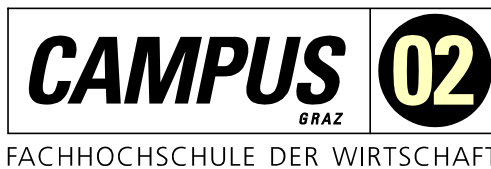


**Masterarbeit**

# **KALIBRATIONSAUTOMATISIERUNG VON SCHWINGUNGSSENSOREN**

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang  
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

**Michael Klamler, BSc**

51800337

betreut und begutachtet von  
Dipl.-Ing. Dr. Manfred Pauritsch

Graz, im November 2022



.....  
Unterschrift

## **EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.



.....

Unterschrift

## **DANKSAGUNG**

An dieser Stelle möchte ich mich nun bei all jenen bedanken, die mich während der Ausarbeitung dieser Masterarbeit sowie während meines Studiums unterstützt haben.

Ein besonderer Dank geht an meine Familie, die mich stets unterstützt und motiviert hat.

Weiters möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr. Manfred Pauritsch für die fachliche Betreuung der vorliegenden Arbeit und die motivierenden Worte bedanken.

## **KURZFASSUNG**

Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Kalibrieren von Schwingungssensoren. Dabei werden unterschiedliche Arten von Schwingungssensoren betrachtet. Es werden auch die verschiedenen Möglichkeiten diskutiert, wie Schwingungssensoren kalibriert werden können. Im weiteren Verlauf wird jedoch nur die Vergleichsvariante behandelt. Für diese Variante wurde die Software in dieser Arbeit entwickelt. Dabei wird das Messgerät mit einem Frequenzgenerator angesprochen sowie parametrisiert und die Messdaten werden erfasst sowie verarbeitet.

Die Eingangskanäle können, wenn vorhanden, mithilfe der im Sensor abgespeicherten Daten parametrisiert werden. Diese Einstellungen können über die grafische Bedienoberfläche eingesehen werden. Sollte der Prüfling über keinen Speicher verfügen oder dieser defekt sein, können die Daten auch manuell eingegeben werden.

Zu einer Kalibrierung gehört auch ein dementsprechendes Protokoll, das dem Sensor die Einhaltung seiner angegebenen Grenzwerte bescheinigt, sofern dies das Ergebnis der Kalibrierung ist. Da diese Erstellung mit Aufwand verbunden ist und dabei auch Fehler unterlaufen können, wurde dies in dieser Arbeit vollständig automatisiert.

## **ABSTRACT**

This paper deals with the topic of calibration of vibration sensors. For that purpose, a few different options as to calibrate a vibration sensor have been considered. Further, in this paper, only the comparison method was used. This method was also used for the software, which was developed in the course of this master's thesis. To do so, a measurement device with a frequency generator was used. This device was addressed and parameterized and the measuring data was collected.

The input channel can be parameterized from the sensor's memory. If the sensor does not have one or if it does not work properly, it can be set up using the graphical user interface. In this interface all necessary data can be checked and if necessary, changed.

When the calibration is completed successfully, a certificate for the sensors is needed. With this software can also be done automatically, which prevents user from committing typing mistakes during manual editing of the report. Moreover, it is more time efficient than creating the report manually.

## INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation .....	1
1.2	Ziele der Arbeit.....	1
2	Kalibrierungsgründe .....	2
2.1	Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit .....	2
2.1.1	Zeitliche Veränderung der Nennwerte .....	2
2.1.2	Verschleiß durch den Betrieb .....	2
2.1.3	Schockereignisse.....	3
2.2	Zur Erfüllung von Normen.....	3
2.3	Zur Schaffung von Vertrauen.....	4
3	Der Kalibriervorgang .....	5
3.1	Kalibrierort.....	5
3.2	Messgeräte .....	5
3.2.1	Messverfahren .....	6
3.2.1.1	Statische Beschleunigung .....	7
3.2.1.2	Stoßbeschleunigung .....	8
3.2.1.3	Dynamische Beschleunigung .....	9
3.2.2	Messkette.....	13
3.2.3	Datenerfassungseinheit .....	14
3.3	Prüfling.....	15
3.3.1	Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer .....	15
3.3.2	Schwinggeschwindigkeitssensoren .....	16
3.3.3	Wegsensoren.....	17
3.4	Darstellungsformen der Messwerte .....	18
3.4.1	Visualisierung während der Kalibration .....	19
3.4.1.1	Zeitsignal .....	19
3.4.1.2	Fast Fourier Transformation .....	20
3.4.1.3	Aussteuerungsanzeige .....	21
3.4.2	Darstellung der Endergebnisse .....	21
3.4.2.1	Tabellarische Darstellung .....	22
3.4.2.2	Grafische Darstellung .....	22
4	Zulässige Abweichungen .....	24
4.1	Benötigte Daten des Prüflings .....	24
4.2	Anforderungen an die Referenz.....	24
4.3	Messunsicherheit .....	25
4.3.1	Datenblatt.....	25
4.3.2	Statistische Abweichungen .....	26
4.3.3	Kombinierte Abweichung .....	26
5	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	27

5.1	Extern vergeben .....	28
5.2	Intern kalibrieren .....	29
5.3	Kostenvergleich .....	29
6	Geeignete Programmiersprachen und Entwicklungsumgebungen.....	32
6.1	Matlab .....	33
6.2	C# .....	33
6.3	Python.....	34
6.4	PyCharm .....	34
6.5	Visual Studio .....	35
7	Programmierung.....	37
7.1	Bedienoberfläche .....	37
7.2	Kommunikation mit dem Messgerät .....	40
7.2.1	Requests.....	40
7.2.1.1	Get.....	41
7.2.1.2	Put .....	41
7.2.1.3	Post.....	42
7.2.1.4	Statuscode.....	42
7.2.2	JSON .....	43
7.3	Datenübertragung.....	45
7.3.1	Header .....	45
7.3.2	Stream .....	45
7.3.3	Kaitai .....	46
7.4	Datenverarbeitung .....	46
7.4.1	Auslesen der Daten .....	46
7.4.2	Verarbeiten der Daten .....	47
8	Einstellung im Messgerät .....	49
8.1	Sensoreinstellungen .....	49
8.2	Messkanal-Einstellung.....	50
8.2.1	Anschlusstyp.....	50
8.2.2	Bandbreite.....	51
8.2.3	Abtastrate.....	52
8.2.3.1	Szenario 1: maximale Bandbreite, minimale Abtastrate .....	53
8.2.3.2	Szenario 2: Bandbreite und Abtastrate sind auf derselben Stufe .....	53
8.2.3.3	Szenario 3: minimale Bandbreite, maximale Abtastrate .....	54
8.2.4	Versorgung für Sensoren.....	55
8.2.5	Speicherplatz .....	55
8.2.6	Kanalname.....	56
8.2.7	Aktivierung des Messkanals .....	56
8.2.8	Hochpass-Filter.....	57
8.2.9	Erdung .....	58
8.2.10	Eingangsspannung.....	60

8.3	Frequenzgenerator-Einstellungen .....	60
8.3.1	Gain .....	61
8.3.2	Signaltyp .....	62
8.3.3	Filter .....	63
8.3.4	Frequenzeinstellung .....	64
8.4	Startbefehle.....	65
9	Prüfprotokoll .....	67
10	Gegenüberstellung von bisherigem und neuem System .....	70
11	Zusammenfassung.....	72
12	Literaturverzeichnis .....	73
	Abbildungsverzeichnis.....	74
	Tabellenverzeichnis .....	75

# **1 EINLEITUNG**

## **1.1 Ausgangssituation**

Im Unternehmen stehen eine Vielzahl an Schwingungssensoren für die verschiedensten Messanwendungen zur Verfügung. Alle diese Sensoren müssen wiederkehrend kalibriert werden und das Ergebnis muss dokumentiert werden. Aufgrund der hohen Anzahl an Sensoren ist dies mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden. Die derzeitige Lösung zur Kalibration der Sensoren ist veraltet und durch die ständige Weiterentwicklung der IT-Infrastruktur aufwendig in der Wartung sowie in der Instandhaltung der Kompatibilität mit neueren Windows-Versionen. Zusätzlich ist die Erstellung des Kalibrierzertifikates komplex und nicht mehr zeitgemäß.

## **1.2 Ziele der Arbeit**

Im ersten Teil dieser Arbeit soll ein Überblick über die Anforderungen und Möglichkeiten des Kalibrierens geschaffen werden. Im praktischen Teil soll ein Tool entstehen, das beim Kalibriervorgang den Anwender bei der Einstellung des Messgerätes sowie bei der Kalibration selbst unterstützt. Im Nachgang soll dieses Tool ein fertiges Kalibrierprotokoll erzeugen, das als Nachweis dienen soll, dass der kalibrierte Sensor auch den Vorgaben entspricht. Dies wird im zweiten Teil dieser Arbeit dokumentiert.

## **2 KALIBRIERUNGSGRÜNDE**

Die Notwendigkeit der regelmäßigen Kalibration von Schwingungssensoren ergibt sich aus mehreren Aspekten. Die regelmäßige Kalibrierung ist von inner- als auch von außerbetrieblicher Bedeutung. In den nachfolgenden Kapiteln werden einige der wesentlichsten Funktionen genauer betrachtet.

### **2.1 Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit**

Eine der grundlegendsten Aufgaben der Kalibrierung ist die Feststellung, dass die zu kalibrierenden Sensoren funktionstüchtig sind. Die Kalibrierung bezeugt nur, dass der Sensor zum Zeitpunkt der Kalibration seine Spezifikation erfüllt. Im Umkehrschluss kann davon ausgegangen werden, dass der Sensor bei den eingesetzten Messungen seine Spezifikationen erfüllt hat. Daraus ergibt sich aber, dass sich der Sensor auch mit gültigem Kalibrierzertifikat außerhalb der Spezifikationen befinden kann. Ein Totalausfall der Funktionsfähigkeit kann einfach detektiert werden. Problematisch wird es jedoch, wenn der Sensor falsche Werte liefert. Dies ist im Betrieb nur schwer bis nicht erkennbar. Die Gründe dafür werden nachfolgend genauer beschrieben. Dies unterstreicht aber die Bedeutung einer regelmäßigen Überprüfung der Sensoren.

#### **2.1.1 Zeitliche Veränderung der Nennwerte**

Die meisten Sensoren unterliegen mehreren Arten der Alterung. Eine davon ist die Alterung aufgrund der Zeit. Diese Art der Alterung kann weder verhindert noch beeinflusst werden. Wie langzeitstabil die Sensoren sind, hängt von mehreren Faktoren ab. Einer der zentralsten hierbei ist, für welchen Zeitraum der Hersteller die Funktionsfähigkeit auslegt. In der Industrie sind diese Zeiträume recht lang. Bei Industriesensoren, abhängig von Hersteller und Fabrikat, kann eine zeitliche Veränderung der Nennwerte im Zeitraum von mehreren Jahren von ca. 2 % angenommen werden. Für genaue Werte der zeitlichen Alterung sind die Herstellerangaben des jeweiligen Sensors zu verwenden.

#### **2.1.2 Verschleiß durch den Betrieb**

Auch durch den ständigen Einsatz der Sensoren kann es zu Veränderungen der Nennwerte kommen. Dies ist besonders dann der Fall, wenn die Sensoren nahe an ihrem Betriebsbereich oder über diesem betrieben werden. Dies kann zum Beispiel dann der Fall sein, wenn ein Sensor häufig übersteuert und dadurch das Ausgangssignal ins Overload gerät. Wie sehr dies dem Sensor schadet, ist von der Häufigkeit, aber vor allem von der Intensität der Überlastung abhängig. Auch eine häufige Montage sowie Demontage bieten Potenzial, die Kennwerte zu verändern. Des Weiteren kann die Belastung durch Potenzialunterschiede und



elektromagnetische Strahlung den Sensoren Schaden zufügen und sollte daher vermieden werden.

### **2.1.3 Schockereignisse**

Schockereignisse können mehrere Ursachen haben. Die häufigste Ursache ist jedoch, dass der Sensor auf den Boden fällt. Dabei macht es einen Unterschied, aus welcher Höhe und auf welche Art von Boden der Sensor fällt. Als Beispiel für einen ungünstigen Ort des Aufpralls kann ein Betonboden angeführt werden. Dabei kann die Stoßbelastung auch ein Tausendfaches der Erdbeschleunigung betragen. Nach einem solchen Schockereignis sollte der Sensor überprüft werden. Aber auch wenn der Sensor montiert ist, besteht die Möglichkeit eines Schocks. Dies ist davon abhängig, wo und an welcher Art von Maschine der Sensor verbaut ist. Bei fest am Boden verankerten Maschinen ist somit das Risiko vom Schockereignissen eher gering. Bei transportablen Maschinen ist es jedoch eine nicht zu vernachlässigende Gefahr. Tendenziell sind hier kleinere Maschinen eher gefährdet als große Maschinen.

## **2.2 Zur Erfüllung von Normen**

Häufig wird im Geschäftsleben und vor allem in Verträgen auf Normen verwiesen, die eingehalten werden müssen. Ein Grund dafür, warum in Verträgen häufig die Einhaltung verschiedener Normen gefordert wird, liegt darin, dass dadurch die Verträge kürzer und weniger detailliert ausgefertigt werden müssen. In vielen Fällen vereinfachen diese Normen auch die Arbeitsabläufe, da diese nach einer auf das Produkt anwendbaren Norm ausgerichtet werden. Sollten mehrere Normen zur Anwendung kommen, kann geprüft werden, ob mit der Einhaltung der Grenzwerte einer Norm auch die Forderungen der anderen Normen erfüllt werden können.

Sollte sich ein Unternehmen einer Zertifizierung unterziehen, kann daraus ein Zwang zur Kalibration der Schwingungssensoren entstehen. Will sich ein Unternehmen nach ISO 9001:2015 zertifizieren lassen, muss dieses Unternehmen ein Qualitätsmanagementsystem einführen, sofern dieses nicht schon vorhanden ist. Aus dem Qualitätsmanagementsystem heraus ergibt sich wiederum die Forderung, dass alle verwendeten Sensoren und Messmittel auch den jeweiligen Anforderungen entsprechen. Dies kann mit einer regelmäßigen Kalibrierung sichergestellt werden.

## **2.3 Zur Schaffung von Vertrauen**

Ein weiterer, nicht zu vernachlässigender Grund für Kalibrierungen ist die Schaffung von Vertrauen. Wird bei einer Messung ein Messgerät verwendet, das über kein Kalibrierzertifikat verfügt, oder ist dieses abgelaufen, erweckt dies den Eindruck, dass möglicherweise etwas nicht stimmt. Dies kann zu Misstrauen führen und die Geschäftsbeziehung belasten, wobei an dieser Stelle nochmals zu erwähnen ist, dass ein Kalibrierzertifikat nur ein Nachweis ist, dass das Messgerät oder der jeweilige Sensor bei der Kalibrierung die geforderten Grenzwerte eingehalten hat. Hierbei kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass es seit der Kalibrierung zu einer Beschädigung gekommen ist.

## **3 DER KALIBRIERVORGANG**

Um Schwingungssensoren kalibrieren zu können, gibt es einige Voraussetzungen. Diese werden in diesem Kapitel aufgelistet und deren jeweilige Funktion wird erläutert.

### **3.1 Kalibrierort**

Eine Kalibrierung kann nicht an jedem beliebigen Ort durchgeführt werden. Der Ort muss einige Kriterien erfüllen. Diese sind allerdings von verschiedenen Faktoren abhängig. Um Schwingungssensoren kalibrieren zu können, muss der Raum, in dem die Kalibrierung stattfinden soll, die allgemeinen Anforderungen an einen Laborraum erfüllen. Dazu zählen grundlegende Aspekte wie Ordnung und Sauberkeit, aber auch die Zutrittsbeschränkung, um die Sicherheit der Personen zu gewährleisten und die Messgeräte vor unsachgemäßer Behandlung sowie Verwendung zu schützen. Normale, die zur Kalibration genutzt werden, sind mit besonderer Vorsicht zu verwenden. Eine nichterkannte Beeinträchtigung des Normals kann zu einer falschen Kalibrierung führen, was im schlimmsten Fall eine Ausgabe von falsch messenden Messgeräten zur Folge hätte. Die Umgebungsbedingungen sind gemäß der Spezifikation der im Raum befindlichen und eingesetzten Geräte zu steuern. Diese Werte müssen überwacht und aufgezeichnet werden.<sup>1</sup>

### **3.2 Messgeräte**

Um Schwingungssensoren kalibrieren zu können, werden Messgeräte benötigt. An diese Messgeräte werden besondere Ansprüche gestellt. Wie diese Ansprüche im Detail aussehen, hängt zum einen davon ab, welche Art von Sensoren damit kalibriert werden soll. So sind bei Beschleunigungssensoren höhere Frequenzbereiche gefragt als bei Schwinggeschwindigkeitssensoren, die tendenziell für niedrigere Frequenzbereiche besser geeignet sind. Die Funktionsweise dieser und anderer Sensoren wird in Kapitel 3.3 genauer betrachtet.

Ein weiteres Kriterium ist die Genauigkeitsklasse des Prüflings. Es muss sichergestellt werden, dass das zu verwendende Kalibriernormal über eine ausreichende Genauigkeit verfügt, um den Prüfling kalibrieren zu können. Daraus ergibt sich eine Hierarchie, an deren Spitze das nationale Normal steht. In Österreich wird dieses vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen verwaltet.

---

<sup>1</sup>Vgl. ISO/IEC 17025:2017, S. 17

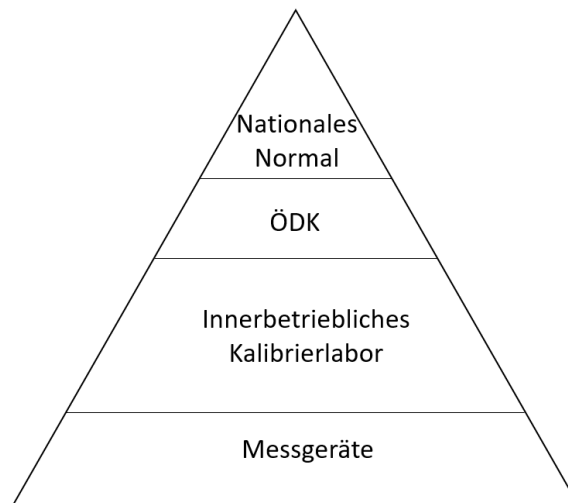


Abbildung 1: Kalibrierpyramide, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Das Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen ist zum einen dafür zuständig, diese nationalen Normalen bereitzustellen, zum anderen aber auch dafür verantwortlich, sicherzustellen, dass diese mit den internationalen Normalen in Einklang stehen. Die nächste Stufe unter den nationalen Normalen sind die akkreditierten Kalibrierstellen. Dies sind speziell ausgerüstete Kalibrierlabore, die ihre Messmittel mit den nationalen Normalen vergleichen. In Österreich wäre dies zum Beispiel der ÖDK, der Österreichische Kalibrierdienst.

Nachfolgend kann die Pyramide beliebig erweitert werden, jedoch verliert das Messmittel mit jeder Stufe an Genauigkeit. In größeren Unternehmen gibt es oftmals eigene Mitarbeiter im hauseigenen Kalibrierlabor, die die Messgeräte in regelmäßigen Abständen kalibrieren. In kleineren Betrieben kann dies an Kalibrierlabore ausgelagert werden. Am Schluss dieser Pyramide stehen die für die Erzeugung der Dienstleistung oder des Produktes notwendigen Messwerkzeuge. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass diese Pyramide nicht nur die Genauigkeit der Messgeräte widerspiegelt, sondern auch die Anzahl der Messgeräte. Auch die Kosten verhalten sich ähnlich dieser Pyramide. Daher muss abgewogen werden, welche Kalibrierung für die Messaufgabe erforderlich ist. Es ist zwar zulässig, mit einem genaueren Messgerät zu messen, aber dies ist meist auch mit höheren Kosten verbunden.

### 3.2.1 Messverfahren

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um Schwingungssensoren zu kalibrieren. Um das richtige Verfahren auswählen zu können, muss zuerst bekannt sein, für welches Einsatzgebiet der Sensor vorgesehen ist. So gibt es Sensoren, die für mehrere Anwendungen geeignet sind. Jedoch ergibt es wenig Sinn, Eigenschaften zu überprüfen, die in der Praxis nicht zur Anwendung kommen.

Nachfolgend werden drei Verfahren beschrieben, wie Beschleunigungssensoren kalibriert werden können.

### 3.2.1.1 Statische Beschleunigung

Eine statische Beschleunigung tritt in vielen Bereichen des täglichen Lebens auf, zum Beispiel, wenn ein Fahrzeug beschleunigt. Als Sensoren sind hierfür kapazitive, aber auch piezoresistive Beschleunigungssensoren geeignet. Um diese Sensoren kalibrieren zu können, müssen sie einer konstanten Kraft ausgesetzt werden. Dies kann mittels einer Zentrifuge erreicht werden.

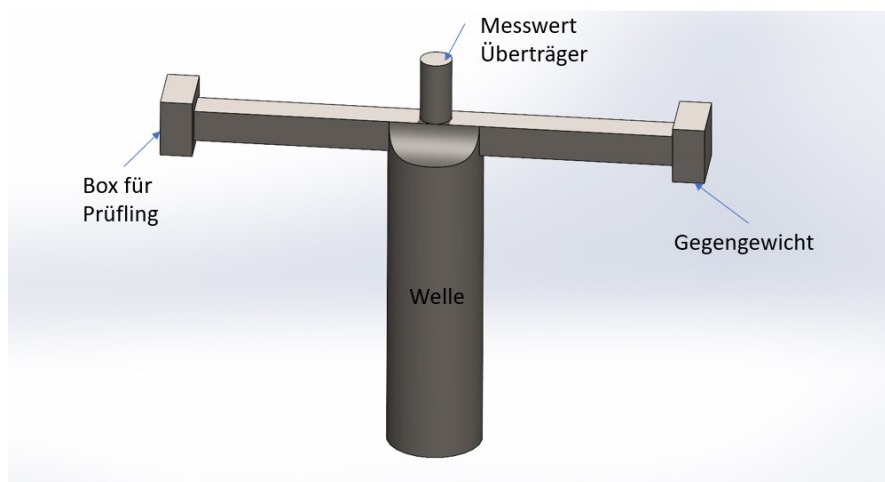


Abbildung 2: Zentrifuge, stark vereinfacht, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Wie in der Abbildung 2 dargestellt ist, kann eine Zentrifuge recht einfach aufgebaut sein. Über die Länge der Arme sowie die Drehzahl kann die gewünschte Beschleunigung eingestellt werden, wobei die Drehzahl variabel ist, die Länge der Arme im Regelfall jedoch nicht. Komplexer ist hierbei die Übertragung der gemessenen Daten. Eine Möglichkeit wäre, wie in der Abbildung dargestellt, mittels eines Messwertüberträgers. Eine weitere wäre, die Datenerfassungseinheit mitrotieren zu lassen. Dies setzt jedoch voraus, dass die Einheit dafür geeignet ist. Daneben könnten die Messwerte drahtlos übertragen werden. In dieser Konfiguration gibt es im Wesentlichen zwei Varianten, wie der beim Prüfling auftretende Beschleunigungswert ermittelt werden kann. Die eine Variante wäre, einen Referenzsensor neben dem Prüfling zu montieren und beide rotieren zu lassen. Eine weitere Möglichkeit wäre, den Wert zu errechnen. Da die Geometrie der Zentrifuge bekannt ist, kann mithilfe der Drehzahl der Beschleunigungswert berechnet werden. Diese Variante bietet den Vorteil, dass in der Box kein zusätzlicher Sensor verbaut werden muss und somit nur das Signal des Prüflings rotierend übertragen werden muss. Des Weiteren kann die Drehzahlmessung in den meisten Fällen robuster ausgeführt werden und ist dadurch weniger anfällig für Abweichungen.

### 3.2.1.2 Stoßbeschleunigung

Eine weitere Möglichkeit, Schwingungssensoren zu kalibrieren, ist die Stoßbeschleunigung. Diese Methode ist aber primär für Beschleunigungssensoren geeignet. Der zentrale Punkt dieser Methode ist die Verwendung einer Kugel, an der der Prüfling montiert wird. An diese Kugel sind einige Anforderungen gestellt. Eine der ausschlaggebendsten ist, dass die Kugel einen gewissen Härtegrad aufweisen muss. Gut geeignet sind für diese Anwendung gehärtete Stähle. Zum einen ergeben sich dadurch Vorteile im Bereich Verschleiß, zum anderen ist die Formstabilität dadurch besser. Auch die Masse der Kugel hat einen Einfluss auf ihre Eignung. So ist ein gerader Gewichtswert nicht nur leichter im Gedächtnis zu behalten, sondern auch für etwaige Berechnungen von Vorteil. Um eine gute Anbindung des Prüflings an die Kugel gewährleisten zu können, empfiehlt es sich, auf eine Schraubverbindung zwischen Kugel und Prüfling zurückzugreifen. Ein häufig verwendetes Gewinde bei Beschleunigungssensoren ist das Gewinde 10/32 UNF.

