoch nicht signifikant. Daher werden zur Untersuchung vieler Faktoren bevorzugt fraktionelle faktorielle Versuchspläne herangezogen. Durch Vermengung der Haupteffekte und Wechselwirkungen zweiter Ordnung mit Wechselwirkungen höherer Ordnung wird die Gesamtzahl der durchzuführenden Versuche reduziert. Die Wirkung der vermengten Faktoren können in der Auswertung nicht mehr unterschieden werden, es dürfen nicht mehrere signifikante Effekte miteinander vermengt werden [ 81 ].

Der Unterschied zwischen vollfaktoriellen und fraktionellen faktoriellen Versuchsplänen wird im Folgenden an einem Versuchsplan mit drei Faktoren (A, B und C), die je auf 2 Stufen untersucht werden, veranschaulicht. Im vollfaktoriellen Versuchsplan, dargestellt in Tabelle 7-6, müssen dazu  $2^3=8$  Versuche durchgeführt werden.



## 7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips

**Tabelle 7-6:** Vollfaktorieller ( $2^3$ -)Versuchsplan für die Faktoren A, B und C

	Planmatrix			Auswertematrix						
	A	B	C	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-
2	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+
3	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+
4	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-
5	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+
6	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-
7	+	+	-	+	+	-	+	-	-	-
8	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Die Faktoren A, B und C werden entsprechend der Planmatrix auf hoher (+) oder niedriger (-) Stufe kombiniert. Die Symbole in den Spalten der Auswertematrix zeigen an, mit welchem Vorzeichen das Ergebnis der einzelnen Versuche in den Effekt einer Haupteinflussgröße bzw. einer Wechselwirkung eingeht. Beim vollfaktoriellen Versuchsplan unterscheiden sich alle Spalten der Auswertematrix, d.h. jeder Haupteinflussgröße und jeder Wechselwirkung kann ihr Einfluss auf das Versuchsergebnis zugeordnet werden.

Tabelle 7-7 zeigt für dieselben drei Faktoren A, B und C den zugehörigen fraktionell faktoriellen  $2^{3-1}$ -Versuchsplan mit nur 4 Parameterkombinationen. Die Planmatrix des  $2^{3-1}$ -Versuchsplans lässt sich aus der eines vollfaktoriellen  $2^2$ -Versuchsplans der Größen  $A^*$  und  $B^*$  erzeugen. Dabei wird der Effekt der Haupteinflussgröße C mit der Wechselwirkung AB vermengt, d.h. in der Analyse kann nicht mehr zwischen der Haupteinflussgröße C und der Wechselwirkung AB unterscheiden. Das gleiche gilt für die Haupteinflussgröße A und die Wechselwirkung BC und die Haupteinflussgröße B und die Wechselwirkung AC, wie man an den jeweiligen Spalten der Auswertematrix erkennen kann.

**Tabelle 7-7:** Fraktionell faktorieller ( $2^{3-1}$ -)Versuchsplan für die Faktoren A, B und C

	Planmatrix			Auswertematrix						
	A	B	C	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
	A*	B*	A*B*							
1	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+
2	+	-	-	+	-	-	-	-	+	+
3	-	+	-	-	+	-	-	+	-	+
4	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Die Verwendung fraktioneller faktorieller Versuchspläne bietet sich hauptsächlich bei einer großen Anzahl von Faktoren an. In dem Fall werden die Haupteinflussgrößen statt mit Zweifachwechselwirkungen mit Wechselwirkungen höherer Ordnung vermengt, deren Auftreten weniger wahrscheinlich ist. Allerdings werden dabei auch Zweifachwechselwirkungen miteinander vermengt. Bei der Aufstellung der Planmatrix ist es daher unerlässlich, schon bekannte Einflüsse im zu untersuchenden System zu berücksichtigen, sowie bei der Auswertung der Ergebnisse die gefundenen Effekte kritisch auf ihre Plausibilität zu überprüfen.

### 7.5.1 Untersuchte Größen

Aufgrund der in den Vorversuchen gefundenen Ergebnisse wird der Abstand der Dosiernadel zur Chipkante in den weiteren Untersuchungen nicht mehr als relevante Größe berücksichtigt. Stattdessen wird der Faktor Flussmittelrückstände (FMR) in die Liste der zu untersuchenden Größen aufgenommen. Es wird ein Versuchsplan der Auflösung IV verwendet, in dem acht Parameter auf jeweils zwei Stufen in insgesamt 16 Variationen untersucht werden. Die Vermengung der Wechselwirkungen ist damit hoch, aber anhand der bisherigen Erfahrungen lassen sich sinnvolle und nicht sinnvolle Effekte unterscheiden. Die untersuchten Parameterkombinationen und die zugehörigen Simulationsergebnisse sind in Tabelle 7-8 aufgeführt. Man erkennt gut die symmetrische Verteilung der Parameterstufen im Versuchsplan.

In der Auswertung wird aus zwei Gründen nur zwischen dem Auftreten und der Abwesenheit von Blasen unterschieden, ohne z.B. die Größe oder Anzahl der entstandenen Blasen zu bewerten. Zum einen ist die Zielgröße der Untersuchung, sicher blasenfrei zu unterfüllen, zum anderen werden die Ergebnisse aus Gründen

## 7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips

des Rechenaufwands nur an Teilgeometrien ermittelt, die teilweise nach Auftreten der ersten Blase bewertet und abgeschlossen werden.

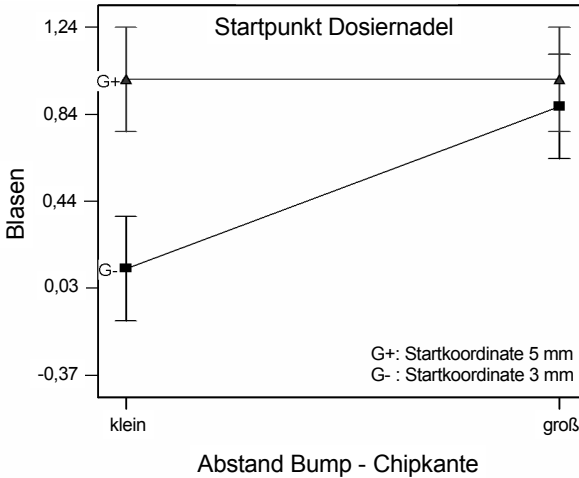
**Tabelle 7-8:** Parameter und Ergebnisse des fraktionellen Versuchsplans

Variante	Pitch [ $\mu\text{m}$ ]	Abstand Chipkante – LSL- Graben	Tiefe LSL-Graben [ $\mu\text{m}$ ]	Spalthöhe [ $\mu\text{m}$ ]	LB-Konfiguration	Nadel- geschwindigkeit [mm/s]	Startkoordinate der Nadel (x) [mm]	FMR	Blasen? [ja/nein]	Blasen in Lücke
1	200	klein	20	40	zu	2	-3	ohne	nein	-
2	250	klein	20	40	zu	5,5	-5	mit	ja	5,6,7
3	200	groß	20	40	offen	2	-5	mit	ja	0
4	250	groß	20	40	offen	5,5	-3	ohne	ja	0,1
5	200	klein	40	40	offen	5,5	-5	ohne	ja	8
6	250	klein	40	40	offen	2	-3	mit	nein	-
7	200	groß	40	40	zu	5,5	-3	mit	ja	0
8	250	groß	40	40	zu	2	-5	ohne	ja	0,2
9	200	klein	20	80	offen	5,5	-3	mit	nein	-
10	250	klein	20	80	offen	2	-5	ohne	nein	-
11	200	groß	20	80	zu	5,5	-5	ohne	nein	-
12	250	groß	20	80	zu	2	-3	mit	ja	1
13	200	klein	40	80	zu	2	-5	mit	nein	-
14	250	klein	40	80	zu	5,5	-3	ohne	nein	-
15	200	groß	40	80	offen	2	-3	ohne	nein	-
16	250	groß	40	80	offen	5,5	-5	mit	nein	-

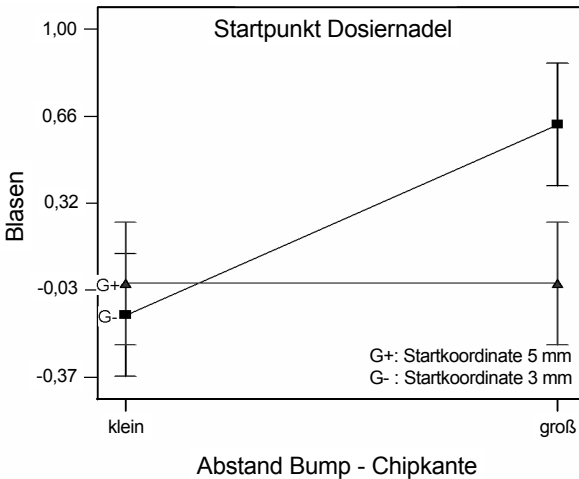
### 7.5.2 Auswertung

Die Varianzanalyse ergibt, dass die Spalthöhe, der Abstand der Bumps zur Chipkante, die Wechselwirkung des Nadelstartpunkts und des Abstands der Bumps zur Chipkante sowie die Wechselwirkung der Spalthöhe und des Nadelstartpunkts signifikante Einflüsse sind. Die Haupteffekte des Systems sind schon aus der Untersuchung in Abschnitt 7.3 bekannt: Eine geringe Spalthöhe ist ungünstig, ein hoher Spalt günstig im Hinblick auf die Blasenfreiheit. Ein kleiner Abstand der Bumps zur Chipkante ist besser, ein großer Abstand schlechter, wenn man blasenfrei unterfüllen will. Beide Haupteffekte zeigen eine Wechselwirkung mit dem Startpunkt der Dosiernadel. Die Wechselwirkungen des Abstands der Bumps zur Chipkante und des Startpunkts der Dosiernadel-

bewegung sind in Abbildung 7-32 und Abbildung 7-33 dargestellt. G steht dabei für die Startkoordinate der Dosiernadelbewegung; G+ zeigt den Effekt bei der Startkoordinate -5mm, G- den Effekt bei der Startkoordinate -3mm.



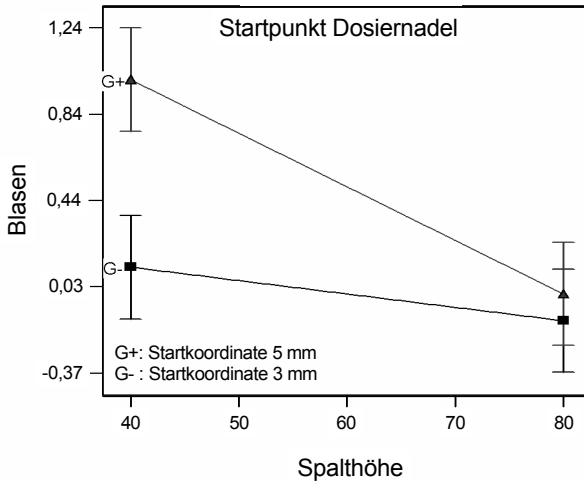
**Abbildung 7-32:** Wechselwirkung Abstand Bump - Chipkante – Startpunkt der Dosiernadelbewegung bei flachem Spalt (40µm)



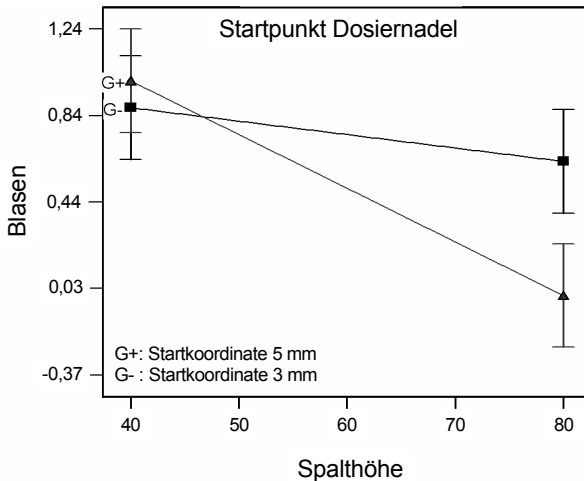
**Abbildung 7-33:** Wechselwirkung Abstand Bump - Chipkante – Startpunkt der Dosiernadelbewegung bei hohem Spalt (80µm)

## 7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips

Abbildung 7-34 und Abbildung 7-35 zeigen die Wechselwirkung der Spalthöhe und des Startpunkts der Dosiernadelbewegung.



