

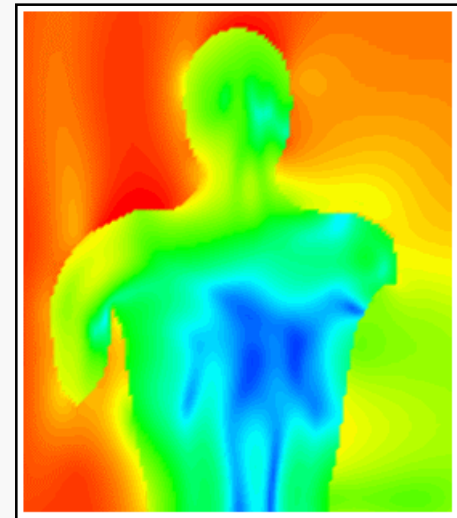
**Berechnung der spezifischen  
Absorptionsrate (SAR)  
dielektrischer Körper mit FEKO**

Christoph Mäurer  
EM Software & Systems, Böblingen



## Inhalt:

- Elektromagnetische Umweltverträglichkeit EMVU
  - Wechselwirkung hochfrequenter elektromagnetischer Felder mit biologischen Körpern
  - Normen, Grenzwerte
- Modellierung von Dielektrika in FEKO
  - Validierung
  - Einfluss der Diskretisierung
  - Homogene und inhomogene Modellierung
  - Algorithmen zur SAR-Berechnung
- Beispiel: Befeldung einer Person im Kfz-Innenraum durch GSM Antenne



# Wirkungen elektromagnetischer Felder auf den Menschen

- **Thermische Wirkung** (Hochfrequenzabsorption)
  - Absorption der Hochfrequenzstrahlung durch Orientierungspolarisation der Wassermoleküle
  - Thermische Wirkung kann durch den SAR-Wert quantifiziert werden: SAR-Wert von 4 W/kg über 30 Minuten entspricht ungefähr einer Temperaturerhöhung von 1° C.
- **Nicht thermische Wirkung**
  - In-vitro, In-vivo und epidemiologische Untersuchungen
  - Bei der Bewertung ist die Unterscheidung zwischen wissenschaftlichem *Nachweis*, wissenschaftlich begründetem *Verdacht* und wissenschaftlichem *Hinweis* zu beachten
  - Untersuchungen zu Kanzerogenität, Kalziumtransport, Fortpflanzung, Herz-Kreislaufsystem, Hirnstromaktivität und kognitive Funktionen, Melatoninhaushalt, Blut-Hirnschranke, etc.

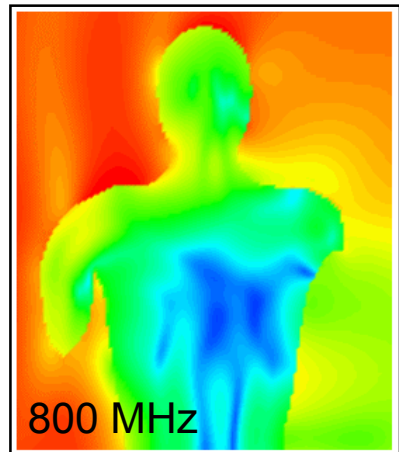
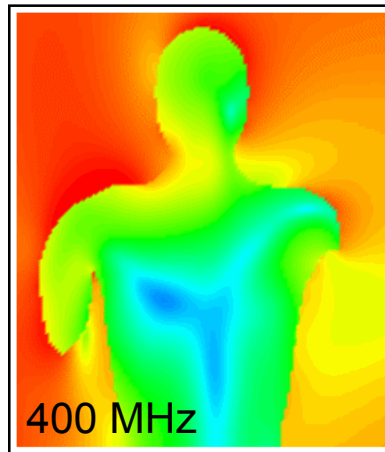
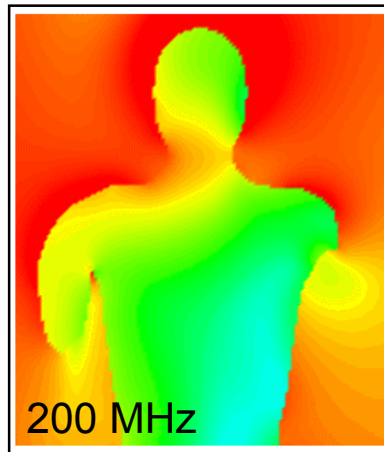
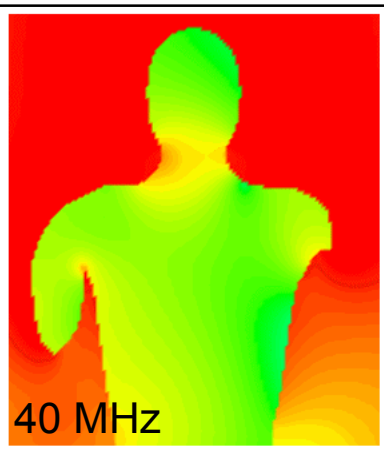
# Thermische Wirkungen elektromagnetischer Felder

Spezifische Absorptionsrate (SAR):

$$SAR = \frac{1}{2} \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad [W/kg]$$

E [V/m]	el. Feldstärke im Dielektrikum
$\sigma$ [S/m]	Leitfähigkeit des Dielektrikums
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Dielektrikums
$\epsilon_r$	rel. Dielektrizitätszahl
f [Hz]	Frequenz

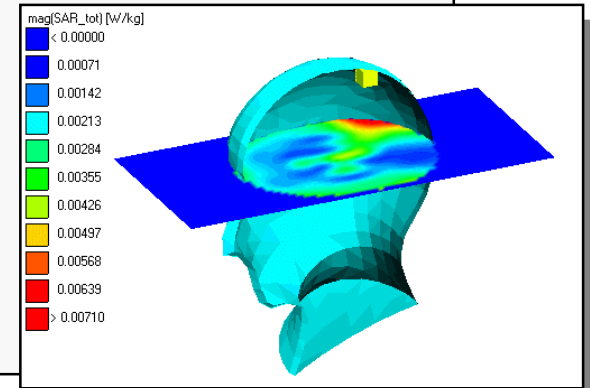
Absorption:      1380 mW                      1521 mW                      942 mW                      720 mW



