

Neue Qualitäten in der Signalerfassungstechnik – Dyn-X und REq-X

Erweiterung des Dynamik- und Frequenzbereichs bei Schall- und Schwingungsmessungen

Dipl.-Ing. **C. Hundeck**, Radevormwald;

Kurzfassung

Brüel & Kjaer hat ein neues Eingangskonzept mit 160dB Dynamik entwickelt. Es verhindert ungültige Messungen, da Übersteuerungsprobleme entfallen und keine Einstellung des Eingangsbereichs mehr benötigt wird. Stellen Sie sich vor, dass Sie am Fuße des Mount Everest stehen, sich ein einzelnes Haar ausreißen und die Dicke des Haares mit der Höhe des Berges vergleichen. Dies gibt Ihnen eine Vorstellung, wie groß der Dynamikbereich ist, der mit der einzigartigen „Dyn-X“ Technologie erreicht wird. Zusätzlich ist mit PULSE Labshop Version 11 die REq-X Technologie entwickelt worden um den Frequenzbereich und die Einsatzmöglichkeiten von Schall- und Schwingungssensoren zu erweitern.

1. Erweiterter Dynamikbereich durch Verwendung der Dyn-X Technologie

Die heute in der Schall- und Schwingungsmessung verwendeten Sensoren haben, je nach der gewählten Technologie, einen Dynamikbereich von 110-150dB. Das Eigenrauschen U_{Noise} und die Übersteuerungsgrenze des Vorverstärkers $U_{Maximum}$ bestimmen die untere und obere Grenze des nutzbaren Arbeitsbereichs eines Sensors. Der Dynamikbereich wird durch das logarithmische Verhältnis von der maximalen Ausgangsspannung zur Rauschspannung in dB angegeben [1].

$$DR_{Sensor} = 20 \cdot \log \left(\frac{U_{Maximum}}{U_{Noise}} \right) dB \quad (1)$$

Tabelle 1 gibt einige Beispiele für unterschiedliche Mikrofon- und Beschleunigungsaufnehmertechnologien an.

Tabelle 1: Übersicht über die nutzbaren Dynamikbereiche unterschiedlicher Schall- und Schwingungssensoren

Sensortyp	Technologie	Eigenrauschen	Übersteuerungsgrenze des Vorverstärkers	Dynamikbereich
Mikrofon Type 4189 (Impedanzwandler Type 2671)	Konstantstromspeisung (Deltatron, IEPE, ICP)	15 μV	7 V	113 dB
Mikrofon Type 4189 (Impedanzwandler Type 2669)	Klassisches Prinzip über 7-pol Lemo, 200V Pol.Spg	8,2 μV	55 V	136 dB
Beschleunigungsaufnehmer Type 4394	Konstantstromspeisung (Deltatron, IEPE, ICP)	26,5 μV	7,8 V	109 dB
Beschleunigungsaufnehmer Type 4371	Ladungstyp	2,5 pC	61,2 pC	148 dB

Bisher konnte der gesamte Arbeitsbereich eines Sensors in vielen Fällen nicht ausgenutzt werden, da die nachgeschaltete Auswerteelektronik die hohe Dynamik nicht verarbeiten konnte. Dies liegt zum Teil an der Auflösung der verwendeten A/D-Wandler, in vielen Fällen aber auch an der Signalkonditionierung vor der Umsetzung in den Digitalbereich. Waren in den 70er Jahren noch A/D-Wandler mit 10-12 Bit üblich, wodurch die nutzbare Dynamik begrenzt wurde, ist heute mit modernen 24-Bit-A/D-Wandlern die nutzbare Dynamik oftmals durch den *analogen* Schaltungsbereich und die nicht optimale Abstimmung der einzelnen Verarbeitungsstufen aufeinander eingeschränkt.

