

ENERGIEVERBRAUCH MODERNER MIKROKONTROLLER SYSTEME [1] [2]

Energieverbrauch von MCU/SoC-Systeme im Vergleich - reicht ein Benchmark, benötigen wir parametrisierbaren Benchmark?

Autor: Horst Diewald, ProJoule GmbH, editiert von Frank Riemenschneider, DESIGN&ELEKTRONIK

Ein bedeutender Faktor in der Auswahl, der Etablierung und dem Markterfolg ist der Energiebedarf eines Systems. Der traditionelle Ansatz die Effizienz in Microampere (μA) oder Microwatt pro Mega-Hertz ($\mu\text{W}/\text{MHz}$) anzugeben greift heute nicht mehr. Energiespeichersysteme halten weder μA noch μW bereit, sondern Joule, also Energie. Der Vergleich von MCU/SoC-Bausteinen mit guter Energiebilanz rückt vermehrt in den Fokus der Anwender.

Reicht ein Benchmark, um einen Mikrokontroller, eine MCU-Familie, oder gar einen MCU-Hersteller auszuwählen? Reichen die Dokumente die öffentlich zugänglich sind? Wie einfach ist das Vorhaben aus mehreren Anbietern den richtigen auszuwählen? Oder ein späterer Wechsel?

- Teil 1: EIN BENCHMARK FÜR ULTRA-LOW-POWER: ULPBENCH-CORE PROFILE
- Teil2: ULPBENCH-CORE PROFILE, EEMBC DOKUMENTE UND MCU DATABLÄTTER
- Teil 3: DER EINFLUSS DER BETRIEBSTEMPERATUR AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH
- Teil 4: MCU DATENBLÄTTER, BETRIEBSMODI, KONTROLLBITS UND -REGISTER, STROM- UND MODETRANSFERPARAMETER

TEIL 1, EIN BENCHMARK FÜR ULTRA-LOW-POWER: ULPBENCH-CORE PROFILE

Die Aussage, dass kleinerer Strom im Betriebsmode und Ruhemode sowie ein kürzerer Betriebsmodus zu Energievorteilen führt, ist leicht nachvollziehbar. Mit dieser Aussage ist jedoch kein Vergleich möglich, sondern nur mit einem Benchmark. Das heißt, gleicher Code (C-Source-Code) für alle. Ein Code der eine faire Balance für das Testen von 8-/16-/32-bit Architekturen erlaubt, denn die Code- und Datenauswahl ist entscheidend für das Ergebnis.

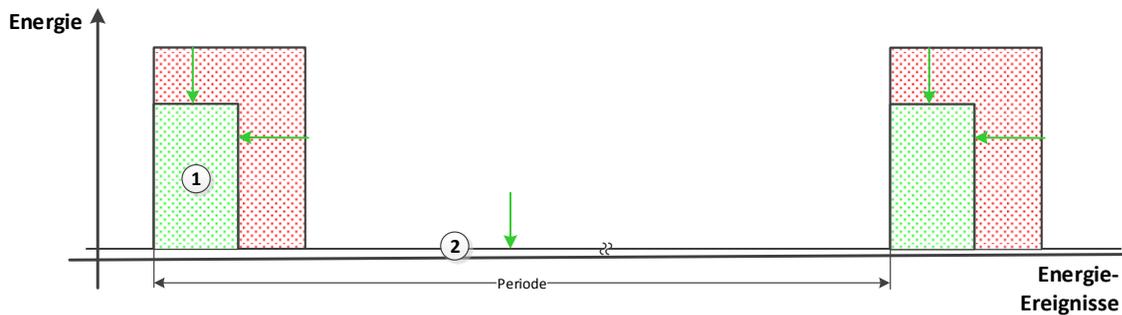


Bild 1 Normalerweise wurden typische Datenblattwerte in dieser Argumentation genutzt. Ein kritischer Blick ist dann ratsam, wenn die maximalen Werte wesentlich höher spezifiziert sind als die typischen Werte. Nach Möglichkeit kann bei einem Entwicklungsboard die Stromaufnahme gegen das Datenblatt geprüft werden. Welchen Code verwendete der Hersteller (1) für seine Aussage, ist er veröffentlicht, leicht zugänglich und auf andere Architekturen übertragbar?

Der aktuelle ULPBench-CP greift diesen einfachen Ansatz auf. Einem Betriebsmode (Codeausführung) folgt eine zweite Phase in einem Echtzeituhr-Mode. Die sogenannte „Workload“ (Code für den Betriebsmode) basiert auf Energiesituationen die zwar nicht alle, aber doch repräsentativ für batteriebetriebene Systeme sind. Als Grundlage wurde der Energieinhalt von einer Lithium-Knopfzelle (CR2032) genommen und eine durchschnittliche Betriebszeit von 4 Jahren definiert. Die Betriebszeiten sind sicher in der Vielfalt der Anwendungen von einigen Monaten bis weit mehr als eine Dekade lang; der Kompromiss ist damit durchaus akzeptabel.

Ein wichtiger Ansatz in diesem Artikel ist, dass die Benchmark-Resultate und die Datenblätter bzw. Dokumente der Hersteller genügen, um eine Applikation bezüglich ihres Energieverbrauchs bzw. der Lebensdauer bei limitierter Energie-Ressource (Batterie, etc.) genügen – lassen wir uns überraschen.

Vorneweg – Klärung einiger Begriffe

Der Energieverbrauch kann in der digitalen Domain in zwei grundlegende Komponenten aufgeschlüsselt werden. Der eine Teil wird für die Ausführung von gewünschten Funktionen verbraucht während der andere Teil verbraucht wird ohne dass dafür eine beabsichtigte Wirkung/Funktion ausgeführt wird. In englischsprachigen Veröffentlichungen wird hier meist von dynamischem und statischem „Stromverbrauch“ gesprochen.

Nahezu alle Mikrocontroller für den Low-Power-Bereich sind heute mit analogen Funktionen ausgestattet. Dies können sein: integrierte Oszillatoren, Spannungsüberwachungen und Start-up-Schaltungen, Komparatoren, Verstärker, A/D- und D/A-Wandler, etc.

Solche Schaltungen haben relativ viel statischen Strom (DC) im Ruhe- und Betriebsfall. Dadurch wird in dieser Beschreibung der Begriff statische Energie bzw. statischer Strom für den DC-Anteil verwendet und nicht für Stromverluste. Der „alte“ Begriff, statisch in der digitalen Domain, wird zusammengefasst unter dem Begriff „Leckstrom“ und umfasst die gesamten, unproduktiven Verluste der MCU/SoC-Bauelemente.

Der Benchmark ULPBench-CP [3]

Die EEMBC-Organisation hat einige Details über die Ziele, die Grundidee, und die Regeln für das Anwenden des Benchmarks veröffentlicht. Das allgemein formulierte Ziel ist, dass die Energieeffizienz herausgearbeitet werden soll.

Zielanwendungen sind Produkte mit erhöhten Anforderungen an den Energieverbrauch für das Internet-der-Dinge (IoT) sowie Anwendungen, die von einer Quelle mit limitiertem Energiebudget (z.B. Batterien) versorgt werden. Erwähnt wird die Bedeutung des Ruhestromes bei strom-limitierten Quellen zum Beispiel bei „Energy-Harvesting“-Systemen, die die meiste Zeit im Standby oder SLEEP-Mode verbringen. Ebenso, wenn das MCU/SoC-System periodisch oder asynchron aus dem Ruhemodus aufgeweckt wird um eine Aufgabe abzuarbeiten. Ultra-Low-Power Systeme erfordern die Kombination und Abwägung der einzelnen erwähnten Parameter. Die Entwickler sehen sich so vielerlei Optimierungsherausforderungen konfrontiert um Anwendungen mit Laufzeiten von Monaten bis hin zu ganzen Dekaden zu entwickeln.

Nun gibt es eine wachsende Zahl von Mikrocontrollern die diese Ultra-Low-Power Fähigkeiten für sich reklamieren, jedoch benötigt der Entwickler mehr Daten als die Parameter aus dem Datenblatt. Aus dieser Notwendigkeit heraus stellt der EEMBC ULPBench eine Methode und Randbedingungen zur Verfügung. Damit lässt sich die Energieeffizienz zuverlässig und unabhängig vom Datenblatt zu messen. Die von EEMBC vertriebene Messplatine ist bereits darauf ausgelegt, dass auch die Energieteile von kurzen, unregelmäßig auftretenden Umschaltungen der Leistungsmodi erkannt und akkumuliert werden. Die Software bereitet diese Informationen, stellt sie dar und liefert die aufbereiteten Benchmark-Informationen.

Warum wurde der Benchmark entwickelt?

Die Aussagen der letzten 20 Jahre war stets, dass kleinere Ströme und kürzere Laufzeit weniger Energieverbrauch bedeutet. Dies ist allgemein gültig und gleichzeitig ohne Aussagekraft. Können Produkte verschiedener Hersteller tatsächlich, basierend auf dieser Aussage, verglichen werden? Vielleicht, aber ein Vergleich verschiedener MCU/SoC-Produkte und Fertigungslinien setzt zumindest voraus, dass nach den gleichen Benchmark-Definitionen getestet wird. Ziele sind Transparenz und Nachvollziehbarkeit. Die definierten Messungen, die Messhardware und der Setup-Prozesses sollen dies ermöglichen. Die Reproduzierbarkeit der Benchmark-Score für jedermann sollte Ziel sein. Alle Daten sollen, ja müssen, der Öffentlichkeit zugänglich sein.

Eigenschaften

Die „Workload“ ist portabel und auf 8-, 16-, und 32-bit MCU/SoCs lauffähig. Damit sind die überwiegende Zahl von verfügbaren (und wohl auch der nächsten Generation) MCU/SoCs in der Lage

den Benchmark abzarbeiten. Damit sollte es den Anbietern möglich sein, Vergleichszahlen den Anwendern zur Verfügung zu stellen.

Prinzipiell ist es möglich mit eigenem „Workload“ und unter gleichen Bedingungen seine bedarfsgerechte Auswahl abzubilden. In Einzelfällen ist damit eine Basis für individuelles Benchmarking möglich.

ULPBench Run Rules

Der ULPBench braucht eine Portierung der Soft- und Hardware um die Bedingungen des Benchmarktests zu erfüllen; EEMBC stellt dazu Codebeispiele zur Verfügung. Dabei ist die Portierbarkeit auf die Abschnitte beschränkt die die Laufumgebung benötigen. Jede andere Änderung ist unzulässig damit die Resultate gültige Kennzahlen nach ULPBench-Core Profile sind. Bei der Übermittlung der Resultate sind das „.bin image“ der Firmware als auch der Source-Code gefordert.

Der Testkandidat muss von der “Energy Monitor“-Hardware versorgt werden um gültige Resultate zu erhalten. Für den aktuellen Benchmark wurde gezeigt, dass mit hochauflösender Messgeräte-Hardware gute Resultate erzielt werden. Es sind Zweifel angebracht ob eine hochauflösende, teure Hardware die künftigen Pulsanwendungen überhaupt erfüllen werden können. Mehr dazu später.

Die Umgebungstemperatur ist auf größer als 21°C / 70°F festgelegt und die Spannungsversorgung während der Benchmark-Ausführung auf 3V gesetzt. Mehr dazu später.

Die Periode, zum Beispiel über einen Wake-up-Timer generiert, ist eine Sekunde. Diese Zeit kann einen bestimmenden Anteil am Energieverbrauch haben. Für den ULPBench-Core Profile ist die Ableitung aus einem 32-kHz-Quarz definiert – wie bei einer sehr großen Zahl von ULP-Anwendungen (ULP, ultra-low power). Eine Genauigkeit von 50 ppm (oder besser) ist gefordert.

Wird beim Testen kein Quarzoszillator verwendet (z.B. ein interner Oszillator) sind die Anweisungen, wie der Timer über die Anpassung der Firmware kalibriert wird, zu erklären. Dies ist erforderlich für die Zertifizierung damit das „EEMBC Certification Lab“ die übermittelten Resultate reproduzieren kann. Bemerkung: eine Veränderung der Periode hat unmittelbaren Einfluss auf die Resultate und das sowohl positive wie auch negative.

I/O-Anzeige(n) müssen, entsprechend des Profils, vorhanden sein. Für den “Core Profile“-Benchmark ist dies in der Dokumentation beschrieben.

Die „Energy Monitor“-Hardware – warum nur 3 V Versorgungsspannung?

