MATERIALI E METODI INNOVATIVI NELLA PROGETTAZIONE DI ALTOPARLANTI

Filippo Bartolozzi

B&C Speakers

52° Convegno Nazionale AIA
Perugia, 10-12 Giugno 2026

Il Sacro Graal degli altoparlanti

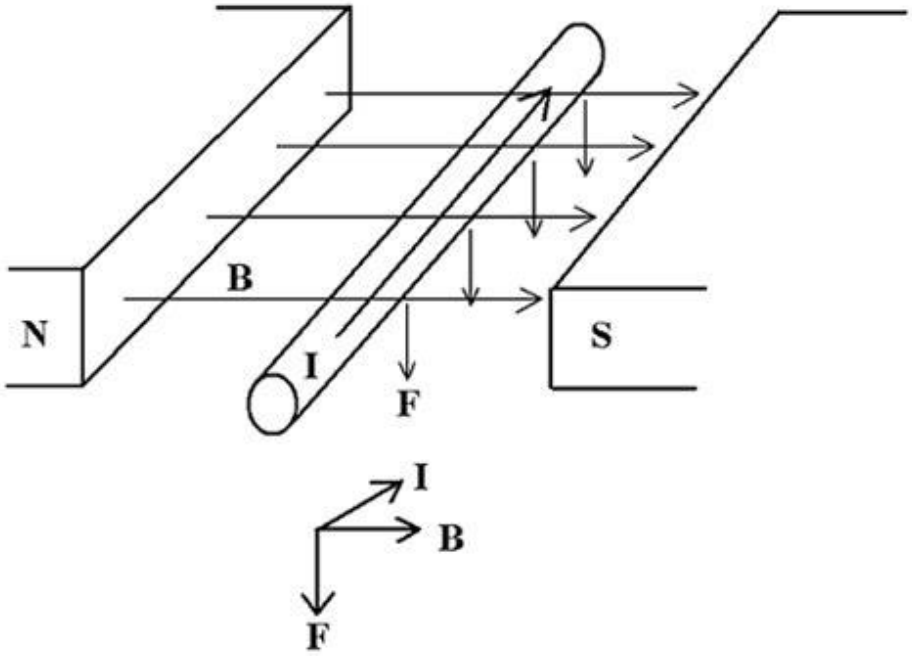
L’altoparlante perfetto:

- emette tutte le frequenze udibili con la stessa ampiezza
- non distorce e non introduce frequenze non presenti in partenza
- è efficiente (trasforma facilmente energia elettrica in energia acustica)
- è piccolo e leggero
- sopporta potenze elevate
- è costruito con materiali economici e facilmente reperibili

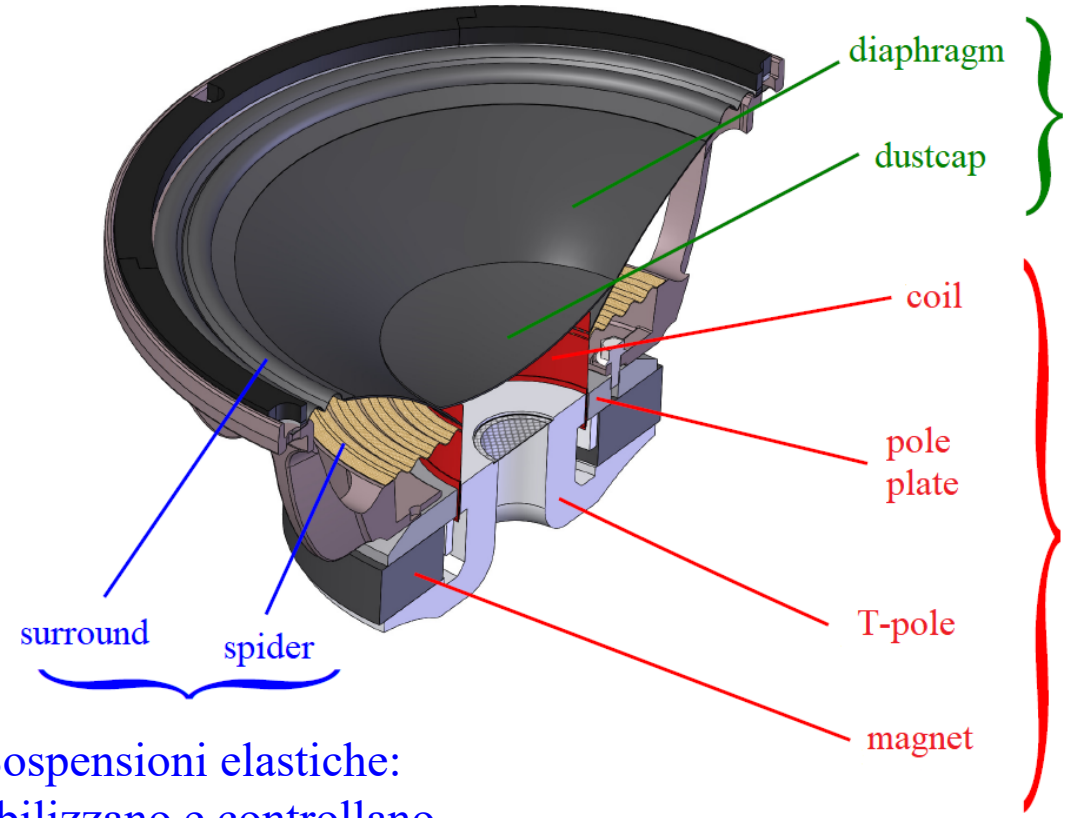
Meccanismo di funzionamento: forza di Lorentz

Gli altoparlanti a bobina mobile sono composti da una membrana vibrante (cono, cupola, bordo) e da un meccanismo per guidarne il movimento, basato sull'interazione fra la corrente che scorre in una bobina ed il campo magnetico prodotto da una magnete permanente.

Quando una corrente scorre in un filo posizionato in un campo magnetico ad esso ortogonale, la *forza di Lorentz* lo spinge da una parte e dall'altra, a seconda del senso di scorrimento.



L’altoparlante a bobina mobile



Diaframma:
trasmette l’energia cinetica
alle particelle d’aria

Motore:
converte l’energia elettrica
in energia cinetica

Sospensioni elastiche:
stabilizzano e controllano
il movimento di cono e bobina

Immobilismo... o evoluzione?

Nella sua struttura primaria, l'altoparlante a bobina mobile *sembra* rimasto pressoché immutato dalla sua invenzione.

Oggi sono tuttavia richieste prestazioni sempre più spinte, che hanno determinato evoluzione in tutti i campi:

- materiali
- geometrie
- metodi di progettazione (simulazioni FEM)
- modellizzazione teorica
- metodi di misura, caratterizzazione, interpretazione
- ...

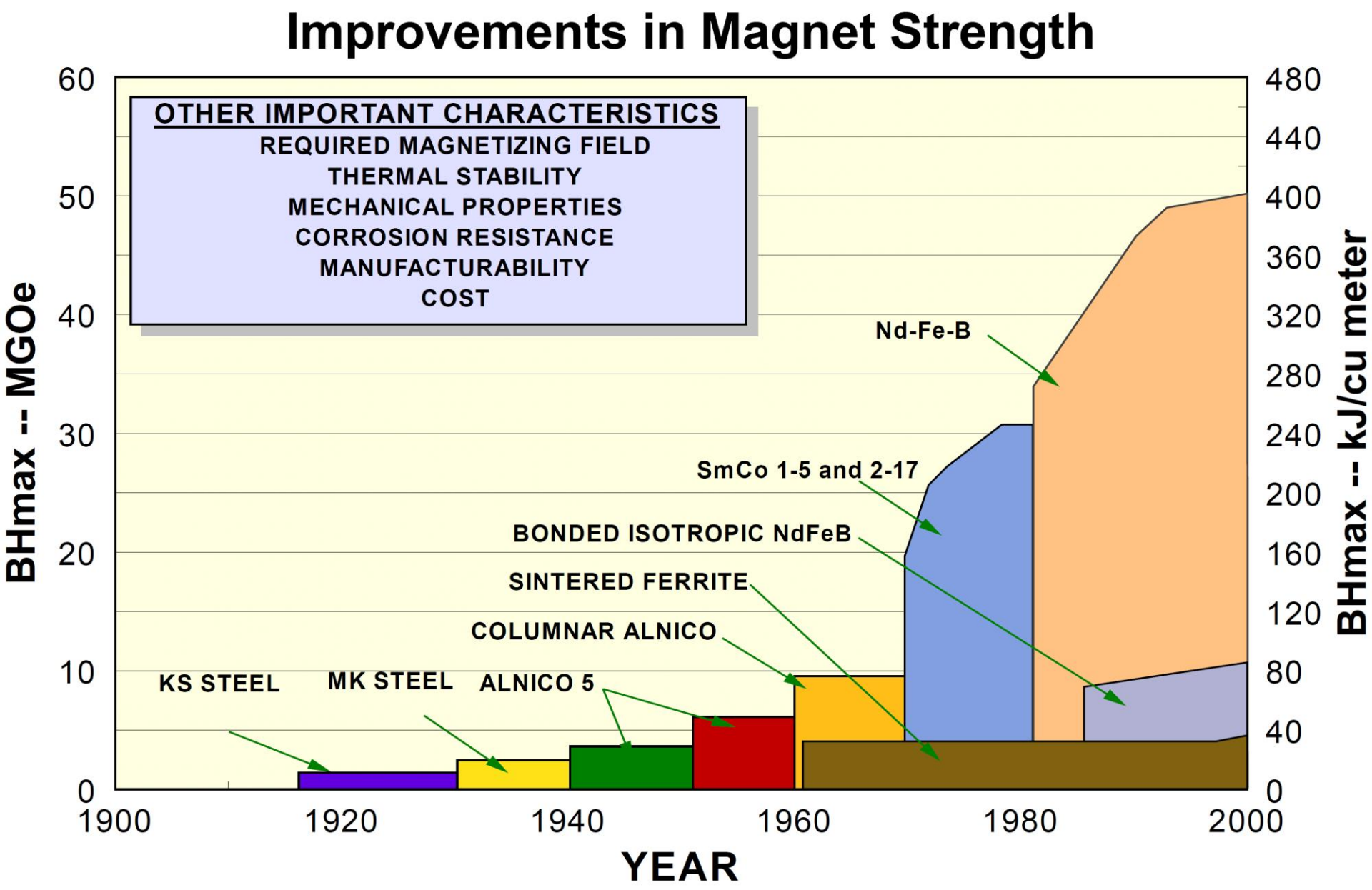
Evoluzione dei materiali: i magneti, l'ingrediente per un motore potente

Il motore è alla base dell'efficienza di trasduzione di un altoparlante; la ricetta per un motore potente è un buon magnete permanente, capace di generare un campo magnetico intenso da concentrare dove è posta la bobina.

