

Akustické simulace v COMSOL Multiphysics



Matouš Lorenc
HUMUSOFT
lorenc@humusoft.cz
+420 284 011 749

The COMSOL® Software Product Suite

COMSOL MULTIPHYSICS®

The platform product. Understand, predict, and optimize physics-based designs and processes with numerical simulation.

DEPLOYMENT PRODUCTS

- COMSOL Compiler™
- COMSOL Server™

Distribute simulation applications created with COMSOL Multiphysics.

ADD-ON PRODUCTS

ELECTROMAGNETICS

- AC/DC Module
- RF Module
- Wave Optics Module
- Ray Optics Module
- Plasma Module
- Semiconductor Module

FLUID & HEAT

- CFD Module
 - Mixer Module
 - Polymer Flow Module
 - Microfluidics Module
 - Porous Media Flow Module
 - Subsurface Flow Module
- Pipe Flow Module
- Molecular Flow Module
- Metal Processing Module
- Heat Transfer Module

STRUCTURAL & ACOUSTICS

- Structural Mechanics Module
 - Nonlinear Structural Materials Module
 - Composite Materials Module
 - Geomechanics Module
 - Fatigue Module
 - Rotordynamics Module
 - Multibody Dynamics Module
- MEMS Module
- Acoustics Module

CHEMICAL

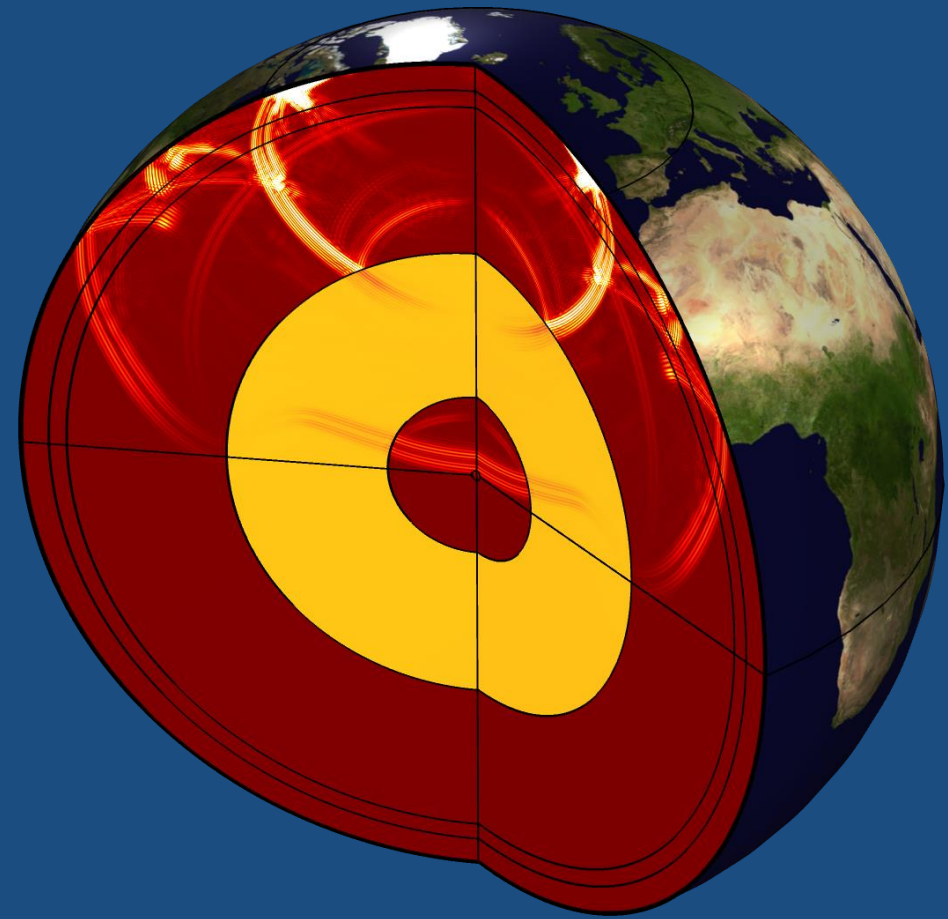
- Chemical Reaction Engineering Module
- Battery Design Module
- Fuel Cell & Electrolyzer Module
- Electrodeposition Module
- Corrosion Module
- Electrochemistry Module

MULTIPURPOSE

- Optimization Module
- Material Library
- Particle Tracing Module
- Liquid & Gas Properties Module

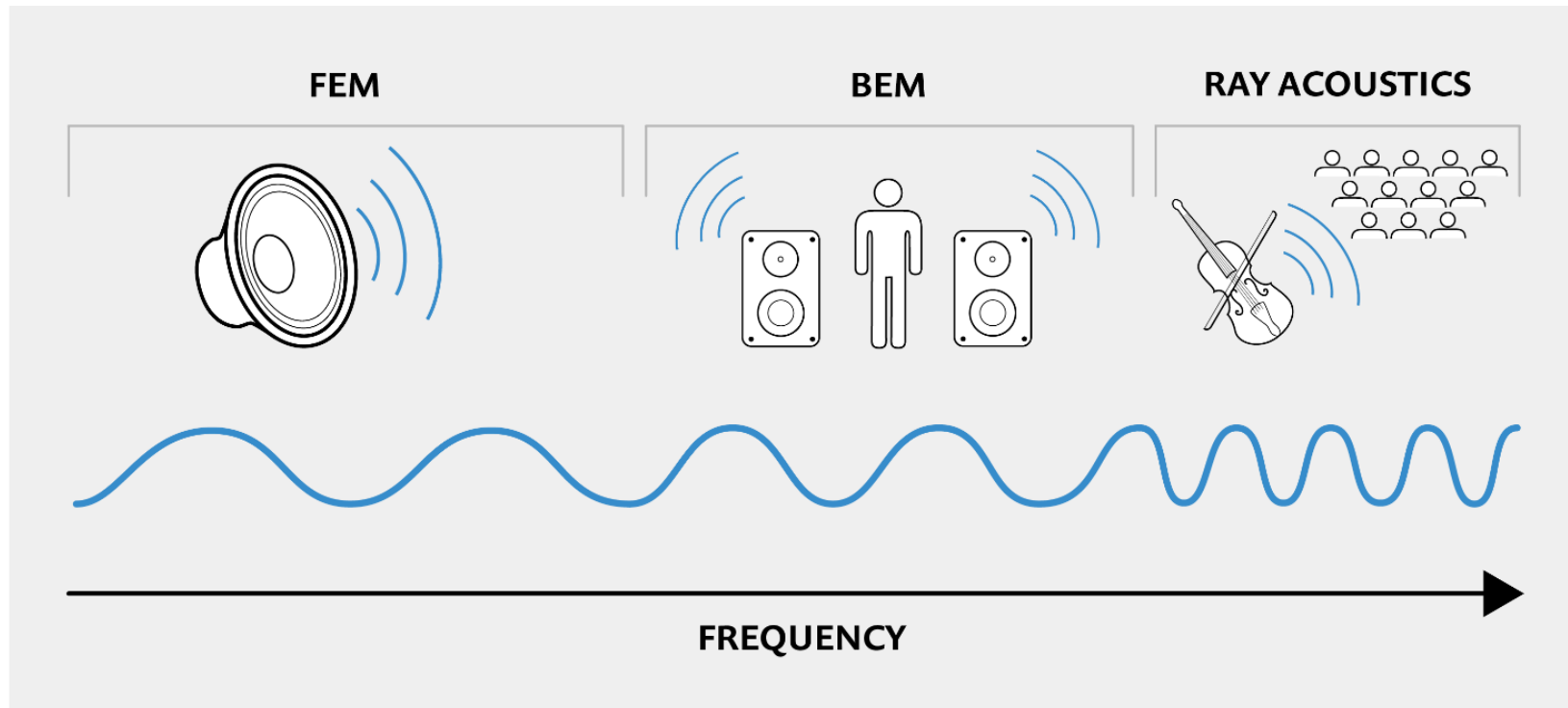
INTERFACING

- LiveLink™ for MATLAB®
- LiveLink™ for Simulink®
- LiveLink™ for Excel®
- CAD Import Module
- Design Module
- ECAD Import Module
- LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- LiveLink™ for Inventor®
- LiveLink™ for AutoCAD®
- LiveLink™ for Revit®
- LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- LiveLink™ for Solid Edge®
- File Import for CATIA® V5



