

Stromsparender, hochgenauer Leistungsmesser für Fahrräder



© shutterstock_345372893

Worum geht es?

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit dem Design eines Leistungsmessers für Fahrräder und geht darauf ein, welche Signalketten-, Power-Management- und Mikrocontroller-ICs dafür geeignet sind. Neben den physikalischen Grundlagen der Leistungsmessung an Fahrrädern wird das Design der entsprechenden Elektronik beschrieben. Die kostengünstige und überaus kompakte Lösung verbraucht sehr wenig Strom, ist aber gleichwohl in der Lage, schwache, niederfrequente Signale präzise zu verstärken.

Leistung messen

Ein Fahrrad-Leistungsmesser misst die vom Radfahrer aufgebrachte Leistung und zeigt sie in Watt an. Leistungsmesser dieser Art sind nicht nur in der Medizin ein wichtiges Hilfsmittel, sondern werden auch zu Trainingszwecken genutzt, um Trainern, Therapeuten und Hobbyradfahrern aussagefähige Informationen über die aufgebrachte Leistung zu geben. Vorgegebene Leistungsprofile können damit genau abgefahren werden und Überlastungen, die zulasten des Trainingserfolgs oder der Gesundheit gehen könnten, lassen sich vermeiden. Zum Beispiel kann die Zielvorgabe gesetzt sein,

bei einer Fahrt bergauf eine Leistung von mindestens 200 W aufzubringen. Sollte die Leistung unter diese Marke fallen, kann entweder die Trittfrequenz erhöht oder in einen höheren Gang geschaltet werden, um das Fahrtempo zu erhöhen und die Leistung zu steigern.

Tatsächliche Kraft messen

Attraktiv an der hier vorgestellten Lösung ist insbesondere, dass die Leistung nicht indirekt über die Fahrgeschwindigkeit und die Trittfrequenz sowie möglicherweise (mit GPS-Unterstützung) über das Streckenprofil ermittelt wird, was Raum für große Ungenauigkeiten ließe. Vielmehr wird die tatsächlich aufgewendete Kraft direkt an der Tretkurbel erfasst, sodass eine exakte Messung der erbrachten Leistung möglich ist. Gegen- und Rückenwind sowie Steigungen und Gefälle werden dabei ebenso berücksichtigt wie der Rollwiderstand.

Drahtlose Verbindung zur Anzeigeeinheit

Abgelesen werden kann die Leistung meist an einer Anzeigeeinheit am Lenker. Zwischen dem eigentlichen, an der Tretkurbel angebrachten Leistungsmesser und der Einheit, die das Berechnen und Visualisieren der Leistung übernimmt, muss eine drahtlose Verbindung bestehen. Damit die Leistung berechnet werden kann, ist es notwen-

dig, die auf einen bestimmten Teil des Fahrrad-Antriebsstrangs ausgeübte Kraft zu erfassen, was mithilfe von Dehnungsmessstreifen in einer so genannten Wheatstone-Brückenschaltung geschieht. Das von der Wheatstone-Brücke generierte Signal ist meist von sehr geringer Frequenz und hat einen sehr niedrigen Pegel, sodass es mit einem hochpräzisen Verstärker mit driftfreier Eingangs-Offsetspannung verstärkt werden muss. Da ein solcher Leistungsmesser zudem aus einer Batterie versorgt wird, sollte sein Stromverbrauch möglichst gering sein.

Hochpräziser Instrumentenverstärker

Mit dem Baustein MAX41400 steht ein hochpräziser Instrumentenverstärker mit geringer Leistungsaufnahme und einem Betriebsspannungsbereich von 1,7 bis 3,6 Volt zur Verfügung, dessen Ein- und Ausgänge Rail-to-Rail-Charakteristik haben. Es stehen acht Verstärkungsstufen zur Wahl, die über die externe Beschaltung selektiert werden können. Wichtig für die Verarbeitung niederfrequenter Signale ist ferner die Tatsache, dass das für Verstärker mit CMOS-Eingangsstufen übliche hohe 1/f-Rauschen hier dank der typisch $1\ \mu\text{V}$ betragenden, driftfreien Eingangs-Offsetspannung eliminiert wird. Die Stromaufnahme von typisch $65\ \mu\text{A}$ wird im

