EGI
Elektrotechnische Grundlagen der Informatik

0 Vorwort

Die Vorlesung EGI richtet sich an Studierende der FH Mannheim im 1. Semester (4 Semesterwochenstunden). Hier werden unter anderem die Grundlagen für die Vorlesung RUR (Rechnerarchitektur und Rechnertechnik, 2.Semester)[1] behandelt. Darüber hinaus soll etwas naturwissenschaftliche / technische „Allgemeinbildung“ vermittelt werden, wie sie von Ingenieurinnen und Ingenieuren erwartet werden darf.

0.1 Warum Elektrotechnik?

Die reine Informatik ist eher Mathematik als Naturwissenschaft. Computer arbeiten nur deshalb elektrisch, weil es damit, wie jemand einmal gesagt hat, „zufällig so gut geht“. Computer arbeiten mit logischen (Bool'schen) Verknüpfungen. Diese könnten nicht nur elektrisch realisiert werden, sondern auch mechanisch, pneumatisch etc. In der Tat waren die ersten Rechenmaschinen mechanisch oder elektromechanisch (Bild 0.1). Auch der erste „Bug“ war mechanisch: „Im September 1945 zupfte die Mathematikerin Grace Murray Hopper eine Motte aus den Schaltwerken des Rechner-Urahns Harvard Mark II“. Heute arbeiten Rechner elektronisch, und es kann nicht schaden, wenn Informatiker/innen wenigstens eine grobe Vorstellung von den physikalischen Vorgängen in ihrer Maschine haben. Die Elektrotechnik bzw. die Elektrizitätslehre zeigt darüber hinaus die typische Denk- und Vorgehensweise in den Natur- und Ingenieurwissenschaften. Da Informatiker/innen auch dort Tätigkeitsfelder finden, sollte ihnen diese Denkweise vertraut sein.

- Mechanisch: Ch. Babbage „Analytical Engine“ (1833), H.Hollerith, K. Zuse
- Elektromechanisch: K.Zuse „Z3“ (1942) , H.H. Aiken „MARK I“
- Röhren: J.M. Brainerd, J.P. Eckert, G.W. Mauchley, H.H. Goldstine „ENIAC“, Electronic Numerical Integrator And Calculator (1946) „erste Computergeneration“, 18000 Röhren
- Transistoren (erfunden 1947) seit 1955 in Computern „zweite Computergeneration“
- ICs , Integrated Circuits (1960 erfunden, 5100$ pro Stück, ab 1969 als Standardbauelemente überall verfügbar), „dritte Computergeneration“
- Mikroprozessor, Intel „4004“ (1971)

Bild 0.1 Entwicklung des Computers

0.2 Grobe Gliederung der Vorlesung

1 Historischer Überblick
2 Mathematische Grundlagen
3 Physikalische Größen und Gleichungen
4 Grundbegriffe
5 Elektrische Netzwerke
6 Der Kondensator
7 Halbleiter
8 Dioden
9 Bipolare Transistoren
10 Feldeffekt-Transistoren
11 Gatter
12 Elektromagnetismus
13 Wechselstrom

[1] die Teilnahme an der Klausur „EGI“ ist Voraussetzung für die Zulassung zum RUR-Labor

1 Historischer Überblick

1.1 Elektrische Erscheinungen

1.1.1 Statische Elektrizität

Schon Thales, einer der sieben Weisen Griechenlands, wusste, dass der Bernstein, wenn er gerieben wird, kleine Körper anzieht. Der Engländer Gilbert (um 1600) nannte diese Anziehungskraft des geriebenen Bernsteins, weil Bernstein griechisch Elektron (ηλεκτρον) heißt, Elektrizität.

η	λ	ε	κ	τ	ρ	ο	ν
Eta	Lambda	Epsilon	Kappa	Tau	Rho	Omikron	Ny

Heute haben wir es leichter und können elektrostatische Erscheinungen provozieren, indem wir einen Kunststoffkamm am Synthetikpullover reiben oder über den Teppichboden schlurfen. Elektrostatische Entladungen (ESD-**e**lectro**s**tatic **d**ischarge) stellen übrigens eine Gefahr für elektronische Bauteile dar. Seriöse Einbauanweisungen für PC-Zubehör weisen darauf hin und kluge Anwender beachten die einschlägigen Vorsichtsmaßnahmen.

In alten Büchern[1] lesen wir von Hartgummistäben, Holundermarkkügelchen, Katzenfellen etc.

Die leichten Körperchen, Papierschnitzel, Kügelchen aus Kork oder Pflanzenmark, welche ein durch Reibung elektrisch gemachter oder elektrisierter Harz- oder Glasstab heftig anzieht, werden nach sehr kurzer Zeit von dem gleichen Stabe wieder abgestoßen. Diese Körperchen haben durch Berührung mit dem elektrisierten Stabe denselben elektrischen Zustand angenommen und werden, sobald sie diesen Zustand besitzen, abgestoßen.

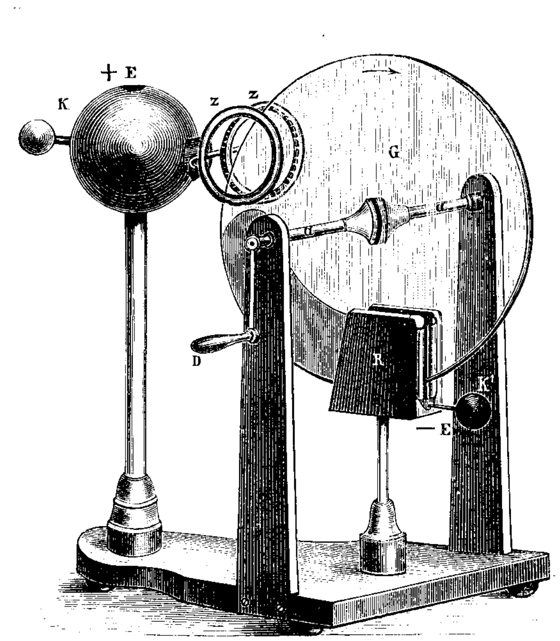


Bild 1.1 Elektrisiermaschine

Mit sogenannten Elektrisiermaschinen (Bild 1.1) erzeugte man „Reibungselektrizität". Dabei wurde der kugelförmige „Konduktor" aufgeladen.

Von Elektronen wusste man damals noch nichts, man stellte aber fest, dass es 2 verschiedene Arten von Ladung gibt: Gleichartige Ladungen stoßen sich ab, ungleichartige ziehen sich an.

Nach Lichtenberg (1777) nennt man die Elektrizität auf dem Glas positiv und auf dem Hartgummi negativ, wenn man Glas mit Amalgam, Hartgummi mit Wolle reibt.

Die Entdeckung, dass einige Körper die Elektrizität leiten, andere nicht, machte 1729 Stephan Gray zu London. Er rieb eine mit Pfropfen verschlossenen Glasröhre und bemerkte, dass auch die Pfropfen elektrisch

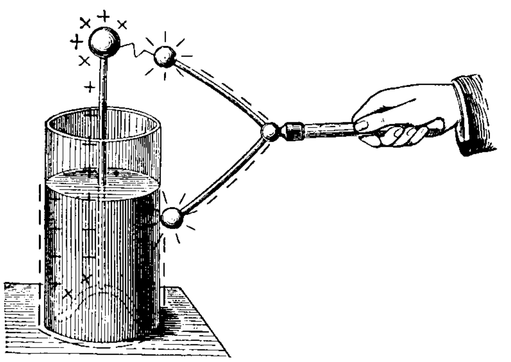
[1] Zitate aus alten Schulbüchern aus dem Jahre 1904 bzw. 1926 sind im Folgenden kursiv geschrieben.

wurden. Es gelang ihm, mittels einer von seidenen Fäden gehaltenen leinenen Schnur die Elektrizität von der Glasröhre über 100m weit bis zu einer Kugel zu leiten, so dass diese leichte Körper anzog.

Der Amerikaner Franklin hat die vorher schon ausgesprochene Vermutung bewiesen, dass das Gewitter eine elektrische Erscheinung ist:
Im Jahre 1752 ließ er, als ein Gewitter drohte, einen Drachen steigen, welcher mit einer eisernen Spitze versehen war, band unten an seine hanfene Schnur einen Schlüssel und erhielt aus diesem elektrische Funken. Darauf brachte er auf seinem Hause eine oben zugespitzte isolierte Metallstange an, befestigte an ihrem unteren Ende eine Glocke und daneben eine zweite, welche durch eine gute Leitung mit dem Erdboden verbunden war; zwischen den Glocken hing eine Metallkugel an einem seidenen Faden; dies Glockenspiel ertönte, so oft die Elektrizität der Luft stark genug war.

Die Leidener Flasche ist ein Glasgefäß, das innen und außen bis etwa 2/3 der Höhe mit Stanniol belegt ist. Geladen wird der innere Belag mit Hilfe eines Metallstäbchens, das oben in einen Knopf endet. Soll die Flasche wirksam sein, so muss der äußere Belag geerdet werden.

Die Leidener Flasche wurde durch Zufall vom Domherrn Kleist in Pommern erfunden (1750). Kleist wollte einen billigen Konduktor haben. Als solchen benutzte er ein dünnwandiges, mit Wasser (später mit Quecksilber) gefülltes Medizinfläschchen, durch dessen Pfropf ein Nagel zum Wasser führte. Er umfasste das Fläschchen beim Laden mit der ganzen Hand (=geerdeter Belag!) und glaubte, es nehme nur wenig El. auf, da es klein sei. Bei der Entladung erhielt er einen so kräftigen Schlag, dass er vor Schreck zu Boden fiel. Cuneus in Leiden (Holland) stellte zuerst solche Flaschen her.



Die Leidener Flasche ist ein Kondensator.

Bild 1.2 Leidener Flasche

Coulomb hat 1785 durch sorgfältige Messungen herausgefunden, wie groß die Kraft ist, die 2 Ladungen aufeinander ausüben.

Zwei kleine, fast punktförmige geladene Körper, die die Ladungen Q_1 und Q_2 tragen und voneinander den Abstand r haben, üben aufeinander eine Kraft aus, für deren Betrag gilt:

$$F = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2} \tag{1.1}$$

Darin ist k ein noch zu bestimmender Proportionalitätsfaktor. Dieser hängt natürlich davon ab, wie die sonstigen Größen in (1.1) definiert werden. In dem heute verwendeten technischen Maßsystem erhält man:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2} \tag{1.2}$$

Dabei gilt im Vakuum:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}} \tag{1.3}$$

Das Coulomb´sche Gesetz ist übrigens genauso aufgebaut, wie das 1666 von Newton formulierte Gravitationsgesetz:

Zwei kugelförmige Körper der Massen m_1 und m_2, deren Mittelpunkte voneinander den Abstand r haben, ziehen sich mit folgender Kraft an.

$$F = f \frac{m_1 m_2}{r^2} \tag{1.4}$$

Die Gravitationskonstante f hat den Wert $f = 6{,}670 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg s}^2}$

1.1.2 Galvanismus

Ludwig Galvani, ein Arzt und Professor zu Bologna, beschäftigte sich seit längerer Zeit mit wissenschaftlichen Versuchen über Muskeln und Nerven der Frösche. Eines Tages (1780) lagen unlängst getötete Frösche auf einem Tisch, auf dem eine Elektrisiermaschine stand. Wenn mit einem Messer mit metallenem Griffe der bloßliegende Nerv zweier Froschschenkel berührt und gleichzeitig durch eine andere Person aus der nicht weit entfernten Elektrisiermaschine ein Funke gezogen wurde, gerieten jedesmal die Froschschenkel in Zuckungen; es erschienen daher diese Zuckungen als Wirkungen der Elektrizität. Nun wollte Galvani sehen, ob auch die Elektrizität der Luft dieselben Erscheinungen bewirke, befestigte an den entblößten Nerven der Froschschenkel einen Kupferhaken und hängte sie mit demselben an das eiserne Gitter seines Gartens; es erfolgten die heftigsten Zuckungen, so oft die Froschschenkel das Gitter berührten. Und doch zeigt sich die Luft unelektrisch (kein Gewitter, Galvani wollte Blitze nachweisen) darum meinte Galvani, es käme die Elektrizität aus den Fröschen selbst und ströme von den Nerven durch das Metall zu den Muskeln. Er stellte die Lehre auf, alle lebendigen Geschöpfe seien mit Elektrizität geladen, unsere Bewegungen und unser ganzes Leben seien daher Wirkungen der Elektrizität.

Der Lehre Galvanis trat Alexander Volta, Professor zu Pavia, entgegen. Er zeigte, dass an den Fröschen die Zuckungen eintraten, wenn man Nerven und Muskeln mit verschiedenen sich berührenden Metallen berührte, und erfand Zusammenstellungen von zwei Metallen und einer Flüssigkeit, durch welche ein elektrischer Strom hervorgebracht wird, den Voltaschen Becher .

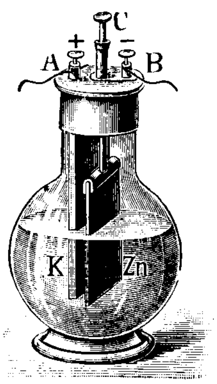


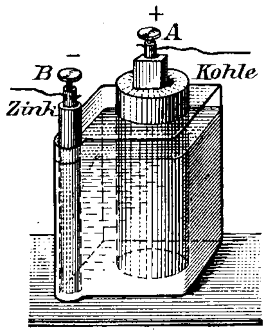
Bild 1.3 Voltaelement

Das galvanische Element wurde von Volta (1790) erfunden. Das Volta-Element besteht aus einer Zinkplatte und einer Kupferplatte in verdünnter Schwefelsäure. An den Elektroden finden, wie wir heute wissen, folgende Reaktionen statt:

$$\text{Zn} \leftrightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$$
$$\text{Cu} \leftrightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$$

Sowohl Zink als auch Kupfer bilden Ionen, wenn sie in Lösung gehen, wobei jeweils 2 Elektronen abgegeben werden. Da der „Lösungsdruck" von Zink als dem unedleren Metall jedoch größer ist als der von Kupfer, gehen mehr Zinkionen als Kupferionen in Lösung. Deshalb wird die Zinkelektrode negativ und die Kupferelektrode wird positiv. Die Zinkionen bilden mit dem Säurerest SO_4^{--} Zinksulfat $ZnSO_4$. Die dabei frei werdenden Wasserstoffionen (genauer Oxonium-Ionen H_3O^+) wandern zur Kupferelektrode. Sie nehmen dort ein Elektron auf und werden neutralisiert. Der dabei entstehende Wasserstoff bildet eine Gasschicht an der Elektrode. Dies ist nachteilig, denn einerseits verringert sich die abgegebene Spannung, weil die Elektrode zur Wasserstoffelektrode wird, andererseits erhöht sich der Innenwiderstand. Dieser Nachteil wird vermieden, wenn man durch ein Oxidationsmittel dafür sorgt, dass der Wasserstoff zu Wasser oxidiert wird.

Beim Braunstein- oder Leclanché-Element[2] (1864) werden eine Zinkelektrode und eine Kohleelektrode verwendet. Die Kohleelektrode ist von Braunstein (MnO_2) umgeben, der als Oxidationsmittel dient. Als Elektrolyt dient z.B. Ammoniumchlorid (Salmiak, NH_4Cl). Das Leclanché-Element liefert eine Spannung von 1,5V. Wird eine höhere Spannung benötigt, so muss man mehrere Elemente hintereinanderschalten. Eine Batterie ist (laut Duden) ein aus mehreren Elementen bestehender Stromspeicher. Genau genommen ist die Bezeichnung Batterie für eine einzelne Zelle falsch.



Die bekannten „Zink-Kohle-Batterien“ sind nach dem Prinzip des Leclanché-Elements aufgebaut. Es wird ein eingedickter Elektrolyt verwendet, daher auch die Bezeichnung „Trockenbatterie“. Elemente, die nicht aufladbar sind, werden auch als Primärelemente bezeichnet, im Gegensatz zu Akkumulatoren (Sekundärelemente).

Bild 1.4 Leclanché-Element

1.1.3 Das Ohm´sche Gesetz

Verbindet man die Elektroden eines galvanischen Elements mit einem Leiter, so fließt dauerhaft (bis das Element verbraucht ist) ein elektrischer „Strom“. Dies ist neu und bemerkenswert, wenn man an die bis dahin nur bekannten elektrostatischen Erscheinungen denkt. Eine Elektrisiermaschine (Bild 1.1) liefert hohe Spannungen (mehrere 10 000V), aber es werden nur wenige Ladungsträger getrennt. Nennenswerte Ströme können damit nur kurzzeitig zustande kommen, etwa wenn der Konduktor entladen wird (Funke).
Ein galvanisches Element dagegen liefert nur kleine Spannungen, aber viel größere Ströme und dies über einen längeren Zeitraum. Jetzt erst werden die verschiedenen Wirkungen des elektrischen Stromes deutlich:

- Wärmewirkung
- Chemische Wirkung (Elektrolyse)
- Magnetische Wirkung (Oersted 1820)

Bei der Elektrolyse von Wasser z.B. kann man anhand der erzeugten Gasmenge Rückschlüsse auf die geflossene Ladungsmenge pro Zeiteinheit, also auf die Stromstärke, schließen.

Es ist naheliegend, nun nach einem Gesetz zu suchen, mit dem die Stromstärke berechnet werden kann. Dies wurde **1827** von Ohm formuliert:

[2] Leclanché, französischer Chemiker, 1839 bis 1882

Die Stromstärke vervielfältigt sich wie die elektromotorische Kraft (=Spannung), und sie nimmt in demselben Verhältnisse ab, wie der Gesamtwiderstand des Stromkreises zunimmt.

Die Einheit des Widerstandes ist V/A und wird mit Ω (Ohm) abgekürzt.

Früher wurde die Einheit Ohm so festgelegt:

Die Einheit des Leitungswiderstandes heißt Ohm; sie ist gleich dem Widerstande eines Quecksilberfadens von 1 qmm Querschnitt und 1,063 m Länge bei 0 Grad.

1.2 Magnetische Erscheinungen

In den Eisengruben der Halbinsel Magnesia wurden im Altertum „Schwarze Steine" gefunden mit der merkwürdigen Kraft, Eisenstücke anzuziehen, die Magnetsteine oder Magnete genannt wurden.

Im Mittelalter schrieb man diesen Steinen wundersame Heilkräfte zu und erzählte sich Fabeln von dem Magnetberge im Norden, der schon in weiter Entfernung alles Eisen aus den sich nähernden Schiffen an sich ziehen sollte, und von dem eisernen Sarge Mohammeds, der in Medina zwischen zwei gewaltigen Magneten frei in der Luft schwebend gehalten werde. Erst wenige Jahrhunderte vor Kolumbus ward man im Abendlande mit der Magnetnadel bekannt, während die Chinesen sie längst (1000 Jahre v. Chr.) gekannt, aber seltener zur See, häufiger zu Lande, auf ihren großen Reisen durch die Steppen Hochasiens als Wegweiser gebraucht hatten. Genauer erforschte die durch Magnete hervorgebrachten Wirkungen um das Jahr 1600 zuerst Gilbert, der Leibarzt der Königin Elisabeth von England, dem auch die Bereitung künstlicher Magnete wohlbekannt war.

Der nach Norden weisende Pol der Magnetnadel (Kompass) heißt Nordpol, der andere Südpol. Daraus folgt, dass der Nordpol der Erde magnetisch gesehen ein „Südpol" darstellt.

Deklination und Inklination des Erdmagnetfeldes

Die Deklination (Abweichung der Magnetnadel von der genauen Nordrichtung; in Deutschland ca. 11° westlich) wurde von Columbus 1492 auf seiner Fahrt nach Amerika entdeckt.

Die Inklination (Neigung gegen die Horizontale) beträgt in Deutschland ca. 66°.

Der Nordpol eines Magneten wird (in Physikbüchern) gerne rot, der Südpol grün angemalt. Sicher ist das auch irgendwo genormt.

Apropos Normen: Vieles ist in den Ingenieurwissenschaften genormt, und wir wollen versuchen, uns an die aktuellen Normen zu halten. Leider ändern sich auch Normen und man sollte (auch) veraltete Darstellungen kennen, um ältere Bücher und Unterlagen verstehen zu können.

Sicher bekannt:

Gleichnahmige Pole zweier Magnete stoßen einander ab, ungleichnamige ziehen sich an.

1.3 Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Erscheinungen

1820 erregte Oerstedt (dänischer Physiker) mit einem Rundschreiben Aufsehen. Er teilte mit, der elektrische Strom bewege Magnetnadeln. Die Gelehrten Europas faszinierte diese für viele unerwartete Verbindung von Strom und Magnetismus. M. Faraday wollte diesen Effekt umkehren und schrieb in sein Notizbuch: „Convert magnetism into electricity". Zunächst gelang es ihm aber nicht, Magnetismus in Elektrizität zu verwandeln. Erst 1831 fand er, dass man Spannung und Strom erhält, wenn man Drähte und Magnete gegeneinander bewegt. So hat Faraday entdeckt, wie man Spannung **induziert**.

Das Lenz´sche Gesetz: (1834) besagt, dass die Induktionsspannung stets so gerichtet ist, dass sie der Ursache des Induktionsvorgangs entgegenwirkt.

Ampère (Professor am Collège de France zu Paris; 1775-1836) sprach die Meinung aus, jeder Magnet oder Elektromagnet sei ein Stahl- oder Eisenstück, welches an seinem Umfange von elektrischen Strömen umkreist werde, womit Magnetismus auf eine Erscheinungsform der Elektrizität zurückgeführt wäre.

Heute wissen wir, dass das Magnetfeld im Dauermagneten vom Elektronenspin verursacht wird. Ein Elektron wirkt wie ein kleiner Kreisel, die bewegte Ladung erregt das magnetische Feld. In ferromagnetischen Stoffen sind in kleinen Kristallbezirken die atomaren Magnete vollständig unter sich ausgerichtet, im unmagnetischen Stoff aber gegeneinander völlig ungeordnet. Bei einer bestimmten Temperatur, dem sogenannten Curiepunkt verlieren Stoffe ihre ferromagnetischen Eigenschaften (Eisen 769 °C, Kobalt 1120 °C, Nickel 360 °C).

Ein Magnetfeld übt auf eine Ladung nur dann eine Kraft[3] aus, wenn sich die Ladung bewegt. Diese Kraft steht senkrecht auf der durch Bewegungsrichtung und Richtung des Magnetfeldes aufgespannten Ebene. Dies kann man auch so interpretieren, dass ein Magnetfeld von einer bewegten Ladung aus wie ein quer dazu stehendes elektrisches Feld „aussieht".

1.4 Die Maxwell´schen Gleichungen

Wenn wir uns mit den physikalischen Gesetzen befassen, die elektrische und magnetische Erscheinungen beschreiben, die ja, wie wir wissen, miteinander verknüpft sind, ist es besser von Elektrizitätslehre zu reden anstatt von Elektrotechnik. Diese Gesetze zu erkennen, war Aufgabe der Naturwissenschaft; Elektrotechnik meint eigentlich die Anwendung.

In den Naturwissenschaften liefern Versuche und Beobachtungen Erkenntnisse und Ergebnisse. So entsteht eine zunächst zusammenhanglose Sammlung von Angaben aus denen man allgemeinere Gesetzmäßigkeiten abzuleiten versucht: Diese **induktive** (lat. inducere: hineinführen) Methode wird heute als grundlegende Forschungsmethode der Naturwissenschaft betrachtet.

Jede Wissenschaft ist aber bestrebt, schnellstens zur **deduktiven** (lat. deducere: herabführen, herunterholen) Methode überzugehen: Einige Grundgleichungen aus denen sämtliche Behauptungen abgeleitet werden können. Die klassische Elektrodynamik ist ein historisch abgeschlossenes und völlig deduktiv behandelbares Gebiet.

[3] Lorentzkraft F_L (H. A. Lorentz, niederländischer Physiker um 1900)

1873 hat **Maxwell** in „A Treatise on Electricity and Magnetism“ seine berühmten Gleichungen aufgestellt.

Auf der Grundlage der Maxwell´schen Gleichungen kann die gesamte Elektrodynamik deduktiv behandelt werden.

Bemerkenswert ist, dass aus den Maxwell´schen Gleichungen folgt, dass es elektromagnetische Wellen geben muss. Dies wurde bereits von Maxwell vermutet, aber erst 20 Jahre später von Hertz nachgewiesen.

1.5 Weitere Meilensteine

1835 Morse, Schreibtelegraph, 1838 Steinheil: Erde als Rückleiter
1834 Jacobi: Elektromotor
1848 Telegraphenlinie Berlin-Frankfurt (Siemens), Zeigertelegraph
1866 Siemens: Dynamomaschine
1866 Unterseekabel Irland-Neufundland, 1870 London-Kalkutta
1877 Bell, Telephon
1879 Edison, Glühlampe
1885 Ferraris / 1887 Tesla: Drehstrom
1891 Entscheidung für Drehstrom in Erzeugung und Verteilung
1890 Hertz, Nachweis elektrischer Wellen
1895 Röntgen, Würzburg: Röntgen-Strahlen, X-Strahlen (X-ray)

1948 Transistor
1965 Integrierte Schaltung
1970 Mikroprozessor

2 Mathematische Grundlagen

Um die Grundgleichungen der Elektrotechnik verstehen zu können, brauchen wir etwas Mathematik. Wir werden in dieser Vorlesung aber keine komplizierten mathematischen Berechnungen vornehmen. Wenn wir etwas rechnen, verwenden wir einfache Spezialfälle, die auch in der Technik häufig vorliegen. Andererseits kann man die Elektrotechnik nur dann richtig verstehen, wenn man weiß, was ein Vektor, ein Integral etc. ist. Dabei ist es wichtiger eine anschauliche Vorstellung von diesen Begriffen zu haben, als irgendwelche Formeln aufschreiben zu können.

2.1 Vektoren

Vektoren sind gerichtete Größen. Wir kennen dies z.B. aus der Beschreibung von Kräften. Im Gegensatz dazu werden ungerichtete Größen Skalare genannt, z.B. die Temperatur.

Ein Vektor kann durch seine Komponenten z.B. im kartesischen Koordinatensystem beschrieben werden.

$$\vec{A} = A_x \vec{e}_x + A_y \vec{e}_y + A_z \vec{e}_z \tag{2.1}$$

Wir kennzeichnen Vektoren mit einem Pfeil. Oft wird auch Fettdruck verwendet. Die Einheitsvektoren $\vec{e}_x$, $\vec{e}_y$ und $\vec{e}_z$ haben die Länge 1 und zeigen in Richtung der Achsen x, y und z eines kartesischen Koordinatensystems. Wir können den Vektor auch wie folgt schreiben:

$$\vec{A} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} \tag{2.2}$$

Vektoren werden addiert, indem man sie „geometrisch“ aneinanderfügt. Dazu können sie beliebig parallel verschoben werden. Dies entspricht einer Addition der einzelnen Komponenten:

$$\vec{C} = \vec{A} + \vec{B} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_x + B_x \\ A_y + B_y \\ A_z + B_z \end{pmatrix} \tag{2.3}$$

Bei der Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar wird nur die Länge (der Betrag) des Vektors verändert.

$$\vec{C} = k \cdot \vec{A} = k \cdot \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k \cdot A_x \\ k \cdot A_y \\ k \cdot A_z \end{pmatrix} \tag{2.4}$$

Es gibt 2 verschiedene Möglichkeiten 2 Vektoren miteinander zu multiplizieren: Das innere (skalare) Produkt und das äußere Vektorprodukt.

Beim inneren Produkt entsteht bei der Multiplikation zweier Vektoren ein Skalar.

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = \left|\vec{A}\right|\left|\vec{B}\right| \cos\alpha = AB\cos\alpha \tag{2.5}$$

Dabei ist α der Winkel zwischen den beiden Vektoren.

Das innere Produkt kann auch aus den Komponenten der beiden Faktoren berechnet werden:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = A_x \cdot B_x + A_y \cdot B_y + A_z \cdot B_z \tag{2.6}$$

Beispiel: Arbeit = Kraft „mal“ Weg

Beim äußeren Vektorprodukt entsteht wieder ein Vektor. Dieser steht senkrecht auf der Ebene, die durch die beiden ursprünglichen Vektoren aufgespannt wird und zwar zeigt der Produktvektor in die Richtung, in die sich eine rechtsgängige Schraube bewegt, wenn man sie in dem Sinne bewegt, der einer Drehung des ersten Vektors in die Richtung des zweiten Vektors auf dem kürzesten Wege entspricht. Für die Länge (Betrag) des so entstandenen Vektors gilt:

$$\left|\vec{A} \times \vec{B}\right| = A \cdot B \cdot \left|\sin\alpha\right| \tag{2.7}$$

Man muss also das Produkt der Beträge der beiden Vektoren mit dem Sinus des Winkels zwischen ihnen multiplizieren.

Das äußere Produkt kann auch aus den Komponenten der beiden Faktoren berechnet werden:

$$\vec{C} = \vec{A} \times \vec{B} = \begin{pmatrix} A_x \\ A_Y \\ A_z \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_y B_z - A_z B_y \\ A_z B_x - A_x B_z \\ A_x B_y - A_y B_x \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

2.2 Integrale

Integral- und Differenzialrechnung wird schon als höhere Mathematik empfunden. Dabei sind Integrale und Ableitungen durchaus aus dem täglichen Leben bekannt, wenn auch nicht unter diesem Namen. Ein Integral ist letztendlich nichts anderes als die Verallgemeinerung einer Summe mit unendlich vielen infinitesimalen Summanden.

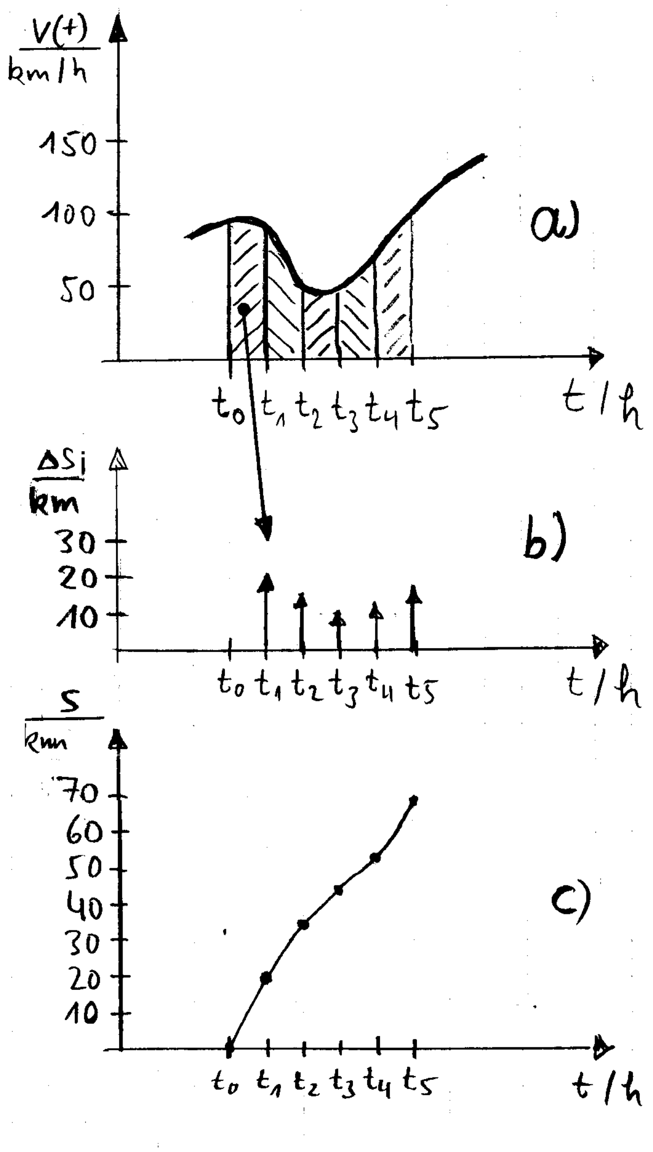


Bild 2.1 Integration der Geschwindigkeit

Wir betrachten z.B. einen PKW, der sich mit verkehrsbedingt schwankender Geschwindigkeit auf der Autobahn bewegen möge. Der zeitliche Verlauf *v(t)* der Geschwindigkeit sei bekannt (als Graph oder formelmäßig). Wir wollen z.B. wissen, welche Strecke der PKW zwischen den Zeitpunkten t_0 und t_5 zurückgelegt hat.

Bei **konstanter** Geschwindigkeit gilt

$$s = v \cdot t \qquad (2.9)$$

Für einen Zeitabschnitt, in dem *v(t)* genügend konstant ist, können wir also den zurückgelegten Weg leicht ausrechnen. In Bild 2-1 ist die Zeit zwischen t_0 und t_5 in 5 gleich große Abschnitte eingeteilt.
Die zurückgelegte Strecke in einem solchen Abschnitt entspricht offensichtlich der Fläche unterhalb der Kurve *v(t)*.
Die Zeitdifferenz $t_5 - t_0$ betrage genau 1 Stunde.
In dem Zeitabschnitt zwischen t_2 und t_3 zum Beispiel beträgt die Geschwindigkeit etwa 50km/h. Der Wegzuwachs in diesem Zeitabschnitt ist demnach:

$$\Delta s_3 = \bar{v}_3 \cdot \Delta t = 50\text{km/h} \cdot \frac{1\text{h}}{5} = 10\text{km} \qquad (2.10)$$

Wollen wir den gesamten Weg wissen , der zwischen t_0 und t_5 zurückgelegt wurde, so müssen wir die einzelnen Wegzuwächse Δs_i aufsummieren:

$$s = \sum_{i=1}^{i=5} \Delta s_i = \sum_{i=1}^{i=5} \overline{v}_i \Delta t \tag{2.11}$$

Diese Summe entspricht dann dem gesamten Flächeninhalt unter *v(t)* zwischen t_0 und t_5.

Allerdings machen wir dabei einen Fehler. Wir haben nämlich in den einzelnen Abschnitten die Geschwindigkeit als konstant angenommen, was sie in Wirklichkeit ja nicht ist. Dieser Fehler wird natürlich um so kleiner, je schmaler wir die einzelnen Rechtecke machen bzw. je kleiner die Zeit Δt gewählt wird. Der Fehler verschwindet, wenn wir die Rechtecke „unendlich schmal“ machen, aus der Summe wird ein Integral.

$$s = \int_{t=t0}^{t=t5} v(t)dt \tag{2.12}$$

Das (bestimmte) Integral gibt also den Flächeninhalt unter einer Funktion, hier *v(t)*, an. Im Mathematikunterricht lernen wir, wie das Integral berechnet wird, wenn *v(t)* analytisch vorliegt. Mit dem Digitalrechner können wir das Integral numerisch ermitteln, indem wir z.B. das Integrieren durch eine Summenbildung ersetzen.

Sicher ist uns aufgefallen, dass bei dem betrachteten Beispiel PKW beide Größen *v(t)* und *s(t)* durch den Tachometer bzw. den Kilometerzähler angezeigt werden. Der Kilometerzähler ist ein mechanischer Integrierer. Beim Tageskilometerzähler können wir den Anfangswert auf 0 setzen.

Ein anderes anschauliches Beispiel für ein Integral ist der Füllstand eines Behälters in Abhängigkeit eines Volumenstroms q_V.

2.3 Linienintegrale

In der Mechanik ist die Arbeit als Produkt aus Kraft und Weg definiert. Im Allgemeinen können Kraft und Weg verschiedene Richtungen haben: Kraft und Weg sind Vektoren. Auch kann die Kraft eine Funktion des Weges sein. Es gilt:

$$W = \int_a^b \vec{F}(s) \cdot d\vec{s} \tag{2.13}$$

Das heißt, wir müssen längs einer beliebig geformten Linie für jedes infinitesimale Wegstück $d\vec{s}$ das innere Vektorprodukt mit der Kraft $\vec{F}(s)$ an dieser Stelle bilden. Die so entstandenen Skalarprodukte werden aufintegriert („summiert“).

Die bekannte Beziehung „Arbeit = Kraft mal Weg“ nimmt also im Allgemeinen die auf den ersten Blick kompliziert erscheinende Form (2.13) an. Dann dürfen aber Kraft und Weg auch verschiedene Richtung haben und sowohl der Betrag als auch die Richtung der Kraft dürfen vom Weg abhängig sein.

Wenn wir z.B. eine Kraft gegen das Schwerefeld der Erde aufwenden, um eine Last in eine größere Höhe zu befördern, so wenden wir Arbeit auf. Wir wissen, dass, wenn wir Reibung und ähnliche Nebeneffekte vernachlässigen, die Arbeit unabhängig vom Weg ist. Hat ein Feld, hier das Schwerefeld der Erde diese Eigenschaft, so heißt es wirbelfrei.

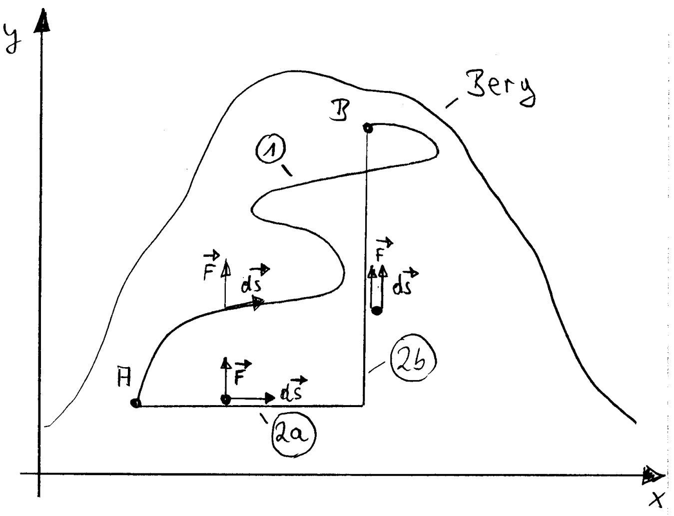


Bild 2.2 Zwei mögliche Integrationswege

In Bild 2.2 ist dargestellt, wie eine Last einmal entlang des verschlungenen Weges 1 und einmal entlang des Weges 2, der ein Stück lang (2a) horizontal und ein Stück lang (2b) senkrecht verläuft, von A nach B bewegt wird. In beiden Fällen brauchen wir dieselbe Arbeit.

Während auf dem Weg 1 die Auswertung von (2.13) sich schwierig gestalten würde, ist dies auf dem Weg 2 einfach. Auf der Teilstrecke 2a liefert das innere Vektorprodukt den Wert 0, auf der Teilstrecke 2b haben Kraft und Weg gleiche Richtung. Da außerdem die aufzuwendende Kraft *F* konstant ist (Erdanziehung), brauchen wir diese nur mit der Gesamtstrecke 2b zu multiplizieren, um die Arbeit zu berechnen.

2.4 Hüllenintegrale

Eine weitere besondere Art von Integralen, die uns in der Elektrotechnik begegnen, sind die sogenannten Hüllenintegrale. Um diesen Begriff zu erläutern, wenden wir uns einem elektrischen Beispiel zu. Wir haben bereits das Coulomb´sche Gesetz kennengelernt, das die Kraftwirkung, die zwei elektrische Ladungen aufeinander auswirken, beschreibt:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

Wir können uns nun die Kraftwirkung, die auf die Ladung Q_1 ausgeübt wird, so entstanden denken, dass Q_2 ein elektrisches Feld erregt. In diesem Feld erfährt also Q_1 die Kraft $\vec{F}_1$. Da $\vec{F}_1$ ein Vektor und Q_1 ein Skalar ist, muss also auch das elektrische Feld ein Vektor sein:

$$\vec{F}_1 = Q_1 \cdot \vec{E} \tag{2.14}$$

Wir können uns nun das elektrische Feld $\vec{E}$ durch die Ladung Q_2 erzeugt denken. Durch Vergleich mit dem Coulomb'schen Gesetz erhalten wir für den Betrag von $\vec{E}$:

$$\left|\vec{E}\right| = E = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \cdot \frac{Q_2}{r^2} \tag{2.15}$$

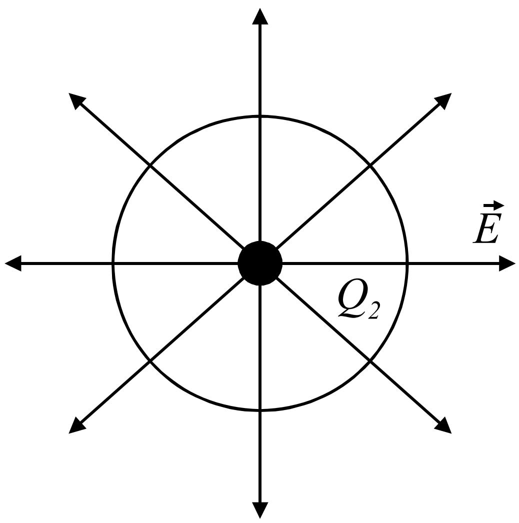


Bild 2.3 Elektrisches Feld einer Punktladung

Die Richtung von $\vec{E}$ erhalten wir im Falle einer punkt- oder kugelförmigen Ladung Q_2 aus der Symmetrie. Die "Feldlinien" gehen nach allen Seiten radial vom Kugelmittelpunkt weg ins Unendliche. Darüberhinaus können wir uns leicht überlegen, ob die Richtung von $\vec{E}$ auf diesen Feldlinien von Q_2 weggeht oder auf Q_2 zugeht. Wenn z.B. sowohl die erregende Ladung Q_2 als auch die Probeladung Q_1 positiv ist, so stoßen diese sich bekanntlich ab. Die Kraft auf die Probeladung ist also von Q_2 weg gerichtet. Da nach (2.14) bei positiver Probeladung Feld und Kraft die gleiche Richtung haben, können wir folgern, dass die Richtung des elektrische Feld von der erregenden positiven Ladung weg gerichtet ist.

Die Vorstellung, dass das elektrische Feld durch eine Ladung erregt wird, beschreibt den Sachverhalt bei statischen Feldern richtig. Sie führt jedoch zu Problemen, sobald die Felder nicht mehr statisch sind, wie dies bei elektromagnetischen Wellen der Fall ist. Wenn die Ladung Q_2 in einer beliebigen Entfernung ein Feld erregt, so müßten wir eine "Fernwirkung" annehmen. Offensichtlich können wir aber mit dem bisher betrachteten Modell zum Beispiel nicht vorhersagen wie lange es dauert, bis sich die Wirkung einer Ladung in einer gewissen Entfernung bemerkbar macht. Wollen wir eine Beschreibung der Felderregung finden, die keinerlei Fernwirkung voraussetzt, so können wir die Erregung der elektrischen Feldstärke $\vec{E}$ nur am gleichen Ort annehmen, an dem auch die Feldstärke beobachtet wird. Bei dieser Betrachtung ordnen wir in jedem Punkt des Raumes der elektrischen Feldstärke $\vec{E}$ einen Vektor $\vec{D}$ zu, der dem Feldstärkevektor gleichgerichtet und ihm proportional ist:

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \tag{2.16}$$

Man bezeichnet $\vec{D}$ als elektrische Flussdichte (früher Verschiebungsdichte) und ε als Permittivität (früher Dielektrizitätskonstante).

Den Betrag der elektrischen Flussdichte im Abstand r einer Punktladung können wir auch schon angeben, er unterscheidet sich ja wegen (2.16) nur um die Permittivität von dem der elektrischen Feldstärke:

$$\left|\vec{D}\right| = D = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{Q_2}{r^2} \tag{2.17}$$

In Bild 2.3 ist eine kugelförmige Hülle um die Ladung Q_2 eingezeichnet. Alle Punkte auf dieser Hülle haben den Abstand r von der Punktladung. Wir denken uns die Oberfläche dieser Kugel nach Art einer "Diskokugel" in sehr viele kleine Flächenelemente mit einem jeweils senkrecht auf diesen Flächenelementen stehenden Vektor $\Delta\vec{A}_\nu$ aufgeteilt, wobei die Länge dieses Vektors die Größe der Fläche angibt. Für jeden dieser Flächenvektoren bilden wir das innere Vektorprodukt, summieren dann diese Produkte und erhalten unter Verwendung der bekannten Formel für die Kugeloberfläche :

$$\sum_{\nu=1}^{N} \vec{D}_\nu \cdot \Delta\vec{A}_\nu \approx D \cdot 4\pi\, r^2 \tag{2.18}$$

Der Vergleich mit (2.17) ergibt:

$$\sum_{\nu=1}^{N} \vec{D}_\nu \cdot \Delta\vec{A}_\nu \approx Q_2 \tag{2.19}$$

Wir haben also einen Zusammenhang zwischen der Ladung innerhalb einer kugelförmigen Hülle und der elektrischen Flussdichte auf ihrer Oberfläche gefunden. Dieser Sachverhalt lässt sich verallgemeinern. Es dürfen auch mehrere Ladungen in der Hülle sein und die Hülle muss nicht kugelförmig sein, sondern darf eine beliebige Form haben. Machen wir nun noch die Flächenvektoren $\Delta\vec{A}_\nu$ infinitesimal klein, so erhalten wir das versprochene Beispiel für ein Hüllen- oder Flächenintegral:

$$\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \sum_\nu Q_\nu \tag{2.20}$$

3 Physikalische Größen und Gleichungen

3.1 Physikalische Größen

Eine beliebige physikalische Größe mit dem Formelzeichen a wird dargestellt als Produkt aus Zahlenwert und Einheit, also

$$a = \{a\} \cdot [a] \tag{3.1}$$

wobei

$\{a\}$ für den Zahlenwert von a

und

$[a]$ für die Einheit steht.

Der Multiplikationspunkt wird im Allgemeinen weggelassen. Man beachte, dass Formelzeichen im Gegensatz zu den Einheiten *kursiv* geschrieben werden.

Beispiele:

Weg	$s = 100\,\mathrm{m}$	also:	$\{s\} = 100$	$[s] = \mathrm{m}$
Geschwindigkeit	$v = 5\,\mathrm{m/s}$	also:	$\{v\} = 5$	$[v] = \mathrm{m/s}$
Zeit	$t = 10\,\mathrm{s}$	also:	$\{t\} = 10$	$[t] = \mathrm{s}$

Die geschweiften bzw. eckigen Klammern stellen also gewissermaßen Operationen dar, die aus der physikalischen Größe den Zahlenwert bzw. die Einheit extrahieren. Bisweilen sieht man auch, dass in physikalischen Gleichungen Einheiten in eckigen Klammern dazugeschrieben werden. Wir wollen diese missverständliche Darstellung ebenso vermeiden, wie sogenannte Zahlenwertgleichungen, bei denen nur mit Zahlenwerten ohne Einheiten gerechnet wird. Daher werden uns die geschweiften und eckigen Klammern nur selten begegnen.

3.2 Basisgrößen

Die meisten physikalischen Größen lassen sich aus wenigen Basisgrößen ableiten. Wichtig sind für uns die Basisgrößen Länge, Masse, Zeit und Stromstärke (Tabelle 3.1)

Größe	Formelzeichen	Einheit	Einheitenzeichen
Länge[1]	l	Meter	m
Masse	m	Kilogramm	kg
Zeit	t	Sekunde	s
Stromstärke	I	Ampere	A

Tabelle 3.1: Basisgrößen

Abgeleitete Größen haben oft einen eigenen Namen und ein eigenes Einheitenzeichen wie das Newton für die Kraft:

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad \Rightarrow \quad [F] = \; 1\mathrm{kg} \cdot 1\mathrm{m/s}^2 = \; 1\mathrm{Newton} = 1\mathrm{N}$$

[1] Wegstrecke s

Das System der Einheiten für physikalische Größen mit dem heute vorwiegend gearbeitet wird, heißt SI-Einheitensystem (SI = Système International).

Die ursprünglich festgelegten Definitionen der Basiseinheiten (Urmeter etc.) wurden zum Teil durch bessere, atomare Standards ersetzt (z.B. Atomuhr).

3.2.1 Länge

Das Meter wurde ursprünglich durch das sogenannte „Urmeter“ (Paris) festgelegt. Diese Definition wurde später durch einen „atomaren“ Standard ersetzt (Wellenlänge der orange-roten Spektrallinie eines bestimmten Übergangs von Krypton).

3.2.2 Masse

Das Kilogramm ist durch ein „Urkilogramm“ (Paris) festgelegt.

3.2.3 Zeit

Die Sekunde ist heute als das 9 192 631 770 fache der Periodendauer der Strahlung beim Übergang zwischen zwischen 2 bestimmten Energieniveaus des Atoms von Cäsium 133 festgelegt.

3.2.4 Stromstärke

Strom bedeutet Ladungstransport pro Zeit. Ein Ampere ist die Stärke eines zeitlich konstanten Stroms durch zwei geradlinige parallele unendlich lange Leiter von vernachlässigbar kleinem Querschnitt, die einen Abstand von 1m haben und zwischen denen die durch den Strom hervorgerufene Kraft im leeren Raum pro m Leitungslänge $2 \cdot 10^{-7}$ mkg/s^2 beträgt.

3.3 Vorsätze zu Einheiten

Um zu große oder unhandliche Zahlenwerte einfacher handhaben zu können, dürfen den Einheiten noch Bezeichnungen für dezimale Vielfache vorangestellt werden, z.B.

T	=	Tera	$= 10^{12}$	d	=	Dezi	$= 10^{-1}$
G	=	Giga	$= 10^{9}$	c	=	Centi	$= 10^{-2}$
M	=	Mega	$= 10^{6}$	m	=	Milli	$= 10^{-3}$
k	=	Kilo	$= 10^{3}$	µ	=	Mikro	$= 10^{-6}$
(h	=	Hekto	$= 10^{2}$)	n	=	Nano	$= 10^{-9}$
(da	=	Deka	$= 10^{1}$)	p	=	Pico	$= 10^{-12}$
				(f	=	Femto	$= 10^{-15}$)

In der Elektrotechnik wichtig sind die Vorsätze G, M, k, m, µ, n und p. Erwähnenswert ist noch , dass der (grossgeschriebene) Vorsatz K, wie wir ihn in der Datentechnik kennen, wie in Kbyte, 1024 bedeutet, im Gegensatz zum kleingeschriebenen k, wie in $k\Omega$, der 1000 bedeutet.

Beispiele:

1000 m	= 1km
1/1000g	= 0,001g = 1 mg
0,000 025A	= 25µA

4 Einige Grundbegriffe

In diesem Kapitel wollen wir Grundbegriffe, die wir schon kennengelernt haben (Ladung, Strom) zusammenstellen und zwei neue (Spannung, Leistung) kennenlernen.

4.1 Die elektrische Ladung

Mit dem Coulomb´schen Gesetz (1.2) haben wir den Begriff der Ladung zwar benutzt, aber noch nicht erwähnt, mit welcher Einheit diese gemessen wird. Wir wissen außerdem, dass als eine der Basisgrößen bei den SI-Einheiten die Stromstärke, die in Ampere gemessen wird, dient. Für die Ladung gibt es eine eigene, abgeleitete Einheit, das Coulomb, also:

$$[Q] = 1\text{ Coulomb} = 1\text{ C} = 1\text{As} \tag{4.1}$$

Man nennt eine solche abgeleitete Einheit, bei der kein anderer Zahlenfaktor als 1 auftritt, eine *kohärente* Einheit. Die Einheit der Ladung ist damit über die Basiseinheiten Ampere und Sekunde festgelegt.

Wir wissen heute, dass Ladungen nur in Vielfachen der Elemetarladung e auftreten. Ein Elektron trägt die Ladung $-e$, ein Proton die Ladung $+e$. Die Ladung ist also „gequantelt“.

Es gilt:

$$Q = \pm\,\mathrm{n} \cdot e \qquad \text{mit} \qquad e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}\ ,\ \text{n ganze Zahl} \tag{4.2}$$

Daraus folgt, dass eine (negative) Ladung von 1 C bzw. 1As aus $6{,}24 \cdot 10^{18}$ Elektronen besteht.

4.2 Der elektrische Strom

Den elektrischen Strom haben wir gerade benutzt, um damit die Einheit für die Ladung festzulegen. Bei der Definition der Stromstärke (Kapitel 3) wurde ein zeitlich konstanter Strom benutzt, d.h. es fließt pro Zeiteinheit eine stets gleichbleibende Ladung. Für den Strom gilt dann:

$$I = Q / t \tag{4.3}$$

Nun kann aber auch die Ladung, die pro Zeiteinheit transportiert wird, schwanken. Dann ergibt sich der Strom aus der Ableitung der Ladung nach der Zeit (=Ladungsänderung pro Zeit):

$$i(t) = \frac{dQ(t)}{dt} \tag{4.4}$$

Es fällt auf, dass in (4.3) für den Strom ein Großbuchstabe und in (4.4) ein Kleinbuchstabe verwendet wurde. Es ist insbesondere in der Elektrotechnik üblich, zeitveränderliche Größen des Stromes oder einer Spannung mit Kleinbuchstaben und konstante Größen mit Großbuchstaben zu kennzeichnen.

4.3 Elektrisches Potenzial und elektrische Spannung

Wir betrachten beispielhaft 2 beliebig geformte metallische Körper von denen einer positiv und einer negativ geladen ist. Die elektrischen Felder dieser beiden Ladungen überlagern sich, was wir mit „Feldlinien" veranschaulichen können. Die Feldlinien beginnen an dem positiv geladenen Körper und enden an dem negativ geladenen Körper. Wenn wir nun eine kleine[1] positive Probeladung q von dem Körper mit der positiven Ladung auf irgendeinem Weg zu dem Körper mit negativer Ladung bewegen, so wird dabei vom Feld Arbeit aufgebracht, denn die positive Ladung erfährt eine Kraft, die von dem Körper mit positiver Ladung weg und zu dem Körper mit negativer Ladung hin gerichtet ist.

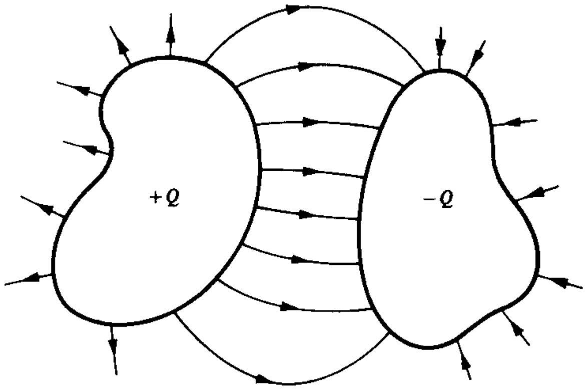


Bild 4.1 Feld zwischen 2 geladenen Körpern

Dies ist vergleichbar mit der mechanischen Arbeit, die wir dem Gravitationsfeld entnehmen, wenn wir mit dem Fahrrad auf irgendeinem Weg den Berg hinabfahren (siehe auch Kapitel 2, Bild 2.2).

Im Prinzip können wir die Arbeit, die wir dabei dem Feld entnehmen mit (2.13) berechnen:

$$W = \int_a^b \vec{F}(s) \cdot d\vec{s} \tag{2.13}$$

Dabei ist die Kraft auf die Probeladung auf jedem Stück des Wegs durch Größe und Richtung des elektrischen Feldes bestimmt:

$$\vec{F}(s) = q \cdot \vec{E}(s) \tag{4.5}$$

Wir setzen (4.5) in (2.13) ein erhalten:

$$W = \int_a^b q \cdot \vec{E}(s) \cdot d\vec{s} \tag{4.6}$$

Die Probeladung q ist konstant und wir können sie vor das Integral ziehen.

$$W_{ab} = q \cdot \int_a^b \vec{E}(s) d\vec{s} = q\left[f(b) - f(a)\right] \tag{4.7}$$

Da die Arbeit, die wir gewinnen, beim elektrischen Feld genau wie beim Gravitationsfeld vom gewählten Weg unabhängig ist, folgt, dass es eine Funktion *f(x,y,z)* gibt, die es gestattet, die Arbeit W_{ab} bei der Verschiebung einer Ladung anzugeben, ohne erst ein Integral ausrech-

[1] Diese sei so klein, dass sie das Feld nicht merklich beeinflusst.

nen zu müssen. Der negative Wert dieser Funktion f heißt Potenzial und wird mit dem Buchstaben φ bezeichnet. Also gilt:

$$\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} = \varphi(a) - \varphi(b) \tag{4.8}$$

Die Arbeit ist also gleich dem Produkt aus transportierter Ladung q und der Potenzialdifferenz. Diese Potenzialdifferenz bezeichnet man als elektrische Spannung zwischen den Punkten a und b. Die Spannung wird mit dem Formelzeichen u bezeichnet (Großbuchstabe U für konstante Spannung):

$$u_{ab} = \varphi(a) - \varphi(b) \tag{4.9}$$

$$W_{ab} = q \cdot u_{ab} \tag{4.10}$$

Die Einheit der elektrischen Spannung ist

$$[U] = 1\,\mathrm{Volt} = 1\,\mathrm{V} = \frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{As}} = \frac{\mathrm{kgm}^2}{\mathrm{As}^3}$$

und lässt sich aus den Basisgrößen ableiten.

4.4 Die elektrische Leistung

Leistung ist Arbeit pro Zeit, allgemein gilt:

$$P = \frac{dW}{dt} \tag{4.11}$$

Mit (4.10) und (4.4) folgt:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dq}{dt} \cdot u = u\,i \tag{4.12}$$

Für die Einheit der Leistung gilt:

$$[P] = 1\,\mathrm{Watt} = 1\,\mathrm{W} = 1\,\mathrm{VA}$$

5 Elektrische Netzwerke

Bekanntlich spielen Schaltungen, die aus einzelnen Bauelementen zusammengesetzt sind, in der Elektrotechnik eine große Rolle. Wir wollen nun Ströme und Spannungen in solchen *Netzwerken* berechnen. Das einfachste Netzwerk ist der elektrische Stromkreis.

5.1 Elektrischer Stromkreis

Strom, Spannung und Elektrizität sind im Alltag für viele Leute offensichtlich Synonyme. Dies beruht zum Teil auf Gedankenlosigkeit, zum Teil aber sicher auch auf Unwissenheit. Journalistische Stilblüten wie „das Gerät braucht eine Stromspannung von 230V“ sind keine Seltenheit.

Dabei ist der Begriff „Strom“ doch einfach: Es „strömt“ etwas. Wie wir aus der Geschichte wissen, waren es zunächst galvanische Elemente mit denen Strom erzeugt wurde. Eine damals wie heute teure Methode. Heute wissen wir, dass es Elektronen sind, die im Metall „strömen“. Wir haben es viel leichter als unsere Ahnen, wir haben ein (sogar zutreffendes) Modell, das unserer Vorstellungskraft auf die Sprünge hilft. Da, wie wir auch wissen, Elektronen negativ geladen sind, bewegen sich die Elektronen tatsächlich entgegen der positiv gezählten Stromrichtung. Manche Leute haben offensichtlich große Probleme mit dieser Feststellung und bedauern es außerordentlich, dass positive und negative Ladung so unglückselig definiert wurden (Katzenfell und Gummistab!). Dieses Problem haben wir nicht; wir betrachten positive und negative Zahlen als gleichberechtigt! Negativ und positiv haben in Mathematik, Naturwissenschaft und Technik nichts mit gut und böse zu tun, sondern besagen nur, ob „so rum“ oder „anders rum“. Wir überlassen es den Kaufleuten, bei Zahlen mit negativem Vorzeichen Unbehagen zu empfinden.

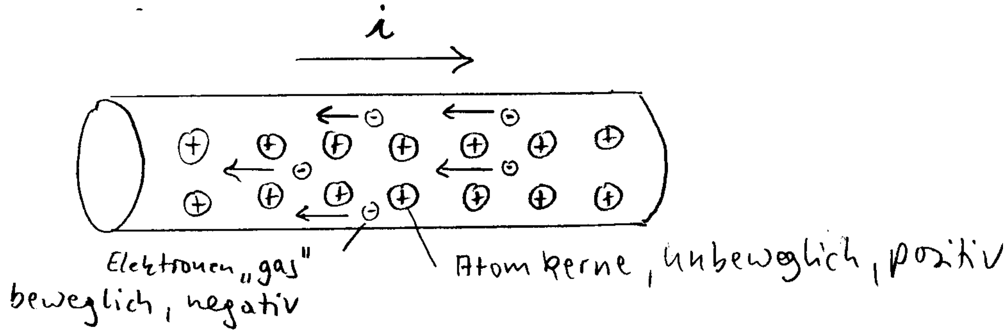


Bild 5.1 Elektrischer Strom im Leiter

Ein einfaches elektrisches Gerät aus dem heutigen Leben ist die Taschenlampe. Die bekannte Schaltung ist in Bild 5.2 dargestellt.

