

Untersuchung zum System on Chip (SoC) Ansatz für digitale Wechselrichter



Verfasser: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Frenzel
Elektrische Maschinen und Antriebe
Fakultät Maschinenbau/Umwelttechnik
Ostbayerische Technische Hochschule Amberg
Kaiser-Wilhelm-Ring 23
92224 Amberg
b.frenzel@oth-aw.de

Datum: 17. März 2018

Inhalt

1	ABSTRACT.....	2
2	EINFÜHRUNG	3
3	ZIEL DER UNTERSUCHUNG.....	4
4	HARDWARE.....	5
5	SOFTWARE.....	8
6	ERGEBNIS	9
7	ABKÜRZUNGEN.....	10
8	LITERATUR	10

1 Abstract

Zum Betrieb elektrischer Motoren und Generatoren neuerer Bauart sowie zur Ankopplung von Solarmodulen an die elektrischen Energieversorgungsnetze in Drehstromtechnik werden in großer Stückzahl digitale Wechselrichter benötigt, die Gleichspannung in Wechselspannung umwandeln.

Besonderes Augenmerk liegt dabei auf Verwendung von Prozessorarchitekturen, die nicht an einen speziellen Hersteller gebunden sind. Dies ermöglicht einen vergleichsweise schnellen und damit preisgünstigeren Wechsel zu einem anderen Hersteller, wenn Prozessoren abgekündigt werden. Eine solche Prozessorarchitektur bietet die Firma ARM (Advanced RISC Machines Ltd.) mit dem Cortex-M Kern speziell für den Verbau in eingebettete Systeme an, der weltweit inzwischen eine außerordentliche Verbreitung gefunden hat.

Die vorliegende Untersuchung überprüft daher Prozessoren mit ARM Cortex-M Architektur hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit als System on Chip (SoC) zur Verwendung in digitalen Wechselrichtern. Dabei entfallen die sonst üblichen ASICs oder programmierbaren Logikbausteine sowie AD Wandler und werden durch interne Komponenten eines Mikrocontrollers ersetzt. Benötigt wird also ein preisgünstiger Cortex-M Prozessor, der neben ausreichender Rechenleistung hochwertige Peripherie auf einem Chip realisiert. Dadurch verringern sich die Kosten und durch die sinkende Bauteilezahl erhöht sich die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems.

Nach einer Gegenüberstellung in Bezug auf Preis und Ausstattung verschiedener Prozessortypen fiel die Wahl auf eine Variante des STM32H7 der Firma ST Microelectronics. Zur Verifikation wurde eine Prozessorplatine zur Abarbeitung der Wechselrichtersoftware entwickelt und ein Modellwechselrichter in Betrieb genommen. Als Ergebnis zeigt sich, dass dieser Prozessortyp der ARM Cortex-M Architektur voll umfänglich geeignet, um damit als SoC leistungsstarke und preisgünstige Wechselrichter aufzubauen.

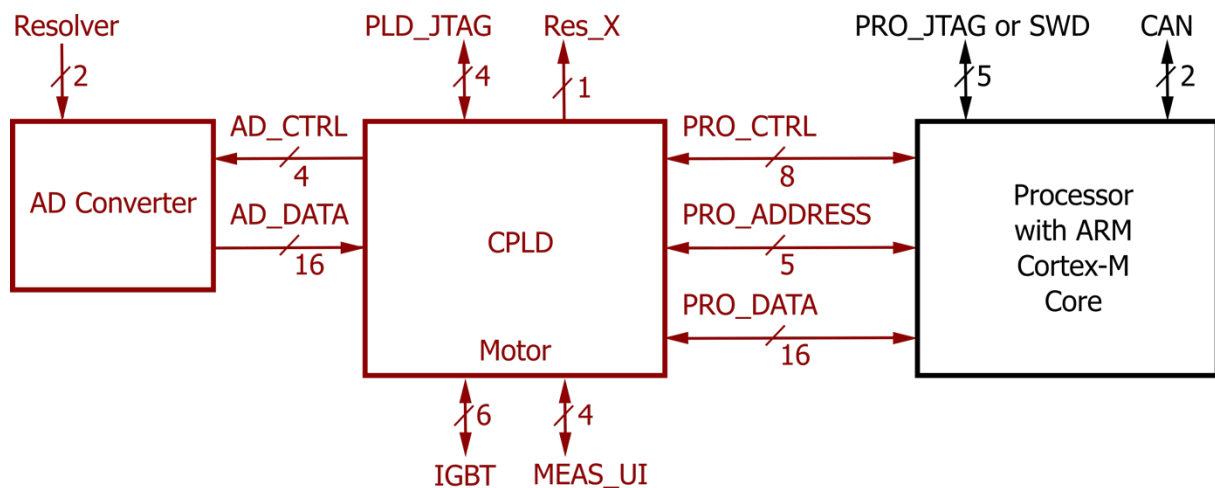
For the operation of recently designed electric motors and generators as well as for coupling of solar modules to modern electrical three-phase power grids, a large number of digital inverters are required to convert DC into AC voltages.