# Normen und Grenzwerte

Empfehlung der **ICNIRP** (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) für den Frequenzbereich 100 kHz - 10 GHz :

- Ganzkörper SAR-Wert:
  - **0.08 W/kg** („general public exposure“)
  - 0.4 W/kg („occupational exposure“)
- Lokaler (Teilkörper) SAR-Wert:
  - **2 W/kg** („general public exposure“)
  - 10 W/kg („occupational exposure“)



- Alle SAR-Werte sind gemittelt über ein 6 Minuten Intervall
- **Der Teilkörper SAR-Wert ergibt sich als Maximum der über 10g zusammenhängendes Gebiet gemittelten lokalen SAR-Werte**
- Für Arme und Beine gilt ein um Faktor 2 höherer Teilkörper-grenzwert
- Unterhalb von 10 MHz wird auch ein Grenzwert für die Flächenstromdichte vorgegeben

## Abgeleitete Grenzwerte (ICNIRP)

Frequenz	E [V/m]	H [A/m]	S <sub>eq</sub> [W/m <sup>2</sup> ]
10 - 400 MHz	28	0.073	2
400 - 2000 MHz	1.375 f <sup>1/2</sup>	0.0037 f <sup>1/2</sup>	f / 200
2 - 300 GHz	61	0.16	10

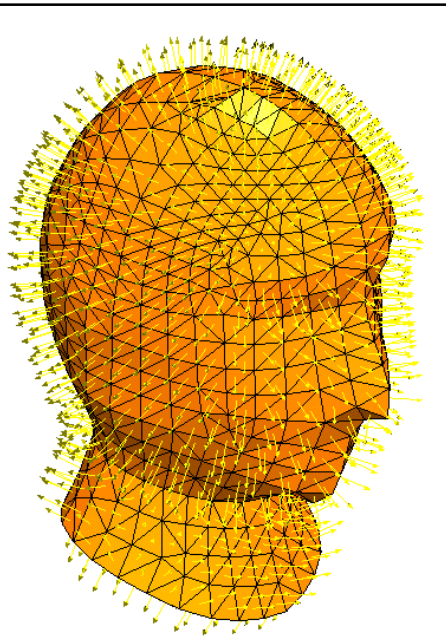
„general public exposure“

- Die abgeleiteten Grenzwerte sind so gewählt, daß auch unter ungünstigen Expositionsbedingungen der Ganzkörper Basisgrenzwert ebenfalls eingehalten ist.
- Die Feldstärke- und Leistungsdichtewerte sind quadratisch gemittelt über ein Intervall von 6 Minuten
- Bei gepulsten elektromagnetischen Feldern gilt eine zusätzliche Begrenzung der Feldstärkespitzenwerte auf das 32fache der abgeleiteten Grenzwerte

# Modellierung von Dielektrika in FEKO

2 Möglichkeiten zu Modellierung beliebiger dielektrischer Körper:

- **Flächenstrommethode:**  
Definition der Oberfläche des Dielektrikums mit ME- und DI-Karte
- **Volumenstrommethode:**  
Definition von dielektrischen Quadern mit QU-Karte



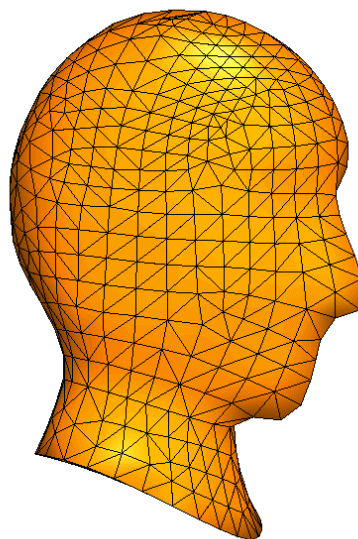
- Für die Abschätzung der Gesamtabsorption und der maximalen Teilkörperabsorption reichen homogene Modelle aus
- Die Beschreibung inhomogener Dielektrika ist möglich, aber sehr aufwendig
- Die exakte Feldverteilung im Körperinnern kann nur mit inhomogenen Modellen bestimmt werden

# Materialparameter

Für die Simulation mit dem homogenen Modell können Materialparameter, wie sie für SAR-Messungen am Phantommodell üblich sind, verwendet werden.

## Dielektrische Eigenschaften (890 MHz):

	$\epsilon_r$	$\sigma$ [S/m]
Blut	61.4	1.53
Haut (trocken)	41.5	0.86
Haut (naß)	46.1	0.84
Fett	5.5	0.05
Knochen	20.8	0.34
Nerven	32.6	0.57
Muskelfaser	56.1	0.96
Auge	55.3	1.16
Zunge	55.3	0.93



