




Forschungszentrum Karlsruhe
Karlsruhe
8. November 2007

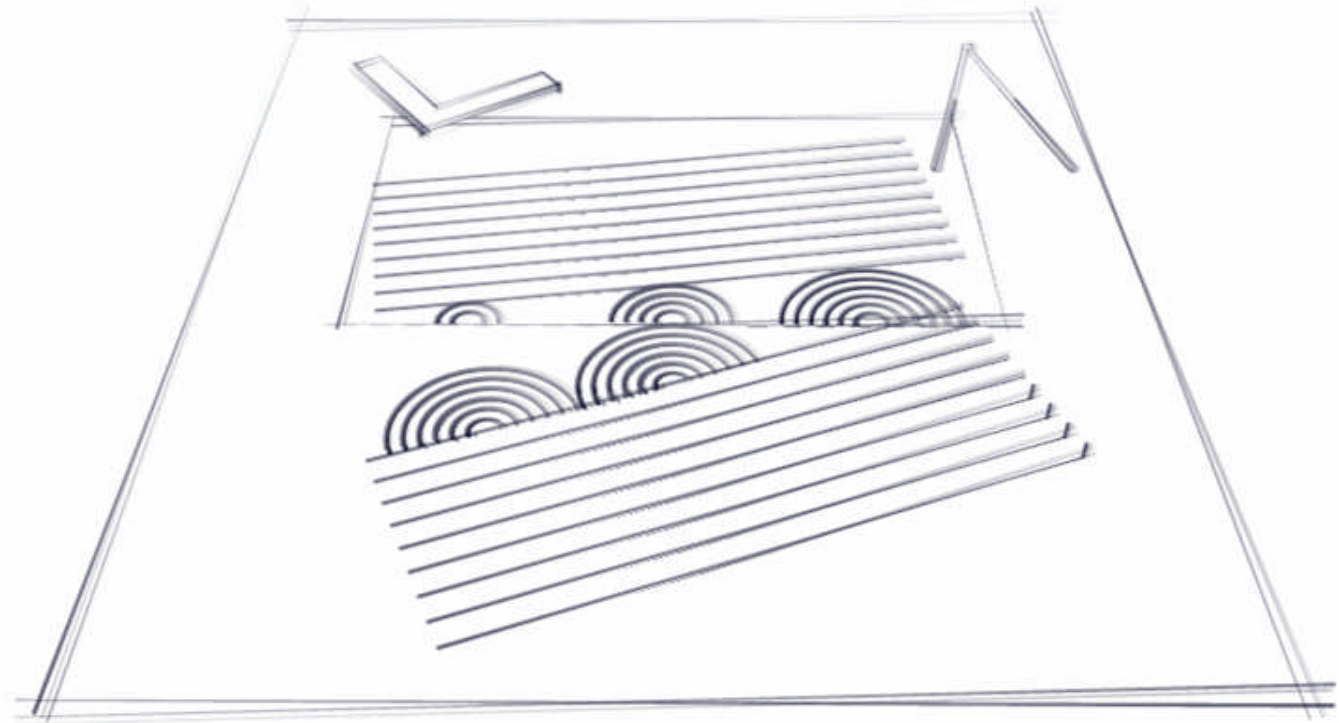




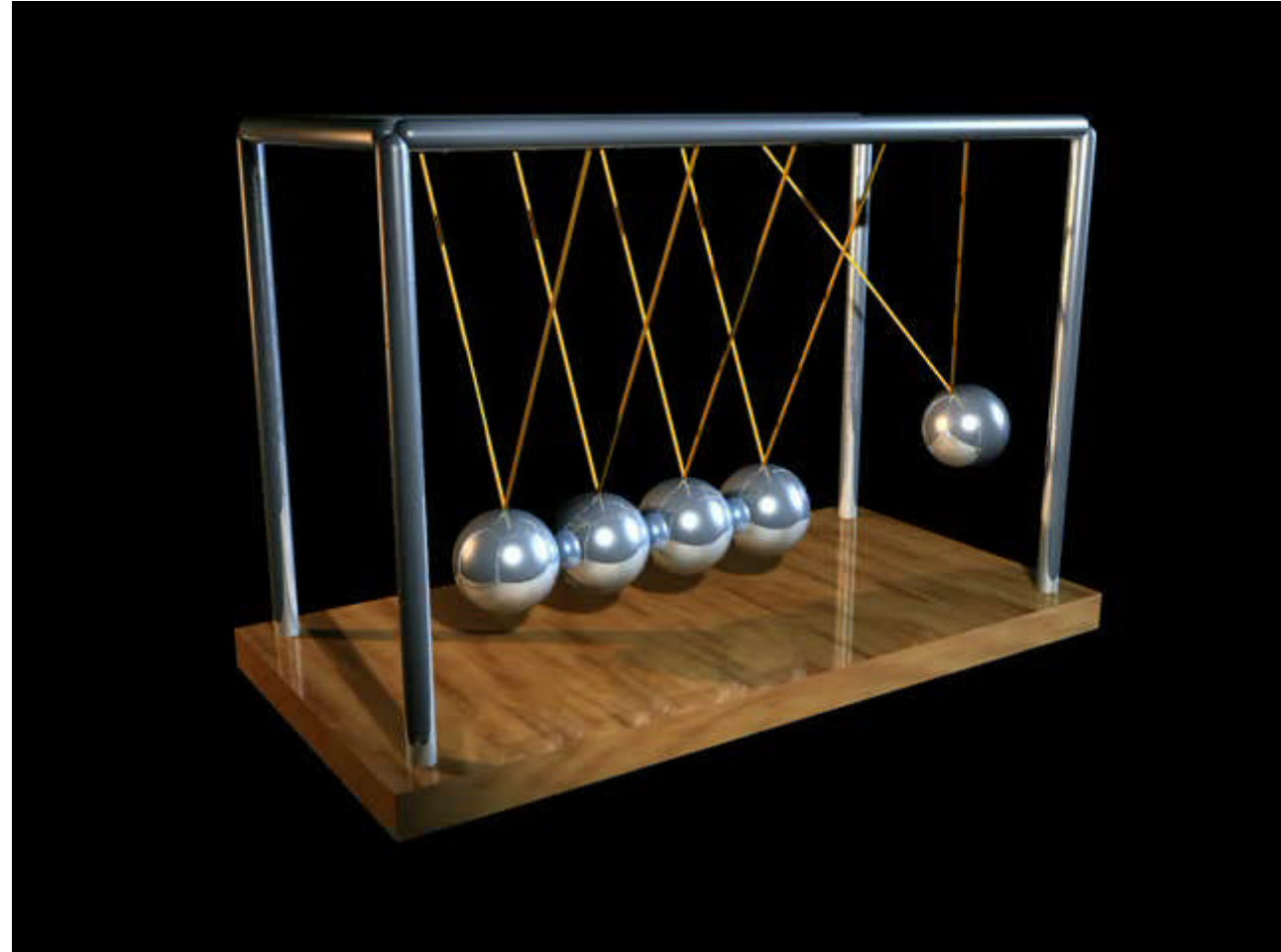
Forschungszentrum Karlsruhe
Karlsruhe
8. November 2007



