

Untersuchung von Miniatur-Verstärkersystemen für Breitbandsensorsignale am Beispiel des ALTP-Messsystems

Huber, Konstantin; Gackstatter, Felix; Rödiger, Tim

Hochschule Landshut

<https://doi.org/10.57688/363>

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Untersuchung wird mit Hilfe einer direkten Integration eines miniaturisierten Messverstärkersystems in das Sensorgehäuse eines ALTP-basierten Wärmestromsensors ein Ansatz zur Erhöhung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses verfolgt. Berücksichtigt werden hierbei der begrenzte Bauraum im Messmodul, ein möglichst hohes Verstärkungsbandbreitenprodukt und sich stark ändernde thermische Randbedingungen. Die thermischen Bedingungen sind eine direkte Folge der Systemintegration der Sensoren in wandnahe von thermisch hochbelasteten Bauteilen.

Es werden verschiedene Strategien zur Signalverstärkung verfolgt: Zum einen werden Einzelchiplösungen, zum anderen werden chopper-stabilisierte Verstärker mit einem nahezu Nulldriftverhalten in einer Multistufenanordnung verwendet. Alle Systeme werden in einem für Wärmestromsensoren typischen konvektiven Einsatzszenario getestet.

In den Untersuchungen zeigten sich Vorteile für eine direkte Integration des Messverstärkersystems im Bereich der Signalcharakteristik und des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses. Zusätzlich konnte eine signifikante Vereinfachung der Messkette erreicht werden, welche die Fehleranfälligkeit durch Bedienfehler stark reduziert.

1. Einleitung

Die schnelle Erfassung von thermischen Parametern zur Charakterisierung von technischen Systemen wird durch das Streben nach höheren Wirkungsgraden und Effizienzoptimierungen immer wichtiger. Als ein wichtiges Messinstrument kann dabei die hochzeitaufgelöste ALTP-Wärmestromsensorik agieren, welche Wandwärmeströme direkt erfassen kann und eine Frequenzauflösung bis in den Megahertzbereich bietet. Klassische Anwendungsfälle wie das Vermessen von thermischen Fluidströmungen sind nach wie vor das Hauptanwendungsfeld dieser Messtechnik [1,2,3]. Neueste Entwicklungen zeigen jedoch, dass auch verstärkt die Optimierung von Kühlstrategien [4], gerade in Bezug auf moderne Lithium-Zellsysteme, Leistungselektronik [6] und Brennstoffzellen [7] eine immer größere Rolle spielen werden. Hier stehen vor allem der Bauteilschutz und die Kühleffizienz im Vordergrund.

Allen Anwendungsfällen gemein liegt die Problematik, dass herkömmliche Wärmestrommessketten Einbau- und platztechnischer Probleme unterliegen. Das zwingend notwendige Messverstärkersystem befindet sich meist in einer zweiten Einheit extern platziert. Dies macht die Messkette nicht nur stärker anfällig für elektromagnetische Einstreuungen, sondern auch aus bauraumtechnischer Sicht in Prüfständen und Industrieprodukten uninteressant. Ziel dieser Untersuchung ist daher, neue Messverstärkerkonzepte für Wärmestromsensoren anhand der ALTP-Messtechnik zu entwickeln, welches komplett in das Sensorgehäuse integriert werden können.

2. Stand der Technik

Die ALTP-Messtechnik ermöglicht eine direkte Messung des Wandwärmestroms mit einem Frequenzgang bis in den niedrigen Megaherzbereich. Diese schnellen Ansprechzeiten werden durch die Ablation einer ca. 500 Nanometer dünnen anisotropen Schicht erreicht. Die Schicht besteht aus abwechselnd laserablatierten YBCO und CuO₂-Lagen welche als Atomlagenthermosäule fungieren und auf einem SrTiO₃ Substrat aufgewachsen sind [5]. Die aktive Fläche des Sensors ist unter einem Schichtwinkel γ transversal zur c-Achse (Flächennormale) orientiert. Dadurch bildet sich bei Wärmebelastung ein transversaler Seebecktensor aus, wessen elektrische Spannungskomponenten in einer Raumrichtung abgegriffen werden. Die aktive Fläche der Schicht beträgt ca. 2 x 3 mm. Bedingt durch die sehr dünne aktive Messschicht des Sensors liegen Messspannungen meist im Bereich von einigen 100 μ V bis 2 mV. Aus diesem Grund wird das Messsignal bisher mit externen Messverstärkersystemen um mindestens zwei Größenordnungen in den höheren Millivoltbereich verstärkt. Durch unverstärkte Signalbereiche ergeben sich jedoch je nach Messumgebung mehr oder weniger stark für elektromagnetische Einstreuungen anfällige Teile der Messkette.

