



**SUS***mobil*

Modul 1: Funktionsweise eines Halbleiter-Gassensors

Theorie

## Inhalt

1. Allgemeines .....	3
2. Theoretische Grundlagen .....	4
a) Konstante Temperatur .....	4
1. Fall: Sensor ohne äußere Atmosphäre .....	4
2. Fall: Sensor in Luft .....	4
3. Fall: Sensor in Luft mit Zielgas .....	5
Reaktionsrate .....	5
b) Veränderliche Temperatur .....	6
1. Fall: Sensor ohne äußere Atmosphäre .....	6
2. Fall: Sensor in Luft .....	6
3. Fall: Sensor in Luft mit Zielgas .....	7

## 1. Allgemeines

Ein Metalloxid-Halbleiter Gassensor besteht aus einem halbleitenden Material (z.B. *Zinndioxid* oder *Wolfram(III)-oxid*). Halbleiter nehmen eine Zwischenstellung zwischen elektrischen Leitern (vor allem Metalle) und Isolatoren (z.B. Glas) ein. Ihre Leitfähigkeit steigt mit zunehmender Temperatur.

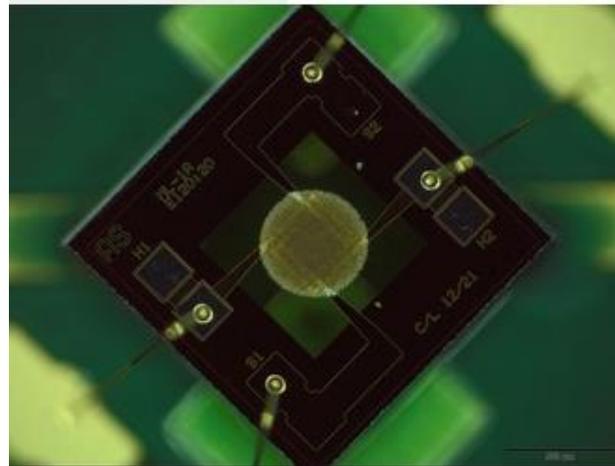


Abb. 1: links: Halbleiter-Gassensor mit vier Anschlüssen verborgen unter einer schützenden Membran. Rechts: Mikroskopaufnahme eines HalbleiterGassensors

Die Funktionsweise beruht auf der Änderung des elektrischen Widerstands des Sensormaterials in Anwesenheit eines Gases. Durch Reaktionen der Sensoroberfläche mit dem umgebenen Sauerstoff und des Zielgases, ändert sich der Widerstand. Eine wichtige Variable ist zudem die Temperatur, mit der der Sensor betrieben wird. Legt man an den Sensor eine größere Heizspannung an, so fließt durch ihn ein größerer Strom. Aufgrund der Wärmewirkung des elektrischen Stroms, kann so über eine Erhöhung der Heizspannung die Sensortemperatur erhöht werden. Sowohl die Heizspannung als auch die Sensorreaktion (Widerstand) können durch Multimeter ausgelesen werden (Abb.2).

