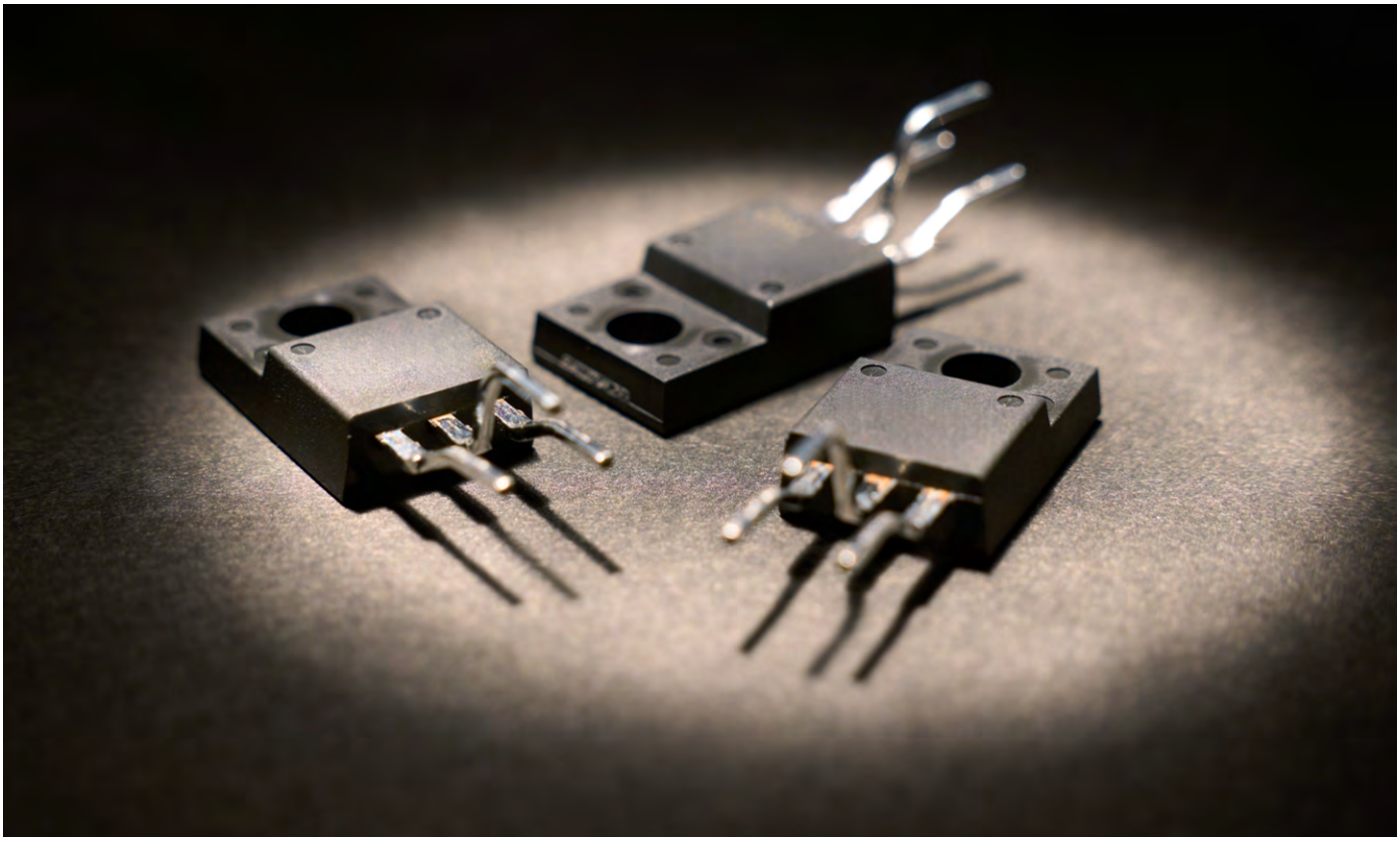
Spezielle Transistoren: FETs und MOSFETs

Projekte für Elektronikeinsteiger

Teil 13

FETs (Field-Effect Transistors) und MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors) sind wichtige Bauelemente der Elektronik, besonders im Bereich der Leistungselektronik und der digitalen Schaltungen. Sie bieten gegenüber den klassischen Transistoren viele Vorteile. Allerdings gibt es auch einige spezielle Besonderheiten, die bei der Arbeit mit FETs und MOSFETs beachtet werden müssen. In diesem Artikel sollen die Grundlagen und einige interessante Anwendungen dieser Bauelemente genauer untersucht werden.



Erforderliches Material für dieses Projekt:
- MOSFET oder MOSFET-Modul
- LED oder LED-Modul
- verschiedene Widerstände
- kleiner Gleichstrommotor (als Ventilator)

Siehe auch Kasten „Benötigtes Material“ am Ende des Beitrags.

Über den Autor
Dr. Günter Spanner ist als Autor zu den Themen Elektronik, Sensortechnik und Mikrocontroller einem weiten Fachpublikum bekannt. Schwerpunkt seiner hauptberuflichen Tätigkeit für verschiedene Großkonzerne wie Siemens und ABB ist die Projektleitung im Bereich Entwicklung und Technologie-Management. Der Dozent für Physik und Elektrotechnik hat zudem zahlreiche Fachartikel und Bücher veröffentlicht sowie Kurse und Lernpakete erstellt.

