

»GREEN ICT @ FMD« – COMPETENCE CENTER FOR ECOLOGICALLY SUSTAINABLE ICT

Energieverbrauch von Inertialsensoren unter realtypischen Einsatzbedingungen am Beispiel der hauseigenen ENAS-IMU

A Whitepaper by "HUB 1 –Sensor-Edge-Cloud"

Sven Voigt (Fraunhofer ENAS), Daniel Bülz (Fraunhofer ENAS)



The work presented is part of the »Green ICT @ FMD« project, your competence center for ecologically sustainable information and communication technology. The project is established by the Research Fab Microelectronics Germany and funded by the German Federal Ministry of Education and Research.

Kompetenzzentrum »Green ICT @ FMD«

c/o Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland FMD
Anna-Louisa-Karsch-Str. 2
10178 Berlin, Germany

Main contact

Sven Voigt

sven.voigt@enas.fraunhofer.de

www.greenict.de

www.forschungsfabrik-mikroelektronik.de

Date of publication

Januar 2025

1. Einleitung

In den vergangenen Jahren hat die Verbreitung von miniaturisierten Inertialsensoren auf Basis von MEMS-Technologien zur Messung von Beschleunigung, Drehrate u.a. stark zugenommen. Anwendungen reichen von Wearables und Smartphones über Robotik- und Drohnensysteme bis hin zu industriellen Überwachungslösungen. Parallel zu dieser Entwicklung steigt der Bedarf an energieeffizienten Sensorsystemen, da die Batterielebensdauer häufig den limitierenden Faktor für mobile oder autonome Geräte darstellt.

Dieses Whitepaper untersucht den Energieverbrauch von Inertialsensoren exemplarisch am Beispiel der hauseigenen IMU unter realtypischen Einsatzbedingungen. Dabei wird insbesondere betrachtet, wie sich unterschiedliche Drehraten und Sampleraten auf die Leistungsaufnahme auswirken und ob mechanische Effekte einen Einfluss auf das Energieverhalten des Systems haben. Abschließend werden praxisrelevante Optimierungsempfehlungen für die Integration in energiebegrenzte Systeme abgeleitet.

2. Aufbau und Funktionsprinzip von Inertialsensoren

MEMS-Inertialsensoren (Micro-Electro-Mechanical Systems) sind miniaturisierte Sensoren, die Beschleunigungen, Drehgeschwindigkeiten, Vibrationen und Neigungen messen können. Sie bestehen aus mikromechanischen Strukturen, die auf einem Siliziumchip integriert sind. Der Aufbau umfasst meist eine bewegliche Masse, die über feine Federstrukturen aufgehängt ist. Bei einer Beschleunigung oder Rotation verschiebt sich diese Masse minimal. Diese Bewegung wird in der Regel kapazitiv, seltener piezoresistiv oder optisch, erfasst. Die daraus resultierende Kapazitätsänderung wird in elektrische Signale umgewandelt, die proportional zur auf die Masse wirkenden Kraft sind. Eine integrierte Auswerteelektronik verstärkt, filtert und digitalisiert diese Signale. MEMS-Beschleunigungssensoren messen Massenträgheitskräfte in eine oder mehrere Richtungen, während MEMS-Gyroskope mithilfe der Corioliskraft Rotationsgeschwindigkeiten erfassen. Kombiniert man beide Sensortypen in einem System, entsteht eine sogenannte Inertial Measurement Unit (IMU), die die vollständige Bewegungs- und Lageinformation in drei Dimensionen liefert. Solche IMUs sind in zahlreichen Anwendungen zu finden bspw. von Smartphones über Drohnen bis hin zu Fahrzeugen und industriellen Navigationssystemen.

Am ENAS wurde eine IMU aus 3 selbstentwickelten 2-Achs-MEMS-Beschleunigungssensoren und 3 einachsigen MEMS-Gyroskopen zusammengesetzt. Der Fokus der einzeln entwickelten Sensoren liegt dabei insbesondere bei Gyroskopen auf Genauigkeit und Bias-Stabilität und nicht primär auf Energiesparsamkeit. Im Vergleich zu optischen Gyroskopen mit höherer Genauigkeit bieten die MEMS-Sensoren jedoch prinzipbedingt den Vorteil der kompakten Baugröße und des niedrigeren Energiebedarfs. Zur Datensammlung und Konfiguration der Sensoren dient ein zentraler in der IMU verbauter Mikroprozessor, welcher die Daten über eine digitale Schnittstelle zum Messdaten-Erfassungs- und Auswertesystem überträgt

3. Messaufbau, -ablauf und Datenerfassung

Der Messaufbau bestand aus einer modularen Testplattform, die sowohl präzise Strommessungen als auch flexible Szenariosteuerungen erlaubt.

Eingesetzte Komponenten waren:

- Inertial-Messplatz bestehend aus Drehtisch AC1120S von Acutronic sowie Temperaturkammer von Vötsch



Abb. 3.1: Inertial-Messplatz bestehend aus Drehtisch AC1120S von Acutronic, Temperatur-Kammer von Vötsch und Steuer-Rechner

- Sensor-Modul: ENAS-IMU, bestehend aus drei einachsigen MEMS-Drehratensensoren sowie drei zweiachsigen MEMS-Beschleunigungssensoren