Bisher werden hochfrequente DC-Messverstärker (-3 dB bei 700 kHz-1 MHz Bandbreite) auf Basis von hochfrequenten spannungsrückgekoppelten Instrumentenverstärkern aufgebaut und für die Messungen mit Wärmestromsensoren optimiert. Die Spannungsversorgung erfolgt dabei symmetrisch über ein 24V-System bestehend aus zwei 12V Batterien. Häufig besitzen Verstärker dieser Art noch einen externen Erdungseingang.

3. Versuchsaufbauten

Zur Messung von Frequenzantworten der verschiedenen Verstärkersysteme werden synthetische Messsignale mit einem Signalgenerator erzeugt und mit einem digitalen Oszilloskop (Rigol MSO5074) ausgewertet und abgespeichert. Die Daten werden anschließend direkt an einen Messrechner transferiert und dort über digitale Datenauswertungsroutinen ausgewertet.

In einer zweiten Untersuchung werden die Systeme im eingebauten Zustand auf ihr Rauschverhalten hin untersucht. Dazu werden die Edelstahlensorgehäuse (siehe Abb. 1) mit dem jeweiligen Verstärker versehen und anschließend geerdet. Um konstante Bedingungen zu erhalten, wird der Test für jeden Verstärker mit demselben Sensorfilm durchgeführt. Dies ist wichtig, denn die Filme haben herstellungsbedingte Unterschiede des Innenwiderstands.

4. Bauraum im Sensormodul

Das verwendete Sensormodul besteht aus einem einschraubbaren ferromagnetischem Edelstahlgehäuse mit M8x1 Gewindeanschluss, ist druckstabil bis ca. 100 bar und aktiv kühlbar. Der Aufbau und die Kalibrierung erfolgen dabei an der Hochschule Landshut. Dadurch kann es speziell für jeden Anwendungsfall angepasst und dimensioniert werden.

Um Verstärkerkonzepte für das aktuelle ALTP-Messmodul entwickeln zu können, müssen zunächst bauraumtechnische Anforderungen geklärt werden. In Abbildung 1 ist dazu eine Schnittzeichnung des Moduls abgebildet. Das Gehäuse hat 10 mm Außendurchmesser und 5.5 mm Innendurchmesser. Die Abmessungen des Sensors sind meist einsatzspezifisch mit dem Fokus auf eine möglichst kompakte und schlanke Baugröße vorgeben.

Damit noch ausreichend Platz für weitere sensorinterne Komponenten wie die Kühllösung bleibt, darf die Dicke des Messverstärkers 2 mm nicht überschreiten. Insgesamt ergibt das damit ein maximaler Bauraum von 3.5 x 25 x 2 mm.

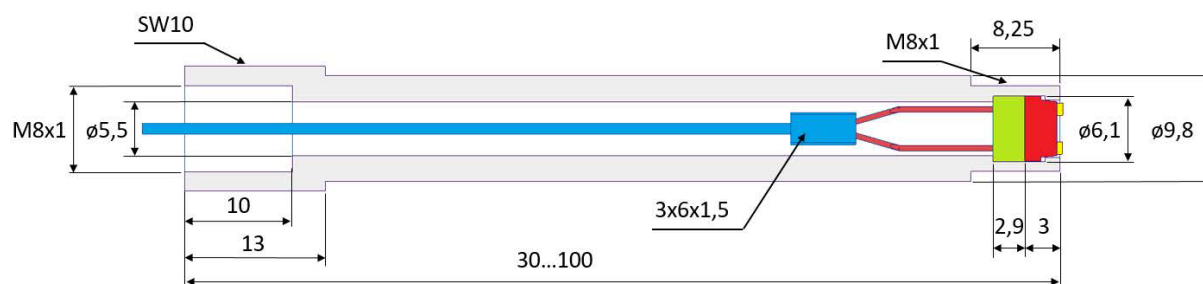


Abb. 1: Bauraum und Abmessungen des Sensormoduls mit Kühllösung [4]

