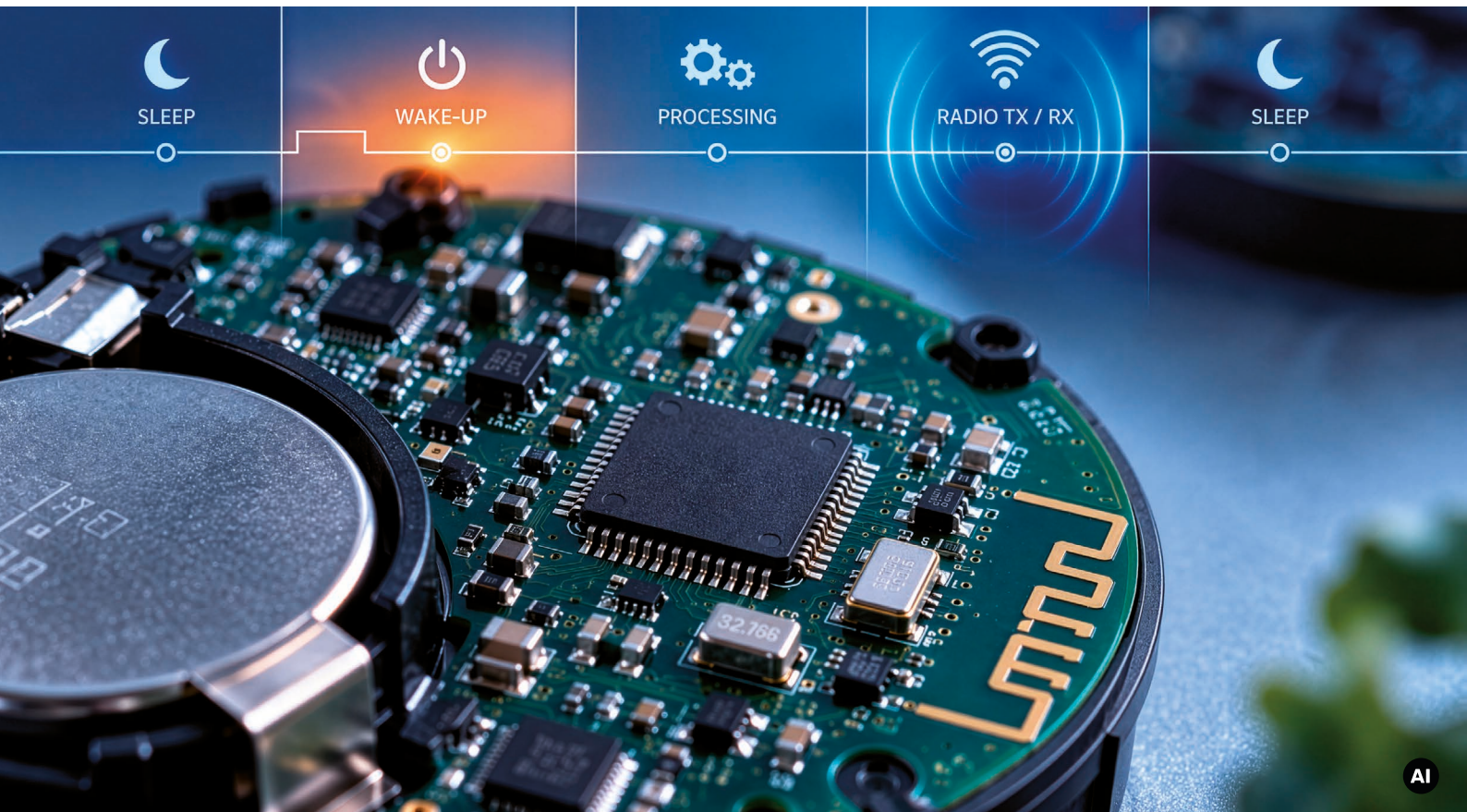


Timing im Funkknoten

Warum Zeitbasis, Systemtakt und Funkreferenz je nach Betriebszustand andere Aufgaben erfüllen, beantwortet dieser Beitrag.



Bei vielen batteriebetriebenen IoT-Knoten ist Funkbetrieb nur eine von mehreren Phasen. Das System schläft, wird zu einem geplanten oder extern ausgelösten Zeitpunkt aktiv, verarbeitet Daten, startet bei Bedarf den Funkteil, sendet oder empfängt und kehrt anschließend wieder in einen stromsparenden Zustand zurück. Aus Sicht des Timings stellt sich deshalb nicht nur die Frage nach der benötigten Frequenz. Entscheidend ist, welche Zeit- oder Frequenzfunktion in welchem Betriebszustand verfügbar sein muss.