Wie in den Regeln festgelegt, ist in der Phase 1 des ULPBench-CP die Versorgungsspannung auf 3V bestimmt. In einer weiteren Phase ist mindestens eine weitere Testspannung laut EEMBC geplant. MCU/SoCs verbrauchen bei kleineren Versorgungsspannungen weniger Energie. Der gewählte sogen. kleinste gemeinsame Nenner der Testspannung wurde genommen um die Resultate auch vergleichen zu können. Ein wichtiges Ziel des ULPBench sind batteriebetriebene Anwendungen und diese sind sehr häufig mit Lithium-Batterien betrieben die typisch 3 V liefern:

- einige starten bei 3.3 V und operieren bis 2.7 V
- einige haben eine Startspannung von 3.0 V, sind lange sehr stabil während der Entlade-/Lastphase
- 2 Alkaline-Batterien ergeben ebenso eine Startspannung von ca. 3 V.

Nun, wie das Statement von EEMBC bereits verspricht, greift das Benchmarking Team in einer weiteren Phase die Versorgungsspannungsthematik auf um andere Spannungen zu ermöglichen. Wenn unterschiedliche MCU/SoCs betrachtet werden ergibt sich kein einheitliches Bild wie die Spannung sein sollte. Veröffentlichungen haben jedoch bereits gezeigt, dass die unterste Betriebsspannung über die Produktfamilien stark variiert (siehe [4]) und erste Device bei 2,2 V den ULPBench nicht mehr ausführen können.

Als eine zweite Phase der Benchmark-Entwicklung ist auch mindestens ein analoges Modul (ADC) in den Test eingebunden. Eine doch erhebliche Anzahl von MCU/SoCs haben Analogmodule die bei Spannungen von unter 2.2 V nicht oder nur eingeschränkt arbeiten. Die Versorgungsspannung unter einen dann nutzbaren Level abzusenken mag heute noch attraktiv sein kann aber die Anwender in Zukunft ziemlich verwirren, „welcher Benchmark-Wert ist denn für mich der richtige?“.

Warum ist die Umgebungstemperatur auf größer als 21°C / 70°F festgelegt?

Es gibt mindestens zwei Aspekte die betrachtet werden müssen.

Die Halbleiterprozesse, die jetzt und künftig genutzt werden, haben, auch ohne dass Code ausgeführt wird, beträchtliche Energieverluste (zusammengefasst unter dem Begriff Leckströme). Diese Ströme sind temperaturabhängig und steigen mit der Temperatur rapide an. Wenn nun die Temperatur beim Ausführen des Energie-Benchmarks hoch ist und auch nur um wenige Grad vom Zielwert abweicht, beeinflusst dies das Resultat teils beträchtlich. Die Vergleichbarkeit der Benchmark-Resultate wird kritisch. Auch die Reproduzierbarkeit der Resultate wird um einiges schwieriger. Da der Benchmark die MCU/SoCs betrifft sollen diese und keine weiteren PCB-Bestandteile auf die Vergleichstemperatur gebracht werden. Wo dies nicht möglich ist, müssen akribisch alle Effekte, die nicht der MCU/SoCs zugeordnet werden können, erfasst und die Benchmark-Resultate entsprechend nachvollziehbar korrigiert werden. Die Benchmarkwerte (EEMark) können dabei höher oder niedriger ausfallen.

Über das Temperaturverhalten sind wenige Daten im Umlauf. Eine Beurteilung dieser Effekte auf eine Systemperformance bzw. Lebensdauer ist auch deshalb schwierig. In einem System versorgt von Quelle mit begrenzter Energiemenge (z.B. einer Batterie) wird dies von großer Bedeutung bei der Auswahl der MCU/Soc's sein.

Um die Temperatur-Problematik besser greifbar zu machen nehmen wir die Daten aus *Bild 2*. So ist die Strom-/Energieerhöhung bei einer Temperaturänderung von 0 auf 50 °C etwa gleich mit der Temperaturänderung von 80 auf 85 °C. Mit anderen Worten, ein Zehntel (!) der Temperaturerhöhung hat den gleichen energetischen Effekt.

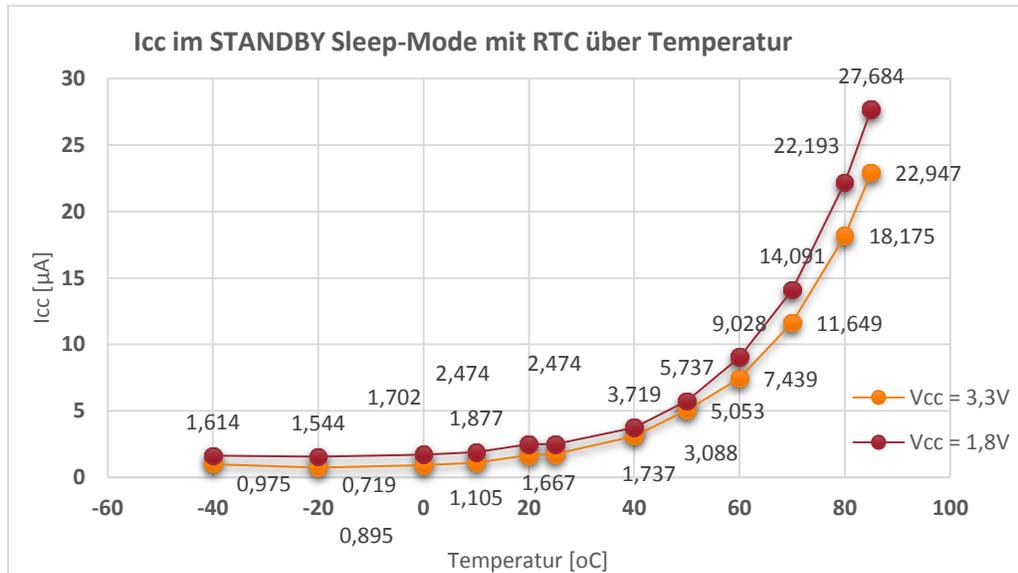


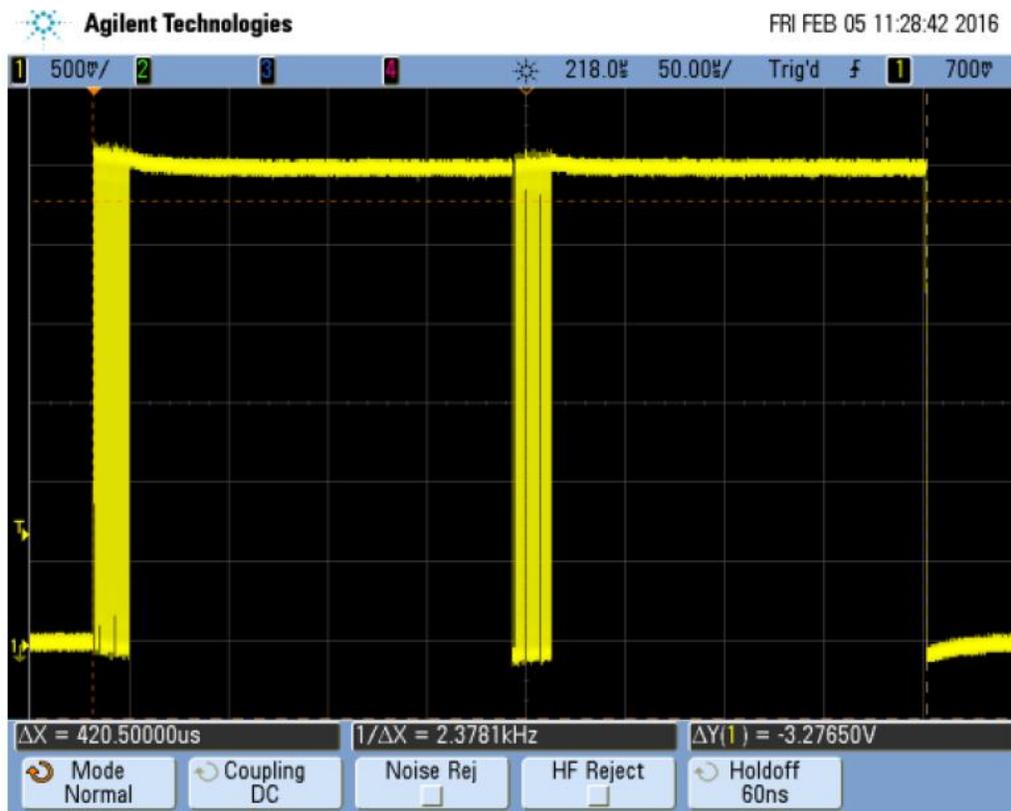
Bild 2 Datenquelle [5]: Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016, Seite 1188
 Der Beitrag im RTC-Mode mag bei 20 Grad gering sein jedoch ist er bei 85 °C erheblich; die
 verbrauchte Energie ist um ca. Faktor 14 höher.

Eine große Hürde zur exakten Messung ist, ausschließlich den Prüfling, also den Mikrokontroller, auf eine stabile, vorgesehene Temperatur zu bringen. Muss der zu testende Mikrokontroller mit einer Platine mit anderen Bauteilen einer Temperatur, zum Beispiel in einer Temperaturkammer, ausgesetzt werden können wir das Ergebnis mit Fragezeichen versehen. Die Daten erfassen in diesem Fall das gesamte Board mit allen Bauteilen und dessen/deren energetischem Temperaturverhalten.

Die Temperatur in einer Applikation wird ein Temperaturprofil/-zyklus aufweisen und der Energieverbrauch entsprechend schwanken. Dazu später mehr.

Die „Energy Monitor“-Hardware – warum eine eigene Hardware und kein konventionelles Messequipment?

Die von Messhardware von EEMBC hat einen sehr weiten Strommessbereich und einen sehr geringen dynamischen Innenwiderstand. Bei konventionellen Strommessungen über Sense-Widerstand ist dies bedingt gegeben. Mit der „Energy Monitor“-Hardware wird die Energie in Form von Ladung, aus einer Kapazität entnommen, gemessen. Daraus resultiert die fast völlige Rückwirkungsfreiheit von Stromspitzen beim Laden/Entladen von Kapazitäten. Und, die „Energy Monitor“-Hardware bindet einen Bruchteil an Kapital gegenüber einer Standard-Messgeräte Lösung. Durch das Messprinzip ist die „Energy Monitor“-Hardware bereit vorbereitet um künftige ULPBench-Phasen mit Perioden vom << 1 Sekunde abzudecken. Ein anderes Szenario ist die intensivere Nutzung von kundendefinierten, anwendungsorientierten Energiemodi die intensives „Power-Gating“ in modernen Prozessen unterstützen. Die gehäufte, im Wesentlichen Device-interne, Kapazitätsumladung muss in zukünftigen Benchmarks von der Messhardware zuverlässig erfasst werden. Damit kann die Messhardware die Entwicklung sehr früh und kostensparend in der Entwicklung energieeffizienter Produkte einbezogen werden. Ein Vergleich der Kosten für eine Ingenieurstunde zum Bezugspreis der „Energy Monitor“-Hardware unterstreicht dies deutlich (siehe [3]).