**Abbildung 7-34:** Wechselwirkung Spalthöhe – Startpunkt der Dosiernadelbewegung bei kleinem Abstand Bump - Chipkante



**Abbildung 7-35:** Wechselwirkung Spalthöhe – Startpunkt der Dosiernadelbewegung bei großem Abstand Bump - Chipkante

Abhängig von der Einstellung der beiden Haupteffekte beeinflusst der Nadelstartpunkt das Blasenrisiko mehr oder weniger stark:

- Flacher Spalt, kleiner Abstand Bump – Chipkante (siehe Abbildung 7-32 und Abbildung 7-34):  
Beim Start der Dosiernadelbewegung bei  $x = -5$  mm ist das Blasenrisiko hoch, bei  $x = -3$  mm gering.
- Flacher Spalt, großer Abstand Bump – Chipkante (siehe Abbildung 7-32 und Abbildung 7-34):  
Das Blasenrisiko ist hoch, quasi unabhängig vom Nadelstartpunkt.
- Hoher Spalt, kleiner Abstand Bump – Chipkante (siehe Abbildung 7-33 und Abbildung 7-34):  
Das Blasenrisiko ist klein, quasi unabhängig vom Nadelstartpunkt.
- Hoher Spalt, großer Abstand Bump – Chipkante (siehe Abbildung 7-33 und Abbildung 7-35):  
Hier ist das Risiko der Blasenentstehung beim Start der Dosiernadelbewegung bei  $x = -3$  mm sogar höher als bei  $x = -5$  mm. Dieser Effekt konnte aus der Untersuchung in Abschnitt 7.3 nicht abgeleitet werden.

Die sicherste Maßnahme ist somit, in einem möglichst hohen Spalt die Bumps so dicht wie möglich an die Chipkante zu setzen und den Dosiervorgang nicht direkt an der Ecke starten zu lassen. Zur Optimierung des Underfill-Prozesses bei einer gegebenen Geometrie muss der Nadelstartpunkt an die Höhe des Fließspalts und den Abstand der Bumps zur Chipkante angepasst werden.

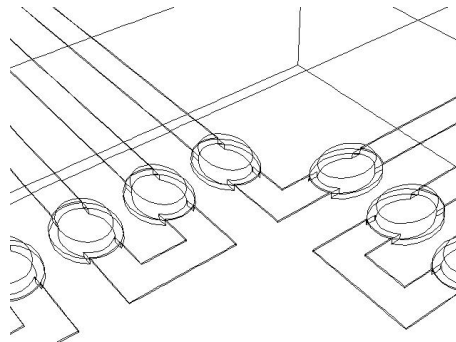
Im Gegensatz zur Untersuchung in Abschnitt 7.3 wird die Tiefe des Lötstopplackgrabens hier nicht als signifikant eingestuft. Dies kann folgende Ursachen haben:

- Die Unterschiede in den gewählten Stufen sind nicht ausgeprägt genug.
- Bei der durchgeführten Variation der einzelnen Parameter lässt sich der Effekt einer einzelnen Größe nicht quantifizieren, dadurch kann ein Einfluss als stärker eingeschätzt werden als er tatsächlich ist.
- Wird nicht nur das Auftreten von Blasen an sich bewertet, sondern ihre Anzahl und Größe quantifiziert, ist unter Umständen eine differenziertere Auswertung möglich.

## 7.6 Runde Lötstopplackaussparungen

Die Erfahrung zeigt, dass die Entstehung der mikroskopischen Fließblasen immer mit dem durchgehenden Lötstopplackgraben zusammenhängt. Alternativ zu dem bisher realisierten und für peripher kontaktierte Flip Chips üblichen Lötstopplackgraben wird daher der Einsatz einzelner kreisförmiger Lötstopplackaussparungen an den jeweiligen Bumps untersucht.

In der in Abschnitt 7.2.3 vorgestellten Grundgeometrie wird, wie Abbildung 7-36 zeigt, der durchgehende Lötstopplackgraben durch ringförmige Vertiefungen der Breite 25  $\mu\text{m}$  um die Bumps herum ersetzt.

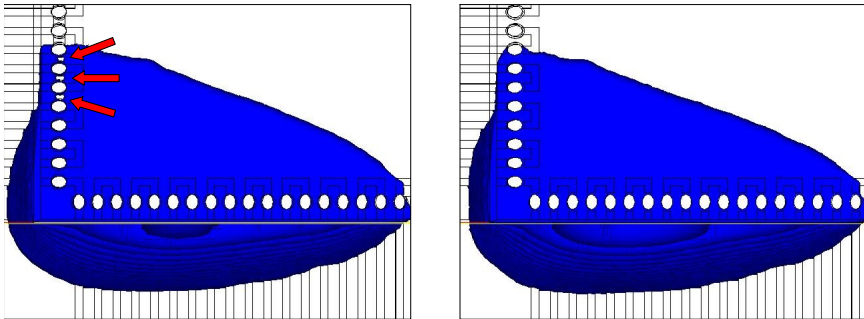


**Abbildung 7-36:** Geometrie mit runden LSL-Aussparungen

Exemplarisch werden eine Variante mit durchgehendem Lötstopplackgraben und eine Variante mit runden Lötstopplackaussparungen verglichen. Dabei werden folgende Parametereinstellungen gewählt: Ein Pitch von 250  $\mu\text{m}$  bei einem kleinen Abstand der Bumps zur Chipkante; die Tiefe des Lötstopplackgrabens beträgt 20  $\mu\text{m}$ , die Spalthöhe 40  $\mu\text{m}$ , es verlaufen geschlossene Leiterbahnstrukturen unter dem LSL. Als Prozessparameter werden eine Nadelschwindigkeit von 5,5 mm/s und der Nadelstartpunkt bei  $x = -5$  mm gewählt. An den Bumps liegen Flussmittelrückstände vor.

Abbildung 7-37 zeigt die Ergebnisse der Simulationen mit durchgängigem Lötstopplackgraben (links) und mit einzelnen runden Lötstopplackaussparungen (rechts) jeweils nach einer Fließzeit von 0,7 s. Im konventionellen durchgehenden Lötstopplackgraben werden an Kante 2 gleich mehrere Blasen in den Lücken 5, 6 und 7 eingeschlossen, die Füllung bei den einzelnen runden Lötstopplackaussparungen erfolgt bei ansonsten gleichem Fließfrontverlauf blasenfrei. Somit ist die Verwendung eines nicht durchgehenden Lötstopplackgrabens eine

wirkungsvolle Maßnahme zur sicheren Vermeidung von Fließblasen, die allerdings eine höhere Genauigkeit in der Fertigung erfordert.



**Abbildung 7-37:** Vergleich der Ergebnisse mit durchgängigem LSL-Graben (links) und runden LSL-Aussparungen (rechts)

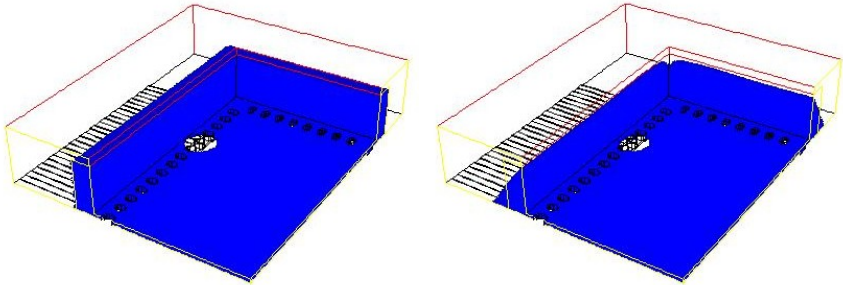
## 7.7 Vakuumverguss: Blasenverhalten beim Belüften

Neben dem Verguss bei Atmosphärendruck ist das Unterfüllen von Flip Chips im Vakuum eine weitere gebräuchliche Prozessvariante. In Experimenten wird beobachtet, dass Blasen, die im Verlauf des Underfill-Prozesses im Vakuum an den Bumps detektiert wurden, sich beim Anheben des Drucks auf Umgebungsdruck oft von den Bumps weg in Richtung Chipmitte bewegen. Die Ursache für dieses Verhalten lässt sich mit Hilfe der Simulation des Belüftungsvorgangs finden.

### 7.7.1 Rand- und Anfangsbedingungen

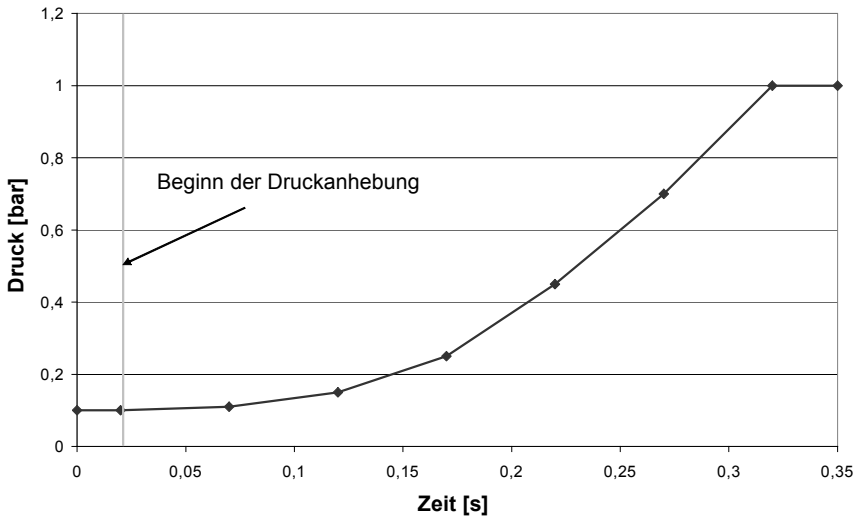
Betrachtet wird ein Teil eines Chips, vergleichbar mit dem in Abschnitt 7.2.3 vorgestellten. Das Fließen des Underfillers während des Prozesses wird nicht nachgestellt, im Ausgangszustand der Simulation ist der Chip fertig unterfüllt und enthält im Bereich des Lötstopplackgrabens einen Lufteinschluss. An der Chipkante wird ein definiertes Fluidvolumen vereinfacht in Form eines Quaders vorgegeben. Dieser Zustand ist in Abbildung 7-38 links dargestellt. Die linke Grafik zeigt den Ausgangszustand bei Simulationsbeginn, bevor sich der Gleichgewichtszustand eingestellt hat. Da ein quaderförmiges Fluiddepot physikalisch nicht stabil ist, wird in der Simulation während der ersten 20ms der Druck noch auf dem niedrigen Ausgangsniveau gehalten, bis sich ein stabiler Zustand der Phasengrenzfläche einstellt. Dabei bildet der Underfiller an den Chipkanten einen Meniskus aus, wie er in Abbildung 7-38 rechts dargestellt ist.





**Abbildung 7-38:** Anfangsbedingungen (links: zu Beginn der Simulation; rechts: nach 20ms)

In der Simulation wird der Druck von einem Wert von 0,1 bar innerhalb von 0,3 s auf 1 bar gesteigert. Als Randbedingung wird ein Druckprofil anhand von sieben Zeit-Druck-Wertepaaren definiert, zwischen denen linear interpoliert wird (siehe Abbildung 7-39).



**Abbildung 7-39:** Druckprofil

Die Luft wird mit der thermischen Zustandsgleichung für ideale Gase beschrieben, der Underfiller wird als inkompressibles Medium angenommen. Für den Underfiller werden eine Dichte von  $1400 \text{ kg/m}^3$  und ein Kontaktwinkel zu

den Wänden von 30° angenommen. Für die Viskosität des Underfillers wird die in Abschnitt 4.3 definierte Viskositätsfunktion verwendet.

### 7.7.2 Blasenverhalten während der Druckbeaufschlagung

Zu Beginn der Rechnung befindet sich die Blase zentriert im Lötstopplackgraben, wobei der Radius der Blase in etwa dem Pitch entspricht und der Blasenmittelpunkt auf einen Bump fällt. Mit steigendem Druck nimmt das Blasenvolumen ab. Die Blase verformt sich und bewegt sich zunehmend in Richtung Chipmitte, bis sie sich schließlich von den Bumps ablöst. Während des ganzen Vorganges liegt an der Blase ein einseitiger Unterdruck an, durch den die Blase ins Innere des Spaltes gezogen wird. Die Druckfelder an der Blase zu verschiedenen Zeitpunkten sind in Abbildung 7-40 dargestellt. Der chipinnenseitig an der Blase anliegende Unterdruck ist eine Folge der durch die Druckerhöhung verursachte Verkleinerung des Blasenvolumens: Der durch die Kompression der Blase frei werdende Raum muss mit Underfiller aufgefüllt werden. Da der Fließwiderstand proportional zur Fließweglänge ist, kann der Underfiller leichter von der Chipkante aus nachfließen als durch das Spaltzentrum. Daher wird außen der Druckunterschied leichter ausgeglichen als im Innern, es entstehen unsymmetrische Unterdruckgebiete und es kommt zu einer Bewegung der Blase in Richtung Chipmitte.