Der Impuls, der für die Kalibration notwendig ist, kann auf mehrere Arten erzeugt werden. Eine Möglichkeit wäre, dazu eine weitere Kugel mit einer definierten Masse auf die Kugel fallen zu lassen. Um den Impuls berechnen zu können, sind neben der Erdbeschleunigung auch die Fallhöhe sowie die Masse der Kugel notwendig. Diese Methode ist in der Praxis jedoch nicht einfach umzusetzen, da sichergestellt werden muss, dass der Aufprallpunkt der Kugel exakt gegenüber dem Prüfling sitzt. Des Weiteren muss die Kugel, auf der der Prüfling montiert ist, in Position gehalten werden, darf aber dadurch den Impuls nicht beeinflussen. Um dies zu erleichtern, kann der Impuls auch gemessen werden, indem auf der Kugel neben dem Prüfling ein Referenzsensor montiert ist. Hierbei könnten sich aber unter Umständen Probleme mit dem verfügbaren Platz ergeben. Um diesen Einflussfaktor zu umgehen, kann der aufgebrachte Impuls gemessen werden. Dazu kann ein Kraftmesshammer verwendet werden. Wie in der unten dargestellten Abbildung zu sehen ist, wird auf einer Stahlkugel der Sensor mittels einer Schraube befestigt. Der Kraftimpuls wird auf der gegenüberliegenden Seite mit einem Kraftmesshammer erzeugt. Der verwendete Hammer muss auf die zu kalibrierenden Sensoren abgestimmt sein, sodass das Messsignal des Hammers und des Prüflings eine angemessene Aussteuerung erzielt. Die Stahlkugel selbst ist an einem langen Faden aufgehängt. Der Faden sollte möglichst lange gewählt werden, sodass die Kugel annähernd auf derselben Ebene nach hinten ausschlagen kann.



Abbildung 3: Stoßkalibrierung mittels Kraftmesshammer, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Die mit dem Hammer aufgebrachte Kraft wird gemessen und kann mit dem Signal des Prüflings verglichen werden. Nach Berücksichtigung der Masse der Kugel sollten beide Signale den gleichen Wert aufweisen. Bei dieser Methode können die Verluste, die zum einen durch die Luftreibung der Kugel und zum anderen durch die Kraftübertragung des Hammers auf die Stahlkugel bedingt sind, vernachlässigt werden. Zentral ist jedoch, dass die Masse des Prüflings nicht außer Acht gelassen wird, vor allem, wenn sich durch den Prüfling das Gesamtgewicht merklich erhöht. In der oben dargestellten Abbildung beträgt der Anteil der Masse des Sensors weniger als 0,5 % der Gesamtmasse. Es muss darauf geachtet werden, dass die Kraft mit dem Hammer in derselben Achse wie die Messrichtung des Prüflings aufgebracht wird. Sollte die Masse der Kugel nicht bekannt sein oder kein Kraftmesshammer verfügbar sein, kann auch bei dieser Methode ein Referenzsensor angebracht werden. In diesem Fall werden keine Ansprüche an den Hammer sowie an die Masse der Kugel gestellt. Auch die Ausrichtung der Krafteinleitung kann mit einer größeren Toleranz erfolgen, da die daraus resultierende Beschleunigung vom Sensor gemessen wird.

### **3.2.1.3 Dynamische Beschleunigung**

Ein weiteres, in der Praxis häufig eingesetztes Verfahren ist die dynamische Beschleunigung. Um diese Art der Beschleunigung zu erzeugen, werden oft elektrodynamische Schwingererregger verwendet. Der mögliche Aufbau eines solchen Schwingererregers, auch Shaker genannt, ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

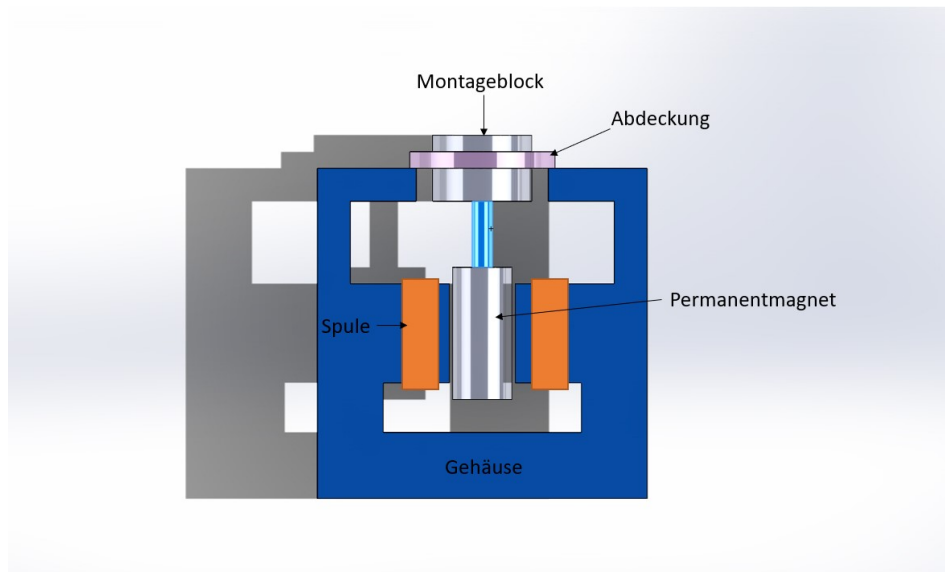


Abbildung 4: Vereinfachter Aufbau eines Shakers, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Das grundlegende Bauteil eines solchen elektrodynamischen Schwingerregers ist im Wesentlichen ein Gehäuse, das magnetisch leitend ist. In der Abbildung 4 orange dargestellt ist die Spule, die zur Erzeugung des magnetischen Wechselfeldes benötigt wird. In der Mitte ist ein Permanentmagnet verbaut, sodass sich der Zylinder mit dem Anlegen eines Stromes nach oben oder unten bewegt. Durch das Wechselfeld entsteht eine Auf- und Ab Bewegung des Zylinders. Diese Bewegung wird über ein Zwischenstück an den Montageblock übertragen, auf den der Prüfling und der Referenzsensor angebracht werden können. In Pink ist die Abdeckung dargestellt, die zum einen als Schutz gegen Verschmutzung dient, zum anderen als Schutz vor dem Einklemmen. Aufgrund der Vereinfachung dieser Darstellung fehlen Bauteile wie ein mechanischer Endanschlag oder auch die Kabelführung. Je nach Baugröße und Stärke des Shakers können die Proportionen der Bauteile stark abweichen. Ist ein hochdynamisches Verhalten gefordert, so werden die beweglichen Teile möglichst leicht und klein ausgelegt. Für Anwendungen, bei denen mit höheren Massen gearbeitet wird, sind diese Bauteile entsprechend massiver auszulegen.

Um die erzeugte Schwingung zur Kalibration des Prüflings verwenden zu können, muss diese gemessen werden. Eine exakte Berechnung der auftretenden Beschleunigung aufgrund der Sollwert-Vorgaben ist eher unüblich und bei Kalibrationen kaum zu finden. Bei der Messung der Schwingung wird zwischen zwei grundlegenden Arten unterschieden, wobei die Erzeugung der Schwingung bei beiden Verfahren mit einem elektrodynamischen Schwingerreger realisiert wird.



## Absolut-Verfahren

Beim Absolut-Verfahren wird der Prüfling am Shaker montiert. Im Regelfall wird dazu eine Schraubverbindung verwendet, da diese sehr zuverlässig die Übertragung der Schwingung auf den Prüfling sicherstellt. In der Abbildung dargestellt ist ein Shaker, auf den der Prüfling montiert ist. Als Referenz ist hier ein Laser-Vibrometer aufgebaut, das an einem Stativ befestigt ist. Der Messpunkt dieses Laser-Vibrometers ist auf den Prüfling gerichtet. Somit kann sichergestellt werden, dass die Referenz die Schwingung misst, der auch der Prüfling ausgesetzt ist.



Abbildung 5: Messaufbau Absolut-Verfahren, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Diese Methode hat mehrere Vorteile. Zum einen besteht zwischen dem Referenzsensor und dem Prüfling keine mechanische Verbindung, jedoch kann die Schwingung, der der Prüfling ausgesetzt ist, am Gehäuse des Prüflings gemessen werden. Besonders dann, wenn der Prüfling größer und schwerer ist als der in der Abbildung dargestellte, hat dies Vorteile. Ein weiterer, sehr bedeutender Vorteil ist, dass es mit dieser Methode möglich ist, die Messung mit Grundeinheiten des internationalen Maßsystems durchzuführen. Die Position des Prüflings kann mittels einer Wegmessung erfolgen, wodurch die Maßeinheit Meter zur Anwendung kommt. Wenn parallel dazu eine Zeitmessung erfolgt, ergibt sich die Information, zu welcher Zeit sich der Prüfling in welcher Höhe befand. Aus diesen beiden Informationen lässt sich die Schwinggeschwindigkeit in m/s berechnen. Ist für die Kalibrierung jedoch die Beschleunigung gefordert, so kann diese durch Ableiten der Schwinggeschwindigkeit nach der Zeit berechnet werden. Somit kann die Kalibrierung auf Grundeinheiten des internationalen Maßsystems erfolgen.

Nachteilig an dieser Methode ist jedoch, dass der Messaufbau im Vergleich zum nachfolgenden System aufwendiger und fehleranfälliger ist. So muss sichergestellt werden, dass die Referenzmessung exakt winkelig ausgerichtet und sehr steif montiert ist, sodass gewährleistet ist, dass es zu keiner Bewegung der Referenz kommen kann. Sind diese Parameter jedoch sichergestellt, sind bei diesem Verfahren höhere Genauigkeiten realisierbar als beim nachfolgenden System.

## Vergleichsmessung

Eine sehr häufig angewandte und weit verbreitete Methode ist die Vergleichsmessung. Analog zum absoluten Verfahren wird auch hier ein Shaker für die Erzeugung der Schwingung verwendet. Auch die Montage des Prüflings kann auf dieselbe Art realisiert werden. In Abbildung 6 ist derselbe Shaker zu sehen wie beim absoluten Verfahren. Der Unterschied liegt jedoch im Fehlen des Laser-Vibrometers.



Abbildung 6: Shaker mit Vergleichsmessaufbau, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Auf der Oberseite der Montageplatte ist der Prüfling montiert, darunter der Referenzsensor. Da dieser nur für seine eigene Überprüfung demontiert wird, ist er unterhalb verbaut und durch Stützen vor möglichen mechanischen Beschädigungen geschützt. Beide Sensoren sind mittels Schraubverbindungen an der Montageplatte montiert. Somit kann die Ausrichtung der Sensoren sichergestellt werden. Dadurch, dass sie auf derselben Platte montiert sind, ist auch sichergestellt, dass beide Sensoren mit derselben Schwingung belastet werden. Die realisierbare

Genauigkeit ist bei dieser Methode stark von der Genauigkeit des verwendeten Referenzsensors abhängig, aber auch von der der Auswerteeinheit. Diese Systeme sind in den verschiedensten Preisklassen erhältlich und dadurch bedingt auch in diversen Genauigkeitsklassen verfügbar.

### 3.2.2 Messkette

Alle Geräte und Sensoren, die dazu benötigt werden, die zu erfassende Größe zu messen und das Messsignal zum Messgerät zu leiten, sowie das Messgerät selbst werden als Messkette bezeichnet. Je nach zur Verfügung stehenden Geräten und Sensoren kann diese Kette unterschiedlich aussehen, jedoch besitzen alle die gleichen Grundfunktionen. So muss bei jeder Messkette ein Sensor enthalten sein, der die zu erfassende Größe messen kann. Die Sensoren können in ihrem Aufbau sehr unterschiedlich sein. Als Nächstes wird ein Übertragungsmedium benötigt, das das Messsignal zum Messgerät transportiert. Dieses Messgerät wertet das Sensorsignal aus und stellt das Ergebnis bereit. Das Ergebnis kann zum Beispiel am Display des Gerätes angezeigt werden. Ebenfalls gibt es Geräte, die das Ergebnis an den PC senden, der dann die Messwerte speichert und visualisiert. Das Ergebnis, das das Messgerät ausgibt, kann aber auch in Form eines analogen Signals erfolgen. Dies kann als Spannungssignal oder auch als Stromsignal geschehen.

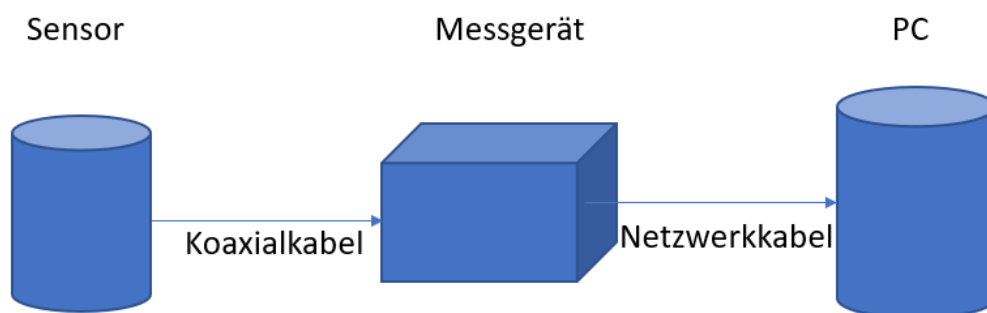


Abbildung 7: Messkette, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In der Abbildung 7 dargestellt ist eine Messkette bestehend aus einem Sensor, einem Messgerät sowie einem PC. Diese ist für die Kalibrieranwendung eine der einfachsten Messketten. In diesem Beispiel wird als Sensor ein stromgespeister Beschleunigungssensor angenommen. Dieser wird vom Messgerät mit der benötigten Energie versorgt und gibt als Messsignal ein Spannungssignal aus. Dieses Signal enthält die Informationen über die gemessenen Frequenzen und Amplituden. Das Messsignal wird über ein Koaxialkabel zum Messgerät weitergeleitet. Dieses stellt die Energieversorgung für den Sensor bereit und misst zugleich das ausgegebene Signal des

Sensors. Aufgrund der vorgenommenen Einstellungen im Messgerät werden die gemessenen Werte an den PC weitergeleitet. Diese Übertragung erfolgt in diesem Beispiel über ein Ethernet-Kabel. Der PC liest die über dieses Kabel empfangenen Daten, visualisiert diese und speichert sie ab.

Die Genauigkeit der gesamten Messkette hängt in diesem Beispiel vom verwendeten Sensor, vom Koaxialkabel und vom Messgerät ab. Das Netzwerkkabel und der PC haben in diesem Beispiel keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Messkette. Hierbei wird nur unterschieden, ob die Messwerte vollständig ankommen oder nicht.

### **3.2.3 Datenerfassungseinheit**

Für diese Arbeit wird das Messgerät LanXI 3160 A 4/2 von Brüel & Kjaer verwendet. Dabei wird der Name LanXI von Brüel & Kjaer für Datenerfassungssysteme verwendet. Diese Produktfamilie ist in weitere Typen unterteilt. Dabei geben die ersten vier Zahlen Aufschluss über die Grundfunktionen des Moduls. In dieser Arbeit wird ein Ausgangssignal und zwei Eingangssignale benötigt. Dazu eignet sich das Modul 3160, welches über einen eingebauten Frequenzgenerator verfügt. Die Typen 3050 und 3053 als Beispiele, besitzen hingegen nur Eingänge. Der Buchstabe A bedeutet, dass dieses Modul voll ausgestattet ist. Der Buchstabe B bedeutet, dass es sich um eine Light-Variante handelt und sich dadurch Einschränkungen in der Sensorauswahl ergeben. Die letzten Zahlen geben noch Aufschluss darüber, über wie viele Kanäle das Modul verfügt. Für das oben genannte Modul würde dies 4 Eingänge und 2 Ausgänge bedeuten.

Alle Typen verfügen über einen Ethernet-Anschluss. Sollten mehrere Module benötigt werden, gibt es auch die Möglichkeit, diese in einen Frame zu packen. Dazu steht entweder ein Frame mit 5 oder auch mit 11 Einschüben zur Verfügung. In diesem Frame kommunizieren die Module über einen eingebauten Bus. Dabei stellt das Modul am Steckplatz eins das Mastermodul dar. Die nachfolgenden Module werden als Slave hochgefahren. Grundsätzlich kann jedes Modul als Master oder als Slave verwendet werden.

Darüber hinaus gibt es die Möglichkeit, die Module einzeln in ein Netzwerk zu hängen. Für die Anwendung mit der Herstellersoftware ergibt sich für den Betrieb kein Unterschied. Zusätzlich können diese Module über Power-over-Ethernet mit Energie versorgt werden, sodass nur ein Ethernetkabel zum Messgerät geführt werden muss. Dadurch ergibt sich eine besonders hohe Flexibilität bei der Wahl des Aufstellungsortes.

Da unterschiedliche Sensoren auch über unterschiedliche Anschlüsse verfügen, gibt es bei diesen Modulen die Möglichkeit die Frontplatte zu wechseln. In der Standardausführung ist hierfür ein BNC-Anschluss vorgesehen. Die B Module können auch nur mit dieser Frontplatte betrieben werden. Für A Module ist die Auswahl deutlich größer. Für die 4 oder 6 Kanaltypen stehen hier zum Beispiel noch TNC oder auch Lemo-Stecker als Frontplatten zur Verfügung.

Für Schwingungsmessungen sind die B Module vollkommen ausreichend. Es können auch einige Typen von Mikrofonen verwendet werden. Für Beschleunigungssensoren, welche direkt eine Ladung ausgeben, werden jedoch die A Module mit einer TNC-Frontplatte benötigt. Die Lemo-Platten werden zum Beispiel für Mikrofone zu Schallintensitätsmessung benötigt.

### 3.3 Prüfling

Es gibt eine Vielzahl an Sensoren, die zur Messung von Schwingungen geeignet sind. Allen gemeinsam ist, dass sie in regelmäßigen Abständen kalibriert werden müssen. Nachfolgend werden drei verschiedene Sensoren genauer betrachtet, die im Unternehmen häufig eingesetzt werden.

#### 3.3.1 Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer

Beschleunigungssensoren werden sehr häufig eingesetzt, um Schwingungen zu messen. Einer der bekanntesten Vertreter dieser Gruppe ist der piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer. Die Vorteile dieser Sensoren liegen im großen Dynamikbereich sowie in der hohen Linearität, aber auch in ihrer Langzeitstabilität. Diese Sensoren können über mehrere Jahrzehnte eingesetzt werden und bleiben trotzdem innerhalb ihrer Spezifikation. Die Bauform kann ebenfalls sehr klein ausgeführt werden. Es sind auch Bauformen verfügbar, die in der Lage sind, in zwei oder drei Raumrichtungen zu messen.



Abbildung 8: Piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In der Abbildung 8 dargestellt ist ein piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer des Typs 4514B001 von Brüel und Kjaer. Dieser Sensor gehört zur Unterart der stromgespeisten piezoelektrischen Beschleunigungsaufnehmer, die auch unter den Namen DeltaTron, IEPE oder IPC bekannt sind. Der Vorteil dieser Sensoren ist, dass die Energieversorgung über eine Konstantstromquelle erfolgt, die meist schon im Messgerät mitverbaut ist. Im Sensor selbst ist eine Elektronik vorhanden, die als Vorverstärker agiert. Es gibt aber auch die Variante, dass

zwischen dem Messgerät und dem Sensor der Verstärker als eigenes Gerät verbaut wird. Bei dieser Variante werden aber deutlich höhere Ansprüche an das Koaxialkabel gestellt, das den Sensor mit dem Verstärker verbindet.

Das in der Typenbezeichnung vorhandene ‚B‘ steht bei diesem Hersteller dafür, dass der Sensor über ein TEDS verfügt, was für ‚Transducer Electronic Data Sheet‘ steht. Dieses TEDS kann vom Messgerät ausgelesen werden und enthält wesentliche Informationen, zum Beispiel die Seriennummer des Sensors oder auch dessen Empfindlichkeit, sodass diese vom Messgerät automatisch übernommen werden können.

Des Weiteren gibt die Typenbezeichnung Aufschluss über die nominelle Empfindlichkeit dieses Sensors, die  $10 \text{ mV/ms}^{-2}$  beträgt.

### 3.3.2 Schwinggeschwindigkeitssensoren

Eine weitere Möglichkeit, Schwingungen zu messen, sind Schwinggeschwindigkeitssensoren. Diese Art der Sensoren wird oftmals für niedrige Frequenzbereiche eingesetzt. In der untenstehenden Darstellung ist ein Schwinggeschwindigkeitssensor sichtbar. Dieser arbeitet nach dem elektrodynamischen Prinzip. Zu beachten ist bei diesen Sensoren die vorgegebene Einbaulage.



Abbildung 9: Schwinggeschwindigkeitssensor, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Elektrodynamische Schnelleaufnehmer besitzen neben einer seismischen Masse einen Permanentmagneten, Federn sowie eine Spule. Dadurch kann das Gesetz der Induktion einer Spannung in einem Leiter angewandt werden. Die induzierte Spannung in die Spule ist

proportional zur Geschwindigkeit des Leiters. Die Federn dienen unter anderem zur elastischen Aufhängung der seismischen Masse, die dadurch schwingfähig wird.<sup>2</sup>

Die Bezeichnung ‚LVS‘ auf dem abgebildeten Sensor bedeutet, dass dieser im unteren Frequenzbereich linearisiert ist. Dies ist notwendig, da es im unteren Frequenzbereich nicht mehr möglich ist, das lineare Verhalten des Sensors beizubehalten. Aus diesem Grund ist im Sensor eine entsprechende Schaltung integriert, die sein Ausgangssignal korrigiert. Dadurch kann der Sensor vom Messgerät so behandelt werden, als wäre auch im unteren Frequenzbereich das Verhalten des Sensors linear.

### **3.3.3 Wegsensoren**

Eine weitere Möglichkeit, Schwingungen zu messen, ist die Abstandsmessung. Dazu muss der Sensor fest montiert sein und darf nicht mit dem zu messenden Objekt mitschwingen. Diese Art der Schwingungsmessung ist aber nur dann möglich, wenn es wirklich zu einer Wegänderung kommt, wie es zum Beispiel bei einer drehenden Welle der Fall ist. Dabei ist zu erwähnen, dass hier nicht mehr absolute, sondern nur relative Größen gemessen werden.

Um die Schwingung messen zu können, muss neben dem Abstandswert zwischen Welle und Sensor auch die Zeit gemessen werden. Diese Abstandswerte werden kontinuierlich aufgezeichnet, wobei sich in Verbindung mit der Zeit eine Historie ergibt. Wird ein Zeitausschnitt genauer betrachtet, kann aus dem Zeitsignal mithilfe der Fouriertransformation ein Frequenzspektrum erstellt werden. Dabei steht die mögliche Frequenzauflösung im direkten Zusammenhang mit der Anzahl an Messwerten pro Sekunde. Je öfter pro Sekunde der Abstand gemessen wird, desto höhere Frequenzen können im Nachgang im Spektrum dargestellt werden.

Als Sensoren sind hier mehrere Typen geeignet. Einer davon ist der induktive Abstandssensor. Diesen gibt es in verschiedenen Ausführungen. Gemeinsam haben diese Sensoren jedoch, dass sie den Abstand nur zu magnetisch leitenden Materialien messen können. So messen diese Sensoren zum Beispiel bei einer lackierten Stahlwelle die Lackdicke nicht mit, sondern messen direkt den Abstand zum Stahl. Dies kann einerseits als Vorteil gesehen werden, andererseits aber auch als Nachteil, da sie nur für bestimmte Materialien geeignet sind.

---

<sup>2</sup> Kuttner (2015), S. 93 ff



Abbildung 10: Induktiver Abstandssensor, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In der Abbildung 10 dargestellt ist ein solcher induktiver Abstandssensor. Im gelb eingefärbten Bereich befindet sich eine Spule, die ein Magnetfeld aussendet. Da Luft ein sehr schlechter magnetischer Leiter ist, können über die Änderung des magnetischen Flusses Rückschlüsse auf die Entfernung eines magnetisch gut leitenden Materials geschlossen werden. Zu beachten ist hierbei, dass die unterschiedlich magnetisch leitfähigen Materialien auch verschiedene magnetische Widerstände besitzen. Um diese Einflussgröße vernachlässigen zu können, sollte für die Kalibration des Sensors dasselbe Material verwendet werden, das später auch bei der Messanwendung verbaut wird.

Beim induktiven Abstandssensor ist zusätzlich ein Oszillator notwendig, der die benötigte Wechselspannung erzeugt. Beim Oszillator kann in weiterer Folge auch das Messsignal abgegriffen werden. Diese Bauform hat den Vorteil, dass nur der Sensor selbst getauscht werden muss, wenn er beschädigt ist; der Oszillator kann weiterverwendet werden. Dieses System ist aber eher ein Auslaufmodell, da in neueren Generationen dieser Sensortypen der Oszillator bereits im Sensor mitverbaut wird. Dadurch wird der Messaufbau einfacher und kompakter.

### **3.4 Darstellungsformen der Messwerte**

Um die Kalibration der Sensoren zu visualisieren, müssen die zur Verfügung stehenden Daten dargestellt werden. Je nach Fortschritt der Kalibration sind andere Darstellungsformen der Daten sinnvoll. Daher wird in diesem Kapitel zwischen den Darstellungsformen, die während der Kalibration notwendig sind, und jenen, die für die Darstellung des Endergebnisses benötigt werden, unterschieden.



### 3.4.1 Visualisierung während der Kalibration

Wird die Kalibration gestartet, ist zu kontrollieren, ob alle Einstellungen von den verwendeten Messgeräten übernommen worden sind. Aber nicht nur bei den Geräten selbst kann es zu Fehlverhalten kommen. So können auch defekte oder beschädigte Messleitungen das Ergebnis verfälschen. Um dies im Zuge der Kalibration erkennen zu können, gibt es eine Vielzahl an Visualisierungsmöglichkeiten während der laufenden Kalibration. Eine Auswahl dieser Möglichkeiten wird nachfolgend betrachtet.

#### 3.4.1.1 Zeitsignal

Häufig wird zur Überprüfung des Messsignals das Zeitsignal betrachtet. Das Zeitsignal stellt den Messwert dar. Dieser kann als Spannungswert ausgegeben werden oder auch mit einer beliebigen Einheit versehen werden. Diese Darstellungsform wird auch von Oszilloskopen bereitgestellt. Bei dieser Ansicht können viele Punkte kontrolliert werden, da im Regelfall noch keine Filter oder ähnliche Hilfsmittel Anwendung gefunden haben.