*Bild 3 Quelle [6]: Analog Devices AN-1402, Rev0: Initial Version
Die Grafik zeigt, dass der Benchmark-Code zweimal nacheinander ausgeführt wird. Vor der Ausführung „toggelt“ der Statuspin 20-mal. Die Zeitmessung weist auf eine Ausführungszeit von 420,5 us hin.*

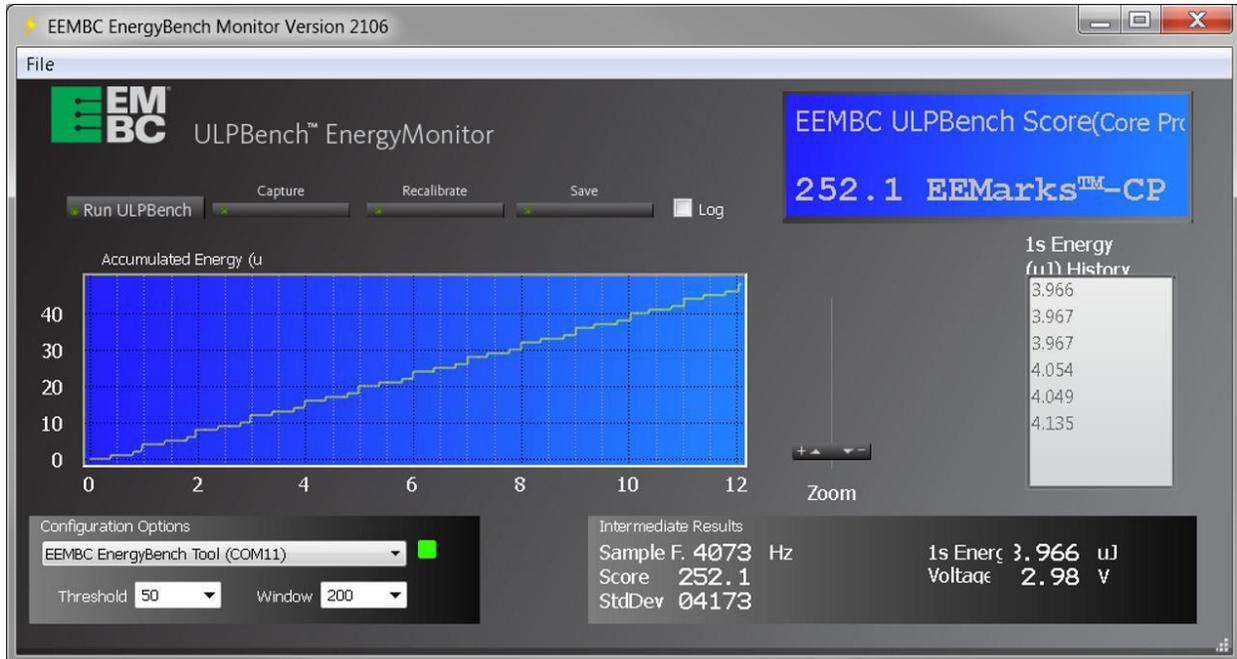


Bild 4 Quelle: Analog Devices AN-1402, Rev0: Initial Version

Die Grafik zeigt die akkumulierte, gemessene Energie in microJoule (μ J), aufgetragen an der X-Achse. Die Y-Achse stellt wohl die Zeit in Sekunden dar. Die Beschreibung des Benchmarks gibt an, dass der Benchmark-Code zweimal pro Sekunde ausgeführt wird.

Unter diesen Randbedingungen ist das *Bild 4* zu betrachten. Eine Erklärung warum nicht nur pro Sekunde ein, eventuell zweigeteiltes, Energiepaket auftritt ist nicht ersichtlich. Dies sollte dem Anwender zur Bewertung zugänglich sein.



Bild 5 Quelle [7]: Texas Instruments über Slideplayer (<http://slideplayer.com/slide/5873902/>)
Die Grafik zeigt ebenso die Energie über Zeit, jedoch nur einen Energiesprung.

Als erstes Fazit bleibt, dass der aktuelle Benchmark eine Basis ist, um eine erste Bewertung zu erhalten. Allgemeine Aussagen wie „kleine Laufzeit bei kleinerem Strom“, $\mu\text{A}/\text{MHz}$, usw. sollten damit der Vergangenheit angehören. Anwender können einen Benchmark-Wert, EEMark-CP, einfordern bzw. selbst ermitteln.

Im zweiten Teil werden Benchmark-Werte und -Dokumente und Unterlagen zu verschiedenen Produkten herangezogen um erste Rückschlüsse auf die Aussagekraft der Daten zu ziehen. Können aufgrund der MCU-Beschreibungen und Datenblätter geeignete Betriebsmodi für den Energieverbrauch und die Betriebs- bzw. Produktlebensdauer ermittelt werden?

ENERGIEVERBRAUCH MODERNER MIKROKONTROLLER SYSTEME

TEIL 2, ULPBENCH-CORE PROFILE, EEMBC DOKUMENTE UND MCU DATABLÄTTER

Ein bedeutender Faktor in der Auswahl, der Etablierung und dem Markterfolg ist der Energiebedarf eines Systems. Der traditionelle Ansatz die Effizienz in Microampere (μA) oder Microwatt (μW) pro MHz ($\mu\text{W}/\text{MHz}$) anzugeben, greift heute nicht mehr. Energiespeichersysteme halten weder μA noch μW bereit, sondern Joule, also Energie.

Im Teil 1 wurden der einzig verfügbare Benchmark für „Low-Power“-Mikrokontroller beleuchtet und zwei Parameter diskutiert, die gelegentlich Diskussionen auslösen. Diese sind die fixe Versorgungsspannung und die vereinbarte Temperatur.

Im Teil 2 betrachten wir die Daten und Dokumente die im Rahmen der Veröffentlichung der Benchmark-Werte von bzw. über den Internetauftritt der EEMBC-Organisation. Dazu in Relation sind Datenblätter und Beschreibungen wie Applikationsdokumente eine Quelle um die Firmendaten für die Energiebetrachtung greifbar zu machen. Kann die Mehrheit der Ingenieursgemeinschaft aufgrund der zur Verfügung gestellten Daten und ohne aufwändige Untersuchungen die richtige Auswahl treffen?

Frage 1:

Wie sind die Benchmark-Werte zu beurteilen? In welcher Relation stehen sie zu den Datenblattwerten?

Aus den EEMBC-Benchmark-Wert (BW statt EEMark-CP verwendet) ermitteln wir den Betriebsstrom und den Ruhestrom beispielhaft einiger Device. Zusammen mit den Laufzeiten der EEMBC-Software und den Datenblattwerten können wir die Abweichungen zwischen rechnerischen (typische Parameterwerte) und gemessenen Werten ermitteln. Um nachvollziehen zu können, ob eine Bewertung ohne eigene Soft- und Hardware-Entwicklung möglich ist, werden nur veröffentlichte Daten verwendet.

Die Berechnungen

Das Benchmark-Konsortium hat die Formel wie folgt definiert:

$$\text{BW} = 1000 / E \quad ; \text{ E ist der Mittelwert von 10 ULPBench- Zyklen und damit der Energieverbrauch pro Sekunde – E ist in } \mu\text{J/s} \text{ eingesetzt}$$

BW, entspricht dem Begriff EEMark-CP

Aus dem Benchmark-Wert errechnen wir uns den durchschnittlichen Energieverbrauch nach der Formel:

$$E = 1000 / \text{BW} \quad \text{E ist } \mu\text{J/s} \text{ oder die Energie die in einer Sekunde verbraucht wird}$$

und daraus die durchschnittliche Stromaufnahme

$$I(\text{avg}) = E / V \quad \text{V ist die Versorgungsspannung – bei praktischen Messungen kann/sollte die tatsächlich gemessene Spannung verwendet werden}$$

Aus dem Datenblatt wird die typische Stromaufnahme in der Ruhemodus-Phase entnommen ($I(\text{standby})$) sowie der Durchschnittswert im RUN-Mode ($I(\text{RUN_avg})$) errechnet aus dem Benchmark-Wert (BW) und dem $I(\text{standby})$.

Aus dem Datenblatt und der angegebenen Betriebsfrequenz erhalten bzw. errechnen wir die vom Hersteller veröffentlichte Stromaufnahme $I(\text{RUN})$ im RUN-Mode.

Die auf dem Internetportal von EEMBC veröffentlichten Daten zeigen nicht immer die Betriebsmodezeit an. Die Trennung in Betriebs- und RTC-Mode-Energie wird dadurch schwierig. Zusammen mit der Zeit für den Betriebsmode (t(RUN_cR/D) oder t(RUN_D)) können die Energieverbräuche, gemessener Wert E_BW_cR und Datenblatt gemäßer Wert E_D, verglichen werden.

Parameter	Atmel				Analog Devices		AmbiqMicro		SiLabs		Texas Instr.					
	SAML21J18A		SAML21		ADuCM302x		Apollo 512-KBR		EFM32ZG222F32		MSP432P401R					
	UES- DC1	1)	rev. B	2)	3)	4)	5)	6)	Rev. B	7)	Rev. C					
Betriebsspannung [V]	D		3,00	3,00		3,00		3,00			2,97		2,97			
Period [s]			1,0	1,0		1,0		1,0			1		1,00			
Processor		Cortex-M0+				Cortex-M3		Cortex-M4F		Cortex-M0+		Cortex-M4F		Cortex-M4F		
BW (EEMark TM -CP)	R		185,80	146,40		245,50		377,50		115,10			167,4		192,30	
E_BW_cR [uJ]	cR		5,38	6,83		4,07		2,65		8,69			5,97		5,20	
I(avg_cR) [uA]	cR		1,79	2,28		1,36		0,88		2,90			2,01		1,75	
I(standby_D) [uA]	D		0,94	1,51		0,83		0,42		0,90			0,80		0,66	
I(RUNcR/D_avg) [uA]	cR/D		0,85	0,77		0,53		0,46		2,00			1,21		1,09	
		12,00	35,00	12,00	32,00	26,00		24,00	37,50	21,00	115,00		16,00	93,91	16,00	93,91
I(RUN_D) [uA]	D		420	384		1280		995,32		2415			1503		1502,60	
t(RUN_cR/D) [ms]	cR/D		2,03	1,99		0,41		0,47		0,83			0,81		0,73	
		Nach Datenblatt				Nach Datenblatt		Nach Datenblatt				Nach Datenblatt		Nach Datenblatt		
t(RUN_R) [ms]	R	1,70		1,70	1	0,420	2	0,44	3	0,90	4	0,81	5	0,67	5	
E_RUN_D [uJ]	D	2,14	2,56	1,96	2,30	1,61	1,58	1,33	1,39	6,52	5,99	3,63	3,60	2,97	3,24	
E_standby_D [uJ]	D	2,82	2,81	4,53	4,52	2,49	2,49	1,26	1,26	2,70	2,70	2,37	2,37	1,96	1,96	
E_D [uJ]	D	4,96	5,38	6,48	6,82	4,10	4,07	2,58	2,65	9,21	8,69	6,00	5,97	4,93	5,20	
E_D - E_cR [uJ]			-0,42	-0,34		0,03				0,53		0,03		-0,27		
BW_C // BW_D		201,73	186,00	154,23	146,59	243,71	245,50	387,21	377,58	108,54	115,13	166,67	167,45	202,75	192,35	
E_BC // E_BW	%		-7,90		-5,08		0,73		-2,51		6,04		0,44		-5,15	
ΔE = E_BW	M	Measured Data				1,45		Dokumente auf EEMBC-Seite liefern keine Daten zur Laufzeit								
	D	Datasheet				3		Applikationsschrift zeigt 423,592ms (RUN); 999,184ms Idle-Zeit								
	R	Report in EEMBC				5		Kein Messresultat, Resultat von "2" bzw. "3" übernommen								
	cR	Berechnet aus EEMBC-Report-Daten				1		Laufzeit von (4) skaliert mit 24MHz/12MHz (für Vergleich)								
Datasheet		1) Atmel-42385B-SAML21_Datasheet_Preliminary-02/2015														
		2) Atmel-42385B-SAML21_Datasheet_Complete-06/2016														
		3) Analog Devices ADuCM3027/ADuCM3029 Rev. Prf February 2016 >>> Preliminary Technical Data!!!!														
		4) Ambiq Micro Apollo MCU Datasheet Rev. 0.9, ?? February 2016 ?? 2015 Ambiq Micro, Inc. ??														
		5) SiLabs 2015-03-06 - EFM32ZG222FX - d0066_Rev1.10														
		6) TI_MSP432P401R_SLAS826 1.10 -FEB 2015														
		7) TI_MSP432P401R_SLAS826E -MARCH 2015-REVISED JULY 2016														

Bild 6a/b Die Quellen sind EEMBC-Benchmark-Werte und -daten, Datenblätter und Report der Hersteller die dort hinterlegt sind. Fünf Devices sind beispielhaft aufgelistet. Mit den EEMBC-Dokumenten und Datenblattwerten ergibt sich Klärungsbedarf.

Die verbrauchte Energie gelistet in der ULPBench-CP-Seite, hinterlegt auf der EEMBC-Webseite, weisen Abweichungen zu den Resultaten aufgrund der Datenblattparameter auf. Die Abweichungen in der zwischen rein auf Datenblattwerten und ULPBench-Werten sind nicht eindeutig zu bestimmen. Ob dies Abweichung des Prüflings von den typischen Parameterwerten oder z.B. Umschaltverluste sind, ist offen. Umschaltverluste sind in keinem Datenblatt benannt.

In manchen Anwendungen mag die Abweichung zwischen Mess- und Datenblattergebnissen eine untergeordnete Rolle spielen. Eine Abtaste von einigen Hz bis KHz ist in modernen Sensorik Konzepten notwendig. Zum Beispiel mit Beschleunigungssensoren und analoger/digitaler Verarbeitung der Messwerte können Umschaltverluste einen signifikanten Energieverbrauch beitragen. Die Umwandlung von Umgebungsparametern in Daten zur digitalen Weiterverarbeitung stellt eine ungleich höhere Herausforderung dar. Ohne Aktivität in dem Bereich ist jeder Benchmark von eingeschränkter Bedeutung. Gerade beim Internet-der-Dinge (IoT) wenn Sensorik und Datenübertragung richtig eingebunden sind.