### 7.7.3 Druckgradient an der Phasengrenze

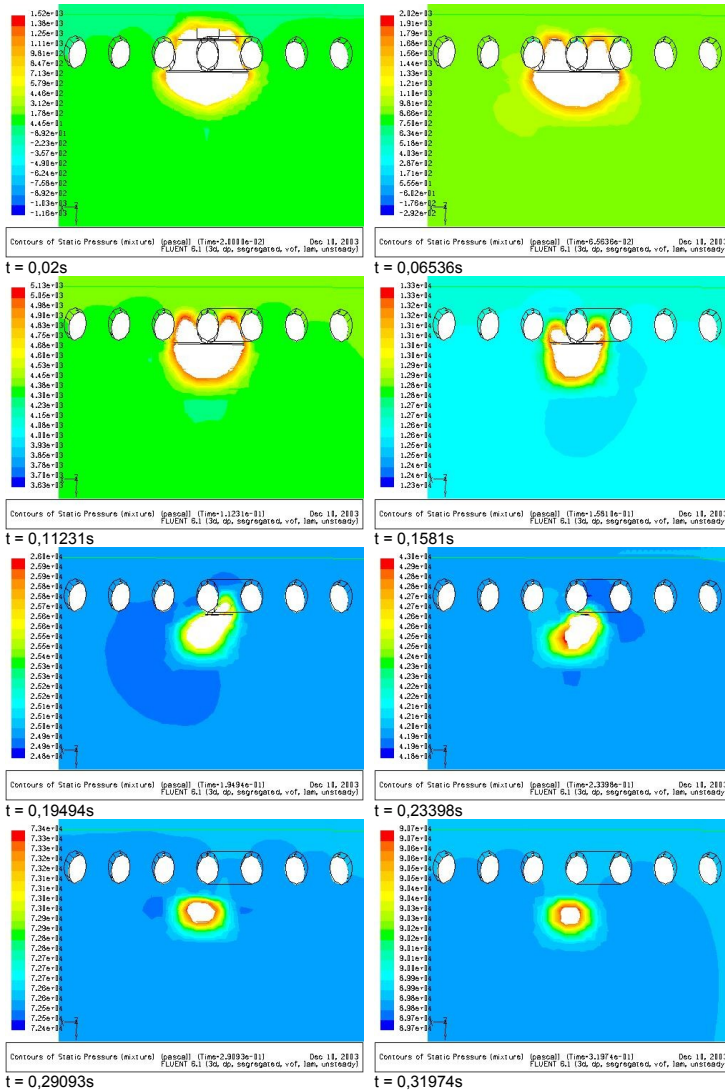
Der in der Simulation auftretende Druckgradient an der Phasengrenze kann zur Überprüfung der Ergebnisse analytisch nachvollzogen werden. Dabei wird von folgenden Randbedingungen ausgegangen:

- Die Luft verhält sich wie ein ideales Gas.
- Das Volumen der Blase beim Ausgangsdruck von 0,1bar beträgt  $6,325 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^3$ .
- Die Blase wird als ideal kugelförmig angenommen.
- Die Spalthöhe beträgt  $h = 0,05 \text{ mm}$ .
- Die Grenzflächenspannung beträgt  $\sigma = 0,03 \text{ N/m}$ .

Bei der Druckerhöhung auf 1 bar verringert sich das Blasenvolumen unter der Annahme, dass sich die eingeschlossene Luft wie ein ideales Gas verhält, auf  $6,325 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^3$ . Daraus ergibt sich ein Kugelradius von 0,053 mm. Zur Berechnung des Druckgradienten an der Phasengrenze wird die Laplace-Young-Beziehung (Gleichung (3.2)) verwendet. Mit den oben genannten Angaben

## 7 Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips

ergibt sich  $\Delta p$  zu 0,012 bar. Die sich in der Simulation einstellende Druckdifferenz beträgt 0,015 bar. Die Übereinstimmung ist also sehr gut.

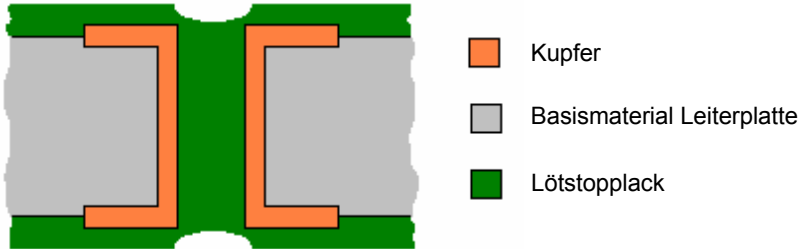


**Abbildung 7-40:** Druckbeaufschlagung: Druckfelder im Nahgebiet der Blase zu verschiedenen Zeitpunkten (Abschnitt 7.7)

---

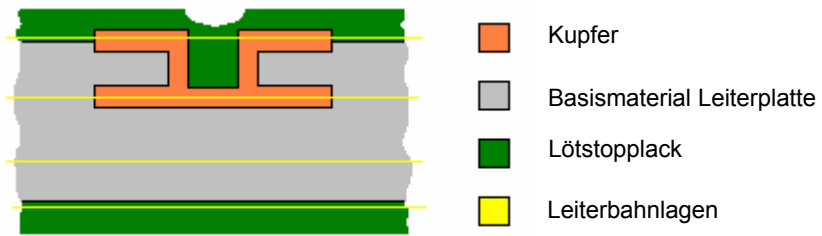
## 8 Untersuchung flächig kontaktierter Flip Chips

In den bisherigen Kapiteln wurden ausschließlich peripher kontaktierte Flip Chips betrachtet, bei denen die Bumps in einem umlaufenden Lötstopplackgraben sitzen. In Anwendungen, die viele Anbindungen erfordern, werden oft flächig kontaktierte Flip Chips, so genannte *Area Array* Flip Chips, eingesetzt. Dabei ist es in der Regel nicht möglich, die erforderliche Schaltungsgeometrie in nur einer Ebene zu realisieren. Daher werden die elektrischen Kontaktierungen auf zwei oder mehrere Lagen in der Leiterplatte verteilt. Zur Verbindung der verschiedenen Lagen dienen so genannte *Vias* („Vertical Interconnect Access“). Zur Verbindung der Außenlagen der Leiterplatte wird das Trägermaterial der Leiterplatte durchbohrt und die Wände der Bohrung werden galvanisch mit Kupfer beschichtet. Man spricht hierbei auch von Durchkontaktierungen, der realisierte Bohrungsdurchmesser liegt in der Größenordnung von 200  $\mu\text{m}$ . Abbildung 8-1 zeigt schematisch den Schnitt durch eine solche Durchkontaktierung.



**Abbildung 8-1:** Schnitt durch eine Durchkontaktierung einer zweilagigen Leiterplatte

In mehrlagigen Leiterplatten höherer Schaltdichte kommen so genannte *Micro-Vias* zum Einsatz. Dabei handelt es sich um Sacklochbohrungen kleineren Durchmessers ( $< 150 \mu\text{m}$ ), mit deren Hilfe die Außenlagen des Schaltungsträgers mit den Innenlagen verbunden werden. Wie die Leiterbahnen werden auch die Pads der Durchkontaktierungen und *Micro-Vias* der Außenschicht mit Lötstopplack überzogen. In Abbildung 8-2 ist schematisch der Schnitt durch ein *Micro-Via* in einer vierlagigen Leiterplatte dargestellt.



**Abbildung 8-2:** Schnitt durch ein Micro-Via in einer vierlagigen Leiterplatte

Mikroskopische Fließblasen können bei flächig kontaktierten Chips an den Bumps mit den ringförmigen Lötstopplackaussparungen oder an den Vertiefungen, verursacht durch Durchkontaktierungen oder Micro-Vias in der Leiterplatte, entstehen. Da es sich – im idealen Fall – in beiden Fällen um rotationssymmetrische Strukturen handelt, ist keine Abhängigkeit von der Anströmrichtung zu erwarten. Aus diesem Grund lassen sich die Mechanismen, die an diesen Strukturen zur Entstehung von Fließblasen führen können, getrennt vom eigentlichen Prozess untersuchen. Im Hinblick auf die Form der Vertiefungen in der Lötstopplackoberfläche ist eine Unterscheidung zwischen Durchkontaktierung und Micro-Via nicht notwendig, im Folgenden wird daher einheitlich der Begriff Via verwendet.

### 8.1 Relevante Größen

Für das Fließverhalten des Underfillers im Spalt zwischen Leiterplatte und flächig kontaktiertem Chip ergeben sich folgende potentielle Einflussgrößen:

- Pitch
- Spalthöhe
- Tiefe der Lötstopplackaussparung
- Breite der Lötstopplackaussparung
- Tiefe der Vias (resultierende Welligkeit der Lötstopplackoberfläche)
- (Innen-) Durchmesser der Vias
- Abstand der Bumps zur Chipkante
- Leiterbahnstrukturen unter dem Lötstopplack
- Startpunkt der Dosiernadelbewegung

- Nadelverfahrensgeschwindigkeit
- Flussmittelrückstände
- Anordnung der Bumps

Eine Größe, die sich bei der Untersuchung der peripher kontaktierten Chips als nicht relevant herausgestellt hat, ist der Verlauf der Leiterbahnstrukturen unter dem Lötstopplack. Es ist nicht zu erwarten, dass dieser Parameter bei flächig gelöteten Chips einen größeren Einfluss hat. Der Abstand der Bumps zur Chipkante war bei den peripher gelöteten Chips eine kritische Größe, durch die der Auftreffpunkt der Fließfront auf den umlaufenden Lötstopplackgraben beeinflusst wurde. Bei flächig gelöteten Chips werden im Regelfall kreisförmige Lötstopplackaussparungen um die einzelnen Lotbumps verwendet, bei denen der Kontaktpunkt mit der Fließfront für das Ergebnis nicht relevant ist. Demzufolge muss auch dieser Faktor, wie auch der Startpunkt der Dosiernadelbewegung und die Nadelverfahrensgeschwindigkeit, nicht berücksichtigt werden.

### 8.2 Modellierung

Bei der Modellierung der flächig kontaktierten Flip Chips werden folgende Vereinfachungen vorgenommen: Die Lotbumps werden als Zylinder mit kreisrunder Grundfläche und einem Durchmesser von 100  $\mu\text{m}$  modelliert. Die Lötstopplackaussparungen liegen in Form eines Rings um die Bumps. Es werden keine unter dem Lötstopplack verlaufenden Leiterbahnen modelliert, die Bumps sitzen auf kreisrunden Pads, deren Kontaktierung über in der Leiterplatte verlaufende Leiterbahnen erfolgt. Man spricht hierbei von paddefinierten Bumps, im Gegensatz zu den lötstopmaskendefinierten Bumps der peripher kontaktierten Chips. Die Wölbungen im Lötstopplack, die sich über den mit Lötstopplack abgedeckten Vias einstellen, werden vereinfacht als zylindrische Vertiefungen modelliert.