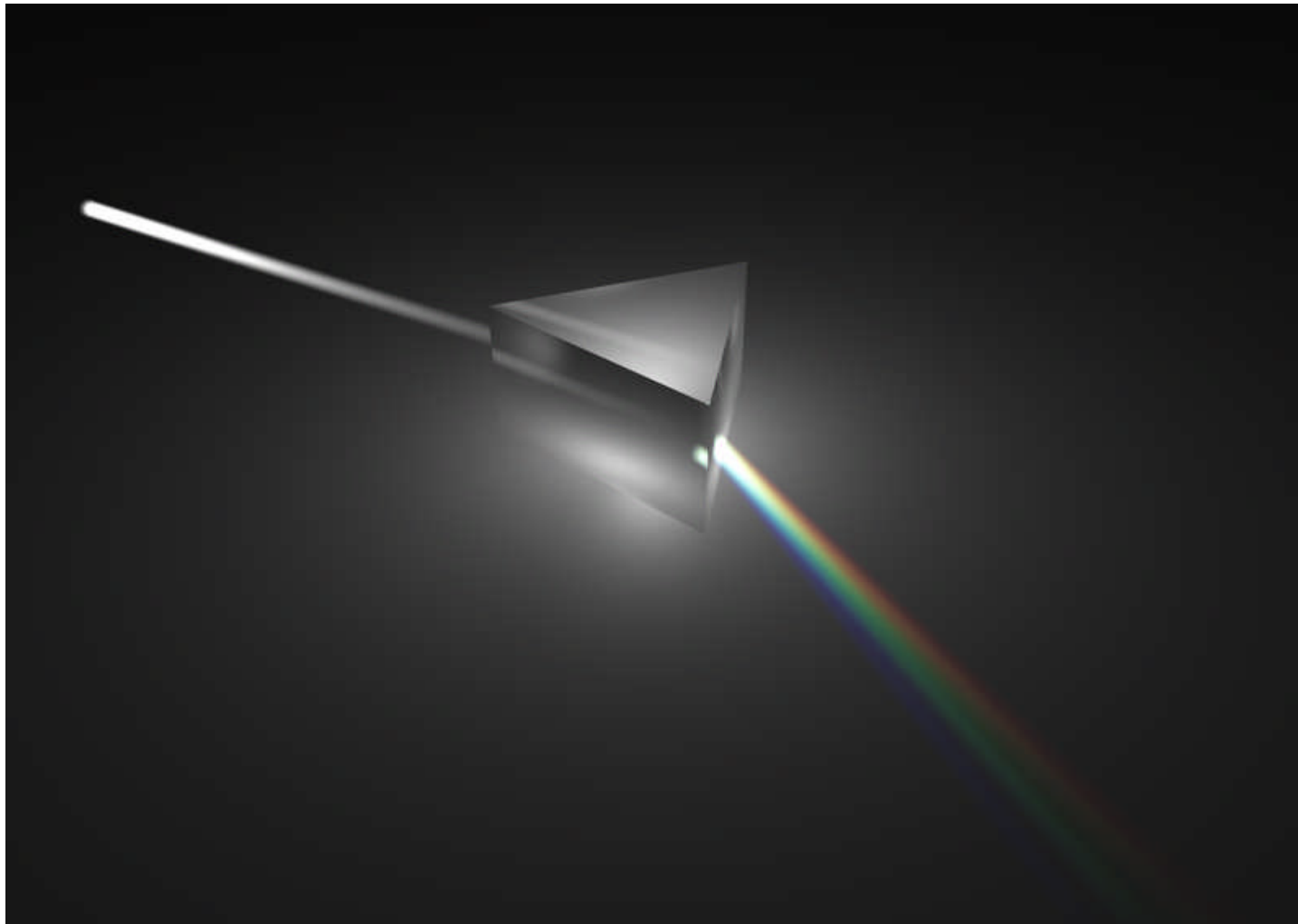
Das wahre Geheimnis ist das Sichtbare,
nicht das Unsichtbare.



Auf Christiaan Huygens geht der Begriff der „Elementarwelle“ zurück.



Newtons Entdeckungen und Theorien bildeten den Grundstock für ein naturwissenschaftliches Weltbild, das über zwei Jahrhunderte Gültigkeit hatte



Newton zeigte, dass durch Brechung und Reflexion das Sonnenlicht in seine spektralen Bestandteile zerlegt werden kann und dadurch die Farben sichtbar werden.

Die Vereinheitlichung der elektromagnetischen Phänomene durch Maxwell (1865)



Die Relativitätstheorie wäre niemals möglich gewesen ohne die mathematischen Gleichungen, die zuerst von James Maxwell aufgezeigt wurden

Albert Einstein

Die Maxwellschen Gleichungen bestimmen die Ausbreitung von elektrischen und magnetischen Feldern in Zeit und Raum durch ein Differentialgleichungssystem

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad , \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu \vec{J} + \mu \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad , \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

3 Komponenten elektrisches Feld + 3 Komponenten magnetisches Feld = 6 Komponenten

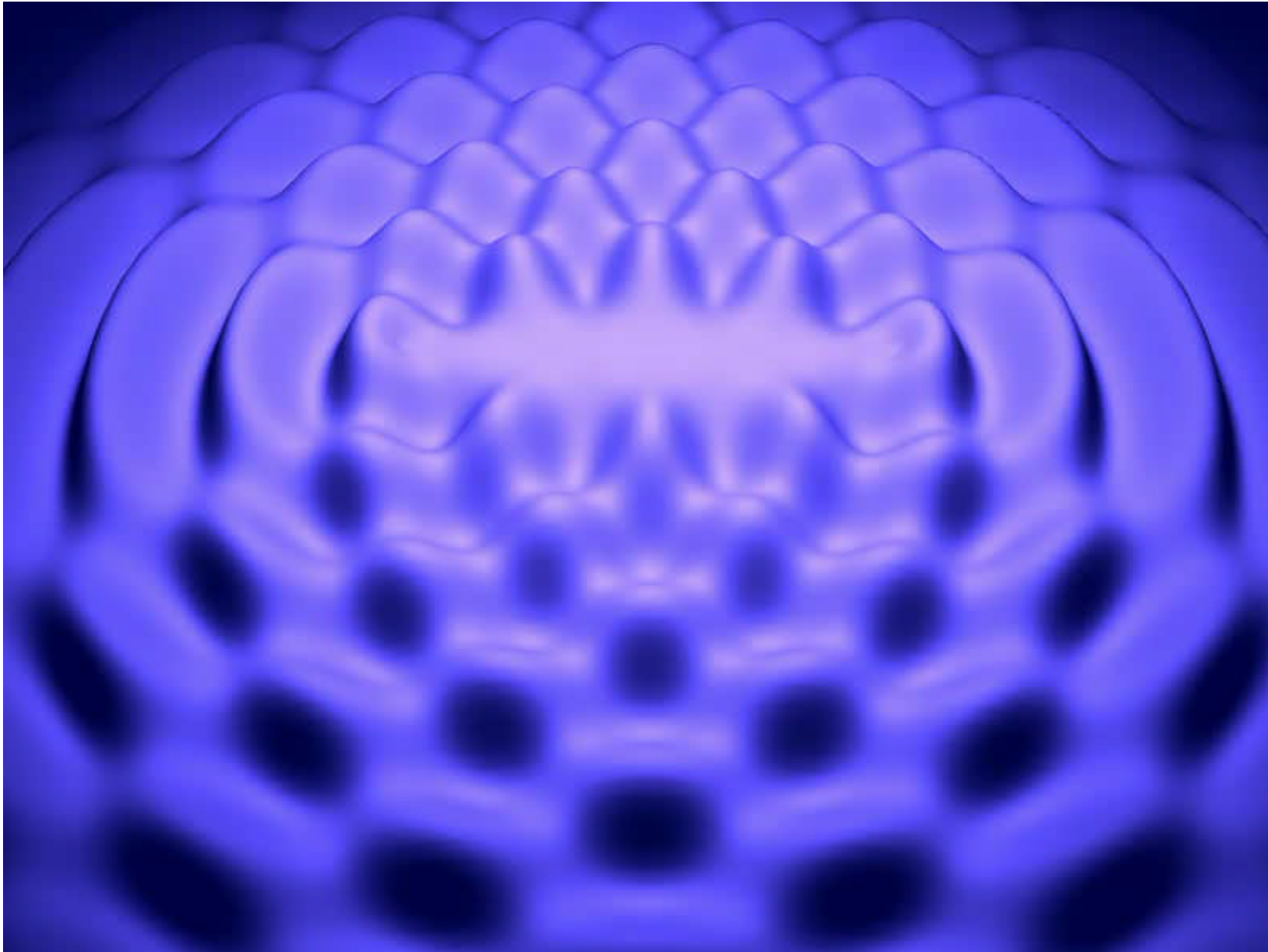
Materie wird durch die Materialparameter
und die elektrische Leitfähigkeit σ