Transistoren der anderen Art: MOSFETs

Ein altes Problem in der Elektronik ist, dass es bei bipolaren Transistoren ohne Steuerleistung, und sei sie noch so gering, keine Verstärkung gibt. Ohne Basisstrom – auch wenn er oft minimal ist – kann kein Kollektorstrom fließen. Allerdings kann der Strom in Halbleitern auch ganz ohne Stromfluss gesteuert werden. Elektrische Felder erlauben sogar eine völlig leistungslose Steuerung. Die Ladung auf der einen Seite eines Isolators kann die Ladungsträger auf der anderen Seite beeinflussen. Ähnlich wie bei einem Kondensator wird der Elektronenfluss dabei durch eine Isolierschicht unterbunden. Auf dieser Grundlage wurden die Feldeffekttransistoren (FETs) entwickelt. Das bedeutet, dass der Stromfluss allein durch das elektrische Feld – also durch eine reine Spannung – gesteuert wird.

Ein FET besitzt drei Anschlüsse:

- **Source (S)** ist die „Quelle" der Ladungsträger. Dort fließen die Ladungsträger in das Bauelement.
- **Drain (D)** ist die „Senke", an der die Ladungsträger den Transistor wieder verlassen.
- Das **Gate (G)** steuert das elektrische Feld, welches den Stromfluss zwischen Source und Drain reguliert.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Typen von FETs:

- **JFET (Junction Field Effect Transistor):** Hier wird der Kanal von einem p-n-Übergang kontrolliert. Es gibt n-Kanal- und p-Kanal-JFETs.
- **MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor FET):** Dies ist eine spezielle Art eines FETs, der ein isoliertes Gate hat, das über eine dünne Oxidschicht vom Kanal getrennt ist.

Die Hauptvorteile von FETs liegen in ihrem hohen Eingangswiderstand. Das heißt nichts anderes, als dass zur Steuerung eines FETs praktisch kein Gate-Strom erforderlich ist. Dieser kann in den meisten Fällen also vollständig vernachlässigt werden.

Der MOSFET unterscheidet sich von einem allgemeinen FET dadurch, dass sein Gate durch eine Isolatorschicht aus Oxid vom Kanal getrennt ist. Es gibt wiederum zwei Haupttypen von MOSFETs: den n-Kanal-MOSFET, bei dem Strom fließt, wenn am Gate eine positive Spannung gegenüber der Source anliegt, und den p-Kanal-MOSFET, bei dem Strom fließt, wenn relativ zur Source eine negative Spannung am Gate angelegt wird. Die Funktionsweise eines MOSFETs ähnelt damit der eines Schalters, der durch eine Gate-Spannung gesteuert wird.

MOSFETs werden häufig in digitalen Schaltungen, Leistungswandlern und Verstärkern eingesetzt. Sie sind ein wesentlicher Bestandteil moderner integrierter Schaltkreise (ICs) und finden sich in Computern, mobilen Geräten und zahlreichen weiteren Anwendungen. Ihre Vorteile liegen in der hohen Schaltgeschwindigkeit, den geringen Leistungsverlusten im Vergleich zu Bipolartransistoren und der hohen Effizienz in Leistungsschaltungen. Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines MOSFETs.

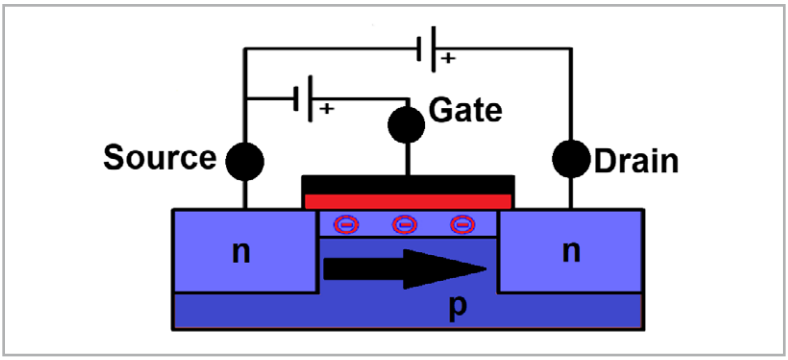


Bild 1: Prinzipieller Aufbau eines MOSFETs

Steuern mit elektrischen Feldern

Das Gate eines MOSFETs ist durch eine dünne Isolierschicht (dem „Oxide", in Bild 1 rot eingezeichnet) vom Kanal getrennt.

Wenn bei einem bestimmten MOSFET-Typ (dem sogenannten „selbstsperrenden n-Kanal MOSFET" – siehe unten) keine Spannung am Gate anliegt, ist der Kanal zwischen Source und Drain gesperrt, und es kann kein Strom fließen. Sobald jedoch eine positive Spannung an das Gate angelegt wird, entsteht ein elektrisches Feld, das die Ladungsträger – Elektronen (-) – im Kanal beeinflusst. Dieses Feld erzeugt einen leitenden Kanal zwischen Source und Drain, der es dem Strom ermöglicht, zu fließen. Die Stärke des Stromflusses wird durch die Höhe der Spannung am Gate bestimmt. Je höher die Spannung, desto stärker ist das elektrische Feld, und desto leitfähiger wird der Kanal. Dadurch kann der MOSFET als Schalter oder Verstärker verwendet werden, indem die Spannung am Gate variiert wird, um den Stromfluss zwischen Source und Drain zu steuern.