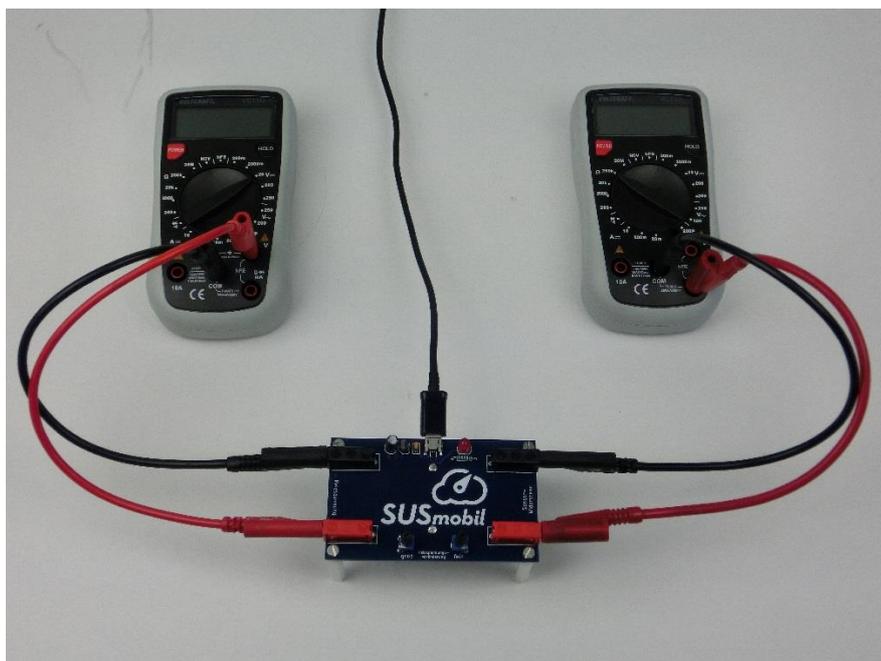


Abb.2: Anstelle des Bildes mit dem Fingerabdruck (das kommt erst zum Schluss) hätte ich hier den Versuchsaufbau mit Multimetern abgebildet.

## 2. Theoretische Grundlagen

### a) Konstante Temperatur

Um das Verhalten der Sensorreaktion bei konstanter Sensortemperatur zu beschreiben, nutzen wir ein einfaches Modell. Dieses besteht aus folgenden Komponenten:

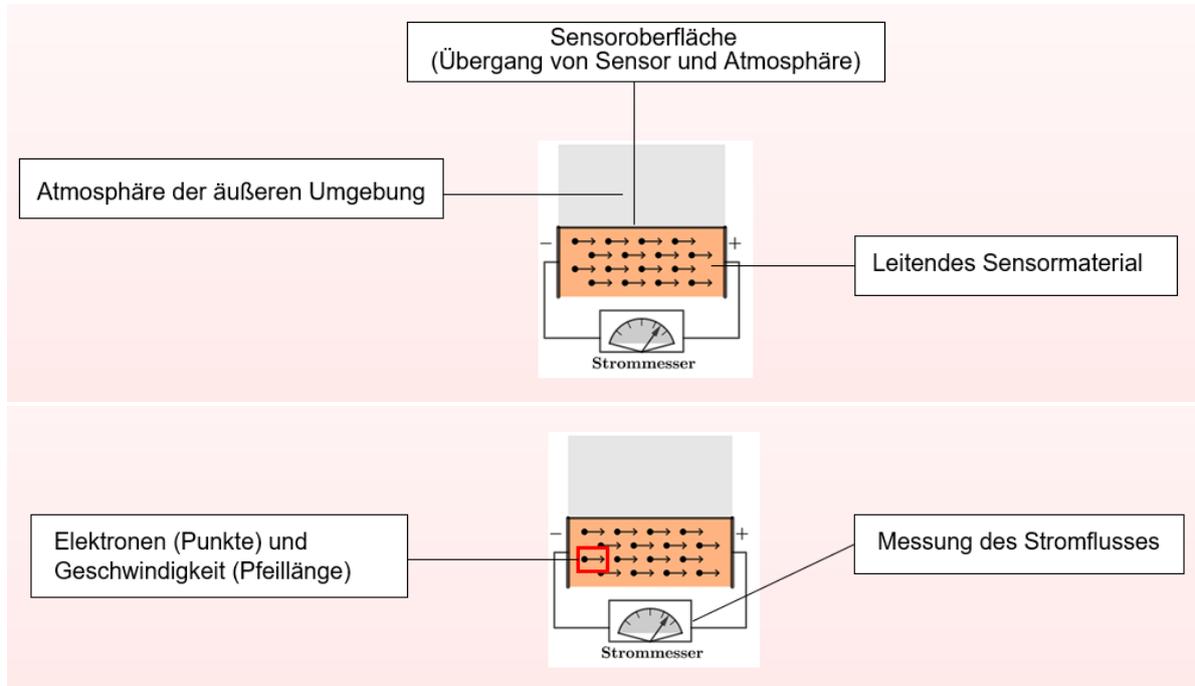


Abb. 3: Komponenten des Modells zur Erklärung des Sensorverhaltens

#### 1. Fall: Sensor ohne äußere Atmosphäre

Man legt eine äußere Spannung  $U$  an das halbleitende Sensormaterial an. Befindet sich der Sensor in einer Atmosphäre ohne Gasmoleküle, trägt eine gewisse Anzahl freier Elektronen zum Ladungstransport bei. Dabei beeinflusst nicht nur die Anzahl der Elektronen, sondern auch deren kinetische Energie den Stromfluss positiv.

