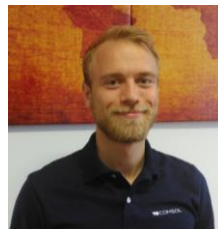


# Příklady použití FEM simulací v elektromobilitě

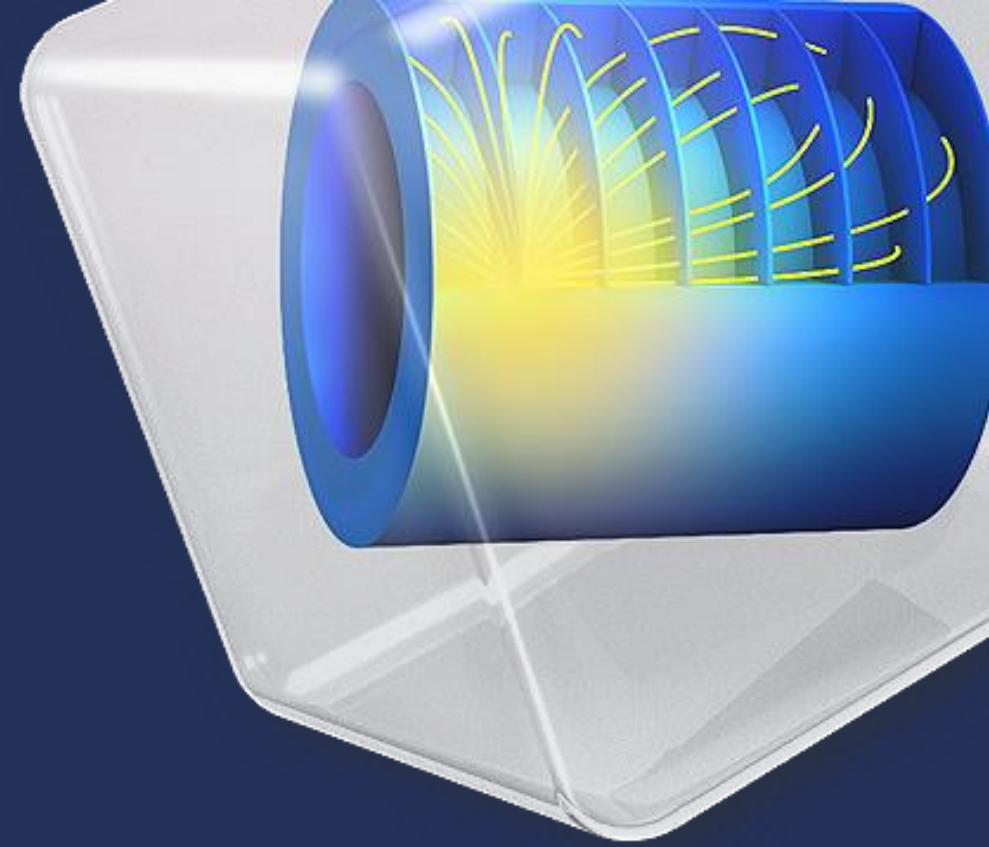


Matouš Lorenc  
HUMUSOFT s.r.o.  
[lorenc@humusoft.cz](mailto:lorenc@humusoft.cz)

# Obsah

- Představení COMSOL Multiphysics
- Multifyzikální simulace baterií
- Modelování elektromotoru
- Nasazení v praxi

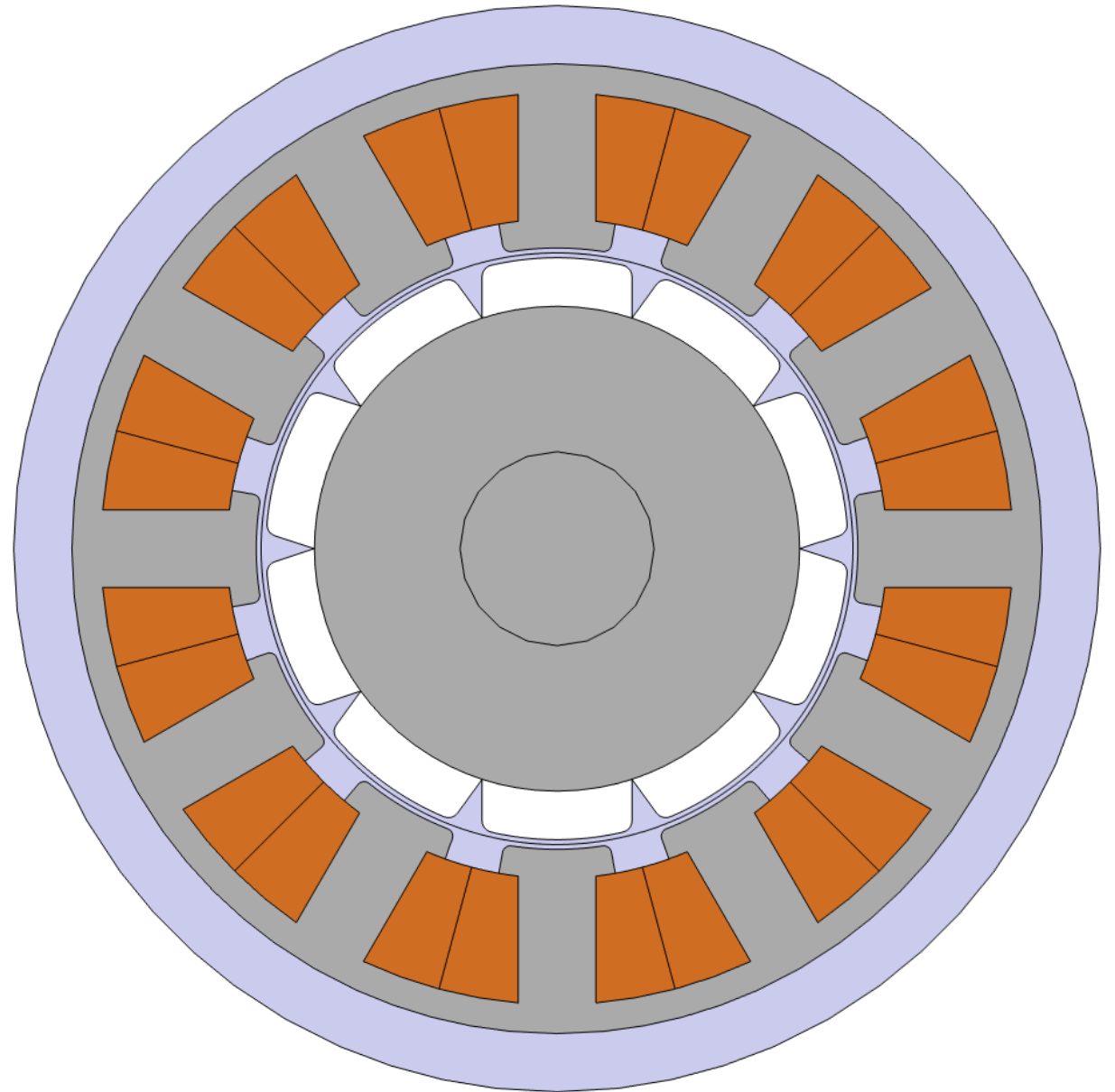




COMSOL Multiphysics®<sup>®</sup>, COMSOL  
Server™ a COMSOL Compiler™

# Elektromotor

- Demo úloha elektromotoru
- 10 pólů a 12 slotů
- 600 otáček za minutu
- Špičkový proud 10 [A]
- Součástí aplikační knihovny:  
<https://www.comsol.com/model/permanent-magnet-motor-in-2d-101961>



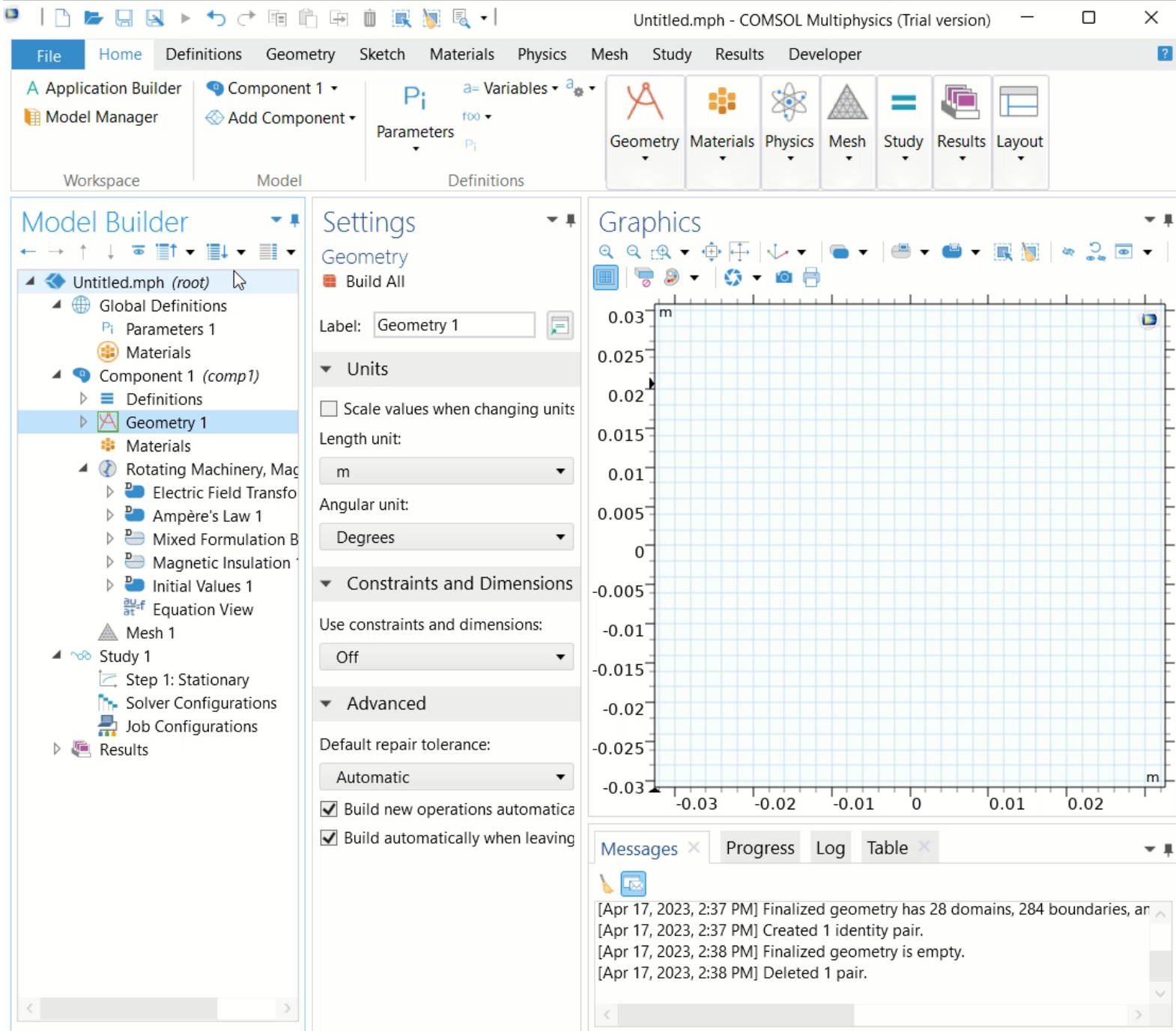
# COMSOL Multiphysics

- Definice parametrů
- Tvorba / import geometrie
- Materiálové vlastnosti
- Počáteční a okrajové podmínky
- Síťování výpočetní oblasti
- Výpočet simulace
- Zpracování výsledků

1.06 GB | 1.25 GB

# COMSOL Multiphysics

- Definice parametrů
- Tvorba / import geometrie
- Materiálové vlastnosti
- Počáteční a okrajové podmínky
- Síťování výpočetní oblasti
- Výpočet simulace
- Zpracování výsledků



# COMSOL Multiphysics

- Definice parametrů
- Tvorba / import geometrie
- **Materiálové vlastnosti**
- Počáteční a okrajové podmínky
- Síťování výpočetní oblasti
- Výpočet simulace
- Zpracování výsledků

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics software interface. The top menu bar includes File, Home, Definitions, Geometry, Sketch, Materials, Physics, Mesh, Study, Results, and Developer. The main workspace is divided into several panels:

- Model Builder:** Shows a tree view of the model structure. The 'Materials' node under 'Component 1 (comp1)' is selected. The tree includes:
  - Untitled.mph (root)
    - Global Definitions
      - Parameters 1
      - Geometry Parts
      - Materials
    - Component 1 (comp1)
      - Definitions
      - Geometry 1
      - Materials (selected)
      - Rotating Machinery, Mag
        - Electric Field Transfo
        - Ampère's Law 1
        - Mixed Formulation B
        - Magnetic Insulation
        - Initial Values 1
        - Continuity 1
        - Equation View
      - Mesh 1
      - Study 1
        - Step 1: Stationary
        - Solver Configurations
        - Job Configurations
      - Results

- Settings:** Shows the 'Materials' settings for the selected node. The 'Material Overview' table is visible:
 

Material	Selection
Entities needing a...	Domains 1–28
- Graphics:** Displays a 2D cross-sectional view of a circular magnetic core with 28 domains. The axes range from -0.04 to 0.04 meters.
- Messages:** Shows a log of operations:
- [Apr 17, 2023, 2:38 PM] Finalized geometry is empty.
- [Apr 17, 2023, 2:38 PM] Deleted 1 pair.
- [Apr 17, 2023, 2:39 PM] Formed assembly of 2 solid objects
- [Apr 17, 2023, 2:39 PM] Finalized geometry has 28 domains
- [Apr 17, 2023, 2:39 PM] Created 1 identity pair.