Typenvielfalt

Bei bipolaren Transistoren gibt es nur zwei Grundtypen: npn und pnp. Die Welt der MOSFETs ist etwas komplizierter. Zunächst genügt es jedoch, die vier Grundtypen zu kennen:

1. **n-Kanal-MOSFET (NMOS):**
   - Der Kanal besteht aus negativ dotiertem (n-) Halbleitermaterial
   - Stromfluss durch Elektronen
2. **p-Kanal-MOSFET (PMOS):**
   - Der Kanal ist positiv dotiert (p-Typ)
   - Stromfluss durch „Löcher" (= Defektelektronen)
3. **Anreicherungstyp (Enhancement Mode) – selbstsperrend:**
   - Leitet nur bei ausreichender Gate-Spannung
   - Standardtyp in digitalen Schaltungen wie z. B. Mikroprozessoren
4. **Verarmungstyp (Depletion Mode) – selbstleitend:**
   - Leitet ohne Gate-Spannung und wird durch eine Gegenspannung abgeschaltet
   - seltener, z. B. in speziellen Analogschaltungen zu finden

Die Schaltbilder hierzu sind in Bild 2 dargestellt. Der **n-Kanal**-Enhancement-MOSFET (**selbstsperrend**, in Bild 2 links oben) ist der mit Abstand wichtigste und am weitesten verbreitete MOSFET-Typ in der modernen Elektronik. Seine dominante Stellung verdankt er vor allem seiner zentralen Rolle in der digitalen Schaltungstechnik und Leistungselektronik.

In der digitalen Welt bildet dieser MOSFET-Typ das Rückgrat der allgegenwärtigen CMOS-Technologie (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), die in praktisch jedem modernen Mikrochip eingesetzt wird - von Prozessoren über Speicherbausteine bis hin zu Logik-ICs. Der Grund für diese Vorrangstellung liegt in den besseren elektrischen Eigenschaften des n-Kanal-Typs: Elektronen als Ladungsträger bewegen sich deutlich schneller durch den Kanal als die Löcher im p-Kanal-MOSFET. Dadurch werden höhere Schaltgeschwindigkeiten ermöglicht.

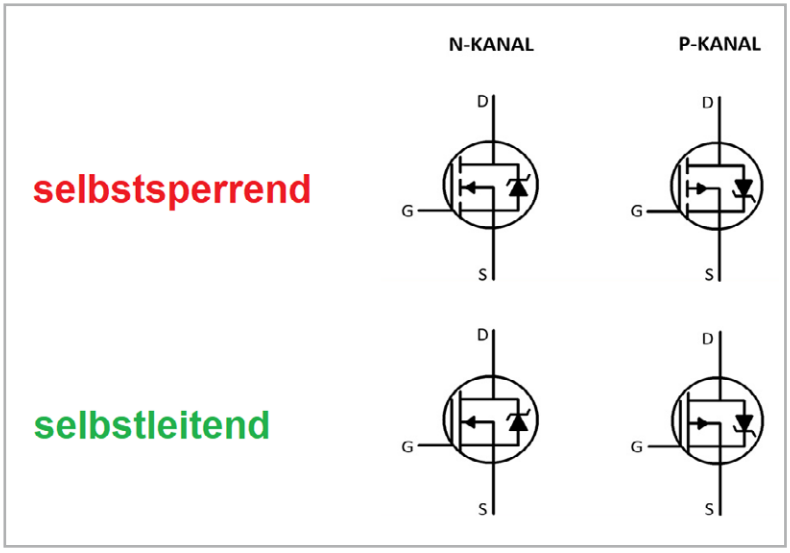


Bild 2: MOSFET-Schaltbilder

Auch in der Leistungselektronik hat sich der n-Kanal Enhancement-MOSFET durchgesetzt. Für Anwendungen wie Schaltnetzteile, Motorsteuerungen oder Spannungswandler bietet er entscheidende Vorteile: sein Einschaltwiderstand ist bei gleicher Chipfläche deutlich niedriger als bei p-Kanal-Varianten, was zu geringeren Leitungsverlusten und höherer Energieeffizienz führt. Zudem lassen sich n-Kanal-MOSFETs kostengünstiger herstellen, was sie zur ersten Wahl für Massenanwendungen macht. Daher soll der selbstsperrende n-Kanal-MOSFET im Folgenden näher betrachtet werden.

Geisterhaft: leistungsloses Steuern

Bild 3 zeigt eine „geisterhafte" Schaltung mit einem selbstsperrenden n-Kanal-MOSFET. Mit dieser einfachen Schaltung lassen sich bereits hochinteressante Effekte beobachten. Die „Antenne" kann aus einem einfachen Drahtstück bestehen. Bild 4 zeigt einen praktischen Aufbauvorschlag zu dieser Schaltung.