#### 2. Fall: Sensor in Luft

Befindet sich der Sensor in gewöhnlicher Luft (blaue Färbung der Umgebung), so kommt es zu einer Bedeckung der Sensoroberfläche mit Sauerstoff (blaue Kreise).

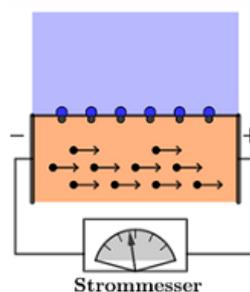


Abb. 4: Gassensor in einer Luftatmosphäre

Der Sauerstoff geht eine Verbindung mit der Oberfläche des Sensors ein, wo er einige, ursprünglich freie, Elektronen bindet. Diese stehen nun nicht mehr zum Ladungstransport zur Verfügung. Der Strom  $I$  sinkt. Da die äußere Spannung  $U$  konstant geblieben ist, kann das Sinken des Stroms nach dem Ohm'schen Gesetz ( $R = \frac{U}{I}$ ) auf einen steigenden Widerstand  $R$  zurückgeführt werden.

### 3. Fall: Sensor in Luft mit Zielgas

Die Luft enthält nun einen zu messenden gasförmigen Stoff („Zielgas“, angedeutet durch violette Färbung der Atmosphäre bzw. einzelne Moleküle durch rote Kreise). Das Zielgas kann mit dem Sauerstoff der Sensoroberfläche reagieren. Dadurch löst sich der Sauerstoff von der Oberfläche, die gebundenen Elektronen werden wieder frei und stehen für den Ladungstransport zur Verfügung. Der Strom  $I$  steigt und der elektrische Widerstand  $R$  sinkt.

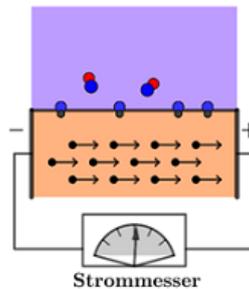


Abb. 5: Gassensor in „Zielgas“-Atmosphäre

### Reaktionsrate

Wieviel gebundener Sauerstoff mit der äußeren Atmosphäre reagiert, lässt sich durch die sogenannte Reaktionsrate beschreiben. Je höher die Reaktionsrate, desto stärker ist der Effekt des 3. Falls.

Die Reaktionsrate hängt maßgeblich von vier Faktoren ab:

#### 1) Konzentration des Zielgases

→ Je mehr Zielgas vorhanden ist, desto wahrscheinlicher finden Reaktionen mit dem Sauerstoff auf der Oberfläche statt.

#### 2) Sauerstoffbedeckung auf der Sensoroberfläche

→ Je stärker die Oberfläche mit Sauerstoff bedeckt ist, desto wahrscheinlicher finden Reaktionen mit dem Zielgas statt.

#### 3) Art des Zielgases

→ Bei gleicher Konzentration und Sauerstoffbedeckung besitzen reaktionsfreudigere (mit dem Oberflächensauerstoff) Zielgase eine höhere Reaktionsrate.

#### 4) Temperatur des Sensormaterials

→ Der Einfluss der Temperatur des Sensormaterials ist sehr komplex. Nicht nur gibt es einen direkten Einfluss auf die Reaktionsrate (bei höheren Temperaturen finden Reaktionen wahrscheinlicher statt). Dazu kommt, dass die Temperatur auch Auswirkungen auf die Sauerstoffbedeckung und die Anzahl freier Ladungsträger hat.

## b) Veränderliche Temperatur

Um das Verhalten der Sensorreaktion bei variabler Sensortemperatur zu beschreiben, widmen wir uns wieder dem Modell. Die Temperatur der Sensoroberfläche wird durch die Farbe angedeutet. Gelb bedeutet (relativ) kalt, orange bedeutet (relativ) warm, und rot bedeutet (relativ) heiß.

### 1. Fall: Sensor ohne äußere Atmosphäre

Erhöht man die Sensortemperatur, so erhöht man dadurch auch die kinetische Energie der Ladungsträger. Dadurch bewegen sie sich schneller und sorgen für einen höheren Strom  $I$  und gleichzeitig einen kleineren elektrischen Widerstand  $R$  (Abb. 6).