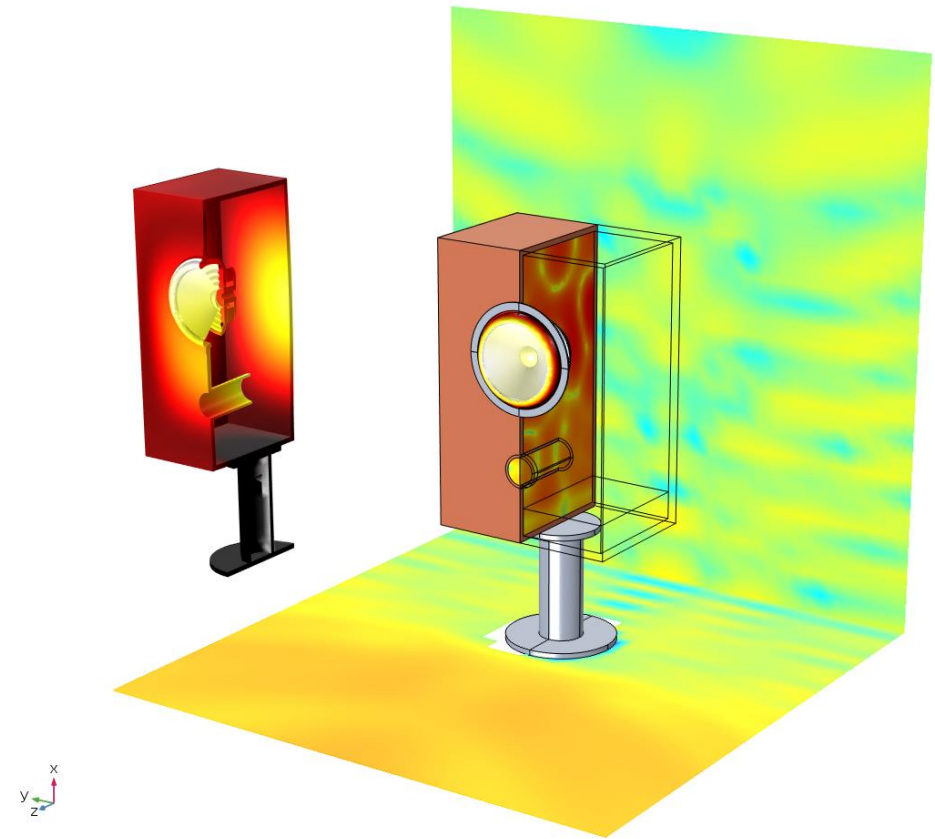
Představení Acoustics Module

Kompletní spektrum nástrojů



Acoustics Module

- Víceúčelový nástroj pro simulace akustiky
 - All-in-one
- Multifyzikální simulace:
 - Vibroakustika (acoustic-structure)
 - Piezoelektrické materiály
 - Aeroakustika (convected acoustics)
 - Porézní materiály (Biot's equations)
 - Elektroakustika (fully coupled or lumped)
- Široké spektrum implementovaných metod:
 - Finite elements (FEM)
 - Boundary elements (BEM)
 - Hybrid FEM-BEM modeling
 - Ray tracing
 - Discontinuous Galerkin (dG-FEM), time explicit



Skříň reproduktoru kombinující FEM vibroakustický výpočet s BEM

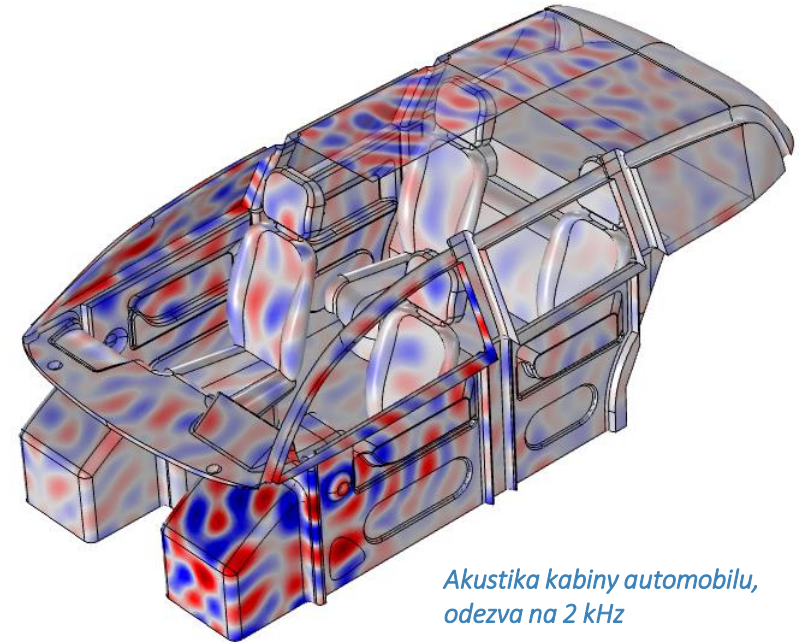
Aplikace ve vědě i v průmyslu

- Automotive

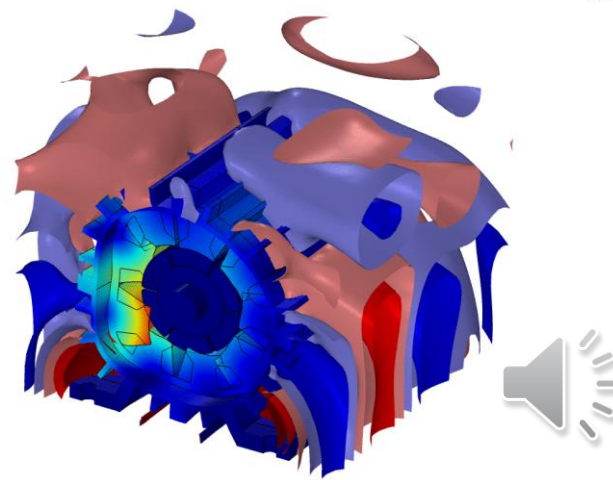
- Výfuky a filtry pevných částic
- Generovaný zvuk
- Zvuková izolace
- Ozvučení interiéru
- Tlumící prvky

- Aerospace

- Hluk z motorů
- Analýza vibrací
- FSI ve frekvenční doméně
- Nedestruktivní testování (NDT)



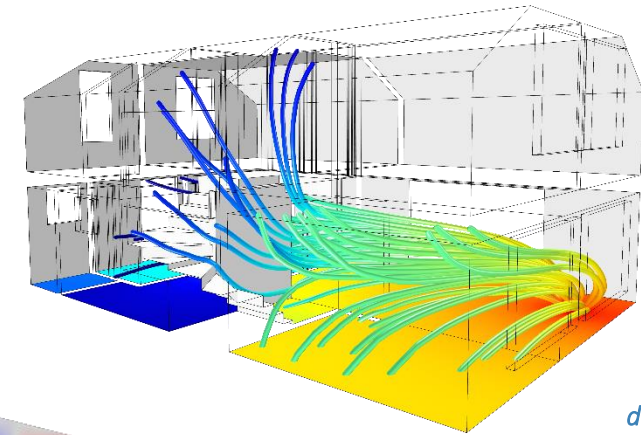
*Akustika kabiny automobilu,
odezva na 2 kHz*



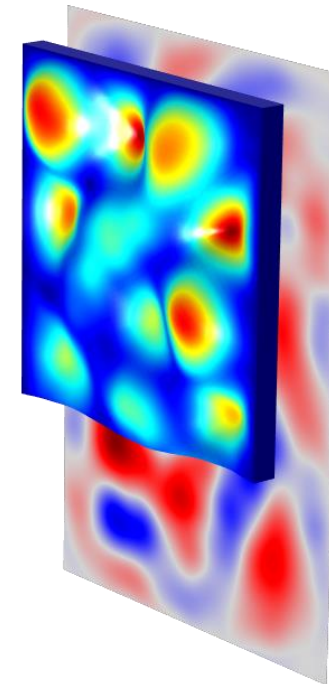
Náběh elektromotoru

Aplikace ve vědě i v průmyslu

- Stavitelství a architektura
 - Zvuková izolace
 - Rozptyl a difuze akustického pole
 - Akustický přenos
 - Analýza vibrací
 - HVAC zvuky z potrubí (pipe acoustics)
 - Porézní a vláknité materiály
 - Biot a Biot-Allard
- Akustika pokoje
 - Měření dozvuku
 - Impulzní odezva
 - Paprsková akustika
 - Akustická pole