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

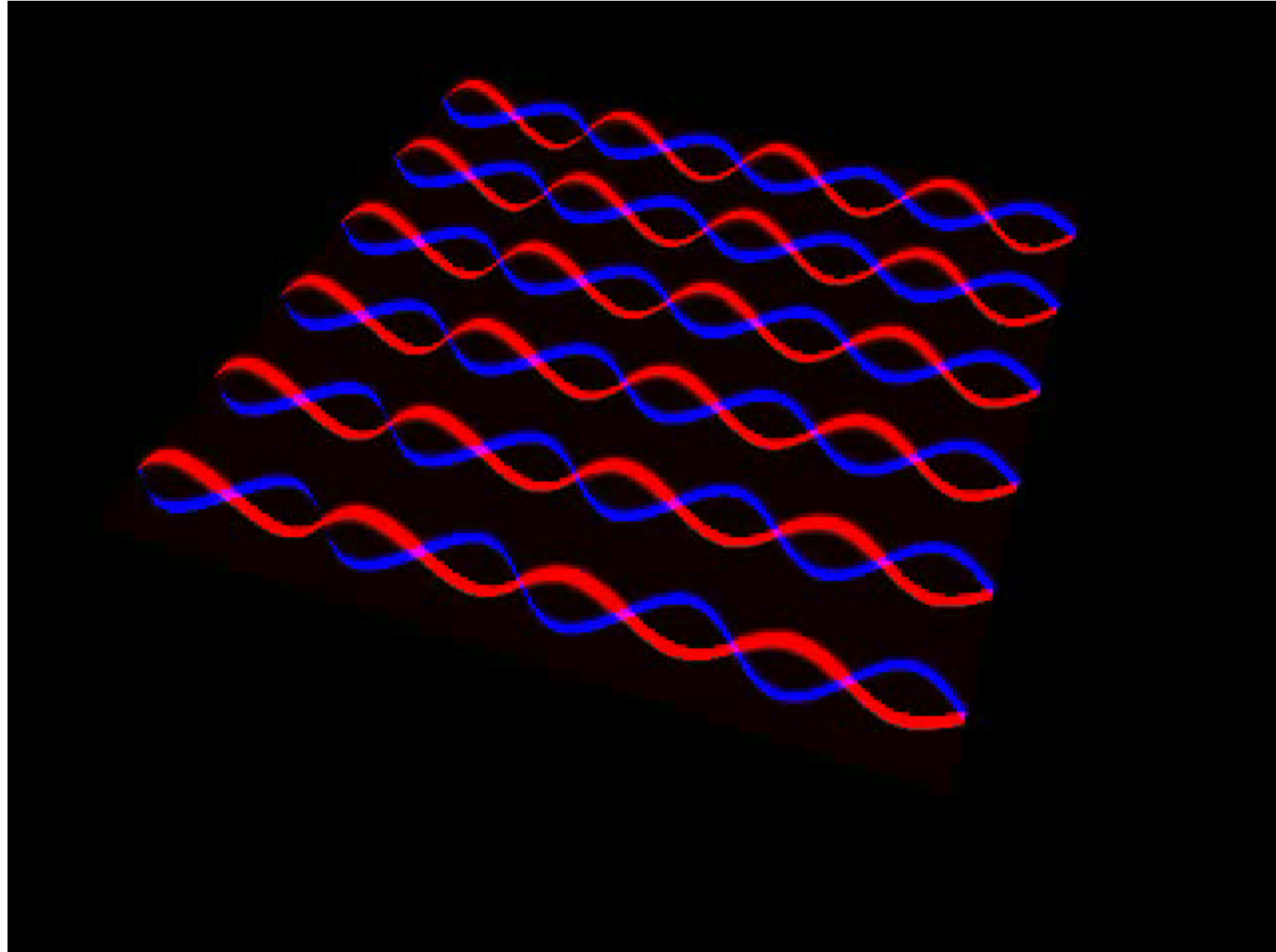
$$\mu = \mu_0 \mu_r$$



Ausbreitung einer Welle mit einem Wellenzentrum (Elementarwelle)



