

Kapitel 13

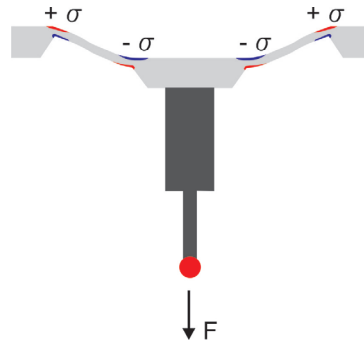
Dotierung

Aufgabenpool

Aufgabe 1

Zeichnen Sie die Bossmembran aus Abb. 13.1 mit den dazu gehörigen Spannungen, wenn der Stylus nach unten gezogen wird.

Antwort:



Aufgabe 2

Warum ist der piezoresistive Effekt bei reinen Halbleitermaterialien nicht nutzbar?

Antwort:

Der elektrische Widerstand von reinen Halbleitermaterialien ist sehr hoch. Die Widerstandsänderung bei Verformung ist dagegen nur sehr gering. Um den Widerstand zu messen, stellt man einen bestimmten Strom ein und misst dann die Spannung, die am Widerstand abfällt. Bei einem hohen Widerstand ist die Spannung entsprechend groß. Eine sehr geringe Spannungsänderung kann dann kaum gemessen werden, da die Auflösung von Messgeräten bei sehr hohen Werten i. d. R. nur gering ist.

Aufgabe 3

Nennen Sie drei Isolatormaterialien und drei Materialien, die den Strom gut leiten.

Antwort:

Isolatormaterialien: Kunststoffe, Holz, Keramik, Glas, Porzellan, Gummi, Öl, Bernstein, Gase unter normalem Druck

Leitermaterialien: Metalle (Aluminium, Blei, Eisen, Kupfer, Messing, Silber, Gold, ...), Kohle (Graphit), Säuren, Basen, Salzlösungen, Wasser

Aufgabe 4

Finden Sie den spezifischen elektrischen Widerstand eines Ihrer genannten Isolatormaterialien und eines der Leitermaterialien heraus. Berechnen Sie daraus den Leitwert der Materialien.

Antwort:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

<i>Isolator</i>	<i>Spezifischer Widerstand ρ [Ω m] bei 20 °C</i>	<i>Leitfähigkeit σ [Ω^{-1} m⁻¹]</i>
<i>Kunststoff, wie z.B.</i>		

<i>Polytetrafluorethylen PTFE</i>	10^{14}	10^{-14}
<i>Holz</i>	$10^4 \text{ bis } 10^{10}$	$10^{-4} \text{ bis } 10^{-10}$
<i>Keramik, wie z.B. Aluminiumoxid Al_2O_3</i>	10^{12}	10^{-12}
<i>Glas</i>	$10^{10} \text{ bis } 10^{15}$	$10^{-10} \text{ bis } 10^{-15}$
<i>Porzellan</i>	10^{12}	10^{-12}
<i>Gummi</i>	10^{13}	10^{-13}
<i>Öl</i>	$1,5 * 10^7$	$6,6 * 10^{-8}$
<i>Bernstein</i>	10^{16}	10^{-16}
Leiter	Spezifischer Widerstand ρ [$\Omega \text{ m}$] bei 20 °C	Leitfähigkeit σ [$\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$]
<i>Aluminium</i>	$2,65 * 10^{-8}$	$3,77 * 10^7$
<i>Blei</i>	$2,08 * 10^{-7}$	$4,81 * 10^6$
<i>Eisen</i>	$1,0 * 10^{-7} \text{ bis } 1,5 * 10^{-7}$	$6,67 * 10^6 \text{ bis } 1 * 10^7$
<i>Gold</i>	$2,21 * 10^{-8}$	$4,52 * 10^7$
<i>Graphit</i>	$8 * 10^{-6}$	$1,25 * 10^5$
<i>Kupfer</i>	$1,68 * 10^{-8}$	$5,95 * 10^7$
<i>Messing</i>	$7 * 10^{-8}$	$1,43 * 10^7$
<i>Silber</i>	$1,59 * 10^{-8}$	$6,29 * 10^7$
<i>Säuren z.B. Schwefelsäure 10 %</i>	$2,5 * 10^{-2}$	40
<i>Kochsalzlösung 10%</i>	$7,9 * 10^{-2}$	12,66
<i>Meerwasser</i>	$5 * 10^{-1}$	2