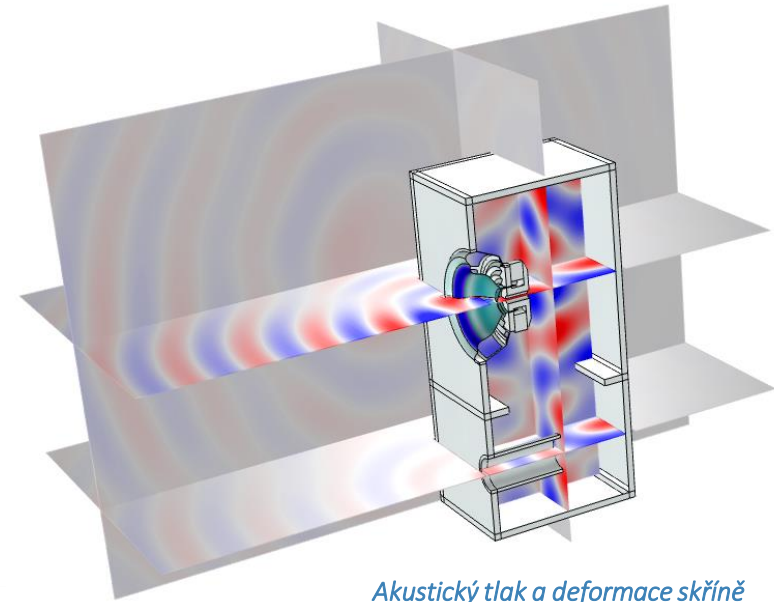
Akustika uvnitř dvouposchoďové budovy



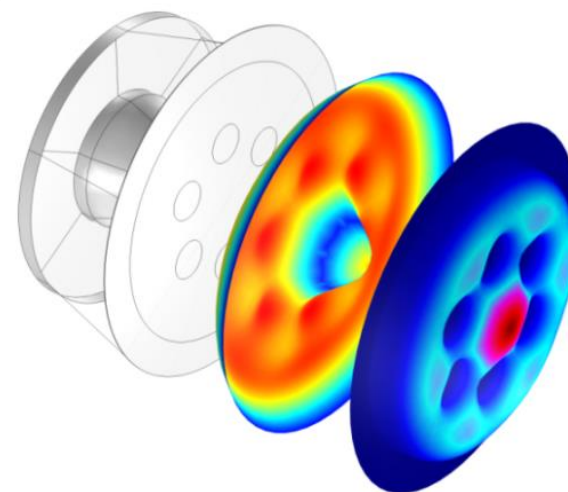
Přenos zvuku skrz betonovou zeď

Aplikace ve vědě i v průmyslu

- Návrh akustických převodníků
 - Mikrofony
 - Reprodukory
 - Piezo-převodníky
 - MEMS převodníky
- Chytré telefony a telekomunikační přístroje
 - Umístění akustických prvků
 - Optimalizace odezvy
 - Analýza zkreslení signálu
- Sluchátka
 - Analýza směrovosti
 - Odezva



Akustický tlak a deformace skříně reproduktoru při 2,5 kHz

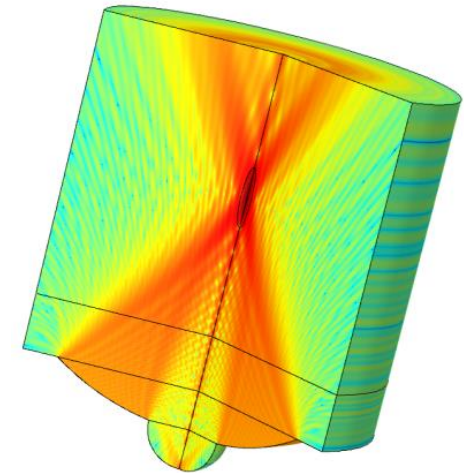


Brüel and Kjær typ 4134 mikrofon. Model z vlastnictví: Brüel and Kjær

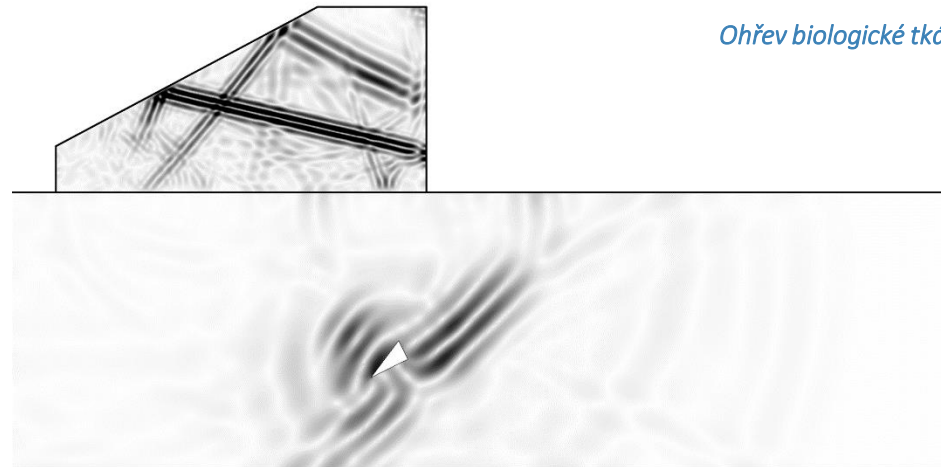
Aplikace ve vědě i v průmyslu

▪ Ultrazvuk

- Fokuzovaný ultrazvuk (HIFU)
- Diagnostický ultrazvuk
- Akustika v tkáních a ohřev
- Nedeštruktivní testování (NDT)
- Nelineární jevy



Ohřev biologické tkáně fokuzovaným ultrazvukem

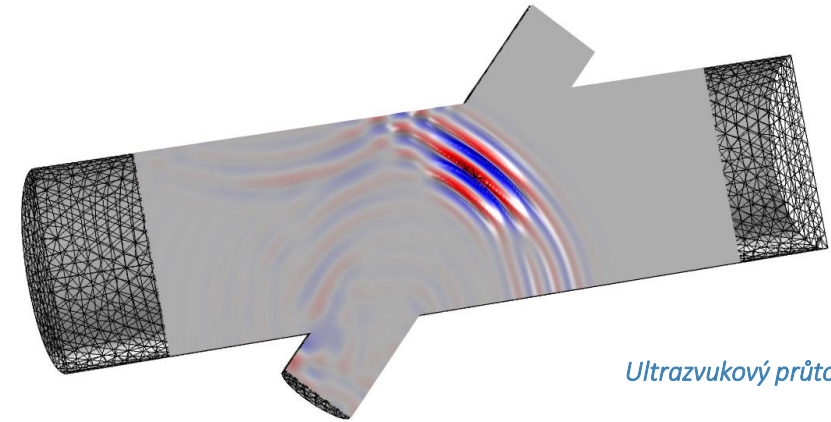


Nedeštruktivní testování nosníku (NDT)

Aplikace ve vědě i v průmyslu

■ Průtokoměry

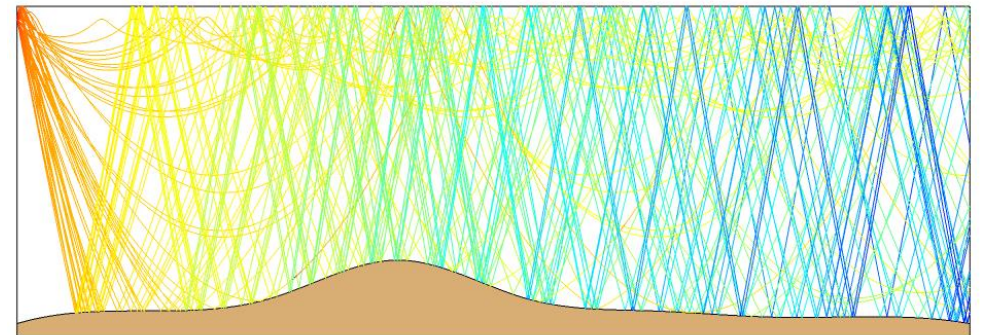
- Ultrazvukový průtokoměr
- Coriolisův průtokoměr
- Simulace vysílače a přijímače



Ultrazvukový průtokoměr

■ Podvodní akustika

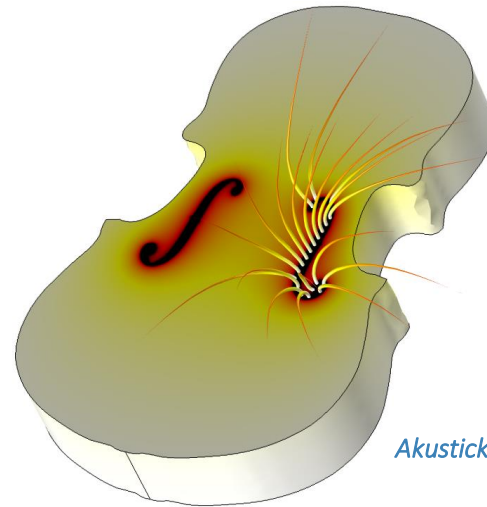
- Ray acoustics pro velké domény
- Návrh sonarů
- Minimalizace akustické stopy