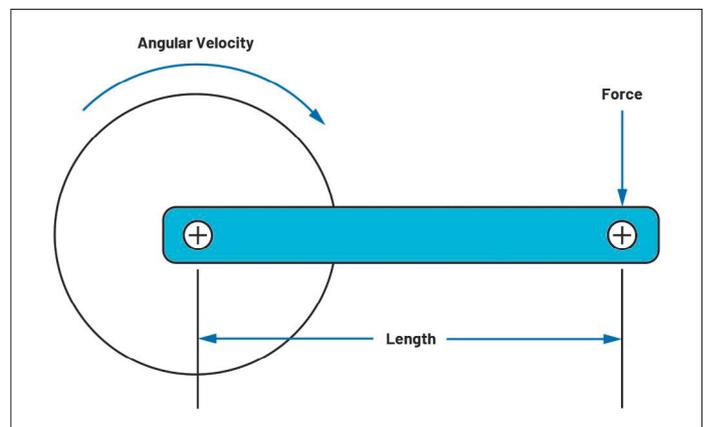


Bild 1: Zum Berechnen der Leistung muss nur die tangentielle Kraft und die Winkelgeschwindigkeit gemessen werden, da die Länge der Pedalkurbel konstant ist

Autor:
Andrew Brierley-Green
Principal Engineer
Analog Devices
www.analog.com

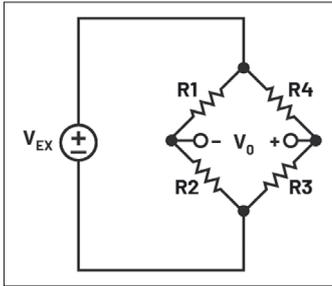


Bild 2: Prinzip einer Wheatstone-Brücke

Shutdown-Modus auf 0,1 μ A abgesenkt. Der MAX41400 ist wahlweise in einem 1,26 \times 1,23 mm großen WLP-Gehäuse mit 9 Anschlusskontakten oder in einem Gehäuse der Bauform TDFN-10 mit Maßen von 2,5 \times 2 mm lieferbar. Für Fahrrad-Leistungsmesser, die normalerweise durch sehr beengte Platzverhältnisse gekennzeichnet sind, bieten diese kleinen Gehäuseabmessungen ideale Voraussetzungen.

Mikrocontroller

Der zweite entscheidende IC ist ein Mikrocontroller (Microcontroller Unit, MCU) des Typs MAX32666. Der Baustein basiert auf einem Arm Cortex-M4-Kern und ist zusätzlich mit einer BLE-Einheit (Bluetooth Low Energy) ausgestattet. Das vom Instrumentenverstärker kommende Signal wird durch einen nach dem SAR-Prinzip (Successive Approximation Register) arbeitenden Analog/Digital-Wandler des Typs MAX11108 in digitale Signalproben umgewandelt, die drahtlos an ein unter Android laufendes Gerät weitergeleitet werden, das die Lei-

stung berechnet und auf einem Display anzeigt.

Die theoretischen Grundlagen der Leistungsmessung

Der in diesem Artikel beschriebene Fahrrad-Leistungsmesser misst die Biegebelastung einer der beiden Tretkurbeln, an deren Enden die Pedale angebracht sind. Für den Vortrieb übt der Radfahrer eine Kraft auf diese Pedale aus, wodurch das vordere Kettenrad mit einer bestimmten Winkelgeschwindigkeit rotiert (Bild 1). Auf welchen physikalischen Grundlagen aber beruht die Funktionsweise des Leistungsmessers?