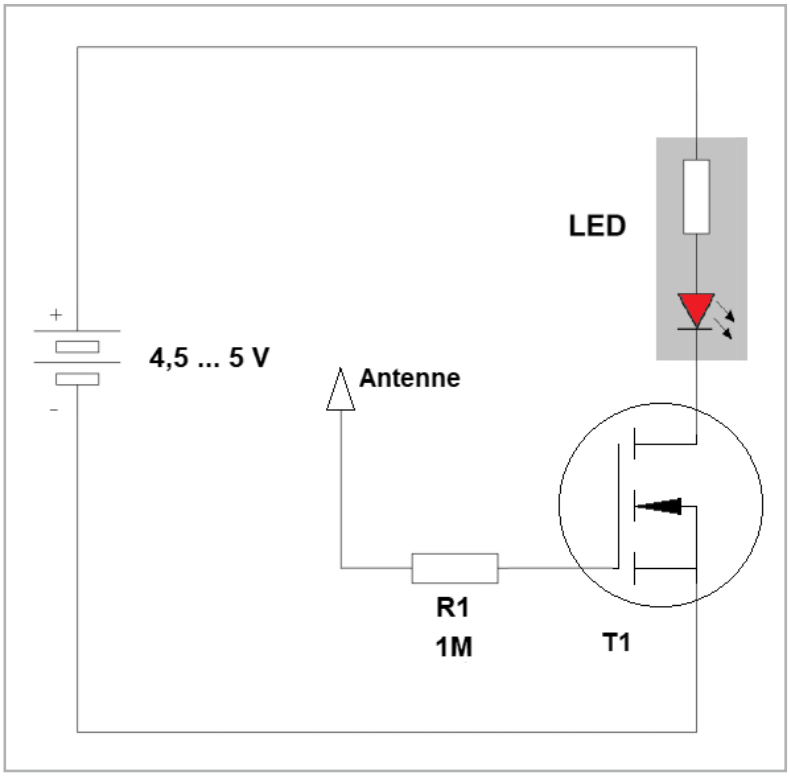


Bild 3: „Geisterhafte" MOSFET-Schaltung

Sobald man die Hand in die Nähe der Antenne bringt, leuchtet die LED auf – oder sie wird dunkler. Das exakte Verhalten ist schwer vorherzusagen. Bewegt man den Aufbau durch den Raum, verändert sich die LED-Anzeige ständig: Mal leuchtet sie, mal bleibt sie dunkel. Metallische Gegenstände, elektrische Leitungen und sogar die bloße Anwesenheit anderer Personen beeinflussen das elektrische Feld im Raum und damit die LED!

Hinweis: Da die Funktion der Schaltung auf elektrostatischen Feldern beruht, funktioniert sie bei geringer Luftfeuchtigkeit – also vor allem im Winter – am besten.

Man kann MOSFETs auch mit bloßer Reibungselektrizität steuern. Mit einfachen Materialien aus dem Haushalt wie einem Kunststofflineal und einem Wolltuch kann man den „magischen" Effekt besonders deutlich demonstrieren. Man reibe das Plastiklineal kräftig am Wolltuch (oder einem Wollpullover), um es elektrostatisch aufzuladen. Wenn man das geladene Lineal nun in die Nähe des MOSFETs bringt (ohne die Antenne zu berühren!), sieht man ein faszinierendes Phänomen - die LED beginnt ihre Helligkeit zu verändern! Die elektrostatische Ladung auf dem Lineal erzeugt ein ausreichend starkes Feld, um den MOSFET zu beeinflussen, genau wie jede andere Spannung am Gate.

Besonders beeindruckend ist, dass die Helligkeit der LED direkt von der Stärke der Aufladung abhängt. Bei kräftigem Reiben ist der Effekt stärker, bei schwächerer Aufladung nur gering. Im abgedunkelten Raum lassen sich die Auswirkungen besonders gut beobachten.

Dieser einfache Versuch demonstriert mehrere wichtige Prinzipien der MOSFET-Elektronik:

- extreme Empfindlichkeit von MOSFETs gegenüber elektrischen Feldern;
- die Möglichkeit, elektronische Schaltungen berührungslos zu steuern;
- offene Gate-Eingänge können zu unerwarteten Effekten führen. Dies gilt auch für digitale Schaltkreise. Dort können sie sogar erhebliche Fehlfunktionen verursachen.

Allerdings ist hier auch Vorsicht geboten: MOSFETs sind empfindliche Bauteile. Man sollte das geladene Lineal daher immer in einem Abstand von ca. 1–2 cm zum Transistor halten, um Schäden zu vermeiden. Der 1-MΩ-Widerstand zwischen der Antenne und dem Gate des MOSFETs dient hier als Schutzwiderstand. Vorsichtshalber sollte man aber dennoch eine direkte Berührung der Antenne verhindern.

Mit etwas Übung kann man feststellen, dass die LED durch geschickte Bewegung des Lineals sogar gedimmt werden kann - ein beeindruckender Beweis für die Macht der Elektrostatik im Alltag!

