

MOSFET

(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

1. Einleitung

MOSFETs sind die Basisbausteine der Mikroelektronik. Sie ermöglichen ein praktisch verlustfreies und schnelles elektronisches Schalten bei hoher Integration. In diesem Versuch sollen die physikalischen Grundlagen eines MOSFETs gezeigt werden. Die drei Komponenten des MOSFETs (Halbleiter, Isolator und Metall) unterscheiden sich in erster Linie in ihrer Leitfähigkeit. Im Bereich der Halbleiteroberfläche kann man die Leitfähigkeit durch Anlegen eines elektrischen Feldes über einen extrem weiten Bereich ändern. Dieser sogenannte Feldeffekt wird zum Schalten in MOSFETs angewendet.

Wichtige Eigenschaften des Halbleitervolumens (Bandlücke, Dotierung, Einfluß von Licht,...) und dessen Beeinflussung durch ein angelegtes elektrisches Feld werden zu verstehen sein. Insbesondere interessiert dabei die dadurch entstehende Raumladungsrandschicht an der Halbleiteroberfläche.

2. MOS – System

Das MOS – System besteht aus einem Halbleiter (hier Si, Bandlücke 1.12 eV), einem aufgewachsenen Isolator (hier SiO₂, Bandlücke ca. 9 eV) und einem auf dem Isolator aufgetragenen Metallfilm (Abb.1).

U_G (Gate-Spannung)

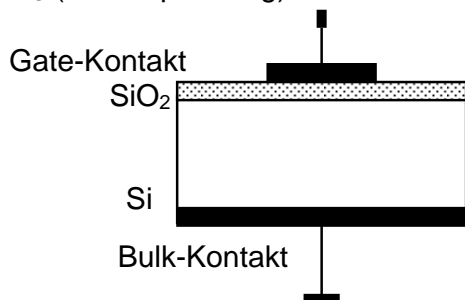
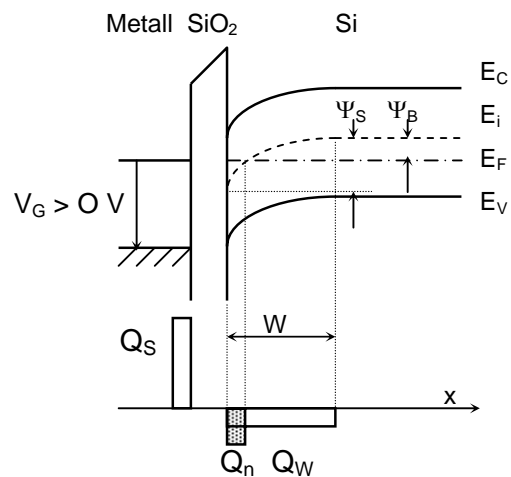


Abb.1: MOS – System.

Durch Anlegen einer Spannung V_G (Gate-Spannung) wird in dieser Kondensatorstruktur an der Oberfläche des Siliziums ein elektrisches Feld erzeugt. Dieses Feld ist proportional zur induzierten Oberflächenladung Q_S . Das elektrische Feld wird ins Halbleiterringere durch die induzierte Raumladungsrandschicht abgeschirmt.

Abb.2 zeigt schematisch die Potentialverhältnisse in der MOS-Struktur. Die Raumladungsrandschicht ist im wesentlichen bestimmt durch die Umbesetzung von Verunreinigungsstörstellen in der Nähe der Grenzschicht und durch die Änderung der Dichte beweglicher Ladungsträger. Da das von außen angelegte elektrische Feld ($\approx 10^4$ V/cm bis 10^6 V/cm) immer noch sehr klein ist gegenüber inneratomaren Feldern (10^8 V/cm), wird das äußere Feld die Potentialverhältnisse im Si-Kristall nur wenig beeinflussen, die Bandstruktur des Si bleibt also unverändert. Das durch die Gate-Spannung bestimmte Potential wird der Bandstruktur nur additiv überlagert und führt damit zu einer Bandverbiegung Ψ_S in der Raumladungsrandschicht.



- Q_S induzierte Oberflächenladung
- Q_n Inversionsladung
- Q_w Raumladung
- W Weite der Raumladungsrandschicht
- Ψ_S Oberflächenbandverbiegung
- Ψ_B Abstand des Fermi-Niveaus des dotierten Halbleiters zum undotierten

Abb.2: Bandverlauf und Ladungsverteilung in der MOS – Struktur.