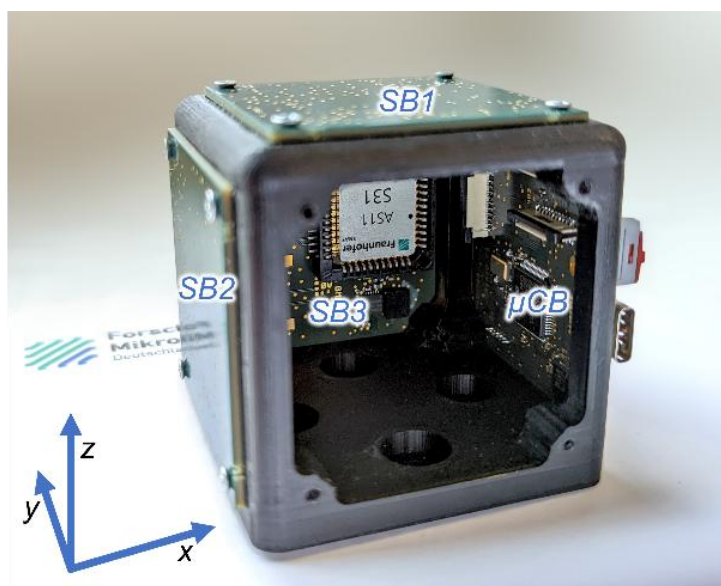


Abb. 3.2: ENAS-IMU mit einzelnen MEMS-Sensoren (3x1-Achsiger MEMS-Drehratensensor, 3x2-Achsiger MEMS-Beschleunigungssensor)

- Strommessinstrument: Joulescope JS220



Abb. 3.3: Joulescope JS220 zur Aufnahme der Versorgungsspannung und Stromaufnahme.

- Kommunikation: UART/USB über Schleifkontakte des Drehtisches zum Messlaptop

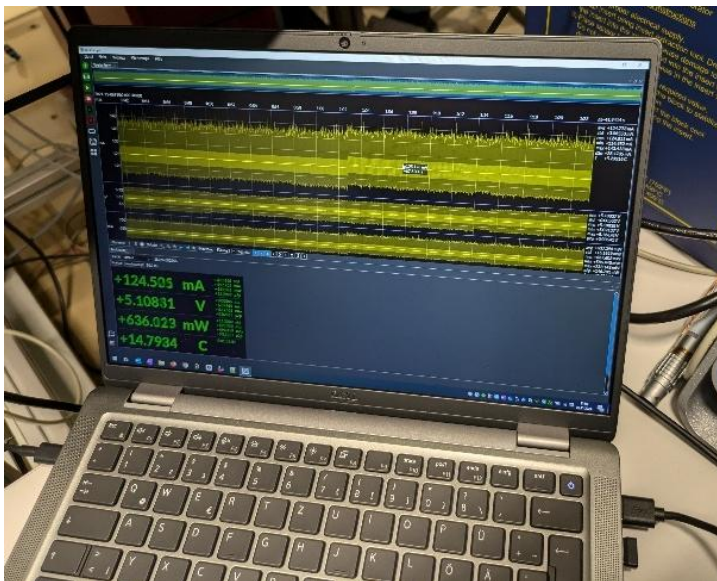


Abb. 3.4: Messlaptop zur Visualisierung und Speicherung der Strom-/Spannungs-/Leistungs-Daten aus dem Joulescope

Die Messungen wurden bei einer Umgebungstemperatur von 23 °C im 1g-Erdschwerefeld durchgeführt. Die IMU wurde auf einem präzisionsgesteuerten Drehtisch montiert, der die Sensoreinheit um die z-Achse rotieren ließ. Dabei wurden sechs verschiedene Drehgeschwindigkeiten eingestellt: 0 %/s, 1 %/s, 10 %/s, 100 %/s, 500 %/s und 1000 %/s. Zusätzlich wurde die IMU jeweils mit zwei unterschiedlichen Ausgangsdatenraten betrieben. Konkret wurden zwischen 50 Samples pro Sekunde sowie 500 Samples pro Sekunde variiert.

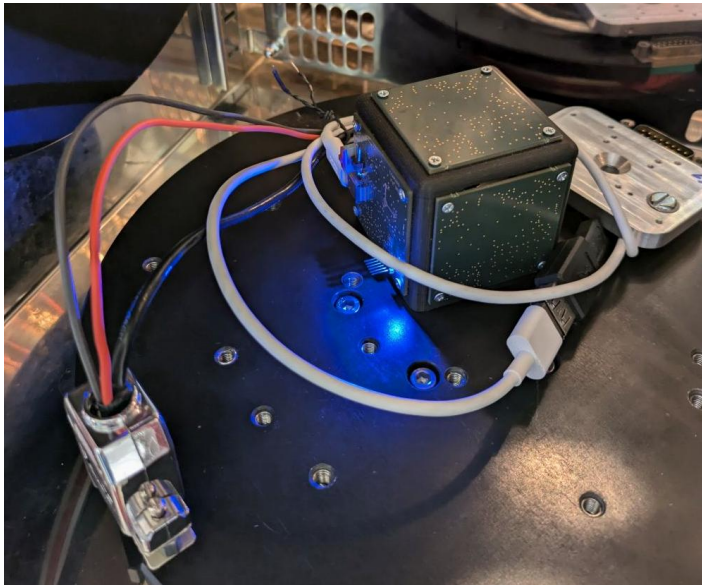


Abb. 3.5: ENAS-IMU auf Drehtisch in Klimakammer. Anschluss und Stromversorgung über USB.

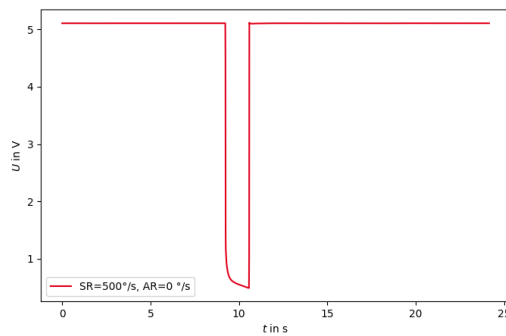
Für die simultane Erfassung von Strom, Spannung und Leistung kam ein JouleScope-Messgerät zum Einsatz. Um eine präzise Messung der Versorgungsspannung zu ermöglichen, wurde ein handelsübliches USB-Kabel (Typ-A auf Typ-C) modifiziert. Dabei wurden die Versorgungsleitungen aufgetrennt, sodass zwischen der 5-V-Leitung und Masse sowohl der Spannungsabfall gemessen als auch der fließende Strom erfasst werden konnte.