Die Batterie ist hier aus der Reihenschaltung von 3 Zellen zusammengesetzt. Die längere der beiden Linien im entsprechenden Schaltzeichen bezeichnet den positiven Anschluss. Wenn man nicht besonders zum Ausdruck bringen will, dass die Batterie aus mehreren Zellen besteht, genügt es, das Schaltzeichen nur einmal zu zeichnen.

Spannungen und Ströme werden mit Zählpfeilen eingetragen. Wichtig ist ein konsequenter Umgang mit diesen Zählpfeilen. Beim Spannungszählpfeil kennzeichnet das Pfeilende das positivere Potenzial und die Pfeilspitze das negativere Potenzial, wenn die zugehörige Spannung (z.B. U_{Batt} in Bild 5.2) ebenfalls positiv ist. Der Zählpfeil allein gibt also noch keine Auskunft darüber, wo tatsächlich das positivere Potenzial („Pluspol“) ist. Bei einer Wechselspannung wäre das ja auch gar nicht möglich.

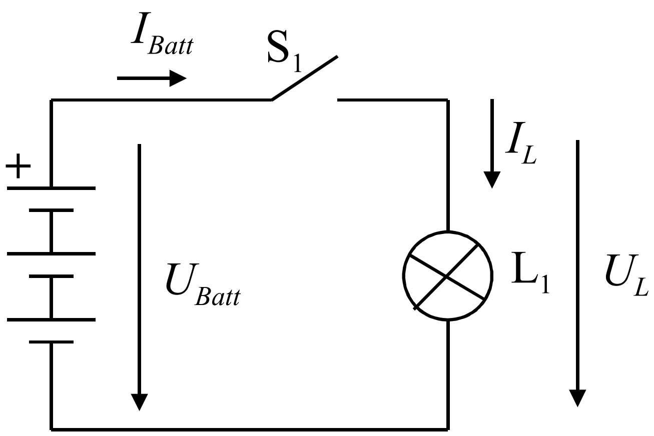


Bild 5.2 Einfacher Stromkreis

Entsprechend gibt der Stromzählpfeil die tatsächliche Stromrichtung für den Fall an, dass der zugehörige Strom (z.B. I_L in Bild 5.2) positiv ist.

In Fällen, wo dies klar ist, wie bei der Batterie in Bild 5.2, wird man den Zählpfeil so eintragen, dass die zugehörige Spannung bzw. der zugehörige Strom positiv ist, im Allgemeinen ist das aber gar nicht möglich. In einem komplizierten Netzwerk, in dem wir die Ströme und Spannungen erst berechnen wollen, zeichnen wir die Zählpfeile willkürlich ein.

An der Batterie haben Spannungszählpfeil und Stromzählpfeil verschiedene Richtung. Wenn die Batterie Leistung abgibt, fließt I_{Batt} in der eingezeichneten Richtung; I_{Batt} und damit das Produkt aus U_{Batt} und I_{Batt}, also die abgegebene Leistung sind positiv. Die Zählpfeile an der Batterie sind hier im Erzeugerzählpfeilsystem dargestellt.

Am Verbraucher (Glühlampe) haben Spannungszählpfeil und Stromzählpfeil gleiche Richtung. In unserem Beispiel sind sowohl U_L als auch I_L positiv und damit auch das Produkt aus beiden, also die aufgenommene Leistung. Hier liegt ein Verbraucherzählpfeilsystem vor.

In Bild 5.2 ist die Schaltung mit Schaltzeichen dargestellt, die Symbole für die tatsächlichen Bauelemente darstellen. Zum Rechnen verwenden wir häufig Ersatzschaltbilder. Die Batterie stellt ja keine ideale Spannungsquelle dar. Wir wissen, dass sie bei Belastung „in die Knie“ geht. Dieser Sachverhalt läßt sich durch eine ideale Spannungsquelle mit einem Längswiderstand beschreiben. Auch bei der Glühlampe interessiert uns nur ihr ohmscher Widerstand. Wir erhalten so das in Bild 5.3 dargestellte Ersatzschaltbild für den Fall, dass der Schalter S geschlossen ist.

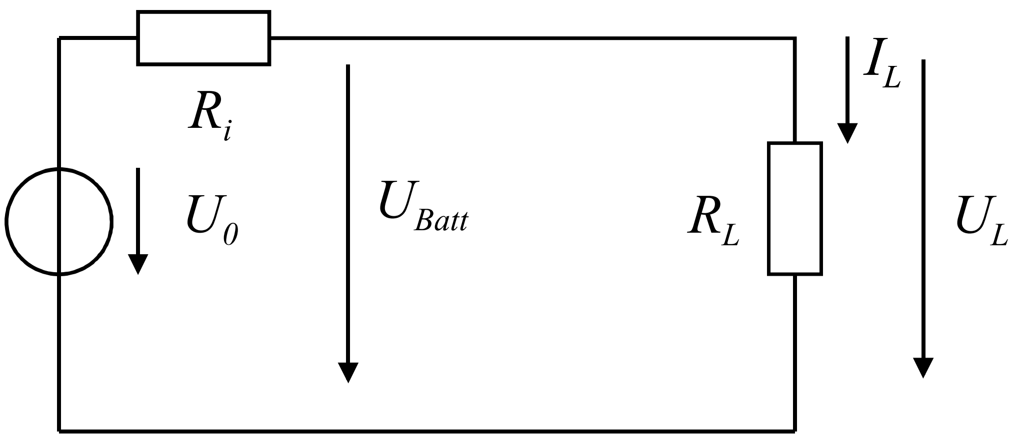


Bild 5.3 Ersatzschaltbild zu Bild 5.2

Die Spannung U_0 heißt Leerlaufspannung. Wenn die reale Spannungsquelle (Batterie) nicht belastet wird, können wir sie an den Klemmen messen. Dann fällt an dem Innenwiderstand R_i keine Spannung ab.

5.2 Gesetze zur Berechnung von Netzwerken

Wenn wir die Ströme und Spannungen in elektrischen Netzwerken berechnen wollen, brauchen wir entsprechende Gesetze oder Regeln. Diese sind überraschend einfach.

5.2.1 Das Ohm'sche Gesetz

Dies ist sicher die bekannteste Gesetzmäßigkeit der Elektrotechnik. Sie stellt den Zusammenhang her zwischen der Spannung, die an einem ohmschen Widerstand anliegt (z.B. U_L in Bild 5.3) und dem Strom, der in dem Widerstand fließt. Bei einem ohmschen Widerstand ist dieser Zusammenhang linear: Spannung und Strom sind proportional zueinander[1]:

$$i = \frac{u}{R} \tag{5.1}$$

$[R] = 1$ Ohm $= 1\Omega = 1$V/A, ohmscher Widerstand

In (5.1) wurden Strom und Spannung mit Kleinbuchstaben bezeichnet. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass das ohmsche Gesetz auch für zeitveränderliche Größen gilt. Insbesondere gilt es auch für Gleichstrom, dann können wir auch Großbuchstaben verwenden.

5.2.2 Knotenregel (1. Kirchhoff 'scher Satz)

Die Knotenregel gestattet die Berechnung von Strömen an den Knoten eines Netzwerkes. Sie besagt, dass sich in einem Schaltungsknoten keine Ladung anhäufen kann, sondern dass die zufließende Ladung auch wieder abfließen muss.

$$\sum I_j = 0 \tag{5.2}$$

Darin sind die I_j die (gemäß gewähltem Zählpfeil) in den Knoten fließenden Ströme. Abfließende Ströme werden negativ gezählt.

Beispiel: Knotenströme I_1, I_2, I_3, I_4 und I_5

zufließend: I_1 und I_4
abfließend: I_2, I_3 und I_5

Gleichung: $I_1 - I_2 - I_3 + I_4 - I_5 = 0$ oder

$I_1 + I_4 = I_2 + I_3 + I_5$

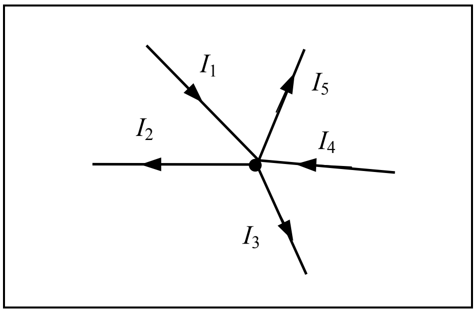


Bild 5.4 Knotenregel

[1] Wir werden allerdings auch Bauelemente kennenlernen, bei denen dies nicht der Fall ist.

5.2.3 Maschenregel (2. Kirchhoff 'scher Satz)

Ähnlich wie für die Ströme in Knoten existiert auch eine Regel für die *Spannungen* in einer Masche.

Die *Maschenregel* besagt, dass die Summe der Spannungen oder Spannungsabfälle beim Durchlaufen einer Masche von einem beliebigen Knoten bis zum gleichen Knoten = 0 ist (Potenzial von Anfangspunkt und Endpunkt des Umlaufs muss gleich sein).

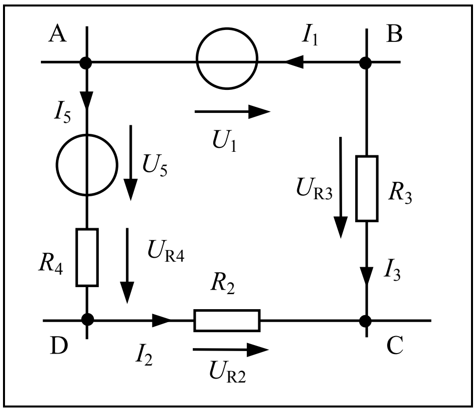


Bild 5.5 Maschenregel

$$\sum U_i = 0 \qquad (5.3)$$

Vorgehensweise bei der Anwendung der Maschenregel:

1. Spannungspfeile an den Widerständen in Übereinstimmung mit der Stromrichtung festlegen
2. Umlaufrichtung in der Masche festlegen (beliebig)
3. Spannungen, deren Zählpfeile *in Richtung des Umlaufsinns* zeigen, werden *positiv* gezählt, solche, deren Zählpfeile *gegen die Umlaufrichtung* zeigen, *negativ*
4. Spannungen mit dem entsprechenden Vorzeichen in die Gleichung eintragen

Beispiel: Maschenumlauf im Uhrzeigersinn, Beginn beim Knoten A

$$U_1 + U_{R3} - U_{R2} - U_{R4} - U_5 = 0$$

Wenn die Spannungsabfälle an den Widerständen durch die Ströme und die Widerstände ausgedrückt werden, ergibt sich:

$$U_1 + I_3 R_3 - I_2 R_2 - I_5 R_4 - U_5 = 0$$

5.3 Mehr über Widerstände

Wir haben den elektrischen Widerstand als eine Größe kennengelernt, die den Zusammenhang zwischen Strom und Spannung beschreibt. Dieser Zusammenhang kann linear sein, wie beim ohmschen Widerstand, es gibt aber auch nichtlineare Widerstände. In der deutschen Sprache ist der Begriff „elektrischer Widerstand“ doppeldeutig: Er bezeichnet einerseits die meist ungewollte Eigenschaft eines Schaltungsteils, z.B. einer Leitung (engl.: resistance) andererseits ein Bauelement (engl.: resistor), das speziell hergestellt wird, um in Schaltungen eingebaut zu werden.

5.3.1 Leitungswiderstand

Für den Widerstand eines homogenen Leiters, dessen Querschnitt A auf seiner ganzen Länge l konstant ist, gilt:

$$R = \frac{\rho\, l}{A} \tag{5.4}$$

mit ρ = spezifischer Widerstand des Leitermaterials (Materialkonstante)

$$[\rho] = \frac{[R][A]}{[l]} = \frac{\Omega\,\mathrm{m}^2}{\mathrm{m}} = \Omega\mathrm{m} \tag{5.5}$$

Stoffe werden entsprechend ihrer Leitfähigkeit eingeteilt :

Gruppe	Stoff	spezifischer Widerstand ρ_{20} / Ωm	Temperaturkoeffizient α /°C
Leiter	Silber	$16 \cdot 10^{-9}$	
	Kupfer	$18 \cdot 10^{-9}$	$3{,}9 \cdot 10^{-3}$
	Gold	$22 \cdot 10^{-9}$	
	Aluminium	$28 \cdot 10^{-9}$	$3{,}8 \cdot 10^{-3}$
	Wolfram	$55 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-3}$
	Eisen	$98 \cdot 10^{-9}$	
Halbleiter	Silicium	$2{,}3 \cdot 10^{3}$	
Nichtleiter	Quarz	$5 \cdot 10^{16}$	

Tabelle 5.1: Elektrische Eigenschaften einiger Stoffe

Bei vielen Leitern ist der spez. Widerstand temperaturabhängig. In erster Näherung kann die Temperatur-Abhängigkeit beschrieben werden durch:

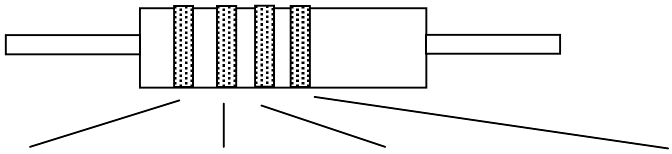
$$\rho_T = \rho_{20}\left(1 + \alpha\left(T - 20^o C\right)\right) \tag{5.6}$$

mit α = Temperatur-Koeffizient (angegeben in Tabellen bei 20°C)

Die Temperatur-Abhängigkeit wird teilweise ausgenutzt, z.B. um Temperaturen zu messen:
$\alpha > 0$: pos. Temperatur-Koeffizient (PTC) = "Kaltleiter"
$\alpha < 0$: neg. Temperatur-Koeffizient (NTC) = "Heißleiter"

5.3.2 Kennzeichnung von Widerständen

Das Bauelement Widerstand wird oft durch Farbringe gekennzeichnet:



Kennfarbe	1. Ziffer	2.Ziffer	Multiplikator	Toleranz
Keine	-	-	-	±20%
Silber	-	-	10^{-2}	±10%
Gold	-	-	10^{-1}	±5%
Schwarz	-	0	10^{0}	-
Braun	1	1	10^{1}	±1%
Rot	2	2	10^{2}	±2%
Orange	3	3	10^{3}	-
Gelb	4	4	10^{4}	-
Grün	5	5	10^{5}	±0,5%
Blau	6	6	10^{6}	-
Violett	7	7	10^{7}	-
Grau	8	8	10^{8}	-
Weiß	9	9	10^{9}	-

Tabelle 5.2: Farbkodierung von Widerständen

Es gibt bevorzugte Werte für Widerstände, die in sogenannten IEC[2]-Reihen E6, E12, E24... festgelegt sind:

E6	1,0				1,5				2,2				3,3				4,7				6,8			
E12	1,0		1,2		1,5		1,8		2,2		2,7		3,3		3,9		4,7		5,6		6,8		8,2	
E24	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1

Tabelle 5.3: IEC-Reihen E6, E12 und E24

Beispiele: rot-rot-schwarz-gold => 22,0 Ω ±5%
gelb-violett-rot –silber => 4,7 kΩ ±10%

Widerstände werden in verschiedenen Techniken hergestellt: Kohleschichtwiderstände, Metalloxid-Schichtwiderstände, Metallschichtwiderstände, Drahtwiderstände.

Neben den Widerständen mit Anschlussdrähten (bedrahtete Bauelemente) gewinnen im Rahmen der Miniaturisierung elektronischer Schaltungen sogenannte SMD[3]-Bauelemente eine immer größere Bedeutung. Diese besitzen keine Anschlussdrähte und werden direkt auf die „Pads“ der Leiterplatte gelötet.

Bei der Schaltungsdimensionierung muss nicht nur der Widerstandswert berechnet werden, es muss auch gewährleistet sein, dass der Widerstand die in ihm umgesetzte Verlustleistung abführen kann. Deshalb gibt es Widerstände für verschiedene Belastbarkeit z.B. ¼ W, ½ W, etc. Die zulässige Belastbarkeit hängt von der Oberfläche des Widerstandes, der Umgebungstemperatur und der zulässigen Oberflächen-Temperatur des Widerstandes ab.

[2] IEC = **I**nternational **E**lektrotechnical **C**ommission
[3] SMD = **S**urface **M**ounted **D**evice

5.3.3 Reihenschaltung von Widerständen

Das Ohm´sche Gesetz und die beiden Kirchhoff´schen Sätze genügen, um beliebig komplizierte Netzwerke zu analysieren. In vielen Fällen ist es aber hilfreich, zusätzliche Regeln für häufige Fälle zu kennen.

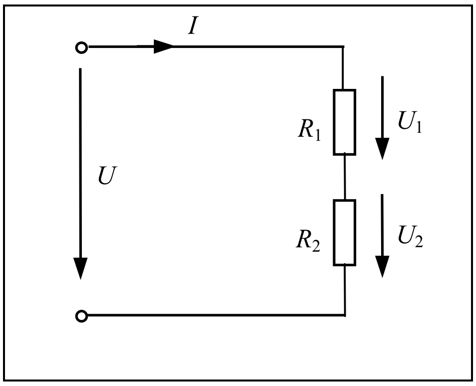


Bild 5.6 zeigt die Reihenschaltung oder Serienschaltung zweier Widerstände. Die Maschenregel liefert:

$$U = U_1 + U_2$$

Bei Ersatz von U_1 und U_2 durch den Strom I und die Widerstände R_1 und R_2 erhalten wir:

$$U = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = I \cdot (R_1 + R_2) = I \cdot R_{res}$$

Bild 5.6 Reihenschaltung

Bei der Reihenschaltung gilt also:

$$\boldsymbol{R_{res} = R_1 + R_2} \quad \text{allgemein:} \quad \boldsymbol{R_{res} = \sum R_i} \tag{5.7}$$

5.3.4 Der Spannungsteiler

Die Frage, wie groß U_2 bei der Reihenschaltung in Bild 5.6 ist, beantwortet uns die *Spannungsteilerregel*, offensichtlich gilt:

$$U_2 = R_2 \cdot I = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U$$

oder:

$$\frac{U_2}{U} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \tag{5.8}$$

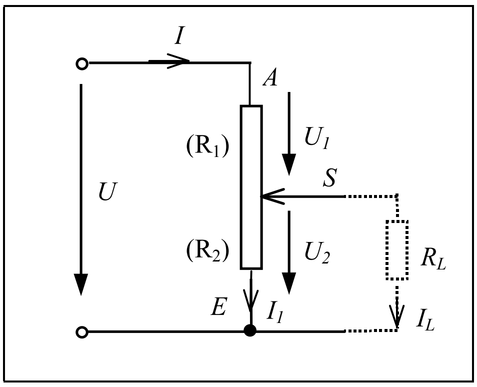


Bild 5.7 Potentiometer

Eine häufig benutzte Anwendung der Spannungsteiler-Regel ist das *Potentiometer*. Dabei werden die beiden Widerstände R_1 und R_2 zu <u>einem</u> Widerstand zusammengefasst, an dem die Spannung U angeschlossen ist. Ein Schleifer S kann nun beliebig zwischen dem Anfangs- (A) und dem Endpunkt (E) des Potentiometers verstellt werden und ermöglicht so einen kontinuierlichen (stetigen) Abgriff eines Teils der Spannung U als Spannung U_2.
Bei unbelastetem Potentiometer gilt die zuvor hergeleitete Spannungsteilerregel.

5.3.5 Parallelschaltung von Widerständen

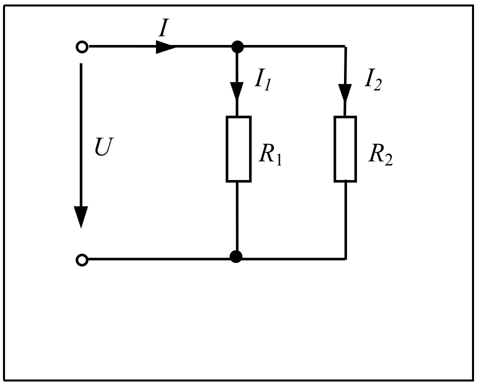


Bild 5.8 zeigt die Parallelschaltung zweier Widerstände. Es soll der resultierende Widerstand berechnet werden. Das Ohm'sche Gesetz auf R_1 bzw. R_2 angewandt gibt:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} \quad \text{und} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} \tag{5.9}$$

Die Knotenregel liefert: $I = I_1 + I_2$
(5.10)

Bild 5.8 Parallelschaltung

Wir setzen (5.9) in (5.10) ein:

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = U\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2} \tag{5.11}$$

Damit ist

$$R_{res} = \frac{U}{I} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \tag{5.12}$$

Werden mehr als 2 Widerstände parallel geschaltet, so wird die entsprechende Formel kompliziert. Offensichtlich gilt aber:

$$\frac{1}{R_{res}} = \sum \frac{1}{R_i} \tag{5.13}$$

Man erhält also den Kehrwert der Parallelschaltung mehrerer Widerstände, indem man deren Kehrwerte addiert.

Der Kehrwert eines Widerstandes wird als Leitwert bezeichnet und hat ein eigenes Formelzeichen und eine eigene Einheit:

$$G = \frac{1}{R} \tag{5.14}$$

$$[G] = \frac{1\mathrm{A}}{\mathrm{V}} = 1\mathrm{S} = 1\,\mathrm{Siemens} \tag{5.15}$$

Wir werden den Leitwert nur selten verwenden.

5.3.6 Spannungsquellen und Stromquellen

Bei der Diskussion der Taschenlampenbatterie haben wir bereits ein Ersatzschaltbild kennengelernt, das aus einer idealen Spannungsquelle U_0 und einem Innenwiderstand R_i besteht, und das das Verhalten der realen Spannungsquelle (Batterie) gut beschreibt.

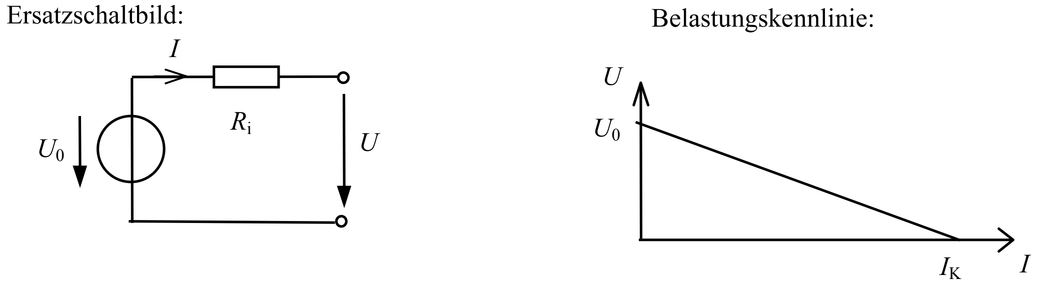


Bild 5.9 Ersatzschaltbild und Belastungskennlinie einer realen Spannungsquelle

Die Belastungskennlinie rechts in Bild 5.9 zeigt, wie die Klemmenspannung U mit zunehmendem Strom I abnimmt. Der Grund ist der dabei zunehmende Spannungsabfall am Innenwiderstand R_i. Ist die Klemmenspannung Null, so fließt der Kurzschlußstrom I_K.

Wir hätten genauso gut eine ideale Stromquelle mit einem parallel geschalteten Innenwiderstand als Ersatzschaltung verwenden können. Das Schaltzeichen für eine ideale Stromquelle und eine damit realisierte reale Stromquelle ist in Bild 5-10 links dargestellt.

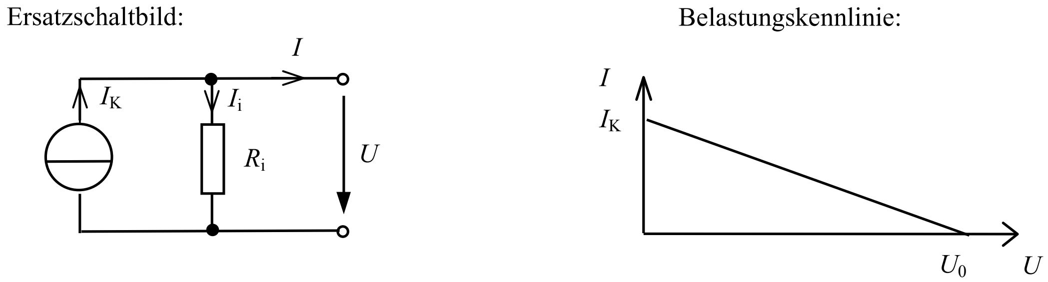


Bild 5.10 Ersatzschaltung und Belastungskennlinie einer realen Stromquelle

Ist die Schaltung in Bild 5.10 unbelastet, so erscheint die Spannung, die der Strom I_k an R_i verursacht an den Klemmen; bei U=0 fließt I_k.

Mit

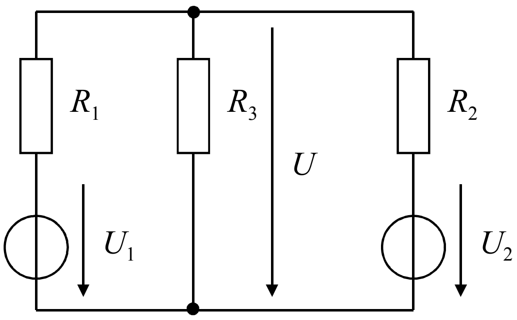
$$U_0 = R_i \cdot I_K \tag{5.16}$$

sind beide Darstellungen von ihrem Klemmenverhalten her äquivalent. Allerdings entspricht im Falle der Taschenlampenbatterie die Schaltung mit der Ersatzspannungsquelle eher den physikalischen Gegebenheiten.

5.3.7 Überlagerungssatz

Oft haben Netzwerke mehrere Spannungs- und/oder Stromquellen. Durch Anwendung des Überlagerungssatzes [Helmholtz 1853] lässt sich die Berechnung von Strömen und Spannungen oft vereinfachen:

Sind in einem Netz mehrere Quellen vorhanden, dann berechnet man zuerst die Wirkung einer Quelle, wobei die Spannungen oder Ströme aller übrigen Quellen gleich Null gesetzt werden[4] und fährt mit allen übrigen Quellen so fort. Die Gesamtwirkung ist die Summe der errechneten Teilwirkungen.



Beispiel: Bei der Schaltung in Bild 5.11 ist $U_1 = 5\text{V}$, $U_2 = 10\text{V}$, $R_1 = 10\Omega$, $R_2 = 20\Omega$, $R_3 = 20\Omega$. Die Spannung U soll berechnet werden.

Bild 5.11 Zum Überlagerungssatz

Schritt 1: U_2 Null setzen und $U_{(1)}$ mit Spannungsteilerregel ausrechnen. Mit dem eingeklammerten Index 1 wird angedeutet, dass das nur ein Teil der endgültigen Spannung U ist.

$$U_{(1)} = U_1 \frac{R_2 \parallel R_3}{R_1 + R_2 \parallel R_3} = 5\text{V} \frac{10\Omega}{10\Omega + 10\Omega} = 2{,}5\text{V}$$

Schritt 2: U_1 Null setzen und $U_{(2)}$ mit Spannungsteilerregel ausrechnen.

$$U_{(2)} = U_2 \frac{R_1 \parallel R_3}{R_2 + R_1 \parallel R_3} = 10\text{V} \frac{\frac{20 \cdot 10}{10+20}\Omega}{20\Omega + \frac{20 \cdot 10}{10+20}\Omega} = 2{,}5\text{V}$$

Die Überlagerung beider Teilergebnisse liefert:

$$U = U_{(1)} + U_{(2)} = 5\text{V}$$

---

[4] Das ist bei einer Spannungsquelle gleichbedeutend mit einem eingefügten Kurzschluss, bei einer Stromquelle mit einem eingefügten Leerlauf.

5.3.8 Ersatz-Spannungs- und -Stromquellen

Betrachtet man 2 beliebige Knoten eines Netzwerkes, zwischen denen ein Zweipol (z.B. Widerstand) angeschlossen ist, so kann zur Berechnung des Stromes durch diesen Zweipol das gesamte restliche Netzwerk ersetzt werden durch eine Ersatz-Quelle (Spannungs- oder Stromquelle). Diese Ersatz-Quelle muss an den Klemmen das *gleiche* elektrische Verhalten zeigen wie der ersetzte Schaltungsteil.

Beispielschaltung (Bild 5.12)

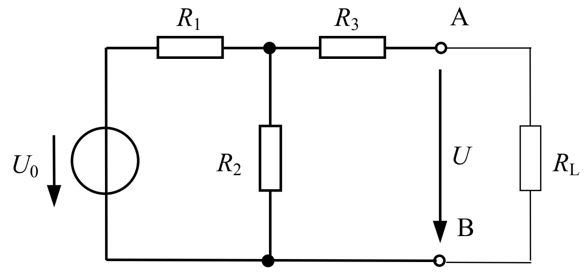


Bild 5.12 Zur Ersatzspannungsquelle

gesucht:
Ersatz-Spannungsquelle bezüglich der Klemmen A und B

Vorgehen:

a) Ermittlung des Innenwiderstands R_{iX} der Ersatz-Quelle, indem
- Spannungsquellen durch einen Kurzschluss und
- Stromquellen durch eine Unterbrechung

ersetzt werden, anschließend
Berechnung des Widerstands zwischen den Klemmen A und B (ohne R_L, ***mit Blickrichtung in die Schaltung hinein!***)

b) Berechnung der Leerlauf-Spannung U_{0X} der Original-Schaltung zwischen den Klemmen A und B *oder*

c) Berechnung des Kurzschluss-Stromes I_{KX} der Original-Schaltung zwischen den Klemmen A und B

Die jeweils fehlende 3. Kenngröße lässt sich über die Beziehung $\boldsymbol{U_0 = R_i \cdot I_K}$ berechnen.

Berechnungen im Beispiel:

a)
$$R_{iX} = R_3 + (R_1 \| R_2) = R_3 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

b) Leerlauf-Spannung: Spannungsteiler mit R_1 und R_2 (R_3 braucht wegen $I = 0$ nicht berücksichtigt zu werden)

$$U_{0X} = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Daraus lässt sich $I_{KX} = U_{0X} / R_{iX}$ berechnen.

Anmerkung: Der linke Schaltungsteil in Bild 5.12 lässt sich nun mit einer Belastungskennlinie beschreiben. Damit können Strom und Spannung an der Schnittstelle auch dann berechnet werden, wenn R_L kein ohmscher Widerstand, sondern ein nichtlinearer Zweipol ist. Dazu tragen wir z.B. die Belastungskennlinie und die Kennlinie des nichtlinearen Zweipols in ein gemeinsames Diagramm ein und bestimmen den Schnittpunkt.

6 Der Kondensator

6.1 Die Kapazität

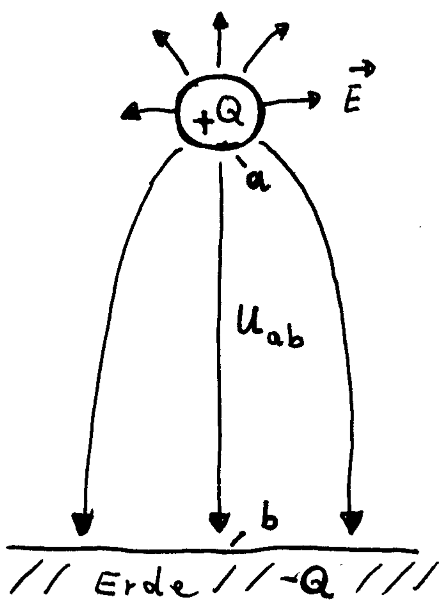


Bild 6.1 Elektrisches Feld einer Kugel

Bei den Elektrisiermaschinen, die wir im Kapitel 1 kennengelernt haben, wurden Metallkugeln (sogenannte Konduktoren) benutzt, um Ladungen zu speichern. Wir wollen nun den Zusammenhang zwischen gespeicherter Ladung und der Spannung, die die Metallkugel gegenüber dem Erdpotenzial[1] einnimmt, ermitteln. Da dabei der Abstand zwischen Metallkugel und Erdoberfläche eine Rolle spielt, wollen wir annehmen, dass die Kugel von der Erde so weit entfernt ist, dass zumindest in der Nähe der Kugel das von ihrer Ladung erregte elektrische Feld kugelsymmetrisch ist.

Wir erinnern uns (Kapitel 4), dass die Spannung U_{ab} in Bild 6.1 gleichbedeutend ist mit der Arbeit, die pro Ladung aufgewendet werden muss, um sie von der Erde zur Kugel zu transportieren.

Folgende Beziehungen, die wir schon kennen, sind nützlich, um die gestellte Aufgabe zu lösen:

$$\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = \sum_v Q_v \tag{2.20}$$

$$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E} \tag{2.16}$$

$$\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} = \varphi(a) - \varphi(b) \tag{4.8}$$

$$u_{ab} = \varphi(a) - \varphi(b) \tag{4.9}$$

Mit (2.20) können wir die elektrische Flussdichte an der Kugeloberfläche bestimmen, wenn wir die in der Hülle eingeschlossene Ladung kennen. Die Auswertung von (2.20) ist einfach, wenn wir wie hier unterstellen können, dass die elektrische Flussdichte überall senkrecht auf der Kugeloberfläche steht und überall gleich groß ist. Dann brauchen wir den Betrag der elektrischen Flussdichte nur mit der Kugeloberfläche zu multiplizieren, um das Hüllenintegral auszuwerten. Dies gilt auch für den Fall, dass wir eine größere Hülle um die Ladung legen, wenn diese wieder kugelförmig und konzentrisch zu der Metallkugel ist, und wenn die Erde noch weit genug entfernt ist, dass das Feld noch als symmetrisch betrachtet werden kann.

[1] Die Ladung, die die Kugel trägt, „fehlt“ der Erde.

Für eine Hülle im Abstand r vom Kugelmittelpunkt gilt also:

$$D \cdot 4\pi\, r^2 = Q \tag{6.1}$$

Mit (2.16) erhalten wir damit für den Betrag der elektrischen Feldstärke an dieser Stelle:

$$E = \frac{D}{\varepsilon} = \frac{Q}{4\pi\,\varepsilon\; r^2} \tag{6.2}$$

Bezeichnen wir nun den Radius der Metallkugel mit r_1 , so können wir die Spannung (Potenzialdifferenz) zwischen Kugeloberfläche und einer gedachten Hüllkugel mit Radius r_2 berechnen, indem wir (6.2) in (4.8) einsetzen und entlang des Radius integrieren:

$$U_{ab} = \int_{r1}^{r2} \vec{E} d\vec{s} = \int_{r1}^{r2} \frac{Q}{4\pi\varepsilon\, r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\varepsilon} \int_{r1}^{r2} \frac{1}{r^2} dr = \frac{Q}{4\pi\varepsilon} \cdot \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \tag{6.3}$$

Die Auswertung des Linienintegrals wurde hier durch geschickte Wahl des Weges vereinfacht. Aus dem Vektorprodukt wurde ein einfaches Produkt. Da aber die Feldstärke hier vom Weg abhängig ist (kleiner wird, je mehr wir uns von der Kugel entfernen) müssen wir dennoch ein Integral, wenn auch ein recht einfaches, lösen. Offensichtlich erhalten wir für die Spannung U_{ab} auch dann einen endlichen Wert, wenn wir r_2 unendlich groß machen:

$$U_{ab} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon\, r_1} \tag{6.4}$$

Gleichung (6.4) gibt also die Spannung an, die eine Kugel mit Radius r_1 gegenüber der sehr weit (unendlich weit) entfernten Erde annimmt, wenn die Kugel die Ladung Q trägt.

Aus (6.4) können wir für die betrachtete Anordnung das Verhältnis von Ladung zu Spannung angeben. Dieses Verhältnis wird Kapazität genannt und mit C abgekürzt. Für die Kugel gilt also:

$$C = \frac{Q}{U} = 4\pi\varepsilon\, r_1 \tag{6.5}$$

Aus dem soeben vollführten Rechengang kann man auch die allgemein gültige Definition erahnen:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A}}{\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s}} \tag{6.6}$$

Für die Kapazität gibt es eine abgeleitete Einheit:

$$[C] = \frac{[Q]}{[U]} = \frac{\mathrm{As}}{\mathrm{V}} = 1\mathrm{F} = 1\mathrm{Farad} \tag{6.7}$$

6.2 Der Plattenkondensator

Bereits im 18. Jahrhundert wusste man, dass es günstigere Anordnungen gibt, um Ladungen zu speichern, als die Metallkugel (Leidener Flasche). Wir betrachten nun zwei parallele rechteckige Metallplatten der Fläche *A*, die die Ladungen +*Q* und –*Q* tragen und zueinander den Abstand *d* haben. Wir wollen nun die Kapazität einer solchen Anordnung ermitteln.

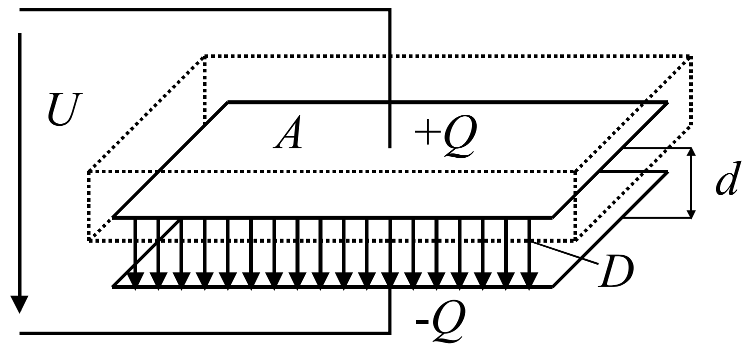


Bild 6.2 Plattenkondensator

Wenn wir annehmen, dass der Abstand *d* klein ist gegenüber den Kantenlängen der Platten, diese sich also dicht gegenüber stehen, so können wir davon ausgehen, dass sich die positiven Ladungen der oberen Platte, von den negativen Ladungen der unteren Platte angelockt, gleichmäßig auf der Unterseite der oberen Platte verteilen. Entsprechend verteilen sich die Ladungen der unteren Platte gleichmäßig auf deren Oberseite. Deshalb stellt sich zwischen den Platten ein gleichmäßiges (homogenes) elektrisches Feld ein. Den Raum außerhalb des Plattenkondensators können wir als praktisch feldfrei ansehen.

Um nun die Kapazität dieser Anordnung zu ermitteln, bringen wir (6.6) zur Anwendung. Dazu ist in Bild 6.2 eine Hülle über die obere Platte gelegt (gestrichelt). Damit ergibt sich für das Hüllenintegral die einfache Beziehung:

$$Q = \oint_A \vec{D} \cdot d\vec{A} = D \cdot A \tag{6.8}$$

Entsprechned einfach ist die Auswertung des Linienintegrals:

$$U_{ab} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{s} = E \cdot d = \frac{D \cdot d}{\varepsilon} \tag{6.9}$$

Damit ist die Kapazität des Plattenkondensators:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon \cdot A}{d} \tag{6.10}$$

Aus 6.10 erkennen wir, dass die Kapazität eines Plattenkondensators um so größer ist, je größer die Fläche der Platten A und je kleiner der Abstand d der Platten zueinander ist. Die Größe ε haben wir bereits im Kapitel 1 kennengelernt. Für das Vakuum (Luft) gilt:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{As}}{\mathrm{Vm}} \tag{1.3}$$

Nun kann man anstelle von Luft auch andere Isolatoren zwischen die beiden Platten bringen. Dann vergrößert sich die „Permittivität" ε gemäß

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \tag{6.11}$$

Der Effekt beruht darauf, dass in dem Isolierstoff eine Polarisation eintritt oder sich bereits vorhandene Dipole im elektrischen Feld ausrichten. Die Größe ε_r heißt „Permittivitätszahl" oder „relative Dielektrizitätskonstante". Sie kann insbesondere für gewisse keramische Massen erhebliche Werte annehmen (Tabelle 6.1).

Material	Permittivitätszahl ε_r
Luft	1
Papier	4..6
Glas	5..7
Polystyrol	2,5
Aluminiumoxid	6..9
Tantalpentoxid	26
Keramische Masse	10..50000

Tabelle 6.1 Permittivitätszahlen ε_r

Will man also Kondensatoren mit großer Kapazität herstellen, so muss man für große Flächen A, kleinen Abstand d und eine möglichst große Permittivitätszahl ε_r des „Dielektrikums" sorgen. Wie klein die Dicke des Dielektrikums gewählt werden kann, hängt außer von der technologischen Machbarkeit insbesondere von der Durchschlagfestigkeit des Materials ab. So muss bei der Auswahl von Kondensatoren darauf geachtet werden, für welche maximale Spannung diese bemessen sind.

Um eine große Fläche zu erzielen, werden Kondensatoren häufig dadurch hergestellt, dass zwei Metallfolien mit dazwischenliegenden Kunstofffolien gewickelt werden.

Elektrolytkondensatoren haben als Dielektrikum eine dünne Oxidschicht. Solche Kondensatoren dürfen nur mit Spannungen der angegebenen Polarität[2] betrieben werden. Die Oxidschicht löst sich auf, wenn der „Elko" falsch gepolt wird.

Es gibt auch Kondensatoren, deren Kapazität verändert werden kann. Früher (heute nur noch bei Billiggeräten) wurden bei Rundfunkempfängern die Sender mit Drehkondensatoren eingestellt. Drehkondensatoren bestehen aus einem feststehenden und einem drehbaren Metallplattenpaket.

[2] Auf dem Bauelement ist ein Anschluss mit einem „+"-Zeichen versehen.

6.3 Strom und Spannung am Kondensator

Wie wir schon wissen, definiert die Kapazität den Zusammenhang zwischen Ladung und Spannung am Kondensator. Diese Beziehung gilt auch für den Fall, dass Spannung und Ladung zeitveränderlich sind:

$$q(t) = C \cdot u(t) \tag{6.12}$$

Um zum Ausdruck zu bringen, dass Ladung und Spannung zeitveränderlich sind, wurden Kleinbuchstaben verwendet.

Den Zusammenhang zwischen Ladung und Strom haben wir bereits in Kapitel 4 kennengelernt:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \tag{4.4}$$

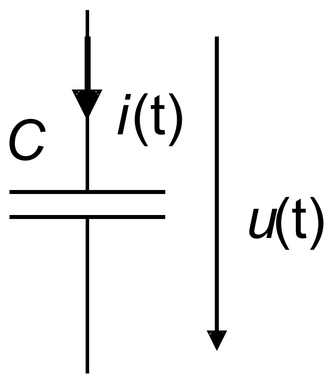
Einsetzen von (6.12) in (4.4) ergibt

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \tag{6.13}$$

oder:

$$u(t) = \frac{1}{C} \int i(t)\, dt \tag{6.14}$$

Bild 6.2 zeigt das Schaltzeichen für den Kondensator und die zugehörigen Zählpfeile.



Gleichung (6.13) sagt aus, dass nur dann ein Strom in den Kondensator fließt, wenn sich die Spannung am Kondensator ändert. Dies ist plausibel, denn wenn sich die Spannung ändert, ändert sich auch die gespeicherte Ladungsmenge. Eine Änderung der Ladungsmenge bedeutet aber, dass Strom fließen muss.
Entsprechend besagt (6.14), dass der Strom, der in den Kondensator fließt, und dort zu einer Vergrößerung der Ladung führt, die Spannung am Kondensator erhöht.

Bild 6.2 Schaltzeichen und Zählpfeile

6.4 Zusammenschaltung von Kondensatoren

6.4.1 Parallelschaltung

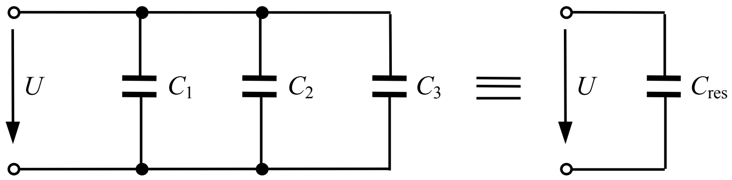


Bild 6.3 Parallelschaltung von Kondensatoren

Die Spannung ist an allen Kondensatoren gleich. Für die Ladungen, die in den einzelnen Kondensatoren gespeichert sind, gilt:

$$Q_v = C_v \cdot U \tag{6.15}$$

Die Gesamtladung beträgt deshalb:

$$Q = \sum_v C_v \cdot U = U \cdot \sum_v C_v = U \cdot C_{res} \tag{6.16}$$

Also:

$$C_{res} = \frac{Q}{U} = \sum_v C_v \tag{6.17}$$

6.4.2 Serienschaltung

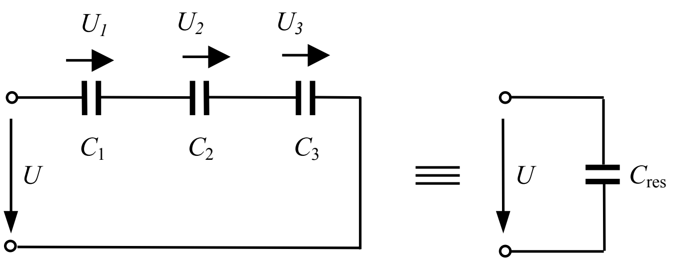


Bild 6.4 Serienschaltung von Kondensatoren

Werden die Kondensatoren gemeinsam aufgeladen, so sind die Ladungen in jedem Kondensator gleich, die einzelnen Spannungen sind verschieden, wenn die Kondensatoren verschiedene Kapazität haben.

$$U = \sum_v U_v = \sum_v \frac{Q}{C_v} = Q \cdot \sum_v \frac{1}{C_v} \tag{6.18}$$

Also:

$$\frac{1}{C_{res}} = \frac{U}{Q} = \sum_v \frac{1}{C_v} \tag{6.19}$$

6.5 Aufladen eines Kondensators

In Bild 6.5 ist der Kondensator zunächst entladen. Zum Zeitpunkt t=0 wird der Schalter S geschlossen und der Kondensator wird über den Widerstand mit der Spannungsquelle verbunden.

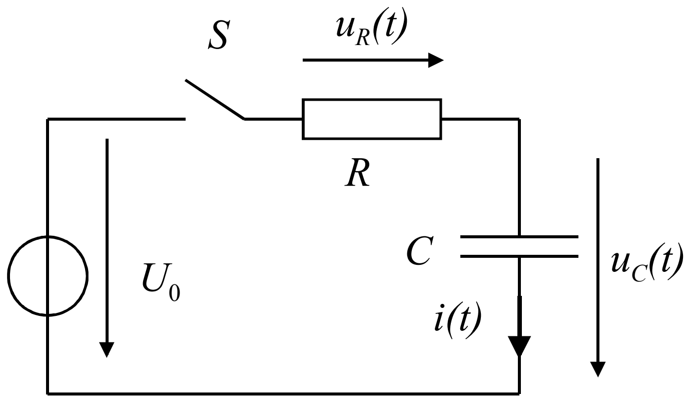


Bild 6.5 Aufladen eines Kondensators

Um zu sehen, was passiert, machen wir einen Maschenumlauf (S geschlossen):

$$-U_0 + u_R(t) + u_C(t) = 0 \tag{6.20}$$

Mit $u_R(t) = R \cdot i(t)$ und $i(t) = C \cdot \dfrac{du_C(t)}{dt}$ erhalten wir:

$$-U_0 + R \cdot C \cdot \frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = 0 \tag{6.21}$$

oder

$$RC\frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = U_0 \tag{6.22}$$

Dies ist eine lineare Differenzialgleichung für die Kondensatorspannung $u_C(t)$. In einer Differenzialgleichung treten eine Funktion, hier $u_C(t)$, und Ableitungen dieser Funktion auf. Gesucht ist die Funktion, die die Differenzialgleichung erfüllt.

Glücklicherweise gehört die hier vorliegende Differenzialgleichung zu einer besonders harmlosen Gattung. Es handelt sich um eine gewöhnliche lineare Differenzialgleichung mit konstanten Koeffizienten. Gewöhnlich heißt eine Differenzialgleichung, wenn sie nur gewöhnliche, keine partiellen Ableitungen enthält. Linear bedeutet hier, dass die gesuchte Funktion und ihre Ableitungen nur in der 1.Potenz auftreten. Die Koeffizienten sind Faktoren, die bei der Funktion, bzw. ihren Ableitungen stehen, hier ist RC ein solcher Koeffizient.

Auf der linken Seite von (6.22) steht nur Summanden, die die gesuchte Funktion bzw. deren Ableitung enthalten. Rechts steht die sogenannte Anregung, hier U_0. Diese wird auch als Inhomogenität oder Störfunktion bezeichnet.

Die Differenzialgleichung heißt **inhomogen**, wenn die rechte Seite vorhanden ist und **homogen**, wenn die rechte Seite Null ist.

Die allgemeine Lösung einer inhomogenen gewöhnlichen linearen Differenzialgleichung mit konstanten Koeffizienten erhält man, indem man

- die zugehörige homogene Dgl. (rechte Seite Null setzen) löst.
- dazu irgendeine (partikuläre) Lösung der inhomogenen Dgl. addiert.
- Konstanten aus Anfangsbedingungen bestimmt.

Wir erproben dieses Verfahren anhand von (6.22):

Lösen der homogenen Dgl. (rechte Seite Null setzen):

$$RC\frac{du_C(t)}{dt} + u_C(t) = 0 \tag{6.23}$$

Eine solche Dgl. lässt sich leicht mit dem Ansatz

$$u_C(t) = A \cdot e^{\lambda \cdot t} \tag{6.24}$$

lösen. Dies liegt daran, dass die Ableitung der e-Funktion wieder eine e-Funktion ist:

$$\frac{du_C(t)}{dt} = A \cdot \lambda \cdot e^{\lambda \cdot t} \tag{6.25}$$

Wir setzen (6.24) und (6.25) in (6.23) ein und erhalten:

$$RCA\lambda e^{\lambda t} + Ae^{\lambda t} = 0 \tag{6.26}$$

Wir dividieren durch $Ae^{\lambda t}$ und erhalten die **charakteristische Gleichung:**

$$RC\lambda + 1 = 0 \tag{6.27}$$

Diese charakteristische Gleichung können wir auch direkt hinschreiben, wenn wir das Prinzip durchschauen. Wir brauchen nur in der homogenen Dgl. die gesuchte Funktion zu 1 zu setzen und für die Ableitung λ einzusetzen. Kommen auch höhere Ableitungen vor (Dgl. n-ter Ordnung), so setzen wir für die n-te Ableitung λ^n.

Aus der charakteristischen Gleichung kann nun der **Eigenwert $\boldsymbol{\lambda}$** (n Eigenwerte bei Dgl. n-ter Ordnung) bestimmt werden:

$$\lambda = -\frac{1}{RC} \tag{6.28}$$

Damit lautet die **homogene Lösung**:

$$u_{Ch}(t) = A \cdot e^{-t/RC} \tag{6.29}$$

Der Ausdruck RC hat dabei die Dimension einer Zeit und wird als **Zeitkonstante τ** bezeichnet:

$$\tau = RC \tag{6.30}$$

Als nächstes müssen wir eine partikuläre Lösung von (6.22) finden. Dazu bietet sich die **Dauerlösung** an, die sich einstellt, wenn nach langer Zeit die Eigenschwingung(en) abgeklungen ist (sind).

$$u_{C\,p}(t) = U_0 \tag{6.31}$$

Diese Dauerlösung können wir direkt aus Bild 6.5 erkennen. Für $t \to \infty$ nimmt die Kondensatorspannung den Wert U_0 an. In komplizierteren Fällen gewinnt man eine partikuläre Lösung durch einen „Ansatz von der Form der rechten Seite".

Die Gesamtlösung von (6.22) erhalten wir nun als Summe von homogener und partikulärer Lösung:

$$u_C(t) = u_{C\,h}(t) + u_{C\,p}(t) = A \cdot e^{-t/RC} + U_0 \tag{6.32}$$

Wir müssen nun noch aus der Anfangsbedingung

$$u_C(t = 0) = 0 \tag{6.33}$$

die Konstante A bestimmen:

$$u_C(0) = 0 = A \cdot e^{-0/RC} + U_0 \tag{6.34}$$

Daraus folgt $A = -U_0$ und schließlich:

$$u_C(t) = U_0(1 - e^{-t/RC}) \tag{6.35}$$

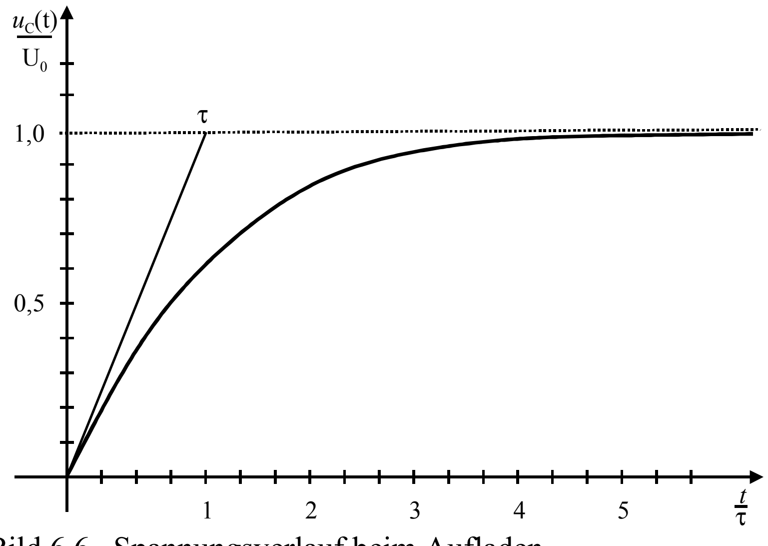


Bild 6.6 Spannungsverlauf beim Aufladen

7 Halbleiter

7.1 Leitungsmechanismus

Die elektrische Leitfähigkeit eines Stoffes hängt in erster Linie von der Anzahl der freien Ladungsträger ab. Bei Festkörpern sind im Gegensatz zu Flüssigkeiten und Gasen die Atome im Kristall fest an ihre Gitterplätze gebunden. Der elektrische Strom entspricht einer Bewegung von Elektronen. Vereinfacht (Bohr'sches Atommodell) kann man sich den Aufbau eines Atoms so vorstellen, dass um den positiv geladenen Atomkern (Protonen und Neutronen) Elektronen auf bestimmten Bahnen kreisen. Da die Protonenzahl gleich der Elektronenzahl ist, ist das Atom elektrisch neutral. Für das Einzelatom gibt es nach der Quantentheorie von Planck nur ganz bestimmte „Schalen" (K,L,M...), die wiederum in Unterschalen unterteilt sind, in denen sich die Elektronen aufhalten können. Jeder dieser Schalen ist ein Energieniveau zugeordnet. Das Energieniveau ist um so höher, je größer der Abstand des Elektrons vom Atomkern ist (Bild 7.1).

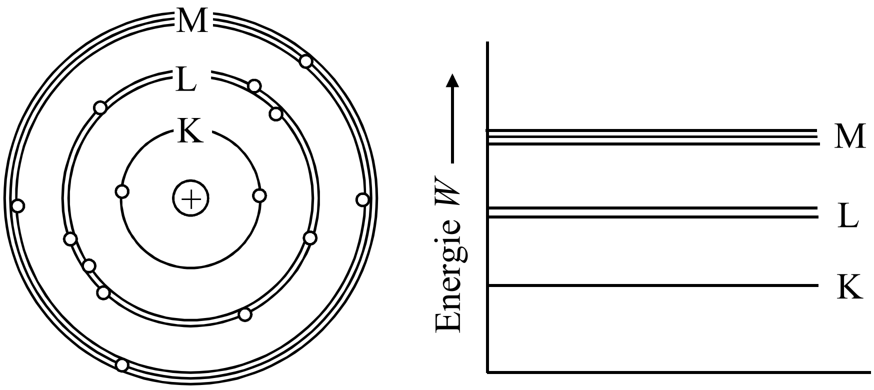


Bild 7.1 Schalenmodell (Silicium) und Energiestufen eines Einzelatoms

Im Gegensatz zu den diskreten Energiestufen beim Einzelatom (Bild 7.2 – links) ergeben sich z.B bei einem zweiatomigen Molekül infolge der gegenseitigen Krafteinwirkung der Atome Doppelniveaus (Bild 7.2 – Mitte). In einem Kristall spalten sich die Energiestufen noch mehr auf und verschmelzen zu einem Band (Bild 7.2 – rechts).

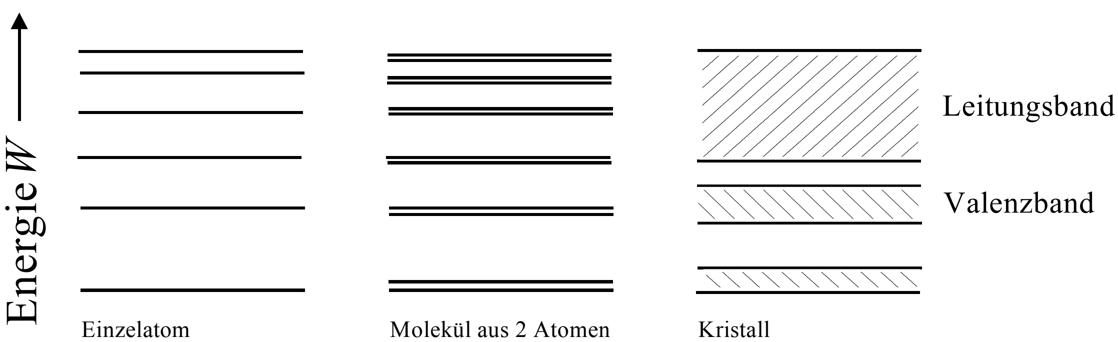


Bild 7.2 Bändermodell

Nur innerhalb dieser Bänder können Elektronen von Festkörpern einen Energiezustand einnehmen. Für das elektrische Verhalten sind das Valenzband, das Leitungsband und der Abstand dazwischen von Bedeutung.

Das Valenzband ist das Energieband der äußeren bei –273 °C voll besetzten Schale. Das Energieband darüber wird als Leitungsband bezeichnet. Elektronen, deren Energiezustand im Leitungsband liegt, sind frei beweglich und tragen als Leitungselektronen zur Leitfähigkeit bei. In Metallen (Bild 7.3 - links) überlappen sich Valenzband und Leitungsband. Metalle besitzen deshalb stets freie Elektronen. Bei Halbleitern ist das Valenzband voll besetzt. Im Leitungsband befinden sich bei -273 °C keine freien Elektronen; der Abstand zum Leitungsband ist aber gering, so dass bei höheren Temperaturen Elektronen in das Leitungsband gelangen können. Beim Isolator hingegen ist der Bandabstand groß. Auch bei hohen Temperaturen können Elektronen nur schwierig ins Leitungsband gelangen.

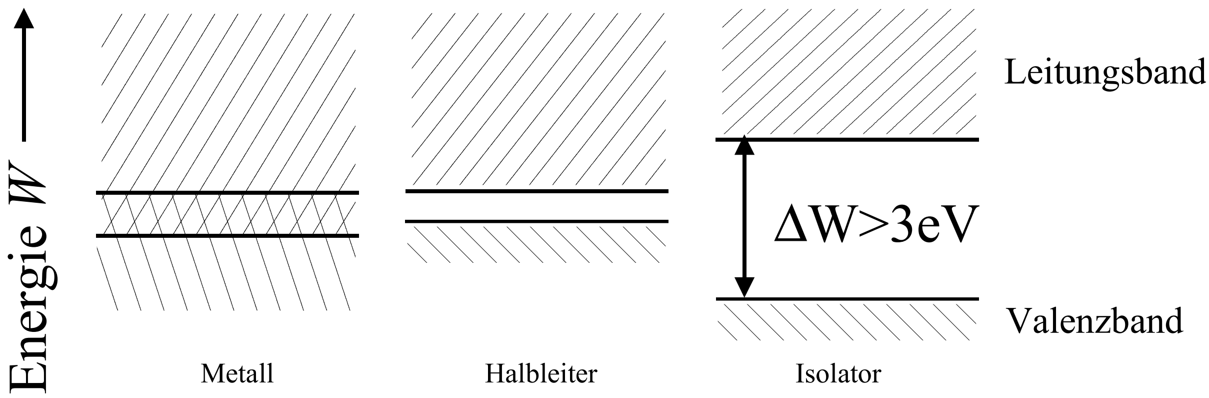


Bild 7.3 Energiebändermodell von Metall, Halbleiter und Isolator

Die Elektronen der äußeren Schale, die sogenannten Valenzelektronen bestimmen das chemische Verhalten. Alle Atome besitzen das Bestreben, Edelgaskonfiguration zu erreichen, d.h. 8 Elektronen auf der äußeren Schale zu haben. Eine Bindung zwischen zwei Atomen lässt sich durch Ausbildung eines gemeinsamen Elektronenpaars erreichen. Beide Elektronen stellen für die Bindung je ein Elektron zur Verfügung. Auf diese Weise erreichen beide Atome unter Einbeziehung des gemeinsamen Elektronenpaares die Edelgaskonfiguration.
Ein Siliciumatom z.B. hat 4 Elektronen auf der Außenschale. In einem Siliciumkristall teilt sich nun ein Siliciumatom jeweils ein Elektronenpaar mit 4 Nachbaratomen. Dies zeigt Bild 7.4 links in räumlicher Darstellung, rechts ist das Kristallgitter vereinfacht in einer Ebene dargestellt.

