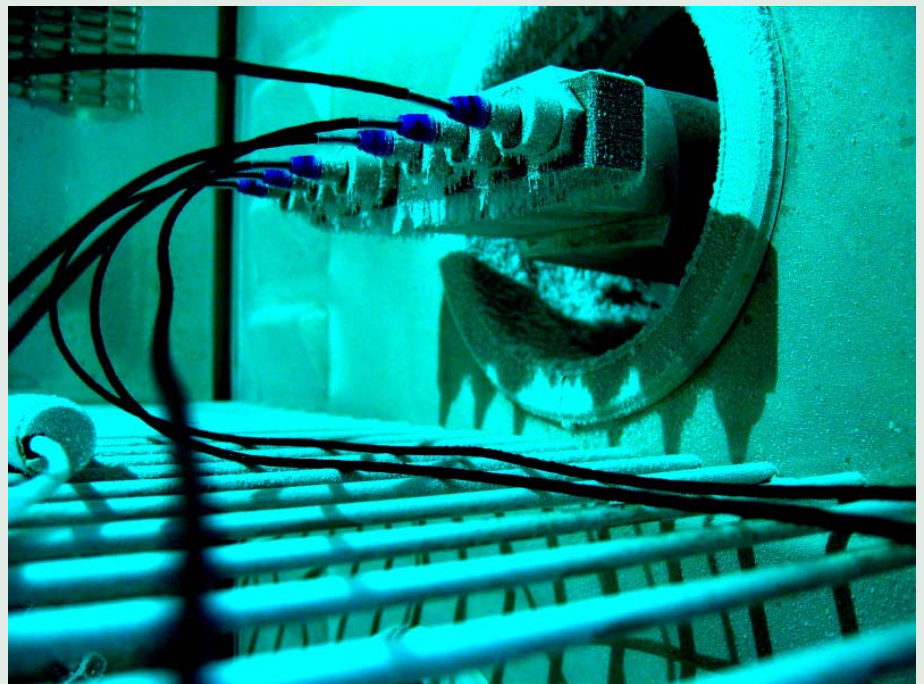


# Temperaturgangskompensation von piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmern bei der Simulation von kombinierten mechanisch-klimatischen Belastungen im Prüflabor

Dargestellt an einem praktischen Versuchsaufbau im Prüflabor

Dipl.-Ing. (FH) Sascha Riek \*)



## Einführung

Ständig wachsende Anforderungen an die Lebensdauer und Zuverlässigkeit moderner Produkte erfordern zunehmend genauere Methoden der Komponentenprüfung.

Eine zentrale Rolle spielt dabei der Einfluss umweltbedingter Faktoren, wie z. B. mechanische und klimatische Belastungen, die auf das Bauteil einwirken. Immer häufiger werden im Rahmen der Umweltsimulation diese Faktoren zur Bauteiloptimierung im Labor nachgestellt. Dazu werden unter anderem elektrodynamische Schwingerreger und Klimaprüfkammern eingesetzt.

Zur Regelung eines Schwingerregers wird im einfachsten Fall ein Beschleunigungsaufnehmer verwendet. Dieser befindet sich aus regelungstechnischen Gründen nahe der zu prüfenden Baugruppe, was zur Folge hat, dass bei Schwingprüfungen mit gleichzeitigem Temperaturwechsel der Beschleunigungssensor ebenfalls der klimatischen Belastung ausgesetzt ist. Durch den physikalischen Aufbau des Beschleunigungsaufnehmers ist die gemessene Ausgangsgröße nicht nur von der mechanischen Schwingung, sondern auch von dessen Temperaturumgebung abhängig. Dieser Effekt verursacht eine Ungenauigkeit, die bei der Berechnung des Fehlerbudgets maßgeblich mit einfließt.