Literatur:

David R. Lide: CRC Handbook of Chemistry and Physics: A ready-reference book of chemical and physical data. 90. Auflage. CRC Taylor & Francis, Boca Raton Fla. 2009, ISBN 978-1-4200-9084-0

http://de.wikipedia.org/wiki/Spezifischer_Widerstand

Aufgabe 5

Zeichnen Sie das Kristallgitter von Silicium (wie in Abb. 13.3), in das a) ein anderer Akzeptor als Phosphor und b) ein anderer Donator als Aluminium eindotiert ist.

Antwort:

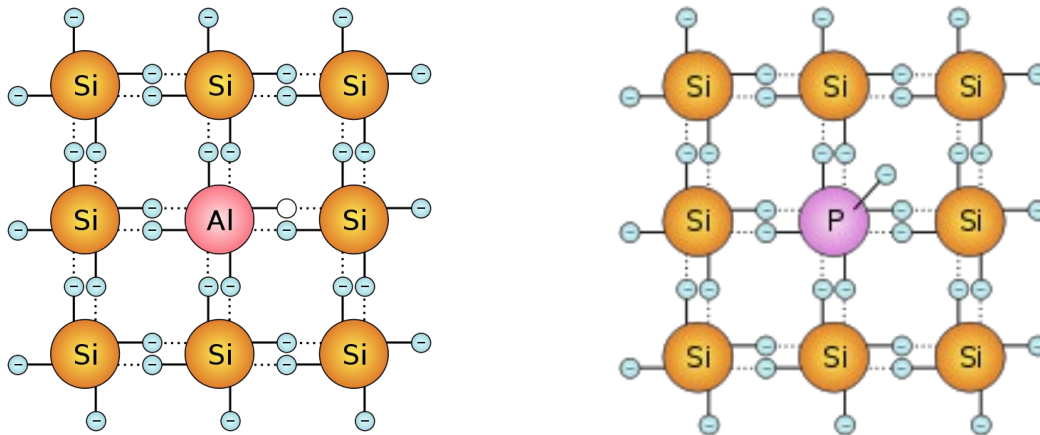


Abb. 13.3: Fremdatome in Silicium. Links: Aluminium -> es entstehen „Löcher“ (p-Dotierung). Rechts: Phosphor mit fünf Valenzelektronen -> es entsteht ein Überschuss an Elektronen (n-Dotierung).

Silicium mit Arsen (Antimon) als Akzeptor: Da sowohl Arsen als auch Antimon genauso wie Phosphor fünf Valenzelektronen haben, ist die schematische Darstellung des Kristallgitters für alle Akzeptoren gleich; es muss nur der Dotierstoff ausgetauscht werden (Abb. 13.3 rechts: statt P für Phosphor As für Arsen oder Sb für Antimon).

Silicium mit Bor (Gallium, Indium) als Donator: Das gleiche gilt auch für die verschiedenen Donatoren. Alle in Frage kommenden Materialien haben drei Valenzelektronen, sodass das Kristallgitter mit den Ladungsträgern gleich bleibt. In Abb. 13.3 links muss daher statt Al für Aluminium nur B für Bor, Ga für Gallium oder In für Indium eingezeichnet werden.

Aufgabe 6

Finden Sie heraus, wie viele Atome Silicium pro cm^3 hat und setzen Sie diese Zahl ins Verhältnis zur Dotierstoffkonzentration eines unbehandelten Siliciumwafers.

Antwort:

Die Anzahl der Teilchen (in diesem Fall der Atome) berechnet man mit der Dichte des Materials und seiner Molmasse (oder molaren Masse).