Potenzieller Dynamikbereich eines 24-Bit-A/D-Wandlers

Was lässt sich mit einer 24-Bit-Quantisierung theoretisch erreichen? Der theoretische Dynamikbereich DR lässt sich folgendermaßen berechnen und in dB darstellen:

$$DR = 20 \times \log \left(2^N \times \sqrt{\frac{F_s}{2 \times F_{NBW}}} \times \sqrt{1.5} \right) \quad (2)$$

Hierbei gibt N die Anzahl der verwendeten Bits, F_s die Abtastfrequenz und F_{NBW} die effektive Analysebandbreite in Hz an [2].

Tabelle 2: Dynamikbereiche von A/D-Wandlern mit 16 und 24 Bit bei unterschiedlicher effektiver Analysebandbreite

N [Bit]	Auflösung (Quantisierungsstufen)	Dynamikbereich				
		F _{NBW} [Hz]				
		32.768	1.024	24	6	1
16	65.536	98	113	129	135	143
24	16.777.216	146	161	178	184	191

Aus Tabelle 2 ist ersichtlich, dass mit einem 24-Bit-A/D-Wandler theoretisch der gesamte Dynamikbereich eines Sensors von etwa 124 dB abgedeckt werden kann. Allerdings muss dafür das Eingangssignal optimal auf den A/D-Wandler abgestimmt werden.

Das kleinste Quantisierungsintervall ΔU des A/D-Wandlers ergibt sich durch die maximal zulässige Eingangsspannung $U_{\max \text{ A/D-Wandler}}$ des A/D-Wandlers und die Anzahl der Quantisierungsstufen 2^N [1].

$$\Delta U = \frac{U_{\max \text{ A/D-Wandler}}}{2^N} \quad (3)$$

Ein sehr kleines Quantisierungsintervall bedeutet eine gute Auflösung. Durch Abstimmung der maximal zulässigen Eingangsspannung auf die zu erwartende Ausgangsspannung des Sensors, kann das Quantisierungsintervall deutlich verkleinert werden. Daher verwenden viele Datenerfassungssysteme mehrstufig schaltbare Eingangsabschwächer, um den optimalen Eingangsbereich einzustellen, d.h. der praktisch nutzbare Dynamikbereich des A/D-Wandlers von etwa 90-100dB wird entsprechend des Eingangssignals verschoben. Wird dieser Bereich überschritten, kommt es am A/D-Wandler zur Übersteuerung und es kommt zu deutlichen Signalverzerrungen, die eine Weiterverarbeitung des Signals unmöglich machen. Ist der Eingangsbereich zu groß gewählt, verschwinden Signalanteile schnell im Quantisierungsrauschen des A/D-Wandlers. Mit der herkömmlichen Technik ist es daher nicht möglich, den gesamten Dynamikbereich hochwertiger Schall- und Schwingungssensoren zu erfassen und auszuwerten.

Entwicklung der Dyn-X Technologie

Die von Brüel & Kjør entwickelte Dyn-X Technologie umgeht diese Problematik indem eine sehr hochwertige Analogeingangsstufe mit sehr großem Dynamikbereich und eine

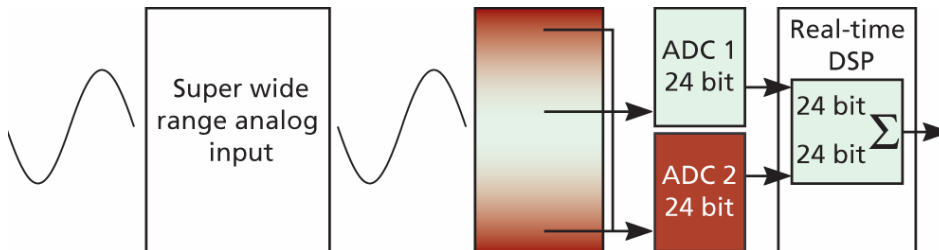


Abbildung 1: Dyn-X Signalverarbeitung mit hochwertigem Analogteil, zwei selektierten A/D-Wandlern und Echtzeit DSP-Verarbeitung