Frage 2:

Können Beschreibungen und Datenblattparameter helfen den Fall des ungünstigsten Energieverbrauches („Worst-Case“) zu beurteilen? Wie lange kann eine Applikation an einer Batterie betrieben werden?

Im Bild 6 sind der Energieverbrauch im Betriebs- und Ruhemodus gelistet. So reicht die Spanne von einem 3:4-Verhältnis bis zu einem Verhältnis 2:1.

Ein Blick in die Datenblätter zeigt, dass die notwendigen Parameter meist fehlen um eine, z.B. Lebensdauerabschätzung für Batterieanwendungen, für ein Produkt nach Spezifikation zu erstellen. So gibt es im Datenblatt ADuCM3027 REV. PrF (hinterlegt auf ULP-Score @ EEMBC) vom Februar 2016 zwar typische Werte bei 3 V und 25 °C aber keine weiteren typische und Maximalwerte. Im Datenblatt Rev. PrG sind zwar Parameter für RUN-Mode vorhanden aber es gibt weiterhin keine Angabe zu den Low-Power-Strömen.

Das Datenblatt von Ambiq Micro Inc. „Apollo MCU Datasheet Rev. 0.9“ von Februar 2016 enthält ausschließlich typische Stromverbrauchswerte in $\mu\text{A}/\text{MHz}$ bei einem (wo anwendbar) internen RC-Oszillator (HFRC) mit 24 MHz. Durch die fehlenden Parameter (typ. max., max. über Temperatur) im aktuellen Datenblatt ist eine Bestimmung unmöglich, ob der Baustein eine vorgegebene Lebensdauer bei gegebener Energiequelle und jenseits von Raumtemperatur erfüllt.

Frage 3:

Wie sind die Stromangaben in Datenblättern zum RUN-Mode zu verstehen?

Der Strom im RUN-Mode ist meist in „ $\mu\text{A}/\text{MHz}$ “ angegeben. Da Low-Power-MCU/SoCs deutlich unter den Leistungsmöglichkeiten der benutzten Halbleiterprozesse bleiben, liegt eine etwa lineare Steigung [$\mu\text{A}/\text{MHz}$] vor. Mit dieser Vorgabe ergibt sich ein interessantes Bild bei veröffentlichten Daten.

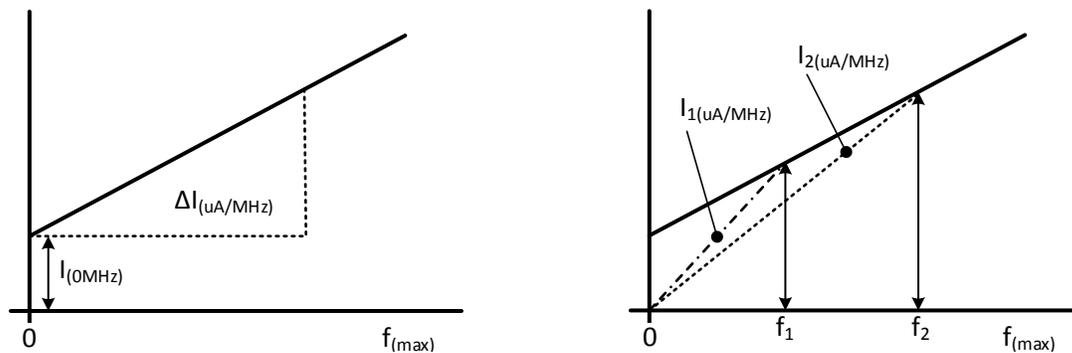
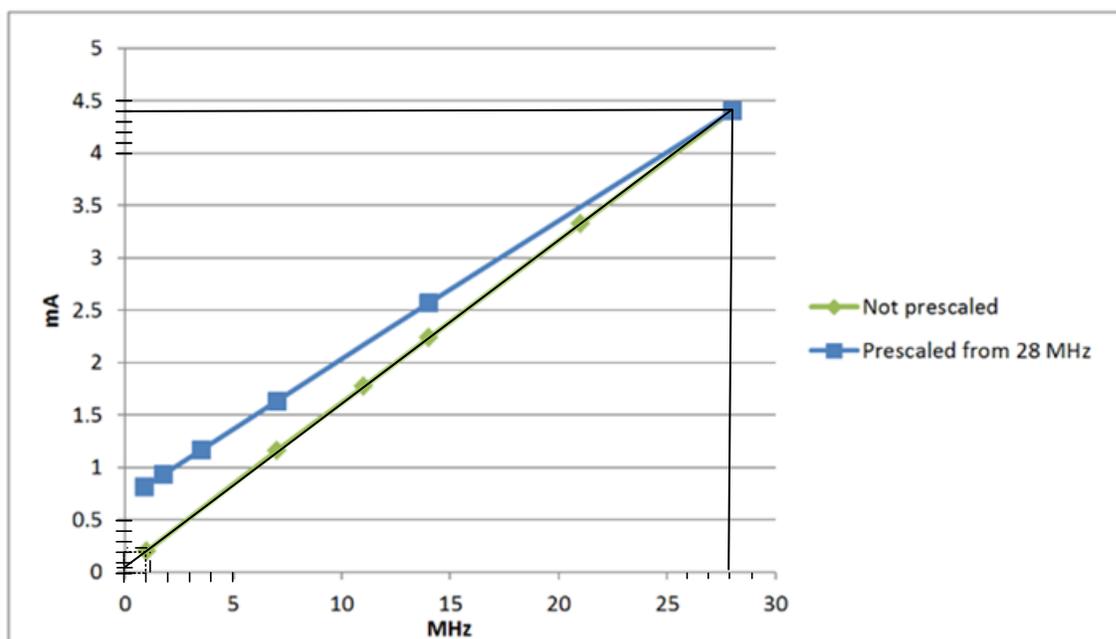


Bild 7a/b Stromaufnahme über Betriebsfrequenz

Bei den Datenblättern gibt es unterschiedliche Angaben zum Stromverbrauch sowohl im LDO/Längsregler-Mode als auch DC/DC-Mode. Manche Datenblätter weisen die Stromaufnahme bei bestimmten Betriebsfrequenzen aus, andere den Strom pro MHz. Die Stromaufnahme ist nicht eindeutig bestimmbar. Manche Daten sind auch nicht als Maxima angegeben – eine Produktlebensdauer (Batteriekapazität) oder Betriebssicherheit („Energy Harvesting“) sind nur mit diesen Daten nicht möglich.

Ein Beispiel, dass nur für eine Frequenz ein Datenblattwert dem Anwender zur Verfügung steht ist im Apollo Datasheet Rev. 0.9 (Ambiq Micro Inc.) zu sehen – bei 3,3 V/1,8 V und HFRC (high frequency RC) von 24MHz. Es gibt zwar Frequenzteiler für diese Taktquelle, der Prozessorkern arbeitet offensichtlich immer mit 24 MHz; ein nicht kalibrierter Wert von typ. +/- 2%. Er kann nachkalibriert werden mit Hilfe von einem 32.768 KHz Quarz (XT-Oszillator). Es gibt übrigens keine Möglichkeit einen anderen Quarzoszillator zu aktivieren – dies ist nicht im Taktgenerator vorgesehen.

Ein anderes Beispiel finden wir bei SiLabs' Applikationsnotiz AN0027.



*Bild 8 Source: Silicon Laboratories, AN0027 Rev. 1.03
Der Datenblatt zeigt durch die unterschiedlichen „Steigungen“ (mA/MHz) dass ein Grundstrom (Offset) vorhanden ist. Der veröffentlichte Graph bestätigt dies.*

Aus dem Graphen (not prescaled from 28MHz) können wir entnehmen, dass ein statischer Grundstrom von ca. $\sim 55 \mu\text{A}$ und ein dynamischer Stromanteil („Steigung“) von ca. $156 \mu\text{A}/\text{MHz}$ für den Stromverbrauch bei einer bestimmten Frequenz berücksichtigt werden muss. Ein wesentlich höherer Grundstrom wird verbraucht, wenn die Applikation in der „prescaled“-Situation betrieben wird. Damit kann projiziert werden, dass der „prescaled“-Mode schlechtere Benchmarkwerte liefert – oder anders ausgedrückt, das Device braucht bei gleichem Programm mehr Energie oder kann kürzer an der gleichen endlichen Energiequelle betrieben werden.

Das Datenblatt selbst macht keine Aussage über den statischen Grundstrom. In einer Applikations-Note finden sich für den statischen Grundstrom: Static Power, Core Domain: $34 \mu\text{A} @ 25^\circ\text{C}, 3\text{V}$. Im Datenblatt finden wir ca. $155 \mu\text{A}/\text{MHz}$ (@ EMO, 14MHz, HFRCO, 3,0V). Bei 1,2 MHz (@ EMO, 1,2 MHz, HFRCO, 3,0V) werden aus dem Graphen etwa $242 \mu\text{A}$ abgelesen. Das Datenblatt weist für diesen Fall $200 \mu\text{A}(\text{typ.})$ und $240 \mu\text{A}(\text{max.})$ aus. Damit liegt der aus dem Graphen ermittelte Wert nicht im typischen Bereich, sondern über der Datenblattangabe.

Damit weicht diese Angabe auch rund 20 % von den aus dem Graphen ermittelten Wert ab.

Frage 3

Kann das Verhalten, der Energieverbrauch einer Anwendung beurteilt werden? Kann ein Temperaturprofil ohne aufwändige Aufbauten und Untersuchungen angewandt werden?

Nach wie vor beschränken wir uns bei unseren Betrachtungen auf MCU/SoC-Bauteile. Die Stromaufnahme von Halbleitern, besonders bei den neueren und neuesten Herstellungsprozessen, ist stark von der Chiptemperatur abhängig. Während bei Hochleistungsprozessoren und leistungsfordernden Anwendungen die interne Temperatur signifikant über die Umgebungstemperatur ansteigt ist dies bei energiesparenden MCU/SoC in der Regel nicht der Fall. Bei energiesparenden MCU/SoCs ist es die Umgebungstemperatur während der Lebensdauer, die berücksichtigt wird.

Bei „hohen“ Temperaturen (zum Beispiel $+85^\circ\text{C}$) bringt jede Temperaturabweichung von wenigen Grad signifikante Unterschiede im Energieverbrauch. Präzise Daten in einem Benchmark sind nur mit dem Einsatz von zum Beispiel, Temperaturschränken mit gleichmäßig verteilter und stabiler Temperatur, zu erreichen.

Eine Datenquelle um den Effekt zu verdeutlichen liefert das Datenblatt *Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016., Seite 1189*. Die gezeigten Werte über Temperatur wurden unter den Betriebsbedingungen:

- $V_{\text{DDIN}} = 0\text{V}$ (Werte rechts der Kurve) und 1.8V (links der Kurve)
- $V_{\text{BAT}} = 3,3\text{V}$ oder $1,8\text{V}$
- RTC running on external 32KHz crystal
- BOD33 is disabled

laut Datenblatt ermittelt. Für die Darstellung in Bild „Back-up Sleep-Mode“ wurden die Daten dem Datenblatt entnommen.

