

**Ohne Wechselrichter geht nichts an netzgebundenen Photovoltaikanlagen – ob nun am 600-Watt-Balkonkraftwerk oder auf riesigen Dachanlagen mit Dutzenden Kilowatt. Welche elektronische Magie drinsteckt, erklären wir in diesem Artikel.**

**Von Luca Zimmermann**

**O**b klein oder groß: Basis des Sonnenkraftwerks ist meist ein Wechselrichter – also ein Gerät, das die von den Solarmodulen abgegebene Gleichspannung in Wechselspannung wandelt. Doch was passiert eigentlich im Detail in dem Kasten, den mir der Solateur im Keller an die Wand oder draußen aufs Profil schraubt? Und wie arbeitet das Maximum-Power-Point-Tracking (MPPT), von dem die Datenblätter sprechen?

Wer sich mit dem Thema Wechselrichter noch nie beschäftigt hat, ist ob der vielen Bezeichnungen schnell verwirrt. Deshalb lohnt sich ein kurzer Exkurs, der die Begriffe klärt, denn es gibt verschiedene Betriebsarten: Ein autarker Wechselrichter – auch **Inselwechselrichter** genannt – erzeugt seine Wechselspannung selbst und dient dort, wo keine Netzversorgung vorhanden ist – etwa in Wohnmobilen oder entlegenen Hütten – als Spannungsquelle. Manche Modelle haben auch Laderegler, um über angeschlossene Solarmodule Akkus zu laden.

Ein **Hybridwechselrichter** ist, einfach gesagt, ein Inselwechselrichter mit Netzanschluss. Er kann die Wechselspannung nicht nur selber erzeugen, sondern auch die Netzversorgung einfach durchreichen. Wobei die Netzversorgung auch ein herkömmlicher Generator mit Verbrennungsmotor sein kann – etwa als Notfallreserve, wenn die Photovoltaikanlage defekt ist oder im Winter den Leistungsbedarf nicht stillen kann. Die Ausstattung variiert von Modell zu Modell: Viele haben Solar-MPPT-Laderegler (siehe unten) integriert und manche können überschüssigen Solarstrom auf der Netzseite einspeisen, um ihn nicht zu vergeuden.

Ein **netzsynchrone Wechselrichter** benötigt eine vorhandene Wechselspannung, um zu funktionieren – beispielsweise

# Strömchen, wechsel dich!

## Wie Solarwechselrichter arbeiten

se die des europäischen Stromnetzes. Er synchronisiert sich mit ihr und speist dann ein, sodass er sich wie ein kleines Kraftwerk ins Stromnetz integriert.

Da in den meisten Photovoltaik-Neuinstallationen heute netzsynchrone Wechselrichter verbaut und diese insbesondere bei Balkonkraftwerken weit verbreitet sind, beschränken wir uns auf diesen Wechselrichtertyp. Damit auch Einsteiger am Ball bleiben, beschreiben wir das Grundprinzip anhand der Wechselrichterbauform, die der Autor für seine Informatik-Masterarbeit verwendet hat.

Technisch gesehen führen viele Wege nach Rom beziehungsweise zum Stromfluss aus der Sonne. Der Wechselrichter in Ihrem Keller oder auf dem Dach arbeitet vermutlich nicht exakt gleich – sicher aber ähnlich.

Ein paar Grundlagen in Elektrotechnik und Photovoltaik helfen beim Verständnis; in [1, 2, 3] finden Sie einsteigerfreundliche Artikel.

## Leitstelle

Moderne netzsynchrone Wechselrichter besitzen immer eine digitale Steuereinheit. Meistens kommt dafür ein handelsüblicher Mikrocontroller zum Einsatz. Dieses Beispiel nutzt einen STM32-Mikrocontroller der Firma STMicroelectronics.

Die CPU ist ein mit 170 MHz getakteter ARM-Cortex M4 mit 512 KByte Programmspeicher sowie 128 KByte Arbeitsspeicher. Speicherausstattung und Taktrate wirken erst einmal lächerlich gering. Doch auf der CPU läuft kein vollwertiges Betriebssystem, sondern eine Firmware, die genau für den Anwendungsfall gebaut ist und keine brachliegenden Zusatzfunktionen als Ballast mitschleppen muss. Zudem besitzt sie für einige der benötigten mathematischen Funktionen Hardwarebeschleuniger. Die einzelnen Bestandteile der Schaltung werden über 50 Ein- und Ausgänge abgefragt beziehungsweise angesteuert.