synchrone A/D-Wandlung mit zwei selektierten, hochwertigen 24-Bit-Wandlern kombiniert wird. Die digitalen Datenströme der A/D-Wandlers werden von einem digitalen Signalprozessor mit speziellen Algorithmen in Echtzeit verarbeitet. Dies führt zu einer äußerst hohen Genauigkeit durch Kompensation von Verstärkungs-, Offset- und Phasenfehlern. Eine wichtige Anforderung bei der Entwicklung dieser Technologie war, dass keinerlei Nachteile in Form von Artefakten sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich entstehen. Durch die Verwendung der zwei 24-Bit-A/D-Wandler mit unterschiedlicher Vorverstärkung entsteht ein deutlich größerer Eingangsspannungsbereich mit kleinen Quantisierungsintervallen, was einen deutlich größeren nutzbaren Dynamikbereich ergibt. Auf einen schaltbaren mehrstufigen Eingangsabschwächer kann somit verzichtet werden.

Leistungsverhalten des Systems

Wie bereits erwähnt, muss die Dynamik der gesamten Analyseketten für Breitbandanalyse (25,6kHz) besser als 124dB sein und entsprechend bei Schmalbandanalyse (6Hz) besser als 160dB, um den Spezifikationen eines hochwertigen Sensors zu entsprechen. In den folgenden Beispielen wird das Verhalten eines Dyn-X-Eingangsmoduls mit einem 24-Bit-Standardeingangsmodul verglichen. Wenn das Standardmodul auf einen sehr empfindlichen Eingangsbereich eingestellt wird, kann es theoretisch Messungen derselben Qualität, aber mit sehr hohem Übersteuerungsrisiko, liefern. Für ein Dyn-X-Eingangsmodul beträgt die maximale Eingangsspannung $7V_{\text{eff}}$ ($10V_{\text{peak}}$) und für das 24-Bit-Standardmodul $5V_{\text{eff}}$ ($7V_{\text{peak}}$).

Abbildung 2 (links) zeigt das Dyn-X-Eingangsmodul verglichen mit dem 24-Bit-Standardmodul für einen 1kHz-Sinus, mit -60dB re 7,07V entsprechend einem Signalpegel

von 7mV_{eff} . Es wurde eine FFT-Analyse bis 25,6kHz mit 6400 Linien und Hanning-Bewertung verwendet. Dies entspricht einer effektiven Rauschbandbreite von 6Hz.

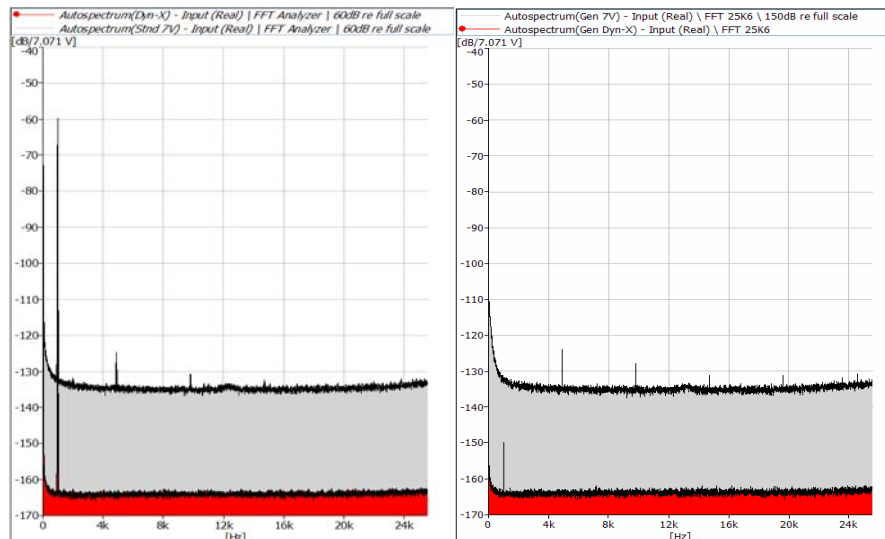


Abbildung 2: Vergleich zwischen Dyn-X-Eingangsmodul und 24-Bit-Standardeingangsmodul
Links: -60dB (7mV) 1kHz Sinuswelle Rechts: -150dB ($0,22\mu\text{V}$) 1kHz Sinuswelle