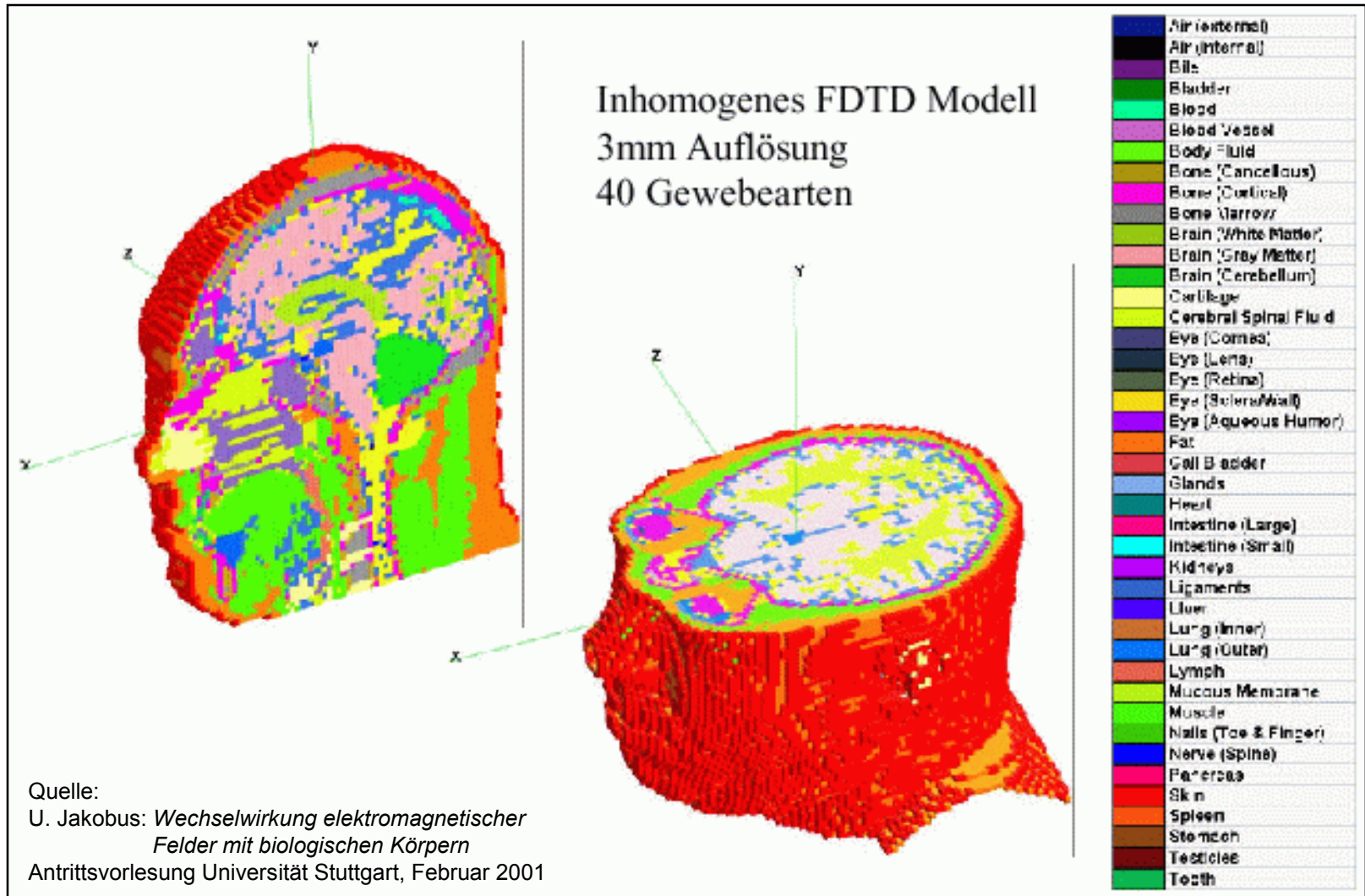
## Durchschnittliche Materialwerte:

	$\epsilon_r$	$\sigma$ [S/m]
Gehirn:		
100 MHz	68.47	0.44
890 MHz	45.85	0.76
Schädel:		
100 MHz	21.46	0.12
890 MHz	16.64	0.24
Muskel:		
100 MHz	66.19	0.73
890 MHz	55.98	0.97

Quelle: <http://www.fcc.gov/fcc-bin/dielec.sh>



# Inhomogenes Kopfmodell



Anregung: Generisches Mobilfunkgerät am linken Ohr,  
 $f = 900 \text{ MHz}$ ,  $P = 100 \text{ mW}$

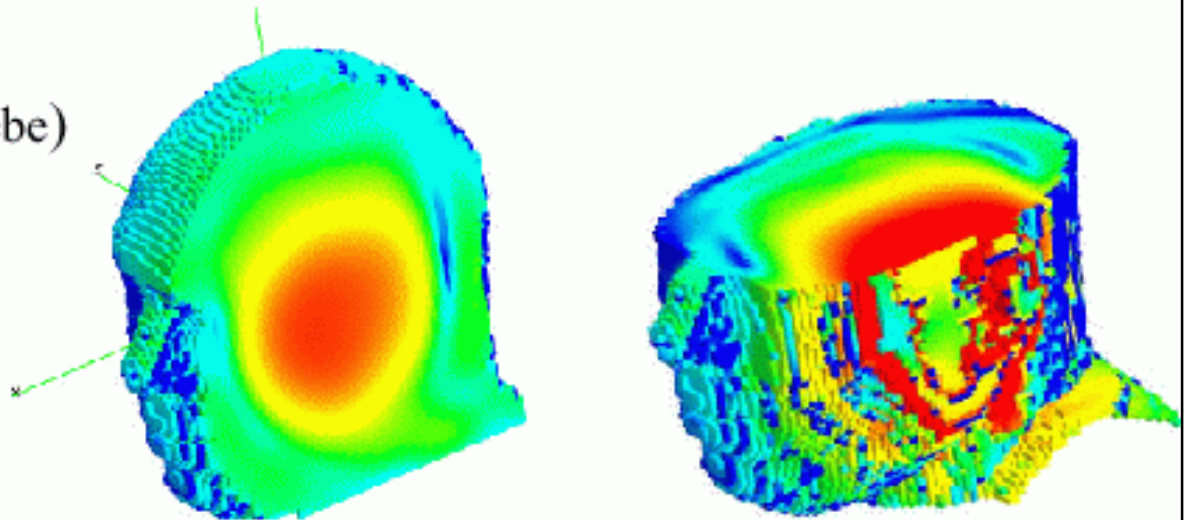
### Homogenes Kopf- Modell (Ersatzgewebe)

Absorbierte Leistung:

69.8 mW

Peak-SAR (10g):