\*) Dipl.-Ing. (FH) Sascha Riek  
Telus - Testlabor für  
Umweltsimulation GmbH  
73266 Bissingen a.d.Teck  
www.telus.de

m+p international Mess- und Rechner-  
technik GmbH  
30173 Hannover  
www.mpihome.com

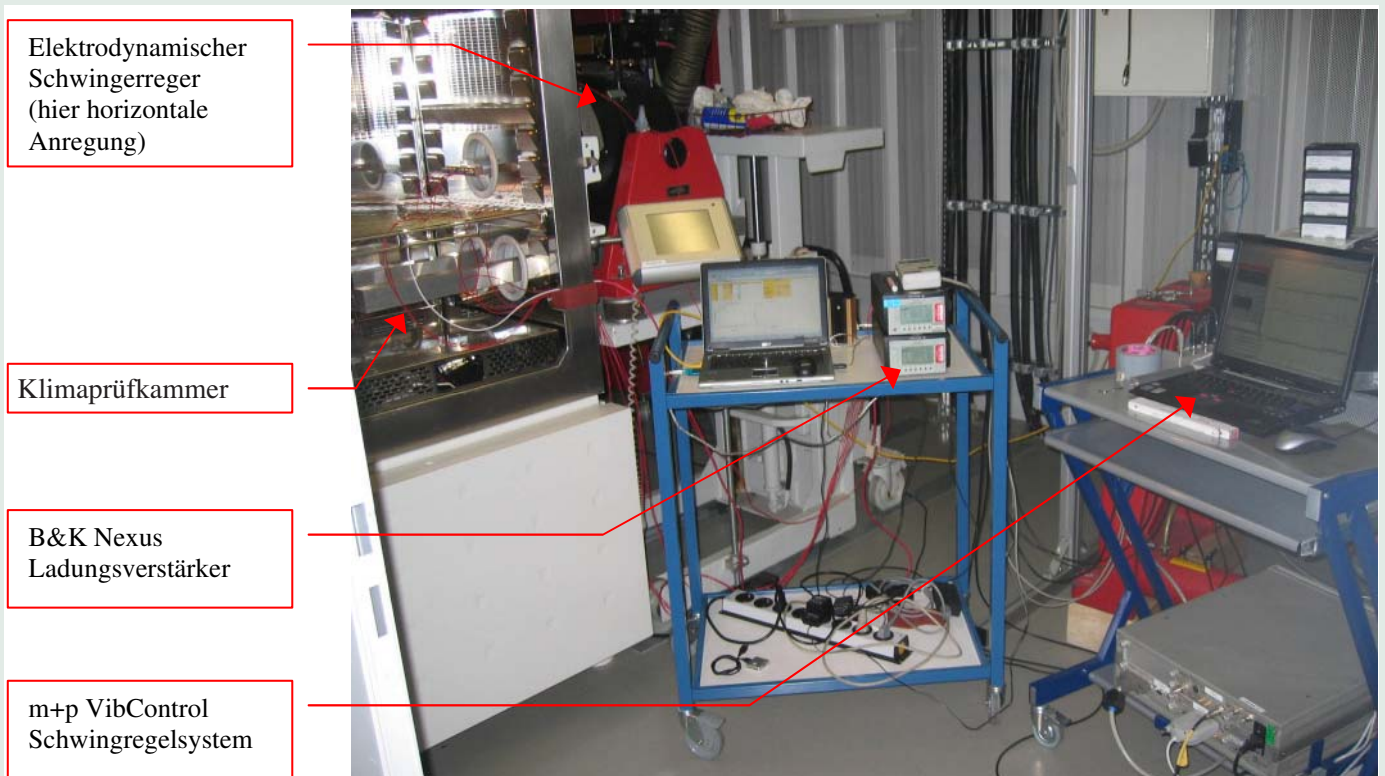


Bild 1: Versuchsaufbau zur Ermittlung des Temperaturganges von piezoelektronischen Beschleunigungsaufnehmern