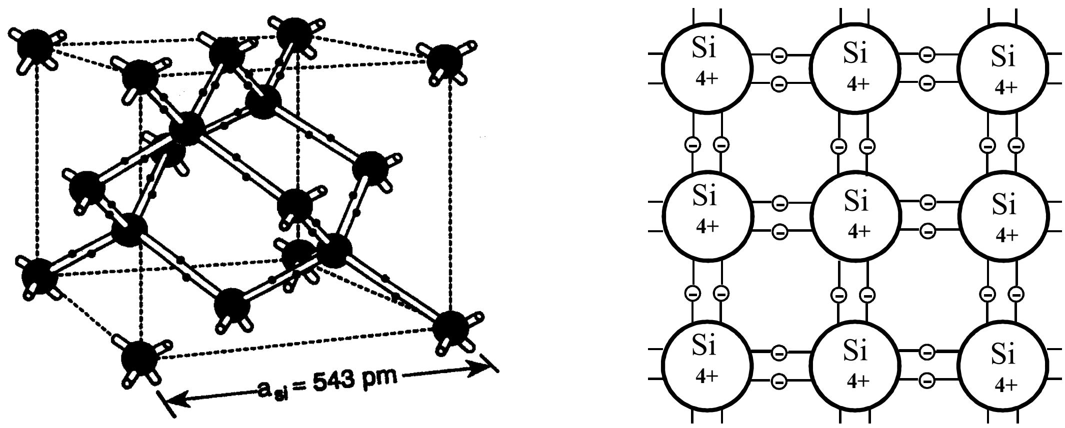
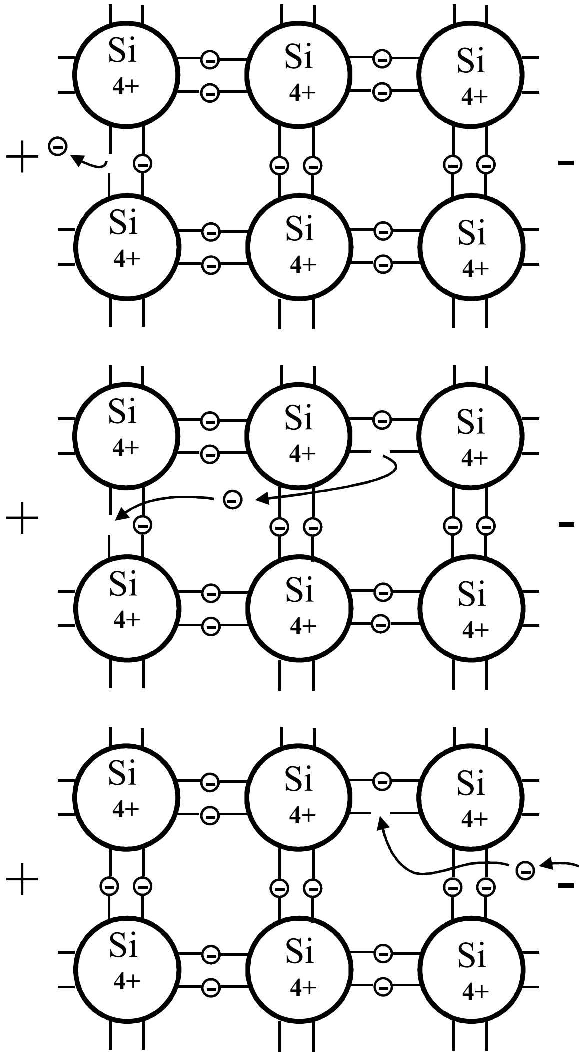


Bild 7.4 Das Kristallgitter von Silicium

7.2 Eigenleitung

Bei reinem Silicium befinden sich bei –273 °C alle Elektronen im Valenzband, d.h. sie dienen der Bindung zwischen den Atomen, wie in Bild 7.4 dargestellt. Durch Energiezufuhr, z.B. durch ein elektrisches Feld, Wärme oder Licht, können Elektronen in das Leitungsband gehoben werden. Dabei werden Elektronen aus ihren Bindungen herausgelöst und können sich frei im Gitter bewegen.

An der Stelle, wo zuvor das Elektron die positive Protonenladung ausgeglichen hat, ist nun ein Loch entstanden, das wie ein positiver Ladungsträger wirkt. In einem nach außen hin neutralen Material befinden sich also *genauso viele Löcher wie freie Elektronen* = Elektron-Loch-Paare. Auf ihrer Bewegung durch den Kristall können nun Elektronen in die Nähe von Löchern kommen, wo sie dann aufgrund der unterschiedlichen Ladungen angezogen werden und die Löcher wieder auffüllen. Dieser Vorgang wird als Rekombination bezeichnet. Bei jeder Temperatur halten sich die Paarbildung und die Rekombination die Waage, allerdings ist die Zahl der Elektron-Loch-Paare stark temperaturabhängig (bei 20°C Zunahme um etwa 5% pro °C).



Wird an einen solchen Halbleiter-Kristall eine Spannung angelegt, so verhält er sich wie ein Leiter (mit allerdings hohem elektrischen Widerstand). Die Elektronen bewegen sich vom negativen Pol zum positiven hin, die Löcher 'wandern' (allerdings etwa um den Faktor 3 langsamer) in die umgekehrte Richtung.

Dieser Vorgang ist in Bild 7.5 dargestellt. Oben hat ein Elektron die Bindung, also das Valenzband verlassen und bewegt sich nun nach links, weil dort eine positive Spannung anliegt. Dort, wo das Elektron vorher war, ist ein Loch entstanden. An dieser Stelle besteht nun ein postiver Ladungsüberschuss, denn der zugehörige Atomrumpf ändert ja seine Ladung nicht, im fehlt jetzt allerdings ein Elektron.

Findet nun in der Nähe eine weitere Elektron-Loch-Paar-Bildung statt (Bild 7.5 – Mitte), so kann das dort frei gewordene Elektron, das zuvor entstandene Loch auffüllen.

Auch das neu entstandene Loch kann wieder von einem von rechts kommenden Elektron besetzt werden.

Bild 7.5 Eigenleitung

7.3 Störstellenleitung

Für einen technischen Einsatz eignet sich ein Halbleiter aber erst, nachdem er vorher gezielt durch andere Stoffe *'verunreinigt'* wurde. Dieser Vorgang wird Dotierung genannt. Für eine Dotierung werden Stoffe aus der 3. oder 5. Gruppe des Periodensystems verwendet, also Stoffe, die entweder 3 oder 5 Valenzelektronen besitzen. In der Gruppe 3 finden wir die Elemente Bor (B), Aluminium (Al), Gallium (Ga) und Indium (In), in der Gruppe 5 stehen z.B. Phosphor (P) und Arsen (As). Werden nun solche Elemente in den Halbleiter-Kristall eingebaut (durch Diffusion oder Ionenimplantation), so können an diesen Stellen keine idealen Paarbindungen aufgebaut werden.

7.3.1 N-Leiter

Bei Elementen der 5. Gruppe ist *ein Elektron überzählig*, d.h. es wird nicht benötigt für eine Paarbindung. Dieses Elektron kann sich daher frei im Kristallgitter bewegen (= *bewegliche negative Ladung*). Stoffe dieser Gruppe nennt man Donatoren (donare = geben), das Halbleiter-Material ist wegen der zusätzlichen Elektronen n-dotiert. Die Elektronen sind im n-dotierten Halbleiter-Material die *Majoritätsträger*, die Löcher die *Minoritätsträger*. Bild 7.6 zeigt links, wie ein Donatoratom, hier Phosphor in den Silciumkristall eingebaut ist. Das überzählige Elektron, das nun keine Bindung eingehen kann, geht leicht ins Leitungsband über, ist also leicht beweglich. Rechts zeigt Bild 7.6 eine vereinfachte Darstellung, die wir für die weiteren Überlegungen benutzen wollen. Es sind nur noch die Donatoratome und ihre (praktisch) freien, leicht beweglichen Elektronen dargestellt. Die Atomrümpfe sind natürlich weiterhin unbeweglich.

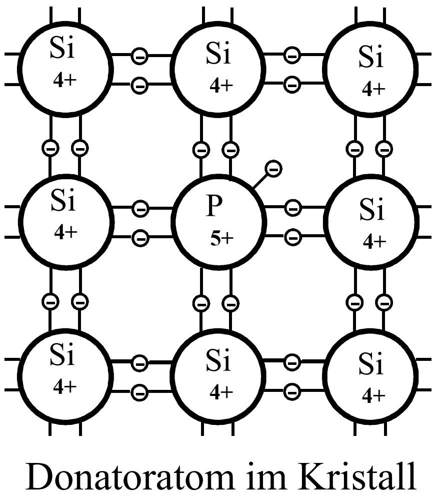


Bild 7.6 N-Leiter

7.3.2 P-Leiter

Bei Elementen der 3. Gruppe *fehlt ein Elektron*, sie benötigen für den Aufbau einer 8er-Schale ein weiteres Elektron. Diese Stoffe nennt man daher Akzeptoren (acceptare = annehmen). Dieses fehlende Elektron wirkt wie ein positiver Ladungsträger (Loch). Das Halbleiter-Material ist p-dotiert. Im p-dotierten Material sind die Löcher die *Majoritätsträger* und die Elektronen die *Minoritätsträger*.

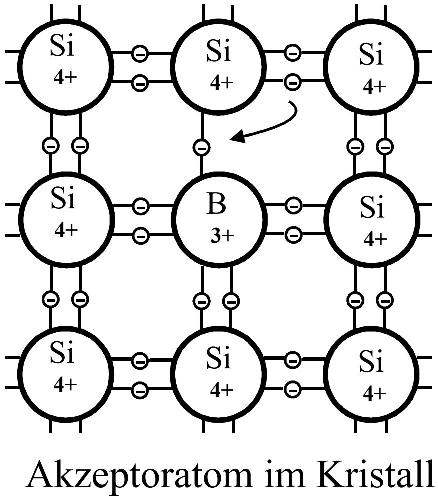


Bild 7.7 P-Leiter

In Bild 7.7 ist dargestellt, wie ein Akzeptoratom, hier Bor, in den Silciumkristall eingebaut ist. Da das Boratom nur 3 Valenzelektronen mitbringt, kann sehr leicht ein Elektron aus dem Leitungsband eingefangen werden und die vierte Bindung eingehen. Rechts zeigt Bild 7.7 wieder eine vereinfachte Darstellung. Es sind nur noch die Akzeptoratome und ihre Fehlstellen (Löcher) dargestellt, die wie leicht bewegliche positiven Ladungen wirken. Auch hier sind natürlich die Atomrümpfe unbeweglich.

Bild 7.8 zeigt schließlich die Lage der Energieniveaus der Störstellen im Bändermodell. Man erkennt, dass relativ viel Energie (1,12 eV) erforderlich ist, um ein Elektron eines Siliciumatoms ins Leitungsband zu bringen. Man braucht aber nur sehr wenig Energie, um das „überschüssige“ Elektron des Phosphoratoms ins Leitungsband zu heben, oder um Elektronen aus dem Valenzband auf das Akzeptorniveau zu heben.

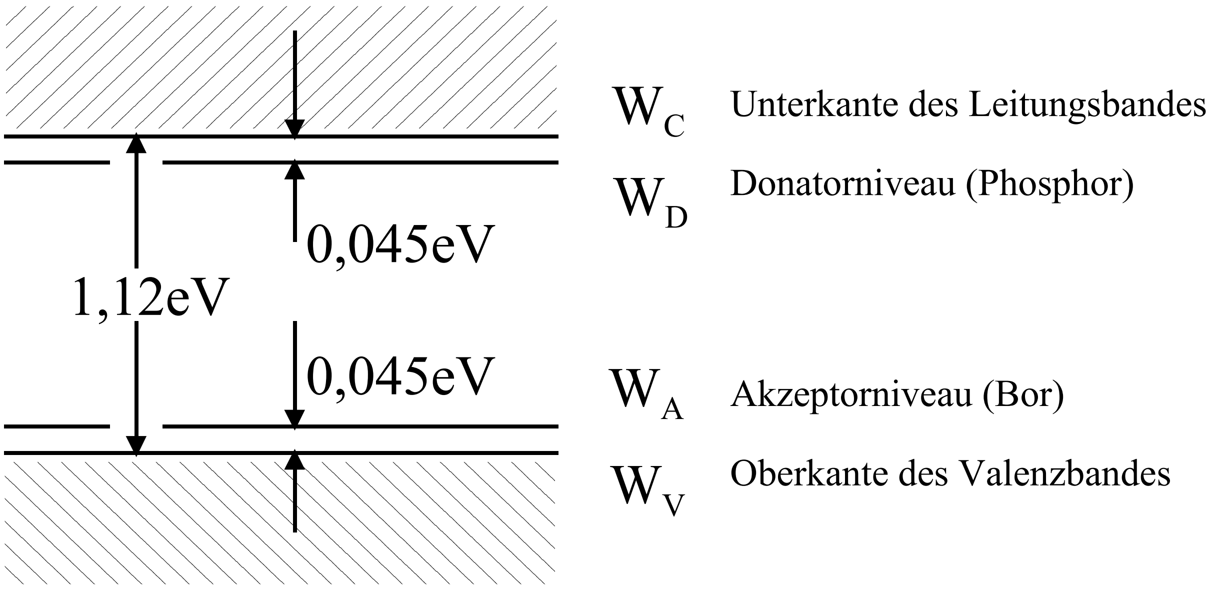


Bild 7.8 Lage der Energieniveaus der Störstellen im Bändermodell.

8 Dioden

8.1 Der PN-Übergang

Wir wollen nun untersuchen, was passiert, wenn p-dotiertes und n-dotiertes Material aneinandergrenzen (Bild 8.1). Die nachfolgende Betrachtung ist stark vereinfacht, genügt aber für ein prinzipielles Verständnis.

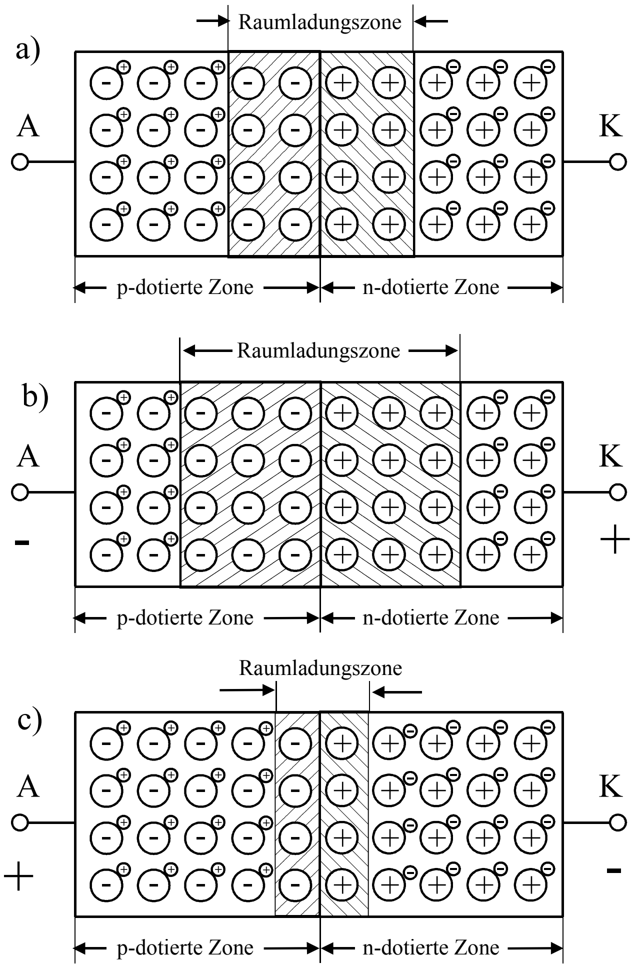


Bild 8.1 PN-Übergang

Die leicht beweglichen Majoritäts-Ladungsträger (Löcher links, Elektronen rechts) diffundieren in die jeweils andere Zone und rekombinieren dort. Die zurückbleibenden unbeweglichen Atomrümpfe sind nun nicht mehr elektrisch neutral. Sie bilden eine Raumladungszone. Das von den Atomrümpfen erzeugte elektrische Feld wirkt einer beliebigen Ausbreitung der Raumladungszone entgegen; es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein.

In Bild 8.1 b) wurde nun an die Anordnung eine Spannung angelegt, so dass die Seite A (p-dotiert) gegenüber der Seite K (n-dotiert) negativ ist. Dadurch werden Löcher nach links und Elektronen nach rechts abgezogen. Die Raumladungszone verbreitert sich. In dieser Situation kann nur ein sehr kleiner Strom dadurch fließen, dass in der Raumladungszone durch Elektronen-Loch-Paarbildung neue bewegliche Ladungsträger entstehen. Die Raumladungszone stellt eine Sperrschicht dar.

In Bild 8.1 c) ist die außen angelegte Spannung nun so gepolt, dass die Seite A positiv gegenüber der Seite K ist. Dadurch werden die Löcher im p-Gebiet nach rechts und die Elektronen im n-Gebiet nach links jeweils in die Raumladungszone getrieben. Da dort Löcher und Elektronen rekombinieren, können von beiden Seiten ständig neue Ladungsträger nachgeliefert werden. Es fließt ein Strom, der bereits bei einer kleinen anliegenden Spannung große Werte annehmen kann.

Offensichtlich hat ein solcher PN-Übergang eine Ventilwirkung für den elektrischen Strom. Bei einer „Polung“ wie in Bild 8.1 b) fließt praktisch kein Strom, während bei einer Polung wie in Bild 8.1 c) die Anordnung „durchlässig“ ist. Ein Bauelement mit dieser Eigenschaft heißt Diode.

Bild 8.2 zeigt die typische Kennlinie einer Halbleiterdiode und das zugehörige Schaltzeichen.

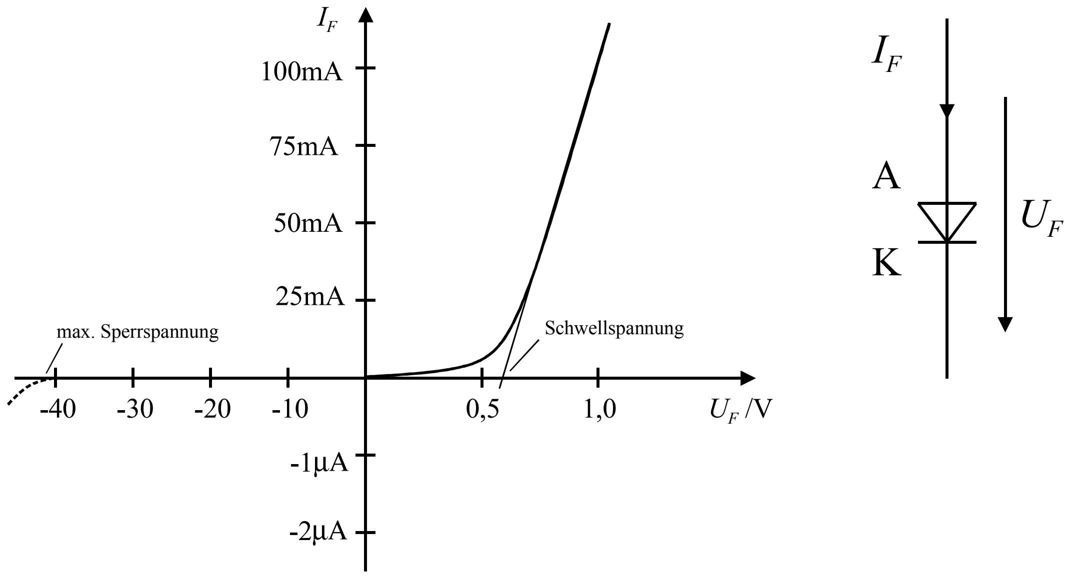


Bild 8.2 Kennlinie einer Diode und zugehöriges Schaltzeichen

Es handelt sich dabei um eine Diode für kleine Ströme und Spannungen, wie sie zur Signalverarbeitung verwendet werden kann. Man beachte, dass in Bild 8.2 die Achsen verschieden skaliert sind, damit sowohl der Durchlassbereich (rechte Seite), wo bei kleinen Spannungen bereits relativ große Ströme fließen, als auch der Sperrbereich, wo erst bei relativ großen Spannungen ein nennenswerter Stromfluss beginnt, entsprechend dargestellt werden können.

Die mit „A“ bezeichnete Seite der Diode heißt Anode, die mit „K“ bezeichnete Seite heißt Kathode (siehe auch Bild 8.1). Bei dem Bauteil „Diode“ ist die Kathode oft mit einem Ring gekennzeichnet. Der Pfeil im Schaltzeichen der Diode symbolisiert die Richtung, in die der Strom durch die Diode fließen kann.
In Durchlassrichtung beginnt erst ab einer gewissen Spannung Strom zu fließen. Der Schnittpunkt der durch eine Gerade approximierten Kennlinie im Durchlassbereich heißt Schwellspannung oder Knickspannung $\boldsymbol{U_k}$**.** Dieser Wert liegt bei Si-Dioden bei ca. 0,6V. Der Durchlassstrom darf bei Signaldioden z.B. 100mA betragen; in der Leistungselektronik gibt es Dioden für Durchlassströme von mehreren 1000A.

Die Kennlinie einer Diode im Durchlassbereich kann näherungsweise durch folgende Gleichung beschrieben werden:

$$I = I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right)$$

mit:

I_S	=	Sperrstrom
U_T	=	Temperaturspannung ($U_T = kT/e \approx 25$ mV bei T = 300 K)
k	=	Boltzmann-Konstante ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
T	=	absolute Temperatur
e	=	Elementarladung

In Sperrrichtung beginnt erst bei einer betragsmäßig viel größeren Spannung ein Strom zu fließen. Diese Durchbruch- oder Zenerspannung U_Z kann bei einigen 10V (Signaldioden) bis zu mehren 1000V (Leistungselektronik) liegen. Der Sperrstrom ist normalerweise unerwünscht und kann zur Zerstörung der Diode führen, denn wegen $P = U \cdot I$ entsteht dann Verlustleistung in der Diode.

8.2 Spezielle Dioden

Dioden werden für unterschiedliche Einsatzzwecke hergestellt. Die bekannteste Anwendung ist sicherlich der „Gleichrichter", den man benötigt, um aus der Wechselspannung unseres Versorgungsnetzes Gleichspannung zu erzeugen, wie sie z.B. zum Betrieb elektronischer Geräte benötigt wird. Signaldioden werden in der analogen und digitalen Signalverarbeitung benötigt, z.B. kann man mit Dioden logische Verknüpfungen realisieren. Daneben gibt es Zenerdioden, Photodioden, Photoelemente, Kapazitätsdioden, Leuchtdioden, Halbleiterlaser,Tunneldioden etc. Im Folgenden werden die wichtigsten Anwendungen vorgestellt.

8.2.1 Gleichrichter

Bild 8.3 zeigt die denkbar einfachste Schaltung für ein Netzgerät, wie es zur Versorgung einer elektronischen Schaltung „aus der Steckdose" verwendet werden könnte.

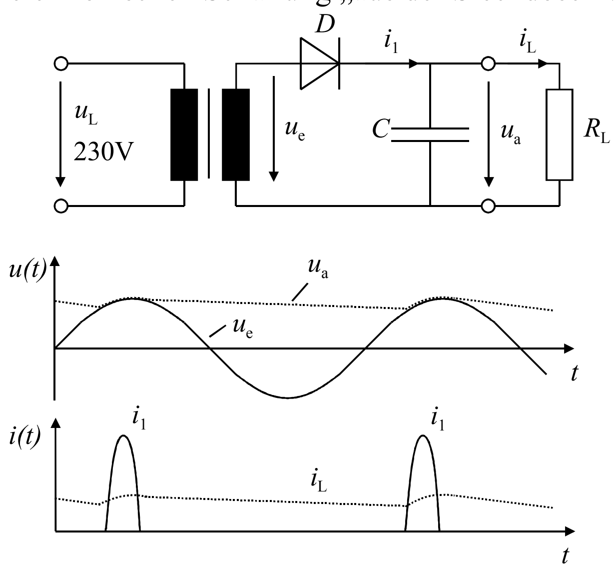


Bild 8.3 Netzteil mit Einweggleichrichter

Die Spannung u_e wird mit einem Transformator „potenzialfrei" aus der 230V-Netzspannung erzeugt. Sie hat wie die Netzspannung einen sinusförmigen Verlauf. Jedesmal, wenn die Spannung u_e größer wird, als die Spannung u_a am Kondensator, beginnt die Diode zu leiten. Dabei wird der Kondensator durch den impulsförmigen Strom i_1 nachgeladen. Dessen Kurvenform hängt wesentlich von den Eigenschaften des Transformators ab (Innenwiderstand etc.). Die Breite des Strompulses i_1 ist um so größer, je mehr der Kondensator in der Pause dazwischen entladen wurde. Die Flächen unter i_1 und i_L in Bild 8.3 müssen übrigens gleich groß sein, denn die durch den Strom i_L entnommene Ladung muss durch den Stromimpuls i_1 wieder zugeführt werden.

Vorteilhafter als der soeben erläuterte Einweggleichrichter, der nur bei der positiven Halbwelle aktiv wird, ist der in Bild 8.4 gezeigte Brückengleichrichter.

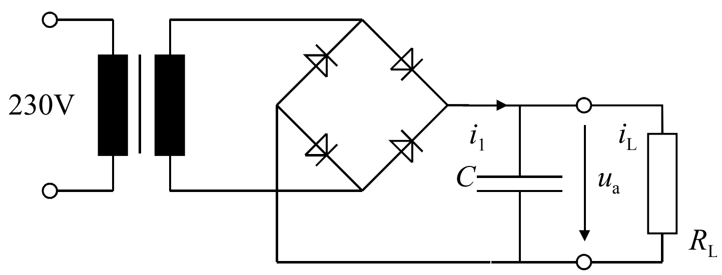


Bild 8.4 Netzteil mit Brückengleichrichter

Hier wird in jeder Halbwelle der sinusförmigen Spannung nachgeladen. Dadurch kann der Kondensator kleiner gewählt werden, denn die Entladezeit ist gegenüber dem Einweggleichrichter viel kleiner.

8.2.2 Signaldioden

Dioden können auch zur Signalverarbeitung benutzt werden. Bild 8.5 zeigt, wie eine Oder-Verknüpfung realisiert werden kann.

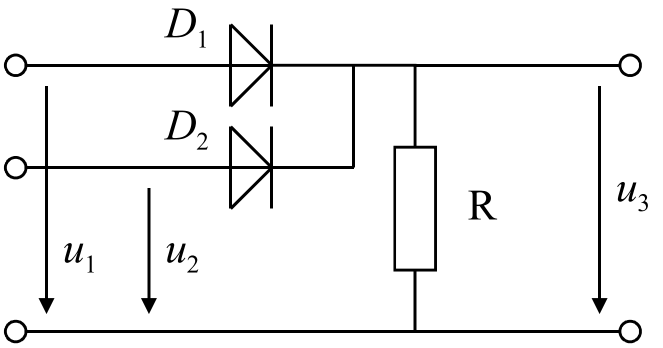


Bild 8.5 Oder-Verknüpfung

Werden an die Schaltung Spannungen u_1 und u_2 angelegt, die logische Signale repräsentieren, z.B. 5V für eine logische Eins, so erscheint am Ausgang u_3 die jeweils größere der beiden Spannungen, weil die zugehörige Diode durchschaltet. Dies entspricht aber einer Oder-Verknüpfung.
Bild 8.6 zeigt die zugehörigen Signalverläufe.

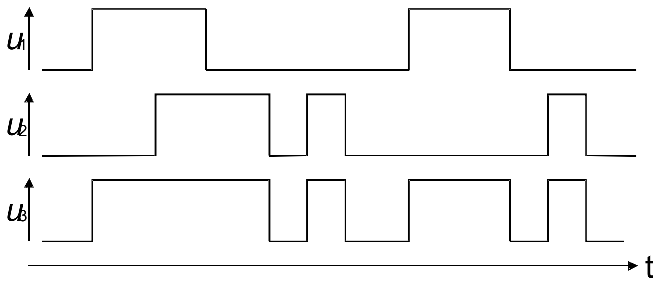


Bild 8.6 Signalverläufe zu Bild 8.5

Von der Möglichkeit, logische Verknüpfungen mit Dioden zu realisieren wird allerdings heute kaum noch Gebrauch gemacht, da es wesentlich bessere Möglichkeiten gibt, die wir auch noch kennenlernen. Dennoch spielen Signaldioden in der Elektronik eine große Rolle (Es gibt ja nicht nur Digitaltechnik).

8.2.3 Zenerdioden

Bei Zenerdioden wird der elektrische Durchbruch in Rückwärtsrichtung ausgenutzt. Durch unterschiedliche Dotierung werden Zenerdioden mit verschiedenen Z-Spannungen von 2,7V bis 200V hergestellt. Genau genommen unterscheidet man den Zenerdurchbruch (überwiegt bei Z-Spannungen unterhalb von 5,5V und den Lawinendurchbruch (überwiegt bei Z-Spannungen oberhalb von 5,5V). Die günstigsten Eigenschaften (Temperaturkoeffizient) haben Zenerdioden mit einer Z-Spannung von 5,5V. Bild 8.7 zeigt eine mit einer Zenerdiode realisierte Stabilisierungsschaltung: Auch bei schwankender Eingangsspannung bleibt U_a weitgehend konstant.

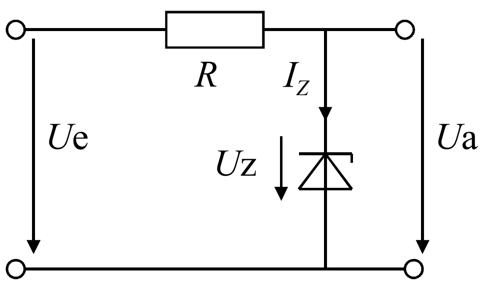


Bild 8.7 Stabilisierungsschaltung

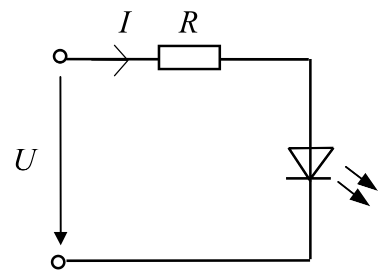
Beim Einsatz von Zenerdioden muss besonders auf die Verlustleistung geachtet werden, denn durch die Zenerdiode fließt Strom **und** es liegt Spannung an. Auch im Vorwiderstand R können erhebliche Verluste entstehen. Müssen stabilisierte Spannungen für größere Leistungen bereitgestellt werden, so setzt man dafür spezielle ICs (Integrierte Schaltungen) ein.

8.2.4 Photodioden und Photoelemente

Photodioden enthalten PN-Übergänge, die von Licht bestrahlt werden können. Dringt ein Photon in den PN-Übergang ein, so kann es dort die Bildung eines Elektron-Loch-Paares verursachen. Dadurch steigt der Strom durch die in Rückwärtsrichtung betriebene Diode. Die Photodiode kann deshalb als optischer Empfänger bzw. Sensor verwendet werden. (Lichtschranke, Empfänger für Fernbedienung im TV-Gerät).
Photoelemente unterscheiden sich prinzipiell nicht von Photodioden. Hier wird aber keine Sperrspannung angelegt. Bildet sich infolge Lichteinfalls ein Elektron-Loch-Paar, so wird in der immer vorhandenen Raumladungszone (Bild 8.1 a) das Elektron zur N-Schicht und das Loch zur P-Schicht befördert. Die Ladungen werden also getrennt und es entsteht eine Spannung, die an den Anschlüssen abgegriffen werden kann. Neben der Verwendung als optischer Sensor ist insbesondere der Einsatz großflächiger Photoelemente als „Solarzellen" von Bedeutung.

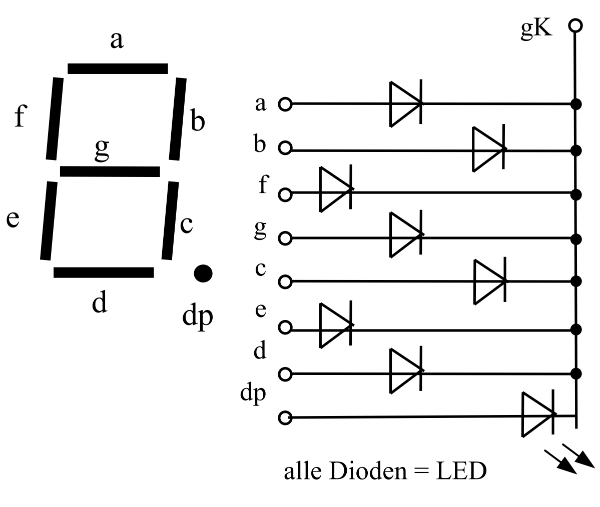
8.2.5 Leuchtdioden

Leuchtdioden bestehen nicht aus Silicium, sondern aus Mischkristall-Halbleitern wie z.B. GaAs (Galliumarsenid). Bei diesen Halbleitern strahlen die Elektronen, die mit Löchern rekombinieren, Energie in Form von Licht ab. Die Wellenlänge des abgestrahlten Lichts hängt vom Halbleitermaterial ab. Am häufigsten kommen LEDs vor mit den Farben rot, gelb und grün (seit wenigen Jahren auch blau, allerdings bisher mit schlechtem Wirkungsgrad). Den besten Wirkungsgrad erzielen LEDs, die im Infrarot-Bereich strahlen. Das abgestrahlte Spektrum ist i.a. sehr schmalbandig (fast kohärentes Licht = Licht mit nur einer Wellenlänge).



LEDs werden in Durchlassrichtung betrieben. Zur Strombegrenzung benötigt eine LED einen Vorwiderstand (Bild 8.8). Die Knickspannnung U_K liegt je nach Typ bei ca. 2-2,3V. Ein typischer Wert für den Durchlassstrom, bei dem die LED hell leuchtet, ist 10mA; entsprechend ist der Vorwiderstand der LED zu dimensionieren.

Bild 8.8 LED mit Vorwiderstand



LEDs haben in vielen Anwendungen Glühlampen ersetzt, wenn es um die Anzeige binärer Zustände und um Funktionsanzeigen geht (PC, Drucker, Unterhaltungselektronik, Armaturenbrett KFZ). Beliebt ist auch die Gruppierung mehrerer LEDs zu sogenannten Sieben-Segment-Anzeigen (Bild 8.9) Damit können Ziffernanzeigen realisiert werden (z.B. Radiowecker).

Infrarot-LEDs werden z.B. zur Datenübertragung zwischen Fernbedienung und TV-Gerät benutzt.

Bild 8.9 Sieben-Segment-Anzeige

9 Bipolare Transistoren

Der Transistor ist ein Bauelement, das einen „Verstärkereffekt“ zeigt. Er wird deshalb auch als aktives Bauelement bezeichnet im Gegensatz zu den „passiven“ Bauelementen Widerstand, Kondensator, Diode etc. Aktive Bauelemente sind notwendig, um das zu realisieren, was man Elektronik nennt. Zunächst war es die Elektronenröhre, die Rundfunk und Fernsehen, aber auch erste elektronische Computer (ENIAC, 1947) ermöglicht hat. Der Transistor wurde 1947 erfunden, es hat aber fast 20 Jahre gedauert, bis er die Elektronenröhre in praktisch allen Anwendungen ersetzt hat.

9.1 Wirkungsweise

In Bild 9.1 ist eine Anordnung dargestellt, die aus 3 aufeinanderfolgenden Halbleiterzonen besteht, von denen die beiden äußeren n-dotiert und die innere p-dotiert ist. Dadurch entstehen, wie wir schon wissen, zwei Sperrschichten. Dies ist durch die in Bild 9.1 ebenfalls dargestellten beiden Dioden symbolisiert.

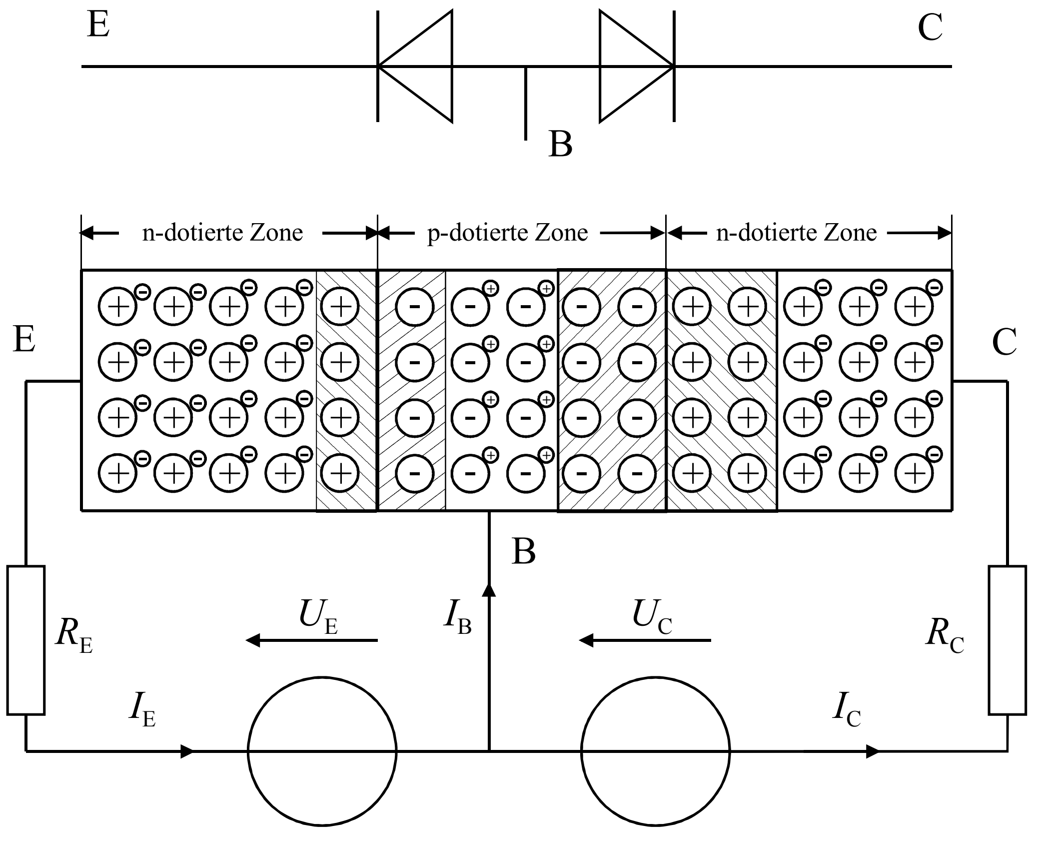


Bild 9.1 Zur Wirkungsweise des Transistors

Wir legen nun zwischen dem Anschluss B (Basis) und dem Anschluss C (Kollektor) eine Spannung an, vorsichtshalber über einen Widerstand. Der Anschluss E (Emitter) sei zunächst noch offen. Die Spannung U_C sei positiv, d.h. der rechte PN-Übergang in Bild 9.1 wird in Sperrrichtung betrieben: Der Kollektor ist positiv und zieht Elektronen aus der Sperrschicht. Die Basis ist negativ, weshalb sie Löcher aus der Sperrschicht zieht. Die Sperrschicht verbreitert sich und ist praktisch frei von Ladungsträgern (außer eventuellen Elektron-Loch-Paarbildungen). Deshalb fließt erwartungsgemäß nur ein sehr kleiner Strom.

Würde nun das in Bild 9.1 dargestellte, aus 2 Dioden bestehende „Ersatzschaltbild“ das Verhalten der Anordnung richtig beschreiben, so würde sich der Kollektorstrom **auch dann nicht ändern**, wenn an die „Basis-Emitterstrecke“ über den Widerstand R_E eine Spannung angelegt wird, die einen Durchlassstrom über Basis und Emitter fließen lässt.

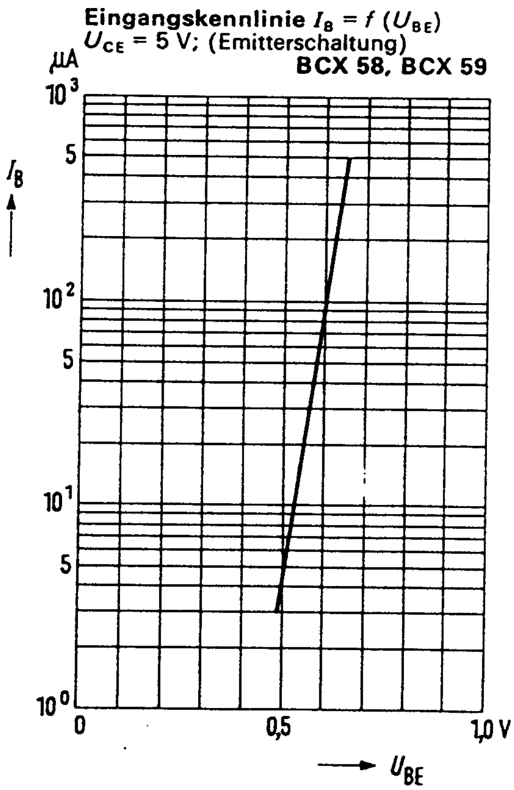
Dem ist aber nicht so, wenn 2 Voraussetzungen erfüllt sind:

- Die Basis (P-Schicht) ist sehr dünn (30 bis 80µm)
- Die Basis ist wesentlich geringer dotiert als der Emitter.

Da infolge der unterschiedlichen Dotierungen die Dichte freier Elektronen in der Emitterschicht sehr viel größer ist, als die Dichte der Löcher in der Basis, fließt zwar ein großer Elektronenstrom vom Emitter zur Basis, aber nur ein kleiner Löcherstrom von der Basis zum Emitter. Da die Basis sehr dünn und schwach dotiert ist, rekombiniert nur ein kleiner Teil der vom Emitter kommenden Elektronen mit den Löchern in der Basis. Die meisten Elektronen diffundieren durch die Basis hindurch und gelangen in die Sperrschicht zwischen Basis und Kollektor. Dort werden sie vom Kollektor, der ja positives Potenzial hat, angezogen.

Im Endeffekt sorgt also ein kleiner Basisstrom dafür, dass ein großer Strom zwischen Kollektor und Emitter fließt. Diese Stromverstärkung liegt bei Kleinsignal-Transistoren zwischen 100 und 1000 und bei Leistungstransistoren zwischen 10 und 100.

In Bild 9.2 sind typische Kennlinien eines Kleinsignal-Transistors dargestellt. Die Eingangskennlinie gibt den Zusammenhang zwischen der Spannung U_{BE} zwischen Basis und Emitter und dem Basisstrom I_B an. Diese Kennlinie unterscheidet sich nicht nennenswert von der Durchlasskennlinie einer Siliciumdiode. Man beachte, dass I_B logarithmisch aufgetragen ist.



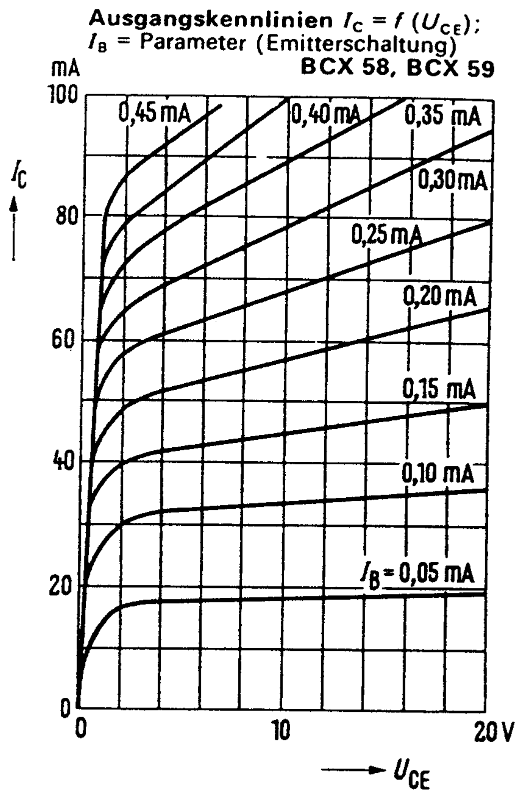


Bild 9.2 Typische Kennlinien eines Transistors

Interessanter ist das Ausgangskennlinien-Feld. Dort ist der Zusammenhang zwischen der Spannung U_{CE} zwischen Kollektor und Emitter und dem Kollektorstrom I_C aufgetragen, wobei der Basisstrom I_B als Parameter an die Kurven angetragen ist, d.h. für jeden Basisstrom gibt es eine andere Kurve. Betrachten wir z.B. den Fall, dass U_{CE} gerade 10V beträgt und dass I_B von 0,1mA auf 0,2mA vergrößert wird. Wir können aus der Ausgangskennlinie für I_B=0,1mA erkennen, dass bei U_{CE}=10V ein Kollektorstrom von I_C = 34mA fließt und aus der Ausgangskennlinie für I_B=0,2mA sehen wir, dass wiederum bei U_{CE}=10V ein Kollektorstrom von I_C = 56mA fließt. Bei einer Änderung des Basisstroms um 0,1mA hat sich also der Kollektorstrom um 56mA-34mA=22mA geändert. Dies ist also eine Verstärkung um den Faktor 220.

9.2 Schaltzeichen

Wir haben bisher einen Transistor kennengelernt, der aus der Schichtenfolge „npn“ aufgebaut ist. Mit der umgekehrten Schichtenfolge „pnp“ erhält man einen dazu komplementären Transistor. Dieser funktioniert im Prinzip genauso, wir müssen in unseren bisherigen Überlegungen nur überall „Elektronen“ mit „Löchern“ und „Plus“ mit „Minus“ vertauschen.
Bild 9.3 zeigt sowohl das Schaltzeichen eines NPN- als auch eines PNP-Transistors. Zusätzlich ist noch einmal die Schichtenfolge dargestellt.

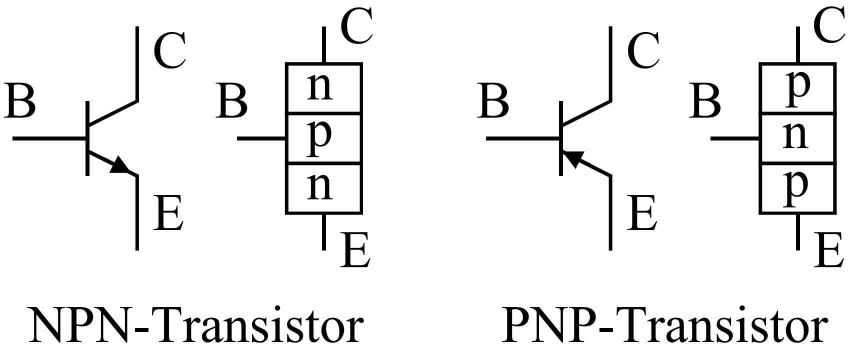


Bild 9.3 Schaltzeichen und Aufbau von Bipolar-Transistoren

Am besten merkt man sich, dass der Pfeil am Emitter die Durchlassrichtung für die Basis-Emitter-Diode angibt und somit auch die Richtung des Stroms zwischen Emitter und Kollektor. Beim NPN-Transistor muss die Basis also um etwa 0,6V positiver sein als der Emitter, damit ein Basisstrom fließen kann. Der davon gesteuerte Kollektorstrom fließt also in den Kollektor hinein. Der Kollektor muss deshalb positiv gegenüber dem Emitter sein.

9.3 Anwendungsbeispiel

Mit einem Transistor kann ein Ausgangsstrom kontinuierlich über einen Eingangsstrom gesteuert werden, wobei ein Verstärkungseffekt auftritt. Man kann mit einer kleinen Änderung des Eingangsstroms eine große Änderung des Ausgangsstroms herbeiführen. Solche „analogen“ Anwendungen sind vor allem in der Nachrichtentechnik wichtig (Hochfrequenz-Verstärker, Oszillatoren („Sender“) Audioverstärker, Videoverstärker etc.). In der Automatisierungstechnik gibt es zwar vereinzelt noch analoge Signalverarbeitung; dann verwendet man aber praktisch immer analoge integrierte Schaltungen (z.B. Operationsverstärker), die zwar intern aus vielen Transistorfunktionen bestehen, von denen der Anwender aber „nichts merkt“. Bei digitaler Elektronik, insbesondere in Mikrocomputern werden Transistoren als „Schalter“ verwendet. Das heißt, der Transistor wird entweder so angesteuert, dass er praktisch keinen Kollektorstrom führt (der Schalter ist offen) oder ganz „durchgesteuert“ ist, d.h.

man führt der Basis so viel Strom zu, dass die Kollektor-Emitterspannung einen kleinen Wert annimmt (der Schalter ist geschlossen).

Wir wollen nun an einem konkreten Beispiel betrachten, wie ein Transistor als Schalter (mit Verstärker-Eigenschaft) verwendet werden kann. Bei dieser Gelegenheit erfahren wir gleichzeitig noch etwas über „Mikrocontroller".

Mikrocontroller sind komplette Mikrocomputer, die als IC (Integrated Circuit) auf einem Siliciumchip realisiert sind. Ein solches IC enthält eine große Anzahl Transistoren[1]. Ein Mikrocontroller besteht wie ein „großer" Computer auch, mindestens aus einer CPU (Central Processing Unit), einem ROM (Read-only Memory) und einem RAM (Random Access Memory). Außerdem muss ein Mikrocontroller noch über Peripherie (Ein-/Ausgabe) verfügen, damit er seine Aufgabe erfüllen kann. Im einfachsten Fall sind dies binäre Ein- oder Ausgänge, die von der CPU wie eine Speicherstelle gelesen oder geschrieben werden können. Solche Ein- oder Ausgänge werden als „Port" bezeichnet.

Bild 9.4 zeigt nun eine Schaltung, die mit einem solchen Mikrocontroller aufgebaut ist. Dieser Mikrocontroller soll unter anderem die Aufgabe haben, mit einer LED zu blinken. Dabei seien allerdings die Ausgangsports zu „schwach", um den für die LED erforderlichen Strom direkt zu liefern. Hier kann nun ein Transistor als gesteuerter Schalter verwendet werden. Setzt der Mikrocontroller das Port P1.3 auf Null, so fließt kein Basisstrom und somit auch kein Kollektorstrom; die LED bleibt dunkel. Zum Einschalten der LED genügt es, dass z.B. ein Strom von ca. 0,1mA in die Basis des Transistors fließt. Dann ist bei einem Kollektorstrom von 10mA (siehe Ausgangskennlinie in Bild 9.2) der Transistor durchgeschaltet, das heißt am Transistor fällt nur noch die geringe „Sättigungsspannung" U_{CEsat} ab. Der Widerstand R_2 muss nun so dimensioniert werden, dass bei einer „Eins" an P1.3 ein genügend großer Basisstrom fließt. Dabei müssen die Eigenschaften des Mikrocontroller-Ports und die Eingangskennlinie des Transistors berücksichtigt werden. Der Widerstand R_3 wird so bestimmt, dass unter Berücksichtigung der Versorgungsspannung, der Durchlassspannung der LED und der Sättigungsspannung U_{CEsat} ein Strom von etwa 10mA fließt.

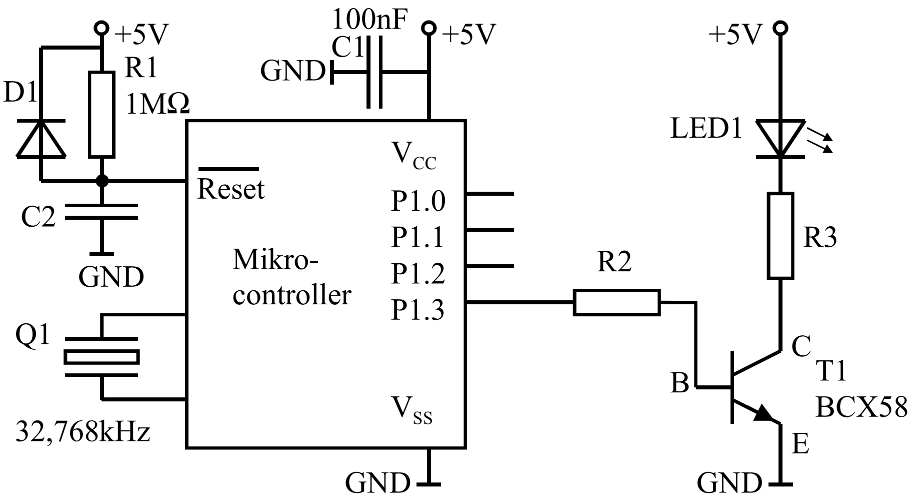


Bild 9.4 Blinklicht mit Mikrocontroller

[1] Allerdings handelt es sich dabei nicht um bipolare Transistoren, sondern um Feldeffekt-Transistoren.

Anhand der Schaltung in Bild 9.4 sollen noch ein paar weitere Details erläutert werden. So fällt auf, dass gar keine „richtigen“ Stromkreise (Maschen) eingezeichnet sind. Stattdessen werden die Symbole „GND“ (Ground) und „+5V“ benutzt, um zu zeigen, welche Schaltungsteile mit dem negativen (hier GND) und welche mit dem positiven Pol (hier +5V) der Versorgungsspannung verbunden sind. Dies ist zweckmäßig, denn in einer umfangreichen elektronischen Schaltung sind viele Punkte an diese Potenziale angeschlossen, und der Schaltplan würde sehr unübersichtlich, wenn auch diese Verbindungen durch Linien dargestellt wären. Eine Versorgungsspannung von 5V ist übrigens typisch für Digitalschaltungen. Neuerdings geht der Trend allerdings zu niedrigeren Spannungen, z.B. 3,3V. Dadurch können die Verluste bei hohen Taktfrequenzen reduziert werden.

In Bild 9.4 sehen wir auch 2 Anwendungen für Kondensatoren. Der Kondensator C1 dient zum Stützen oder „Abblocken“ der Versorgungsspannung. Die Stromaufnahme eines Digital-ICs unterliegt infolge der internen Schaltvorgänge oft sehr starken, schnellen (hochfrequenten) Schwankungen. Der Kondensator sorgt dafür, dass die Versorgungsspannung am IC dennoch einigermaßen glatt bleibt. Der hier angegebene Wert von 100nF ist typisch für solche Anwendungen. Meist hat man für mehrere ICs gemeinsam zusätzlich noch einen größeren Kondensator z.B. 10µF (Elektrolyt), sodass auch niederfrequente Schwankungen gestützt werden. Mit dem Kondensator C2, dem Widerstand R1 und der Diode D1 ist eine sogenannte Reset-Schaltung realisiert. Ein Mikrocontroller muss nämlich nach dem Einschalten in einen definierten Zustand gebracht werden. Dazu ist der Eingang Reset\ vorgesehen. Der Querstrich über dem Signalnamen (oder z..B. ein „Back-Slash“ dahinter) bedeutet Negation. An diesem Eingang muss nach dem Einschalten der Versorgungsspannung für ein gewisse Zeit eine logische Null (kleine Spannung) angeliegen. Dies wird mit dem RC-Glied aus R1 und C1 erreicht. C1 ist zunächst entladen, sodass Reset\ auf Null gehalten wird. Erst wenn C2 über R1 auf eine bestimmte Spannung aufgeladen ist, läuft der Rechner los. Die Diode D1 dient dazu, den Kondensator beim Ausschalten schnell zu entladen.

Jeder Rechner arbeitet mit einem bestimmten Takt. Dieser Takt wird in der Regel mit einem Quarzoszillator erzeugt. Ein solcher Oszillator ist meist integriert, der Quarz muss aber extern angeschlossen werden (Q1 in Bild 9.4). Bei einer einfachen Anwendung genügt ein langsamer Takt, es kann dann z.B. ein Uhrenquarz (32,768 kHz) verwendet werden. Ein langsamer Takt hat den Vorteil, dass die Stromaufnahme einer solchen Schaltung gering bleibt und die Schaltung nur wenig Störungen aussendet. Für hohe Rechenleistung ist allerdings eine hohe Taktfrequenz erforderlich. Diese liegt bei etwas leistungsfähigeren Mikrocontrollern z.B. bei 16MHz, bei PCs wurde die 1-GHz-Schwelle bereits überschritten.

9.4 Daten des Transistors

Es sind eine ganze Anzahl von technischen Daten notwendig, um das Verhalten eines Transistors hinreichend zu beschreiben. Diese können sogenannten Datenblättern entnommen werden. Dort sind auch Kennlinien, wie die in Bild 9.2, enthalten. Für einfache Schaltanwendungen, auf die wir uns beschränken wollen, sind außer den zulässigen Grenzwerten (Wieviel Spannung, Strom und Verlustleitung „kann“ der Transistor) nur wenige Werte interessant. Ein wichtiger Wert ist die Gleichstromverstärkung B:

$$B = I_C / I_B \tag{9.1}$$

Sie gibt das Verhältnis von Kollektorstrom zu Basisstrom an und liegt bei Kleinsignaltransistoren meist in der Gegend von 100. Allerdings ist die Gleichstromverstärkung *B* nicht konstant, sondern vom Arbeitspunkt abhängig. In den Datenblättern ist diese Abhängigkeit als Funktion von I_C als Tabelle oder Diagramm angegeben. Verwendet man den Transistor als Schalter, so geht man im Zweifelsfall von einer kleineren Stromverstärkung aus, als dieser tatsächlich hat. Wenn bei dem Kollektorstrom, der bei durchgeschaltetem Transistor fließen soll, soviel Basisstrom fließt, dass der linke, fast senkrecht verlaufende Teil der Ausgangskennlinie (Bild 9.2) erreicht wird, so ist der Transistor durchgeschaltet. Er befindet sich im Sättigung- oder Übersteuerungsbereich. Der Bereich rechts davon heißt Verstärkungsbereich.

Für den Schaltbetrieb ist die Spannung wichtig, die sich bei durchgeschaltetem Transistor über Kollektor und Emitter einstellt. Diese wird als Sättigungsspannung U_{CEsat} bezeichnet und hängt vom Kollektorstrom ab. Sie liegt in der Größenordnung von 0,2 bis 0,3V und ist vom Arbeitspunkt abhängig. Der Spannungsabfall bei durchgeschaltetem Transistor kann auch durch den (differentiellen) Widerstand r_{CC} (typisch <100Ω) dargestellt werden.

Ist der Transistor ausgeschaltet, so fließt der Kollektor-Emitter-Reststrom I_{CE0} (Basis offen) oder I_{CES} (Basis mit dem Emitter verbunden). Dieser liegt je nach anliegender Kollektor-Emitter-Spannung z.B. bei 100nA bis 10µA. Das Verhalten der Kollektor-Emitterstrecke beim gesperrten Transistor, aber auch im Verstärkungsbereich kann auch durch den (differentiellen) Widerstand r_{CE} (typisch 10..200kΩ) dargestellt werden.

Bild 9.5 schließlich zeigt ein vereinfachtes Ersatzschaltbild[2] und entsprechend vereinfachte Kennlinien. Die Stromquelle wird durch den Basisstrom gesteuert. Die differentiellen Widerstände r_{BE} , r_{CC} und r_{CE} sind die Kehrwerte der Geradensteigungen. Dieses Modell bildet die wirklichen Kennlinien (Bild 9.2) durch Geradenstücke nach.