Ein LED-Dimmer mit „Touch"- Funktion

Mit einfachen Mitteln kann die Geisterschaltung zu einem zuverlässigen Sensor-Dimmer erweitert werden. Wird zusätzlich ein Speicherkondensator zwischen Gate und Source des FETs geschaltet, entsteht eine „Integrator-Schaltung", deren Ausgangsspannung sich nur langsam ändert. Mit 1 MΩ

Bild 4: Aufbauvorschlag zur „geisterhaften" MOSFET-Schaltung

und 1 µF erhält man eine Zeitkonstante im Sekundenbereich. Mit Berührungskontakten (z. B. Reißnägeln) kann eine beliebige Helligkeit der LEDs eingestellt werden. Eine Berührung mit dem Finger reicht aus, um die LED zu steuern. Werden Gate- und Plus-Kontakt (in Bild 5 oben) gemeinsam berührt, wird die LED heller. Bei gleichzeitiger Berührung von Gate- und Minuskontakt (in Bild 5 unten) wird sie dunkler. Damit hat man einen praxistauglichen Berührungssensor mit Dimmer-Funktion. Falls keine geeigneten Reißnägel zur Verfügung stehen, können auch direkt blanke Drahtstücke als Kontakte verwendet werden.

Nach dem Öffnen bzw. Loslassen der Kontakte bleibt die eingestellte Helligkeit relativ lange konstant. Allerdings verändert sich die Helligkeit im Laufe der Zeit, da sich der Kondensator durch verschiedene Effekte selbständig entlädt. In der Praxis ist diese Zeitspanne allerdings so groß, dass dieser Effekt kaum eine Rolle spielt.

Steht ein extrem hochohmiger Widerstand (z. B. 10 MΩ) zur Verfügung, kann man die Entladungen beschleunigen. Der Widerstand muss dazu parallel zum Kondensator geschaltet werden. Damit lässt sich eine automatische Berührungslampe realisieren, die durch Berührung eingeschaltet wird und nach einigen Sekunden selbstständig wieder erlischt.

MOSFETS als Kraftpakete

Das MOSFET-Modul aus dem PAD-Set ist mit 20 V/3 A beschriftet. Dies mag zunächst erstaunen, da SMD-Transistoren vergleichbarer Größe maximal 100 mA schalten können. Das Bauteil selbst ist winzig, es misst nur wenige Millimeter (s. Bild 6).

Der Schlüssel für die hohe Leistungsfähigkeit ist der sogenannte Einschaltwiderstand (RDS(on)). Bei diesem MOSFET beträgt er nur 0,045 Ω, während der Bipolartransistor (BC548) eine feste Sättigungsspannung hat. Bei 1 A verliert der MOSFET nur 0,045 W, der BC548 aber 0,7 W – er würde bereits überhitzen und wäre innerhalb von Sekundenbruchteilen defekt! Dank des minimalen Widerstands kann der hier verwendete IRLML2502 dagegen bis über 3 A schalten. MOSFETs sind damit effizienter für Anwendungen mit hohen Strömen.

Die wichtigsten Daten des IRLML2502 sind:

Typ: n-Kanal-Enhancement-Mode-MOSFET

- Maximale Drain-Source-Spannung: 20 V
- Maximale Gate-Source-Spannung: ±12 V
- Maximaler Dauerstrom: 3,4 A
- Gate-Schwellenspannung: 0,45–1,0 V
- Einschaltwiderstand: 45 mΩ = 0,045 Ω
- Einschaltzeit t_{on}: 10 ns
- Ausschaltzeit t_{off}: 24 ns
- Gehäusetemperatur: -55 °C bis +150 °C

Der IRLML2502 ist also zudem ein „Logic-Level-Gate"-Typ. Er ist schon bei VGS = 2,5 V voll durchgeschaltet und damit ideal für die Ansteuerung mit

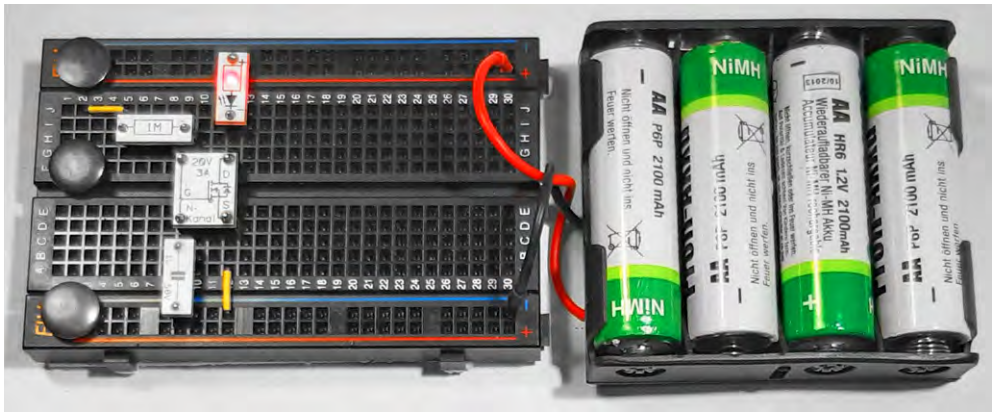


Bild 5: LED-Dimmer mit „Touch"-Funktion

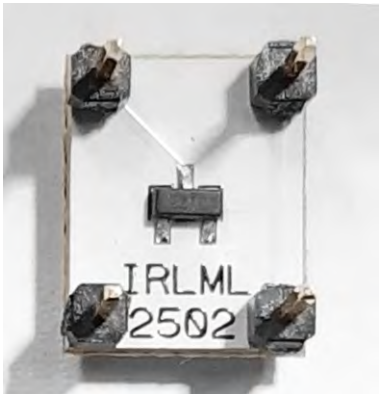


Bild 6: Der MOSFET selbst ist nur wenige Millimeter groß!