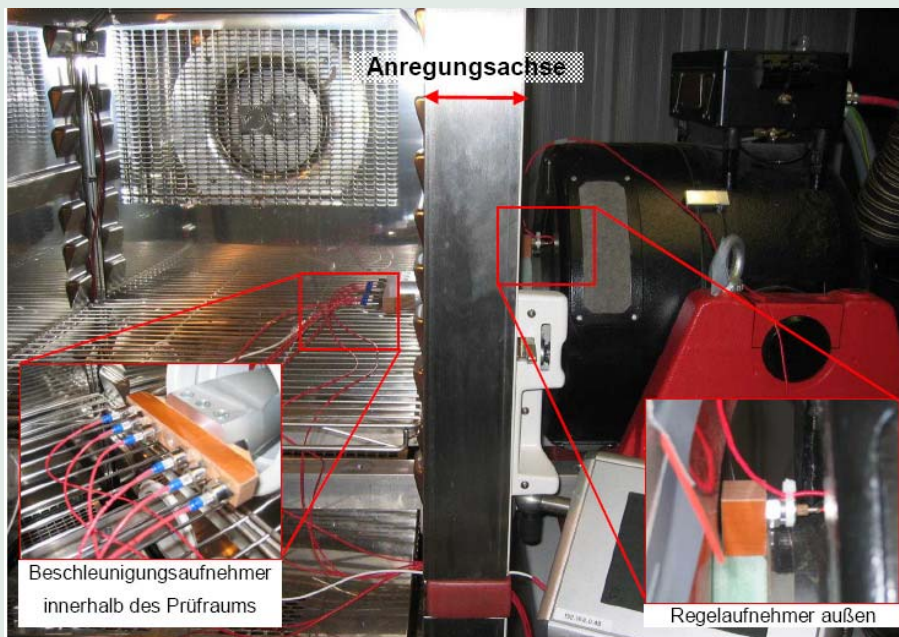


Bild 2: Positionierung der Beschleunigungsaufnehmer

### Versuchsaufbau

Bild 1 zeigt den Versuchsaufbau mit einem elektro-dynamischen Schwingererger, der seitlich an eine Klimaprüfkammer angebracht ist. Durch eine Öffnung an der Kammerwand ragt die Kalibrier-vorrichtung ins Kammerinnere. In diesem Fall erfolgt die Schwinganregung in horizontaler Richtung.

Zur Signalaufbereitung der Beschleunigungsaufnehmer dienen zwei B&K Nexus Ladungsverstärker, die an ein mehrkanaliges VibControl Schwingregelsystem von m+p international angeschlossen sind.

Bild 2 zeigt die Lage der Beschleunigungsaufnehmer. Ein Beschleunigungsaufnehmer ist außerhalb der Klimakammer angebracht, er dient als Regel- bzw. Referenzwertaufnehmer.

Innerhalb der Klimakammer befinden sich die zu kalibrierenden Aufnehmer. Für die nachfolgenden Versuche wurden gängige Beschleunigungsaufnehmer von drei unterschiedlichen Herstellern eingesetzt.

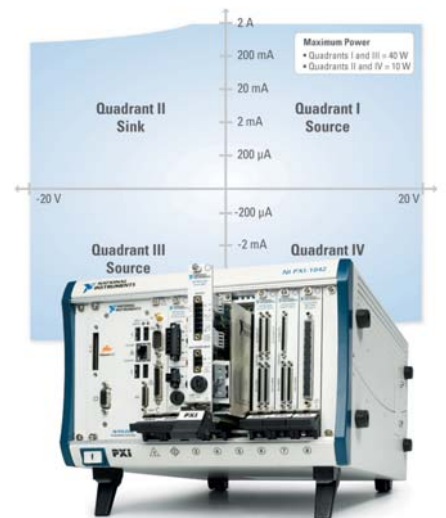
### Versuchsparameter

Der Aufbau wird mit einem Gleitsinus angeregt, der sich zwischen 250 und 300 Hz bewegt. Bei einer Frequenz von 275 Hz wird kalibriert, die Beschleunigung beträgt konstante 20 m/s<sup>2</sup>. Überlagert zur sinusförmigen Anregung wird ein Temperaturprofil (Abbildung 1) gefahren. Vorversuche haben gezeigt, dass bedingt durch die Wärmekapazität der Beschleunigungsaufnehmer eine Stabilisierungsdauer von ca. 30 Minuten nötig ist.

Hersteller	Typ 1	Typ 2	Typ 3
Ausgang	Ladung	Ladung	ICP
Empfindlichkeit	1,2 pC/(m/s <sup>2</sup> )	3,3 pC/(m/s <sup>2</sup> )	10 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Masse	16 gr	17 gr	8 gr
Resonanzfrequenz	32 kHz	28 kHz	40 kHz
Betriebstemperatur	-67 °C bis +177 °C	-50 °C bis +250 °C	-54 °C bis +165 °C
Max. Beschleunigung	20.000 m/s <sup>2</sup>	10.000 m/s <sup>2</sup>	500 m/s <sup>2</sup>
Querempfindlichkeit	<3 %	3 %	3 %
Amplitudenlinearität	< ±5 %	±5 %	±1 %
Temperaturempfindlichkeit	0,25 %/°C	0,3 %/°C	0,004 %/°C