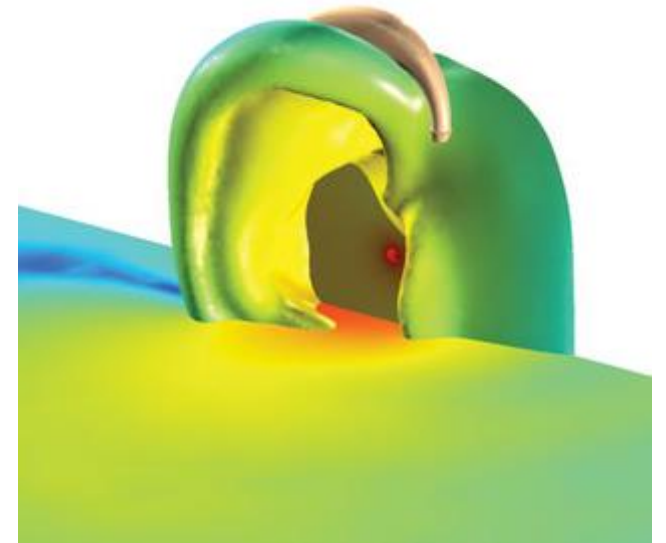
Podvodní trasování akustických paprsků

Aplikace ve vědě i v průmyslu

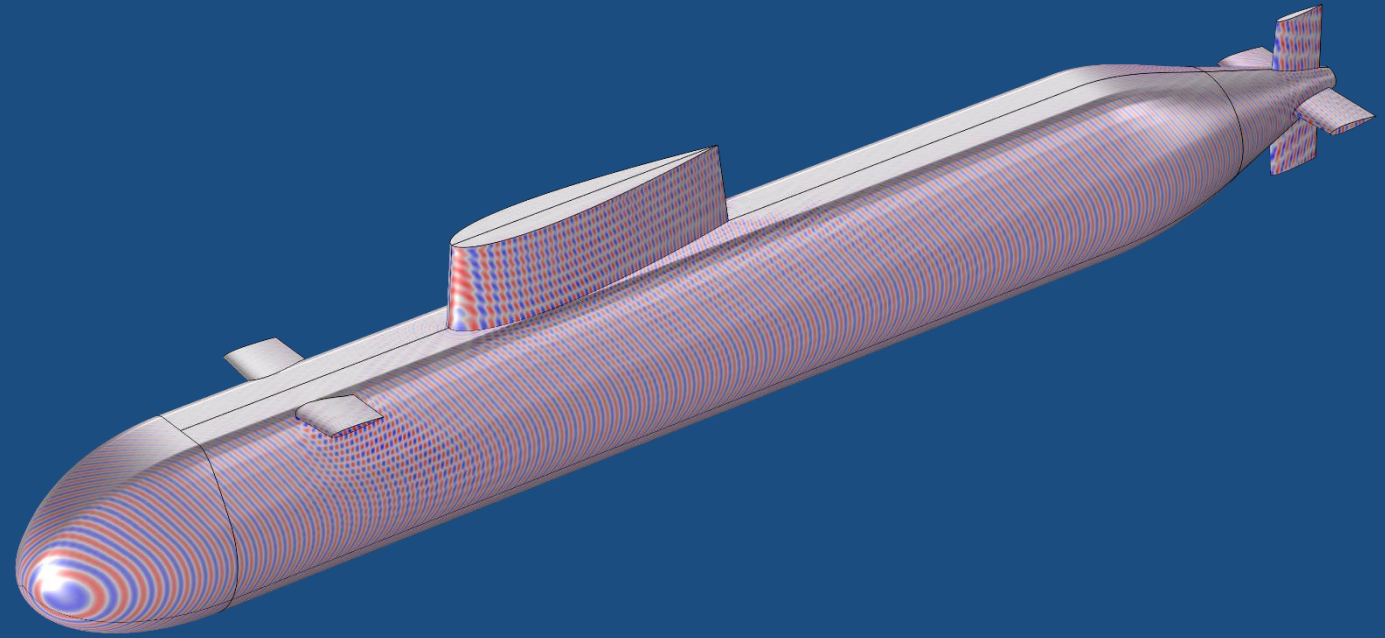
- Sluchové pomůcky
 - Přenosová funkce
 - Směrová analýza
 - Systémová odezva
- Hudební nástroje
- Pokročilé aplikace
 - Foto-/optoakustika
 - Termoakustické chlazení
 - Akusto-fluidika
 - Akustická radiace
 - Akustické streamování
 - Nestabilní spalování



Akustická studie violonciella



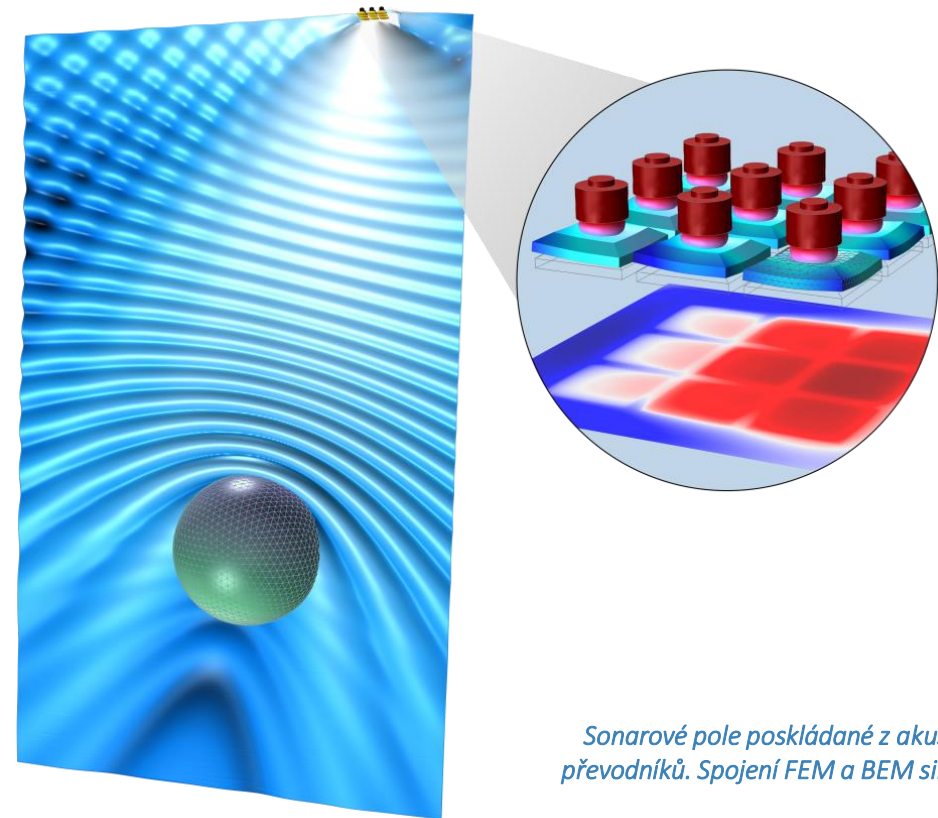
Hi-Fi naslouchátka, multifyzikální simulace. Model z vlastnictví: WIDEX A/S



Simulační nástroje pro akustiku

Výpočet akustického tlaku

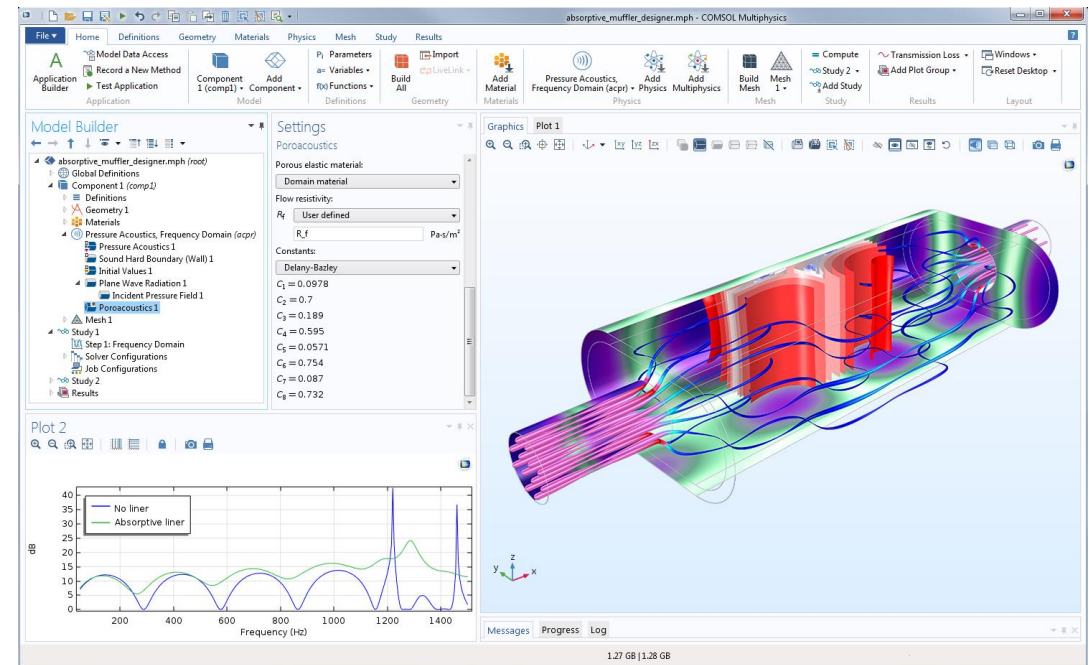
- Řešení skalární akustiky
 - Helmholtzova rovnice
 - Skalární vlnová rovnice
- Metoda konečných prvků (FEM)
 - Frekvenční doména
 - Analýza vlastních frekvencí
 - Časová doména
 - Modální analýza
- Metoda hraničních prvků (BEM)
 - Frekvenční doména
- Hybridní BEM-FEM přístup
 - Frekvenční doména
- Nespojité Galerkin (dG-FEM)
 - Časově explicitní řešení



Sonarové pole poskládané z akustických převodníků. Spojení FEM a BEM simulace.

