

Kapitel 4

ZnSe–Transport

Der ZnSe–Transport in der CVD–Anlage umfasst den Abtrag der pulverförmigen Quelle, den Transport der gasförmigen Ausgangsstoffe von der Quellen– zur Substratseite und das Wachstum polykristalliner Schichten im Substratbereich. Sowohl Abtrag als auch Schichtwachstum werden von den chemischen Reaktionen innerhalb der Gasphase bzw. zwischen der Gasphase und Oberflächenspezies bestimmt. Die Kinetik der chemischen Reaktionen hängt einerseits von Druck, Temperatur und Spezies–Konzentration ab, andererseits ist die Reaktionszeit durch den Gasfluss begrenzt. Quasigleichgewichtsbedingungen sind gegeben, wenn die Reaktionen innerhalb der vom Gasfluss vorgegebenen Reaktionszeit vollständig ablaufen.

Der ZnSe–Abtrag in der oben vorgestellten CVD–Anlage läuft unter bestimmten Voraussetzungen unter Gleichgewichtsbedingungen ab. Anhand des Vergleiches experimenteller Abtragsdaten mit Gleichgewichtsrechnungen konnten unter diesen Voraussetzungen die Reaktionsmechanismen der ZnSe–Quellenverflüchtigung analysiert werden. Die effektiven Reaktionsraten des ZnSe–Abtrags wurden für weiterführende Simulationen außerhalb des Gleichgewichts verwendet. Diese Rechnungen bilden die Grundlage für die Entwicklung neuer CVD–Reaktoren, mit denen gesteigerte Transportraten erzielt werden können.

Das Wachstum polykristalliner ZnSe–Schichten im Substratbereich der CVD–Anlage läuft für Substrattemperaturen unter 400 °C außerhalb des chemischen Gleichgewichts ab. Experimentelle Ergebnisse zeigen darüber hinaus, dass nicht nur die Reaktionskinetik sondern auch der von der Substratwahl abhängige Nukleationsprozess berücksichtigt werden muss. Eine Simulation der Schichteigenschaften ist daher nicht möglich. Die experimentellen Ergebnisse zu Wachstumsraten und Eigenschaften der gewachsenen ZnSe–Schichten werden im anschließenden Kapitel vorgestellt.

4.1 ZnSe–Abtrag im chemischen Gleichgewicht

Für moderate Quellflüsse ($Q_1 + Q_2$) um 500 ml/min und Reaktordrücke um 200 mbar erfolgt der ZnSe–Abtrag mit einem H_2/I_2 –Gasgemisch als Transportgas innerhalb der ersten 20 mm des 150 mm langen Quellbootes. Zwischen der Pulverquelle und der Gasphase stellt sich also ein Gleichgewicht innerhalb der Kontaktzeit von ca. 0,6 s ein.

Der resultierende experimentelle Abtrag in [mg/h] ist in Abbildung 4.1 in Abhängigkeit von der Quelltemperatur im Bereich von 450 – 750 °C dargestellt. Die Temperatur T_{Jod} der Jodquelle betrug hier 60 °C, was einem Joddampfdruck von 5,2 mbar entspricht [Kna91].

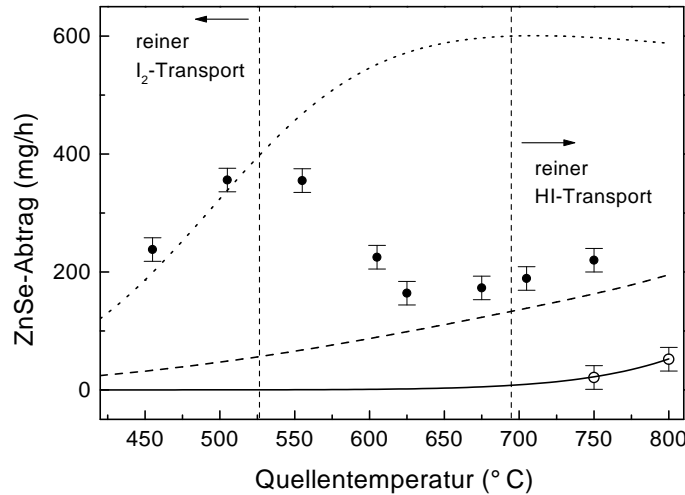
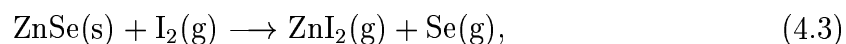
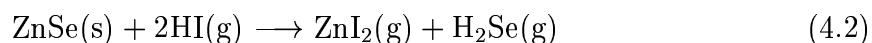
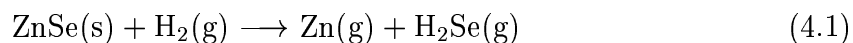