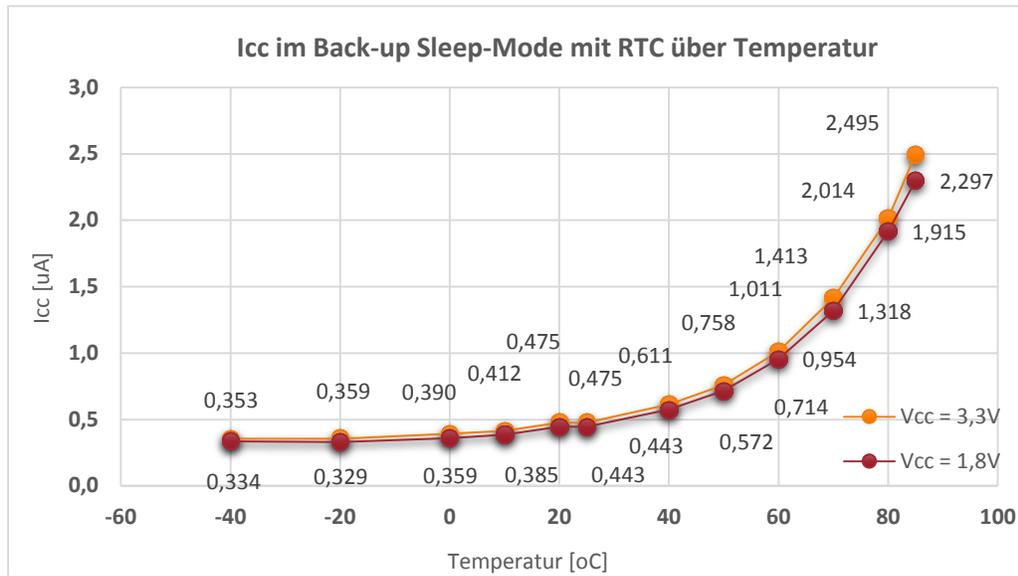


Bild 9 Quelle: Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016, Seite 1189
 Der Backup Sleep-Mode; der Beitrag im RTC-Mode mag bei 20 Grad gering sein jedoch ist er bei 85 °C erheblich; die verbrauchte Energie ist um ca. Faktor 5 höher

Operating conditions:

- VDDIN = 3.3V (orange/linke Kurve) or 1.8V (rot-braun/rechte Kurve)
- ULPVERG LPEFF Enable
- RTC running on external 32KHz crystal
- BOD33 is disabled

Nach den Daten aus *Bild 6a/b* sind der Energiebedarf im Betriebsmodus und Ruhemodus (RTC-Mode) etwa gleich. Der Energieverbrauch im Ruhemodus wäre entscheidend für den Gesamtenergieverbrauch. Bei, zum Beispiel Batteriebetrieb, ist die Betriebsdauer einer Anwendung bei 85°C dadurch stark verkürzt.

In der Realität wird die überwiegende Anzahl der Anwendungen Temperaturschwankungen unterliegen und nicht mit gleichbleibenden Temperaturen betrieben werden. Mindestens zwei Voraussetzungen werden benötigt um dem ausreichend Rechnung zu tragen.

Erstens, die Datenblätter müssen sowohl typische als auch maximale Stromparameter über verschiedene Temperaturen dem Anwender zur Verfügung stellen. Alternativ ist zu untersuchen, ob Kurven der Stromparameter über Temperatur genügen. Dies kann ein Ausweg sein, um die Anzahl der Stromparameter nicht weiter ansteigen zu lassen.

Zweitens, der Anwender braucht ein genügend genaues Temperaturprofil das während der Betriebsdauer in der Anwendung relevant ist. Dies ist unter der Kontrolle des Anwenders, er kann und wird dies für seine Qualitätssicherung sowieso sicherstellen.

Es sind hier nur drei von vielen möglichen Fragen aufgeworfen und zeigen dass ohne Mitwirkung des MCU/SoC-Herstellers eine Lebens-/Betriebsdauer-Berechnung nicht hinreichend genau durchgeführt werden kann. Die berühmt-berüchtigte Formel „Versuch-und-Irrtum“ (Try and Error) dürfte in der Qualitätssicherung der Anwender wenige Anhänger finden.

ENERGIEVERBRAUCH MODERNER MIKROKONTROLLER SYSTEME

TEIL 3, DER EINFLUSS DER BETRIEBSTEMPERATUR AUF DEN ENERGIEVERBRAUCH

Ein bedeutender Faktor in der Auswahl, der Etablierung und dem Markterfolg ist der Energiebedarf eines Systems. Der traditionelle Ansatz die Effizienz in Microampere (μA) oder Microwatt pro Mega-Hertz ($\mu\text{W}/\text{MHz}$) anzugeben greift heute nicht mehr. Energiespeichersysteme halten weder μA noch μW bereit, sondern Joule, also Energie.

Im Teil 2 wurde erörtert warum ein allgemeiner Benchmark eines Konsortiums, der den Temperatureffekt auf den Energieverbrauch berücksichtigt, problematisch ist. Bei höheren Temperaturen werden die Verbrauchswerte stark beeinflusst und ungenaue Temperaturbedingungen haben einen nicht mehr vernachlässigbaren Einfluss auf das Ergebnis, den Benchmark-Score.

Um die Temperatur-Problematik besser greifbar zu machen nehmen wir die Daten aus *Bild 9* und *Bild 10*. So ist die Strom-/Energieerhöhung bei einer Temperaturänderung von 0 auf 50 °C vergleichbar mit der Änderung der Temperatur von 80 auf 85 °C. Mit anderen Worten, ein Zehntel (!) Temperaturerhöhung hat den gleichen energetischen Effekt in einem anderen Temperaturbereich.

Eine Datenquelle um den Effekt zu verdeutlichen liefert das Datenblatt *Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016*. Die gezeigten Werte über Temperatur wurden unter den Betriebsbedingungen:

- *VDDIN = 3.3V (Werte rechts der Kurve) und 1.8V (links der Kurve)*
- *ULPVERG LPEFF Enable*
- *RTC running on external 32KHz crystal*
- *PD0, PD1, PD2 in retention state*
- *BOD33 is disabled*

veröffentlicht. Aus diesen Darstellungen im Datenblatt wurden die Daten gewonnen und im Bild „STANDBY Sleep-Mode“ verarbeitet.

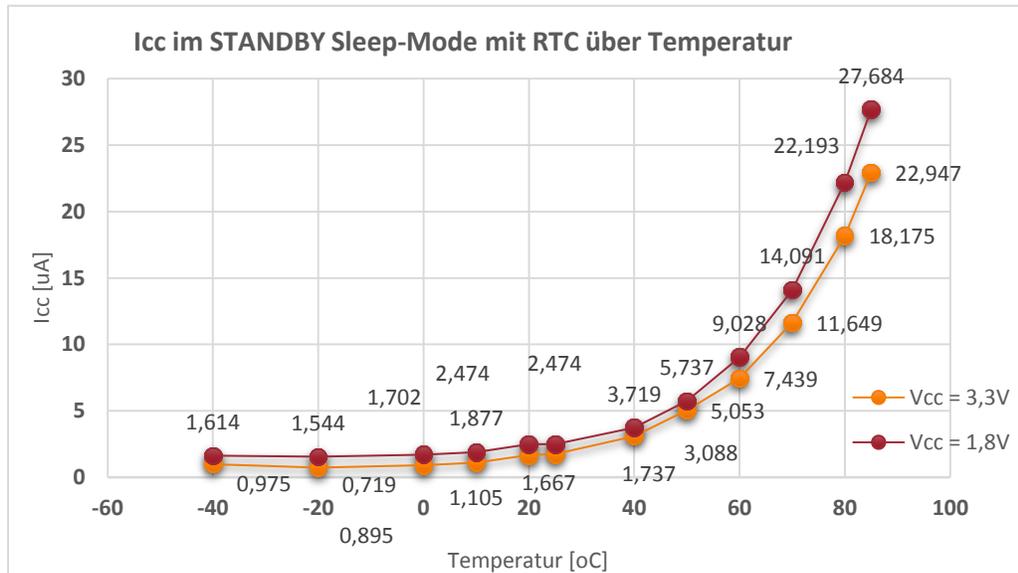


Bild 10 Datenquelle: Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016, Seite 1188
 Der Beitrag im RTC-Mode mag bei 20 Grad gering sein jedoch ist er bei 85 °C erheblich; die verbrauchte Energie ist um ca. Faktor 14 höher.

Im gleichen Datenblatt Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016, Seite 1182. Die gezeigten Werte über Temperatur wurden unter den Betriebsbedingungen:

- VDDIN = 0V (Werte rechts der Kurve) und 1.8V (links der Kurve)
- VBAT = 3,3V oder 1,8V
- RTC running on external 32KHz crystal
- BOD33 is disabled

laut Datenblatt ermittelt und wurden für die Darstellung in Bild „Back-up Sleep-Mode“ aus dem Datenblatt abgenommen.

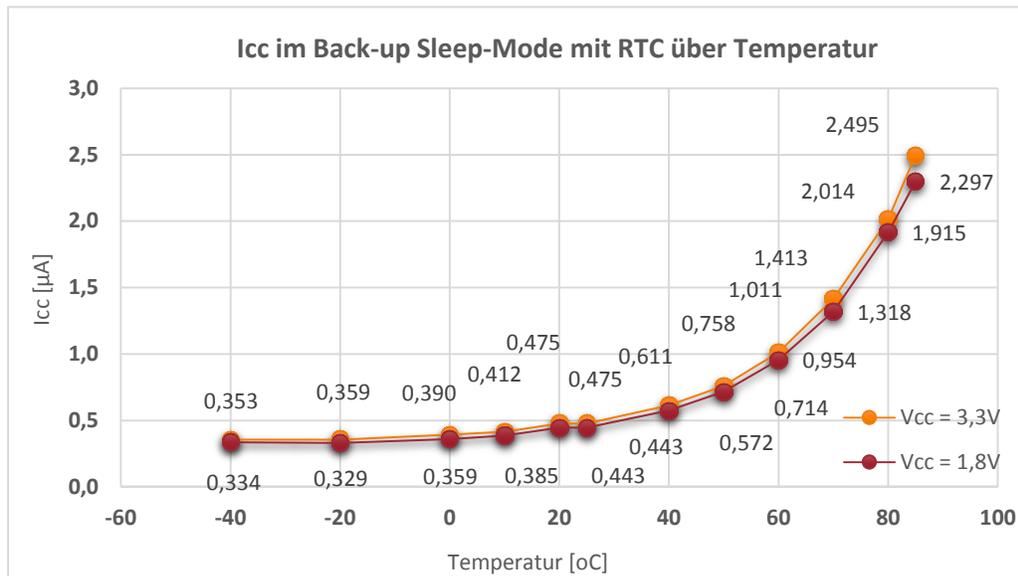


Bild 11 Quelle: Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016, Seite 1189
 Der Backup Sleep-Mode; der Beitrag im RTC-Mode mag bei 20 Grad gering sein jedoch ist er bei 85 °C erheblich; die verbrauchte Energie ist um ca. Faktor 5 höher

Operating conditions:

- VDDIN = 3.3V (orange/linke Kurve) or 1.8V (rot-braun/rechte Kurve)
- ULPVERG LPEFF Enable
- RTC running on external 32KHz crystal
- BOD33 is disabled

The datasheet (“Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016”) current consumption parameter are in “BACKUP”-(sleep)-Mode:

				typ.	max.	Units
BACKUP	powered by VBAT, VBAT consumption	1.8V	25°C	0.37	0.60	µA
			85°C	2.0	4.9	
		3.3V	25°C	0.40	0.64	
			85°C	2.1	5.1	

Bild 12 Quelle: Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016, Seite 1152
 Die Maximalwerter sind etwa Faktor 1,5 bis 2,5 über den typischen Werten. Das Verhältnis der Ströme bei 85°C zu den Strömen bei 25°C ist ca. 5. Die Stromwerte bei 85 °C sind sehr nahe den Werten in Bild 11. Mit diesen Werten sind Berechnungen zu Betriebsdauer möglich. Im gleichen Datenblatt auf Seite 196 ist die Power-Block-Struktur gezeigt, PDBACKUP umfasst den 32-kHz-Quarzoszillator und RTC-Zähler. Auf Seite 38 ist gezeigt, dass VBAT der Oszillator und RTC versorgen kann.

The datasheet (“Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-02/2015”) current consumption parameter are in “STANDBY”-Mode:

				typ.	max.	Units
STANDBY	PDO, PD1, PD2 in retention state	1.8V	25°C	0,92		µA
			85°C	TBD		
		3.3V	25°C	0,9		
			85°C	10,5		

The datasheet (“Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016”) current consumption parameter are in “STANDBY”-Mode:

				typ.	max.	Units
STANDBY	PDO, PD1, PD2 in retention state	1.8V, LPEFF disable	25°C	1,3	3,1	µA
			85°C	23,9	60,8	
		3.3V, LPEFF enable	25°C	1,2	2,7	
			85°C	20,7	45,8	

Bild 13 Quelle: Atmel Datasheets.

Die Daten von 02/2015 basieren auf Simulationen und die Daten von 06/2016 auf Daten von Charakterisierung.

The datasheet (“Atmel-42402E-SAM L22G / L22J / L22N_Datasheet_Complete-07/2016”) current consumption parameter are in “Standby”-Mode:

				typ.	max.	Units
STANDBY	RTC running on XOSC32K	1.8V, LPEFF disable	25°C	2.2	8.1	µA
			85°C	43.7	171.4	
		3.3V, LPEFF enable	25°C	2.0	7.3	
			85°C	32.0	104.1	

Bild 14 Quelle: Atmel-42402E-SAM L22G / L22J / L22N_Datasheet_Complete-07/2016, Seite 1152

Die Maximalwerter sind etwa Faktor 2 bis 2,6 über den typischen Werten. Sie sind bei 85 Grad sehr nahe den Werten im Bild 11. Mit diesen Werte sind Berechnungen zu Betriebsdauer möglich.