Mikrocontrollern wie Arduino, ESP 32 oder Raspberry Pi. Die niedrige Gate-Ladung ermöglicht zudem hohe Schaltfrequenzen (bis in den MHz-Bereich). Durch den ESD-Schutz (bis 2 kV) ist der MOSFET zudem relativ robust. Typische Anwendungen sind damit Lastschaltungen in 3,3 V-/5 V-Systemen, PWM-Steuerung von LEDs, Relais oder Motoren.

Praxisbeispiel Motorsteuerung

MOSFETs sind heute eine der wichtigsten Bausteine zur Steuerung von Elektromotoren, besonders im Bereich der Gleichstrommotoren („DC"-Motoren). Sie funktionieren wie elektronische Schalter oder variable Widerstände und bieten eine sehr effiziente Möglichkeit, Motoren ein- und auszuschalten oder ihre Drehzahl präzise zu steuern.

In typischen Leistungsschaltungen werden wieder n-Kanal-MOSFETs bevorzugt verwendet. Dabei wird der Motor zwischen die positive Versorgungsspannung und den Drain-Anschluss des MOSFETs geschaltet. Der Source-Anschluss wird mit Masse (GND) verbunden. Ein zusätzlicher Pull-down-Widerstand (z. B. 10 kΩ) sorgt dafür, dass das Gate im ausgeschalteten Zustand sicher auf Masse gezogen wird und der Motor nicht ungewollt anläuft.

Ein wichtiger Schutzbaustein ist die sogenannte Freilaufdiode, die antiparallel zum Motor angeschlossen wird. Da Elektromotoren beim plötzlichen Abschalten hohe Induktionsspannungen erzeugen, könnte der MOSFET ohne Diode beschädigt werden. Die Diode sorgt dafür, dass diese Spannungen sicher abgeleitet wird.

Die Motorsteuerung mit MOSFETs bietet einige Vorteile:

- Hohe Effizienz: sehr geringe Verluste im leitenden Zustand
- Einfache Ansteuerung: direkt mit Mikrocontroller möglich (besonders bei Logic-Level-MOSFETs)
- Kompakte Bauweise: kleine Bauteile, wenig externe Beschaltung nötig
- Hohe Strombelastbarkeit: Leistungs-MOSFETs können problemlos mehrere Ampere schalten

Dem stehen allerdings auch einige Nachteile gegenüber:

- Empfindlichkeit gegen statische Entladung (ESD): Vorsicht beim Handling, da das Gate leicht zerstört werden kann.
- Schutzmaßnahmen erforderlich: Ohne Freilaufdiode oder Gatewiderstand können Schäden entstehen.

Vollautomatischer Ventilator

Um die Leistungsfähigkeit eines MOSFETs in der Praxis zu demonstrieren, soll hier eine vollautomatische Ventilatorschaltung vorgestellt werden. Ein Temperatursensor steuert die Schaltung. Die Ansteuerung des Ventilators erfolgt über den MOSFET. Die Bilder 7 und 8 zeigen das Schaltbild und einen Aufbauvorschlag dazu.

Der NTC-Widerstand ändert seinen Wert mit der Temperatur. Steigt diese an, fällt sein Widerstandswert ab (siehe auch Teil 7 dieser Serie: Frostmelder und Brandwächter). Dadurch fällt auch die Spannung an der Basis von T1. Mit dem Potentiometer kann die genaue Basisspannung und damit die Schaltschwelle des automatischen Ventilators eingestellt werden. Sobald die Basisspannung den Schwellwert der Transistorschaltspannung von ca. 0,6 unterschreitet, schaltet der Transistor. Damit ändert sich auch die Spannung am Gate des MOSFETs. Wird diese größer als die Gate-Schwellenspannung von 0,45–1,0 V, wird der MOSFET leitend und der Ventilator beginnt zu laufen.

Fällt die Umgebungstemperatur unter den Schwellwert, steigt der Widerstand des NTCs, T1 wird leitend und das Gate des MOSFETs wird auf Masse geschaltet. Damit sperrt der MOSFET und der Ventilatormotor kommt zum Stehen. Der Widerstand R4 liefert eine positive Rückkopplung an die Basis von T1. Damit wird eine gewisse Hysterese erzeugt. Diese sorgt dafür, dass es am Umschaltpunkt nicht zu unerwünschten Oszillationen kommt. Bild 9 zeigt die mit einem Oszilloskop gemessenen Schaltschwellen. Die rote Linie zeigt die Eingangsspannung an der Basis von T1. Die Hysterese (oranger Bereich) ist deutlich zu erkennen. Die Schaltung sorgt also dafür, dass der Ventilator bei zu hohen Temperaturen automatisch anläuft und bei Unterschreiten der gewählten Schalttemperatur wieder abgeschaltet wird.