Abbildung 4.1: ZnSe-Abtrag als Funktion der Quelltemperatur: experimentelle Daten für H₂/I₂-Transport ($Q_1 + Q_2 = 500$ ml/min, $p_{Reaktor} = 200$ mbar, $T_{Jod} = 60$ °C) (●) und reinen H₂-Transport ($Q_1 = 500$ ml/min, $p_{Reaktor} = 200$ mbar) (○), sowie theoretische Gleichgewichtsrechnungen für Reaktion (4.1) —, (4.2) --- und (4.3) [Rum00]

Zusätzlich wurde der experimentelle ZnSe-Abtrag unter Verwendung reinen Wasserstoffs als Transportgas bestimmt. Zu diesem Zweck wurde der Fluss Q_1 durch die Jodquelle auf Null gesetzt und der Verdünnungsfluss Q_2 auf 500 ml/min erhöht (vergleiche Abbildung 3.1). Speziell für gemäßigte Temperaturen um 500 °C können über den ZnSe-Transport mit H₂/I₂ deutlich höhere Abträge erzielt werden. Vergleichbare Abträge von 350 mg/h mit einem H₂/I₂-Gasgemisch als Transportgas werden unter Verwendung von reinem Wasserstoff erst für Temperaturen > 900 °C erreicht.

Theoretisch ergibt sich die Gleichgewichtskonzentration der chemischen Spezies bei konstantem Druck p und Temperatur T aus der Minimierung der freien Enthalpie $G = H - TS$. Für deren Berechnung wurde das Programm *ChemSage* [Eri90] verwendet. Die in die Rechnung einfließenden Enthalpien H und Entropien S der beteiligten Verbindungen stammen aus [Kna91]. Der aus den berechneten Gleichgewichtskonzentrationen der festen ZnSe-Phase ermittelte Quellenabtrag ist in Abbildung 4.1 eingefügt. Ausgegangen wurde dabei von den folgenden Brutto-Umsatzgleichungen



welche die ZnSe-Quellenverflüchtigung unter Verwendung eines H₂/I₂-Gasgemisches beschreiben. Anhand des Vergleiches der experimentellen Abtragsdaten mit den berechneten Werten für H₂-, HI- bzw. I₂-Transport kann der Reaktionsmechanismus in drei Bereiche unterteilt werden:

- $500\text{ °C} \geq T_{Quelle}$: Reiner I_2 -Transport (Reaktion (4.3))
- $500\text{ °C} \leq T_{Quelle} \leq 650\text{ °C}$: Gemischter I_2 /HI-Transport (Reaktionen (4.3),(4.2))
- $650\text{ °C} < T_{Quelle} \leq 750\text{ °C}$: Reiner HI-Transport (Reaktion(4.2))

Reiner H_2 -Transport (Reaktion (4.1)) ist für Temperaturen $\leq 750\text{ °C}$ gegenüber dem jodunterstützten Abtrag vernachlässigbar.

