

Grad an. Dabei entspricht jede Einheit  $0,25^\circ$  Drehwinkel der Kurbelwelle. Da aber je Zylinder nur ein winkelorientierter Bezugspunkt, nämlich der obere Totpunkt, zur Verfügung steht, muß zum Koordinieren der Zündung anstelle von Winkeln mit Zeitwerten gearbeitet werden. Um den Frühzündungswinkel in eine Zeit umzurechnen, ist die Zeitdauer für eine ganze Umdrehung mit dem Frühzündungswinkel (als Bruchteil von  $180^\circ$ ) zu multiplizieren. Da natürlich dieser Zeitwert jeweils vor der Zündung vorliegen muß, wird die Frühzündungszeit von der Periodendauer subtrahiert, so daß der Zündzeitpunkt als Verzögerung seit dem letzten Passieren des oberen Totpunkts dargestellt wird.

Als nächstes ist zu berechnen, wann die Zündspule zum Erzeugen des nächsten Funkens einzuschalten ist. Dafür nimmt man Widerstand und Induktivität der Spule (und weitere Widerstände und Spannungsabfälle in der Schaltung) zunächst als konstant an. Auf diese Weise wird die Einschaltzeit, die zum Erzeugen eines bestimmten Spulenstroms nötig ist, zu einer stetigen, jedoch nichtlinearen Funktion der Batteriespannung. Auch dies gilt jedoch nur solange, wie die Spannung ausreichend hoch ist, um den Strom bei den gegebenen Schaltungswiderständen überhaupt zu erzeugen. Eine bequeme Methode zum Bestimmen der Einschaltzeit ist, sie aus einer zweidimensionalen Tabelle zu entnehmen, für die die Batteriespannung als Zugriffsparmeter verwendet wird. Der in der Tabelle enthaltene Wert stellt eine Zeit dar, die direkt von der Zeit subtrahiert werden kann, die zwischen dem Passieren der Referenzmarke und dem Einschalten der Zündspule verstreicht. Man erhält so die Zeit zwischen dem Passieren der Referenz und dem Einschalten der Zündspule.