Arbeit ist die durch eine Kraft umgesetzte Energiemenge. Berechnet wird sie als Produkt aus Kraft und Weg (Gleichung 1). Eine Arbeit W wird verrichtet, wenn eine Masse unter dem Einfluss einer Kraft F um eine bestimmte Distanz d bewegt wird. An der Arbeit ist dabei selbstverständlich nur die in Bewegungsrichtung zeigende Komponente des Kraftvektors beteiligt.

$$W = F \times d$$

Verwendet man SI-Einheiten, wird die Kraft in Newton und die Entfernung in Metern gemessen, sodass die Arbeit die Einheit Newtonmeter (Nm) bzw. Joule (J) hat. Ein Joule ist die Arbeit, die verrichtet wird, wenn eine Kraft von einem Newton über eine Strecke von 1 m wirkt. Die physikalische Leistung P wiederum gibt an, in welcher Zeit die Arbeit verrichtet wird (Gleichung 2).

$$P = \frac{W}{t}$$

P ist die Leistung in Watt, W die in Joule angegebene Arbeit und t die Zeit (in Sekunden).

Der Zusammenhang zwischen Arbeit und Leistung führt zu folgender Überlegung: Wenn man die Winkelgeschwindigkeit kennt (also die Zeit, in der das Pedal eine volle Drehung ausführt), lässt sich die erbrachte Leistung berechnen, denn diese ist das durch die Zeit dividierte Produkt aus Kraft und Weg. Wenn die Tretkurbel in t Sekunden eine vollständige Umdrehung ausführt und während der gesamten Zeit eine konstante Kraft auf die Kurbel ausgeübt wird, ist der Weg einfach der Umfang eines Kreises mit dem Radius r (Länge der Tretkurbel, gemessen vom Mittelpunkt der Tretlagerachse bis zum Kraftangriffspunkt).

$$P = \frac{F \times 2\pi r}{t}$$

Das Produkt aus Kraft und Radius ($F \times r$) wird als Drehmoment (τ) bezeichnet, und die bei der Kreisbewegung verrichtete Arbeit berechnet sich als Produkt aus Drehmoment und Winkel (im Bogenmaß). Da ein kompletter Kreis im Bogenmaß dem Wert 2π entspricht, ist $2\pi/t$ die Winkelgeschwindigkeit ω . Gleichung 3 kann deshalb wie folgt umgeschrieben werden:

$$P = \tau \omega$$

Zum Berechnen der Leistung werden also zwei Größen benötigt, nämlich das Drehmoment und die

Winkelgeschwindigkeit. Das Drehmoment aber ist einfach das Produkt aus der ausgeübten Kraft und der Länge der Tretkurbel (Bild 1). Da letztere konstant ist, müssen nur die Kraft und die Winkelgeschwindigkeit gemessen werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass ausschließlich die tangentielle Komponente des Kraftvektors am Erbringen der Leistung beteiligt ist.

Aufgewendete Kraft

Die soeben angestellten Überlegungen basierten auf der Annahme, dass die aufgewendete Kraft während der gesamten Kurbelumdrehung konstant ist. Dies ist in der Praxis natürlich nicht der Fall, denn bei senkrechter Kurbelstellung (12-Uhr- oder 6-Uhr-Position) dürfte die tangentielle Kraftkomponente (außer bei geübten Radfahrern) null betragen. In dieser Stellung erreicht dagegen die radiale, am Erbringen der Arbeit nicht beteiligte Kraftkomponente ihr Maximum. Die tangentielle Komponente wiederum hat ihren Höchstwert bei waagerechter Pedalstellung (3-Uhr- oder 9-Uhr-Position), wenn man eine feste Verbindung zwischen Schuh und Pedal voraussetzt. Das Drehmoment ändert sich also ständig, sodass es während einer Umdrehung mehrere Male erfasst werden muss.

Der hier beschriebene Leistungsmesser ist an der linken Pedalkurbel befestigt. Wir erfassen also nur die an einer der beiden Kurbeln erbrachte Leistung und gehen davon aus, dass die Leistung an der anderen Kurbel identisch ist. Da dies aber nicht unbedingt der Fall sein