### 8.3 Voruntersuchung: Einfluss der Vias

In einer im Vorfeld der Simulation flächig kontaktierter Flip Chip-Geometrien durchgeführten Studie wird der Einfluss von Vias auf die Blasenbildung untersucht. Dazu werden systematisch der Radius  $R$  und die Tiefe  $T$  der resultierenden Höhenunterschiede in der Leiterplatte sowie die Höhe  $H$  des Fließspalts variiert. Auswertekriterium ist die Entstehung von Fließblasen in den einzelnen Vertiefungen. Die eingestellten Stufen der verschiedenen Parameter sind in Tabelle 8-1 aufgeführt:

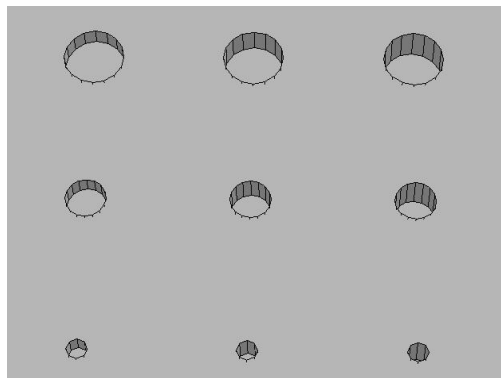
**Tabelle 8-1** Parameterstufen bei der Untersuchung der Vias

Spalthöhe H [ $\mu\text{m}$ ]	40	60	80	100	150	
Radius R [ $\mu\text{m}$ ]	10	25	50	75	100	
Tiefe T [ $\mu\text{m}$ ]	10	25	50	75	100	150

### 8.3.1 Geometrie und Gitter

Für die Simulation werden Testgeometrien entworfen, in denen eine ebene Fläche mit Vertiefungen versehen ist, wie sie z.B. bei Vias vorliegen. Über dieser strukturierten Grundplatte befindet sich in einem definierten Abstand eine ebene Deckplatte. Abbildung 8-3 zeigt einen Ausschnitt aus der beschriebenen Grundplatte. Die Vias werden dabei vereinfacht als zylindrische Vertiefungen, ausgehend vom ebenen Lötstopplack, modelliert. Die Radien der Vertiefungen steigen in Fließrichtung an. Die Tiefe wird parallel zur Einströmkante erhöht.

Ein grundsätzlich denkbarer Einfluss der zusätzlichen Erhöhung durch die bei realen Vias vorliegende umlaufende Cu-Schicht wird vernachlässigt. Für jede Spalthöhe wird eine eigene Testgeometrie verwendet.



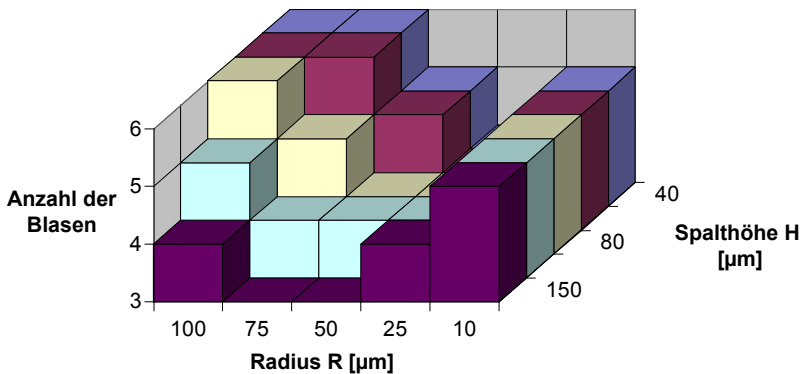
**Abbildung 8-3:** Geometrie: Ausschnitt aus der Grundplatte mit zylindrischen Lötstopplackaussparungen zur schematischen Darstellung von Vias in der Simulation

Der Underfiller strömt über eine Seitenfläche ein, das Fließen wird ausschließlich durch die Kapillarwirkung hervorgerufen.

### 8.3.2 Ergebnisse

Folgende allgemeine Einflüsse können bei der Parametervariation beobachtet werden: Bei steigender Spalthöhe  $H$  nimmt das Risiko der Blasenentstehung ab. Bei zunehmender Tiefe  $T$  der Vias steigt dagegen die Gefahr der Blasenentstehung.

Beim Radius  $R$  der Vias kann im Gegensatz dazu kein eindeutiger Zusammenhang beobachtet werden: Bei sehr kleinen und sehr großen Radien treten häufiger Blasen auf als im Bereich mittlerer Radien. Bei sehr kleinen Radien liegt kein offensichtlicher Einfluss von Spalthöhe bzw. Tiefe der Vias auf die Entstehung von Fließblasen vor.



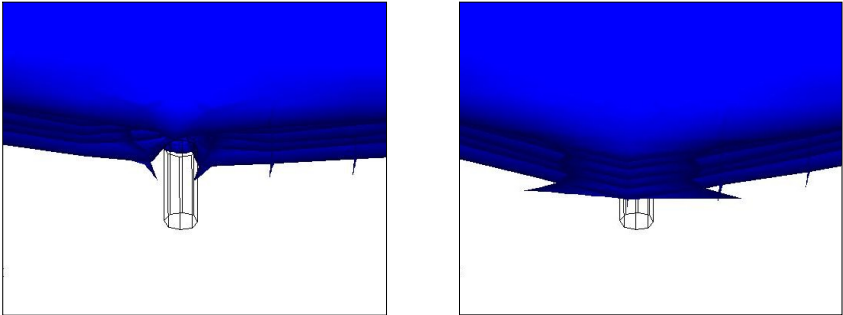
**Abbildung 8-4:** Zusammenhang zwischen dem Radius  $R$  der Vias, der Spalthöhe  $H$  und der sich einstellenden Anzahl der Blasen (ermittelt durch numerische Simulation)

Abbildung 8-4 zeigt eine Übersicht der berechneten Ergebnisse. Das Ergebnis wird dadurch um einen Freiheitsgrad reduziert, dass die Anzahl der Blasen jeweils für die verschiedenen Tiefen einer bestimmten Radius-Spalthöhen-Kombination addiert werden. Der bei dieser Art der Darstellung entstandene Informationsverlust ist sehr gering, da in allen Fällen die gleichen Parameterstufen der Tiefe betrachtet werden. Somit kann, aufgrund des monotonen Zusammenhangs zwischen Tiefe und Blasenbildung, die Anzahl der Blasen direkt mit der „Grenztiefe“, ab der Blasen entstehen, korreliert werden.



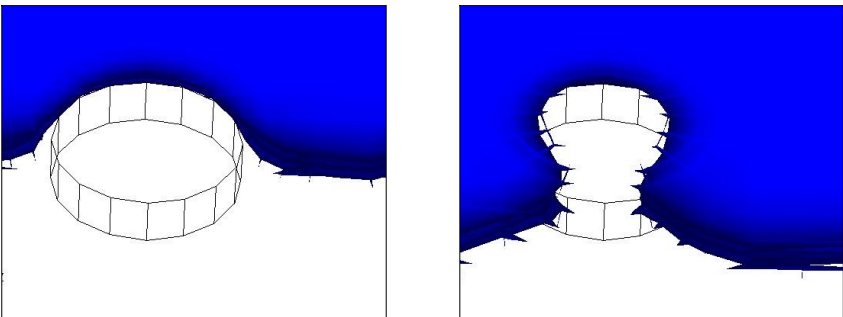
### 8.3.3 Entstehungsmechanismen

Bei großen und kleinen Radien existieren unterschiedliche Entstehungsmechanismen. Kleine Radien stellen eine so geringe Störung des Fließvorgangs dar, dass sich die Fließfront parallel über die Vertiefung hinwegbewegt, gleichzeitig ist die Hemmung des Fluids, in die Vertiefung einzudringen, hoch (siehe Abbildung 8-5).



**Abbildung 8-5:** Blasenentstehung bei kleinen Radien der Vias in der Leiterplatte ( $H = 40 \mu\text{m}$ ,  $R = 10 \mu\text{m}$ ,  $T = 50 \mu\text{m}$ )

Große Radien wirken dagegen als relevantes Fließhindernis, die Fließfront teilt sich beim Erreichen der Vertiefung und fließt an beiden Seiten daran entlang. Abhängig von der Tiefe des Via und der Spalthöhe beginnt das Fluid an der Stelle, wo sich die Teilfließfronten getrennt haben, den Spalt zu befüllen.



**Abbildung 8-6:** Blasenentstehung bei großen Radien der Vias in der Leiterplatte ( $H = 40 \mu\text{m}$ ,  $R = 100 \mu\text{m}$ ,  $T = 50 \mu\text{m}$ )

Eine Blase entsteht, wenn sich die beiden Teilfließfronten hinter dem Via zusammenschließen, bevor die Vertiefung vollständig ausgefüllt ist (siehe Abbildung 8-6). Für ein geringes Risiko der Blasenentstehung darf die Hemmung des Underfillers, in die Vertiefung einzutreten, nur gering sein. Der Fortschritt der Fließfront muss durch das Vias so stark gestört werden, dass die Vertiefung vollständig gefüllt ist, bevor die Flüssigkeit den Spalt über der Vertiefung vollständig gefüllt hat.

### 8.3.4 Experimente

Zur Verifizierung der Simulationsergebnisse werden Testvehikel entworfen. Der Fließspalt wird dabei durch einen auf die Leiterplatte gelöteten Flip Chip mit peripheren Anschlüssen definiert. Das Raster der zu untersuchenden Strukturen auf der Leiterplatte hat einen ausreichend großen Abstand von der Chipkante, so dass keine Einflüsse der Bumps auf das Fließverhalten des Underfillers zu erwarten sind. Wegen der besseren Reproduzierbarkeit der geometrischen Verhältnisse werden anstelle von tatsächlichen Vias zylindrische Aussparungen im Lötstopplack mit verschiedenen Radien realisiert. Weder die Dicke des Lötstopplacks auf der Leiterplatte noch die resultierende Spalthöhe des Fließspalts können frei variiert werden, somit kann nur der Einfluss der Radien der Lötstopplackaussparungen auf das Entstehen von Fließblasen beobachtet werden. Der kleinste simulierte Radius von  $10\ \mu\text{m}$  kann aus fertigungstechnischen Gründen nicht realisiert werden.

Die Dicke des Lötstopplacks auf der Testleiterplatte beträgt  $35 - 40\ \mu\text{m}$ , der Fließspalt ist etwa  $90\ \mu\text{m}$  hoch. Im Versuch entstehen in der Reihe mit den größten Radien Fließblasen. Dieses Ergebnis korreliert mit denen der Simulation.

## 8.4 Voruntersuchung: Einfluss der Lötstopplackaussparungen

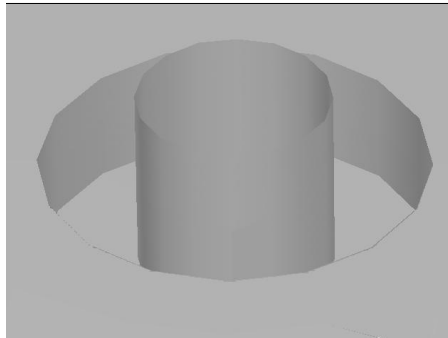
Analog zu der in Abschnitt 8.3 durchgeführten Parameterstudie wird in einem weiteren Schritt der Einfluss der Tiefe  $T$  und der Breite  $B$  der Lötstopplackaussparungen an den Bumps bei verschiedenen Spalthöhen  $H$  untersucht. Tabelle 8-2 zeigt die eingestellten Stufen der einzelnen Parameter:

**Tabelle 8-2:** Parameterstufen bei der Untersuchung der LSL-Aussparungen

Spalthöhe H [ $\mu\text{m}$ ]	40	60	80	100	150
Breite B [ $\mu\text{m}$ ]	10	30	50	75	100
Tiefe T [ $\mu\text{m}$ ]	10	20	30	40	60

### 8.4.1 Geometrie und Rechengitter

Die Lotbumps werden als zylindrische Körper mit einem konstanten Durchmesser von  $100\ \mu\text{m}$  dargestellt. Die umlaufenden Lötstopplackaussparungen sind ebenfalls zylindrisch, wobei die Bumps und die jeweilige Aussparung konzentrisch zueinander angeordnet sind. Die radiale Breite B der Lötstopplackaussparungen steigt in Fließrichtung, ihre Tiefe T jeweils parallel zur Einströmkante. Ein Ausschnitt aus der Geometrie ist schematisch in Abbildung 8-7 dargestellt. Die Randbedingungen werden analog zur Untersuchung der Vias gewählt (siehe Abschnitt 8.3.1).



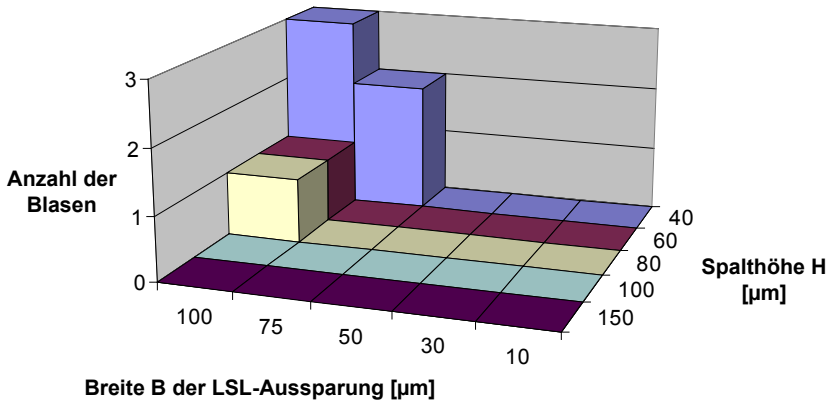
**Abbildung 8-7:** Geometrie: einzelner Bump in einer LSL-Aussparung

### 8.4.2 Ergebnisse

Im Hinblick auf die Blasenentstehung lassen sich folgende Tendenzen erkennen: Mit zunehmender Spalthöhe H nimmt das Risiko der Blasenentstehung ab, mit zunehmender Tiefe T der Lötstopplackaussparung steigt die Gefahr der Blasenentstehung. Bei größer werdender Breite B der Lötstopplackaussparung steigt die Gefahr der Blasenentstehung gleichfalls.