Der Quellenabtrag über die Reaktion mit HI wird erst für Temperaturen oberhalb von 500 °C relevant. Ursache ist die starke Temperaturabhängigkeit der HI-Bildung aus H_2 und I_2 gemäß Reaktion



Die Reaktionsrate $d[HI]/dt$ in $[\text{mol}/\text{cm}^3\text{s}]$ ist durch

$$\frac{d[HI]}{dt} = 2k[H_2][I_2], \quad (4.5)$$

definiert, wobei k als Geschwindigkeitskonstante bezeichnet wird [Bau81b], die über die Arrhenius-Gleichung exponentiell von der Aktivierungsenergie E_A der Reaktion abhängt [Atk92]:

$$k = A \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \quad (4.6)$$

Der Faktor A wird als präexponentieller Faktor oder auch Häufigkeitsfaktor bezeichnet, die Größe R stellt die allgemeine Gaskonstante dar. Für die HI-Bildung wird k mit $1,94 \cdot 10^{14} \exp(-20620/T)\text{ cm}^3/\text{mol s}$ angegeben [Bau81b]. Die Reaktionsrate $d[HI]/dt$ der HI-Bildung ist in Abbildung 4.2 als Funktion der Temperatur dargestellt. Ausgegangen wurde von den in den Reaktor einströmenden Konzentrationen von $[H_2]$ und $[I_2]$ für einen Quellfluss von $500\text{ ml}/\text{min}$ und einer Jodtemperatur von 60 °C .

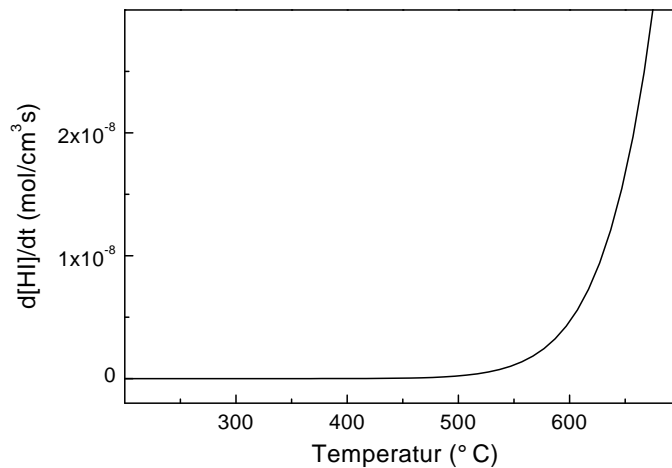


Abbildung 4.2: Reaktionsrate $d[HI]/dt$ in $[\text{mol}/\text{cm}^3\text{s}]$ als Funktion der Temperatur

Vermutet wird, dass für Quellentemperaturen $< 500\text{ °C}$ kein HI vor Erreichen des Quellenbootes gebildet wird, während für Quellentemperaturen $\geq 650\text{ °C}$ die HI-Bildung bereits vor Erreichen des Quellenbootes vollständig abgeschlossen ist. Im mittleren Temperaturbereich setzt sich das Gasgemisch über der Quellenoberfläche dann aus I_2 und HI zusammen, wobei der HI-Anteil mit der Temperatur ansteigt.

4.1.1 Zusammenfassung

Die gute quantitative Übereinstimmung der experimentellen Abtragsraten mit Gleichgewichtsrechnungen zeigt, dass für moderate Flussraten die Reaktionen zwischen Quellenmaterial und Transportgas vollständig ablaufen. Erst für Flussraten deutlich über 500 ml/min ist eine zunehmende Abweichung der experimentellen Abtragsdaten von den Gleichgewichtswerten zu beobachten.

Aus dem Vergleich des experimentellen ZnSe-Abtrags mit Gleichgewichtsrechnungen wurde abgeleitet, dass die ZnSe-Verflüchtigung für Temperaturen ≤ 500 °C vorwiegend über die Reaktion mit I_2 erfolgt. Als Ursache wird die stark temperaturabhängige HI-Bildung angenommen, die erst bei höheren Temperaturen einsetzt. Die Folge ist ein Wechsel des dominierenden Reaktionsmechanismus vom I_2 -System bei geringen Temperaturen zum HI-System für Temperaturen ≥ 650 °C. Der Quellenabtrag des HI-Transports ist wesentlich geringer im Vergleich zum I_2 -Transport. Maximale ZnSe-Abträge werden in der CVD-Anlage daher für Quellentemperaturen um 500 °C realisiert.