Particular attention is given to processor architectures that are not dependent on a single supplier. In case of a processor's obsolescence, this allows a comparably fast and therefore cheaper transition to another manufacturer. Such a processor architecture is provided by the company ARM (Advanced RISC Machines Ltd.), known as Cortex-M. This architecture was specifically designed for installation in embedded systems. This type of processor has since been widely used.

Hence, the present study examines processors with ARM Cortex-M architecture for their usability as a System on Chip (SoC) design for use in digital inverters. This eliminates the commonly used ASICs, programmable logic devices or AD converters and will be replaced by internal microcontroller's components. Therefore, a low-priced Cortex-M processor is required, which realizes high-quality peripherals on a single chip. Furthermore, this processor needs sufficient computing power to be suitable for all computing tasks.

A comparison in terms of price and features of different processor types identified a variant of the STM32H7 by ST Microelectronics as a promising candidate. For verification, a processor PCB was developed. Already used field oriented control software in other inverters was ported to this hardware. Finally, with this newly designed processor board a model inverter was put into operation. As a result, this processor type of the ARM Cortex-M architecture can function as a Soc and is fully suitable to build very high-performance and low-cost inverters systems.

2 Einführung



Function	Type	Remarks
AD Converter	AD7655ASTZ	Simultaneous sampling, 16 bit resolution
CPLD	Altera MAX II Series	Atmel MACH XO2 Series for cost sensitive applications
Processor	ARM	Cortex-Mx with x = 3, 4 or 7

Abbildung 1: Übersicht der Signalelektronik eines digitalen Wechselrichters mit Cortex-M Kern

Heute am Markt erhältliche Wechselrichter sind meist mit einer digitalen Signalelektronik aufgebaut. Ein Beispiel zur Ansteuerung eines Motors mit einem ARM Prozessor als zentrale Recheneinheit und einem programmierbaren Logikbaustein (CPLD) sowie AD Wandler (AD

Converter) zeigt Abbildung 1 [1]. Wahlweise werden die Funktionalitäten in einem CPLD auch über ein FPGA oder über ein ASIC realisiert. Darüber hinaus werden überwiegend zur Rotorlageerfassung der Elektromaschinen Lagegeber oder Resolver verwendet, deren Ankopplung an die Signalelektronik ebenfalls über externe Chiplösungen [2] oder externe AD Wandler [3] erfolgt.

Möchte man die Bauteilezahl für solch eine Schaltung reduzieren, um die Zuverlässigkeit zu erhöhen und die Kosten zu senken, müssen diese Funktionalitäten in einem einzigen Chip – einem System on Chip oder SoC– abgebildet werden. Bezogen auf Abbildung 1 sollten die in roter Farbe dargestellten Komponenten in einem einzigen Chip zusammen mit einem leistungsfähigen Prozessor integriert sein. Dies spart teure programmierbare Logikbausteine und AD Wandler ein und eröffnet Spielräume, um möglichst kleine Bauräume der Wechselrichter-Hardware, auch mit Hinblick auf mobile Anwendungen, realisieren zu können.

Für ein solches Wechselrichtersystem wird daher ein schneller, hochauflösender und flexibler Prozessor mit einer Software mit Echtzeitfunktionalität und vielfältiger on-Chip Hardware benötigt. Vorzugsweise sollte ein ARM Cortex-M Prozessorkern integriert sein, um die Vorzüge der Code-Portierbarkeit und der weiteren in [1] erläuterten Vorteile im digitalen Wechselrichter nutzen zu können. Insbesondere sind bei diesem SoC folgende Komponenten für den Modellwechselrichter obligatorisch, wobei Timer, Sigma-Delta Demodulatoren und AD Wandler synchronisierbar sein müssen:

- Timer zur Realisierung der Timing Master Funktion
- Timer mit komplementären Ausgängen und Totzeitfunktion als dreiphasiger PWM Generator zur Ansteuerung des IGBT Moduls
- Timer zur Realisierung der Resolvererregung
- UART für den Hintergrund-Monitor
- vier Sigma-Delta Demodulatoren zur Erfassung von Strom (2 x Motorstrom, 1 x Zwischenkreisstrom) und Spannung (1 x Zwischenkreisspannung)
- drei AD Wandler (2 x synchrone Wandler für sin/cos-Resolverkanäle, 1 x für Motortemperatur) mit einer Auflösung von 16-Bit
- ein CAN Controller nach CAN 2.0 A (11-Bit Identifier)
- Serial Wire Debug Interface (SWD Interface)

3 Ziel der Untersuchung

Ziel der Studie war es, aufgrund der in der Einleitung genannten Vorteile einen Mikrocontroller mit ARM Cortex-M Kern hinsichtlich Verwendbarkeit in einem digitalen Wechselrichter zum Einsatz als SoC zu finden und näher zu untersuchen.

Als Testplattform wurde zur Evaluierung ein Prozessorboard entwickelt und gebaut sowie mit weiteren eigens entwickelten Platinen zu einem Wechselrichter komplettiert und in Betrieb genommen. Als Software wurde der bereits in [1] entworfene und realisierte Echtzeit-Scheduler auf den ausgewählten Prozessor übertragen.

4 Hardware

4.1. Prozessor

Um einen geeigneten Mikrocontroller zu finden, wurde zunächst ein Preis- und Leistungsvergleich neuerer Prozessoren für eingebettete Systeme mit bisher im Labor Mechatronik verwendeten Prozessoren gemäß Abbildung 2 durchgeführt.

OCPU	Manufact.	Core	Clock	DMIPS	Algorithm	CPU Time	Algorithm	CPU Time
MC68332	Freescale	68k 32-bit	20 MHz	4	Sinus	3.40 μ s	Alg_res with atan2	23.8 μ s
DSP56F803	Freescale	DSC 16-bit	80 MHz	40		0.65 μ s		3.4 μ s
STM32F103	ST Micro	Cortex-M3 32-bit	72 MHz	90		0.47 μ s		2.0 μ s
STM32F407	ST Micro	Cortex-M4 32-bit	168 MHz	210		0.20 μ s ^(*)		0.86 μ s ^(*)
STM32H743	ST Micro	Cortex-M7 32-bit	400 MHz	856		0.072 μ s		0.45 μ s

Chip	Pins	Flash/kB	RAM/kB	Price p.u. ⁽¹⁾	Price p.u. ⁽²⁾
MC68332GCEH20	132	—	2	22.64 €	24.67 €
DSP56F803BU80E	100	64	4	15.61 €	14.68 €
STM32F103VCT6	100	256	48	7.05 €	5.34 €
STM32F407VGT6	100	1024	192	7.17 €	7.74 €
STM32H743ZIT6	144	2048	1024	11.72 €	15.10 €

- Test algorithms with table lookup for trigonometric functions (sin, atan2)
- MC68332 features an assembly lookup instruction (tbls.w)

^(*) Time scaled using STM32F407 to STM32F103 DMIPS ratio

⁽¹⁾ Farnell net price without discount for >300 pcs, (January 03, 2018)

⁽²⁾ DigiKey net price without discount for >300 pcs, (January 03, 2018)

Abbildung 2: Leistungs- und Preisvergleich verschiedener Prozessoren für eingebettete Systeme

Die Darstellung in [1] ist hierbei um eine neue Prozessorvariante mit Cortex-M7 Kern erweitert worden. Bis auf den STM32F407 wurden bei der Rechenzeitbestimmung in der Darstellung alle Prozessoren mit maximaler Taktrate betrieben. Bei den ARM Prozessoren wurden zur Vergleichbarkeit die Algorithmen ohne Änderung des Thumb2-Codes auf die jeweilige CPU übertragen. Sofern im Prozessor vorhanden, arbeiteten alle Prozessoren mit abgeschalteter FPU. Im Falle des STM32H743 wurde der gesamte Code vor Ausführung in das TCM ausgelagert, um ohne Verwendung eines Speicher-Caches maximale Rechenleistung zu erhalten.

Prozessoren mit einem ARM Cortex-M7 Kern sind zwar schon länger auf dem Markt, jedoch war deren Verfügbarkeit mit maximaler Taktung von 400 MHz bisher stark beschränkt. Bis Ende des Kalenderjahres 2017 war auch der aufgeführte Prozessor noch nicht im Massenmarkt erhältlich, lediglich einige wenige mit dem Prozessor bestückte Testboards waren käuflich zu beziehen [4]. Um trotzdem die Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit durchführen zu können, stellte der Hersteller ST Microelectronics freundlicherweise dem Labor Mechatronik an der OTH Amberg zwei Muster des Cortex-M7 Prozessors vorab kostenlos zur Verfügung.

