

▲ PULSE Messwerterfassungs- und Analyseplattform

## Mikrofone und ihr Frequenzgang

Mikrofone werden nach ihrem Verhalten im Schallfeld in drei Typen eingeteilt – Freifeld-, Diffusfeld- und Druckmikrofone.

Wenn ein Mikrofon in ein Schallfeld gebracht wird, wirkt sich seine Anwesenheit auf das Feld aus. Abb. 2 zeigt, dass durch örtliche Reflexionen der Druck vor dem Mikrofon ansteigt und das Mikrofon einen zu hohen Schalldruck misst. Dieser »Empfindlichkeitsanstieg« ist frequenzabhängig und erreicht sein Maximum an der Frequenz, bei der die Wellenlänge  $l$  gleich dem Mikrofondurchmesser  $D$  ist. Wenn der entsprechende Frequenzgang eines  $1/2$ -Zoll-Mikrofons entlang der D-Achse aufgetragen wird, ist zu erkennen, dass der Anstieg bei 2 kHz beginnt und das Maximum von ca. 10 dB bei 27 kHz liegt.

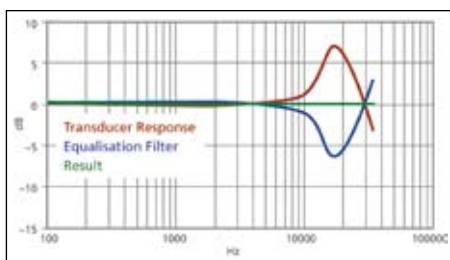
Freifeldmikrofone haben einen flach verlaufenden Frequenzgang, bezogen auf den Schalldruck, der vorhanden war, bevor das Mikrofon in das Schallfeld gebracht wurde. Es ist wichtig zu beachten, dass (wie früher erwähnt) die physische Anwesenheit des Mikrofons das Schallfeld stört. Das Freifeldmikrofon ist so ausgelegt, dass es diese Störung kompensiert. Die blaue Kurve in Abb. 3 zeigt den Frequenzgang eines Freifeldmikrofons, wenn es in einem diffusen Feld verwendet wird.

Die rote und die grüne Kurve zeigen den Frequenzgang des Freifeldmikrofons, wenn es in einem freien Schallfeld verwendet wird. Die rote Kurve gilt für einen Schalleinfallswinkel von  $0^\circ$ , die

# REq-X

## Frequenzgangentzerrung an Sensoren

**Frequenzgangentzerrung (Response Equalisation, REq-X) ist eine neue Technik, die es gestattet, den Frequenzgang von Mikrofonen, Beschleunigungsaufnehmern und Kupplern in Echtzeit zu korrigieren. Dies erweitert den nutzbaren Frequenzbereich der Sensoren, verbessert die Messgenauigkeit und vergrößert die Einsatzmöglichkeiten vorhandener Sensoren. Abb. 1 zeigt das Prinzip von REq-X. Es bedeutet, dass das selbe Mikrofon (unabhängig vom Mikrofontyp) unter Freifeld- und Diffusfeldbedingungen und als Druckmikrofon verwendet werden kann. Darüber hinaus lässt sich das Mikrofon für Schalleinfallswinkel in 30-Grad-Schritten korrigieren, d.h. Einfallswinkel von  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  und  $180^\circ$ , sowie für verschiedenes Mikrofonzubehör wie Windschirme, Mikrofongitter und Nasenkonusse, was die Messgenauigkeit um weitere 5 bis 10 dB verbessert. Bei einem korrekt montierten Beschleunigungsaufnehmer kann damit gerechnet werden, dass REq-X die empfohlene obere Grenze des nutzbaren Frequenzbereichs von einem Drittel der Aufnehmer-Resonanzfrequenz auf die halbe Resonanzfrequenz erhöht – eine Zunahme um 50%. Dies führt zu einer insgesamt besseren Messqualität. Anders ausgedrückt: Die bestmögliche Messgenauigkeit wird nur mit Frequenzgangentzerrung erhalten.**