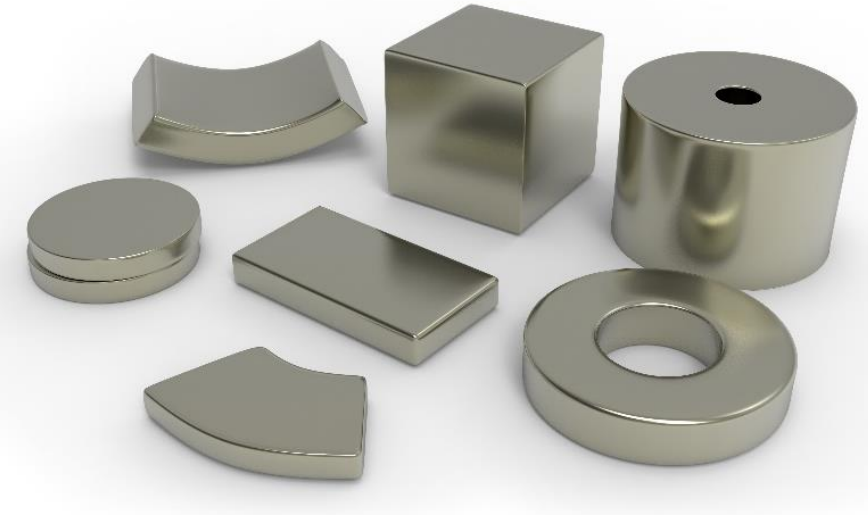
Originariamente in un altoparlante il campo magnetico era prodotto da una "bobina di campo", cui veniva fornita una tensione continua. Soltanto dopo la II Guerra Mondiale si diffusero i magneti permanenti.

Nei decenni, magneti di vari tipi sono stati utilizzati negli altoparlanti, quali **AlNiCo, SmCo, ferriti, NdFeB** (ingegnerizzati negli Anni 80). Questi si differenziano fra loro per resistenza alla smagnetizzazione, densità di energia magnetica, costo e facilità di approvvigionamento.

Evoluzione dei materiali: magneti



Magneti al Neodimio: opportunità e sfide



I magneti al Neodimio possiedono alta densità di energia magnetica e permettono motori potenti anche se di dimensioni contenute.
Il loro uso ha portato a miniaturizzare altoparlanti in auricolari, smartphone, dispositivi elettronici e casse acustiche.
Gli interessi mondiali attorno alle *terre rare* che li costituiscono, tuttavia, ne mettono in dubbio l'approvigionamento e ne aumentano il costo.
In particolare, la Cina ha sviluppato un quasi monopolio nella estrazione e lavorazione di terre rare, nonché nella produzione di magneti al Nd.
Il mondo sta lavorando ad alternative: riciclo di magneti al Neodimio, magneti senza terre rare, ma ancora non si è trovata una soluzione.

Evoluzione di materiali: coni e membrane

La membrana deve essere resistente, riprodurre stimoli a tutte le frequenze senza introdurre risonanze proprie.
Servono dunque:

- rigidità e leggerezza:
  alta velocità del suono
  per movimento sincrono
- buono smorzamento interno
  per dissipare l'energia di risonanze
- buona resistenza a frattura
- resistenza agli agenti climatici
  (temperatura, umidità)

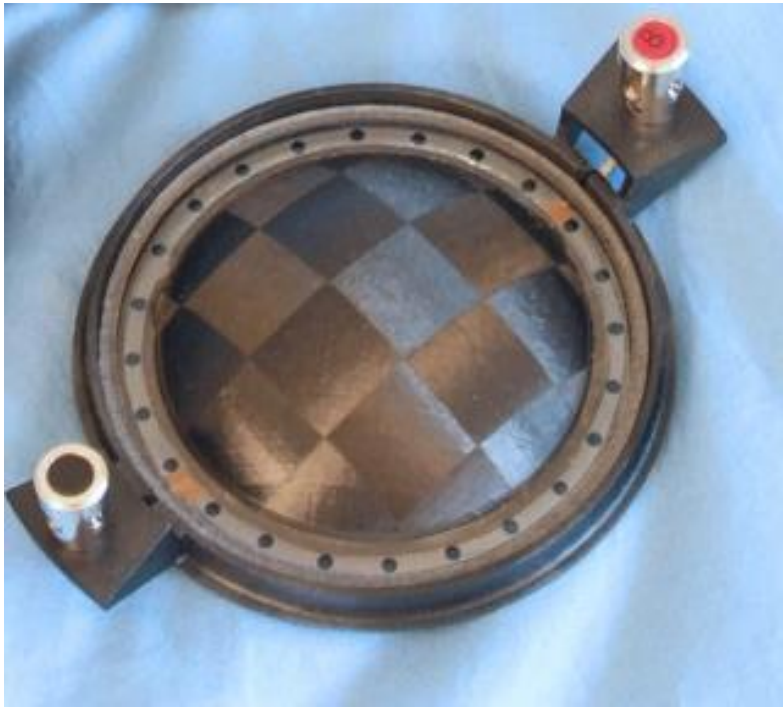
Evoluzione di materiali: coni e membrane

- La carta è da sempre usata perché leggera, con buono smorzamento, facile da fabbricare e da modificare tramite additivi e resine.
- Polimidi Aromatici (Kevlar, Conex): resistente agli impatti ed al calore
- Polipropilene: non assorbe umidità, buono smorzamento interno
- Sandwich di materiali (Rohacell, Honeycomb): struttura rigida e leggera
- Polpe “caricate” con fibra di vetro o fibra di carbonio

- Materiali “green”: foglie di banano, canapa, bioplastiche

TeXtreme: strati di carbonio

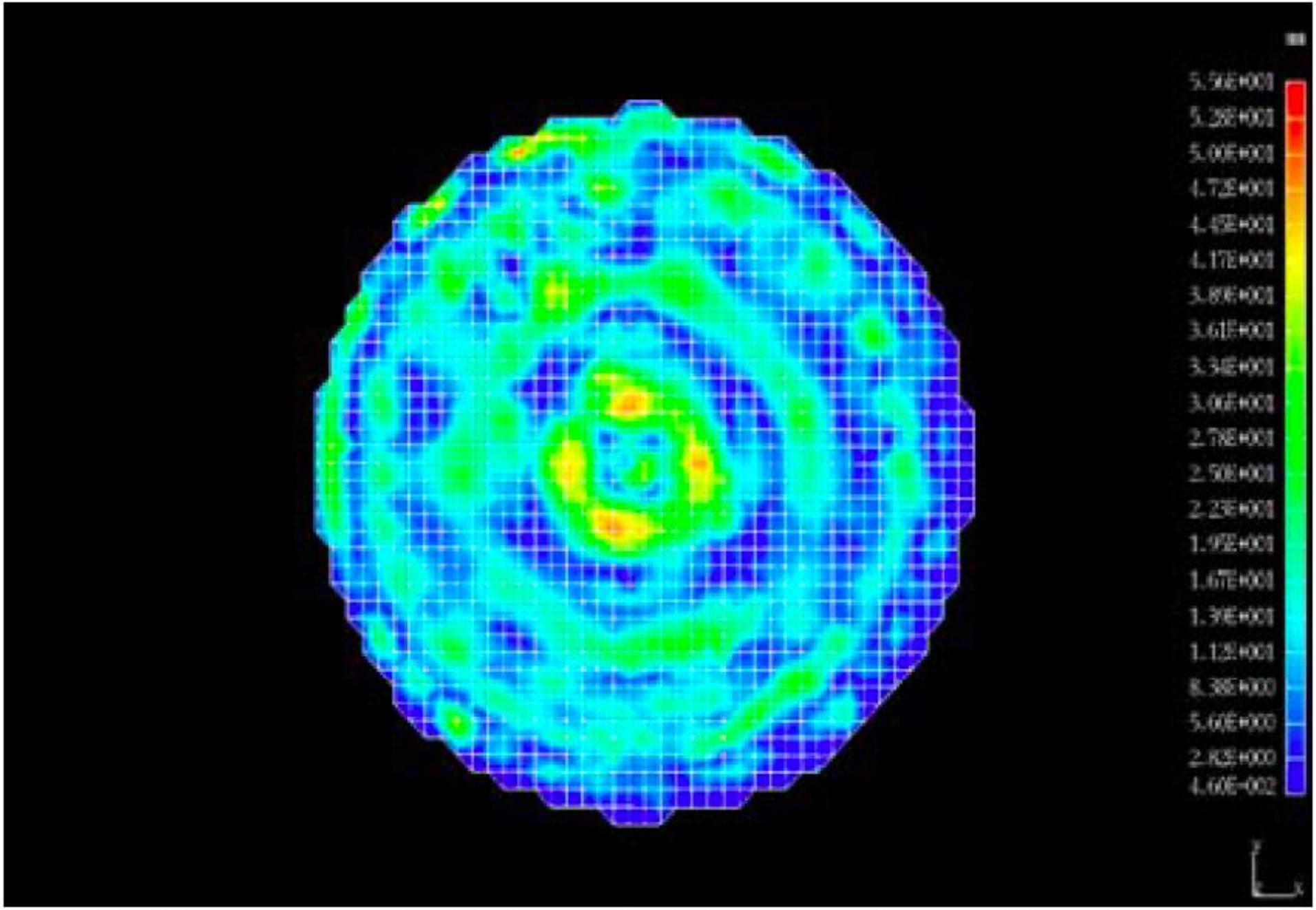
TeXtreme: più strati molto sottili di fibre di carbonio, per ottenere la rigidità e lo smorzamento desiderati.