Dichte von Silicium: $2,336 \text{ g/cm}^3$

Molmasse von Silicium: $28,09 \text{ g/mol}$

$$28,09 \text{ g} \hat{=} 1 \text{ mol}$$

$$2,336 \text{ g} \hat{=} x \text{ mol}$$

$$\Rightarrow x = \frac{2,336 \text{ g} * 1 \text{ mol}}{28,09 \text{ g}}$$

$$\Rightarrow x = 0,083 \text{ mol}$$

*In einem cm^3 sind also 0,83 mol Silicium enthalten. Da ein mol mit $6,022 * 10^{22}$ Teilchen definiert ist, sind demnach $0,83 \text{ mol} * 6,022 * 10^{22} \text{ Teilchen/mol} = 5 * 10^{22} \text{ Teilchen}$ (= Atome) enthalten.*

Zum Vergleich: Typische Dotierstoffkonzentrationen von unbearbeiteten Siliciumwafern liegen bei 2×10^{14} bis $2,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

Aufgabe 7

Erklären Sie, wie man mit einer Dotierung die n-Vordotierung eines Siliciumwafers

- a) verstärken
- b) verringern
- c) ins Gegenteil umkehren könnte.

Antwort:

Mit einer n-Dotierung kann man die n-Vordotierung verstärken, mit einer leichten p-Dotierung kann man sie verringern, mit einer starken p-Dotierung (die Dotierstoffkonzentration muss größer sein als die der n-Vordotierung) kann man sie ins Gegenteil umkehren.

Aufgabe 8

Finden Sie mit Hilfe des Periodensystems der Elemente heraus, wie viele Elektronen

- a) Phosphor
und
- b) Bor

insgesamt haben. (Stichworte: Schalenmodell, Valenzelektronen).

Antwort:

Bor befindet sich in Gruppe 13 und hat die Ordnungszahl 5. Die Ordnungszahl gibt die Anzahl der Protonen im Atomkern und damit auch die Anzahl der Elektronen an. Nach dem Schalenmodell von Niels Bohr ist die K-Schale mit 2 Elektronen besetzt. Die L-Schale ist dementsprechend mit 3 Elektronen besetzt. Da die L-Schale gleichzeitig die äußere Schale ist, handelt es sich bei den 3 Elektronen um Valenzelektronen.

Phosphor befindet sich in Gruppe 15 und hat die Ordnungszahl 15. Die K-Schale ist mit 2 Elektronen, die L-Schale mit 8 und die M-Schale mit 5 (Valenz-)Elektronen besetzt.

Aufgabe 9

Machen Sie folgendes Experiment: Nehmen Sie eine Glasschale und füllen sie mit lauwarmen Wasser. Geben Sie ein paar Tropfen Tinte (blau oder schwarz) hinzu und beobachten Sie, was passiert (nicht rühren!). Erläutern Sie mit Hilfe dieser Beobachtung den Vorgang der Diffusion.

Antwort:

Der Tintentropfen wird im Wasser sehr schnell größer, seine Färbung ist zu Beginn „wolkig“ (ungleichmäßig). Nach ca. 1 Minute hat sich die Größe des Tintenflecks im Wasser mindestens verdoppelt, die Färbung ist bereits sehr gleichmäßig. Es gibt deutlich dunklere Bereiche in der Mitte. A, Rand ist die Färbung heller.

Nach 20 min hat sich die Größe des Tintenflecks nicht wesentlich verändert, aber er ist in der Glasschale herumgewandert. Die Farbe ist insgesamt etwas blasser geworden, dagegen ist das Wasser gleichmäßig leicht bläulich geworden.

Nach 60 min sind Form und Größe des Tintenflecks weiter gleich geblieben (es ist ein fast perfekter Halbmond), er ist aber noch weiter herumgewandert. Die Farbe ist noch blasser geworden. Das Experiment wurde an dieser Stelle abgebrochen, aber es lohnt sich, die Tinte/Wasser-Mischung auch einmal über Nacht stehen zu lassen.