Zur Identifikation eines leistungsfähigen und gleichzeitig preisgünstigen Prozessors ist die Erstellung verschiedener Indizes denkbar. Aus der Tabelle in Abbildung 2 wurde unter Vernachlässigung des veralteten 68k-Prozessors MC68332 der Preis je Einheit der beiden Distributoren gemittelt (p.p.u). Anschließend wurden zwei Indizes erstellt, deren qualitativer Verlauf bei zunehmenden Werten auf leistungsfähigere und gleichzeitig preisgünstigere Prozessoren schließen lassen. Die Indizes sind:

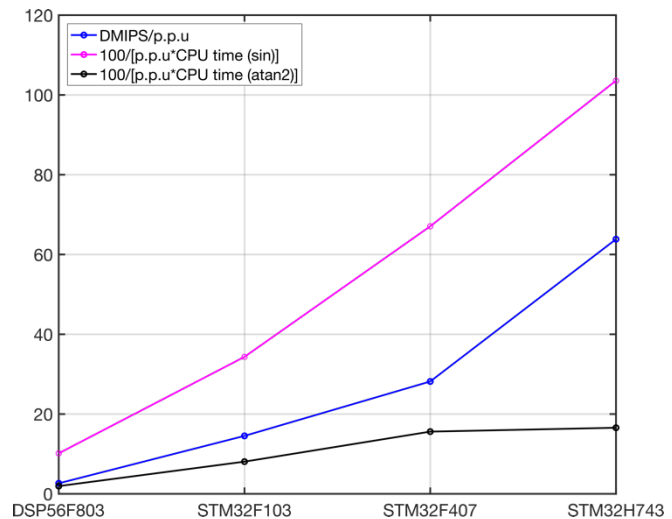


Abbildung 3: Leistungsindizes für verschiedene Prozessoren

- DMIPS/p.p.u in der Einheit DMIPS/€
- $100/[p.p.u * \text{benötigte CPU Zeit}]$: Einheit 100 MHz/€

Das Ergebnis für die vier verglichenen Prozessoren mit den benötigten CPU Zeiten zur Berechnung eines Sinus bzw. eines 4-Quadranten-Arkustangens zeigt Abbildung 3. Unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit ergeben sich die beiden Prozessoren STM32F407 und STM32H743 als am preisgünstigsten. Von diesen beiden Processorvarianten wurde für die weiteren Untersuchungen der STM32H743 [5] ausgewählt, da dieser neben seinem geringen leistungsbezogenen Preis zudem vier Filter für Sigma-Delta-Demodulation und als einer der wenigen Microcontroller auf dem Markt drei AD-Wandler mit 16-bit Auflösung integriert hat. Dadurch können im Vergleich zum verwendeten Prozessor in [1] aus der Winkelinformation nun auch Drehbeschleunigungen mit hinreichender Genauigkeit noch errechnet werden, ohne auf einen externen AD Wandler zurückgreifen zu müssen.

4.2. Galvanische Isolation

Aufgrund der Höhe der Zwischenkreisspannung ist vor allem bei mobilen Anwendungen und bei höheren Leistungen [6] fast immer eine galvanische Isolation zur Strom-/Spannungsmessung vorzusehen. Dies erfolgt aufgrund benötigter Isolationsstrecken grundsätzlich über externe Komponenten und kann nicht in einen SoC Ansatz mit einbezogen werden.

Die Isolationsbausteine in Wechselrichtern haben häufig einen Sigma-Delta-Modulator am Datenausgang, der mit einer Taktrate von bis zu 20 MHz arbeitet, da sich damit die Signalübertragung über die Isolationsbarriere vergleichsweise einfach realisieren lässt. Außerdem ist diese Art des Ausgangssignals wesentlich weniger anfällig gegenüber äußeren Störungen verglichen etwa mit einem analogen Spannungssignal.

Diese Ausgangssignale sind zur Erfassung mit dem ausgewählten Mikrocontroller bestens geeignet. Zur Messung der beiden Motorströme, des Zwischenkreisstromes und der Zwischenkreisspannung wurde ein Isolationsbaustein [7] mit einer derartigen Datenschnittstelle ausgewählt. Die Schnittstelle konnte auf der entwickelten Platine direkt mit den vier Filtereingängen der Sigma-Delta-Demodulatoren verbunden werden. Als Taktquelle für die externen Modulatoren diente der eigens im Mikrocontroller dafür vorgesehene Taktgenerator.