Výpočet akustického tlaku: Materiálové modely

- Akustický tlak v objemu
 - Uživatelem definovaný útlum
 - Útlum v atmosféře
 - Útlum v oceánu
- Nelineární akustický materiálový model Westervelt
 - Výpočet v časové doméně
- Poroakustický materiálový model
 - Definovaný Biotovými Parametry
 - Delany-Bazley-Miki modely
 - Johnson-Champoux-Allard (JCA)
 - A více
- Akustika ve štěrbinách
- Anizotropní materiálové modely



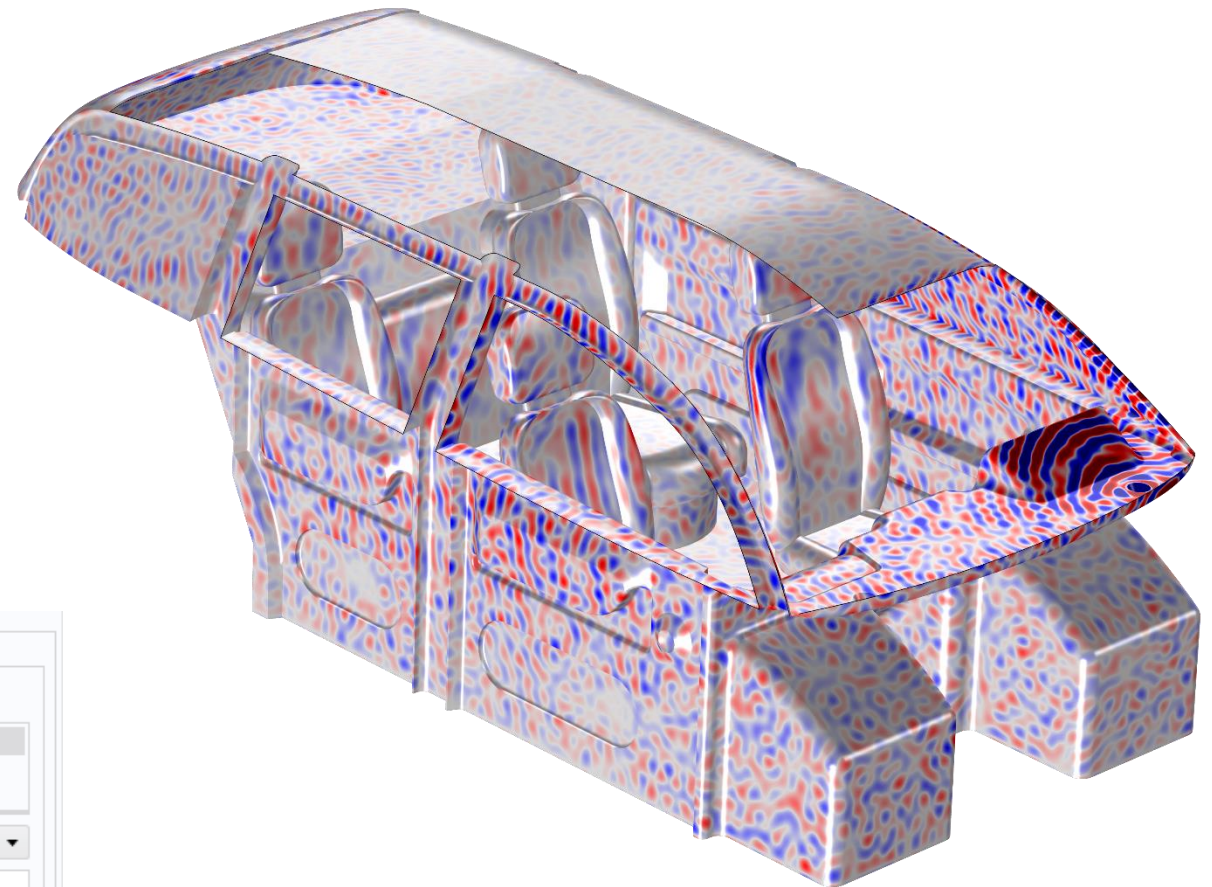
Výfuk s tlumivým nátěrem a porézní doménou.

Výpočet akustického tlaku: Řešiče pro objemné modely

- *Shifted Laplace* iterační řešič
 - Lepší konvergence při vyšších frekvencích
- *Domain Decomposition* iterační řešič
 - Pro distribuované výpočty na clustrech

<input checked="" type="checkbox"/>	Suggested Direct Solver (acpr)
▶ <input type="checkbox"/>	Suggested Iterative Solver (GMRES with GMG) (acpr)
▶ <input type="checkbox"/>	Suggested Iterative Solver (FGMRES with GMG) (acpr)
▶ <input checked="" type="checkbox"/>	Suggested Iterative Solver (Shifted Laplace) (acpr)
▶ <input type="checkbox"/>	Suggested Iterative Solver (Domain Decomposition) (acpr)

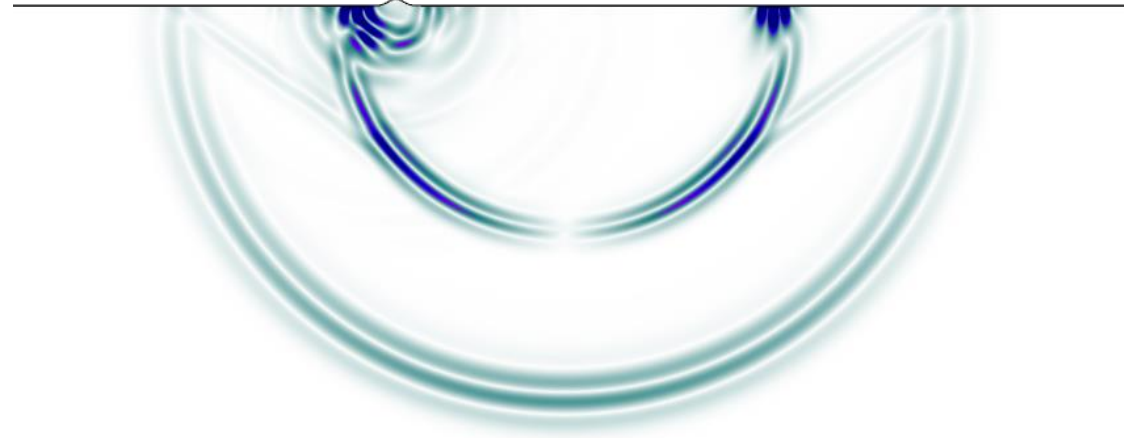
<input checked="" type="checkbox"/>	Prefer the free matrix format
<input checked="" type="checkbox"/>	Shifted Laplace contribution
Physics:	
Pressure Acoustics, Frequency Domain (acpr)	
Add weak contribution:	Automatic
Shift coefficient:	0.4
<input type="checkbox"/>	Keep generated weak contribution



Akustika v kabině automobilu při 7 kHz

Elastické vlny

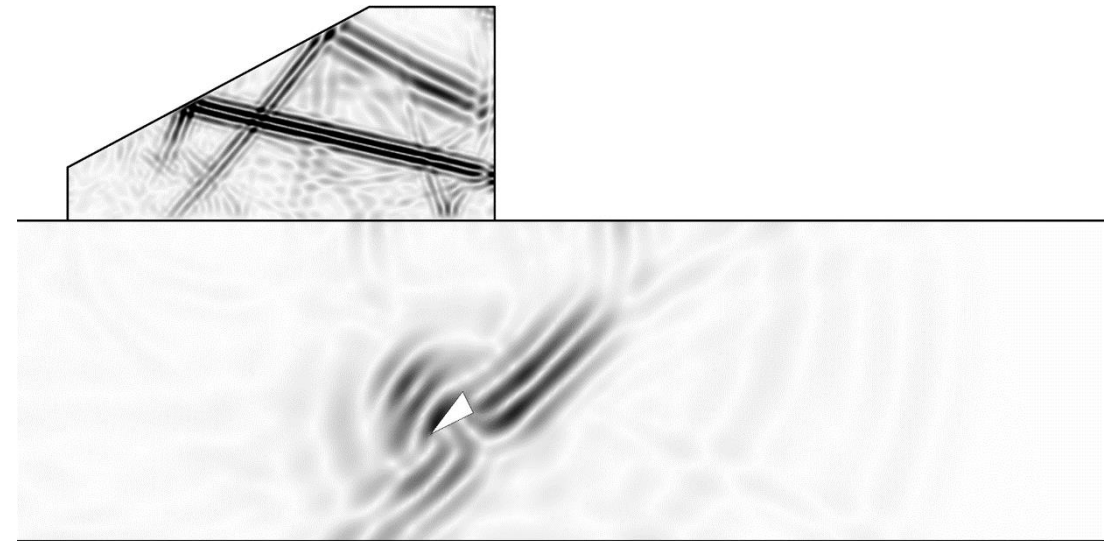
- Rozhraní pro simulace
 - Elasto/akustických vln v pevných látkách a porézních strukturách
 - Piezoelektrické materiály
- BAW, SAW, Lambovy vlny a další
- Různé způsoby modelování
 - Metoda konečných prvků (FEM)
 - Nespojitý Galerkin (dG), časově explicitní metoda
- Možnost multifyzikálních propojování



Zemětřesení a odraz seismických vln od hory.