Beim Dyn-X-Eingangsmodul liegen Rausch- und Störkomponenten unter -160dB , was dem Dynamikbereich hochwertiger Sensoren entspricht. Das Eigenrauschen des 24-Bit-Standardmoduls liegt ca. 30dB höher und die Nichtlinearität des A/D-Wandlers äußert sich durch das Vorhandensein von Störkomponenten.

In Abbildung 2 (rechts) erfolgt ein ähnlicher Vergleich, doch hier ist der Sinus um 150dB abgeschwächt, was einem Signalpegel von $0,22\mu\text{V}_{\text{eff}}$ entspricht. Bei dem Dyn-X-Eingangsmodul liegen Eigenrauschen und Störkomponenten unter -160dB und der Sinus ist gut erkennbar. Bei dem 24-Bit-Standardmodul verschwindet der Sinus im Rauschen. Das Rauschen und die Nichtlinearität des A/D-Wandlers sind beim Standardmodul deutlich erkennbar.

Abbildung 3 ist ein Beispiel für eine Mikrofonmessung aus dem „wirklichen Leben“. Es handelt sich um eine Büroumgebung mit Sprache im Hintergrund und einer Person, die pfeift: Eine FFT-Analyse bis 25,6kHz mit 1600 Linien ergibt eine Frequenzauflösung von 16Hz . Das Mikrofonsignal wird über beide Kanäle parallel gemessen.

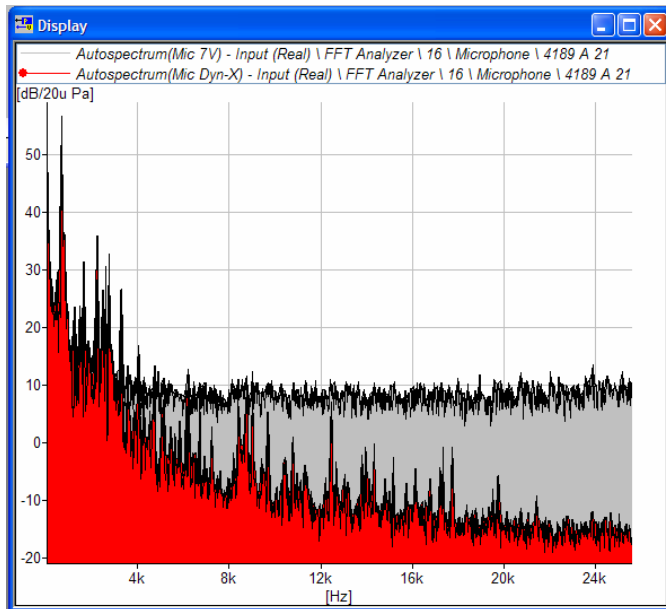


Abbildung 3: Vergleich zwischen Dyn-X-Eingangsmodule und 24-Bit-Standardeingangsmodule für eine Mikrofonmessung in einem Büro

Diese einfache Messung illustriert deutlich die bessere Dynamik des Dyn-X-Eingangsmoduls verglichen mit dem 24-Bit-Standardmodul. Der Unterschied beträgt fast 30dB. Das 24-Bit-Standardmodul misst das Systemrauschen anstelle der Umgebungsgeräusche im Büro. [3]