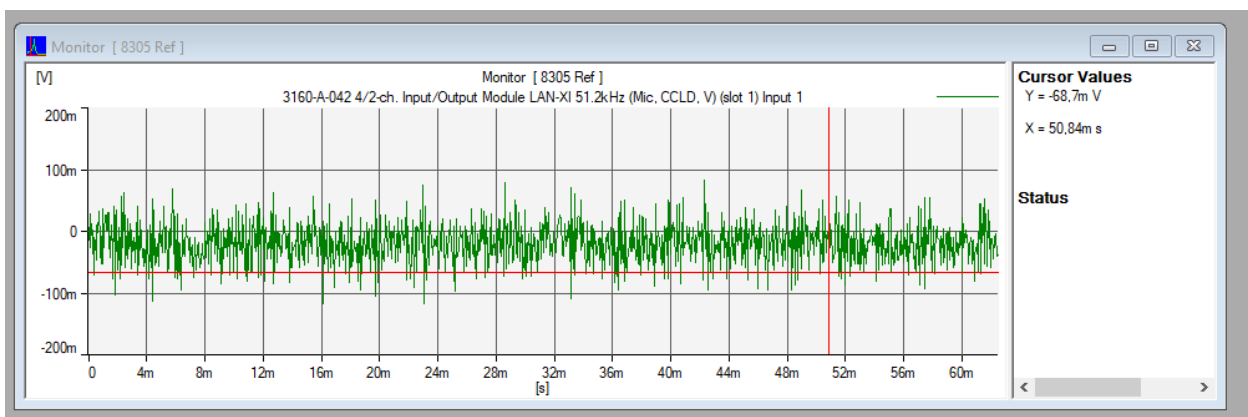


Abbildung 11: Zeitsignal eines zufälligen Rauschens, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Bei dieser Darstellungsform ist es ausschlaggebend, wie das Signal, das gemessen wird, aussehen soll. Ist die Signalform nicht bekannt, können nur aufgrund der Aussteuerung und von Beobachtungen der Periodizität Vermutungen angestellt werden. In der oben dargestellten Abbildung 11 ist ein Zeitsignal abgebildet. Bei dieser Signalform handelt es sich um ein zufälliges Rauschen, das auch als Kalibriersignal verwendet werden kann. Aufgrund der Zufälligkeit sollte in diesem Signal keine Periodizität erkennbar sein. Für die Verwendung als Kalibriersignal ist jedoch zentral, dass alle Frequenzen enthalten sind, die sich im Frequenzbereich des Prüflings befinden.

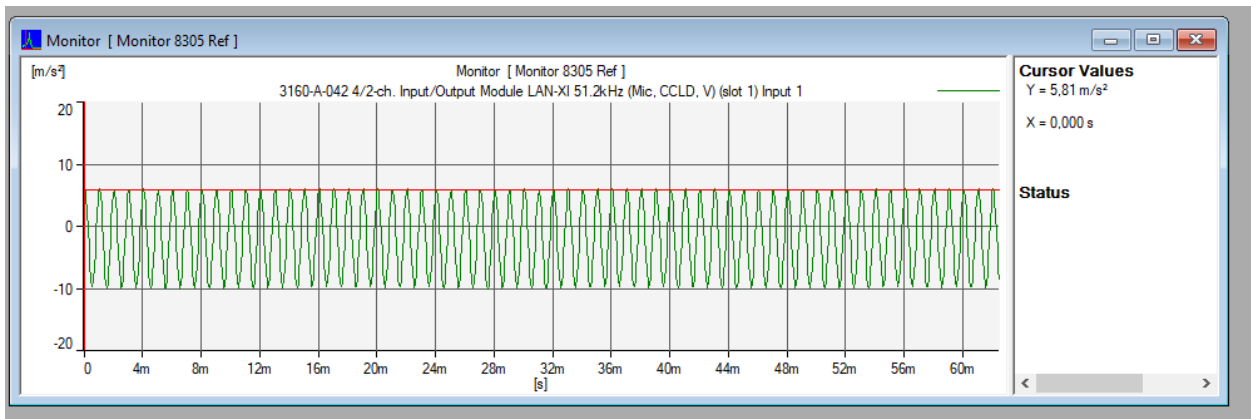


Abbildung 12: Zeitsignal eines Sinus-Signals, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In dieser Darstellung ist das Zeitsignal eines Sinus-Signals dargestellt. Wenn bekannt ist, um welche Signalform es sich handelt, kann dies in dieser Darstellung genau überprüft werden. Es können Schwankungen der Amplituden sowie das Vorhandensein von harmonischen Vielfachen der Grundschwingung festgestellt werden.

### 3.4.1.2 Fast Fourier Transformation

Aus dem Zeitsignal kann eine Fast Fourier Transformation erstellt werden. Diese Darstellungsform ist besonders dann ausschlaggebend, wenn nur eine einzelne Frequenz am Shaker angelegt wird. Dabei kann in dieser Darstellungsform kontrolliert werden, ob wirklich nur diese eine Frequenz in der Schwingung enthalten ist oder ob sich Vielfache der Grundschwingung im Signal befinden. Auch Einstreuungen können in dieser Darstellungsform gefunden werden.

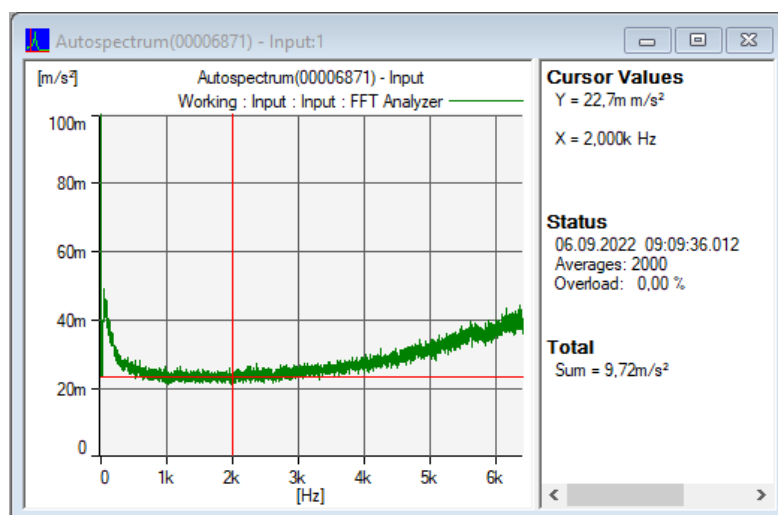


Abbildung 13: Frequenzspektrum eines Rauschens, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In der oben dargestellten FFT, Fast Fourier Transformation, ist das Frequenzspektrum eines Rauschens dargestellt. Auf der x-Achse ist die Frequenz in Hertz dargestellt, auf der y-Achse die Amplitude in  $m/s^2$ . Hierbei ist zu erkennen, dass die Amplituden der einzelnen Frequenzen

deutlich unterschiedlich sind. In dieser Darstellung kann auch beobachtet werden, ob einzelne Frequenzen überproportional oder nicht enthalten sind. Die Ursachen dafür können zum Beispiel Einstreuungen, aber auch ein Defekt sein.

### 3.4.1.3 Aussteuerungsanzeige

Eine weitere, während des Kalibriervorgangs relevante Anzeige ist die Aussteuerungsanzeige. An dieser Anzeige kann abgelesen werden, ob das gemessene Sensorsignal sehr klein ist oder nahe an der Übersteuerung liegt. Damit kann sichergestellt werden, dass sich das Sensorsignal während der Kalibration nicht in einem Extrembereich befindet.

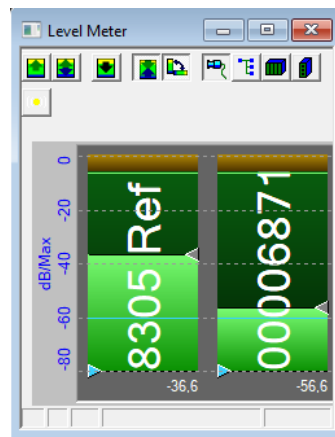


Abbildung 14: Aussteuerungsanzeige, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In der vorliegenden Abbildung 14 ist die Aussteuerungsanzeige als Säulendiagramm dargestellt. Auf der y-Achse ist der Wert in dB dargestellt. Zusätzlich kann sich der Balken auch verfärben. In diesem Beispiel bedeutet die Farbe Grün, dass der Sensor eine ausreichend hohe Aussteuerung hat, sodass damit gemessen werden kann. Ist die Säule blau, erfährt der Sensor keine Schwingung oder nur eine sehr kleine, die für die Messung eigentlich zu gering ist. Die dritte Farbe ist rot. Verfärbt sich der Balken auf Rot, bedeutet dies, dass die Schwingung höher ist, als der Sensor messen kann. Dieser Bereich ist bestmöglich zu vermeiden, da es durch Betreiben in diesem Bereich zu Schäden am Sensor kommen kann.

Besonders oft kommt dieses Diagramm beim Einstellen zur Anwendung oder am Beginn der Messung zum Einsatz, da ein schneller Überblick entsteht. Beim Kalibrationsvorgang wird es nur während der Parametrierphase benötigt. Bei der Auswertung der Daten spielt dieses Diagramm nur eine untergeordnete Rolle.

### 3.4.2 Darstellung der Endergebnisse

In diesem Kapitel werden die zwei bedeutendsten Darstellungsformen der Endergebnisse betrachtet. Je nach Anforderung kann eine oder können beide Formen dargestellt werden.

### 3.4.2.1 Tabellarische Darstellung

Diese Form der Darstellung ist besonders gut geeignet, wenn nur eine bestimmte Frequenz betrachtet werden soll. Hierbei wird eine bestimmte Frequenz vorgegeben und diese wird vom Referenzsensor sowie vom Prüfling gemessen. Die Auswahl der Frequenzen kann aufgrund mehrerer Kriterien erfolgen. Eines davon ist, dass die Frequenzen genauer betrachtet werden, die häufig gemessen werden. Ist dies nicht bekannt, kann die Auswahl symmetrisch über den gesamten Frequenzbereich oder logarithmisch gewählt werden. In diesen Tabellen sind die Frequenzstufen angegeben, bei denen gemessen wurde, ebenso die gemessene Amplitude sowie die gemessene Empfindlichkeit des Prüflings. Die Werte des Referenzsensors können optional angegeben werden. Von Bedeutung ist die Spalte mit der prozentuellen Abweichung zwischen dem Istwert und dem gemessenen Wert. Dieser Wert wird in Prozent angegeben und kann sowohl für die Amplitude als auch für die Empfindlichkeit ausgewiesen werden.

Der große Vorteil dieser Methode ist, dass die Abweichung direkt in Prozent ausgewiesen werden kann. Nachteilig an dieser Form ist jedoch, dass der Sensor bei bestimmten Frequenzen aufgrund von Beschädigungen nicht richtig messen könnte, dies aber bei dieser Form der Darstellung nicht erkennbar ist.

### 3.4.2.2 Grafische Darstellung

Um den ganzen Frequenzbereich überprüfen zu können, wird häufig für die Messung ein Rauschen angelegt. Um die Differenz zwischen dem Prüfling und der Referenz in einem Diagramm darstellen zu können, wird das Frequenzspektrum des Prüflings durch das der Referenz dividiert. Sind die Amplituden der beiden Sensoren bei derselben Frequenz gleich, ist das Ergebnis Null. Stimmen die Amplituden des Prüflings mit jenem der Referenz exakt überein, entsteht bei null ein gerader Strich. Ist eine Abweichung gegeben, ist der Wert im Diagramm höher oder kleiner Null.

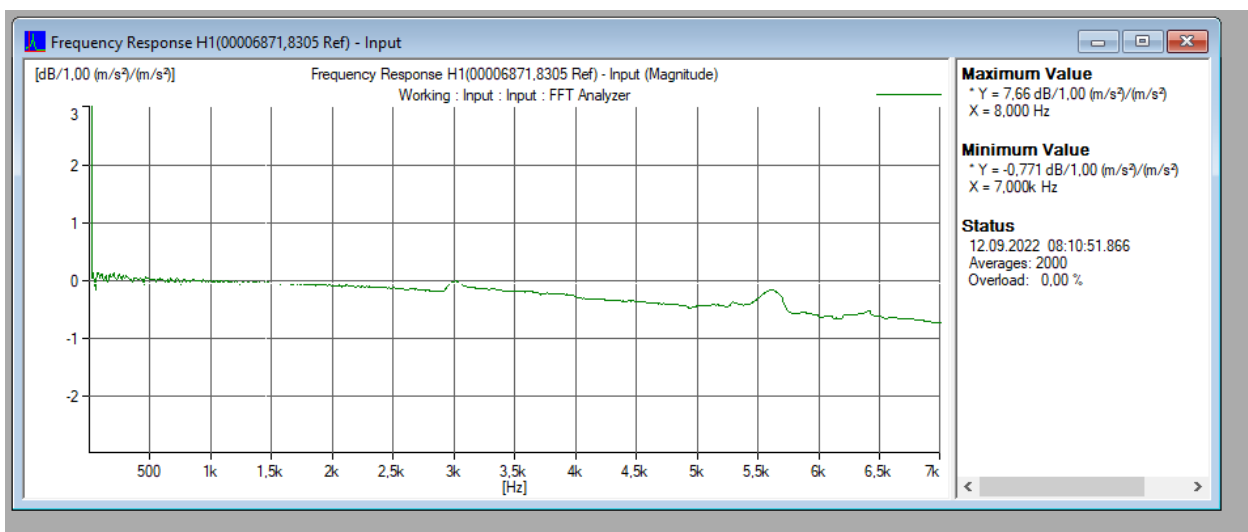


Abbildung 15: Frequenzgang, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In Abbildung 15 ist der Frequenzgang ersichtlich. Hier wird deutlich, bei welchen Frequenzen die Übereinstimmung unzureichend ist. Sind solche Frequenzen in den Bereichen enthalten, die benötigt werden, ist dieser Sensor für die Messung nicht mehr geeignet. Wie hoch die Abweichung sein darf, um einen Sensor weiterzuverwenden, wird im nachfolgenden Kapitel genauer betrachtet. Der einzustellende Frequenzbereich richtet sich zum einen nach den Herstellervorgaben dazu, für welchen Bereich der Sensor geeignet ist. Zum anderen kann der Bereich auch von handelnden Personen eingeschränkt werden. Dies ist immer dann sinnvoll, wenn bekannt ist, in welchem Frequenzbereich der Sensor eingesetzt wird. So kann im genutzten Bereich die Genauigkeit erhöht werden.

## **4 ZULÄSSIGE ABWEICHUNGEN**

Um die Kalibrierung und auch die anschließende Bewertung durchführen zu können, sind im Vorfeld einige Dinge zu beachten. So gibt es, je nach Spezifikation der Prüflinge, auch entsprechende Anforderungen an das Kalibrierequipment. In den nachfolgenden Kapiteln werden die wesentlichsten Daten betrachtet, um die zulässige Abweichung eines Sensors angeben zu können. Da im anschließend folgenden praktischen Teil der Masterarbeit die Vergleichsmethode verwendet wird, findet nur eine Betrachtung dieser Methode statt.

### **4.1 Benötigte Daten des Prüflings**

Um ein geeignetes Gerät für die Kalibrierung auswählen zu können, müssen zuerst die Kennwerte des Prüflings bekannt sein und betrachtet werden. Nachfolgend werden am Beispiel eines Beschleunigungssensors die benötigten Daten erörtert.

Ein Parameter, mit dem häufig begonnen wird, ist der Frequenzbereich. Hierbei ist zu beachten, dass der Prüfling über den ganzen Frequenzbereich hinweg überprüft werden kann. Besonders bei Sensoren, die für niedrige Frequenzen geeignet sind, kann dies die Auswahl der Referenzsensoren beeinflussen. Dies gilt ebenso für Sensoren, die für den hochfrequenten Bereich entwickelt wurden.

Ein weiteres wesentliches Kriterium ist die nominelle Empfindlichkeit. Auch hier gibt es große Unterschiede. Diese Information wird benötigt, um einen Referenzsensor so wählen zu können, dass dieser bei niedriger Empfindlichkeit des Prüflings nicht übersteuert und dass bei sehr hohen Empfindlichkeiten das Messsignal des Referenzsensors nicht im Rauschen versinkt.

Das dritte Kriterium ist die angegebene Genauigkeit des Prüflings. Hierbei ist zu beachten, dass der verwendete Referenzsensor ca. eine um den Faktor 3 höhere Genauigkeit aufweist als der Prüfling. Ansonsten würde der Sensor aufgrund der fehlenden Genauigkeit der Referenz nach der Kalibrierung schlechter eingestuft werden, als er in Wirklichkeit sein könnte.

### **4.2 Anforderungen an die Referenz**

Die Genauigkeit der Kalibration der Prüflinge ist zum überwiegenden Teil von der Genauigkeit der Referenz abhängig. Daher sind an diese einige Anforderungen gestellt. Wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt wurde, sollte die Referenz eine dreimal höhere Genauigkeit aufweisen als jene des Prüflings. Jedoch gibt es noch weitere Aspekte, die berücksichtigt werden müssen.

Einer davon ist, dass auch die Referenz in regelmäßigen Abständen rückführbar kalibriert werden muss. Je nachdem, in welcher Stufe sich die Referenz in der Kalibrierpyramide befindet, kann dies sehr aufwendig sein und auch kostspielig ausfallen. Referenzsensoren, die zur Werkskalibrierung verwendet werden, können oftmals noch selbst mit der Vergleichsmethode

kalibriert werden. Jedoch muss diese wiederum die Anforderung an die steigende Genauigkeit erfüllen.

Des Weiteren muss die Referenz eine Kalibrierhistorie aufweisen, in der nachgewiesen wird, dass sie ihre eigene Kalibrierung jedes Mal bestanden hat.

Zusätzlich zu diesen Anforderungen muss darauf geachtet werden, dass die Umgebungsbedingungen aufgezeichnet werden, bei denen die Referenz verwendet wird. Sollte sich der Lagerraum vom Kalibrierort unterscheiden, so ist sicherzustellen, dass die Referenz ausreichend Zeit bekommt, um sich an die Bedingungen, die im Kalibrierlabor vorherrschen, anzugleichen. Als Beispiel kann hier die Temperatur genannt werden. Sollte die Referenz in einem nichtklimatisierten Lager aufbewahrt werden, kann es im Sommer oder auch im Winter zu deutlichen Temperaturunterschieden zwischen dem Lagerort und dem Labor kommen. Das Angleichen der Temperatur an die Laborbedingungen kann etwas Zeit in Anspruch nehmen. Dies ist abhängig von der Größe des Temperaturunterschiedes sowie von der Masse des Sensors selbst.

### **4.3 Messunsicherheit**

Ein weiterer zentraler Punkt ist die Messunsicherheit. Je kleiner diese Unsicherheit ist, desto genauer kann das Messergebnis ausfallen. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass eine sehr kleine Messunsicherheit eine Fehlmessung nicht ausschließt. Die Messunsicherheit setzt sich aus mehreren Teilwerten zusammen, die nachfolgend betrachtet werden.

#### **4.3.1 Datenblatt**

Zu jedem Messgerät gibt es vom Hersteller ein dazugehöriges Datenblatt. Auf diesem sind die für das Gerät oder den Sensor relevanten Daten angegeben. Für die Berechnung der Messunsicherheit wird die vom Hersteller angegebene Genauigkeit benötigt. Dabei sind in den Datenblättern oftmals mehrere Werte angegeben. Am Beispiel eines Beschleunigungssensors, wie er in Kapitel 3.3.1 beschrieben ist, sind im Datenblatt ebenfalls mehrere Werte zu finden. Eine häufig benötigte Information ist die Höhe der Amplitude. Eine für Beschleunigungssensoren häufige Genauigkeit liegt bei 10 % über dem gesamten nutzbaren Frequenzbereich. Die Nennempfindlichkeit wird hier häufig bei 159,2 Hz angegeben. Dabei ist ein Vertrauensniveau von 95 % üblich. Die 159,2 Hz, die bei der Nennempfindlichkeit angegeben werden, sind dabei nicht willkürlich gewählt, sondern entsprechen einer Kreisfrequenz von 1000 rad/s.

Auch die Information über die Winkelgenauigkeit ist auf dem Datenblatt zu finden und wird in Grad angegeben. Zusätzlich können diese Informationen auch grafisch im Datenblatt dargestellt sein.

### 4.3.2 Statistische Abweichungen

Neben den im Datenblatt angegebenen Unsicherheiten gibt es Abweichungen, die sich mithilfe der Statistik berechnen lassen. Dazu kann im ersten Schritt die Varianz berechnet werden.

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

$s^2$	Varianz
$n$	Anzahl der Werte
$x_i$	Einzelner Messwert
$\bar{x}$	Mittelwert der Messwerte

Durch eine ausreichende Anzahl an Messungen kann so ein guter Schätzwert ermittelt werden. Besonders bei der Kalibrierung ist dies ausschlaggebend, da dies die Grundlage für weitere Messungen darstellt. Die Anzahl an Messungen sollte deutlich im Hunderterbereich liegen. In Abbildung 15 wurden als Beispiel 2000 Messungen verwendet. Dieser Wert ist jedoch hoch gewählt und es wird dementsprechend Zeit benötigt, bis diese Messungen durchgeführt sind.

### 4.3.3 Kombinierte Abweichung

Die dritte Variante ist eine Kombination der beiden vorherigen Abweichungen. Dazu müssen diese zusammengeführt werden. Damit das Messergebnis der GUM, der Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, entspricht, muss ein Bereich ausgewiesen werden, in dem sich der wahre Wert befindet. Dafür müssen beide Abweichungen mit demselben Vertrauensniveau, zum Beispiel mit  $k = 2$ , berechnet werden. Danach können die beiden Werte geometrisch addiert werden.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Baumgartner (2019), S.18



## 5 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG

Die Kalibration von Sensoren ist nicht nur für das Unternehmen selbst ein wesentlicher Bestandteil, sondern kann auch von den Kunden aktiv eingefordert werden. Für das Unternehmen selbst ist die Werkskalibrierung von Sensoren eine Art Rückversicherung, um sicherzustellen, dass ihre Produkte nach erfolgter Überprüfung auch tatsächlich den Vorgaben entsprechen. Werden Sensoren nicht regelmäßig überprüft, kann ein schleichend eintretender Defekt möglicherweise nicht oder nicht früh genug erkannt werden. Im schlimmsten Fall würde ein solcher Defekt oder eine Abweichung erst dann entdeckt, wenn zahlreiche Produkte aufgrund von Mängeln zurückgewiesen wurden. Dies ist neben dem Imageschaden oftmals auch finanziell negativ. Um dem vorzubeugen, müssen Sensoren aus Eigeninteresse – von normativen Erforderlichkeiten abgesehen – überprüft werden.

Bei der Überprüfung von Sensoren gibt es verschiedene Instanzen. Die niederwertigste ist eine sogenannte Funktionskontrolle. Diese sollte vor jeder Verwendung eines Messgerätes durchgeführt werden. Die Anforderungen an diese sind nicht hoch und sollten von jedem Bediener des Messgerätes vollzogen werden können. Dabei wird nur sichergestellt, dass der Sensor Werte liefert, die im Bereich des Möglichen liegen. Etwaige Genauigkeiten werden dabei nicht betrachtet.

Die nächste Ebene nach der Funktionskontrolle ist die sogenannte Werkskalibrierung. Dabei kann der Name dieser Kalibrierung irreführend sein. Werkskalibrierungen können sowohl vom Hersteller des Sensors als auch vom Bediener beziehungsweise einer firmenintern autorisierten Person durchgeführt werden. Es müssen dazu nur gewisse Formvorschriften eingehalten werden. Diese sind normativ festgehalten. Werden diese eingehalten, ist dies für einen Sensor des täglichen Gebrauchs ausreichend.

Es gibt auch höherwertigere Kalibrationsverfahren als die Werkskalibrierung. Diese sind in Österreich unter anderem als Eichung bekannt. Je nach Art des Sensors kann eine Eichung deutlich aufwendiger sein als eine einfache Werkskalibrierung. Es gibt jedoch Sensoren, bei denen der Aufwandsunterschied zwischen einer Werkskalibrierung und einer Eichung nur gering ist. Abgesehen vom zeitlichen Aspekt der Untersuchung sind auch höhere Anforderungen an die Referenzsensoren gestellt. Dasselbe gilt für das ausübende Personal.

Da sowohl eine Kalibrierung als auch eine Eichung mit hohen Kosten verbunden sind, gibt es dazu verschiedene Ansätze. Zuerst muss jedoch abgeklärt werden, ob eine Werkskalibrierung ausreichend ist oder ob eine Eichung erforderlich ist. Ist eine Eichung der Sensoren notwendig, wird im Regelfall davon Abstand genommen, die werksinterne Kalibrierstelle für diese Anwendung zu zertifizieren, da dies ohnehin nur für ausgesuchte Sensoren notwendig ist. Des

Weiteren ist die Zertifizierung als Eichstelle mit hohem Aufwand sowie mit hohen Kosten verbunden.

Wird jedoch festgehalten, dass eine Werkskalibrierung ausreichend ist, ist es ab einer gewissen Anzahl von Sensoren sinnvoll, diese unternehmensintern durchzuführen. Da es dazu jedoch viele unterschiedliche Aspekte zu beachten gibt, werden diese in den nachfolgenden Kapiteln betrachtet.