Eine weiterführende Analyse des ZnSe-Quellenabtrags mit einem H_2/I_2 -Gasgemisch als Transportgas ist nur über die Kenntnis der Stoffkonzentrationen in der Gasphase zugänglich. Im Gegensatz zu den Reaktionen zwischen Gasphase und Quellenmaterial laufen die Reaktionen innerhalb der Gasphase unter den gegebenen Voraussetzungen nicht vollständig ab. Die Zusammensetzung der Gasphase kann in diesem Fall nur unter Berücksichtigung kinetischer Effekte berechnet werden. Es wurden daher Simulationen abseits des chemischen Gleichgewichts durchgeführt, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

4.2 Simulationen außerhalb des chemischen Gleichgewichts

Für die numerische Simulation von CVD-Prozessen außerhalb des chemischen Gleichgewichts müssen mathematische Modelle herangezogen werden, die den Zusammenhang von Hydrodynamik und Reaktionskinetik berücksichtigen. Neben Druck, Temperatur und Spezies-Konzentrationen spielen dann auch Flussraten und die Reaktorgeometrie eine Rolle [Kle95]. Das zugrundeliegende mathematische Modell basiert auf der Erhaltung von Energie, Impuls, Masse und chemische Spezies. Wegen der Komplexität der Prozesse und der endlichen Rechnerkapazität ist es zwar nicht möglich, den gesamten CVD-Prozess zu simulieren. Einzelne Teilaspekte, wie hier die Gasphasenzusammensetzung im Quellenrohr, tragen jedoch zu einem verbesserten Verständnis des Gesamtprozesses bei. Für die Entwicklung neuer CVD-Anlagen helfen numerische Simulationen den Einfluss von Reaktorgeometrien und Prozessparametern abzuschätzen. Im Abschnitt 4.2.3 wird an einem vereinfachten zweidimensionalen Modell gezeigt, wie die Reaktorgeometrie des CVD-ZnSe-Transports im Hinblick auf gesteigerte Abtragsraten optimiert werden kann.

Zur numerischen Berechnung der Zusammenhänge wurde das kommerzielle CFD-Programm (engl.: computational fluid dynamics) *Fluent/UNS* eingesetzt [flu]. Grundlage der Berechnungen ist die finite Volumenmethode, bei der die Transportgleichungen auf der Basis von Volumenelementen gelöst werden.

4.2.1 Transportgleichungen

Die Transportgleichungen basieren auf gekoppelten Differentialgleichungen für die Erhaltungsgrößen Energie, Impuls, Masse und chemische Spezies mit entsprechenden Randbedingungen. In jeder Gleichung wird die Änderung einer physikalischen Eigenschaft als abhängige Variable beschrieben [Pat80]. Die Terme in den Differentialgleichungen werden auf der Basis von Volumenelementen ausgedrückt (finite Volumenmethode) und haben im allgemeinen die Form

$$\frac{d}{dt}\rho o + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{u} o)}_{\text{Konvektion}} = \underbrace{\nabla \cdot (D \nabla o)}_{\text{Diffusion}} + \underbrace{S}_{\text{Quellterm}} \quad (4.7)$$

Die abhängige Variable wird durch o repräsentiert, \vec{u} ist das Geschwindigkeitsfeld, ρ die Dichte, D ein Diffusionskoeffizient und S ein Quellterm. Die Terme der verallgemeinerten Differentialgleichung beschreiben die zeitliche Veränderung der betrachteten Größe o an einem gegebenen Punkt durch Mitbewegung im Geschwindigkeitsfeld (Konvektion), durch den Konzentrationsgradienten (Diffusion) und durch Quellen bzw. Senken. Das Geschwindigkeitsfeld muss dabei der Kontinuitätsgleichung

$$\frac{d}{dt}\rho + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (4.8)$$

genügen. Der Zusammenhang zwischen Druck p und Volumen V des Gasgemisches wird mit der Gasgleichung für ideale Gase

$$pV = nRT \quad (4.9)$$

beschrieben, wobei n die Molanzahl bezeichnet, R die allgemeine Gaskonstante und T die absolute Temperatur in [K].