Spezifikationen dieser Aufnehmer

# Die Richtung bestimmen Sie!



## SMU auf PXI-Basis

Funktionen der SMU NI PXI-4130

- 4-Quadranten-Betrieb (Sinking/Sourcing) bis zu  $\pm 20$  V und 2 A
- 1 nA Auflösung
- Zusätzlicher Hilfskanal mit +6 V
- Kompakte Größe: bis zu 17 SMU-Kanäle in einem PXI-Chassis

>> Demovideos zum Produkt und Spezifikationen zum Herunterladen finden Sie unter [ni.com/powersupplies/d](http://ni.com/powersupplies/d)

089 7413130



**National Instruments Germany**  
Konrad-Celtis-Str. 79 • D-81369 München  
Tel.: +49 89 7413130 • Fax: +49 89 7146035  
[ni.com/germany](http://ni.com/germany) • [info.germany@ni.com](mailto:info.germany@ni.com)

©2008 National Instruments Corporation. Alle Rechte vorbehalten. National Instruments, NI und ni.com sind Warenzeichen von National Instruments. Andere erwähnte Produkt- und Firmennamen sind Warenzeichen oder Handelsbeziehungen der jeweiligen Unternehmen. 2008-9215-501-117-1

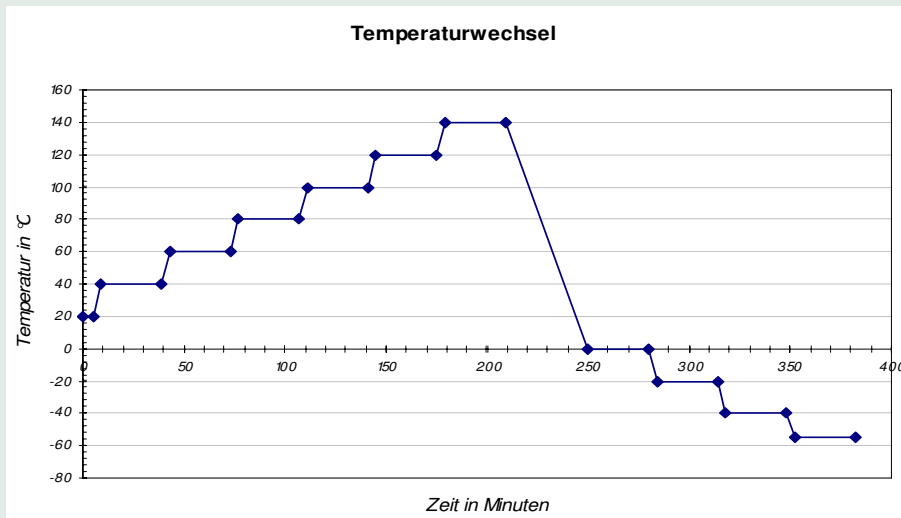


Abbildung 1: Temperaturverlauf während der Kalibrierung

Kalibriertemperatur  $T_{kal}$  [°C]:  
[23; 40; 60; 80; 100; 120; 140; 0; -20; -40; -55(-60)]  $\pm 2$  K  
Max. Änderungsgeschwindigkeit:  
5 K/min

### Ergebnisse

In den folgenden Diagrammen ist der Verlauf der Empfindlichkeit über die Temperatur einiger Beschleunigungsaufnehmer aufgetragen.

Die im Versuch gemessenen Daten zeigen deutlich, dass Beschleunigungsaufnehmer ein zum Teil stark ausgeprägtes Temperaturverhalten aufweisen. Die folgende Abbildung 2 vergleicht die hier untersuchten Aufnehmertypen.

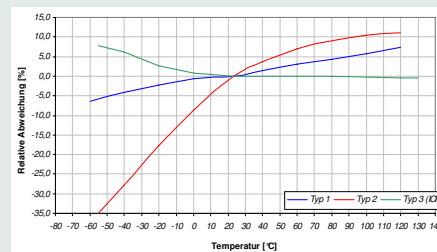


Abbildung 2: Relative Abweichung der Beschleunigungsaufnehmer unter veränderter Umgebungstemperatur

Wie sich dieses Verhalten auf eine gängige Vibrationsprüfung von 8 Stunden mit überlagertem Temperaturprofil -40/+100°C in der Realität auswirkt, kann man in der folgenden Grafik sehen.