## **5.1 Extern vergeben**

Eine komfortable wie gängige Praxis ist, die Sensoren an externe Dienstleister zu schicken, die die Kalibrierung übernehmen. Besonders für kleinere Unternehmen, die nur über eine beschränkte Anzahl an Schwingungssensoren verfügen, ist dies oftmals die naheliegendste Variante. Bei kleineren Unternehmen sind die Ressourcen sowie das Know-how nicht im notwendigen Ausmaß verfügbar. Zusätzlich gilt, dass es für das Vertrauen des Kunden nicht förderlich ist, wenn der Anwender und die Person, die die Kalibrierung durchführt, dieselbe Person sind, was jedoch bei kleineren Unternehmen in der Regel nicht anders möglich ist.

Oftmals wird von kleineren Unternehmen die Kostenersparnis durch eine hausinterne Kalibrierung unterschätzt. Die laufenden Kosten für die Wartung und für die Überprüfung von Referenzsensoren sind nicht gravierend höher als für die, die sich im täglichen Gebrauch finden.

Was jedoch mit einer erheblichen Investition verbunden ist, ist die Erstausrüstung, um Werkskalibrationen durchführen zu können. Dazu gehören neben den baulichen Maßnahmen zur Errichtung eines geeigneten Kalibrierlabors auch die Anschaffungskosten für geeignete Referenzsensoren sowie für die notwendigen Schwingerreger, um Kalibrationen durchführen zu können.

Nachteilig an einer externen Vergabe der Kalibration der Sensoren ist neben dem Aufwand für Verpackung und Versand der Sensoren auch das Risiko eines Transportschadens, der beim Transport der Sensoren erfolgen kann. Zusätzlich stehen die Sensoren in dieser Zeit nicht zur Verfügung und es wird für sie möglicherweise ein Ersatz benötigt. Je nach Unternehmen und Labor, das die Kalibrierung durchführt, sind die Sensoren für mindestens eine Woche, aber bis zu sechs Wochen oder mehr außer Haus und dadurch nicht verfügbar. Es gibt zwar Labore, die einen Express-Service anbieten, jedoch ist dieser mit deutlichen Mehrkosten verbunden und auch hier ist die Unterschreitung von fünf Werktagen oftmals nicht möglich. Damit sich dies nicht negativ auf die Auftragsabwicklung auswirkt, ist eine zuverlässige und exakte Planung notwendig. Die Kosten werden nachfolgend der werkinternen Kalibration gegenübergestellt.

## 5.2 Intern kalibrieren

Vor allem größere Unternehmen verfügen über eigene Kalibrierlabore, um ihre Sensoren kalibrieren zu können. In vielen Unternehmen werden zuerst nur die hohen Kosten für die Anschaffung und Wartung der Labore gesehen. Welche Wertschöpfung in diesen erbracht wird, wird selten sichtbar. Die Anschaffungskosten für ein neues Kalibrierlabor sind hoch. Jedoch sind die Messgeräte, die zur Kalibrierung verwendet werden, hochwertig und im Regelfall langlebig.

Die werksinterne Kalibrierung bietet deutliche Vorteile in Bezug auf die Verfügbarkeit der Sensoren. Werksintern sollte es möglich sein, dass Sensoren nach deren Ablieferung bei der Kalibrierstelle am folgenden Werktag wieder für Messungen zur Verfügung stehen. Dies bedarf ebenso einer Planung, da auch die Kapazitäten einer Werkskalibration nicht unendlich hoch sind. Da die Überprüfung jedoch in regelmäßigen Abständen erfolgen muss, sollte die Planung nicht besonders aufwendig sein.

Die Werkskalibrierung hat noch einen entscheidenden Vorteil gegenüber der externen Kalibrierung. Sollte ein besonderes Ereignis eintreten, das die Kalibrierung des Sensors erlöschen lässt, kann diese werksintern im Notfall rasch durchgeführt werden und der Sensor kann, sofern die Kalibrierung positiv verläuft, sofort wieder eingesetzt werden. Bei einer externen Vergabe der Kalibration müssen für diesen Fall Ersatzsensoren verfügbar sein, was wiederum mit zusätzlichen Anschaffungs- sowie Lagerkosten verbunden ist.

## 5.3 Kostenvergleich

Eine generelle Aussage, ab wie vielen Sensoren es sich lohnt, eine werksinterne Kalibrierstelle zu betreiben, kann nicht getroffen werden. Dies liegt zum einen daran, dass in den verschiedenen Unternehmen auch eine Vielzahl an unterschiedlichen Sensoren vorhanden sind.

Dieser Kostenvergleich bezieht sich daher nur auf das Unternehmen, für das die Kalibriersoftware entwickelt wurde. Ebenso fließen unternehmensspezifische Umstände mit ein, die in vergleichbaren Unternehmen anders sein können.

Als Erstes werden die Kosten für eine externe Kalibrierung betrachtet. Auch wenn die Kalibrierung extern vergeben wird, fallen im Unternehmen Kosten an.

Extern	
Transportvorbereitung	€ 24,33
Versandkosten	€ 4,50
Kalibrierung laut Angebot	€ 348,00
Abwicklungspauschale	€ 19,00
Rücktransport	€ 30,00
Gesamtkosten	€ 425,83
Ab 10 Stk.	€ 357,73

Tabelle 1: Kostenaufstellung externe Kalibrierung, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Wie in Tabelle 1 dargestellt ist, kommen zusätzlich zu den Gebühren, die vom Dienstleister verrechnet werden, auch interne Kosten dazu. Als erster Punkt ist die Transportvorbereitung gelistet. Dieser Punkt beinhaltet alle Kosten, zum Beispiel das Verpackungsmaterial, aber auch den Zeitaufwand in Euro umgerechnet, die für ein Versenden benötigt werden. Inbegriffen darin sind der Transport aus dem Lager hin zur Versandabteilung, der Zeitaufwand für die Verpackung sowie die Formalitäten, die benötigt werden, damit die Sendung das Werksgelände verlassen kann. Die Versandkosten stellen das Porto für die Versendung mit der Österreichischen Post dar. Dabei wird von der kleinsten Verpackungseinheit, die nicht als Brief gewertet wird, ausgegangen. Etwaige Großkundenrabatte werden bei dieser Aufstellung nicht berücksichtigt. Die Kosten für die Kalibrierung in der Tabelle beziehen sich auf eine Werkskalibrierung.

Die Abwicklungspauschale wird ebenfalls vom Dienstleister verrechnet.

In der Position Rücktransport sind die Kosten enthalten, die anfallen, damit die Sensoren vom Wareneingang wieder zurück an ihren Lagerplatz transportiert werden können. Zusätzlich fallen noch Aufwendungen für die Dokumentation, für die Archivierung der Protokolle sowie für die kommerzielle Abwicklung im Unternehmen an. Viele dieser Positionen benötigen zwar nur wenige Minuten, sie sollten jedoch trotzdem in dieser Darstellung aufgelistet werden.

Für einen einzelnen Sensor fallen dadurch nicht zu vernachlässigende Kosten an. Werden jedoch mehrere Sensoren auf einmal verschickt, sinken die Kosten, da es bei vielen Positionen denselben Aufwand bedeutet, unabhängig davon, wie viele Sensoren versandt werden. Als Beispiel kann hier der Transport der Sensoren herangezogen werden, da aufgrund der geringen Baugröße zehn Sensoren auf einmal getragen werden können. Die Kosten für die Kalibrierung beim Dienstleister sind jedoch pro Stück und fließen daher pro Stück in die Sammelrechnung ein.

Auch bei der werksinternen Kalibrierung fallen neben der eigentlichen Kalibrierung noch weitere Kosten an. Diese wurden ebenso wie für eine externe Kalibrierung erhoben.

Intern	
Transport	€ 14,17
Rüstzeitkosten	€ 8,50
Kalibrierung	€ 7,08
Rücktransport	€ 14,17
1 Stk.	€ 43,92
Ab 10 Stk.	€ 10,77

Tabelle 2: Kosten werksinterne Kalibrierung, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Am Beginn dieser Betrachtung steht der Transport der Sensoren zum Labor, in dem diese kalibriert werden. Aufgrund des werksinternen Transports ist hier keine Verpackung notwendig. Jedoch wird für diesen Transport Zeit benötigt. Damit mit der Kalibrierung begonnen werden kann, sind Vorbereitungen notwendig. Dazu zählen unter anderem das Einschalten und Hochfahren der benötigten Messgeräte. Der Kostenpunkt Kalibrierung enthält den Zeitaufwand, der benötigt wird, um den Sensor am Gerät zu montieren, ihn zu kalibrieren und das Protokoll zu erstellen sowie um den Sensor zu demontieren. Für diese Zeitermittlung wurde bereits das in dieser Arbeit behandelte Programm verwendet. Da dieses sehr gut automatisiert ist, resultiert ein geringer Zeitaufwand. Die Kosten für das Labor sowie für die notwendigen Messgeräte sind bereits im Stundensatz inkludiert und daher in dieser Betrachtung nicht separat angeführt. Abschließend müssen die Sensoren wieder in das Lager zurücktransportiert werden.

Auch hier gilt, wie bei der externen Kalibrierung, dass durch das gemeinsame Kalibrieren die Stückkosten deutlich sinken. Zu erwähnen ist jedoch, dass dieser ausgewiesene Preis dem Selbstkostenpreis entspricht. Sollte diese Dienstleistung der Werkskalibrierung auch anderen Unternehmen angeboten werden, würde als Grundlage auch der Stückpreis genannt. Zusätzlich würden weitere Zuschläge hinzukommen. Dabei würde sich der Preis deutlich erhöhen.

## 6 GEEIGNETE PROGRAMMIERSPRACHEN UND ENTWICKLUNGSUMGEBUNGEN

Die Wahl der Programmiersprache hat einen wesentlichen Einfluss darauf, wie das Programm am Ende aussieht. Des Weiteren bestimmt sie auch die Wartbarkeit der mit dieser Sprache geschriebenen Anwendungen. Bei der Erstellung von Anwendungen, vor allem innerhalb eines Unternehmens, sollte darauf geachtet werden, dass nicht zu viele verschiedene Sprachen eingesetzt werden. Wird die Anzahl der Sprachen begrenzt, können gewisse Blöcke wiederverwendet werden und müssen nicht in jeder Sprache separat erstellt sowie gewartet werden. Zusätzlich empfiehlt es sich, Sprachen zu wählen, die weit verbreitet sind, da es dadurch leichter ist, Personal zu finden, das diese Programme auch dann noch warten kann, wenn der Programmierer der Anwendung das Unternehmen verlassen hat. Dies wird mit zunehmender Personalfuktuation immer bedeutsamer.

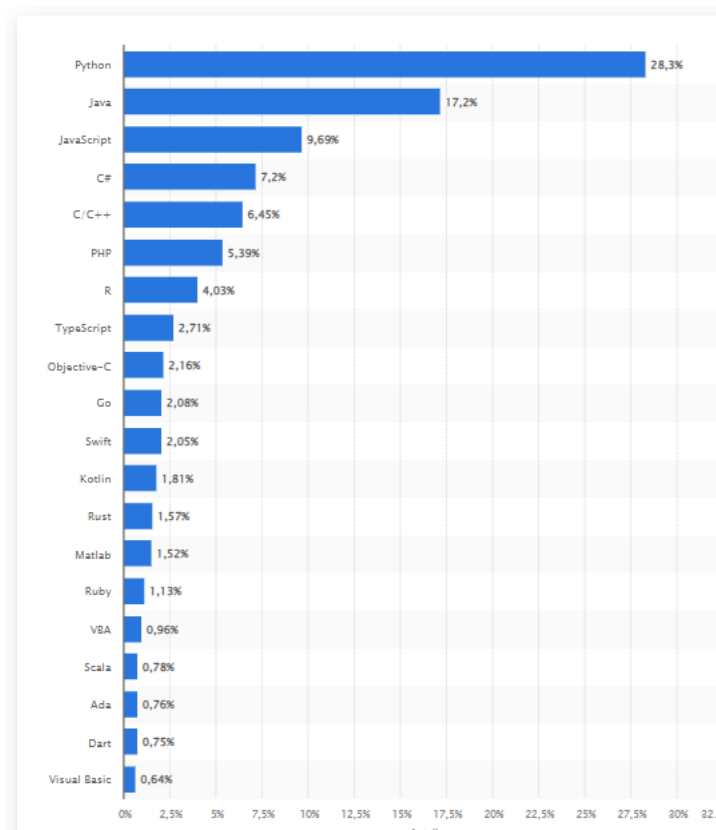


Abbildung 16: Beliebteste Programmiersprachen Oktober 2022, Quelle: statista.com, Onlinequelle [21.10.2022].

In Abbildung 16 ist das Ranking der Programmiersprachen von Oktober 2022 dargestellt. Die Beliebtheit von Sprachen ändert sich mit der Zeit. Dies liegt zum einen daran, dass neue Sprachen mit neuen Funktionalitäten auf den Markt drängen, aber auch daran, dass sich die Anforderungen über die Zeit ändern. Im Unternehmen ist geschichtlich gesehen die Sprache VBA, Visual Basic for Applications, stark eingesetzt worden. Mittlerweile hat die Beliebtheit dieser Sprache, wie in Abbildung 16 erkennbar ist, deutlich abgenommen.

Bezogen auf eine konkrete Anwendung ist die Kompatibilität mit den bereits bestehenden Anwendungen essenziell. Wenn die Sprache nicht unterstützt wird, sind ihre Vorteile nichtig. Dabei muss an dieser Stelle angemerkt werden, dass es technisch gesehen wenige Fälle gibt, bei denen eine Programmiersprache gänzlich ungeeignet ist. Im Regelfall ist nur der Aufwand für dasselbe Ergebnis höher und dadurch der Einsatz unwirtschaftlich. Aus diesem Grund werden nachfolgend drei Sprachen genauer betrachtet, die für die Anwendung gut geeignet sind. Zusätzlich werden zwei Entwicklungsumgebungen diskutiert. Diese bieten unterschiedliche Vorteile und Unterstützungen bei der Erstellung von Anwendungen.

## 6.1 Matlab

Matlab gehört zum amerikanischen Unternehmen MathWorks und hat eine lange Geschichte. Besonders eignet sich Matlab zur Berechnung von mathematischen Aufgaben. In Kombination mit ihrem Geschäftsmodell, das günstige Studentenlizenzen beinhaltet, ist Matlab seit Jahren an diversen Bildungseinrichtungen vertreten. Dadurch ist diese Programmiersprache vielen Absolventen von höheren Schulen bekannt und diese haben sie in den letzten Jahren in den Unternehmen verbreitet. Zusätzlich sind im Laufe der Zeit viele Erweiterungen hinzugekommen, zum Beispiel Simulink, aber auch der App Designer. Letzterer ist ein Modul zur Erstellung von grafischen Oberflächen.

Die Vorteile dieser Software sind zum einen die einfache Sprache und ihre umfangreichen Möglichkeiten im Bereich der Messdatenverarbeitung. Die Erstellung von Grafiken ist ebenso komfortabel. Ein weiterer Pluspunkt ist der App Designer. Dieser ermöglicht ein einfaches und schnelles Erstellen von grafischen Bedienoberflächen.

Ein Nachteil dieser Software sind die Lizenzgebühren. Je nach Variante kann die Lizenz direkt an ein Gerät gebunden sein. In Unternehmen kommen aber oftmals auch geteilte Lizenzen zum Einsatz. Diese sind von Vorteil, wenn die Software von vielen Personen genutzt wird, aber nicht zur selben Zeit. Wird die Software auch offline benötigt, ist dieses Modell ungeeignet.

## 6.2 C#

C# wurde von Microsoft entwickelt, ebenso wie C und C++, wobei C die älteste der drei Sprachen ist, dicht gefolgt von C++. C# wurde Anfang der 2000er Jahre, mehr als zwanzig Jahre später, der Öffentlichkeit vorgestellt und ist somit die jüngste der drei Sprachen. C# zählt zu den Hochsprachen und verfügt über umfangreiche Bibliotheken. Aufgrund der Tatsache, dass C# von Microsoft entwickelt wurde, ist diese Sprache sehr gut für Programme geeignet, die im Einsatz auf Windows-Rechnern laufen. Mittlerweile gibt es aber auch Möglichkeiten, diese Programme auf anderen Plattformen zu verwenden.

Einer der Vorteile dieser Sprache ist die Nähe zu Windows, sofern die Anwendung im Einsatz auf einem Windows-Rechner laufen soll. Des Weiteren ist vorteilhaft, dass diese Sprache weiter entfernt von der Hardware ist als C und C++.

Die Nachteile dieser Sprache liegen im Bereich der mathematischen Funktionen. Die Grundoperatoren sind zwar einfach möglich, jedoch wird bei komplexeren mathematischen Operationen deutlich, dass dies nicht im Fokus der Entwickler stand.

Vom Verbreitungsgrad her ist C# im Vergleich zu Matlab stärker am Markt als Programmiersprache vertreten, vor allem dann, wenn die ganze C-Familie betrachtet wird.

### **6.3 Python**

Python ist aktuell eine sehr beliebte Programmiersprache, wie auch aus dem Ranking in Abbildung 16 hervorgeht. Die Sprache wurde zu Beginn der 1990er Jahre der Öffentlichkeit vorgestellt. Aufgrund ihrer Vielseitigkeit ergeben sich zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten.

Diese Sprache bietet viele Vorteile. So ist sie einfach zu erlernen und bietet zugleich viele Möglichkeiten. Für mathematische Berechnungen steht zum Beispiel das Modul numpy zur Verfügung. Damit lassen sich auch komplexere Berechnungen einfach durchführen.

Ein weiterer Vorteil ist die große Community, wodurch für Anfänger viele Beispielprogramme im Internet zur Verfügung stehen. Dadurch ergibt sich auch eine gewisse Dynamik, die vermuten lässt, dass diese Sprache noch länger stark am Markt vertreten sein wird, was für die langfristige Wartung von Programmen ein Vorteil ist.

Aufgrund dieser Vorteile und der Tatsache, dass diese Sprache im Unternehmen bereits eingesetzt wird, liegt es nahe, Python für diese Arbeit zu verwenden.

### **6.4 PyCharm**

PyCharm ist eine Entwicklungsumgebung, die hauptsächlich, wie der Name schon vermuten lässt, für Python entwickelt wurde. PyCharm ist ein Produkt der Firma JetBrains, die ihren Hauptsitz in der Tschechischen Republik hat. Somit ist PyCharm eine europäische Alternative zu den meist amerikanischen Mitbewerbern für die Python-Programmierung.

PyCharm ist in zwei unterschiedlichen Versionen erhältlich. Die eine Variante ist eine Open-Source-Variante und steht dadurch kostenlos zur Verfügung. Alternativ gibt es die Professional Edition, bei der eine 30-Tage-Testversion angeboten wird, die jedoch danach kostenpflichtig ist. Wie der Zusatz ‚Professional‘ vermuten lässt, sind in dieser Version mehr Funktionen und Unterstützungstools vorhanden.



Ihr Aufbau ist ähnlich wie vergleichbare Produkte der Konkurrenz. Dies hat den Vorteil, dass Nutzer sich schnell zurechtfinden, die Umgebung hebt sich aber dadurch nicht so stark von der Konkurrenz ab. Auf der linken Seite sind die im aktuellen Ordner enthaltenen Dateien sichtbar. Unter diesen können die zusätzlich installierten Bibliotheken angezeigt werden.

Die Menüleiste fällt im Vergleich zu anderen Produkten recht umfangreich aus, für Einsteiger bietet dies aber nicht zwangsläufig einen Vorteil. Wesentlich häufiger werden die Buttons rechts unter der Menüleiste benötigt. Hier befinden sich der Run- und der Debug-Button. Zusätzlich kann in diesem Bereich mit dem Drop-down-Menü auch das auszuführende Projekt ausgewählt werden. Es empfiehlt sich aber, als Standardeinstellung das aktuell angezeigte Programm zu starten.

Wie es auch bei anderen Programmen üblich ist, kann mithilfe der roten Punkte zwischen der Zeilennummerierung und dem Code ein Haltepunkt für den Debug-Modus gesetzt werden. Besonders am Anfang ist dies eine zentrale Information, um Fehler im Code einfacher lokalisieren zu können.

PyCharm stellt auch viele Möglichkeiten zur Verfügung, die Umgebung zu personalisieren. So kann zum Beispiel der Projektbaum auf die rechte Seite verschoben werden. Es wird auch der Dark Mode unterstützt. Ob diese Einstellung jedoch schonender für die Augen ist, ist derzeit nicht wissenschaftlich belegt.<sup>4</sup> Jedoch erfreut sich diese Einstellung steigender Beliebtheit, besonders in Personenkreisen, die sich mit der Programmierung beschäftigen. Wirklich messbar ist hingegen der reduzierte Stromverbrauch des Bildschirms; dies gilt aber nur bei bestimmten Bildschirmtechnologien, zum Beispiel bei der OLED-Technologie. Bei anderen Bildschirmtechnologien kann der Unterschied fast Null betragen.

## 6.5 Visual Studio

Visual Studio ist eine Entwicklungsumgebung von Microsoft. Visual Studio wird in mehreren Varianten angeboten, für Windows-PCs als Visual Studio in der Lizenzvariante, für Apple-PCs als Lizenzvariante Visual Studio for Mac und als dritte, kostenlose Version als Visual Studio Code. Letztere Variante ist sowohl für Windows und Mac als auch für Linux verwendbar. Die beiden Lizenzvarianten bieten mehr Möglichkeiten und Komfort. Im Vergleich mit der im vorherigen Kapitel beschriebenen PyCharm Professional Edition ist Visual Studio jedoch deutlich teurer.

Visual Studio Code unterstützt nicht nur Sprachen aus der Microsoft-Welt, sondern es stehen fast 70 verschiedene Sprachen zur Auswahl, wenn eine neue Datei erstellt wird. Es handelt sich dabei

---

<sup>4</sup> wertgarantie (2022), Online-Quelle [1.10.2022]

nicht nur um Hochsprachen, wie Python oder C#, sondern es sind auch Datenformate wie JSON darunter gelistet.

Beim grundsätzlichen Aufbau der Benutzeroberfläche sind sich PyCharm und Visual Studio Code sehr ähnlich. Auch hier ist auf der linken Seite der Explorer dargestellt. Der Startbutton ist ebenfalls rechts oben, wie in der vorherigen Entwicklungsumgebung. Im unteren Bereich ist der Terminal dargestellt. Hier werden alle eingegebenen Befehle aufgelistet. Die Print-Funktion druckt die Daten oder den Text in dieses Feld. Für den Debugging-Modus sollte jedoch der Explorer zugeklappt werden und es sollten stattdessen die verwendeten Variablen angezeigt werden.

Besonders bei der Fehlersuche im Debugging-Modus ist es empfehlenswert, diese Anzeige zu verwenden. Visual Studio Code bietet aber auch die Möglichkeit, nachdem die Zeile debuggt wurde, den Wert oder den Inhalt einer Variablen anzuzeigen, wenn mit der Maus darübergefahren wird. Dies ist jedoch vor allem dann unpraktisch, wenn ein Dictionary vorliegt. Dies ist in der Variablenliste leichter zu durchsuchen.

Wie die vorangegangenen Abbildungen andeuten, ist die Wahl für dieses Projekt auf die Entwicklungsumgebung Visual Studio Code gefallen. Diese Umgebung hat, wie in diesem Kapitel schon erörtert wurde, viele Vorteile, ausschlaggebend war jedoch im konkreten Fall die komfortablere Einbindung von Bibliotheken, die benötigt wurden.

## 7 PROGRAMMIERUNG

Wie aus dem vorangegangenen Kapitel herauszulesen war, wurde für dieses Projekt die Programmiersprache Python gewählt. Die wesentlichen Gründe dafür waren die weite Verbreitung der Sprache, die vielen Erweiterungen sowie die Tatsache, dass diese Sprache bereits im Unternehmen eingesetzt wird. Als Entwicklungsumgebung, wie ebenfalls aus dem vorherigen Kapitel ersichtlich, wurde Visual Studio Code von Microsoft ausgewählt.

Die Programmierung stellte den größten zeitlichen Aufwand bei der Umsetzung dieser Arbeit dar. Aus diesem Grund werden in diesem Kapitel die einzelnen Schritte detailliert dargestellt. Die Unterkapitel wurden in vier Hauptbereiche aufgeteilt, wobei der erste Teil den für den Anwender sichtbaren Teil betrifft. Die weitere Untergliederung erfolgt aufgrund der Meilensteine, die bei der Programmierung gesetzt wurden.

### 7.1 Bedienoberfläche

Ein wesentlicher Teil und vor allem für alle sichtbar ist die grafische Bedienoberfläche. Dies ist das Erste und oftmals auch das Einzige, was der Bediener von einer Anwendung sieht. Die Codezeilen dahinter bleiben für die meisten Anwender im Verborgenen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, sich über die Gestaltung der Bedienoberfläche Gedanken zu machen. Eine gutgruppierte und logisch sinnvolle Anordnung von Eingabefeldern, Buttons und Beschriftungen erleichtert zum einen die Bedienung durch den Anwender, ist aber zum anderen auch zur Reduktion von Eingabefehlern ausschlaggebend. So kann eine ungünstige Anordnung dazu führen, dass bei bestimmten Feldern die Eingabe vergessen wird. Je nachdem, um welche Eingabe es sich handelt, kann es vorkommen, dass dadurch der ganze abgearbeitete Prozess wiederholt werden muss. Dies ist besonders dann ärgerlich, wenn die Wiederholung mehr Zeit in Anspruch nimmt. Aber auch bei kürzeren Wiederholungszeiten besteht die Gefahr, dass diese fehlende Eingabe nach Abschluss übersehen wird und das Projekt mit falschen Angaben abgeschlossen sowie archiviert wird. Um dem vorzubeugen, gibt es neben einer angemessenen Anordnung noch weitere Hilfsmittel. Eines ist die Wahl des Defaultwerts. Bei Angaben, die sich nur sehr selten ändern, ist es sinnvoll, einen gängigen Defaultwert zu verwenden. Dies bringt aber wiederum die Gefahr mit sich, dass dessen Änderung vergessen wird, sollte der benötigte Wert einmal davon abweichen. Aus diesem Grund ist dies für jedes Eingabefenster separat zu bewerten.