Die Resolver signale sind per se bereits galvanisch von der Zwischenkreisspannung isoliert. Es musste nur auf eine klare Aufteilung zwischen analoger und digitaler Versorgung des

Resolvers und der im STM32H743 integrierten 16-Bit AD Wandler einerseits sowie der Digitalelektronik andererseits gesorgt werden.

Außerdem wurden im Modellwechselrichter noch folgende Komponenten galvanisch isoliert:

- die Versorgung der IGBT-Gatetreiber
- die Temperaturerfassung des IGBT Moduls
- das CAN-Modul gegenüber der Prozessorversorgung
- die Prozessorversorgung gegenüber der äußeren Niederspannungsversorgung (24 V)

4.3. Prozessorplatine

Das für den Modellwechselrichter entworfene digitale Mockup sowie die vollständige bestückte Prozessorplatine zeigt Abbildung 4.

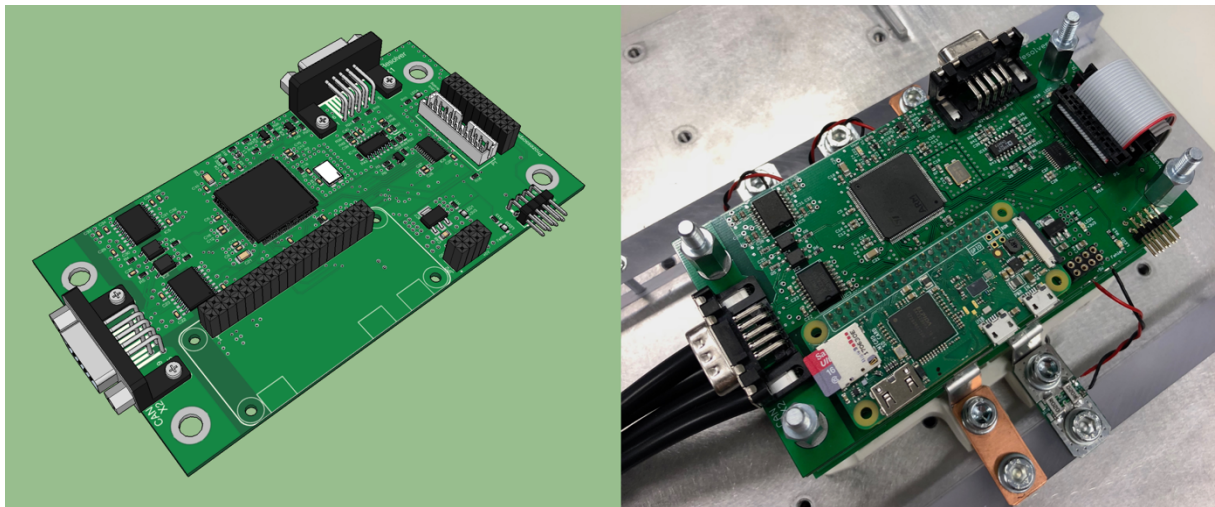


Abbildung 4: Digital Mockup Prozessorplatine (links) und bestückte Platine mit eingestecktem Raspberry (rechts)

Das CAN-Interface befindet sich im Bild links. Der isolierte CAN Transceiver wird feldbusseitig mit einem isolierten DC-DC-Wandler versorgt [8]. Wahlweise kann für den CAN-Knoten eine ebenfalls isolierte Split-Terminierung eingeschaltet werden. Die Aktivierung erfolgt durch Programmierung des STM32 Prozessors über GPIO.

Rechts hinten im Bild wurde die analoge Versorgung und Analogmasse mit Resolveranschluss realisiert, im Bild rechts sind die Steckverbinder zur Strom- und Spannungsmessplatine sowie zum Anschluss der IGBT-Treiberplatine zu finden. Rechts vorne befinden sich Teststecker und Versorgungseinheit samt LDO Regulator und Versorgungsstecker sowie ein Stecker zur Verbindung eines Raspberry Pi Zero W.

