

# TwinCAT-Echtzeiterweiterung für Windows

PC-based Control ist die Kombination aus allgemein verfügbarer Technologie der IT-Welt mit spezialisierten Funktionen für die Automatisierungstechnik. So kann die Automatisierungstechnik an der rasanten Entwicklung in Hard- und Software der IT-Welt teilhaben und gleichzeitig die vorhandene Rechenleistung für automatisierungstechnische Aufgaben nutzen. Dazu wird ein Standardbetriebssystem und Standard-PC-Hardware genutzt. De-facto-Standard bei Betriebssystemen im Office-Bereich ist Microsoft Windows, das mit einer leistungsfähigen Echtzeiterweiterung und TwinCAT für die Automatisierungstechnik ertüchtigt wurde.



Ramon Barth,  
Leiter Software-Entwicklung,  
System, HMI und Echtzeit

Mit Windows steht eine weitreichende Software-Unterstützung von am Markt verfügbaren Hardware-Komponenten zur Verfügung. Eine wesentliche Voraussetzung für automatisierungstechnische Anwendungen ist allerdings die Abarbeitung von programmierten Funktionen in Echtzeit. Windows ist von Haus aus „by Design“ nicht echtzeitfähig, d. h. ein langer Druck-Job beispielsweise kann dazu führen, dass andere Funktionen deutlich verspätet ( $\Delta t > 500 \text{ ms}$ ) ausgeführt werden. 500 ms Latenzzeit werden u. U. auf einem Büro-PC nicht einmal bemerkt, bedeuten aber für ein Steuerungssystem meist einen katastrophalen Fehler.

Aufgrund der allgemeinen Verfügbarkeit, Verbreitung und Stabilität hat Beckhoff im Jahr 1996 das Betriebssystem Microsoft Windows NT (damals NT 4.0) als Betriebssystem für seine PC-basierte Steuerungstechnik ausgewählt. Mit der langjährigen Erfahrung der Echtzeitlösung unter MS-DOS wurde eine Echtzeiterweiterung für Windows entwickelt. Ziel war die Erweiterung eines allgemein verfügbaren weit verbreiteten Betriebssystems mit für die Automatisierungstechnik nutzbaren Echtzeitfunktionen. Von der Idee her sollten die Echtzeitfunktionen – wie z. B. eine SPS – für das Betriebssystem wie ein Druckertreiber aussehen. Dieser Ansatz wurde und wird bis heute über alle Windows-Versionen einschließlich Windows 10 weiterentwickelt. Aktuell werden Beta-Versionen von Windows 11 mit TwinCAT im Entwicklungslabor und bei ersten Kunden getestet.

## Am Anfang war der Timer Interrupt

Basis der PC-Steuerungstechnik von Beckhoff ist der zentrale Timer Interrupt, von dem alle zeitgesteuerten Funktionen abgeleitet werden. Hauptfunktion des Timer Interrupts ist die zyklische Aktivierung des TwinCAT-Echtzeit-Schedulers, dessen Tasks die benötigten Echtzeitfunktionen des Automatisierungssystems ausführen.

Der zentrale Zeitgeber für Windows NT auf einem PC von 1996 war der PC Timer 0 des Timerbausteins Intel 8254. Für den „Proof of Concept“ wurde

der Interrupt des PC Timer 0 so genutzt, dass eine einwandfreie Funktion des Windows-NT-Systems jederzeit gegeben war. Die Implementierung wurde mithilfe von Microsoft-Mitarbeitern in einem Pariser Microsoft-Labor validiert. Echtzeitmessungen mit einem externen Hardware-Oszilloskop zeigten ein deterministisches Auftreten des Timer Interrupts mit geringem Jitter in den programmierten Intervallen.

Grundlage für die deterministische Abarbeitung des höchstpriorisierten Interrupts im Windows-NT-System ist die allgemeine Interrupt-Behandlung des NT-Kernels. Das Windows-NT-Interrupt-Konzept sieht vor, dass Interrupt-Service-Routinen (ISR) Hardware-Interrupts nur sehr kurz verarbeiten, quittieren und längere Verarbeitungsprozesse in die niederpriorisierte Ebene der „Deferred Procedure Calls“ (DPC) verschieben. Somit ist gewährleistet, dass Interrupt-Service-Routinen sich gegenseitig nicht bzw. nur sehr kurz blockieren.

## Umschaltung von Windows- und Echtzeitkontext

Eine patentierte Eigenschaft der TwinCAT-Echtzeitlösung ist der – intern sogenannte – Doppeltick. Damit werden pro Echtzeitintervall zwei Interrupts ausgelöst. Ein Interrupt dient zum Umschalten vom Windows-Kontext in den Echtzeitkontext mit nachfolgender Ausführung des Echtzeit-Schedulers. Der zweite Interrupt schaltet nach einer programmierbaren Zeit wieder zurück in den Windows-Kontext. Dieser Vorgang wird im programmierten Intervall der Basiszeit wiederholt. Auf diese Art entstehen zwei unterliegende Zeitscheiben, die jeweils von Windows-Funktionen und TwinCAT-Echtzeitfunktionen genutzt werden. Im konkreten Beispiel heißt dies für eine Basiszeit von 1 ms mit einer 80/20-Aufteilung, dass für TwinCAT-Echtzeitanwendungen in jeder Millisekunde 800  $\mu\text{s}$  zur Verfügung stehen und für Windows-Aktivitäten 200  $\mu\text{s}$  übrig bleiben. Die Basiszeit und die Aufteilung zwischen Windows und TwinCAT ist konfigurierbar. Der genannte PC Timer 0 eignet sich für diese Betriebsart hervorragend, da die Intervallzeit einen Zyklus im Voraus programmiert werden