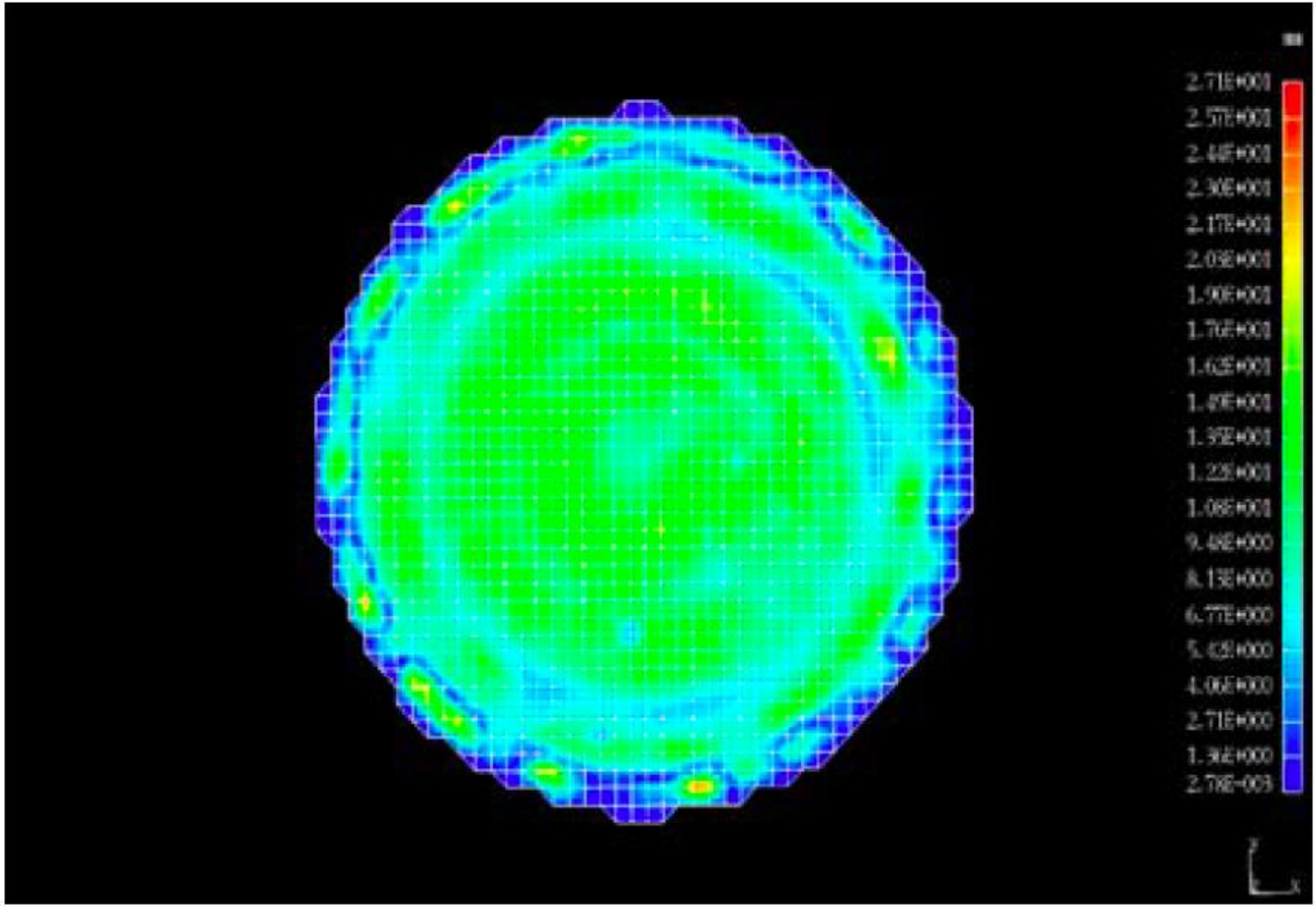
Evoluzione dei materiali per membrane di driver a compressione

- Tradizionalmente, le membrane dei driver a compressione erano fabbricate in materiali metallici (Ti, Al, Be, Mg), caratterizzati da grande rigidità e facili da stampare.
- Materiali plastici (PEEK, Kapton, Melinex, ...), economici e facili da formare; il PEEK ha ottima resistenza alla fatica, agli agenti chimici ed alla temperatura.
- Materiali ottenuti per tecniche di *Vapour Deposition*, in cui uno strato di materiale molto rigido è depositato su uno di materiale più tradizionale, per irrigidirlo senza aumentarne eccessivamente la massa.

  Es.: TiN su Ti: densità +8%, rigidità + 45%



LDV map at 13kHz of 3” Titanium diaphragm

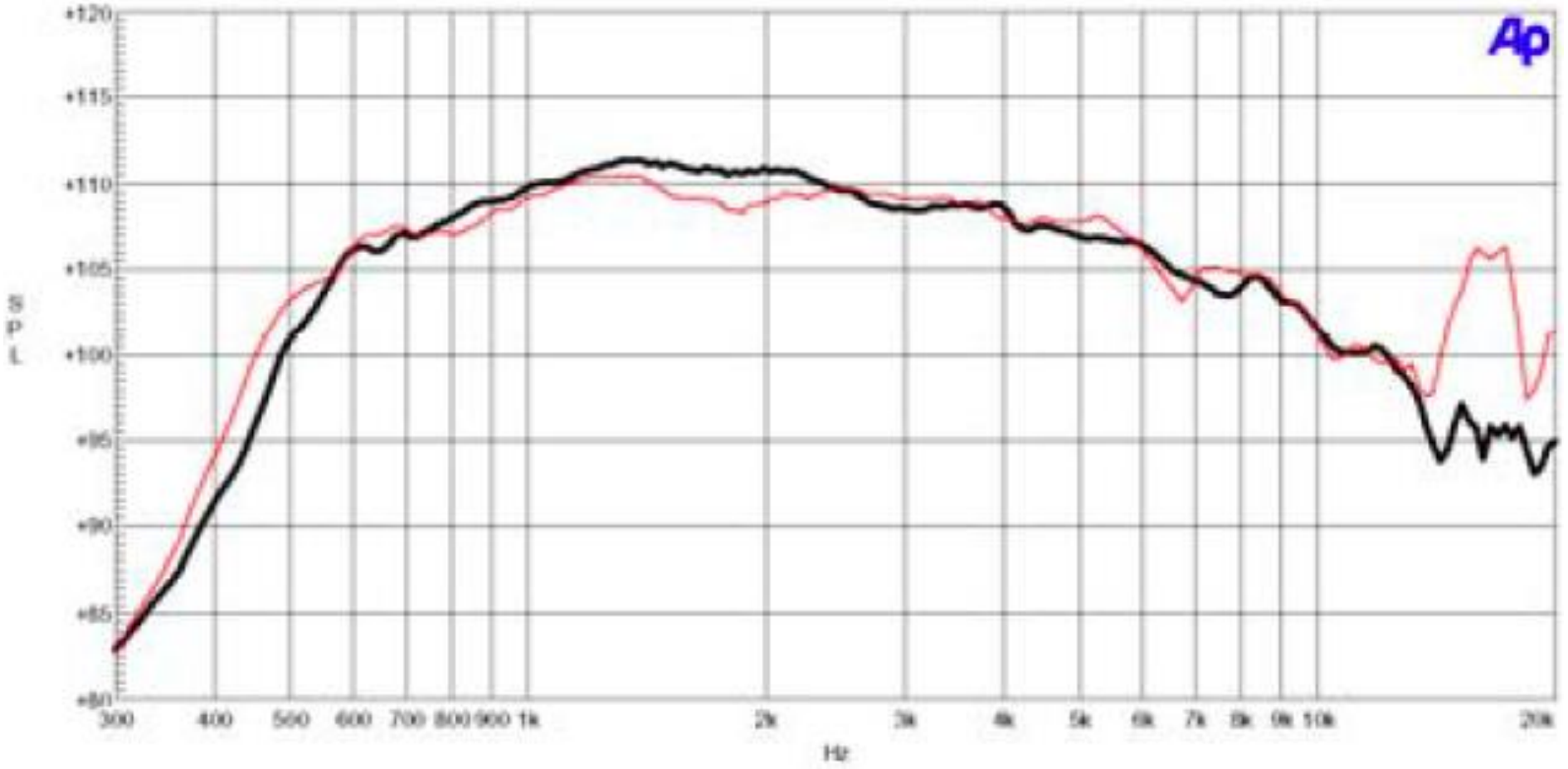


LDV map at 13kHz of 3” Nitrided diaphragm

Titanio vs Titanio+TiN depositato

Ti

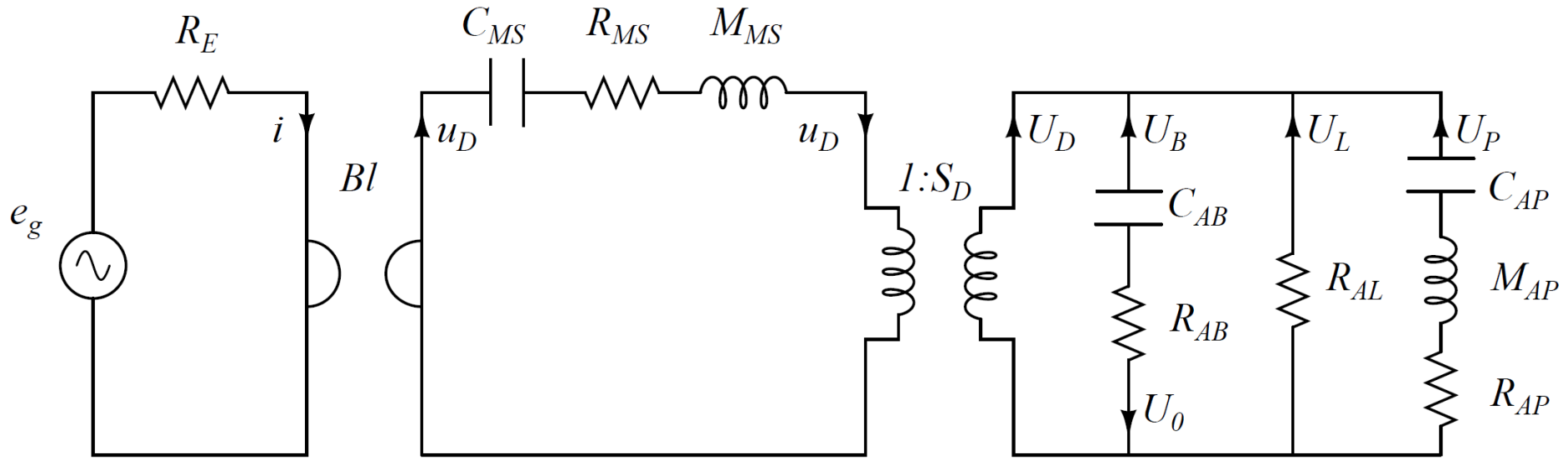
Ti + TiN



Evoluzione dei modelli teorici

Anni ’60 e ’70: modello di Thiele e Small (per bassi segnali)

L’insieme di altoparlante e cassa acustica è descritto come un circuito elettrico, caratterizzato da parametri *misurabili* che ne determinano la performance.
La progettazione dei due elementi deve avvenire *insieme.*
Thiele e Small forniscono per primi una base matematica solida ai progettisti.