4.2.2 Gasphasenzusammensetzung im Quellenrohr

Die chemischen Reaktionen innerhalb des H_2/I_2 -Gasgemisches werden über die allgemeine Form der Arrhenius-Gleichung (4.6) in die Rechnungen einbezogen. Die Arrhenius Parameter A und E_A für die Reaktionen zwischen den chemischen Spezies H_2 , H , I_2 , I und HI sind in Anhang A zusammengestellt (aus [Bau81b, Bau81a]).

Das dreidimensionale Modell des Quellenrohres wurde unter Verwendung des Programms *Gambit* [flu] erstellt. Wie in Abbildung 4.3 zu erkennen, wurde die Größe der Volumenelemente senkrecht zur Flussrichtung z von innen nach außen verringert. Der sich nahe der Außenwand einstellende Geschwindigkeitsgradient Δv_z kann dann in ausreichender Genauigkeit berechnet werden. Ursache des v_z -Gradientens ist die Viskosität des Gasgemisches.

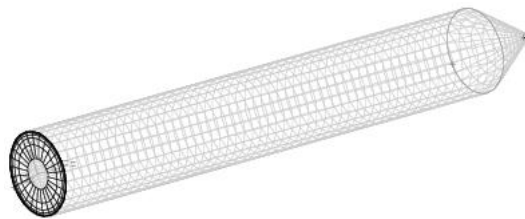


Abbildung 4.3: Dreidimensionales Modell des Quellenrohres in der linearen CVD-Anlage

In die Berechnung der Gasphasenzusammensetzung fließen die Anfangsbedingungen

- Geschwindigkeit v_z am Gaseinlass
- Gaszusammensetzung am Gaseinlass
- Druck $p_{Reaktor}$ im Quellenrohr
- Temperaturverteilung $T(z)$ im Quellenrohr

ein. Dabei wurden für moderate Geschwindigkeiten v_z (Quellflüsse < 1000 ml/min) laminare Strömungen angenommen. Die Temperaturverteilung $T(z)$ im Quellenrohr wurde experimentell für verschiedene Einstellungen des 5-Zonen-Ofens bestimmt. Für eine nominelle Quelltemperatur von 650 °C ergibt sich mit einem Quellfluss des H_2/I_2 -Gasgemisches von 500 ml/min und einer Jodtemperatur von 60 °C die in Abbildung 4.4 dargestellte I_2 -Verteilung im Quellenrohr ($v_z = 0,03$ m/s, I_2 -Massenanteil = $0,4$, $p_{Reaktor} = 200$ mbar).

Die Simulation der Gasphasenzusammensetzung unter Berücksichtigung von dynamischen Effekten zeigt, dass für Quelltemperaturen von 650 °C über 90 % des einströmenden I_2 -Gases bereits vor Erreichen des Quellenbootes zersetzt ist. Da der