Die IMU wurde über den USB-Anschluss eines Laptops sowohl mit Strom versorgt als auch zur Datenübertragung genutzt. Jede Messung begann mit dem Start der JouleScope-Aufzeichnung. Anschließend wurde die IMU kurzzeitig vom System getrennt und erneut verbunden, um einen definierten System-Reset herbeizuführen. Direkt nach dem Wiederanschluss startete eine fünf Sekunden dauernde Messung mit der jeweils konfigurierten Samplerate.

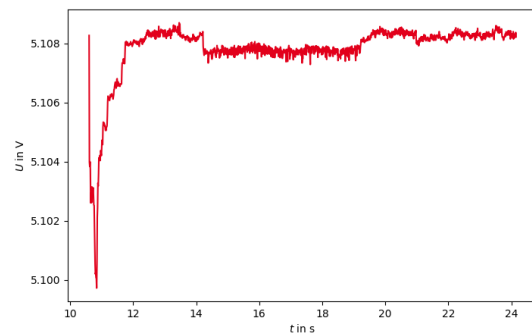
4. Ergebnisse und Analyse unter realtypischen Einsatzbedingungen

4.1. Spannungs- und Stromverlauf

Der zeitliche Verlauf der gemessenen Versorgungsspannung zeigt deutlich das charakteristische Verhalten während des An- und Absteckens der IMU, das im Rahmen des System-Resets durchgeführt wurde. Der Moment des Einschaltens kann als Synchronisationsmarke zwischen der Strommessung und der eigentlichen Datenerfassung verwendet werden.



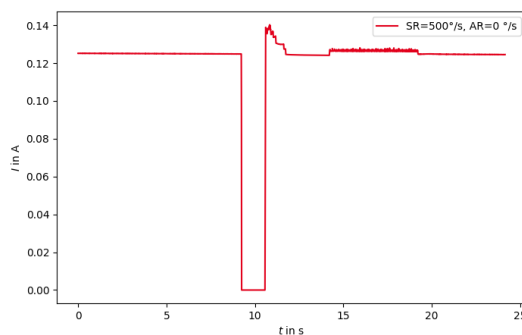
a) Spannungsverlauf während einer Messung – deutlich zu sehen ist das An- und Abstecken der IMU zum System-Reset.



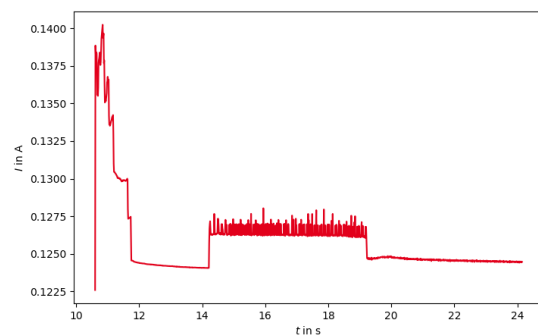
b) Spannungsverlauf nach dem Einschalten

Abb. 4.1: Beispielhafter Spannungsverlauf einer Messung

Der Stromverlauf zeigt ein analoges Verhalten. Nach dem Einschalten erreicht die IMU innerhalb weniger Millisekunden ihren stabilen Betriebszustand. Die aufgenommenen Strom- und Spannungsverläufe bestätigen, dass das System nach dem Reset reproduzierbar in denselben Arbeitspunkt übergeht.



a) Stromverlauf während einer Messung – deutlich zu sehen ist das An- und Abstecken der IMU zum System-Reset.



b) Stromverlauf nach dem Einschalten

Abb. 4.2: Beispielhafter Stromverbrauch während einer Messung

4.2. Leistungsvergleich

Die Auswertung der Leistungsdaten zeigt, dass die Startphase der IMU über alle Messungen hinweg nahezu identisch verläuft. Während des Betriebs konnte festgestellt werden, dass die Leistungsaufnahme kaum von der eingestellten Drehgeschwindigkeit abhängt.

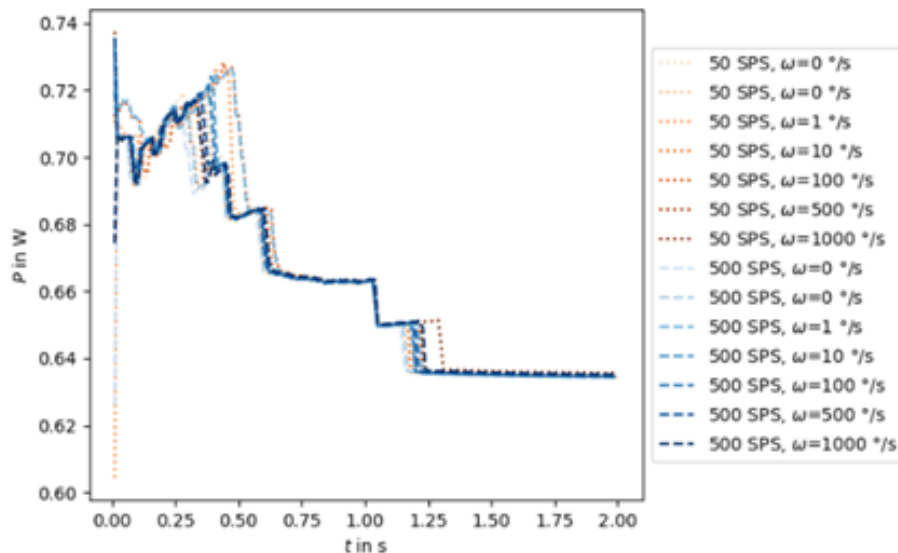


Abb. 4.3: Leistungsverlauf während dem Startup der IMU

Dagegen zeigt sich ein deutlicher Einfluss der Samplerate: Bei einer höheren Datenrate steigt der Leistungsbedarf messbar an. Die Ursache hierfür liegt in der intensiveren Kommunikation zwischen Sensoren und Auswerteeinheit, was zu einem erhöhten Energiebedarf der digitalen Schnittstellen führt. Während die mechanische Belastung also kaum Einfluss auf die Energieaufnahme hat, ist die Kommunikationsaktivität ein wesentlicher Faktor.