4.4. Debugging und Monitoring

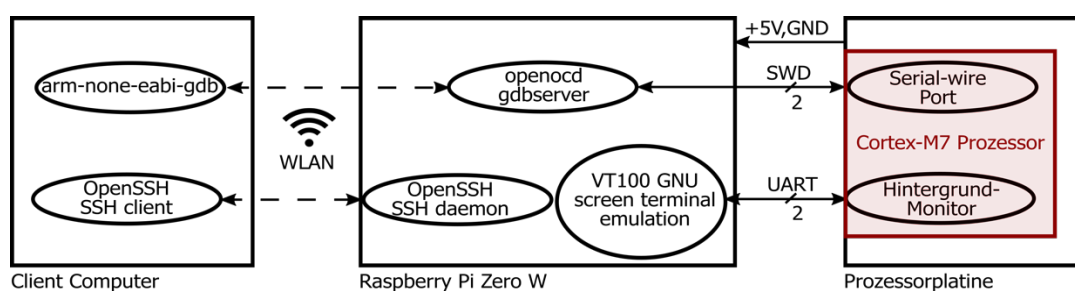


Abbildung 5: Übersicht Debug- und Monitor-Interface

Um das Debugging komfortabler zu gestalten und den Hintergrundmonitor über WLAN bedienen zu können, wurde auf der Prozessorplatine eine neue Schnittstelle zum vergleichsweise preisgünstige Einplatinencomputer Raspberry Pi Zero W vorgesehen [9]. Dieser dient nur zur Inbetriebnahme und zur Bedienung des Hintergrund-Monitors und ist für den Betrieb des Wechselrichters nicht erforderlich, siehe Abbildung 5. Daher kann der Raspberry Pi selbst während des Betriebs abgesteckt oder dessen Betriebssystem heruntergefahren werden. Auf dem Einplatinencomputer läuft das Standardbetriebssystem Raspbian [10] in der derzeitigen gültigen Version Stretch, einer Variante des Debian Linux [11] angepasst auf den ARM11 Prozessor BCM2835 des Raspberry Pi [12].

Findet das Betriebssystem nach dem Einschalten kein gültiges WLAN-Netz, konfiguriert sich das WLAN Interface als WLAN Access Point. Anderenfalls meldet sich der Raspberry Pi am WLAN an und steht nach Abfrage des DHCP Servers mit gültiger IP Adresse als Netzteilnehmer zur Verfügung.

Der Vorteil dieser Konfiguration besteht darin, dass zum einen heute fast jeder Computer über eine WLAN Schnittstelle verfügt und somit der Wechselrichter von beliebiger Hardware aus bedient und eingerichtet werden kann. Zum anderen entfällt eine zusätzliche Verkabelung zum Wechselrichter.

5 Software

5.1. Synchronisation

Zum störungsfreien Betrieb ist die Synchronisation der SoC Komponenten bezüglich der Pulsung der IGBTs von entscheidender Bedeutung. Wird beispielsweise während

des Abtastvorgangs eines AD Wandlers ein IGBT die

Zwischenkreisspannung von mehreren hundert Volt an- oder abschalten, wird die Messwerterfassung, z.B. der Resolversignale, unbrauchbar sein. Gemäß Abbildung 6 wird daher die Triggerung der internen Komponenten immer in der Pulspause ausgelöst.

5.2. Realtime Scheduler, Hintergrund-Monitor, Algorithmen

Die Basissoftware des Modellwechselrichters ist der bereits in [1] ausführlich beschriebene Realtime Scheduler mit Assemblermacros, mit umfangreicher Kommentierung und kleiner Codegröße. Abweichend davon wird aufgrund der geringen Größe im neuen Modellwechselrichter der gesamte Code einschließlich aller Algorithmen und NVIC Vektortabelle nach Initialisierung vom FLASH Speicher in das TCM transferiert und dort ausgeführt.

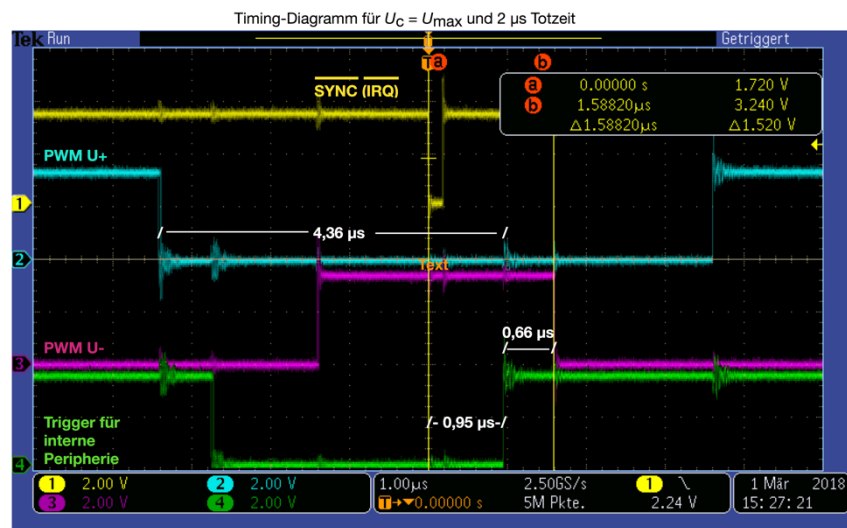


Abbildung 6: Synchronisation interner Peripherie bei positiver Flankentriggerung am Beispiel eines Motorstranges