5. Verstärkerkonzepte

Die Neuentwicklung wird zunächst auf die Auswahl geeigneter Messverstärkerchips fokussiert. Dabei ist nicht nur das Signal-zu-Rausch-Verhältnis, sondern auch der Temperatureinfluss und das damit einhergehende Driftverhalten und die dynamischen Anforderungen an das Messsystem von Wichtigkeit. Im Entwicklungsprozess entstanden drei verschiedene Konzepte, welche nachfolgend erläutert werden:

5.1. Verstärkerkonzept 1

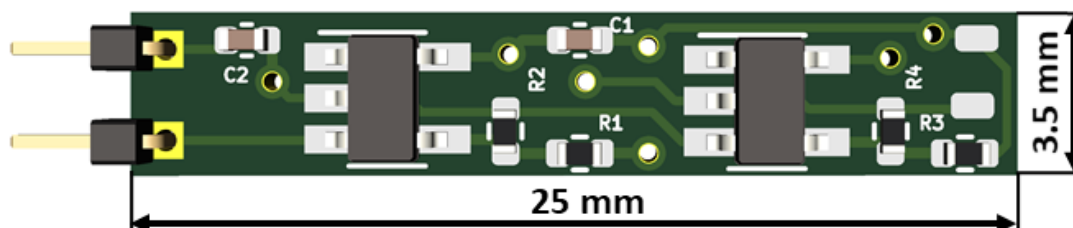


Abb. 2: Verstärkerkonzept 1, basierend auf einem zweistufigen, chopper-basierten Operationsverstärker

Verstärkerkonzept 1 (siehe Abb. 2) besteht aus einem zweistufigen Aufbau mit zwei chopper-basierten OPA188, bzw. ADA4523-Verstärkern. Sie bieten den Vorteil einer sehr guten DC-Präzision mit einem relativ niedrigen Rauschniveau im Niederfrequenten Bereich bei gleichzeitiger großer Versorgungsspannung von ± 12 V. Außerdem erlaubt der Aufbau eine sehr gutes Driftverhalten auch bei hohen Temperaturschwankungen. Dies ist für den Einsatz in Umgebungen mit stark schwankenden Temperaturen von großer Bedeutung.

5.2. Verstärkerkonzept 2

Das zweite Verstärkerkonzept wird auf Basis eines klassischen spannungsrückgekoppelten Instrumentenverstärkers ausgeführt. Mithilfe des AD8421 kann ein Verstärkerkonzept mit geringem Platzbedarf bei gleichzeitig hoher Präzision, hohem Bandbreitenprodukt, hoher Gleichtaktunterdrückung und für die Baugröße niedrigen Rauschniveaus realisiert werden. Der Verstärker ist dabei mit einer Baugröße von 3×5 mm (MSOP-8) gerade an der Grenze um die Baumraumtechnischen Anforderungen zu erfüllen. Die Grundschaltung des Verstärkers erlaubt einen Betrieb bis 2 MHz (-3 dB) bei einem Verstärkungsfaktor von 100. Die Charakteristik des Verstärkers führt zu weitbandigen Schwingungen, welche mit Ausgangswiderständen und Rückkopplungsunterdrückenden Kondensatoren gedämpft werden. Die Spannungsversorgung erfolgt auch hier symmetrisch mit ± 12 V. Das temperaturabhängige Driftverhalten liegt um mehr als eine Größenordnung ($0.2 \mu\text{V}/\text{K}$) am Eingang höher als bei Variante 1. Dies kann ggf. in Kombination mit hohen Verstärkungsfaktoren (100x) zu einem Driftverhalten des Spannungssignals von bis zu $20 \mu\text{V}/\text{K}$, bzw. $0.2 \text{ W}/\text{cm}^2/\text{K}$ führen. Da meist hohe Temperaturschwankungen auch mit hohen thermischen Lasten und damit hohen Wärmeströmen eingehen, muss anwendungsfallspezifisch entschieden werden, ob dieses Verhalten toleriert werden kann.