Oft verschweigen die Hersteller von Wechselrichtern CPU-Details. Bei den meisten dürften je nach Funktionsumfang ähnliche Mikrocontroller, FPGAs oder Mobilprozessoren (ARM, Xtensa etc.) – auch in Kombination – zum Einsatz kommen.

## Leistungssuchende

Die Leistungssuchende – im Solarjargon meist als Maximum-Power-Point-Tracking (MPPT) bezeichnet – ist eine Kern-

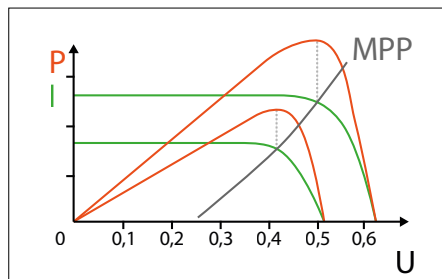
funktion jedes Photovoltaikwechselrichters. Denn um Solarmodule optimal auszunutzen, kann man nicht einfach irgendeine Last anlegen.

Einzelne Solarzellen – nicht zu verwechseln mit Solarmodulen, die aus mehreren Zellen bestehen – erzeugen bei Bestrahlung eine Gleichspannung, je nach verwendetem Halbleitermaterial zwischen 0,5 und 0,7 Volt. In Reihe in einem Modul zusammengeschaltet ergeben sich die typischen 18 bis 50 Volt – je nach Modulgröße sowie Anzahl der Zellen und deren Verschaltung.

Während die Spannung im unbelasteten Zustand nahezu immer gleich bleibt, variiert die verfügbare

Leistung mit der Temperatur, Bestrahlung und Beschattung der Zellen. Belastet man das Modul mit einem Verbraucher, sinkt die Spannung zunächst etwas und bricht dann signifikant ein. Der Leistungspunkt (Maximum Power Point, MPP) ist also dort, wo das Produkt aus Strom und Spannung die größtmögliche Leistung ergibt.

Der Maximum-Power-Point-Tracking-Algorithmus versucht, diesen Leistungspunkt für das oder die angeschlossenen Solarmodule regelmäßig neu zu ermitteln. Die einfachste Methode dafür ist, die Solarmodule bei steigender Spannung zu belasten, bis die Leistung einbricht und dann die Belastung wieder zu reduzieren (Perturb & Observe, Bergsteigeralgorithmus). Da sich der Leistungspunkt bei steigender Temperatur in der Grafik nach links und sinkenden Temperaturen nach rechts bewegt, muss der Algorithmus nicht nur



**Der Leistungssuchende findet den Arbeitspunkt, an dem Strom und Spannung eines Photovoltaikmoduls die höchste Leistung liefern (MPP). Da sich die Bedingungen aufgrund von Verschattungen, Änderungen in der Sonneneinstrahlung und Verdreckung permanent ändern, muss der Leistungssuchende das Optimum ständig neu ermitteln.**

## c't kompakt

- Damit aus der Gleichspannung von PV-Modulen eine haushaltsübliche Wechselspannung wird, braucht es Wechselrichter.
- Netzwechselrichter, wie sie auch Balkonkraftwerke nutzen, synchronisieren sich mit dem Stromnetz.
- Auch wenn die dafür nötigen Algorithmen komplex sind, kann man den Schaltungsaufbau leicht verstehen.

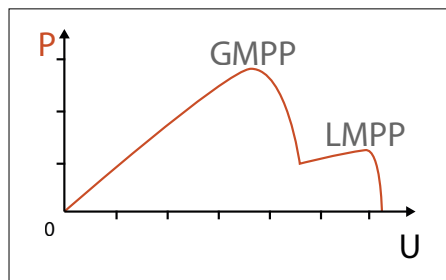
durch Erhöhen, sondern auch durch Absenken des Laststroms regelmäßig prüfen, ob der aktuelle Punkt noch dem Maximum entspricht. Dadurch oszilliert die Leistung immer leicht um den MPP. Das funktioniert problemlos bei nicht verschatteten Panels oder einzelnen Modulen.