Die Potentialverteilung wird durch Lösen der Poisson-Gleichung berechnet. Die Randbedingungen sind: (i) Verschwinden des elektrischen Feldes im Halbleiterinneren und (ii) Proportionalität des elektrischen Feldes an der Oberfläche zur induzierten Oberflächenladung. Die Raumladungsdichte hängt dabei vom Energieabstand der Bandkanten E_C (Leitungsband) und E_V (Valenzband) vom Fermi-Niveau E_F im Halbleiter ab. Die exakte mathematische Behandlung ist in Anlage 1 (Sze, Physics of Semiconductors) gegeben.

Es treten wesentlich verschiedene Zustände des Systems auf. Im folgenden werde angenommen, daß das Si p-leitend ist.

Akkumulation: Die Gate-Spannung ist so gepolt, daß das Gate negativ geladen ist. Da diese negative Ladung auf die Löcher im p-Si anziehend wirkt, reichern sich Löcher an der Si/SiO₂ –Grenzschicht an. Die Bänder im Halbleiter werden deshalb nach oben verbogen.

Verarmung: Das Gate ist schwach positiv gepolt. Die Löcher werden vom Gate abgestoßen und ins Halbleiterinnere gedrängt. Zurück bleiben die negativ geladenen Ionenrümpfe der Akzeptoren, welche das Feld abschirmen. Die Bänder sind nach unten verbogen. Die Randzone ist verarmt an beweglichen Ladungsträgern (Isolierschicht).

Inversion: Das Gate wird stärker positiv gepolt, so daß die Bänder noch weiter als bei der Verarmung nach unten verbogen werden. Schneidet die Mitte der Bandlücke E_i das Fermi-Niveau, so sind an der Grenzfläche mehr Elektronen als Löcher vorhanden (schwache Inversion). Nähert sich die Leitungsbandkante dem Fermi-Niveau oder schneidet es sogar, so steigt die Elektronendichte an der Grenzfläche plötzlich enorm an. Für Gate-Spannungen, die größer sind als diese Einsatzspannung U_T , wird die zusätzliche negative Ladung größtenteils in Form von Elektronen in einem sehr schmalen Inversionsband induziert. Diese Elektronen sind parallel zur Grenzfläche frei beweglich. Senkrecht dazu sind sie vom p-leitenden Volumen durch die Verarmungsrandschicht elektrisch isoliert. Es entsteht also ein p-n-Übergang.

Bei einer idealen MOS – Struktur sind bei $U_G = 0V$ die Bänder nicht verbogen. Durch Ionen im Oxid und besetzte Oberflächenzustände ist aber im allgemeinen bereits bei $U_G = 0V$ eine Bandverbiegung vorhanden. Durch geeignete Wahl von U_G läßt sich aber der Flachbandzustand erreichen. Diese Gate-Spannung heißt Flachbandspannung (U_{FB}). Aus

ihrem Wert läßt sich die Zahl der Oberflächenzustände abschätzen.

In diesem Versuch soll die Raumladungsrandschicht durch Kapazitäts- und Leitfähigkeitsmessungen untersucht werden.

3. Kapazitätsmessungen

Durch Lösen der Poisson-Gleichung erhält man einen Zusammenhang zwischen induzierter Oberflächenladung Q_S und der Oberflächenbandverbiegung Ψ_S . Die Berücksichtigung des Spannungsabfalls über das Siliziumoxid ergibt einen Zusammenhang zwischen Q_S und U_G .

Experimentell läßt sich die Raumladungsrandschicht durch eine Kapazitätsmessung charakterisieren. Man bestimmt dabei die differentielle Kapazität C_{tot} als Funktion von U_G . C_{tot} ist definiert als dQ_S/dU_G , d.h. man ändert U_G um einen kleinen Betrag und mißt die Änderung von Q_S . Für die Plattenkondensatorgeometrie ist die Kapazität ein Maß für den Plattenabstand, d.h. für die Weite der Raumladungsrandschicht.

Die differentielle Kapazität wird gemessen, indem man der Gate-Spannung eine kleine Wechelspannung $U_0 \sin \omega t$ überlagert und an der Meßkapazität die Spannung U_M abgreift. Die ω -Frequenzkomponente von U_M , die mit einem Lock-in-Verstärker phasenempfindlich gemessen wird, ist bei geeigneter Wahl von C_M ein Maß für die Probenkapazität.