306.6 mW/kg



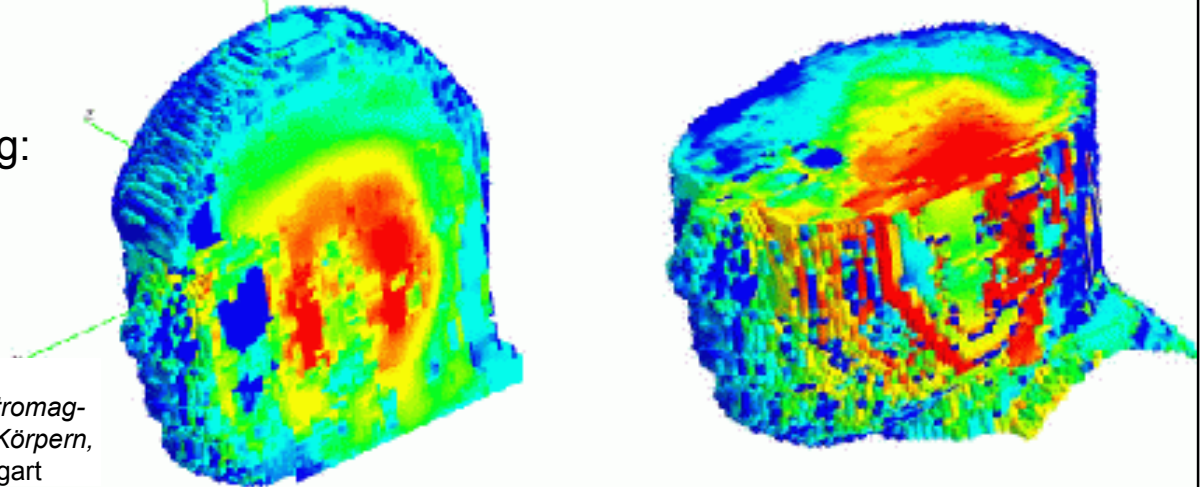
### Inhomogenes Kopfmodell

Absorbierte Leistung:

67.6 mW

Peak-SAR (10g):

293.2 mW/kg



Quelle:

U. Jakobus: *Wechselwirkung elektromagnetischer Felder mit biologischen Körpern*,  
Antrittsvorlesung, Universität Stuttgart

# Berechnung der SAR-Werte in FEKO

## Ganzkörper SAR:

In der Ausgabe-datei sind die Verluste  $P_{\text{diss}}$  angegeben.

$$\text{SAR}_G = P_{\text{diss}} / (V \rho)$$

### LEISTUNGSBILANZ IM DIELEKTRIKUM (in Watt)

Integration der ins jeweilige Medium zeigenden Normalkomponente des Poyntingvektors auf der Oberflaeche der dielektrischen Koerper

Medium	Integral der Leistungsd.	metallische Verluste	Netzwerk-verluste	Leistung der Quellen	Verluste im Medium
0	unbekannt	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	unbekannt
1	6.80958E-02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	6.80958E-02

## Teilkörper SAR:

Im Menü

Results...

Near fields...

Iso-surface...

More...

können die notwendigen Parameter angewählt werden

### SAR options

Material parameters:

Conductivity [S/m]

0.86

Density (rho) [Kg/m^3]

1000.00

Maximum SAR [W/kg]

Over 10.00 g using  Iso Vol.  Cube

Weight [g] 0.00

Avg. SAR 0.00

Apply

OK

Cancel

# Berechnung vom Teilkörper SAR-Werten

**SAR options**

Material parameters:

Conductivity [S/m]

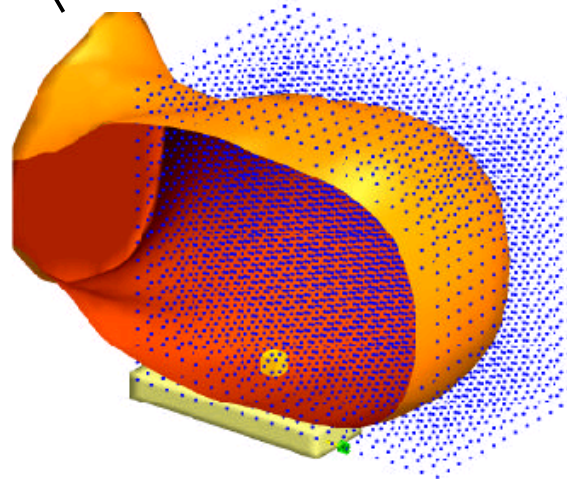
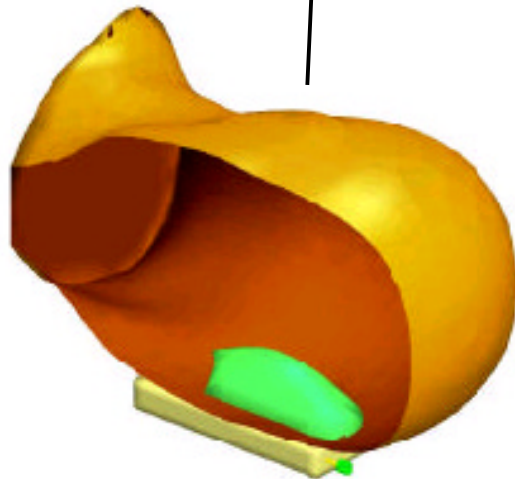
Density (rho) [Kg/m<sup>3</sup>]

Maximum SAR [W/kg]