## String- versus Mikrowechselrichter

Netzsynchrone Wechselrichter sind heute in zwei Bauformen verbreitet: Mikro- beziehungsweise Modulwechselrichter, die pro Solarmodul einen Eingang und oft sogar individuelle MPP-Tracker haben, und String-Wechselrichter, für die alle Solarmodule in Reihe geschaltet werden.

Die Leistungssuchende bei String-Wechselrichtern ist etwas komplizierter als im Beispiel zuvor: Während der Mikrowechselrichter jedes Panel oder zwei nebeneinanderliegende Panels gezielt optimieren kann, muss der String-Wechselrichter das für den ganzen Strang (engl. „String“) erledigen – also für alle Solarmodule gemeinsam. Wenn nun Wolken, Bäume, Antennen oder Schornsteine die Photovoltaikanlage teilweise verschatten, entsteht außer dem globalen Leistungsmaximum (GMPP) auch ein lokales (LMPP), an dem der MPP-Tracker hängenbleiben kann. Moderne String-Wechselrichter prüfen deshalb den gesamten Lastwiderstandsbereich nicht nur regelmäßig auf den optimalen Leistungspunkt, sondern auch dann, wenn sich die Leistungsabgabe der Anlage stark geändert hat.

Die gängige Behauptung, dass ein verschattetes Solarmodul die gesamte Anlage herunterzieht, stimmt bei aktuellen Solarmodulen nicht mehr, denn diese haben eine oder mehrere Bypass-Dioden, über die der



**Fällt Schatten auf einen Teil einer großen Photovoltaikreihenschaltung, dann können zusätzlich zum globalen Leistungsmaximum lokale Leistungsmaxima (LMPP) entstehen. Moderne String-Wechselrichter nutzen Algorithmen zur Leistungspunktsuche, die den gesamten Bereich regelmäßig „abfahren“, um das globale Maximum (GMPP) zu finden.**

Solarstrom an verschatteten und damit undurchlässigen Solarzellen vorbeifließen kann. Größere Teilverschattungen bewirken aber möglicherweise, dass die Spannung des Strings unter den Spannungspunkt fällt, ab dem der MPP-Tracker funktioniert, oder sogar so weit absinkt, dass der Wechselrichter seinen Dienst ganz einstellt. Aus diesem Grund setzten wir bei unserem Eigenbauprojekt ab Seite 22 zwei Mikrowechselrichter statt einen String-Wechselrichter ein.

Elektrisch wird die Leistungspunktsuche oft durch eine Spannungs- und Stromregelbare DC-DC-Stufe umgesetzt – also durch einen Aufwärtswandler, den der Mikrocontroller steuern kann. Die DC-DC-Stufe stellt für die nachfolgenden Stufen eine geregelte Gleichspannung zur weiteren Wandlung bereit – die Zwischenkreisspannung. Durch Verändern des Stroms in den Zwischenkreis und damit indirekt auch ins Netz, regelt sie, wie stark die Solarmodule belastet werden. Die Spannung am PV-Eingang sowie der Strom werden dabei stetig überwacht.

Im Fall unserer Wechselrichterbauweise lädt das MPPT über den regelbaren Aufwärtswandler drei Kondensatoren mit 400 Volt auf, aus denen sich der Wechselrichter bedient.

### **Gleich- werd' Wechselspannung**

Um ins Stromnetz einspeisen zu können, muss der Wechselrichter die in den Kondensatoren gespeicherte Ladung in eine Sinusspannung mit 50 Hertz wandeln. Das erledigen moderne Wechselrichter digital.

Aufs Nötigste heruntergebrochen kann man einen Wechselrichter mit vier Feldefekttransistoren als elektronische Schalter

bauen. Zwei Transistoren werden mit dem positiven Potential der Gleichspannung verbunden – im Schaltplan  $Q_1$  und  $Q_3$  – und die anderen zwei mit dem negativen Potential beziehungsweise Masse ( $Q_2$ ,  $Q_4$ ). Das erlaubt, die positive Gleichspannung auf L – also Phase – und Masse auf N zu schalten und umgekehrt. Macht man das kontinuierlich, erhält man eine Rechteck-Wechselspannung: Schaltet man  $Q_1$  und  $Q_4$  gleichzeitig ein, so wird der obere Strang positiv und der untere negativ, Vac ist in dem Fall ein Gleichstrom in Pfeilrichtung. Wenn hingegen  $Q_2$  und  $Q_3$  eingeschaltet sind, fließt der Strom genau entgegengesetzt.