Damit rückt die Timing-Architektur in den Mittelpunkt. Ein Funkknoten hat nicht einfach „einen Taktgeber“. Je nach SoC, Funkarchitektur und Power-Mode können mehrere Funktionen nebeneinander existieren, unterschiedliche Quellen nutzen oder teilweise auf dieselbe physische Quelle zurückgreifen. Für die Auswahl eines Resonators oder Oszillators ist deshalb entscheidend, welche Aufgabe die jeweilige Quelle im System tatsächlich übernimmt.

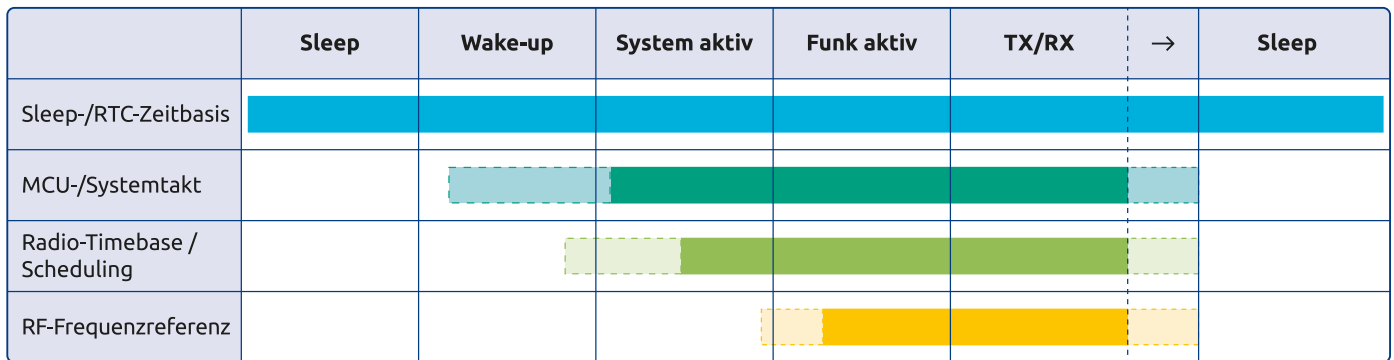
Nicht ein Takt, sondern mehrere Timing-Rollen

Für die Systembetrachtung lohnt es sich, vier Funktionen zunächst gedanklich zu trennen. Eine niederfrequente Sleep- oder RTC-Zeitbasis kann die Zeit fortschreiben und ein späteres Wake-up terminieren. Der MCU- oder Systemtakt versorgt Verarbeitungseinheiten und Peripherie. Daneben kann eine Radio-Timebase beziehungsweise Scheduling-Zeitbasis für Zeitstempel, Scheduling oder die zeitliche Planung von Funkoperationen zuständig sein. Davon zu unterscheiden ist die RF-Frequenzreferenz, die für den aktiven Funkbetrieb als Referenz für das Radio bzw. die Frequenzsynthese dient.

Bild 1 bringt Timing-Funktionen eines duty-cycled IoT-Funkknotens: Eine niederfrequente Sleep-/RTC-Zeitbasis kann über den Betriebszyklus verfügbar bleiben, während Systemtakt, Radio-Timebase und RF-Frequenzreferenz je nach Betriebszustand hinzukommen.



Autor:
Hendrik Nielsen
Technical Sales Specialist FCP
WDI AG
hnielsen@wdi.ag
www.wdi.ag



schematisch, systemabhängig

Bild 1: Beispielhafte Timing-Funktionen eines duty-cycled IoT-Funkknotens

Gestrichelte Bereiche kennzeichnen Übergänge bzw. architekturabhängige Verfügbarkeit.

Diese vier Funktionen bedeuten nicht, dass vier separate Taktbausteine benötigt werden. Clock-Domänen können gekoppelt sein, interne Oszillatoren zur Verfügung stehen oder Zeitbasen zwischen unterschiedlichen Taktomänen synchronisiert werden. Eine physische Quelle kann mehrere Funktionen bedienen; umgekehrt kann ein System für verschiedene Betriebszustände mehrere Quellen einsetzen.