Diffusion:

Die Tintenmoleküle haben sich im Wasser gleichmäßig verteilt (die Tintenmoleküle sind im Wasser diffundiert), bis sich ein energetisches Gleichgewicht eingestellt hat. Eine noch gleichmäßigere Verteilung kann nur erreicht werden, wenn Energie von außen zugeführt wird. Dies kann z. B. in Form von Wärme oder durch Rühren geschehen (probieren Sie es aus!).

Aufgabe 10

Erläutern Sie den Unterschied zwischen dem ohmschen Widerstand R und dem spezifischen Widerstand ρ .

Antwort:

Der Widerstand R (Ohmsche Widerstand) beschreibt das Verhältnis von elektrischer Spannung U und Strom I :

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{ohmsches Gesetz}$$

Die Einheit des ohmschen Widerstands ist $[\Omega]$.

Der spezifische Widerstand ρ ist eine temperaturabhängige Materialkonstante mit der abgeleiteten SI-Einheit $[\Omega \text{ m}]$. Sie ergibt sich aus der dimensionsbezogenen Kürzung von $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Es gilt:

$$1 \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6} \Omega \text{ m}$$

Der ohmsche Widerstand R berechnet sich aus dem spezifischen Widerstand ρ durch:

$$R = \frac{l}{A} \rho$$

mit l : Länge des elektrischen Leiters und A : Querschnittsfläche

Aufgabe 11

Diskutieren Sie, ob es so gut ist, ein Diffusionsrohr sowohl für die n- als auch für die p-Diffusion zu nutzen (siehe Abb. 13.5 oben).

Antwort:

Nein, das ist auf keinen Fall gut. Da man nie sichergehen kann, ob sich von der vorangegangenen Diffusion noch Dotieratome im Rohr befinden, kann ein beherrschbarer Prozess nicht gewährleistet werden. Die Diffusionsrohre sollten immer nur für eine Art der Diffusion verwendet werden.

Aufgabe 12

Lesen Sie aus dem Diagramm in Abbildung 13.9 die Tiefe des pn-Übergangs nach einer Diffusion bei 1000 und 1100 °C ab. Wie groß ist dort der Widerstand direkt unter der Substratoberfläche, d. h. links vom Peak?

Antwort:

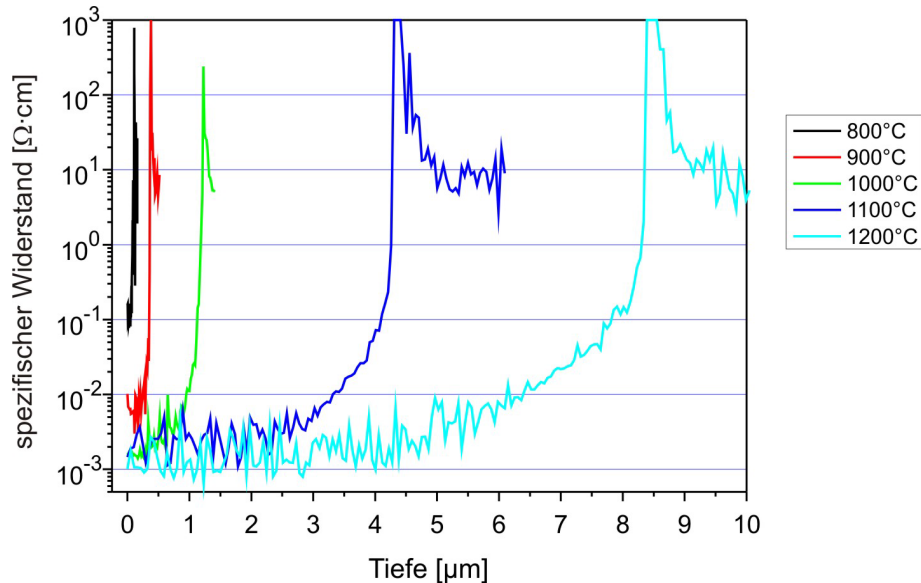


Abb. 13.9: Ergebnisse einer Spreading Resistance Messung

Tiefe des pn-Übergangs bei 1000 °C: 1 µm

Tiefe des pn-Übergangs bei 1100 °C: 4,3 µm

Spezifischer Widerstand direkt unter der Substratoberfläche, also bei einer Tiefe von 0 µm, bei 1100 °C: ca. $0,8 \cdot 10^{-3} \Omega \text{ cm} = 0,8 \cdot 10^{-5} \Omega \text{ m}$.