Elastické vlny: Časově explicitní řešení

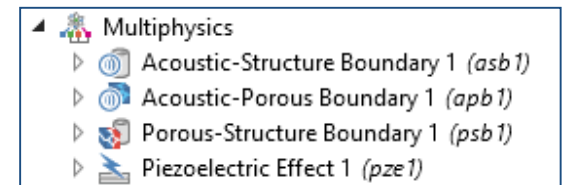
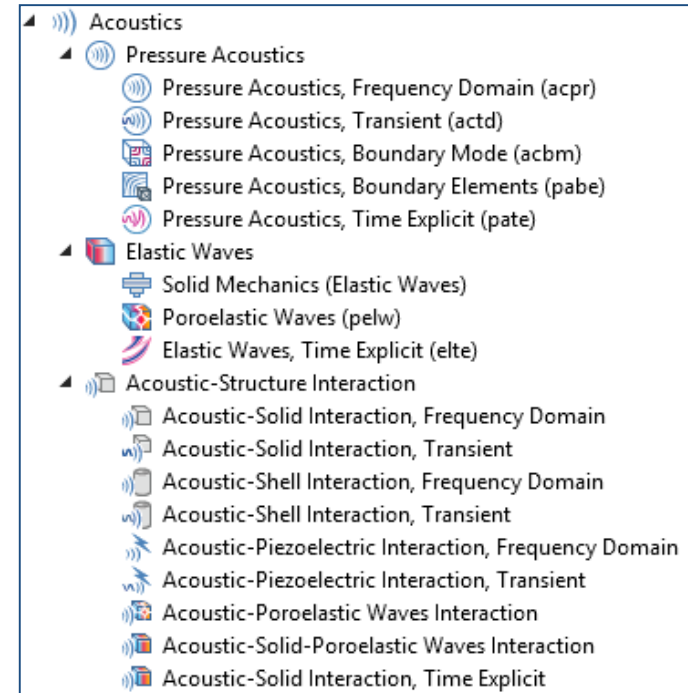
- Řešení velkých lineárně elastických problémů
- Izotropní/anizotropní materiály
- Rayleighovo tlumení
- Materiálové přechody
- Škálovatelnost pro distribuované výpočty
- Jednoduché napojení na akustická rozhraní



Nedestruktivní testování nosníku (NDT).

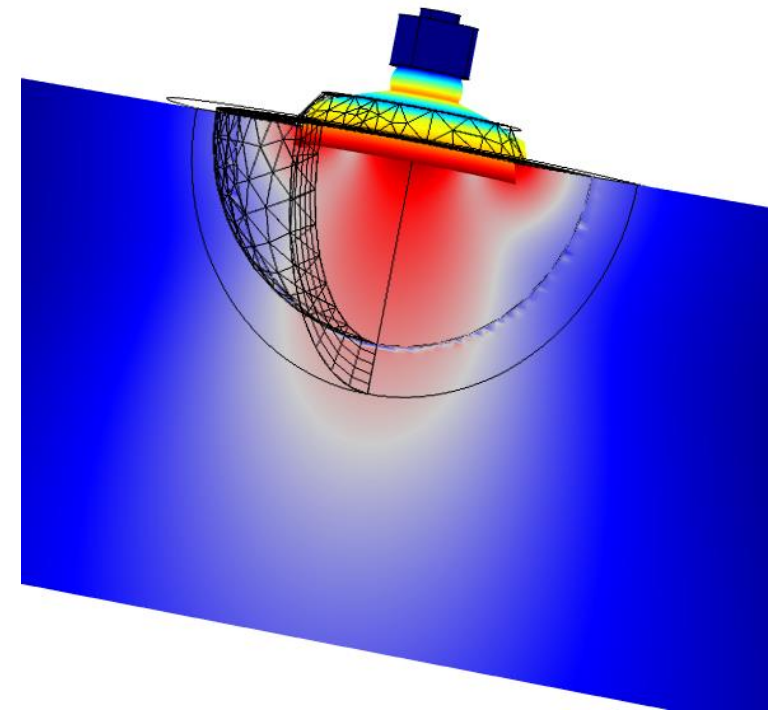
Akusticko-strukturální rozhraní

- Předdefinovaná multifyzikální rozhraní:
 - Propojení se strukturální mechanikou
 - Propojení se skořepinami a kompozity
 - Propojení s membránami
 - Propojení s rigidními doménami
 - Hybridní FEM-BEM přístup



Akusticko-piezoelektrická interakce

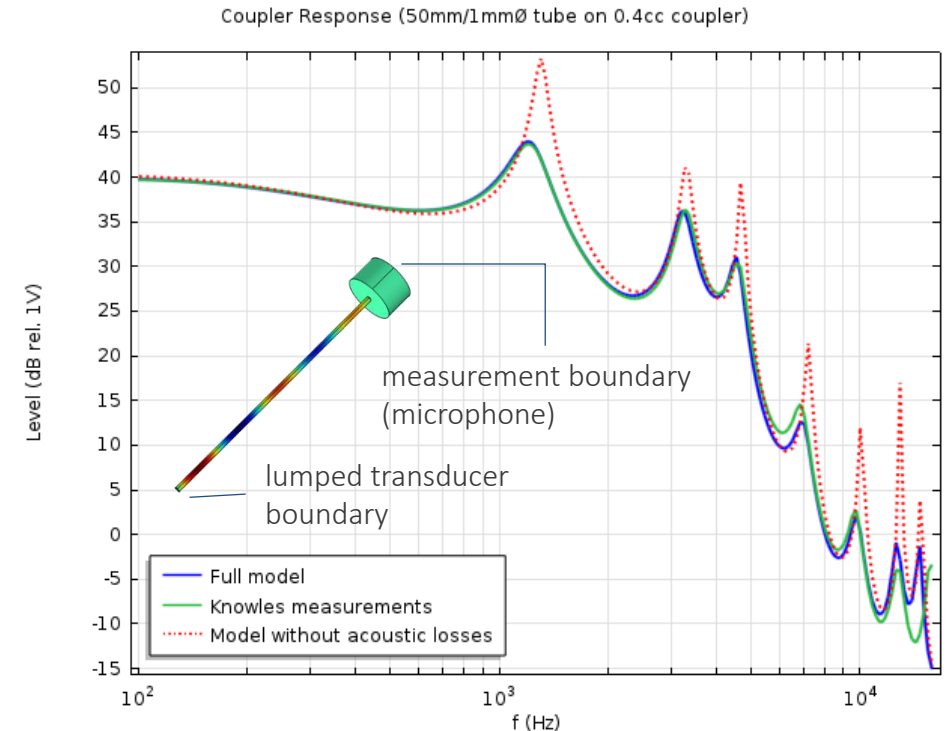
- Propojení tří fyzikálních rozhraní
 - Pressure Acoustics
 - Solid Mechanics
 - Electrostatics
- Multifyzikální rozhraní
 - Piezoelectric Effect spojuje elektrostatiku a strukturální mechaniku
 - Acoustic-Structure Boundary spojuje strukturální mechaniku a akustiku (BEM a FEM)
- Výpočty v časové a frekvenční doméně



Piezelektrický převodník: akustická houba.

Elektroakustické modely

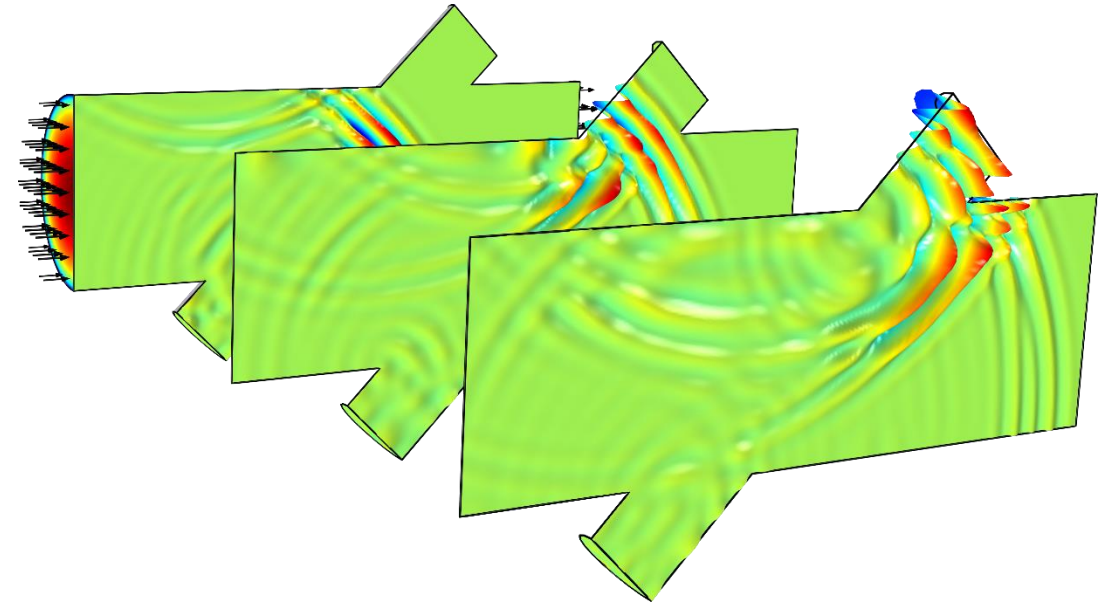
- Diskrétní elektroakustické systémy napojené na náhradní elektrický obvod
- Plnohodnotné oboustrané spojení konečně prvkového modelu s diskrétním systémem
- Návrhy náhradních el. obvodů ze SPICE pro elektro-akustické převodníky (přijímač/vysílač)



Diskretizovaný model Knowles ED23146 přijímače (miniaturní reproduktor).