Wenn keine Daten des Strom- oder Energieverbrauchs bei höheren Temperaturen – nicht nur bei 85°C – in den Datenblättern stehen, wie sind dann in erster Näherung solche Daten zu ermitteln?

Kommentar: Dies ist ein Versuch der Annäherung an die Problematik wie sich der Energieverbrauch in Anwendungen gemäß einem Temperaturprofil. Dies sollte nicht als Regel verstanden werden. Die Hersteller von MCU/SoC-Bausteinen sind Ansprechpartner um die relevanten Daten zu liefern, um diese Berechnungen in einer qualitativ hochwertigen Aussage, durchführen zu können.

Der ULPBench-CP besteht im wesentlichen aus zwei (eigentlich drei) Phasen laut den verfügbaren Beschreibungen. Die Phasen sind der Betriebsmode (Codeausführung) und der Ruhemode (Echtzeituhr, -takt), zusätzlich gibt es Energieverluste in den Übergängen zwischen den Modi.

Um die Auswirkung der Betriebstemperaturen auf den Energieverbrauch bzw. die Lebensdauer bei der Versorgung mit einer Batterie zu beurteilen ohne verfügbare Herstellerdaten evaluieren wir verfügbare Messergebnisse. Dazu greifen wir auf Veröffentlichungen zurück die den ULPBench-CP nutzen.

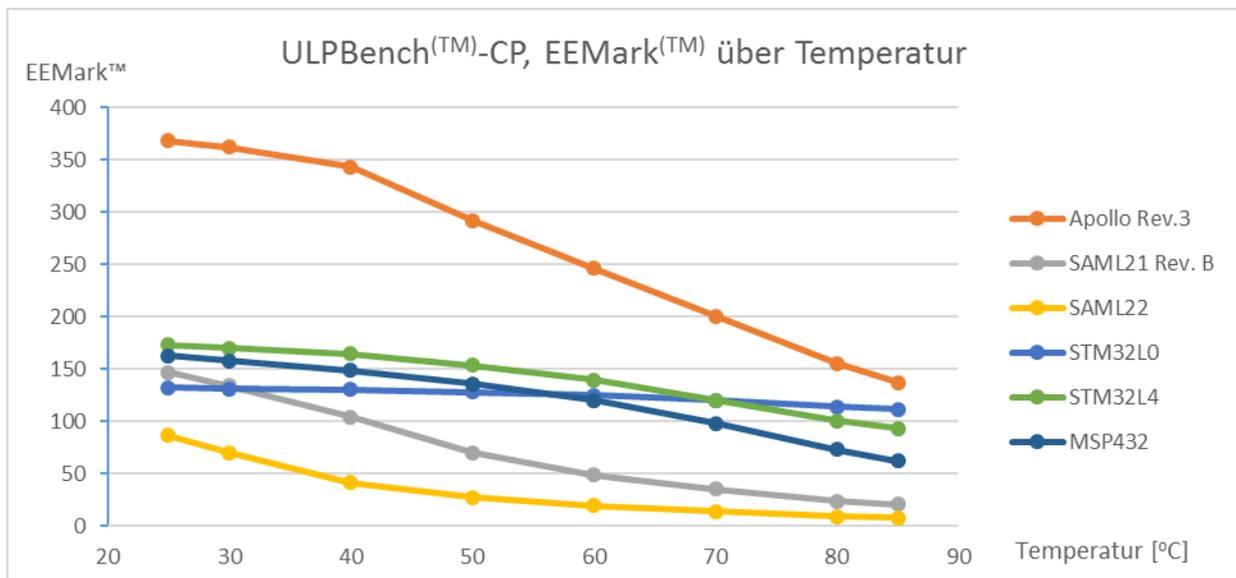


Bild 15 Datenquelle: DESIGN&ELEKTRONIK

Wie wir in Bild 10 und Bild 11 gesehen habe ändert sich der Benchmarkwert EEMark-CP stark mit der Temperatur.

Baustein	Apollo Ambiq rev.3	SAML21 rev. B	SAML22	STM32L0	STM32L4	MSP432
EEMark™-CP, 25°C (BW25)	368,0	146,4	86,3	172,7	132,5	162,6
EEMark™-CP, 85°C (BW85)	136,9	20,7	8,0	92,3	113,9	61,9
Faktor BW25/BW85	2,69	7,08	10,73	1,87	1,16	2,63

Aus der Tabelle ergibt sich kein Hinweis, dass der Werteverlauf wie in Bild 10/Bild 11 auf andere MCU/SoCs übertragen werden kann. Der Faktor BW25/BW85 zeigt eine Spannweite von 1,16 bis 10,73. Herstellerdaten sind notwendig, um die Auswirkung der Betriebsbedingungen beurteilen zu können.

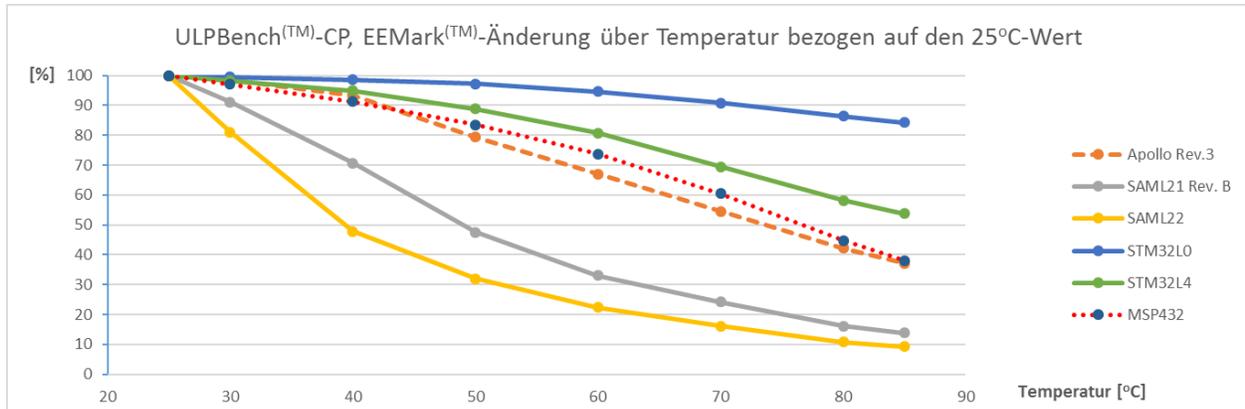


Bild 16 Prozentuale Änderung des ULPBench- EEMark-Wertes

Damit verifizieren wir unter Berücksichtigung der Daten in *Bild 11* (SAML21, Rev. B) und veröffentlichten Daten der Design&Elektronik (EEMark-CP: SAML21 Rev.B, LPEff on – 137,33) wie sich der Benchmarkwert EEMark verändert. Wie wird sich die Temperaturabhängigkeit des Ruhestroms (*Bild 13*) widerspiegeln?

Für die weiteren Betrachtungen nehmen wir die Werte vom SAML21J18 Rev. B, LPEff on, mit dem von Design&Elektronik veröffentlichtem EEMarks-CP von 137,33. Der Energieverbrauch wird als temperaturunabhängig angenommen (wie bei 25°C ermittelt).

Aus Berechnungen entnehmen wir die Betriebsenergie mit 3,72 µJ, die Ruhemode-Energie mit 3,69 µJ. Wir nehmen an, dass die Abhängigkeit des (RTC)-Ruhestroms von der Temperatur dem Verlauf in *Bild 11* entspricht. Weiter nehmen wir an, dass die Energieaufnahme im Betriebsmodus weitgehend temperaturunabhängig ist.

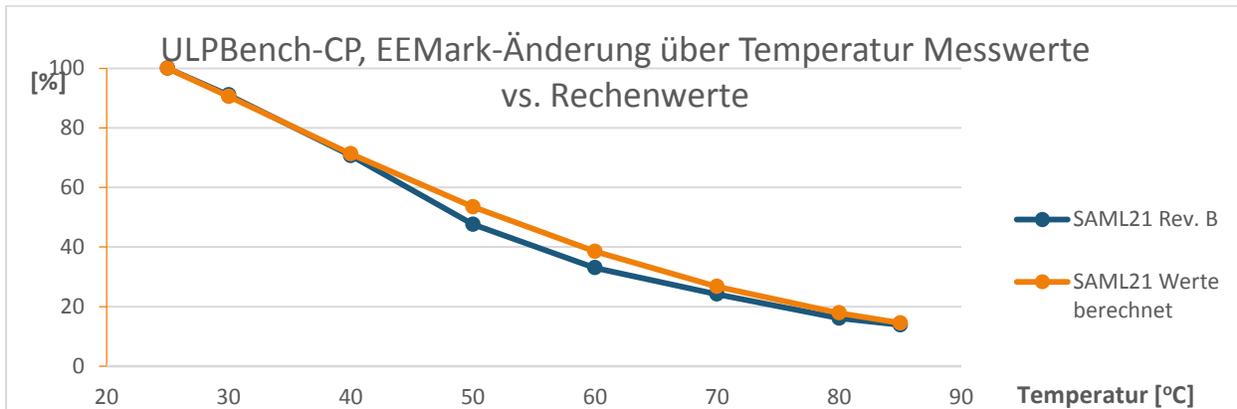


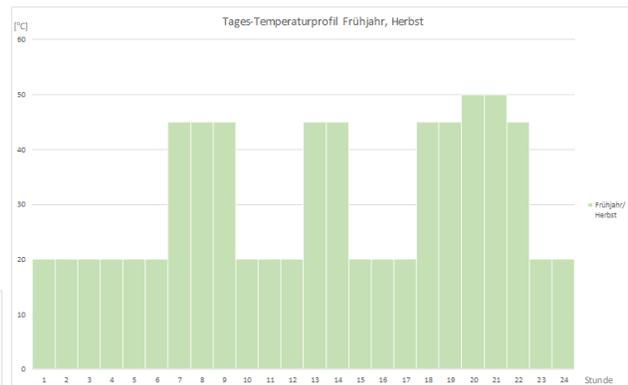
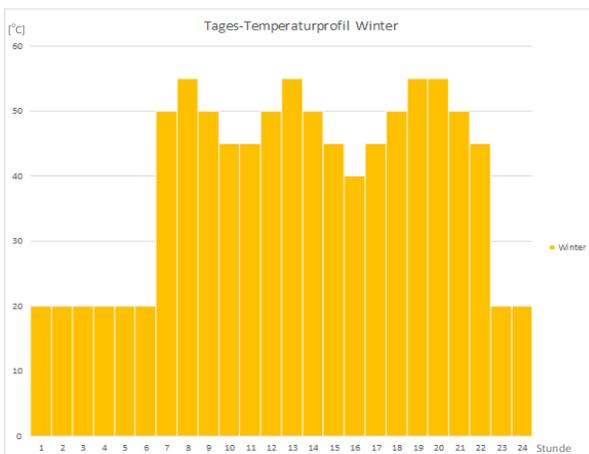
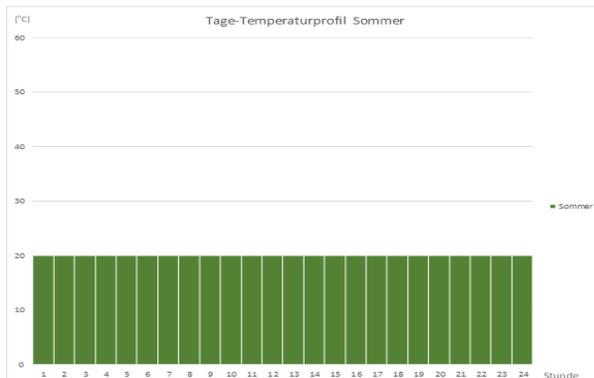
Bild 17 Die Gegenüberstellung der Energieaufnahme von gemessenen Werten und errechneten Werten zeigt, dass die Annahme, der Betriebsstrom ist weitgehend temperaturunabhängig, berechtigt ist.

Aus den Daten kann geschlossen werden, dass die Energieaufnahme steigen wird, wenn reale Temperaturprofile angelegt werden.