Over  g using  Iso Vol.  Cube

Weight [g]  Avg. SAR

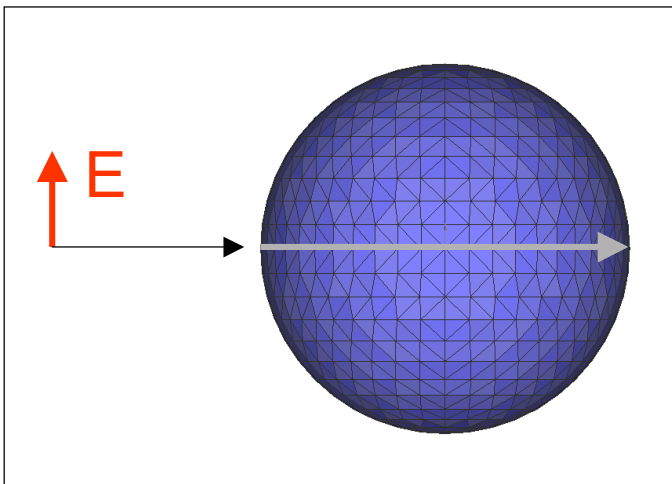
Es wird ein regelmäßiges kartesisches 3D Gitter von Nahfelddaten benötigt.  
1g entspricht 1 cm<sup>3</sup> für  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$   
→ notwendige Gitterweite: 2-5 mm



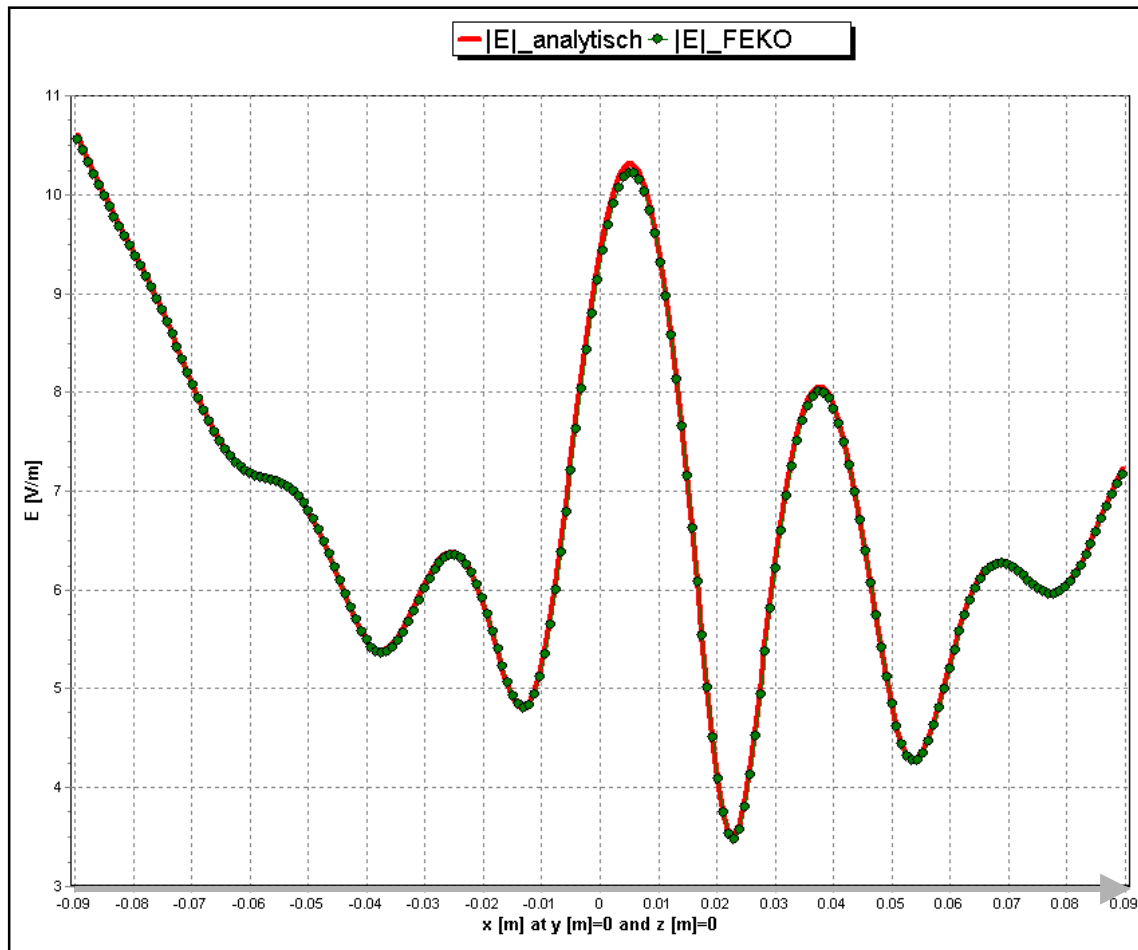
ICNIRP: 10g zusammenhängendes Gebiet  
IEEE: 1g Würfel