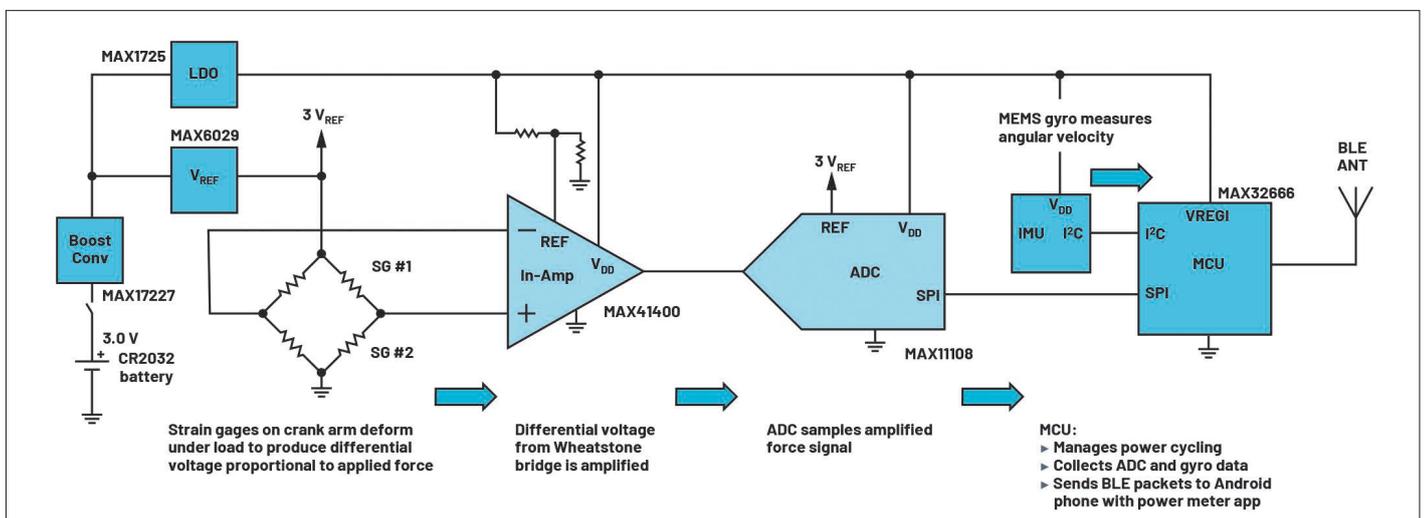


Bild 3: Blockschaltbild der Signalkette für den Leistungsmesser

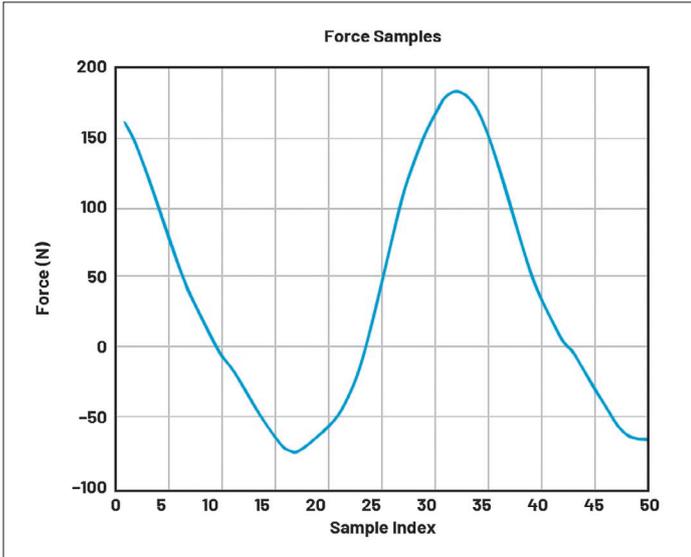


Bild 4: Auf die Tretkurbel wirkende Tangentialkraft, erfasst mit einem Abtastintervall von 40 Millisekunden

muss, messen anspruchsvollere Lösungen die Leistung tatsächlich an beiden Tretkurbeln.

Trägheitsmesseinheit

Während man für die Kraftmessung Dehnungsmessstreifen benutzt, wird die Winkelgeschwindigkeit mit einer Trägheitsmesseinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) gemessen. Als strom- und kostensparende Alternative ist es auch möglich, die Winkelgeschwindigkeit aus dem Dehnungsmessstreifen-Signal herzuleiten. Hierauf wird weiter unten noch eingegangen.