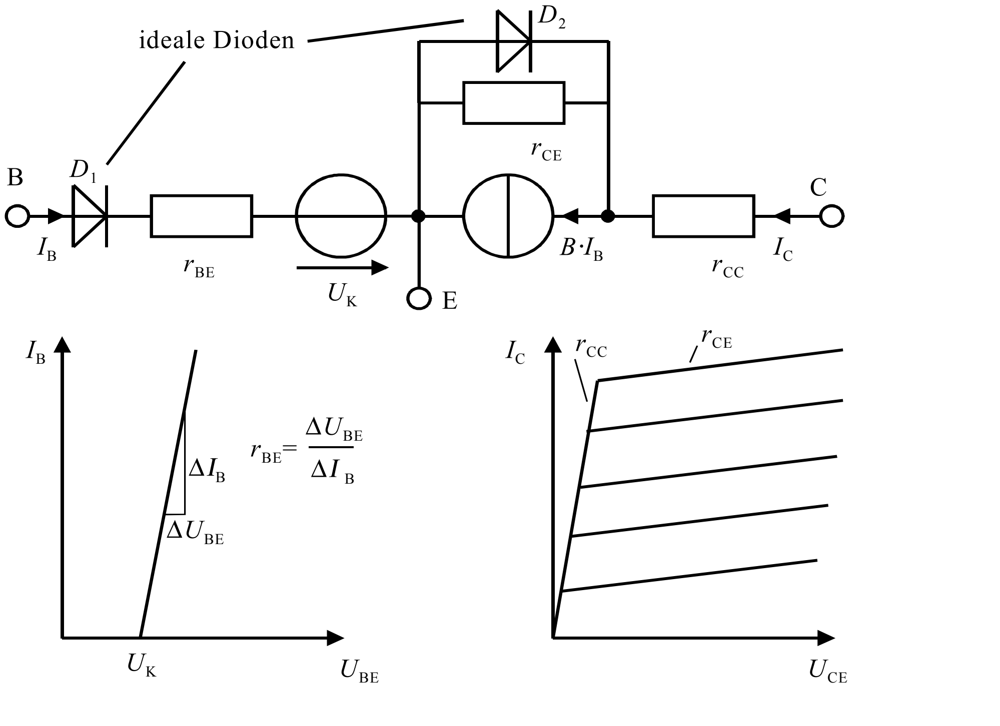


Bild 9.5 Vereinfachtes Gleichstromersatzschaltbild für die Emitterschaltung

[2] für die Emitterschaltung, d.h. Emitter an GND, wie wir sie auch in Bild 9.4 verwendet haben.

10 Feldeffekt-Transistoren

Neben den bipolaren Transistoren gibt es sogenannte unipolare oder Feldeffekt-Transistoren (FET). Ihre Wirkungsweise beruht auf einem völlig anderen Effekt. Beiden Transistorarten ist gemeinsam, dass es sich um Bauelemente mit Verstärkereigenschaft handelt. Viele Aufgaben in der Elektronik können mit beiden Arten von Transistoren erledigt werden. In der Digitaltechnik haben die Feldeffekt-Transistoren die anfangs ausschließlich verwendeten bipolaren Transistoren verdrängt. Es gibt verschiedene Arten von Feldeffekt-Transistoren, wir beschränken unsere Betrachtungen auf die sogenannten MOSFETs (**M**etall **O**xide **S**emiconductor **F**ield **E**ffect **T**ransistor).

10.1 Wirkungsweise

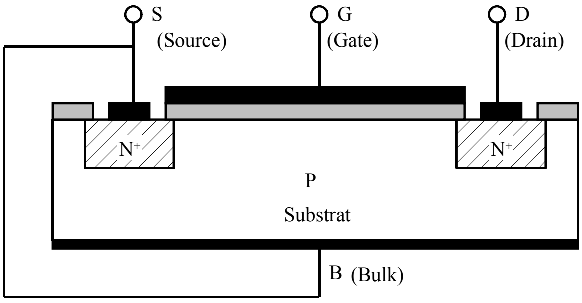


Bild 10.1 Prinzipieller Aufbau eines N-Kanal-MOSFET.

Bild 10.1 zeigt den Aufbau eines N-Kanal-MOSFET. Als Grundmaterial dient P-dotiertes Silicium (sogenanntes Substrat), in das in geringem Abstand zwei stark[1] N-dotierte Zonen eindiffundiert werden. Die Oberfläche des Halbleiters zwischen den beiden N-Zonen wird durch eine Isolierschicht aus SiO_2 (Siliciumdioxyd) abgedeckt. Darauf wird eine metallische Elektrode aufgedampft. Der Anschluss an dieser Elektrode heißt Gate. Die beiden N-Zonen werden kontaktiert. Einer der beiden Anschlüsse (Source) wird normalerweise (im Bauelement) mit dem Substratanschluss B verbunden. Der Anschluss an der anderen N-Zone wird Drain genannt.

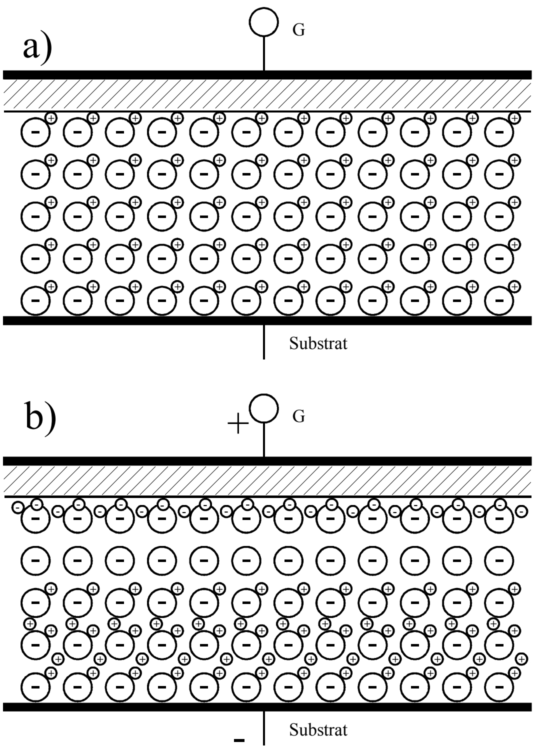


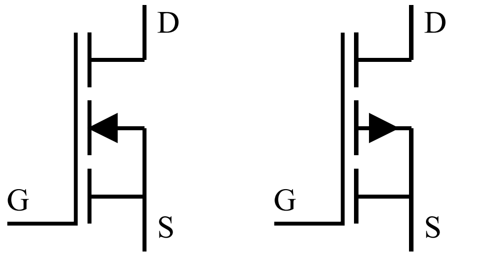
Bild 10.2 Ausbildung des N-Kanals

In Bild 10.2 ist die P-Zone zwischen Substrat und dem isolierten Gate noch einmal vergrößert dargestellt. In a) sind die negativ geladenen Atomrümpfe und die beweglichen Löcher gleichmäßig verteilt.
In b) wurde an das Gate eine gegenüber dem Substrat positive Spannung angelegt. Da das Gate isoliert ist, fließt kein Strom. Die (positiven) Löcher werden aber im Substrat nach unten abgestoßen, während Elektronen, die im Wesentlich aus Elektron-Loch-Paarbildungen entstanden sind, vom Gate angezogen werden und unter dem Gate einen „Kanal“ bilden. Dieser Kanal bildet nun eine leitfähige „Brücke“ zwischen Source und Drain.

[1] Das „+“-Zeichen bedeutet hier stark dotiert.

10.2 Schaltzeichen und Eigenschaften

In seinen Eigenschaften unterscheidet sich der MOSFET vom bipolaren Transistor wesentlich dadurch, dass seine Ansteuerung am Gate nicht durch einen Strom, sondern durch eine Spannung erfolgt. Nur zum Aufladen der Gatekapazität fließt ein Strom in das Gate. Zum Aufrechterhalten des „Einzustandes“ ist danach keine Leistung mehr nötig. Diese Tatsache ermöglicht es, Logikschaltungen mit besonders geringer Leistungsaufnahme zu bauen. Der MOSFET ist außer in integrierten Digitalschaltungen auch in der Leistungselektronik von Bedeutung. Wie bei den bipolaren Transistoren, so gibt es auch bei den MOSFETs komplementäre Typen. So gibt es ausser N-Kanal MOSFETs auch P-Kanal MOSFETs. Bei letzteren muss an das Gate eine negative Spannung gegenüber der Source angelegt werden, um sie durchzusteuern. Bild 10.3 zeigt die Schaltzeichen beider Varianten.



N-Kanal-MOSFET
Anreicherungstyp
(selbstsperrend)

P-Kanal-MOSFET
Anreicherungstyp
(selbstsperrend)

Bild 10.3 Schaltzeichen

Die hier vorgestellten MOSFETs sperren, wenn die Spannung U_{GS} zwischen Gate und Source Null ist. Sie werden deshalb auch als selbstsperrend bezeichnet. Daneben gibt es auch MOSFETs, die bei $U_{GS} = 0$ bereits eingeschaltet sind. Diese werden als selbstleitend bezeichnet, und man muss z.B. beim N-Kanal-FET negatives U_{GS} anlegen, damit der FET sperrt. Ausserdem gibt es noch sogenannte Sperrschicht-FETs, bei denen das Gate nicht durch eine Oxidschicht, sondern durch einen in Sperrrichtung betriebenen PN-Übergang vom Kanal getrennt ist. Wir beschränken unsere Betrachtungen auf die in Bild 10.3 gezeigten selbstsperrenden MOSFETs.

Bild 10.4 zeigt nun die Steuerkennlinie und die Ausgangskennlinien eines N-Kanal Leistungs-MOSFET.

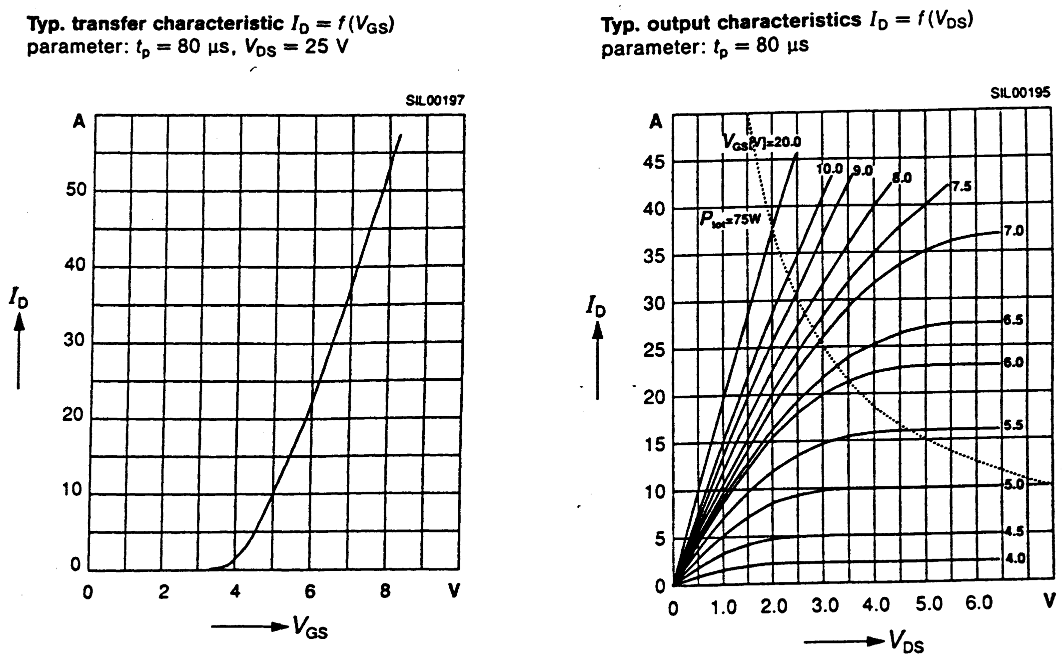


Bild 10.4 Steuerkennlinie und Ausgangskennlinien eines N-Kanal MOSFETs

Die Steuerkennlinie in Bild 10.4 links zeigt den Zusammenhang zwischen der Gate-Spannung U_{GS} und dem Drainstrom I_D. Man beachte, dass diese Kennlinie im Gegensatz zu der Eingangskennlinie des bipolaren Transistors (Bild 9.2) nicht den Zusammenhang zwischen Eingangsspannung und Eingangsstrom darstellt (letzterer ist ja praktisch Null), sondern bereits die Auswirkung auf den Ausgang zeigt. Ab einer charakteristischen Spannung, U_{GSth} (th = threshold) beginnt ein Drainstrom zu fließen. Die Steuerkennlinie ist für eine relativ große Drain-Source-Spannung dargestellt. Damit befinden wir uns weit im rechten Teil des Ausgangskennlinienfeldes. Dort, im sogenannten „Abschnürbereich", sind die Kennlinien fast waagrecht, der Drainstrom hängt bei fester Gate-Spannung kaum von der Drain-Source-Spannung ab.
Verwenden wir (wie in der Digitaltechnik) den MOSFET hauptsächlich als Schalter, so ist der linke Bereich des Ausgangskennlinienfeldes von Interesse. Dort verhält sich die Drain-Source-Strecke bei fester Gate-Spannung wie ein steuerbarer ohmscher Widerstand. Dieser Ein-Widerstand R_{DSon} kann sehr klein sein, bei dem hier betrachteten Leistungs-MOSFET liegt er bei typisch 0,085Ω. Andererseits fließt bei $U_{GS} = 0$ nur ein Drain-Strom I_{DSS} im µA-Bereich.

10.3 Anwendungsbeispiel

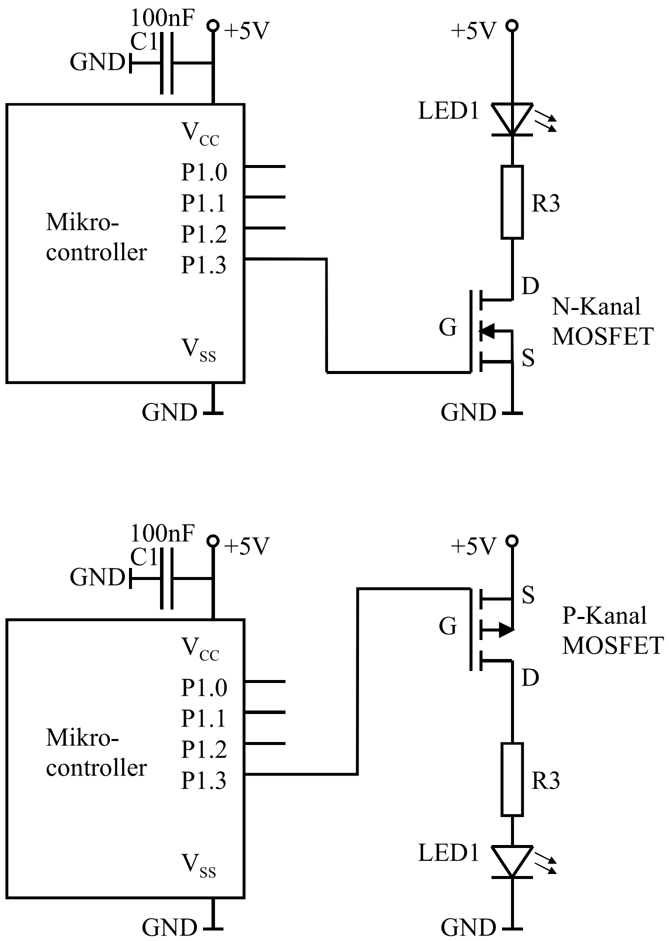


Bild 10.5 Anwendungsbeispiel

In Bild 10.5 ist das Anwendungsbeispiel, das wir bereits vom bipolaren Transistor her kennen, mit MOSFETs realisiert, wobei alternativ beide Varianten (N-Kanal und P-Kanal) zum Einsatz kommen.

Der N-Kanal-MOSFET kann den bipolaren NPN-Transistor direkt ersetzen. Voraussetzung ist dabei, dass die Threshold-Spannung U_{GSth} klein genug ist, damit das 5-Volt-Signal des µC-Ports den MOSFET durchsteuern kann. Ein Widerstand zwischen Port und Gate ist hier nicht erforderlich.

Im unteren Teil von Bild 10.5 ist die gleiche Aufgabe mit einem P-Kanal-MOSFET gelöst. Jetzt ist die Source an +5V angeschlossen. Zum Einschalten muss an das Gate eine gegenüber der Source negative Spannung angelegt werden. Das ist dann der Fall, wenn der µC an P1.3 eine Null (0V) ausgibt. Liegt hingegen P1.3 auf 5V (Eins), so ist $U_{GS} = 0$ und der MOSFET ist gesperrt.

Die Verwendung eines MOSFETs anstelle eines bipolaren Transistors in Anwendungen wie der vorliegenden ist dann vorteilhaft, wenn nicht nur eine Leuchtdiode, sondern ein große Last geschaltet werden muss.

11 Gatter

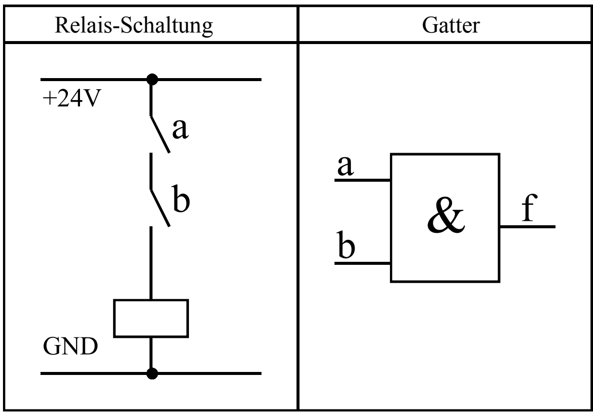
Computer arbeiten nur deshalb „elektronisch“, weil sich so logische Verknüpfungen leicht realisieren lassen. Eine Schaltung, die logische Verknüpfungen realisiert, d.h. aus einer oder mehreren binären Eingangsgrößen eine binäre Ausgangsgröße erzeugt, wird Gatter (engl. Gate[1]) genannt. Im Folgenden betrachten wir zunächst die grundlegenden logischen (Bool'schen) Verknüpfungen und lernen dann in einem weiteren Abschnitt ihre Realisierung mit elektronischen Mitteln kennen.

11.1 Bool’sche Verknüpfungen

Mit den Bool’schen Verknüpfungen werden binäre (Bool'sche) Variablen oder Signale verarbeitet. Eine binäres Signal kann nur die beiden Zustände 0 und 1 annehmen. In elektronischen Schaltungen wird die 0 in der Regel mit „Spannung ungefähr Null“ und die 1 mit „Spannung da“ dargestellt. Die grundlegenden Bool’schen Verknüpfungen sind UND (engl. AND), ODER (engl. OR) und NICHT (engl. NOT). Aus diesen Verknüpfungen lassen sich mit Hilfe der Bool’schen Algebra alle beliebigen anderen Verknüpfungen herstellen.

11.1.1 Die UND-Verknüpfung

Bild 11.1 zeigt die UND-Verknüpfung als sogenannte Relais-Schaltung, das Symbol für ein (elektronisches) UND-Gatter und die zugehörige Wertetabelle. Die Relais-Schaltung veranschaulicht die Funktion besonders gut. Die Relaisspule zieht nur dann an, wenn der Kontakt a **UND** der Kontakt b geschlossen sind. Entsprechend geht das Ausgangssignal f des Gatters nur dann auf 1 (z.B. 5V), wenn beide Eingangssignale auf 1 (z.B. 5V) sind.



Wertetabelle

a	b	f
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

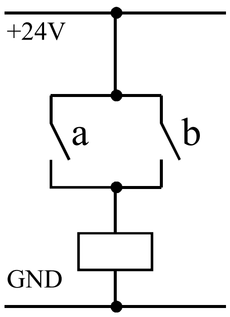
Bild 11.1 UND-Verknüpfung

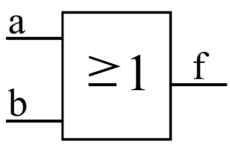
11.1.2 Die ODER-Verknüpfung

Bild 11.2 zeigt die ODER-Verknüpfung als sogenannte Relais-Schaltung, das Symbol für ein (elektronisches) ODER-Gatter und die zugehörige Wertetabelle. Die Relaisspule zieht bereits dann an, wenn einer der Kontakte a **ODER** b geschlossen ist. Entsprechend geht das Ausgangssignal f des Gatters bereits dann auf 1 (z.B. 5V), wenn eines der beiden Eingangssignale auf 1 (z.B.5V) ist.

[1] nicht zu verwechseln mit der Steuerelektrode des MOSFET

Relais-Schaltung | Gatter | Wertetabelle





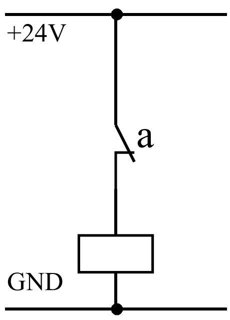
a	b	f
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

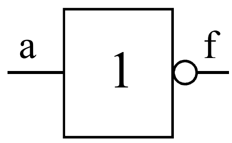
Bild 11.2 Oder-Verknüpfung

11.1.3 Die NICHT-Verknüpfung

Bild 11.3 zeigt eine NICHT-Verknüpfung (Inverter) als sogenannte Relais-Schaltung, das Symbol für ein (elektronisches) NICHT-Gatter und die zugehörige Wertetabelle. Der Kontakt a in der Relaisschaltung ist ein „Öffner“. Dieser ist normalerweise geschlossen und öffnet bei Betätigung. Deshalb zieht die Relaisspule an, wenn der Kontakt **NICHT** betätigt ist. Entsprechend geht das Ausgangssignal f des Gatters auf 0 wenn das Eingangssignal a auf 1 (z.B.5V) geht. Die Negation wird im Schaltsymbol durch einen Kreis am Ausgang (oder Eingang) dargestellt.

Relais-Schaltung | Gatter | Wertetabelle





a	f
0	1
1	0

Bild 11.3 Nicht-Verknüpfung

11.2 Aufbau von elektronischen Gattern

Im Folgenden schauen wir uns kurz das Innenleben von Gattern an, die entweder mit bipolaren oder mit MOSFETs realisiert sein können. In jedem Fall handelt es sich dabei um „Integrierte Schaltungen“ (engl. IC = Integrated Circuit), bei denen alle Bauelemente auf einem Siliciumchip realisiert sind. Es gibt (auch heute noch) ICs, die nur wenige Gatter enthalten, z.B. 4 UND-Gatter. Solche Schaltungen heißen SSI (small scale integrated circuit) im Gegensatz zu den LSI (large scale integrated circuit), zu denen z.B. die Mikrocontroller gehören. Elektronische Schaltungen sind oft aus wenigen LSI aufgebaut, die SSI benötigt man oft als „system glue[2]“.

[2] engl. Leim

11.2.1 TTL-Gatter

Die erste Familie von Logik-Bausteinen, die sich in großem Umfang durchsetzte, war die sogenannte Transistor-Transistor-Logik (TTL). Bild 11.4 zeigt ein NAND (invertierendes AND), das in dieser Technik realisiert ist. Der Ausgang wird auch als „totem pole“ bezeichnet.

Wenn eine 0 ausgegeben werden soll, muss der untere Transistor T4 durchgeschaltet und der obere Transistor T3 gesperrt sein. Dies ist dann der Fall, wenn T2 durchgeschaltet ist. Dies geschieht über R1, solange IN1 und IN2 beide auf 5V liegen (oder offen sind). Die Basis-Kollektor-Diode von T1 ist dann in Durchlassrichtung gepolt.

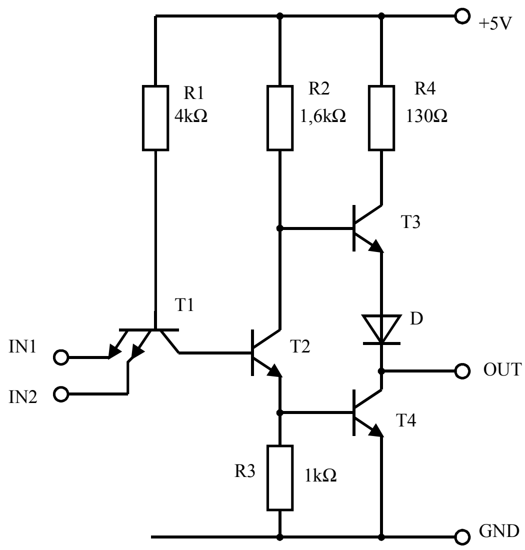


Bild 11.4 TTL-NAND-Gatter

Wird IN1 oder IN2 (oder beide) auf 0 gelegt, so arbeitet T1 als Transistor. Dieser Transistor wird durch R1 durchgesteuert. Dadurch sperrt T2, T3 wird über R2 durchgesteuert und T4 sperrt ebenfalls. Am Ausgang erscheint eine 1.

TTL-Schaltungen werden immer an 5V betrieben. Für eine logische 0 ist spezifiziert, dass die Schaltung am Ausgang nicht mehr als 0,4V abgeben darf, umgekehrt müssen Spannungen, die kleiner als 0,8V sind, am Eingang noch sicher als 0 erkannt werden. Für eine logische 1 muss am Ausgang mindestens 2,4V abgegeben werden. Spannungen die größer als 2V sind, müssen am Eingang sicher als 1 erkannt werden. Der zulässige Störabstand beträgt also jeweils nur 0,4V. Durch eine Störung in dieser Höhe kann aus einer 0 eine 1 werden und umgekehrt.

TTL-Logik hat einige Nachteile. Sie benötigt relativ viel Strom wegen der Arbeitswiderstände und ist verhältnismäßig langsam, weil die Transistoren in die Sättigung gefahren werden. Deshalb wurden einmal schnellere (Schottky-TTL) und energiesparendere (Lower-Power-Schottky) Varianten entwickelt. Heute sind TTL-Schaltungen weitgehend von den CMOS-schaltungen (nächster Abschnitt) verdrängt. Auch moderne CMOS-Schaltungen sind meist in einer TTL-kompatiblen Varianten erhältlich. Damit ist dann gemeint, dass sie insbesondere die oben angegebenen TTL-Pegel verstehen.

11.2.2 CMOS-Gatter

CMOS verwendet komplementäre MOSFETs (daher der Name). Bild 11.5 zeigt einen in CMOS realisierten Inverter. Ist das Eingangssignal auf 0, so ist T1 gesperrt und T2 durchgeschaltet. Am Ausgang erscheint eine 1 (5V). Bei einer 1 (5V) am Eingang wird T1 durchgeschaltet und T2 gesperrt, am Ausgang erscheint eine 0. Die CMOS-Schaltung braucht stationär keine Leistung, denn es fließt kein Strom.

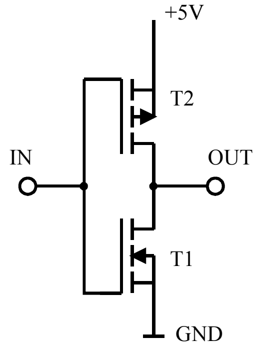


Bild 11.5 CMOS-Inverter

Bild 11.6 zeigt ein CMOS-NAND. Wenn beide Eingänge auf 1 sind (UND-Bedingung erfüllt), werden T1 und T2 angesteuert und T3 und T4 sind gesperrt. Der Ausgang liegt auf 0.
Ist IN1 auf 1, aber IN2 auf 0, so ist T2 und T3 gesperrt und T4 ist durchgeschaltet. Der Ausgang liegt auf 1.
Wenn beide Eingänge auf 0 liegen, sind T1 und T2 gesperrt und T3 und T4 sind durchgeschaltet. Der Ausgang liegt auf 1.

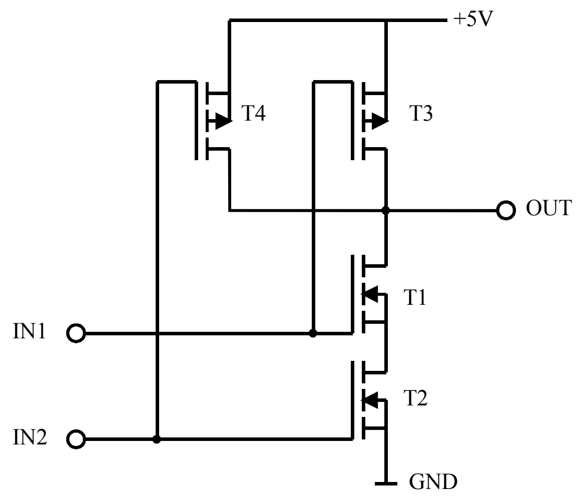


Bild 11.6 CMOS-NAND

Bild 11.7 schließlich zeigt ein CMOS-NOR (invertierendes OR).

Wenn beide Eingänge auf 0 liegen (Oder-Bedingung nicht erfüllt), so sind T3 und T4 durchgeschaltet und T1 und T2 sind gesperrt. Der Ausgang liegt auf 1.

Liegt IN1 auf 1 und IN2 auf 0, so ist T3 gesperrt und T1 ist durchgesteuert. Der Ausgang liegt auf 0.

Liegen beide Eingänge auf 1, so sind T1 und T2 durchgesteuert und T3 und T4 sind gesperrt. Der Ausgang liegt auf 0.

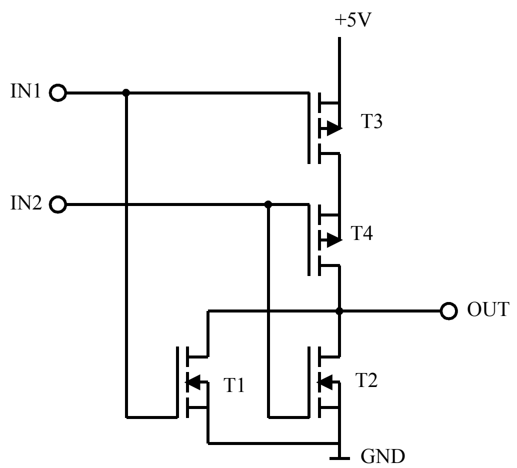


Bild 11.7 CMOS-NOR

CMOS-Schaltungen haben eine ganze Reihe Vorteile, weshalb sie sich weitgehend durchgesetzt haben. Dank ihres symmetrischen Aufbaus ist der Störabstand groß, die Schwelle zwischen 0 und 1 liegt typisch bei der halben Versorgungsspannung (2,5V bei 5V Versorgung). Es gibt aber auch spezielle Varianten, die am Eingang TTL-kompatibel sind. Das Ausgangssignal nimmt, wenn es unbelastet ist, den Pegel der Versorgungsspannung bzw. von GND an. Es schaltet „rail to rail". Nennenswerte Leistung nehmen CMOS-Schaltungen nur dann auf, wenn sie höhere Frequenzen verarbeiten müssen. Dann müssen die Gate-Kapazitäten umgeladen werden. CMOS-Schaltungen müssen nicht unbedingt an 5V betrieben werden. Die ersten CMOS-Schaltungen waren für den Betrieb an 12V oder mehr konzipiert, wovon man sich eine besonders hohe Störunempfindlichkeit versprochen hat. Heutige CMOS-Schaltungen (HC-Reihe = High Speed CMOS, AC-Reihe = Advanced CMOS) werden üblicherweise an 5V betrieben. Der Trend geht eher zu kleineren Versorgungsspannungen (3,3V und darunter).

Da die Eingänge von CMOS-Schaltungen hochohmig sind, dürfen die Eingänge in Schaltungen nicht offen bleiben. Sie würden sonst „floaten" und überraschende Effekte zeigen. Aus dem gleichen Grund sind CMOS-Schaltungen ESD-empfindlich. Sie können durch statische Aufladungen leicht beschädigt werden.

12 Elektromagnetismus

12.1 Magnetisches Feld

Wie beim elektrischen Feld, wo eine **elektrische Feldstärke** $\vec{E}$ und eine **elektrische Flussdichte** $\vec{D}$ (auch Verschiebungsdichte) definiert ist, gibt es eine **magnetische Feldstärke** $\vec{H}$ und eine **magnetische Flussdichte** $\vec{B}$ (auch magnetische Induktion). Magnetische Flussdichte und magnetische Feldstärke sind über die **Permeabilität** μ, die auch nichtlinear sein kann, miteinander verknüpft. Unten sind die Beziehungen für elektrisches Feld und magnetisches Feld gegenübergestellt.

$\vec{E}$ elektrische Feldstärke	$\vec{H}$ magnetische Feldstärke
$\vec{D}$ elektrische Flussdichte	$\vec{B}$ magnetische Flussdichte
$\vec{D} = \varepsilon \cdot \vec{E}$	$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$
$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$	$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$
$\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$	$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

(12.1)

Bekanntlich besteht nun ein Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern. Die entsprechenden Gesetzmäßigkeiten werden wir im Folgenden kennenlernen.

12.2 Das Durchflutungsgesetz

Das Durchflutungsgesetz beschreibt die bekannte Tatsache, dass ein stromdurchflossener Leiter von einem Magnetfeld umgeben ist. Es lautet:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = \sum i = \Theta \tag{12.2}$$

Es besagt, dass das Wegintegral der magnetischen Feldstärke auf einem beliebigen Weg, der einen oder mehrere stromdurchflossene Leiter bezüglich der Stromrichtung rechtswendig umschließt, gleich der Summe der Ströme in diesen Leitern ist. Die Summe dieser Ströme wird auch Durchflutung Θ genannt.

Die Beziehung (12.2) lässt sich leicht anwenden, wenn der Integrationsweg längs des magnetischen Feldes gewählt wird, und wenn die magnetische Feldstärke längs des Weges überall gleich groß ist. Ist die Länge des Weges *l*, so vereinfacht sich (12.2) zu:

$$H \cdot l = \sum i \tag{12.3}$$

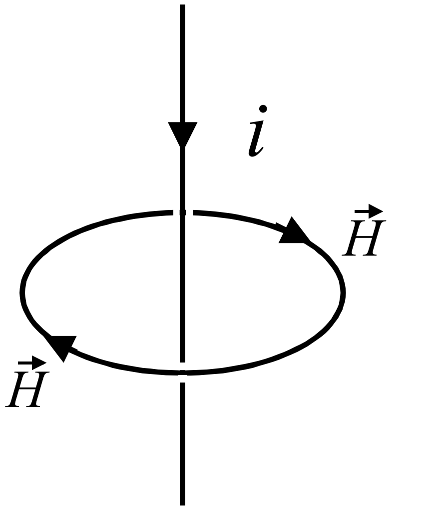


Bild 12.1 Magnetfeld um stromdurchflossenen Leiter

Wir wollen diese Regel an 2 einfachen Anordnungen erproben. Bild 12.1 zeigt einen stromdurchflossenen Leiter. Das Magnetfeld umgibt den Leiter konzentrisch. Wir fragen nun nach dem Betrag der Feldstärke im Abstand r vom Leiter. Es gilt:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = H 2\pi r = i \tag{12.4}$$

$$H = \frac{i}{2\pi r} \tag{12.5}$$

In Bild 12.2 ist nun ein ringförmiger Eisenkern dargestellt, auf den N Windungen aufgebracht sind. Die mittlere Feldlinienlänge in dem Eisenkern sei l. Es soll der Betrag der magnetischen Feldstärke in dem Eisenkern berechnet werden.

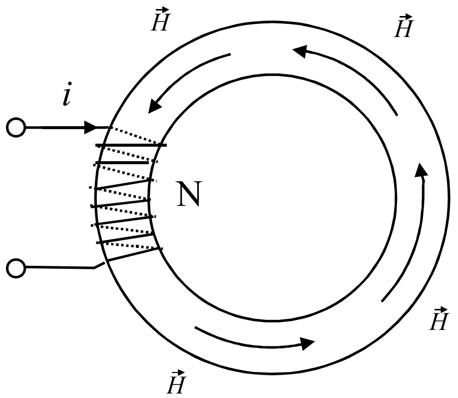


Bild 12.2 Magnetfeld in ringförmigem Eisenkern

Es gilt:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{s} = H \cdot l = N \cdot i \tag{12.6}$$

$$H = \frac{N \cdot i}{l} \tag{12.7}$$

Hier ist also die magnetische Feldstärke bei gegebenem Strom i im Eisenring um so größer, je mehr Windungen N aufgebracht werden.

12.3 Das Induktionsgesetz

Veränderliche Magnetfelder erzeugen eine elektrische Spannung. Dieser Sachverhalt wird durch das Induktionsgesetz präzisiert:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\frac{d\Phi}{dt} \tag{12.8}$$

Es besagt, dass das Wegintegral der elektrischen Feldstärke auf der Umrandung einer Fläche gleich ist der negativen Ableitung des Flächenintegrals der magnetischen Flussdichte nach der Zeit, wobei die Umlaufrichtung des Wegintegrals dem Flächenvektor $\vec{A}$ rechtswendig zugeordnet ist. Das Flächenintegral über die magnetische Flussdichte $\vec{B}$ wird als Fluss Φ bezeichnet. In Bild 12.3 ist eine Leiterschleife dargestellt, die von einem magnetischen Fluss durchsetzt ist. Wir wollen die Spannung u_L bestimmen. Wir „berechnen" das Umlaufintegral in der angedeuteten Richtung von $d\vec{s}$ längs des Leiters, also rechtswendig zu $\vec{A}$. Im Leiter selbst ist praktisch kein Feld vorhanden, wir erhalten nur einen Beitrag für das Wegstück zwischen den Klemmen:

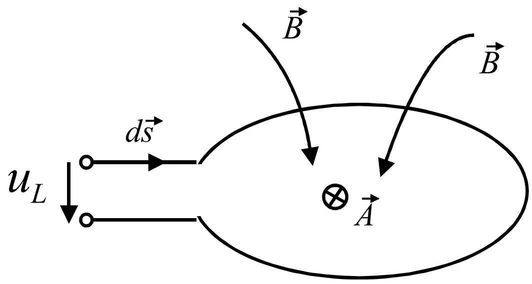


Bild 12.3 Zum Induktionsgesetz

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -u_L = -\frac{d}{dt} \oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = -\frac{d\Phi}{dt} \qquad (12.9)$$

$$u_L = \frac{d\Phi}{dt} \qquad (12.10)$$

Man beachte, dass bei der in Bild 12.3 gewählten Zählpfeilrichtung für die Klemmenspannung u_L das negative Vorzeichen verschwindet.

12.4 Die Induktivität

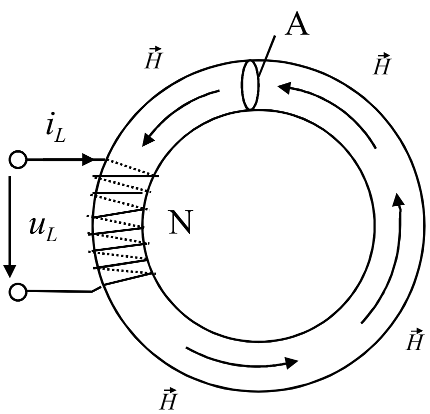


Bild 12.4 Berechnung der Induktivität

In Bild 12.4 ist noch einmal die Ringspule aus Bild 12.2 dargestellt. Wir wollen nun den Zusammenhang betrachten, der zwischen einem Strom i_L, der in die Spule fließt, und der Spannung u_L an den Klemmen der Spule besteht. Die Querschnittsfläche des Eisenkerns sei A. Durch die N Windungen vergrößert sich die vom Fluss durchsetzte Fläche um das N-fache. Es gilt:

$$u_L = N\frac{d\Phi}{dt} = N \cdot \frac{dB \cdot A}{dt} \qquad (12.11)$$

Darin ist nun

$$B = \mu \cdot H \qquad (12.12)$$

In (12.7) haben wir H in Abhängigkeit des Stromes bereits berechnet. Einsetzen von (12.12) in (12.11) und anschließendes Einsetzen von (12.7) ergibt:

$$u_L = \frac{NA\mu\, dH}{dt} = \frac{N^2 A\mu}{l} \cdot \frac{di}{dt} \qquad (12.13)$$

Die konstanten Größen in (2.13) können wir zusammenfassen:

$$L = \frac{N^2 A\mu}{l} \qquad (12.14)$$

Damit wird aus (12.13):

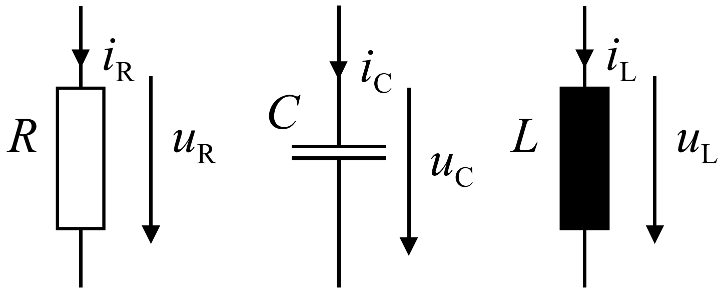
$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} \tag{12.15}$$

Die Größe L heißt Induktivität. Für ihre Einheit gilt:

$$[L] = \frac{[u]}{\left[\frac{di}{dt}\right]} = 1 \cdot \frac{\mathrm{V}}{\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{s}}} = 1 \cdot \frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}} = 1\mathrm{H} = 1\mathrm{Henry} \tag{12.16}$$

Mit der Induktivität (Spule) haben wir ein weiteres Bauelement kennengelernt, für das wir einen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung angeben können.

Bild 12.5 zeigt das Schaltzeichen für die Induktivität zusammen mit den bereits bekannten Schaltzeichen für Widerstand und Kondensator.



$$u_R = R \cdot i_R \qquad i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} \qquad u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}$$

Bild 12.5 Schaltzeichen und Formeln für R, C und L

12.5 Der Transformator

Wir betrachten erneut einen Ringkern, auf den nun aber 2 Spulen aufgebracht sind (Bild 12.6):

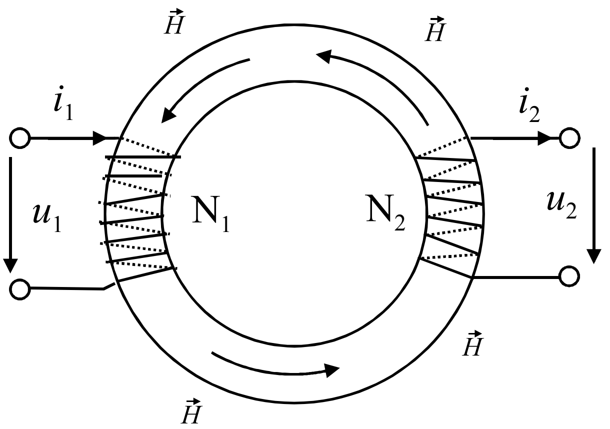


Bild 12.6 Transformator

Es gilt:

$$u_1 = N_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \tag{12.17}$$

$$u_2 = N_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt} \tag{12.18}$$

Daraus folgt:

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{N_1}{N_2} \tag{12.19}$$

Die Spannungen an den Klemmen stehen also im gleichen Verhältnis zueinander wie die Windungszahlen. Vorraussetzung dafür, dass Spannungen „induziert" werden können ist allerdings, dass sich der Fluss ständig ändert. Damit ändern sich auch die Spannungen ständig. Eine Anordnung wie die in Bild 12.6 heißt Transformator. Der Transformator kann nur „Wechselspannungen" „übertragen".

Wir wenden nun noch das Durchflutungsgesetz auf den Transformator an. Es gilt:

$$H = \frac{N_1 \cdot i_1}{l} - \frac{N_2 \cdot i_2}{l} \tag{12.20}$$

Man beachte, dass hier der zweite Term negativ gezählt wird. Das kommt daher, weil in Bild 12.6 der Strom i_2 in entgegengesetzter Richtung zu dem Strom i_1 den Kern durchflutet.
Aus (12.20) folgt:

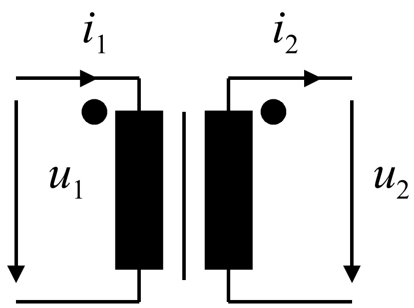
$$i_2 \cdot N_2 = N_1 \cdot i_1 - H \cdot l \tag{12.21}$$

Ist nun die Permeabilität μ groß, wie das bei Eisen der Fall ist, so ist bei endlicher Flussdichte B wegen (12.12) die magnetische Feldstärke H sehr klein. Der Ausdruck $H \cdot l$ in (12.21) kann dann vernachlässigt werden. Es gilt:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2} \tag{12.22}$$

Die Ströme verhalten sich also umgekehrt proportional zu den Windungszahlen.

Bild 12.7 zeigt das Schaltzeichen des Transformators. Der Punkt, der bisweilen eingetragen wird, kennzeichnet den Wicklungsanfang von Wicklungen, die den Kern im gleichen Wicklungssinn umschließen.



$$\frac{u_2}{u_1} = \frac{N_2}{N_1} \qquad \frac{i_2}{i_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Bild 12.7 Schaltzeichen und Formeln des Transformators

Die große Bedeutung des Transformators beruht darauf, dass damit aus einer Wechselspannung eine andere Wechselspannung beliebiger Größe erzeugt werden kann. Dabei erfolgt gleichzeitig eine Potenzialtrennung zwischen „Primärseite" und „Sekundärseite". Die Umsetzung ist nur mit geringen Verlusten behaftet (ohmsche Verluste in den Windungen und Eisenverluste im Kern durch Ummagnetisierung und Wirbelströme).

Nur durch die Umsetzung auf ein hohes Spannungsniveau (400kV) kann elektrische Energie wirtschaftlich über große Entfernungen übertragen werden. Dann ist nämlich der für eine entsprechende Leistung notwendige Strom geringer. Die Verluste bei gegebenem Leitungswiderstand hängen ja vom Strom ab, der über die Leitung fließt, nicht aber von der Spannung.

13 Wechselstrom

Bisher haben wir überwiegend Gleichspannungen und Gleichströme betrachtet, aber auch zeitveränderliche Spannnungen und Ströme wie sie z.B. beim Laden und Entladen von Kondensatoren auftreten. Transformatoren können nur Spannungen und Ströme übertragen, die sich „ständig ändern". Andernfalls kann ja im Transformator keine Spannung induziert werden. In unseren Energieversorgungsnetzen haben Spannungen und Ströme einen sinusförmigen Verlauf.

13.1 Bezeichnungen

In Bild 13.1 ist ein sinusförmiger Spannungsverlauf dargestellt. An der „Zeitachse" ist hier nicht die Zeit selbst, sondern der Winkel, der sich aus dem Produkt aus „Kreisfrequenz" ω und der Zeit t ergibt, aufgetragen. Dies ist oft zweckmäßig, weil sich dann die entsprechenden Sinuswerte ohne Umrechnung auftragen lassen.

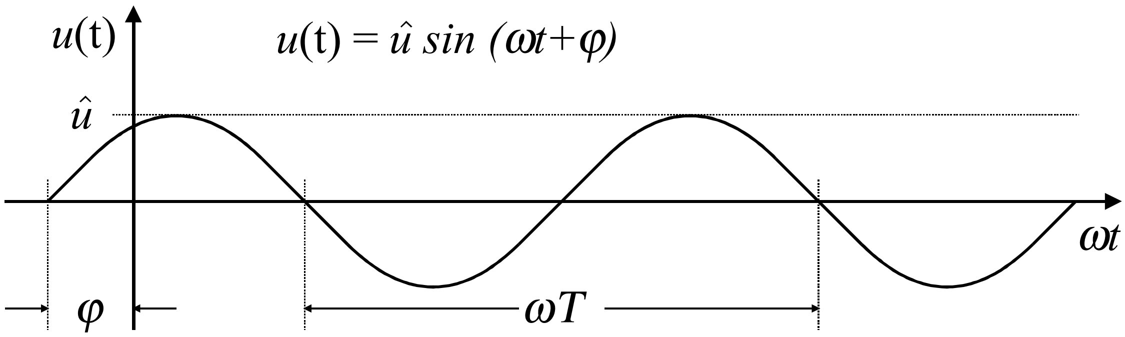


Bild 13.1 Spannung mit sinusförmigem Verlauf

Die Größen in Bild 13.1 bedeuten:

$u(t)$ Momentanwert, Augenblickswert

$\hat{u}$ Scheitelwert, Amplitude, Maximalwert

ω Kreisfrequenz, Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi \cdot f$

T Periodendauer $\omega \cdot T = 2\pi$

f Frequenz = Anzahl der Perioden pro Sekunde $f = 1/T$

$[f] = 1\text{s}^{-1} = 1\text{Hz} = 1\text{Hertz}$

φ Nullphasenwinkel: Winkel der zum Zeitpunkt $t = 0$ anliegt.
Die Funktion geht um den Winkel φ früher durch Null.

In Europa werden die Energieversorgungsnetze mit $f = 50$ Hz betrieben, in USA mit 60 Hz, das Netz der Deutschen Bahn arbeitet mit $16\,^2\!/_3$ Hz, das Bordnetz von Flugzeugen mit 400Hz.

13.2 Der Effektivwert

Liegt eine sinusförmige Spannung wie die in Bild 13.1 an einem ohmschen Widerstand an, so fließt auch ein sinusförmiger Strom, denn das Ohm´sche Gesetz gilt auch für zeitveränderliche Größen. Für die Leistung, die in diesem Widerstand umgesetzt wird, gilt:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) = \frac{u(t)^2}{R} = i(t)^2 R \tag{13.1}$$

In Bild 13.2 sind nun ein sinusförmiger Strom und die Leistung aufgetragen, die dieser Strom in einem Widerstand *R* umsetzt.

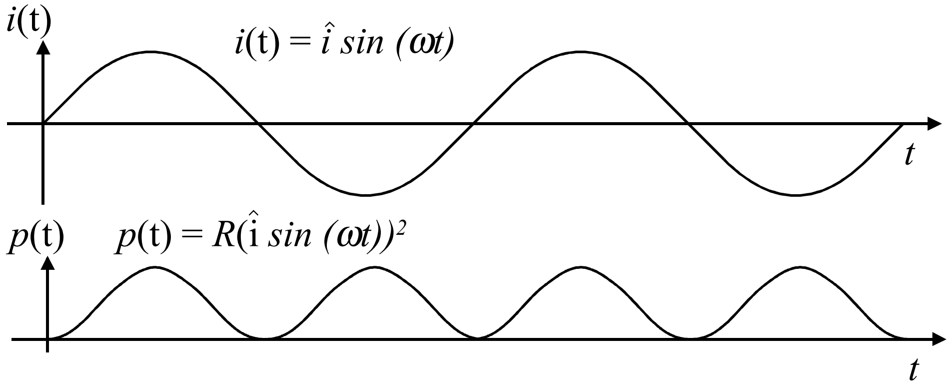


Bild 13.2 Zeitverlauf von Strom und Leistung in einem ohmschen Widerstand

Offensichtlich ist die Leistung infolge des Quadrates stets positiv. Wir wollen nun den Mittelwert dieser Leistung durch die Amplitude des Stomes $\hat{i}$ und den Widerstand *R* ausdrücken. Dazu integrieren wir p(t) über eine Periode und dividieren durch die Periodendauer.

$$\overline{p} = \frac{1}{T}\int_0^T R\left[\hat{i}\sin(\omega t)\right]^2 dt = \frac{1}{T}\int_0^T R\left[\hat{i}^2\,\frac{1}{2}\left[1-\cos 2\omega t\right]\right]dt = \frac{R\hat{i}^2}{2T}\left(t - \frac{1}{2\omega}\sin 2\omega t\right)\Bigg|_0^T = \frac{R\,\hat{i}^2}{2} \tag{13.2}$$

Oft möchte man unabhängig davon, ob es sich um Gleichstrom oder Wechselstrom handelt, wissen, wie groß der Strom sein muss, um eine bestimmte Leistung umzusetzen. Für sinusförmigen Wechselstrom gilt (für Wechselspannung entsprechend):

$$\overline{p} = R \cdot I^2 = \frac{R \cdot \hat{i}^2}{2} \tag{13.3}$$

$$I = I_{eff} = \frac{\hat{i}}{\sqrt{2}} \tag{13.4}$$

Ein sinusförmiger Wechselstrom (Spannung) mit einem Effektivwert gemäß (13.4) erzeugt die gleiche Wärmewirkung in einem ohmschen Widerstand, wie ein Gleichstrom mit gleichem Wert. Die Spannungen und Ströme, die bei Wechstrom und Spannung üblicherweise angegeben werden, sind Effektivwerte, ohne dass dies besonders gekennzeichnet wird (Beispiel: Netzspannung 230V). Ein Glühbirne für 230V (effektiv) Wechselspannung würde an 230V Gleichspannung genauso hell leuchten. Die 230V-Netzspannung hat eine Amplitude $\hat{u} = \sqrt{2} \cdot 230\text{V} = 325\text{V}$.

$$F=\frac{Q_1\cdot Q_2}{4\pi\,\varepsilon\,r^2}\qquad W=\int\vec{F}(s)\cdot d\vec{s}\qquad \vec{F}=Q\cdot\vec{E}\qquad \vec{F}=m\frac{d\vec{v}}{dt}$$ 1Nm = 1 Ws

$$[Q]=1\mathrm{C}=1\mathrm{Coulomb}=1\mathrm{As}\qquad [F]=1\mathrm{N}=1\mathrm{Newton}=\frac{1\mathrm{kgm}}{\mathrm{s}^2}\qquad [U]=1\mathrm{V}=1\mathrm{Volt}=\frac{\mathrm{Nm}}{\mathrm{As}}$$

Kugel: $A=4\pi\,r^2$ Kreis: $A=\pi\,r^2$ $u=2\pi\cdot r$

$$u=\int\vec{E}\cdot d\vec{s}\qquad i=\frac{dQ}{dt}$$

M = 10^6 k = 10^3 m = 10^{-3} µ = 10^{-6} n = 10^{-9} p = 10^{-12}

$$W=Q\cdot U\qquad P=\frac{dW}{dt}\qquad P=U\cdot I\quad P=\frac{U^2}{R}=I^2\cdot R\qquad [P]=1\mathrm{W}=1\mathrm{Watt}=1\mathrm{VA}$$

Maxwell: $\oint\vec{H}\cdot d\vec{s}=\int_A\left(\vec{S}+\frac{d\vec{D}}{dt}\right)\cdot d\vec{A}\qquad \oint\vec{E}\cdot d\vec{s}=-\int_A\frac{d\vec{B}}{dt}\cdot d\vec{A}\qquad \vec{D}=\varepsilon\cdot\vec{E}\qquad \vec{B}=\mu\cdot\vec{H}$

$$Q=\int_A\vec{D}\cdot d\vec{A}\qquad 0=\int_A\vec{B}\cdot d\vec{A}\qquad \vec{S}=\kappa\cdot\vec{E}$$

$$\varepsilon=\varepsilon_r\cdot\varepsilon_0\qquad \varepsilon_0=8{,}854\cdot10^{-12}\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{Vm}}\qquad \mu=\mu_r\cdot\mu_0\qquad \mu_0=4\cdot\pi\cdot10^{-7}\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{Am}}$$

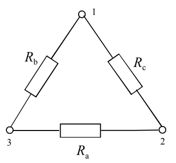
$$U=R\cdot I\quad R=\frac{\rho\cdot l}{A}\qquad \rho_T=\rho_{20}\left(1+\alpha\left(T-20°C\right)\right)\qquad R_T=R_{20}\left(1+\alpha\left(T-20°C\right)\right)$$

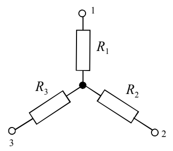
Parallelschaltung: $R=\frac{R_1\cdot R_2}{R_1+R_2}$ Spannnungsteiler $U_2=U\frac{R_2}{R_1+R_2}$ Stromteiler $I_2=I\frac{R_1}{R_1+R_2}$

Ersatzspannungsquelle: $R_i=?$ Alle Quellen Null setzen und Widerstand bestimmen.

$U_0=?$ z.B. Spannungsteilerregel Ersatzstromquelle: $U_0=R_i\cdot I_k$

Überlagerungssatz: Nacheinander alle Quellen bis auf eine Null setzen. Teillösungen addieren.





$$R_1=\frac{R_bR_c}{R_a+R_b+R_c}\qquad R_2=\frac{R_aR_c}{R_a+R_b+R_c}\qquad R_3=\frac{R_bR_a}{R_a+R_b+R_c}$$

Kondensator: $C=\frac{Q}{U}\qquad C=\frac{\varepsilon\cdot A}{d}\qquad [\mathrm{C}]=1\mathrm{F}=1\mathrm{Farad}=\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{V}}\qquad i=C\frac{du}{dt}$

RC-Glied: Wenn Anregung stückweise konstant: $u(t)=A\cdot e^{-t/\tau}+B\qquad \tau=RC$

Diode: $I=I_s\left(e^{\frac{U}{U_T}}-1\right)$ $U_T\approx 25mV$ bei Raumtemp.

Wechselspannung: $u(t)=\hat{u}\sin(\omega t+\varphi)\qquad \omega=2\pi\cdot f\qquad f=\frac{1}{T}\qquad U_{eff}=\frac{\hat{u}}{\sqrt{2}}$

Induktivität: $L=\frac{N^2A\mu}{l}\qquad u_L=L\cdot\frac{di}{dt}\qquad [L]=1\mathrm{H}=1\mathrm{Henry}=\frac{1\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}}$

1) Zwei dem Betrag nach gleich große Punktladungen haben einen Abstand von 5cm. Sie ziehen sich mit einer Kraft von 3,2mN an.

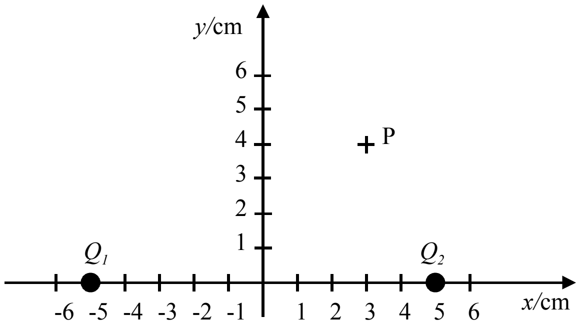
a) Haben die Ladungen gleiches oder verschiedenes Vorzeichen?

b) Wie groß sind die Ladungen? ($\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$)

c) Welche Kraft üben die Punktladungen im Abstand von 10cm aufeinander aus?

2) Eine Metallkugel mit einem Radius von r=20cm trägt die Ladung 10nC. Geben Sie den Betrag der elektrischen Flussdichte D und der elektrischen Feldstärke E an der Oberfläche der Kugel und im Abstand von 1m vom Kugelmittelpunkt an.

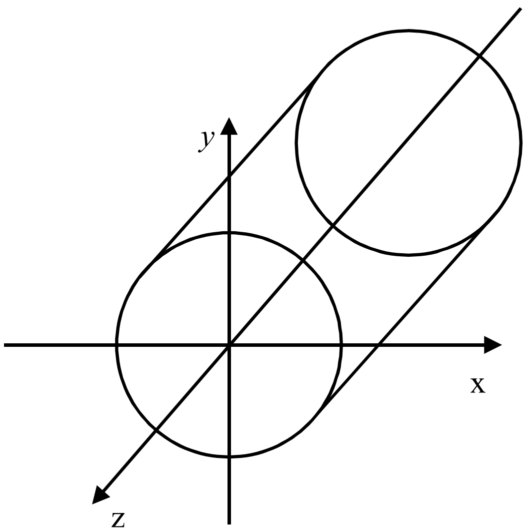
3) Zwei Punktladungen $Q_1 =$ 30nC und $Q_2 =$ –50nC haben einen Abstand von 10cm. Die Skizze zeigt die Lage der Punktladungen in einem Koordinatensystem. Die z-Koordinate ist für beide Ladungen 0.



a) Geben Sie die elektrische Flussdichte $\vec{D}$ im Punkt P (x=3cm, y=4cm, z=0cm) als Vektor an.
Wie groß ist der Betrag D der elektrischen Flussdichte im Punkt P?

b) Geben Sie die Kraft $\vec{F}$ auf eine Ladung $Q_3 =$ 10nC , die an den Punkt P gebracht wird, als Vektor an. Wie groß ist ihr Betrag?