Heutige Messaufgaben in der Schall- und Schwingungsmesstechnik erfordern diese Technologien, da immer mehr Messungen in kürzerer Zeit mit unbekanntem Signaleigenschaften durchgeführt werden müssen. Eine Wiederholung der Fehlmessung ist aus Kostengründen nicht wünschenswert oder technisch gar nicht möglich. Der große Dynamikbereich mit nur einem Eingangsbereich erfordert einen minimalen Benutzereingriff und vermeidet eine falsche Aussteuerung des Signals. Übersteuerungen und Messungen in der Nähe des Signalrauschens können nur noch entstehen, wenn für die Messanwendung ungeeigneten Sensoren verwendet werden. Eine sichere und komfortable Technologie bei der Erfassung von Signalen hat auch wirtschaftliche Auswirkungen, z.B. bei Crashtests, Airbagtests, zerstörenden Materialprüfungen und zeitkritischen Anwendungen an Prüfständen, im Windkanal, auf Teststrecken und bei der Flugerprobung. Auch andere hochdynamische Anwendungen wie Strukturanalysen und Impulsprüfungen profitieren von der Dyn-X Technologie.

2. Frequenzgangentzerrung mit REq-X

Mit der Einführung der Dyn-X Technologie und der damit verbundenen Erweiterung des nutzbaren Dynamikbereichs von Sensoren, kam die Frage nach einem erweiterten nutzbaren Frequenzbereich und einer flexibleren Nutzung von Sensoren auf. Der Frequenzbereich von Schall- und Schwingungssensoren wird allgemein durch den linearen Übertragungsbereich bestimmt. Ist der gesamte Frequenzgang des Sensors bekannt, kann durch ein Korrekturfilter der Frequenzgang komplett, oder zumindest teilweise, linearisiert werden.

Berechnung des Korrekturfilters

Die bei der REq-X Technologie verwendeten Korrekturfilter sind als FIR-Filter realisiert. Zur Berechnung der entsprechenden Filterimpulsantwort $g(t)$ wird der gesamte Frequenzgang des Sensors $H(f)$ invertiert.

$$G(f) = \frac{1}{H(f)} \quad (4)$$

Der invertierte Frequenzgang $G(f)$ wird mit Hilfe der inversen Fouriertransformation in die Impulsantwort $g(t)$ überführt.

$$g(t) = \sum_{k=0}^{N-1} G(f_k) \cdot e^{j \frac{2\pi k n}{N}} \quad (5)$$

Das korrigierte Eingangssignal $y(t)$ kann nun durch Faltung des nicht korrigierten Eingangssignals des Messsystems $x(t)$ mit der Impulsantwort des Korrekturfilters $g(t)$ berechnet werden.

$$y(t) = x(t) * g(t) \quad (6)$$

Abhängig vom Verlauf des zu korrigierenden Frequenzgangs und der gewünschten Genauigkeit, muss die Anzahl der Stützstellen des FIR Filters beachtet werden. Jedes digitale Filter erzeugt eine Signalverzögerung, welche ebenfalls in Betracht gezogen werden muss. Die im Brüel & Kjaer Analysesystem PULSE implementierte REq-X Technologie wählt die Länge der Filterantwort gemäß der ausgesuchten Frequenzgangkorrektur und der

gewünschten Genauigkeit automatisch aus und korrigiert die Signallaufzeiten der einzelnen Signale, so dass phasengenaue Messungen weiterhin möglich sind.

Anwendung von REq-X bei Schwingungsmessungen

Die obere Grenze des nutzbaren Frequenzbereichs von Beschleunigungssensoren ist in den meisten Fällen durch die 10% Abweichung von der Referenzlinie definiert. Sie beträgt etwa 30% der Resonanzfrequenz des Sensors im montierten Zustand. Die untere Grenzfrequenz wird bei IEPE Sensoren durch die eingebaute Elektronik bestimmt. Auch hier wird eine Abweichung von 10% von der Referenzlinie als Grenze verwendet [4]. Der Frequenzgang von Brüel & Kjaer Beschleunigungssensoren wird während der Produktion gemessen und im Kalibrierzeugnis dokumentiert. Beschleunigungssensoren mit TEDS (Transducer Electronic Data Sheet) haben den Frequenz- und Phasengang zusätzlich als Polynomkoeffizienten im eingebauten Datenchip gespeichert. An Hand dieser Informationen kann ein Korrekturfilter berechnet und der Frequenzgang in weiten Bereichen linearisiert werden.