Aufgabe 13

Wie würde das Dotierprofil bei 1200 °C verlaufen, wenn Sie nicht den spezifischen elektrischen Widerstand, sondern die Dotierstoffkonzentration über der Substrattiefe auftragen würden? (Gefragt ist nur der prinzipielle Verlauf des Dotierprofils ohne genaue Werte.)

Antwort:

*Die Spreading Resistance Messungen wurden nach einer Diffusion aus **unerschöpflicher Quelle** gemacht. Die Form des Dotierprofils würde also so aussehen wie die Profile in Abb. 13.11.*

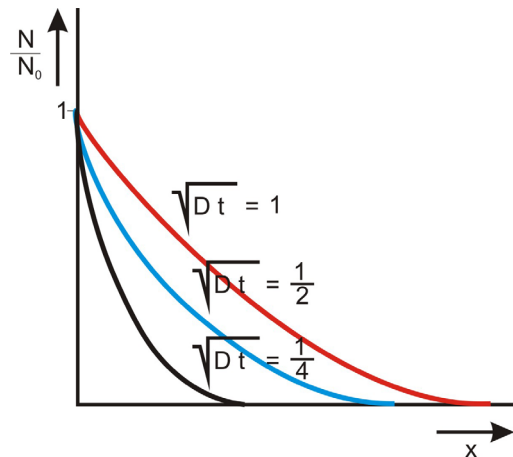
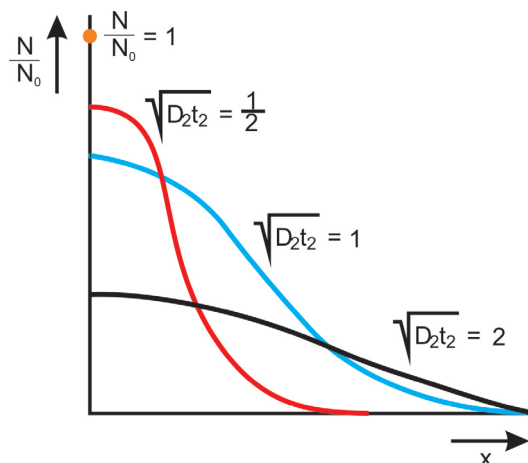


Abb. 13.11: Konzentration des Dotierstoffes N/N_0 abhängig von der Tiefe x unter der Substratoberfläche bei unerschöpflicher Quelle (Dotierprofil unerschöpfliche Quelle) [MLS]

Aufgabe 14

Zeichnen Sie in Abbildung 13.12 den Punkt auf der y-Achse, wo $N/N_0 = 1$ ist.

Antwort:



Der eingezeichnete Punkt ist qualitativ. Wichtig ist, dass er auf jeden Fall oberhalb der Kurven liegt.

Aufgabe 15

Was würde passieren, wenn vor einer Diffusion eine Chemikalie mit Metallionen verunreinigt gewesen wäre? Welche Auswirkungen hätte dies auf die erzeugten Widerstände? Was müssten Sie als Betreuer einer Diffusionsanlage tun, wenn darin Proben prozessiert wurden, die mit Metallionen verschmutzt gewesen sind? Haben Sie eine Idee, wie Sie eine Verunreinigung der Wafer mit Metallionen **vor** der Diffusion feststellen können?

Antwort:

Wenn eine Chemikalie vor der Diffusion mit Metallionen verunreinigt gewesen wäre, wären diese in die Substratoberfläche eingedrungen. Da Metalle leitfähig sind, würde eine Verunreinigung des Substrats mit Metallionen eine Verringerung der erzeugten Widerstände bewirken.