In Python gibt es für die Erstellung von grafischen Oberflächen das Erweiterungsmodul `tkinter`. Importiert wird dieses Modul mit dem Befehl `from tkinter import`. Danach kann dieses Modul genutzt werden. Um es in den nachfolgenden Zeilen nicht immer ausschreiben zu müssen, kann der Befehl `import tkinter as tk` verwendet werden. Besonders dann, wenn eine Funktion sehr oft aufgerufen werden muss, empfiehlt sich eine solche Abkürzung.

Bei der Erstellung der Bedienoberfläche wurde besonders darauf geachtet, mit möglichst wenigen Einstellmöglichkeiten auszukommen. Aus diesem Grund wirken für betriebsfremde Menschen manche Beschriftungen und Einstellungen etwas verwirrend. Daher wird in diesem Kapitel auf die einzelnen Felder besonders eingegangen.

Im oberen Bereich der Bedienoberfläche befinden sich alle relevanten Daten und Eingabefelder, die sich auf die Sensoren beziehen. Dieser Bereich trägt die Überschrift „Sensordaten“. Im weiteren Verlauf sind die Daten des Prüflings auf der linken Seite angeordnet, jene der Referenz auf der rechten Seite. Beim Prüfling wird die Seriennummer entweder vom TEDS ausgelesen, oder, wenn der Prüfling über keinen verfügt, manuell eingegeben. Die Funktionsweise des TEDS wird zu einem späteren Zeitpunkt genauer betrachtet. Bei der Referenz wird die Seriennummer des am häufigsten verwendeten Kalibriersensors schon voreingetragen.

Neben der Seriennummer des Prüflings ist das Eingabefeld der Index-Nr. Die Index-Nr. ist eine fortlaufende Nummer, die jedem Sensor und jedem Messgerät eine eindeutige Nummer im Unternehmen zuweist. Die Annahme, dass für eine eindeutige Zuordnung die Seriennummer ausreichend ist, ist falsch. Nur in Kombination mit dem Modelltyp wird die Seriennummer eindeutig. Zusätzlich gibt es viele Geräte, die über eine sehr lange Seriennummer verfügen, wodurch dieses System für den Menschen nicht komfortabel lesbar ist. Aus diesem Grund ist auch in dieser Kalibriersoftware die Indexnummer integriert.

Abbildung 17: Bedienoberfläche Schwingungssensoren Kalibration, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Die Empfindlichkeit kann auf Unternehmensfremde verwirrend wirken. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die einzugebende Zahl einem Spannungswert in Volt entspricht. Zum einen wurde hier diese Schreibweise gewählt, da diese auch in anderen Programmen, die im Unternehmen im Einsatz sind, so üblich ist. Der Hauptgrund dafür liegt aber darin, dass die

Einheit aus dem TEDS als String ausgelesen wird. Die Empfindlichkeit wird ebenfalls aus dem TEDS ausgelesen, sofern vorhanden, aber als Zahl. Somit würde diese Änderung deutlichen Mehraufwand bedeuten. Optisch ansprechender wäre die Darstellung in Millivolt, aber da die Eingabe auch hier im Regelfall automatisiert erfolgt, wurde die Darstellung in der Grundeinheit bevorzugt. Die Änderung hätte ein weiteres Eingabefeld für das Einheitenvorzeichen bedeutet.

Dasselbe gilt für die Empfindlichkeit des Referenzsensors, mit dem Unterschied, dass hier im Regelfall kein TEDS verwendet wird. Die beiden im Unternehmen vorhandenen Referenzsensoren verfügen hingegen über einen normierten Ausgang mit derselben Empfindlichkeit von  $10 \text{ mV/m/s}^2$ . Aus diesem Grund ist diese Empfindlichkeit im Eingabefeld schon als Startwert hinterlegt, sofern kein TEDS gefunden wurde. Die Abfrage wird aber trotzdem für den Fall durchgeführt, dass einmal ein anderer Sensor mit TEDS verwendet wird. Die Empfindlichkeit kann in beiden Fällen manuell geändert werden.

Die Zeile mit dem Hersteller, der Art des Sensors und dem Modell wird hauptsächlich für die Erstellung des Prüfprotokolls benötigt. Im konkreten Fall sind hier die Art des Sensors sowie der Hersteller schon im Programm vorausgefüllt. Dies hat den Grund, dass der Großteil der Sensoren, die mit dieser Software kalibriert werden sollen, derselben Art angehören und vom selben Hersteller stammen. Die Modellnummer kann entweder manuell eingegeben werden oder beim Vorhandensein eines TEDS automatisch ausgefüllt werden.

Im unteren Teil sind die Einstellungen, die für den Signalgenerator notwendig sind, angeordnet. Auf der linken Seite befinden sich die Checkboxen. Im konkreten Fall ist hier die Checkbox Random vorausgewählt. Das Random-Signal wird in einem späteren Kapitel genauer erklärt. Als zweite Checkbox kann das Sinus-Signal ausgewählt werden. Für den Fall, dass das Sinus-Signal ausgewählt wird, müssen auch die Eingabefelder Start, Ende und Schrittweite ausgefüllt werden. Dabei steht das Feld Start für die Startfrequenz, bei der die Kalibrierung beginnt. Das Ende steht für die Frequenz, bis zu der gemessen werden soll. Die Schrittweite gibt vor, wie viele Punkte zwischen der Start- und der Endfrequenz gemessen werden sollen. So würde die Eingabe ‚1‘ in der Schrittweite einer Auflösung von einem Hertz entsprechen. Dadurch wird hier ein sogenannter ‚step sine‘ für die Kalibrierung erzeugt. Dabei werden die verschiedenen Frequenzen angefahren und gemessen. Somit kann jede einzelne Frequenz betrachtet werden. Die Dauer der Kalibrierung ist dadurch stark davon abhängig, wie groß der Frequenzbereich, der begutachtet werden muss, gewählt wird. Aber auch die Schrittweite hat einen wesentlichen Einfluss auf den Zeitaufwand für die Kalibrierung.

Benötigt wird diese Einstellung immer dann, wenn vermutet wird, dass ein Sensor bei einer bestimmten Frequenz ein Problem haben könnte, dies aber in der Standardeinstellung nicht genau genug erkennbar ist, da der eingestellte Frequenzbereich zu groß ist. Es kann auch dafür

verwendet werden, wenn der Sensor am Rande seiner Spezifikation betrieben wird und dadurch sein Verhalten in diesem Bereich genauer betrachtet werden soll.

Der Button Ende ist für das Beenden des Programms verantwortlich. Damit das gesamte Programm geschlossen wird, gibt es einen vordefinierten Command namens ‚destroy‘.

Der Button Programmstart startet die Kalibrierroutine. Was dabei ausgeführt wird, wird in den folgenden Kapiteln genauer erläutert.

Dasselbe gilt für den Button Protokoll, wozu nachfolgend ein eigenes Kapitel verfasst wurde.

## **7.2 Kommunikation mit dem Messgerät**

Am Beginn der Programmierung muss eine Verbindung zum Messgerät aufgebaut werden. Für den ersten Versuch kann dies über den Webbrowser geschehen. Dazu wird die IP-Adresse des Messgerätes verwendet. Beim verwendeten Messgerät öffnet sich dadurch eine Seite, in der gewisse Informationen abgefragt werden können. Diese Daten sind aber in dieser Form für das Programm noch nicht zu verwenden. Sie dienen lediglich als erster Test, ob sich das Messgerät so überhaupt ansprechen lässt.

Bevor dies getestet wird, sollte sichergestellt werden, dass diese Funktion in dieser Art gegeben ist. Relevant ist auch, ob ein zusätzliches Stichwort benötigt wird. Der Grundaufbau dieser Anfrage sieht folgendermaßen aus: `http://ip_adresse_des_Messgerätes`. Dies ist die einfachste Form. Es kann aber auch notwendig sein, dass nach der IP-Adresse noch weitere Wörter anzufügen. Dies ist immer für das jeweilige Geräte abzuklären.

### **7.2.1 Requests**

Damit der Zugriff in einem Python-Programm erleichtert wird, gibt es einige verfügbare Bibliotheken, die importiert werden können. Eine davon nennt sich Requests. Es gibt aber auch andere Bibliotheken, zum Beispiel Urllib oder httplib, die im Grunde für dieselbe Anwendung genutzt werden können. Im weiteren Verlauf wird die Requests-Bibliothek behandelt. Ein Grund dafür ist, dass diese, verglichen mit den anderen Optionen, einfach zu bedienen ist.

Damit die Bibliothek verwendet werden kann, muss sie installiert werden. Dies kann mit dem Code ‚`pip install requests`‘ durchgeführt werden. Danach kann diese mit dem Befehl ‚`import requests`‘ in das Programm geladen werden.

Für die weitere Programmierung der Schwingungssensoren-Kalibration werden im Wesentlichen vier Methoden aus der Requests-Bibliothek genutzt, die nachfolgend genauer beschrieben werden.

### 7.2.1.1 Get

Als erste der drei Methoden wird ‚get‘ betrachtet. Diese wird dazu verwendet, Informationen abzufragen. Um die richtigen Informationen zu bekommen, muss der Pfad bekannt sein, an dem die Information zu finden sind. Ein solcher Abfragebefehl kann wie folgt aussehen: ‚response = requests.get(host + "/rest/rec/module/info")‘. Dabei ist ‚response‘ die Variable, in der die Antwort gespeichert ist. Im konkreten Fall gibt dieser Befehl die Antwort im JSON-Format zurück. Diese wird in einem eigenen Kapitel genauer betrachtet. Der weitere Aufbau besteht darin, über die Bibliothek ‚requests‘ auf die Methode ‚get‘ zuzugreifen.

In der Klammer ist der Pfad angegeben, an dem die benötigten Informationen zu finden sind. Um nicht jedes Mal die IP-Adresse angeben zu müssen, ist diese in der Variablen ‚host‘ inkludiert, ebenso wie ‚http://‘. HTTP steht für ‚HyperText Transfer Protocol‘. Durch das Plus werden die Ausdrücke mit der Zieladresse zusammengeführt. Die Variable ‚host‘ wurde zur besseren Wartbarkeit des Programmes eingeführt, da sich die IP-Adresse des Messgerätes ändern kann. Sonst müsste bei jeder Änderung der IP-Adresse der gesamte Code durchsucht werden. Da die Requests häufig im Programm verwendet werden, würde dies einen erheblichen Wartungsaufwand bedeuten.

Die weiteren Wörter des Pfades müssen entweder aus der Dokumentation entnommen werden oder, wenn diese nicht vorhanden ist, auf anderen Wegen, zum Beispiel durch Ausprobieren, gefunden werden.

Die Auswirkungen eines fehlerhaften ‚get‘-Befehl sind, verglichen mit anderen Befehlsarten eingeschränkt, da hier nur Daten vom Messgerät abgefragt werden und er somit nur eine lesende Funktion hat. Dadurch beschränkt sich das Risiko eines falschen Befehls darauf, nicht die richtige oder keine Antwort zu bekommen. In beiden Fällen wurden die Einstellungen des Gerätes nicht verändert.

### 7.2.1.2 Put

Der Aufbau des ‚put‘-Befehls ähnelt stark dem des ‚get‘-Befehls. Auch hier muss der exakte Pfad bekannt sein, damit die Daten an der richtigen Stelle landen. Im Gegensatz zum ‚get‘-Befehl werden aber beim ‚put‘-Befehl Daten an das Gerät gesendet. Dies wird ebenfalls über das JSON-Format abgewickelt. Damit die Daten richtig gesendet werden können, muss der Aufbau des JSON-Formats, das an das Messgerät gesendet werden soll, bekannt sein. Dann können gezielt einzelne Teile in der Datei verändert werden, zum Beispiel die Sensorempfindlichkeit. Diese abgeänderten Daten können im Anschluss mit dem ‚put‘-Befehl an das Messgerät gesendet werden. Das Messgerät liest diese Änderung und stellt die Einstellung im Messgerät selbst um. Sollten die gesendeten Einstellungen jedoch falsch sein, werden diese im besten Fall nicht übernommen und verworfen. Dies ist dann der Fall, wenn eine Position oder Variablenart nicht

der entspricht, die erwartet wird, zum Beispiel, wenn eine Zahl erwartet wird, sich jedoch auch ein Buchstabe darin befindet. In diesem Fall kommt es zu einer Statusmeldung, die im nachfolgenden Kapitel betrachtet wird.

Schwerwiegender ist es, wenn der Fehler vom Gerät nicht erkannt wird, da die Einstellung zwar möglich, für die gewünschte Anwendung jedoch nicht geeignet ist. Daraus ergeben sich zwei mögliche Szenarien. Zum einen können die gemessenen Werte falsch sein, wenn zum Beispiel bei der Sensorempfindlichkeit das Komma nicht richtig geschrieben wurde. Im anderen Fall kann, wenn zum Beispiel die Amplitude des Ausgangssignals zu hoch eingestellt wird, es zur Beschädigung des Gerätes bis hin zu dessen Zerstörung führen.

Aus diesem Grund muss der schreibende Befehl ‚put‘ mit mehr Vorsicht verwendet werden als ein lesender.

### **7.2.1.3 Post**

Der ‚post‘ Befehl hat sehr ähnliche Eigenschaften wie der ‚put‘ Befehl. Für die meisten Anwendungen sind beide Befehle gleichermaßen geeignet. Es gibt jedoch einen gravierenden Unterschied zwischen den beiden Befehlen. Der ‚put‘ Befehl liefert auch bei beliebiger Anzahl an Wiederholung desselben Befehles das gleiche Ergebnis. Beim ‚post‘ Befehl kann sich das Ergebnis mit jeder wiederholten Sendung des Befehles ändern. Dies muss bei der Verwendung dieses Befehles beachtet werden.

### **7.2.1.4 Statuscode**

Um eine Rückmeldung zu bekommen, ob ein Befehl richtig ausgeführt wurde oder ob ein Problem aufgetreten ist, kann der Statuscode abgelesen werden. Daher ist es nicht uninteressant, zu wissen, was die am häufigsten auftretenden Codes bedeuten.

Als Erstes wird der Statuscode 200 betrachtet. Dieser sagt aus, dass der Befehl ausgeführt wurde und keine Probleme beim Senden aufgetreten sind. Dies ist in einem funktionierenden Programm der einzige Code. Da dies aber nicht immer der Fall ist, gibt es noch weitere Codes. So kommen Nutzer leicht mit dem Code 400 in Berührung. Dies ist immer dann der Fall, wenn sich das Gerät zum Beispiel in einem Modus befindet, in dem kein Befehl empfangen werden kann. Dieser Fehlercode kann aber auch dann auftreten, wenn Fehler in der Schreibweise des Befehls enthalten sind.

Ebenfalls kommt der Fehlercode 404 vor. Dieser tritt dann auf, wenn der angegebene Pfad fehlerhaft ist. Dies kommt sehr häufig vor, vor allem, wenn nach dem Prinzip ‚trial and error‘ ein Pfad gesucht wird, der nicht eindeutig bekannt ist.



Deutlich seltener als die Statuscodes zuvor ist der Fehlercode 500 anzutreffen. Dieser zeigt einen unerwarteten Fehler an. Dies kann verschiedenste Ursachen haben und ist deutlich schwieriger zu finden als die beiden zuvor.

## 7.2.2 JSON

Wie in den vorangegangenen Kapiteln schon erwähnt wurde, erfolgt der Informationsaustausch über das JSON-Format. Dieses Format ist unabhängig von den jeweiligen Programmiersprachen und kann somit als Austauschmedium verwendet werden. Je nachdem, wie es in einem Programm eingesetzt wird, ist es unterschiedlich aufgebaut. Es gibt auch mehrere Möglichkeiten, einzusehen, was in der JSON-Datei enthalten ist. Je nach Ansicht ist dies einfacher oder schwieriger für den Menschen zu lesen.

Damit die Information von einem ‚get‘-Befehl in eine Variable gespeichert wird, muss der Variablen mitgeteilt werden, dass es sich um ein JSON handelt. Dies kann mit ‚daten=response.json()‘ realisiert werden. Im Debug-Modus kann an dieser Stelle schon der Inhalt betrachtet werden. Dazu muss mit dem Mauszeiger über die Variable, in der das JSON abgelegt wurde, gefahren werden.

```

response = requests.get(host + "/rest/rec/module/info")
module_info = response.json()
{
  'license': 'permanentLicense',
  'module': {
    'frontpanel': {
      'serial': 106301,
      'type': ...
    }
  }
}
> special variables
> function variables
res  'license': 'permanentLicense'
res  'module': {
set  'moduleState': 'RecorderOpened'
# R  'numberOfInputChannels': 4
uti  'numberOfOutputChannels': 2
#Se  'preampInputSupported': False
uti  'sdCardInserted': False
> 'supportedBridgeCompletion': []
> 'supportedBridgeSupply': []
# G  > 'supportedConnectors': ['BNC', 'LEMO']
> 'supportedDestinations': ['sd', 'socket', 'multiSocket', 'socketUdp']
set  > 'supportedFilters': ['DC', '0.1 Hz 10%', '0.7 Hz', '1.0 Hz 10%', '7.0 Hz']
set  > 'supportedHatsChannelPairs': []
set  'supportedMaxBridgeCurrent': 0.0
set  'supportedMaxBridgeVoltage': 0.0
set  > 'supportedOutputRanges': ['10 Vpeak']
set  > 'supportedQuarterCompletionImpedance': []
set  > 'supportedRanges': ['0.250 Vpeak', '10 Vpeak', '10 Vpeak-fixed', '31.6 V
Halten Sie die Alt-Taste gedrückt, um zur Editor-Sprachanzeige beim Daraufzeigen zu wec...
if Teds1 == True:
  setup["channels"][0]["ccId"] = True
    
```

Abbildung 18: Dateneinsicht JSON-File, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In dieser Ansicht kann ein Einblick in die darin enthaltenen Daten genommen werden. Dasselbe ist auch im Debug-Modus auf der linken Seite im Feld Variablen möglich. An dieser Stelle ist dies noch praktischer, da nicht die Codezeile gesucht werden muss, an der das JSON an die Variable übergeben wird. Bei den Pfeilen ist jeweils eine Unterordnung an Daten vorhanden, die ebenfalls an dieser Stelle eingesehen werden kann.

Es besteht auch die Möglichkeit, diese JSON-Datei außerhalb des Programmes als Datei abzulegen. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass diese im Urzustand umständlich zu lesen ist, wie in Abbildung 19 sichtbar ist.

```
1 {"floating": false, "gain": 0.0, "inputs": [{"frequency": 0.0, "gain": 0.0, "number": 1,
```

Abbildung 19: JSON-File ohne Formatierung, Quelle: eigene Darstellung (2022)

In dieser Urdarstellung, nachdem die JSON-Datei auf dem PC abgelegt wurde, sind alle Informationen in einer Reihe gelistet. Dies macht sie für den Menschen schwer lesbar. Ebenfalls sind in dieser Ansicht die Unterteilungen schwer bis nicht erkennbar. Aus diesem Grund gibt es verschiedene Hilfsmittel, die das Format dahingehend anpassen, dass es für den Menschen lesbarer wird. Dabei werden die Zeilenumbrüche sowie die Einrückungen formatiert.

```
1 {
2   "outputs" : [
3     {
4       "floating" : false,
5       "gain" : 0.1414213180541992,
6       "inputs" : [
7         {
8           "frequency" : 1000.0,
9           "gain" : 0.9999998807907105,
10          "number" : 1,
11          "offset" : 0.0,
12          "phase" : 0.0,
13          "signalType" : "sine"
14        },
15        {
16          "gain" : 0.0,
17          "number" : 2,
18          "signalType" : "dc"
19        }
20      ],
21     "signalType" : "sine"
```

Abbildung 20: JSON-File formatiert, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In Abbildung 20 wurde dieselbe JSON-Datei aufgerufen wie in Abbildung 19 mit zwei Unterschieden. Der erste Unterschied liegt darin, dass andere Werte eingegeben wurden. Der zweite, und das ist der wesentliche in diesem Beispiel, ist, dass die zweite Datei formatiert wurde und dadurch für den Menschen besser zu lesen ist als die in Abbildung 19. Dafür gibt es je nach verwendetem Editor unterschiedliche Hilfsmittel, die die Datei formatieren. Für die Verwendung der Datei ist es irrelevant, welche Formatierung verwendet wird. Im Vergleich zu Abbildung 18 ist hier ein Unterschied zu erkennen. Für die Verwendung sind diese beiden aber am besten geeignet.

Meistens werden von einer JSON-Datei nur bestimmte Daten benötigt. Um auf diese gezielt zugreifen zu können, muss der Aufbau der Datei bekannt sein. Diese Dateien sind als sogenanntes Dictionary aufgebaut. Soll nun ein Wert daraus ausgelesen werden, kann dies wie folgt aussehen: `„sensitivity = channels[0][‘sensitivity’]“`. Als Erstes wird die Variable benötigt, in die die Information abgelegt werden soll. Danach wird der Name der JSON-Datei angegeben. Die

eckigen Klammern bedeuten, dass hier auf den Unterordner zugegriffen wird. In der letzten Klammer steht der Name, der den gewünschten Wert enthält.

Das Beschreiben einer Variablen in der JSON-Datei funktioniert ähnlich. Um dies anschaulicher darzustellen, wird im nachfolgenden Beispiel der Signaltyp aus Abbildung 20 von ‚sine‘ auf ‚random‘ geändert. Dazu wird zuerst der Name der JSON-Datei benötigt, in der dies geändert werden soll. Im konkreten Fall heißt diese Datei ‚generator\_setup‘. Danach kommen die eckigen Klammern, die bis ins entsprechende Unterverzeichnis führen. Der entsprechende Code sieht dazu wie folgt aus: `generator_setup["outputs"][0]["inputs"][0]["signalType"] = "random"`.

Was aus Abbildung 20 nicht direkt herauszulesen ist, ist, dass es nicht nur einen Output gibt, sondern mehrere. Im konkreten Fall wird Ausgangskanal 1 geändert. Ebenso nicht leicht erkennbar ist, dass dieser Kanal auch mehrere Inputs haben kann. Hier wird Input 1, also Index 0, geändert. Um keine Fehlermeldung zu erzeugen, muss bekannt sein, welcher Datentyp an dieser Stelle erwartet wird. In diesem Fall ist es ein String. Besonders ist hierbei auf die Schreibweise zu achten, da ansonsten nicht die gewünschte Einstellung übernommen wird und es zu einer Fehlermeldung kommt.

Bis zu diesem Zeitpunkt wurde nur der Wert in der JSON-Datei geändert. Damit diese Einstellung auch vom Messgerät übernommen wird, muss diese Datei mit dem ‚put‘-Befehl an das Messgerät geschickt werden. Danach sind die Einstellungen im Messgerät geändert.

## 7.3 Datenübertragung

Die Daten, die zur Parametrierung des Messgerätes benötigt werden, wurden bereits in Kapitel 7.2 betrachtet. Im vorliegenden Kapitel liegt der Fokus auf der Übertragung der Messdaten. Dazu werden vom Hersteller des Messgerätes zwei Dateien zur Verfügung gestellt, die im Programmcode eingebunden werden können.

### 7.3.1 Header

Die erste dieser beiden Dateien nennt sich Header. Diese wird dazu benötigt, Informationen über das Datenpaket zu erhalten. Darin enthalten ist auch die Information, ob und wie viele Messdaten sich im Paket befinden.

### 7.3.2 Stream

Die zweite vom Hersteller bereitgestellte Datei heißt Stream. Diese greift auf die Informationen zu, die vom Header ausgelesen wurden. Daher werden hier nur die Bytes bearbeitet, die Messdaten enthalten können. In einer Schleife werden diese Messdaten ausgelesen und in die entsprechende Variable zur weiteren Verarbeitung abgelegt.

### 7.3.3 Kaitai

Kaitai ist eine deklarative Sprache, die vor allem für das Beschreiben von binären Daten verwendet wird. Diese können entweder in einer Datei oder in einem Speichermedium liegen. Zuerst wird in der Sprache Kaitai ein bestimmtes Format beschrieben, dieses wird in einer Datei abgespeichert und dann wird diese in der benötigten Sprache, sofern diese mit Kaitai kompatibel ist, kompiliert. Dies wird dazu verwendet, einfacher auf die Daten einer API, in diesem Fall als Stream, zuzugreifen.<sup>5</sup>

## 7.4 Datenverarbeitung

Damit die Daten nicht nur vom Messgerät auf den PC übertragen werden, müssen diese auch verarbeitet werden. Dabei muss der Aufbau der Daten bekannt sein, damit auf diese zugegriffen werden kann.

### 7.4.1 Auslesen der Daten

Wie eingangs schon erwähnt wurde, muss die Datenstruktur bekannt sein. Im konkreten Fall liegt diese in Form eines Dictionary vor. Da es sich jedoch um mehrere Pakete handelt, in denen Messdaten enthalten sind, müssen die Messdaten in einem Array zwischengespeichert werden. Dies muss für jeden Kanal einzeln durchgeführt werden. Bevor jedoch mit dem Stream der Daten begonnen wird, muss festgelegt werden, wie viele Daten abgespeichert werden sollen. Im konkreten Fall wird ein Zeitsignal übertragen. Daher muss überlegt werden, wie viele Sekunden aufgezeichnet und abgelegt werden sollen. Dies bestimmt auch die Größe des Arrays und ist zugleich die Abbruchbedingung der Schleife, wenn genügend Daten abgelegt wurden. Da die Daten in Blöcken übertragen werden, muss das Auslesen in einer Schleife erfolgen. Dazu werden jedoch mehrere benötigt, denn es kann vorkommen, dass Datenblöcke keine Daten enthalten. In diesem Fall wird auf den nächsten Durchlauf gewartet. Sind ausreichend Daten aufgezeichnet worden, wird die Schleife beendet. Dies wurde hier so gelöst, dass dies der Fall ist, wenn das Array mit den erwarteten Daten gefüllt ist. Ausschlaggebend ist jedoch die richtige Wahl, an welcher Stelle im Programm und mit welchem Array dies gemacht wird. Wird darauf nicht geachtet, kann es vorkommen, dass in den Arrays unterschiedlich viele Daten vorhanden sind. Dies kann bei der weiteren Datenverarbeitung zu Problemen führen.