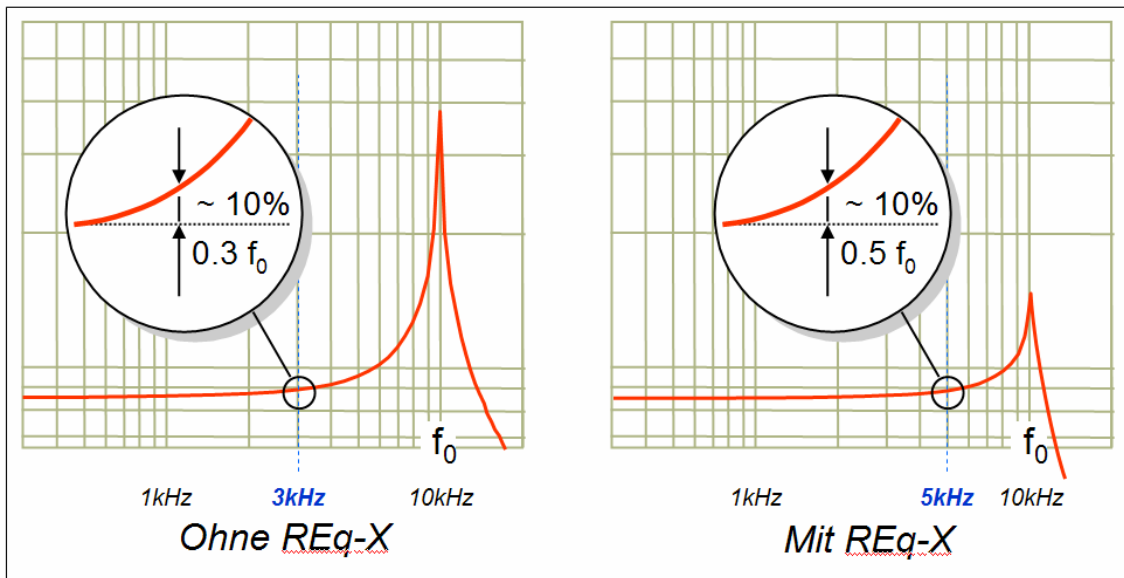


Abbildung 4: Frequenzgang eines Beschleunigungsaufnehmers mit (rechts) und ohne REq-X (links) Korrektur

Mit Hilfe der REq-X Technologie kann der nutzbare Frequenzbereich eines monoaxialen Beschleunigungsaufnehmers verdoppelt, bei triaxialen Sensoren um 50%, erweitert werden.

Anwendung von REq-X bei Schallmessungen

Mikrofone sind für bestimmte Schallfelder optimiert, wobei zwischen Freifeld-, Diffusfeld- und Druckmikrofonen unterschieden wird. Die Verwendung eines Mikrofons mit Diffusfeldkorrektur in einem Freifeld kann, je nach Schalleinfallswinkel, zu einer Über- bzw. Unterbewertung der hohen Frequenzen von bis zu 5dB führen [5].