Ultrazvuk: Časově explicitní formulace

- Lineární šíření akustické vlny v prostředí s definovaným stacionárním prouděním
- Řešení objemných časově závislých dějů
- Okrajová podmínka Absorbing Layer
- Nespojitý Galerkin (dG-FEM) umožňuje odlehčit nároky na operační paměť

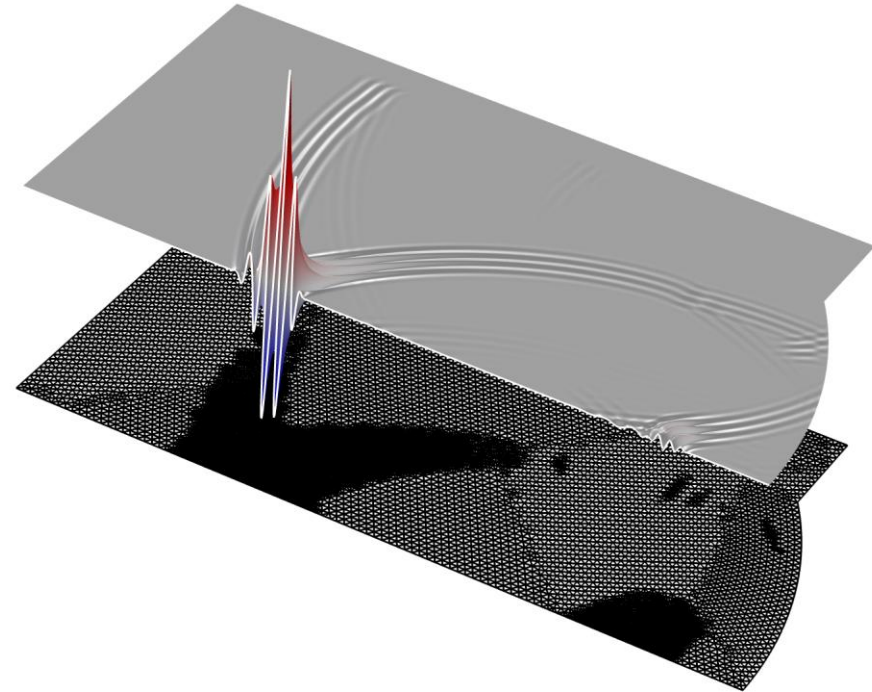


Model ultrazvukového průtokoměru s více než 16 milion DOF.

Ultrazvuk: Nelineární akustika

Nonlinear Pressure Acoustics, Time Explicit

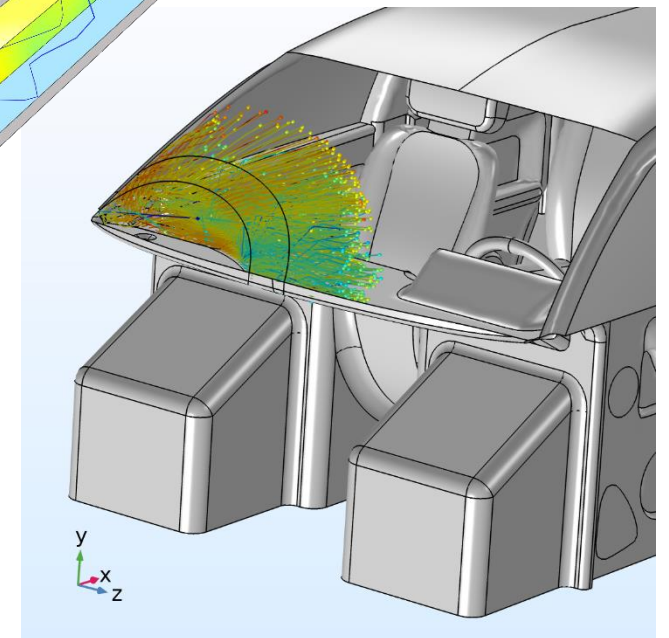
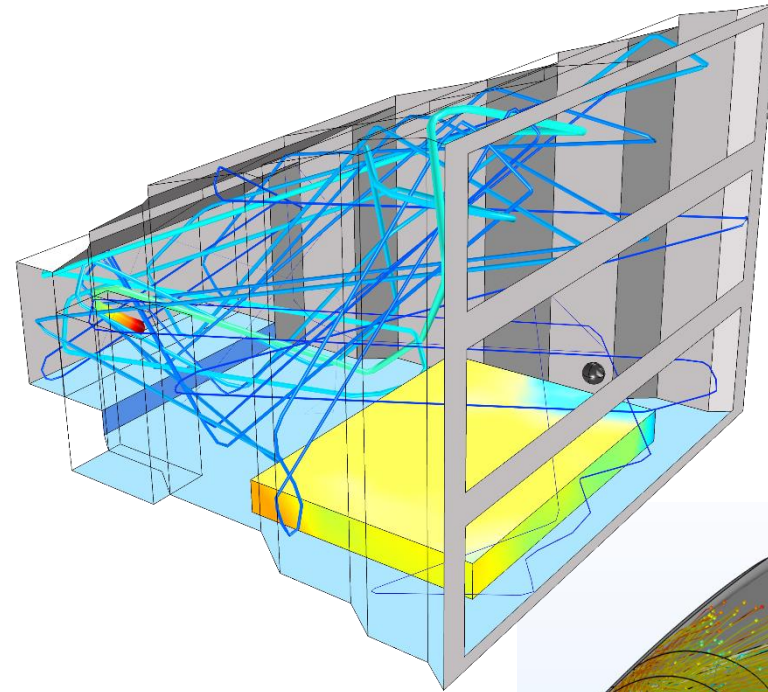
- Model nonlinear ultrasound propagation
- Dissipation models
- Adaptive mesh refinement to capture higher order harmonic generation
- Shock capturing with WENO limiters
- Large acoustic problems in the time domain
- Absorbing layers
- Discontinuous Galerkin method (dG-FEM) formulation is used



Simulace HIFU s adaptivní sítí pro zachycení čela vlny.

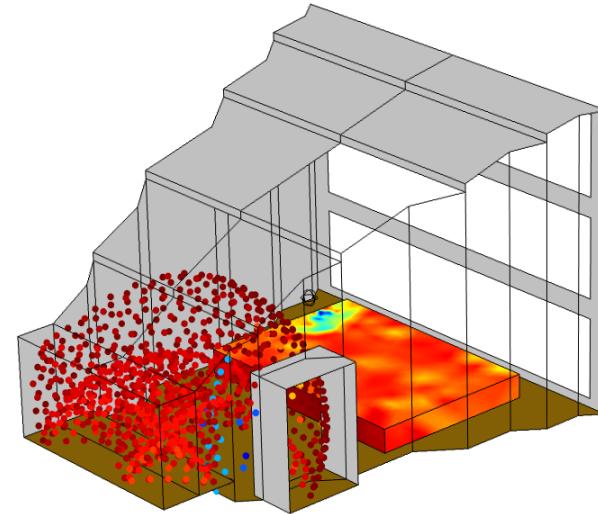
Geometrická akustika

- Řešení pro vysoké frekvence a/a nebo objemné domény
- Vlnová délka je menší než geometrické prvky s ní interagující
- Ray Acoustics
- Acoustic Diffusion Equation

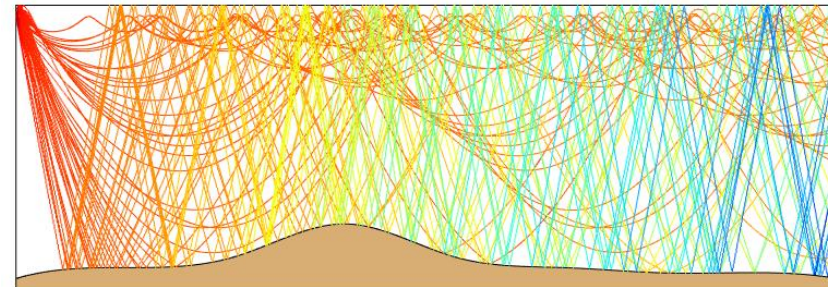


Ray Acoustics

- Trasování paprsků v akustickém poli
 - Obytné pokoje, interiér auta, koncertní sály
 - Akustika pod vodní hladinou
 - Akustika v otevřených prostorech
- Výpočet intenzity a výkonu paprsku
 - Difrakční mřížka
 - Útlum a absorpce v objemu
- Detailní okrajové podmínky
 - Závislé na frekvenci a úhlu dopadu
- Frekvenčně závislé materiálové vlastnosti
- Materiálová rozhraní
- Trasování paprsků v objemu s povrchovou sítí