---

<sup>5</sup> Kaitai (2021), Online-Quelle [11.11.2022]

## 7.4.2 Verarbeiten der Daten

Um die Daten, die als Zeitsignal in einem Array abgelegt wurden, zu verarbeiten, muss für die weitere Bearbeitung numpy installiert werden. Dies ist, wie Requens, eine von Python zur Verfügung gestellte Unterstützung. Bei numpy handelt es sich um das Mathematikmodul, wodurch bei vielen Berechnungen auf vorgefertigte Module zurückgegriffen werden kann. Mit diesem Modul kann aus dem aufgezeichneten Zeitsignal eine FFT kreiert werden. Diese FFT wird sowohl für den Referenzsensor als auch für den Prüfling erstellt.

Damit diese berechneten Daten visualisiert werden können, wird ein weiteres Modul benötigt. Dieses heißt matplotlib und wird für das Zeichnen von Graphen verwendet. Die Installation dieses Moduls funktioniert auf dieselbe Weise wie bei den vorangegangenen Modulen. Nun kann die FFT, die aus dem Zeitsignal berechnet wurde, grafisch dargestellt werden.

Als nächster Schritt muss die FFT des Prüflings durch die FFT der Referenz dividiert werden. Dadurch kann die Übereinstimmung des Signals des Prüflings mit dem der Reverenz geprüft werden. Da sich bei einer hundertprozentigen Übereinstimmung eine Linie bei 1 ergeben würde, muss der Wert 1 abgezogen werden, damit der Mittelpunkt auf der x-Achse liegt.

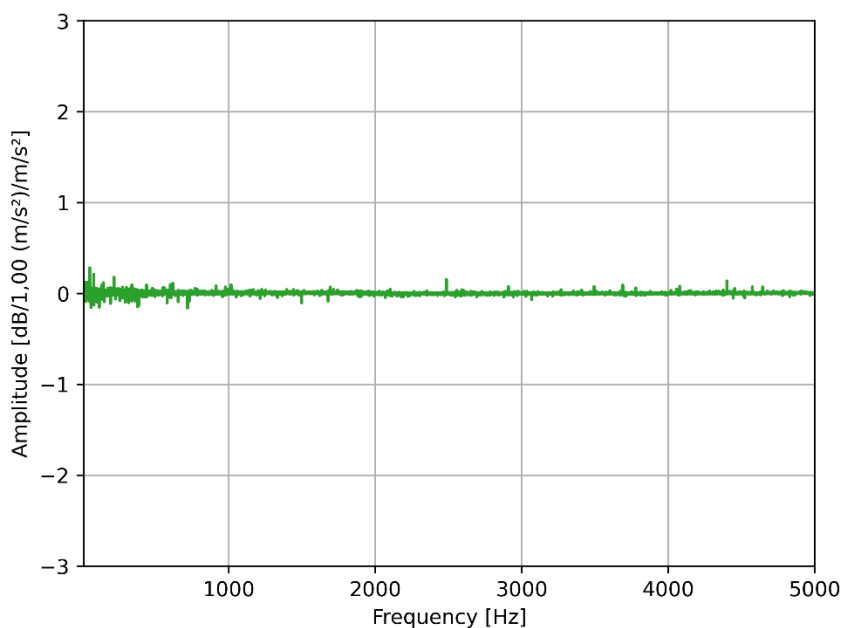


Abbildung 21: Grafische Darstellung des Ergebnisses der dividierten FFTs, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In Abbildung 21 ist das Ergebnis der gemessenen Daten sichtbar. Dazu wurden aus den beiden aufgezeichneten Zeitsignalen die FFT berechnet und diese wurden anschließend durchdividiert und der Wert 1 wurde abgezogen. Diese Darstellung ist jedoch noch ohne Mittelung. Um sie für die Kalibrierung zu verwenden, muss noch eine Mittelung eingeführt werden. Diese ist, neben der optischen Verschönerung des Ergebnisses, auch eine Frage der damit einhergehenden

Genauigkeit. Durch eine angemessene Anzahl an Mittelungen können zufällig auftretende Einflüsse auf das Messsignal verringert werden. Dies trägt auch zur Erhöhung der Genauigkeit der Messung bei. Wie viele Mittelungen benötigt werden, hängt von mehreren Faktoren ab. Einer ist der Prüfling selbst, ein anderer sind die Umgebungsbedingungen. Ob die Anzahl an Mittelungen ausreichend ist, kann anhand des Ergebnisses beurteilt werden. Im Zweifelsfall sollten jedoch mehr Mittelungen gewählt werden. Diese können im Anschluss Schritt für Schritt reduziert werden, bis eine Verschlechterung des Signals erkennbar wird. Damit kann die Mindestzahl an Mittelungen für diese Konstellation ermittelt werden.

## 8 EINSTELLUNG IM MESSGERÄT

Im vorangegangenen Kapitel wurde erläutert, wie Einstellungen am Messgerät vorgenommen werden können. In diesem Kapitel werden diese Einstellmöglichkeiten und ihre daraus resultierenden Auswirkungen betrachtet. Nur das Wissen, dass etwas eingestellt werden kann, reicht oftmals nicht aus, um auch das gewünschte Ergebnis zu erhalten. Ebenso werden hier die Standardeinstellungen, die im Messgerät vorgenommen werden, betrachtet und die Gründe werden erläutert.

### 8.1 Sensoreinstellungen

Nach dem Start des Messgerätes sind bei allen Einstellmöglichkeiten Standardeinstellungen ausgewählt. Bezogen auf den Sensor sind das relativ wenige Parameter. Diese Parameter sind so gewählt, dass ohne ihre Veränderung weder das Messgerät noch den Sensor bei einem Start des Messvorgangs beschädigt werden kann.

Die Empfindlichkeit ist in der Standardeinstellung auf 1 V/V eingestellt. Aufgrund der Tatsache, dass das Messgerät nur Spannungen messen kann, ist das die Grundeinheit. Im Nachgang kann so die Empfindlichkeit des Sensors berücksichtigt werden. Trotzdem empfiehlt es sich, von Beginn an mit der richtigen Empfindlichkeit zu arbeiten. Bei der Eingabe ist der Zahlenwert in Volt anzugeben, im separaten Fenster die Einheit, welcher Größe dieser Spannungswert entspricht, zum Beispiel  $m/s^2$ , der auch beispielhaft in der Bedienoberfläche angegeben ist.

Die Eingabe des Typs hat für die Messung selbst keinen Einfluss, dient jedoch der besseren Nachvollziehbarkeit. Im Nachgang wird der Typ jedoch für das Kalibrierprotokoll benötigt. Dasselbe gilt für die Seriennummer. Sie wird ebenfalls im Kalibrierprotokoll angeführt.

Einige der Sensoren verfügen über ein sogenanntes TEDS. Diesem ist auf der Bedienoberfläche ein eigener Button zugeteilt. TEDS steht für ‚Transducer Electronic Data Sheet‘. Wie der ausgeschriebene Name vermuten lässt, handelt es sich bei einem TEDS um einen kleinen Speicher, der im Sensor verbaut ist. Auf diesem Speichermedium sind alle relevanten Daten, die ansonsten auch im Datenblatt enthalten sind, elektronisch verfügbar. Dies bringt einige Vorteile mit sich. So können durch das Auslesen dieses TEDS die relevanten Sensordaten, wie die Empfindlichkeit, die Seriennummer und Ähnliches, vom Messgerät übernommen werden. Dies trägt maßgeblich zum Bedienkomfort bei, da nicht von jedem Sensor die Daten per Hand eingegeben werden müssen. Zusätzlich kann dadurch Verwechslungen vorgebeugt werden, da, wenn die Empfindlichkeit automatisch ausgelesen wird, sichergestellt werden kann, dass diese auch beim richtigen Sensor eingetragen ist. Werden diese Informationen per Hand eingegeben, besteht die Gefahr, dass bei der Eingabe Fehler unterlaufen, zum Beispiel, dass ein Sensor ausgelassen wird und die Sensoren mit der zugehörigen Empfindlichkeit möglicherweise versetzt sind.

Dies ist auch in der IEEE unter Nummer 1451 standardisiert. Für die Sensoren, die in dieser Arbeit behandelt werden, ist Unternummer 4 relevant.

## 8.2 Messkanal-Einstellung

Nachdem die Einstellungen für den Sensor getroffen wurden, muss auch der Messkanal selbst parametrierbar werden. Im Gegensatz zu den Sensoreinstellungen, die im Nachgang noch bearbeitet werden können, ist dies beim Einstellen für den Messkanal nicht möglich.

### 8.2.1 Anschlusstyp

Am Beginn dieser Einstellungen steht die Auswahl des richtigen Anschlusses. Das verwendete Messgerät unterstützt zwei verschiedene Arten von Anschlüssen. Beim ersten Typ handelt es sich um einen mehrpoligen Lemo-Stecker. Dieser Stecker wird häufig für Mikrofone verwendet. Die zweite Variante ist ein sogenannter BNC-Stecker. ‚BNC‘ steht für ‚Bayonet Neill Concelman‘ wobei Neill und Concelman die Namen der beiden Erfinder dieses Steckers sind. Entwickelt wurde dieser Stecker für Koaxialkabel, für die er nach wie vor eingesetzt wird.



Abbildung 22: Frontpanel mit BNC-Anschlüssen, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In Abbildung 22 ist das Frontpanel des Messgerätes mit den BNC-Anschlüssen dargestellt. Beim verwendeten Messgerät kann dieses Panel ausgetauscht werden. Daher ist auch die Einstellung im Programm notwendig, um welches Panel es sich handelt. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass diese Stecker für einen Wellenwiderstand von 50 Ohm ausgelegt sind. Das ist besonders bei der Wahl von Verbindungskabeln zwischen dem Messgerät und dem Sensor zu beachten. Die maximal übertragbare Frequenz ist im konkreten Fall irrelevant, da diese BNC-Stecker für Frequenzen von 1 GHz ausgelegt sind, in manchen Fällen auch noch mehr. Da die maximale Frequenz des Messgerätes bei 51,2 kHz liegt, ist dies mehr als ausreichend. Gewöhnlich wird das Frontpanel vom Messgerät selbst erkannt und dadurch ist im Regelfall nur eine Kontrolle notwendig, ob das Panel erkannt wurde. Andernfalls ist dies ein Hinweis darauf, dass entweder kein Panel montiert ist oder ein Defekt vorliegen könnte.



## 8.2.2 Bandbreite

Die nächste Einstellung, die getroffen werden muss, ist die Bandbreite. Standardmäßig ist hier die höchste Bandbreite von 51,2 kHz eingestellt. Die maximale Bandbreite ist deswegen als Standardeinstellung gewählt, da sie sicherstellt, dass die gewünschte Bandbreite darin enthalten ist. Da es aber oft der Fall ist, dass eine derart hohe Bandbreite nicht benötigt wird, gibt es auch Unterteilungen.

Unterstützte Bandbreiten	
51,2	kHz
25,6	kHz
12,8	kHz
6,4	kHz
3,2	kHz
1,6	kHz

Tabelle 3: Unterstützte Bandbreiten, Quelle: eigene Darstellung.

Es gilt auch hier der Grundsatz, dass die Frequenzen, die gesucht werden, bekannt sein sollten. Zumindest eine Bereichsabschätzung sollte vorhanden sein. Dies ist notwendig, um die Bandbreite groß genug zu wählen, aber auch nicht größer. Es werden dadurch unnötige Daten produziert, was Speicherplatz benötigt, wobei dies aufgrund des günstigen Speichers an Relevanz verloren hat. Der deutlich bedeutsamere Grund ist Folgendes: Wenn eine Frequenz, die gesucht wird, nur sehr schwach vertreten ist, kann es vorkommen, dass diese aufgrund der zu großen Bandbreite nicht klar erkannt werden kann und dadurch die Gefahr besteht, dass diese nicht gefunden wird, obwohl sie eigentlich vorhanden ist.

Im Falle der Kalibrierung der Sensoren ist die Wahl der Bandbreite simpel, da sie vom jeweiligen Sensor, der kalibriert werden soll, vorgegeben ist. Daher reicht ein Blick in das Datenblatt des Herstellers, in dem die maximale Frequenz angegeben ist, für die der Sensor geeignet ist.

Abseits der Kalibrierung gibt es mehrere Möglichkeiten. Dabei muss aber unterschieden werden, ob die Maschinen im Betrieb sind oder im Stillstand. Für im Betrieb befindliche Maschinen müssen die angeregten Frequenzen ermittelt werden. Bei Maschinen mit drehenden Teilen kann als Basis die Drehfrequenz des rotierenden Teils genommen werden. Am Beispiel eines Ventilators mit einem asynchronen Drehstrom-Kurzschlussläufermotor mit vier Polpaaren und einer Schlupfdrehzahl von dreißig Umdrehungen pro Minute würde die Drehfrequenz 12 Hz betragen.

$$n_s = \frac{60 * f}{p}$$

$n_s$       Synchrone Drehzahl in U/min

$f$         Netzfrequenz in Hz

$p$         Polpaarzahl

Um von der synchronen Drehzahl auf die asynchrone Drehzahl schließen zu können, kann der Schlupf von der synchronen Drehzahl abgezogen werden.

$$f = \frac{n}{60}$$

f      Frequenz in Hz

n      Asynchrone Drehzahl in U/min

Des Weiteren wird bei diesem Beispiel angenommen, dass der Lüfter fünf Schaufeln besitzt. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei einer Frequenzanalyse die 12 Hz als Drehfrequenz sowie deren harmonische Vielfachen und die Kombination aus Drehfrequenz multipliziert mit der Anzahl der Schaufeln gefunden werden müssen. Auch hier sind die harmonischen Vielfachen zu erwarten. An dieser Stelle muss noch erwähnt werden, dass dieses Beispiel mit einer Netzfrequenz von 50 Hz betrachtet werden muss. Zusätzlich können elektrische Einstreuungen im Bereich von 50 Hz vorhanden sein sowie 100 Hz, die durch die elektrische Anregung des Motors auftreten können. Es wäre denkbar, dass die harmonischen Vielfachen von 100 Hz gefunden werden können. Dies ist aber nur dann der Fall, wenn im Bereich des Blechpakets gemessen wird. Im Regelfall sind diese Schwingungen aber zu klein und sind vom Rauschen des Sensors nicht zu unterscheiden.

Eine weitere Methode ist, die Eigenfrequenzen eines Bauteils zu berechnen und diese durch eine gezielte Anregung nachzuweisen. Bei Stahlbauteilen kann dies genau berechnet werden. In diesem Fall wird nur kontrolliert, ob die Eigenfrequenz weit genug von der Anregefrequenz entfernt ist. Bei Bauteilen mit Verbundmaterialien und in Kombination mit Handarbeit ist dies oft schwieriger, da hier die Schwankungsbreite der Parameter teilweise stark ausgeprägt sein kann. In diesem Fall kann nach dem Ausschließungsverfahren vorgegangen werden, indem jene Frequenzen analysiert werden, die angeregt werden können. Dies ist aber nur in einem eingeschränkten Bereich möglich.

### **8.2.3 Abtastrate**

Eine weitere bedeutende Einstellung ist die Abtastrate. Sie hat ebenfalls einen sehr großen Einfluss auf das Messergebnis. Wird die Abtastrate zu gering eingestellt, können sich mehrere Probleme ergeben. Die Auswirkungen reichen dabei von einer unnötig langen Aufzeichnungszeit bis hin zur Fehlmessung. Die Abtastraten können aber nur zu einem Teil beliebig gewählt werden, da das Messgerät nur eine bestimmte Auswahl zur Verfügung stellt.

Abtastrate	
131 072	Samples/Sekunde
65 536	Samples/Sekunde
32 768	Samples/Sekunde
16 384	Samples/Sekunde
8192	Samples/Sekunde
4096	Samples/Sekunde

Tabelle 4: Unterstützte Abtastraten, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Wie in Tabelle 4 dargestellt sind auch hier sechs Stufen, wie bei der Bandbreite, vorhanden. Wenn die Zahlen genauer betrachtet werden, ist feststellbar, dass alle diese Stufen die Basis 2 aufweisen. Dies ist nicht grundlos, da das gemessene Signal digitalisiert werden muss. So entsprechen die 4096 Samples 12 Bit, die 131 072 Samples 17 Bit.

Wie eingangs schon erwähnt wurde, kann mit der Wahl der Abtastrate der Grundstein für eine Fehlmessung gelegt werden. Daher werden nachfolgend drei Szenarien betrachtet.

#### 8.2.3.1 Szenario 1: maximale Bandbreite, minimale Abtastrate

Das Messgerät hat eine maximale Bandbreite von 51 200 Hz. Die minimal mögliche Abtastrate beträgt 4096 Samples/Sekunde. Würde mit diesen Einstellungen eine Messung durchgeführt, ergäben sich die entsprechenden Messwerte. Es kann daraus auch eine FFT erstellt werden. Wird diese aber genauer betrachtet, wird erkennbar, dass hier Frequenzen enthalten sind, die tatsächlich nicht vorhanden sind. Dies ist eines der letzten Alarmsignale, dass bei der Einstellung des Messgerätes etwas nicht richtig sein kann. Um dies zu vermeiden, sollte das Abtasttheorem beachtet werden.

Laut dem Abtasttheorem dürfen für eine gegebene Abtastfrequenz  $f_s$  im Signal nur Frequenzen  $f$  im Bereich vom  $0 \leq f < f_s/2$  enthalten sein. Dabei wird  $f_s/2$  auch als Nyquist-Frequenz bezeichnet. Sind in einem Signal Frequenzanteile enthalten, die größer oder gleich der Nyquist-Frequenz sind, ist das Ausgangssignal nicht mehr eindeutig zu rekonstruieren.<sup>6</sup>

Damit eine derartige Einstellung nicht vorgenommen werden kann, sollte dies in der Software automatisch abgefragt werden. Nach Abschluss der Messungen kann dies nicht mehr korrigiert werden und die Messung muss wiederholt werden.

#### 8.2.3.2 Szenario 2: Bandbreite und Abtastrate sind auf derselben Stufe

In diesem Beispiel wird davon ausgegangen, dass die Einstellungen laut Tabelle 3 und Tabelle 4 auf derselben Höhe sind. Konkret bedeutet das die höchste Abtastrate mit der größten Bandbreite, die niedrigste Abtastrate mit der niedrigsten Bandbreite eingestellt werden. In diesem

---

<sup>6</sup> Kuttner (2015), S. 247

Fall wird als Erstes betrachtet, ob das Abtasttheorem erfüllt ist. Es ist jede Abtastrate um 2,56 höher als die Bandbreite. Dadurch kann das Abtasttheorem als erfüllt angesehen werden. Es kann die gesamte Bandbreite dargestellt werden. Laut Abtasttheorem wäre zweifach größer ausreichend, im Messgerät sind die Stufen aber auf 2,56 festgelegt. Diese 2,56 sind dann üblich, wenn das Signal für einen FFT-Analysator gedacht ist. Dabei reicht es nicht aus, nur das Abtasttheorem zu erfüllen, sondern es muss zusätzlich noch ein Tiefpassfilter integriert werden, der ab der Frequenz  $f_s/2$  kein Signal mehr durchlässt. Dieser Filter wird auch Antialiasing-Filter genannt.

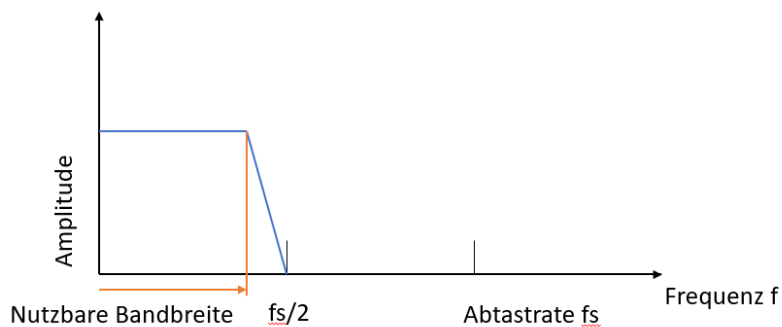


Abbildung 23: Nutzbare Bandbreite mit Abtastrate, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In Abbildung 23 ist auf der x-Achse die Frequenz aufgetragen. Dabei sind die Punkte der Abtastrate sowie jener der halben Abtastrate eingezeichnet. Wie dabei sichtbar wird, fällt die Amplitude des Signals bei der halben Abtastfrequenz auf null. Dies liegt am erwähnten Filter. Der orangefarbene Pfeil stellt die nutzbare Bandbreite dar. Wenn die unterste Stufe gewählt wird, betragen die nutzbare Bandbreite 1600 Hz und die Abtastrate 4096 Hz. Der verbleibende Teil zwischen 1600 Hz und 2048 Hz wird vom Filter benötigt. Im verwendeten Messgerät ist dazu ein Butterworth-Filter dritter Ordnung im Einsatz. Dieser dient dazu, diese ‚Aliens‘ zu vermeiden.

Mit dieser Einstellung ist gewährleistet, dass das Signal vollständig rekonstruiert werden kann und dass die Vermeidung von ‚Aliases‘ im Signal gegeben ist. Zusätzlich ist diese Einstellung die mit dem kürzesten Zeitbedarf. Sie wird daher häufig angewendet.

### 8.2.3.3 Szenario 3: minimale Bandbreite, maximale Abtastrate

Dieses Szenario ist das gegenteilige Extrem zum ersten Szenario. Auch hier ist das Abtasttheorem erfüllt. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass alle Informationen, die im Signal enthalten sind, erfasst werden können. Auf den ersten Blick gibt es bei dieser Variante keinen Vorteil im Vergleich zum zweiten Szenario. Es werden in erster Linie sehr viele Daten produziert, die nicht unbedingt notwendig sind. Jedoch gibt es Fälle, in denen ein solches Überabtasten, auch Oversampling genannt, sinnvoll sein kann. Einer dieser Fälle ist dann

gegeben, wenn bei der niedrigsten möglichen Abtastrate, die das Abtasttheorem noch erfüllt, der Abstand zwischen der Bandbreite und der halben Abtastrate sehr gering ist. In diesem Fall werden sehr hohe Ansprüche an die Flankensteilheit des Antialiasing-Filters gestellt. Sollte dies vom Filter nicht erfüllt werden können, ist zu empfehlen, die Abtastrate zu erhöhen. Warum die Flankensteilheit des Filters nicht ausreicht, kann mehrere Gründe haben. Zum einen sind Filter mit flacheren Flanken einfacher und kostengünstiger zu realisieren. Umgekehrt gilt, dass steile Flanken teuer und deren Verwendung dadurch eine Frage des Preises ist.

Die Auswirkungen einer unnötig hohen Abtastrate beschränken sich auf einen erhöhten Speicherbedarf für die gewonnenen Daten sowie auf einen erhöhten Verarbeitungsaufwand aufgrund der hohen Zahl an Daten. Diese Auswirkungen sind in der heutigen Zeit im performanten Rechner und mit hohen sowie günstigen Speicherkapazitäten kleiner als in Zeiten, in denen Rechenleistung und Speicher knapp waren. Aus diesem Grund ist zu empfehlen, die Abtastrate im Zweifelsfall höher zu wählen als notwendig, da die Auswirkungen wesentlich geringer sind als umgekehrt.

#### **8.2.4 Versorgung für Sensoren**

Viele Sensoren benötigen für ihren Betrieb eine Energieversorgung. Diese kann auf mehrere Arten bereitgestellt werden. Eine ist die Versorgung direkt vom Messgerät. Da das verwendete Messgerät über einen BNC-Anschluss verfügt, an den ein Koaxialkabel angeschlossen wird, sind die Möglichkeiten zur Energieübertragung begrenzt. Im verwendeten Messgerät wird diese Energieversorgung CCLD, ‚Constant Current Line Drive‘, genannt. Wie der Name schon vermuten lässt, wird bei dieser Methode ein konstanter Strom in Höhe von 4 bis 5 mA ausgegeben. Mit diesem konstanten Strom wird der Sensor über die Messleitung mit Energie versorgt. Somit können das Messsignal und die Spannungsversorgung über ein Koaxialkabel erfolgen. Diese Art der Energieversorgung ist aber nicht nur unter den Namen CCLD, sondern auch als IEPE, ‚Integrated Electronics Piezo Electric‘, ICP, ‚Integrated Circuit Piezoelectric‘, oder als DeltaTron bekannt. Die Begriffe stehen aber alle für das gleiche Verfahren und sind untereinander austauschbar. Ob ein verwendeter Sensor diese Form der Energieversorgung benötigt, kann entweder über das TEDS abgefragt werden oder auch über das Datenblatt des Sensors. Häufig verfügen Sensoren, die mit der CCLD-Versorgung arbeiten, auch über ein TEDS.

#### **8.2.5 Speicherplatz**

Das verwendete Messgerät unterstützt zwei unterschiedliche Arten, wie die Messdaten aufgezeichnet werden können. Als Standardeinstellung werden die Daten auf eine SD-Karte geschrieben, die auf der Rückseite des Messgerätes eingeführt werden muss. Auf dieser können die einzelnen Messungen als Wave-Dateien abgelegt werden. Diese Variante ist aber nur in zwei Fällen empfehlenswert. Einer davon ist, wenn die Messaufzeichnung über ein Webinterface nur

gestartet und gestoppt wird. Dabei kommt es zu keinem Datastream und die Daten müssen von der SD-Karte gelesen werden. Der zweite wäre, wenn der PC nicht über ausreichend Speicher verfügt oder die Daten auf einem anderen PC benötigt werden, der mit dem Messrechner keine Verbindung hat. In beiden Fällen ist der Workflow aber nicht optimal, da das Transportieren von Daten per portablen Speichermedium nicht mehr zeitgemäß ist.