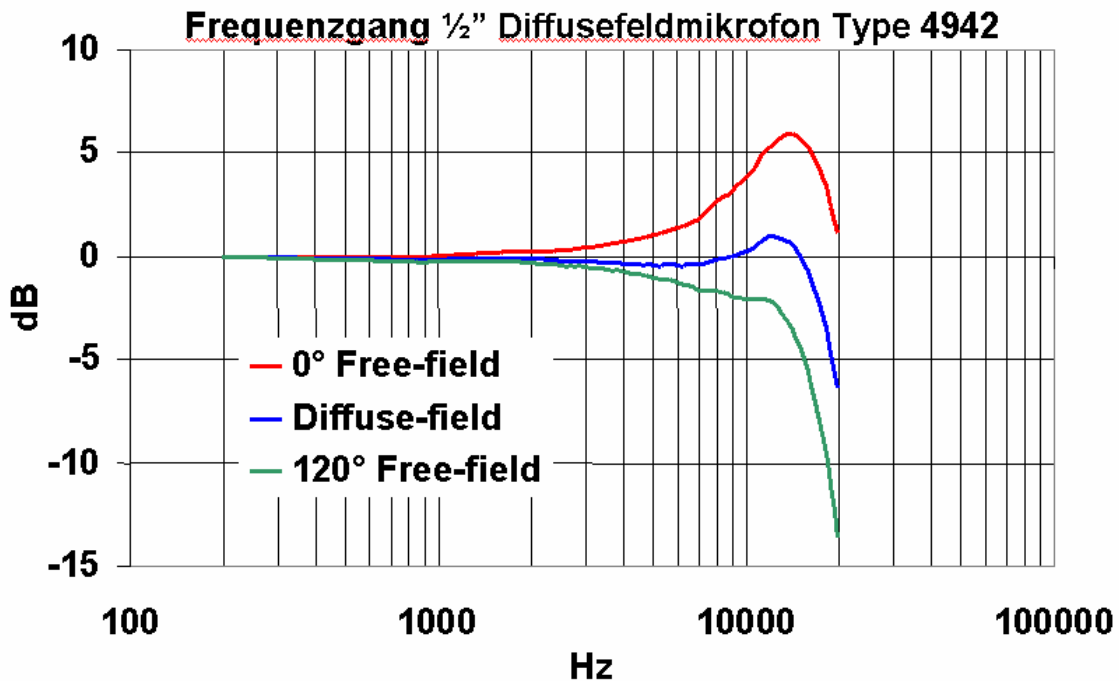


Abbildung 5: Einfluss des Schallfeldes und des Schalleinfallswinkels im Freifeld für ein Diffusfeldmikrofon Brüel & Kjaer Type 4942

In vielen Fällen werden bei Schallmessungen auch Windschirme oder ein Nasenkonus verwendet, wodurch der Frequenzgang des Mikrofons beeinflusst wird. Sind die Einflüsse unterschiedlicher Schallfelder oder Schalleinfallswinkel und die Auswirkungen von verwendetem Zubehör bekannt, kann ein Korrekturfilter berechnet und der Frequenzgang linearisiert werden. Brüel & Kjaer liefert bei jedem Messmikrofon eine CD (früher Diskette) mit den jeweiligen, im Kalibrierlabor ermittelten, individuellen Frequenzgängen für unterschiedliche Schalleinfallswinkel, Windschirm usw mit, aus denen mit Hilfe der REq-X Technologie die Korrekturfilter berechnet werden können. Durch die Frequenzgangkorrekturen kann ein für Freifeldbedingungen optimiertes Mikrofon auch in einem Diffusfeld verwendet werden. Dies gilt auch für Freifeldmikrofone im Diffusfeld.

Der erweiterte nutzbare Frequenzbereich und die flexibleren Einsatzmöglichkeiten des Messmikrofons erhöhen die Messgenauigkeit und sparen Kosten.

3. Zusammenfassung

Mit der Einführung der TEDS-, Dyn-X- und REq-X-Technologie ist die korrekte Verwendung von Schall- und Schwingungssensoren deutlich komfortabler und sicherer geworden.