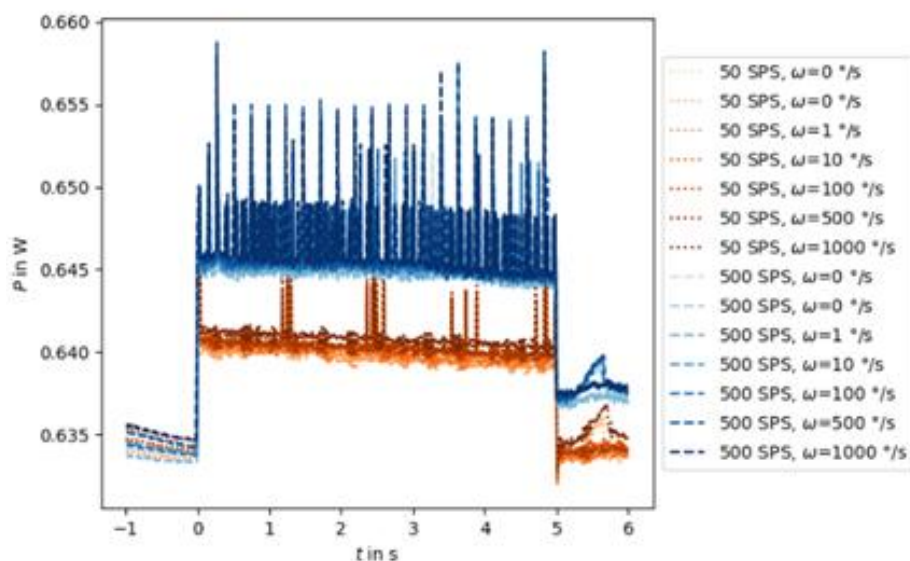


Abb. 4.4: Leistungsverlauf während der 5 s-Messung

4.3. Analyse der Sensordaten

Die aufgezeichneten Sensordaten zeigen das erwartete Verhalten der einzelnen Messgrößen. In einigen Fällen traten geringfügige Übertragungsfehler auf, die jedoch auf Kommunikationsprobleme bei hohen Sampleraten und hohen Drehgeschwindigkeiten zurückzuführen sind.

Die gemessenen Drehraten in z-Richtung korrespondieren linear mit den eingestellten Drehgeschwindigkeiten des Drehtisches entlang dieser Achse. Die Drehraten in x- und y-Richtung (senkrecht zur Drehachse) bleiben konstant bei 0 ‰, was auf eine gute Ausrichtung der Sensorachsen schließen lässt.

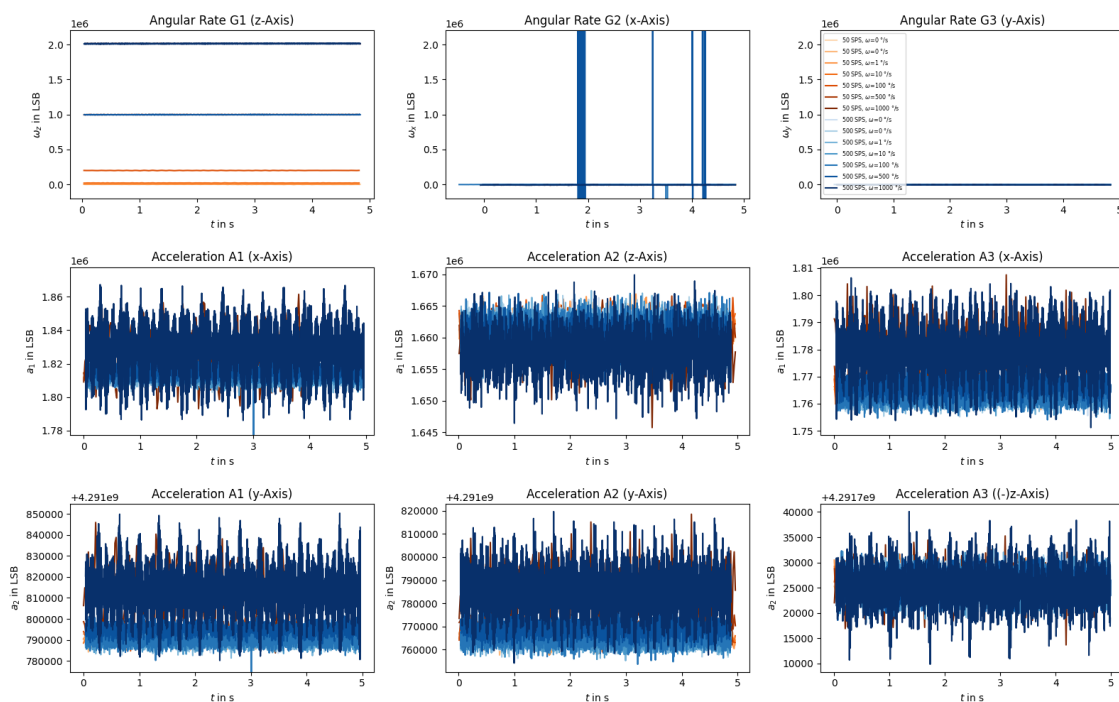


Abb. 4.5: Messdaten für alle Messungen aufgeteilt für jede einzelne Messgröße (3xDrehrate, 6xBeschleunigung) vergleichend dargestellt