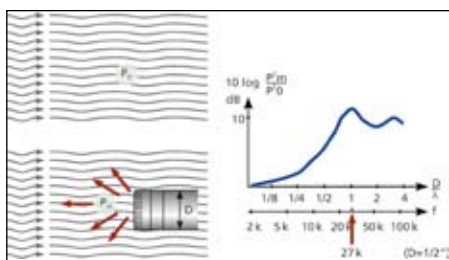
▲ **Abb. 1: Frequenzgang des Sensors (rot), Entzerrfilter (blau), entzerrter Frequenzgang (grün)**

grüne für 120°. Wenn ein Freifeldmikrofon in einem diffusen Feld verwendet wird oder wenn das Freifeldmikrofon unter Freifeldbedingungen nicht direkt in Richtung der Schallquelle zeigt, wird der Pegel bei den hohen Frequenzen unterbewertet, sofern keine Frequenzgangentzerrung erfolgt. Der korrekte Einsatz von Freifeldmikrofonen erfordert somit ein freies Schallfeld mit nur einer Schallquelle, wobei das Mikrofon auf die Schallquelle zeigt.

Das Diffusfeldmikrofon ist so konstruiert, dass es gleichförmig auf Signale reagiert, die gleichzeitig aus allen Richtungen einfallen. Es sollte deshalb immer dann verwendet werden, wenn ein diffuses Schallfeld vorliegt, z. B. häufig in Räumen, in denen der Schall von Wänden, der Decke und im Raum befindlichen Objekten reflektiert wird – beispielsweise Räume mit harten Betonwänden und ohne Fußbodenbelag.

Diffusfeldmikrofone sollten auch verwendet werden, wenn mehrere Schallquellen zum Schalldruck an der Messposition beitragen. Abb. 4 zeigt den Frequenzgang in verschiedenen Schallfeldern – den flachen Frequenzgang hat es nur im Diffusfeld.

Die blaue Kurve in Abb. 4 zeigt den Frequenzgang eines Diffusfeldmikrofons, das im diffusen Schallfeld eingesetzt wird. Die rote und die grüne Kurve zeigen den Frequenzgang des Diffusfeldmikrofons in einem freien Schallfeld. Die rote Kurve gilt für einen Schalleinfallswinkel von 0°, die grüne für 120°. Wird das Diffusfeldmikrofon ohne Frequenzgangentzerrung im freien Schallfeld verwendet, besteht ein Risiko, dass der Pegel bei hohen Frequenzen um mehr als 5 dB über- oder unterbewertet wird.

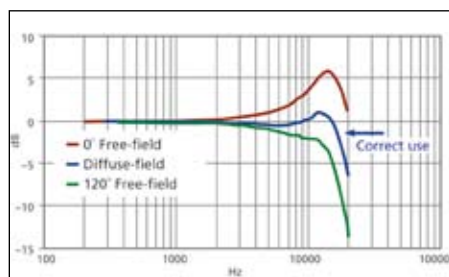


▲ **Abb. 2: Druckanstieg vor dem Mikrofon unter Freifeldbedingungen**

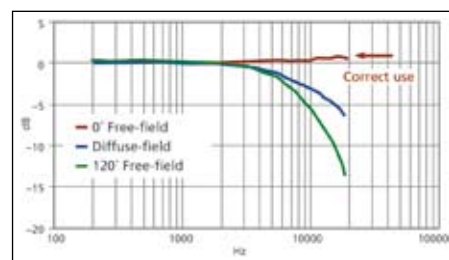
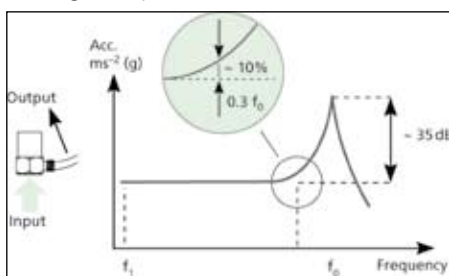
Druckmikrofone werden hauptsächlich für Messungen in geschlossenen Hohlräumen verwendet, z. B. Kupplermessungen und bei der Kalibrierung von Audiometern, wo die physischen Abmessungen des Mikrofons in der Größenordnung der Wellenlänge des gemessenen Schallfeldes oder darunter liegen, sowie für Messungen an Wänden oder auf Oberflächen, an denen das Mikrofon so angebracht werden kann, dass seine Membran mit der umgebenden Fläche bündig abschließt.