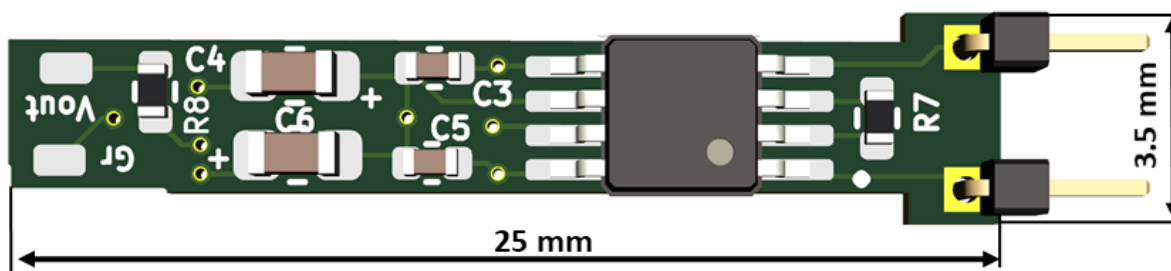


Abb. 3: Verstärkerkonzept 2, basierend auf einem Instrumentenverstärker

5.3. Verstärkerkonzept 3

Das dritte Verstärkerkonzept ist mit Fokus auf eine möglichst kurze und kompakte Bauweise entwickelt worden und stellt eine miniaturisierte Form des zweiten Konzepts dar. Dies geschieht durch die Beschränkung auf die nötigsten stabilisierten Komponenten, alle optionalen und potentiell signalverbessernden Komponenten wurden ausgespart.

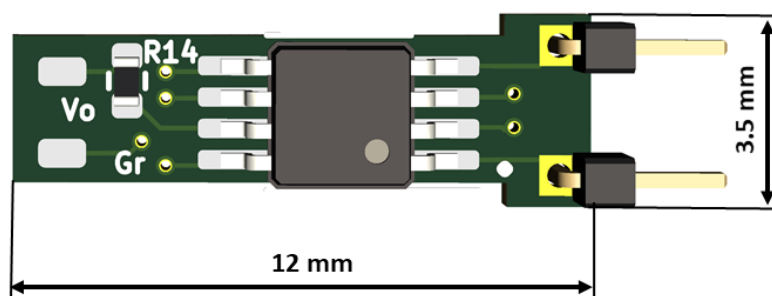


Abb. 4: Verstärkerkonzept 3 in Minimalbauweise auf Basis von Konzept 2

6. Bandbreitenmessung und Signalantwort

Die jeweils zu testenden Verstärker werden mit einem sinusförmigen Eingangssignal, welches in seiner Amplitude konstant gehalten wird, beaufschlagt. Das Signal wird während der Versuchsdurchführung stufenweise mit unterschiedlichen Grundfrequenzen, welche von 1 kHz bis 1,5 MHz reichen, variiert. Die Signalantwort des Verstärkers wird mit dem Oszilloskop erfasst und aufgezeichnet. Als Referenzsignal wird zusätzlich das Eingangssignal des Verstärkers mit ausgewertet und gespeichert. Abbildung 5 zeigt exemplarisch ein Eingangssignal und ein dazu korrespondierendes Ausgangssignal bei 1,3 MHz Signalfrequenz. Anhand dieser Datensätze werden mit Hilfe einer numerischen Fast-Fourier-Transformation (FFT) die Phasen- und Amplitudeninformationen zu den jeweiligen Signalen berechnet, ausgewertet und gegeneinander verglichen.