Um nun eine möglichst saubere Sinusspannung zu erzeugen, verwendet der Mikrocontroller Pulsweitenmodulation (PWM) mit hoher Frequenz (140 Kilohertz). Dazu besitzt er Ausgänge, die zusätzliche Schaltkreise auf dem Chip haben, über die die hohe Schaltfrequenz ohne großes Zutun der CPU zustande kommt: die CPU konfiguriert den Ausgang, der zusätzliche Schaltkreis übernimmt den Rest. Ohne diese Unterstützung müsste die CPU sehr viel Rechenleistung für das schnelle Schalten der Ausgänge aufwenden (Software-PWM) – dann würde ein CPU-Kern mit nur 170 MHz Taktfrequenz möglicherweise nicht mehr genügen. Die PWM-Ausgänge sind mit den Steuereingängen der Transistoren (Q) verbunden.

Da auch bei elektrischer Spannung Trägheit herrscht, kann man mittels PWM beliebige Spannungen unterhalb der Eingangsspannung erzeugen. Schaltet ein PWM-Ausgang die Transistoren mit hoher Frequenz (in diesem Fall mit 140 Kilohertz) nur während der Hälfte der Zeit ein, entspricht die Ausgangsspannung der Hälfte der Eingangsspannung – man spricht dann von 50 Prozent Tastgrad.

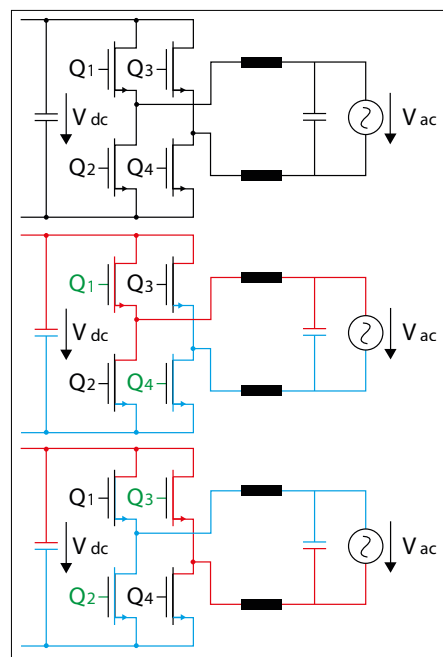
Erzeugt man nun eine linear steigende und fallende Serie an Tastgraden, entsteht eine Rechteckspannung. Weil man für das Wechselspannungsnetz jedoch einen sinusförmigen Verlauf benötigt, wird statt einer linearen Folge dementsprechend auch die Sinusfunktion für den Tastgrad zugrunde gelegt. Der Wechselrichter misst zusätzlich die Zwischenkreis- also Eingangsspannung ( $U_{DC}$ ). Sitzen Kondensatoren im Stromkreis, fließt die Energie der hochfrequenten Rechteckspannung zunächst in die Kondensatoren, sodass die Spannung hinter dem Kondensator nur langsam ansteigt. Beim Ausschalten entlädt der Kondensator ebenso langsam, was die Spannung so glättet, dass von der hohen PWM-Frequenz

nichts mehr zu sehen ist. Ein weiterer Kondensator am Wechselrichtereingang verhindert bei Belastung größere Einbrüche der Gleichspannung.

### **Synchronisation & Einspeisung**

Damit der Wechselrichter Leistung einspeisen kann, muss nicht nur die Höhe und Frequenz seiner Ausgangsspannung stimmen, auch deren Phase muss im Einklang mit der des Stromnetzes sein. Im einfachsten Fall werden dazu zwei analoge Eingänge des Mikrocontrollers über je eine Spannungsteilerschaltung – zwei Widerstände, über die die Spannung abfällt – mit Nullleiter und Phase verbunden. Der Mikrocontroller ermittelt daraus Spannung und Phasenlage des Netzes. Über eine Phasenregelschleife wird die erzeugte Wechselspannung mit der Netzspannung synchronisiert und kontinuierlich überwacht. Je nach Wechselrichter kann es einige Minuten dauern, bis er synchron ist. Im Optimalfall dauert es wenige Netzperioden.