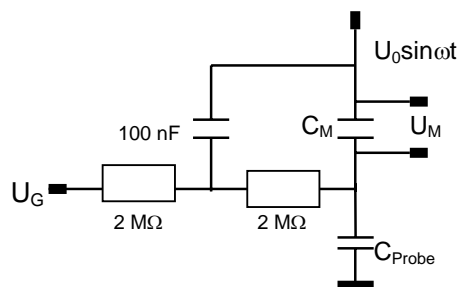


Abb.3: Schaltung zur Messung von C_{tot} .

Versuchsdurchführung:

Die Oszillatorausgangsspannung wird auf 200 mV (Spitze-Spitze) bei einer Frequenz von 640 Hz eingestellt. Die Meßkapazität wird gemäß der Abschätzung in Aufgabe 1 gewählt. Anstelle der Probe wird zunächst eine Referenzkapazität $C_R = 1$ nF angeschlossen. Die Phase am Lock-in-Verstärker wird so eingestellt, daß sie sich nicht ändert, unabhängig davon, ob C_R angeschlossen ist oder nicht. Nach Drehen der Phase um 90° und Abtrennen von C_R entspricht der Meßwert der

Streukapazität der Spannungsversorgung und kann durch geeignete Wahl des DC-Offsets am Lock-in-Ausgang unterdrückt werden. Das Ausgangssignal wird mit einer Kapazitätsdekade geeicht.

Nun wird die Probe angeschlossen. Die Gate-Spannung wird mit einem motorgetriebenen Potentiometer von $-8V$ bis $+8V$ durchgeföhren, die Meßspannung wird dabei auf einem X-Y-Schreiber aufgezeichnet. Die Motorgeschwindigkeit ist auf die Zeitkonstante am Lock-in-Verstärker abzustimmen ! Der Versuch wird für $\omega = 64, 640$ und 6400 Hz jeweils mit und ohne Beleuchtung der Probe durch eine LED durchgeföhrt. Die LED wird mit einem Netzgerät betrieben.

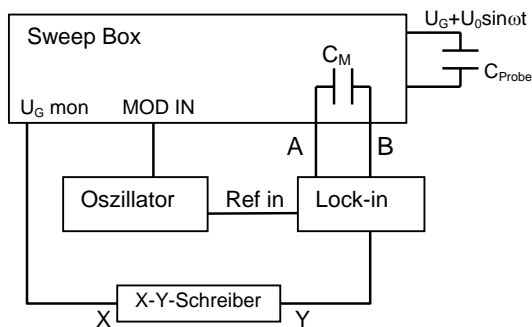


Abb.4: Aufbau zur Messung von C_{tot} .

Auswertung:

- (1) Berechnung der Impedanz des Meßkreises (kapazitiver Spannungsteiler). Welche Beziehung muß zwischen ω , C_M und C_{probe} bestehen, damit die Meßspannung ein direktes Maß für C_{probe} ist ?
- (2) Bestimmung des Dotiertyps der Probe
- (3) Bestimmung der Oxiddicke
- (4) Bestimmung der Störstellenkonzentration aus dem Verhältnis C_{min}/C_{ox} bei 640 Hz (siehe Anhang)
- (5) Erklärung des Frequenzverhaltens
- (6) Erklärung des Einflusses von Licht
- (7) Bestimmung von V_T und V_{FB}
- (8) Bestimmung der Ionenkonzentration im Oxid

4. Leitfähigkeit des MOSFETs

Abb.5 zeigt den schematischen Aufbau eines n-Kanal MOSFETs (p-dotiertes Volumen). Zwischen Source und Drain, den mit dem Gate zu schaltenden Kontakten, wird eine Spannung U_D (Drain-Spannung) angelegt und der Drain-Strom gemessen. Source und Drain sind stark

n-dotiert und daher vom Volumen durch einen pn-Übergang isoliert. Solange sich im Bereich zwischen Source und Drain keine Inversionsschicht beweglicher Elektronen aufbaut, fließt kein Strom aufgrund der beiden entgegengesetzt geschalteten Dioden.