Interferenz von 2 Wellenzentren

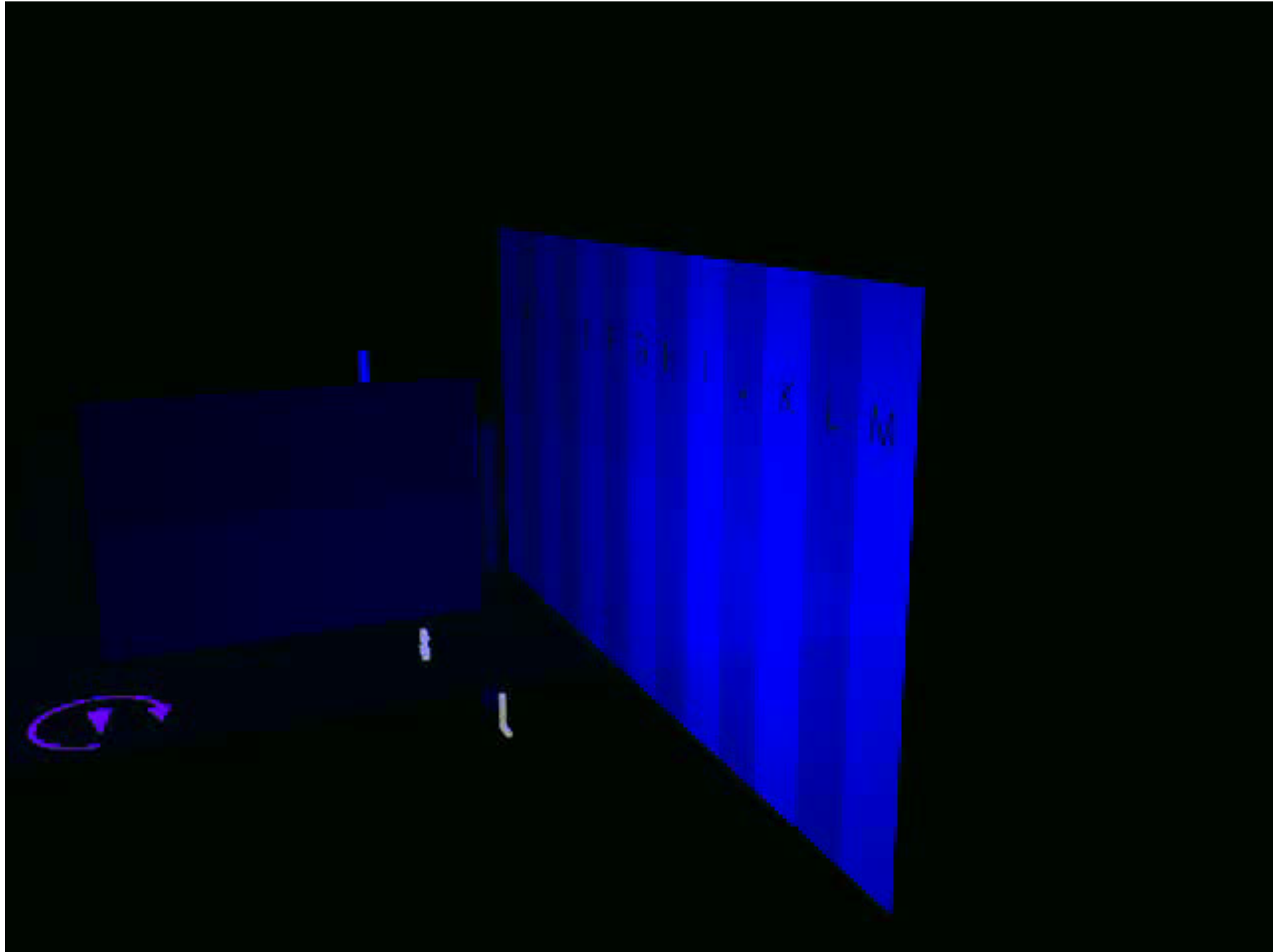


Wellengleichung des elektrischen Feldes

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

Wellengleichung des magnetischen Feldes

$$\Delta \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$



Allgemeiner Energieerhaltungssatz

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{S}}_p + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \varepsilon |\vec{\mathbf{E}}|^2 + \frac{1}{2\mu} |\vec{\mathbf{B}}|^2 \right) = -\sigma_{eff} |\vec{\mathbf{E}}|^2$$

In einem Material mit Volumen V umgesetzte Leistung

$$\langle P_{abs} \rangle = -\frac{1}{2} \iiint \sigma_{eff} |\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{x})|^2 dV$$

$$v' = \frac{v + u}{1 + \frac{uv}{c^2}}$$

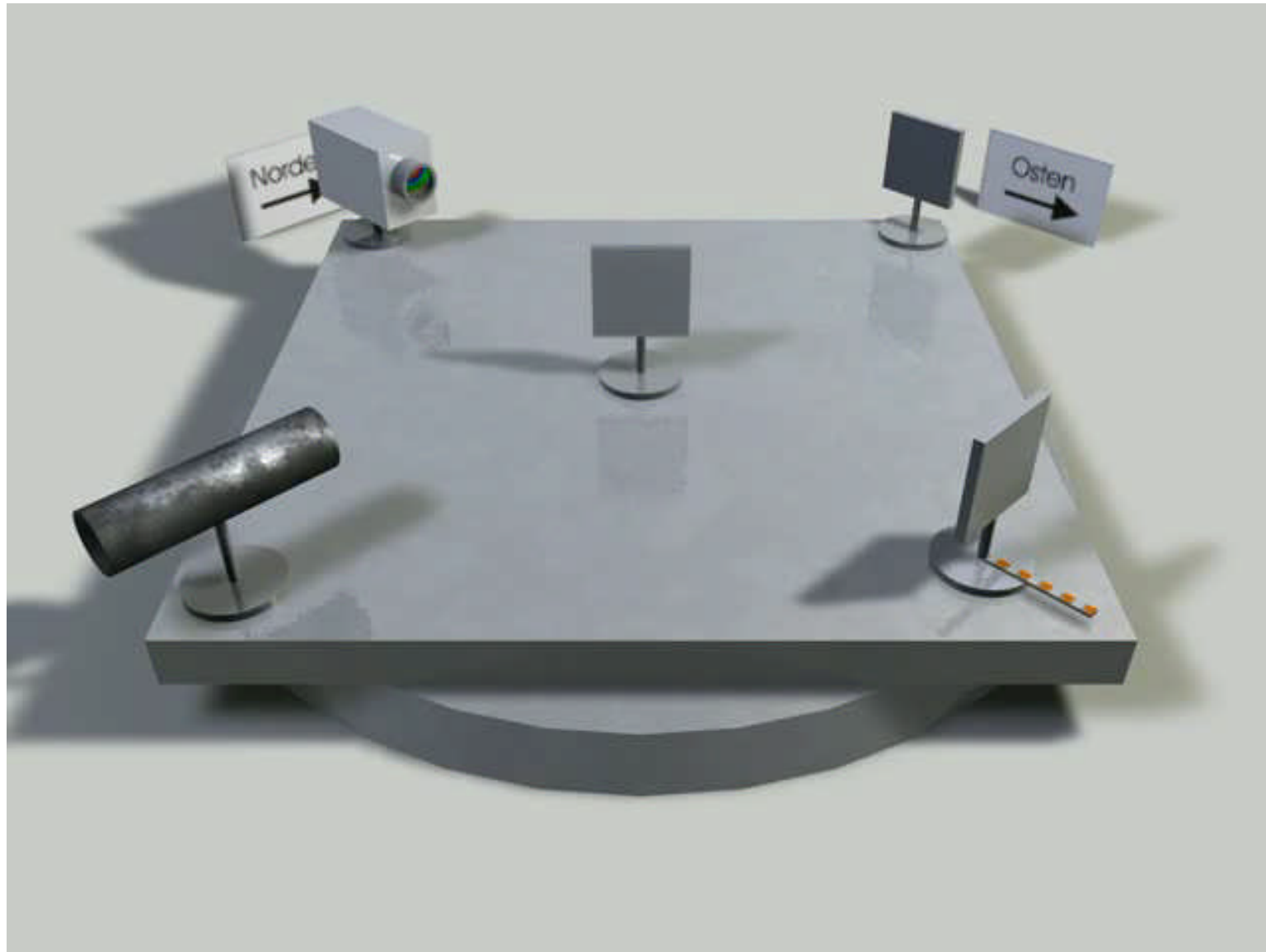
Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