Nur bei sehr großen Breiten der Lötstopplackaussparung ( $B \geq 75\ \mu\text{m}$ ) und relativ kleinen Spalthöhen kommt es überhaupt zur Entstehung von Fließblasen. Im Gegensatz zu den Vias besteht hier ein monotoner Zusammenhang zwischen den

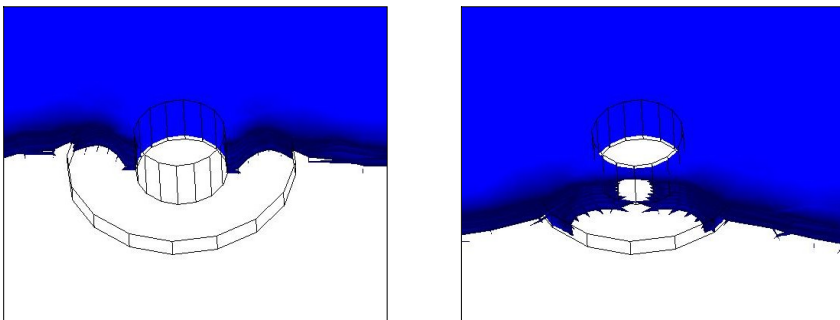
einzelnen Parametern und der Neigung zur Blasenbildung. In Abbildung 8-8 sind die Ergebnisse zusammengefasst.



**Abbildung 8-8:** Zusammenhang zwischen der Breite B der LSL-Aussparungen, der Spalthöhe H und der resultierenden Anzahl der Blasen (ermittelt durch numerische Simulation)

### 8.4.3 Entstehungsmechanismen

Blasen werden nur an sehr breiten Lötstopplackaussparungen eingeschlossen, die Entstehung erfolgt nach dem gleichen Mechanismus wie bei den Vias mit großem Durchmesser (siehe Abbildung 8-9).

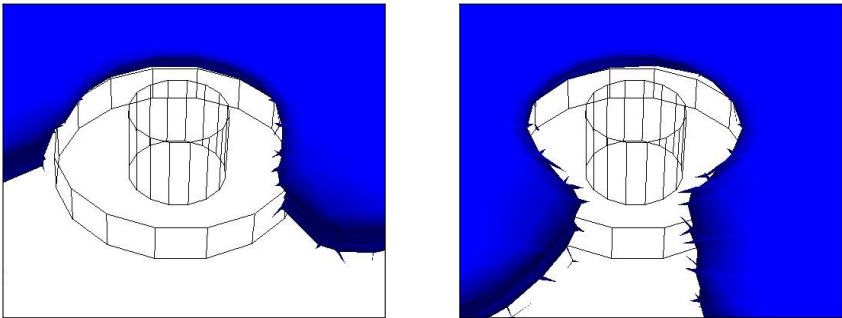


**Abbildung 8-9:** Füllverhalten an der Lötstopplackaussparung ( $H = 40 \mu\text{m}$ ,  $B = 75 \mu\text{m}$  und  $T = 20 \mu\text{m}$ )

## 8 Untersuchung flächig kontaktierter Flip Chips

Der Einfluss der breiten Aussparungen ist so groß, dass die Fließfront sich teilt und der Underfiller von beiden Seiten um die Aussparung herum fließt. Bei flachen Aussparungen ist die Hemmung des Fluids, in die Aussparung einzudringen, nur gering und der untere Bereich des Rings kann vollständig gefüllt werden, bevor die beiden Teilfließfronten im oberen Bereich des Spalts wieder auf einander treffen.

Bei tiefen Lötstopplackaussparungen ist zum einen der Widerstand gegen das Eindringen größer, zum anderen muss ein größeres Volumen befüllt werden. Daher können Luft einschlüsse entstehen, wenn der Ring um die Bumps nur teilweise oder gar nicht mit Underfiller gefüllt wird. Dieses Verhalten ist in Abbildung 8-10 dargestellt.



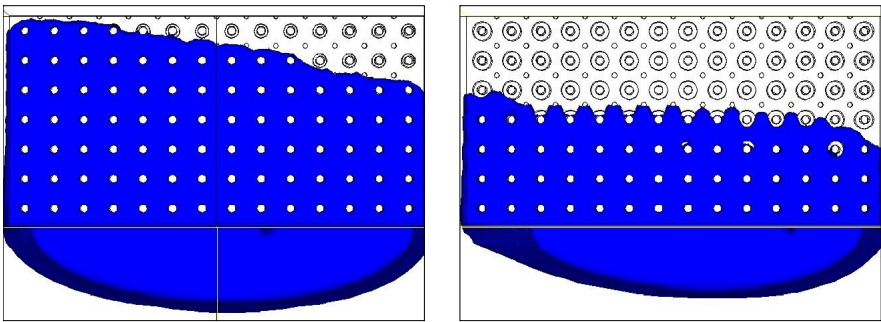
**Abbildung 8-10:** Füllverhalten an der Lötstopplackaussparung ( $H = 40 \mu\text{m}$ ,  $B = 75 \mu\text{m}$  und  $T = 40 \mu\text{m}$ )

## 8.5 Untersuchungen an flächig kontaktierten Chips

### 8.5.1 Referenzrechnung

Simuliert wird eine Konfiguration mit typischen Abmessungen: Der Chip hat eine quadratische Grundfläche bei einer Kantenlänge von 5 mm. Der Abstand der Bumps beträgt  $350 \mu\text{m}$ . Die ringförmigen Lötstopplackaussparungen um die Chips haben eine radiale Breite von  $32 \mu\text{m}$  und sind  $40 \mu\text{m}$  tief. Versetzt zwischen den Bumps befinden sich Vias mit einem Radius von  $30 \mu\text{m}$ , der resultierende Höhenunterschied des Lötstopplacks an den Vias beträgt  $15 \mu\text{m}$ . Die Spalthöhe wird mit  $40 \mu\text{m}$  extra klein und damit ungünstig für eine blasenfreie Unterfüllung gewählt. Die Dosiernadelbewegung startet am Punkt  $x = -2,5 \text{ mm}$ , die Nadel verfährt mit einer Geschwindigkeit von  $5 \text{ mm/s}$ . Das Ergebnis dieser Simulation ist in Abbildung 8-11 links dargestellt. Es kann keine

Neigung zur Blasenbildung festgestellt werden. Zum Nachweis, dass es mit den verwendeten Methoden prinzipiell möglich ist, die Entstehung von Fließblasen unter flächig kontaktierten Chips zu simulieren, wird diesem Ergebnis eine Variante mit im Hinblick auf das Blasenrisiko „verschärften“ Abmessungen gegenübergestellt. Dabei werden die Tiefe und die Breite der Lötstopplackaussparung auf je  $60\ \mu\text{m}$  erhöht, die restlichen Parameter bleiben unverändert. Das Ergebnis dieser Rechnung ist in Abbildung 8-11 rechts dargestellt.



**Abbildung 8-11:** Gegenüberstellung: Blasenentstehung bei üblichen (links) und „ungünstigen“ (rechts) Abmessungen ( $t = 1,04\ \text{s}$ )

In dieser Konfiguration wird gleich an mehreren Stellen Luft eingeschlossen. Da das zu füllende Volumen der Lötstopplackaussparungen größer ist als in der bisherigen Variante, verringert sich die globale Fließgeschwindigkeit im Spalt entsprechend. Der Vergleich zeigt, dass in praxisrelevanten Geometrien ein erhöhtes Risiko der Entstehung von mikroskopischen Fließblasen ausgeschlossen werden kann. Auch eine Neigung zur Bildung makroskopischer Fließblasen ist im oben aufgeführten Beispiel nicht zu erkennen. Die regelmäßige Anordnung der Bumps führt zu einer Vergleichmäßigung der Fließfront, ein Voreilen der Fließfront an der Kante kann nicht beobachtet werden.

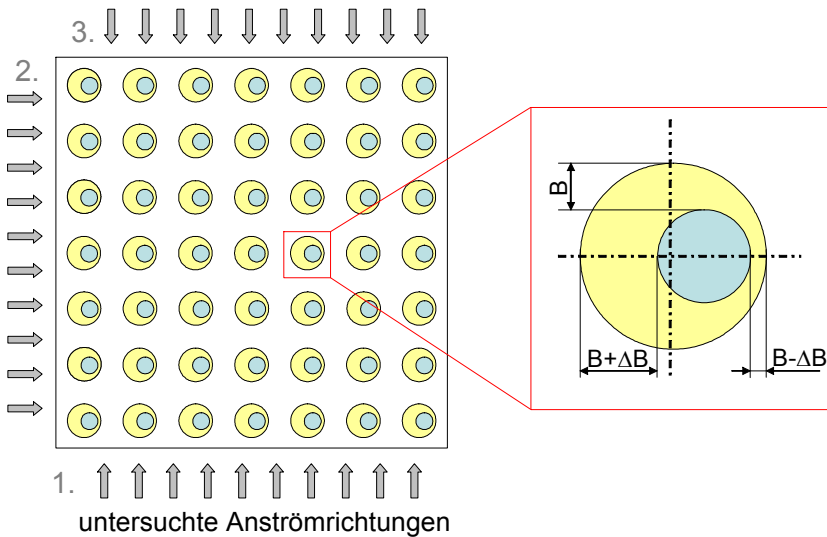
Eine mögliche, noch zu untersuchende Ursache für die Entstehung von Fließblasen in eigentlich unkritischen Konfigurationen ist ein fertigungsbedingter Versatz des Lötstopplacks auf der Leiterplatte relativ zu den Lotpads, wodurch die Bumps nicht mehr konzentrisch in der Lötstopplackaussparung sitzen. Diese Situation wird in Abschnitt 8.5.2 untersucht. Weitere Irregularitäten, wie z.B. größere Anhäufungen von Flussmittelrückständen auf der Leiterplatte, können im Rahmen dieser Arbeit nicht sinnvoll untersucht werden. Schließlich bleibt noch

## 8 Untersuchung flächig kontaktierter Flip Chips

zu klären, ob in künftigen feinstrukturierten Anwendungen mit einem höheren Risiko im Hinblick auf mikroskopische Blasen zu rechnen ist. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 8.5.3 überprüft.

### 8.5.2 Simulation des Lötstopplackversatzes

Untersucht wird der Einfluss eines Lötstopplackversatzes auf der Leiterplatte in Fließrichtung und quer zur Fließrichtung von  $\Delta B = \pm 20 \mu\text{m}$  bei ansonsten unveränderten Parametern. Abbildung 8-12 zeigt einen Ausschnitt der verwendeten Geometrie und die untersuchten Anströmrichtungen.



**Abbildung 8-12:** Geometrien zur Untersuchung des Lötstopplackversatzes

In keiner der Varianten kommt es zu Luftpfehlüssen. Ein moderater Versatz des Lötstopplacks auf der Leiterplatte kann somit als unkritisch im Hinblick auf die Entstehung von Fließblasen gewertet werden.

### 8.5.3 Simulation eines engen Anschlussrasters

Schließlich wird noch der Einfluss eines engen Anschlussrasters auf den Underfill-Prozess untersucht. Dafür wird ein Chip mit einem Pitch von  $150 \mu\text{m}$  und einer Kantenlänge von  $4,95 \text{ mm}$  gewählt. Der Durchmesser der Bumps beträgt  $70 \mu\text{m}$ , der Durchmesser der Lötstopplack-Aussparung  $100 \mu\text{m}$ . Sowohl die Höhe des Fließspaltes als auch die Tiefe der Lötstopplackaussparungen

beträgt 40  $\mu\text{m}$ . Es werden keine Vias modelliert. Auch bei kleinem Pitch kann keine Neigung zur Blasenbildung festgestellt werden. Allerdings ist zu erwarten, dass bei einem engeren Anschlussraster Nicht-Idealitäten im Prozess, wie zum Beispiel Ablagerungen von Flussmittelrückständen, das Fließverhalten stärker beeinflussen.