# Validierung am Kugelmodell

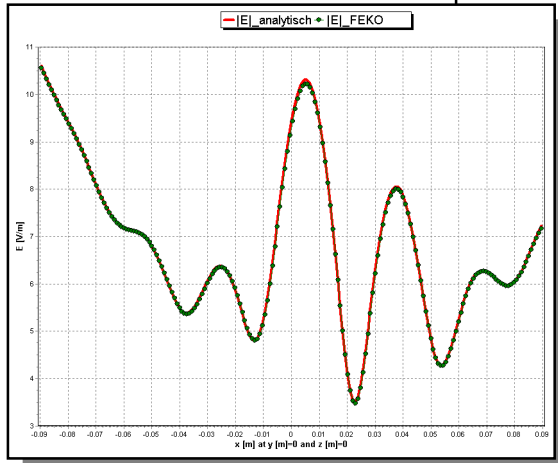
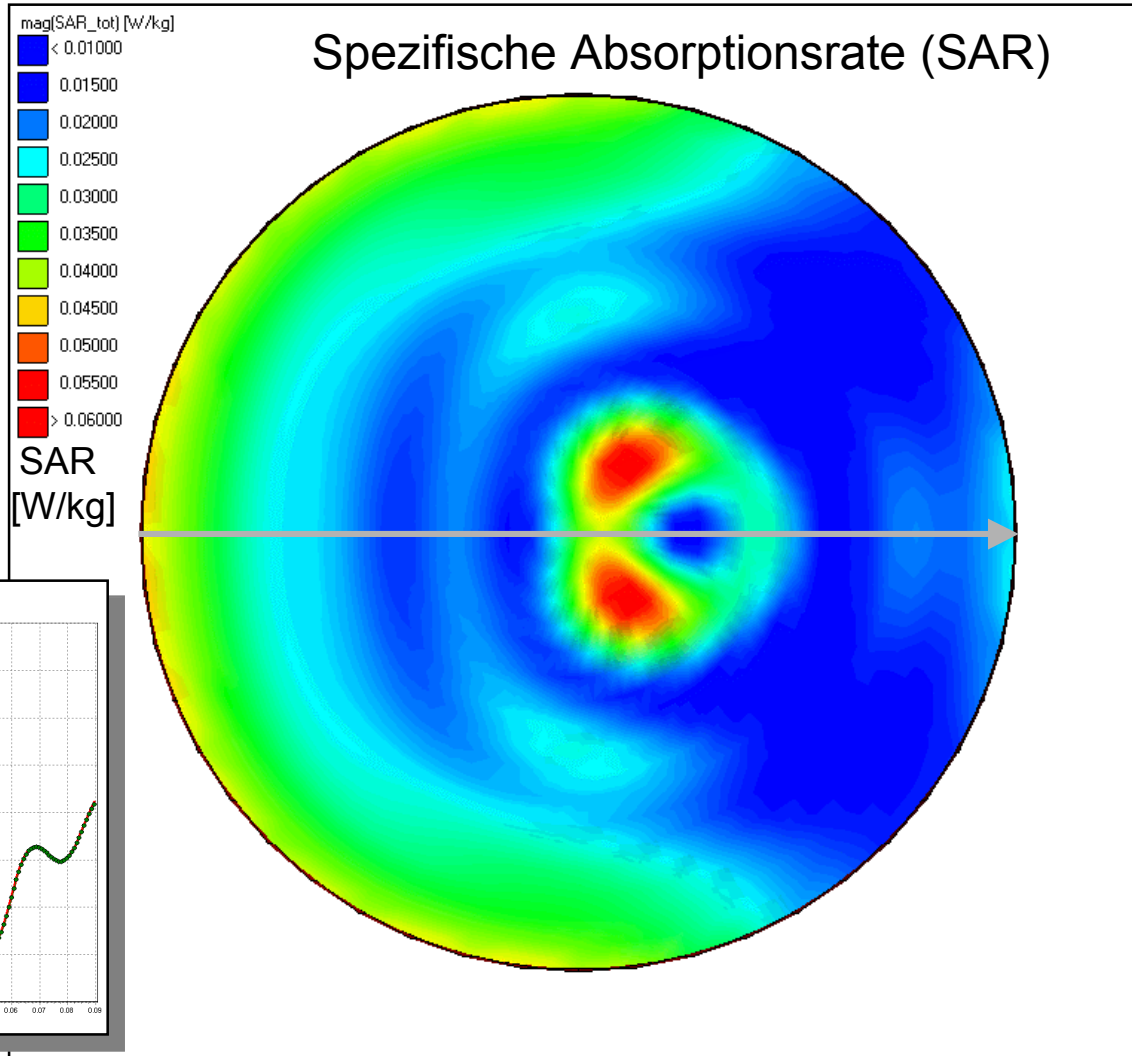
Befeldung einer dielektrischen Kugel durch eine ebene Welle



$f = 890 \text{ MHz}$	$\epsilon_r = 44$
$\lambda = 0.33684 \text{ m}$	$\sigma = 0.855 \text{ S/m}$
$\lambda_d = 0.04986 \text{ m}$	$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$
$ E  = 41 \text{ V/m}$	$r = 0.09 \text{ m}$



# Validierung am Kugelmodell

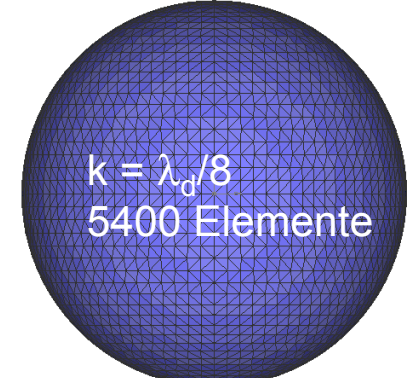
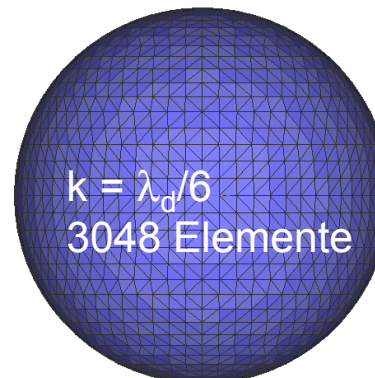
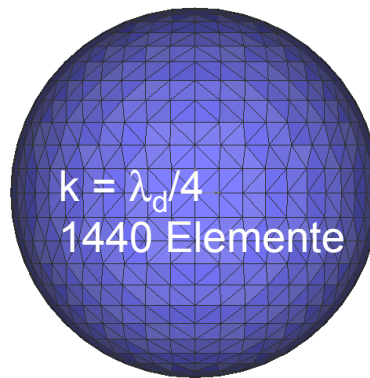
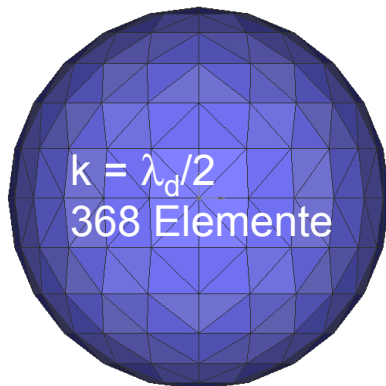
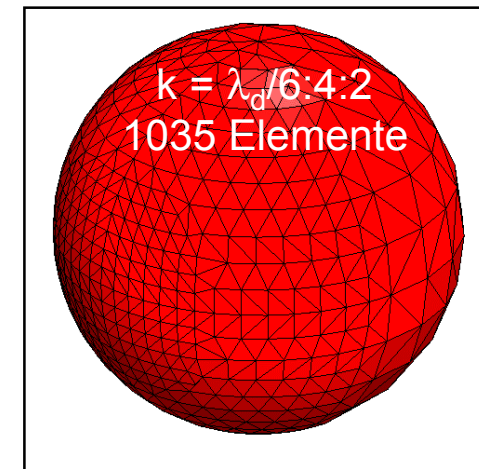