# COMSOL Multiphysics

- Definice parametrů
- Tvorba / import geometrie
- Materiálové vlastnosti
- Počáteční a okrajové podmínky
- Síťování výpočetní oblasti
- Výpočet simulace
- Zpracování výsledků

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics software interface. The main window is titled "Untitled.mph - COMSOL Multiphysics (Trial version)". The interface is divided into several panels:

- File Menu:** File, Home, Definitions, Geometry, Sketch, Materials, Physics, Mesh, Study, Results, Developer.
- Workspace:** Application Builder, Model Manager, Component 1, Add Component.
- Definitions:** Parameters, a= Variables, Pi, r00, Pi.
- Model Builder:** A tree view showing the model structure:
  - Untitled.mph (root)
    - Global Definitions
      - Parameters 1
      - Geometry Parts
      - Default Model Inputs
      - Materials
    - Component 1 (comp1)
      - Definitions
      - Geometry 1
      - Materials
      - Rotating Machinery, Magnetic
        - Electric Field Transfo
        - Ampère's Law 1
        - Mixed Formulation B
        - Magnetic Insulation
        - Initial Values 1
        - Continuity 1
        - Equation View
      - Mesh 1
      - Study 1
        - Step 1: Stationary
        - Solver Configurations
        - Job Configurations
        - Results

- Settings:** Rotating Machinery, Magnetic.
- Label: Rotating Machinery, Magnetic
- Name: rmm
- Domain Selection: Selection: All domains. A list of domains 1 through 6 is shown.
- Equation: Out-of-plane vector potential
- Components: Field components solved for: Out-of-plane vector potential
- Background Field: Full field
- Thickness: Out-of-plane thickness: d = 1 m
- Graphics:** A 2D plot of the rotating machinery component, showing a circular cross-section with internal slots. The axes range from -0.035 to 0.035 m.
- Messages:**
- Messages x
- Progress
- Log
- Table x

[Apr 17, 2023, 2:39 PM] Finalized geometry has 28 domains, 284 bc  
 [Apr 17, 2023, 2:39 PM] Created 1 identity pair.  
 [Apr 17, 2023, 2:57 PM] Formed assembly of 2 solid objects.  
 [Apr 17, 2023, 2:57 PM] Finalized geometry has 40 domains, 308 bc  
 [Apr 17, 2023, 2:57 PM] Updated 1 pair.



# COMSOL Multiphysics

- Definice parametrů
- Tvorba / import geometrie
- Materiálové vlastnosti
- Počáteční a okrajové podmínky
- **Síťování výpočetní oblasti**
- Výpočet simulace
- Zpracování výsledků

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics software interface. The top menu bar includes File, Home, Definitions, Geometry, Sketch, Materials, Physics, Mesh, Study, Results, and Developer. The main workspace is divided into three panels: Model Builder, Settings, and Graphics.

**Model Builder:** Shows the model hierarchy for 'Untitled.mph (root)'. The 'Mesh 1' node is selected under 'Component 1 (comp1)'. The hierarchy includes Global Definitions, Parameters 1, Geometry Parts, Default Model Inputs, Materials, Component 1 (comp1), Definitions, Geometry 1, Materials, Moving Mesh, Rotating Machinery, Magnetic (rmm), and Mesh 1.

**Settings:** The 'Mesh' settings are displayed. The 'Label' is 'Mesh 1'. The 'Sequence Type' is 'Physics-controlled mesh'. The 'Physics-Controlled Mesh' section is expanded, showing 'Element size' set to 'Normal' and 'Contributor' set to 'Rotating Machinery, Magnetic (rmm)'. A 'Use' checkbox is checked.

**Graphics:** Shows a 2D cross-section of a semi-circular geometry with a mesh. The vertical axis ranges from -0.002 to 0.02 m, and the horizontal axis ranges from -0.005 to 0.01 m. The mesh is composed of quadrilateral elements.

**Messages:** The bottom panel shows a log of messages:

- [Apr 17, 2023, 2:57 PM] Formed assembly of 2 solid objects.
- [Apr 17, 2023, 2:57 PM] Finalized geometry has 40 domains, 308 bc
- [Apr 17, 2023, 2:57 PM] Updated 1 pair.
- [Apr 17, 2023, 3:33 PM] Phases added successfully.

# COMSOL Multiphysics

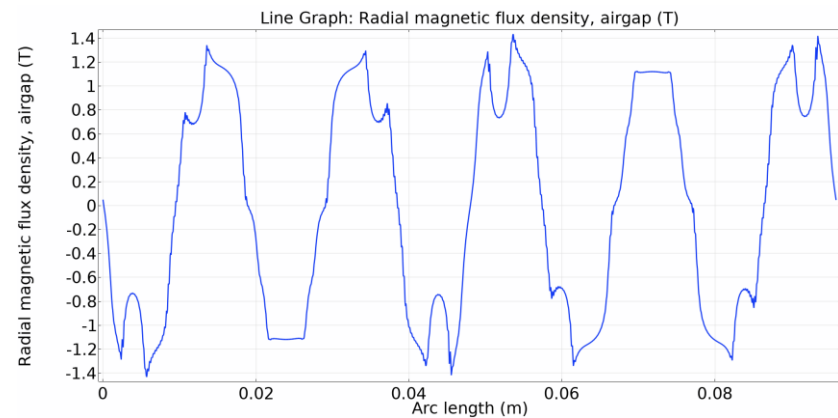
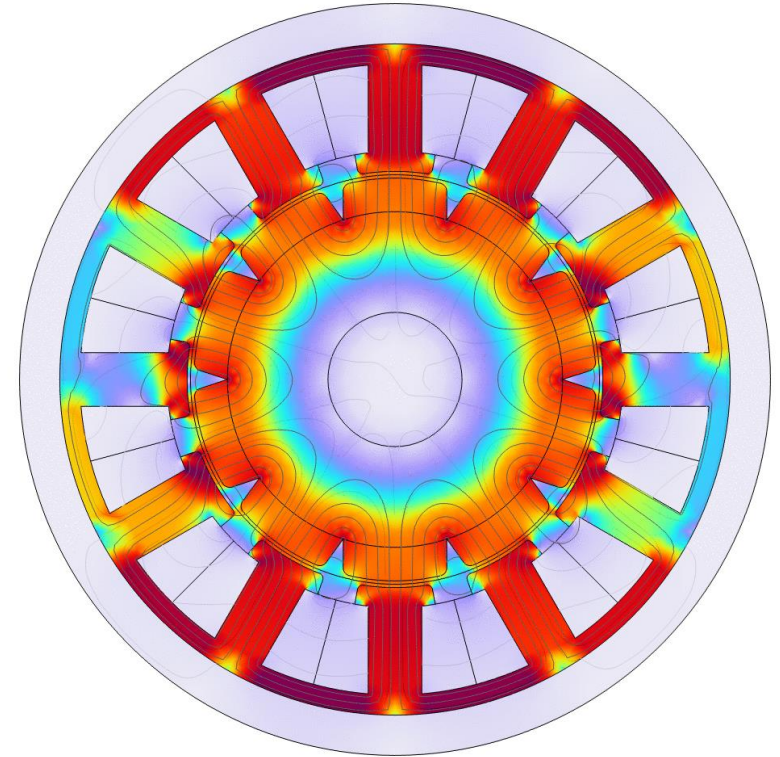
- Definice parametrů
- Tvorba / import geometrie
- Materiálové vlastnosti
- Počáteční a okrajové podmínky
- Síťování výpočetní oblasti
- Výpočet simulace
- Zpracování výsledků

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics software interface. The top menu bar includes File, Home, Definitions, Geometry, Sketch, Materials, Physics, Mesh, Study, Results, and Developer. The main workspace is divided into several panels:

- Model Builder:** Shows a tree view of the model structure. The root is 'Untitled.mph (root)', which contains 'Global Definitions' (Parameters 1, Geometry Parts, Default Model Inputs, Materials), 'Component 1 (comp1)' (Definitions, Geometry 1, Materials, Moving Mesh, Rotating Machinery, Mesh 1), and 'Study 1' (Step 1: Stationary, Solver Configurations, Job Configurations, Results).
- Settings:** Currently shows 'Solver Configurations'.
- Graphics:** Displays a circular domain with a fine mesh. The axes range from -0.035 to 0.035 meters.
- Messages:** Shows a log of simulation progress:
  - [Apr 17, 2023, 2:57 PM] Formed assembly of 2 solid objects.
  - [Apr 17, 2023, 2:57 PM] Finalized geometry has 40 domains, 308 bc
  - [Apr 17, 2023, 2:57 PM] Updated 1 pair.
  - [Apr 17, 2023, 3:33 PM] Phases added successfully.
  - [Apr 17, 2023, 3:38 PM] Complete mesh consists of 14142 domain

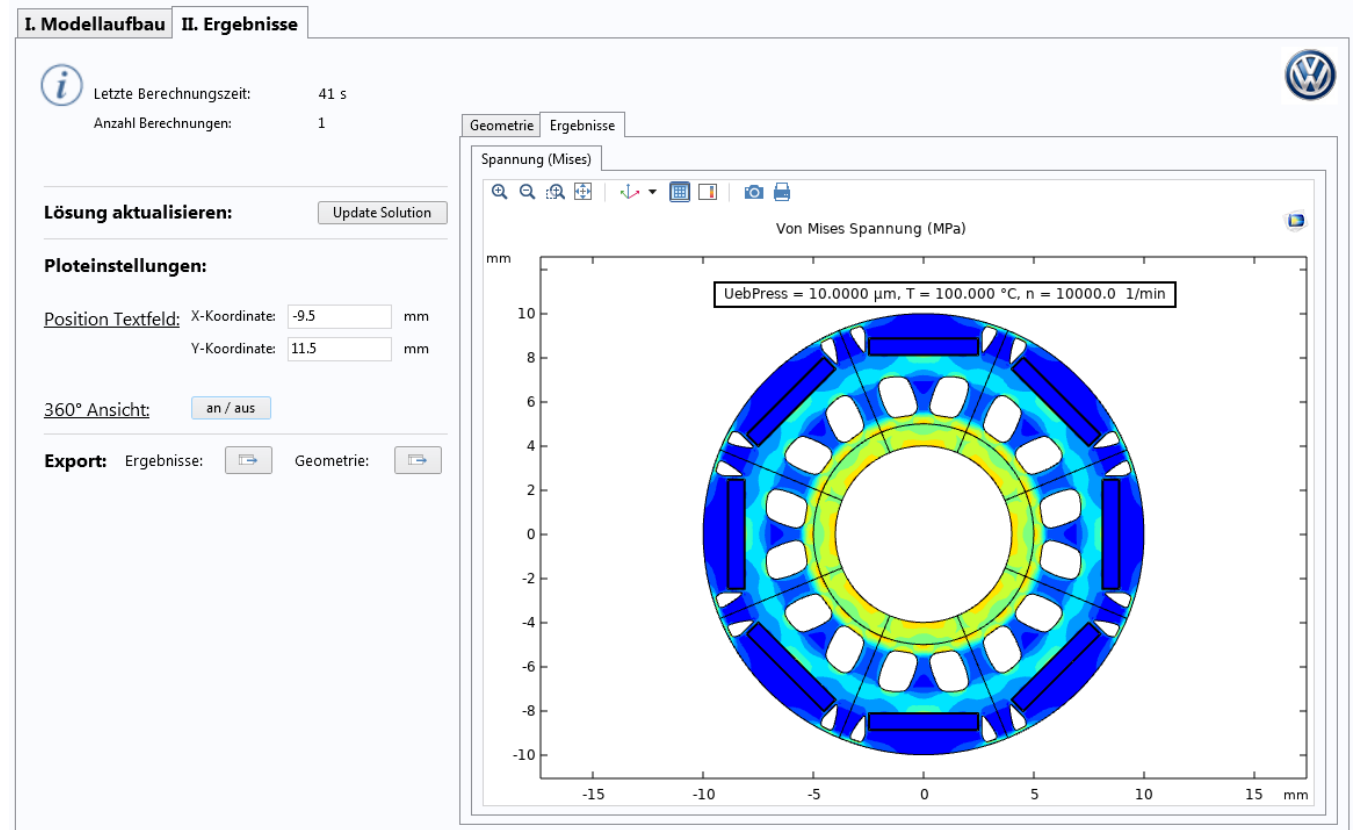
# COMSOL Multiphysics

- Definice parametrů
- Tvorba / import geometrie
- Materiálové vlastnosti
- Počáteční a okrajové podmínky
- Síťování výpočetní oblasti
- Výpočet simulace
- Zpracování výsledků



# COMSOL Server

- Přístup k aplikacím skrz webové rozhraní
  - Správa účtů a přihlašovacích údajů
  - Uživatelům stačí k přístupu webový prohlížeč
- Instalace COMSOL Server™ kde je potřeba:
  - Vlastní server uvnitř instituce
  - Cloud
- [www.comsol.com/blogs/7-reasons-why-comsol-customers-are-using-simulation-apps/](http://www.comsol.com/blogs/7-reasons-why-comsol-customers-are-using-simulation-apps/)



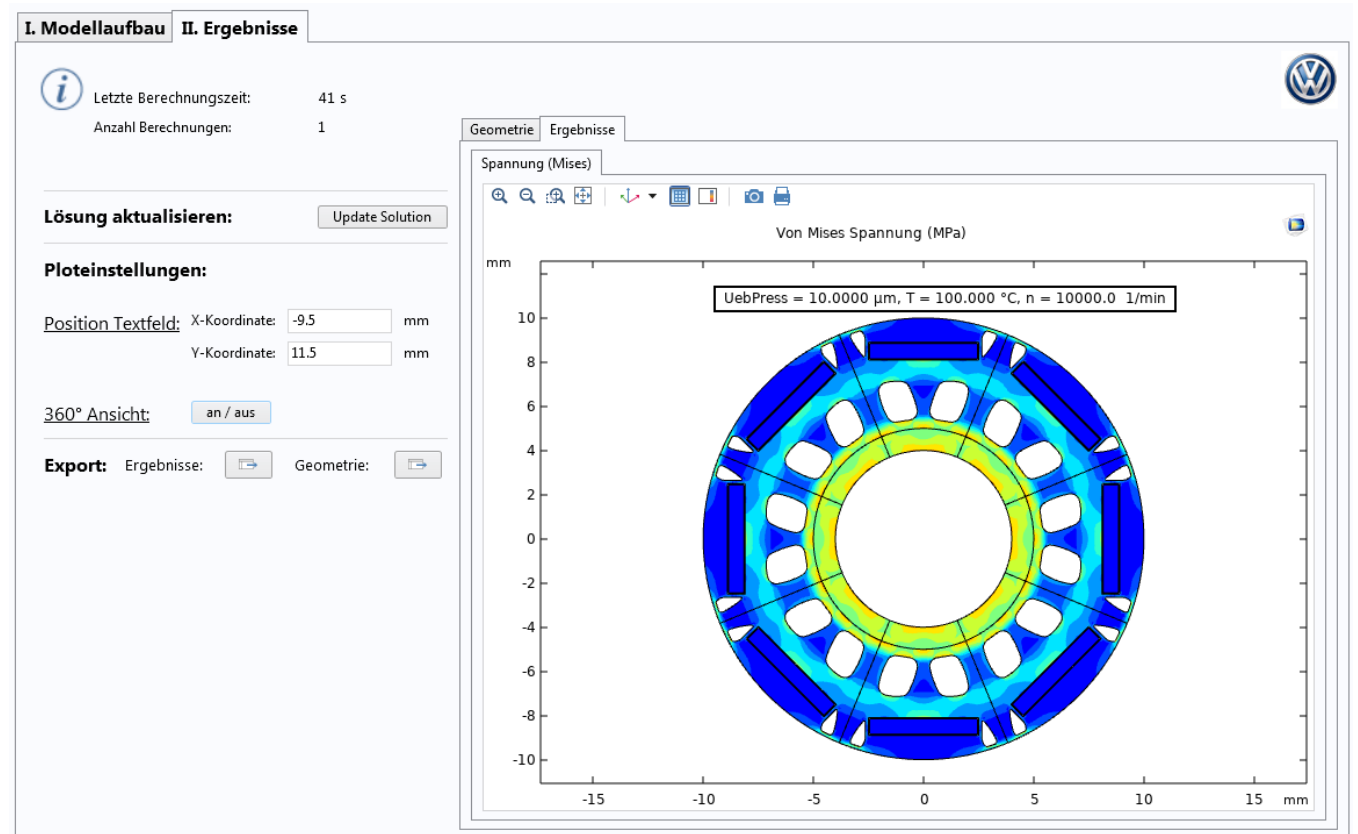
*"The idea was to create an application for colleagues to enable an easy and fast way to benchmark different designs."*

- Marie Hermanns, Volkswagen



# COMSOL Compiler

- Generuje samostatně spustitelné aplikace, které nepotřebují COMSOL Multiphysics
- Umožňuje licenčně spravovat kompilovaný software
  - Možnost komerčně šířit vlastní aplikace na bázi COMSOL modelu



# COMSOL MULTIPHYSICS®

The platform product for simulating real-world designs, devices, and processes. One user interface for all engineering applications.