Typ 1				1,260			
Temp [°C]	[pC/(m/s <sup>2</sup> )]	[%]					
120	1,354	7,46					
100	1,332	5,71					
80	1,314	4,29					
60	1,298	3,02					
40	1,278	1,43					
23	1,260	0,00					
0	1,251	-0,71					
-20	1,232	-2,22					
-40	1,207	-4,21					
-60	1,180	-6,35					

Typ 2				3,485			
Temp [°C]	[pC/(m/s <sup>2</sup> )]	[%]					
120	3,875	11,19					
100	3,847	10,39					
80	3,801	9,07					
60	3,727	6,94					
40	3,615	3,73					
23	3,485	0,00					
0	3,184	-8,64					
-20	2,866	-17,76					
-40	2,516	-27,80					
-55	2,265	-35,01					

Typ 3 (ICP)				20,790			
Temp [°C]	[m/s <sup>2</sup> ]	[mV]	DEV [%]				
130	20,710	208,550	-0,38				
120	20,720	208,650	-0,34				
100	20,760	209,053	-0,14				
80	20,780	209,255	-0,05				
60	20,780	209,255	-0,05				
40	20,790	209,355	0,00				
23	20,790	209,355	0,00				
0	20,940	210,866	0,72				
-20	21,330	214,793	2,60				
-40	22,050	222,044	6,06				
-55	22,390	225,467	7,70				

Datum:	20. Januar 2007
Name:	Sascha Riek
Kal. Wert	1,224 pC/(m/s <sup>2</sup> )
Anregung:	Sinus 275 Hz 20 m/s <sup>2</sup>
Referenzgeber:	14 240 1,18 pC/(m/s <sup>2</sup> )
Ladungsverstärker 1:	870
Ladungsverstärker 2:	869
Regelsystem:	m+p VibControl Sys 6
Temperaturfühler:	PT100 DV2

Datum:	20. Januar 2007
Name:	Sascha Riek
Kal. Wert	3,430 pC/(m/s <sup>2</sup> )
Anregung:	Sinus 275 Hz 20 m/s <sup>2</sup>
Referenzgeber:	14 240 1,18 pC/(m/s <sup>2</sup> )
Ladungsverstärker 1:	870
Ladungsverstärker 2:	869
Regelsystem:	m+p VibControl Sys 6
Temperaturfühler:	PT100 DV2

Datum:	20. Januar 2007
Name:	Sascha Riek
Kal. Wert	10,070 mV/(m/s <sup>2</sup> )
Anregung:	Sinus 275 Hz 20 m/s <sup>2</sup>
Referenzgeber:	14 240 1,18 pC/(m/s <sup>2</sup> )
Ladungsverstärker 1:	Ohne (ICP)
Ladungsverstärker 2:	B&K Nexus 117
Regelsystem:	m+p VibControl Sys 5
Temperaturfühler:	PT100 DV2