1881 A. Michelson, Postdam

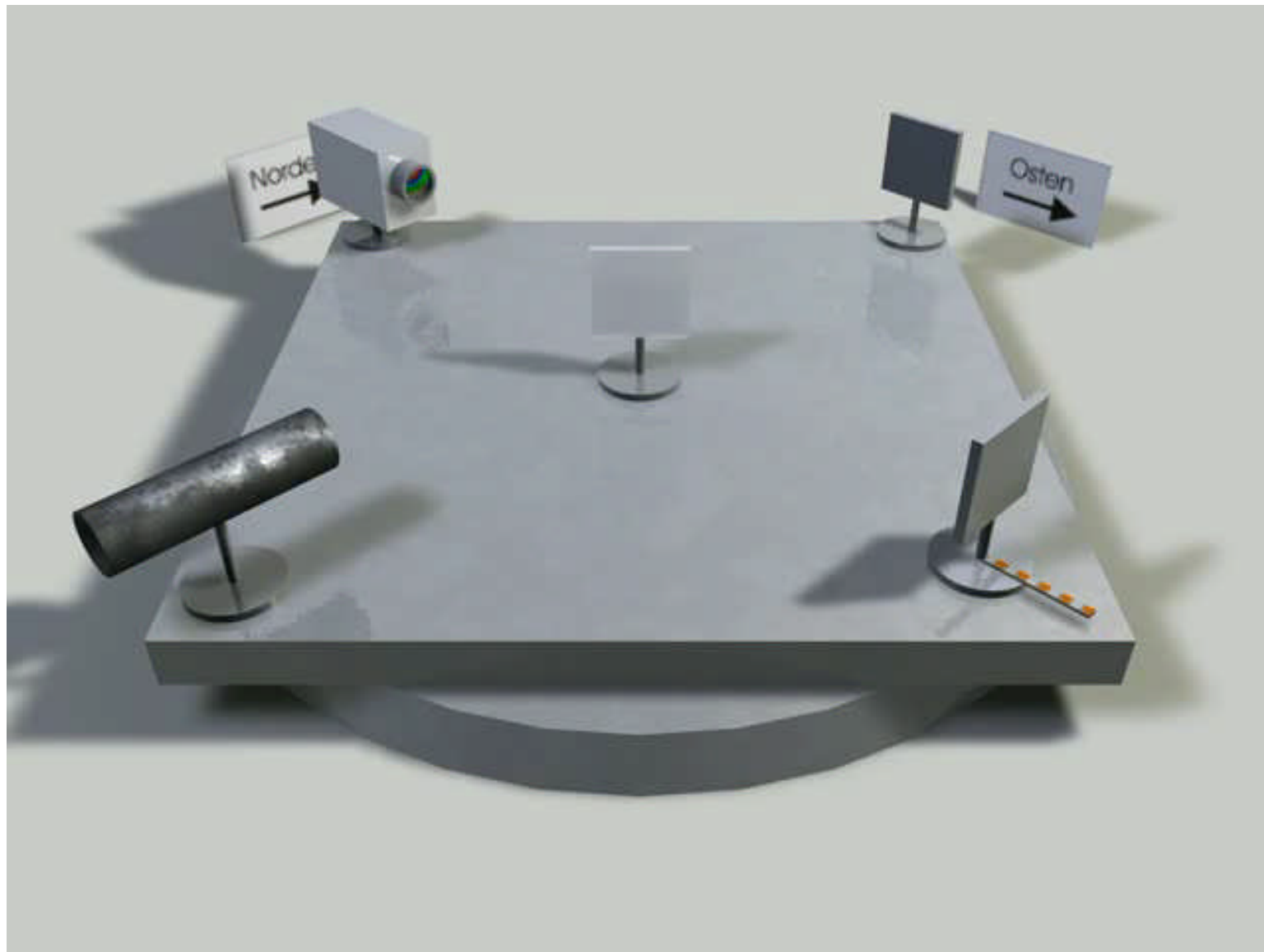
1887 E.W. Morley, Jena

$$v' = v + u$$

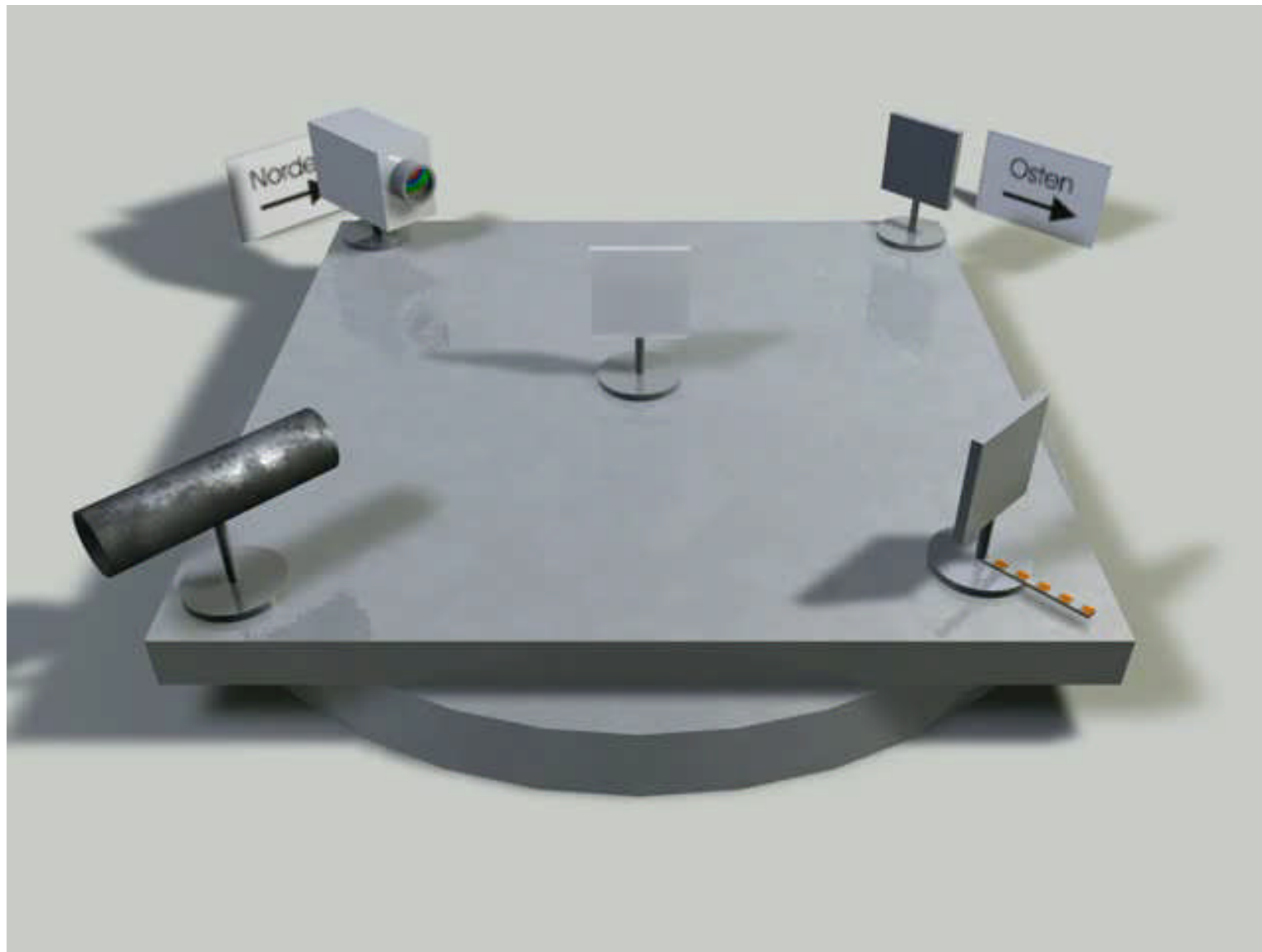
Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