Anschließend kann er seine Ausgangsspannung leicht erhöhen, sodass Strom ins Netz fließt. Den Ausgangsstrom steuert die Wechselrichterelektronik so, dass die abgegebene Leistung dem MPPT-Maximum entspricht.



**Je nach Ansteuerung der Transistoren wird entweder N oder L mit dem positiven respektive negativen Potential der Zwischenkreisspannung verbunden. Macht man das mit hoher Frequenz und wechselnder Einschaltdauer, kann man eine Sinusspannung modulieren.**



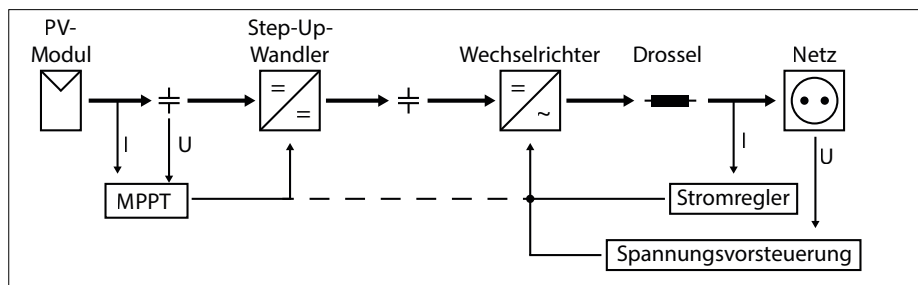
## Schutzabschaltung

Wechselrichter müssen beim Weg- oder Abfallen der Netzspannung oder Defekten im Gerät sofort abschalten. Dieser Netz- und Anlagenschutz ist nicht nur wichtig, weil der „kleine“ 5-Kilowatt-Wechselrichter mit dem Versorgen des gesamten Straßenzugs völlig überfordert wäre: Schalten Wechselrichter nicht unverzüglich ab, könnte es beim Ausstecken von Balkonkraftwerken oder Arbeiten am Leitungsnetz Verletzte oder gar Tote geben.

Der Mikrocontroller überwacht dazu ständig die Netzparameter: Spannung, Frequenz, Netzimpedanz. Befindet sich die Spannung in einem Bereich außerhalb der zulässigen Bereiche oder ist die Phasenlage des Wechselrichters nicht mehr synchron, so trennt der Controller die Verbindung zum Stromnetz über einen Trennschalter. Da auch dieser Schaden nehmen kann, etwa weil sich die Kontakte am Relais durch Stromspitzen zusammenschweißen, ist der Trennschalter mit zwei Relais redundant ausgelegt. PV-seitige Spannungseinbrüche oder Fehler in der Messelektronik muss der Wechselrichter ebenso erkennen. Sinkt die Spannung durch Verschattung so weit ab, dass der Wechselrichter nicht mehr zuverlässig einspeisen kann, so trennt er auch dafür temporär die Verbindung. Sobald wieder ausreichend Spannung anliegt, nimmt er den Betrieb wieder auf.

Spannungseinbrüche im Netz sind erkennbar, auch wenn der Wechselrichter selbst eine Spannung erzeugt. Durch die gleichzeitige Regelung und Messung des Stroms wird die Netzimpedanz mit überwacht, also etwa der Widerstand zum nächsten größeren Anschlusspunkt (Mittelspannungstrafo). Fällt die Spannung im Netz ab und der Wechselrichter würde weiterhin versuchen, 230 Volt zu generieren, sind deutlich größere Ströme notwendig, um den gesamten Netzabschnitt auf die Spannung zu heben. In der Regel ist die Spannung des Wechselrichters selbst bei maximaler Leistung höchstens wenige Volt höher als die des Netzes. Sinkt die Spannung also rapide, schaltet der Wechselrichter ab. Gleiches gilt für starke Anstiege – etwa beim Ausstecken des Balkonkraftwerks.

Eine Ausnahme bildet dabei der sogenannte Fault-Ride-Through. Tritt im Netz ein kurzzeitiger Abfall der Spannung auf, etwa durch einen Kurzschluss an anderer Stelle, so würde das sofortige Abschalten aller Erzeugungsanlagen zu einem Blackout führen. Daher gibt es Vorgaben nach DIN EN 50160, wie lange ein



**Der Netzwechselrichter als vereinfachtes Blockschaltbild vom Solarmodul links über den Wechselrichter zur Einspeisung ins Netz. Dabei werden diverse Parameter gemessen und kombiniert zur Regelung des Wechselrichters genutzt.**

bestimmter Spannungseinbruch toleriert werden muss: Die Spannung darf beispielsweise für 20 Millisekunden um 55 Prozent der Nominalspannung einbrechen oder für fast eine Sekunde um etwa 30 Prozent, ohne dass sich die Erzeugungsanlagen abschalten.