Zusätzlich wurde eine Schnittstelle zur Programmiersprache C ergänzt, um auch in den Zeitscheiben bzw. im Hintergrund einfache Funktionen in einer höheren Programmiersprache ergänzen zu können. Der Timing Master wird jetzt mit dem kernnahen SysTick Timer [13] realisiert (SYNC Signal in Abbildung 6). Dennoch gibt es weiterhin eine Möglichkeit, z.B. für Mehrachsantriebe eine externe Synchronisation durchzuführen.

Um die zwingend notwendige Synchronisation in allen Betriebsfällen zu gewährleisten, wurde nur ein Interrupt ohne DMA zugelassen. Da der Interrupt-Controller des Cortex-M allerdings keine Unterbrechung einer ISR durch einen Interrupt gleicher Priorität zulässt, löst im Scheduler der SysTick IRQ wieder eine Unterbrechung geringerer Priorität (PendSV) aus und beendet sich anschließend selbst.

Der Hintergrund-Monitor wurde nach Anpassung der Register ebenso aus dem Modellwechselrichter mit Cortex-M3 Prozessor aus [1] übernommen wie auch alle restlichen Algorithmen zur feldorientierten Regelung. Bei diesem seit einigen Jahren gängige Verfahren werden alle Feld- und Zustandsgrößen eines Motors in ein meist mit dem Erregerfeld des Rotors mitrotierendes, orthogonales Koordinatensystem transformiert [14]. Für zukünftige Untersuchungen wären alternativ zur klassischen Realisierung der Feldorientierung auch weitergehende Ansätze zur Stromregelung z.B. nach [15] denkbar.

6 Ergebnis

Im Rahmen der Untersuchungen konnte die Verwendbarkeit von ARM Cortex-M Kernen zum Einsatz als SoC in digitalen Wechselrichtern bestätigt werden. Dabei wurde die bei digitalen Wechselrichtern übliche Signalelektronik nach Abbildung 1 auf ein SoC Design nach Abbildung 7 reduziert.

Die Vorteile gegenüber herkömmlichen Systemansätzen sind die Kostenersparnis, die Platzersparnis hinsichtlich Bauraum der Platinen und Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Reduktion der Bauteilzahl.

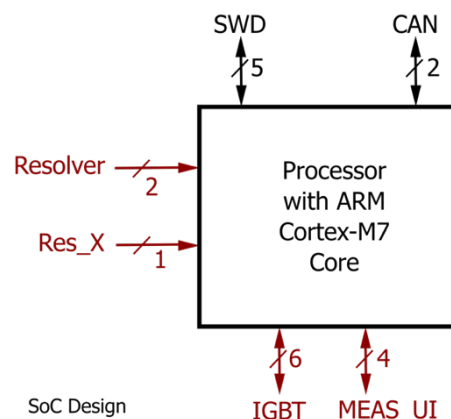


Abbildung 7: SoC System eines digitalen Wechselrichters

Basierend auf den Ergebnissen aus [1] war es somit möglich, innerhalb kurzer Entwicklungszeiten die Software auf den neuen Microcontroller zu übertragen.

Zum Leistungsnachweis wurde ein vollständig funktionsfähiger Wechselrichter aufgebaut, auf dem eine feldorientierte Regelung mit Raumzeigermodulation implementiert wurde. Es wurde ein kurzes Video zu einem ersten Funktionstest des Wechselrichters im Labor Mechatronik an der OTH Amberg angefertigt und kann auf Nachfrage zur Verfügung gestellt werden.

Die Programme sowie die erstellte Prozessorplatine können zukünftig im Rahmen von Projekten und Vorlesungen insbesondere im neuen Studiengang „Mechatronik und digitale Automation“ an die Studierenden weitergegeben und die gewonnenen Erfahrungen in die Lehrveranstaltungen integriert werden.