Dabei darf die Timing-Funktion nicht mit der Bauteilkategorie verwechselt werden: Ein Schwingquarz ist ein passiver Resonator, XO und TCXO sind vollständige Oszillatoren, eine RTC ist eine Zeitfunktion beziehungsweise ein entsprechender Baustein. Welche physische Taktquelle eine Funktion versorgt, hängt von der jeweiligen Architektur ab.

Im Sleep bleibt nicht alles stehen

Gerade in duty-cycled IoT-Anwendungen zeigt sich, warum diese Trennung wichtig ist. Ein tiefer Low-Power-Zustand bedeutet nicht zwangsläufig, dass jede Zeitfunktion abgeschaltet wird. Je nach SoC und gewähltem Power-Mode kann eine niederfrequente Clock-Domäne weiterlaufen, während hochfrequente System- oder Funkdomänen ruhen.

Das ist etwa dann relevant, wenn das System nach einer definierten Zeit wieder aufwachen oder eine geplante Funkoperation vorbereiten soll. Je nach Architektur kann eine hochfrequente Zeitbasis für Zeitstempel und geplante Funkoperationen in einem tiefen Low-Power-Zustand nicht zur Verfügung stehen. Eine weiterlaufende niederfrequente Zeitbasis kann dann dazu dienen, das Timing über den Sleep-Zustand hinweg zu erhalten bzw. die entsprechenden Zeitbasen beim Übergang zu synchronisieren.

Damit werden zwei unterschiedliche Betrachtungen sichtbar. Eine Frequenzabweichung der Sleep-Zeitbasis kann sich über die Schlafdauer als akkumulierte Zeitabweichung und damit als Unsicherheit des geplanten Ereigniszeitpunkts auswirken. Dieser Zusammenhang gehört zum Timing-Budget des Systems; Scheduling ist eine mögliche Anwendung davon. Die Genauigkeit beziehungsweise Stabilität einer RF-Referenz betrifft dagegen die für den aktiven Funkbetrieb benötigte Frequenzreferenz. Beide können in ppm spezifiziert sein und beschreiben dennoch nicht dieselbe Systemgröße.

Wie Clock-Domänen über Power-Modi hinweg behandelt werden, ist keine allgemeine Eigenschaft von „Funkknoten“. Sie hängt vom konkreten SoC, der Power-Management-Architektur und den gewählten Betriebsmodi ab. Ein dauerhaft empfangendes Gerät, ein Gateway und ein batteriebetriebener Sensor stellen deshalb unterschiedliche Anforderungen.

Wake-up: Start ist nicht gleich Start

Besonders kritisch wird die Begriffswahl beim Übergang aus dem Sleep. In Datenblättern und App Notes tauchen Begriffe wie Startup Time, Wake-up Time, Enable Time, Stabilization Time oder Lock Time auf. Sie bezeichnen jedoch nicht automatisch denselben Vorgang.

Bei einem externen Schwingquarz ist das Anschwingen eine Eigenschaft der gesamten Oszillatorschaltung. Der passive Resonator startet nicht unabhängig von seiner Umgebung. Bei einer Pierce-Oszillatorschaltung kann sich die Startup Time auf den Aufbau der Oszillation bis zu einem definierten stabilen Schwingungszustand beziehen. Wie schnell dieser Zustand erreicht wird, hängt nicht allein vom Resonator ab, sondern vom Zusammenspiel mit der Oszillatorschaltung und ihren Betriebs- und Lastbedingungen.

Bei einem vollständigen Oszillator kann „Startup Time“ dagegen die Zeit vom Einschalten bis zu einem definierten Ausgangszustand beschreiben. Besitzt der Oszillator eine Output-Enable- oder Standby-Funktion, kann zusätzlich ein eigener Enable-to-Output-Parameter spezifiziert sein. Angaben zu Settling- oder Stabilization-Zeiten dürfen wiederum nur dann herangezogen werden, wenn das konkrete Datenblatt einen solchen Parameter tatsächlich definiert.

Daneben umfasst der Systemstart weitere Vorgänge. Die CPU kann aus einem Low-Power-Zustand zurückkehren, Clock-Domänen können aktiviert werden, der Funkblock kann seine eigene Startsequenz durchlaufen, und je nach Architektur können Kalibrierungen oder Synthesizer- beziehungsweise PLL-Lock-Vorgänge hinzukommen. Reihenfolge, Parallelität und notwendige Schritte hängen vom konkreten System ab. Deshalb ist „System wach“ nicht zwangsläufig gleichbedeutend mit „Funk bereit“.