- **MODEL BUILDER:** Combine physics phenomena in one model
- **APPLICATION BUILDER:** Build simulation apps from models
- **MODEL MANAGER:** Collaborate and organize models and apps

## COMSOL Compiler™

Compile simulation apps into executable files. Run them freely on any computer.

## COMSOL Server™

Host and administrate your simulation apps. Run them through a web interface.

## 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

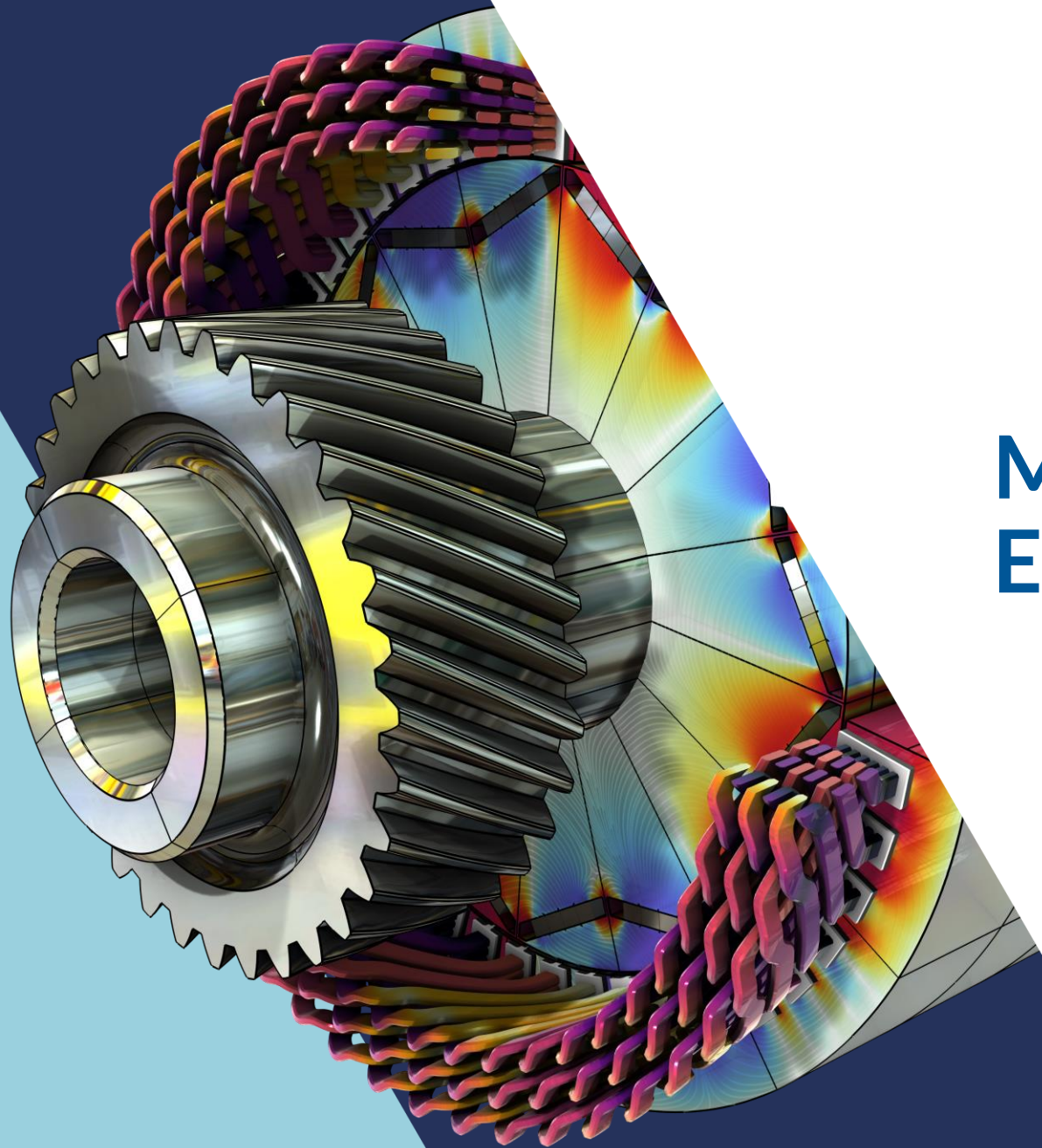
- Chemical Reaction Engineering Module
- Battery Design Module
- Fuel Cell & Electrolyzer Module
- Electrodeposition Module
- Corrosion Module
- Electrochemistry Module

### MULTIPURPOSE

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

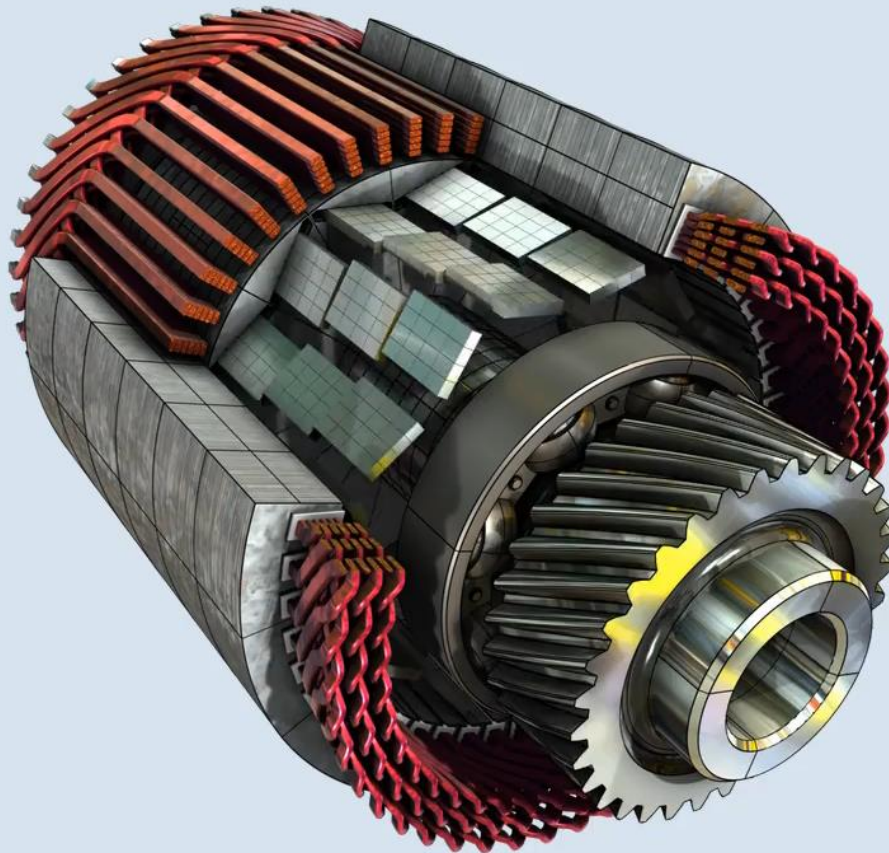
### INTERFACING

- 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



# Multifyzikální Modelování Elektromotoru

# Modelování Elektrických Strojů



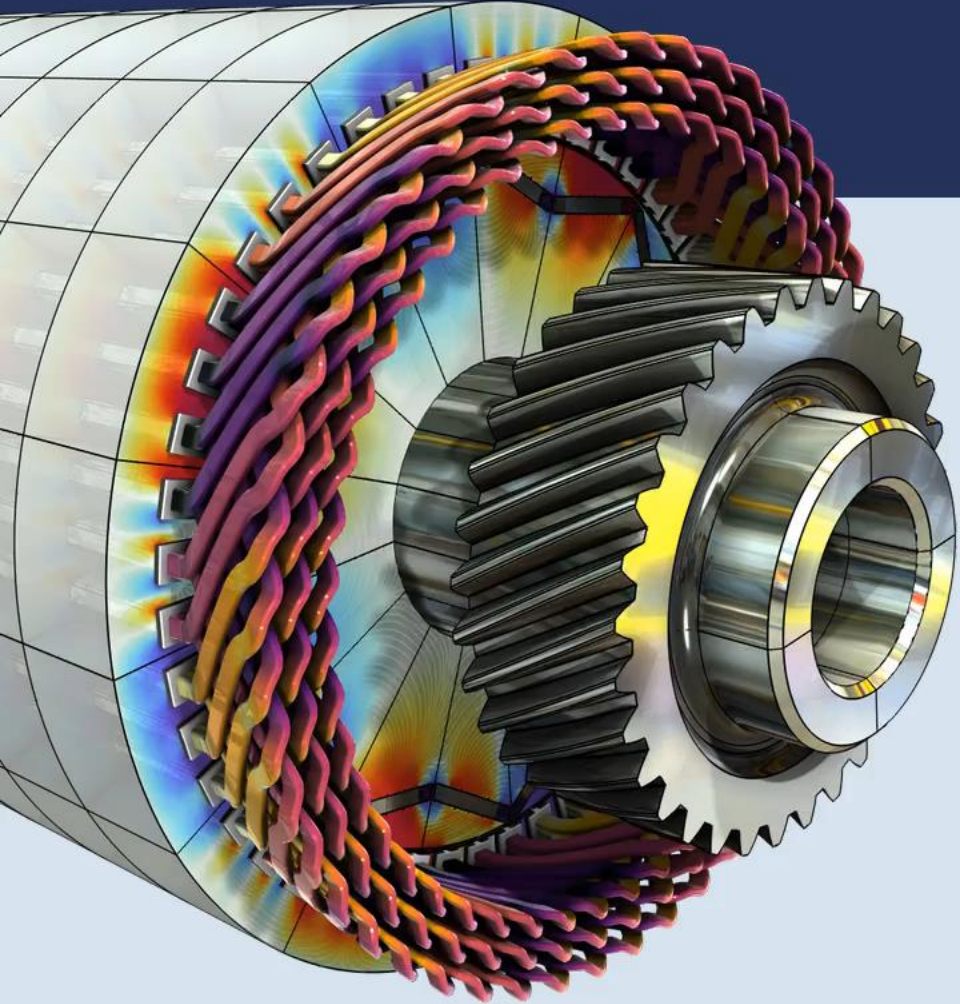
## Témata

topologie stroje, typy vinutí, kmitání točivého momentu, optimalizace, výpočet ztrát, tepelná analýza, demagnetizace, vibrace a hluk, magneto-strikce, mapy účinnosti, obvody řízení motoru a mnoho dalších

## AC/DC Module

Zahrnuje bohatý soubor nástrojů pro modelování elektrických strojů spolu s mnoha příklady

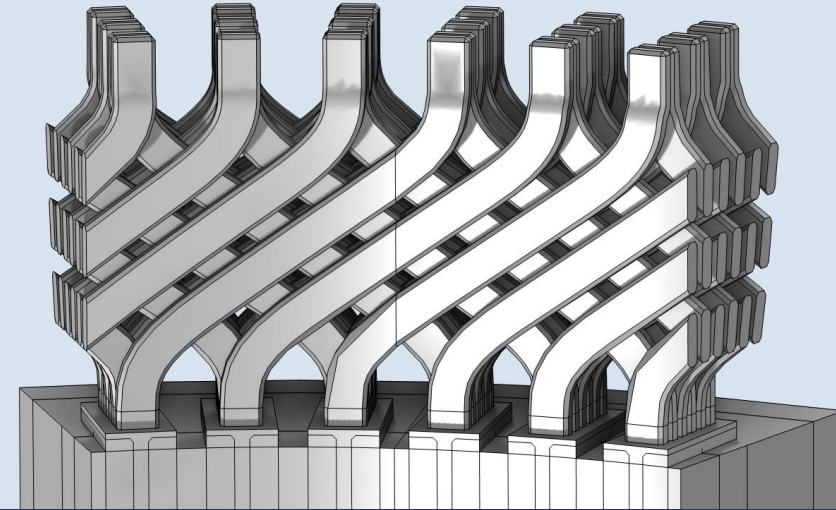
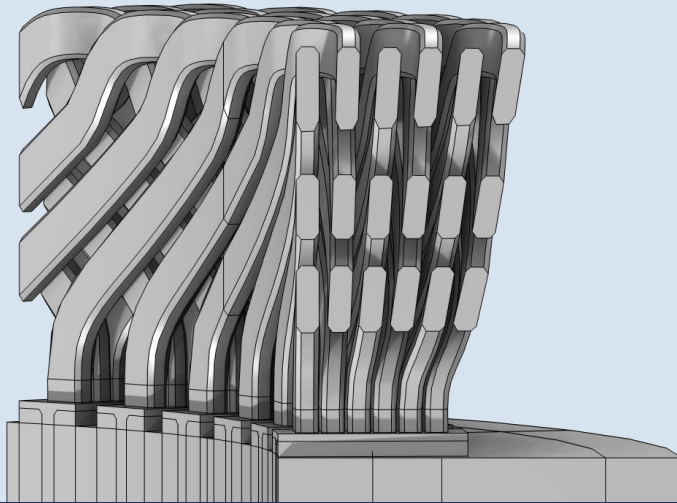