Die Kraftmessung

Die aufgewendete Kraft bewirkt eine mechanische Deformation (Biegung) der Tretkurbel. Andere mechanische Bauteile des Antriebsstrangs, wie etwa die Achse, auf der die Tretkurbeln befestigt sind, erfahren dagegen eine Torsionsverformung, die bei einigen Fahrrad-Leistungsmessern genutzt wird.

Verformungen werden in der Regel mithilfe von Dehnungsmessstreifen gemessen. Ein Dehnungsmessstreifen ist ein sehr dünner, langer Metalldraht, der von einem flexiblen Material umgeben ist. Er wird auf der Oberfläche des Objekts befestigt, dessen Deformation gemessen werden soll. Die Ausrichtung des Dehnungsmessstreifens hängt davon ab, welche Art von Verformung es zu messen gilt. Wird das Objekt deformiert, wird der Draht des Dehnungsmessstreifens

gestreckt oder gestaucht. Im ersten Fall wird er dünner und länger. Da aber der elektrische Widerstand des Drahts umgekehrt proportional zu seiner Querschnittsfläche und direkt proportional zu seiner Länge ist, sorgen beide Effekte für eine Widerstandserhöhung. Wird der Draht dagegen gestaucht, wird er dicker und kürzer, wodurch sein Widerstand sinkt. Der undeformierte Dehnungsmessstreifen hat einen bestimmten Nennwiderstand (üblich sind Standardwerte von beispielsweise 120 Ω, 350 Ω oder 1 kΩ). Durch Stauchen oder Strecken des Dehnungsmessstreifens variiert der Widerstandswert geringfügig um diesen Nennwert. Damit in der Wheatstone-Brücke ein möglichst geringer Strom fließt, kommt in dem hier beschriebenen Fahrrad-Leistungsmesser ein Dehnungsmessstreifen mit 1 kΩ Nennwiderstand zum Einsatz.

Wheatstone-Brückenschaltung

Zum Messen kleiner Widerstandsänderungen bedient man sich häufig einer so genannten Wheatstone-Brückenschaltung (Bild 2).

Diese Brückenschaltung besteht aus zwei parallelgeschalteten Spannungsteilern. An den oberen und den unteren Anschluss der Brücke wird eine Anregungsspannung V_{EX} gelegt, und V_O ist die Ausgangsspannung, wie im Bild gezeigt. V_O berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$V_O = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \times V_{EX}$$

Befindet sich die Brücke im Gleichgewicht ($R_4/R_3 = R_1/R_2$), so ist $V_O = 0$ V. In einer so genannten Viertelbrücken-Konfiguration wird einer der vier Widerstände durch den Dehnungsmessstreifen ersetzt (z. B. R_4 durch R_g). Ändert sich nun R_g , gerät die Brücke aus dem Gleichgewicht und die Differenzspannung V_O ist nicht mehr null.

Halbbrücken-Konfiguration

In dem hier beschriebenen Leistungsmesser wird eine Halbbrücken-Konfiguration benutzt, bei der R_3 und R_4 durch Dehnungsmessstreifen ersetzt werden, während es sich bei R_1 und R_2 um „Dummy“-Widerstände von 1 kΩ handelt. Die Verwendung zweier Dehnungsmessstreifen hat den Vorteil, dass sich die Amplitude des von der Brücke abgegriffenen Signals verdoppelt. Außerdem kommt es zu einer prinzipbedingten Temperaturkompensation. Dehnungsmessstreifen verlängern bzw. verkürzen sich nämlich auch durch Temperaturänderungen, und die daraus resultierenden Widerstandsänderungen lassen sich nicht von jenen unterscheiden, die durch Verformung erzeugt werden. Da beide Dehnungsmessstreifen aber dicht nebeneinander angeordnet sind und dieselbe Temperatur haben, heben sich die temperaturbedingten Widerstandsänderungen gegenseitig auf.