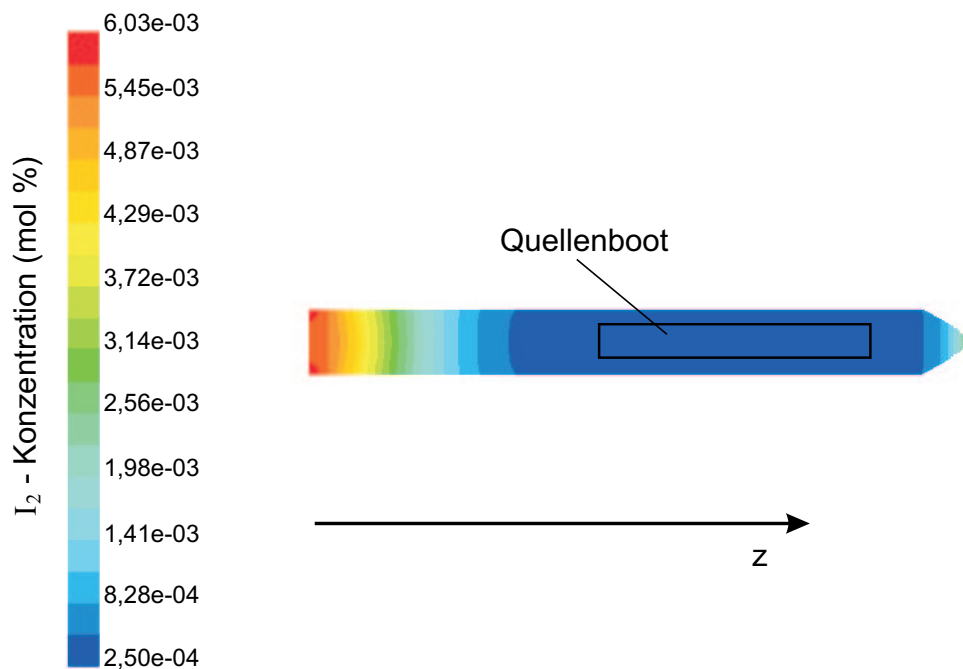


Abbildung 4.4: I₂-Verteilung im Quellenrohr in mol % für eine nominelle Quellentemperatur von 650 °C

überwiegende Teil zu HI umgesetzt wird, steigt die molare Konzentration von HI umgekehrt proportional zu derjenigen von I₂. Dieses Ergebnis bestätigt die Annahme, dass ZnSe für Temperaturen oberhalb von 650 °C in erster Linie über die Reaktion mit HI (Gleichung (4.2)) abgetragen wird, während der I₂-Transport in diesem Temperaturbereich zu vernachlässigen ist.

4.2.3 Weiterführende Simulationen neuartiger Reaktorgeometrien

Die Gasphasenzusammensetzung bestimmt in Verbindung mit den Reaktionsraten der Verflüchtigungsreaktionen den ZnSe-Abtrag. Mit geeigneten CFD-Programmen wie *FLUENT/UNS* [flu] können daher auch die Abtragsraten variiert Reaktorgeometrien berechnet werden [Fri98]. Wegen der endlichen Rechnerkapazität ist die Behandlung dreidimensionaler Problemstellungen jedoch nur begrenzt möglich [Mih98, Fri98]. Im folgenden wird daher ein vereinfachtes zweidimensionales Modell vorgestellt, an dem nicht nur Abtrags- sondern auch die Wachstumsraten diskutiert werden. Der Einfluss verschiedener Substrate auf den Nukleationsprozess wird dabei vernachlässigt.

Der effiziente ZnSe-Abtrag über die Reaktion mit I₂ ist besonders interessant für kostengünstige Herstellungsverfahren bei niedrigen Prozesstemperaturen. Im Vergleich zu dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten linearen CVD-Reaktor verspricht das erstmals von Sirtl [Sir63] erwähnte CSVT-Verfahren (engl.: close space vapour transport) weiter gesteigerte Abtragsraten [Hov69, Per88]. Im geschlossenen Volumen wird dieses Verfahren bereits für die Herstellung von Chalkopyriten der Zusammen-

setzung $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{Se,S})_2$ für die Anwendung als Absorber in Solarzellen angewandt [Mas93, Gue98, Dje00]. Die großflächige Abscheidung von Dünnschichtsolarzellen erfordert jedoch die Entwicklung eines offenen Reaktorsystems, so dass die einzelnen Schichten in einem Durchlaufprozess aufgebracht werden können. Anhand von Simulationen des ZnSe-Transports in einem offenen CSVT-System wird im folgenden der Einfluss verschiedener Prozessparameter auf die Wachstumsrate abgeschätzt.