Temperaturgesteuerte Ventilatoren finden vielfältige Anwendungen in zahlreichen Bereichen. In der Computertechnik und Leistungselektronik sind sie unerlässlich für die Kühlung von Komponenten wie CPUs, Grafikkarten und Netzteilen. Aber auch für die allgemeine Gehäuselüftung und die Klimatisierung von Serverräumen kommen sie zum Einsatz, um Überhitzung und Leistungsverlust zu vermeiden sowie die thermische Stabilität ganzer Systeme zu gewährleisten.

Im Haushalt und in Gebäuden werden die Ventilatoren in Gewächshäusern zur Optimierung der Wachstumsbedingungen eingesetzt oder

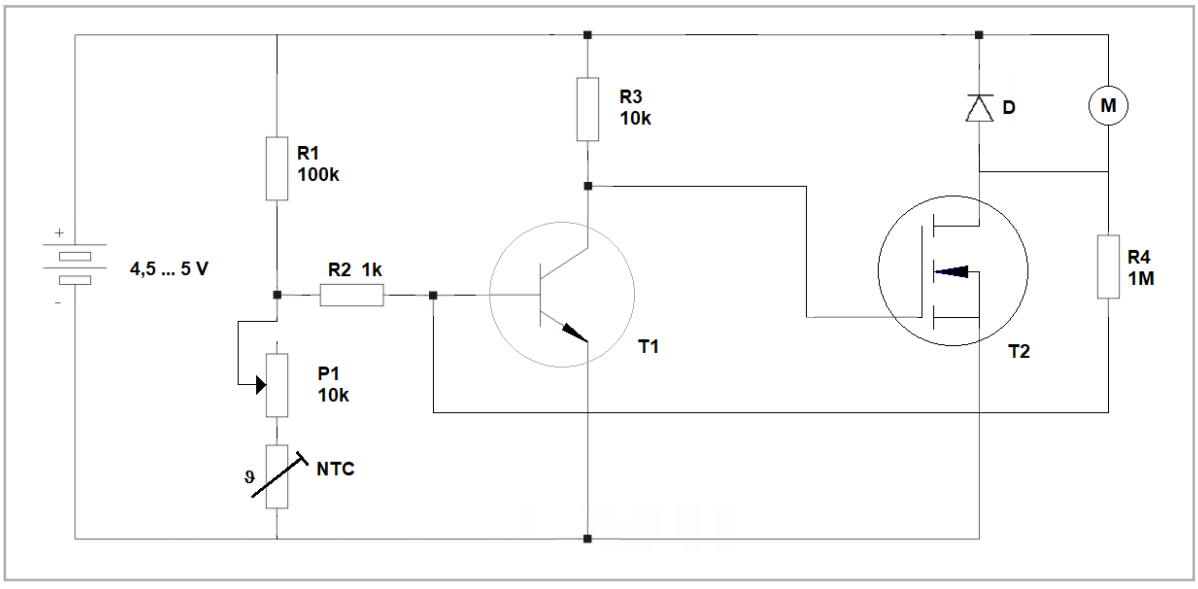


Bild 7: Schaltbild zum automatischen Ventilator

Bild 8: Aufbau zum vollautomatischen Ventilator

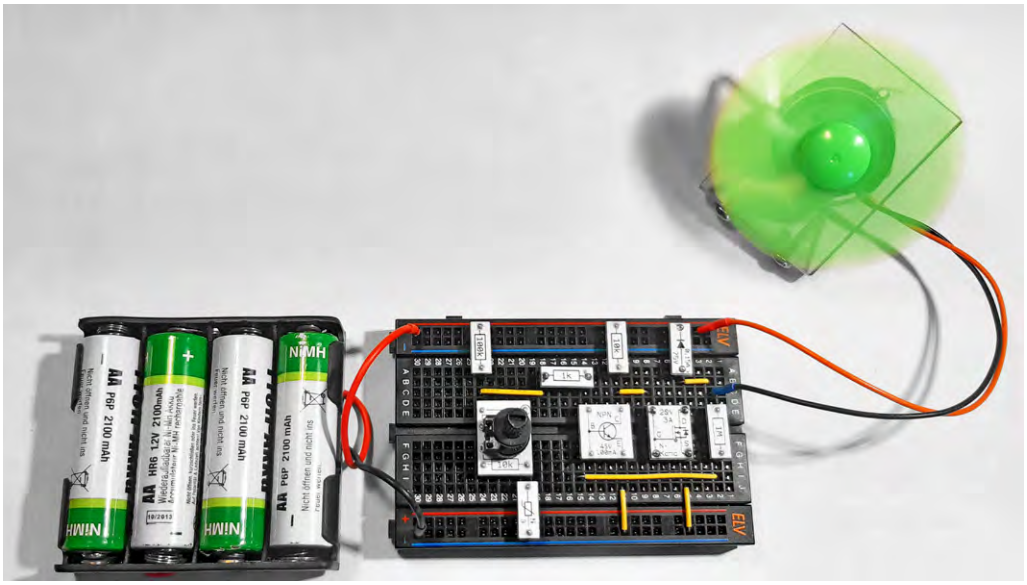
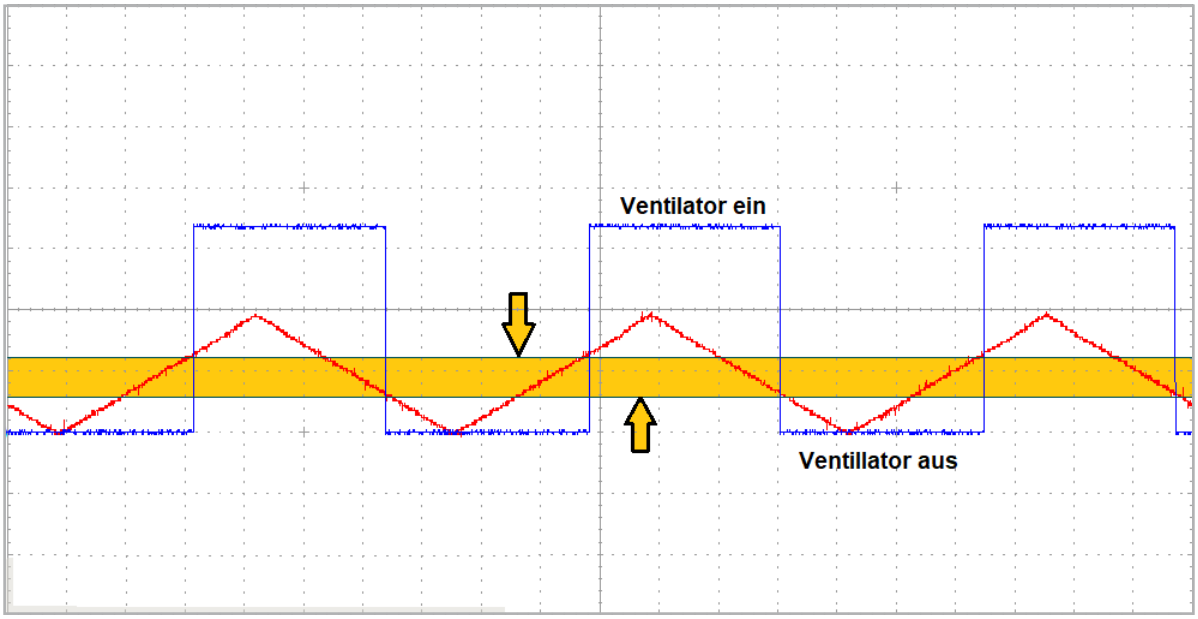


Bild 9: Schaltschwellen und Hysterese (500 ms bzw. 1 V pro Skalenteil)



als Dachbodenlüfter zur Reduzierung der sommerlichen Hitzeentwicklung. Auch in der Fahrzeugtechnik spielen sie eine wichtige Rolle bei der Motorkühlung und in einigen Fällen auch bei der Innenraumlüftung. Darüber hinaus finden sich temperaturgesteuerte Ventilatoren in Laborgeräten, medizinischen Systemen usw. Mithilfe leistungsfähiger MOSFETs lassen sich dort auch größere Motoren und Antriebe problemlos steuern und regeln.