Alle Brüel & Kjær-Mikrofone werden mit einem individuellen Kalibrierzeugnis geliefert, aus dem der Frequenzgang des Mikrofons für das Schallfeld ersichtlich ist, für das es ausgelegt ist. Weitere Frequenzgänge für andere Schallfelder und Zubehör sind der CD mit den Mikrofondaten zu entnehmen und können mit dem Microphone-Viewer-Pro-

▼ **Abb. 4: 1/2-Zoll-Diffusfeldmikrofon in verschiedenen Schallfeldern**



▼ **Abb. 5: Die obere Grenzfrequenz für einen Beschleunigungsaufnehmer beträgt 0,3 f<sub>0</sub>**



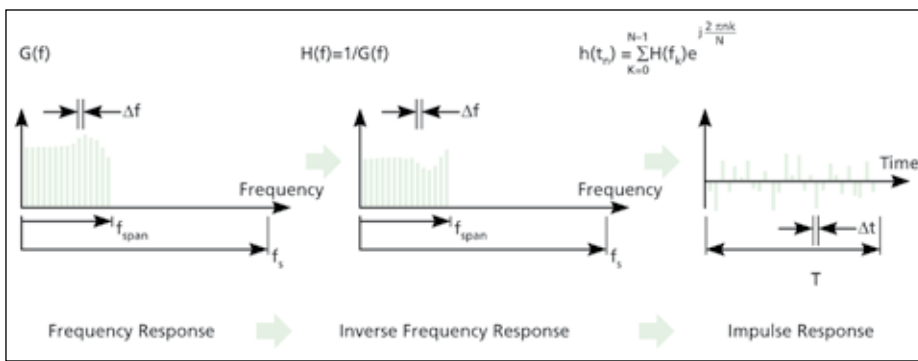
▲ **Abb. 3: 1/2-Zoll-Freifeldmikrofon in verschiedenen Schallfeldern**

gramm auf der CD betrachtet werden. Die Frequenzgangkurven sind auch in Form einer Excel-Tabelle erhältlich. Die CD mit den Mikrofondaten wird seit mehr als zehn Jahren mit Brüel & Kjær-Mikrofonen mitgeliefert und die darauf enthaltenen Daten werden für die Frequenzgangentzerrung verwendet.

### Beschleunigungsaufnehmer und ihr Frequenzgang

Beschleunigungsaufnehmer liefern bei einer konstanten Beschleunigung ein konstantes Ausgangssignal. Dies gilt von sehr niedrigen Frequenzen bis zu einer Grenzfrequenz, die durch das Ansteigen des Ausgangssignals bei der Aufnehmerresonanz bedingt ist. Generell werden Aufnehmer nicht in der Nähe ihrer Resonanz verwendet, da dies zu großen Messfehlern führen kann. Als Faustregel gilt, dass ein Beschleunigungsaufnehmer ohne Frequenzgangentzerrung bis zu einem Drittel seiner Resonanzfrequenz eingesetzt werden kann. Dann ist gewährleistet, dass der Fehler bei dieser Frequenz etwa 10% oder 1 dB nicht überschreitet. Die Resonanzfrequenz des montierten Aufnehmers multipliziert mit 0,3 ergibt die in Abb. 5 gezeigte 10%-Grenzfrequenz. Der Frequenzgang auf dem Kalibrierzeugnis des Aufnehmers entspricht der Montage mit Stiftschraube oder Metallclip.

Die Befestigung des Aufnehmers mit Hilfe einer Stahlstiftschraube ist die beste Montagemethode, die überall angewendet werden sollte, wo dies möglich ist. Stiftschrauben lassen sich jedoch nicht immer verwenden. Wenn eine Klebkopfschraube, dünnes doppelseitiges Klebeband, Bienenwachs oder Fett verwendet wird, nimmt die



▲ Abb. 6: REQ-X wird im Zeitbereich implementiert, wobei die Impulsantwort des Korrekturfilters und Faltungstechniken verwendet werden

Resonanzfrequenz und mit ihr der nutzbare Frequenzbereich ab.

Es ist zu beachten, dass ein schlecht montierter Aufnehmer Schwingungsmessungen stark beeinträchtigen kann, indem der nutzbare Frequenzbereich wesentlich verringert wird. Am wichtigsten ist der enge mechanische Kontakt zwischen dem Aufnehmer und der Fläche, an der er befestigt werden soll.