Evoluzione dei modelli teorici

Anni ’60 e ’70: modello di Thiele e Small (per bassi segnali)

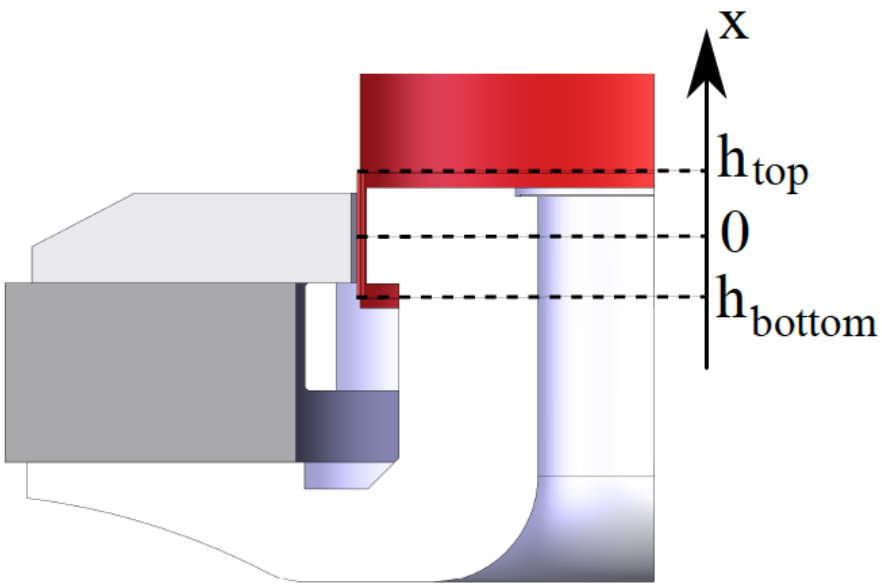
L’insieme di altoparlante e cassa acustica è descritto come un circuito elettrico, caratterizzato da parametri *misurabili* che ne determinano la performance.
La progettazione dei due elementi deve avvenire *insieme.*
Thiele e Small forniscono per primi una base matematica solida ai progettisti.

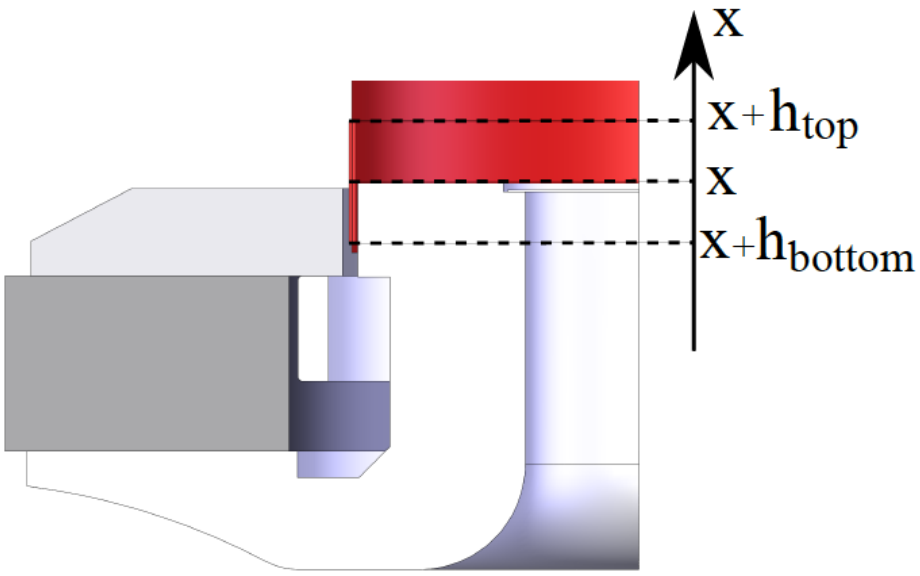
Anni ’90 e ’00: modello di Klippel (per alti segnali)

A grandi segnali, la membrana dell’altoparlante compie grandi escursioni ed i parametri dell’altoparlante non sono costanti, ma variano con lo stimolo, con la posizione della bobina, con la temperatura, con la storia precedente, ...
Klippel estende il modello presentando strumenti per quantificare e *misurare* le *non linearità* del sistema, permettendo ai progettisti di migliorare i prodotti.

Parametri dipendenti dalla posizione: fattore di forza del motore Bl(x)

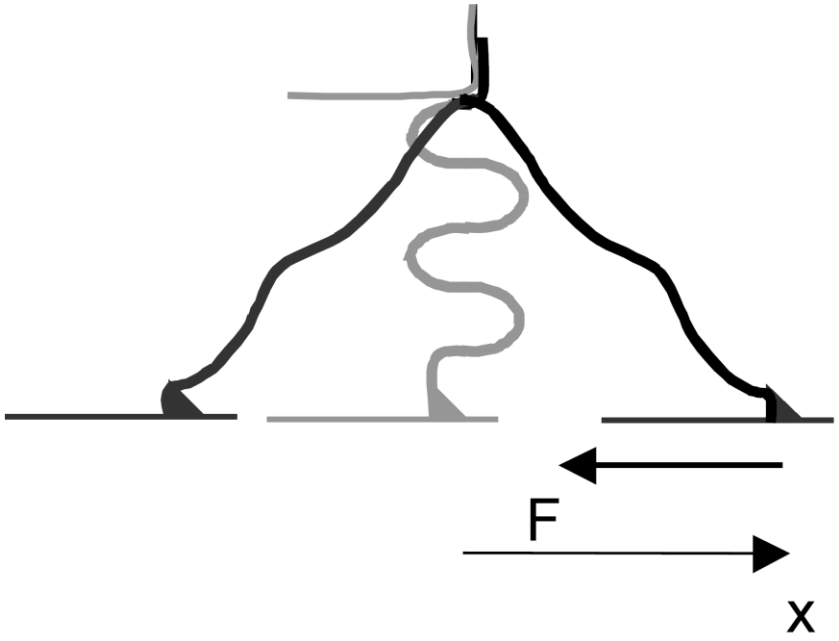
La forza del motore dipende dalla posizione della bobina, in quanto essa intercetta il campo magnetico sempre meno via via che si allontana dalla posizione di equilibrio.

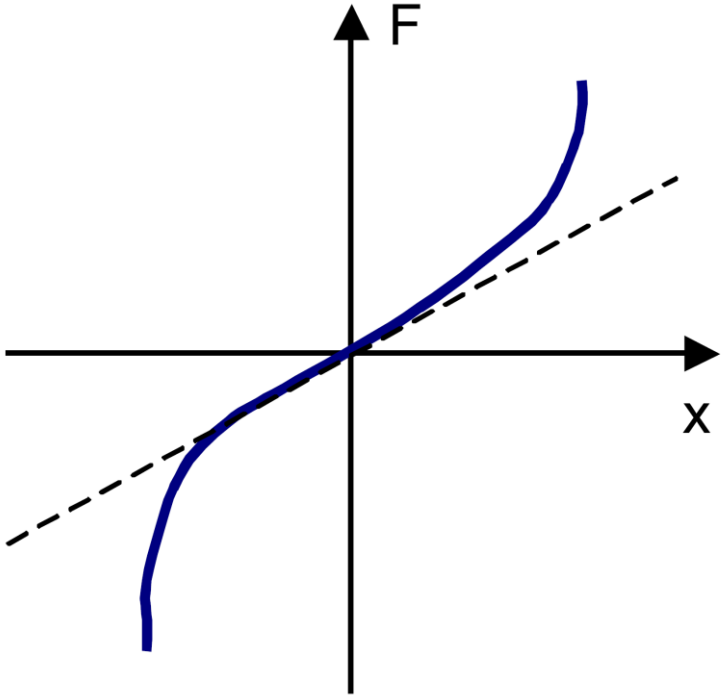




Parametri dipendenti dalla posizione: rigidezza delle sospensione Kms(x)

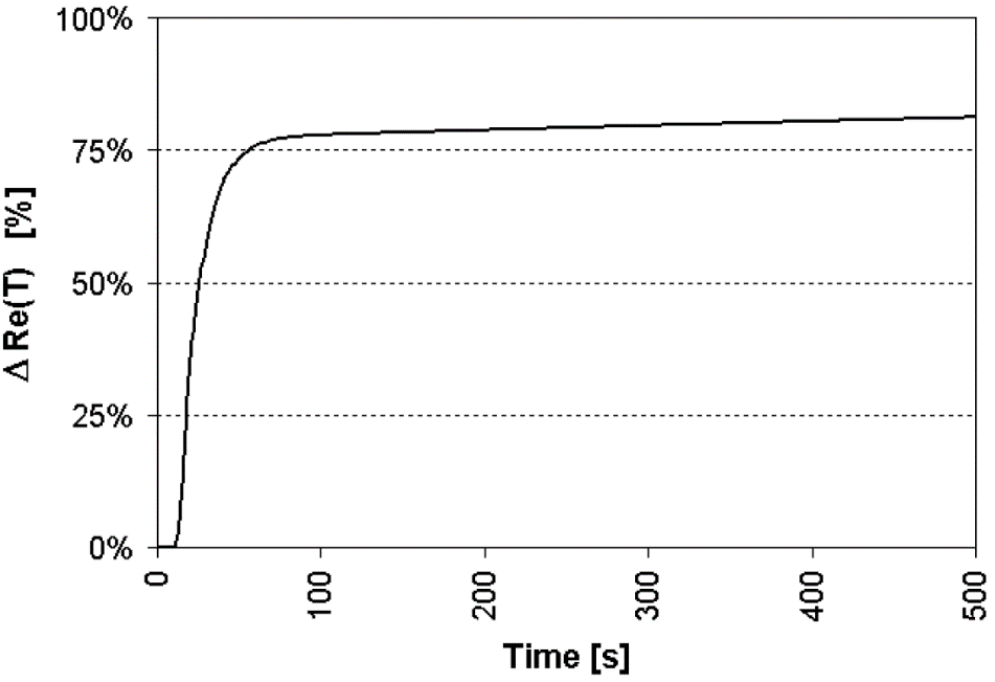
La capacità del materiale delle sospensioni elastiche di estendersi diminuisce all'aumentare della deformazione:
la rigidezza della "molla" delle sospensioni dipende dalla deformazione.