## POC MODEL

# Synchronní Elektromotor

- Typický design pro současnou generaci elektrických vozidel:
  - 8 pólů, 48 slotů
  - Zkosený rotor se segmentovanými magnety ve tvaru V
  - Vlasové vodiče statoru;  
Vinutí distribuované v jediné vrstvě
  - 240 kW (320 hp), 460 N·m (340 lbf·ft), 5000 rpm
  - 495 A (RMS)
  - 310 V (RMS)
- Aplikační galerie: [Motor Tutorial Series](#)



## Part Libraries

Refresh Update COMSOL Part Libraries

Search

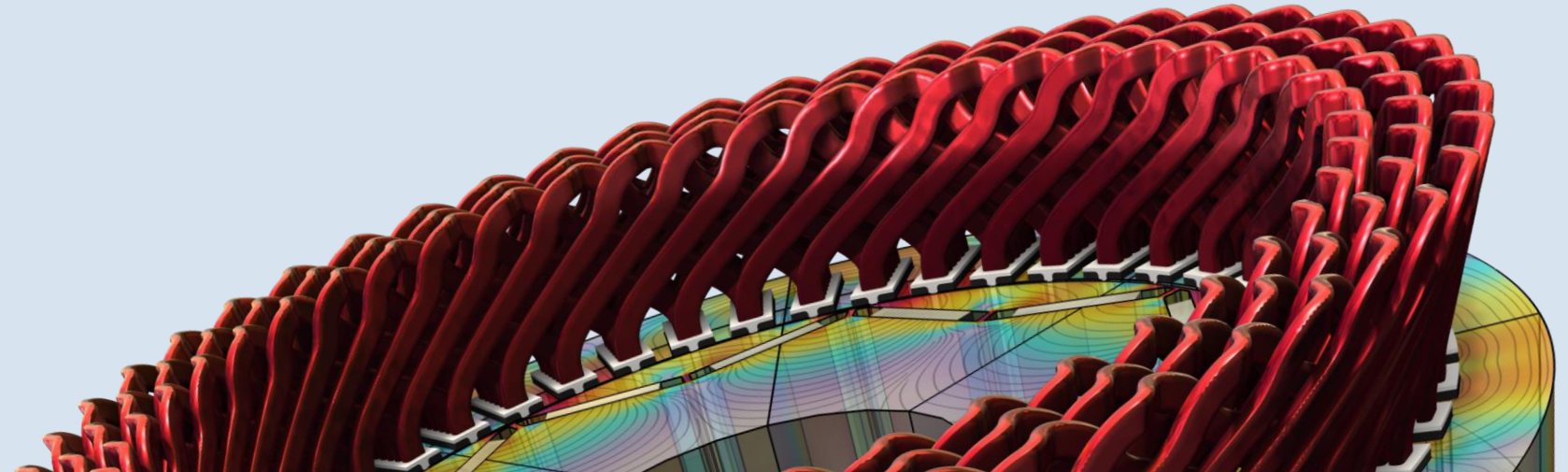
- ▶ COMSOL Multiphysics
  - ▶ AC/DC Module
    - ▶ Homogenized Multiturn Coils
    - ▶ Magnetic Cores
    - ▶ Rotating Machinery 2D
      - ▶ Rotors
        - ▶ Internal
          - embedded\_magnet\_internal\_rotor\_2d
          - embedded\_magnet\_v\_shape\_internal\_rotor\_2d
          - surface\_mounted\_magnet\_internal\_rotor\_2d
        - ▶ Stators
          - ▶ External
            - slotted\_external\_stator\_2d
      - ▶ Rotating Machinery 3D
        - ▶ Synchronous Electric Drive 3D
          - synch\_edrive\_3d\_hairp\_conn\_bracket
          - synch\_edrive\_3d\_hairp\_conn\_endcap
          - synch\_edrive\_3d\_hairp\_conn\_joint
          - synch\_edrive\_3d\_rot\_emb\_vshape\_2d
          - synch\_edrive\_3d\_rot\_emb\_vshape\_3d
          - synch\_edrive\_3d\_stat\_par\_slots\_2d
          - synch\_edrive\_3d\_stat\_par\_slots\_3d
    - ▶ Single Conductor Coils
    - ▶ Heat Transfer Module
    - ▶ Microfluidics Module

## Předpřipravená Geometrie

Geometrické sekvence lze organizovat jako díly skládačky a ukládat do centralizovaných knihoven, ke kterým mají přístup kolegové

Podpora mnoha formátů CAD nebo přímé propojení s jiným CAD softwarem

*Synchronous Electric Drive 3D* je nový soubor dílů, který poskytuje komplexní příklad synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM) s vlasovým vinutím ve 2D i 3D



AC/DC MODULE

# Nástroje pro Modelování Elektromotorů

Settings  
Conducting Magnet

Label:

Domain Selection

Override and Contribution

Equation

Show equation assuming:

Study 2: Synchronous rotation, Time Dependent

$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ,  $\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r$

$\mathbf{H} = -\nabla V_m$

Magnet

Direction method:

Specify north and south boundaries

Pattern type:

Circular pattern

Specify direction only for entities identifying the pattern.

Pattern center:

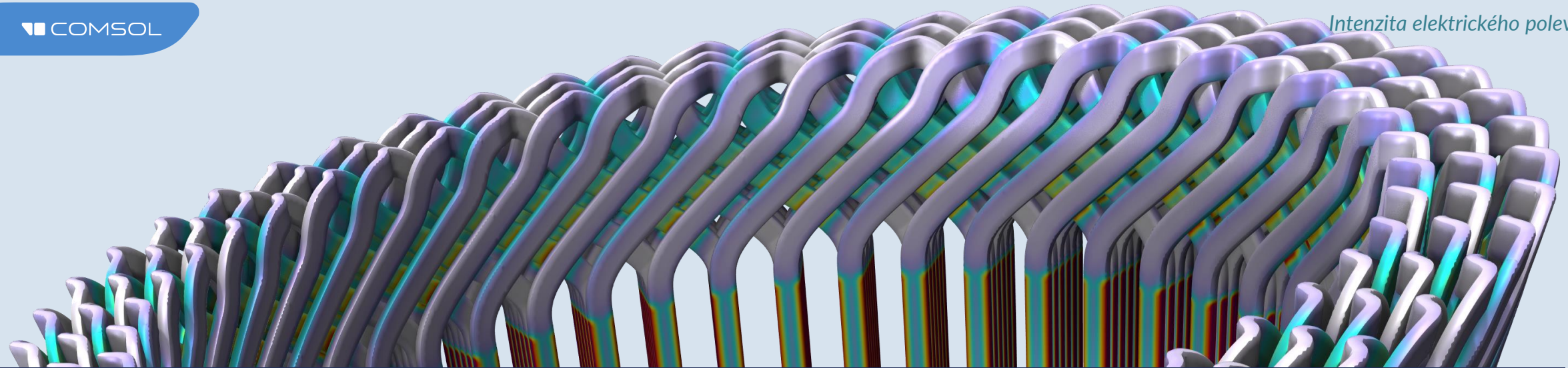
$r_0$	<input type="text" value="0"/>	X	m
	<input type="text" value="0"/>	Y	

Pattern additional angle:

$\alpha$   rad

Constitutive Relation B-H

- *Magnet*
  - Směr magnetizace
  - Interní izolované plochy
  - Pole magnetů (např. Halbach)
- *Multiphase Winding*
  - Využití opakujícího se vzoru
- Definice plochy vodiče z poměru zaplnění slotu
- Využití sektorové symetrie
- Automatický výpočet točivého momentu pomocí uzlu *Arkkio Torque Calculation*

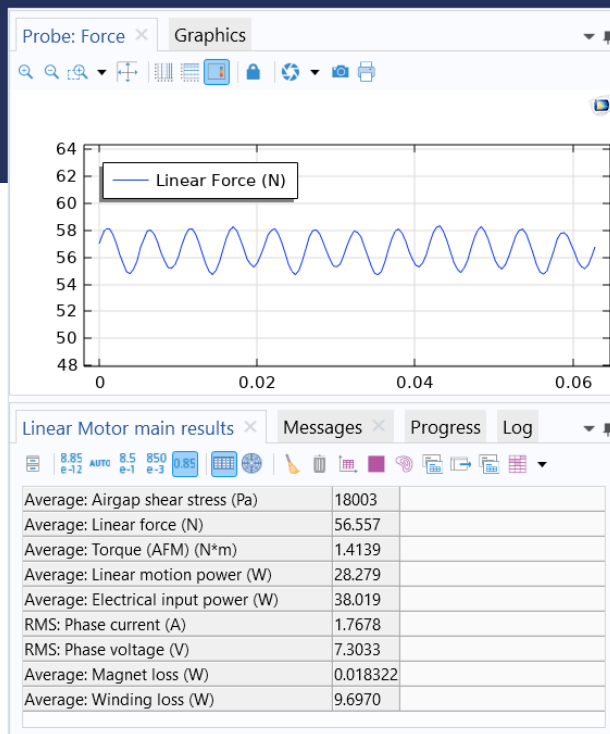


## Post-Processing a Výsledky

Rozsáhlá sada funkcí pro post-processing a vizualizaci poskytuje lepší vhled do vašich výsledků

Získávejte klíčové výsledky, jako jsou RMS hodnoty, harmonické frekvence a mapy účinnosti, pomocí funkcí pro analýzu dat a maker – tzv. *Methods*

Komunikujte výsledky efektivně s vašimi kolegy prostřednictvím automaticky generovaných zpráv



# Výpočet Ztrát v Železe a Vinutí

## Loss Calculation

Steinmetz, Bertotti,  
ohmický ohřev a další  
vlastní definice

## Time-to-Frequency Losses

Zprůměrované ztráty  
z časově závislé  
výpočetní studie

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics software interface for a project named 'pm\_motor\_3d.mph'. The 'Physics' tab is active, and the 'Loss Calculation' settings are configured for 'Loss Calculation 1'.

**Model Builder:** The tree view shows the model structure, including 'Rotating Machinery, Magnetic (rmm)' with sub-entities like 'Electric Field Transformation 1', 'Ampère's Law 1', 'Mixed Formulation Boundary 1', 'Magnetic Insulation 1', 'Initial Values 1', 'Continuity', 'Magnetic Flux Conservation - air', 'Magnetic Flux Conservation - iron', 'Ampère's Law - stator core', 'Loss Calculation 1', 'Ampère's Law - magnet', 'Coil 1', 'Force Calculation 1', 'Gauge Fixing for A-field 1', 'Periodic Condition 1', 'Periodic Condition 2', 'Periodic Condition 3', and 'Sector Symmetry 1'. A 'Mesh 1' is also present.

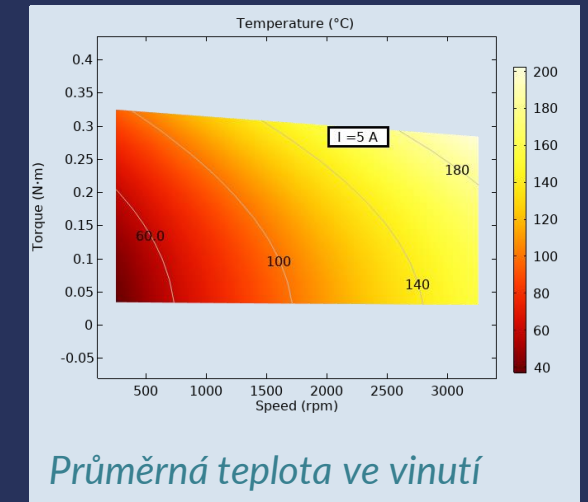
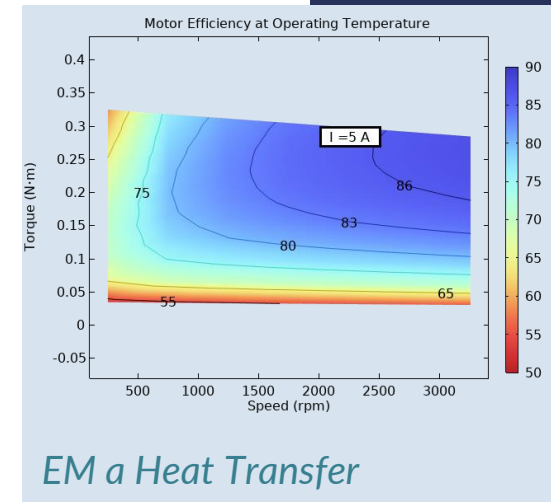
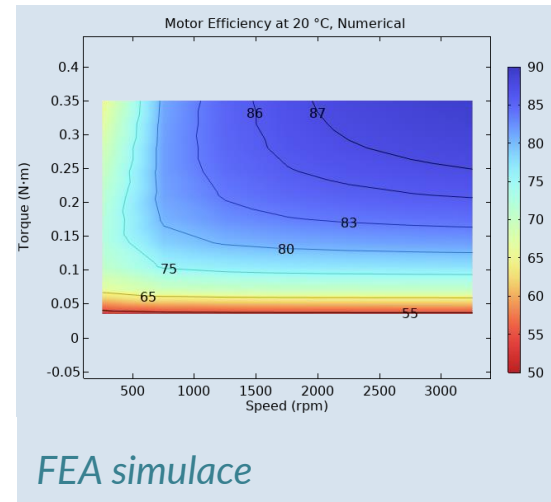
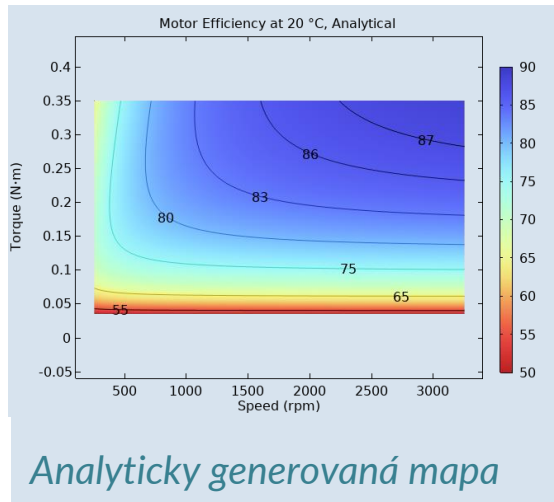
**Settings:** The 'Loss Calculation' settings are as follows:
 

- Label:** Loss Calculation 1
- Domain Selection:** All domains
- Equation:** Show equation assuming: Loss Calculation, Time to Frequency Losses. The equation is:
 
$$Q = k_h \left( \frac{f}{1[\text{Hz}]} \right)^\alpha \left( \frac{|B|}{1[\text{T}]} \right)^\beta$$
- Loss Model:** Steinmetz
- Steinmetz Parameters:**
  - Proportionality constant:  $k_h = 1000$  W/m<sup>3</sup>
  - Exponent for frequency:  $\alpha = 1$
  - Exponent for magnetic flux density:  $\beta = 1.5$

**Graphics:** The 'Loss Density in Magnets and Stator Core' plot shows a 3D view of the motor's internal components with a color-coded loss density map. The volume is set to 'Volumetric'.