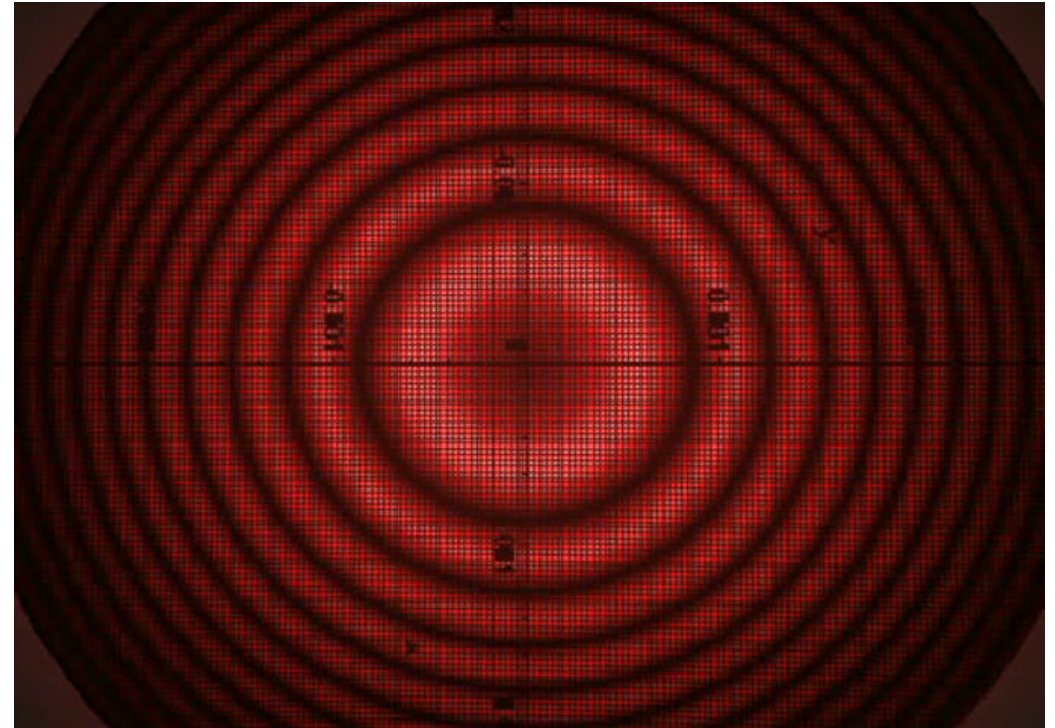
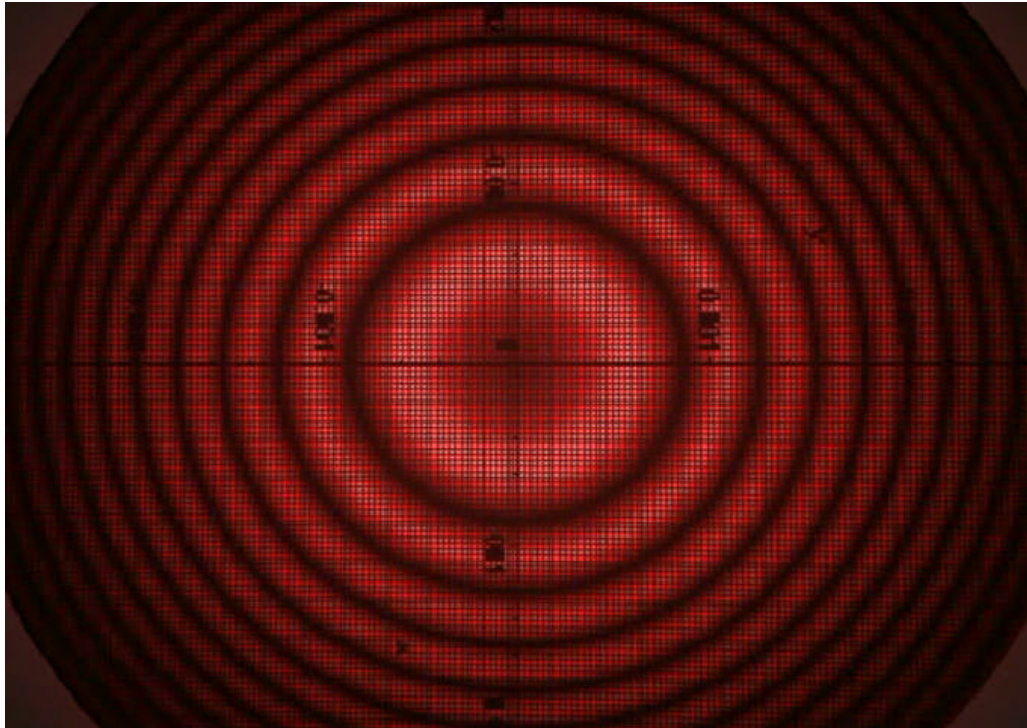


Das Experiment I – Laser orientiert in Ost-West Richtung



Das Experiment II– Laser orientiert in Nord-Süd Richtung





Es ist keine Verschiebung der Interferenzstruktur messbar.

$$\Delta\Phi \sim \frac{v^2}{c^2}$$

Einzige Schlussfolgerung: Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Kann sich die Lichtgeschwindigkeit ändern?