Beschleunigungsaufnehmer werden mit einem Kalibrierzeugnis geliefert. Die fünf Parameter, die den Frequenzgang eines ideal montierten Aufnehmers definieren, sind Resonanzfrequenz, Q-Faktor, obere und untere Grenzfrequenz und Amplitudenkorrektur/Flanke. Diese Parameter werden für alle Brüel & Kjær-Beschleunigungsaufnehmer angegeben – bereits seit zehn Jahren. Für die Frequenzgangentzerrung sollten TEDS-Aufnehmer verwendet oder die oben genannten Parameter in die Sensordatenbank eingegeben werden. Für ausgewählte Sensoren enthält die Sensordatenbank auch den

Frequenzgang für verschiedene Montagemethoden.

### Wie funktioniert REQ-X?

Die Frequenzgangentzerrung wird mittels einer iterativen Frequenzabstimmethode im Zeitbereich implementiert. Diese hat den Vorteil, dass sobald das Zeitsignal für die Frequenzgangentzerrung gewählt wurde, die Entzerrung in Echtzeit erfolgt und auf alle zur Verfügung stehenden Analysearten angewendet wird.

In Abb. 6 zeigt das linke Diagramm, G(f), den Frequenzgang eines Sensors. Dieser kann der Sensordatenbank entnommen werden. Durch Umkehrung des Diagramms wird das Korrekturspektrum H(f) erhalten, das multipliziert mit dem Eingangsspektrum einen flachen Verlauf ergibt. Wenn eine inverse FFT für das Korrekturspektrum berechnet wird, erhält man die Impulsantwort h(t) des Korrekturspektrums. Die Implementierung der Entzerrung im Zeitbereich bedeutet, dass das entzerrte Signal als Faltung zwischen dem

Eingangssignal und der Impulsantwortfunktion des Entzerrfilters berechnet wird. Die Länge der Impulsantwort hängt von der unteren Frequenzgrenze ab. Wenn beispielsweise die Signale bis 25,6 kHz analysiert werden, wird eine Abtastfrequenz von  $F_s = 65.536$  Hz verwendet.

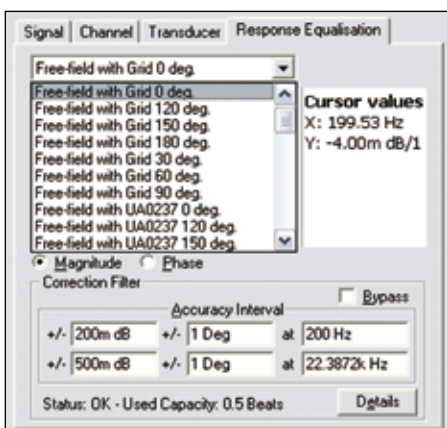
Wenn das Spektrum bis hinab zu 128 Hz korrigiert werden soll, sollte die Auflösung des Korrekturfilters mindestens  $Df = 128$  Hz betragen. Jetzt kann berechnet werden, dass die Länge der Impulsantwort mindestens  $N = F_s/Df = 65.536/128 = 512$  Abtastwerte beträgt.

In Abhängigkeit vom Frequenzgangverlauf des Sensors und davon, wie präzise die Frequenzgangentzerrung sein soll, muss die Frequenzauflösung und damit die Länge der Impulsantwort eventuell erhöht werden – dies erfolgt automatisch. Die maximale Länge der Impulsantwort ist auf 4.001 Abtastwerte beschränkt. Ein solches Filter verursacht eine Verzögerung, die automatisch korrigiert wird. Es wird angezeigt, welche Verarbeitungsleistung für die aktuelle Entzerrung erforderlich ist.

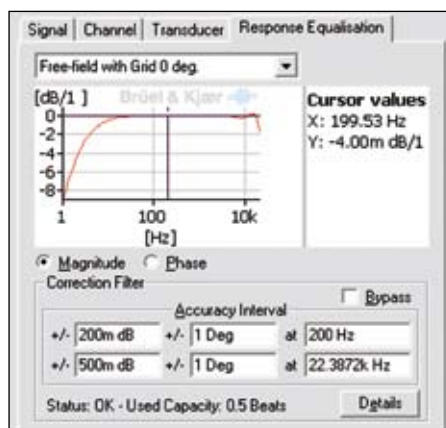
Wenn REQ-X gewählt wird, erfolgt stets eine Amplitudenentzerrung. Die Phase wird einbezogen, wenn entsprechende Informationen zur Verfügung stehen.