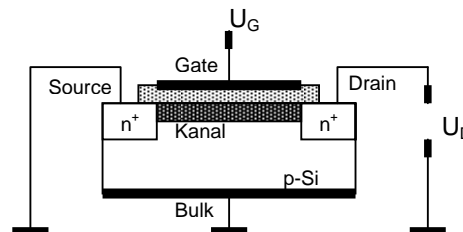


Abb.5: Schematischer Aufbau eines n-Kanal-MOSFETs

Falls die Gate-Spannung positiv gepolt und ihr Wert größer als die Einsatzspannung U_T ist, befindet sich unterhalb der Gate-Elektrode ein n-leitender Kanal, dessen Widerstand man mit den Source- und Drain-Elektroden messen kann. Die Abhängigkeit des Source-Drain-Stromes (I_{SD}) von der Gate-Spannung bei fixierter Source-Drain-Spannung heißt Eingangskennlinie. Aus ihrem Verlauf kann man U_T bestimmen.

$$R = \frac{W}{L} \cdot \frac{U_D}{I_{SD}} = \frac{1}{\sigma_S}$$

Der spezifische Kanalwiderstand R läßt sich ermitteln aus , wobei L und W Länge bzw. Breite der Gate-Elektrode sind. σ_S ist die spezifische Kanalleitfähigkeit. Die Leitfähigkeit σ ($[\sigma]=1/\Omega cm$) wird folgendermaßen beschrieben: Hier sind e , n , p , μ_n und μ_p die Elementarladung, die Elektronen- bzw. Löcherkonzentration und

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

die Elektronen- bzw. Löcherbeweglichkeit. Die Beweglichkeit μ ($[\mu]=cm^2/Vs$) ist definiert als der Proportionalitätsfaktor zwischen Driftgeschwindigkeit v_D eines Ladungsträgers

$$\mu = \frac{v_D}{E}$$

und elektrischer Feldstärke E :

$$\sigma_S = en_S\mu_{eff}$$

Im n-Kanal des MOSFETs gilt $n \gg p$ und damit: , wobei $[\sigma_S] = 1/\Omega$ gilt und n_S und μ_{eff} die Flächendichten frei beweglicher Ladungsträger bzw. die Beweglichkeit der Elektronen im Inversionskanal sind.

Aus den vorangegangenen Gleichungen und der Trägerdichte n_S als Funktion der Gate-Spannung (siehe Aufgabe 1) läßt sich folgender Ausdruck für μ_{eff} herleiten:

$$\mu_{eff} = \frac{\frac{L}{W} \cdot \frac{I_{SD}}{U_D}}{\frac{C_{ox}}{LW} (U_G - U_T)}$$

Die effektive Beweglichkeit kann man mit der Feldeffektbeweglichkeit μ_{FE} vergleichen, die durch

$$\mu_{FE} \equiv \frac{d\sigma_S}{dQ_S} = \frac{1}{e} \cdot \frac{d\sigma_S}{dn_S}$$

definiert ist. Durch Einsetzen von σ_S in die Definition von μ_{FE} ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen effektiver und Feldeffektbeweglichkeit:

$$\mu_{FE} = \mu_{eff} + n_S \cdot \frac{d\mu_{eff}}{dn_S}$$

Man sieht also, daß beide Beweglichkeiten gleich sind, wenn μ_{eff} nicht von n_S abhängt.

Experimentell ist die Feldeffektbeweglichkeit folgendermaßen zugänglich: Eine der Gate-Spannung überlagerte Modulation sorgt für eine Änderung dQ_S der Oberflächenladung. Die daraus resultierende Änderung $d\sigma_S$ der Leitfähigkeit wird im Source-Drain-Strom beobachtet.

Aus der Beweglichkeit läßt sich die mittlere Zeit zwischen zwei Streueignissen der Ladungsträger bestimmen:

$$\mu = \frac{e\tau}{m^*}$$

, wobei τ die Streuzeit und m^* die effektive Masse der Ladungsträger sind. Für Si ist $m^* = 0.2 \cdot m_0$ (m_0 – Masse des freien Elektrons).