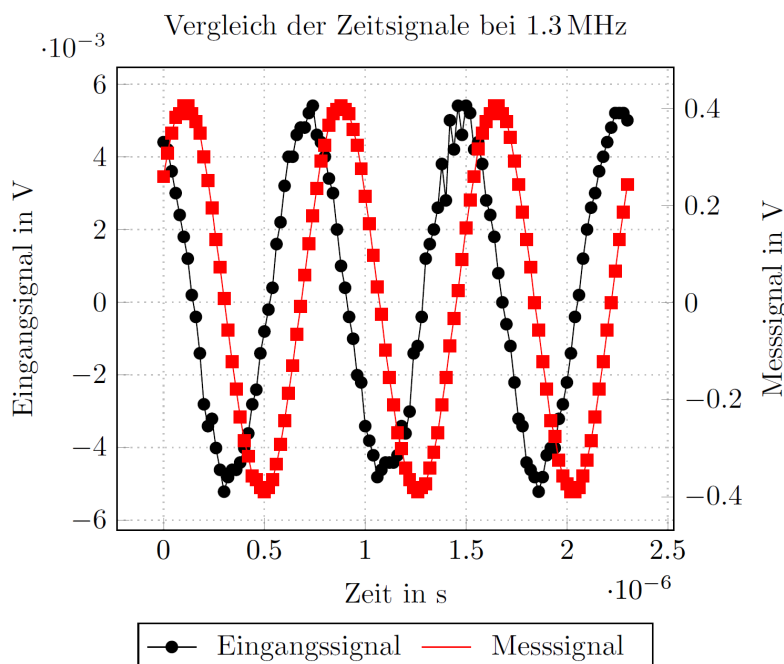


Abb. 5: Vergleich eines Eingangssignals mit 1,3 MHz und des korrespondierenden Ausgangssignals gemessen mit Verstärkerkonzept 3

Als Resultat erhält man die in Abbildung 6 dargestellten Amplituden-/Frequenzantworten der Verstärkerkonzepte abhängig von der jeweiligen Signalfrequenz des Eingangssignals. Folgende Erkenntnisse können daraus gewonnen werden:

6.1. Verstärkerkonzept 1

Konzept 1 basiert auf einem kaskadierten, chopper-stabilisierten Zero-offset Verstärkers (ADA4523) und ist für hohe Verstärkungen bei hohen Messfrequenzen weniger geeignet. So werden maximal 29 dB bei einer -3dB-Grenzfrequenz von 800 KHz und 20 dB bei 1,5 MHz erreicht. Eine Optimierung der Grenzfrequenz würde weiter zu Lasten der Gesamtverstärkung gehen. Dieses Konzept empfiehlt sich daher besonders, wenn hohe Einsatztemperaturen, bzw. hohe Temperaturschwankungen erwartet werden.

6.2. Verstärkerkonzept 2 und 3

Beide Konzepte basieren auf einem AD8421 Instrumentenverstärker mit 40 dB Verstärkung. Die theoretische -3dB-Bandbreite sollte ca. 2 MHz betragen, was nur von Verstärkungskonzept 2 erreicht wird. Bedingt durch den nochmal deutlich kompakteren Aufbau des dritten Konzepts fällt die Grenzbandbreite auf ca. 1,5 MHz ab. Der Vergleich mit einem größeren Verstärkerchip AD8429 (Abbildung 6 links oben) zeigt, dass sowohl der Phasenwinkel, als auch die Bandbreite grundsätzlich durch die Miniaturisierung nicht maßgeblich beeinträchtigt sind. Beide Konzepte können die Anforderungen erfüllen. Damit ist eine Substitution des externen Messverstärkers möglich.