4) Wir betrachten einen langen Leiter, der eine gleichmäßig verteilte Ladung trägt. Der „Ladungsbelag“ betrage 10^{-6} C/m (d.h. pro Meter Leitungslänge befindet sich die Ladung 10^{-6} C). Ein kartesisches Koordinatensystem wird nun so angeordnet, dass die z-Achse in Richtung des Leiters verläuft.



a) Berechnen Sie den Betrag der elektrischen Flussdichte D auf der Oberfläche eines (gedachten) Zylinders mit Radius r, der konzentrisch um diesen Leiter angeordnet ist.

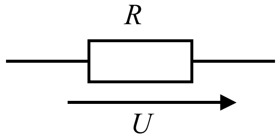
b) Geben Sie die Flussdichte $\vec{D}$ als Vektor in Abhängigkeit von x und y an.

1) Der Heizleiter eines elektrischen Kochers besteht aus 10m Chromnickeldraht von 0,45mm Durchmesser. (ρ=1,1 Ωmm^2/m). Wie groß ist der Widerstand? Welche Leistung hat der Kocher, wenn er an einer Gleichspannung von 230V betrieben wird?

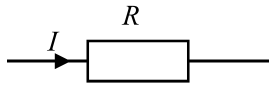
2) Welche Drahtlänge ist für einen Widerstand von 500Ω aus 0,4mm dickem Konstantandraht (ρ==0,5Ωmm^2/m) erforderlich?

3) Welche Temperatur hat ein Heizkörper, wenn er bei 20°C einen Strom von 2,9A und im Betrieb 0,5A aufnimmt? (Betriebsspannung 220V, α=0,004/°C)

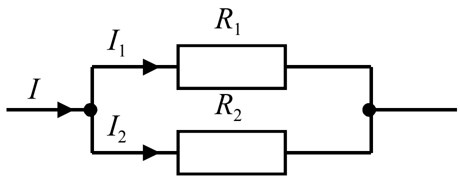
4) An einem Widerstand R liegt eine Spannung U an. Geben Sie allgemein die in dem Widerstand umgesetzte Leistung an.



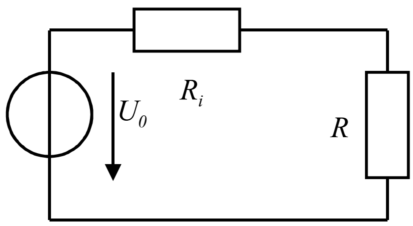
5) Durch einen Widerstand R fließt ein Strom I. Geben Sie allgemein die in dem Widerstand umgesetzte Leistung an.



6) In der nebenstehenden Schaltung verzweigt der Strom I in 2 Widerstände. Drücken sie den Strom I_1 durch I, R_1 und R_2 aus. (Anmerkung: Stromteilerregel – merken!)

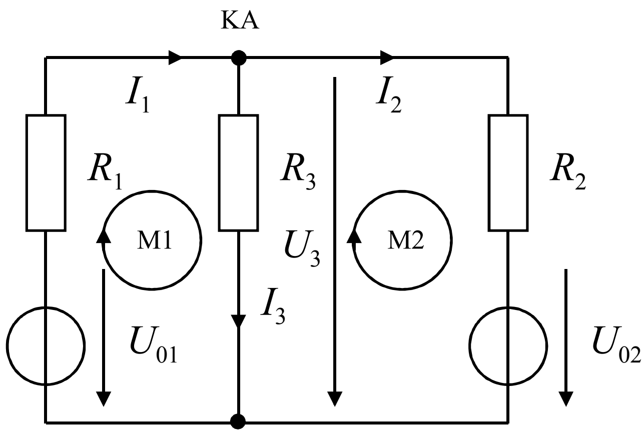


7) An eine Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand R_i ist ein Widerstand R angeschlossen. Für welchen Wert von R ist die in R umgesetzte Leistung am größten?



8) Geben Sie für die nebenstehende Schaltung die Knotengleichung für den Knoten KA und die Maschengleichungen für die Umläufe M1 und M2 an.

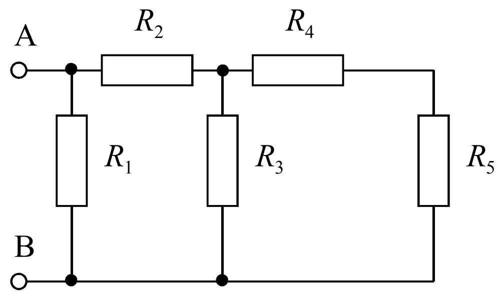
9) Berechnen Sie I_1 , I_2 und U_3 allgemein als Funktion von U_{01}, U_{02}, R_1, R_2 und R_3.



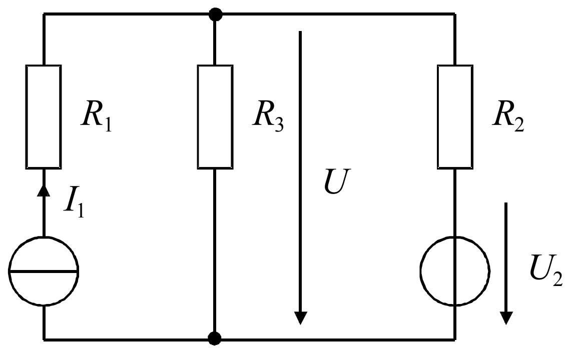
10) Berechnen Sie I_1 , I_2 und U_3 für U_{01}=5V, U_{02}=10V, R_1=10Ω, R_2=20Ω und R_3=20Ω.

11) Wie groß ist die in R_1, R_2 und R_3 umgesetzte Leistung?

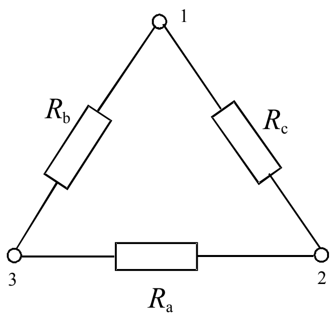
1) Berechnen sie den Widerstand zwischen den Klemmen A und B der neben abgebildeten Anordnung allgemein ausgedrückt durch R_1 bis R_5 und für den Fall, dass alle Widerstände den Wert 10Ω haben.

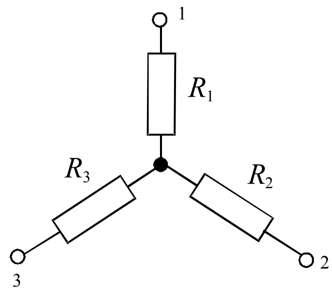


2) Gegeben ist nebenstehende Anordnung. Berechnen Sie U für I_1=0,1A, U_2=10V
R_1=5Ω, R_2=10Ω, R_3=20Ω



3) Bei der Vereinfachung von Widerstandsnetzwerken lässt sich oft die sogenannte Dreieck-Stern-Umwandlung anwenden. Dazu wird die „Dreieck"-Schaltung links ersetzt durch die „Stern"-Schaltung rechts. Beide Schaltungen sind bezüglich ihres Verhaltens an den





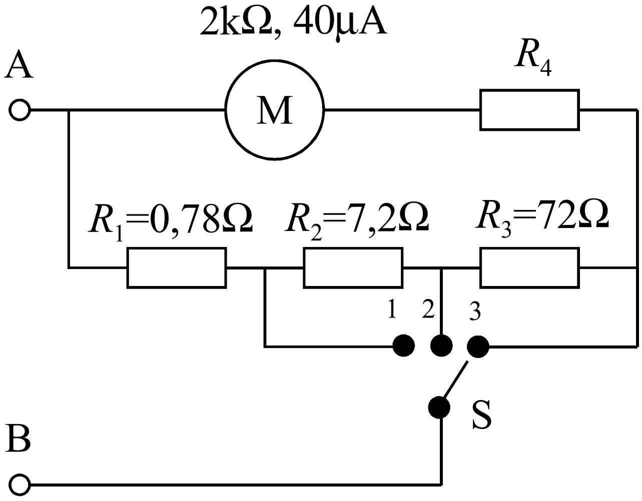
Klemmen 1,2 und 3 äquivalent, wobei folgende Beziehungen gelten:

$$R_1 = \frac{R_b R_c}{R_a + R_b + R_c} \qquad R_2 = \frac{R_a R_c}{R_a + R_b + R_c} \qquad R_3 = \frac{R_a R_b}{R_a + R_b + R_c}$$

Leiten Sie diese Beziehungen her.

Anleitung: Der Widerstand zwischen 2 Klemmen muss bei beiden Schaltungen gleich sein (dritte Klemme jeweils offen). Damit erhält man 3 Gleichungen und daraus durch geschicktes Zusammenfassen die gesuchte Lösung.

1) Die nebenstehende Abbildung zeigt einen Ausschnitt aus dem Schaltplan eines Vielfachmessgerätes. Das **Messwerk M** hat einen Widerstand von 2kΩ und der Vollausschlag des Zeigers wird bei einem Strom von 40µA erreicht. Das **Messgerät** soll als Amperemeter eingesetzt werden.

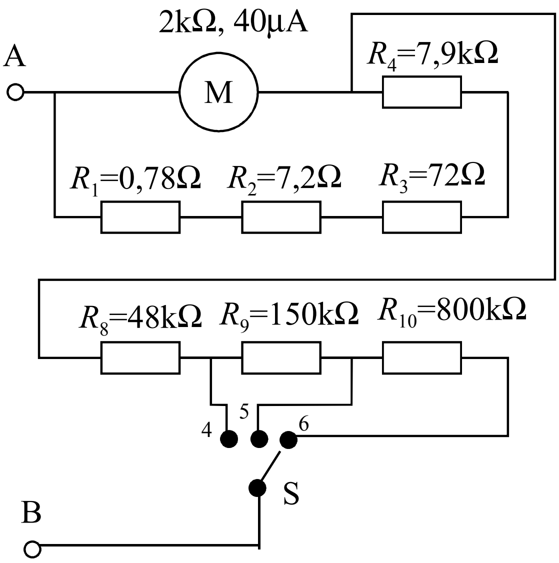


a) Wie groß muss R_4 sein, dass in der Schalterstellung 3 der Vollausschlag bei 5mA erreicht wird?

b) Wie groß ist dann der Spannungsabfall an dem **Messgerät** (Spannung zwischen Klemmen A und B?

c) Bei welchen Strömen wird in Schalterstellung 1 und in Schalterstellung 2 Vollausschlag erreicht?

2) Die nebenstehende Schaltung zeigt nun das Vielfachmessgerät in der Betriebsart „Voltmeter".



a) Bei welchen Spannungen wird in den Schalterstellungen 4, 5und 6 jeweils Vollausschlag erreicht?

b) Wie groß ist dann jeweils der Widerstand zwischen den Klemmen A und B?

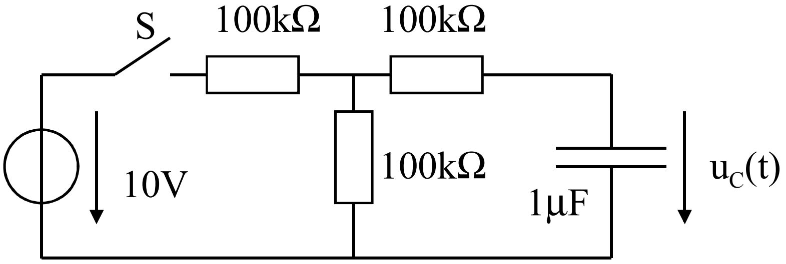
c) Wieviel Strom nimmt das Messgerät bei Vollauschlag jeweils auf?

3) Ein Plattenkondensator besteht aus zwei Platten mit je 200cm^2 Fläche. Der Plattenabstand beträgt 2mm. Welche Kapazität hat der Kondensator, wenn das Dielektrikum Hartpapier (ε_r=4) ist?

4) Wie groß ist die Ladung eines Kondensators von 16µF, wenn er an eine Gleichspannung von 300V angelegt wird?

5) An einem Kondensator von 1µF erhöht sich die Spannung gleichmäßig in 5ms um 100V. Wie groß ist die Ladestromstärke?

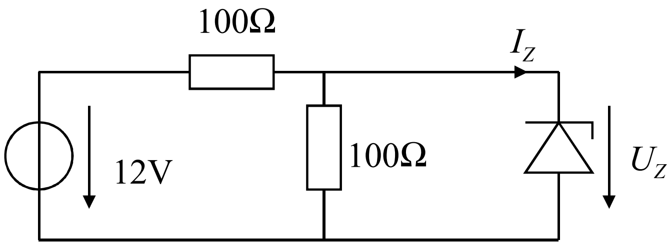
1) Bei der abgebildeten Schaltung ist der Kondensator zunächst entladen. Zum Zeitpunkt t=0 wird der Schalter S geschlossen.



a) Zeichnen Sie eine ab diesem Zeitpunkt gültige Ersatzschaltung, die geeignet ist, den Zeitverlauf $u_C(t)$ zu bestimmen.
b) Auf welchen Endwert lädt sich der Kondensator auf?
c) Wie groß ist die Zeitkonstante?
d) Wie lange dauert es, bis $u_C(t)$ seinen Endwert auf 1% genau erreicht hat?
e) Geben sie die Zeitfunktion $u_C(t)$ an.
f) Skizzieren sie $u_C(t)$.

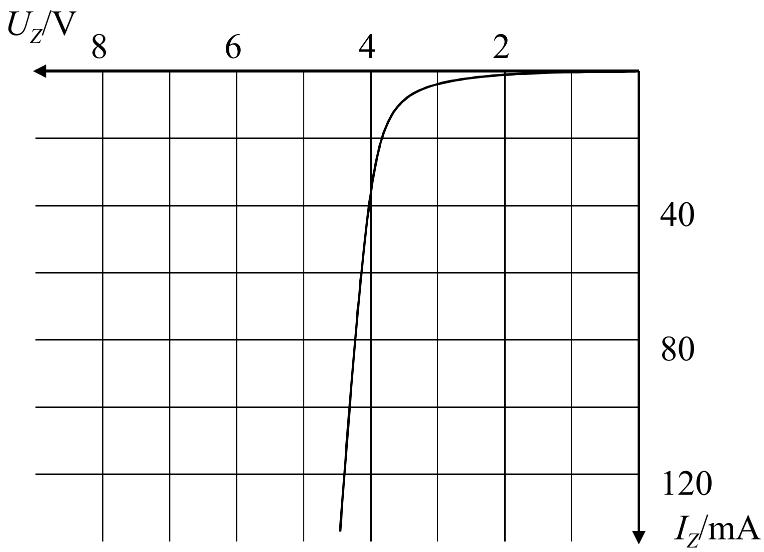
2) Der Schalter S in Aufgabe 1) war lange Zeit geschlossen, so dass $u_C(t)$ seinen Endwert erreicht hat. Zum Zeitpunkt t=0 (neue Zeitzählung) wird der Schalter geöffnet.
a) Welchen (neuen) Endwert nimmt $u_C(t)$ an?
b) Wie groß ist jetzt die Zeitkonstante?
c) Wie lange dauert es, bis $u_C(t)$ seinen Endwert auf 1% genau erreicht hat?
d) Geben sie die Zeitfunktion $u_C(t)$ an.
e) Skizzieren sie $u_C(t)$.

3) Die Skizze zeigt die Kennlinine einer Z-Diode und eine Schaltung mit dieser Z-Diode.

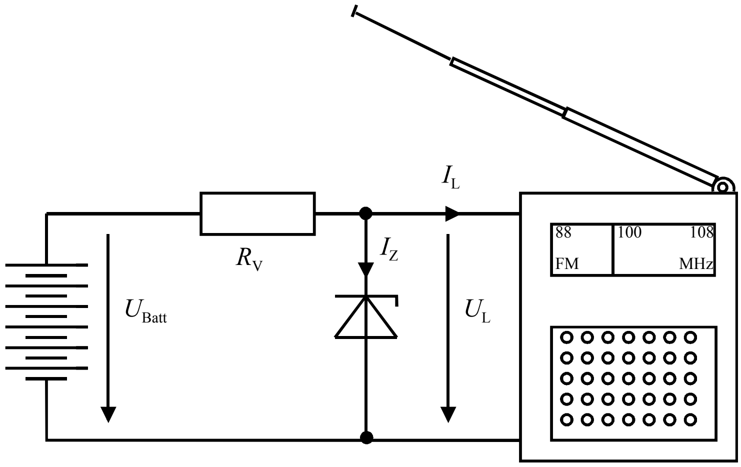


a) Welche Leerlaufspannung und welchen Innenwiderstand hat der Schaltungsteil links von der Z-Diode?

b) Zeichnen Sie die Belastungskennlinie („Widerstandsgerade") dieses Schaltungsteils in das Diagramm ein und ermitteln Sie U_Z und I_Z graphisch.

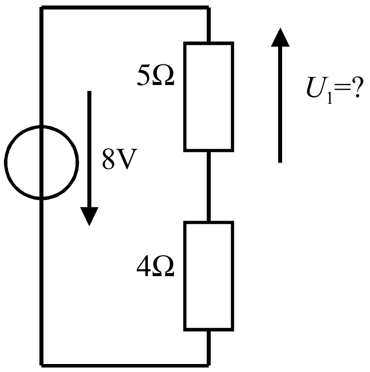


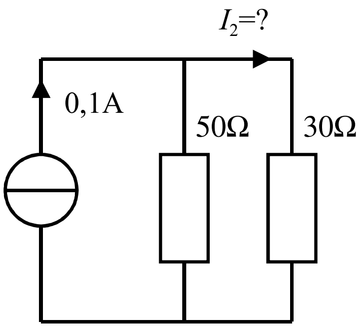
1) Ein Taschenradio ist für den Betrieb mit 2 Alkalizellen (3V) ausgelegt. Seine Stromaufnahme schwankt zwischen 10mA (kleine Lautstärke) und 50mA (große Lautstärke). Es soll nun an einer Autobatterie betrieben werden, deren Spannung zwischen 10V und 14V liegen kann. Die Versorgungsspannung soll mit einer Z-Diode stabilisiert werden.

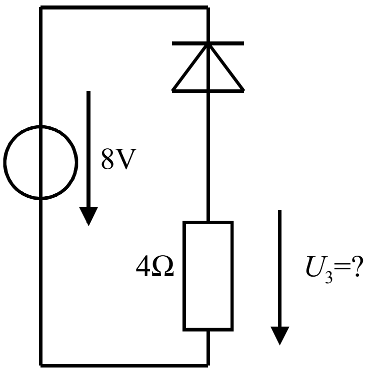


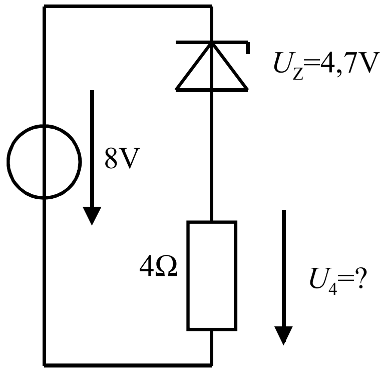
a) Wählen Sie für R_V einen Wert aus der E6-Reihe (1,0 ; 1,5 ; 2,2 ; 3,3 ; 4,7 ; 6,8), so dass unter „worst-case-Bedingungen" I_Z mindestens 5mA beträgt, aber nicht unnötig groß ist. Die Zenerspannung soll konstant 2,7V betragen. (Überlegen Sie zuerst, was hier „worst-case" bedeutet).
b) Wie groß kann die Verlustleistung in R_V und in der Z-Diode höchstens werden. (Achtung: hier andere „worst-case"-Bedingungen und das Radio kann auch ausgeschaltet sein.)
c) Die Autobatterie hat ein Ladung von 45Ah (D.h. es kann z.B. 45 Stunden lang ein Strom von 1A entnommen werden). Um wieviel Prozent entlädt sich die Batterie, wenn die Anordnung 1 Woche lang angeschlossen bleibt (bei U_{Batt} = 12V). Wie wirkt es sich aus, wenn das Radio dabei ausgeschaltet ist, wie wenn es eingeschaltet ist?

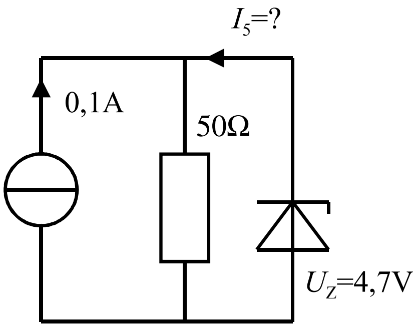
2) Berechnen Sie!

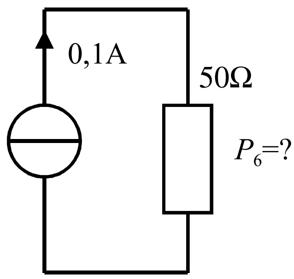






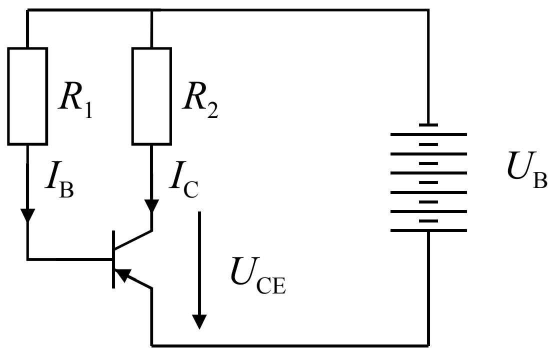


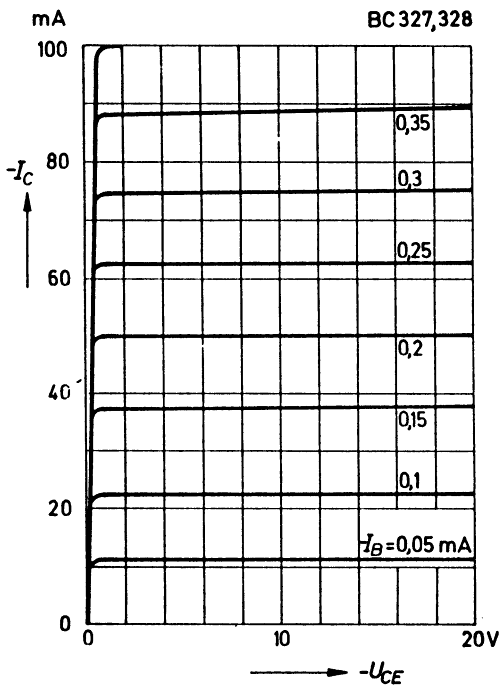




Aufgabe 1

Beachten Sie, dass in der Schaltung ein PNP-Transistor eingebaut ist. Der Innenwiderstand der Batterie soll vernachlässigt werden.

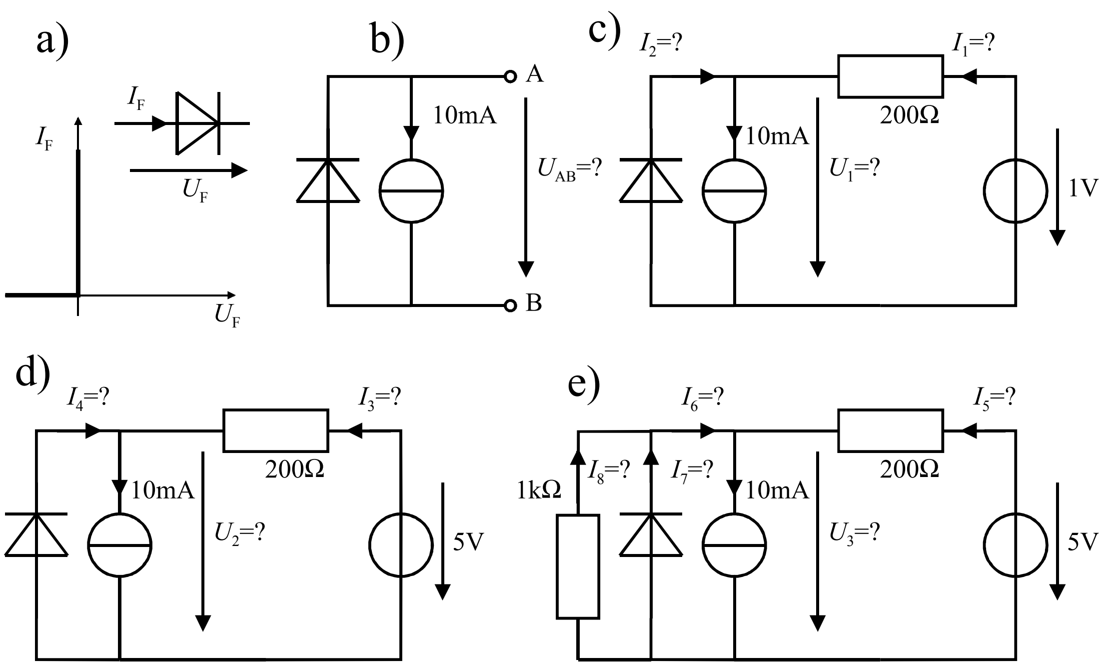




U_B=12V
R_2 = 220Ω

a) Zeichnen Sie den Zählpfeil für U_B ein.
b) Zeichnen Sie die „Arbeitsgerade“ in das Ausgangskennlinienfeld ein.
c) Dimensionieren Sie R_1 so, dass U_{CE} = -8V wird (Basis-Emitterspannung ca. 0.6V).
d) Verlustleistung im Transistor und in R_2?

Aufgabe 2 (Denksport!; die Diode ist ideal (Bild a))



U_{AB}	U_1	I_1	I_2	U_2	I_3	I_4	U_3	I_5	I_6	I_7	I_8

Name:	Matr.-Nr.:

Fachhochschule Mannheim Hochschule für Technik und Gestaltung Klausur EGI	SS 2000	Prüfer: Prof. Best
10.07.2000	Bearbeitungszeit: 120 min Hilfsmittel: Taschenrechner, handschriftliche Formelsammlung (2 Blatt A4)	

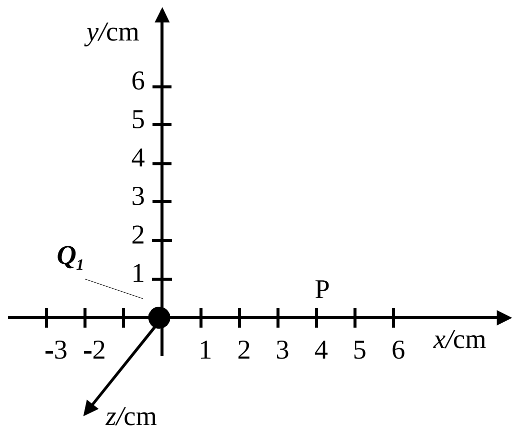
Tragen Sie Namen und Matrikelnummer auf diesem Blatt und Ihren Lösungsblättern ein.
Die erzielbaren Punkte stehen in [ ]. Ergebnisse bitte in die Aufgabenblätter eintragen; **Nebenrechnungen mit abgeben**.

Aufgabe 1 [8]

Im Ursprung eines kartesischen Koordinatensystems befindet sich eine Ladung $\boldsymbol{Q_1}$. Die von ihr erregte elektrische Flussdichte im Punkt P (x=4cm, y=0cm, z=0cm) beträgt:

$$\vec{D} = \begin{pmatrix} -300 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{nC}}{\text{m}^2}$$

$(\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}})$



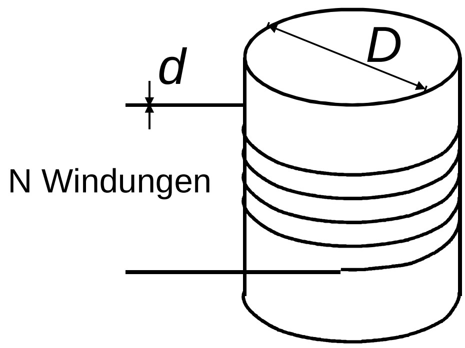
a) [2] Wie groß ist die elektrische Feldstärke $\vec{E}$ im Punkt P?
b) [4] Wie groß ist Q_1?
c) [2] Welche Kraft $\vec{F}$ wirkt auf eine Ladung Q_2 = -10nC, die an die Stelle P gebracht wird?

a)	b)	c)
$\vec{E}$ =	Q_1 =	$\vec{F}$ =

Aufgabe 2 [5]

Ein Widerstand hat N=850 Windungen mit D=5cm Durchmesser aus d=0,3mm dickem Nikkelindraht (ρ = 0,43Ωmm^2/m).

Formel: R=
Größe: R=



Aufgabe 3 [4]

Der Widerstand der Kupferwicklung (α = 0,0038/°C) eines Elektromotors beträgt bei 10°C zunächst 850Ω. Nach längerem Betrieb ist der Widerstand 1018Ω. Auf welche Temperatur hat sich die Wicklung erwärmt?

Formel: T =	Größe: T =

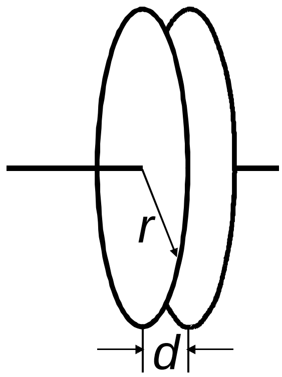
Aufgabe 4 [4]

Ein Kondensator besteht aus zwei kreisförmigen Platten mit r=10cm, die einen Abstand von d=1mm voneinander haben.

a) [2] Berechnen Sie die Kapazität.

b) [1] Wie groß ist die elektrische Feldstärke zwischen den Platten, wenn an den Kondensator eine Spannung von 100V angelegt wird?

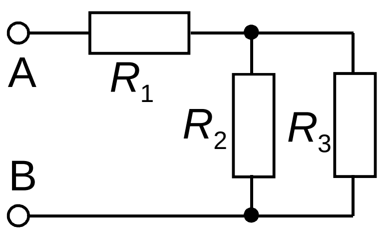
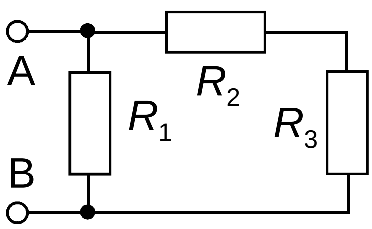
c) [1] Wieviel Ladung befindet sich dann jeweils auf einer der Kondensatorplatten?



a) C =	b) E =	c) Q =

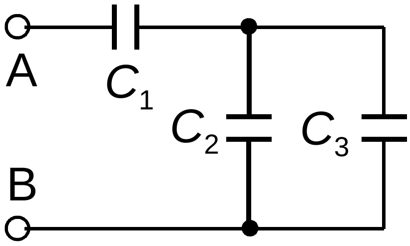
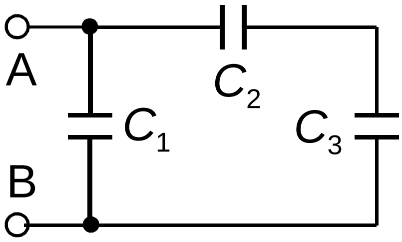
Aufgabe 5 [4]

Geben Sie jeweils den Widerstand zwischen den Klemmen A und B an.

	a) R_{AB} =
	b) R_{AB} =

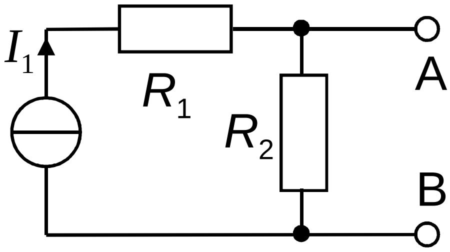
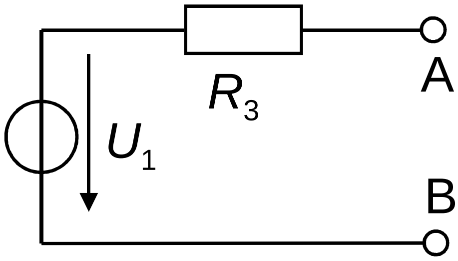
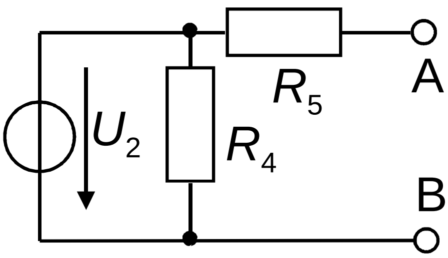
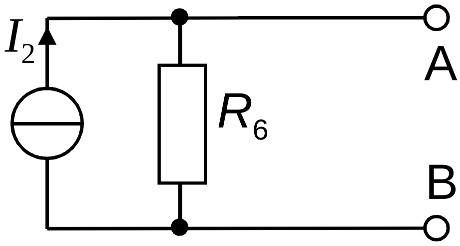
Aufgabe 6 [4]

Geben Sie jeweils die Kapazität zwischen den Klemmen A und B an.

	a) $C_{\mathrm{AB}} =$
	b) $C_{\mathrm{AB}} =$

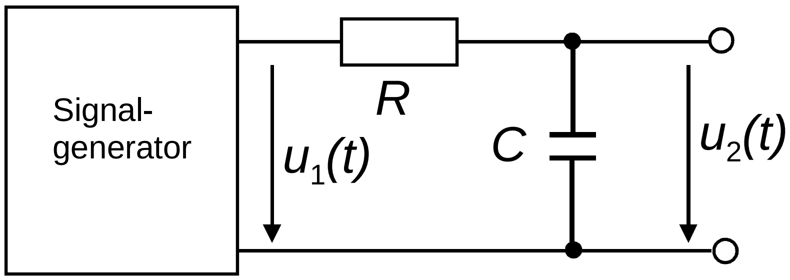
Aufgabe 7 [4]

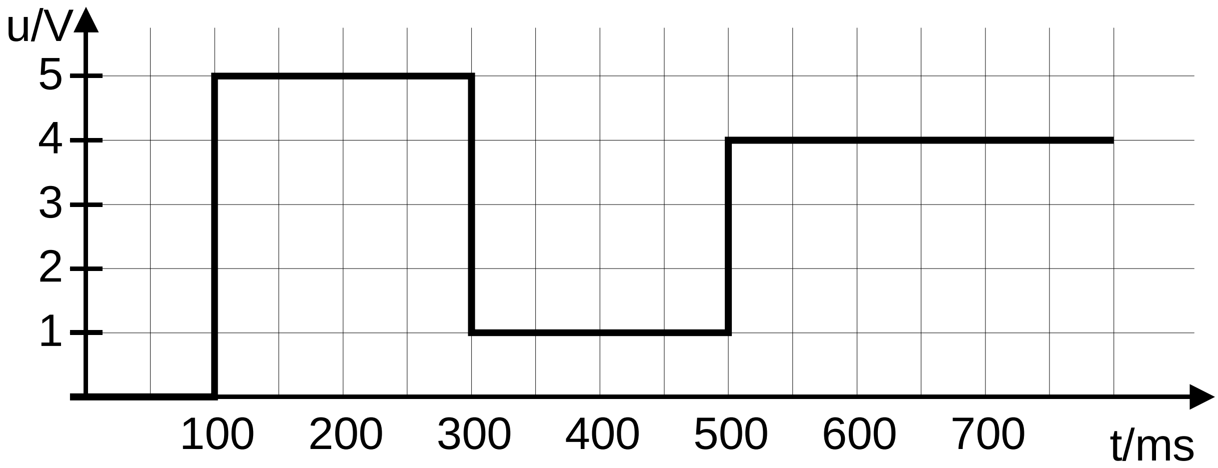
In der folgenden Tabelle sollen die Schaltungen in der linken Spalte und in der mittleren Spalte jeweils gleiches Verhalten bezüglich der Klemmen A und B haben. Geben Sie die dafür notwendigen Beziehungen in der rechten Spalte an.

		a) U_1= R_3=
		b) I_2= R_6=

Aufgabe 8 [10]

Ein Signalgenerator erzeugt eine zeitveränderliche Spannung u_1(t). Der Verlauf dieser Spannung ist in der Skizze unten dargestellt. Für einige Zeitpunkte soll u_2(t) berechnet werden und es soll der Verlauf von u_2(t) in die Skizze eingetragen werden. Werte: **R = 100kΩ, C = 3,3µF, u_2(t=0) = 0V.**



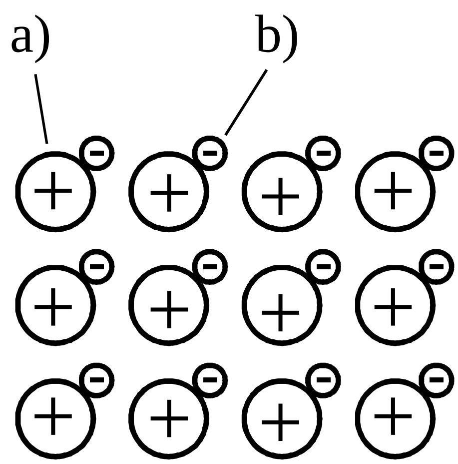


t/ms	100	300	500	700
u_2(t)/V				

Aufgabe 9 [6]

Die nebenstehende Skizze zeigt symbolisch die unbeweglichen Atomrümpfe der Fremdatome (große Kreise) und die beweglichen Ladungsträger (kleine Kreise) in einem dotierten Halbleiterkristall.

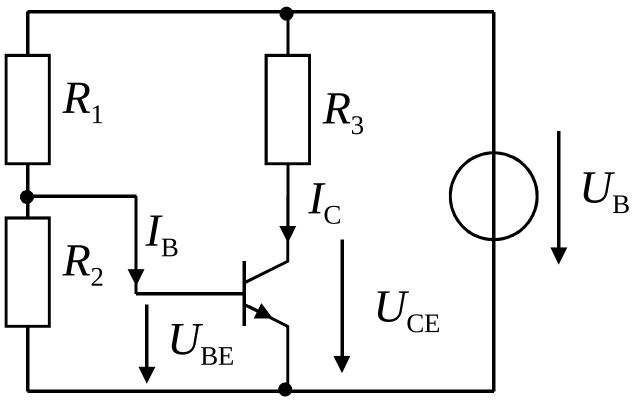
a) [2] Wie nennt man die Fremdatome (positiv geladenen Atomrümpfe) ?
b) [2] Wie nennt man die negativen beweglichen Ladungsträger?
c) [2] Ist hier ein P-Leiter oder ein N-Leiter dargestellt?

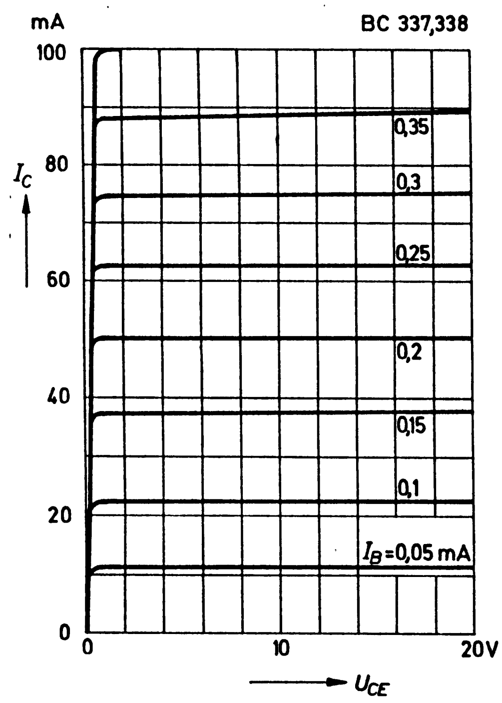


a)	b)	c)

Aufgabe 10 [8]

In der unten skizzierten Schaltung sind U_B , R_2 und R_3 gegeben. Für verschiedene Werte von R_1 sollen jeweils I_B, U_{CE} und I_C bestimmt werden (in die Tabelle unten eintragen). Nehmen Sie dazu an, dass die Durchlassspannung der Basis-Emitter-Strecke 0,6V beträgt.





U_B = 18V
R_2 = 10kΩ
R_3 = 220Ω

a) [2] Geben Sie I_B als Funktion von R_1 an.

Formel: I_B =

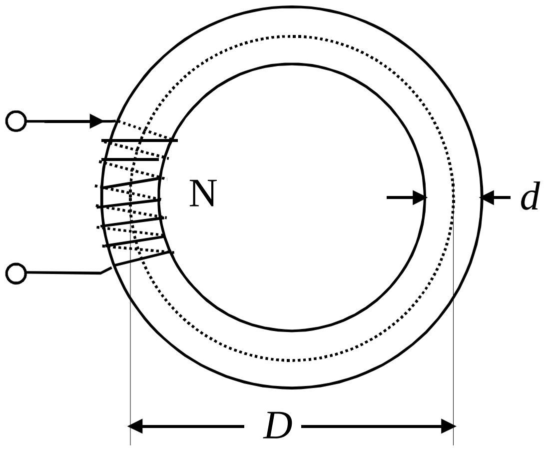
b) [2] Tragen Sie die "Arbeitsgerade" in das Diagramm ein.

c) [4] Füllen Sie die Tabelle aus.

R_1	1MΩ	100kΩ	68kΩ	10kΩ
I_B				
U_{CE}				
I_C				

Aufgabe 11 [5]

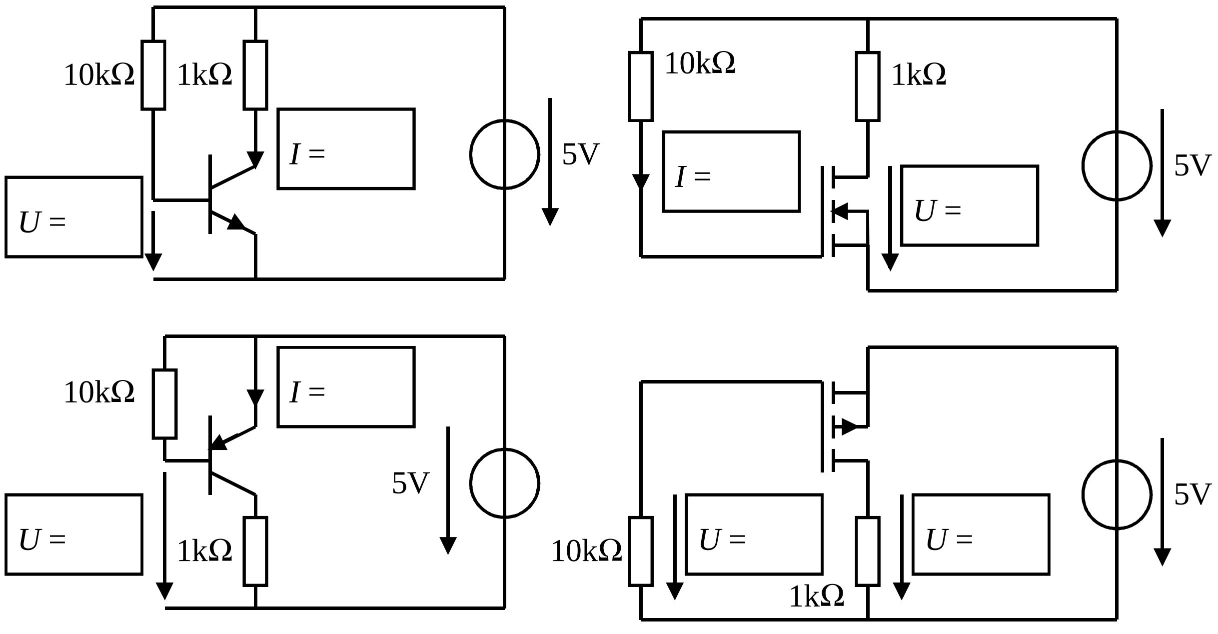
Auf einen ringförmigen Kern (mittlerer Durchmesser D = 10cm, Dicke d = 1 cm, Permeabilitätszahl μ_r = 10000) sind N =1000 Windungen aufgebracht.
Berechnen Sie die Induktivität.
($\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$)



Formel: L =	Größe: L =

Aufgabe 12 [8]

Tragen Sie im Folgenden Spannungen und Ströme ein. (Durchlassspannung an Dioden bzw. Basis-Emitterstrecken mit 0,6V, Spannung an durchgeschalteten Transitoren mit 0V annehmen.)



Name:	Matr.-Nr.:

Fachhochschule Mannheim Hochschule für Technik und Gestaltung Klausur EGI Version a	WS 2000/01	Prüfer: Prof. J. Best
05.02.2001	Bearbeitungszeit: 120 min Hilfsmittel: Taschenrechner, handschriftliche Formelsammlung (2 Blatt A4)	

Tragen Sie Namen und Matrikelnummer auf diesem Blatt und Ihren Lösungsblättern ein.
Die erzielbaren Punkte stehen in [ ]. Ergebnisse bitte in die Aufgabenblätter eintragen;
Nebenrechnungen mit abgeben.

Aufgabe 1 [7]

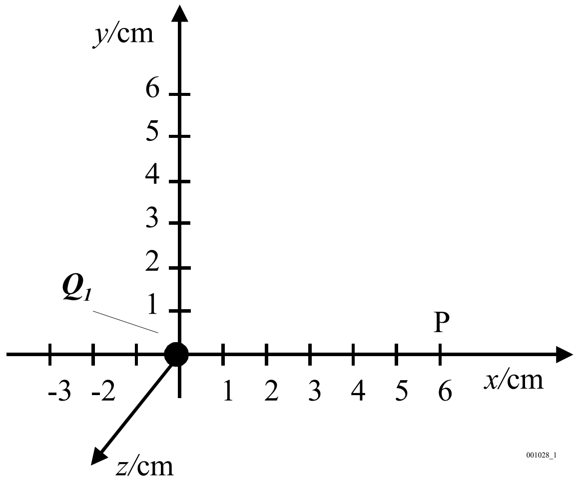
Im Ursprung eines kartesischen Koordinatensystems befindet sich eine Ladung Q_1=10nC. Berechnen Sie für den Punkt P (x=6cm, y=0cm, z=0cm):
(Alle Größen sind als Vektor anzugeben.)

($\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{As}}{\text{Vm}}$)

a) [3] Die elektrische Flussdichte $\vec{D}$.

b) [2] Die elektrische Feldstärke $\vec{E}$.

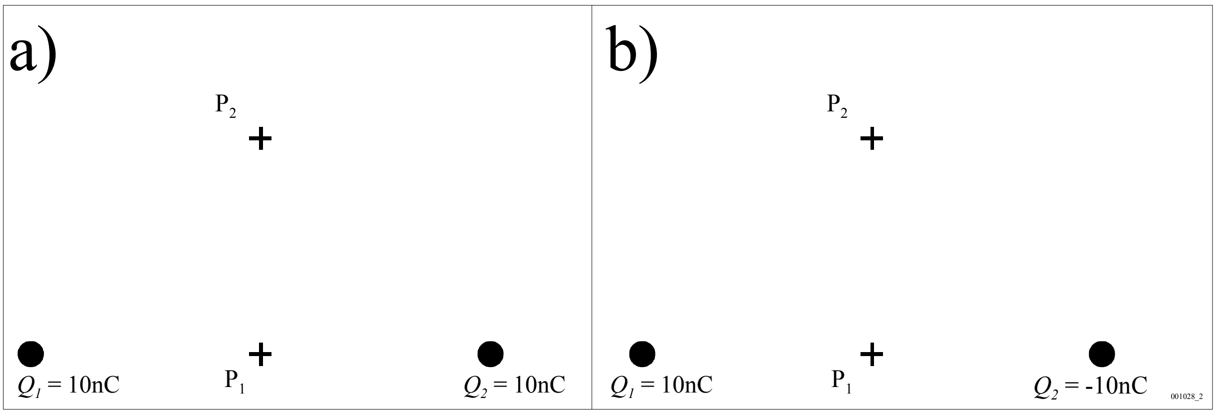
c) [2] Die Kraft $\vec{F}$, die auf eine Ladung Q_2 = -10nC wirkt, die an die Stelle P gebracht wird.



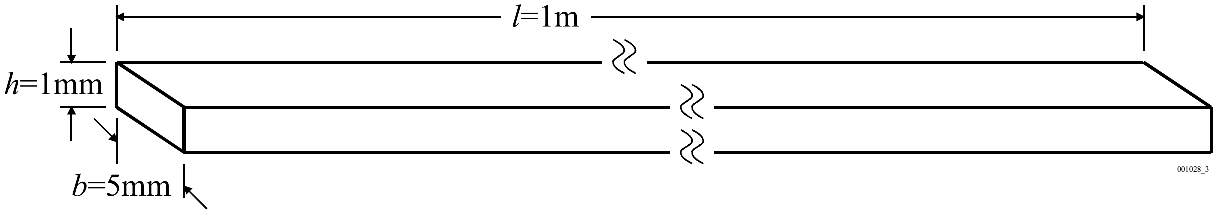
a)	b)	c)
$\vec{D}=$	$\vec{E}=$	$\vec{F}=$

Aufgabe 2 [4]

In Bild a) sind die Ladungen Q_1 und Q_2 gleich groß und haben gleiches Vorzeichen; in Bild b) sind Q_1 und Q_2 ebenfalls gleich groß, haben aber verschiedenes Vorzeichen. Tragen Sie jeweils im Punkt P_1 und im Punkt P_2 die Richtung der elektrische Feldstärke als Vektor-Pfeil ein (nur qualitativ, keine Rechnung!).



Aufgabe 3 [5]
Eine Kupferschiene hat rechteckigen Querschnitt (siehe Skizze) und ist 1m lang. Sie wird von einem Strom von I = 50A in Längsrichtung durchflossen. Wie groß ist die elektrische Spannung zwischen den Enden der Schiene? ($\rho = 0{,}018\Omega mm^2/m$)

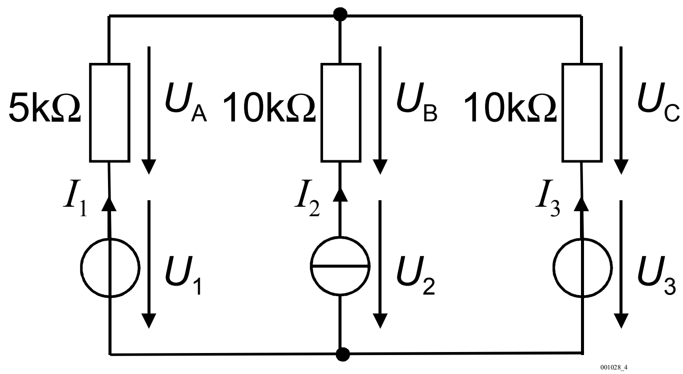


Formel: U =	Größe: U =

Aufgabe 4 [4]
Die Wicklung eines Elektromagneten hat bei 20°C einen Widerstand von 500Ω (α=0,0038/°C). Welchen Widerstand hat sie im Betrieb bei 62°C?

Formel: R =	Größe: R =

Aufgabe 5 [12]
In der nebenstehenden Schaltung soll in einem ersten Schritt (Teil a-c) die Spannung U_C für verschiedene Kombinationen der Werte der Spannungen U_1 und U_3 und des Stromes I_2 berechnet werden. In einem zweiten Schritt (Teil d) sind dann alle Spannungen und Ströme zu berechnen.
Hinweise: Überlagerungssatz!
Achtung: enthält auch Stromquelle.
Man kann alles „im Kopf" rechnen!



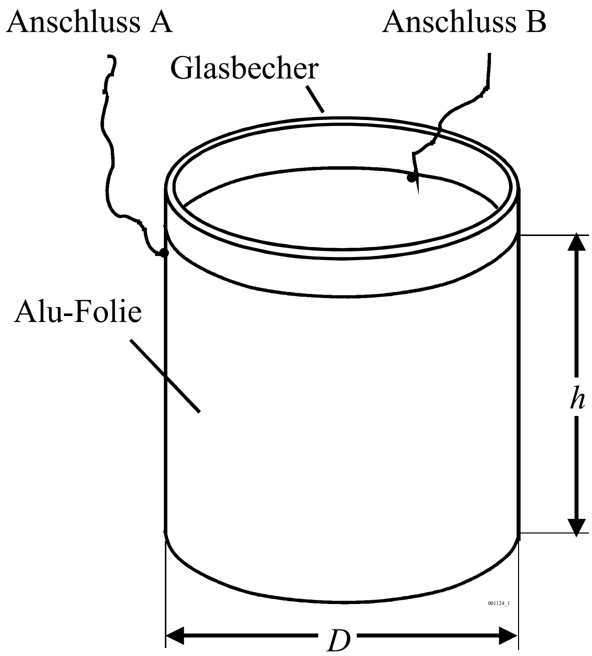
a) [2] Für U_1 = 9V, I_2 = 0mA, U_3 = 0V ist U_C =	b) [2] Für U_1 = 0V, I_2 = 0mA, U_3 =15V ist U_C =	c) [2] Für U_1 = 0V, I_2 = 3mA, U_3 = 0V ist U_C =

d) [6] Für U_1=9V, I_2=3mA, U_3 = 15V
ist
U_C = U_A = U_B= U_2 =

I_3= I_1=

Aufgabe 6 [6]

Ein Glasbecher ist innen und außen, mit Ausnahme des Bodens und eines Streifens am Rand des Bechers, mit Alu-Folie beklebt. Der äußere Belag ist mit einem Anschluss A, der innere Belag mit einem Anschluss B versehen. Berechnen Sie die Kapazität dieser Anordnung sowie die gespeicherte Ladung, wenn die Spannung zwischen Anschluss A und B 10000V beträgt.



h = 8cm D = 6cm $\varepsilon_r = 6$

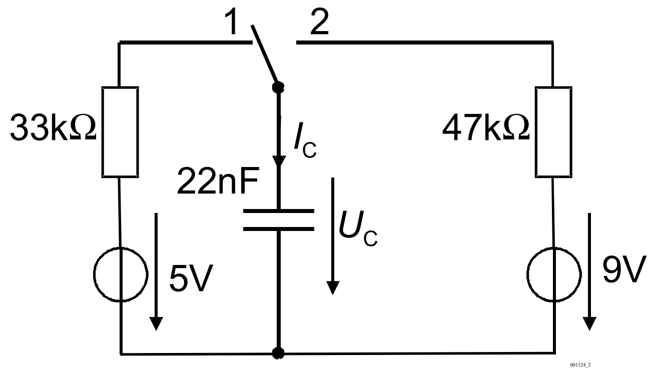
Dicke des Glases: 2mm

C =

Q =

Aufgabe 7 [8]

In der neben skizzierten Schaltung war der Schalter lange Zeit in Stellung 1.
Zum Zeitpunkt t=0 wird der Schalter in Stellung 2 umgelegt.



a) [4] Geben Sie $u_C(t)$ und $i_C(t)$ an (mit eingesetzten Werten) :

$u_C(t)$= $i_C(t)$=

b) [4] Zu welchem Zeitpunkt t_1 ist $u_C(t_1) = 7\text{V}$?

t_1=

Aufgabe 8 [6]

a) [4] Wie unterscheiden sich Metalle, Halbleiter und Isolatoren bezüglich ihres Bandabstandes? Wie heißen die Bänder, die dabei eine Rolle spielen?

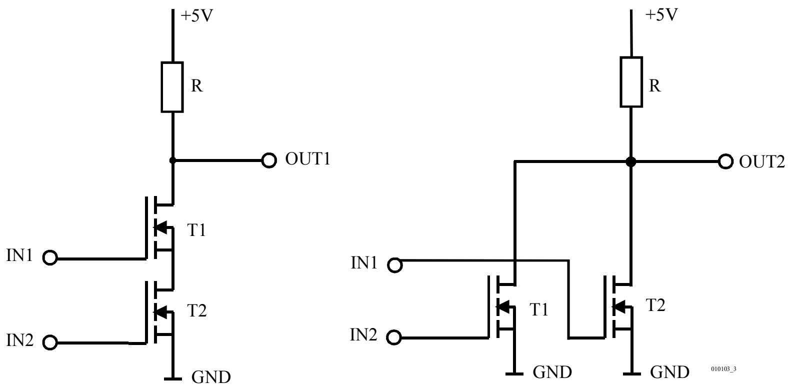
b) [2] Wie nennt man 5-wertige Fremdatome (z.B. Phophor), die in Silicium „eingebaut“ wurden?

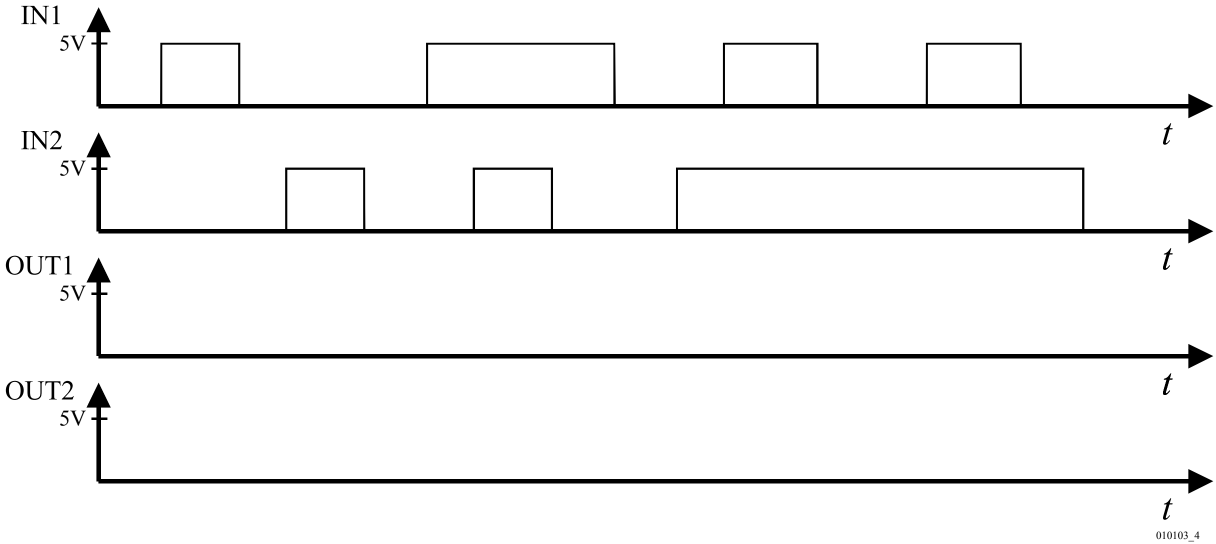
Aufgabe 9 [8]

Mit den beiden nebenstehenden Schaltungen sind jeweils logische Verknüpfungen realisiert.

In dem Diagramm unten sind die Verläufe der Eingangsspannungen IN1 und IN2 angegeben.

a) [6] Tragen Sie dazu die Verläufe der Ausgangsspannungen OUT1 und OUT2 ein.





b) [2] Welche Art von Verknüpfung ist mit der linken bzw. mit der rechten Schaltung realisiert?