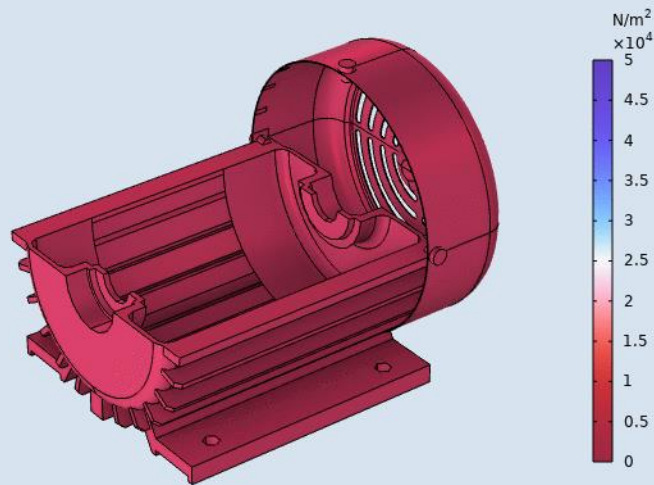
**Messages:** The bottom right corner shows a 'Messages' window with 'Progress' and 'Log' buttons.

# Vliv Teploty na Efektivitu

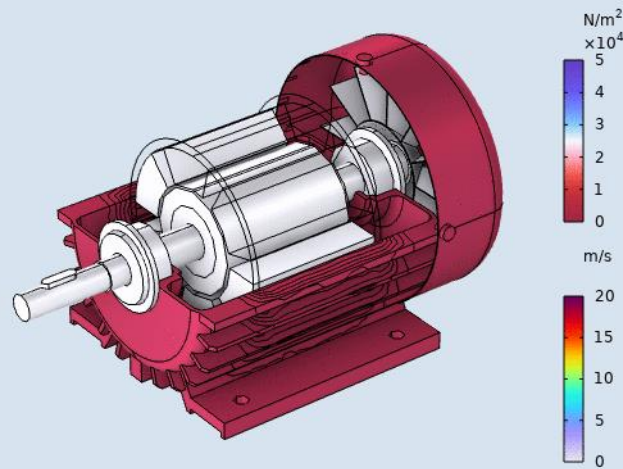


- COMSOL Blog: [Computing loss, temperature, and efficiency in electric motors](#)

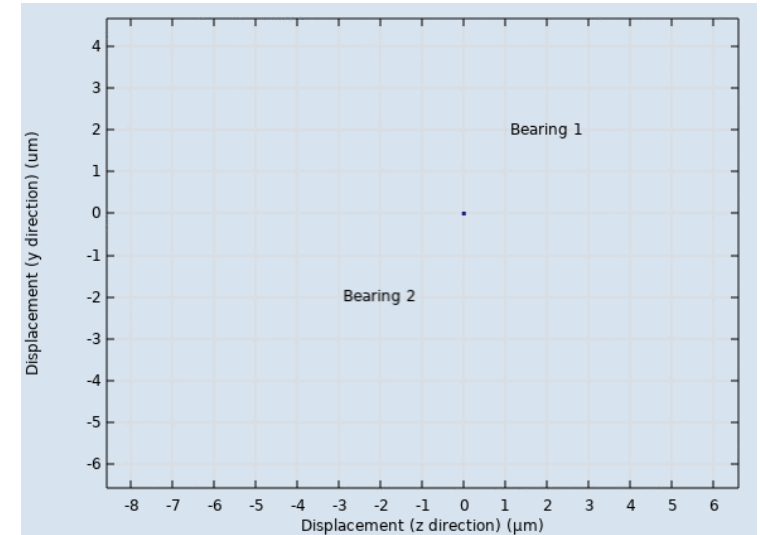
# Analýza Vibrací Motoru



Rozložení namáhání v krytu motoru.



Rozložení namáhání a rychlost otáčení.



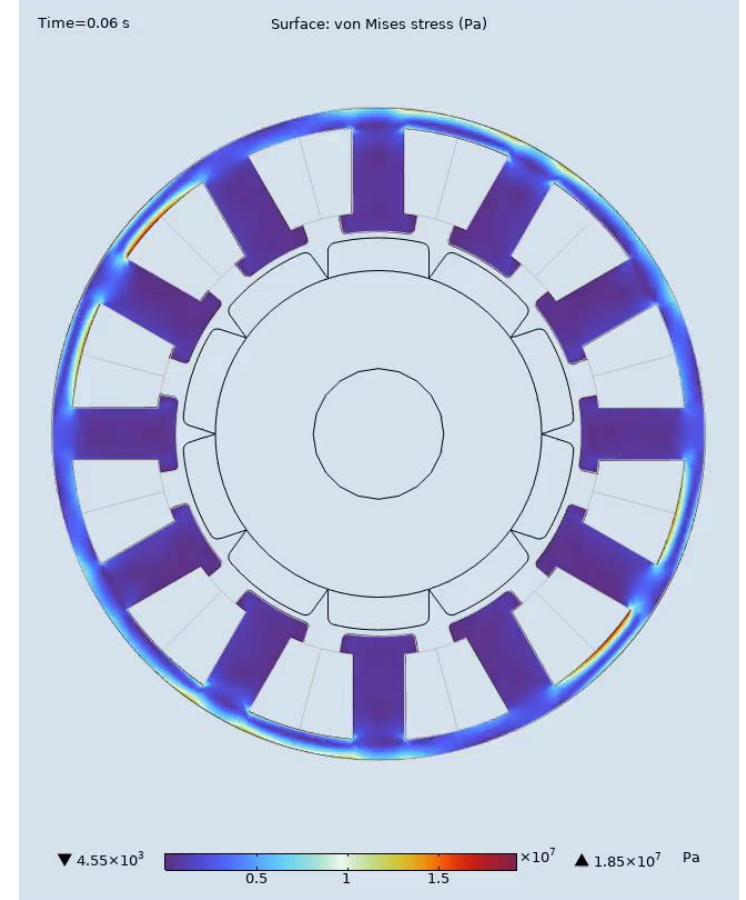
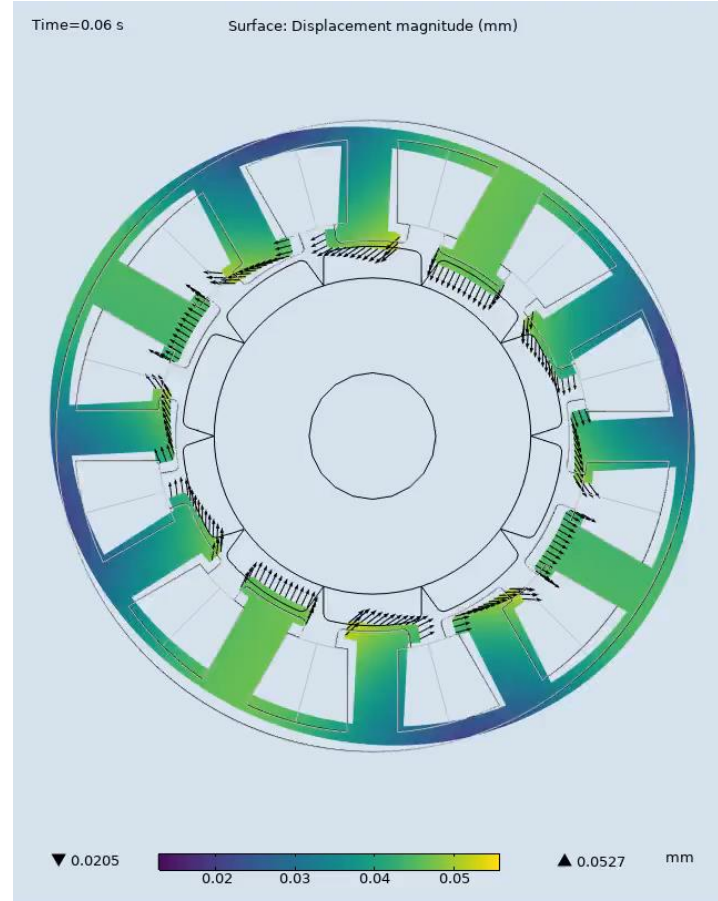
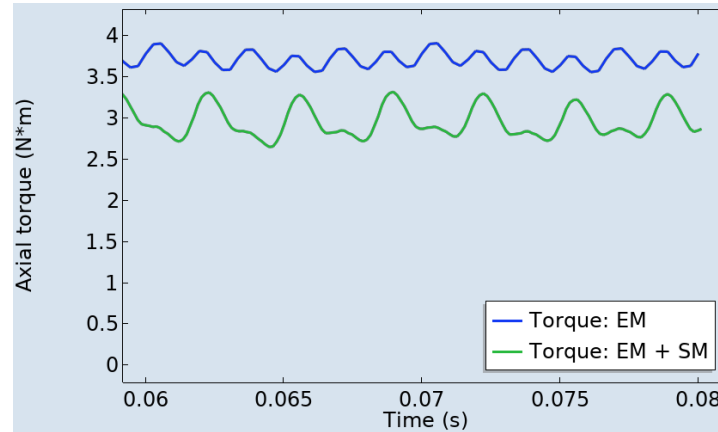
Orbity rotoru pro ložiska 1 a 2.

- 2D elektromagnetický model propojený s 3D výpočtem strukturální mechaniky
- Mění se šířka vzduchové mezery mezi rotorem a statorem
- Nevyrovnané elektromagnetické síly způsobují vibrace

# Efekt Deformace

Mechanická deformace negativně ovlivňuje točivý moment motoru

COMSOL umožňuje obousměrné propojení elektromagnetického a strukturálního výpočtu



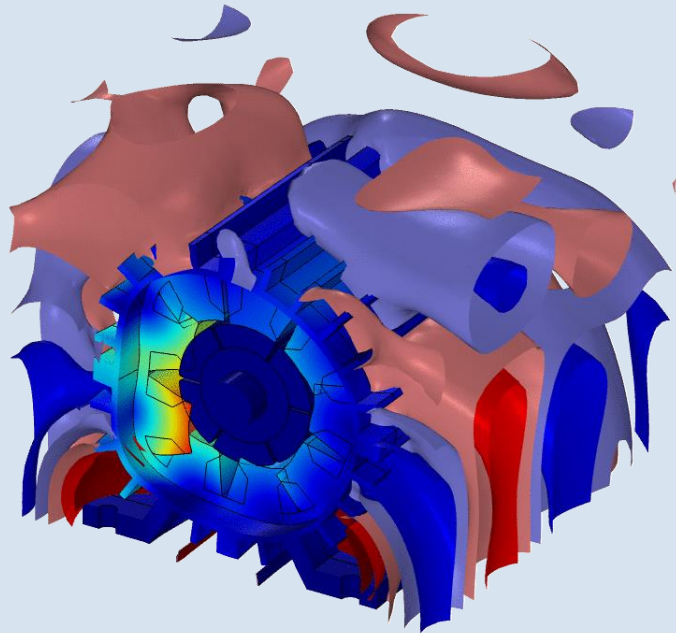
Vlevo nahoře: Točivý moment  $s$  a bez strukturálních deformací

Vpravo: Von Mises namáhání

Vlevo dole: Pole deformací (20x scaling factor)