---

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Fließverhalten von Underfillern bei Flip Chip-Anwendungen anhand von Strömungssimulationen und begleitenden Experimenten untersucht. Das Augenmerk lag dabei auf den Ursachen, die zur Entstehung von Luftpneumaten führen. Diese sind zu vermeiden, da sie zu einer Verminderung der Zuverlässigkeit des Verbundes von Flip Chip und Substrat führen können.

Als Grundlage für die Simulation wurde der verwendete Modell-Underfiller vollständig charakterisiert. Es wurden die Dichte und die Grenzflächenspannung gegen Luft gemessen. Die Viskosität wurde in Abhängigkeit von der Schergeschwindigkeit ermittelt und über den fünfparametrischen Carreau-Yasuda-Ansatz modelliert. Schließlich wurden die Kontaktwinkel gemessen, die der Underfiller auf Glas sowie den verschiedenen im Verbund vorliegenden Materialien ausbildet. Sämtliche Stoffwerte wurden bei der Verarbeitungstemperatur des Underfillers von 70°C ermittelt.

Zur Auswahl einer geeigneten Software für die Füllsimulation wurden zwei charakteristische Testfälle herangezogen. Die an das zu verwendende Programm gestellten Anforderungen wurden von der Strömungssimulationssoftware Fluent erfüllt. Um die quantitative Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit der Realität zu überprüfen, wurden Experimente an einem einfachen Testvehikel durchgeführt und mit der Simulation korreliert. Als Testvehikel diente dabei ein planparalleler Spalt zwischen zwei Glasplatten definierter Höhe, in dem die Fließlänge des Underfillers in Abhängigkeit von der Zeit gemessen wurde. Die in der Simulation ermittelten Werte geben die experimentellen Ergebnisse gut wieder.

Bei der Ermittlung der Viskositätsfunktion war im Bereich sehr niedriger Schergeschwindigkeiten ein zeitabhängiger Anstieg der gemessenen Viskositätswerte beobachtet worden. Um zu überprüfen, wie wichtig dieser Zeiteffekt für die Beschreibung des Füllvorganges ist, wurden Untersuchungen an Glaschips mit flächigem Anschlussraster durchgeführt, die auf einer Glasplatte fixiert wurden. Es konnte gezeigt werden, dass es bei kleinen Fließgeschwindigkeiten zu einer reversiblen Ausbildung von Strukturen zwischen den Füllstoffpartikeln kommt. In der Phase des Fließvorgangs, in der es zur Entstehung von Fließblasen kommen kann, herrschen jedoch hohe Schergeschwindigkeiten vor, und dieser Effekt ist nicht relevant.

Ein Effekt, der hingegen bei hohen Schergeschwindigkeiten an Bedeutung gewinnt, ist aus der Literatur als Partikelmigration bekannt (z.B. [ 61 ]) und wird verursacht durch die schergeschwindigkeits- und konzentrationsabhängige Diffusion der Partikel im Fließkanal. Das Migrationsmodell von Zhang und Acrivos [ 2 ] wurde in Form einer benutzerdefinierten Unterroutine in Fluent implementiert und mit den experimentellen Ergebnissen von Guo et. al [ 63 ] getestet. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment festgestellt werden. Im Fall des in dieser Arbeit verwendeten Modell-Underfillers konnte hingegen aufgrund des geringen Füllstoffanteils kein nennenswerter Einfluss der Partikelmigration festgestellt werden. Daher wurden auch die nachfolgenden Untersuchungen unter der Annahme einer homogenen Füllstoffverteilung im Underfiller durchgeführt.

In Kapitel 7 ist die Untersuchung peripher kontaktierter Flip Chips beschrieben. Für eine möglichst umfassende Evaluierung potentieller Einflussgrößen wurden sämtliche Stoff-, Geometrie- und Prozessparameter erfasst und ihre Zusammenhänge analysiert. Dadurch ließ sich die Menge der zu untersuchenden Einflüsse auf acht Parameter reduzieren.

In der Simulation wurde die bewegte Dosiernadel mit Hilfe einer benutzerdefinierten Unterroutine implementiert. Die ausreichende Feinheit des Rechengitters konnte anhand einer Gitterstudie nachgewiesen werden. Anhand einer Referenzrechnung wurde das grundsätzliche Fließverhalten des Underfillers im Chipspalt vorgestellt. Die Ergebnisse der Simulation sind physikalisch plausibel, auch Effekte wie das schon mehrfach in der Literatur beschriebene Voraneilen des Underfillers an der Chipkante werden wiedergegeben.

Bei der Untersuchung der Einflussgrößen wurden ausgehend von der Referenzrechnung die Parameter einzeln variiert und ihr Einfluss im Hinblick auf die Blasenfreiheit bewertet. Hierbei erwiesen sich ein flacher Lötstopplackgraben, ein hoher Spalt, ein kleiner Abstand der Bumps zur Chipkante sowie ein nach innen gerückter Startpunkt der Dosiernadelbewegung als günstig zur Vermeidung von Lufteinschlüssen. Die Ergebnisse der Simulation wurden, soweit realisierbar, im Experiment bestätigt. In einer weiteren Untersuchung wurden die Einflussgrößen auf Basis eines fraktionellen Versuchsplans auf ihre statistische Signifikanz sowie auf eventuelle Wechselwirkungen untersucht. Als signifikante Einflussgrößen erwiesen sich die Spalthöhe, der Abstand der Bumps zur Chipkante, die Wechselwirkung zwischen dem Nadelstartpunkt und dem Abstand der Bumps zur Chipkante sowie die Wechselwirkung der Spalthöhe mit dem Nadelstartpunkt.

Durch die Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Entstehung mikroskopischer Fließblasen immer mit dem bei peripher kontaktierten Flip Chips praxisüblichen durchgängigen Lötstopplackgraben zusammenhängt. In der Simulation wurde in einer Variante mit erhöhtem Blasenrisiko der durchgängige Lötstopplackgraben durch einzelne runde Lötstopplackausparungen ersetzt, wodurch eine blasenfreie Füllung erreicht werden konnte.

Außer den Einflüssen, die zur Entstehung von Fließblasen führen, wurde das Verhalten schon vorhandener Blasen an den Bumps bei einem Anstieg des Umgebungsdrucks simuliert. In experimentellen Untersuchungen war beobachtet worden, dass nach einem Vakuumverguss mit anschließender Belüftung auf Normaldruck mikroskopische Blasen nicht an den Bumps, sondern im Bereich der Chipmitte auftraten. Mit Hilfe der Simulation konnte dieses Verhalten anhand des resultierenden Druckfelds im Chipspalt erklärt werden.

Neben den peripher kontaktierten Flip Chips wurden auch der Underfill-Prozess bei flächig kontaktierten Flip Chips untersucht, wie sie im Zuge der zunehmenden Miniaturisierung und Komplexität immer mehr an Bedeutung gewinnen. Es konnte gezeigt werden, dass bei praxisüblichen Abmessungen und Prozessparametern die Gefahr der Entstehung mikroskopischer Fließblasen nicht gegeben ist. Auch ein feinerer Pitch führt nicht zwangsläufig zu einem höheren Risiko der Blasenbildung.

Die hier entwickelte Methode zur Simulation des Fließverhaltens von Underfillern ist somit ein geeignetes Werkzeug zur Prozessoptimierung. Die identifizierten Einflussparameter der Blasenentstehung unterstützen die auf den Underfill-Prozess zugeschnittene Konzeption zukünftiger Flip Chip-Aufbauten.

Das in Abschnitt 7.2.6 angesprochene Problem der hohen Rechenzeiten behindert im Moment noch den effizienten Einsatz der vorgestellten Methoden im Zuge des Chip-Designs. Bleibt der Trend der letzten Jahrzehnte, bekannt geworden als Moore'sches Gesetz [ 82 ], bestehen, dem zufolge sich die Rechnerkapazitäten alle ein bis zwei Jahre verdoppeln, ist die Anwendung der Fließsimulation in einer frühen Phase des Chip-Designs zur Optimierung des gesamten Verbundes in absehbarer Zukunft vorstellbar.

In künftigen Arbeiten sollte die Untersuchung auf komplette Chipgeometrien ausgeweitet werden. In diesem Zusammenhang ist auch die Studie des Einflusses des Dispensmusters auf den Underfill-Prozess denkbar. Eine erweiterte Zielsetzung ist die gleichzeitige Optimierung der Qualität der Chipunterfüllung und der Fließdauer zur Verringerung der Prozesszeiten.

---

# Quellen

- [ 1 ] Schwiebert, M. K., Leong, W. H.: *Underfill Flows as Viscous Flow Between Parallel Plates driven by Capillary Action*. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology – Part C, 19(2), 1996, S. 133-137.
- [ 2 ] Zhang, K., Acrivos, A.: *Viscous Resuspension in Fully Developed Laminar Pipe Flows*. Int. J. Multiphase Flow, 20(3), 1994, S. 579-591.
- [ 3 ] <http://www.vde.com/Allgemein/Informationen/Presse/2003-Oeffentlich/2003-85.htm>, 15.9.2005
- [ 4 ] Johnson, R. W., Evans, J. L., Jacobsen, P., Thompson, J. R., Christopher, M.: *The Changing Automotive Environment: High-Temperature Electronics*. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing 27(3), 2004, 164-176.
- [ 5 ] Tummala, R. R., Sundaram, V., Liu, F., White, G., Bhattacharya, S., Pulugurtha, R. M., Swaminathan, M., Dalmia, S., Laskar, J., Jokerst, N. M., Chow, S. Y.: *High Density Packaging in 2010 and Beyond*. 2002 International Symposium on Electronic Materials and Packaging, S. 30-36.
- [ 6 ] Chang, C. S., Oscilowski, A., Bracken, R. C.: *Future Challenges in Electronics Packaging*. Circuits & Devices 1998, S. 45-54.
- [ 7 ] Tummala, R. R.: *Fundamentals of Microsystems Packaging*. 1. Auflage New York: McGraw-Hill, 2001.
- [ 8 ] Lau, J. H.: *Flip Chip Technologies*. 1. Aufl. New York: McGraw-Hill Book Company, 1996.
- [ 9 ] Wang, L., Wong, C. P.: *Recent Advances in Underfill Technology for Flip-Chip, Ball Grid Array, and Chip Scale Package Applications*. International Symposium on Electronic Materials and Packaging 2000, S. 224-231.
- [ 10 ] Elenius, P., Levine, L.: *Comparing Flip-Chip and Wire-Bond Interconnection Technologies*. Chip Scale Review Juli/August 2000, S. 81 – 87.
- [ 11 ] Mescher, P., Scanlan, C., Erich, R., Parker, C., O'Brien, P.: *Application Specific Flip Chip Packages: Considerations and Options in Using Flip Chips*. Pan Pacific Microelectronics Symposium Conference 2000.

## Quellen

---

- [ 12 ] Pascariu, G., Cronin, P., Crowley, D.: *Next Generation Electronics Packaging Utilizing Flip Chip Technology*. IEEE/CPMT/SEMI International Electronics Manufacturing Technology Symposium 2003, S. 432 – 426.
- [ 13 ] Norris, K. C., Landzberg, A. H.: *Reliability of Controlled Collapse Interconnections*. IBM Journal of Research and Development 1969, S. 266-271.
- [ 14 ] Nakano, F., Soga, T., Amagi, S.: *Resin-Insertion Effect on Thermal Cycle Resistivity of Flip-Chip Mounted LSI Devices*. International Society of Hybrid Microelectronics Conference 1987.
- [ 15 ] Tummala, R. R.: *Microelectronics Packaging Handbook*. 1. Aufl. New York: Van Nostrand Reinhold, 1989.
- [ 16 ] Rau, I.: *Bewertung und Zuverlässigkeitsanalyse von Underfillmaterialien für die Flip-Chip-Technik*. Diss TU Berlin, 2005.
- [ 17 ] Bradley, E.: *Lead-Free Solder Assembly: Impact and Opportunity*. Electronic Components and Technology Conference 2003, S. 41-46.
- [ 18 ] DIN EN 29454: *Flußmittel zum Weichlöten – Teil 1: Einteilung, Kennzeichnung und Verpackung*. 1994.
- [ 19 ] Strauss, R.: *Surface Mount Technology*. 1. Aufl. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994.
- [ 20 ] Jianjun, L., Sung, Y.: *Studies on Thermal and Mechanical Properties of PBGA Substrate and Material Construction*. Electronic Components and Technology Conference 2002, S. 1595-1604.
- [ 21 ] Kück, H.: *Miniaturtechnik I-II*. Vorlesungsunterlagen Universität Stuttgart 2001/2002.
- [ 22 ] Patra, S. K., Lee, Y. C.: *Modeling of Self-Alignment Mechanism in Flip-Chip Soldering Part II: Multichip Solder Joints*. Electronic Components and Technology Conference 1991, S. 783-788.
- [ 23 ] Thompson, J. R., Freytag, J., Senske, W., Wondrak, W.: *An Automotive Industry's Perspective on High-Temperature Electronics*. SMTA 2002.
- [ 24 ] Wondrak, W., Debhi, A., Umbach, G., Blessing, A., Getto, R., Pesl, F. P., Unger, W.: *Passive Components for High Temperatures: Application Potential and Technological Challenges*. AEC Reliability Workshop, Nashville 2004.