Die zweite Variante ist, die Daten zu streamen. Dazu muss die Einstellung von ‚SD‘ auf ‚socket‘ umgestellt werden. Dies hat zur Folge, dass die gemessenen Daten an den PC gesendet werden. Diese ankommenden Daten müssen dann vom PC beziehungsweise von der Software, die den Stream der Messdaten ausgelöst hat, verarbeitet werden. Dies hat mehrere Vorteile. Zum einen können die Daten direkt aufbereitet und verarbeitet werden. Es muss danach nur das benötigte Endergebnis abgespeichert werden und die Rohdaten, die je nach Dauer der Messung sehr groß ausfallen können, können wieder verworfen werden. Der PC kann auch als Datensammler verwendet werden, der die gemessenen Daten als Wave-Datei ablegt. Dies ist dann sinnvoll, wenn die Daten zur Analyse von einer anderen Software eingelesen werden müssen.

### **8.2.6 Kanalname**

Der Titel ‚Kanalname‘ klingt auf den ersten Blick zwar selbsterklärend, kann aber bei Missachtung schwerwiegende Folgen haben. In der Standardeinstellung findet sich für „channel“: 1 eine fortlaufende Nummer und als „name“: „Channel 1“. Dabei muss beachtet werden, dass unter ‚Channel‘ die Durchnummerierung im Datentyp Integer durchgeführt wird und die Kanäle von 1 beginnend durchgezählt werden. Der Name setzt sich aus dem Wort ‚Channel‘ und der fortlaufenden Nummer zusammen. Im ersten Blick sieht das nach einer doppelten Benennung aus. Geändert werden kann aber nur der Name, da dieser den Datentyp String aufweist. Somit kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass einer der Begriffe einer Nummerierung entspricht, der andere einer Benennung, die den Zweck erfüllen soll, die Identifikation für den Menschen zu erleichtern, da die Benennung nach der Messstelle gewählt werden kann.

### **8.2.7 Aktivierung des Messkanals**

Nachdem das Messgerät an die Spannungsversorgung angeschlossen ist, startet es automatisch. Dabei sind alle Messkanäle ausgeschaltet. Nachdem das Messgerät spannungslos war, sind alle Einstellungen, die bei der vorgegangenen Messung eingestellt waren, zurückgesetzt, so auch die Einstellung, ob ein Kanal bei der Messung aktiv war. Darum muss nach jedem Start, der auch durch eine Energieversorgungsunterbrechung hervorgerufen werden kann, die Information übermittelt werden, welche Kanäle verwendet werden. Die Aktivierung eines Messkanals kann damit kombiniert werden, dass dieser, wenn ein TEDS gefunden wurde, automatisch aktiv ist.

## 8.2.8 Hochpass-Filter

Eine weitere und zentrale Einstellung betrifft die Filter, mit denen das Eingangssignal gefiltert werden soll. Auch bei dieser Einstellung gibt es eine Standardeinstellung. Diese lässt das Eingangssignal ungefiltert durch. Dies hat den Grund, dass ein bereits aufgenommenes Signal noch nachbearbeitet werden kann und auch im Nachgang ein Hochpass-Filter eingesetzt werden kann. Bei Sensoren, die zum Beispiel den Abstand messen, kann es interessant sein, auch den statischen Abstand aufzuzeichnen, der im Messsignal als DC-Anteil ausgewiesen wird. Diese Information ist nach der Anwendung eines Filters aber unwiderruflich verloren. Ebenso verhält es sich, wenn ein Hochpass-Filter zu hoch eingestellt wurde. Werden jedoch stromgespeiste Sensoren verwendet, ist der DC-Anteil oft störend und sollte aus dem Messsignal gefiltert werden. Dazu stehen im Messgerät mehrere Filter zur Auswahl.

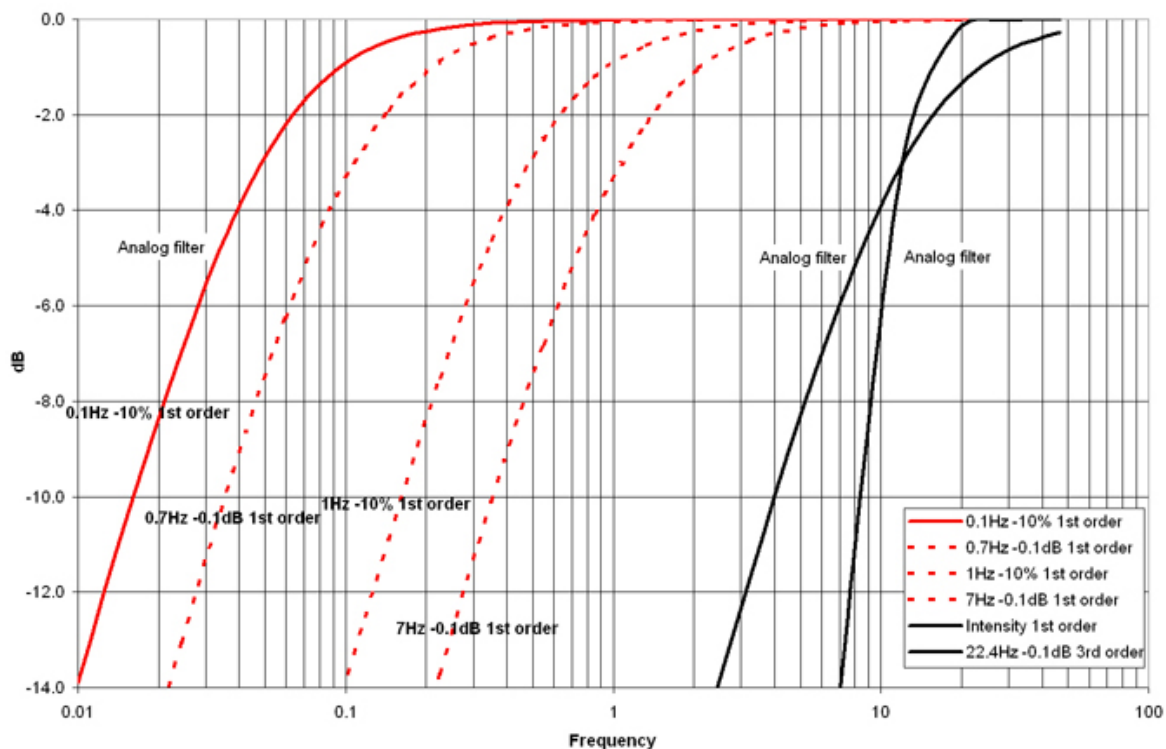


Abbildung 24: Filter-Charakteristik, Quelle: Pulse Help (2022).

Es stehen mehrere mögliche Filter für die jeweilige Anwendung zur Verfügung. Alle Filter, welche in Abbildung 24 dargestellt sind, sind erster Ordnung mit verschiedenen Grenzfrequenzen, davon ausgenommen ist jedoch der 22,4 Hz Filter, welcher eine höherer Ordnung aufweist. Dabei entspricht die rote Linie einem analogen Filter, wie auch die beiden schwarzen. Bei den strichlinierten handelt es sich um digitale Filter. Die roten weisen einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Dies liegt daran, dass die digitalen Filter derselben Ordnung entsprechen wie der analoge Filter. Dennoch haben die digitalen Filter Vorteile gegenüber den analogen. So können sie entweder mit Logikbausteinen aufgebaut werden oder in Softwares umgesetzt werden. Im

Gegensatz zu den analogen Filtern spielt die Temperatur des Messgerätes eine untergeordnete Rolle. Die Genauigkeit dieser Filter ist mit der zur Verfügung stehenden Wortlänge begrenzt. Trotzdem haben auch die analogen Filter nach wie vor ihre Berechtigung. So sind diese weder von der Wortlänge noch von AD-/DA-Wandlern abhängig. Rundungsfehler kommen bei analogen Filtern nicht vor. Auch bei verrauschten Signalen sind in manchen Fällen analoge Filter im Vorteil. Im vorliegenden Fall sind beide Varianten enthalten, wodurch der Filter situationsabhängig gewählt werden kann.

Einzig der 22,4 Hz-Filter sticht mit seiner Charakteristik hervor. Dies liegt daran, dass dieser im Vergleich zu den anderen Filtern eine höhere Ordnung aufweist. Dies ist, neben der Beschriftung, auch an seiner steileren Flanke zu erkennen. Es gilt hier folgender Grundsatz: Je höher die Ordnung des Filters ist, desto steiler sind die Flanken. In manchen Fällen kommt es vor, dass die Frequenz, die gesucht wird, sehr nahe an einer liegt, die in der Auswertung nicht enthalten sein soll. Damit jedoch die Frequenz, die gesucht wird, durch den Filter nicht beeinträchtigt wird, die störende aber unterdrückt wird, muss die Steilheit der Flanke des Filters angepasst werden. Dies kann durch die Wahl einer höheren Ordnung realisiert werden. Jedoch sind Filter höherer Ordnungen deutlich aufwendiger und auch teurer. Daher sollte die Ordnung nur so hoch wie notwendig gewählt werden.

Die Unterdrückung von Frequenzen ist aber nicht die einzige Auswirkung des Filters auf das Messsignal. So kommt es durch den Einsatz von Filtern zu einer Phasenverschiebung. Jedoch gibt es auch Filter ohne Verschiebung. Bei passiven Hochpass-Filtern entsteht durch das Filtern zwischen der Eingangsspannung und der Ausgangsspannung eine Verschiebung von  $180^\circ$ . Sofern alle Signale mit demselben Filter gefiltert werden, kann diese Verschiebung vernachlässigt werden, da sie um denselben Winkel verschoben ist. Werden Signale ohne Filter aufgezeichnet und wird die Information des Phasenwinkels nicht benötigt, kann dies ebenfalls vernachlässigt werden. Ausschlaggebend wird dieser jedoch dann, wenn phasenbezogene Frequenzanalysen durchgeführt werden sollen. In diesem Fall ist die Phasenlage zu korrigieren. Falls dies nicht möglich ist, ist dies entsprechend zu vermerken, damit diese Information erhalten bleibt.

### **8.2.9 Erdung**

Einstreuungen von elektrischen Signalen können große Probleme verursachen. Dabei ist die Herkunft dieser Einstreuung oftmals nicht leicht zu identifizieren. Daher lohnt es sich, vor der Suche die Möglichkeiten auszuloten, die das Messgerät bietet. Als Erstes sollte die Energieversorgung betrachtet werden. Hier gilt es zu eruieren, ob über die Energieversorgung das Messgerät geerdet wird. Ein erster Hinweis darauf erfolgt vom Anschlusskabel. Ist dieses als Kaltgeräte-kabel ausgeführt, liegt die Vermutung nahe, dass das Gerät über die Energieversorgung geerdet werden kann. Nur das Vorhandensein eines PE-Leiters ist noch keine Garantie, dass das Messgerät auch damit verbunden ist. Ist am Anschlusskabel ein Stecker des



Typ C, also ein Flachstecker, montiert, kann davon ausgegangen werden, dass das Messgerät nicht geerdet ist.

Es gibt auch Messgeräte, die über PoE, also ‚Power over Ethernet‘, betrieben werden. Diese Art der Energieversorgung hat den Vorteil, dass der Standort des Messgerätes über keine Steckdose verfügen muss. Dies ist besonders dann praktisch, wenn mehrere Module verstreut aufgebaut werden müssen. Dadurch muss nur das Netzkabel verlegt werden. Es ist jedoch sicherzustellen, dass der verwendete Switch auch die Funktion PoE zur Verfügung stellt. Die maximal abgenommene Leistung darf dabei ebenfalls nicht überschritten werden. Welche Leistungen bei dieser Art der Energieversorgung übertragen werden können, ist in IEEE 802.3 festgelegt.



Abbildung 25: Rückseite des Messgerätes, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Neben den beiden bereits genannten Varianten gibt es eine weitere Möglichkeit, das Messgerät zu erden. Diese ist in Abbildung 25 auf der rechten Seite dargestellt. Es handelt sich hierbei um eine Erdungsbuchse. Hier kann das Messgerät über Strippen sicher geerdet werden. Der Erdungspunkt ist sorgfältig zu wählen. Erdungsschienen sind dafür gut geeignet. Sollte die Erdung über den PE-Leiter einer Spannungsversorgung durchgeführt werden, ist zum einen zu überprüfen, ob der PE-Leiter tatsächlich dem Erdpotenzial entspricht. Wenn zum Beispiel ein Verlängerungskabel nur für die Erdung des Messgerätes verwendet wird, kann es vorkommen, dass es zu Unterbrechungen aufgrund des Absteckens kommt, falls die Anzahl an Steckdosen nicht ausreichend ist. Des Weiteren kann es bei dieser Methode vorkommen, dass andere Geräte auf den PE-Leiter Störsignale einkoppeln. Ist dies der Fall, würde durch das Erden die Signalqualität verschlechtert.

Zusätzlich muss der Aufbau des Messgerätes selbst betrachtet werden. Beim verwendeten Messgerät ist die Besonderheit, dass die Energieversorgung sowie die PoE-Schnittstellen galvanisch von den Messkanälen getrennt sind. Somit bleibt, sofern das Messgerät geerdet werden soll, nur die Erdungsbuchse übrig.

Außerdem kann im Messgerät eingestellt werden, ob den einzelnen Kanälen zueinander auf dasselbe Potenzial gelegt werden sollen oder ob sie getrennt davon sein sollen. Auch das ist wieder eine Frage des Messaufbaus. In der Standardeinstellung sind alle Masseanschlüsse der

Kanäle am selben Potenzial. Wenn alle Messstellen isoliert aufgebaut sind, sollte dies die zu bevorzugende Einstellung sein. Ob in dieser Variante eine externe Erdung benötigt wird, liegt im Verantwortungsbereich des Messtechnikers. Sollten Einstreuungen im Messsignal erkennbar sein, sollte es geerdet werden. Sollte jedoch bekannt sein, dass zwei Messstellen auf unterschiedlichen Potenzialen aufgebaut sind, sollte der betroffene Kanal auf ‚floating‘ eingestellt werden, also vom gemeinsamen Bezugspunkt getrennt werden. Ein solcher Potenzialunterschied kann zur Übersteuerung des Messkanals führen und ihn im schlimmsten Fall beschädigen oder zerstören. Die Ursachen für diese Potenzialunterschiede können sehr vielfältig sein und sind stark von den Umgebungsbedingungen abhängig. Anlagen mit hohen elektrischen Feldern und großen Energieströmen sind davon besonders betroffen.

### 8.2.10 Eingangsspannung

Viele Messgeräte unterstützen das Verändern der maximalen Eingangsspannung. Dabei sollte der Eingangsbereich des Kanals immer nur so groß wie notwendig gewählt werden. Es sollte ein Übersteuern des Eingangskanals verhindert werden. Die einfachste Variante wäre, den Eingangsbereich auf den maximalen Bereich zu stellen. In den meisten Fällen kann auch mit einem brauchbaren Messsignal gerechnet werden. Der Grund, warum trotzdem der Eingangsbereich so klein wie möglich gewählt werden soll, ist, dass bei einem kleineren Eingangsbereich die Höhe der Amplitude genauer gemessen werden kann. Dies liegt am Analog-Digital-Umsetzer. Diese Umsetzer haben nur eine begrenzte Anzahl an Stufen, in die der gesamte Messbereich unterteilt werden kann. Wird der Eingangsbereich verkleinert, so ist für den kleinen Bereich dieselbe Anzahl an Stufen verfügbar, die ansonsten für den gesamten Bereich zur Verfügung gestanden hätte. Dies ist eine einfache und effektive Möglichkeit, die Genauigkeit des Messgerätes zu verbessern, ohne einen Mehraufwand betreiben zu müssen.

## 8.3 Frequenzgenerator-Einstellungen

Damit der Frequenzgenerator das Signal liefert, das gewünscht ist, muss dieser entsprechend parametrisiert werden. Dazu empfiehlt es sich, zuerst die Standardeinstellung auszulesen. Diese kann schon Hinweise darauf geben, wie die Parameter verändert werden können. Ausgelesen werden können diese mit dem Befehl `response = requests.get(host + "/rest/rec/generator/output/default")`. Sie müssen dann wieder als JSON-File in eine Variable gelegt werden. Wie das Ablegen realisiert werden kann und wozu die `get`-Funktion benötigt wird, wurde bereits in Kapitel 7.2 erläutert. Diese Standardeinstellungen zeigen jedoch nur einen Teil davon, wozu das Gerät in der Lage ist. Je nach verwendeter Signalform sind unterschiedliche Einstellungen notwendig. Diese sind im Benutzerhandbuch des Messgerätes erklärt. Das verwendete Messgerät verfügt über zwei Ausgänge. Diese können aber mit der gleichen

Herangehensweise parametrieren. Zusätzlich hat jeder dieser Ausgänge zwei mögliche Inputkanäle, die am Ende entweder summiert oder multipliziert werden können. Es besteht auch die Möglichkeit, ein Input-Signal zu streamen; dies wird in dieser Arbeit aber nicht benötigt und somit nicht weiter behandelt. Obwohl zwei Eingangskanäle vorhanden sind, die das Ausgangssignal erzeugen, kann auch nur einer der beiden Kanäle verwendet werden und der andere Kanal kann inaktiv gestellt werden. Nachfolgend werden die Parameter, die für das erstellte Programm notwendig sind, betrachtet.

### 8.3.1 Gain

Als Erstes betrachtet wird der Gain, also die Verstärkung. Wie eingangs schon erwähnt wurde, sind hier zwei Eingangsparameter für einen Ausgang vorhanden. Aus diesem Grund kann der Gain an drei verschiedenen Stellen adjustiert werden. Wie in Abbildung 26 in der ersten Zeile dargestellt ist, kann hier die erste Grundeinstellung des Gains vorgenommen werden. Eingegeben werden können Werte zwischen 0 und 1, wobei 0 der Deaktivierung des Ausgangs gleichkommt. Bei der Zahl 1 wird die Amplitude in maximaler Größe ausgegeben. Am Ausgang kann maximal eine Spannung von 10 Volt Spitze ausgegeben werden. Dieser Wert wird mit dem ersten Gain von Zeile 1 multipliziert.

```
generator_setup["outputs"][0]["gain"] = 0.5
generator_setup["outputs"][0]["inputs"][0]["gain"] = 0.2
```

Abbildung 26: Verstärkung Ausgangskanäle, Quelle: eigene Darstellung (2022).

In diesem Fall beträgt die maximale Amplitude beim Gain in Zeile 2 5 Volt Spitze. Dasselbe gilt für den zweiten Input des ersten Ausgangs. Dieser ist jedoch in Abbildung 26 nicht dargestellt, da er im weiteren Programm nicht benötigt wird. Dadurch, dass bei der ersten Stufe das Ausgangssignal auf 5 Volt Spitze beschränkt wurde, ist diese die Basis für den zweiten Gain, der mit 0,2 das Ausgangssignal auf 1 Volt Spitze senkt. Dies entspricht einem RMS, einem ‚Root Mean Square‘-Wert von rund 0,707 Volt, falls als Signalform ein Sinus-Signal gewählt wurde. Da hier aber auch andere Signalformen erzeugt werden können, sind die Angaben des Spitzenwertes aussagekräftiger, vor allem, wenn dieses Signal bei anderen Geräten als Input dient. Da der Spitzenwert nie größer sein kann als der RMS-Wert, dient diese Herangehensweise auch dem Schutz der Geräte, da diese vor Überspannung geschützt werden können. Unterspannung ist in diesem Fall so gut wie irrelevant, da diese Ausgänge ohnehin nur wenig Energie bereitstellen können. Im konkreten Fall sind es maximal 40 mA Spitze.

### 8.3.2 Signaltyp

Wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt wurde, stehen mehrere Signalformen zur Auswahl. Diese Signalformen können im Gerät selbst erzeugt werden. Sollten diese nicht ausreichen, besteht die Möglichkeit, Signalformen von externen Quellen zu streamen.

Signalformen	
1	DC
2	Sinus
3	Linear sweep
4	Logarithmic sweep
5	Random
6	P_random

Tabelle 5: Signalformen, Quelle: eigene Darstellung (2022).

Es besteht die Möglichkeit, ein DC-Signal zu erzeugen. Dies wird aber eher selten benötigt, da dies auch über den Offset erzeugt werden kann. Als reine Signalform ist die Bedeutung eher als gering einzustufen.

Deutlich häufiger wird die Signalform des Sinus-Signals benötigt. Dies kann zum Beispiel dazu verwendet werden, einen Sensor an einer bestimmten Frequenz zu überprüfen. Oft ist es der Fall, dass Sensoren bei einer bestimmten Frequenz beschädigt sind. Um dies genau erfassen zu können, kann ein solches Sinus-Signal verwendet werden.

Um beim Beispiel des Sensors zu bleiben, kann es auch vorkommen, dass die Beschädigung nur auf einen Frequenzbereich abgeschätzt werden kann. In diesem Fall kann der lineare Sweep verwendet werden. Bei diesem müssen eine Startfrequenz sowie die Frequenz, an der gestoppt werden soll, eingegeben werden. Als dritter Parameter wird die Steigung benötigt. Diese gibt an, um wieviel Hertz pro Sekunde das Signal erhöht wird. Dadurch kann eine solche Beschädigung leichter identifiziert werden. Der Vorgang hat aber noch immer den Nachteil, dass sich die Frequenz kontinuierlich verändert. Dies kann besonders bei Eigenfrequenzen negativ sein, da diese etwas Zeit benötigen, bis sie sich aufgeschwungen haben. Bei einer zu schnellen Erhöhung können diese dadurch übersehen werden.

Um dies zu vermeiden, kann der sogenannten ‚step sine‘ verwendet werden. Bei dieser Art werden nacheinander verschiedene Frequenzen mit der Signalform des Sinus angefahren. Diese Frequenz wird für eine bestimmte Zeit gehalten, sodass sich die Eigenfrequenzen aufschaukeln können. Je nachdem, wie stark diese ausgeprägt sind, kann dies schneller oder langsamer erfolgen. Diese Signalform ist aber standardmäßig nicht enthalten. Sie kann jedoch nachgebaut werden, indem die Frequenz des Sinus-Signals nach jedem Stopp erhöht wird und im Anschluss wieder gestartet wird. Dies ist aber im Vergleich zu einem Sweep mit erheblichem Zeitaufwand

verbunden. Jedoch gibt es Fälle, wo nur durch diese Methode die gesuchten Eigenfrequenzen gefunden werden. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn zwei Eigenfrequenzen nebeneinander liegen und eine deutlich stärker ausgeprägt ist, aber die kleinere, die im Signal verdeckt wird, im Betrieb der Anlage angeregt wird. Dadurch ist die Amplitude diese Frequenz deutlich höher als erwartet und bedarf einer Erläuterung.

Eine weitere Variante des Sweeps ist, ihn nicht linear steigen zu lassen, sondern ihn logarithmisch zu erhöhen. Dies hat insofern Vorteile, da niedrige Eigenfrequenzen aufgrund ihrer längeren Periode länger benötigen, um sich aufzuschaukeln, höhere hingegen schneller sind. Oftmals ist es auch der Fall, dass der untere Frequenzbereich mehr interessante Frequenzen enthält und der obere Frequenzbereich nur als Information dient.

Eine weitere Signalvariante ist Random, also zufällige auftretende Frequenzen. Auch die Höhe der Amplitude ist dabei zufällig. Da es jedoch nicht sinnvoll ist, Frequenzen zu erzeugen, die nicht gemessen werden können, kann eine gewisse Bandbreite vorgegeben werden. Auch zu beachten ist, dass die höchstmögliche enthaltene Frequenz vom Messgerät selbst beschränkt ist, da dieses nur über einen endlichen Bereich an Bandbreite verfügt.

Die letzte Variante des Ausgangssignals ist ein pseudozufälliges Signal. Dabei enthält ein Segment ein zufälliges Signal. Dieses wird jedoch periodisch wiederholt. Für das Überprüfen von Sensoren ist dieses Signal gut geeignet. Es muss nur sichergestellt werden, dass die Frequenzen, die für das Kalibrieren benötigt werden, darin enthalten sind. Ein weiterer Vorteil bei dieser Signalart ist, dass für ein aussagekräftiges Messergebnis weniger Mittelungen benötigt werden als bei einem wirklich zufälligen Signal.

### **8.3.3 Filter**

Um weitere Signalformen erzeugen zu können, werden Filter benötigt. Im konkreten Fall stehen hierzu ein Hochpass-Filter sowie ein pinker Filter zur Verfügung. Diese können aber nur bei der Signalform Random angewandt werden. Bei Pseudo Random steht nur der pinke Filter zur Verfügung. Wie der Name ‚pinker Filter‘ schon vermuten lässt, kann mit diesem ein rosa Rauschen erzeugt werden. Für die Kalibrierung von Schwingungssensoren hat das rosa Rauschen jedoch keine Bedeutung. Es wird eher bei der Überprüfung von Lautsprechern und Mikrofonen verwendet.

Der Hochpass beim Random-Rauschen kann dafür verwendet werden, um eventuell störende niedrige Frequenzen aus dem Signal zu filtern. Ebenso kann er dazu verwendet werden, um sicherzustellen, dass in diesem Signal kein DC-Anteil enthalten sein kann. Für diese Arbeit haben diese Filter aber keine Relevanz und werden daher auch nicht angewendet. In der Standardeinstellung sind sie deaktiviert, da sie nur für spezielle Anwendungen, vor allem aber in der Akustik benötigt werden.