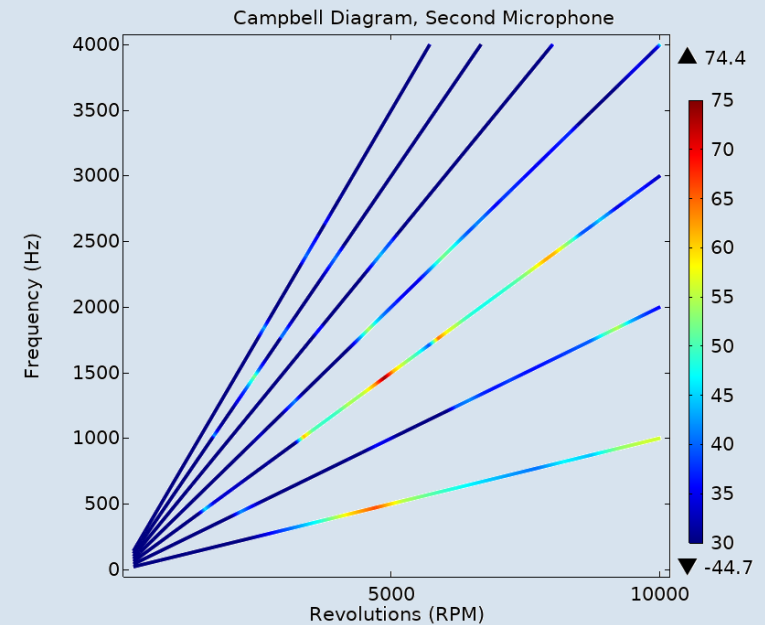


# Vibro-Akustická Analýza



## Akustický Tlak

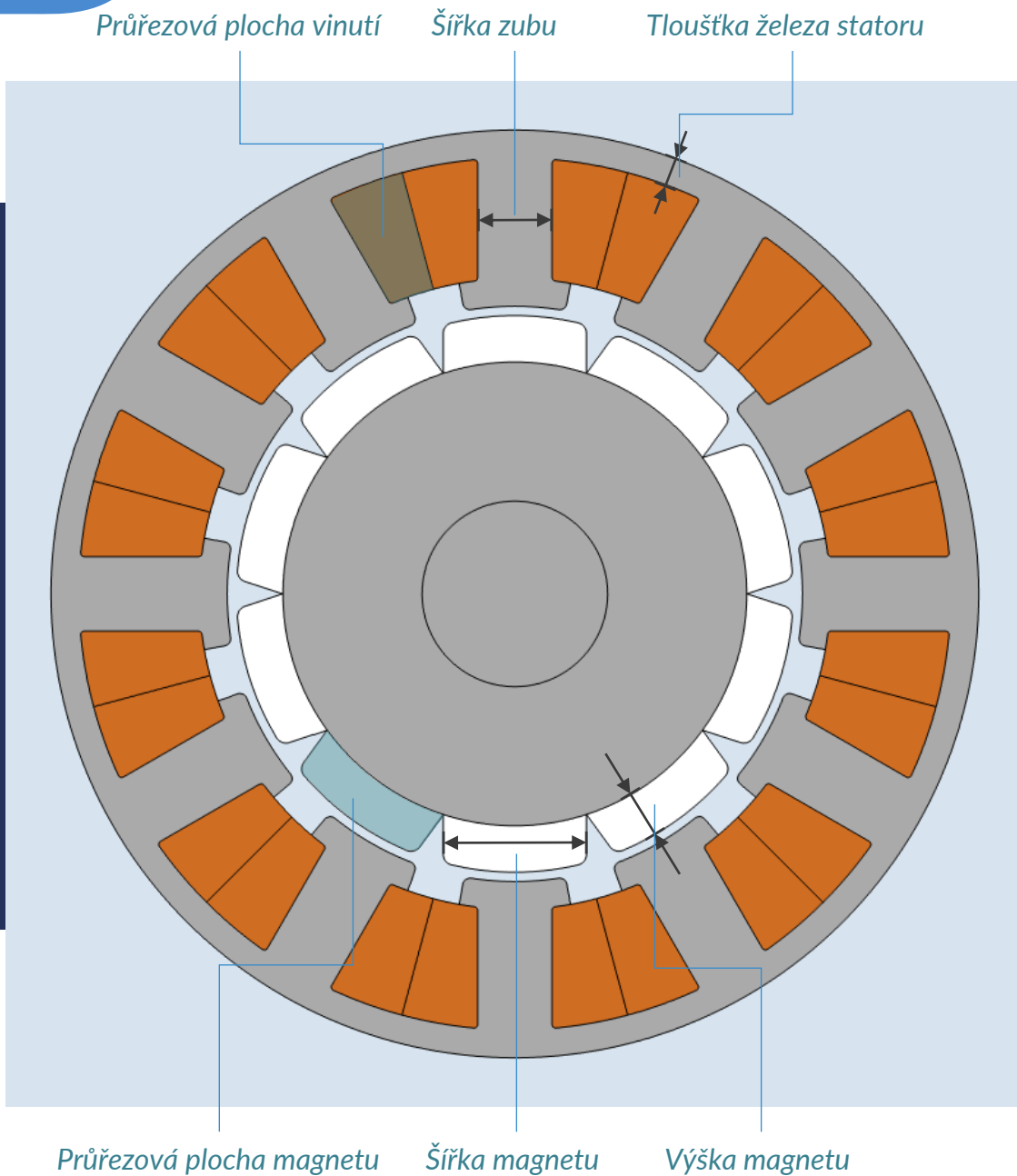
Výpočet elektromagnetického namáhání je propojen se strukturálně-akustickým modelem



## Campbellův Diagram

Rychlost otáček vs. frekvence hluku

Barva značí intenzitu hluku



## Optimalizační Úloha

Parametrická, tvarová a topologická optimalizace

Cíl: Maximalizovat točivý moment

Kontrolní proměnné: Šířka zubu, Tloušťka železa statoru, Výška a šířka magnetu

Omezení: Zachování plochy vinutí, 10% redukce plochy magnetu

## USER STORY: VOLKSWAGEN – KASSEL

# Topologická Optimalizace pro Efektivní Návrh Elektromotoru

Simulation Applications Streamline the Development of Electric Vehicle Motors. © 2020 COMSOL. IEEE Spectrum Multiphysics Simulation. Research by Marie Hermanns and Steffan Rothe, Volkswagen Kassel, Germany.

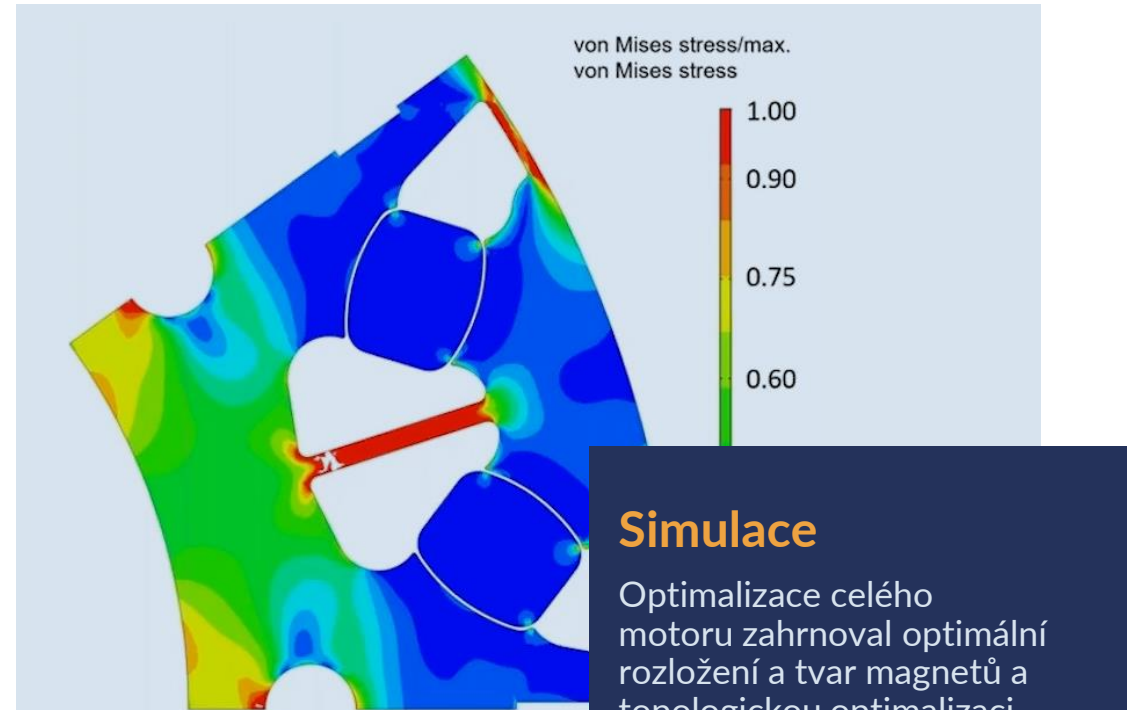


VW ID.4: Struktura pohonu zadní nápravy. Obrázek poskytl Volkswagen.

### Cíl

Elektrický pohon Volkswagenu ID.4 používá synchronní motor s permanentními magnety.

Cílem inženýrů bylo najít optimální uspořádání rotoru.

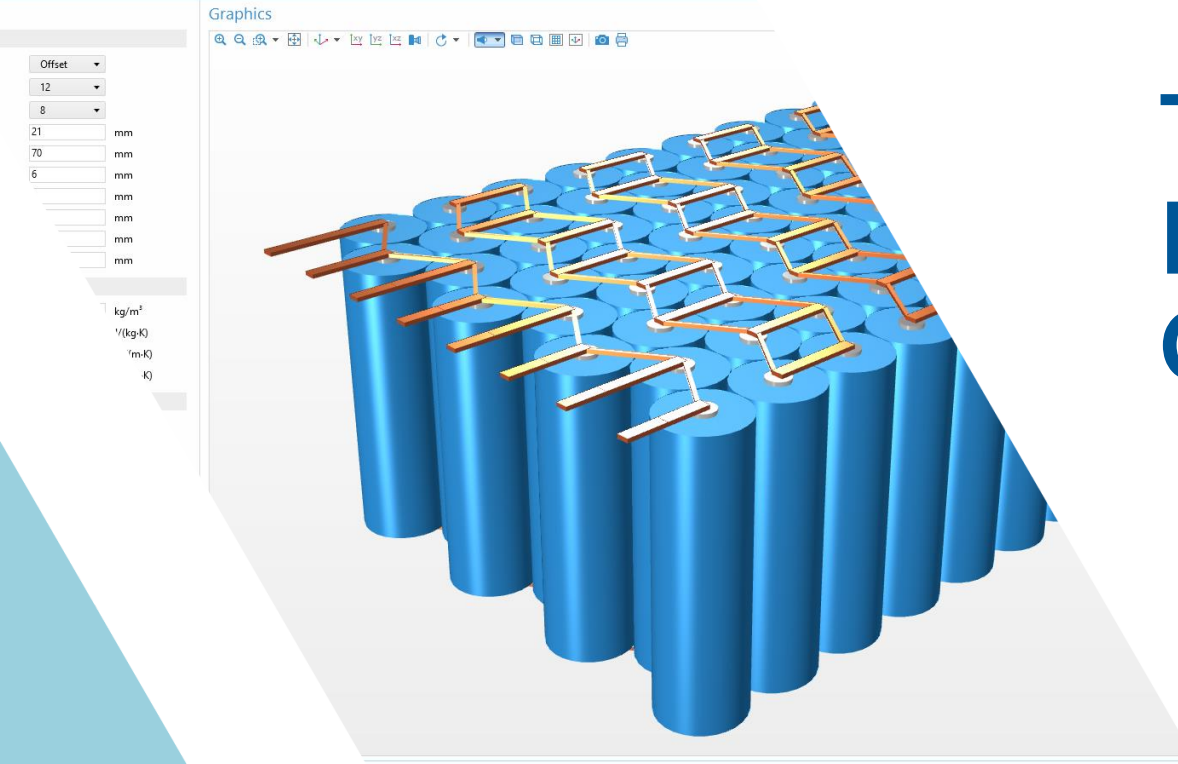
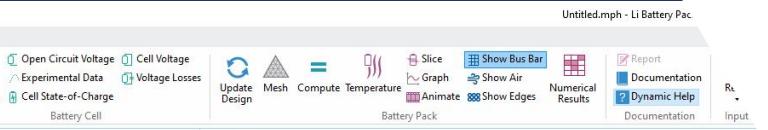


Analýza statické přetížení.  
Obrázek poskytl Volkswagen.

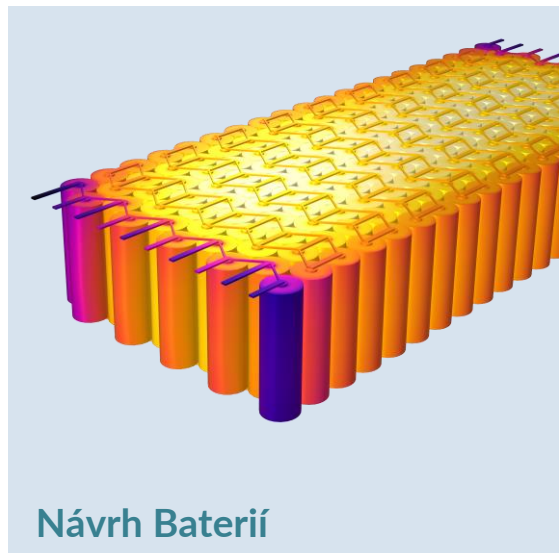
### Simulace

Optimalizace celého motoru zahrnoval optimální rozložení a tvar magnetů a topologickou optimalizaci rotoru.

Model spojuje elektromagnetický a mechanický výpočet.



# Trendy v Simulacích Baterií a Palivových Článků



Návrh Baterií

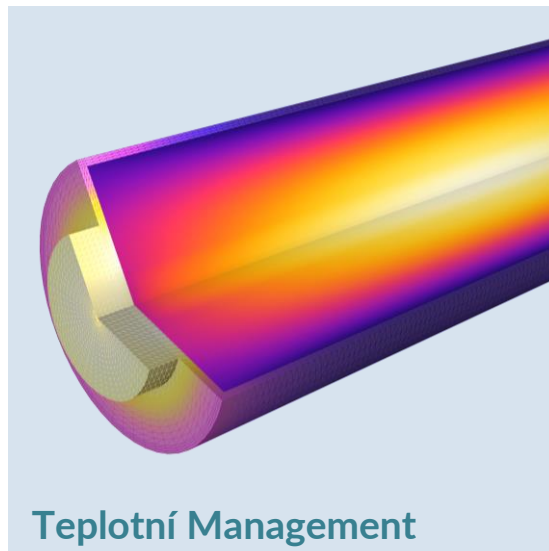
Palivové Články a  
Elektrolyzéry

# Modelování Baterií a Palivových Článků..

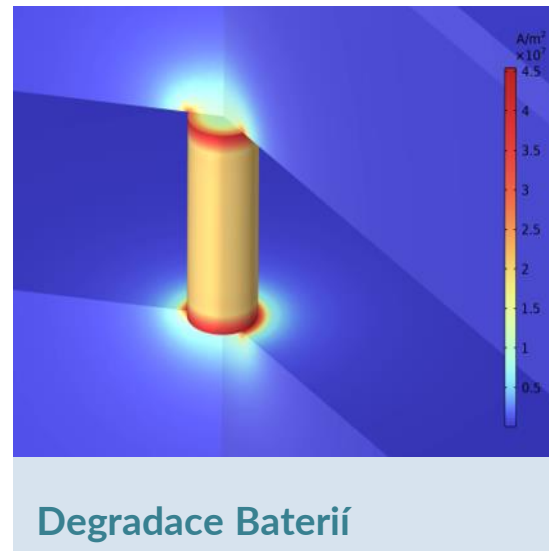
...implikuje multidisciplinární a  
multifyzikální simulace

## COMSOL Multiphysics® zahrnuje:

- Přednastavená fyzikální rozhraní pro inženýry navrhující baterie a palivové články
- Nástroje pro tvorbu komplexních simulačních aplikací

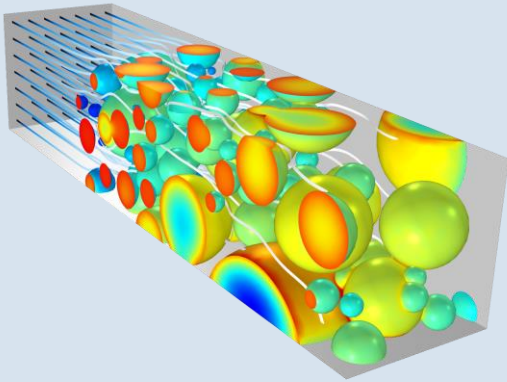


Teplotní Management

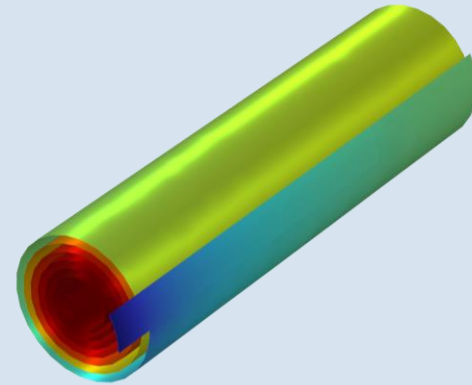


Degradace Baterií

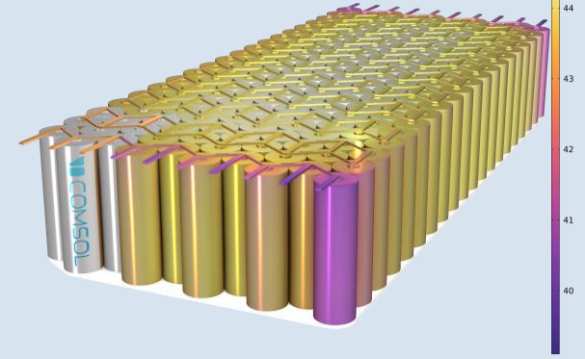
# Battery Design Module: Škálovatelnost Fyzikálního Problému



Mikroskopický pohled: heterogenní 3D model Li-ion elektrody.