Die effektive Beweglichkeit wird bestimmt, indem I_{SD} bei $U_D = 100\text{mV}$ als Funktion von U_G im Bereich zwischen -2V und $+10\text{V}$ gemessen wird. Für die Bestimmung der Feldeffektbeweglichkeit wird der Gate-Spannung eine Modulationsspannung von 100mV bei $\omega = 64\text{Hz}$ überlagert. Die ω -Frequenzkomponente des Spannungsabfalls am Meßwiderstand R_S wird mit einem Lock-in-Verstärker erfaßt und ist proportional zur Feldeffektbeweglichkeit μ_{FE} . Die Dokumentation der Meßergebnisse erfolgt über einen X-Y-Schreiber. Alle Messungen werden bei 77K und 300K durchgeführt. Die schematische Meßanordnung ist in Abb.6 gezeigt.

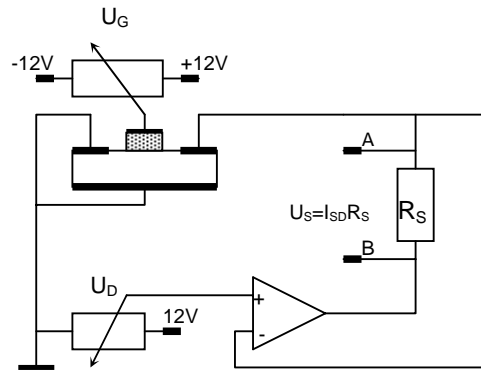


Abb.6: Schaltung zur Messung von I_{SD} .

Auswertung:

- (1) Welcher Zusammenhang zwischen U_G und n_S ergibt sich für $U_G > U_T$?
- (2) U_T ist bei 77K und 300K zu bestimmen. Woher kommt der Unterschied?
- (3) Aus dem Verhältnis I_{SD}/U_D ist μ_{eff} für einige Werte von n_S bei 77K und 300K zu berechnen (Wertetabelle, Skizze).
- (4) μ_{FE} ist als Funktion von n_S zu zeichnen (Umskalieren der aus der Messung gewonnenen Kurve) und mit μ_{eff} zu vergleichen.
- (5) Bestimmung der Streuzeit für maximales μ_{eff} bei 77K und 300K .

5. Pinch-Off-Effekt

Bisher wurde lediglich der Fall betrachtet, daß U_D klein ist gegenüber U_G und die Abhängigkeit des Source-Drain-Stromes von der Gate-Spannung untersucht. Nun ist von Interesse, was passiert, wenn beide Spannungen ungefähr gleich groß werden. Dazu wird der Source-Drain-Strom in Abhängigkeit von der Drain-Spannung bei konstanter Gate-Spannung (Ausgangskennlinie) gemessen. Solange U_D kleiner ist als U_G hängt I_{SD} linear von U_D ab. I_{SD} geht bei etwa $U_D = U_G$ in Sättigung und wird unabhängig von U_D . Diese Erscheinung nennt man Pinch-Off-Effekt (Abb.7).

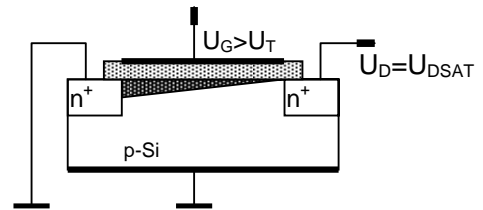


Abb.7: MOSFET am Pinch-Off-Punkt.

Der Pinch-Off-Effekt kommt auf folgende Weise zustande: Source und Halbleitervolumen liegen beide auf Massepotential. Falls nun die Spannungen an Gate und Drain gleich groß sind, so besteht in der Nähe der Drain – Elektrode kein elektrisches Feld zwischen dem Gate und der Inversionsschicht. Damit ist dort n_S gleich Null. In diesem Fall ändert sich der

Leitungsmechanismus, denn eine weitere Stromerhöhung wird nun durch die Injektion von Ladungsträgern in den von Ladungsträgern freien Raum begrenzt.

Auswertung:

- (1) Warum steigt der Source-Drain-Strom bei $U_D > U_{DSAT}$ kaum noch an ?
- (2) Aufnehmen eines Kennlinienfeldes
- (3) qualitative Bestimmung der Abhängigkeit von U_{DSAT} von U_G , Erklärung

6. Lock-in-Verstärker

Mit einem Lock-in-Verstärker können extrem empfindlich modulierte Signale gemessen werden, selbst wenn diese um viele Größenordnungen unter dem Rauschpegel liegen. Die hohe Empfindlichkeit wird durch eine phasenempfindliche Gleichrichtung erreicht, bei der das nicht modulierte Rauschen weggemittelt wird. Abb.8 zeigt die einfachste Realisierung eines Lock-in-Verstärkers. Das Signal mit dem modulierten Anteil wird über zwei Widerstände auf die invertierenden und nicht invertierenden Eingänge eines Operationsverstärkers gegeben. Mit dem Referenzsignal wird je nach Vorzeichen entweder der pnp oder der npn-Transistor durchgeschaltet und so entweder der invertierende oder der nicht invertierende Eingang eines Operationsverstärkers kurzgeschlossen.