### 8.3.4 Frequenzeinstellung

Die Frequenzeinstellung ist je nach eingestellter Signalform unterschiedlich anzugeben. So muss für den Sinus die Frequenz eingegeben werden. Der Bereich der einstellbaren Frequenz erstreckt sich dabei von 1 mHz bis zu 51,2 kHz. Zusätzlich zur Frequenz kann die Phasenlage beim Start eingegeben werden. Diese kann zwischen 0 und 359,9999 Grad gewählt werden. Sofern kein Wert vorgegeben wird, wird mit der Phasenlage 0 gestartet.

Beim linearen Sweep hingegen werden mehr Parameter benötigt. Als Erstes muss die Frequenz eingegeben werden, bei der gestartet werden soll. Als Nächstes wird die Frequenz benötigt, bei der gestoppt werden soll.

Wie beim Sinus-Signal kann auch bei dieser Einstellung die Phasenlage beim Start im selben Bereich angegeben werden.

Eine entscheidende Einstellung ist die Geschwindigkeit, mit der die Frequenz erhöht werden kann. Die Eingabe erfolgt in Hertz pro Sekunde. Diese Einstellung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Zeit, wie lange ein Durchlauf dauert. So kann, wenn hier nur mit wenigen Hertz pro Minute erhöht wird und der Frequenzbereich sehr weit gewählt wurde, dies durchaus viel Zeit in Anspruch nehmen. Jedoch sollte, wenn Eigenfrequenzen gesucht werden, bedacht werden, dass diese etwas Zeit benötigen, bis sie sich aufgeschwungen haben. Daher ist es oftmals sinnvoller, den Frequenzbereich einzuschränken als eine zu hohe Steigung der Rampe zu vermeiden.

Nun stellt sich die Frage, was passiert, wenn die Stoppfrequenz erreicht wurde. Hier gibt es ebenfalls zwei Varianten. Die eine ist, dass bei der Startfrequenz wieder gestartet wird. Dies ist auch die Standardeinstellung. Die zweite Möglichkeit ist, dass nach Erreichen der Stoppfrequenz die Richtung umgedreht wird und von der Stoppfrequenz mit derselben Geschwindigkeit wieder Richtung Startfrequenz gefahren wird. Ein komplettes Stoppen ist hier nicht vorgesehen.

Die Angaben für den logarithmischen Sweep unterscheiden sich nur in der Geschwindigkeit. Im Gegensatz zum linearen Sweep wird hier die Geschwindigkeit in Dekaden pro Sekunde eingegeben. Die übrigen Einstellungen sind analog zum linearen Sweep.

Für das Rauschen muss zum einen die Bandbreite angegeben werden. Auch hier beträgt die maximale Bandbreite 51,2 kHz. Die Bandbreite sollte aber auf den benötigten Frequenzbereich reduziert werden. Zusätzlich kann eine Mittelfrequenz spezifiziert werden. In der Standardeinstellung ist diese mit dem Wert 0 angegeben. Wird diese Einstellung jedoch nicht angepasst, so steht nur die halbe Bandbreite zur Verfügung,

Für das Pseudo-Rauschen gelten dieselben Einstellmöglichkeiten wie für das Rauschen.

An dieser Stelle ist nochmals zu erwähnen, dass das JSON-File, das an das Gerät gesendet wird, an die Signalart angepasst werden muss. Es dürfen in der Datei nur Einstellungen gesetzt

werden, die bei dieser Signalart benötigt werden. Sonst kann es vorkommen, dass die Einstellung verworfen wird und mit der Standardeinstellung gearbeitet wird.

## 8.4 Startbefehle

Um dem Messgerät mitteilen zu können, wann etwas gestartet werden soll, werden verschiedene Befehle benötigt. Je nachdem, was gestartet werden soll, müssen gewisse Voreinstellungen getroffen werden. Damit im Messgerät überhaupt Einstellungen verändert werden können, muss dazu der Recorder geöffnet werden. Dies kann über den ‚put‘-Befehl realisiert werden. Wird dieser Schritt vergessen, wird bei jedem Versuch, Einstellungen im Messgerät vorzunehmen, mit einer Fehlermeldung geantwortet. Danach können alle Einstellungen, wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erläutert wurde, vorgenommen werden.

Einer der ersten Schritte beim Kalibrieren, nachdem die Parametrierung erfolgt ist, ist das Starten des Frequenzgenerators. Grundsätzlich wird dieser auch über den ‚put‘-Befehl gestartet, jedoch ist im Gegensatz zum Öffnen des Recorders zusätzlich die Übermittlung einer JSON-Datei notwendig. In dieser Datei sind die Daten enthalten, die dem Messgerät mitteilen, welche Ausgänge aktiviert werden sollen. Da in dieser Arbeit nur ein Ausgangskanal benötigt wird, wird nur Ausgangskanal 1 aktiviert.

Nachdem der Generator gestartet ist, kann mit der Aufzeichnung der Messung begonnen werden. Diese kann, im Vergleich zum Generatorstart, über einen ‚post‘-Befehl realisiert werden. Dazu wird das Stichwort ‚measurements‘ benötigt.

Um die Messung zu stoppen wird, analog zum Start, keine JSON-Datei benötigt, sondern nur der ‚put‘-Befehl. Der Pfad ist fast identisch, es muss nur die Silbe ‚stop‘ am Ende hinzugefügt werden.

Nachdem der Messvorgang abgeschlossen ist, kann auch der Ausgang deaktiviert werden. Im Gegensatz zum Aktivieren wird dazu nur ein einfacher ‚put‘-Befehl, ohne JSON-Datei, mit dem Zusatz ‚stop‘ benötigt. An dieser Stelle kann festgestellt werden, dass Befehle, die das Potenzial haben, das Messgerät selbst oder angeschlossene Geräte zu beschädigen, mit deutlich mehr Aufwand zu realisieren sind. Beim Start der Messung kann im Vergleich zum Start des Frequenzgenerators wenig Schaden am Messgerät oder an der Peripherie angerichtet werden. Hingegen ist das Deaktivieren so einfach wie möglich, da auch durch ein versehentliches Abschalten kein Schaden am Frequenzgenerator selbst hervorgerufen werden kann.

Damit der Vorgang sauber abgeschlossen werden kann, muss dem Messgerät mitgeteilt werden, dass alle erforderlichen Messungen beendet sind. Dies hat zwar auf die aufgezeichneten Daten keinen direkten Einfluss mehr, dient aber als sauberer Abschluss der Messung.

Ebenso sollte, nachdem die Messung abgeschlossen ist und keine weiteren Einstellungen vorgenommen werden, der Recorder geschlossen werden. Dies hat ebenso wie das Schließen der Messung auf die Messdaten keinen Einfluss mehr, stellt aber das Gerät selbst wieder in den Status ‚verfügbar‘ zurück, wodurch entweder derselbe PC oder auch ein anderer PC wieder auf das Gerät zugreifen kann.

Wird dies nicht gemacht, muss das Gerät manuell wieder zurückgesetzt werden. Dies kann jedoch nur durch eine Unterbrechung der Stromzufuhr erfolgen, was sowohl den Workflow als auch die Lebenserwartung des Gerätes negativ beeinflusst.



## 9 PRÜFPROTOKOLL

Die Kalibrierung eines Sensors ist erst nach der Erstellung eines entsprechenden Zertifikats vollständig. Wie dieses Protokoll genannt wird, ist nicht ausschlaggebend, nur dessen Inhalt. Da dieses Protokoll auch der Kunde oder dessen beauftragter Konsultant begutachten kann, sollte es gewissenhaft erstellt werden. Dabei sind die normativen Anforderungen zu erfüllen. Zentral ist auch, dass das erstellte Protokoll sowohl in Papierform als auch digital vorgelegt werden kann. Dabei ist die Vorlage in Papierform unkompliziert, jedoch können in digitaler Form Probleme auftreten. Eines ist das Dateiformat. Daher sollte ein Format gewählt werden, das von vielen Endgeräten unterstützt wird. Im besten Fall ist die dazu benötigte Software als Standardsoftware am Gerät verfügbar. Eines dieser Formate ist PDF, das portable Dokumentenformat. Dieses hat den Vorteil, dass es nicht leicht verändert werden kann und von fast jedem Endgerät geöffnet werden kann. Dieses Format ist auch für die Langzeitarchivierung geeignet. Da Kalibrierungen nur für einen bestimmten Zeitraum gültig sind, ist dies zwar kein Ausschlusskriterium, jedoch ist es trotzdem ein Vorteil, wenn das Dokument auch noch nach vielen Jahren problemlos geöffnet werden kann.

Die Erstellung des Protokolls wird ebenfalls automatisiert durchgeführt. Wie in Kapitel 7.1.6 erwähnt wurde, ist dazu ein eigener Button vorgesehen. Wenn der Button betätigt wird, startet die Erstellung des Protokolls. Da dies in Kapitel 7 noch nicht erwähnt wurde, wird dies an dieser Stelle nachgeholt.

Als Erstes wurde das Modul `reportlab` installiert. Dies ist ein Modul, das für die Erstellung von PDF-Dateien entwickelt wurde. Aus diesem Modul wird das Untermodul `Canvas` benötigt. Sofern keine weiteren Angaben über die Größe des Blattes gemacht werden, wird als Standard das Format A4 gewählt.

Zuerst müssen die notwendigen Variablen abgerufen werden. Diese sind zum Beispiel die Seriennummer des Prüflings. Dies kann, wie schon in Kapitel 7 erläutert wurde, durch den `get`-Befehl realisiert werden. Nachdem alle Variablen aktualisiert wurden, müssen sie in der PDF-Datei platziert werden. Im Gegensatz zur Bedienoberfläche wird hier jedoch nicht mit Spalten und Zeilen gearbeitet, sondern die Positionierung erfolgt aufgrund eines Koordinatensystems. Dabei ist zu beachten, dass sich die x-Werte von links nach rechts erhöhen, die y-Werte von unten nach oben. Dies klingt im ersten Moment zwar logisch, ist bei der Umsetzung jedoch gewöhnungsbedürftig, da im Regelfall am linken oberen Rand begonnen wird, ein Dokument zu füllen. Der dazugehörige Befehl lautet: `,c.drawString(50,630,"Serial No:")`. Damit wird ein String an der angegebenen Stelle platziert. Der in Hochkommas stehende Text wird auch als Text wie angezeigt geschrieben. Anstelle eines Textes kann hier auch eine Variable eingetragen werden, deren Wert an dieser Stelle angegeben wird. Das Dokument ist so aufgebaut, dass zuerst die Beschriftung erstellt wird und in einer eigenen Zeile dann die dazugehörige Variable.

In einem Dokument ist es manchmal auch erforderlich, die Schriftgröße oder -art zu ändern. Dazu stehen in reportlab einige Schriftarten zur Auswahl. Die Größe kann durch Eingabe einer Zahl geändert werden. Der Befehl `,c.setFont('Times-Roman', 32)'` ändert die Schriftart beispielsweise auf Times-Roman und stellt die Größe auf 32 ein. Diese Angaben ähneln auch anderen Textverarbeitungsprogrammen wie Word von Microsoft. Diese Größe und Schriftart werden so lange beibehalten, bis sie durch diesen Befehl wieder geändert werden. Es besteht auch die Möglichkeit, den Text fett zu schreiben.

Auf Prüfberichten wird im Regelfall das Logo der Firma angezeigt. Diese Logos sind häufig als Bilder abgespeichert. Es kann auch sein, dass eine Grafik, zum Beispiel eine FFT, im Protokoll eingefügt werden soll. Dazu muss zuerst das Bild in eine Variable, wie `,bild='spectrum.png'`, importiert werden. Danach kann es in der PDF-Datei mit dem Befehl `,c.drawImage(bild, 50,345, width=360, height=255)'` platziert werden. Dabei wird als Erstes der Name der Variablen geschrieben, in der das Bild abgelegt ist, danach die Position in der PDF-Datei. Dabei wird wieder der Punkt links unten für die Platzierung verwendet. Sollte sich die Größe des Bildes ändern können, ist ratsam, dem Bild die Größe im Dokument vorzugeben, damit nicht andere Teile der PDF-Datei überdeckt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Proportionen dem Original entsprechen, da diese sonst verzerrt aussehen können. Dies wäre optisch nicht anschaulich und kann bei einem Graphen zu Fehleinschätzungen führen.

In einem Protokoll ist die Angabe des Datums, an dem die Kalibrierung erfolgt ist, notwendig. Die Datumseingabe kann per Hand vorgenommen werden. Dazu wäre jedoch ein weiteres Eingabefenster in der Bedienoberfläche Abbildung 17 notwendig. Um auch der Manipulation vorbeugen zu können, wird in diesem Programm das Datum automatisiert im Protokoll eingefügt. Dazu wird das Modul `datetime` aufgerufen und der Tag, der Monat und das Jahr werden in eine Variable geschrieben. Danach kann das Datum noch formatiert werden, sodass es der im jeweiligen Land üblicherweise verwendeten Schreibweise entspricht. Anschließend kann das Datum wie eine Variable im Protokoll platziert werden.

Eine weitere signifikante Information ist, wann spätestens die nächste Kalibrierung durchzuführen ist. Das Kalibrierintervall ist von mehreren Faktoren abhängig. Ein sehr individueller Faktor ist dabei die Häufigkeit und die Intensität des Einsatzes eines Sensors. Wird ein Sensor sehr häufig verwendet oder ist dieser besonderen Belastungen ausgesetzt, ist das Kalibrierintervall kürzer zu wählen. Wird der Sensor nicht oft oder schonend eingesetzt, kann das Intervall länger gewählt werden. Es muss jedoch an die Beanspruchung angepasst sein. Im Unternehmen ist das Kalibrierintervall für Schwingungssensoren auf zwei Jahre fixiert. Daher wird dieser Wert auch ins Protokoll übernommen.

Um das Datum des neuen Kalibriertermins anzeigen zu können, muss dieses erst berechnet werden. Dabei kann die Jahreszahl allein nicht leicht verändert werden. Einfacher ist es, die Tage

bis zum nächsten Termin dazu zu addieren. Dies hat jedoch den Nachteil, dass ein etwaiges Schaltjahr nicht mitberücksichtigt werden kann. Da es jedoch auch eine Toleranz bei der Kalibrierung der Sensoren gibt, kann dieser Nachteil vernachlässigt werden.

Nachdem das Protokoll erstellt wurde, muss es gespeichert werden. Da es wenig Sinn ergibt, alle Protokolle unter demselben Namen abzuspeichern, sollte ein aussagekräftiger Name gewählt werden. Was unter ‚aussagekräftig‘ fällt ist vom Betrachter abhängig. In dieser Anwendung wird als Name der Typ des Sensors sowie dessen Seriennummer angegeben. Damit sofort ersichtlich ist, wann dieser das letzte Mal kalibriert wurde, fließen auch die letzten beiden Ziffern des Datums in den Namen mit ein. Die Namensvergabe erfolgt in derselben Zeile, in der der Canvas erstellt wurde. Am Ende muss das Ganze gespeichert werden. In manchen Fällen ist es erwünscht, dass die PDF-Datei nach der Erstellung geöffnet wird. In dieser Anwendung wurde darauf verzichtet, dass die PDF-Datei nach Erstellung geöffnet wird. Dies liegt daran, dass die Protokolle beim Überspielen in die Messgerätedatenbank geöffnet werden müssen und hier nochmals das Protokoll kontrolliert werden kann.

## 10 GEGENÜBERSTELLUNG VON BISHERIGEM UND NEUEM SYSTEM

Nachdem das neue Programm fertiggestellt wurde und einsatzbereit ist, können die beiden Systeme verglichen werden. Die Verbesserungen müssen nun dahingehend überprüft werden, ob sie den Vorstellungen entsprechen.

Eines der Ziele dieser Arbeit war es, bei der Umsetzung möglichst auf lizenzierte Softwares zu verzichten. Das Programm wurde in Visual Studio Code geschrieben; als Sprache wurde Python verwendet. Es musste auch auf keine kostenpflichtigen Toolboxen zurückgegriffen werden. Die Schnittstelle zu den Messgeräten ist frei verfügbar beziehungsweise die Lizenz dazu ist im Messgerät selbst hinterlegt und wurde im Kaufpreis mitinkkludiert, sodass keine laufenden Kosten entstehen. Auch bei der Erstellung des Prüfprotokolls ist es gelungen, auf Word oder Excel zu verzichten. Das Protokoll wird als PDF-Datei abgelegt, wodurch es mit fast jedem Endgerät geöffnet werden kann, ohne dass eine eigene Software dafür installiert oder angeschafft werden muss. Mit der PDF-Datei ist auch die Langzeitarchivierung möglich, sollte die Anforderung auftreten, die Protokolle nach ihrem Ablauf weiter zu bevorraten. Einzig das Betriebssystem des PC ist auf Windows beschränkt. Es wäre zwar auch hier grundsätzlich möglich, auf Windows zu verzichten, jedoch ist im Unternehmen nur Windows als Betriebssystem für PCs zugelassen. Daher ist dies in diesem Sinne zwar keine Einschränkung, es wäre aber ein Punkt, der unter gegebenen Anlässen noch umgesetzt werden könnte.

Ein bedeutender Punkt ist die automatisierte Erstellung und Ablage der Kalibrierprotokolle. Um diese zu erstellen, mussten beim alten System die Messdaten nach Excel exportiert werden, der Graph musste gezeichnet werden und die Daten zum Prüfling mussten manuell vervollständigt werden. Das Ganze musste dann als PDF-Datei abgelegt werden. Die zweite Möglichkeit bestand darin, das Messergebnis als Bild zu exportieren und in Word einzufügen. Bei dieser Variante mussten alle Sensordaten manuell in Word eingetragen werden. Mit der neuen Software ist dies mit einem Klick erledigt. Zu erwähnen ist hierbei, dass es durch das automatisierte Ausfüllen der Daten zu keinen Tippfehlern oder zu einem Vergessen der Änderungen kommen kann. Dies ist zum einen eine Steigerung des Komforts für den Bediener, erhöht aber auch die Qualität, da es dadurch nicht zu falschen Einträgen kommt.

Der aus betriebswirtschaftlicher Sicht wesentlichste Punkt ist jedoch der Zeitbedarf. Verglichen werden kann an dieser Stelle nur die Einstellung mit dem Rauschen, da die zweite Variante, wie sie im Programm implementiert wurde, vorher nicht möglich war. Die Zeit, die für das Messen benötigt wird, ist in beiden Fällen ähnlich. Dies liegt aber daran, dass für eine entsprechende Frequenzauflösung bei jedem System die gleiche Mindestaufnahmezeit benötigt wird. Wird die gleiche Anzahl an Mittelungen verwendet, resultiert der gleiche Zeitaufwand. Wo jedoch Zeit eingespart wird, ist bei der Erstellung und bei der Ablage des Prüfprotokolls. Je nachdem, wie schnell der Bediener mit der Maus und den Augen am Bildschirm arbeitet, liegt hier das

Einsparungspotenzial zwischen zwei und fünf Minuten pro erstelltem Protokoll. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass für Excel auch Vordrucke verwendet wurden sowie bei einem neuen Sensor das ganze Tabellenblatt kopiert wurde und nur die sich ändernden Daten angepasst wurden.

Da bei der Montage der Sensoren am Kalibriertisch keine Änderungen vorgenommen wurden, ist auch dieser Zeitaufwand zwischen den Systemen identisch.

Der letzte Punkt betrifft die Rüstzeit. Bei beiden Systemen muss ein PC verwendet werden. Beim alten System mussten zwei Programme für das Messgerät geöffnet und eingerichtet werden. Zusätzlich waren der Explorer und der Vordruck für das Erstellen des Protokolls notwendig. Bei der neuen Software muss nur diese gestartet werden. Da die neue Software nur Funktionen enthält, die für die Kalibrierung benötigt werden, startet diese auch deutlich schneller als die große Software, die für das alte System benötigt wird. Mit dem neuen Programm ist die Dauer der Rüstzeit vor allem davon abhängig, wie schnell der PC startet, sofern er sich nicht ohnehin schon im Betrieb befindet.

## 11 ZUSAMMENFASSUNG

In der heutigen Zeit, in der Sensoren so billig und leicht verfügbar sind wie noch nie, gewinnt auch das Thema der Kalibrierung zunehmend an Bedeutung. Oftmals sind keine Messwerte ein kleineres Problem als falsche. Da die Anzahl an Sensoren stark wächst, wird es für das Personal schwieriger, jedes Signal auf dessen Plausibilität zu prüfen. Daher wird eine regelmäßige und lückenlose Kalibrierhistorie immer bedeutsamer. Zum einen dient sie den Unternehmen selbst als Form der Qualitätssicherung, zum anderen wird sie von den Kunden immer mehr eingefordert beziehungsweise vorausgesetzt. Dies kann auch in Form von eingeforderten Zertifizierungen der Fall sein.

Damit die stetig steigende Anzahl von Sensoren mit dem bestehenden Personalstand abgearbeitet werden kann, wurde diese Kalibriersoftware entwickelt. Dadurch dass in diesem Programm nur die notwendigsten Funktionen eingebaut wurden, konnte die Bedienoberfläche schlicht und übersichtlich gehalten werden. So sind für die Bedienung des Programms keine langen Einschulungen notwendig. Das grundlegende technische Verständnis wird jedoch vorausgesetzt.

Einstellungen, die normalerweise vom Personal auf Basis des Sensortyps vorgenommen werden, sind in diesem Programm größtenteils vordefiniert. Als Beispiel kann an dieser Stelle die Hochpass-Filtereinstellung genannt werden. Diese wird automatisch an den angegebenen Frequenzbereich angepasst. Somit kann diese Anpassung zum einen nicht vergessen werden, zum anderen ist dies eine Arbeitersparnis.

Des Weiteren wurde die Protokollerstellung vollständig automatisiert. Alle Daten, die sich ändern, werden automatisiert bei der Erstellung aktualisiert. Diese Tätigkeit musste in der Vergangenheit teilweise manuell ausgeführt, teilweise weiterkopiert werden. Beide Arten sind jedoch fehleranfällig und mit Aufwand verbunden. Hier spart die Automatisierung nicht nur Zeit, sondern reduziert auch gleichzeitig das Fehlerpotenzial. Dadurch kann die gewonnene Zeit für höherwertige Tätigkeiten genutzt werden.

Es gäbe noch viele Funktionen, die in diesem Programm nützlich wären, jedoch wurde versucht, das Programm auf das Minimum zu beschränken, da jede zusätzliche Einstellmöglichkeit Fehlerpotenzial verursacht und die Komplexität der Anwendung steigern würde.

## 12 LITERATURVERZEICHNIS

### Gedruckte Werke (2)

Baumgartner, F. (2019): *Messunsicherheit*

Kuttner, Thomas (2015): *Praxiswissen*, Springer Vieweg, Wiesbaden

### Online-Quellen (2)

Kaitai (2021): <https://kитай.io/>

<https://kитай.io/> [Stand: 11.11.2022]

wertgarantie (2022): *wertgarantie*

<https://www.wertgarantie.de> [Stand: 1.10.2022]

### Normen (1)

*ISO/IEC 17025:2017: ISO/IEC 17025:2017*

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1: Kalibrierpyramide, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	6
Abbildung 2: Zentrifuge, stark vereinfacht, Quelle: eigene Darstellung (2022).....	7
Abbildung 3: Stoßkalibrierung mittels Kraftmesshammer, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	9
Abbildung 4: Vereinfachter Aufbau eines Shakers, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	10
Abbildung 5: Messaufbau Absolut-Verfahren, Quelle: eigene Darstellung (2022).....	11
Abbildung 6: Shaker mit Vergleichsmessaufbau, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	12
Abbildung 7: Messkette, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	13
Abbildung 8: Piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	15
Abbildung 9: Schwinggeschwindigkeitssensor, Quelle: eigene Darstellung (2022).....	16
Abbildung 10: Induktiver Abstandssensor, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	18
Abbildung 11: Zeitsignal eines zufälligen Rauschens, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	19
Abbildung 12: Zeitsignal eines Sinus-Signals, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	20
Abbildung 13: Frequenzspektrum eines Rauschens, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	20
Abbildung 14: Aussteuerungsanzeige, Quelle: eigene Darstellung (2022).....	21
Abbildung 15: Frequenzgang, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	22
Abbildung 16: Beliebteste Programmiersprachen Oktober 2022, Quelle: statistia.com, Onlinequelle [21.10.2022]. .....	32
Abbildung 17: Bedienoberfläche Schwingungssensoren Kalibration, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	38
Abbildung 18: Dateneinsicht JSON-File, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	43
Abbildung 19: JSON-File ohne Formatierung, Quelle: eigene Darstellung (2022) .....	44
Abbildung 20: JSON-File formatiert, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	44
Abbildung 21: Grafische Darstellung des Ergebnisses der dividierten FFTs, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	47
Abbildung 22: Frontpanel mit BNC-Anschlüssen, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	50
Abbildung 23: Nutzbare Bandbreite mit Abtastrate, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	54
Abbildung 24: Filter-Charakteristik, Quelle: Pulse Help (2022). .....	57
Abbildung 25: Rückseite des Messgerätes, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	59
Abbildung 26: Verstärkung Ausgangskanäle, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	61



## **TABELLENVERZEICHNIS**

Tabelle 1: Kostenaufstellung externe Kalibrierung, Quelle: eigene Darstellung (2022). .....	30
Tabelle 2: Kosten werksinterne Kalibrierung, Quelle: eigene Darstellung (2022).....	31
Tabelle 3: Unterstützte Bandbreiten, Quelle: eigene Darstellung. ....	51
Tabelle 4: Unterstützte Abtastraten, Quelle: eigene Darstellung (2022).....	53
Tabelle 5: Signalformen, Quelle: eigene Darstellung (2022). ....	62