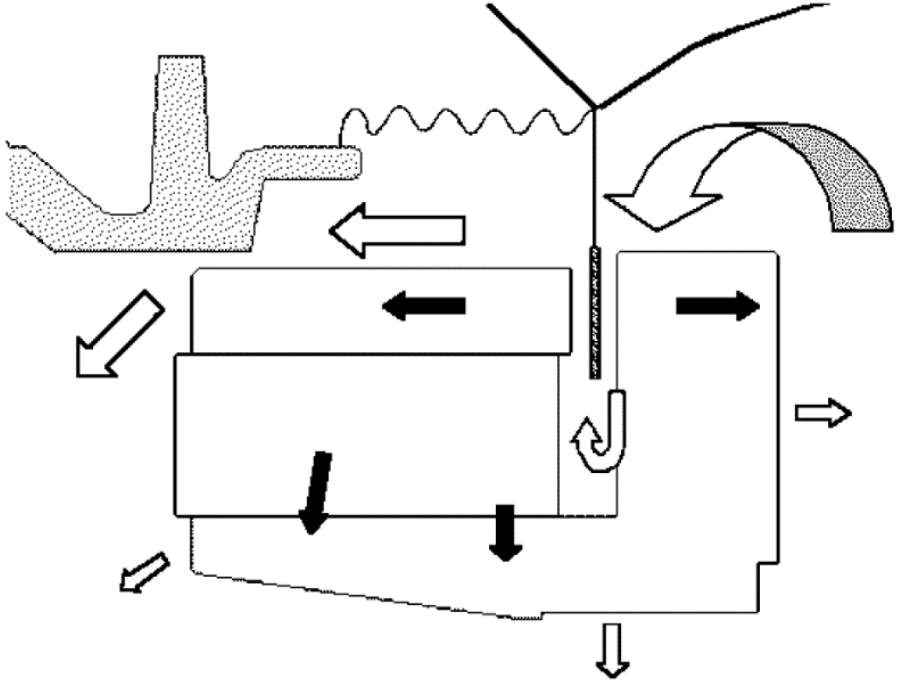




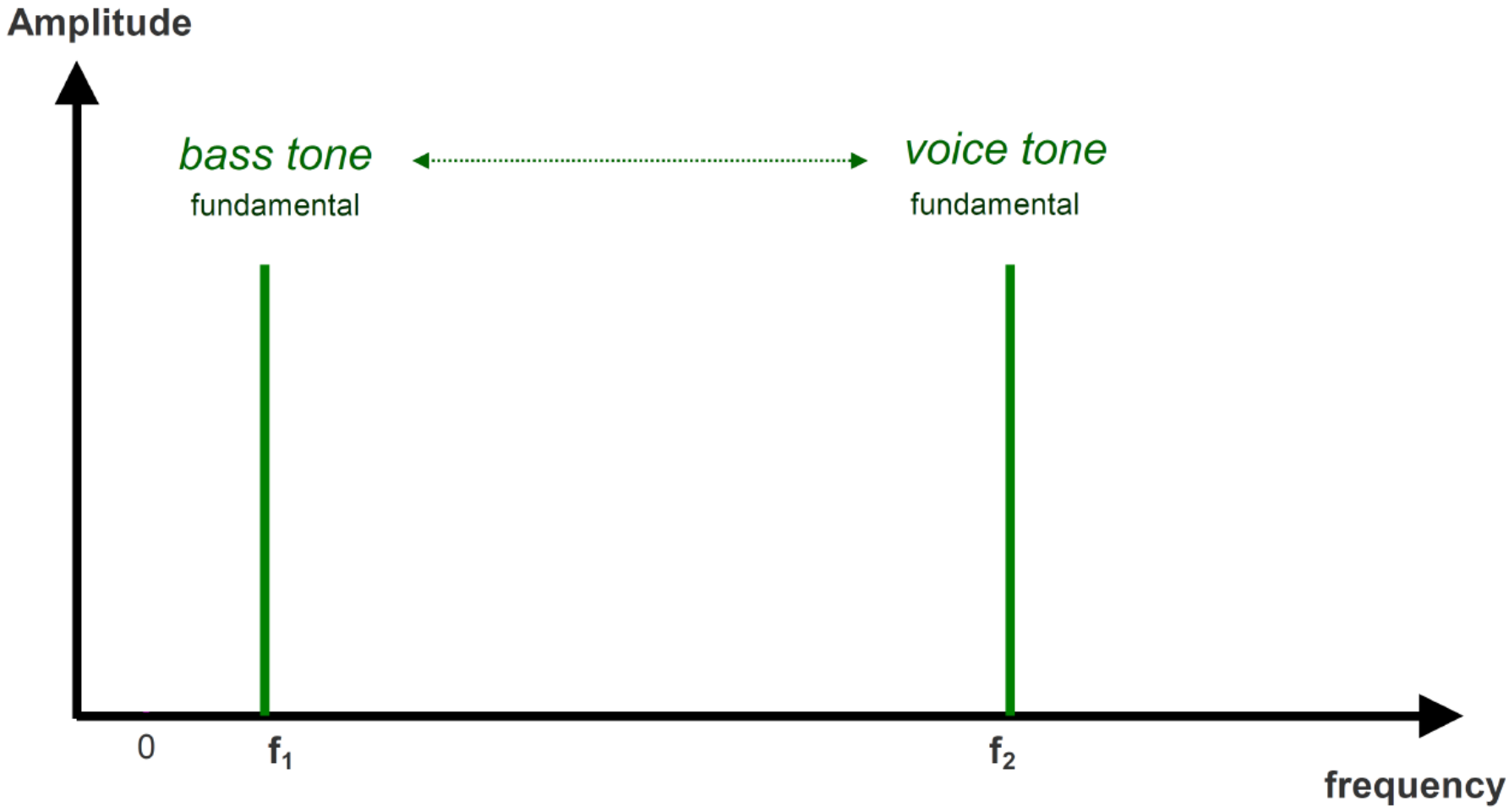
L’elefante nella stanza: la dipendenza dalla temperatura

Molta della potenza elettrica si dissipa sulla bobina per effetto Joule, facendone aumentare notevolmente la temperatura e la resistenza. Le parti intorno si scaldano e le prestazioni dell’altoparlante variano.