Beschreibung des Systems

Das komplette System besteht aus einer kleinen, schmalen Leiterplatte, die an der linken Tretkurbel angebracht wird, den an der Kurbel befestigten Dehnungsmessstreifen sowie einem Android-Gerät (z. B. einem Smartphone oder Tablet), das per BLE die Rohdaten von der Leiterplatte empfängt, um die Leistung zu berechnen und auf einem Display anzuzeigen. Das Blockschaltbild der Leiterplatte ist in Bild 3 zu sehen.

Die gesamte Leiterplatte wird durch eine Knopfzelle des Typs CR2032 versorgt. Deren Nennspannung von 3 V dürfte mit zunehmender Entladung langsam zurückgehen. Da aber stabile Spannungen als Referenzspannung für den ADC und den Instrumentenverstärker sowie als Anregungsspannung benötigt werden, wird die Batteriespan-

nung mit einem Aufwärtswandler des Typs MAX17227 auf 3,8 V hochgesetzt. Die 3 V (Brücken-Anregungsspannung und ADC-Referenzspannung) werden aus diesen 3,8 V mit einer Spannungsreferenz des Typs MAX6029 erzeugt. Die ebenfalls 3 V betragende Versorgungsspannung sämtlicher ICs wird dagegen mithilfe eines LDO-Reglers vom Typ MAX1725 bereitgestellt.

Verstärktes Dehnungsmessstreifen-Signal

Der Instrumentenverstärker MAX41400 verstärkt die Differenzspannung am Ausgang der Brücke wandelt sie in ein massebezogenes Signal um. An den REF-Eingang des Instrumentenverstärkers ist ein Spannungsteiler angeschlossen, der eine Referenzspannung von 1,5 V erzeugt. Das verstärkte Dehnungsmessstreifen-Signal wird von einem 12bit-A/D-Wandler des Typs MAX11108 abgetastet, der nach dem SAR-Prinzip arbeitet und eine SPI-Schnittstelle (Serial Peripheral Interface) hat. Die Winkelgeschwindigkeit wird mithilfe des in der MEMS-basierten IMU enthaltenen Drehratengebers (Gyroskops) erfasst.

Der Mikrocontroller MAX32666 steuert die IMU über ein I²C-Interface und kontrolliert mit seiner Firmware die Einschaltdauer der Schaltung, erfasst die Signale des ADC und der IMU und verpackt diese Daten in BLE-Pakete, die in regelmäßigen Zeitabständen gesendet werden.

Minimierung des Stromverbrauchs

Um die durchschnittliche Leistungsaufnahme zu minimieren, sind die Schaltungen auf der Leiterplatte immer nur für sehr kurze Zeitspannen aktiv. Zum Beispiel wird die Kraft mit einer Rate von 25 Hz erfasst, und nur alle 40 ms erwacht die MCU aus ihrem Tiefschlaf-Modus, in dem der Großteil ihrer internen Schaltungen entweder ganz abgeschaltet sind oder sich in einem Stromspar-Modus befinden. Die Firmware holt anschließend verschiedene analoge Bauteile aus ihrem Low-Power-Status. Die Anregungsspannung für die Messbrücke etwa wird durch einen in Serie geschalteten MOSFET ein-

geschaltet. Die Brücke wirkt wie ein zwischen 3 V und Masse liegender Widerstand von 1 kΩ, weshalb sie bei geschlossenem Schalter von 3 mA Gleichstrom durchflossen wird. Würde dieser Strom ständig fließen, wäre die durchschnittliche Leistungsaufnahme deutlich höher. Der Instrumentenverstärker hat zum Aktivieren des Shutdown-Modus einen speziellen Anschluss, der durch eine GPIO-Leitung (General-Purpose Input/Output) des Mikrocontrollers angesteuert wird. Auf diese Weise ist es möglich, den Verstärker jeweils nur für den kurzen Moment zu aktivieren, in dem das Kraftsignal abgetastet wird. Auch der ADC wird im Low-Power-Status gehalten und nur zum Abtasten des Kraftsignals sowie zur Ausgabe des digitalisierten Werts aktiviert. Für den Wechsel des ADC zwischen Low-Power-Modus und aktivem Betrieb müssen jeweils SPI-Befehle geschrieben werden.