### CPU-Zeit-Verteilung bei Shared Cores und Isolated Cores



kann und die Übernahme des neuen Zeitwerts versatzlos erfolgt. Mit dem Doppeltick lässt sich die Rechenzeit auf einem einzelnen Prozessorkern (Core) derart aufteilen, dass für Windows notwendige Timing-Funktionen erhalten bleiben und Windows nicht durch eine zu hohe Echtzeitlast „abgewürgt“ werden kann. So funktioniert z. B. eine Kommunikation von Windows über die serielle Schnittstelle auch mit höheren Baud-Raten einwandfrei, was ohne den Doppeltick nicht möglich wäre.

Am Beispiel des PC Timer 0 zeigt sich die optimale Ausnutzung der PC-System-Betriebsmittel durch TwinCAT. Aber die PC-Architektur hat sich im Laufe der Jahre sehr schnell weiterentwickelt. PC Timer 0 steht auf modernen PCs ohne „legacy support“ schon gar nicht mehr zur Verfügung. Mit Einführung von Dual- bzw. Multicore-Systemen wurde z. B. die Nutzung der Timer des i8254 in TwinCAT durch die Timer des LAPIC (Local Advanced Programmable Interrupt Controller) auf einem Core ersetzt. Wesentlichen Anteil an der CPU-Rechenleistung hat die Cache-Architektur und deren optimale Nutzung. Hierzu konnte TwinCAT in Zusammenarbeit mit CPU-Herstellern im Laufe der Jahre angepasst und stetig optimiert werden.

#### Der TwinCAT Scheduler

Für die Aufteilung der Rechenzeit im Echtzeitkontext nutzt TwinCAT einen Scheduler, der heute bis zu 65.535 Tasks verwalten kann. Die erste Version der Schedulers von 1996 unterstützte 64 Tasks, die im Wesentlichen für SPS und NC genutzt wurden. Mit Einführung der Multicore-Technologie entstand zudem die Anforderung an den Scheduler, Echtzeittasks effizient auf die für TwinCAT konfigurierten Cores zu verteilen. Dies ließ das Scheduling deutlich komplexer werden. Insbesondere die Skalierbarkeit über eine größere Anzahl von Cores (> 16) stellte eine Herausforderung dar. Aktuell unterstützt der TwinCAT Echtzeit-Scheduler bis zu 256 Cores, was im Automatisierungssektor ein Alleinstellungsmerkmal darstellt. Ohne Multi-/Manycore-Unterstützung

wären rechenzeitintensive Anwendungen wie z. B. XTS, XPlanar oder Echtzeit-Bildverarbeitung nicht möglich. Die Multicore-Unterstützung von TwinCAT bietet zwei unterschiedliche Betriebsarten:

- Shared Cores: TwinCAT teilt sich wie beschrieben einen Core und ungenutzte Rechenzeit des TwinCAT-Kontextes wird dem Windows-Kontext zugewiesen.
- Isolated Cores: In diesem Fall wird über die Windows-Konfiguration die Anzahl der für Windows zur Verfügung stehenden Cores begrenzt. Die verbleibenden Cores werden von TwinCAT erkannt und können per TwinCAT-Konfiguration aktiviert werden. Diese Betriebsart kann den Determinismus des Timer Interrupts noch einmal verbessern und reserviert 100 % der Rechenkapazität des Cores für TwinCAT-Echtzeit-Tasks.

#### Fazit und Ausblick

Der TwinCAT-Echtzeitkern hat sich in den letzten 25 Jahren von einem Timer Interrupt mit angeschlossenem Scheduler zu einem Echtzeitsystem entwickelt, das modernste 64-Bit-CPU-Architekturen optimal – im Sinne der Automatisierungstechnik – unterstützt. Standardisierte APIs wie OpenMP werden ebenso wie das Debugging mit Visual Studio® ermöglicht. Mithilfe des TwinCAT Real-time Monitors (TE1010) lässt sich das Zeitverhalten von Tasks, Semaphoren und anderen Betriebsmitteln des Echtzeitsystems mikrosekundengenau aufzeichnen und darstellen. Aktuell hat Beckhoff begonnen, TwinCAT/BSD (Kombination von FreeBSD und TwinCAT-Echtzeitkern) sowie TC/RTOS (Kombination aus FreeRTOS und TwinCAT-Echtzeitkern) auszuliefern. In Zukunft könnten auch andere Kombinationen folgen – auf jeden Fall wird es noch zahlreiche weitere Implementierungen von TwinCAT auf neuer Hardware geben.

weitere Infos unter:

[www.beckhoff.com/te1010](http://www.beckhoff.com/te1010)