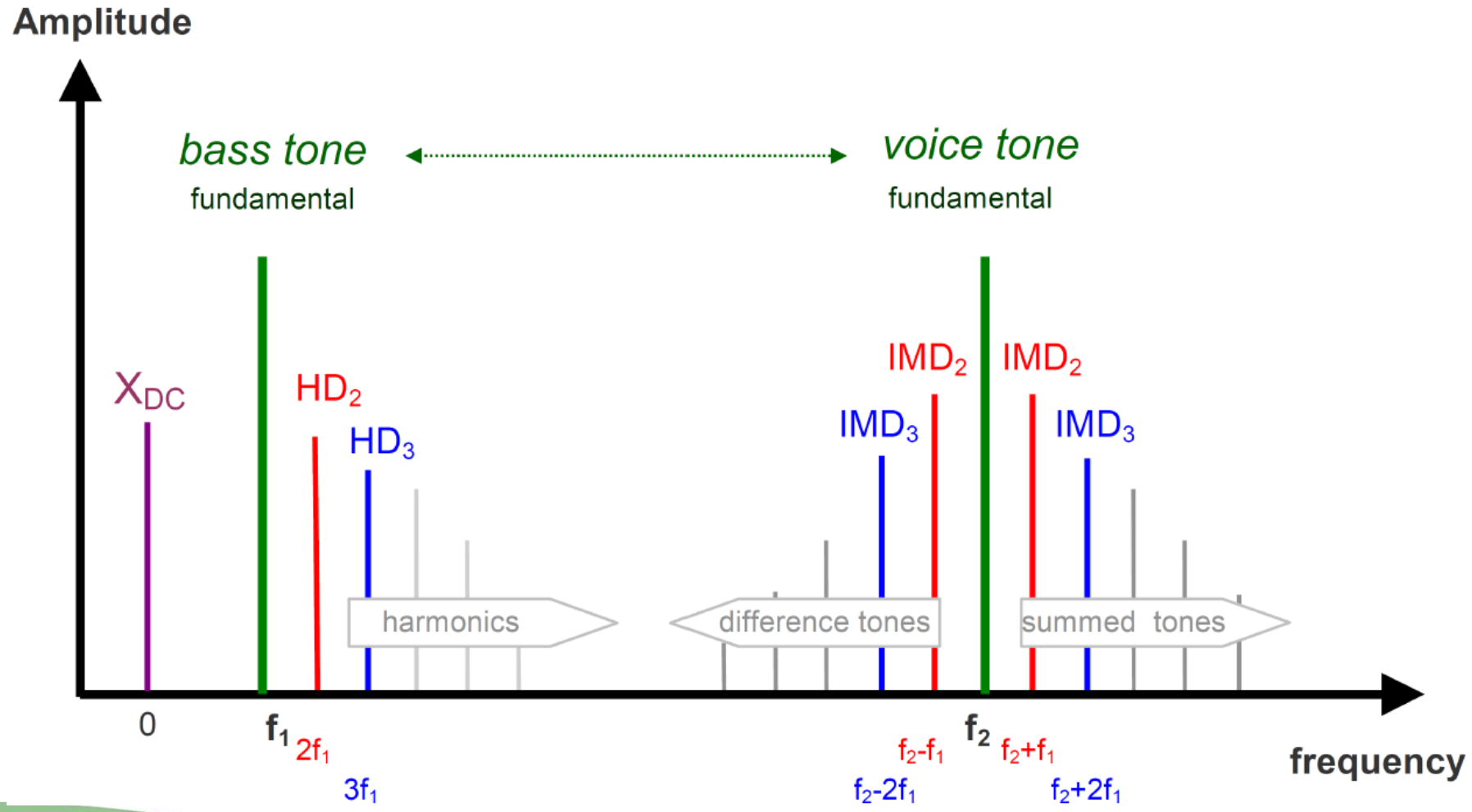




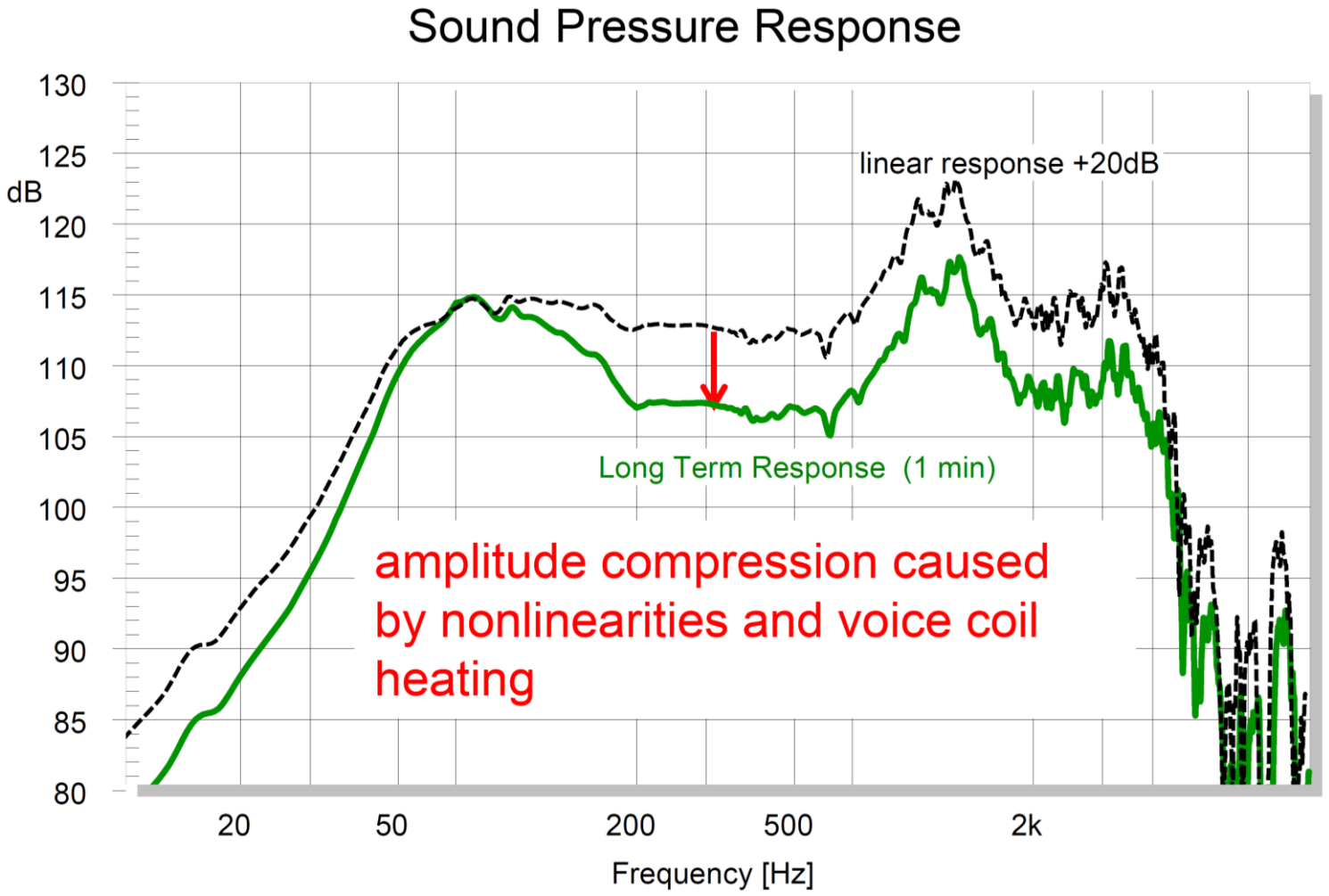
Le conseguenze delle non linearità: distorsioni nella pressione sonora



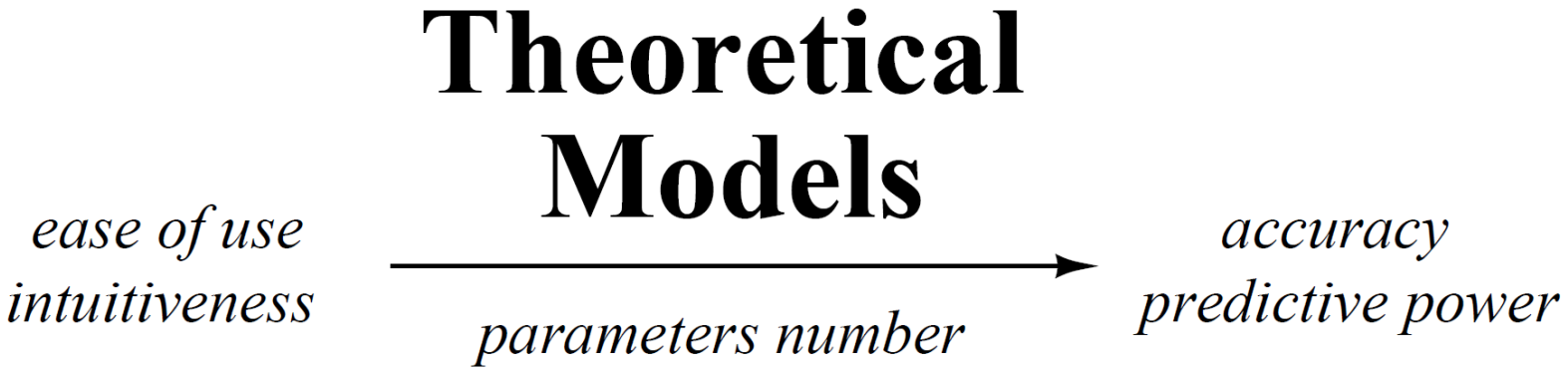
Le conseguenze delle non linearità: distorsioni nella pressione sonora