Moderne Netzwechselrichter reagieren auch auf einen Anstieg der Netzfrequenz, also auf ein netzseitiges Überangebot von Strom. Ab 50,2 Hertz bis 51,5 Hertz regeln sie ihre Leistungsabgabe linear herab, bis die Netzfrequenz sich wieder normalisiert. Alte Geräte schalten zum Teil bei 50,2 Hertz einfach ab. Heutige Geräte dürfen das nicht mehr, denn aufgrund der großen Verbreitung von Photovoltaikanlagen würde der schlagartige Wegfall der Produktionsleistung zu einem mehr oder minder starken Einbruch der Netzfrequenz führen. Die Gefahr eines Blackouts bestünde.

## Ensemble

Um die gesamte Funktionsweise besser zu verstehen, lohnt es sich, den Prozess noch einmal von der Gleich- bis zur Wechsellspannung zu betrachten. Dazu finden Sie auf dieser Seite ein Blockschaltbild: Sobald die PV-Module bestrahlt werden und eine Spannung erzeugen, kann der Aufwärtswandler den Zwischenkreiskondensator laden. Dabei wird der Ladestrom langsam erhöht, bis die Spannung und damit auch die Leistung am Solarmodul einbricht. Das so gemessene Leistungsangebot zieht der Wechselrichter für seine Stromvorgabe heran.

Für die Erzeugung der Wechsellspannung überwacht der Wechselrichter zunächst die Netzspannung und leitet daraus die Parameter wie Spitzenspannung und Phasenlage ab. Mithilfe dieser Werte generiert der Wechselrichter eine synchrone Wechsellspannung. Über den vom MPPT ermittelten Leistungspunkt bestimmt der Wechselrichter die ans Netz abzugebende

Leistung. Dann erhöht er die Spannung, sodass Strom fließt: Die Sonnenenergie kann im Netz genutzt werden.

Schutzeinrichtungen verhindern, dass der Wechselrichter bei abnormalen Netz-situationen weiter produziert beziehungsweise das Überangebot vergrößert.

## Raffinierte Technik

Moderne Schaltungs- und Regelungstechnik mit digitalen Steuerungen treiben die Energiewende an. Ohne diese Technik könnte grüner Strom heute nicht so unkompliziert und kostengünstig im eigenen Haus produziert werden. Der hier beschriebene Aufbau steht zwar nur exemplarisch für einen bestimmten einphasigen Wechselrichter und das Verfahren wird sich von Hersteller zu Hersteller in Details unterscheiden. Doch er zeigt das Grundprinzip, das für jeden Wechselrichter ähnlich ist.

Wenn Sie jetzt selbst Lust bekommen haben, grünen Strom zu produzieren, lesen Sie ab Seite 22 unsere Reportage zum Eigenbau einer Photovoltaikanlage. Wollen Sie es lieber eine Nummer kleiner angehen, beginnen Sie mit unserem Artikel zu Balkonkraftwerken [1, 2]. Wer richtig tief einsteigen möchte, kann über [ct.de/yfj9](http://ct.de/yfj9) die Masterarbeit des Autors abrufen, für die er einen Netzwechselrichter mitentwickelt und programmiert hat. (amo@ct.de) **ct**

## Literatur

- [1] Jan Mahn, Andrijan Möcker, Heimkleinkraftwerk, Mit Balkonsolaranlagen die Stromrechnung senken, c't 15/2022, S. 20
- [2] Jan Mahn, Andrijan Möcker, Sonnenwandler, Mikrowechselrichter für Balkonkraftwerke: Grundlagenwissen und Marktübersicht, c't 17/2022, S. 104
- [3] Jan Mahn, Stromschnellen, Was Sie über elektrischen Strom wissen müssen, c't 24/2022, S. 122

**Masterarbeit zu Netzwechselrichtern:**  
[ct.de/yfj9](http://ct.de/yfj9)