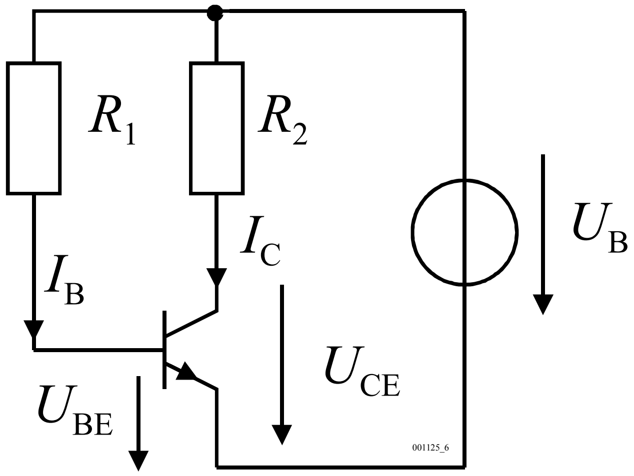
linke Schaltung:	rechte Schaltung:

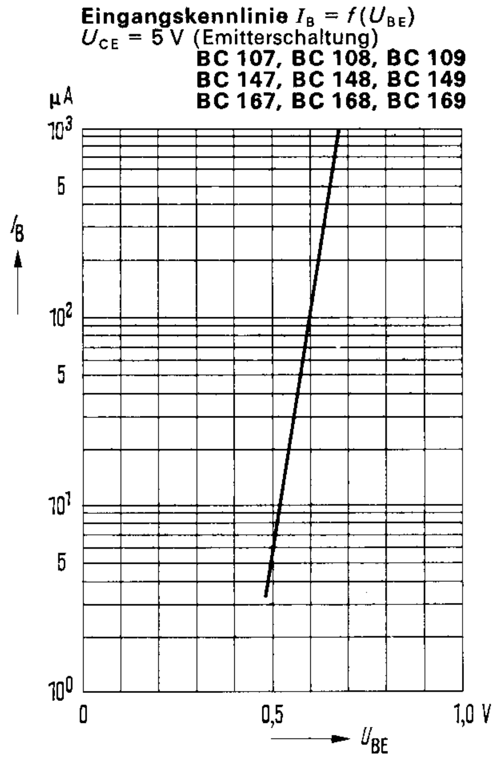
Aufgabe 10 [8]
In der nebenstehenden Schaltung ist

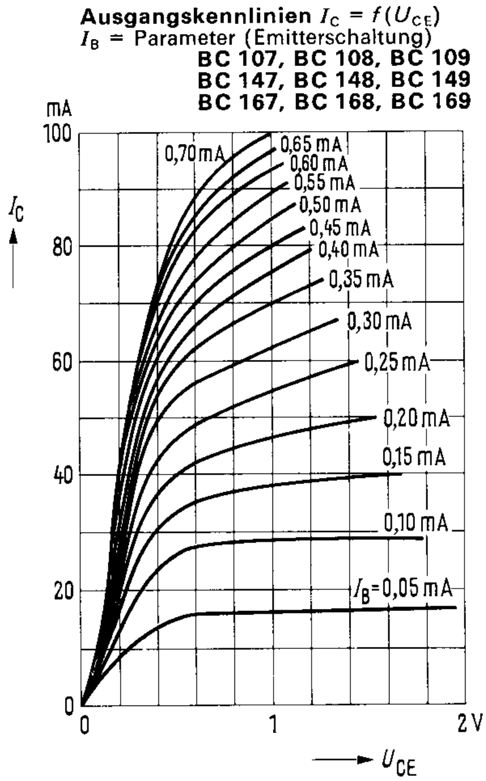
U_B=5V; R_1=10kΩ; R_2=100Ω

Bestimmen Sie mit Hilfe der unten angegebenen Kennlinien den sich einstellenden Arbeitspunkt.

(keine Näherung, Werte möglichst genau mit den Kennlinien bestimmen.)







U_{BE}=	U_{CE}=
I_B=	I_C=

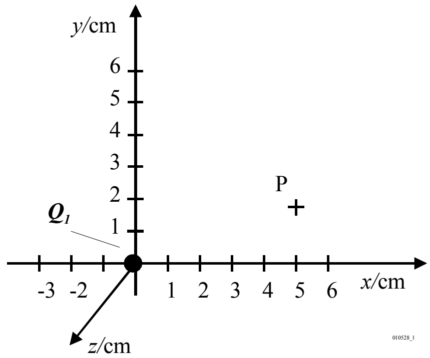
Name:	Matr.-Nr.:

Fachhochschule Mannheim Hochschule für Technik und Gestaltung Klausur EGI Version b	SS 2001	Prüfer: Prof. J. Best
09.07.2001	Bearbeitungszeit: 120 min Hilfsmittel: Taschenrechner, Hilfsblatt EGI	

Tragen Sie Namen und Matrikelnummer auf diesem Blatt und Ihren Lösungsblättern ein. Die erzielbaren Punkte stehen in [ ]. Ergebnisse bitte in die Aufgabenblätter eintragen; **Nebenrechnungen mit abgeben**.

Aufgabe 1 [5]

Im Ursprung eines Koordinatensystems befindet sich eine Ladung Q_1 = 30nC. Berechnen Sie für den Punkt P (x=5cm, y=2cm, z=0cm) die elektrische Flussdichte (Als Vektor angeben!).



$\vec{D} =$

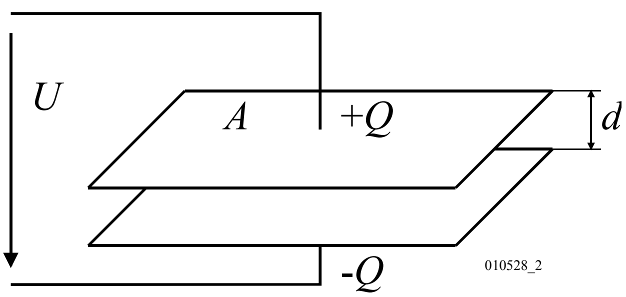
Aufgabe 2 [5]

Die elektrische Flussdichte an einem Punkt P ist bekannt (siehe unten). An diesen Punkt wird eine Ladung Q = 10nC gebracht. Berechnen Sie den Betrag der auf diese Ladung ausgeübten Kraft.

$\vec{D} = \begin{pmatrix} 300 \\ 400 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot 10^{-9} \frac{\text{AS}}{\text{m}^2}$	$\lvert F \rvert =$

Aufgabe 3 [5]

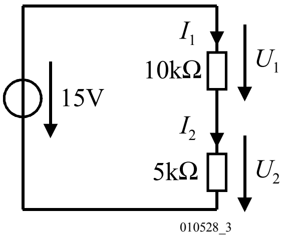
Bei einem Plattenkondensator beträgt A =100cm^2 und d = 1mm. Zwischen den Platten befindet sich ein Isolierstoff mit der Permittivitätszahl 5. Es wird eine Spannung U=100V angelegt. Berechnen Sie die Kapazität des Kondensators, die elektrische Feldstärke zwischen den Platten und die Ladung Q.



$C =$	$E =$	$Q =$

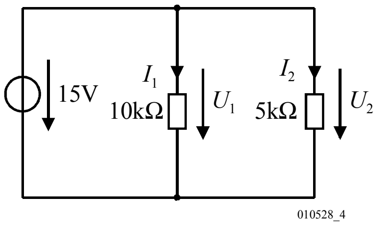
Aufgabe 4 [8] Berechnen Sie jeweils.

a) [2]



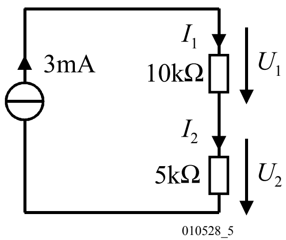
U_1 =	U_2 =
I_1 =	I_2 =

b) [2]



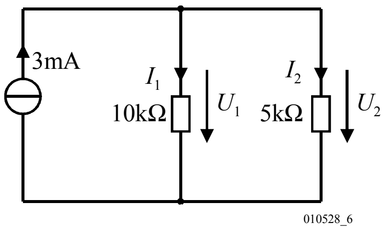
U_1 =	U_2 =
I_1 =	I_2 =

c) [2]



U_1 =	U_2 =
I_1 =	I_2 =

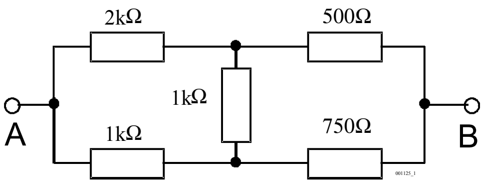
d) [2]



U_1 =	U_2 =
I_1 =	I_2 =

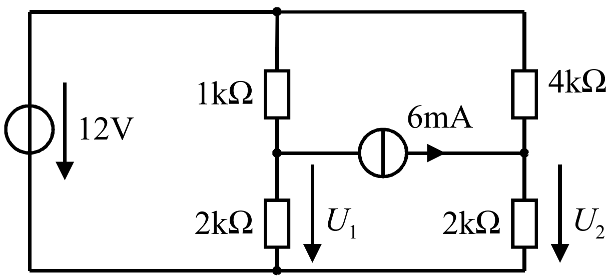
Aufgabe 5 [4]

Wie groß ist der Widerstand zwischen den Klemmen A und B?



R_{AB} =

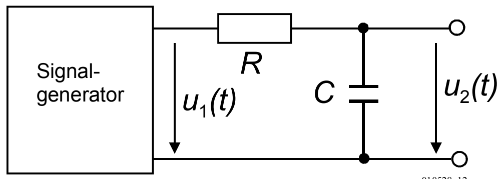
Aufgabe 6 [4] Berechnen Sie U_1 und U_2.



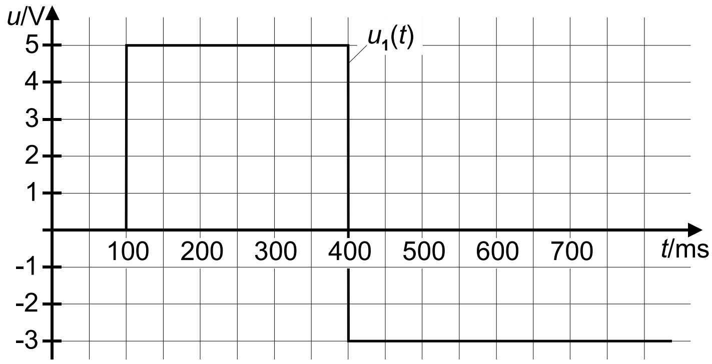
010528_7

$U_1 =$	$U_2 =$

Aufgabe 7 [10]
Ein Signalgenerator erzeugt eine Spannung u_1(t) und speist ein RC-Glied. Es gilt $u_2(0)=0$.
Skizzieren Sie den Verlauf von $u_2(t)$ und berechnen Sie den Zeitpunkt t_1, bei dem $u_2(t)$ die t-Achse schneidet.
(R=100kΩ, C=2,2µF)



010528_12



010528_13

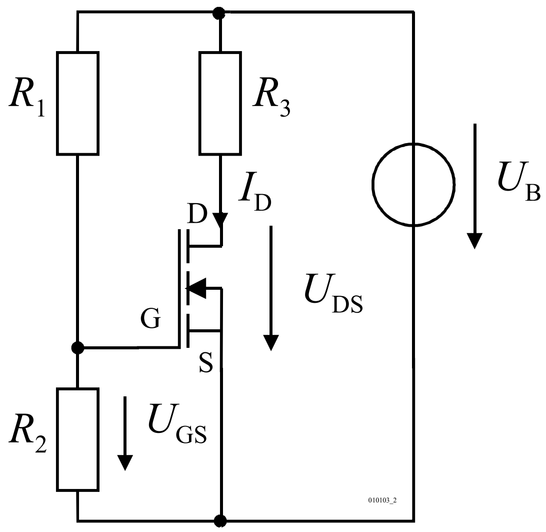
t_1=

Aufgabe 8 [4]

Nennen Sie verschiedene Anwendungen und Arten von Halbleiterdioden.

Aufgabe 9 [8]

In der nebenstehenden Schaltung ist $\boldsymbol{U_B} = \mathbf{12V}$ und $\boldsymbol{R_1} = \boldsymbol{R_2} = \mathbf{100k\Omega}$**;** die Ausgangskennlinien des MOSFETs sind unten dargestellt.



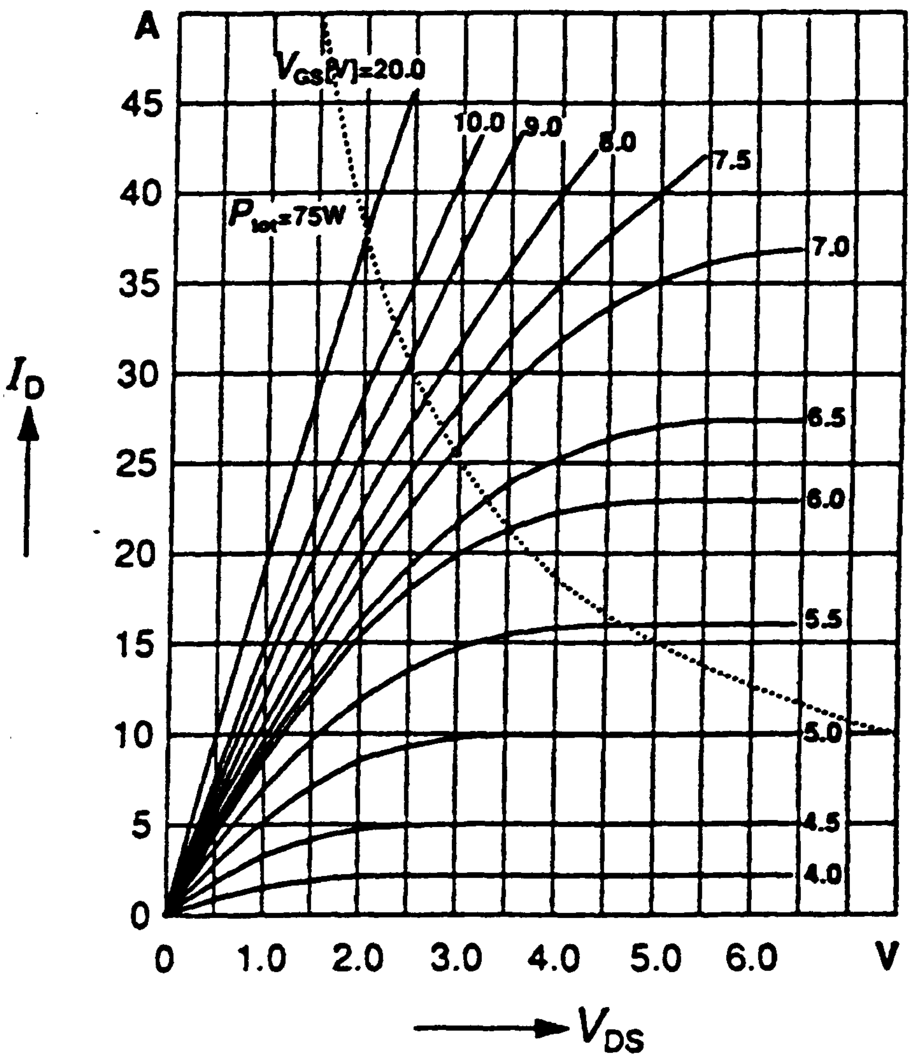
a) [3] Wie groß muss $\boldsymbol{R_3}$ gewählt werden, damit $\boldsymbol{I_D} = \mathbf{20A}$ wird?

R_3 =

b) [3] Zeichnen Sie für R_3 aus a) die Lastkennlinie in das Diagramm unten ein.

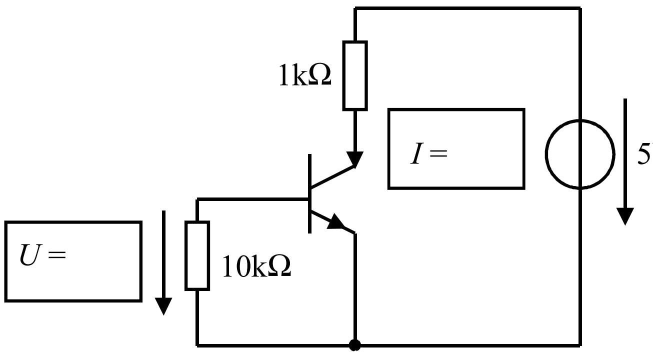
c) [2] Wie groß ist die Verlustleistung im MOSFET?

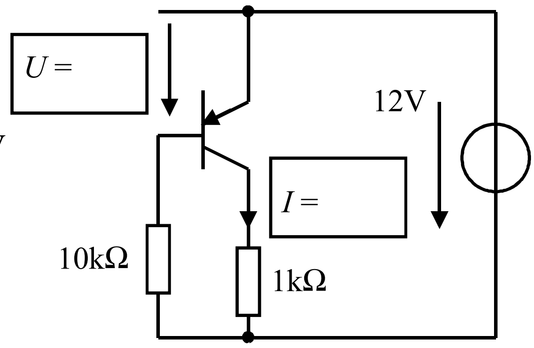
P =

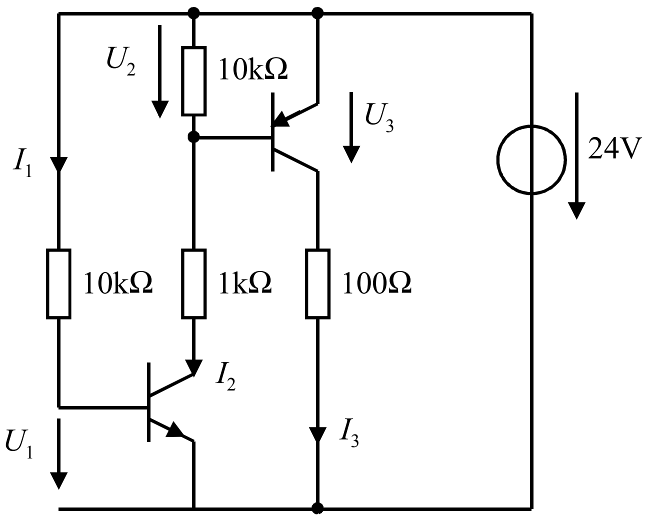


Aufgabe 10 [7]

Tragen Sie im Folgenden Spannungen und Ströme ein. (Durchlassspannung an Si-Dioden bzw. Basis-Emitterstrecken mit 0,6V, an LEDs mit 2V; Spannung an durchgeschalteten Transitoren mit 0V anzunehmen.)







U_1 =

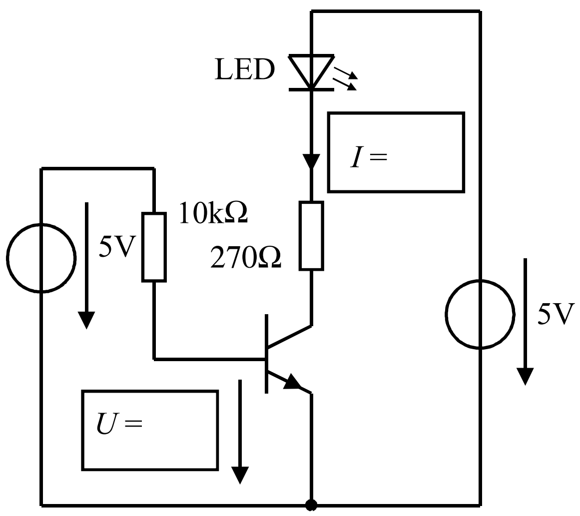
U_2 =

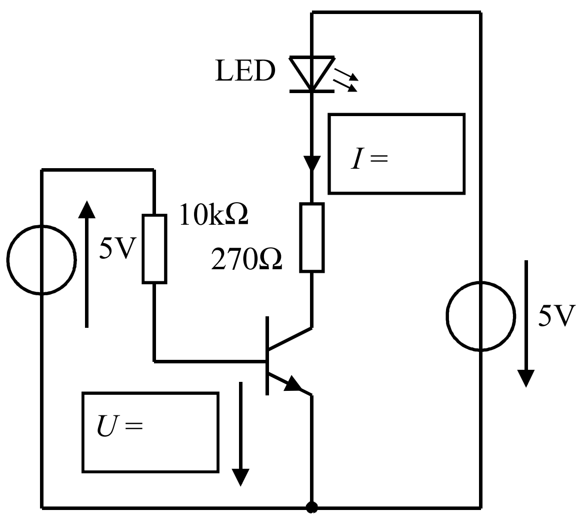
U_3 =

I_1 =

I_2 =

I_3 =

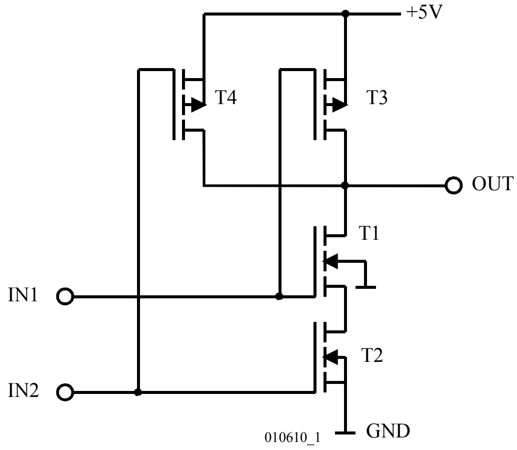




010609 3

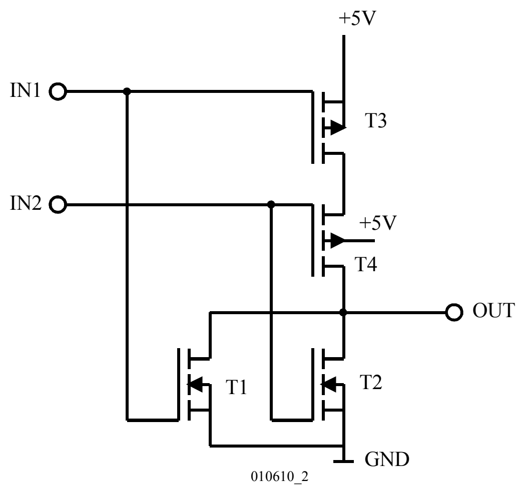
Aufgabe 11 [6]

a) [3] Bei der folgenden Schaltung ist **IN1=5V** und **IN2=0V**. Tragen Sie für jeden der Transistoren ein, ob dieser durchgeschaltet (**ON**) oder gesperrt (**OFF**) ist. Wie groß ist OUT? Welche logische Verküpfung ist realisiert?



T1=	T2=	T3=	T4=
OUT=			
Dies ist ein -Gatter			

b) [3] Bei der folgenden Schaltung ist **IN1=5V** und **IN2=0V**. Tragen Sie für jeden der Transistoren ein, ob dieser durchgeschaltet (**ON**) oder gesperrt (**OFF**) ist. Wie groß ist OUT? Welche logische Verküpfung ist realisiert?



T1=	T2=	T3=	T4=
OUT=			
Dies ist ein -Gatter			

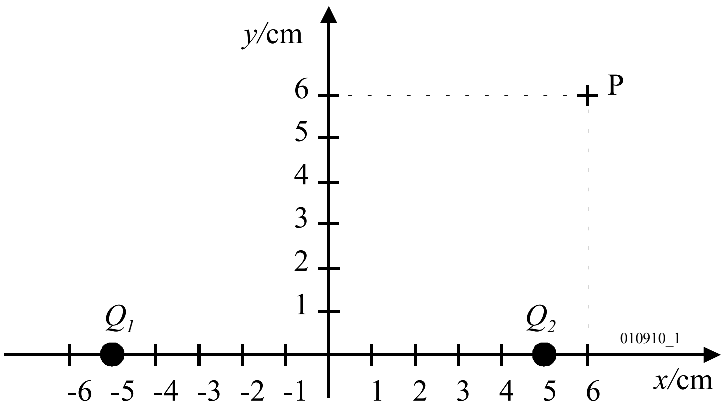
Name:	Matr.-Nr.:

Fachhochschule Mannheim Hochschule für Technik und Gestaltung Klausur EGI	WS 2001/02	Prüfer: Prof. J. Best
04.02.2002 Version a	Bearbeitungszeit: 120 min Hilfsmittel: Taschenrechner, Hilfsblatt EGI	

Tragen Sie Namen und Matrikelnummer auf diesem Blatt und Ihren Lösungsblättern ein.
Die erzielbaren Punkte stehen in [ ]. Ergebnisse bitte in die Aufgabenblätter eintragen;
Nebenrechnungen mit abgeben.

Aufgabe 1 [10]

Die Skizze zeigt die Lage zweier Punktladungen Q_1 und Q_2 in einem Koordinatensystem. Die z-Koordinate ist für beide Ladungen 0. Im Folgenden soll für verschiedene Werte von Q_1 und Q_2 die elektrische Flussdichte im Punkt P (x=6cm, y=6cm, z=0) **vektoriell** angegeben werden.



a)[4]

Werte von Q_1 und Q_2	Elektrische Flussdichte im Punkt P
Q_1 = 10nC Q_2 = 0	$\vec{D}$ =

b)[4]

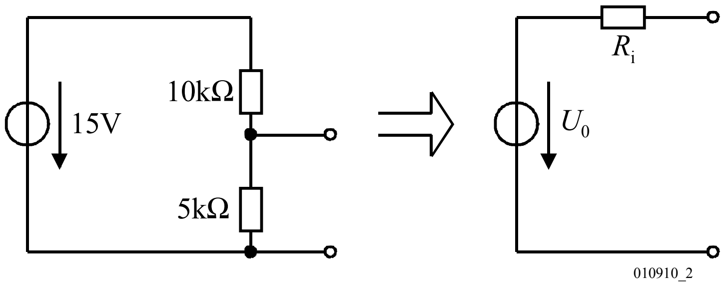
Werte von Q_1 und Q_2	Elektrische Flussdichte im Punkt P
Q_1 = 0 Q_2 = -10nC	$\vec{D}$ =

c)[2]

Werte von Q_1 und Q_2	Elektrische Flussdichte im Punkt P
Q_1 = 10nC Q_2 = -10nC	$\vec{D}$ =

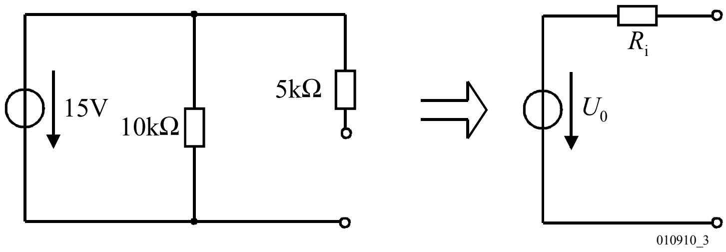
Aufgabe 2 **[12]** Die Schaltungen auf der linken Seite sollen jeweils durch die Ersatzschaltung auf der rechten Seite dargestellt werden.

a) [3]



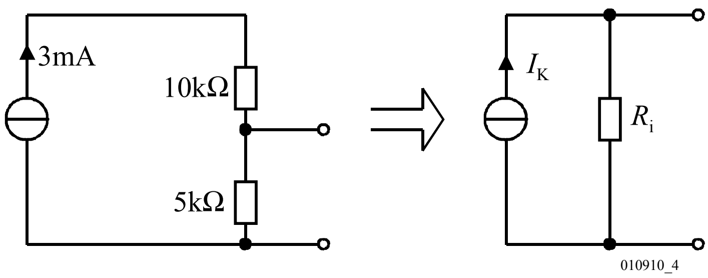
$U_0 =$
$R_i =$

b) [3]



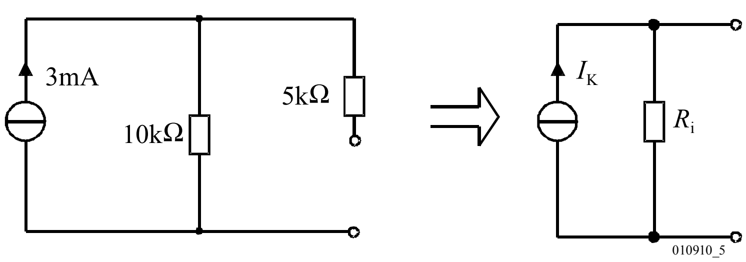
$U_0 =$
$R_i =$

c) [3]



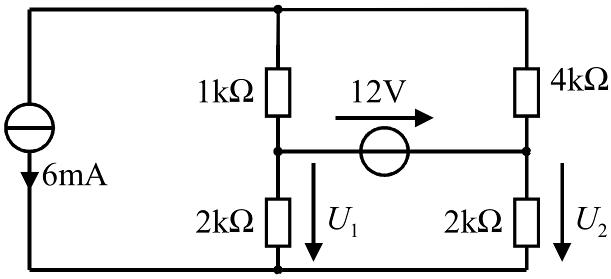
$I_k =$
$R_i =$

d) [3]



$I_k =$
$R_i =$

Aufgabe 3 **[4]** Berechnen Sie U_1 und U_2.

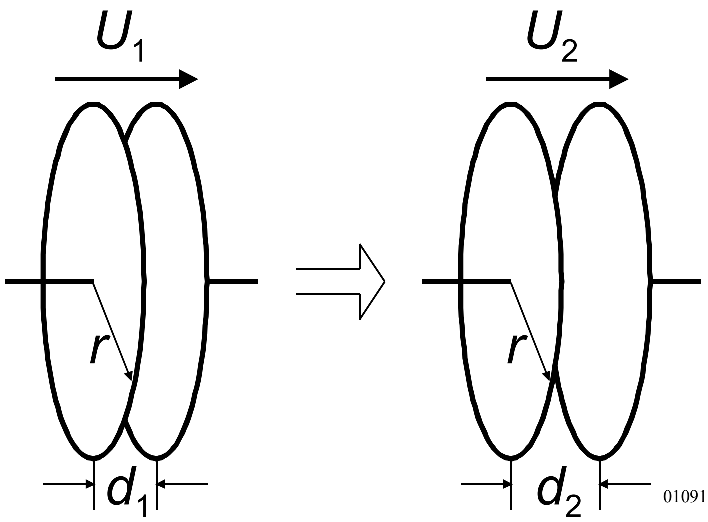


010528_8

U_1 =	U_2 =

Aufgabe 4 **[7]**

Ein Kondensator besteht aus zwei kreisförmigen Platten mit r = 8cm, die zunächst einen Abstand von $\boldsymbol{d_1}$ **= 1mm** voneinander haben. Dieser Kondensator ist auf U_1 = 100V aufgeladen. Seine **Anschlüsse** sind aber **offen**, so dass kein Strom in den Kondensator fließen kann. Der Abstand zwischen beiden Platten wird nun auf $\boldsymbol{d_2}$ **= 2mm** vergrößert. Geben Sie die Kapazität und die Ladung des Kondensators vor und nach der Veränderung des Abstands, sowie die Spannung U_2 an.



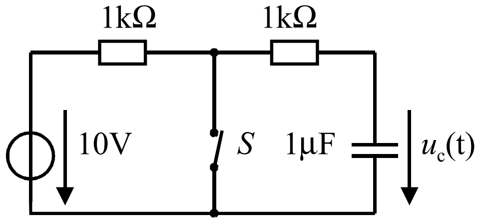
010913_1

vorher:	**nachher:**
U_1 = 100V	U_2 =
C_1 =	C_2 =
Q_1 =	Q_2 =

Aufgabe 5 [9]

Der Schalter S wird jeweils zum Zeitpunkt t=0 **geöffnet**. Geben Sie jeweils die Zeitfunktion $u_C(t)$ an.

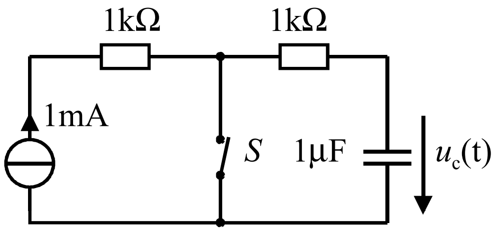
a) [3]



010528_9

$u_C(t) =$

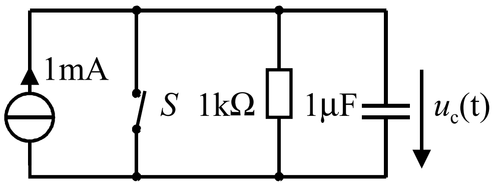
b) [3]



010528_10

$u_C(t) =$

c) [3]



010528_11

$u_C(t) =$

Aufgabe 6 [9]

a) [2] Wie unterscheiden sich Metalle, Halbleiter und Isolatoren bezüglich ihres Bandabstandes? Wie heißen die Bänder, die dabei eine Rolle spielen?

b) [1] Was versteht man unter Eigenleitung?

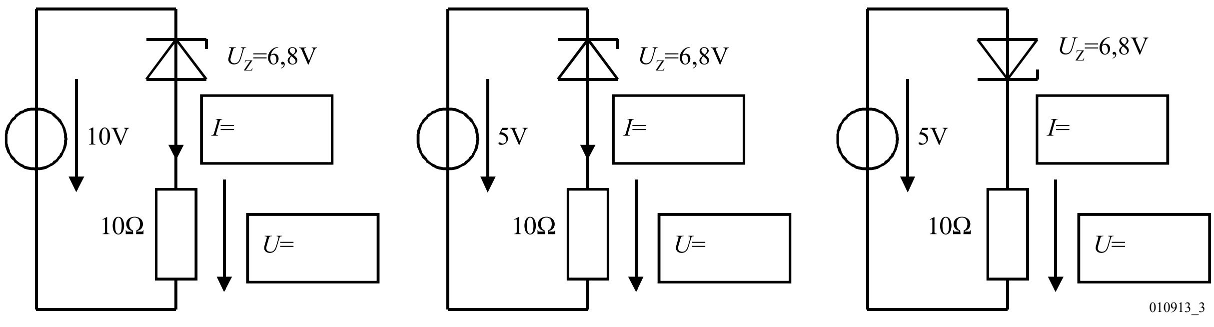
c) [1] Was versteht man unter Dotieren?

d) [2] Was ist ein N-Leiter?

e) [1] Wie nennt man 5-wertige Fremdatome (z.B. Phophor), die in Silicium „eingebaut“ wurden?

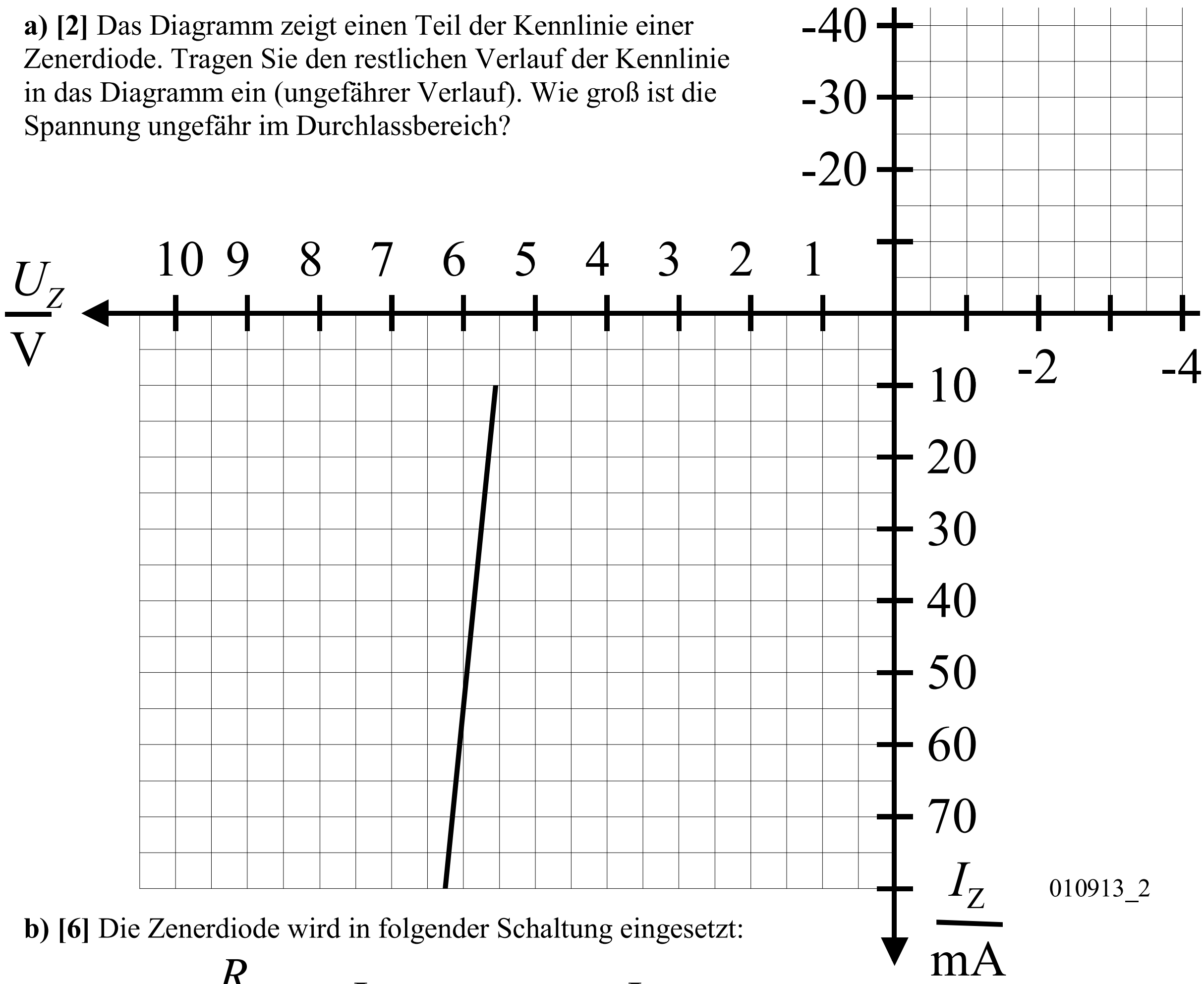
f) [2] Welche Art von beweglichen Ladungsträgern sind in einem P-Leiter in der Mehrheit, welche in der Minderheit? Welche Bezeichnungen sind dafür üblich (**...träger**)?

<u>**Aufgabe 7**</u> **[6]** Geben Sie bei folgenden Schaltungen jeweils *U* und *I* an. (Nehmen Sie an, dass die Zenerdiode in „Sperrrichtung“ ihre Zenerspannung exakt einhält und in Durchlassrichtung den für Siliciumdioden typischen Wert hat.)

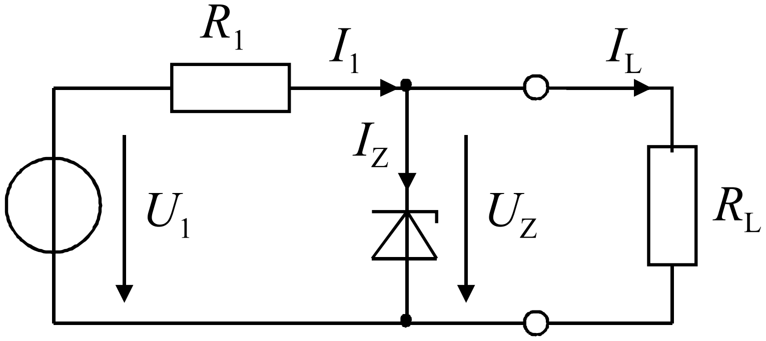


Aufgabe 8 **[8]**

a) [2] Das Diagramm zeigt einen Teil der Kennlinie einer Zenerdiode. Tragen Sie den restlichen Verlauf der Kennlinie in das Diagramm ein (ungefährer Verlauf). Wie groß ist die Spannung ungefähr im Durchlassbereich?



b) [6] Die Zenerdiode wird in folgender Schaltung eingesetzt:



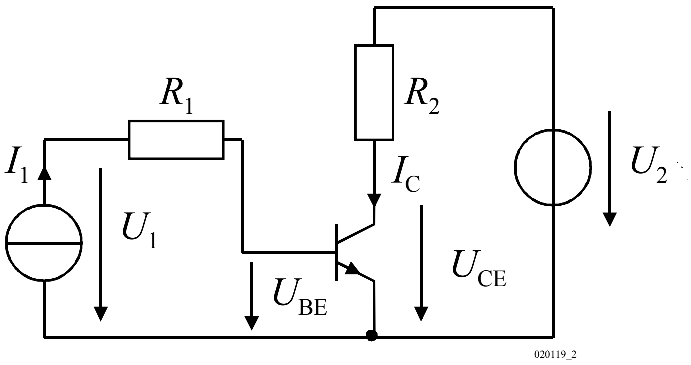
Bestimmen Sie zeichnerisch für U_1 =15V, R_1 =220Ω und R_L = 470Ω den Arbeitspunkt (U_Z | I_Z). Bestimmen Sie dazu die Arbeitsgerade des linearen Teils der Schaltung und zeichnen Sie diese in das Diagramm ein. Berechnen Sie außerdem die Verlustleistung P_Z in der Zenerdiode, und P_{R1} im Widerstand R_1 .

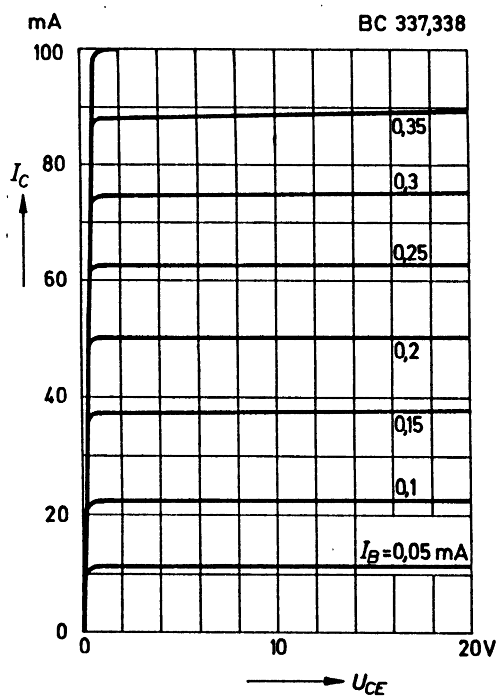
U_Z =	I_Z =
P_Z =	P_{R1} =

<u>Aufgabe 9</u> [6]

In der dargestellten Schaltung ist

$I_1 = 200\mu A$	$R_1 = 10k\Omega$	$U_2 = 14V$	$R_2 = 150\Omega$



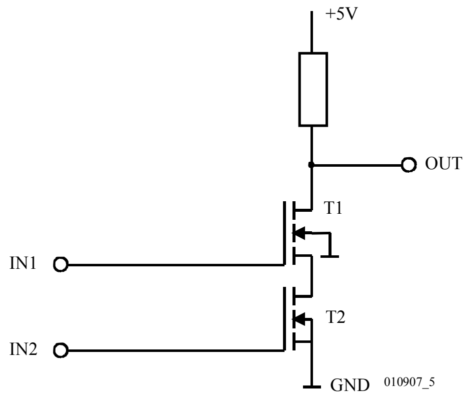


Geben Sie folgende Werte an:

$U_1 =$	$U_{BE} =$	$U_{CE} =$
$I_C =$	Stromverstärkung $h_{FE} =$	

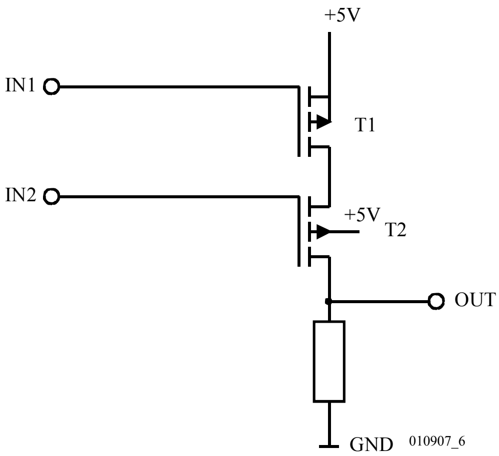
Aufgabe 10 [6]

a) [3] Bei der folgenden Schaltung ist **IN1=5V** und **IN2=0V**. Tragen Sie für jeden der Transistoren ein, ob dieser durchgeschaltet (**ON**) oder gesperrt (**OFF**) ist. Wie groß ist OUT? Welche logische Verküpfung ist realisiert?



T1=	T2=
OUT=	
Dies ist ein -Gatter	

b) [3] Bei der folgenden Schaltung ist **IN1=5V** und **IN2=0V**. Tragen Sie für jeden der Transistoren ein, ob dieser durchgeschaltet (**ON**) oder gesperrt (**OFF**) ist. Wie groß ist OUT? Welche logische Verküpfung ist realisiert?



T1=	T2=
OUT=	
Dies ist ein -Gatter	

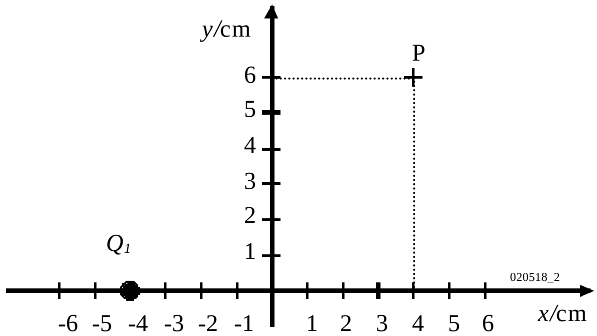
Name:	Matr.-Nr.:

Fachhochschule Mannheim Hochschule für Technik und Gestaltung Klausur EGI	SS 2002	Prüfer: Prof. J. Best
12.07.2002 Version a	Bearbeitungszeit: 120 min Hilfsmittel: Taschenrechner, Hilfsblatt EGI	

Tragen Sie Namen und Matrikelnummer auf diesem Blatt und Ihren Lösungsblättern ein.
Die erzielbaren Punkte stehen in [ ]. Ergebnisse bitte in die Aufgabenblätter eintragen;
Nebenrechnungen mit abgeben.

Aufgabe 1 [6]

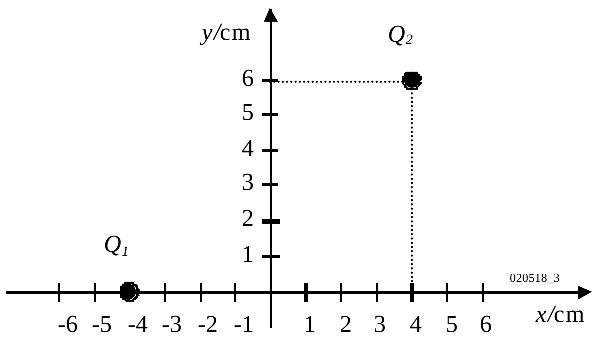
An der Position (x = - 4cm, y = 0cm, z = 0cm) befindet sich die Ladung Q_1 = - 10 nC. Berechnen Sie im Punkt P (x = 4cm, y = 6 cm, z = 0cm) den Betrag der elektrischen Flussdichte und den Betrag der elektrischen Feldstärke. Geben Sie beide Größen auch vektoriell an.



D =	E =
$\vec{D}$ =	$\vec{E}$ =

Aufgabe 2 [4]

An der Position (x = - 4cm, y = 0cm, z = 0cm) befindet sich die Ladung Q_1 = - 10 nC und an der Position (x = 4cm, y = 6 cm, z = 0cm) befindet sich die Ladung Q_2 = + 10nC. Berechnen Sie den Betrag der Kraft zwischen Q_1 und Q_2. Geben Sie außerdem die Kräfte auf Q_1 und Q_2 vektoriell an.

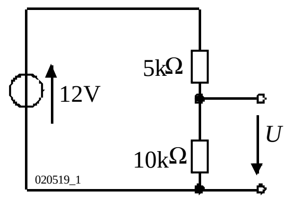


F =	$\vec{F}_1$ = (Kraft auf Q_1)	$\vec{F}_2$ = (Kraft auf Q_2)

<u>Aufgabe 3</u> [6]

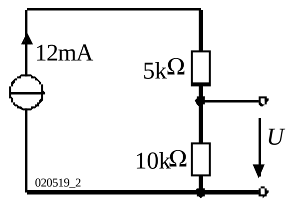
a) [1] Wie groß ist die Spannung *U*?

U =



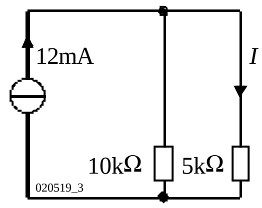
b) [1] Wie groß ist die Spannung *U*?

U =



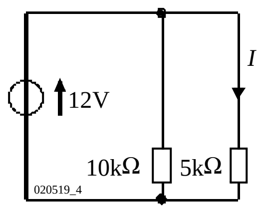
c) [1] Wie groß ist der Strom *I*?

I =



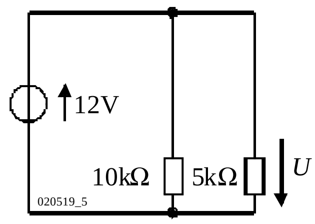
d) [1] Wie groß ist der Strom *I*?

I =



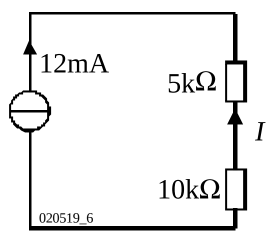
e) [1] Wie groß ist die Spannung *U*?

U =



f) [1] Wie groß ist der Strom *I*?

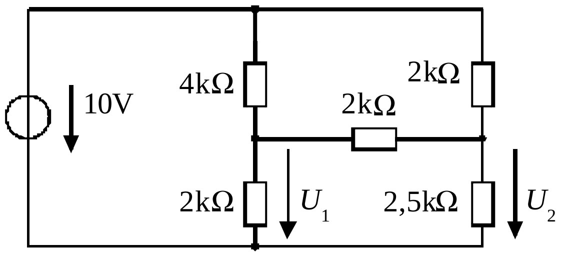
I =



Aufgabe 4 [6] Berechnen Sie U_1 und U_2.

Tipp: Dreieck-Stern-Umwandlung

U_1 =	U_2 =

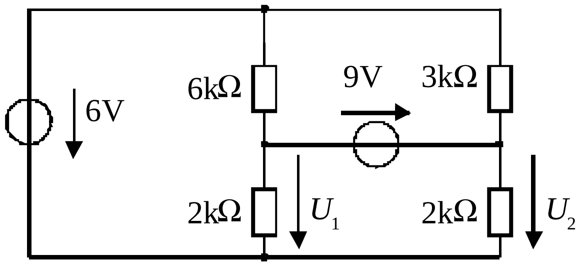


020519_7

Aufgabe 5 [6] Berechnen Sie U_1 und U_2.

Tipp: Überlagerungssatz!

U_1 =	U_2 =



020519_8

Aufgabe 6 [8]

Ein Spule aus Kupferdraht ist wie rechts dargestellt aufgebaut. Sie hat bei 100°C einen Widerstand von 100 Ω.

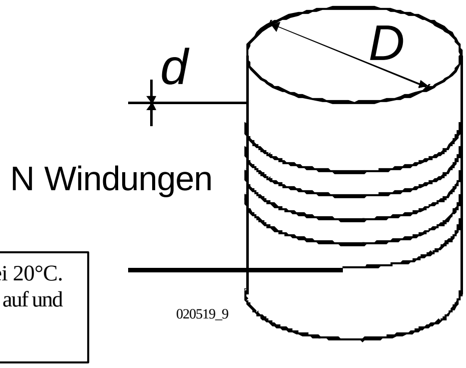
Wieviele Windungen N hat die Spule?

D = 10cm, d = 0,5mm

$r_{20} = 18 \cdot 10^{-9}$Ùm

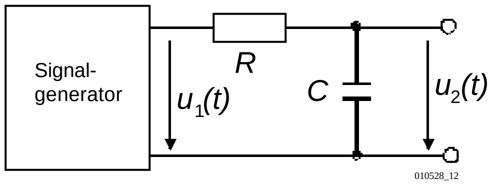
$a = 3{,}9 \cdot 10^{-3}\,/°C$

Tipp: Berechnen Sie den Widerstand bei 20°C. Stellen Sie dann die Gleichung R=f(N) auf und lösen sie diese nach N auf.

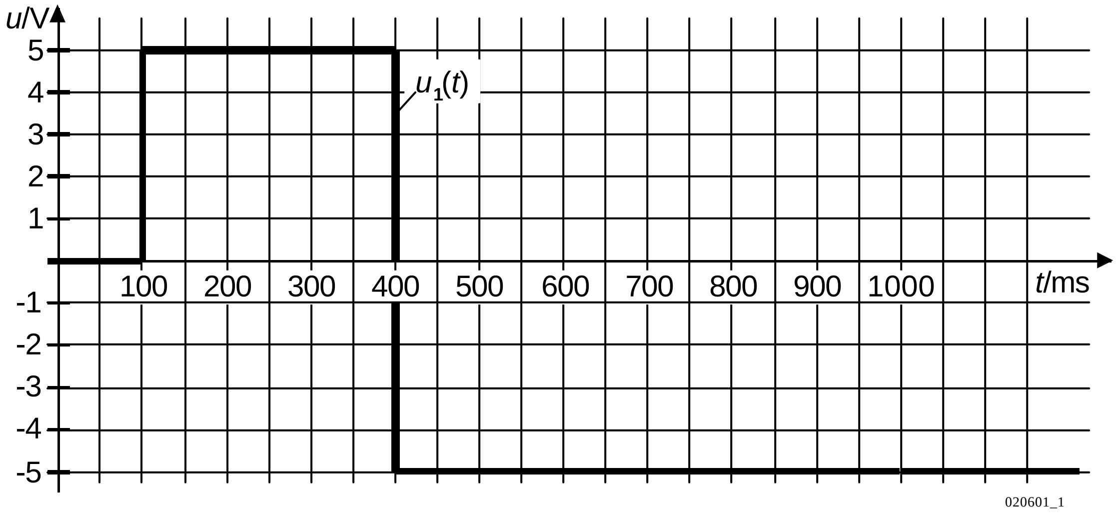


Aufgabe 7 [12]

Ein Signalgenerator erzeugt ab dem Zeitpunkt $t = 0$ das unten dargestellte Signal $u_1(t)$. Vor dem Zeitpunkt $t = 0$ ist $u_2(t) = u_1(t) = 0$.



R = 150 kΩ, C = 1,5µF



a) [3] Wie lautet die Funktion $u_2(t)$ für den Abschnitt 100ms < t < 400ms?

$u_2(t)$ =

b) [1] Berechnen Sie u_2(400ms).

u_2(400ms) =

c) [5] Geben Sie $u_2(t)$ für den Abschnitt t > 400ms an.

$u_2(t)$ =

d) [1] Berechnen Sie u_2(700ms).

u_2(700ms) =

e) [2] Tragen Sie $u_2(t)$ in das Diagramm oben ein.

Aufgabe 8 **[10]**

a) [2] Wie unterscheiden sich Metalle, Halbleiter und Isolatoren bezüglich ihres Bandabstandes? Wie heißen die Bänder, die dabei eine Rolle spielen?

b) [1] Was versteht man unter Eigenleitung?

c) [1] Was versteht man unter Dotieren?

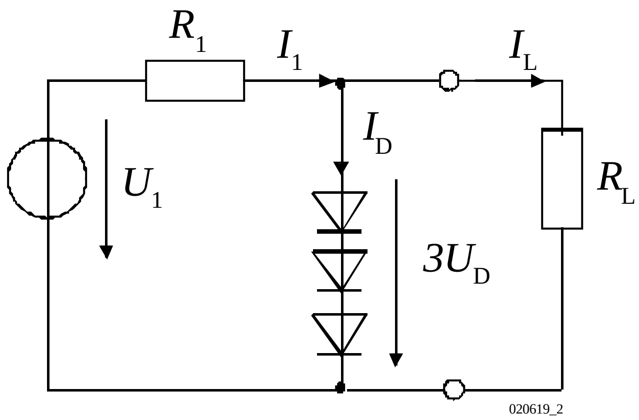
d) [2] Was ist ein N-Leiter?

e) [1] Wie nennt man 5-wertige Fremdatome (z.B. Phophor), die in Silicium „eingebaut" wurden?

f) [3] Nennen sie verschiedene Arten bzw. Anwendungen von Dioden

Aufgabe 9 [10]

Die nebenstehende Schaltung benutzt anstelle einer Zenerdiode 3 in Durchlassrichtung betriebene Siliziumdioden des Typs 1N4148 um eine kleine Spannung zu stabilisieren.



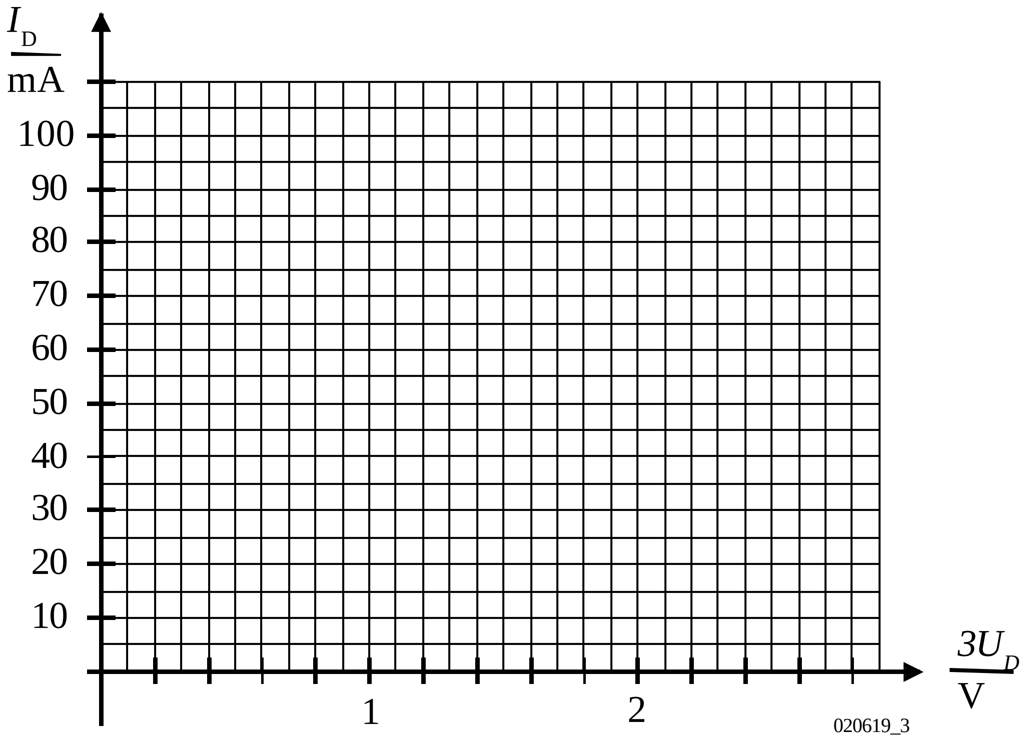
Die Kennlinie einer Diode kann durch

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{m \cdot u_T}} - 1 \right)$$

mit I_S = 2,68nA, m=1,84 und u_T=25mV beschrieben werden.

9a) [4] Berechnen Sie einige Werte und zeichnen Sie die Kennlinie in das untenstehende Diagramm.

$3U_D$/V	1,8	2,1	2,25	2,4
I_D/mA				



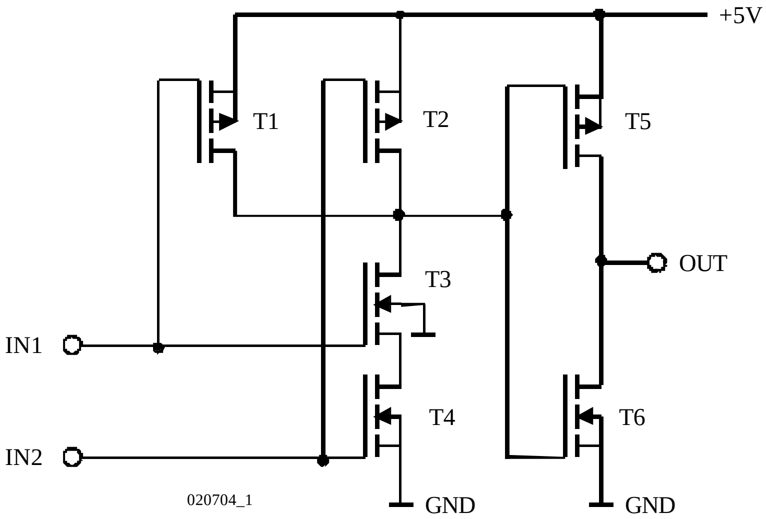
9b) [6] Bestimmen Sie $3U_D$ und I_D for U_1 = 10V, R_1=100Ω und R_L = 39Ω.
(Tipp: Benutzen Sie die Thévenin-Ersatzschaltung für den linearen Teil und zeichnen Sie dessen Kennlinie ebenfalls in das Diagramm; zeichnerische Lösung genügt)

$3U_D$ =	I_D =

Aufgabe 10 **[10]**

Die nebenstehende Schaltung wird von den binären Signalen IN1 und IN2 angesteuert.

10a) [6] In der Tabelle unten sind alle möglichen Kombinationen der Eingangssignale dargestellt. Vervollständigen Sie diese Tabelle in dem Sie für jeden Transistor den Schaltzustand "ON" (für Schalter zu") bzw. "OFF" (für Schalter offen) eintragen. Tragen Sie außerdem in die Spalte "OUT" die jeweilige Ausgangsspannung ein.



IN1	IN2	T1	T2	T3	T4	T5	T6	OUT
0V	0V							
0V	+5V							
+5V	0V							
+5V	+5V							

10b) [1] Um was für ein Gatter handelt es sich?

10c) [1] Was für eine Art von Transistor ist T1 und was für eine Art von Transistor ist T3?

T1:	T3:

10d) [1] Wie nennt man die bei der Schaltung verwendete Technologie und warum heißt diese so?

10e) [1] Was sind die Vorteile dieser Technologie?