Bild 2 zeigt schematisch den Ablauf zwischen Wake-up und Funkbereitschaft: Je nach System können nach dem Wake-up-Ereignis mehrere teilweise überlappende Vorgänge folgen, etwa CPU-Wake-up, das Aktivieren benötigter Clock-Domänen, das Anschwingen der Oszillatorschaltung oder der Startup eines Oszillators, die Aktivierung des Funkblocks sowie gegebenenfalls Kalibrier- oder PLL-/Synthesizer-Lock-Vorgänge.

Für das Design ist diese Unterscheidung entscheidend. Wer nur einen einzelnen Startup-Wert aus einem Datenblatt übernimmt, weiß noch nicht, welcher Anteil der vollständigen Wake-up-Latenz damit beschrieben ist. Erst wenn klar ist, welche Funktion startet und welcher Zustand am Ende erreicht sein muss, lässt sich ein Zeitbudget sinnvoll aufstellen.

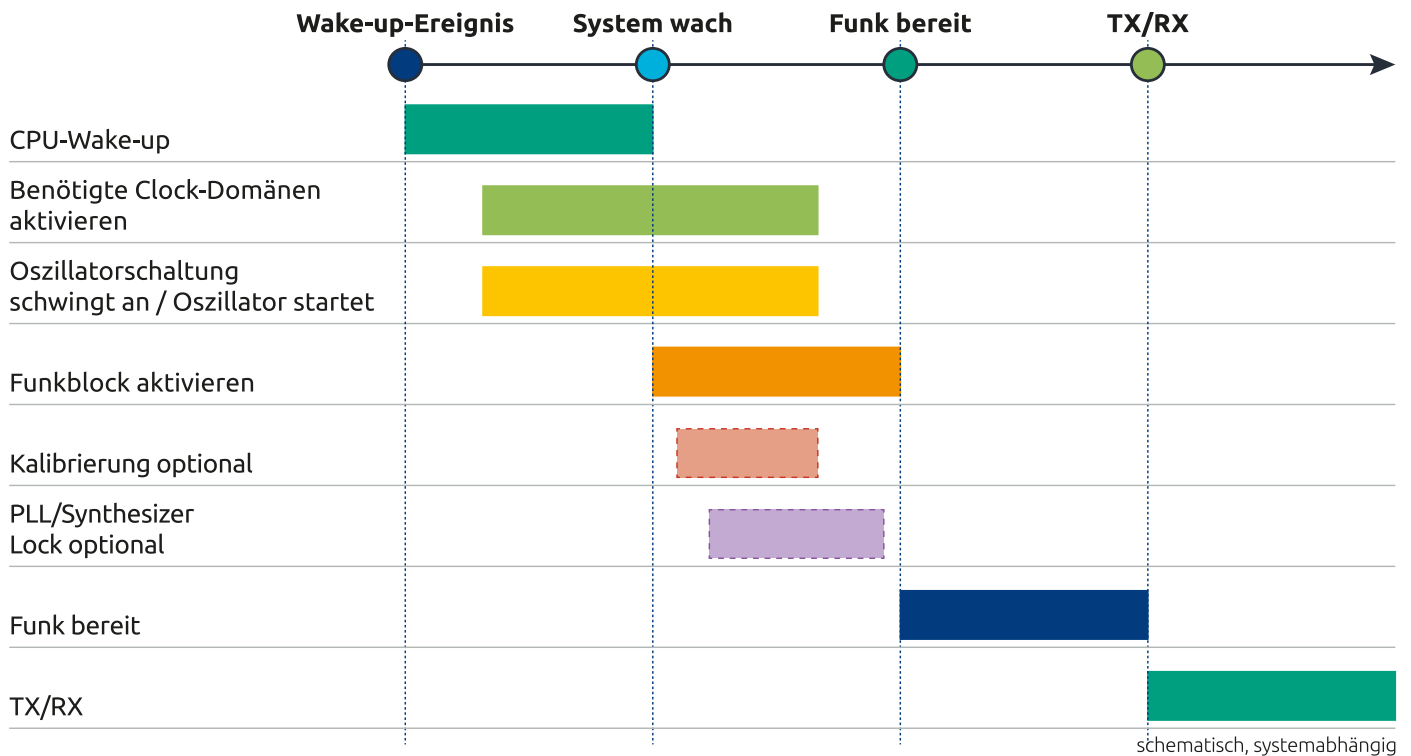


Bild 2: Schematischer Ablauf zwischen Wake-up und Funkbereitschaft

Im Funkbetrieb wird aus ppm ein Frequenzbudget

Ähnlich sorgfältig muss mit ppm-Angaben umgegangen werden. ppm ist zunächst nur eine dimensionslose Verhältnisangabe. Sie sagt noch nicht, ob damit eine initiale Frequenztoleranz, eine Änderung über Temperatur, Alterung oder eine zusammengefasste Stabilitätsangabe gemeint ist.