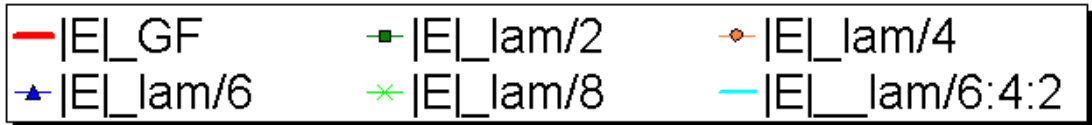
# Einfluss der Diskretisierung

Befeldung einer hom. dielektrischen Kugel durch Dipol (Abstand  $\delta = 0.03$  m) mit 0.25 W Leistung

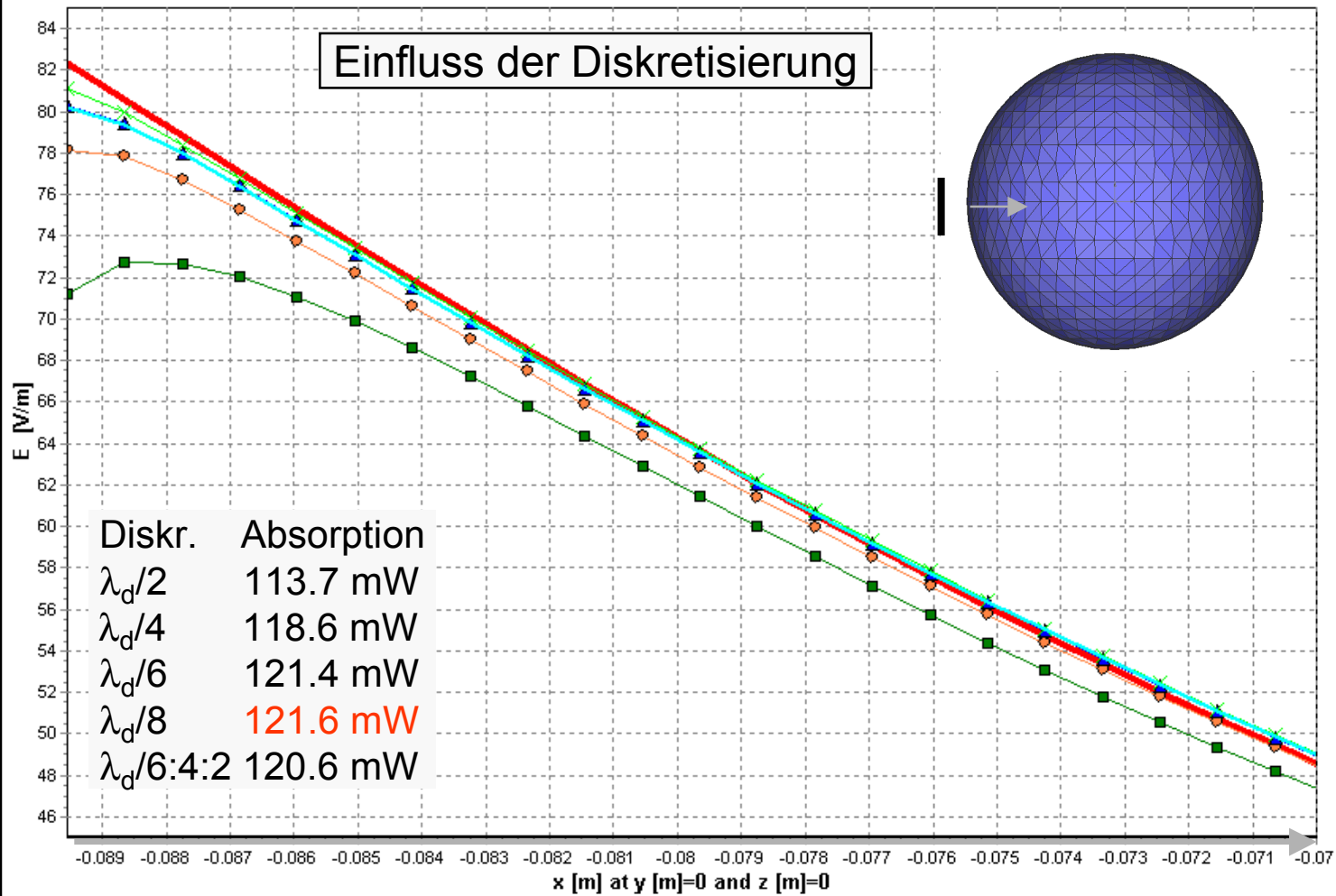
$f = 890$ MHz	$\epsilon_r = 44$
$\lambda = 0.33684$ m	$\sigma = 0.855$ S/m
$\lambda_d = 0.04986$ m	$\rho = 1000$ kg/m <sup>3</sup>
$\delta = 0.03$ m	$r = 0.09$ m

Variable Diskretisierung:

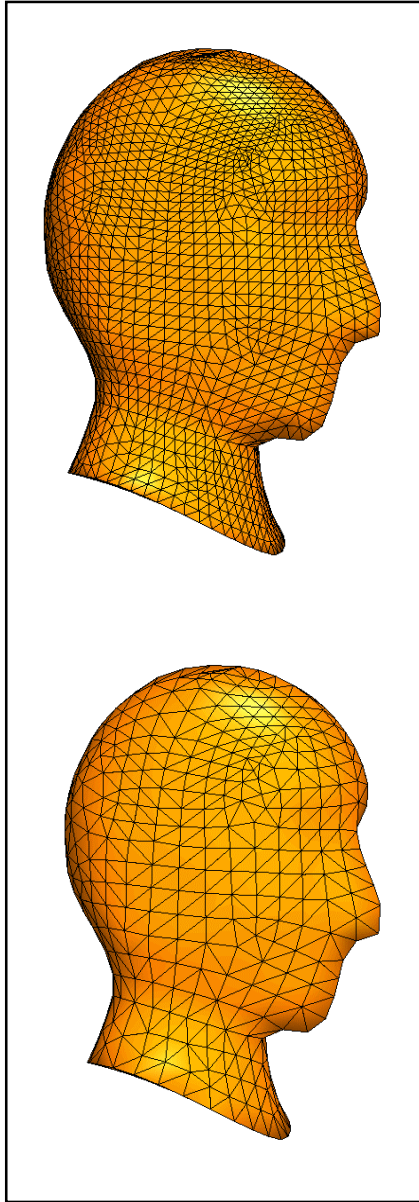




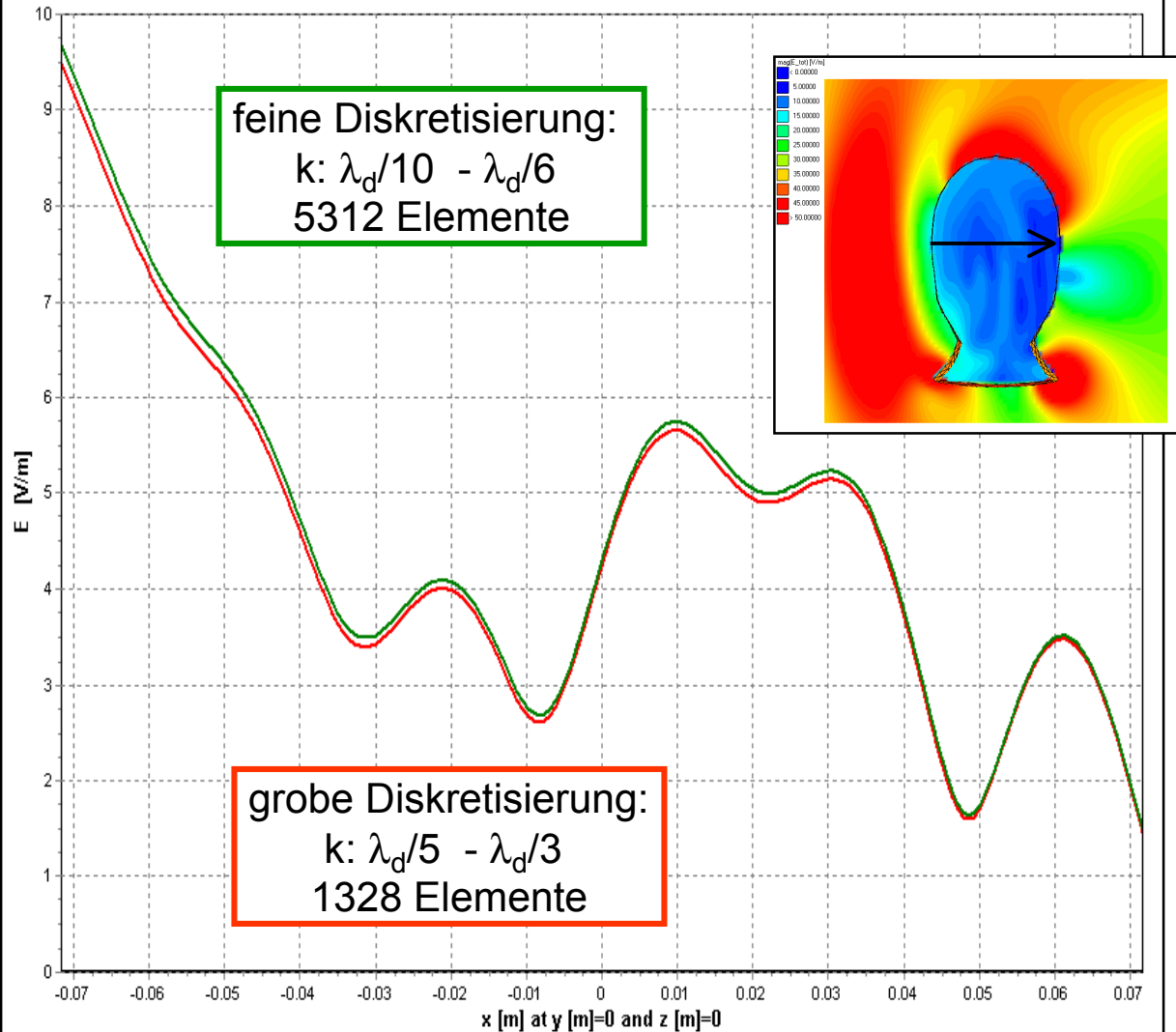
Einfluss der Diskretisierung







Befeldung durch ebene Welle bei 890 MHz  
mit elektrischer Feldstärke  $|E| = 41 \text{ V/m}$



## Fazit

- In FEKO können Ganzkörper- und Teilkörper SAR-Werte berechnet werden
- Homogene Modelle reichen zur SAR Bestimmung aus
- Die genaue Feldverteilung im Innern des Dielektrikums kann nur mit inhomogenen Modellen erzielt werden
- Je nach Norm stehen unterschiedliche Algorithmen zur Verfügung
- Eine optimierte Diskretisierung minimiert den Rechenaufwand