- 
- [ 25 ] Norris, M. J.: *Dispensing Flip Chip Underfill Process Problems and Solutions*. IEEE/CPMT Berlin International Electronics Manufacturing Technology Symposium 1998, S. 119-124.
- [ 26 ] Roesner, B.: *The Beneficial Effect of Underfilling on the Reliability of Flip-Chip Joints*. PEP'97.
- [ 27 ] Quinones, H., Babiarz, A.: *Flip Chip, CSP and WLP Technologies: A Reliability Perspective*. IMAPS Nordic 2001.
- [ 28 ] Zhang, Z., Wong, C. P.: *Recent Advances in Flip-Chip Underfill: Materials, Process, and Reliability*. IEEE Transactions on Advanced Packaging 27(3), 2004, S. 515-524.
- [ 29 ] Wun, B., Lau, J.: *Characterization and Evaluation of the Underfill Encapsulants for Flip Chip Assembly*. International Electronics Manufacturing Technology Symposium 1994, S. 139-146.
- [ 30 ] Babiarz, A. J., Huysmans, F.: *Advances in Dispensing Processes for Flip Chip Underfill*. ISHM NORDIC 34<sup>th</sup> Annual Conference 1997.
- [ 31 ] Wun, K.-L. B., Margaritis, G.: *The Evaluation of Fast-Flow, Fast-Cure Underfills for Flip Chip on Organic Substrate*. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part A, Vol. 21, No. 1, 1998, S. 13-17.
- [ 32 ] Zhang, F., Li, M., Chen, W. T., Chian, K. S.: *An Investigation into the Effects of Flux Residues on Properties of Underfill Materials for Flip Chip Packages*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 26(1), 2003, S. 233-238.
- [ 33 ] Suryanarayana, D., Wu, T. Y., Varcoe, J. A.: *Encapsulants Used in Flip-Chip Packages*. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology 16(8), 1993, S. 858-862.
- [ 34 ] Rasiah, I. J.: *Selecting an Underfill for Flip Chip Packaging*. Electronics Engineer 1999.
- [ 35 ] Fan, L., Zhang, Z., Wong, C. P.: *Effect of Filler Settling of Underfill Encapsulant on Reliability Performance*. 2001 International Symposium on Advanced Packaging Materials, S. 218-223.
- [ 36 ] Wang, J., Chen, T.: *The Effect of Flow Properties on Filler Settling of Underfill in the Flip Chip Package*. Electronic Components and Technology Conference 2004, S. 761-766.
- [ 37 ] Babiarz, A. J., Quinones, H., Ciardella, R.: *Fast Underfill Processes for Large to Small Flip Chips*. Pan Pacific International Conference 2001.

- [ 38 ] Quinones, H., Babiarz, A. J., Adamson, S. J.: *Flip Chip And Chip Scale Packaging Technologies - A Historical Perspective And Future Challenges*. SEMICON China 2000 Technical Symposium, S. A1-A10.
- [ 39 ] Fujiki, T., Tanaka, F., Homma, Y., Yoshii, H., Kotaka, K.: *Prevention of Voids during the Underfill Process*. Proceedings of HDP 2004, S. 221-223.
- [ 40 ] Lucero, A. E., Dias, R., Pavey, T.: *Predictive Reliability Modeling for Flipchip Interconnect Bump Extrusion*. Electronic Components and Technology Conference 2000, S. 61-623.
- [ 41 ] Schubert, A., Dudek, R., Kloeser, J., Michel, B., Reichl, H., Hauck, T., Kaskoun, K.: *Experimental and Numerical Reliability Investigations of FCOB Assemblies with Process-induced Defects*. Electronic Components and Technology Conference 2000, S. 624-632.
- [ 42 ] Rzepka, S., Feustel, F., Meusel, E., Korhonen, M. A., Li, C.-Y.: *The Effect of Underfill Imperfections on the Reliability of Flip Chip Modules: FEM Simulation and Experiments*. Electronic Components and Technology Conference 1998, S. 362-370.
- [ 43 ] Piesche, M.: *Grundlagen der Mechanischen Verfahrenstechnik*. Vorlesungsunterlagen Universität Stuttgart, 1999.
- [ 44 ] Adamson, A. W., Gast, A. P.: *Physical Chemistry of Surfaces*. 6. Aufl. New York: John Wiley & Sons Inc. 1997.
- [ 45 ] Truckenbrodt, E.: *Strömungsmechanik*. 1. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1968.
- [ 46 ] Jiang, H.: *Untersuchung des Underfillingprozesses für die Flip-Chip-Technik*. Diss TU Berlin, 2000.
- [ 47 ] Lai, C.-L., Young, W.-B.: *A Model for Underfill Viscous Flow Considering the Resistance Induced by Solder Bumps*. Transactions of the ASME 126, 2004, S. 186-194.
- [ 48 ] Fenner, R. T.: *Principles of Polymer Processing*. 1. Aufl. London: Macmillan Press Ltd. 1979.
- [ 49 ] Ferziger, J. H., Peric, M.: *Computational Methods for Fluid Dynamics*. 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag 1999.
- [ 50 ] Schütz, S.: *Modellbildung und Simulation von Strömungsvorgängen*. Vorlesungsunterlagen Universität Stuttgart, 2000.
- [ 51 ] Nichols, B.D. and Hirt, C.W.: *Methods for Calculating Multi-Dimensional, Transient Free Surface Flows Past Bodies*. Proc.: First Intern. Conf. Num. Ship Hydrodynamics, Gaithersburg, ML, 1975.

- 
- [ 52 ] Harlow, F. H., Welch, J. E.: *Numerical Calculation of Time Dependent Viscous Incompressible Flow of Fluid with Free Surface*. Phys. Fluids 8 (12), 1970, S. 2182-2189.
- [ 53 ] <http://www.flow3d.com>, 1.9.2005
- [ 54 ] Hirt, C. W., Nichols, B. D.: *Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries*. J. Comput. Phys. 39, 1981, S. 201-225.
- [ 55 ] Dokumentation zu Fluent 6.1
- [ 56 ] Brackbill, J. U., Kothe, D. B., Zemach, C.: *A Continuum Method for Modeling Surface Tension*. Journal of Computational Physics 100, 1991, S. 335-354.
- [ 57 ] Lauger, J., Huck, S.: *Real Controlled Stress and Controlled Strain Experiments with the Same Rheometer*. XIII Int. Congress on Rheology 2000, S.10-13.
- [ 58 ] Morrison, F. A.: *Understanding Rheology*: 1. Aufl. New York: Oxford Press, 2001.
- [ 59 ] Hansen, F. K., Rødsrud, G.: *Surface Tension by Pendant Drop*. Journal of Colloid and Interface Science, 141(1), 1991, S. 1-9.
- [ 60 ] Huang, Y., Bigio, D., Pecht, M. G.: *Fill Pattern and Particle Distribution of Underfill Material*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 27(3), 2003, S. 493-498.
- [ 61 ] Leighton, D., Acrivos, A.: *The Shear-induced Migration of Particles in Concentrated Suspensions*. J. Fluid Mech. 181, 1987, S. 415-439.
- [ 62 ] Krieger, I. M.: *Rheology of Monodisperse Lattices*. Advanced Colloid Interface Science 3, 1972, S. 111-136.
- [ 63 ] Guo, Y., Lehmann, G. L., Driscoll, T., Cotts, E. J.: *A Model of the Underfill Flow Process: Particle Distribution Effects*. Proc.: Electronic Components and Technology Conference 1999, S. 71-76.
- [ 64 ] Li, P. C., Cotts, E. J., Guo, Y., Lehmann, G. L.: *Viscosity Measurements and Models of Underfill Mixtures*. Proc.: 3rd International Conference on Adhesive Joining and Coating Technology in Electronics Manufacturing 1998, S. 328-333.
- [ 65 ] Tso, C. P., Sundaravadivelu, K., Zhang, L. B.: *Externally Guided Underfill Encapsulation and Subsequent Filler Particle Migration during Electronics Packaging*. Journal of Micromechanics and Microengineering 14(2), 2004, S. 212-219.



- [ 66 ] Lehmann, G. L., Driscoll, T., Guydosh, N. R., Li, P. C., Cotts, E. J.: *Underflow Process for Direct Chip-Attachment Packaging*. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part A, 21(2), 1998, S. 266-274.
- [ 67 ] Han, S., Wang, K. K.: *Analysis of the Flow of Encapsulant During Underfill Encapsulation of Flip Chips*. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology – Part B. 20(4), 1997, S. 424-433.
- [ 68 ] Young, W.-B., Yang, W.-L.: *The Effect of Solder Bump Pitch on the Underfill Flow*. IEEE Transactions on Advanced Packaging 25(4), 2002, S. 537-542.
- [ 69 ] Young, W.-B., Yang, W.-L.: *Underfill Viscous Flow Between Parallel Plates and Solder Bumps*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 25(4), 2002, S. 695-700.
- [ 70 ] Young, W.-B.: *Anisotropic behavior of the capillary action in flip chip underfill*. Microelectronics Journal 34, 2003, S. 1031-1036.
- [ 71 ] Venkataraman, P., Fullone, C., Ramkumar, M.: *Underfill Flow Modeling for Flip Chip on Board Assembly*. Pan Pacific Microelectronics Symposium Conference 2002.
- [ 72 ] Ni, G., Gordon, M. H., Schmidt, W. F., Muysshondt, A.: *Experimental and Numerical Study of Underfill Encapsulation of Flip-Chips Using Conductive Epoxy Polymer Bumps*. Electronic Components and Technology Conference 1997, S. 859-865.
- [ 73 ] Tay, A. A. O., Huang, Z. M., Wu, J. H., Cui, C. Q.: *Numerical Simulation of the Flip-Chip Underfilling Process*. IEEE/CPMT Electronic Packaging Technology Conferences 1997, S. 263-269.
- [ 74 ] Yang, H., Bayyuk, S., Krishnan, A., Przekwas, A.: *Computational Simulation of Underfill Encapsulation of Flip-Chip ICs Part I - Flow Modeling and Surface-Tension Effects*. Electronic Components and Technology Conference 1998, S. 1311-1318.
- [ 75 ] Nguyen, L., Quentin, C., Fine, P., Cobbs, B., Bayyuk, S., Yang, H., Bidstrup-Allen, S. A.: *Underfill of Flip Chip on Laminates: Simulation and Validation*. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology 22(2), 1999, S. 168-176.
- [ 76 ] Chang, R.-Y., Hung, C.-C., Yang, W.-H.: *Three-Dimensional Cae Analysis Of Underfill Flow Of Flip-Chips*. ANTEC Annual Technical Conference 2002.
- [ 77 ] Fine, P., Cobb, B., Nguyen, L.: *Flip Chip Underfill Flow Characteristics and Prediction*. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies 23(3), 2000, S. 420-427.

- 
- [ 78 ] Bass, M.: *Handbook of Optics*. Bd. 2: *Devices, Measurements, and Properties*. 2. Aufl. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [ 79 ] Scheel, W.: *Baugruppentechologie in der Elektronik*. Verlag Technik, Berlin, 1997
- [ 80 ] Montgomery, D. C.: *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 3. Aufl. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [ 81 ] Kleppmann, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung*. 1. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 1998.
- [ 82 ] Moore, G. E.: *Cramming More Components onto Integrated Circuits*. *Electronics* 38(8), 1965, S. 114-117.