7 Abkürzungen

• AC	Alternating Current
• AD	Analog/Digital
• ARM	Advanced RISC Machines Ltd.
• ASICs	Application Specific Integrated Circuits
• Bit	Binary Digit
• CAN	Controller Area Network
• CPLD	Complex Programmable Logic Device
• DC	Direct Current
• DHCP	Dynamic Host Configuration Protocol
• DMA	Direct Memory Access
• DMIPS	Dhrystone Million Instructions Per Second
• FPGA	Field Programmable Gate Array
• FPU	Floating Point Unit
• gdb	GNU debugger
• GNU	GNU's not Unix
• GPIO	General Purpose Input/Output
• IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
• IP	Internet Protocol
• IRQ	Interrupt ReQuest
• ISR	Interrupt Service Routine
• JTAG	Joint Test Action Group
• LDO	Low Dropout
• openOCD	open On-Chip Debugger
• PWM	Pulsweitenmodulation
• RISC	Reduced Instruction Set Computer
• SoC	System on Chip
• SSH	Secure Shell
• SWD	Serial Wire Debug
• TCM	Tightly-coupled memory
• UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
• VT100	Virtual Terminal 100 Protocol
• WLAN	Wireless Local Area Network

8 Literatur

Alle online verfügbaren Quellen wurden zuletzt am 03. Januar 2018 abgerufen.

- [1] Frenzel, B.: *Untersuchung zum Einsatz von ARM Cortex-M Prozessorkernen in voll digitalisierten Wechselrichtern*. Forschungsbericht 2015 der OTH Amberg-Weiden, S. 14-23. [Online] Verfügbar unter: <https://www.oth-aw.de/files/oth-aw/Aktuelles/Veroeffentlichungen/Forschungsbericht/Forschungsbericht-2015.pdf>
- [2] ANALOG DEVICES: *High Performance, 10-Bit to 16-Bit Resolver-to-Digital Converter*. Circuit Note CN-0276, Norwood Massachusetts, 2013 (Rev. 0) – Firmenschrift. [Online] Verfügbar unter: <http://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/reference-designs/CN0276.pdf>
- [3] Frenzel, B.; Kurzweil, P.; Parspour, N.: *Resolver Based Position Sensing in Automotive Applications*. Conference Proceedings PCIM Power Conversion Intelligent Motion (2012), S. 1639-1645
- [4] ST MICROELECTRONICS: *STM32 Nucleo-144 Boards*. User Manual UM1974 – Firmenschrift. [Online] Verfügbar unter: http://www.st.com/resource/en/user_manual/dm00244518.pdf
- [5] ST MICROELECTRONICS: *STM32H7x3 advanced ARM-based 32-bit MCUs*. Reference manual RM0433 – Firmenschrift. [Online] Verfügbar unter: http://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00314099.pdf
- [6] Frenzel, B.; Kurzweil, P.; Rönnebeck, H.: *Electromobility concept for racing cars based on lithium-ion batteries and supercapacitors*. Journal of Power Sources 196 Elsevier (2010), S. 5364-5376
- [7] ANALOG DEVICES: *16-Bit Isolated Sigma-Delta Modulator, AD7403*. Norwood Massachusetts, 2015 (Rev. B) – Firmenschrift. [Online] Verfügbar unter: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7403.pdf>
- [8] ANALOG DEVICES: *2.5 kV, Isolated DC-to-DC Converter, ADuM5000*. Norwood Massachusetts, 2017 (Rev. B) – Firmenschrift. [Online] Verfügbar unter: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuM5000.pdf>
- [9] Kurniawan, A.: *Getting Started with Raspberry Pi Zero W*. Kindle Edition. PE Press (2017)
- [10] Newcomb, A.; Haxsen V.: *Linux für Maker: Raspbian – das Betriebssystem des Raspberry Pi richtig verstehen und effektiv nutzen*. dpunkt.verlag (2017)
- [11] Jurzik, H.: *Debian GNU/Linux: Das umfassende Handbuch*. 7. Aufl. Rheinwerk Computing (2017)
- [12] BROADCOM: *SBCM2835 ARM Peripherals*. Cambridge (2012) – Firmenschrift. [Online] Verfügbar unter: <https://www.raspberrypi.org/app/uploads/2012/02/BCM2835-ARM-Peripherals.pdf>
- [13] ARM: *ARMv7-M Architecture Reference Manual*. Issue E.c Cambridge (2017) – Firmenschrift. [Online] Verfügbar unter: https://static.docs.arm.com/ddi0403/e/DDI0403E_c_armv7m_arm.pdf
- [14] Frenzel, B.; Gebhard, F.; Kurzweil, P.: *Physik Formelsammlung*. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.
- [15] Frenzel, B.; Kilger, F.: *Method for current regulation of permanently excited synchronous motors for guided missiles having an electromechanical actuating drive for the rudder*. United States Patent and Trademark Office. April 25, 2002. US20020047680A1