Low-Power-Modus

Der Stromverbrauch der IMU wird ebenfalls minimiert, indem nur der Drehratengeber genutzt wird, während der Beschleunigungssensor permanent im Low-Power-Modus belassen wird. Auch der Drehratengeber wird nur so lange aktiviert, wie es zum Erfassen und Auslesen des Messwerts notwendig ist. Die gesamte übrige Zeit bleibt er in einem Low-Power-Zustand. Als zusätzliche stromsparende Maßnahme wird die Winkelgeschwindigkeit mit einer Rate von nur 1,6 Hz gemessen. Wie weiter unten erläutert wird, kann sogar ganz auf die IMU verzichtet werden, um den Stromverbrauch weiter zu verringern. Sind die Kraft und die Winkelgeschwindigkeit erfasst und die entsprechenden Werte gespeichert, wechselt die MCU wieder in den Tiefschlaf-Modus. Sobald eine bestimmte Anzahl Signalproben erfasst wurde, werden diese von der MCU in ein BLE-Paket verpackt, das anschließend gesendet wird. Bei Nichtgebrauch kann die gesamte Leiterplatte durch einen Schiebeschalter, der die Batterie von den übrigen Schaltungen trennt, komplett abgeschaltet werden.

Lange Betriebsdauer

Wird die IMU genutzt und ist die Leiterplatte eingeschaltet, wird

an 3 V Versorgungsspannung ein Strom von durchschnittlich 760 μA aufgenommen, was einer mittleren Leistungsaufnahme von 2,3 mW entspricht (für das komplette System einschließlich der Wheatstone-Brücke). Nimmt man für eine CR2032-Batterie eine typische Energiekapazität von 225 mAh an, errechnet sich eine Betriebsdauer von etwa 296 Stunden. Ohne IMU würde die Stromaufnahme auf nur 640 μA an 3 V Versorgungsspannung zurückgehen. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme würde damit auf 1,9 mW fallen, was an einer CR2032-Batterie für eine Betriebsdauer von 352 Stunden reichen würde.

Abschätzung der Winkelgeschwindigkeit

Um ohne IMU auszukommen, kann man sich den in Bild 4 dargestellten Verlauf der auf die Tretkurbel wirkenden Tangentialkraft über eine volle Umdrehung zunutze machen. Die Periodizität des Kraftsignals fällt sofort ins Auge.

Grundsätzlich kann anhand des Kraftsignals die Winkelgeschwindigkeit ermittelt werden. Die entsprechenden Signalverarbeitungs-Algorithmen wurden mithilfe von MATLAB programmiert. Das Konzept bestand darin, eine Sinuskurve der in Gleichung 6 angegebenen Form in den Verlauf des Kraftsignals einzupassen.

$$y = A \sin(\omega x + \phi) + B$$

Darin steht A für die Amplitude, ω für die Winkelgeschwindigkeit, ϕ für die Phase und B für den Offset.

Die Optimierungsfunktion ist in Gleichung 7 angegeben. In dieser auf der Methode der kleinsten Quadrate beruhenden Funktion ist \hat{y} der Vektor der gemessenen Datenpunkte und y das Resultat von Gleichung 6.

$$C = \sum (\hat{y} - y)^2$$

Mit der in MATLAB enthaltenen Funktion zum Finden von Minima werden jene Werte von A, ω , ϕ und B ermittelt, für die C in Gleichung 7 ein Minimum erreicht. Der dabei ermittelte ω -Wert wird verwendet, die übrigen Werte dagegen verworfen. Nachdem für ω ein Schätzwert für die aktuellen Vektorwerte vorliegt, wird ein neuer Satz Signalproben geladen und der gesamte Vorgang wiederholt. In seltenen