Ausblick

Nachdem in diesem Artikel die Grundlagen und Anwendungen von MOSFETs genauer betrachtet wurden, soll es im nächsten Beitrag darum gehen, wie man Spannungen elektronisch umwandeln kann. Dabei sollen dann wieder klassische Transistoren zum Einsatz kommen, um Spannungen effizient zu erhöhen oder aber auch zu reduzieren. Insbesondere die Spannungserhöhung bietet viele interessante Anwendungen. So können damit z. B. Leuchtdioden auch noch mit nahezu leeren Batterien betrieben werden – auch ein kleiner Beitrag zur Energieeinsparung und zum Umweltschutz! ELV

Ergänzungen und Anregungen

- Kann man mit der „Geisterschaltung" auch Leitungen in Mauern und Wänden aufspüren?
- Mit einem leistungsstarken LED-Cluster kann die Dimmerschaltung auf eine leuchtstarke Sensorlampe umgerüstet werden – was ist dabei zu beachten?
- In welchen Grenzen lässt sich die Schaltschwelle der automatischen Ventilatorsteuerung ändern? Wie könnte man den Bereich erweitern bzw. einschränken?
- Welche Grenzwerte sollte man beim Betrieb der Ventilatorsteuerung beachten - Hinweis: Leistungsdaten des MOSFETs?

Benötigtes Material

PAD-PRO-EXSB	Artikel-Nr. 158980	Zum Produkt
Kleiner Ventilatormotor, SOL-Expert Solarmotor RF300	Artikel-Nr. 118161	Zum Produkt
Batteriehalter für 4x Micro	Artikel-Nr. 081527	Zum Produkt