Bei den Beschleunigungswerten zeigt sich in x- und y-Richtung ein leichter Anstieg bei höheren Drehgeschwindigkeiten. Dieser Effekt lässt sich durch die Zentrifugalkräfte erklären, welche aufgrund einer geringen Exzentrizität zwischen dem geometrischen Zentrum des Drehtisches und den Sensorelementen entstehen. Die Beschleunigung in z-Richtung ist hiervon nicht betroffen.

Bei hohen Drehzahlen steigt zudem das Rauschen der Beschleunigungssensoren an, was auf Vibrationen im Drehtischsystem zurückzuführen ist. Diese Effekte beeinflussen die Messqualität, nicht jedoch den Energieverbrauch der IMU selbst.

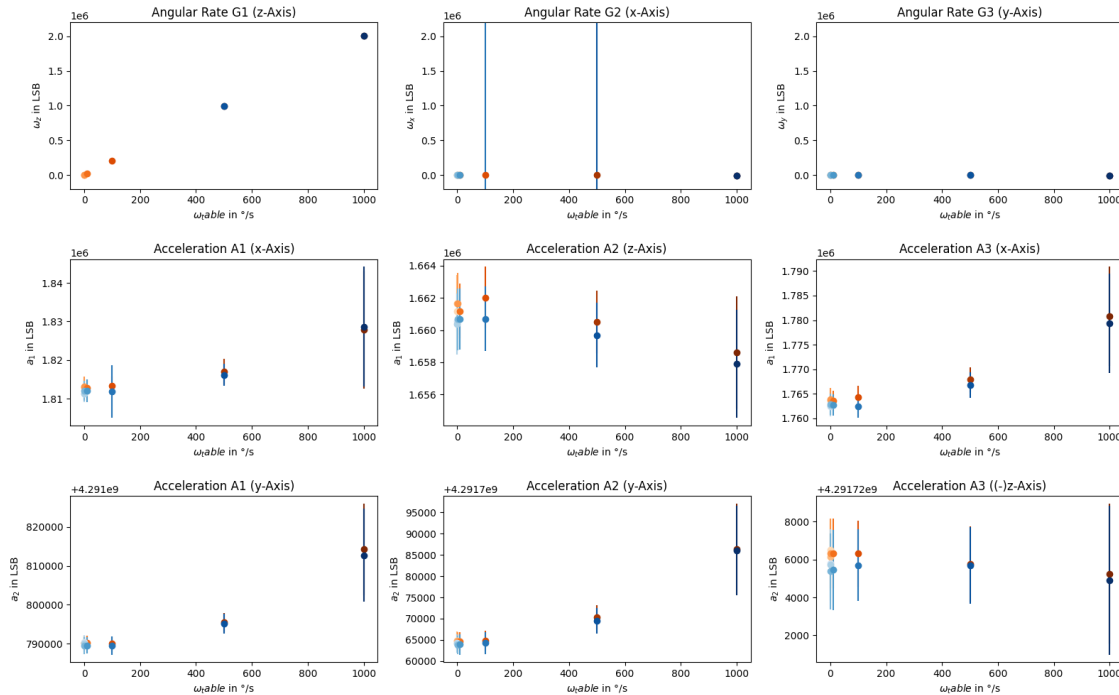


Abb. 4.6: Mittelwerte für die jeweilige Messung über der Anregungsgeschwindigkeit (ω_{table}) vergleichend für alle Messgrößen (3xDrehrate, 6xBeschleunigung) dargestellt.

Die Mittelwerte der gemessenen Drehraten zeigen eine klare lineare Abhängigkeit von der eingestellten Drehgeschwindigkeit des Drehtisches. Für die Beschleunigungswerte in x- und y-Richtung ergibt sich eine quadratische Abhängigkeit, was mit dem physikalischen Zusammenhang zwischen Zentrifugalbeschleunigung und Drehgeschwindigkeit übereinstimmt.

Die Allan-Varianz-Analyse verdeutlicht, dass sich die Genauigkeit der Beschleunigungssensoren durch Mittelung der Messwerte verbessern lässt. Bei den Drehratensensoren ist dieser Effekt bei hohen Anregungen jedoch weniger ausgeprägt. Die Messungen zeigen zudem, dass bei niedrigerer Samplerate das Rauschen höher ausfällt, da die Anzahl der verfügbaren Messpunkte für die Mittelung geringer ist.