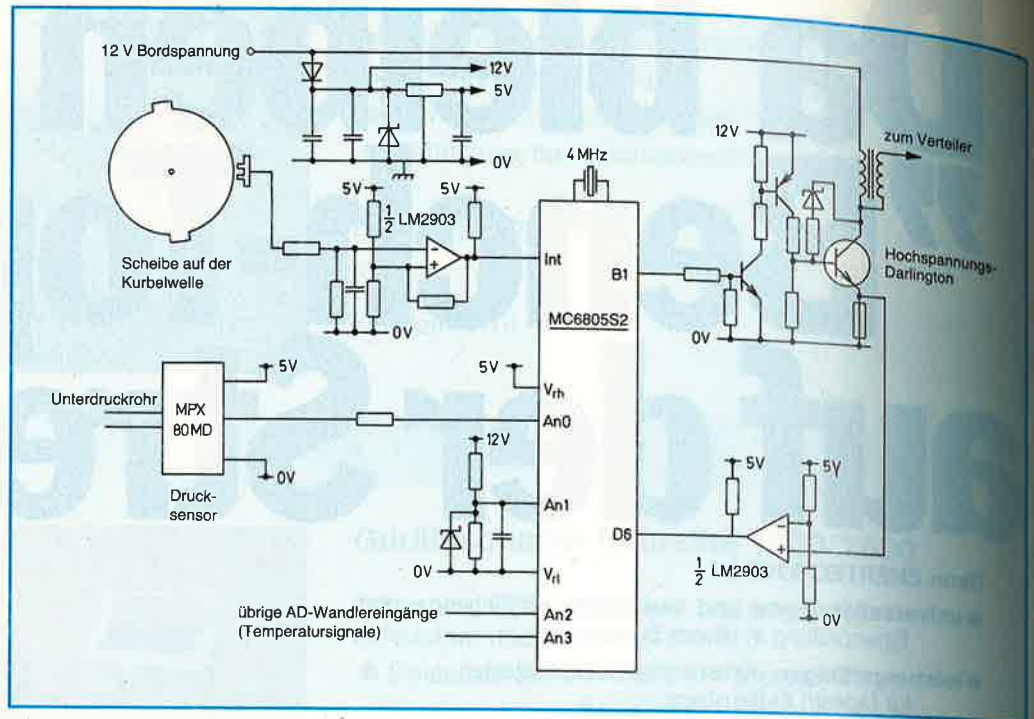


Bild 2: Schaltbild des Zündsystems

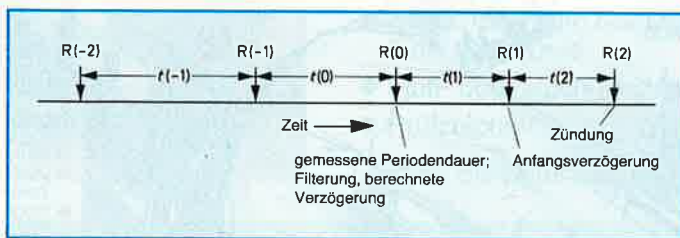


Bild 3: Das Beschleunigungsproblem

In der Praxis jedoch werden Fertigungstoleranzen, Temperatureinflüsse usw. zu unterschiedlichen Widerständen und Induktivitäten der Zündspule führen. Deshalb wird der Spulenstrom im vorliegenden System direkt erfaßt und zum Berechnen der Einschaltzeit herangezogen, so daß zum Zündzeitpunkt exakt der erforderliche Strom fließt.

### Erzeugen des Zündfunkens

Nunmehr sind also die Zeit vom Passieren der Referenzmarke bis zum Einschalten der Zündspule sowie die Ein-

schaltzeit selbst bekannt. Beim Passieren des Referenzpunktes muß demnach der Timer für die Zündspule gestartet werden. Da der 16-bit-Zeitgeber für das Erfassen der Periodendauer vorbehalten ist, muß hier auf den 8-bit-Timer zurückgegriffen werden. Da die Genauigkeit von  $8 \mu\text{s}$  unbedingt erforderlich ist, ergibt sich ein Problem: bei der gegebenen Genauigkeit beläuft sich die max. Zeitverzögerung auf  $256 \times 8 = 4,096 \text{ ms}$ . Dies ist bei hohen Drehzahlen völlig unkritisch; bei geringer Tourenzahl jedoch wird ein Vielfaches dieses Wertes erforderlich sein.

```

LOOP      LDA      DELAY      ; Lesen des Verzögerungswertes
          DECA     BPL        ; in 8µs-Schritten
          BPL     LOOP       ; Dekrementieren
          JNE     LOOP       ; falls kein Unterlauf, GOTO LOOP
    
```

Die Lösung liegt in einem variablen Verteiler-Verhältnis, wobei der Verlust an Genauigkeit durch eine kleine Software-Verzögerungsschleife ausgeglichen wird, die unmittelbar vor dem Anlaufen des Timers eingefügt wird. Hier eine passende Verzögerungs-Routine (siehe untenstehendes Bild).

Die Sequenz DECA, BPL dauert unabhängig von der gewählten Verzögerung exakt  $8 \mu\text{s}$ , so daß die Schleife sich hervorragend zum Genauigkeitsausgleich bei langen Verzögerungszeiten eignet, die in  $8\text{-}\mu\text{s}$ -Schritten berechnet wurden. Nachdem diese Füllzeit verstrichen ist, wird Timer A gestartet. Die Spule wird eingeschaltet, wenn dieser Zeiger Null erreicht. Die Interruptroutine muß vorher sichergestellt haben, daß die Spule abgeschaltet ist; ebenso daß die Umschaltfunktion von Timer A an Port B1 freigegeben ist, da von hier die Spule angesteuert wird.