Le conseguenze delle non linearità: la Power Compression



Il giusto compromesso

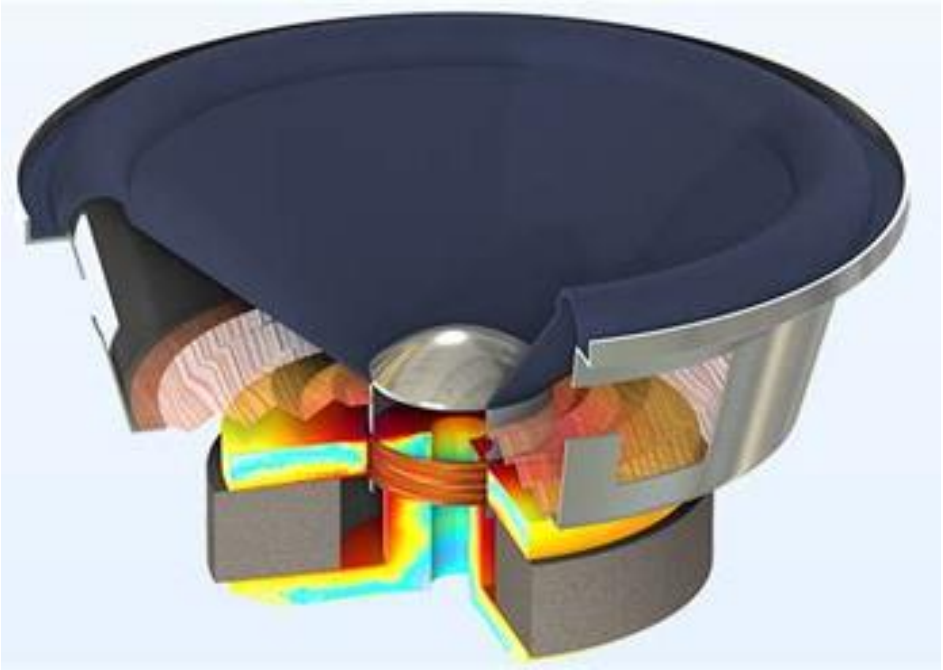


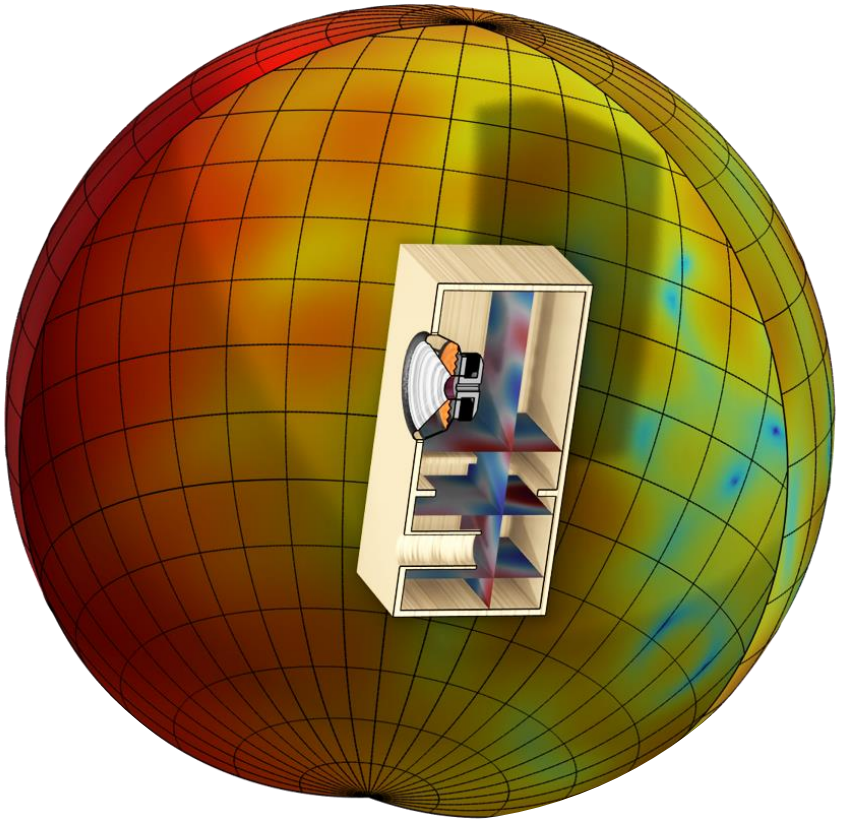
- Descrizione delle caratteristiche principali del sistema
- Stima della performance generale
- Immediata correlazione causa/effetto
- Utili nella prima parte della progettazione
- Calcoli semplici e veloci

- Descrizione dettagliata del sistema e dei suoi componenti
- Identificazione e correzione di specifici problemi
- Ottimizzazione delle prestazioni
- Sono richiesti dati aggiuntivi!

Metodi di progettazione evoluti: simulazioni FEM

I metodi di simulazione a elementi finiti (FEM) permettono di analizzare sistemi molto complessi con alto grado di dettaglio, dando la possibilità di compiere “esperimenti pensati”, evidenziando o separando gli effetti.





Simulazione del profilo del fattore di forza

Coil internal diameter =	49,8	mm
Bare wire diameter =	0,34	mm
Wire material =	Rame	
GRADE 1 / GRADE 2		
Winding height =	20	mm
Layers number =	2	
Split height =	0	mm
Former thickness =	0,15	mm

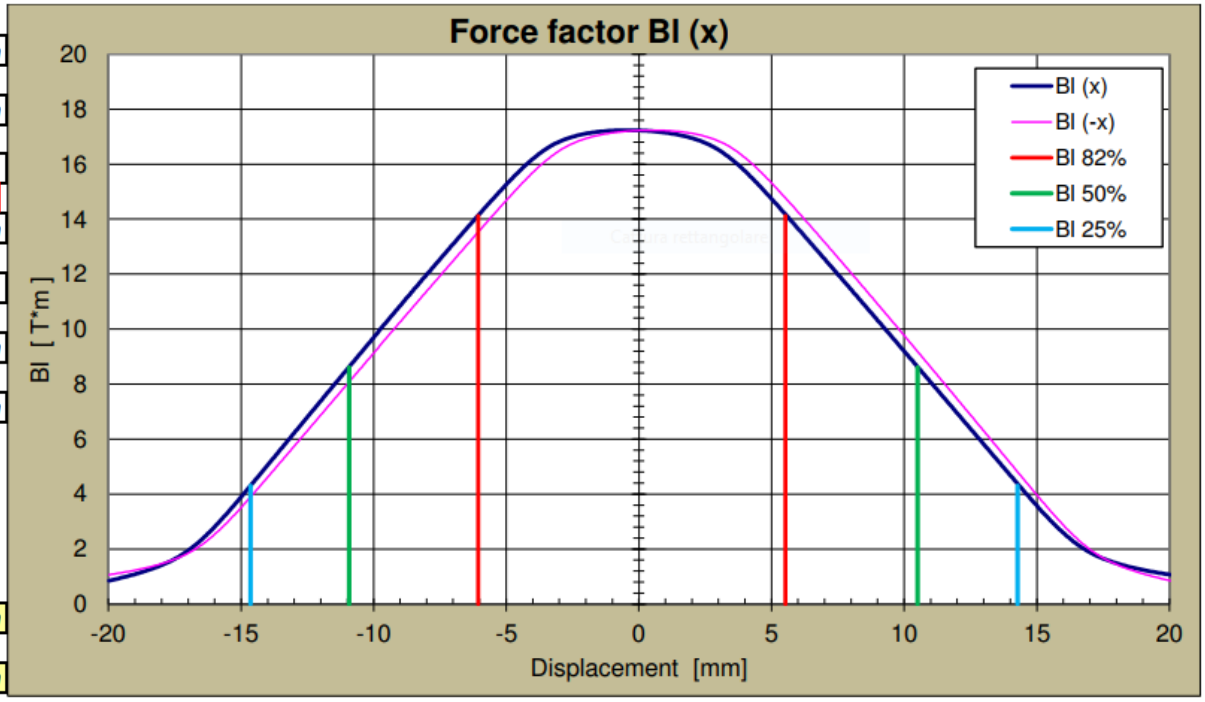
Bl(0) = 17,23 T·m

Check if DCD ☐

Bl_max = 17,24 T·m

position: -0,42 mm

Coil external diameter =	51,57	mm
Coil average diameter =	50,69	mm
Wire external diameter =	0,3682	mm
Turns number =	108,6	
DC Resistance =	3,277	Ω
Coil mass =	14,042	g
Coil length =	17,300	m
Motor strength (Bl^2/Re) =	90,56	kg/s



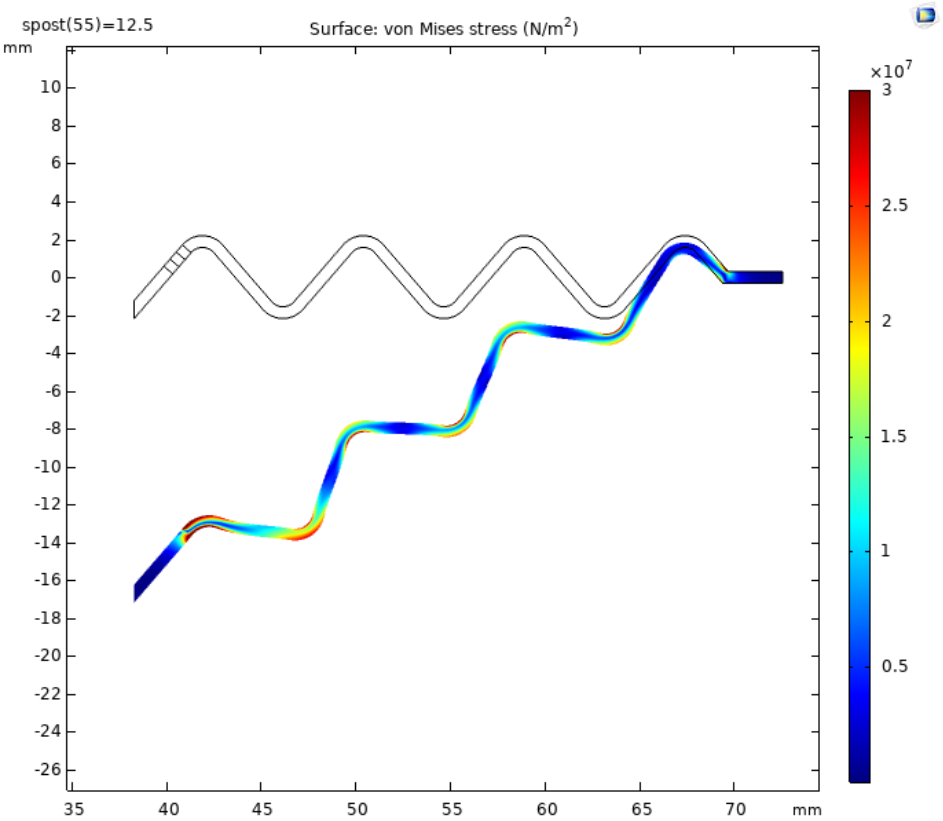
Added mass =	100	g
Resonance frequency =	50	Hz
Nominal Impedance Znom =	4	Ω
Speaker diameter (inches) =	15"	
R_{MS} =	3	N*s/m

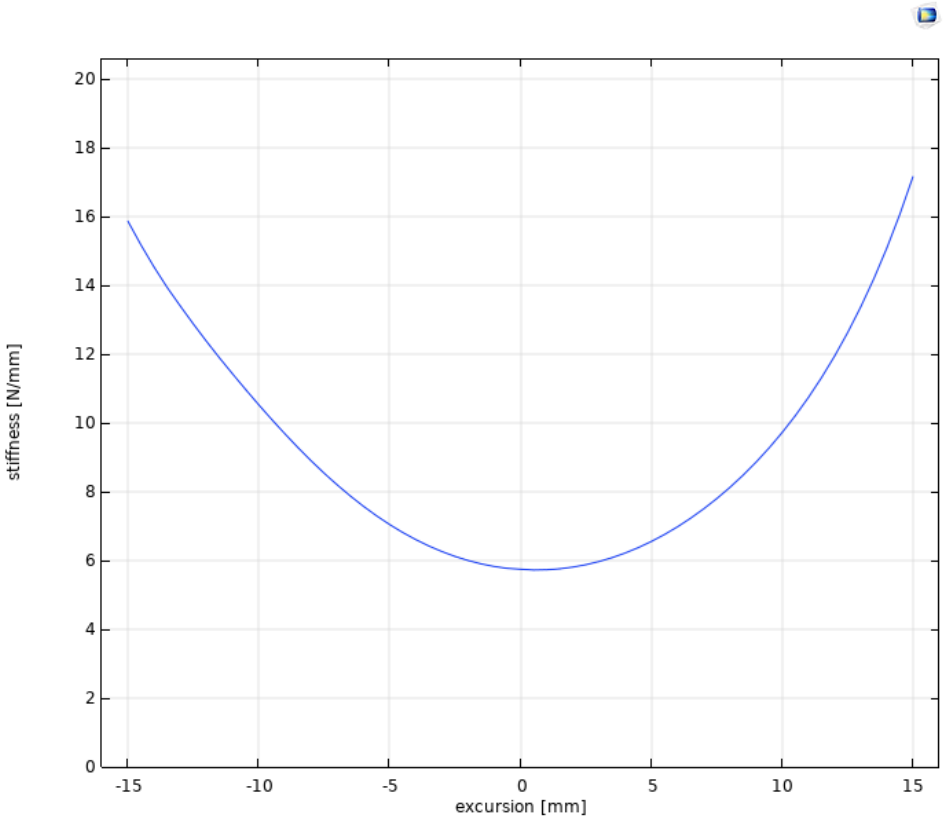
Total mass =	114,042	g
Compliance =	88,85	µm/N
Equivalent volume =	92,1	l
Effiiciency η_0 =	2,84%	%
SPL (1 W on Re) =	96,70	dB SPL
SPL (1 W on Znom) =	97,56	dB SPL
Q_{ES} =	0,3956	
Q_{MS} =	11,9424	
Q_{TS} =	0,3829	