### Wie wird REQ-X angewendet?

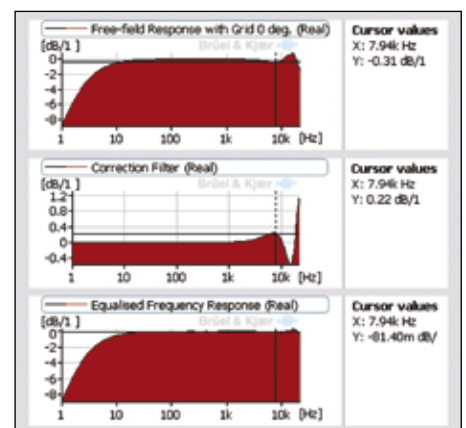
Die Frequenzgangentzerrung wird auf der Seite mit den Signaleigenschaften angewendet. Bei einem Mikrofon stehen typisch 50 verschiedene Entzerrungskurven zur Auswahl, je nachdem, für welches Schallfeld und welches



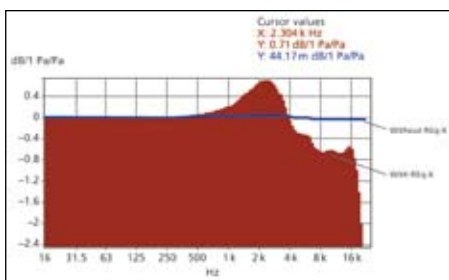
▲ Abb. 7a: Verschiedene Entzerrungs-FRFs



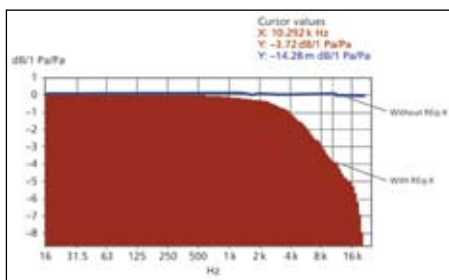
▲ Abb. 7b: Gewählte Entzerrungs-FRF



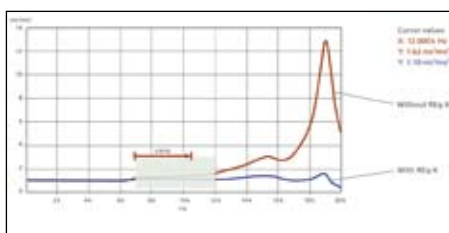
▲ Abb. 8: Details zu Korrekturfilttern



▲ **Abb. 9: Freifeldmikrofon Typ 4190 mit Windschirm unter Freifeldbedingungen**



▲ **Abb. 10: Freifeldmikrofon Typ 4190 unter Diffusfeldbedingungen**



▲ **Abb. 11: Beschleunigungsaufnehmer Typ 4507 mit Metallclip montiert**

Zubehör die Entzerrung erfolgen soll (siehe Abb. 7a).

Anschließend kann für niedrige und hohe Frequenzen das Genauigkeitsintervall in dB wählt werden. Der Status gibt an, ob die Entzerrung innerhalb einer Impulsantwortfunktion von 4.001 Abtastwerten realisiert werden kann und wie viel Prozent der maximalen Filterkapazität die Implementierung beansprucht. Für Mikrofone reicht der Standardfrequenzbereich von 200 Hz bis zu der im Datensatz der Sensordatenbank angegebenen oberen Grenzfrequenz. Für Beschleunigungsaufnehmer reicht der Standardfrequenzbereich von 200 Hz bis zur halben Resonanzfrequenz. Die vorgegebene Genauigkeit beträgt 0,2 dB an der unteren und 0,5 dB an der oberen Frequenz.

Die Korrekturfilter-Details (siehe Abb. 8) zeigen den aktuellen Frequenzgang des Sensors (derselbe wie in Abb. 7b)

zusammen mit dem verwendeten Korrekturfilter und dem entzerrten Frequenzgang. Jetzt wird die REq-X auf den gewählten Sensor angewendet. Da die Frequenzgangentzerrung des Sensorsignals vor der Eingabe in einen Analysator erfolgt, wird sie automatisch auf alle Analysen angewendet, die im Rahmen des Messprojektes erfolgen.