Tabelle 1: Temperaturabhängigkeit

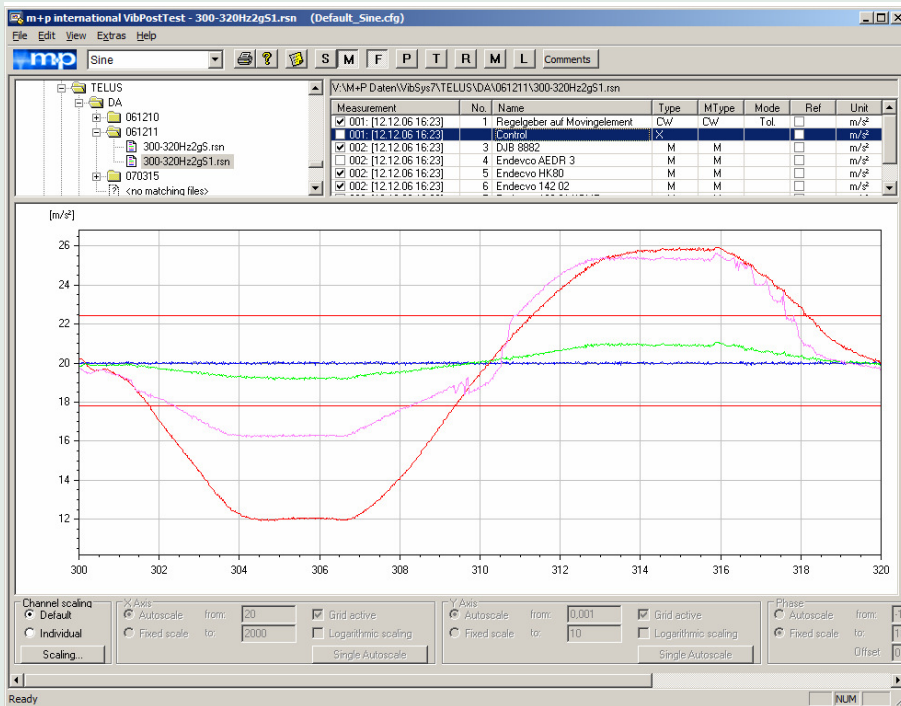


Abbildung 3: Schwingprüfung 8 Stunden mit überlagertem Temperaturwechsel -40/+100°C durchgeführt mit einem m+p VibControl Schwingregelsystem

Da der Sinuslauf von 300 bis 320 Hz genauso lange dauerte wie der Temperaturzyklus, kann die Frequenzachse als Zeitachse angesehen werden (das Frequenzverhalten des Aufbaus kann vernachlässigt werden).

Die blaue Linie zeigt den Regelkanal, der in diesem Fall wieder außerhalb der Klimakammer angebracht war. Die verbliebenen drei Kurvenverläufe zeigen den „gemessenen“ Beschleunigungsverlauf von Aufnehmern, die sich innerhalb der Klimakammer befanden.

Würde solch ein Aufnehmer zur Regelung verwendet, dann würde sich der tatsächliche zeitliche Beschleunigungsverlauf zwischen 12m/s² und 26m/s² bewegen (im hier gezeigten Extremfall).

### Gewinn und Ausblick

Die durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass Beschleunigungsaufnehmer mit Ladungsausgang ein Temperaturverhalten aufweisen.

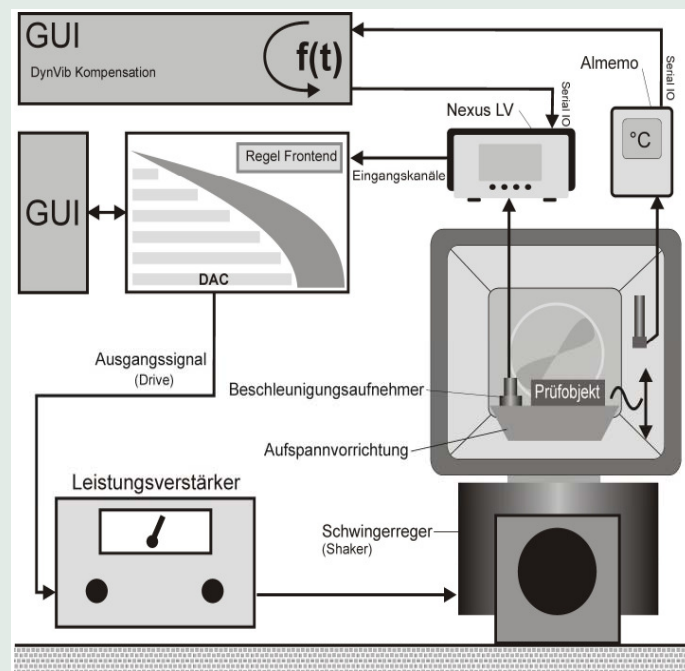
Mit der Trendlinienfunktion von MS Excel kann aus den gewonnenen Messdaten eine Polynomfunktion gebildet werden.

Nachfolgend ist beispielhaft eine Polynomfunktion des vierten Grades vom Aufnehmer Typ 1 dargestellt.

$$f(t) = -3E-10 \cdot t^4 + 7E-08 \cdot t^3 - 3E-06 \cdot t^2 + 0,0007t + 1,1647 \left[ \frac{pC}{m \cdot s^2} \right]$$

Mit einem solchen Polynom kann die Ausgangsempfindlichkeit eines Aufnehmers in Relation zur Umgebungstemperatur gestellt werden.

Aufbauend auf diese Erkenntnisse werden nun diese Daten in eine Anwendung



implementiert. Dadurch können Temperaturgangfehler für nahezu jeden beliebigen PE-Beschleunigungsaufnehmer drastisch minimiert werden.