Materialien werden durch eine Dielektrizitätszahl charakterisiert

$$\tilde{\epsilon} = \frac{c_0^2}{c^2}$$

Beispiel Teflon

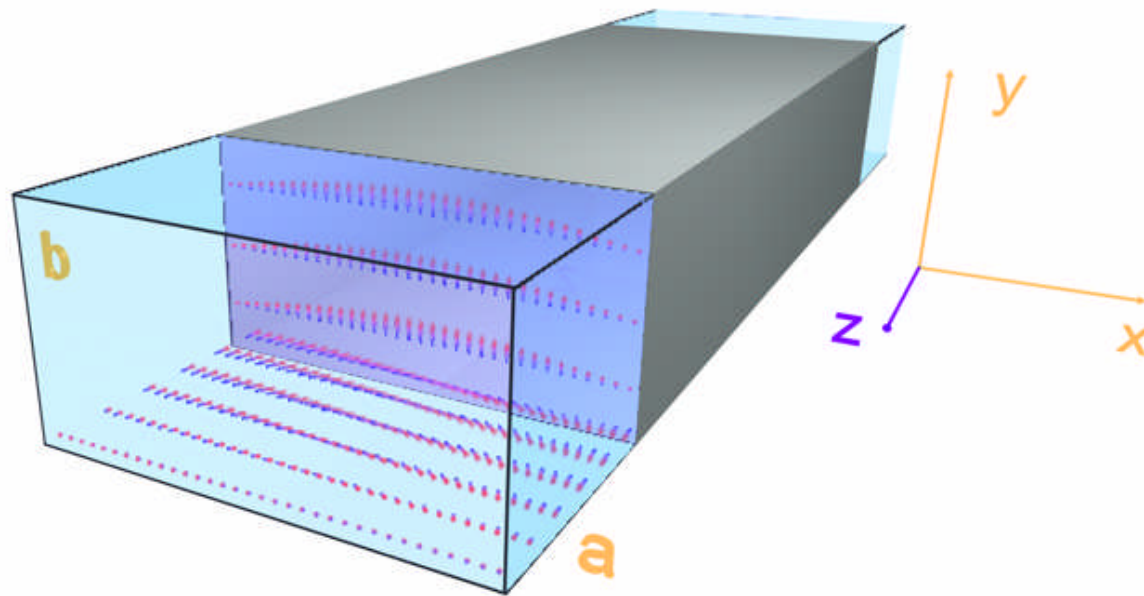
$$\epsilon = 2.04$$

$$n = \sqrt{\epsilon} = \frac{c_0}{c_{Material}} = 1.42$$

$$c_{Material} = \frac{c_0}{n} = 0.7c_0$$

Material	Permittivity	Conductivity [S/m]
Teflon	2.04	0.00090
PVC	2.91	0.00400
PE	2.51	0.00004
Alumina	9.55	0.02000
Wood	3.40	0.09950
GFRP	3.80	0.00510
CFRP	2530	28.3000

Kann sich die Lichtgeschwindigkeit ändern?



$$n = \frac{c}{c_{\text{Material}}} = 1.42$$

$$\varepsilon = 2.04$$

a	8.6 cm
b	4.3 cm
λ_0	12.25 cm
k_0	51.3 m^{-1}
$\tilde{k}_{1,0}$	36.51 m^{-1}
$\beta_{1,0}$	36.05 m^{-1}
v_g	$2.1 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.7 c$
v_p	$4.28 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1.43 c$
\tilde{f}	1.74 GHz
$\tilde{\lambda}$	17.2 cm
$\lambda_{1,0}$	17.42 cm
$Z_{\text{TE}_{1,0}}$	536.61Ω

Der Photoeffekt 1887

Heinrich Hertz und
Wilhelm Hallwachs

ANNALEN
DER
PHYSIK UND CHEMIE.

HERAUSGEGEBEN VON HERMANN VON HELMHOLTZ DURCH
F. L. S. GIEBEL, L. V. GIEBEL, J. C. POISSONNET.

NEUER FOLGE

BAND XXXIII.

DES SAISON 1887 ANNEE 1887 SOUSCRIPTION 1887.

SEITE-WITTEBUND

DER PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT IN BERLIN

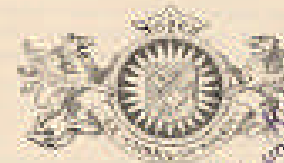
UND VERWALTET VON HERMANN

IL. VON HELMHOLTZ

HERAUSGEGEBEN VON

G. WIEDEMANN.

HOCHHEIM DRUCKEREI



LEIPZIG, 1887.

VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTEL

29 1 19

REAKTOR
Der- und-...
Zentrum
Bach Nr.

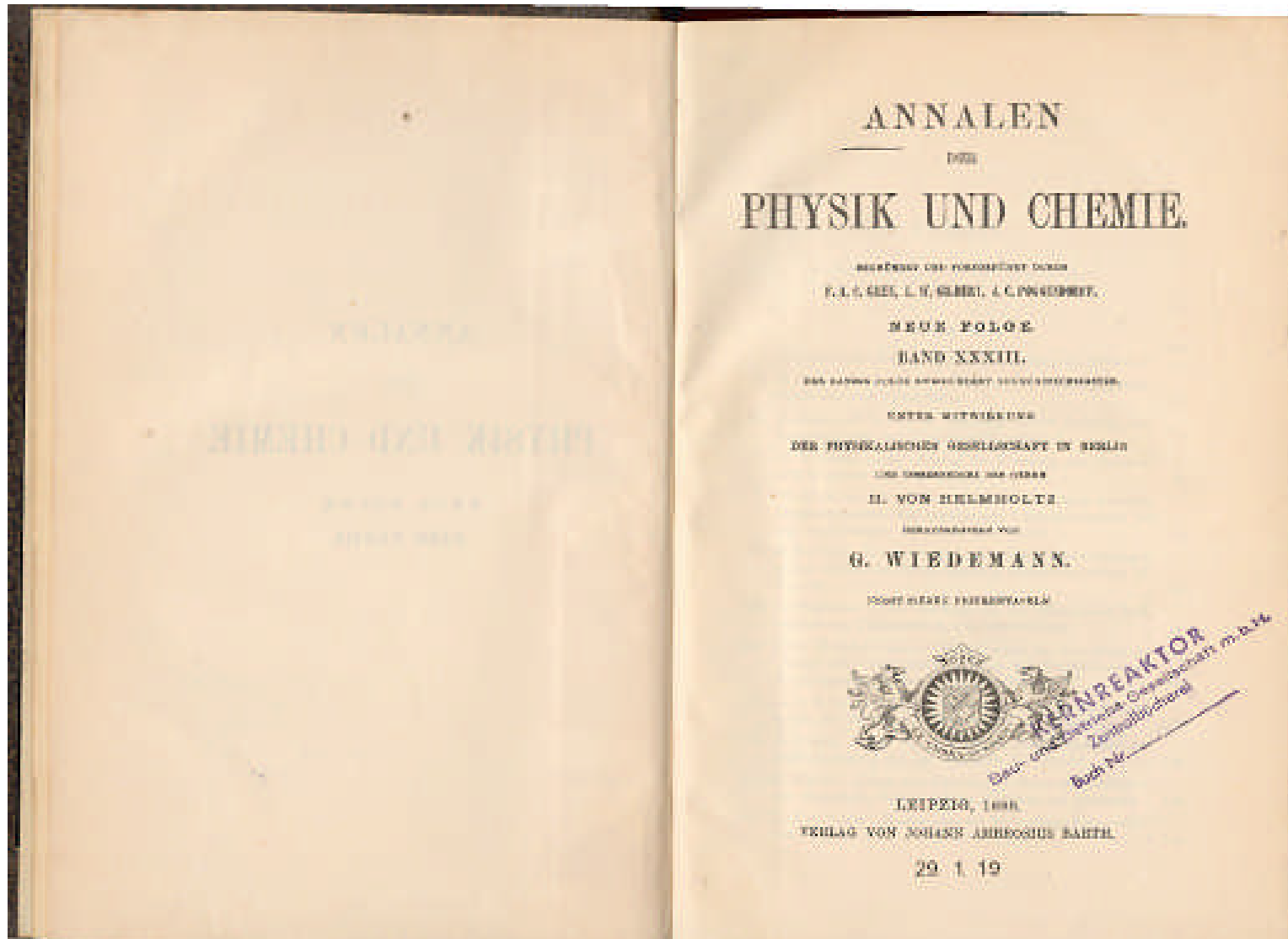


Quelle: Deutsches Museum, München

photoeffekt: Experimenteller Aufbau







Photoeffekt: Das Experiment (ohne Glaträger)



ne Glasträger: Volle Entladung

Glasträger: Keine volle Entladung



$$W \sim E^2$$

Zu der von W.Hallwachs geäußerten Vermutung, sowie auch anderen Versuchen, die Befunde zu erklären, konnte die Maxwell-Theorie nicht für eine Lösung herangezogen werden.