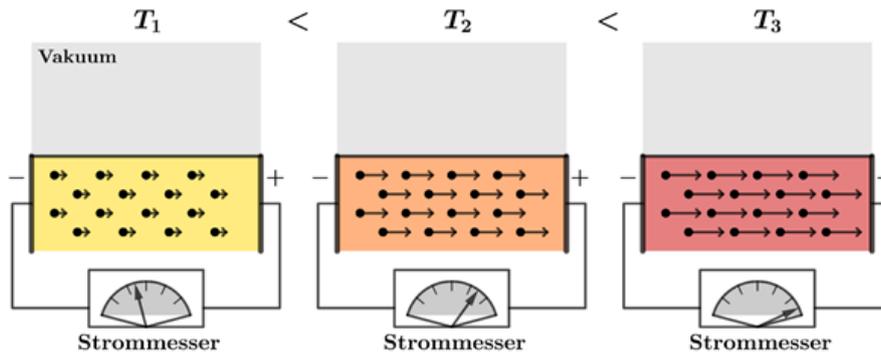


Abb. 6: Oben: Sensorverhalten bei verschiedenen Temperaturen im Vakuum.

Das ist eine typische Eigenschaft von Halbleitern: Sie leiten den Strom bei höheren Temperaturen besser (man nennt sie daher auch Heißeleiter). Bei den Halbleitersensoren können wir dieses Verhalten jedoch nicht beobachten, da der Einfluss der Atmosphäre nicht außer Acht gelassen werden darf.

### 2. Fall: Sensor in Luft

Beindet sich der Sensor in Luft, so geht der Sauerstoff, wie 2a) erläutert, eine Bindung mit der Sensoroberfläche ein. Ehemals freie Elektronen werden gebunden und stehen nicht mehr für den Ladungstransport zu Verfügung. Die Sauerstoffbedeckung der Oberfläche wird mit größer werdender Temperatur auch größer (Abb. 7).

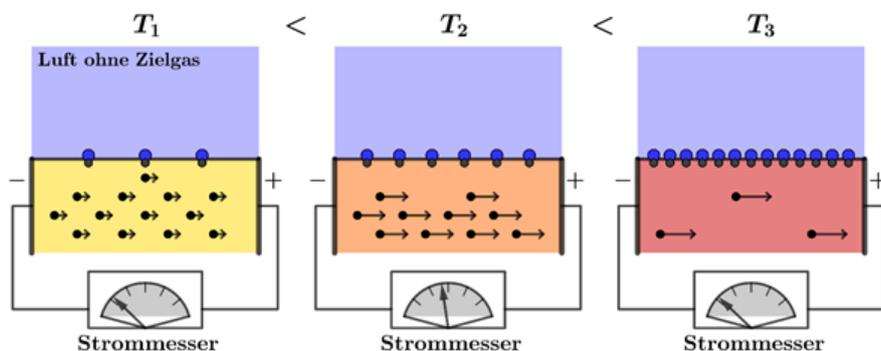


Abb. 7: Unten: Sensorreaktion in Luftatmosphäre bei verschiedenen Sensortemperaturen

Erhöht man die Sensortemperatur, so treten also *zwei gegensinnige Effekte* auf: Wie in Fall 1 erhöht sich die kinetische Energie der Elektronen, was (für sich alleine) zu einem Stromanstieg führt. Gleichzeitig werden aber mehr freie Ladungsträger an der Oberfläche durch Sauerstoff gebunden, was (für sich alleine) zu einer Senkung des Stroms führt.

Beim Übergang von  $T_1$  auf  $T_2$  überwiegt in der Summe beider Effekte der Stromanstieg durch die erhöhte kinetische Energie der freien Ladungsträger. Demzufolge sinkt der elektrische Widerstand zunächst ab.

Beim Übergang von  $T_2$  auf  $T_3$  verstärken sich die beiden Effekte weiter, jedoch überwiegt in diesem Fall die Bindung der Elektronen an den Sauerstoff. Zwar ist die Geschwindigkeit der freien Ladungsträger bei  $T_3$  sehr groß, aber es gibt kaum noch welche. Dadurch sinkt der Strom ab und der elektrische Widerstand steigt.