### Die Idee

Mithilfe der im Vorversuch ermittelten spezifischen Polynomfunktion kann die korrekte Empfindlichkeit eines Beschleunigungsaufnehmers in Bezug zur Umgebungstemperatur berechnet werden oder anders ausgedrückt: Es kann für einen gegebenen Temperaturbereich für jede Temperatur ein Korrekturfaktor errechnet werden. Dieser Korrekturfaktor muss bei der Bewertung des Sensorsignals einfließen. Der Ablaufplan einer solchen Verkettung kann dabei wie folgt aussehen:

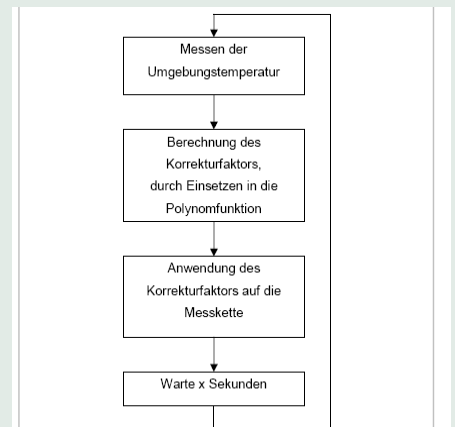


Abbildung 4: Schwingregelkreis mit Fehlerkompensation

Um dies zu erreichen, muss in die Rückführung des Regelkreises aktiv eingegriffen werden. Das Sensorsignal muss vor dem Regelsystem entsprechend der aktuellen Temperatur korrigiert werden. Für diese Korrektur eignen sich Beschleunigungsaufnehmer und kalibriertes Regelsystem nicht. Dadurch bleibt als einzige veränderbare Komponente in der Rückführungskette des Regelkreises der Ladungsverstärker übrig.

Der hier verwendete B&K Nexus Ladungsverstärker ist ein prozessorgesteuerter Verstärker mit serieller Schnittstelle. Über die Schnittstelle sind sämtliche Funktionen erreichbar, d. h., dass auch der Wert der Empfindlichkeit über die Schnittstelle umprogrammiert werden kann.

Versuche zeigten, dass bei einer geringen Veränderung der Empfindlichkeit keine sprunghaften Störungen am Ausgang des Verstärkers entstehen. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, da die Anpassung vom Regelsystem nicht bemerkt werden darf.