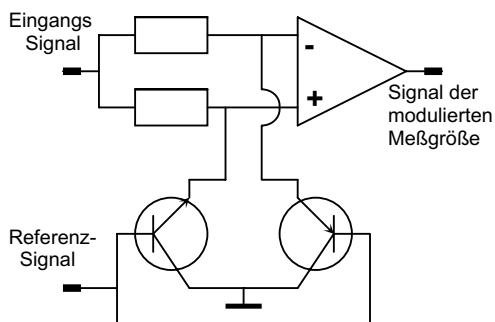


Abb.8: Prinzip eines Lock-in-Verstärkers

Die Anlagen sind die Kapitel 7 und 8 des Buches „Physics of Semiconductor Devices“ von S.M. Sze (Wiley, 1981). Kopien beim Betreuer
 Zur Auswertung nötige Daten von Proben sind am Versuchsaufbau ausgehangen. Für interessierte Studenten: H. Baltes, W. Göpel, J. Hesse „Sensors Update“ (VCH, Weinheim 1996), Kapitel 2; zum HSGFET: M. Bögner, ... Appl. Phys. Lett. 73 (1998) 2524.

Sicherheitshinweise:

In Notfällen wenden Sie sich bitte immer an TUM Feuerwehr: 112

Notfälle: 112 (Feuerwehr)

Allgemeine Hinweise:

Machen Sie sich vertraut mit den Sicherheitsvorrichtungen, bevor Sie in einem Labor neu zu arbeiten beginnen. Lokalisieren Sie den nächsten Feuerlöscher, die nächste Löschdecke. Wo ist der nächste Feuermelder, welches sind die Fluchtwege? Wo finden Sie Merkblätter über das Verhalten bei Unfällen. Wen müssen Sie alarmieren?

Laborplätze sind sauber zu halten. Jeder sorgt für Ordnung an seinem Arbeitsplatz. Essen und Trinken darf grundsätzlich nicht ins Labor mitgebracht werden. Beim Hantieren mit Chemikalien droht Vergiftung.

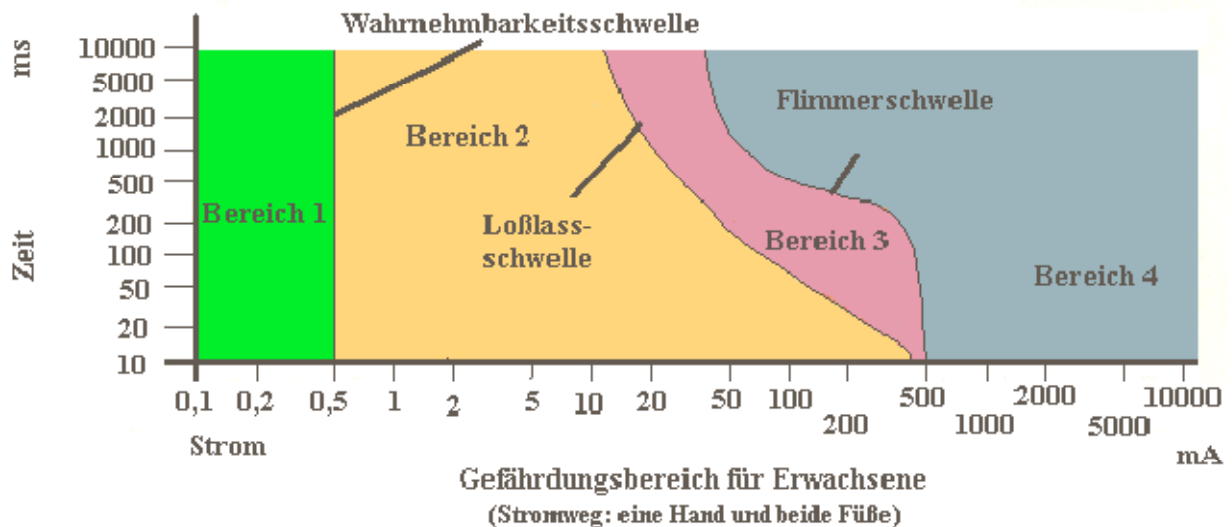
Fruchtsäfte zum Beispiel sind stark säurehaltig und greifen Elektronik sofort an. Demzufolge empfiehlt sich auch das Waschen der Hände vor dem Hantieren mit elektrischen Aufbauten.