TEMPERATURPROFIL, EIN ANWENDUNGSBEISPIELE

Im ersten Beispiel betrachten wir einen Heizkostenzähler, der an einem Heizkörper montiert ist. Zur Vereinfachung nehmen wir an, dass es drei Heizsituationen während eines Jahres gibt, zwei Übergangsphasen (Frühjahr, Herbst, jeweils 2 Monate), Sommerbetrieb mit Temperaturen um 25°C für ca. 4 Monate, und den Winterbetrieb, die Heizperiode, mit 4 Monaten. Die Heizprofile sind für 24-Stunden dargestellt und gelten in diesem Beispiel für jeweils 90 Tage. Vereinfacht wird jedes Quartal in 90 Tage eingeteilt mit 360 Tage im Jahr. In den Übergangsphasen nehmen wir ferner an, dass am Morgen eine Aufheizphase, gefolgt von einer Heizphase, die wiederum in eine „heizlose“ Phase mündet bevor der Kreislauf von vorne beginnt. Der Winterbetrieb ist gleichrangig betrachtet außer dass die Temperaturen und Zeitphasen anders sind.

Für die Auswirkungen der Temperaturprofile auf die Laufzeit bzw. den EEMark-Wert betrachten wir eine Atmel-MCU SAM-L21, da dort RTC-Stromwerte über die Temperatur verfügbar gemacht sind. Die verwendeten Daten wurden bereits im vorangegangenen Abschnitt angesprochen.



Für die Anwendungsbetrachtung wird bei batteriebetriebenen Produkten meist die Lebensdauer entscheidend sein. Die Energiebetrachtung ist hier das Mittel-zum-Zweck. Aus dem Energieverbrauch wird die Lauf-/Betriebszeit unter zu Hilfenahme einer Zielbatterie errechnet.

Der absolute Energieverbrauch wird je nach Auslegung der Funktionen und Schaltung eines Heizkostenverteilers unterschiedlich sein. Aus den Berechnungen jedoch kann der Mehrverbrauch der MCU benannt werden. Er ist um ca. 32-Prozent höher als der Vergleichswert, wenn die Temperatur dauerhaft 25°C wäre. Um wie viel sich die Lebensdauer reduziert, kann dann unter Berücksichtigung der übrigen Energieverbraucher der Applikation ermittelt werden.

Bild 18 Die drei grob vereinfachten Temperaturprofile dienen der Veranschaulichung des Einflusses der Temperatur auf den Energieverbrauch bzw. der Lebensdauer.

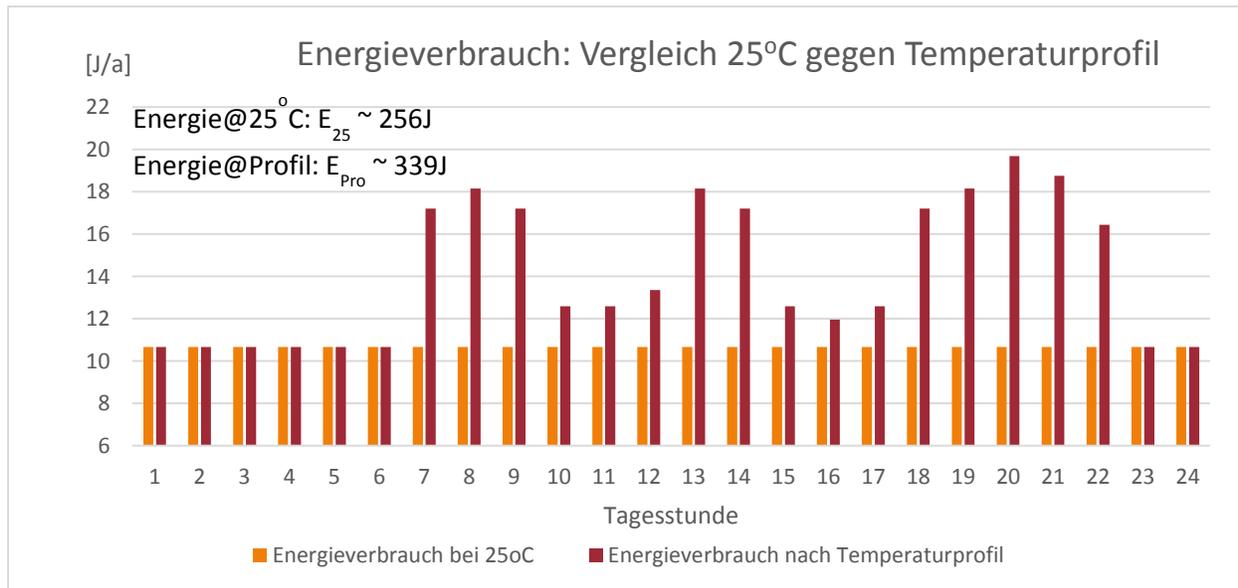


Bild 19 Der Energieverbrauch wird am Beispiel der MCU SAML21 anhand der vorangegangenen Temperaturprofile dargestellt. Die Energie ist kumulativ anhand der Tagesstunden für das gesamte Jahr dargestellt.

Die Berechnungen zeigen, dass die Anwendung von Temperaturprofilen der Betriebsbedingungen schon bei Temperaturen weit unter der maximal definierten Betriebsspannung einen signifikanten Einfluss zum Energieverbrauch und der Betriebsdauer beiträgt. Die Temperaturabhängigkeit des RTC-Mode-Betriebs und der Anteil an der gesamten Energieaufnahme sind die Eckpunkte wie sehr der Energieverbrauch über die Betriebstemperatur ausbildet.

Fazit

Der Einfluss der Betriebstemperatur auf den Energiebedarf hat gegebenenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Betriebslebensdauer. Ein weiterer Einfluss sollte berücksichtigt werden, wenn die Energiezufuhr, zum Beispiel bei „Energie-Harvesting“-Systemen in der Spitzenenergie-Leistung beschränkt ist. Ein wesentlich feinmaschigeres Energieprofil ist dann angesagt.

Was wir hier mit kleinen Energiemengen betrachtet haben decken Feldversuche mit E-Automobilen auf. Die verfügbare Energiemenge und der Verbrauch sind von Umgebungsbedingungen abhängig wie zum Beispiel der Außentemperatur, dem Nutzerprofil (Klimaanlage, Fahrverhalten) und Verkehrssituationen.

ENERGIEVERBRAUCH MODERNER MIKROKONTROLLER SYSTEME

TEIL 4: MCU DATENBLÄTTER, BETRIEBSMODI, CONTROLBITS UND -REGISTER, STROM- UND MODETRANSFERPARAMETER

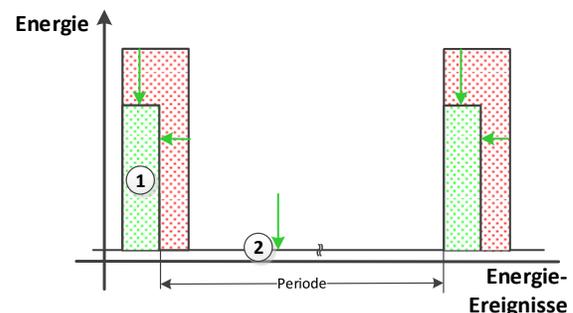
Die vorangegangenen Teile haben sich bereits (im Rahmen der Evaluierungen) mit den Angaben in den Datenblättern befasst. Die Datenblätter sind dabei in ihrer letzten Version im Internet abrufbar, nicht jedoch die Vorgängerversionen. Sind die einzelnen Versionen nicht lokal gespeichert, werden Aussagen zum Zeitpunkt einer Betrachtung wie zum Beispiel der Energieverbrauch nicht mehr eindeutig nachvollziehbar. Ein anderes Beispiel, wenn auch selten, ist, dass Produkte beworben werden, die Marketingaussagen anhand von Datenblättern nicht einsehbar sind. Ein Beispiel hierfür ist die jüngste Ankündigung von Apollo 2, ein Produkt von Ambiq Micro.

Wenn wir die Energieeffizienz bei der Auswahl des am besten geeigneten Mikrocontrollers beurteilen wollen, stehen und verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Resultate aus Benchmarks nach ULPBench von EEMBC
2. Artikel, die Messungen an MCUs durchführt haben und deren Resultate auch veröffentlicht sind
3. Dokumente der MCU-Anbieter
4. Veröffentlichungen in wissenschaftlichen oder technischen Zeitschriften, Kongressen, etc.

RESULTATE NACH ULPBENCH VON EEMBC

Wie in den vorangegangenen Teilen besprochen, ist der ULPBench so definiert, dass er die einfachste Aussage über den Energieverbrauch liefert. Ein zusammenhängend ausgeführter RUN-Mode (Code wird abgearbeitet) und einem RTC-Mode, indem die Periode von einer Sekunde mit 50ppm Genauigkeit erzeugt wird. Die getesteten Devices müssen nicht den typischen Datenblattwerten entsprechen.



Jede Anwendung die über diese einfache Definition hinaus geht kann Verbrauchswerte liefern, die die EEMark-Rangliste auf den Kopf stellt. Hier sind drei beispielhaft genannt:

- Umschaltverluste zwischen den verschiedenen Powermodi und notwendiger Code (z.B. ein zwischengeschaltetes real-time Betriebssystem - RTOS)
- Peripherie, insbesondere digitale Funktionen mit erhöhtem Datendurchsatz und analoge Funktionen wie ADC/DAC/Verstärker usw.
- Umschalt- und Limitierungen der Abfolge/Sequenz von Modezuständen

Alle drei genannten Konditionen werden nicht durch den „ersten“ Benchmark von EEMBC abgedeckt.

Die Hersteller von MCU-Linien liefern in der Regel eine Vielzahl von Dokumenten. Wir beschränken uns auf die funktionellen Beschreibungen, elektrischen Charakteristika, und anwendungsbezogene Dokumentationen. Softwarebeispiele und Entwicklungsumgebungen (Hard-, Software) lassen wir außen vor.

Im *Bild 20* sind alle Seiten zusammengefasst die in irgendeiner Weise mit der Betriebseinstellung und -änderung verknüpft werden können und zum sicheren Betrieb relevant sind/sein könnten.

Hersteller	Datenblätter etc.	Seiten Powermodi, el. Parameter/ Gesamtzahl	Familie
Microchip/ Atmel	Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016 Atmel-42412B-.._AT04296_Application Note-02/2016 Atmel-42411B-U LP-Tech..-AT06549_App Note-08/2015 Atmel-42471A- ADC-...._AT12705_App Note-06/2015	227/1255 15/19 12/14 10/12	SAML21
ST	9 Datasheets, DS10969 taken: DocID027692 Rev 2, March 2016 RM0395: DocID027296 Rev 1, Feb. 2016 AN4746: DocID028138 Rev 1, Optimizing... Power ... AN4635: DocID027290 Rev 3; LP UART Operation AN4621: DocID027173 Rev 1: ULP features.... AN4759: DocID028310 Rev 2: ... LP-RTC ...	49/193 127/1614 28/30 30/43 20/25 11/51	STM32L4 51 Devices
TI	SLAS826E–MARCH 2015–REVISED JULY 2016 Technical Reference Manual; SLAU356E March 2015–Revised December 2016 (ARMv7-M Architecture Reference Manual) (SLAA728–December 2016) SLAA657A–March 2015–Revised June 2016 SLAA658A–March 2015–Revised June 2016 SLAA668–March 2015 SLAA640–March 2015	47/200 77/817 --/-- 77/817 6/8 11/12 14/15	MSP432P401 2 Devices

Bild 20 Die verfügbaren Daten um die energieeffizienteste Anwendung zu erreichen, sind vielfältig. Es wird nur eine Familie innerhalb des gesamten Portfolios betrachtet.

Die Daten die notwendig sind um einen sicheren und energieeffizienten Betrieb über alle Betriebsspannungs- und Betriebstemperaturen zu erreichen sind wesentlich umfangreicher als es die „wenigen“ veröffentlichten Powermodi suggerieren:

- Die Betriebsspannung und -frequenz kann verschiedene Bereiche abdecken
- Instruktionen und Powermode-Kontrollbits
- Externe Bauteile z.B. Induktivität bei DC/DC-Betrieb
- Diverse Um-, Ein/Ausschaltwörter und -bits; Abschalten der von interner Spannungsversorgung
Zulässige Sequenzen und das erforderliche Timing
- Takterzeugung, -routing und ein-/ausschalten

Nicht gezählt sind die Seite die über folgende Einstellungen, Funktionen und Betriebszustände bestimmen:

- Interrupt und „Exception“-Handling

- Memory-Konditionen wie „Waitstate“-Bedingungen, Datenerhalt in Datenspeicher (SRAM retention), usw.
- Speicherschutz/MMU-Einstellungen etc.
- Betriebs-/Powermodi während Debug-Betrieb
- Peripheriefunktionen Enable/Disable, Power-/Performance-Einstellungen und Änderungsbedingungen
- Abspeichern und Re-Konfiguration von Funktionen

Die aktuellen Systemarchitekturen bedeuten, dass viele Betriebsbedingungen nach dem kleinsten gemeinsamen Nenner festgelegt sind. Dies bedeutet zum Beispiel, dass beim Akzeptieren und Abarbeiten einer Anforderung, wie z.B. Interrupt Request, auf ein hohes Niveau des Leistungs- und Energiebedarfs geschaltet wird. Nur durch zusätzliche Software und den Zeit- und Energiebedarf von dem fest-definierten Betriebszustand in einen passenderen gewechselt werden kann.