# Anhang A - Unterroutinen (UDFs)

## A.1 Implementierung der UDFs

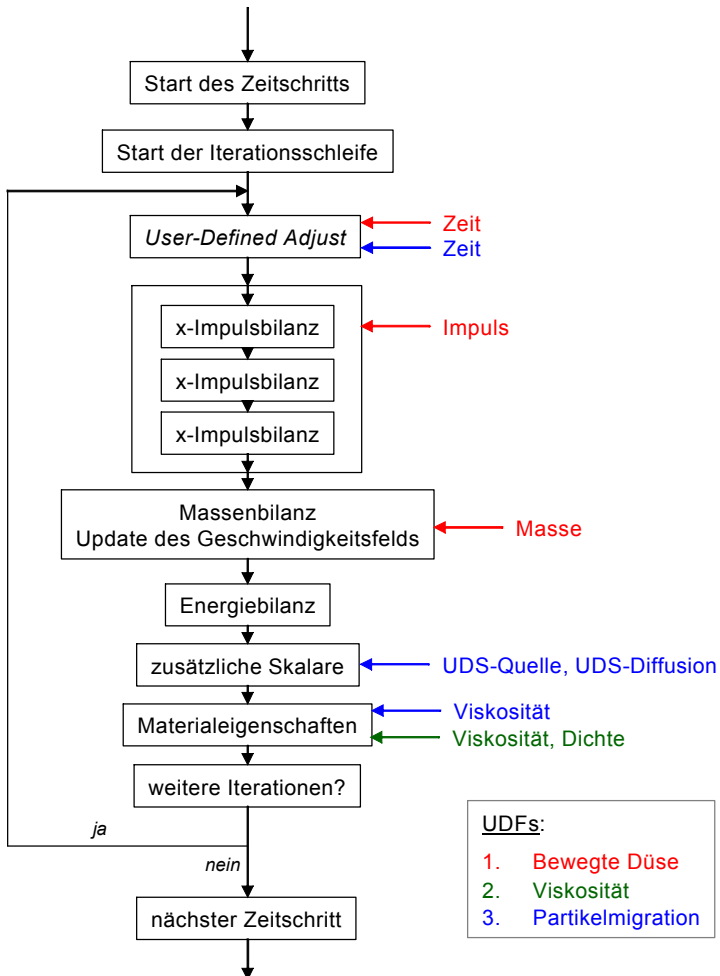


Abbildung A-1: Ablauf eines Zeitschritts und Implementierung der UDFs

## A.2 UDF Bewegte Dosiernadel

```

/*****
/*
/* Definition einer mit der Zeit bewegten Massen-
/* und Impulsquelle
/* zur Beschreibung der Nadelbewegung
/*
/*****

# include "udf.h"

# define m_ein 3.01e-6 /* einstroemender Massenstrom in [kg/s] */
# define D 0.0004 /* "Nadeldurchmesser" in [m] */
# define h_D 0.0001 /* "Hoehe" der Quelle in [m] */
# define v_Nadel 0.0055 /* Nadelgeschwindigkeit in [m/s] */
# define x_0 -5e-3 /* x-Koordinate Nadelstartposition [m] */
# define y_0 -5.4e-3 /* y-Koordinate Nadelstartposition [m] */
# define z_0 0.05e-3 /* z-Koordinate Nadelstartposition [m] */
# define V 1.6e-11 /* Volumen des Quellbereiches [m^3] */
# define v_ein 1.38e-2 /* Einstroemgeschwindigkeit [m/s] */

static real zeit = 0.;

DEFINE_ADJUST(setzeit, d)
{
    zeit = CURRENT_TIME;
}

DEFINE_SOURCE(mass, c, t, dS_m, eqn)
{
    real source_m;
    real x[ND_ND];
    real posx, posy, posz, posD;

    C_CENTROID(x, c, t);
    {
        posx = x[0]; /* Schleife über alle Zellen, */
        posy = x[1]; /* liest die jeweilige Koordinate aus */
        posz = x[2];
    }

    posD = v_Nadel*zeit; /* Verschiebung der Nadel */
                        /* zur Ausgangskoordinate */
                        /* nach der jeweiligen Zeit */

    if ((posx > x_0 + posD -0.5*D) && (posx < x_0 + posD + 0.5*D)
        && (posy > y_0 - 0.5*D) && (posy < y_0 + 0.5*D)
        && (posz > z_0 - 0.5*h_D) && (posz < z_0 + 0.5*h_D))

```

## Anhang A - Unterroutinen (UDFs)

---

```
        source_m = m_ein/V;
    else
        source_m = 0;

    dS_m[eqn] = 0;          /* Ableitung der Quellenfunktion      */
                           /* (erhöht die Stabilität der Rechnung) */

return source_m;
}

DEFINE_SOURCE(imp_source, c, t, dS_i, eqn)
{
    real source_i;
    real x[ND_ND];
    real posx, posy, posz, posD;

    C_CENTROID(x, c, t);
    {
        posx = x[0];
        posy = x[1];
        posz = x[2];
    }

    posD = v_Nadel*zeit;    /* Verschiebung der Nadel          */
                           /* zur Ausgangskoordinate          */
                           /* nach der jeweiligen Zeit        */

    if ((posx > x_0 + posD - 0.5*D) && (posx < x_0 + posD + 0.5*D)
        && (posy > y_0 - 0.5*D) && (posy < y_0 + 0.5*D)
        && (posz > z_0 - 0.5*h_D) && (posz < z_0 + 0.5*h_D))
        source_i = m_ein*v_ein/V;
    else
        source_i = 0;

    dS_i[eqn] = 0;          /* Ableitung der Quellenfunktion      */
                           /* (erhöht die Stabilität der Rechnung) */

return source_i;
}
```

### A.3 UDF Viskosität

```

/*****
/*
/*   Scherratenabhängige Viskosität nach Carreau-Yasuda   */
/*
/*****

#include "udf.h"

DEFINE_PROPERTY(cell_viscosity, cell, thread)

{real viskositaet, P1, P2, P3, P4, P5;

  real scherrate = C_STRAIN_RATE_MAG(cell, thread);

    P1 = 0.0451;
    P2 = 0.3101;
    P3 = 0.46817;
    P4 = 0.87383;
    P5 = 0.31952;

    viskositaet = (P1+(P2-P1)*pow(1+pow(scherrate*P3,P4), (P5-
1)/P4));

  return viskositaet;

}
```

## A.4 UDF Partikelmigration

```
/* **** */
/*      UDF zur Partikelmigration      */
/* **** */
#include "udf.h"

enum
{
  uds_phi,
  gamma_pkt,
  dgamma_pkt_nach_dz
};

# define a 1.3e-6      /* mittlerer Partikelradius */
# define phi_m 0.58   /* max. Partikelkonzentration */
# define rho_F 1164.56 /* Dichte des reinen Fluids */
# define rho_S 2650   /* Dichte des Fuellstoffs */

/* Parameter der Carreau-Yasuda-Viskositatsfunktion */

# define P1 0.0255
# define P2 0.1755
# define P3 0.4638
# define P4 0.8658
# define P5 0.3169

DEFINE_DIFFUSIVITY(Diff_C, c, t, index)
{
  real phi, dmu_nach_dphi;
  real D_C;
  real gammapkt, nullvisk;

  if (C_UDSI(c, t, uds_phi) < 0.01)
    C_UDSI(c, t, uds_phi) = 0;
  if (C_UDSI(c, t, uds_phi) > 0.55)
    C_UDSI(c, t, uds_phi) = 0.55;

  phi = C_UDSI(c, t, uds_phi);

  C_UDSI(c, t, gamma_pkt) = sqrt(C_DUDZ(c, t)*C_DUDZ(c, t) + C_DVDZ(c,
t)*C_DVDZ(c, t));
  gammapkt = C_UDSI(c, t, gamma_pkt);

  nullvisk = (P1+(P2-P1)*pow(1+pow(gammapkt*P3,P4), (P5-1)/P4));
}
```

## Anhang A - Unterrountinen (UDFs)

```

    dmu_nach_dphi = 2*nullvisk*(1+1.5*phi/(1-phi/phi_m))*1.5/(1-
phi/phi_m)/(1-phi/phi_m);

switch(index)
{
    case uds_phi:
        D_C = C_R(c, t)*a*a*gammapkt*(1/3*phi*phi*(1+0.5*exp(8.8*phi))
+0.6*phi*phi/C_MU_L(c, t)*dmu_nach_dphi);
        break;
    case gamma_pkt:
        D_C = 0;
        break;
    case dgamma_pkt_nach_dz:
        D_C = 0;
        break;
}

return D_C;
}

DEFINE_SOURCE(quelle, c, t, dS, eqn)
{
    real phi, dmu_nach_dphi;
    real source1, source2, source;
    real grad_phi_z, grad_mu_z;
    real d2gamma_pkt_nach_dz2;
    real gammapkt, nullvisk;

    if (C_UDSI(c, t, uds_phi) < 0.01)
        C_UDSI(c, t, uds_phi) = 0;
    if (C_UDSI(c, t, uds_phi) > 0.55)
        C_UDSI(c, t, uds_phi) = 0.55;
    phi = C_UDSI(c, t, uds_phi);

    C_UDSI(c, t, gamma_pkt) = sqrt(C_DUDZ(c, t)*C_DUDZ(c, t) + C_DVDZ(c,
t)*C_DVDZ(c, t));
    gammapkt = C_UDSI(c, t, gamma_pkt);

    nullvisk = (P1+(P2-P1)*pow(1+pow(gammapkt*P3,P4),(P5-1)/P4));

    dmu_nach_dphi = 2*nullvisk*(1+1.5*phi/(1-phi/phi_m))*1.5/(1-
phi/phi_m)/(1-phi/phi_m);
    grad_phi_z = C_UDSI_G(c, t, uds_phi)[2];
    grad_mu_z = grad_phi_z*dmu_nach_dphi;

    C_UDSI(c, t, dgamma_pkt_nach_dz) = C_UDSI_G(c, t, gamma_pkt)[2];

    d2gamma_pkt_nach_dz2 = C_UDSI_G(c, t, dgamma_pkt_nach_dz)[2];

    if (C_VOF(c, t)>0.5)
    {
        source1 = C_R(c, t)*(nullvisk/C_MU_L(c, t)*grad_phi_z-
2*nullvisk/C_MU_L(c, t)*phi*grad_phi_z-nullvisk/C_MU_L(c,

```



## Anhang A - Unterroutinen (UDFs)

---

```
t)/C_MU_L(c, t)*(phi-phi*phi)*grad_mu_z)*2/9*(rho_S -
rho_F)/nullvisk*9.81*a*a;
    source2 = C_R(c, t)*0.6*a*a*phi*phi*d2gamma_pkt_nach_dz2;
    source =(source1 + source2);
}
else source = 0;

return source;
}

DEFINE_PROPERTY(viskositaet, c, t)
{
real phi, mu;
real scherrate, nullvisk;

if (C_UDSI(c, t, uds_phi) < 0.01)
    C_UDSI(c, t, uds_phi) = 0;
if (C_UDSI(c, t, uds_phi) > 0.55)
    C_UDSI(c, t, uds_phi) = 0.55;

phi = C_UDSI(c, t, uds_phi);

if (C_UDSI(c, t, gamma_pkt) < 0.00001)
    scherrate = 0.00001;
else
    scherrate = C_UDSI(c, t, gamma_pkt);

nullvisk = (P1+(P2-P1)*pow(1+pow(scherrate*P3,P4), (P5-1)/P4));

mu = nullvisk*pow((1+1.5*phi/(1-phi/phi_m)),2);

return mu;
}
DEFINE_PROPERTY(dichte, c, t)
{
real phi, rho;

if (C_UDSI(c, t, uds_phi) < 0.01)
    C_UDSI(c, t, uds_phi) = 0;
if (C_UDSI(c, t, uds_phi) > 0.55)
    C_UDSI(c, t, uds_phi) = 0.55;

phi = C_UDSI(c, t, uds_phi);

rho = rho_F+(rho_S-rho_F)*phi;
return rho;}

```

---

# Lebenslauf

Tanja Häußermann

6. Mai 1977

Geboren in Stuttgart

1983 - 1987

Grundschule Remshalden Geradstetten

1987 - 1996

Burggymnasium Schorndorf  
Abitur Juni 1996

1996 - 2002

Studium der Verfahrenstechnik an der Universität  
Stuttgart  
Abschluss als Diplom-Ingenieurin September 2002

2002 - 2005

Doktorandin bei der Robert Bosch GmbH, CR/APP4

Seit Oktober 2005

Mitarbeiterin der Robert Bosch GmbH Stuttgart