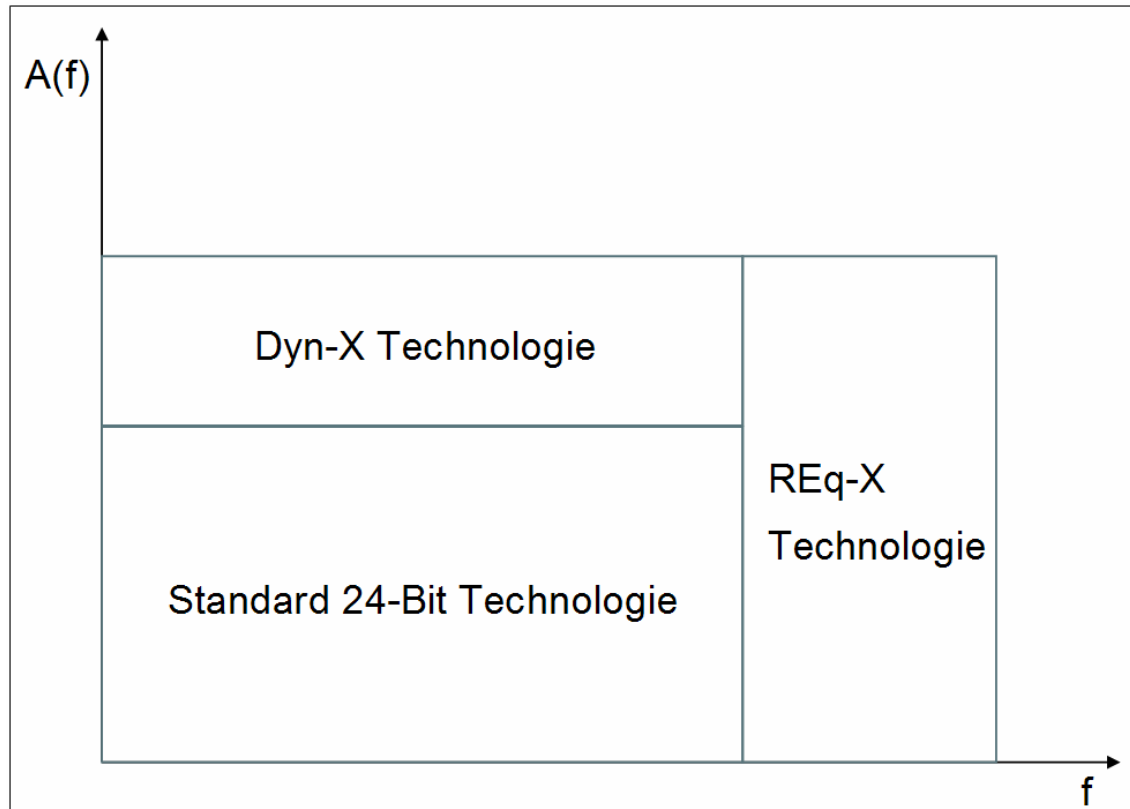


Abbildung 6 - Erweiterung der Analysefähigkeiten durch Dyn-X und REq-X

- TEDS vermeidet Verkabelungsfehler und Zuordnungsprobleme von Sensoren. Falsche Sensorempfindlichkeitswerte sind nahezu unmöglich.
- Dyn-X erweitert den Dynamikbereich auf 160dB und erhöht hierdurch die Messgenauigkeit. Übersteuerungen und unzureichende Aussteuerung gehören damit der Vergangenheit an.
- REq-X erweitert den nutzbaren Frequenzbereich, die Genauigkeit der Messwerte und den flexiblen Einsatz von Mikrofonen in unterschiedlichen Schallfeldern.

- [1] Tietze, U, Schenk, Ch.: Halbleiter Schaltungstechnik, 10.Auflage. Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo; Hong-Kong; Barcelona; Budapest; Springer 1993
- [2] Randall, R.B.: Frequency analysis. Naerum DK: Brüel & Kjaer, 1987
- [3] Brüel & Kjaer magazine, Ausgabe 2/2005, Naerum DK: Brüel & Kjaer, 2005
- [4] Serridge, M; Licht, T.R.: Piezoelektrische Beschleunigungsaufnehmer und Vorverstärker – Theorie und Anwendung. Naerum DK: Brüel & Kjaer 1990
- [5] Technical Documentation – Microphone Handbook – Vol.1: Theory, Brüel & Kjaer, Naerum DK 1996