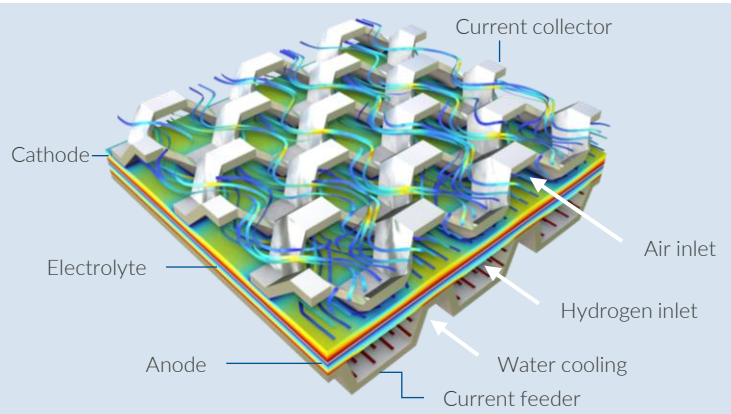
Jediný článek: plnohodnotný 3D Newmanův model Li-ion článku.



Bateriový pack: distribuovaný zjednodušený model článku pro každou Li-ion baterii s 3D přestupem tepla.

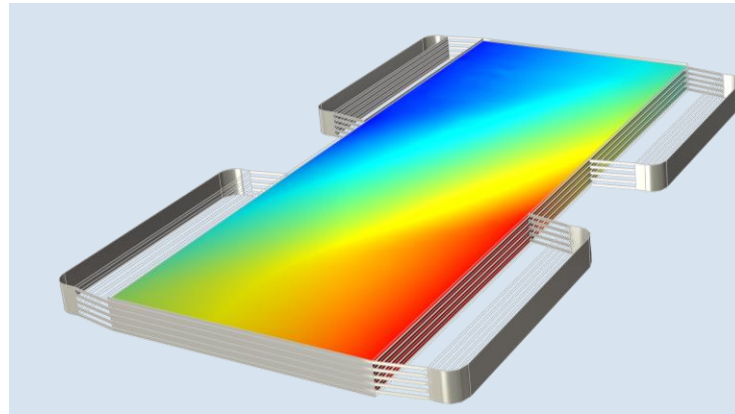
- Od mikroskopického modelu po bateriový pack
- Plná elektrochemická formulace v 1D, 2D a 3D
- 1D detailní elektrochemie nebo zjednodušený diskretizovaný model pro simulování více článků, např. pro simulace teplotního managementu
- Časově závislé studie, zahrnující přechodové jevy, nabíjecí cyklus a EIS\* studie pro všechny rozměrové škály a chemie

# Fuel Cell & Electrolyzer Module



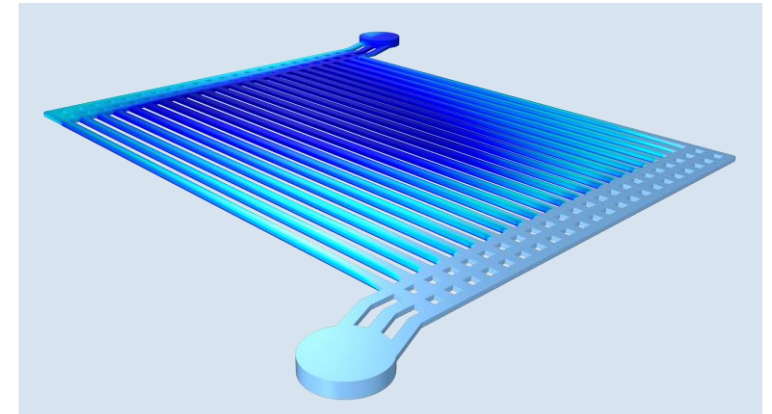
## Gas-Difuzní Elektrody (GDEs), Separátory, Membrány, Kolektory Proudů a Bipolární Desky

- Primární, sekundární a terciární distribuce proudu v elektrodách s difuzní vrstvou plynu
- Modely kapalného, membránového a pevného elektrolytu
- Propojení se CFD a přestupem tepla



## Rozhraní pro Vodíkové Palivové Články a Elektrolýzu Vody

- Termodynamická knihovna s rovnovážnými potenciály, difúzními koeficienty, viskozitami a parními tlaky pro dvojčinné systémy
- Transport membránou pro přechod plynů, parazitické proudy a elektroosmotické odporové síly vody
- Vícerozložkový transport s Maxwell–Stefaovou rovnicí



## CFD a Přestup Tepla

- Dvoufázové laminární proudění: bublinový model, modely směsí, Euler–Euler a fázový transport
- Proudění v porézním médiu s Darcyho zákonem a Birkmanovou rovnicí
- Přestup tepla s předdefinovanými elektrochemickými zdroji tepla pro snadné propojení fyzikálních rozhraní

## THE BATTERY DESIGN MODULE

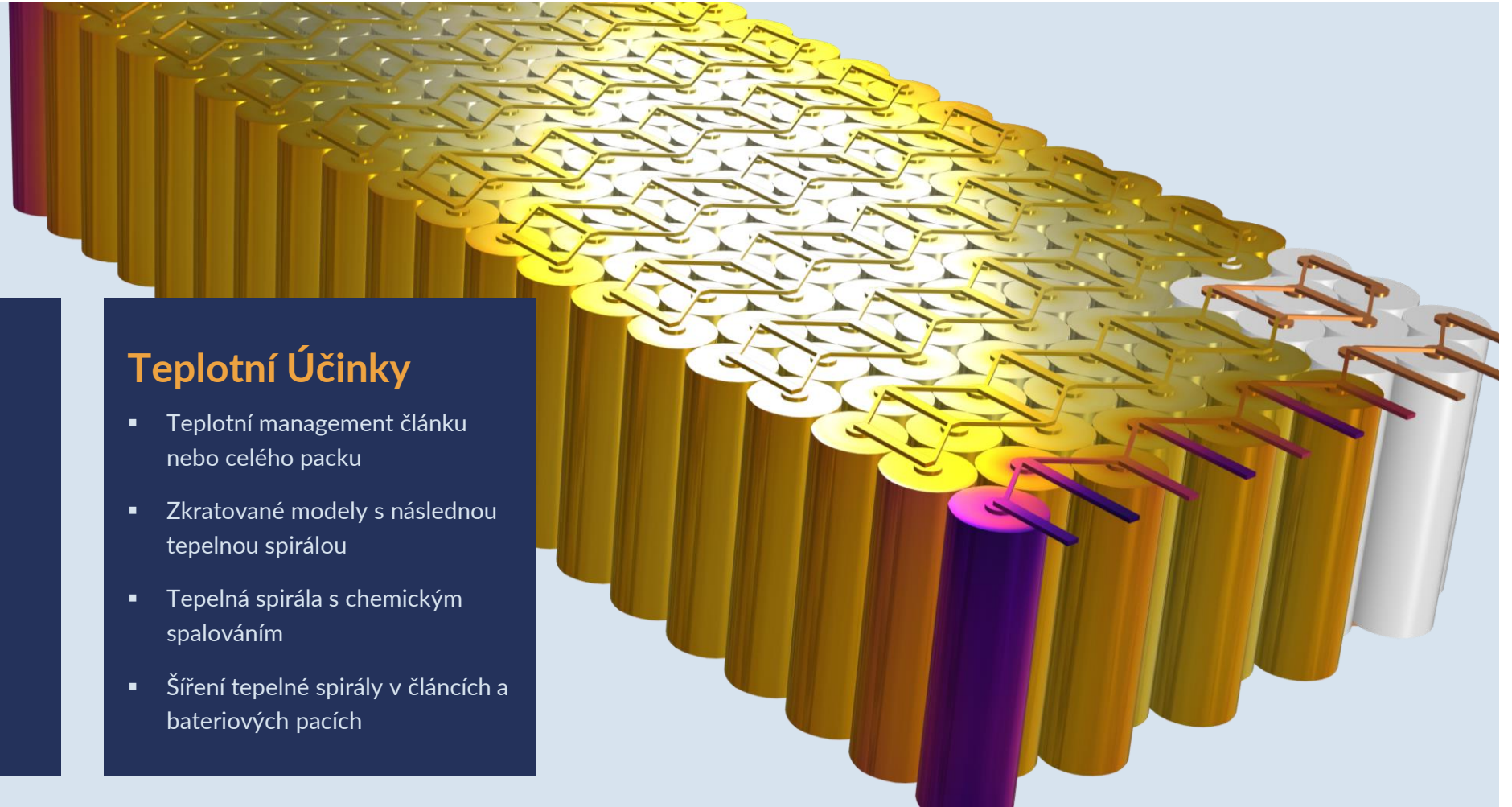
# Stárnutí Baterií a Teplotní Management

## Stárnutí

- Vedlejší reakce a zmenčování reakční plochy
- Pokovování a skraty
- SEI
- Únik plynů
- Mechanická degradace
- Únik elektrolytu

## Teplotní Účinky

- Teplotní management článku nebo celého packu
- Zkratované modely s následnou tepelnou spirálou
- Tepelná spirála s chemickým spalováním
- Šíření tepelné spirály v člancích a bateriových pacích







# COMSOL Multiphysics®

## Model Builder

Kombinujte fyzikální rozhraní v jediném modelu.

## Application Builder

Vytvářejte aplikace z multifyzikálních modelů.

## Model Manager

Spolupracujte s kolegy a organizujte modely v přehledné databázi.

# Model Builder

Switch between the Model Builder, Application Builder, and Model Manager

Geometry

Materials

Physics

Mesh

Studies

Results

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics Model Builder interface for a battery application. The main window is titled "battery\_app.mph - COMSOL Multiphysics". The interface is divided into several panes:

- Model Builder (Left):** A tree view showing the model structure. The "Electrochemical Heating 1 (ech1)" node is selected under the "Multiphysics" section.
- Settings (Middle-Left):** Configuration options for the selected node. The "Domain Selection" is set to "All domains". The "Equation" section shows the governing equations for electrochemical heating, including the heat balance equation and the Nernst equation for the open-circuit voltage.
- Graphics (Right):** A 3D visualization of the battery model, showing a stack of cylindrical cells. The time is set to "Time=0.2 h".
- Bottom Panel:** A "Messages" and "Progress" bar, along with a "Log" window showing the "Open Circuit Voltage" results.

The following equations are displayed in the Settings pane:

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_h$$

$$Q_h = \left( \eta_{IR} + \eta_{act} + T \frac{\partial E_{OCV}(SOC)_{X=1}}{\partial T} \right) I_{cell} + Q_{mix}$$

$$Q_{mix} = \frac{3Q_{cell,0}}{\tau} \int_0^1 \rho \frac{\partial E_{OCV,therm}}{\partial SOC} \frac{\partial SOC}{\partial X} \frac{\partial SOC}{\partial X} X^2 \partial X \quad \text{for a pa}$$

$$E_{OCV,therm} = E_{OCV,ref}(SOC) - T_{ref} \frac{\partial E_{OCV}(SOC)}{\partial T}$$

The bottom panel shows the following data for the "Open Circuit Voltage" plot:

SOC	Open circuit voltage(V)
0.0000	1.3104
0.0100000	1.311

# Application Builder

Switch between:  
Model Builder  
Application Builder  
Model Manager

The screenshot displays the COMSOL Multiphysics interface for a battery application. The top ribbon includes tabs for File, Home, Definitions, Geometry, Materials, Physics, Mesh, Study, Results, and Developer. The main workspace is divided into three panels:

- Model Builder:** Shows a hierarchical tree of the model structure. The selected item is "Electrochemical Heating 1 (ech1)".
- Settings:** Displays the configuration for "Electrochemical Heating 1". The domain selection is set to "All domains". The equation is shown as:
 
$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q_h$$

$$Q_h = \left( \eta_{IR} + \eta_{act} + T \frac{\partial E_{OCV}(SOC|_{X=1}, T)}{\partial T} \right) I_{cell} + Q_{mix}$$

$$Q_{mix} = \frac{3Q_{cell,0}}{\tau} \int_0^1 \frac{\partial E_{OCV,therm}}{\partial SOC} \frac{\partial SOC}{\partial X} x^2 dx \quad \text{for a pa}$$

$$E_{OCV,therm} = E_{OCV,ref}(SOC) - T_{ref} \frac{\partial E_{OCV}(SOC)}{\partial T}$$
- Graphics:** Shows a 3D visualization of the battery cell structure at Time=0.2 h. The surface is labeled "Temperature (K)".