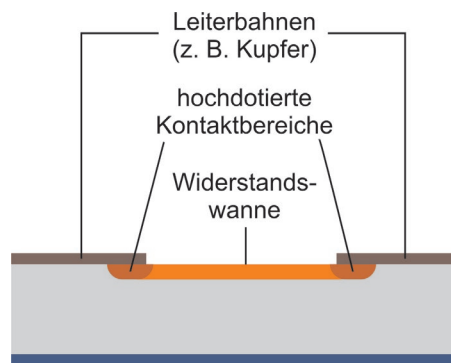
Eine Diffusionsanlage muss vollständig gereinigt werden, wenn sie mit verunreinigten Substraten betrieben wurde. Das bedeutet, dass die Anlage sofort für die weitere Prozessierung gesperrt, heruntergefahren und das Diffusionsrohr ausgebaut und

professionell gereinigt werden muss. Um die Prozesssicherheit auf jeden Fall wieder herzustellen, muss das Diffusionsrohr gegen ein neues ausgetauscht werden.

Aufgabe 16

Zeichnen Sie eine Widerstandswanne mit hochdotierten Kontaktbereichen im Schnitt. Zeichnen Sie auf der Waferoberfläche auch die Leiterbahnen mit ein.

Antwort:



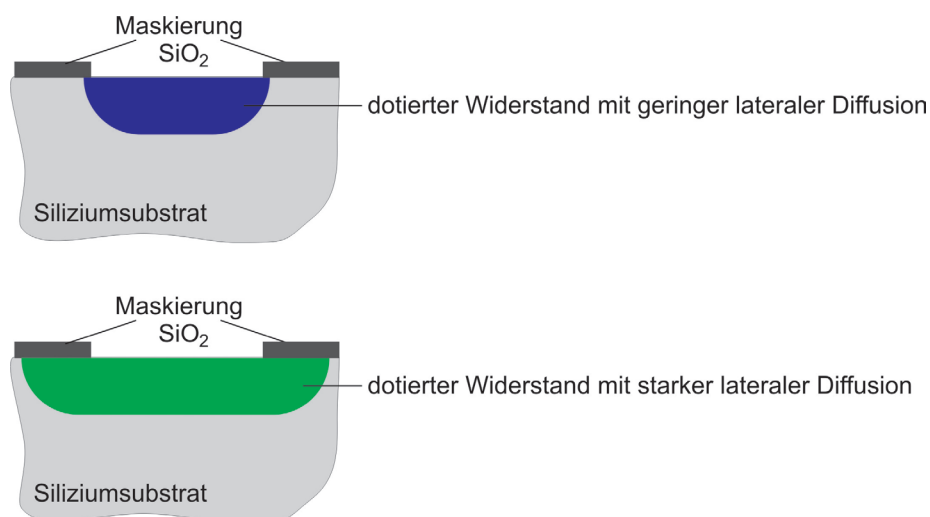
Aufgabe 17

Skizzieren Sie einen dotierten Widerstand im Schnitt

- a) bei dem die laterale Diffusion der Dotieratome nur ganz gering ist
- b) bei dem es zu einer starken Diffusion der Dotieratome nicht nur in die Tiefe, sondern auch zu allen Seiten gekommen ist.

Zeichnen Sie auch die für den Widerstand strukturierte Maskierschicht ein.

Antwort:



Aufgabe 18

Zeichnen Sie in Abbildung 13.15 noch zwei weitere Linien ein:

- a) eine für ein noch schwereres Ion
- b) eine für ein ganz leichtes Ion.

Antwort:



ANHANG

Mathematische Beschreibung des Diffusionsvorgangs mit den Fick'schen Gesetzen:

Die Grundlage der Berechnung wird durch das Massenerhaltungsgesetz (Gleichung 13.A1) und die Kontinuitätsgleichung (Gleichung 13.A2) gegeben.

$$i = -D \frac{dN}{dx} \quad \text{Gleichung 13.A1}$$

$$\frac{di}{dx} + \frac{dN}{dt} = 0 \quad \text{Gleichung 13.A2}$$

Dabei ist i der Fluss der Dotieratome pro Einheitsfläche (auch Materiestrom genannt) und N die Konzentration des Dotierstoffes. D ist der Diffusionskoeffizient, der beschreibt, wie gut ein Dotieratom in das Substrat diffundieren kann. Der Diffusionskoeffizient ist abhängig von den Materialien und der Prozesstemperatur. Er muss daher experimentell ermittelt oder in Tabellen nachgeschaut werden.