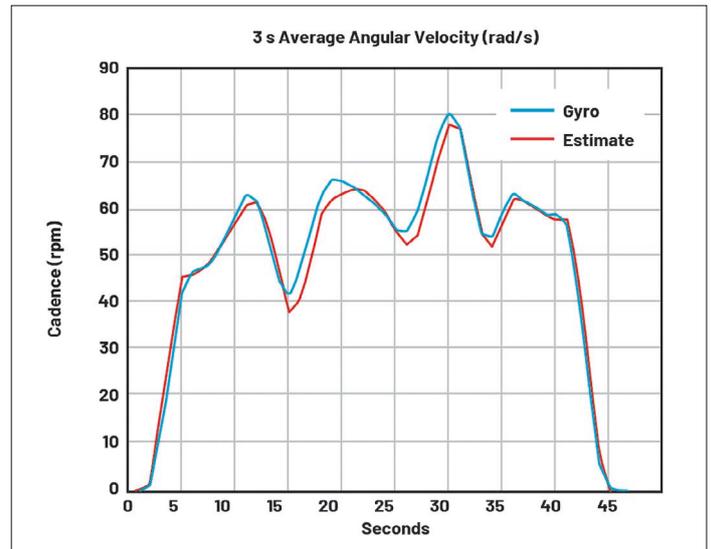


Bild 5: Trittfrequenz (geschätzt bzw. gemessen)

Fällen kann es vorkommen, dass die Minima-Suche nicht konvergiert und das Resultat deutlich größer ist als normal. In diesem Fall wird der berechnete ω -Wert verworfen und auf den vorherigen Wert zurückgegriffen. Um die Tauglichkeit dieses Konzepts zu belegen, wurde mit einem BLE-Sniffer eine Reihe von Datenpaketen mit Winkelgeschwindigkeits- und Kraftwerten erfasst, die während des Betriebs des Fahrrads gesendet wurden. Mithilfe von MATLAB-Skripten wurde der Paketinhalt extrahiert und weiterverarbeitet. In Bild 5 ist die geschätzte Kurbeldrehzahl (Trittfrequenz) gemeinsam mit der vom Drehratengeber registrierten Trittfrequenz (Kadenz) dargestellt.

Energiemessung

Da die vom Radfahrer geleistet mechanische Arbeit schlicht das Integral der Leistung über die Zeit ist, stehen hinreichend Daten zur Verfügung, um die vom Radfahrer aufgewendete Energie zu berechnen. Die Anwendungssoftware nimmt zu diesem Zweck eine numerische Integration der Leistung über die Zeit vor und ermittelt auf diese Weise die verrichtete mechanische Arbeit (in Joule). Mit einem entsprechenden Umrechnungsfaktor kann die Arbeit in Kilokalorien ausgegeben werden. Auf der Basis der Annahme, dass der menschliche Körper 4 J an chemischer Energie konsumiert, um 1 J an Arbeit zu verrichten, wird mit einem zusätzlichen Umrechnungsfaktor von 4 ermittelt, wie viele Kilokalorien der Radfahrer ungefähr verbraucht hat.

Demovideo

Die in diesem Artikel beschriebene Lösung wurde an einem stationären Übungsfahrrad installiert, wie in diesem Demonstrationsvideo zu sehen ist. Die beiden Dehnungsmessstreifen sind an der linken Tretkurbel angebracht und über Leitungen mit der ebenfalls an dieser Kurbel befestigten Leiterplatte verbunden.

Zusammenfassung

Der Artikel hat gezeigt, wie sich der stromsparende, hochpräzise Instrumentenverstärker MAX41400 in einer Kraftmess-Anwendung, im vorliegenden Fall in einem Leistungsmesser für Fahrräder, einsetzen lässt. Zusammen mit dem stromsparenden Mikrocontroller MAX32666 und einer Reihe Power-Management-ICs von Analog Devices entstand eine Lösung mit einer Leistungsaufnahme von nur 2,3 mW.

Wer schreibt:

Andrew Brierley-Green arbeitet am Standort San Jose (Kalifornien/USA) als Principal Engineer in der Timing and Sensor Interface Product Line der zur Industrial Multimarket BU gehörenden Industrial Automation Division. Er kam 2021 im Zuge der Übernahme von Maxim Integrated zu Analog Devices. Bei Maxim war er für die Applikations- und Systementwicklung sowie die Produktdefinition verschiedener HF- und Wireless-Produkte zuständig. ◀