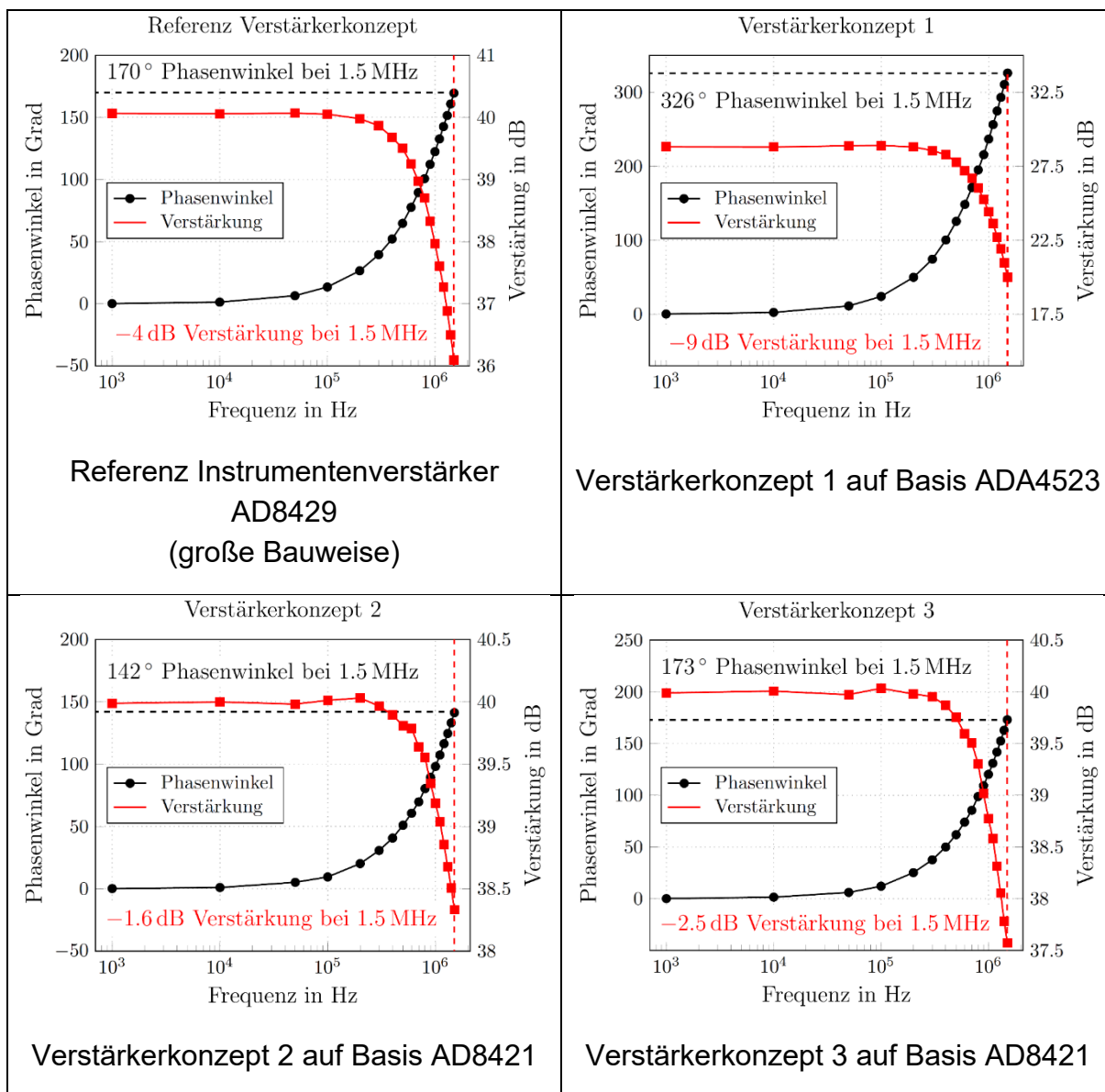


Abb. 6: Ergebnisse der Phasen und Amplitudenuntersuchung der drei Verstärkerkonzepte im Vergleich zum einem Referenzverstärker

7. Grundrauschen und Signal-zu-Rauschverhältnis

Das Grundrauschen wurde mit allen Verstärkerkonzepten bei identischer Konfiguration des Messaufbaus untersucht. Dazu wurden die Verstärkermodule offen (ohne elektromagnetische Schirmung) mit einem externen ALTP Sensor an einem Oszilloskop mit 10 MHz Samplerate vermessen. Abbildung 7 zeigt die spektrale Leistungsdichte aller Konzepte betrieben außerhalb des Sensorgehäuses. Zu erkennen ist, dass das kompakteste Konzept 3 eine höhere Leistungsdichte des weißen Rauschens als das etwas größere Konzept 2 aufweist. Auch die mittlere Rauschdichte ist dadurch erhöht, was im Einsatz zu einem schlechteren Signal-zu-Rausch-Verhältnis führt.