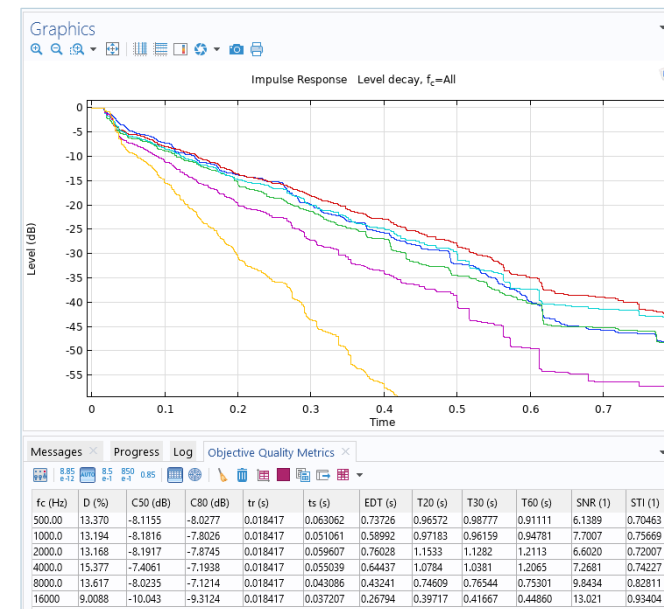
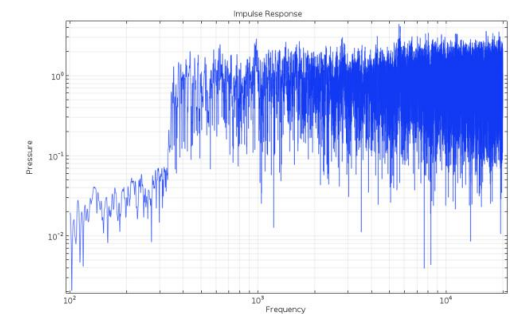
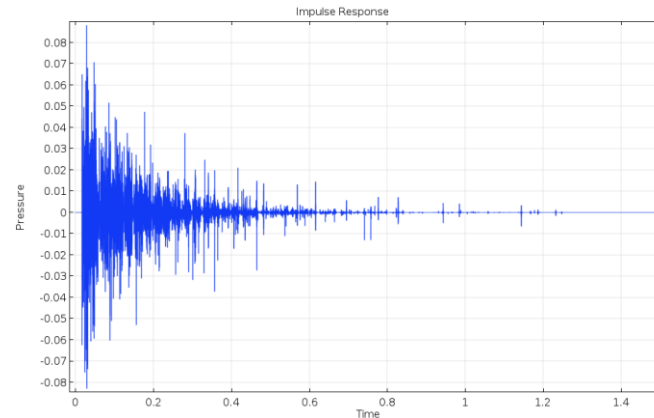
Malý koncertní sál a čelo akustické vlny 0,01 s od začátku simulace.



Podvodní trasování akustických paprsků.

Ray Acoustics

- Práce s výslednou impulzní odezvou
- Dataset přijímače
 - Směrnost
- Graf pro vykreslení impulzní odezvy
 - Rozlišení oktáv, 1/3 oktáv a 1/6 oktáv
 - Vykreslení úbytku energie
- Výpočet SPL



Settings
Receiver 3D

Plot

Label: Receiver 3D - All Bands

Data

Receiver

Center

x: 1.5 m

y: 5 m

z: 1 m

Radius

Radius input: Expression

Number of rays: Nrays 1

Room volume: Vol m³

Source-receiver distance: dsr m

$R = \log_{10}(V) dsr \sqrt{4/N}$

Directivity

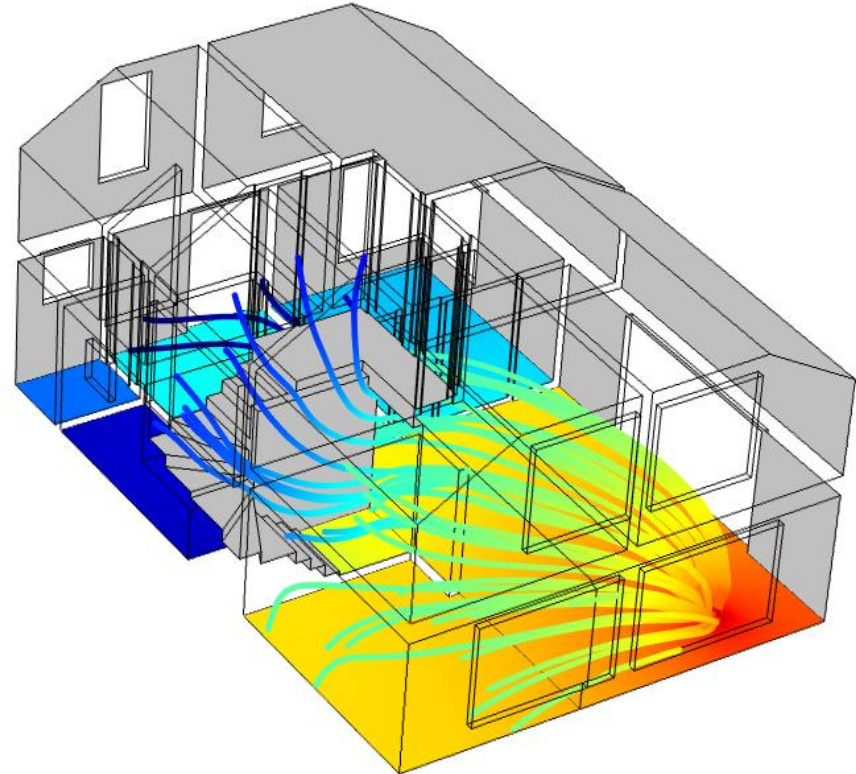
Directivity type: Omnidirectional

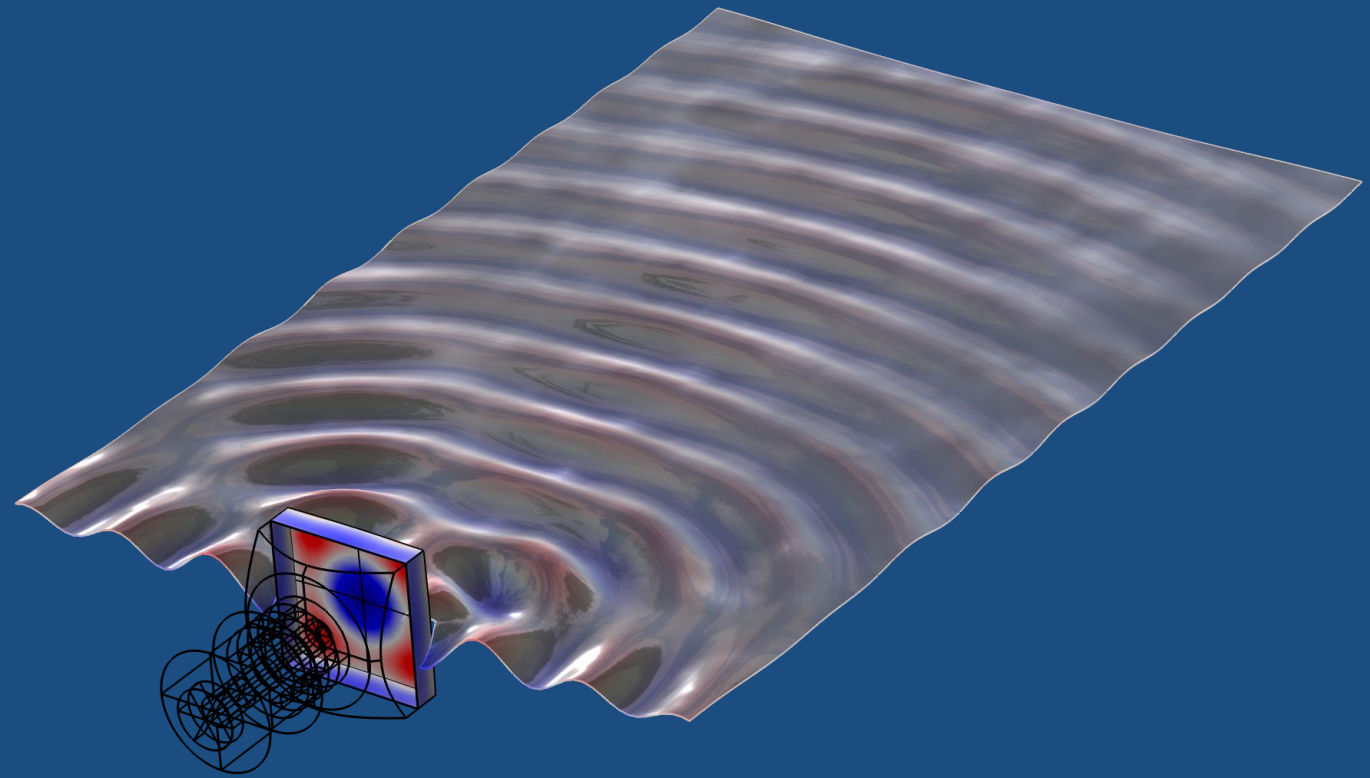
Extra Time S

Advanced

Acoustic Diffusion Equation

- Aproximace difuzního akustického pole
- Akustika pokoje ve 3D
- Geometricky závislá difuzní konstanta (akustická střední volná dráha)
- Statistické modely: Sabine, Eyring, a Modifikovaný Eyring
- Definice vstupů a materiálových vlastností v pásmech
- Analýza křivek poklesu energie
- Dozvuk T_{60}





Příklad: Podvodní sonar

Matouš Lorenc
HUMUSOFT s.r.o.

Příklad: Podvodní sonar

- Simulace „akustické houby“
 - Základní jednotka sonarového pole
- Od pieza po akustické pole
 - Electrostatics
 - Structural Mechanics
 - Pressure Acoustics, Boundary Elements
- Obrácená polarita piezo prstýnků
 - Lokální souřadný systém

} Piezoelectric Effect
} Acoustic-Structure Boundary