Name:	Matr.-Nr.:

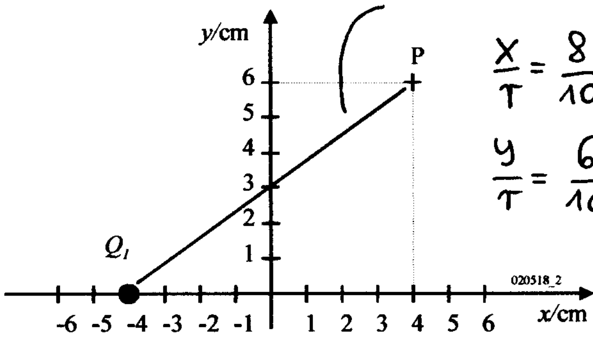
Fachhochschule Mannheim Hochschule für Technik und Gestaltung Klausur EGI	SS 2002	Prüfer: Prof. J. Best
12.07.2002 Version a	Bearbeitungszeit: 120 min Hilfsmittel: Taschenrechner, Hilfsblatt EGI	

Tragen Sie Namen und Matrikelnummer auf diesem Blatt und Ihren Lösungsblättern ein. Die erzielbaren Punkte stehen in [ ]. Ergebnisse bitte in die Aufgabenblätter eintragen; **Nebenrechnungen mit abgeben.**

Aufgabe 1 [6]

$\sqrt{8^2+6^2}\,\text{cm} = 10\,\text{cm}$

An der Position (x = - 4cm, y = 0cm, z = 0cm) befindet sich die Ladung Q_1 = - 10 nC. Berechnen Sie im Punkt P (x = 4cm, y = 6 cm, z = 0cm) den Betrag der elektrischen Flussdichte und den Betrag der elektrischen Feldstärke. Geben Sie beide Größen auch vektoriell an.



$\frac{x}{r} = \frac{8}{10}$

$\frac{y}{r} = \frac{6}{10}$

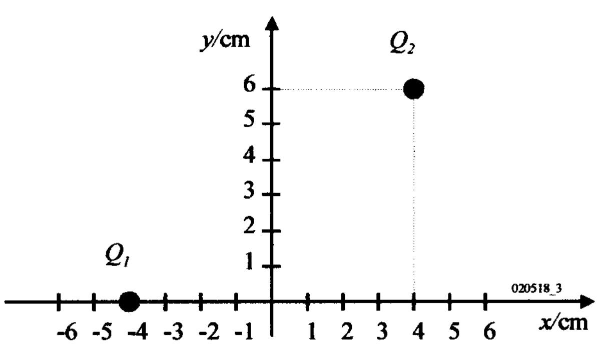
2 | 2

$D = \frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{10\cdot 10^{-9}\,C}{4\pi\, 0.01\,m^2} = 79{,}6\cdot 10^{-9}\,\frac{As}{m^2}$	$E = \frac{D}{\varepsilon_0} = \frac{79.6\cdot 10^{-9}\,As/m^2}{8.854\cdot 10^{-12}\,As/Vm} = 8.99\,\frac{kV}{m}$
$\vec{D} = -\begin{pmatrix} 63{,}7 \\ 47.8 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{nC}{m^2}$	$\vec{E} = -\begin{pmatrix} 7.2 \\ 5.4 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{kV}{m}$

1 | 1

Aufgabe 2 [4]

An der Position (x = - 4cm, y = 0cm, z = 0cm) befindet sich die Ladung Q_1 = - 10 nC und an der Position (x = 4cm, y = 6 cm, z = 0cm) befindet sich die Ladung Q_2 = + 10nC. Berechnen Sie den Betrag der Kraft zwischen Q_1 und Q_2. Geben Sie außerdem die Kräfte auf Q_1 und Q_2 vektoriell an.

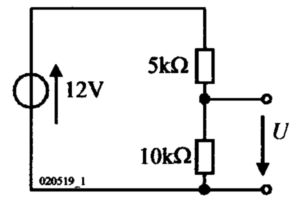


2 | 1 | 1

$F = E\cdot Q = 8.99\,\frac{kV}{m}\cdot 10\,nC$ $= 90\,\mu N$	$\vec{F}_1 = \begin{pmatrix} 72 \\ 54 \\ 0 \end{pmatrix} \mu N$ (Kraft auf Q_1)	$\vec{F}_2 = -\begin{pmatrix} 72 \\ 54 \\ 0 \end{pmatrix} \mu N$ (Kraft auf Q_2)

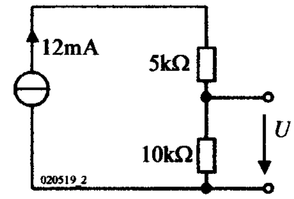
Aufgabe 3 [6]

a) [1] Wie groß ist die Spannung *U*?



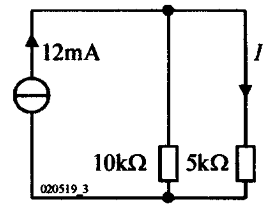
U = $-8V$

b) [1] Wie groß ist die Spannung *U*?



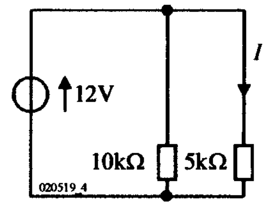
U = $120V$

c) [1] Wie groß ist der Strom *I*?



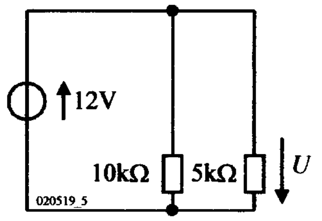
I = $8mA$

d) [1] Wie groß ist der Strom *I*?



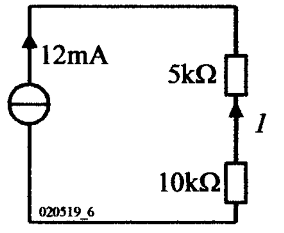
I = $-\frac{12V}{5k\Omega} = -2{,}4mA$

e) [1] Wie groß ist die Spannung *U*?



U = $-12V$

f) [1] Wie groß ist der Strom *I*?

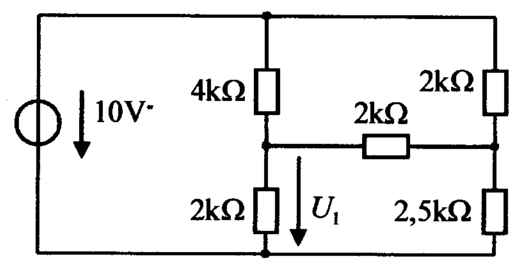


I = $-12mA$

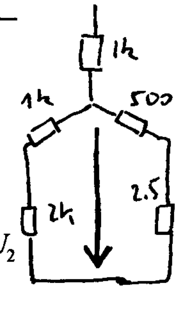
Aufgabe 4 [6] Berechnen Sie U_1 und U_2.

Tipp!

$U_1 = 6V \frac{2}{3} = 4V$	$U_2 = 6V \frac{1.5}{3} = 5V$



020519_7

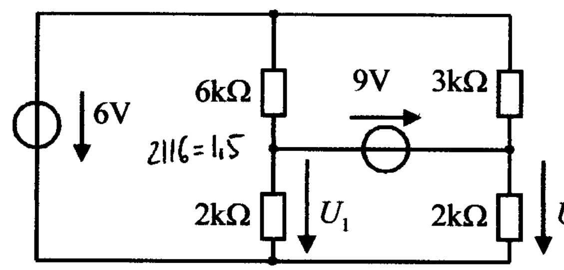


$10V \cdot \frac{1.5}{2.5} = 6V$

Aufgabe 5 [6] Berechnen Sie U_1 und U_2.

Tipp

$U_1 = 7V$	$U_2 = -2V$



020519_8

$6 \| 3 = 2$

$2 \| 3 = 1.2$

$2 \| 6 = 1.5$

$u_{1,1} = 6V \frac{1}{3} = 2V$ $\quad u_{2,1} = 2V$

$u_{1,2} = 9V \frac{1.5}{2.7} = 5V$ $\quad u_{2,2} = -4V$

Aufgabe 6 [8]

Ein Spule aus Kupferdraht ist wie rechts dargestellt aufgebaut. Sie hat bei 100°C einen Widerstand von 100 Ω.

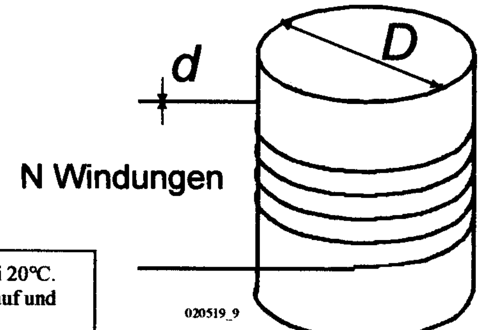
Wieviele Windungen N hat die Spule?

$D = 10\text{cm}$, $d = 0{,}5\text{mm}$

$\rho_{20} = 18 \cdot 10^{-9} \Omega m$

$\alpha = 3{,}9 \cdot 10^{-3} /°C$

Tipp: Berechnen Sie den Widerstand bei 20°C. Stellen Sie dann die Gleichung $R=f(N)$ auf und lösen sie diese nach N auf.



020519_9

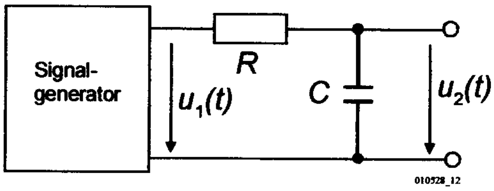
$$R_{20°} = R_{100°} / (1 + \alpha \cdot 80°) = 100\Omega / (1 + 3.9 \cdot 10^{-3} \cdot 80) = 76.2\Omega \quad 2$$

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\rho \cdot N \cdot D \cdot \cancel{\pi}}{\cancel{\pi} (d/2)^2} \; ; \; N = \frac{R d^2}{4 \rho \cdot D} = \frac{76.2\Omega \cdot 0.5^2 \cdot 10^{-6} m^2}{4 \cdot 18 \cdot 10^{-9} \Omega m \cdot 0.1 m} \quad 4$$

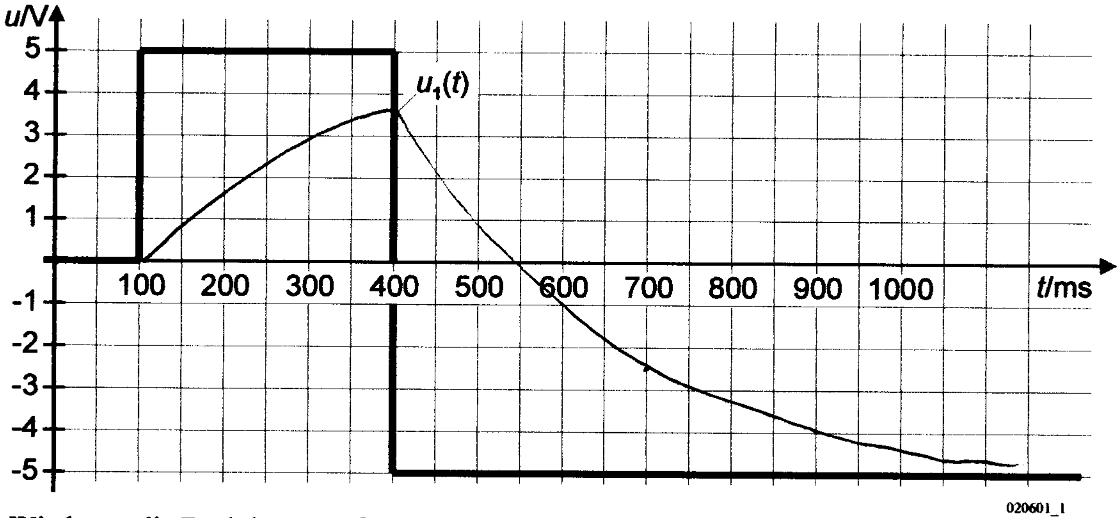
$$N = 2646 \quad 2$$

Aufgabe 7 [12]

Ein Signalgenerator erzeugt ab dem Zeitpunkt $t = 0$ das unten dargestellte Signal $u_1(t)$. Vor dem Zeitpunkt $t = 0$ ist $u_2(t) = u_1(t) = 0$.



R = 150 kΩ, C = 1,5µF $\tau = 225\,ms$



a) [3] Wie lautet die Funktion $u_2(t)$ für den Abschnitt $100ms < t < 400ms$?

$u_2(t) = 5V\left(1 - e^{-(t-100)/225ms}\right)$

b) [1] Berechnen Sie $u_2(400ms)$.

$u_2(400ms) = 5V\left(1 - e^{-300/225}\right) = 3{,}682\,V$

c) [5] Geben Sie $u_2(t)$ für den Abschnitt $t > 400ms$ an.

$u_2(t) = 8{,}682V \cdot e^{-(t-400)/225ms} - 5V$

d) [1] Berechnen Sie $u_2(700ms)$.

$u_2(700ms) = 8{,}682V \cdot e^{-300/225} - 5V = -2{,}71\,V$

e) [2] Tragen Sie $u_2(t)$ in das Diagramm oben ein.

Aufgabe 8 [10]

a) [2] Wie unterscheiden sich Metalle, Halbleiter und Isolatoren bezüglich ihres Bandabstandes? Wie heißen die Bänder, die dabei eine Rolle spielen?

Metalle: überlappen, Halbleiter: klein, Isolatoren: groß
Leitungsband, Valenzband

b) [1] Was versteht man unter Eigenleitung?

Leitfähigkeit eines Halbleiters infolge Elektronen/Lochpaarbildung

c) [1] Was versteht man unter Dotieren?

Einbau von Fremdatomen

d) [2] Was ist ein N-Leiter?

Mit 5-wertigen Stoffen dotiert:
freie Elektronen

e) [1] Wie nennt man 5-wertige Fremdatome (z.B. Phophor), die in Silicium „eingebaut" wurden?

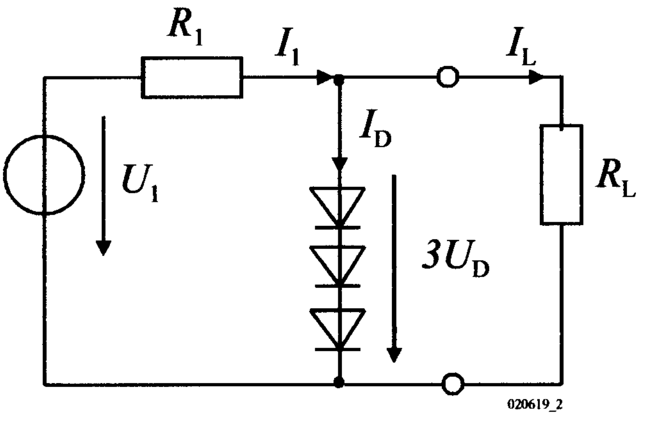
Donatoren

f) [3] Nennen sie verschiedene Arten bzw. Anwendungen von Dioden

- Gleichrichterdioden
- Zenerdioden
- Leuchtdioden

Aufgabe 9 **[10]**

Die nebenstehende Schaltung benutzt anstelle einer Zenerdiode 3 in Durchlassrichtung betriebene Siliziumdioden des Typs 1N4148 um eine kleine Spannung zu stabilisieren.



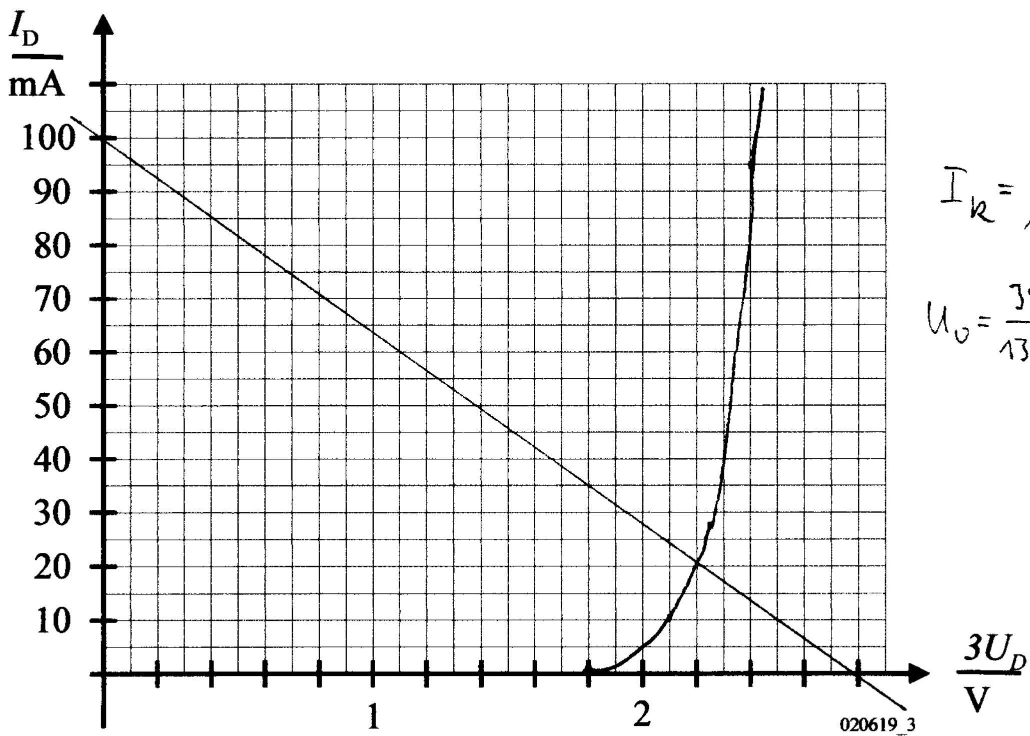
Die Kennlinie einer Diode kann durch

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{m \cdot u_T}} - 1 \right)$$

mit $I_S = 2{,}68\text{nA}$, m=1,84 und u_T=25mV beschrieben werden.

9a) **[4]** Berechnen Sie einige Werte und zeichnen Sie die Kennlinie in das untenstehende Diagramm.

$3U_D$/V	1,8 $u_D = 0.6$	2,1 $u_D = 0.7$	2,25 $u_D = 0.75$	2,4 $u_D = 0.8$
I_D/mA	1.24	10.9	32.3	95.7



$I_k = \frac{10V}{100\Omega} = 100\,mA$

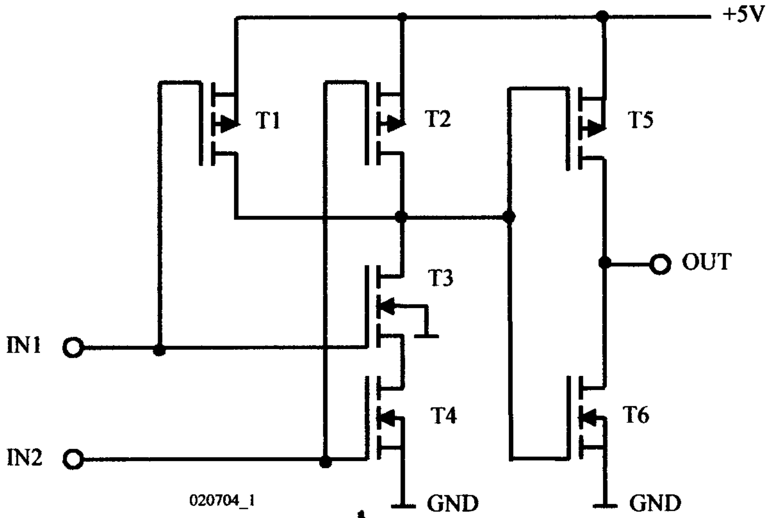
$U_0 = \frac{39}{139} \cdot 10V = 2{,}8\,V$

9b) **[6]** Bestimmen Sie $3U_D$ und I_D for U_1 = 10V, R_1=100Ω und R_L = 39Ω.
(Tipp: Benutzen Sie die Thévenin-Ersatzschaltung für den linearen Teil und zeichnen Sie dessen Kennlinie ebenfalls in das Diagramm; zeichnerische Lösung genügt)

$3U_D$ = 2,2V	I_D = 20 mA

Aufgabe 10 [10]

Die nebenstehende Schaltung wird von den binären Signalen IN1 und IN2 angesteuert.



10a) [6] In der Tabelle unten sind alle möglichen Kombinationen der Eingangssignale dargestellt. Vervollständigen Sie diese Tabelle in dem Sie für jeden Transistor den Schaltzustand "ON" (für Schalter zu") bzw. "OFF" (für Schalter offen) eintragen. Tragen Sie außerdem in die Spalte "OUT" die jeweilige Ausgangsspannung ein.

IN1	IN2	T1	T2	T3	T4	T5	T6	OUT
0V	0V	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON	0V
0V	+5V	ON	OFF	OFF	ON	OFF	ON	0V
+5V	0V	OFF	ON	ON	OFF	OFF	ON	0V
+5V	+5V	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF	5V

10b) [1] Um was für ein Gatter handelt es sich?

UND-GATTER

10c) [1] Was für eine Art von Transistor ist T1 und was für eine Art von Transistor ist T3?

T1: P-Kanal-MOSFET	T3: N-KANAL-MOSFET

10d) [1] Wie nennt man die bei der Schaltung verwendete Technologie und warum heißt diese so?

C MOS Complementary ...

10e) [1] Was sind die Vorteile dieser Technologie?

kein Leistungsverbrauch

Name:	Matr.-Nr.:

Fachhochschule Mannheim Hochschule für Technik und Gestaltung Klausur EGI	WS 2002/03	Prüfer: Prof. J. Best
12.02.2003 Version a	Bearbeitungszeit: 120 min Hilfsmittel: Taschenrechner, Hilfsblatt EGI	

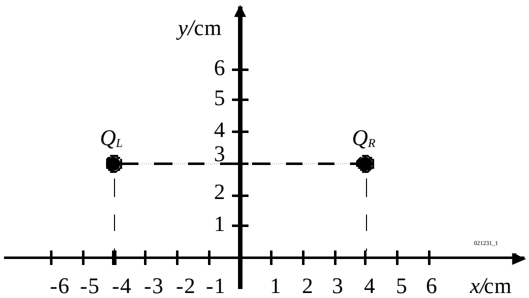
Tragen Sie Namen und Matrikelnummer auf diesem Blatt und Ihren Lösungsblättern ein.
Die erzielbaren Punkte stehen in [ ]. Ergebnisse bitte in die Aufgabenblätter eintragen;
Nebenrechnungen bitte auf die Rückseite des vorausgehenden Blattes.

<u>Aufgabe 1</u> [10]

Die Skizze zeigt zwei Punktladungen Q_L und Q_R in einem Koordinatensystem.

Q_L = 20nC

Q_R = -30nC



a) [2] Berechnen Sie den Betrag der Kraft auf Q_L bzw. Q_R

$F =$

b) [2] Geben Sie die Kraft auf Q_L und Q_R jeweils als Vektor an.

$\vec{F}_{QL} =$ $\qquad$ $\vec{F}_{QR} =$

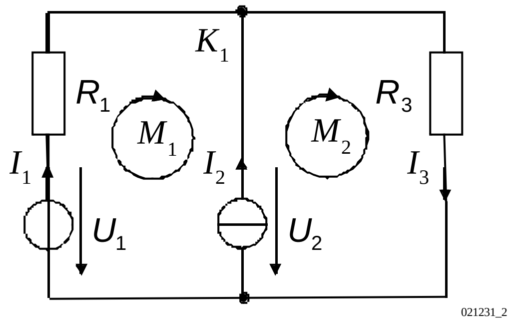
c) [6] Berechnen Sie die elektrische Flussdichte und die elektrische Feldstärke im Ursprung (0,0) des Koordinatensystems (vektoriell!)

$\vec{D} =$ $\qquad$ $\vec{E} =$

Aufgabe 2 **[10]**

Gegeben sind U_1 , I_2 , R_1 und R_3 .

a) [3] Geben Sie die Maschengleichungen für M_1 und M_2 und die Knotengleichung für K_1 an.

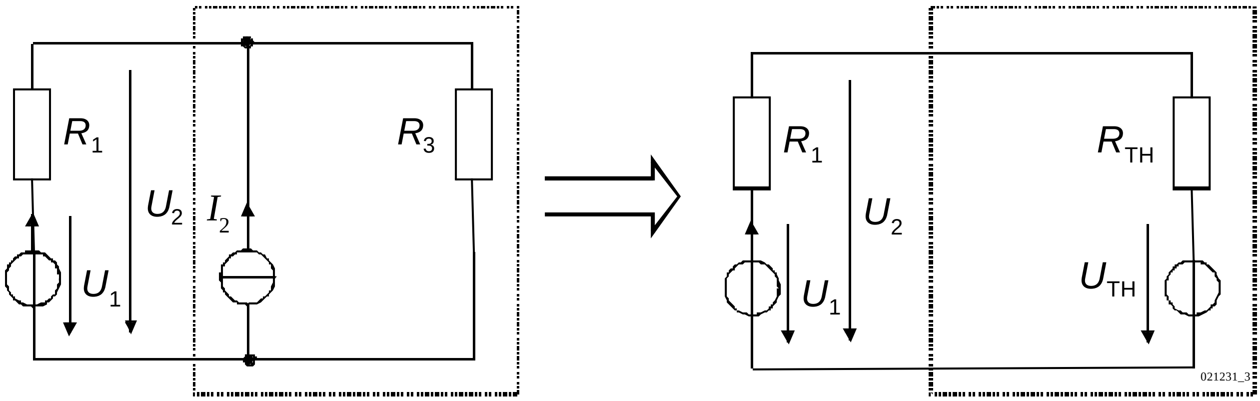


M_1 :

M_2 :

K_1 :

b) [3] Für die weitere Berechnung soll nun der „rechte Teil" der Schaltung durch seine (Thevenin) Ersatzschaltung ersetzt werden. (Geben Sie R_{TH} und U_{TH} an.)

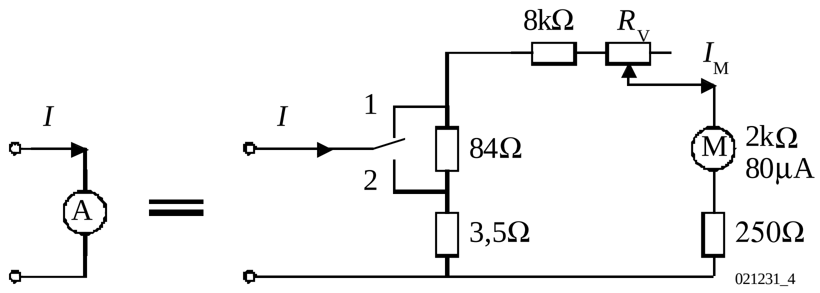


R_{TH} = U_{TH} =

c) [4] Berechnen Sie nun U_2 als Funktion von U_1 , I_2 , R_1 und R_3 .

U_2 =

Aufgabe 3 [6]
Auf der rechten Seite der Skizze ist die Schaltung eines Amperemeters dargestellt, dessen Messbereich sich in 2 Stufen umschalten lässt. Das Messwerk M hat einen Innenwiderstand von 2kΩ und zeigt bei $I_M = 80\ \mu A$ Vollausschlag.



a) [3] Wie muss der Widerstand R_V eingestellt werden, damit das Amperemeter in Stellung 1 bei I =10mA Vollausschlag zeigt? Tipp: Stromteilerregel.

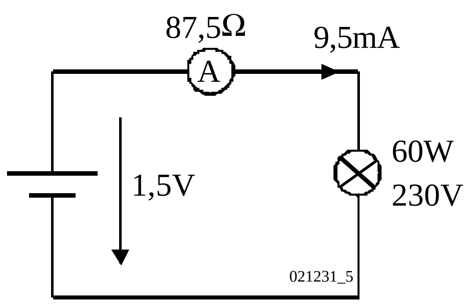
R_V =

b) [3] Bei welchem Strom zeigt das Amperemeter Vollausschlag in Stellung 2?

I =

Aufgabe 4 [6]

Der Kaltwiderstand (bei 20°C) einer 60W-Glühlampe für 230V soll mit nebenstehender Anordnung bestimmt werden. Es wird ein Strom von 9,5mA gemessen. Der Innenwiderstand des Amperemeters beträgt dabei 87,5Ω.



a) [2] Berechnen Sie den Kaltwiderstand der Glühlampe.

R_{kalt} =

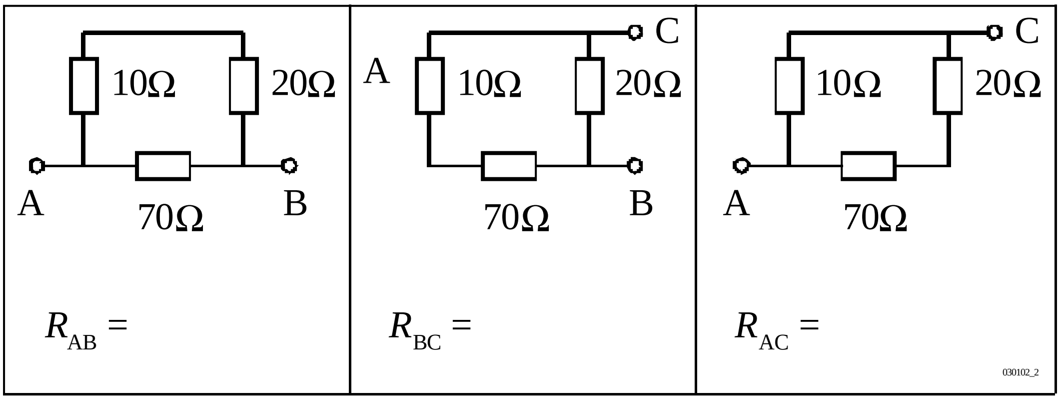
b) [4] Berechnen Sie den Widerstand der Glühlampe beim Betrieb an 230V Gleichspannung und die Temperatur des Glühfadens ($\alpha = 5 \cdot 10^{-3} / {}^\circ C$).

$R_{heiß}$ =

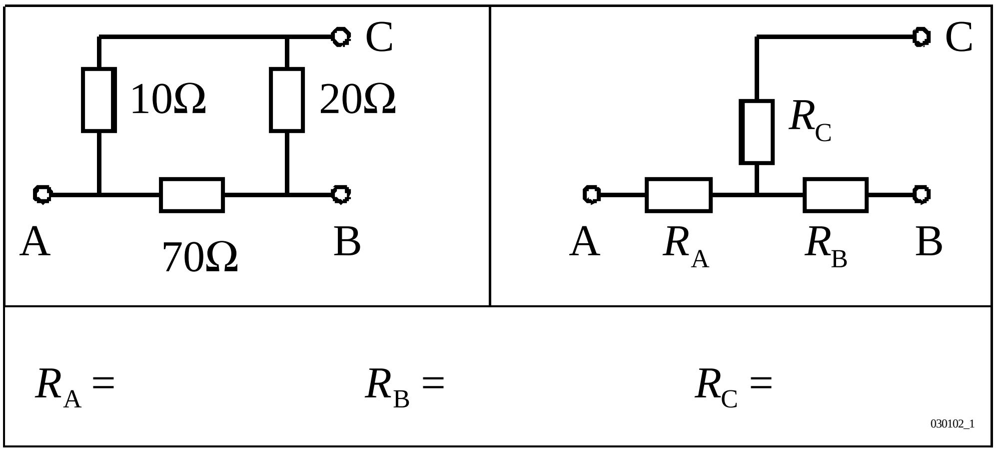
T =

<u>Aufgabe 5</u> [6]

a) [3] Berechnen Sie jeweils den Widerstand zwischen den beiden Anschlüssen.

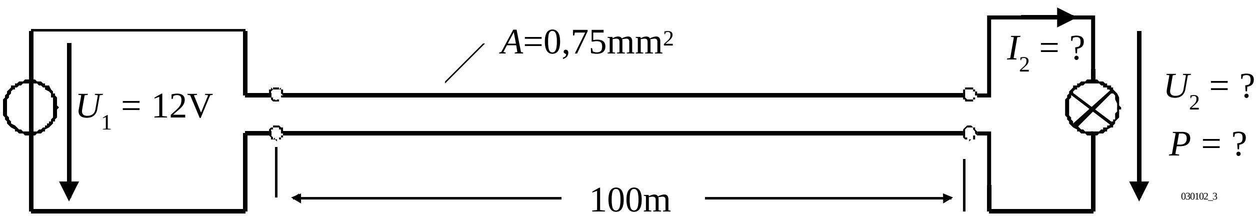


b) [3] Bestimmen Sie R_A , R_B und R_C so, dass die Schaltungen links und rechts äquivalent sind.



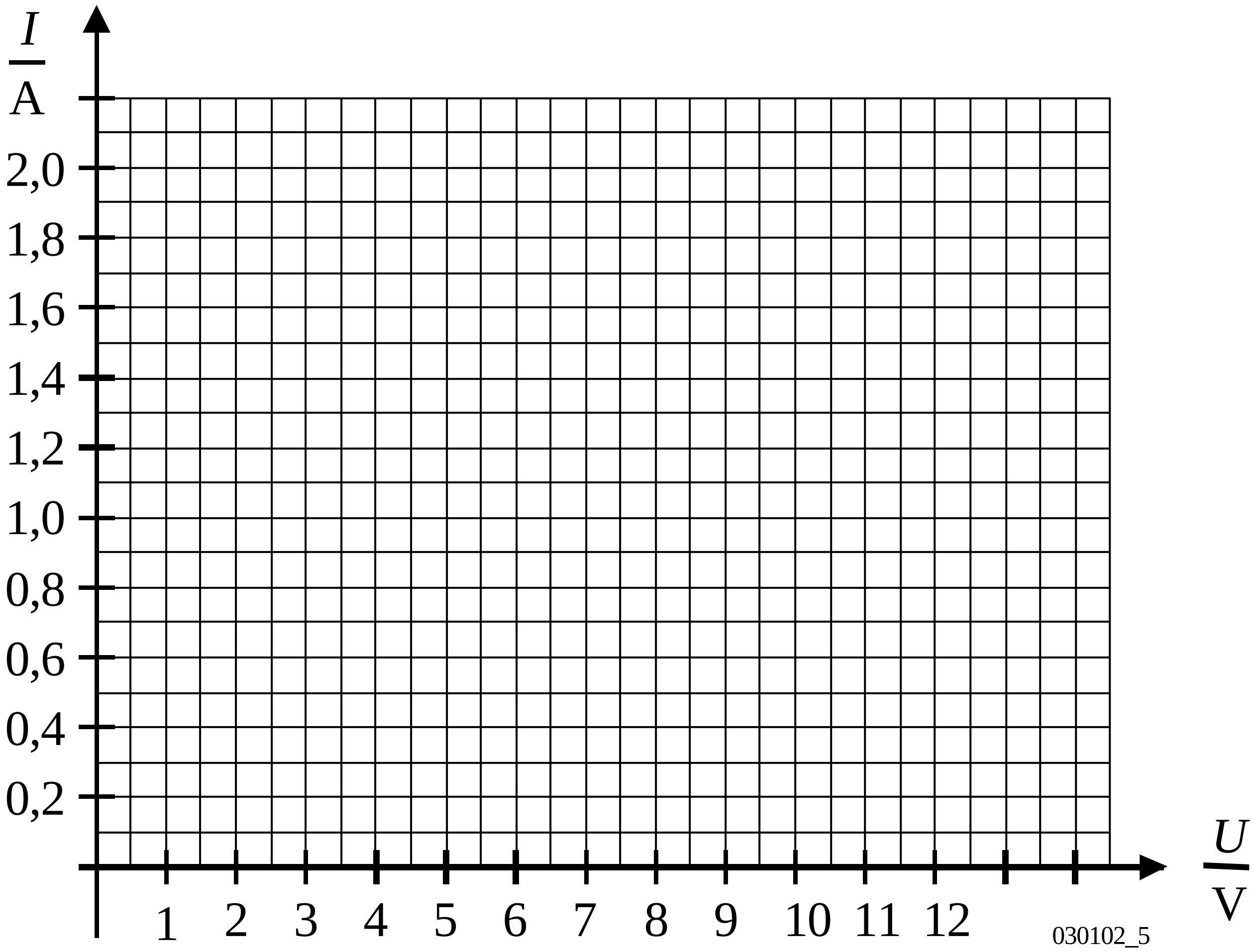
<u>Aufgabe 6</u> [10]

Eine Halogenlampe wird über eine 100m lange Leitung mit einem Querschnitt von 0,75mm^2 an einer 12V Gleichspannungsquelle betrieben. ($r = 18 \cdot 10^{-9}\,\Omega m$)



Für die Lampe wird folgender Zusammenhang zwischen Strom und Spannung gemessen:

U/V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I/A	0,5	0,67	0,81	0,93	1,05	1.16	1,25	1,35	1,43	1,52	1,59	1,68



a) [2] Tragen Sie die Kennlinie der Lampe in das Diagramm ein.
b) [2] Berechnen Sie den Gesamtwiderstand der Leitung.

R_L =

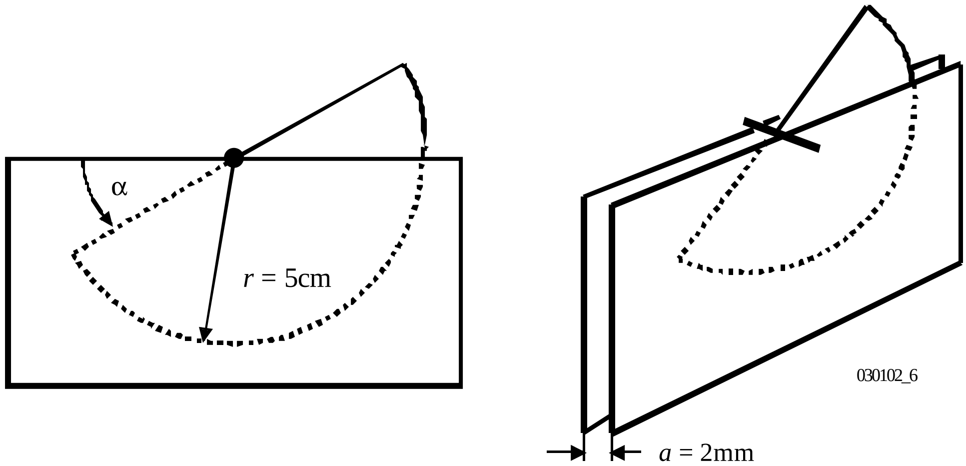
c) [3] Tragen Sie die Kennlinie des linearen Teils (Spannungsquelle + Leitung) in das Diagramm ein.

d) [3] Bestimmen Sie die Spannung über der Halogenlampe und den Strom durch die Halogenlampe. Welche Leistung wird in der Lampe umgesetzt?

U_2 =	I_2 =	P =

<u>Aufgabe 7</u> [6]

Ein Drehkondensator besteht aus einem halbkreisförmigen Rotor, der genau in der Mitte zwischen zwei parallelen Platten drehbar gelagert ist. Der Rotor ist gegenüber den Platten isoliert. Die beiden parallelen Platten sind leitend miteinander verbunden. Vernachlässigen Sie im Folgenden so genannte „Randeffekte“, d.h. berücksichtigen Sie nur das Feld, das sich im Luftspalt zwischen Rotor und den feststehenden Platten befindet.
Der eine Anschluss des Kondensators ist mit dem Rotor, der andere mit den feststehenden Platten verbunden.



a) [1] Wann ist die Kapazität des Kondensators am größten?

b) [3] Berechnen Sie die Kapazität für $\alpha = 0°$.

$C =$

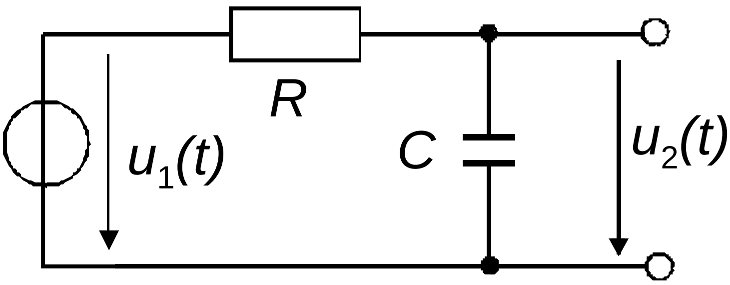
c) [2] Geben Sie die Kapazität als Funktion des Drehwinkels α an und skizzieren Sie diese Funktion.

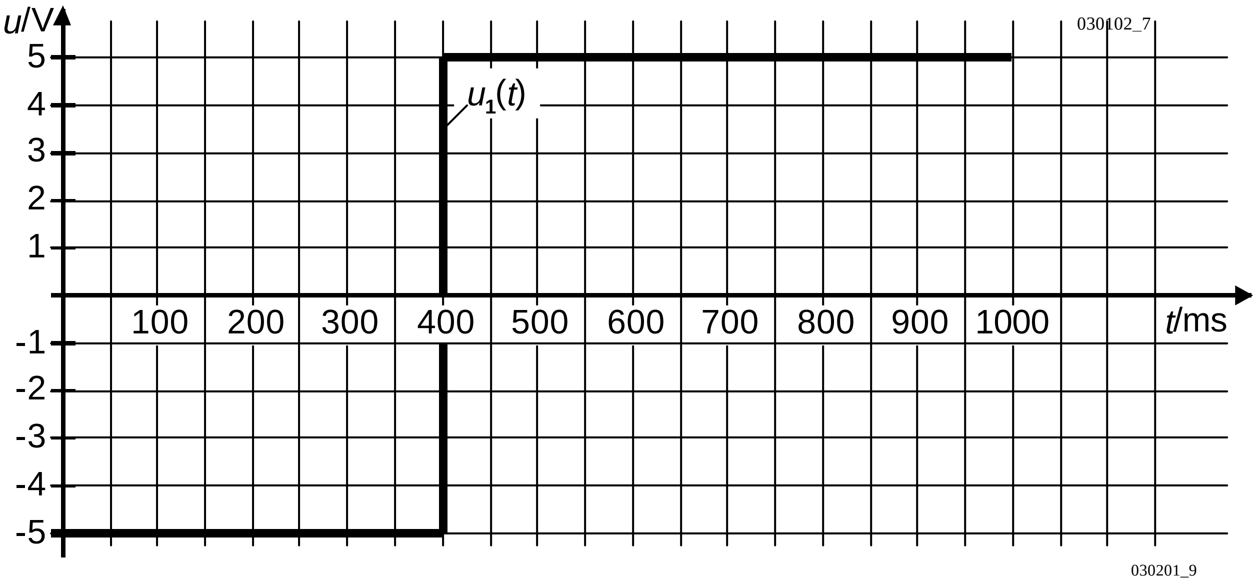
$C(\alpha) =$

Aufgabe 8 [6]

Die Spannungsquelle $u_1(t)$ ist zeitvariabel. Sie hat für längere Zeit den Wert -5V und springt dann bei t = 400ms auf +5V.

R = 200kΩ, C = 1,5µF





a) [1] Wie groß ist die Zeitkonstante?

τ =

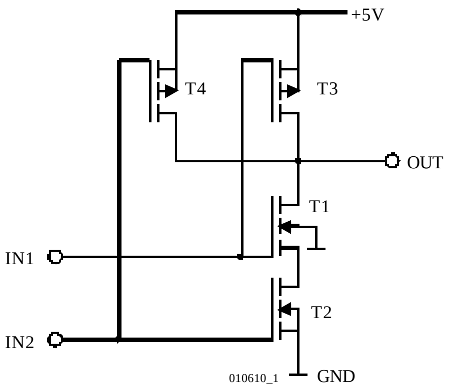
b) [2] Tragen Sie den Verlauf von u_2 (t) in das Diagramm ein.

c) [3] Geben Sie $u_2(t)$ für t>400ms an.

$u_2(t)$ =

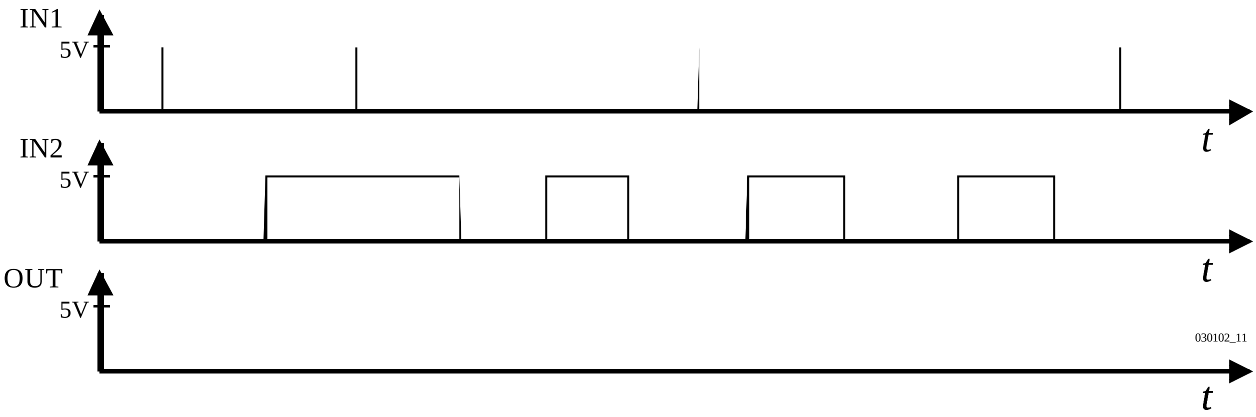
Aufgabe 9 [8]

a) [3] Bei der folgenden Schaltung ist zunächst **IN1=0V** und **IN2=5V**. Tragen Sie für jeden der Transistoren ein, ob dieser durchgeschaltet (**ON**) oder gesperrt (**OFF**) ist. Wie groß ist dann das Potenzial am Ausgang OUT? Welche logische Verknüpfung ist realisiert?



T1=	T2=	T3=	T4=
OUT=			
Dies ist ein -Gatter			

b) [2] Tragen Sie in das Diagramm unten den Verlauf für das Signal OUT ein.



c) [1] Was für eine Art von Transistor ist T1 und was für eine Art von Transistor ist T3?

T1:	T3:

d) [1] Wie nennt man die bei der Schaltung verwendete Technologie und warum heißt diese so?

e) [1] Was sind die Vorteile dieser Technologie?

1	10
2	10
3	6
4	6
5	6
6	10
7	6
8	6
9	8
	68

Name:	Matr.-Nr.:

Fachhochschule Mannheim Hochschule für Technik und Gestaltung Klausur EGI	WS 2002/03	Prüfer: Prof. J. Best
12.02.2003 Version a	Bearbeitungszeit: 120 min Hilfsmittel: Taschenrechner, Hilfsblatt EGI	

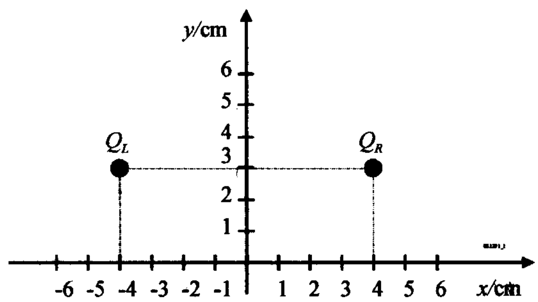
Tragen Sie Namen und Matrikelnummer auf diesem Blatt und Ihren Lösungsblättern ein.
Die erzielbaren Punkte stehen in [ ]. Ergebnisse bitte in die Aufgabenblätter eintragen;
Nebenrechnungen bitte auf die Rückseite des vorausgehenden Blattes.

Aufgabe 1 [10]

Die Skizze zeigt zwei Punktladungen Q_L und Q_R in einem Koordinatensystem.

$Q_L = 20\text{nC}$

$Q_R = -30\text{nC}$



a) [2] Berechnen Sie den Betrag der Kraft auf Q_L bzw. Q_R

$$F = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{4\pi\varepsilon r^2} = \frac{20\cdot10^{-9}\cdot 30\cdot 10^{-9}}{4\cdot\pi\cdot 8{,}854\cdot10^{-12}\cdot 8^2\cdot 10^{-4}}\,\text{N} = 842.6\,\mu\text{N}$$

b) [2] Geben Sie die Kraft auf Q_L und Q_R jeweils als Vektor an.

$$\vec{F}_{QL} = \begin{pmatrix} 843 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}\mu\text{N} \qquad \vec{F}_{QR} = -\begin{pmatrix} 843 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}\mu\text{N}$$

c) [6] Berechnen Sie die elektrische Flussdichte und die elektrische Feldstärke im Ursprung (0,0) des Koordinatensystems (vektoriell!)

$$D_L = \frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{20\cdot10^{-9}}{4\pi\, 0{,}05^2}\frac{\text{As}}{\text{m}^2} = 637\cdot10^{-9}\frac{\text{As}}{\text{m}^2}$$

$$D_R = \frac{Q}{4\pi r^2} = \frac{30\cdot10^{-9}}{4\pi\cdot 0{,}05^2}\frac{\text{As}}{\text{m}^2} = 955\cdot10^{-9}\frac{\text{As}}{\text{m}^2}$$

$$D_{Lx} = \frac{4}{5}D_L = 509{,}6\ \text{nAs/m}^2$$

$$D_{Ly} = -\frac{3}{5}D_L = -382{,}5\ \text{nAs/m}^2$$

$$D_{Rx} = \frac{4}{5}D_R = 764\ \text{nAs/m}^2$$

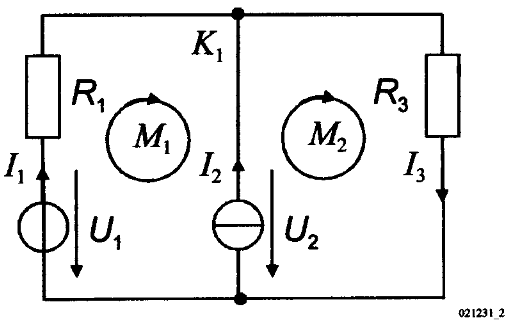
$$D_{Ry} = \frac{3}{5}D_R = 573\ \text{nAs/m}^2$$

$$\vec{D} = \begin{pmatrix} 1274 \\ 190 \\ 0 \end{pmatrix}\frac{\text{nAs}}{\text{m}^2} \qquad \vec{E} = \frac{\vec{D}}{\varepsilon} = \begin{pmatrix} 144 \\ 22 \\ 0 \end{pmatrix}\frac{\text{kV}}{\text{m}}$$

Aufgabe 2 [10]

Gegeben sind U_1 , I_2 , R_1 und R_3 .

a) [3] Geben Sie die Maschengleichungen für M_1 und M_2 und die Knotengleichung für K_1 an.

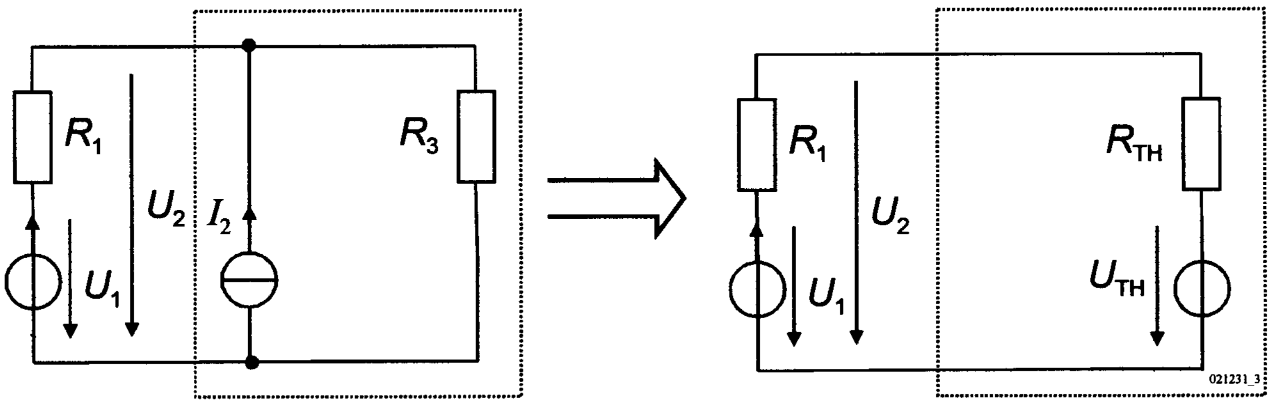


M_1 : $U_2 - U_1 + I_1 \cdot R_1 = 0$

M_2 : $I_3 \cdot R_3 - U_2 = 0$

K_1 : $I_1 + I_2 - I_3 = 0$

b) [3] Für die weitere Berechnung soll nun der „rechte Teil" der Schaltung durch seine (Thevenin) Ersatzschaltung ersetzt werden. (Geben Sie R_{TH} und U_{TH} an.)

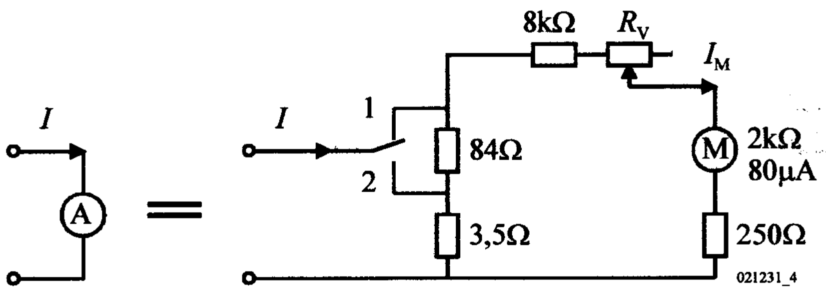


$R_{TH} = R_3$ $U_{TH} = R_3 \cdot I_2$

c) [4] Berechnen Sie nun U_2 als Funktion von U_1 , I_2 , R_1 und R_3 .

$$U_2 = U_1 \frac{R_3}{R_1 + R_3} + R_3 \cdot I_2 \frac{R_1}{R_1 + R_3}$$

Aufgabe 3 [6]
Auf der rechten Seite der Skizze ist die Schaltung eines Amperemeters dargestellt, dessen Messbereich sich in 2 Stufen umschalten lässt. Das Messwerk M hat einen Innenwiderstand von 2kΩ und zeigt bei $I_M = 80\ \mu A$ Vollausschlag.



a) [3] Wie muss der Widerstand R_V eingestellt werden, damit das Amperemeter in Stellung 1 bei I =10mA Vollausschlag zeigt? Tipp: Stromteilerregel.

$$I_M = I \frac{87.5\Omega}{87.5\Omega + 8k + 2k + 250 + R_V} \quad ; \quad I_M (R_V + \dots) = I \cdot 87.5\Omega$$

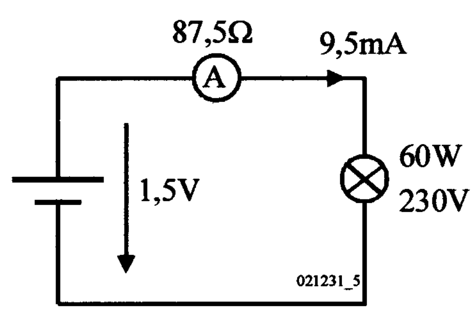
$$R_V = \frac{10\,mA}{80\,\mu A} 87.5\Omega - 10.338\,k\Omega = 599.5\,\Omega$$

b) [3] Bei welchem Strom zeigt das Amperemeter Vollausschlag in Stellung 2?

$$I = I_M \frac{599.5 + 10338}{3.5} = 250\,mA$$

Aufgabe 4 [6]

Der Kaltwiderstand (bei 20°C) einer 60W-Glühlampe für 230V soll mit nebenstehender Anordnung bestimmt werden. Es wird ein Strom von 9,5mA gemessen. Der Innenwiderstand des Amperemeters beträgt dabei 87,5Ω.



a) [2] Berechnen Sie den Kaltwiderstand der Glühlampe.

$$R_{kalt} = R_{ges} - 87.5\Omega = \frac{1{,}5V}{9{,}5mA} - 87.5 = 70.4\Omega$$

b) [4] Berechnen Sie den Widerstand der Glühlampe beim Betrieb an 230V Gleichspannung und die Temperatur des Glühfadens ($\alpha = 5 \cdot 10^{-3}/°C$).

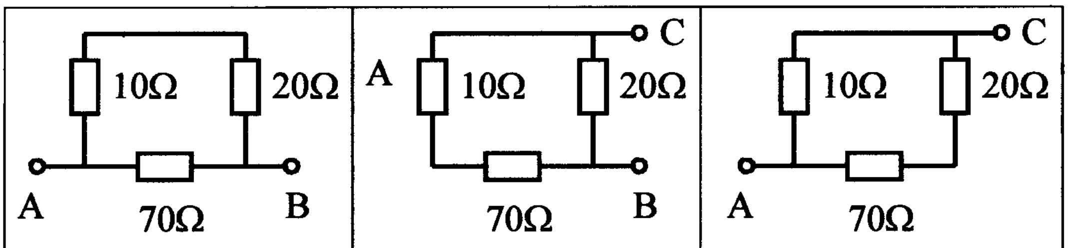
$$R_{heiß} = U^2/P = 230^2 V^2/60W = 882\,\Omega$$

$$R = R_{20°}(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad ; \quad \Delta T = \left(\frac{R}{R_{20}} - 1\right)/\alpha$$

$$T = 20° + \left(\frac{R_{heiß}}{R_{kalt}} - 1\right) 1/\alpha = 2326°C$$

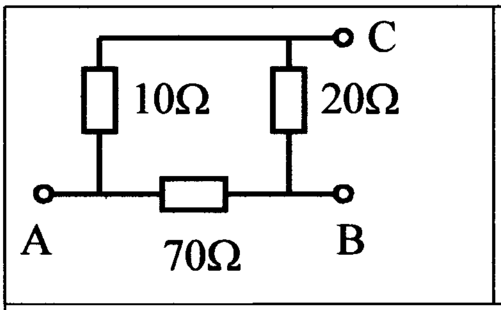
Aufgabe 5 [6]

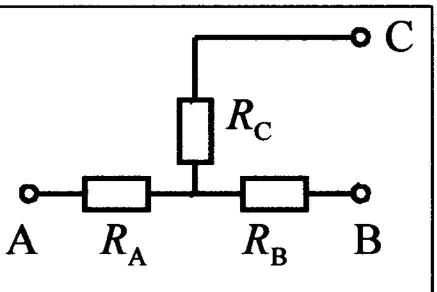
a) [3] Berechnen Sie jeweils den Widerstand zwischen den beiden Anschlüssen.



$R_{AB} = 21\,\Omega$ | $R_{BC} = 16\,\Omega$ | $R_{AC} = 9\,\Omega$

b) [3] Bestimmen Sie R_A , R_B und R_C so, dass die Schaltungen links und rechts äquivalent sind.