### Beispiele

Abb. 9 zeigt das Ergebnis der Entzerrung eines Freifeldmikrofons Typ 4190 im freien Schallfeld mit Windschirm. In diesem Beispiel wurden sehr enge Toleranzen gewählt: 50 mdB sowohl bei 50 Hz als auch an der oberen Grenzfrequenz von 22,4 kHz, um nach der Signalentzerrung einen sehr flachen Frequenzgang zu erhalten. Die größte Verbesserung um ca. 0,7 dB ist bei 2,3 kHz zu sehen. Auch wenn der Frequenzgang nahezu flach ist, kann er mit REq-X noch verbessert werden. Das ist ein Vorteil, wenn sehr hohe Forderungen an die Messgenauigkeit gestellt werden.

Abb. 10 zeigt das Ergebnis der Entzerrung eines Freifeldmikrofons Typ 4190 im diffusen Schallfeld. Es wurden dieselben Toleranzen wie oben verwendet. In diesem Fall erfolgte die größte Verbesserung um ca. 3,7 dB bei 10,3 kHz. Das heißt, dass wenn unter Diffusfeldbedingungen gearbeitet wird und kein Diffusfeldmikrofon vorhanden ist, kann stattdessen ein Freifeldmikrofon verwendet werden.

Brüel & Kjør-Mikrofone werden mit einem Frequenzgang geliefert, der für den angegebenen Schallfeldtyp optimiert ist. Auch bei einem guten Mikrofondesign kann den Frequenzgang verbessert werden. Mit REq-X lässt sich der Frequenzgang weiter glätten und damit die Messgenauigkeit im angegebenen Frequenzbereich um bis zu 1,5 dB verbessern.

REq-X lässt sich auch verwenden, um den Einfluss des Schalleinfallswinkels und von Mikrofonzubehör wie Windschirmen zu kompensieren, was die Genauigkeit um weitere 5 bis 10 dB verbessert.

Abb.11 zeigt den gemessenen Frequenzgang eines mit Metallclip montierten Beschleunigungsaufnehmers Typ 4507. Die Resonanzfrequenz wurde bei 19 kHz gemessen. Ohne REq-X beträgt die obere Grenzfrequenz 7 kHz. Mit REq-X erhöht sich die obere Frequenz auf 12 kHz, d.h. um mehr als 50%, und die Genauigkeit bis zur Resonanzfrequenz wird drastisch verbessert.

Für Brüel & Kjør-Beschleunigungsaufnehmer wird eine obere 10%-Grenzfrequenz angegeben. Diese beträgt normalerweise 0,3-mal der Resonanzfrequenz. Mit REq-X kann jetzt die Messgenauigkeit im selben Frequenzbereich auf 5% halbiert werden. Wird stattdessen die 10%-Grenze beibehalten und REq-X verwendet, kann man den Frequenzbereich der Aufnehmer erweitern. Bei uniaxialen Aufnehmern lässt sich die obere Frequenz um bis zu 100% erweitern. Bei anderen Typen lässt sich die obere Frequenz meist um bis zu 50% erweitern. Im Beispiel von Abb. 11 erhöht sich die obere Grenzfrequenz um 70%.

### Schlussfolgerung

Response Equalisation eXtreme (REq-X) bietet folgende Vorteile: Sie erweitert die Einsatzmöglichkeiten neuer und vorhandener Sensoren, verbessert die Messgenauigkeit und erweitert den nutzbaren Frequenzbereich von Sensoren. Sie wird in Echtzeit angewendet und wirkt sich auf Messungen und Analysen vorteilhaft aus. In Kombination mit der Dynamikbereicherweiterung, auch als Dyn-X-Technologie bezeichnet [1], erweitert sie sowohl Frequenz- als auch Messbereiche und gestattet damit noch präzisere und zuverlässigere Messungen.

#### ► INFO

**Autoren:**  
Svend Gade, Tommy Schack, Ole Thorhauge  
Brüel & Kjør  
www.bksv.com

**Literatur:**  
[1] N. J. Jacobsen, O.T. Andersen: »Dyn-X Technology: 160 dB in One Input Range«, Brüel & Kjør Technical Review No. 1, 2006, pp. 1 - 14