Das Massenerhaltungsgesetz sagt aus, dass der Materiestrom i proportional ist zur räumlichen Änderung der Dotierstoffkonzentration N (für „räumliche Änderung“ steht in der Mathematik der Ausdruck $\frac{d}{dx}$). Anders ausgedrückt: Die Natur versucht stets, einen Zustand

des Gleichgewichts zu erreichen bzw. zu behalten. Bezogen auf die Diffusion heißt das: Ist ein Dotierstoff in der Substrattiefe x nicht gleichmäßig verteilt, so werden sich die Dotieratome bewegen (Materiestrom i), bis das Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Der Proportionalitätsfaktor ist der Diffusionskoeffizient D . Das heißt, der Materiestrom ist umso größer, je leichter der Dotierstoff diffundieren kann, aber auch je größer der Verteilungsunterschied des Dotierstoffes ist.

Ein Beispiel aus der Natur:

Bei Regen erhöht sich die Konzentration an H_2O -Molekülen N an der Erdoberfläche. Das Wasser dringt in die Erde (Materiestrom i , Abstand zur Erdoberfläche x), und zwar leicht, wenn die Erde locker ist (Diffusionskoeffizient D hoch) und schwerer, wenn die Erde fest und ausgedörrt ist (Diffusionskoeffizient D niedrig). Der Materiestrom an H_2O -Molekülen in die Erde ist auch umso größer, je trockener die Erde vorher war. Mit dem Eindringen in die Erde gleicht die Natur den Unterschied oben nass – unten trocken aus.

Die Kontinuitätsgleichung beschreibt, dass die Summe der räumlichen Änderung des Materiestroms i und der zeitlichen Änderung der Dotierstoffkonzentration N gleich Null ist (für „zeitliche Änderung“ steht in der Mathematik der Ausdruck $\frac{d}{dt}$). Wenn man die Gleichung

umstellt, ist sie leichter zu interpretieren:

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{di}{dx} \quad \text{Gleichung 13.A2a}$$

In Worten: Die zeitliche Änderung der Dotierstoffkonzentration N in einem definierten Volumen ist genau so groß wie die Abnahme des Massenstroms i durch die Grenzfläche. Oder anders ausgedrückt: Die Dotierstoffkonzentration N wird sich nur ändern, wenn ein Materiestrom i durch die Oberfläche herein oder hinaus geht. Nehmen wir noch einmal das *Beispiel aus der Natur*:

Wir betrachten 1 m^3 Erde, begrenzt durch seine Oberfläche. Regnet es zu Anfang sehr stark, dringen sehr viele H_2O -Moleküle durch die Erdoberfläche (Massenstrom i). Als Folge davon ändert sich die Wassermenge in dem m^3 Erde sehr schnell. Regnet es dann immer weniger,

dringen immer weniger H₂O-Moleküle in die Erde ein (der Massenstrom nimmt ab). Die Konzentration der H₂O-Moleküle N nimmt dann zwar weiter zu, aber immer langsamer.

Mit diesen beiden Gleichungen ergibt sich die Diffusionsgleichung:

$$\frac{\delta N(x, t)}{\delta t} = D \frac{\delta^2 N(x, t)}{\delta x^2} \qquad \text{Gleichung 13.A3}$$

Zur Erklärung: δ steht in der Mathematik für „partielle Differentiation“. Sie wird verwendet, wenn ein Parameter von mehreren Größen abhängt (z. B. die Konzentration von der Substrattiefe x und von der Prozessdauer t), die vorliegende Änderung aber nur bezüglich einer Größe betrachtet wird.