Erreicht Timer A Null, so wird das Spulentreiber-Port (Port B1) automatisch eingeschaltet. Die Timer-Interruptroutine muß lediglich den

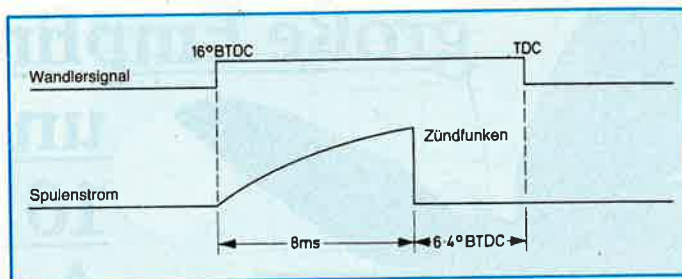


wendet werden. Der Funke wird demnach nahezu zwei Perioden nach  $R(0)$  erzeugt, was einer kompletten Motorumdrehung entspricht. Es ist augenfällig, daß der auf der Basis der Periode zwischen  $R(-1)$  und  $R(0)$  berechnete Funke zu spät erzeugt werden wird, wenn die Motordrehzahl gerade stark ansteigt. Bei hohen Motordrehzahlen ist dies unkritisch, weil die Interrupts in sehr schneller Folge vorliegen, so daß die Änderungen der Periodendauer nicht sehr ins Gewicht fallen. Im Bereich der Leerlaufdrehzahl dagegen wird die Drehzahländerung entscheidende Auswirkungen haben.

Abhilfe schafft ein Differentialfilter zweiter Ordnung, mit dem die folgende Periode auf der Basis der gegenwärtigen und der vorhergehenden Periodendauer quasi vorhergesagt wird. Die allgemeine Form dieses Filters lautet:

$$T(1) = t(0) + A t(-1) - t(0) + B t(-2) - t(-1)$$

wobei es sich bei A und B um Konstanten, bei  $t(n)$  um gemessene Periodendauern handelt.  $T(1)$  ist der für  $t(1)$  vorhergesagte Wert. Als geeignete Werte für die Koeffizienten A und B haben sich im vorliegenden System  $+7/8$  und  $-1/8$  herausgestellt, um Drehzahländerungen vom  $6000 \text{ min}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  ab einer Anfangsdrehzahl von  $850 \text{ min}^{-1}$  zu folgen. Da zur Berechnung der Frühzündung zwei Perioden nötig sind, werden die ersten ein oder zwei Funken notwendigerweise zu spät erzeugt. Danach tritt eine ausreichende Kompensation ein. Die Filterkoeffizienten erfordern keine direkte Multiplikation, sondern sind durch Verschieben und Addieren relativ unproblematisch zu berechnen. Damit die vorhergesagten Werte nicht zu stark schwanken, erfolgt keine Rundung. Der vorliegende Filter wird zweimal hintereinander eingesetzt, wobei beim zweiten Mal  $T(1)$  anstelle von  $t(0)$  eingesetzt wird, sowie  $t(0)$  an-



**Bild 4: Ablauf beim Anlassen ( $200 \text{ min}^{-1}$ )**

stelle von  $t(-1)$  usw., um schließlich mit  $T(2)$  die (hoffentlich) korrekte Periodendauer zu erhalten. Der zweite Durchlauf wird bei Drehzahlen über  $300 \text{ min}^{-1}$  gesperrt, wenn die Unterschiede der Periodendauer vernachlässigbar gering werden.

## Anlassen bringt Probleme

Das hier eingesetzte Verfahren, die Zündzeitpunkte auf der Basis früherer Werte zu berechnen, die fast eine halbe Kurbelwellenumdrehung zurückliegen, hat einen entscheidenden Nachteil. Dieser besteht darin, daß die Drehzahl des Motors von Zyklus zu Zyklus starken Schwankungen unterliegt, wenn die Drehzahl als solche z.B. während des Anlassens sehr gering ist. Es ist so gut wie sinnlos, einen Zündzeitpunkt aufgrund vorangegangener Perioden zu berechnen, weil die Periodendauern sich ständig beträchtlich ändern. Ein Lösungsweg wäre die Verlegung des Referenzpunkts an eine Stelle, die dem statischen Zündzeitpunkt konventioneller Zündsysteme entspricht. Die Spule müßte dann so rechtzeitig vor der nächsten Referenzmarke eingeschaltet werden. Referenzmarke und Zündzeitpunkt würden nämlich zusammenfallen, so daß an der Referenzmarke ausreichend Strom durch die Spule fließen muß, um einen Zündfunken zu erzeugen. Dieses Verfahren weist jedoch zwei Nachteile auf. Einerseits sind externe Komponenten zur Strombegrenzung nötig, was den Bestrebungen zur Beschränkung des Hardware-