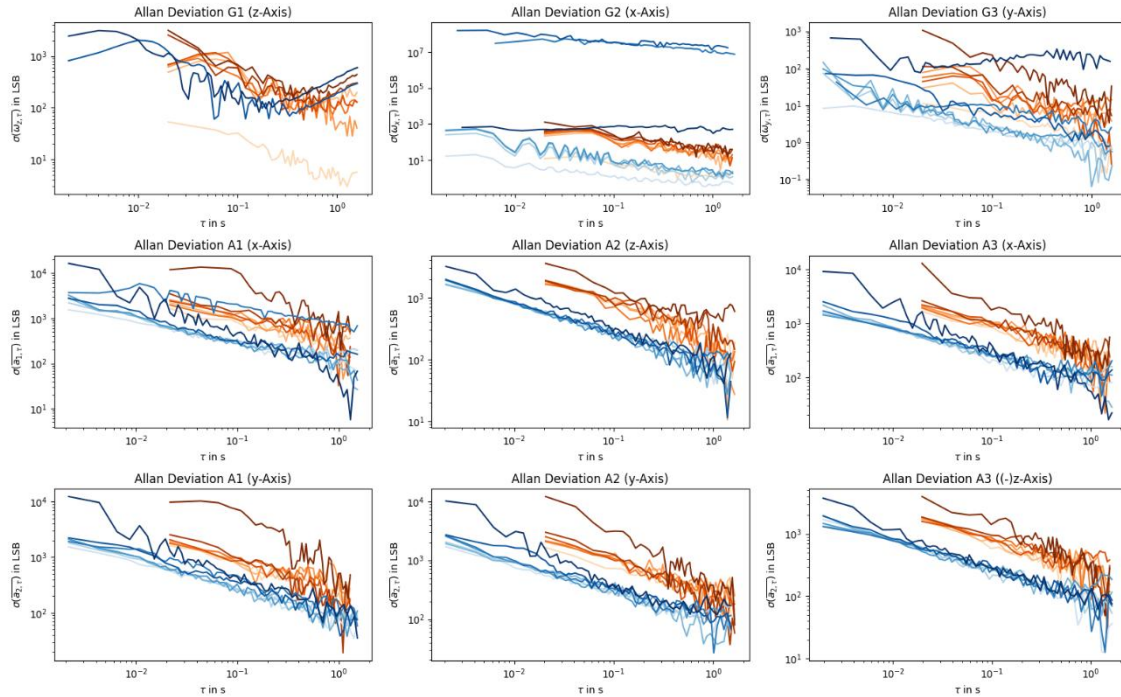


Abb. 4.7: Allan-Varianzen der Messungen vergleichend für alle Messgrößen (3xDrehrate, 6xBeschleunigung) dargestellt.

In der Frequenzanalyse der Sensordaten ist bei der höchsten Drehgeschwindigkeit von 1000 %/s ein deutlicher Peak im Bereich zwischen 100 Hz und 150 Hz erkennbar. Dieser Peak tritt in allen Messgrößen auf und ist auf mechanische Vibrationen des Drehtisches zurückzuführen.

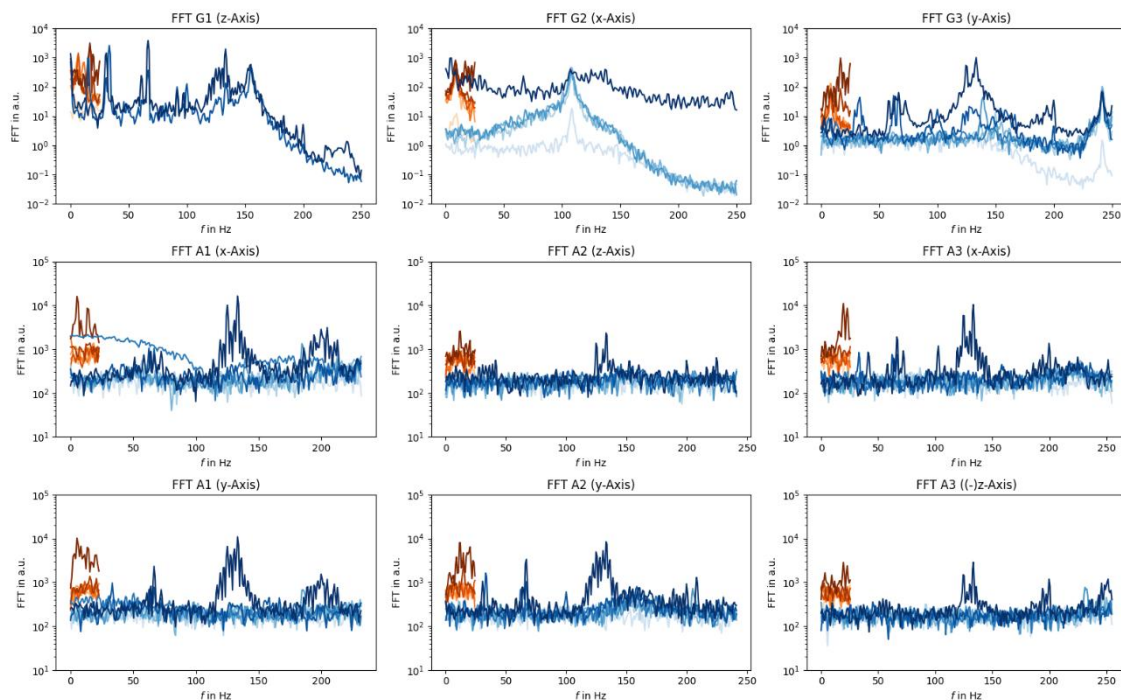


Abb. 4.8: Spektren der Messungen vergleichend für alle Messgrößen (3xDrehrate, 6xBeschleunigung) dargestellt.

Zur Untersuchung eines möglichen Zusammenhangs zwischen der Drehgeschwindigkeit und der Energieaufnahme aufgrund von Bitverteilungen in der Kommunikation wurden die über USB übertragenen Daten hinsichtlich der Verteilung von Einsen- und Nullen-Bits analysiert. Es konnte kein signifikanter Trend festgestellt werden, dass höhere Drehgeschwindigkeiten zu einer größeren Anzahl an Eins-Bits führen. Nach der Decodierung mit dem COBS-Verfahren (Consistent Overhead Byte Stuffing) nimmt die Anzahl der Eins-Bits über alle Drehgeschwindigkeiten hinweg sogar leicht ab. Die Datenmenge steigt erwartungsgemäß proportional zur eingestellten Samplerate. Die beobachtete Streuung bei hohen Datenraten lässt sich auf Paketverluste und fehlerhafte Übertragungen zurückführen, die nicht vollständig decodiert werden konnten.