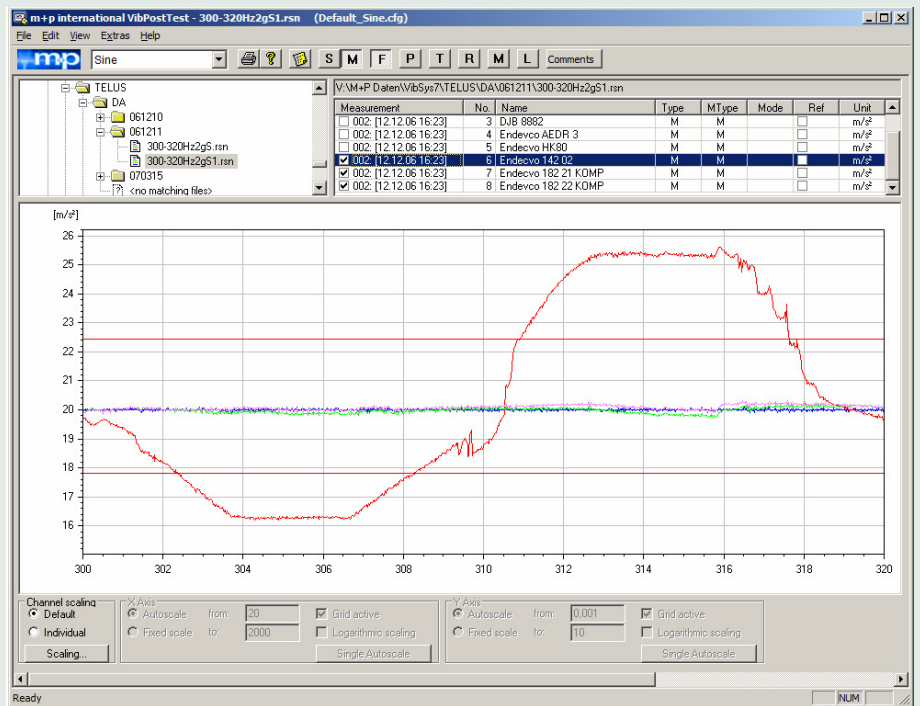
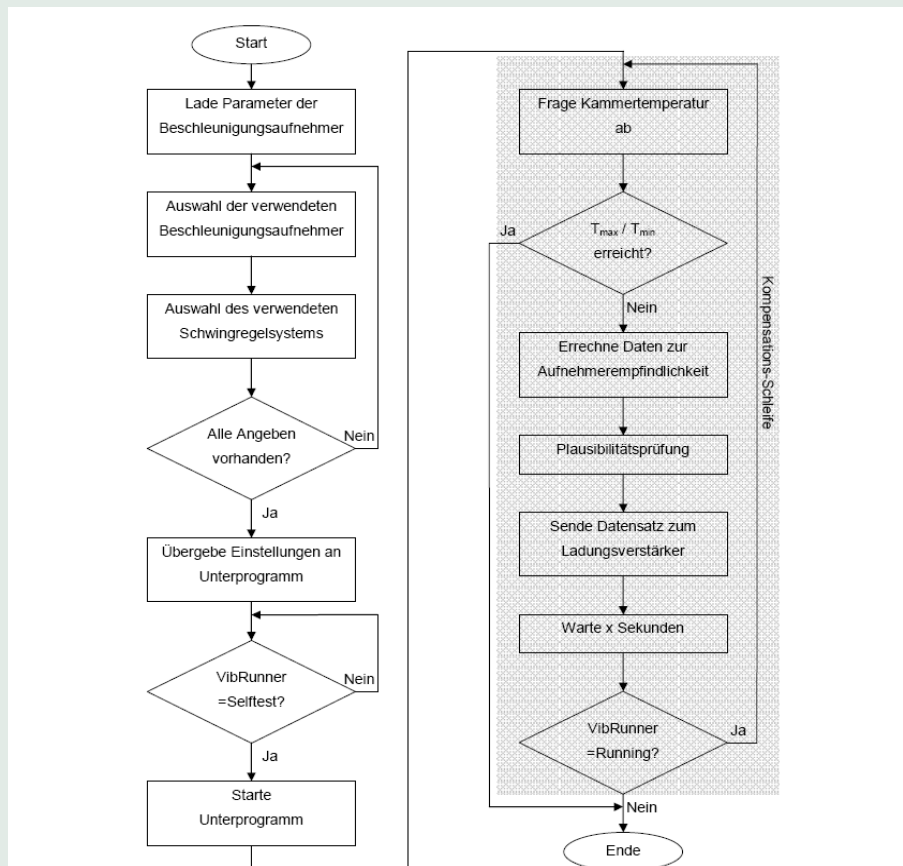


Abbildung 5: Schwingprüfung 8 Stunden mit überlagertem Temperaturwechsel -40/+100°C, diesmal mit Kompensation

### Vergleichsmessung mit Fehlerkompensation

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Programm zur Fehlerkompensation entwickelt, dessen Hintergrund und Funktions-

weise in dem folgenden Funktionsplan dargestellt ist.



Im Folgenden soll festgestellt werden, wie gut die Fehlerkompensation arbeitet. Der Versuchsaufbau ist identisch mit dem, der zu Beginn angewandt wurde; ebenso die verwendeten Prüfmittel. Der Unterschied liegt darin, dass der Ladungsverstärker von der Kompensationssoftware angesteuert wird. Diese sendet im 10-Sekunden-Takt die korrigierten Empfindlichkeiten der Aufnehmer zu Ladungsverstärker.

### Ergebnis der Vergleichsmessung

Auch hier wurde wieder eine Vibrationsprüfung von 8 Stunden und einem Temperaturwechsel von -40/+100°C angewandt.

Der rote Kurvenverlauf zeigt hier einen Beschleunigungsaufnehmer vom Typ 1, der nicht an die Fehlerkompensation angeschlossen war. Die Kurvenverläufe grün und pink zeigen zwei Beschleunigungsaufnehmer (ebenfalls vom Typ1), die an das Kompensationsprogramm angeschlossen waren. Die blaue Linie stellt den Regelkanal dar, der wieder außerhalb der Klimakammer angebracht war.

Abbildung 5 verdeutlicht, dass durch die Kompensation eine drastische Verbesserung des Temperaturverhaltens erreicht worden ist. Die Kurvenverläufe grün und pink (Beschleunigungsaufnehmer innerhalb der Klimakammer) verhalten sich über die gesamte Testdauer annähernd deckungsgleich zum Regelkanal (außerhalb der Klimakammer).