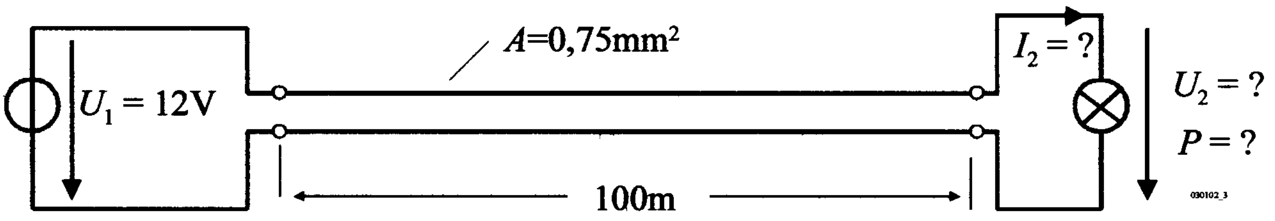




$R_A = \frac{70\cdot 10}{100} = 7\,\Omega$ $R_B = \frac{20\cdot 70}{100} = 14\,\Omega$ $R_C = 2\,\Omega$

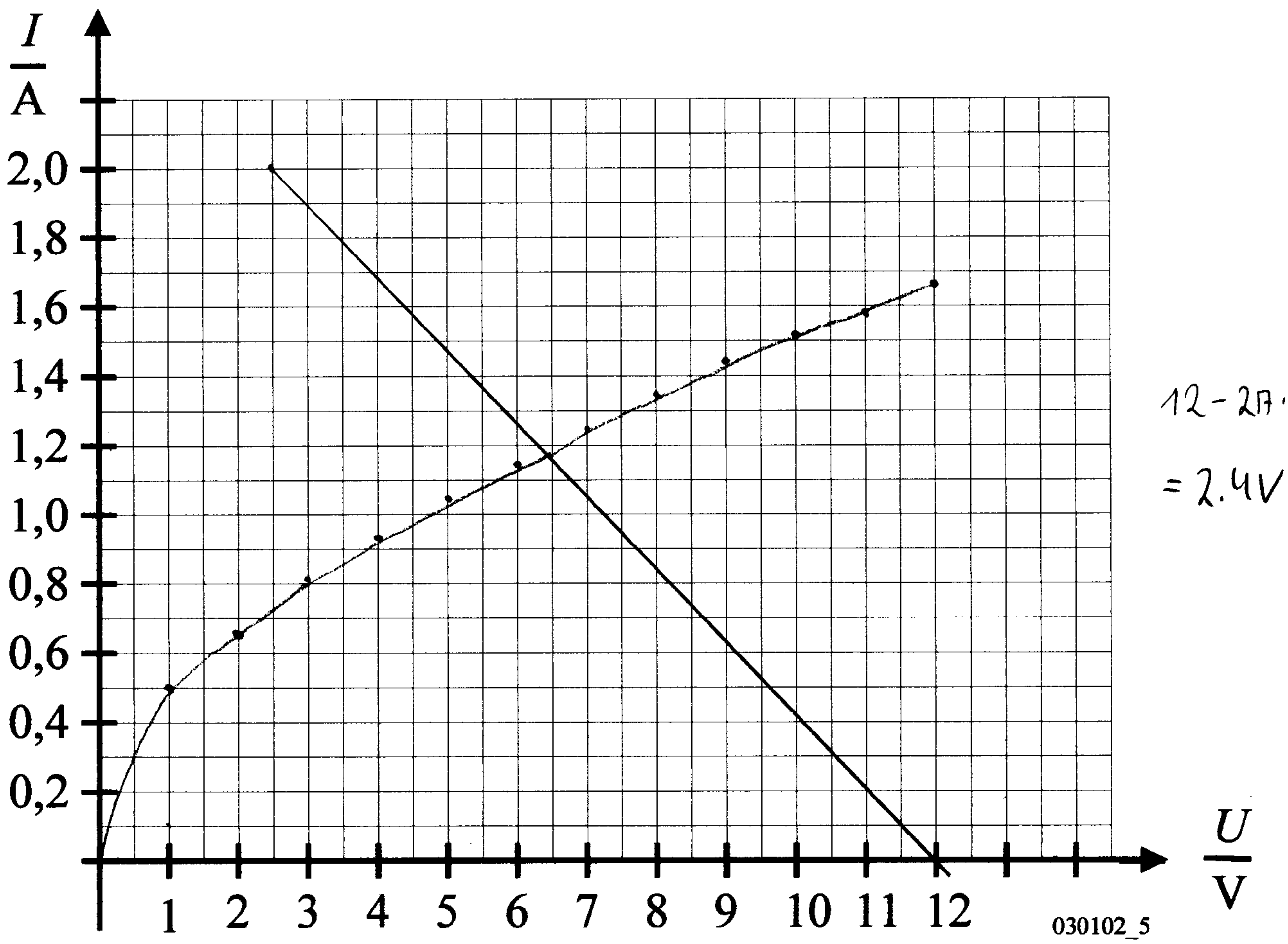
Aufgabe 6 [10]

Eine Halogenlampe wird über eine 100m lange Leitung mit einem Querschnitt von $0{,}75\text{mm}^2$ an einer 12V Gleichspannungsquelle betrieben. ($\rho = 18\cdot 10^{-9}\,\Omega m$)



Für die Lampe wird folgender Zusammenhang zwischen Strom und Spannung gemessen:

U/V	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
I/A	0,5	0,67	0,81	0,93	1,05	1.16	1,25	1,35	1,43	1,52	1,59	1,68



$12 - 2A \cdot 4{,}8\Omega$

$= 2.4V$

a) [2] Tragen Sie die Kennlinie der Lampe in das Diagramm ein.
b) [2] Berechnen Sie den Gesamtwiderstand der Leitung.

$R_L = \rho \frac{l}{A} = 18 \cdot 10^{-9} \Omega m \frac{200\,m}{0{,}75 \cdot 10^{-6}\,m^2} = 4{,}8\Omega$

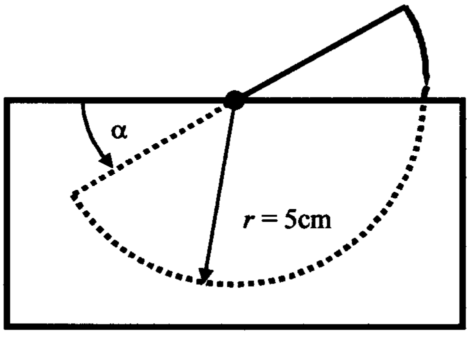
c) [3] Tragen Sie die Kennlinie des linearen Teils (Spannungsquelle + Leitung) in das Diagramm ein.

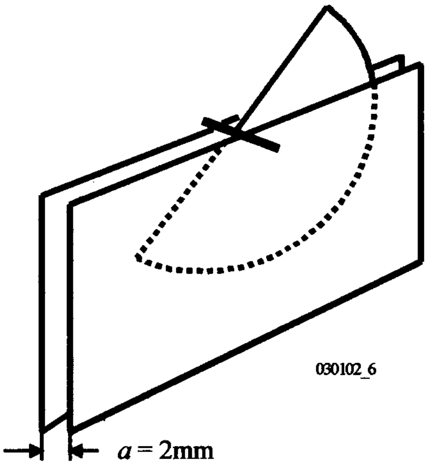
d) [3] Bestimmen Sie die Spannung über der Halogenlampe und den Strom durch die Halogenlampe. Welche Leistung wird in der Lampe umgesetzt?

$U_2 = 6{,}4V$ $I_2 = 1{,}18A$ $P = 7{,}5W$

Aufgabe 7 [6]

Ein Drehkondensator besteht aus einem halbkreisförmigen Rotor, der genau in der Mitte zwischen zwei parallelen Platten drehbar gelagert ist. Der Rotor ist gegenüber den Platten isoliert. Die beiden parallelen Platten sind leitend miteinander verbunden. Vernachlässigen Sie im Folgenden so genannte „Randeffekte", d.h. berücksichtigen Sie nur das Feld, das sich im Luftspalt zwischen Rotor und den feststehenden Platten befindet.
Der eine Anschluss des Kondensators ist mit dem Rotor, der andere mit den feststehenden Platten verbunden.





a) [1] Wann ist die Kapazität des Kondensators am größten?

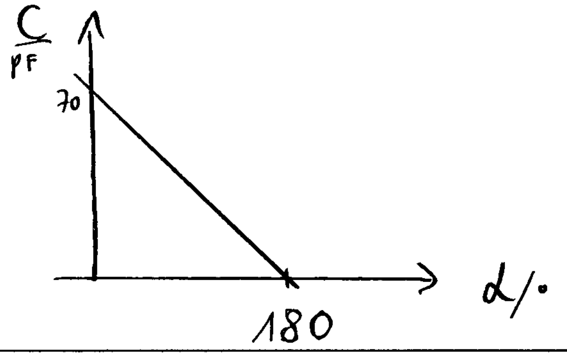
für $\alpha = 0°$

b) [3] Berechnen Sie die Kapazität für α = 0°.

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} = \varepsilon \cdot \frac{\pi r^2/2 \cdot 2}{a/2} = 2\varepsilon \frac{\pi r^2}{a} = 2 \cdot 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm} \cdot \frac{\pi \cdot 0.05^2}{2 \cdot 10^{-3}} = 70 \text{ pF}$$

c) [2] Geben Sie die Kapazität als Funktion des Drehwinkels α an und skizzieren Sie diese Funktion.

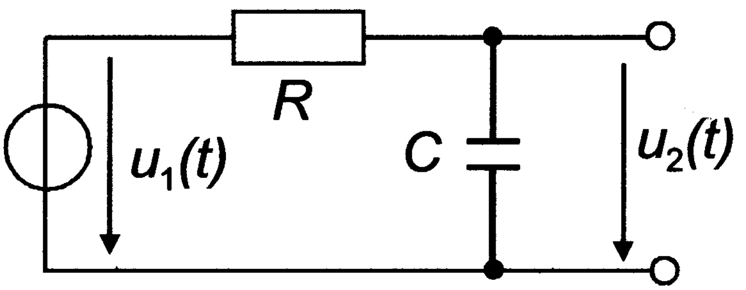
$$C(\alpha) = \frac{180° - \alpha}{180°} \cdot 70 \text{ pF} = \left(1 - \frac{\alpha}{180°}\right) \cdot 70 \text{ pF}$$

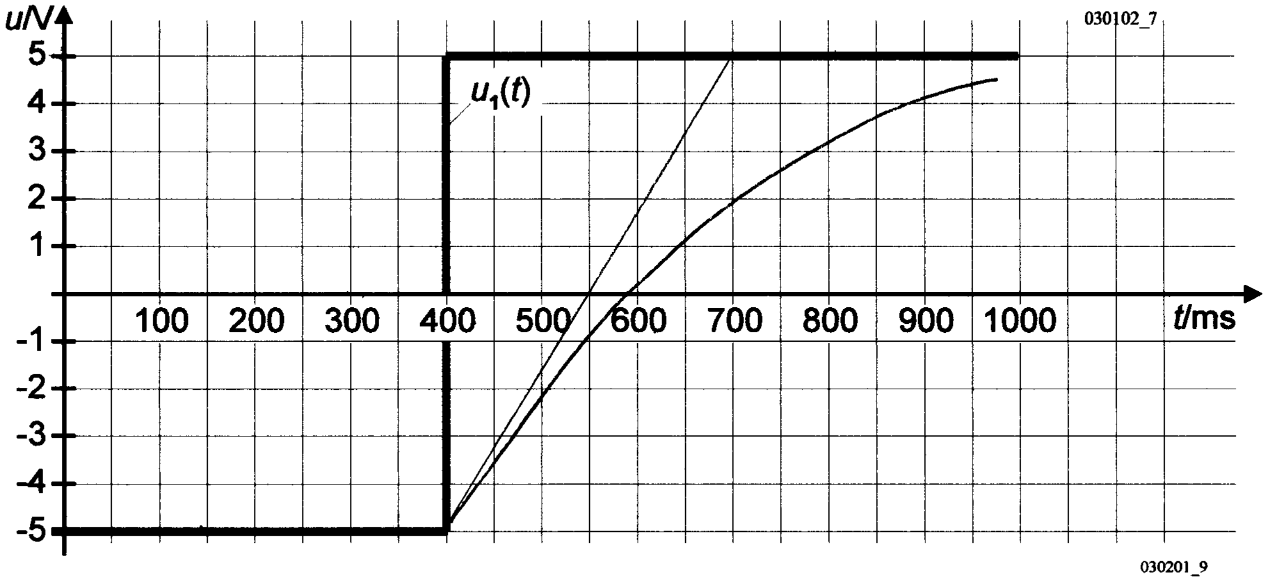


Aufgabe 8 [6]

Die Spannungsquelle $u_1(t)$ ist zeitvariabel. Sie hat für längere Zeit den Wert -5V und springt dann bei t = 400ms auf +5V.

R = 200kΩ, C = 1,5μF





030201_9

a) [1] Wie groß ist die Zeitkonstante?

$\tau = R \cdot C = 300\,ms$

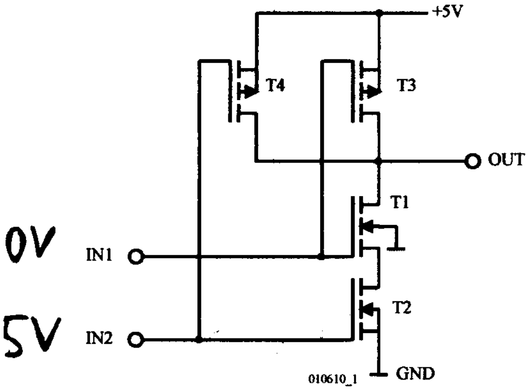
b) [2] Tragen Sie den Verlauf von $u_2(t)$ in das Diagramm ein.

c) [3] Geben Sie $u_2(t)$ für t>400ms an.

$u_2(t) = 5V - 10V \cdot e^{-(t-400ms)/300ms}$

Aufgabe 9 [8]

a) [3] Bei der folgenden Schaltung ist zunächst **IN1=0V** und **IN2=5V**. Tragen Sie für jeden der Transistoren ein, ob dieser durchgeschaltet **(ON)** oder gesperrt **(OFF)** ist. Wie groß ist dann das Potenzial am Ausgang OUT? Welche logische Verknüpfung ist realisiert?



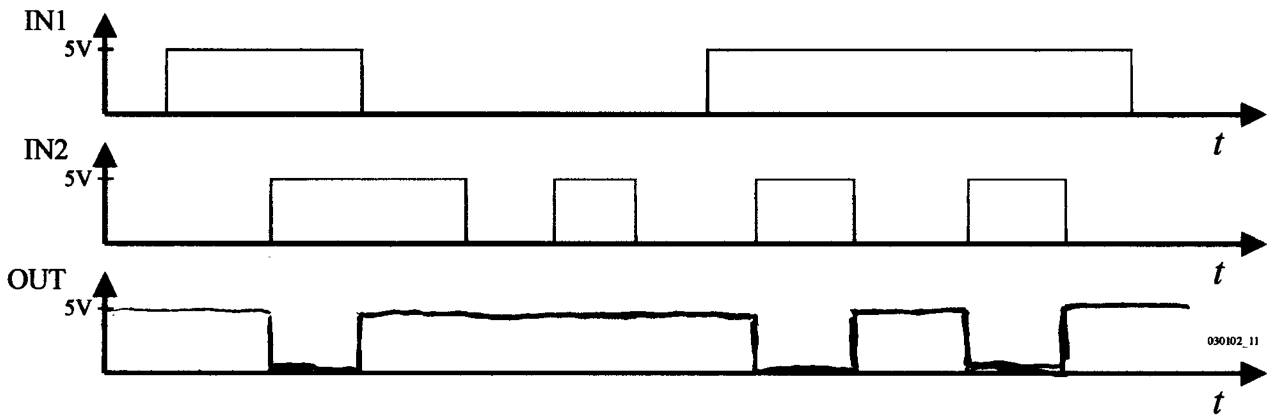
T1= OFF	T2= ON	T3= ON	T4= OFF
OUT= 5V			
Dies ist ein NAND -Gatter			

– 1

– 1

– 1

b) [2] Tragen Sie in das Diagramm unten den Verlauf für das Signal OUT ein.



c) [1] Was für eine Art von Transistor ist T1 und was für eine Art von Transistor ist T3?

T1: n-Kanal-MOSFET	T3: p-Kanal MOSFET

d) [1] Wie nennt man die bei der Schaltung verwendete Technologie und warum heißt diese so?

CMOS, Complementary ...

e) [1] Was sind die Vorteile dieser Technologie?

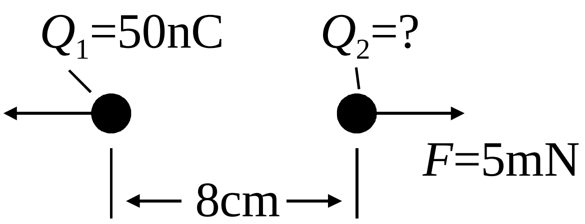
geringer Leistungsverbrauch

Name:	Matr.-Nr.:

Fachhochschule Mannheim Hochschule für Technik und Gestaltung Klausur EGI	WS 1999/2000	Prüfer: Prof. Best
09.02.2000	Bearbeitungszeit: 120 min Hilfsmittel: Taschenrechner, handschriftliche Formelsammlung (2 Blatt A4)	

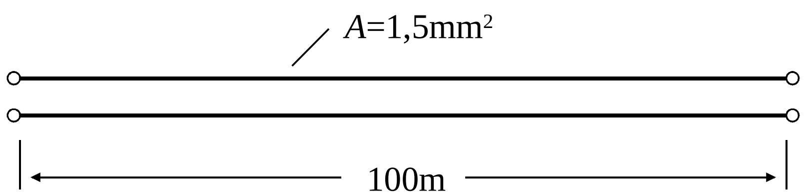
Tragen Sie Namen und Matrikelnummer auf diesem Blatt und Ihren Lösungsblättern ein.
Bitte beschriften Sie die Blätter nur einseitig. Die erzielbaren Punkte stehen in [ ].
Ergebnisse bitte in die Aufgabenblätter eintragen; **Nebenrechnungen mit abgeben**.

Aufgabe 1 [3]
Zwei Punktladungen haben einen Abstand von 8cm. Sie stoßen sich mit einer Kraft von 5mN gegenseitig ab. Die eine Ladung beträgt 50nC. Wie groß ist die andere?
($\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12} \frac{\mathrm{As}}{\mathrm{Vm}}$)



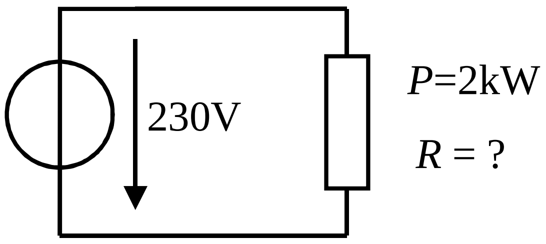
Formel: Q_2 =	Größe : Q_2 =

Aufgabe 2 [3]
Ein Verlängerungskabel ist 100m lang. Die Leitungen (Hin- und Rückleiter) haben einen Querschnitt von 1,5 mm^2 und bestehen aus Kupfer. ($\rho = 18 \cdot 10^{-9} \Omega m$).
Wie groß ist sein Gesamt-Widerstand?



Formel: R =	Größe : R =

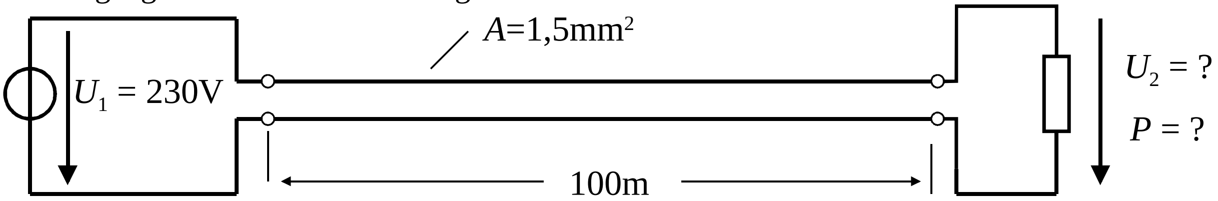
Aufgabe 3 [2] Wie groß ist der Widerstand eines elektrischen Grills, wenn dieser bei 230V Anschlussspannung 2kW abgibt?



Formel: R =	Größe : R =

Aufgabe 4 [4]

Der Grill aus Aufgabe 3 wird über das Kabel aus Aufgabe 2 betrieben, wobei die Spannung am Eingang des Kabels 230V beträgt.



a) [2] Wie groß ist die Spannung am Grill?

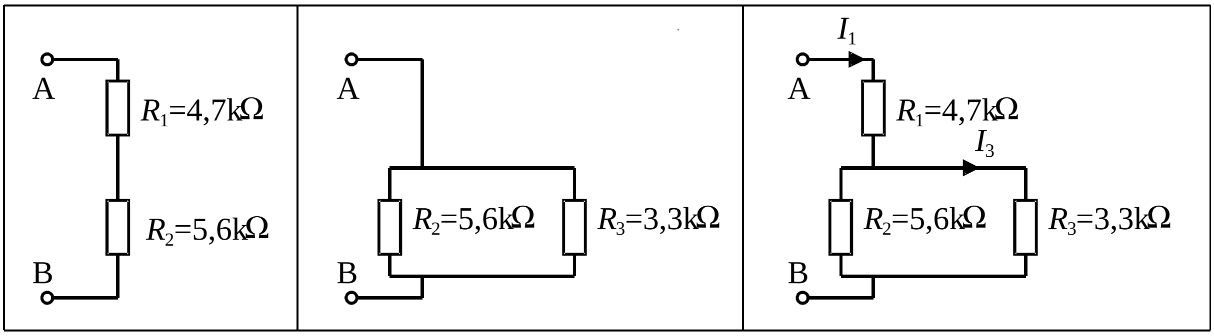
Formel: U_2 =	Größe : U_2 =

b) [2] Wieviel Leistung gibt der Grill nun ab?

Formel: P =	Größe : P =

Aufgabe 5 [3]

Geben Sie jeweils den Widerstand R_{AB} zwischen den Punkten A und B allgemein und für die Werte R_1=4,7kΩ, R_2=5,6kΩ, R_3=3,3kΩ an.



a) [1] Formel: R_{AB} = Größe: R_{AB} =	b) [1] Formel: R_{AB} = Größe: R_{AB} =	c) [1] Formel: R_{AB} = Größe: R_{AB} =

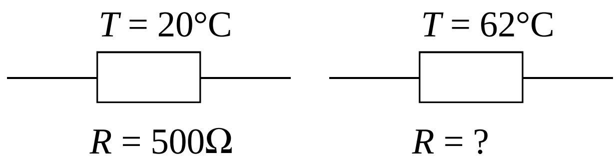
Aufgabe 6 [4]

Die Schaltung aus Aufgabe 5c) wird an eine Spannung von U_{AB} = 10V angelegt. Berechnen Sie die Ströme I_1 und I_3.

Formel: I_1 =	Größe : I_1 =
Formel: I_3 =	Größe : I_3 =

Aufgabe 7 [3]

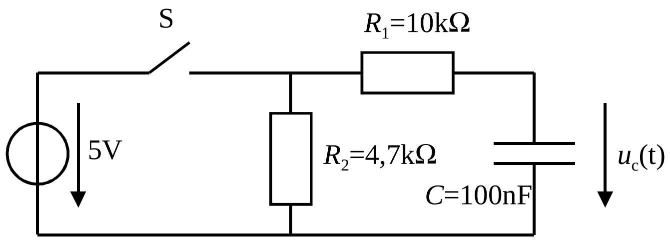
Eine Wicklung eines Elektromotors besteht aus Kupfer und hat bei 20°C einen Widerstand von 500Ω. Welchen Widerstand hat Sie im Betrieb bei 62°C? (α=0,0039/°C).



Formel: R = Größe : R =

Aufgabe 8 [10]

In der nebenstehenden Schaltung war der Schalter lange geöffnet, so dass der Kondensator praktisch vollständig entladen ist. Zum Zeitpunkt t=0 wird der Schalter geschlossen.



a) [4] Auf welchen Endwert $u_C(\infty)$ lädt sich der Kondensator auf, wenn der Schalter beliebig lange geschlossen bleibt und wie groß ist die Zeitkonstante τ ?

Endwert: $u_C(\infty)$ = Zeitkonstante: τ =

b) [2] Geben Sie die Zeitfunktion $u_C(t)$ für den Aufladevorgang an. Geben Sie auch an, wie groß $u_C(t)$ nach einer Millisekunde ist.

$u_C(t)$ = u_C(1ms) =

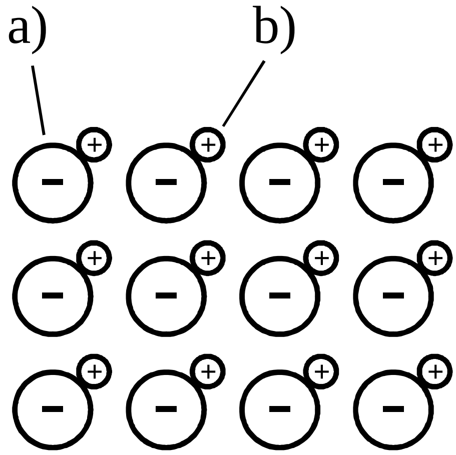
c) [2] Zum Zeitpunkt t_1 = 1ms wird der Schalter S wieder geöffnet. Auf welchen (neuen) Endwert $u_C(\infty)$ läuft nun die Kondensatorspannung zu und wie groß ist **jetzt** die Zeitkonstante τ?

Endwert: $u_C(\infty)$ = Zeitkonstante: τ =

d) [2] Geben Sie die Zeitfunktion $u_C(t)$ für den Entladevorgang an. (Es genügt, die Zeitfunktion mit einer neuen Zeitzählung ab t_1 darzustellen.)

$u_C(t)$=

Aufgabe 9 [6]



Die nebenstehende Skizze zeigt symbolisch die unbeweglichen Atomrümpfe der Fremdatome (große Kreise) und die beweglichen Ladungsträger (kleine Kreise) in einem dotierten Halbleiterkristall.

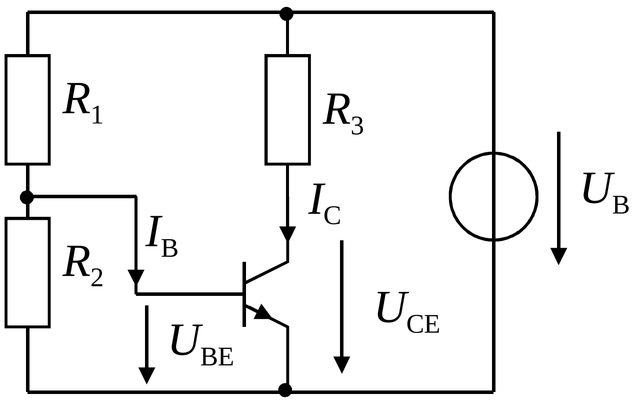
a) [2] Wie nennt man die Fremdatome (negativ geladenen Atomrümpfe) ?

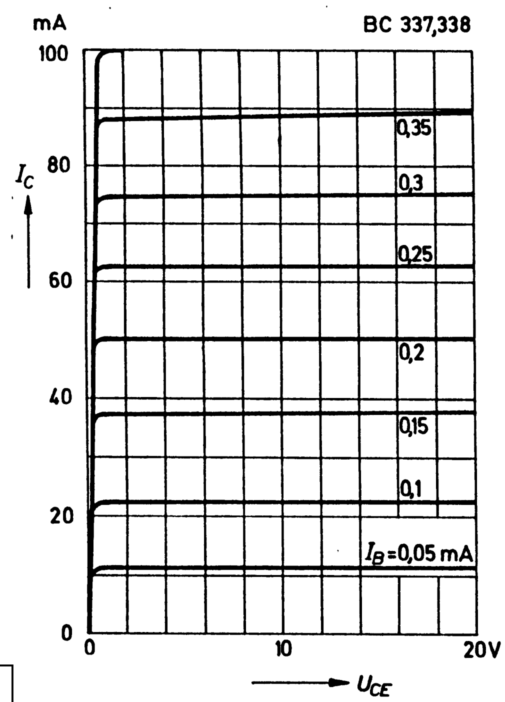
b) [2] Wie nennt man die positiven beweglichen Ladungsträger?

c) [2] Ist hier ein P-Leiter oder ein N-Leiter dargestellt?

a)	b)	c)

Aufgabe 10 [11]





a) [1] Um welchen Transistortyp handelt es sich?

a)

b) [2] Tragen Sie für U_B = 16V und R_3 = 180Ω die „Arbeitsgerade“ in das Kennlinienfeld ein.

c) [2] Bestimmen Sie den Arbeitspunkt für I_B=0,1mA

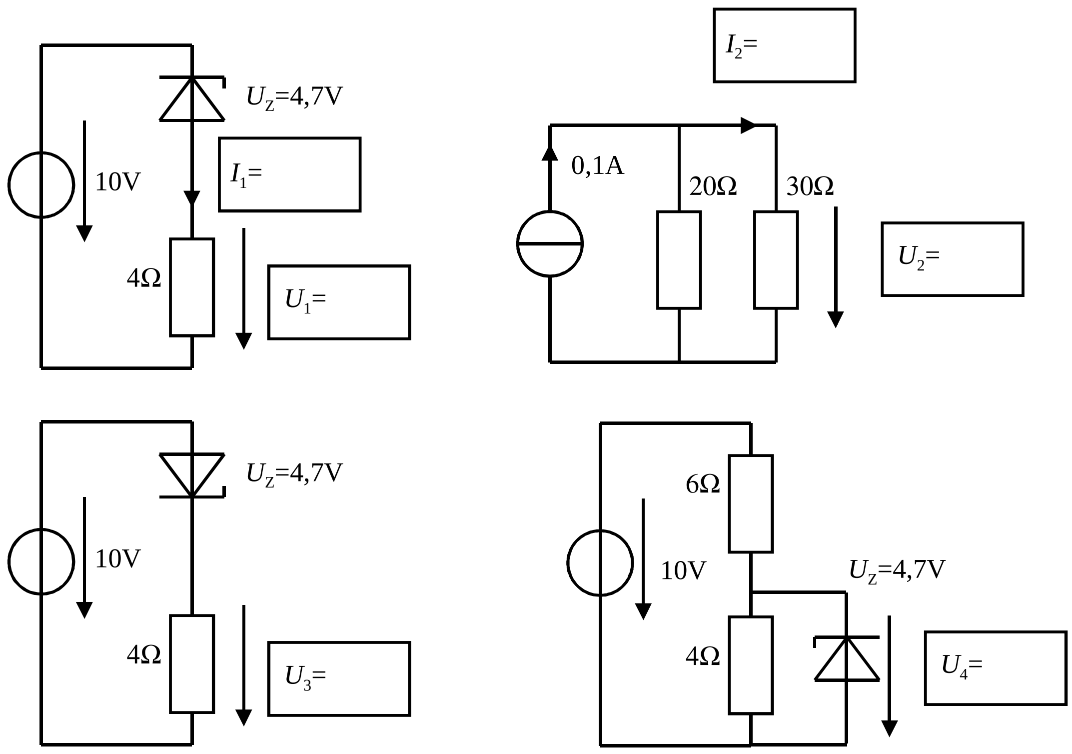
U_{CE} =	I_C =

d) [6] Leiten sie eine Formel ab, mit der man R_1 ausrechnen kann, wenn U_B, U_{BE} , I_B und R_2 gegeben sind. Berechnen Sie damit R_1 für $U_B = 16V$, $U_{BE} = 0{,}6V$, $I_B = 0{,}1mA$ und $R_2 = 1k\Omega$.

Formel: $R_1 =$	Größe : $R_1 =$

Aufgabe 11 [6]

Berechnen Sie! (Durchlasspannung bei Dioden mit 0,6V annehmen).



Aufgabe 12 [5]

a) [2] Die 230V-Wicklung eines Klingeltransformator hat 1600 Windungen. Wieviele Windungen werden für die 8V-Wicklung benötigt? (Trafo als ideal, d.h. keine Streuung, betrachten).

b) [3] Wie groß ist die Amplitude der Ausgangsspannung?

a)	b)

Blatt1 **1a)** verschiedenes **1b)** 29.8 nC **1c)** 0,8 mN **2a)** Oberfläche: $D = 19{,}9 \cdot 10^{-9} \dfrac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}$; $E = 2{,}25 \dfrac{\mathrm{kV}}{\mathrm{m}}$

1m Abst.: $D = 795 \cdot 10^{-12} \dfrac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}$; $E = 89{,}9 \dfrac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$ **3a)** $\vec{D} = \begin{pmatrix} 1{,}157 \\ -1{,}646 \\ 0 \end{pmatrix} \dfrac{\mu\mathrm{C}}{\mathrm{m}^2}$; D=2,01µC/m²

3b) $\vec{F} = \begin{pmatrix} 1{,}306 \\ -1{,}858 \\ 0 \end{pmatrix} \mathrm{mN}$; F=2,27mN **4a)** $D = \dfrac{1}{2\pi r} 10^{-6} \dfrac{\mathrm{C}}{\mathrm{m}}$ **4b)** $\vec{D} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ 0 \end{pmatrix} \dfrac{1}{x^2 + y^2} \cdot \dfrac{10^{-6}\mathrm{C}}{2\pi\ \mathrm{m}}$

Blatt2 1) R=69,2Ω ; P=764W 2) l=125,7m 3) T=1220°C 4) $P=U^2/R$ 5) $P=RI^2$

6) $I_1 = I \dfrac{R_2}{R_1 + R_2}$ 7) $R=R_i$ 8) $I_1 - I_2 - I_3 = 0$; $R_1 I_1 + R_3 I_3 = U_{01}$; $R_2 I_2 - R_3 I_3 = -U_{02}$

9) $I_1 = \dfrac{(R_2 + R_3)U_{01} - R_3 U_{02}}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$; $I_2 = \dfrac{-(R_1 + R_3)U_{02} + R_3 U_{01}}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$; $U_3 = \dfrac{R_3 (U_{01} R_2 + U_{02} R_1)}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3}$

10) I_1=0A; I_2=-0.25A; U_3=5V 11) P_{R1}=0W; P_{R2}=1,25W; P_{R3}=1,25W

Blatt3 1) $R = \dfrac{R_1 R_2 R_3 + R_1 R_2 R_4 + R_1 R_2 R_5 + R_1 R_3 R_4 + R_1 R_3 R_5}{R_1 R_3 + R_1 R_4 + R_1 R_5 + R_2 R_3 + R_2 R_4 + R_2 R_5 + R_3 R_4 + R_3 R_5} = 6{,}25\Omega$ 2) U=7,33V

Blatt4 1a) R_4=7,92kΩ 1b) U_{AB}= 396,8mV 1c) 512 mA ; 50 mA 2a) 2,48V ; 9,98V ; 49,98V
2b) 49,6kΩ ; 199,6kΩ ; 999,6kΩ 2c) 50µA 3) 354pF 4) 4,8mC 5) 20mA

Blatt5 1a) U_0=5V R_i=150kΩ 1b) 5V 1c) τ=150ms 1d) t=691ms 1e) $u_c(t) = 5V(1 - e^{-t/150ms})$
2a) Endwert 0V 2b) τ=200ms 2c) t=921ms 2d) $u_c(t) = 5Ve^{-t/200ms}$
3a) U_0=6V R_i=50Ω 3b) Achsenabschnitte: 6V ; 120mA ; U_Z=4V; I_Z=40mA

Blatt6 1a) R_v=100Ω 1b) P_R=1,28W P_Z=0,305W 1c) 35% egal, ob Radio an oder aus
2) U_1= -4,44V ; I_2 = 62,5mA ; U_3= 0V ; U_4= 3,3V; I_5=-6mA; P_6=0,5W

Blatt7 1a) zeigt nach oben 1b) Achsenabschnitte 12V und 55mA 1c) I_B ca.-0,09mA; R_1=127kΩ 1d) P_T=160mW P_R=80mW
2) U_{AB}=0V ; U_1=0V ; I_1=5mA ; I_2=5mA ; U_2=3V ; I_3=10mA ; I_4=0A ; U_3=2,5V ; I_5=12,5mA I_6=2,5mA ; I_7=0A ; I_8= -2,5mA

Klausur WS 1999/2000 1) Q_2=71,2nC; 2) R=2,4Ω 3) R=26,45Ω 4a) U_2 =210,9V
4b) P=1,68kW 5a) R_{AB}=10,3kΩ 5b) R_{AB}=2,08 kΩ 5c) R_{AB}=6,78 kΩ 6) I_1=1,475mA; I_3=928µA 7) R=581,9Ω 8a) $u_C(\infty) = 5\mathrm{V}$; $\tau = 1\mathrm{ms}$ 8b) $u_C(t) = 5V\left(1 - e^{-\frac{t}{1\mathrm{ms}}}\right)$;

$u_C(1\mathrm{ms}) = 3{,}16\mathrm{V}$ 8c) $u_C(\infty) = 0\mathrm{V}$; $\tau = 1{,}47\mathrm{ms}$ 8d) $u_C(t) = 3{,}16V\left(e^{-\frac{t}{1{,}47\mathrm{ms}}}\right)$ 9a) Akzeptoren

9b) Löcher 9c) P-Leiter 10a) npn-bipolar 10b) Achsenab. U_{CE} =16V I_C =88,9mA
10c) U_{CE} =12V I_C =21mA 10d) R_1=22kΩ 11) I_1 = 1,325A; U_1= 5,3V; I_2 = 40mA; U_2 = 1,2V; U_3=9,4V; U_4 = 4V; 12a) N_2= 55; 12b) $\hat{U}_2 = 11{,}3\mathrm{V}$

Klausur SS 2000 1a) $\vec{E}=\begin{pmatrix}-33{,}9\\0\\0\end{pmatrix}\frac{\text{kV}}{\text{m}}$; 1b) Q_1=-6,03·10^{-9}C; 1c) $\vec{F}=\begin{pmatrix}339\\0\\0\end{pmatrix}\mu\text{N}$

2) $R=\frac{4\rho DN}{d^2}=812{,}2\Omega$; 3) $T=T_0+\frac{R_T-R_0}{R_0\cdot\alpha}=62°\text{C}$; 4a) C=278pF; 4b) E=100kV/m

4c) $Q=27{,}8\text{nC}$; 5a) $R_{AB}=R_1+\frac{R_2R_3}{R_2+R_3}$; 5b) $R_{AB}=\frac{R_1(R_2+R_3)}{R_1+R_2+R_3}$; 6a) $R_{AB}=\frac{C_1(C_2+C_3)}{C_1+C_2+C_3}$

6b) $C_{AB}=C_1+\frac{C_2C_3}{C_2+C_3}$; 7a) $U_1=I_1\cdot R_2$; $R_3=R_2$; 7b) $I_2=\frac{U_2}{R_5}$; $R_6=R_5$

8)

t/ms	100	300	500	700
$u_2(t)$/V	0	2,27	1,69	2,74

9a) Donatoren; 9b) Elektronen; 9c) N-Leiter

10a) $I_B=\frac{17{,}4\text{V}}{R_1}-0{,}06\text{mA}$; 10b)

R_1	1MΩ	100kΩ	68kΩ	10kΩ
I_B	0	0,114mA	0,196mA	1,68mA
U_{CE}	18V	13V	7V	0,2V
I_C	0mA	22mA	50mA	80mA

11) $L=\frac{N^2d^2\mu_0\mu_r}{4D}=3{,}14\text{H}$ 12)

U=0,6V; I=5mA	I=0mA; U=0V
U=5V; I=0mA	U=0V; U=5V

Klausur WS 2000/2001 1a) $\vec{D}=\begin{pmatrix}221\\0\\0\end{pmatrix}\frac{\text{nC}}{\text{m}^2}$ 1b) $\vec{E}=\begin{pmatrix}25\\0\\0\end{pmatrix}\frac{\text{kV}}{\text{m}}$ 1c) $\vec{F}=\begin{pmatrix}-250\\0\\0\end{pmatrix}\mu N$

2) Skizze 3) $U=\frac{\rho\cdot l\cdot I}{A}$ U = 180mV 4) $R=R_{20}(1+\alpha\cdot(T-20°))$ $R=579{,}8\Omega$

5a) U_C = 6V 5b) U_C = -10V 5c) U_C = 10V
5d) U_C = 6V U_A= 12V U_B = -30V U_C = 51V I_3 = -0,6mA I_1 = -2,4mA

6) C = 400pF Q = 4µF 7a) $u_C(t)=9V-4V\cdot e^{-\frac{t}{1{,}034ms}}$ $i_c(t)=85\mu\text{A}\cdot e^{-\frac{t}{1{,}034ms}}$

7b) t_1= 0,717 ms 8a) Metalle: Valenzband und Leitungsband überlappen, Halbleiter: kleiner Abstand, Isolatoren: großer Abstand.
8b) Donatoren 9a) Skizze 9b) Links: NAND, Rechts: NOR
10) U_{BE} = 0,65V I_B = 435µA U_{CE} = 0,3V I_C = 45mA

Klausur SS2001

1) $\vec{D}=\begin{pmatrix}765\\306\\0\end{pmatrix}\frac{\text{nC}}{\text{m}^2}$ 2) F= 565µN 3) C = 443pF E = 100kV/m Q = 44,3 nC

4a) U_1 = 10V U_2 = 5V I_1 = 1mA I_2 = 1mA
4b) U_1 = 15V U_2 = 15V I_1 = 1,5mA I_2 = 3mA
4c) U_1 = 30V U_2 = 15V I_1 = 3mA I_2 = 3mA
4d) U_1 = 10V U_2 = 10V I_1 = 1mA I_2 = 2mA

5) $R_{AB} = 1\text{k}\Omega$ 6) $U_1 = 4\text{V}$ $U_2 = 12\text{V}$ 7) $t_1 = 577\text{ms}$
8) Gleichrichterdiode, Signaldiode, Zenerdiode, Leuchtdiode, Photodiode
9) $R_3 = 0{,}45\Omega$ $P = 60\text{W}$
10) Bild oben links: U=0V, I=0A Bild oben rechts: U=0,6V, I=12mA
Bild Mitte: $U_1 = 0{,}6\text{V}$, $U_2 = 0{,}6\text{V}$, $U_3 = 0\text{V}$, $I_1 = 2{,}34$ mA, $I_2 = 23{,}4\text{mA}$, $I_3 = 240\text{mA}$
Bild unten links: U =0,6V, I =11mA Bild unten rechts: U = -5V I = 0A
11a) T1 = ON, T2 = OFF, T3 = OFF, T4 = ON, OUT = 5V, NAND-Gatter
11b) T1 = ON, T2 = OFF, T3 = OFF, T4 = ON, OUT = 0V, NOR-Gatter

<u>Klausur WS2001/2002</u>

1a) $\vec{D} = \begin{pmatrix} 44{,}5 \\ 24{,}3 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{nC}}{\text{m}^2}$ 1b) $\vec{D} = \begin{pmatrix} -35{,}4 \\ -212{,}2 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{nC}}{\text{m}^2}$ 1c) $\vec{D} = \begin{pmatrix} 9{,}1 \\ -188 \\ 0 \end{pmatrix} \frac{\text{nC}}{\text{m}^2}$

2a) $U_0 = 5\text{V}$ $R_i = 3{,}33\ \text{k}\Omega$ 2b) $U_0 = 15\text{V}$ $R_i = 5\ \text{k}\Omega$ 2c) $I_k = 3\text{mA}$ $R_i = 5\ \text{k}\Omega$
2d) $I_k = 2\text{mA}$ $R_i = 15\ \text{k}\Omega$ 3) $U_1 = 0\text{V}$ $U_2 = -12\text{V}$
4) vorher: $U_1 = 100\text{V}$ $C_1 = 178\text{pF}$ $Q_1 = 17{,}8$ nC
nachher: $U_1 = 200\text{V}$ $C_1 = 89\text{pF}$ $Q_1 = 17{,}8$ nC

5a) $u_C(t) = 10V\left(1 - e^{-t/2ms}\right)$ 5b) $u_C(t) = 1000\frac{\text{V}}{\text{s}} \cdot t$ 5c) $u_C(t) = 1V\left(1 - e^{-t/1ms}\right)$

6a) Metalle: Bänder überlappen, Halbleiter: kleiner Bandabstand, Isolatoren: großer Bandabstand; Leitungsband, Valenzband
6b) Elektronen-Loch-Paarbildung infolge Temperatur etc. im Halbleiter
6c) Hinzufügen von Fremdatomen, um Leitfähigkeit zu erhöhen.
6d) Mit 5-wertiges Fremdatomen dotiert, freie Elektronen
6e) Donatoren
6f) Löcher in der Mehrheit (Majoritätsträger), Elektronen in der Minderheit (Minoritätsträger)
7) I=0,32A, U=3,2V; I= 0A, U = 0V; I =0,44A, U=4,4V
8) $U_Z = 5{,}7\text{V}$, $I_Z = 30\text{mA}$, $P_Z = 170\text{mA}$, $P_{R1} = 393\text{mW}$
9) $U_1 = 2{,}6\text{V}$, $U_{BE} = 0{,}6\text{V}$, $U_{CE} = 6{,}5\text{V}$, $I_C = 50\text{mA}$, $h_{FE} = 250$
10a) T1=ON, T2=OFF, OUT=5V, NAND
10b) T1=OFF, T2=ON, OUT=0V, NOR

Ein analoges Vielfachmessgerät

J. Best, FH Mannheim, 04.10.2002

Für nicht zu große Ansprüche gibt es Vielfachmessgeräte recht günstig. Das hier abgebildete Modell hat in einem Baumarkt etwa 10 € gekostet. (Zu ähnlich niedrigen Preisen bekommt man übrigens auch schon Digital-Multimeter mit LCD-Ziffernanzeige.)

Ein Blick auf die Skala und den Wahlschalter zeigt, was man damit messen kann.

DCV bedeutet Gleichspannung (Direct Current Volt), genau übersetzt „Gleichstrom-Volt“. Diese englische Abkürzung ist übrigens etwas fragwürdig (aber üblich), denn es handelt sich ja um einen Spannungsmessbereich und Strom ist nicht gleich Spannung.

Die Werte am Wahlschalter geben jeweils an, bei welcher Spannung der Zeiger auf Vollausschlag geht. Steht der Schalter auf 1000 DCV, so würden wir Vollausschlag erhalten, wenn 1000V zwischen den beiden Buchsen COM (Common = gemeinsam) und VmAΩ (Volt – Milliampere – Ohm) anliegen. Den Wert 1000 sucht man auf der Skala übrigens vergebens. Hier muss man eben die Skala zu Rate ziehen, die bei „10“ endet. Man hängt dann an den abgelesen Wert zwei Nullen an. Maßgeblich ist dabei übrigens die schwarze Skala, nicht die rote. Letztere gilt nur für AC10V, was auch dran steht; wir müssen nur genau hinschauen.

Der DCmA-Bereich ist für Strommessungen zuständig. Wir haben die Wahl zwischen 10mA und 250mA Vollausschlag.

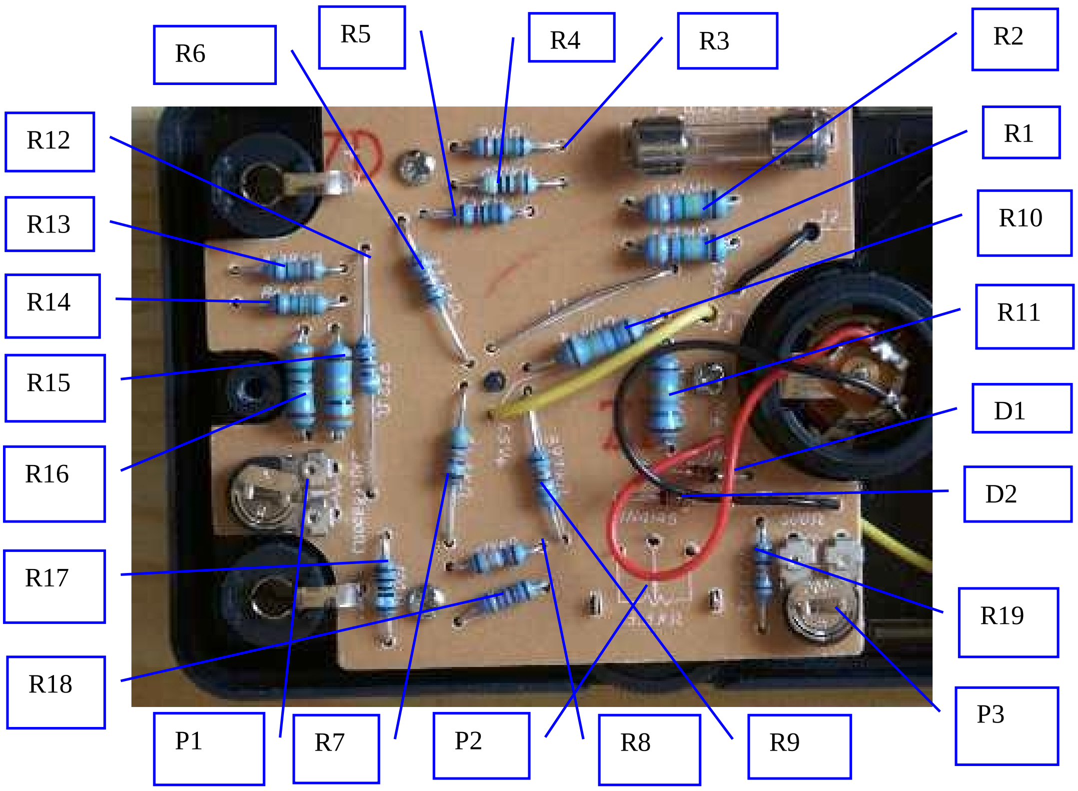
Ein spezieller Spannungsmessbereich BAT dient zur Batteriekontrolle. Hier ist nicht nur der Endausschlag auf die Batteriespannungen 1,5V und 9V abgestimmt, das Messgerät belastet hier die Batterie etwas, so dass eine schlaffe Batterie besser erkannt wird.

In der Stellung „Ω“ können Widerstände gemessen werden. Dafür ist dann die grüne Skala zuständig. Auf der linken Seite finden wir übrigens ein Einstellrädchen „0ΩADJ“, das zu einem Potentiometer gehört. Damit müssen wir, bevor wir einen Widerstand messen, auf 0-Ohm abgleichen: Die beiden Buchsen werden verbunden und das Rädchen wird so lange gedreht, bis der Zeiger auf 0Ω (also ganz rechts) steht. Die Widerstandskala ist übrigens nicht linear geteilt. Steht der Wahlschalter auf 10X, so sind die auf der grünen Skala abgelesenen Werte mit 10 zu multiplizieren; steht der Wahlschalter auf 1k, multipliziert man die abgelesen Werte mit 1000.

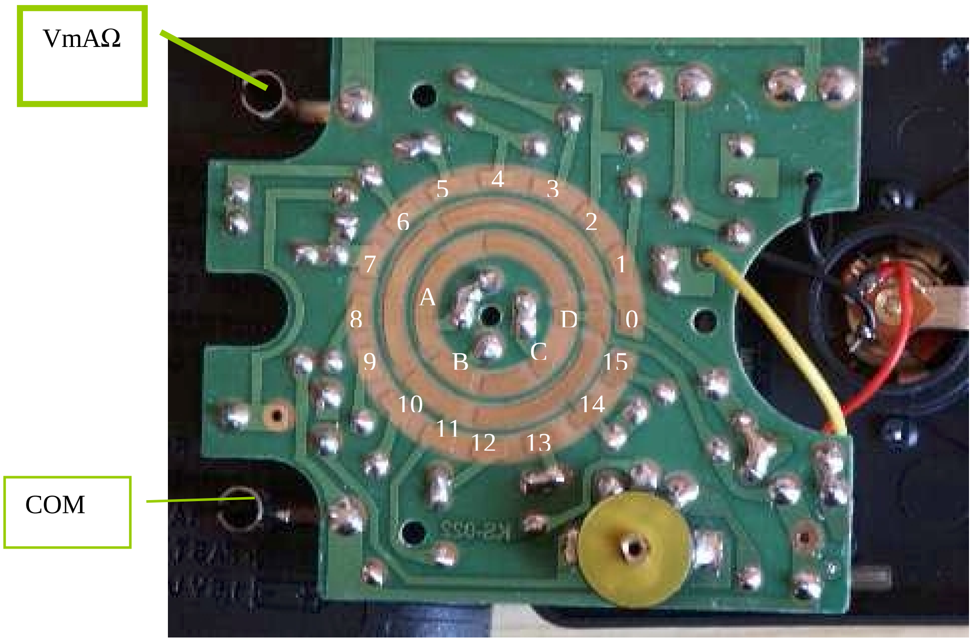
Der ACV-Bereich dient schließlich zum Messen von Wechselspannungen.

Ein wichtiges Qualitätsmerkmal eines solchen Messgerätes ist seine Empfindlichkeit bzw. sein Innenwiderstand. Auf der Skala finden wir hier die Angaben „DC 10kΩ/V“ und „AC 4,5kΩ/V“. Das bedeutet z.B., dass im 10V-Messbereich das Messgerät die Schaltung mit einem Widerstand von 10kΩ/V*10V, also 100kΩ belastet. Wenn wir also damit Messungen in einer elektronischen Schaltung vornehmen, die selbst einen großen Innenwiderstand hat, so wird das Ergebnis verfälscht (und die Funktion der Schaltung beeinträchtigt).

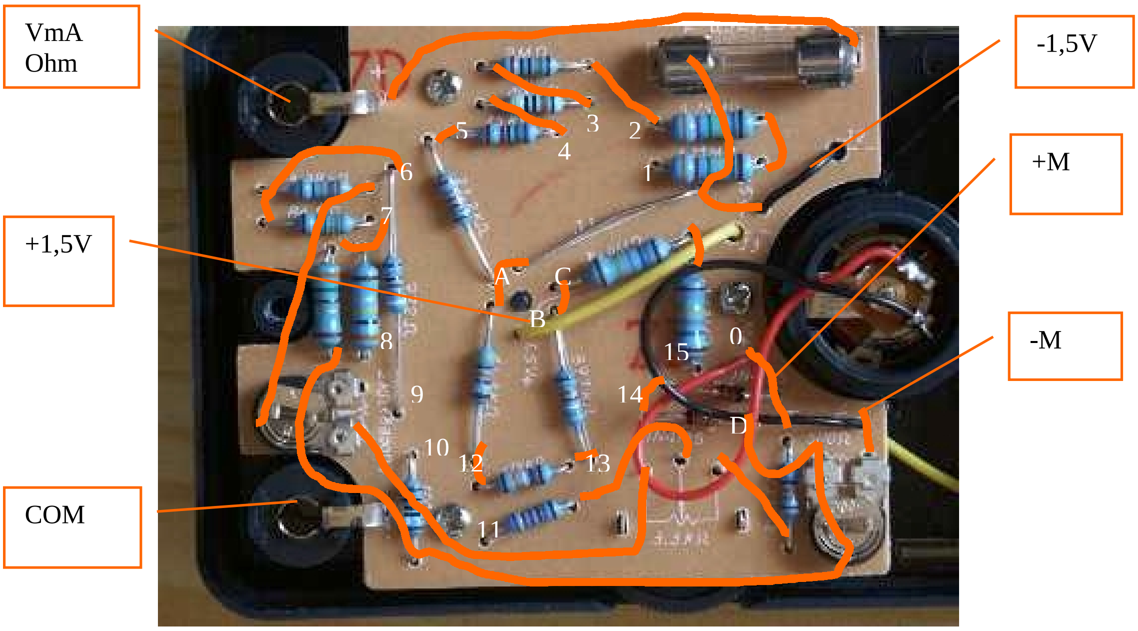
Natürlich muss man eine solche Neuerwerbung zu Hause gleich aufschrauben, um zu sehen, was man für sein Geld bekommen hat. (Das muss man sowieso tun, um eine Mignonzelle einzulegen, die nicht mitgeliefert wird und die für Widerstandsmessungen benötigt wird.) Die nächste Abbildung zeigt die Leiterplatte, die im Wesentlichen mit Widerständen bestückt ist. Freundlicherweise hat der Hersteller die entsprechenden Werte auf die Leiterplatte aufgedruckt. Spezialisten können die Werte aber auch an den Farbringen ablesen. Die Bauelemente wurden hier außerdem mit Namen versehen. Damit kann man den Bezug zum Schaltplan herstellen.



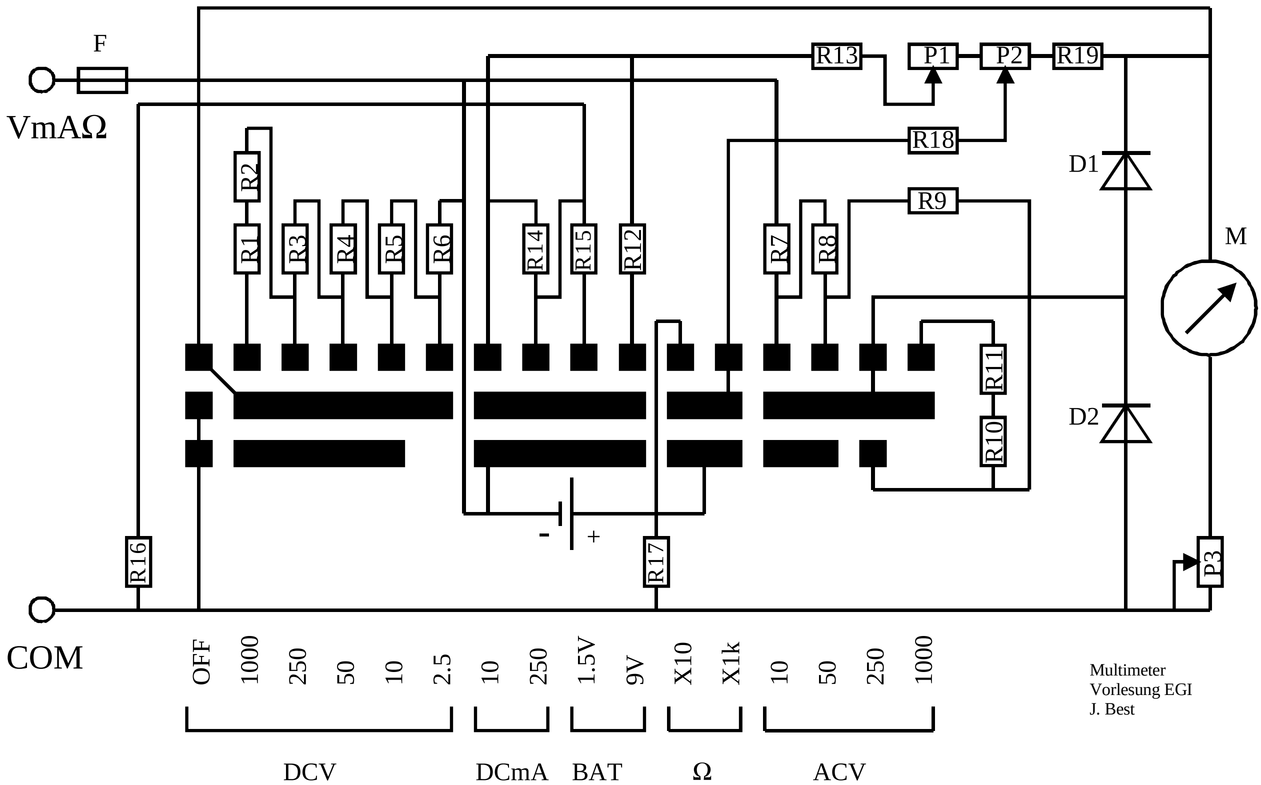
Die folgende Abbildung zeigt die Rückseite der Leiterplatte. Sie wurde aber (mit einem Photoeditor) horizontal gespiegelt, um einen besseren Vergleich zu ermöglichen. Was also z.B. bei der vorausgegangenen Abbildung „oben links“ ist, ist auch bei der Abbildung unten „oben links“. Die runden Leiterbahnen in der Mitte bilden zusammen mit einem Schleifkontakt den Wahlschalter.



Hier ist nun wieder die Bestückungsseite der Leiterplatte dargestellt; zusätzlich wurden aber die Verbindungen, die die Leiterbahnen auf der Rückseite herstellen, eingetragen. Die Ziffern 1-15 und die Buchstaben A-D kennzeichnen Verbindungen zum Wahlschalter.



Damit ist es nun mit erträglicher Mühe möglich, einen Schaltplan zu malen (ohne Garantie):



Die schwarzen Rechtecke stellen Kontakte des Wahlschalters dar. In einer von 16 Schalterstellungen sind jeweils 3 untereinander liegende Kontakte miteinander verbunden.

Damit können wir nun überprüfen, ob wir die Schaltung verstehen, bzw. ob alles richtig abgemalt wurde.

Die folgende Tabelle gibt die Werte der Widerstände an.

R1	3,75MΩ
R2	3,75MΩ
R3	2MΩ
R4	400kΩ
R5	75kΩ
R6	23,2kΩ
R7	41,3kΩ
R8	179kΩ
R9	897kΩ
R10	1,68MΩ
R11	1,68MΩ
R12	972Ω
R13	3,38kΩ
R14	84,5Ω
R15	3,04Ω
R16	3,51Ω
R17	100Ω
R18	7,26kΩ
R19	1,33kΩ
P1	2kΩ
P2	3,3kΩ
P3	500Ω

Die Widerstände haben hier übrigens nicht die gewohnten IEC-Normwerte. Damit könnte man die hier vorliegende Aufgabe nicht lösen.

Der Vollständigkeit halber ist hier noch der Farbcode für die Widerstände angegeben. Dabei geben bei der hier verwendeten Genauigkeitsklasse die ersten 3 Farbringe die Ziffernfolge an, der 4. Farbring gibt die Anzahl der anzuhängenden Nullen an, der 5. Farbring gibt die Genauigkeit an.

0	schwarz
1	braun
2	rot
3	orange
4	gelb
5	grün
6	blau
7	violett
8	grau
9	weiß