Bild 20 zeigt exemplarisch, dass die energie-optimierte Applikation ein umfangreiches Studium der Literatur erfordert. Die jeweilige Implementierung mit „Clock“- und „Power“-Gating, zahlreichen Oszillator und Betriebsspannungszuständen und deren Kontrolle, Instruktionen und elektrischen Charakteristika, etc. erfordert eine gründliche Planung der Energiespar-Zustände.

Auch die dynamischen Randbedingungen sind von größerer Bedeutung und nicht alle Energieniveaus sind von einem aktuellen Betriebszustand erreichbar.

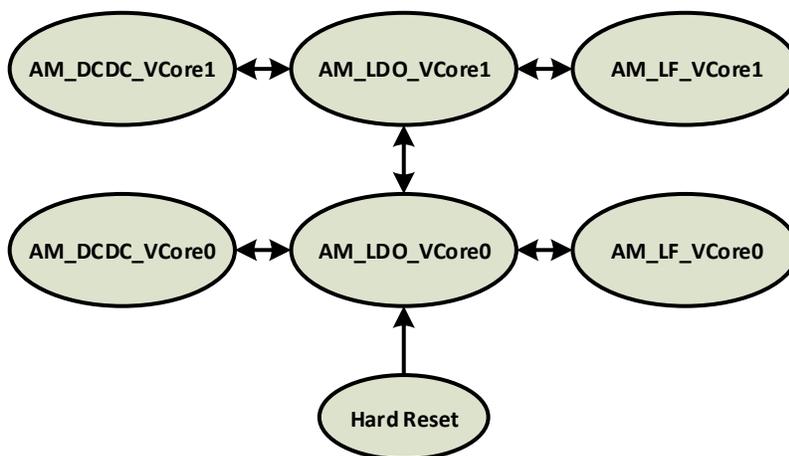


Bild 21 Quelle: TI SLAA657A

Das Bild suggeriert, dass kein, ein oder zwei Zwischenschritte notwendig sind um von einem Mode (LDO/DC-DC und LF128KHz) zu einem anderen zu kommen. Weiter Bedingungen (z.B. Latenzzeit) sind nicht genannt, wohl aber notwendig. Im Bild sind „nur“ die Übergänge im „Active Mode“ gezeigt. Übergänge zwischen Betriebs-/low-Power-Modi sind nicht enthalten.

Zu den elektrischen Charakteristika ist noch anzumerken, dass diese als statisch, das heißt, im eingeschwungenen Zustand zu betrachten sind. Umschalt- und Einschwingverluste sind in den Datenblättern nicht genannt. Bestenfalls lassen einige Abschnitte in Applikationsschriften Hinweise finden.

So lassen sich für den STM32L476 (EEMark=153) aus Datenblattwerten mit $1700 \mu\text{A}@2\mu\text{s}/3\text{V}$ eine „Wakeup“-Energie von $\sim 0,1\mu\text{J}$ errechnen. Beim Messen des Energieverbrauches mit der ULPBench-CP soft- und Hardware ergibt sich ein Verbrauch von $6,66 \mu\text{J}$. Bei der Periode von einer Sekunde ist demnach die „Wakeup“-Energie vernachlässigbar. Wenn die ULPBench-Workload nun auf 100 Ereignisse verteilt ist, ist die „Wakeup“-Energie ($10,2 \mu\text{J}$) signifikant größer als die „Workload“-Energie von $6,56 \mu\text{J}$.

Auch der „Overhead“ um aus bestimmten Energiesparmodi in den Betriebsmode zu kommen, kann bei entsprechender Periode die Wahl eines weniger effizienten Betriebsmodes anzeigen. Ein Beispiel von SiLabs zeigt dies.

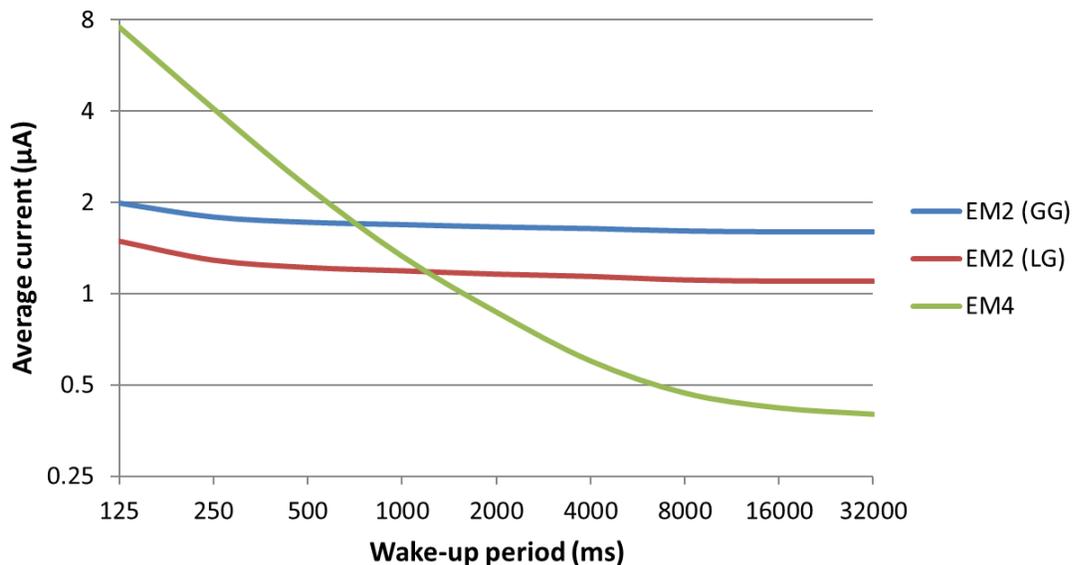


Bild 22 Quelle: SiLabs, 2013-11-25 - AN0027_Rev1.03; Power consumption for periodic wake-up from EM2 vs EM4.

The report suggests that Energy Mode 4 offers the lowest current consumption, no full retention, thus requiring the device to go through a reset cycle when waking up. This reset cycle requires significantly longer time than a wake-up from EM2 or EM3.

Die Übergänge zwischen einzelnen Energiemodi sind in der Regel nicht in allen erdenkbaren Kombinationen möglich. Hierzu ein Beispiel von NXP/Qualcomm's Kinetis-MCUs.

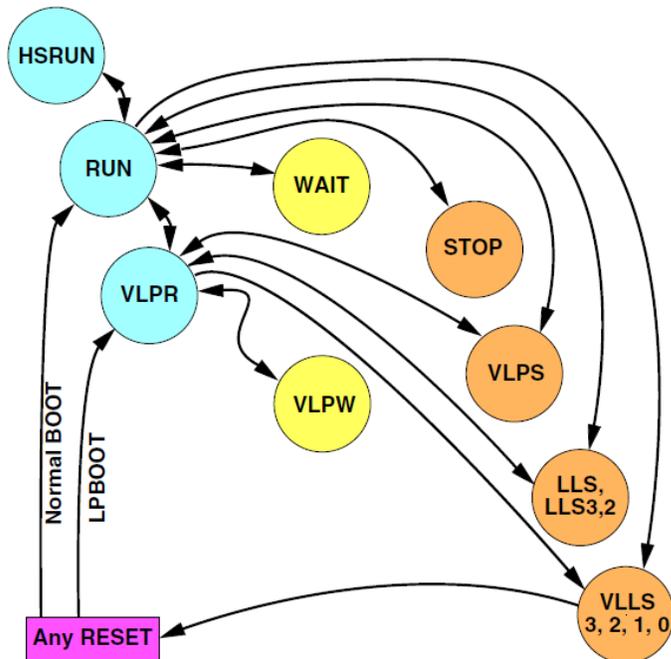


Bild 23 Quelle: NXP, **AN4503: Power Management for Kinetis MCUs, Rev. 2, 04/2015**
Es ist nicht jeder Mode von jedem Mode erreichbar.

Wie im *Bild 23* beispielhaft zu sehen, kann der Mode HSRUN nur vom RUN-Mode aus erreicht werden. Auch zeigt es, dass jeder „Low-Power“-Mode nur in den RUN-Mode verlassen werden kann. Da keine Ausnahme hiervon gezeigt ist, muss davon ausgegangen werden, dass jedes Event, jeder Interrupt entweder im RUN-Mode oder im „Very-Low-Power-RUN“-Mode abgearbeitet wird oder dort ein anderer Mode per Software gewählt werden muss. Dies heißt, dass immer zum aufrufenden RUN/VLPR-Mode zurückkehrt.

Diese Transfers zwischen den Modes unterliegen Zeit-/Taktbedingungen die von Nanosekunden bis Millisekunden dauern. Dabei ist die Relation zu den üblichen Ausführungszeiten der ULPBench-Workload interessant, die von ca. 0,4 bis 2 Millisekunden reicht. Dies dabei benötigten Taktzyklen sind im Bereich von 10.000 bis 23.000 Zyklen.

Wo stehen wir?

Wir haben nun kennengelernt wie ein Ansatz zur Vergleichbarkeit der MCU/SoC Energieverbräuche in der Industrie durch den ULPBench der EEMBC-Organisation erfolgreich eingeführt wurde. Für die Eignung einer MCU/SoC-Familie für energie-sensitive Produkte sind mehr Betrachtungen notwendig als im ULPBench durchgespielt worden sind.

Den Einfluss auf den Energieverbrauch im Standby und Active (RUN) Mode hat der Anwender in der Regel nur durch S/W Code Effizienz, nicht aber durch Prozess Technologieauswahl oder Chip Design. Die Ursachen zum Beispiel für die Temperaturabhängigkeit des Energieverbrauchs sind anwenderunabhängig. Der Anwender kann - bestenfalls mit dem Hardwarehersteller - den dynamischen Energieverbrauch optimieren mit geeigneten Methoden der Betriebsmodeverwaltung. *Bild 20* zeigt beeindruckend welchen Erklärungsaufwand die Industrie betreibt. Ziel ist, dass der Anwender den

jeweils best-möglichen Betriebsmode nutzen kann. Die Informationen in *Bild 21* und *Bild 23* zeigen aber auch die Limitierungen zum Wechsel der Betriebsmodi. Die anzuwendende Strategie in der Zukunft von Low Energy Systemen ist, Umschaltvorgänge verkürzen, vermeiden und einfacher strukturieren.

Quo Vadis, wo geht's hin?

Die steigende Anzahl der Betriebsmodi-Wechsel stellt neue Herausforderungen dar. Wir haben gesehen, dass eine große Anzahl von Informationen und deren Kombinationen durchgearbeitet werden müssen. So können die Hardwaremöglichkeiten der MCU/SoC-Produkte optimal angewendet werden. Ein besserer Umgang mit Betriebsmodi ist eine Lösung. Diese Lösung kann dem Anwender wie dem Hersteller eine klare Struktur der angewendeten Modi und einen gut definierten Wechselprozess an die Hand geben. Die Wartbarkeit und spätere Produktverbesserungen werden sicher.

Dazu gibt es bereits innovative Ideen.

VERWEISE

- [1] Frank Riemenschneider, Weka Verlag, „Prozessor-Benchmarks – wer manipuliert sie am Besten?“, *DESIGN&ELEKTRONIK*, 2013.
- [2] Frank Riemenschneider, Weka Verlag, *DESIGN&ELEKTRONIK*, „Ultra-Low-Power-Mikrocontroller Benchmark ULPBench entzaubert,“ 2016.
- [3] „Embedded Microprocessor Benchmark Consortium,“ [Online]. Available: <http://www.eembc.org>.
- [4] Frank Riemenschneider, „Benchmark - ULPBench debunked,“ *DESIGN&ELEKTRONIK*, Oktober 2016.
- [5] Atmel (R), „Atmel-42385J-SAM L21_Datasheet_Complete-06/2016,“ 2016.
- [6] Analog Devices (R), „Analog Devices AN-1402, Rev0: Initial Version“.
- [7] Texas Instruments Inc., „Unbekannt,“ (<http://slideplayer.com/slide/5873902/>).

Weitere verwendete Dokumente sind in den Quellenangaben zu finden.