Aufwands zuwiderläuft. Andererseits würde der Interruptablauf gestört, wenn im normalen Betrieb der Interrupt zum Ausschalten der Spule gleichzeitig mit dem Referenz-Interrupt erscheint. (Wenn also ein aus der Tabelle bestimmter Zündzeitpunkt mit dem statischen Zündzeitpunkt zusammenfällt.)

Die gewählte Lösung ist ein Kompromiß. Man beläßt dabei den Referenzpunkt am oberen Totpunkt, der nie mit dem Zündzeitpunkt zusammenfällt. Zum Bestimmen des Zündzeitpunkts von diesem Punkt aus wird deshalb die Referenzmarke so ausgeführt, daß  $16^\circ$  vor dem oberen Totpunkt die steigende Taktflanke erscheint, wie das in Bild 4 dargestellt ist (die fallende Taktflanke tritt dann am oberen Totpunkt auf). Wird die Spule an der steigenden Taktflanke ein-, und je nach der verwendeten Spule beispielsweise 8 ms später ausgeschaltet, so erfolgt die Zündung bei einer Drehzahl von  $200 \text{ min}^{-1}$   $6...7^\circ$  vor dem oberen Totpunkt. Die Frühzündung vergrößert sich mit abnehmender Drehzahl und nimmt mit steigender Drehzahl ab. Dieses Verfahren hat den Vorteil, daß keine externe Strombegrenzung erforderlich ist. Anstelle eines Reluktanzsensors ist jedoch ein Halleffekt- oder Optosensor erforderlich. Nachteilig wirkt sich zudem aus, daß die Frühzündung für den Anlaufvorgang nicht konstant ist, sondern sich mit der Drehzahl ändert. (Bei einigen Motortypen kann dies problematisch werden, da der Motor bei zu großer Frühzündung

möglicherweise versucht, rückwärts zu laufen.) Nachdem der Motor angesprungen ist und eine bestimmte Drehzahlsschwelle überschritten hat, wird in die normale Betriebsart übergegangen, in der lediglich die fallende Taktflanke als Referenz eingesetzt wird.

## Die Leistung des Systems

Der Prototyp des beschriebenen Systems wurde in einem Volvo mit 2,1-Liter-Motor und Benzineinspritzung eingebaut. Das Zünd-Kennfeld stellt eine exakte Kopie des in der normalen Version verwendeten Kennfeldes dar. Es ist auch kein Leistungsunterschied zwischen beiden Ausführungen wahrnehmbar. Beim Einsatz im Fahrzeug haben sich die Toleranzen des Frühzündungswinkels als etwas größer herausgestellt als auf dem Prüfstand ermittelt. Der Grund ist, daß die beiden Referenzmarken nicht exakt  $180^\circ$  voneinander entfernt sind. Weicht die Position eines der beiden Zähne nur um  $0,1^\circ$  vom Sollwert ab, so macht das bei der Messung der Periodendauer (bei  $1000 \text{ min}^{-1}$ ) eine Abweichung von vier Zählheiten aus, die zwischen zwei Messungen auftreten kann. Der Kumulierungseffekt beim zweimaligen Durchlauf des Differentialfilters führt bei dieser Drehzahl zu einer Ungenauigkeit von  $\pm 5^\circ$ . Besonders problematisch wirkt sich dies bei Leerlaufdrehzahl aus, wenn der Motor nicht unbedingt mit konstanter Tourenzahl läuft. Abweichungen des Verdichtungsverhältnisses und lokale Änderungen des Gemisches erzeugen zyklusweise Änderungen, die unter gewissen Umständen von den Filtern verstärkt werden können. Möglicherweise schafft ein besonderer Leerlaufschalter hier Abhilfe, der die Filter bei geschlossener Drosselklappe sperrt.

Kennziffer:

402