Quellenmaterial und Substrat sind bei der CSVT-Methode im geringen Abstand Δx übereinander angeordnet, so dass ein Großteil des Transportgases nicht verbraucht wird, sondern nach der Deposition erneut zur Verfügung steht. Entscheidenden Einfluss auf die Transportraten hat die Temperaturdifferenz $\Delta T = T_1 - T_2$ und der Abstand Δx zwischen Quelle und Substrat [Bai79].

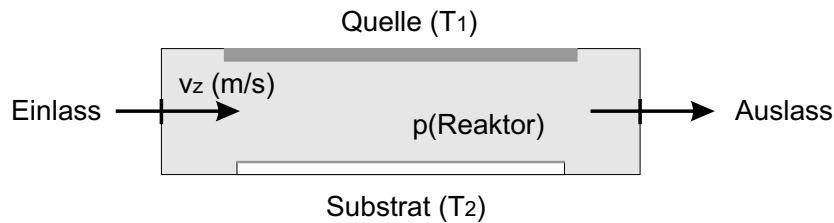


Abbildung 4.5: Zweidimensionales Modell eines CSVT-Reaktors zur Simulation des ZnSe-Transports unter Verwendung eines H_2/I_2 -Gasgemisches als Transportgas

Ausgegangen wurde von dem in Abbildung 4.5 wiedergegebenen zweidimensionalen Modell eines CSVT-Reaktors. Für die Berechnung der Wachstumsraten wurden neben den homogenen Reaktionen innerhalb der Gasphase auch heterogene Reaktionen zwischen gasförmigen Verbindungen und festem ZnSe einbezogen. Wie die Rechnungen der Gasphasenzusammensetzung im vorigen Abschnitt ergaben, müssen für niedrige Prozesstemperaturen unterhalb von 500 °C ausschließlich Reaktionen mit I_2 (Gleichung (4.3)) berücksichtigt werden. Die benötigten Geschwindigkeitskonstanten von Hin- (k_{\rightarrow}) und Rückreaktion (k_{\leftarrow}) wurden aus den experimentellen Abtragsdaten für Temperaturen unter 500 °C bestimmt. Dabei wurde ausgenutzt, dass die Gasphase über der ZnSe-Pulverquelle für die gegebenen Prozessparameter¹ innerhalb der ersten 20 mm des Quellenbootes sättigt. Für die gesuchten Parameter A_{\rightarrow} , A_{\leftarrow} sowie $E_{A_{\rightarrow}}$ und $E_{A_{\leftarrow}}$ ergeben sich dann aus den numerischen Rechnungen die effektive Werte [Fri98]

$$A_{\rightarrow} = 4,5 \cdot 10^5 \text{ m/s}, \quad E_{A_{\rightarrow}} = 6,4 \cdot 10^4 \text{ J/mol},$$

$$A_{\leftarrow} = 7,7 \cdot 10^5 \text{ m}^4/\text{skmol}, \quad E_{A_{\leftarrow}} = -6,9 \cdot 10^3 \text{ J/mol}.$$

Die daraus abgeleiteten effektiven Geschwindigkeitskonstanten beziehen sich entsprechend den experimentellen Voraussetzungen auf geringe Temperaturen unter 500 °C und pulverförmiges ZnSe-Quellenmaterial.

Als Anfangsbedingung wurde eine mittlere Eintrittsgeschwindigkeit v_z von $0,05\text{ m/s}$ des H_2/I_2 -Gasgemisches mit einem I_2 -Massenanteil von $0,25$ gewählt. Der Druck des Systems wurde zunächst bei 200 mbar festgehalten.

¹ $p_{\text{Reaktor}} = 200\text{ mbar}$, $Q_1 + Q_2 = 500\text{ ml/min}$, $T_{\text{Jod}} = 60\text{ °C}$

Die Ergebnisse der numerischen Rechnungen zeigen, dass die Wachstumsrate g für einen konstanten Abstand Δx zwischen Quelle und Substrat linear von der Temperaturdifferenz ΔT abhängt. Eine erhöhte Wachstumsrate kann ebenfalls durch Verringerung des Abstands Δx bei konstanter Temperaturdifferenz ΔT erzielt werden. Die Abhängigkeit der Wachstumsrate g von Abstand Δx und Temperaturdifferenz ΔT kann also mit

$$g \propto \Delta T / \Delta x, \quad (4.10)$$

ausgedrückt werden. Das heißt ein größerer Abstand Δx hat keinen Einfluss auf die Wachstumsrate, wenn gleichzeitig ein größerer Temperaturgradient $\Delta T / \Delta x$ aufrecht erhalten werden kann.