# Application Builder

Forms and UI widgets

Access model parameters and settings

Methods to create code snippets in Java<sup>®</sup>

The screenshot displays the COMSOL Application Builder interface for a 'battery.mph' project. The main window is titled 'Battery Pack' and is divided into several sections:

- Left Panel (Application Builder):** A tree view showing the project structure, including 'battery.mph (root)', 'Inputs', 'Themes', 'Main Window', 'Forms', 'main', 'batteryCell', 'properties', 'openCircuitVoltage', 'experimentalData', 'advancedSettings', 'fittingParameters', 'batteryPack', 'design', 'materialProperties', 'conditions', 'solverMeshSettings', 'information', 'postprocessingSlider', 'numericalResults', 'resultsTableFull', 'helpBatteryCell', 'helpBatteryPack', 'Events', 'Declarations', 'Methods', and 'Libraries'.
- Top Bar:** Contains menu options (File, Home, Form) and a toolbar with icons for 'Form Objects' (Input Field, Button, Check Box, Text Label, Data Display, Graphics, More Objects), 'Layout' (Grid, Sketch), 'Sketch' (Show Grid Lines, Arrange Lines), 'Grid' (Row Settings, Column Settings, Insert, Remove, Align, Merge Cells, Split Cell, Extract Subform), and 'Test' (Test Application, Apply Changes, Preview Form, Test in Web Browser).
- Central Design Area:** A 'Form Editor' window for interactive UI design using drag and drop. It features a 'Design' panel with settings for 'Battery Pack' (Packing type, Number of batteries in series, Number of batteries in parallel, Battery diameter, Battery height, Terminal diameter, Terminal thickness, Bus bar thickness, Serial connector width, Parallel connector width) and 'Battery Material Properties' (Density, Heat capacity, Thermal conductivity, in plane, Thermal conductivity, cross plane). Below these are 'Conditions' (C rate, Initial state-of-charge, Final state-of-charge, Initial/external temperature, Heat transfer coefficient, sides, Heat transfer coefficient, top, Heat transfer coefficient, bottom) and 'Solver and Mesh Settings' (Number of output time steps).
- Right Panel (Settings):** A 'Settings' panel for the 'Form' window, including 'Name', 'Title', 'Icon', 'Size' (Initial size, Margins), 'Dialog Settings' (Store changes, Resizable), and 'Grid Layout for Content' (a table with columns and rows).

Annotations with blue arrows point to the 'Forms and UI widgets' (top left), 'Access model parameters and settings' (middle left), 'Methods to create code snippets in Java<sup>®</sup>' (bottom left), and the 'Form Editor window for interactive UI design using drag and drop' (center right).

7.34 GB | 7.76 GB

# Simulation Applications

Design

Operating conditions

Results

Graphics

Untitled.mph - Li Battery Pack Designer

File Home

Battery Cell Battery Pack

Compute Parameters

Open Circuit Voltage Cell Voltage

Experimental Data Voltage Losses

Cell State-of-Charge

Update Design Mesh

Compute Temperature

Slice Show Bus Bar

Graph Show Air

Animate Show Edges

Numerical Results

Documentation

Battery Pack

Graphics

Time=0.2 h

Surface: Temperature (K)

**Battery Pack**

▼ Design

Packing type: Offset

Number of batteries in series: 20

Number of batteries in parallel: 10

Battery diameter: 21 mm

Battery height: 70 mm

Terminal diameter: 6 mm

Terminal thickness: 1 mm

Bus bar thickness: 1 mm

Serial connector width: 3 mm

Parallel connector width: 1 mm

▼ Conditions

C rate: 4

Initial state-of-charge: 1

Final state-of-charge: 0.2

Initial/external temperature: 20 °C

Heat transfer coefficient, sides: 30 W/(m<sup>2</sup>·K)

Heat transfer coefficient, top: 30 W/(m<sup>2</sup>·K)

Heat transfer coefficient, bottom: 5 W/(m<sup>2</sup>·K)

Numerical Results

Export to Text Export to Excel Clear Table

Variable name	Solution 1
Maximum battery temperature [degC]	44.7612
Average battery temperature [degC]	30.6030
Battery pack volume [m <sup>3</sup> ]	0.00585087
Battery capacity [A*h]	4
Optimality tolerance	0.01
Ohmic overpotential at 1C [V]	0.0045162
Diffusion time constant [s]	1374.4
Dimensionless charge exchange current	0.86471
Packing type	Offset
Batteries in series	20
Batteries in parallel	10
Battery diameter [mm]	21
Battery height [mm]	70
Terminal diameter [mm]	6
Bus bar thickness [mm]	1
Serial connector width [mm]	3
Parallel connector width [mm]	1
Battery density [kg/m <sup>3</sup> ]	2000
Battery heat capacity [J/(kg*K)]	1400
Thermal conductivity, in plane [W/(m*K)]	30
Thermal conductivity, cross plane [W/(m*K)]	1
C rate	4
Initial state of charge	1
Final state-of-charge	0.2
Initial/external temperature [degC]	20
Heat transfer coefficient, sides [W/(m <sup>2</sup> *K)]	30
Heat transfer coefficient, top [W/(m <sup>2</sup> *K)]	5
Heat transfer coefficient, bottom [W/(m <sup>2</sup> *K)]	30
Mesh size	Normal

battery\_app.mph - COMSOL Multiphysics

File Home Definitions Geometry Materials Physics Mesh Study Results Developer

Application Builder Model Manager Component 2 Add Component Parameters Variables Functions Variable Utilities Parameter Case Build All Import LiveLink Add Material Lumped Battery 2 Add Physics Build Mesh Mesh 1 Compute Study 1 Add Study Battery Pack Add Plot Group Windows Reset Desktop

Model Builder

- battery\_app.mph (root)
  - Global Definitions
    - Parameters: Geometry Sequence
    - Parameters: Parameter Estimation
    - Parameters: Thermal Management
    - Load Cycle Data ( $E_{cell\_exp}$ ,  $L_{cell\_exp}$ )
    - Open Circuit Voltage (int2)
  - Geometry Parts
  - Default Model Inputs
  - Materials
  - Component 1 (comp1)
    - Definitions
    - Lumped Battery (lb)
      - Cell Equilibrium Potential 1
      - Voltage Losses 1
  - General Optimization (opt)
    - Definitions
  - Component 2 (comp2)
    - Definitions
    - Geometry 1
    - Materials
    - Heat Transfer in Solids (ht)
      - Lumped Battery 2 (lb2)
        - Cell Equilibrium Potential 1
        - Voltage Losses 1

Settings

Voltage Losses

Equation

Show equation assuming: Study 1, Time Dependent

$$E_{cell} = E_{ocv}(\overline{SOC}, T) + \eta_{IR} + \eta_{act} + \eta_{conc}$$

$$\eta_{IR} = \eta_{IR,1C} \frac{I_{cell}}{I_{1C}}$$

$$\eta_{act} = \frac{2RT}{F} a \sinh \frac{I_{cell}}{2j_0 I_{1C}}$$

$$\tau \frac{\partial SOC}{\partial t} + \nabla \cdot (-\nabla SOC) = 0$$

$$\nabla SOC|_{x=1} = \frac{\tau I_{cell}}{3Q_{cell,0}}; \nabla SOC|_{x=0} = 0; SOC|_{t=0} = SOC_{cell,0}$$

$$\overline{SOC} = 3 \int_0^1 SOC x^2 dx$$

$$\eta_{conc} = E_{ocv}(SOC|_{x=1}, T) - E_{ocv}(\overline{SOC}, T)$$

Model Input

Temperature: T Temperature (ech1)

Ohmic Overpotential

Ohmic overpotential at 1C:  $\eta_{IR,1C}$  opt\_eta\_IR\_1C V

Activation Overpotential

Include activation overpotential

Dimensionless charge exchange current:  $j_0$  opt\_j0 1

Include double layer capacitance

Concentration Overpotential

Include concentration overpotential

Particle diffusion

Diffusion time constant:  $\tau$  opt\_tau s

Particle type: Spheres

Graphics Temperature Inside pack x

Time=0.2 h Surface: Temperature (K)

z  
y

Messages x Progress Log Load Cycle Data x

[Mar 15, 2022, 4:57 PM] Opened file: D:\models\battery\_assembly\battery\_app.mph

Untitled.mph - Li Battery Pack Designer

File Home

Battery Cell Battery Pack Compute Parameters Open Circuit Voltage Cell Voltage Experimental Data Voltage Losses Cell State-of-Charge

Update Design Mesh Compute Temperature Slice Graph Show Bus Bar Show Air Numerical Results Report Documentation Dynamic Help Reset Input

### Battery Pack

Design

Packing type: Offset

Number of batteries in series: 20

Number of batteries in parallel: 10

Battery diameter: 21 mm

Battery height: 70 mm

Terminal diameter: 6 mm

Terminal thickness: 1 mm

Bus bar thickness: 1 mm

Serial connector width: 3 mm

Parallel connector width: 1 mm

Battery Material Properties

Density: 2000 kg/m<sup>3</sup>

Heat capacity: 1400 J/(kg·K)

Thermal conductivity, in plane: 30 W/(m·K)

Thermal conductivity, cross plane: 1 W/(m·K)

Conditions

C rate: 4

Initial state-of-charge: 1

Final state-of-charge: 0.2

Initial/external temperature: 20 °C

Heat transfer coefficient, sides: 30 W/(m<sup>2</sup>·K)

Heat transfer coefficient, top: 30 W/(m<sup>2</sup>·K)

Heat transfer coefficient, bottom: 5 W/(m<sup>2</sup>·K)

Solver and Mesh Settings

Number of output time steps: 11

Mesh size: Normal

Information

Battery Cell:  Solution not yet available.

Battery Pack:  Last computation time: 30 min 15 sec

### Graphics

Time=0.2 h

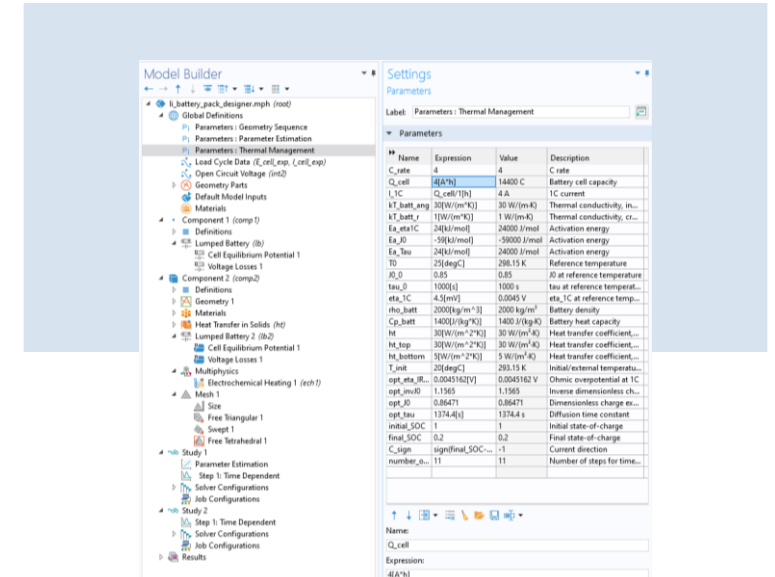
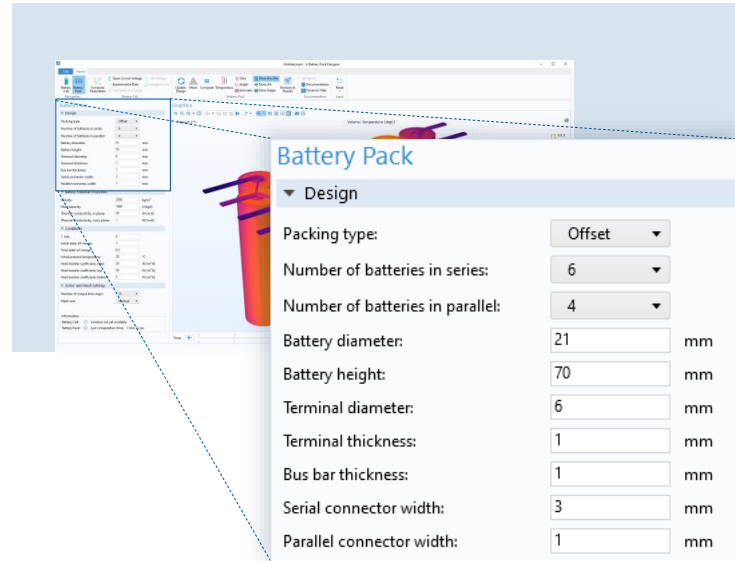
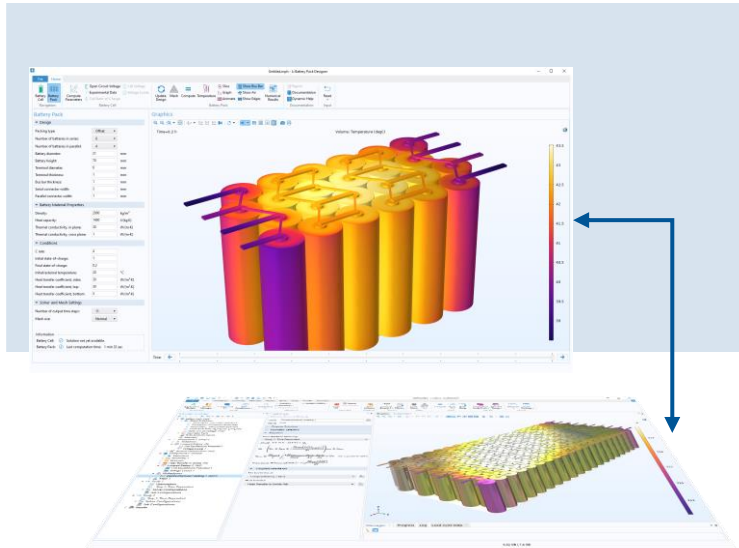
Surface: Temperature (K)

z

x y

Time:

# Shrnutí: Co je simulační aplikace?



## GUI vytvořené na základě FEM modelu

Umožňuje intuitivní a efektivní interakci s modelem pomocí specializovaného uživatelského rozhraní.

## Typické funkce:

- Vstupy a výstupy pro definované úlohy
- Dokumentace
- Automatické generování reportů

## Co všechno můžete ovládat?

Tvůrce aplikace Vám může zpřístupnit veškeré prvky nastavení původního FEM modelu. Záleží jen na Vás jak komplexní bude výsledná aplikace.



# Konference COMSOL Multiphysics 2023

## Konference COMSOL Multiphysics 2023

Setkání českých a slovenských uživatelů a příznivců programu COMSOL Multiphysics.

- 25. - 26.5. 2023
- <https://www.humusoft.cz/event/comsol-2023/>
- Lednice, jižní Morava
- Hotel Galant nebo online

Datum: 25.-26.5.2023 (čtvrtek až pátek)

Místo: Hotel Galant, Lednice, Česká republika

Vstupné: ZDARMA

Jazyk: Čeština, Slovenština

Úvod

Program

Ubytování a občerstvení

Přihláška

Pozvěte kolegu

### Středa (24.5.2023)

17:00 Registrace a blok pro předem domluvené osobní konzultace

18:30 Návštěva Lednicko-valtického areálu

20:00 Konec registrace

### Čtvrtek (25.5.2023)