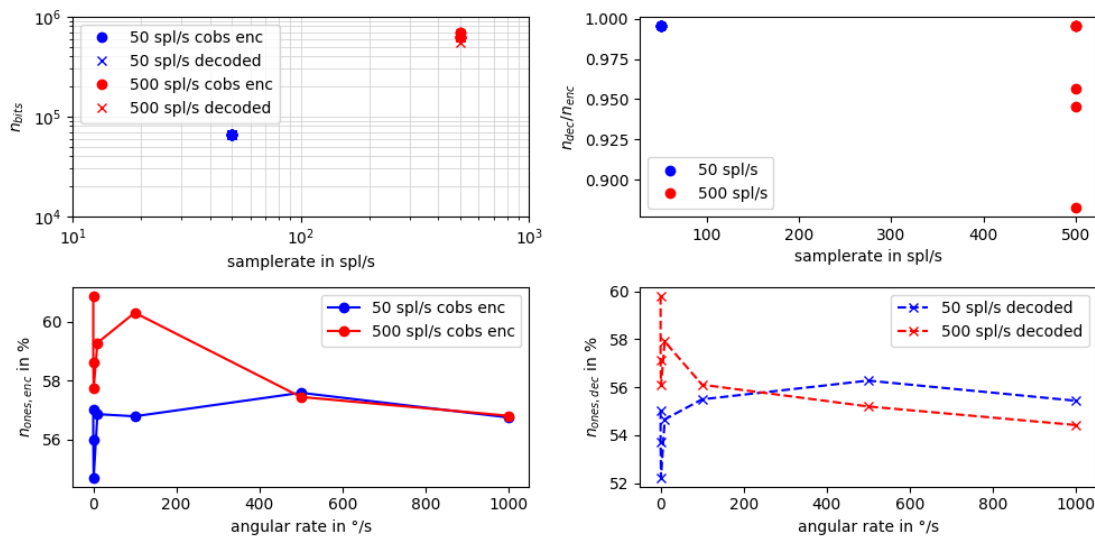


Abb. 4.9: Datenanalyse hinsichtlich Verteilung von Einsen- und Nullen-Bits.

Um einen möglichen Einfluss der Schleifkontakte bei verschiedenen Drehraten auf den Energieverbrauch auszuschließen, wurde anstelle der IMU ein ohmscher Widerstand von $200 \, \Omega$ eingebaut. Abbildung 4.10. zeigt die entsprechende Versuchsanordnung.

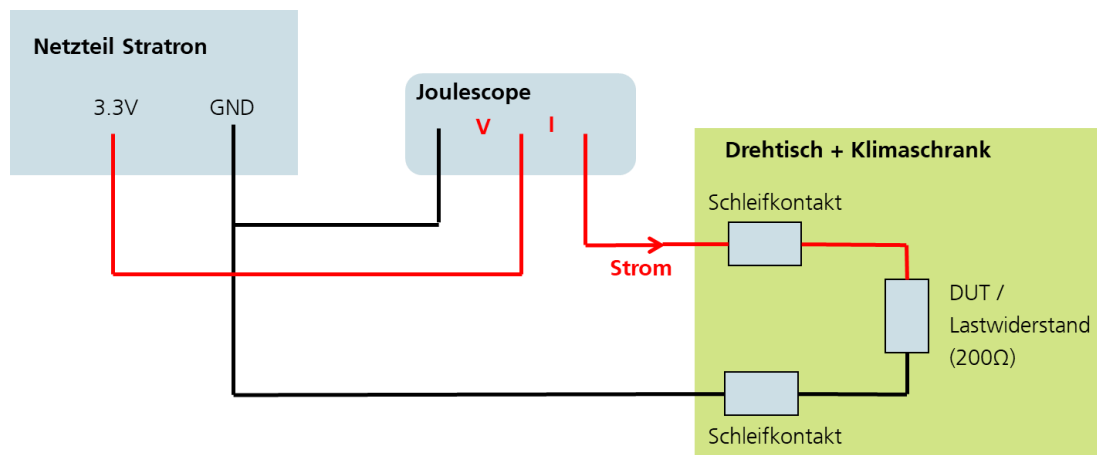


Abb. 4.10: Versuchsanordnung zur Untersuchung des möglichen Einflusses der Schleifkontakte des Drehtisches

Unabhängig von der Drehgeschwindigkeit konnte eine leichte Eigenerwärmung und damit verbundene leichte Erhöhung des Widerstandswertes festgestellt werden. Die führt jedoch zu keiner relevanten zusätzlichen Stromaufnahme.

4.4. Langzeitmessung der IMU-Leistungsaufnahme

Um den Einfluss einer möglichen Eigenerwärmung der IMU selbst zu untersuchen, wurde die Leistungsaufnahme über einen Zeitraum von rund 1,5 Stunden aufgezeichnet. Nach etwa 1,25 Stunden zeigte sich keine Veränderung der mittleren Leistungsaufnahme (siehe Abb. 4.11). Allerdings wurde ein periodisches Verhalten beobachtet: Etwa alle 30 Sekunden stieg die Leistungsaufnahme kurzfristig um rund 5 mW an, bevor sie wieder langsam abnahm. Dieses Verhalten blieb über den gesamten Messzeitraum hinweg erhalten und wird vermutlich durch interne Regelmechanismen eines Spannungsreglers verursacht. Zudem zeigte sich, dass die Entladezeit dieser Zyklen sich im Verlauf geringfügig verkürzte, was auf einen stabilen thermischen Zustand der Sensorik hindeutet.