Bei einem Schwingquarz können beispielsweise die initiale Frequenztoleranz, das Frequenz-Temperatur-Verhalten, die Alterung und die realen Lastbedingungen relevant sein. Die Lastkapazität C_L ist dabei eine spezifizierte Lastbedingung, auf die die Lastresonanzfrequenz des Quarzes bezogen ist. Der Quarz wird für diese Bedingung abgeglichen. Welche Last in der realen Oszillatorschaltung tatsächlich wirksam wird, hängt jedoch von der Beschaltung und den parasitären Kapazitäten ab. Weicht sie von der spezifizierten Lastbedingung ab, kann sich auch die Frequenzlage verschieben.

Bei XO- und TCXO-Datenblättern muss genau geprüft werden, wie der Hersteller Angaben wie Frequency Stability, Total Stability oder vergleichbare Begriffe definiert und welche Beiträge darin bereits enthalten sind. Einzelwerte dürfen nicht noch einmal zu einer Gesamtabweichung addiert werden, wenn sie bereits Bestandteil einer übergeordneten Spezifikation sind.

Auch eine einfache Worst-Case-Summe ist nicht automatisch richtig. Sie ist nur dann sinnvoll, wenn die verwendeten Spezifikationen, ihre Bezugsbedingungen und ihre Definitionen dieses Vorgehen zulassen. Für den Entwickler lautet die eigentliche Frage deshalb nicht „Wie viele ppm hat der Taktgeber?“, sondern: Welche Frequenzabweichungen sind für die aktive Funktion relevant, wie sind sie spezifiziert und welches Budget muss das System tatsächlich einhalten?

Stromaufnahme allein greift zu kurz

Bei batteriebetriebenen Funkknoten beschreibt die Stromaufnahme einer Taktquelle noch nicht den Energiebedarf des Betriebszyklus. Entscheidend ist auch, wie lange einzelne Systemzustände aktiv bleiben.

Eine Timing-Lösung, die nur während einer kurzen aktiven Phase benötigt wird, ist anders zu bewerten als eine Zeitbasis, die über lange Sleep-Intervalle durchlaufen muss. Auch Start- und Übergangsphasen können zum Energiehaushalt beitragen, wenn dadurch andere Teile des Systems länger aktiv bleiben. Daraus folgt jedoch keine einfache Rangfolge nach dem Motto „schnellerer Startup spart Energie“. Ob eine kürzere Startphase einen messbaren Vorteil bringt, hängt von Leistungsaufnahme, Duty Cycle, Systemarchitektur und den übrigen aktiven Funktionen ab.

Für die Auswahl zählt deshalb die Kombination aus Betriebszustand und Aufgabe mehr als ein isolierter Stromwert: Welche Clock muss dauerhaft verfügbar sein, welche darf abgeschaltet werden und welche muss nach dem Wake-up neu bereitgestellt werden? Entscheidend ist letztlich, wann das Gesamtsystem den Zustand erreicht, in dem Anwendung und Funk ihre eigentliche Aufgabe erfüllen können.

Aus dem Betriebszustand wird die Spezifikation

Damit verschiebt sich auch der Ausgangspunkt für das Design-In. Vor der Suche nach einer Teilenummer muss klar sein, welche Timing-Funktion in welchem Betriebszustand benötigt wird, ob sie kontinuierlich verfügbar bleiben muss und welche Genauigkeits- beziehungsweise Startup-Definition für diese Funktion tatsächlich relevant ist. Ebenso muss geklärt sein, ob ein passiver Resonator mit der Oszillatorstufe des ICs oder ein vollständiger Oszillator eingesetzt wird und welche Einflüsse eine angegebene Stabilität bereits umfasst.

Erst daraus lässt sich ableiten, welche Resonator- oder Oszillatorlösung zum Leistungsprofil des Systems passt. Bei einem duty-cycled Funkknoten beginnt die Auswahl deshalb nicht mit der Frequenzzeile im Datenblatt, sondern mit den Zeit- und Frequenzfunktionen, die Sleep, Wake-up und Funkbetrieb tatsächlich benötigen. ◀