Die eigenen Arbeiten dürfen nicht zu einem erhöhten Gefahrenpotential für andere werden (Putzpersonal, Mitarbeiter, Serviceleute, Besucher).

Elektrizität, Hochspannung:

Stromstöße:

Beispiel: Bei einem Widerstand von ca. 1kOhm (Hand-Füße) braucht es lediglich 50V Spannung um sich in Lebensgefahr zu bringen (siehe untenstehendes Diagramm).



Bereich 1: Wechselströme in diesem Bereich werden von den meisten Menschen gar nicht wahrgenommen.

Bereich 2: Es ist ein Kribbeln zu spüren, auch schmerzhaftes Verkrampfen sind möglich. Direkte Schäden sind kaum zu befürchten.

Bereich 3: Die Stromquelle kann auf Grund von Muskelverkrampfung nicht mehr losgelassen werden.

Bereich 4: Schwere Schädigung und häufig tödliche Stromwirkung, z.B. durch Herzkammerflimmern.

Stromweg Körperwiderstand (minimal):

Hand - Hand ca. 650 Ω

Hand - Fuß ca. 1300 Ω

Hand - Füße ca. 975 Ω

Hände - Füße ca. 650 Ω

Der Hautwiderstand beträgt einige Tausend Ohm, kann bei hohen Spannungen aber bis auf Null absinken.

Geräte mit Netzanschluss (230 V):

Gemäss Vorschriften SEV dürfen an Geräten mit Netzanschluss keine Änderungen vorgenommen werden, noch dürfen solche Geräte im Eigenbau hergestellt werden, ohne vom Elektronik-Verantwortlichen vor Inbetriebnahme geprüft zu werden.

ESD (Electro Static Discharge):

Jeder Mensch lädt sich durch Bewegung schnell mal auf mehrere 1000V auf. Oft reichen wenige Volt Spannung aus, aktive elektrische Bauteile zu zerstören. Dies kommt auch schon mal vor, wenn man mit der Hand ohne Berührung in die Nähe des Bauteils kommt.

Beim Arbeiten mit hochempfindlichen Messgeräten oder elektrischen Bauteilen aller Art ist grundsätzlich ein Erdungsband zu tragen. Das einfache Tragen eines Erdungsbandes verhindert teure Reparaturarbeiten.

Arbeit mit flüssigem Stickstoff:

- Kontakt mit dem Produkt kann Kaltverbrennungen bzw. Erfrierungen verursachen. Achten Sie deshalb darauf, dass keine Flüssigkeit in Schuhe einlaufen kann.
- Insbesondere bei Ab- und Umfüllvorgängen kann es in Räumen mit schlechter Belüftung durch Verdrängung der Atemluft unbemerkt zu hohen Stickstoff-Konzentrationen in der Atemluft kommen. Möglichkeit akuter Erstickungsgefahr!
- Der Einschluss von Flüssig-Stickstoff in nicht dafür vorgesehenen Gefäßen ohne Druckausgleich kann bei Raumtemperatur zum Bersten der Behältnisse führen. Bei Kunststoffgefäßen tritt Kaltversprödung auf. Beim Zerplatzen dann allgemein Gefahr durch Splitterwirkung.
- Zapfstellen dürfen nur in Räumen mit guter Be- und Entlüftung installiert werden. Die Zapfhähne sollten möglichst selbstschliessend sein. Füllen Sie Flüssig-Stickstoff nur in gut gelüfteten Räumen ab.
- Verwenden Sie beim Befüllen und Handhabung der Dewargefäße immer eine Schutzbrille und geeignete Schutzhandschuhe. Bei Spritzgefahr immer Gesichtsschutz einsetzen.
- Beim Transport von Flüssigstickstoff nicht in Aufzügen mitfahren.