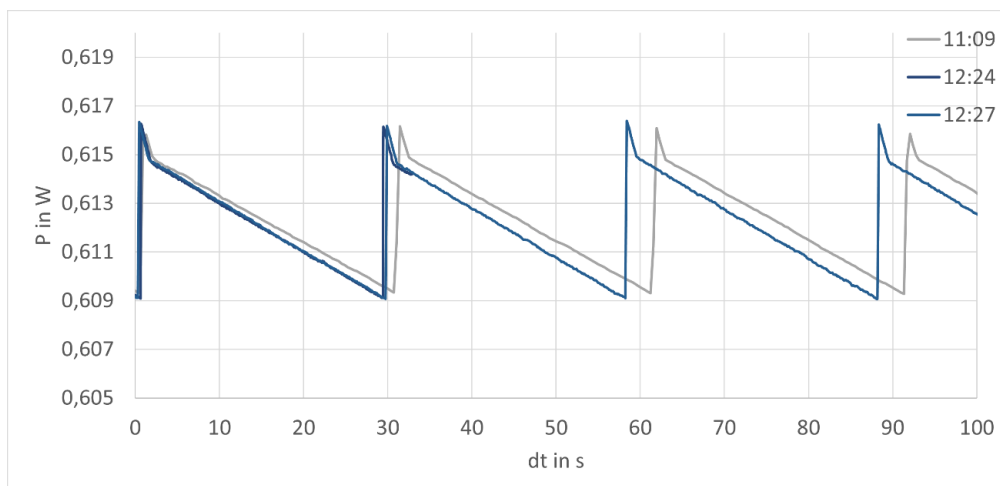


Abb. 4.11: Periodisch sprunghaftes Ansteigen und Abfallen der Leistungsaufnahme um 5mW

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Untersuchungen zeigen, dass der Energieverbrauch der ENAS-IMU weitgehend unabhängig von der mechanischen Anregung und der Drehgeschwindigkeit ist. Die Variation der Samplerate hat dagegen einen klar messbaren Einfluss: Mit steigender Datenrate erhöht sich die Leistungsaufnahme aufgrund intensiverer Kommunikationsprozesse zwischen Sensor und Host-System.

Mechanische Einflüsse wie Vibrationen oder Zentrifugalkräfte wirken sich in erster Linie auf die Messqualität aus, nicht jedoch auf die elektrische Leistungsaufnahme aus. Die Versuche mit einem ohmschen Ersatzwiderstand zeigen, dass der aufgebaute Versuchstand keinen Mehrverbrauch verursacht. Die Schleifkontakte des Drehtisches sind in den hohen Drehratebereich stabil. Zudem belegen Langzeitmessungen einen stabilen Energieverbrauch der IMU mit nur minimalen, vermutlich durch einen Spannungsregler verursachte, Schwankungen im Milliwattbereich.

6. Empfehlungen für den praktischen Einsatz

Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass moderne MEMS-Inertialsensoren (IMUs) auch unter realtypischen Einsatzbedingungen eine hohe Energieeffizienz und Stabilität aufweisen. Für die praktische Nutzung lassen sich daraus mehrere Handlungsempfehlungen ableiten:

Optimierung der Samplerate zur Energieeinsparung:

Der Energieverbrauch hängt primär von der eingestellten Datenrate ab. Eine Reduktion der Samplerate auf das tatsächlich benötigte Minimum kann den Leistungsbedarf signifikant senken, ohne die Messqualität wesentlich zu beeinträchtigen. Für batteriebetriebene Systeme, etwa Drohnen, Wearables oder autonome Sensoren, ist diese Anpassung eine einfache und effektive Maßnahme zur Laufzeitverlängerung.

Mechanische Einflüsse sind energetisch vernachlässigbar:

Drehgeschwindigkeit, Vibrationen oder Zentrifugalkräfte haben keinen nennenswerten Einfluss auf die elektrische Leistungsaufnahme der IMU. Dies spricht für den robusten und zuverlässigen Einsatz auch in mechanisch beanspruchten Umgebungen, wie etwa in rotierenden Maschinen, Fahrzeugen oder Robotergelenken.

Kommunikationsschnittstellen als Hauptenergiequelle:

Der größte Energieanteil entfällt auf die Kommunikation zwischen Sensor und Auswerteeinheit. Durch geeignete Kommunikationsstrategien wie beispielsweise gepufferte Datentransfers, energieeffiziente Übertragungsprotokolle oder lokale Vorverarbeitung auf dem Sensor kann die Effizienz deutlich verbessert werden.

Langzeitbetrieb und Periodizität beachten:

Die periodischen Leistungsschwankungen im Bereich von wenigen Milliwatt können auf zyklische interne Prozesse (z.B. Speicherzugriffe, Taktumschaltungen, Kommunikationszyklen oder Ladeprozesse von Spannungsreglern) hindeuten. Diese Effekte sollten bei Langzeitmessungen oder Energieprofilanalysen berücksichtigt werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

7. Fazit

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass moderne MEMS-Inertialsensoren einen sehr stabilen Energieverbrauch zeigen, der primär durch Software- und Kommunikationsparameter bestimmt wird. Mechanische Einflüsse (Drehrate/Beschleunigung) wirken sich vorwiegend auf die Messgüte, nicht aber auf die elektrische Leistungsaufnahme aus.

Für den praktischen Einsatz bedeutet dies, dass IMUs mit hoher Zuverlässigkeit auch in dynamischen oder rotierenden Anwendungen eingesetzt werden können, ohne energetische Nachteile befürchten zu müssen. Der größte Hebel zur Verbesserung der Energieeffizienz liegt somit in der Optimierung der Datenverarbeitung und Kommunikationsstrategien, nicht in der Sensormechanik selbst.

8. Danksagung

Diese Forschung wurde vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen des Projekts GreenICT@FMD (FKZ: 16ME0496) gefördert.