Higher than...		From (mm)	To (mm)		Xbl (± mm)	Offset (mm)
Bl_82% =	14,13	-6,1	5,5		5,8	-0,27
Bl_50% =	8,61	-10,9	10,5		10,7	-0,21
Bl_25% =	4,31	-14,6	14,3		14,5	-0,18

Insert Speaker Model

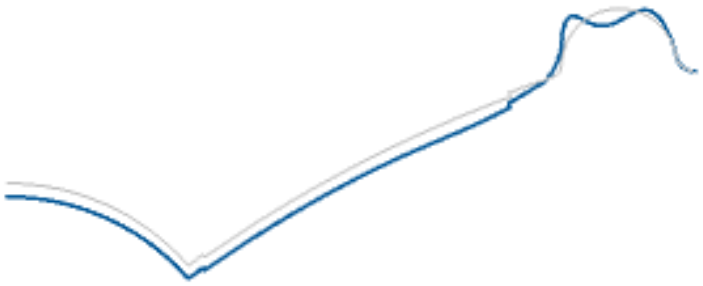
Simulazione del profilo di rigidezza delle sospensioni elastiche



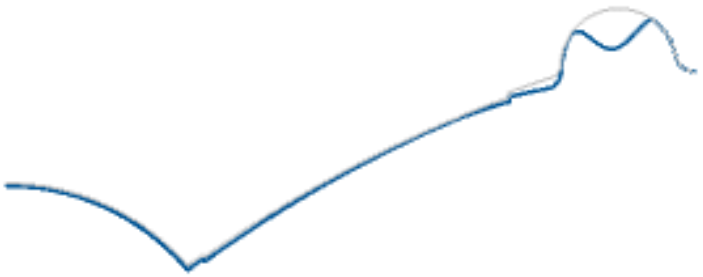


Phase Decomposition

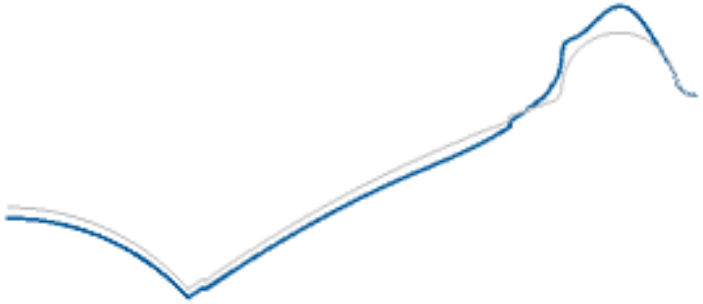
- Total (axial displacement only)



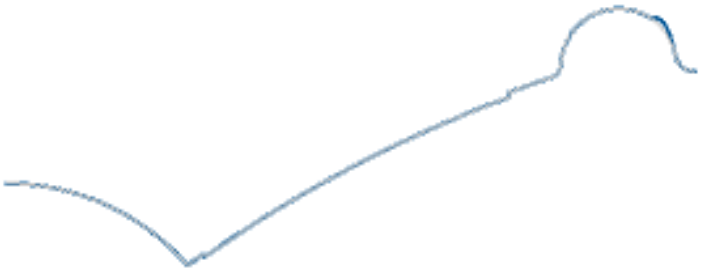
- In-Phase



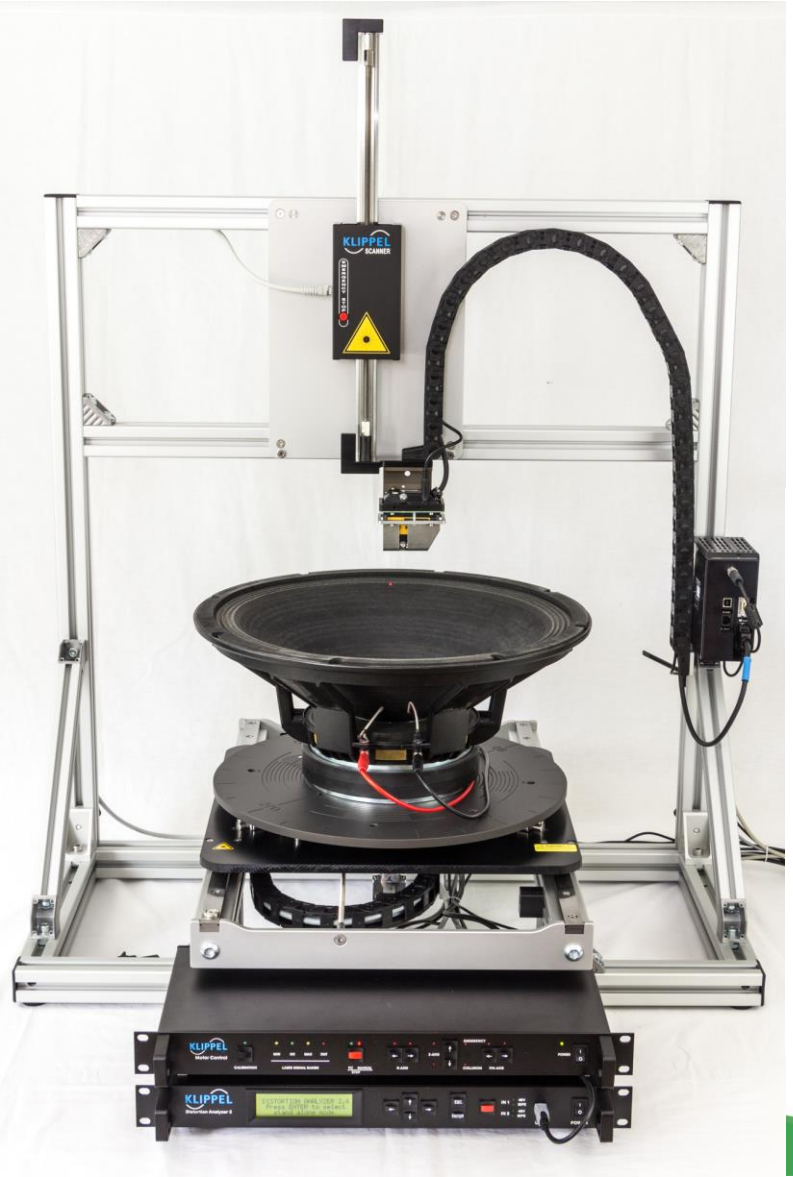
- Quadrature



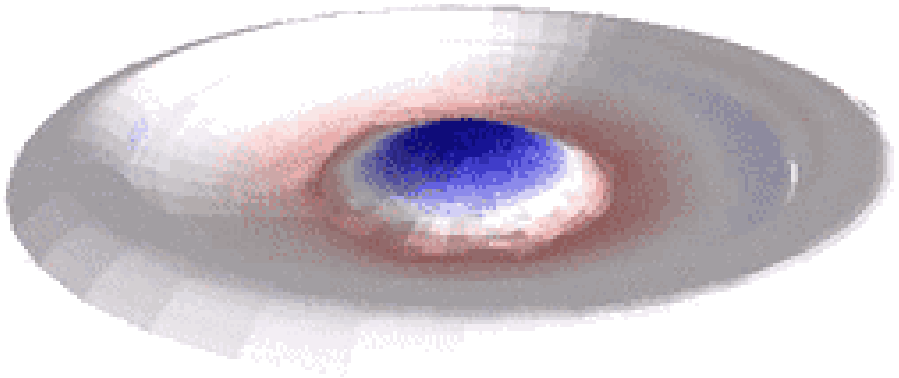
- Anti-Phase



Phase Decomposition nella realtà: scansione del movimento di membrane



Con particolari strumenti è possibile scansionare il movimento del diaframma alle varie frequenze, per comprendere quali parti di esso si muovano in fase, contribuendo all'emissione complessiva, e quali in controfase, sottraendo energia.



Sviluppi futuri e nuove frontiere

Quali sviluppi futuri ci possiamo attendere?

- Altoparlanti efficienti per “suonare forte” anche con poca potenza: prodotti portatili a batteria, alimentati POE (Power Over Ethernet), ...
- Riduzione di ingombri e pesi:
  - alta densità di altoparlanti per miglior controllo sulla direttività in prodotti Line Array, Immersive Audio, Sound Field Synthesis
  - ridotti tempi e costi di montaggio/smontaggio impianti per live
- Nuovi materiali per ottenere il ”sacro Graal”:
  - magneti energetici (e di sicuro approvvigionamento)
  - materiali più leggeri, più rigidi e più smorzati per estendere la banda e ridurre le risonanze

Sviluppi futuri e nuove frontiere

- Integrazione di sensoristica ed elettronica nell'altoparlante
  - controllo del comportamento durante il funzionamento
  - correzione dinamica e riduzione delle distorsioni
  - stabilizzazione meccanica
  - protezione da sovraescursione e surriscaldamento
- Tecniche di progettazione
  - simulazione multifisica
  - ottimizzazione delle geometrie
  - approfondimento dei fenomeni fisici all'interno dei componenti, estensione della modellazione a nuovi fenomeni finora trascurati

Grazie per l'attenzione!

Filippo Bartolozzi
fbartolozzi@bcspeakers.com