Der Grund für die sinkende Wachstumsrate für große Abstände ist der geringere Einfluss der Druckänderung an Quelle bzw. Substrat auf das vergrößerte Gasvolumen (Abbildung 4.6). Das zeigt die berechnete verringerte Gasgeschwindigkeit an Quellen- und Substratoberfläche, wenn der Abstand vergrößert wird. Als Folge der geringen Gasgeschwindigkeit sinkt sowohl die Abtrags- als auch die Depositionsrates.

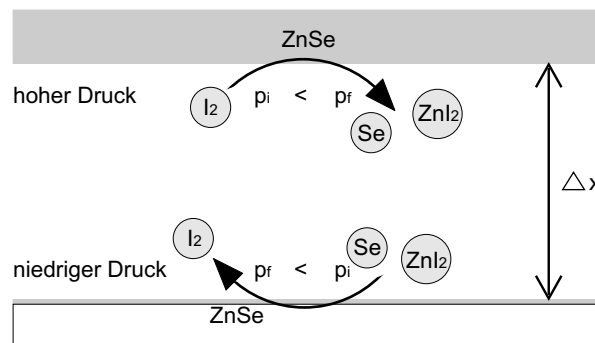


Abbildung 4.6: Antrieb der Bewegung des Gasvolumens zwischen Quelle und Substrat: die Verflüchtigungsreaktion führt zu einem Druckanstieg im Bereich der Quelle, die Rückreaktion auf der Substratseite hat eine Druckerniedrigung zur Folge

Die Variation des Druckes ergab maximale Wachstumsraten für Werte um 100 mbar. Für höhere Drücke wird der Speziestransport durch Diffusion zwischen Quelle und Substrat zunehmend behindert. Für kleinere Drücke sinken dagegen die Reaktionsraten, da diese nach Gleichung (4.5) proportional zur Spezieskonzentration der Ausgangsstoffe sind.

4.2.4 Zusammenfassung

Maximale Quellenabträge werden in der CVD-Anlage für Temperaturen um 500–550 °C erreicht, während mit weiter ansteigenden Quellentemperaturen bis ca. 650 °C ein sinkender ZnSe-Abtrag beobachtet wird (Abbildung 4.1). Gleichgewichtsrechnungen zufolge liegt der ZnSe-Abtrag über die Reaktion mit I_2 für T_{Quelle} : 500–650 °C um einen Faktor 5–7 über dem für HI-Transport erwarteten Abtrag. Als Ursache für den sinkenden Quellabtrag wurde daher eine temperaturabhängige I_2 -Verteilung im

Quellenrohr angenommen. Die Simulation der Gasphasenzusammensetzung unter Einbeziehung hydrodynamischer und reaktionskinetischer Effekte konnte diese Vermutung bestätigen.

Mit dem Ziel der Entwicklung neuer kostengünstiger Herstellungsverfahren wurde der ZnSe-Transport über die sehr effiziente I_2 -Reaktion für variierte Reaktorgeometrien simuliert. Für einen offenen CSV-T-Reaktor, bei dem Quelle und Substrat im geringen Abstand übereinander angeordnet sind, ergab sich eine lineare Abhängigkeit der Wachstumsrate sowohl vom inversen Abstand $1/\Delta x$ als auch von der Temperaturdifferenz ΔT zwischen Quelle und Substrat. Es zeigte sich, dass die Bewegung des Gasvolumens zwischen Quelle und Substrat eine wesentliche Antriebskraft für hohe Wachstumsraten ist.