Die beiden gegensinnigen Effekte führen zu einem Verlauf des Sensorwiderstandes in Abhängigkeit der Temperatur, der bei Luft ohne Zielgas einer Parabel ähnelt. Bei euren Messungen habt ihr diesen prinzipiellen Verlauf nachgewiesen.

### 3. Fall: Sensor in Luft mit Zielgas

Da das Zielgas mit dem Oberflächensauerstoff reagiert, werden Elektronen wieder freigesetzt. Der Sensorwiderstand ist deshalb grundsätzlich niedriger als bei Luft ohne Zielgas (vgl. 3. Fall in Kapitel 2a). Das Verhalten des Sensors bei Anwesenheit eines Zielgases und veränderlicher Temperatur ist zudem stark von der Reaktionsrate des Zielgases mit dem Oberflächensauerstoff abhängig. Je nach Zielgas kommt es so zu einem charakteristischen Profil („Fingerabdruck“) der Sensorreaktion.

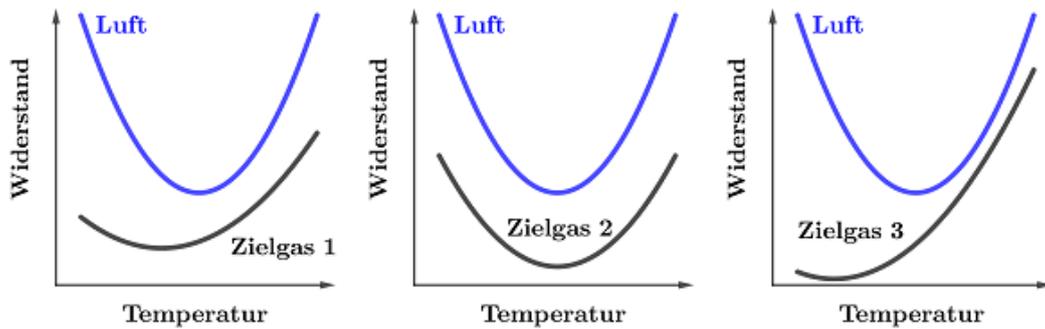


Abb. 8: Prinzipieller Widerstandsverlauf bei unterschiedlichen Stoffen und unterschiedlichen Sensortemperaturen.

Auf diese Weise sind wir in der Lage verschiedene Stoffe und auch Konzentrationen voneinander zu unterscheiden. Als Beispiel habt ihr in Modul 1 die „Fingerabdrücke“ der Atmosphären von Wasser, Apfelsaft und alkoholfreiem Bier gemessen (Abb. 8). Beachte bei den drei Diagrammen, dass die Achse, an denen der Widerstand abgetragen ist, zur besseren Vergleichbarkeit logarithmiert wurde.

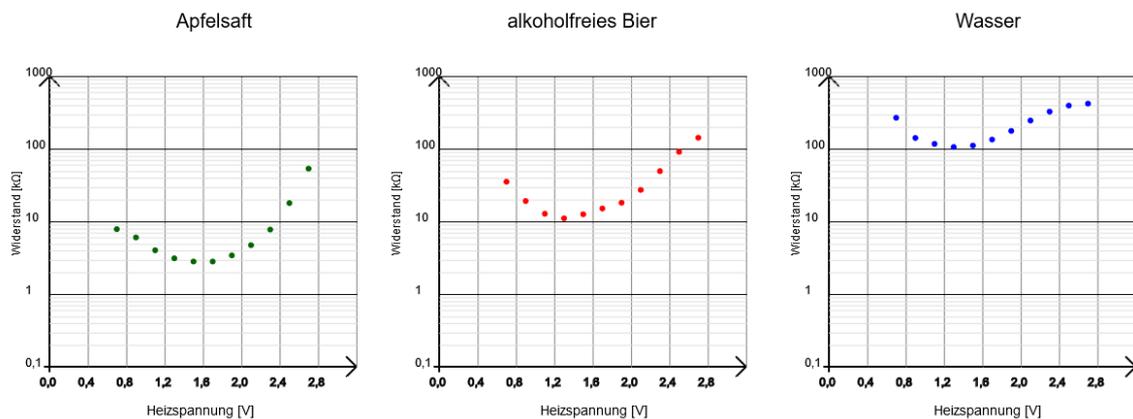


Abb. 8: „Fingerabdruck“ verschiedener Stoffe