Verstärkerkonzept 3 und der Referenzverstärker liegen trotz deutlich unterschiedlicher Ansätze (Integrierter Verstärker gegenüber externen Verstärker) weitestgehend beieinander. Konzept 1 (schwarz) bietet ein um nahezu 2 Größenordnungen niedriges Rauschniveau. Bezieht man das deutlich niedrigere Verstärkungsniveau (29 dB zu 40 dB) mit ein, so profitiert das Signal-zu-Rausch-Verhältnis um ca. Faktor 5. Die Chopperfrequenz liegt dabei bei 330 kHz. Ein signifikanter Einfluss auf das Rauschverhalten konnte nicht festgestellt werden. Das Verstärkungsbandbreitenprodukt beträgt ca. 5 MHz die gemessene Grenzfrequenz (-3 dB) des Gesamtverstärkers 1.5 MHz. Die Eckfrequenz des $1/f$ Rauschens liegt für ADA4523 bei ca. 10 kHz, für den AD8421 bei 10 Hz. Offensichtlich dominieren elektromagnetische Einstreuungen und die Einflüsse der Sensorik (thermisches Rauschen) im Versuchsaufbau, sodass keine typisches Funkelrauschen erkennbar ist.

Die Ordinaten in Abbildung 7 sind für die Sensorik bereits in Watt umgerechnet. Der Umrechnungsfaktor zu V^2/Hz ist dabei abhängig von der spezifischen Sensitivität S , der Messspannung V , der Sensoroberfläche A_{Sen} und dem Verstärkungsfaktor G des Messverstärkers und kann als $W = \frac{V * A_{Sen}}{S * G}$ formuliert werden.

Betrachtet man Abbildung 7 b) lässt sich feststellen, dass die Integration in das Gehäuse für Instrumentenverstärker gerade im realen Prüfstandsbetrieb (Einbau in einem Konvektionsprüfstand) sinnvoll ist. Das untersuchte Konzept 2 bietet hier ein im Mittel um den Faktor 10 reduziertes Rauschniveau. Auch hier zeigt sich also, dass die elektromagnetischen Einstreuungen auf die unverstärkte Messleistung einen großen Einfluss haben. Offensichtlich dominieren diese auch das Gesamtrauschverhalten der Messkette.

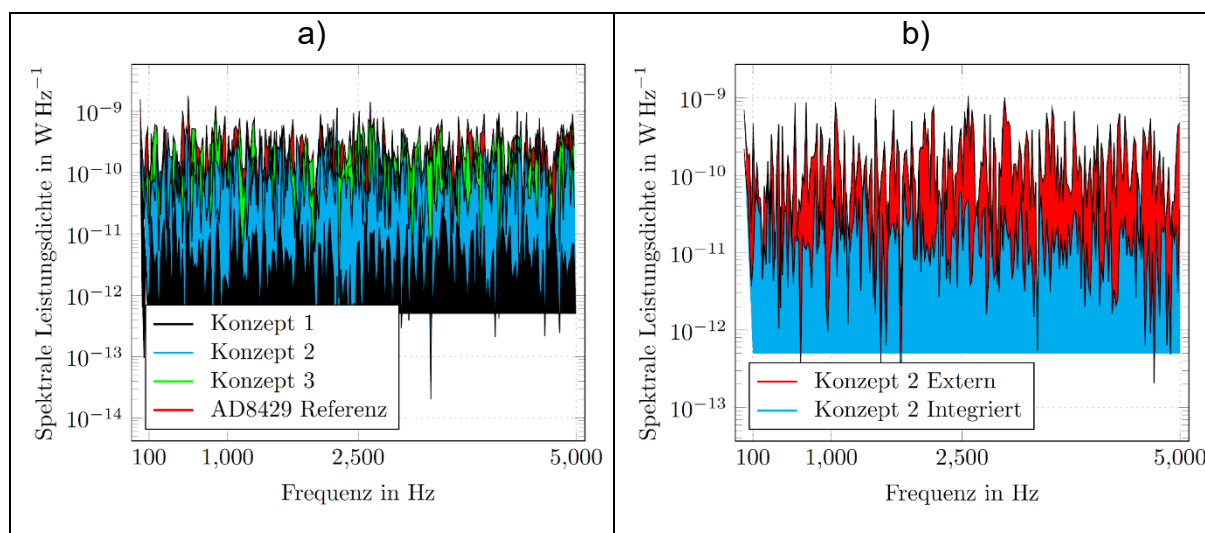


Abb. 7: Spektrale Leistungsdichte der Ausgangssignale der Verstärkerkonzepte. a) alle Konzepte extern aufgebaut, b) Vergleich direkte Integration in Gehäuse

8. Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden drei verschiedene Verstärkerkonzepte in sehr kompakter Bauweise entwickelt und erfolgreich im ALTP-Messmodul platziert. Mithilfe einer Phasen- und Frequenzganganalyse und einer Rauschanalyse konnten signaltechnische Eigenschaften der verschiedenen Konzepte untersucht werden. Folgende Erkenntnisse konnten daraus gewonnen werden:

1. Es zeigte sich, dass das chopper-stabilisierte Verstärkerkonzept 1 die geforderten Verstärkerbandbreitenprodukte bei den gegebenen Bauraumbedingungen nicht bereitstellen konnte. Ein Einsatz ist nur bei hohen Anforderungen an das Signal-zu-Rauschverhältnis und bei hohen Temperaturschwankungen innerhalb des Sensormoduls zu empfehlen, wenn Messfrequenzen bis in den Megahertzbereich nicht notwendig sind.
2. Verstärkerkonzept 2, welches auf einen spannungsrückgekoppelten Instrumentenverstärker basiert, bietet bei einer Verstärkung von 40 dB eine -3dB-Bandbreite von 2 MHz. Das Rauschniveau bewegt sich dabei leicht unter dem Niveau eines externen Referenzmessverstärkers.
3. Das dritte Verstärkerkonzept zeigt durch die noch stärker ausgeprägte Miniaturisierung und durch die Beschränkung auf die wesentlichsten Bauteile Einbußen in der maximalen Messfrequenz von 25 % gegenüber dem 2. Konzept. Das Rauschniveau lag ebenfalls über dem des zweiten Konzepts, jedoch auf Niveau des externen Messverstärkers.
4. Eine Untersuchung des Rauschverhaltens in einem konvektiven Prüfstand bei einerseits direkter Integration in das Sensorgehäuse und bei andererseits externem Betrieb des Verstärkerkonzepts 2 zeigt ein im Mittel um den Faktor 10 besseres Gesamttrauschverhalten bei direkter Integration. Gerade bei höheren Frequenzbereichen kann daher eine direkte Integration deutliche Vorteile bieten.

Literatur

- [1] Huber, K.; Roediger, T.: Comparison of Radiation and Convection-Based Calibration of Fast-Response Heat Flux Sensors. Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air, Vol. 84140, American Society of Mechanical Engineers, 2020.
- [2] Knauss, H.; Roediger, T. et al.: A Novel Sensor for Fast Heat Flux Measurements. In: AIAA Journal of Spacecraft & Rockets, 46/2, p. 255-265, 2009.
- [3] Roediger, T.: The Atomic Layer Thermopile - A New Heat Transfer Measurement Technique in Fluid Mechanics and Thermodynamics. Dissertation, Stuttgart, 2009.
- [4] Gackstatter, F.; Huber, K.; Roediger, T.: Ein neuartiges Atomlagenthermosäulenbasiertes Sensorsystem für hochzeitaufgelöste Wandwärmestrommessungen. In: Tagungsband 2. Symposium Elektronik und Systemintegration ESI 2020, Landshut, 2020.

- [5] Zeuner, S.: Atomlagenthermosäulen in Hochtemperatur Supraleitern als schnelle Strahlungsdetektoren. Dissertation, Regensburg, 1994.
- [6] Schulz-Harder, J.: Efficient cooling of power electronics. 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA), IEEE, 2009.
- [7] Freundt, P.: Systemnahe thermische Charakterisierung eines oxidkeramischen Brennstoffzellen-Stacks für die mobile Anwendung. Dissertation, Universität Stuttgart, 2015.

Kontakt

Konstantin Huber, M. Sc.
Hochschule Landshut
Fakultät Maschinenbau
Am Lurzenhof 1
84036 Landshut
E-Mail: konstantin.huber@haw-landshut.de