Energieerhaltung bei Durchgang des Lichtes durch das Fenster (Maxwell)

$$R + T = 1$$

Reflexions-, und Transmissionsfaktoren der Glasfenster und anderer Materialien lassen sich alle aus Messdaten exakt berechnen.

Erklärung des Effektes erst 1905 (A.Einstein)

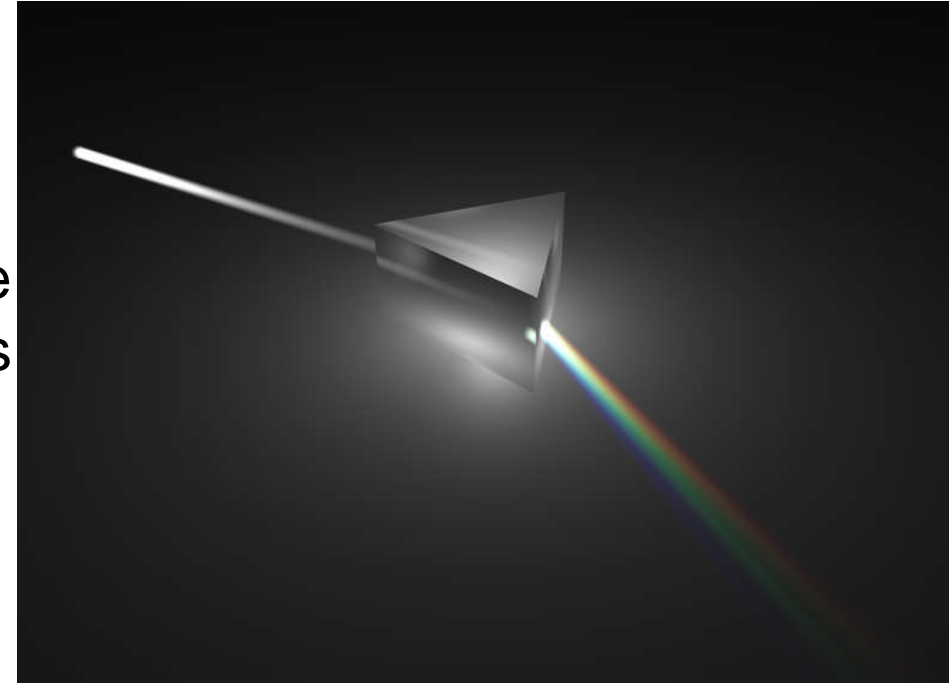
s werden nur dann Elektronen emittiert, wenn das Licht eine bestimmte Indestfrequenz hat

$$f \geq f_{\min}$$

instein machte zur Erklärung dieses Effektes die Annahme, dass das Licht der Frequenz f aus Energie Einheiten der Größe

$$W = hf$$

esteht (Quantelung).



ie Konstante h wurde bereits im Jahr 1900 von Max Planck zur Erklärung der ohlraumstrahlung eingeführt. Die Idee und Annahme, dass die Energie einer lektromagnetischen Welle in Einheiten $W=hf$ portioniert (gequantelt) ist, wurde hier m experimentelle Ergebnisse anzupassen, „widerwillig“ erstmalig eingeführt.

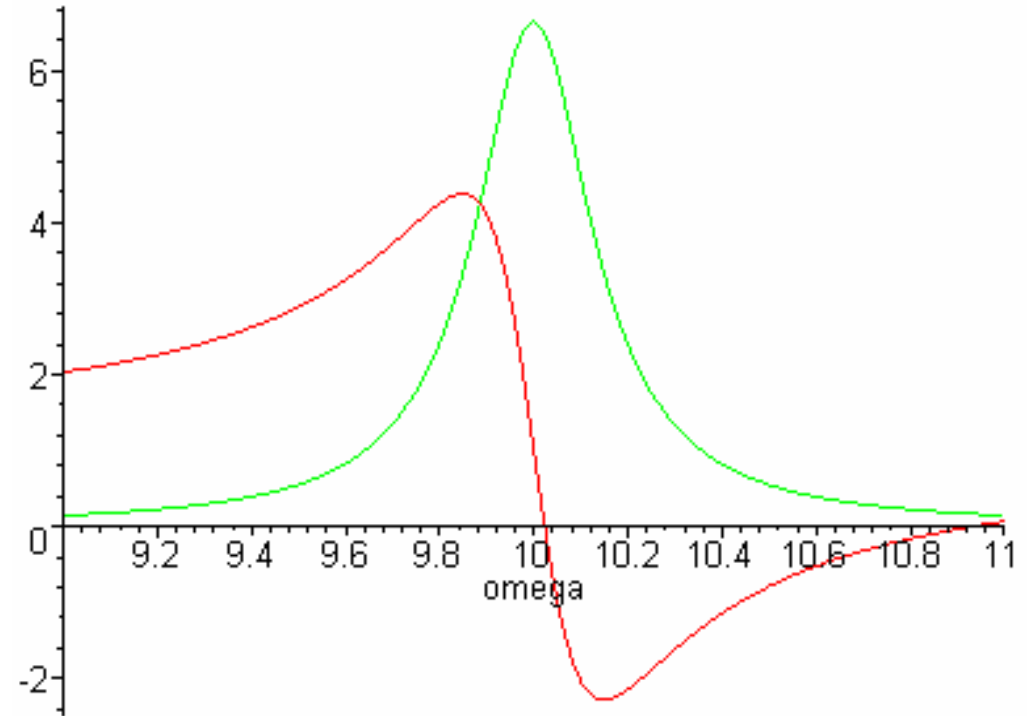
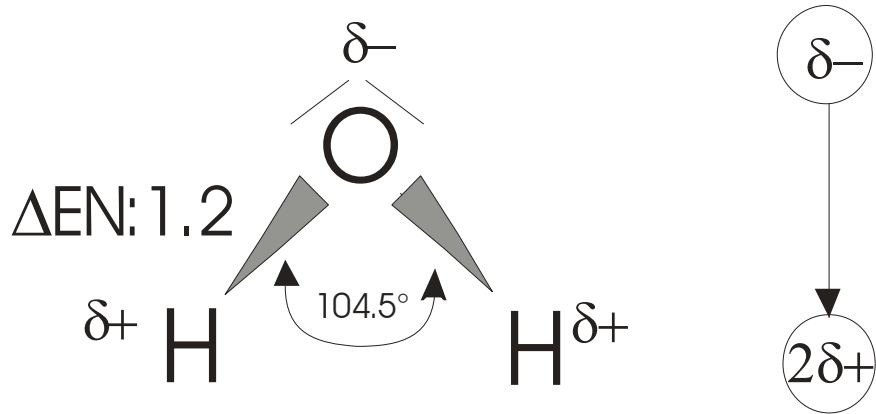
Allgemeiner Energieerhaltungssatz

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{S}}_p + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \varepsilon |\vec{\mathbf{E}}|^2 + \frac{1}{2\mu} |\vec{\mathbf{B}}|^2 \right) = -\sigma_{eff} |\vec{\mathbf{E}}|^2$$

In einem Material mit Volumen V umgesetzte Leistung

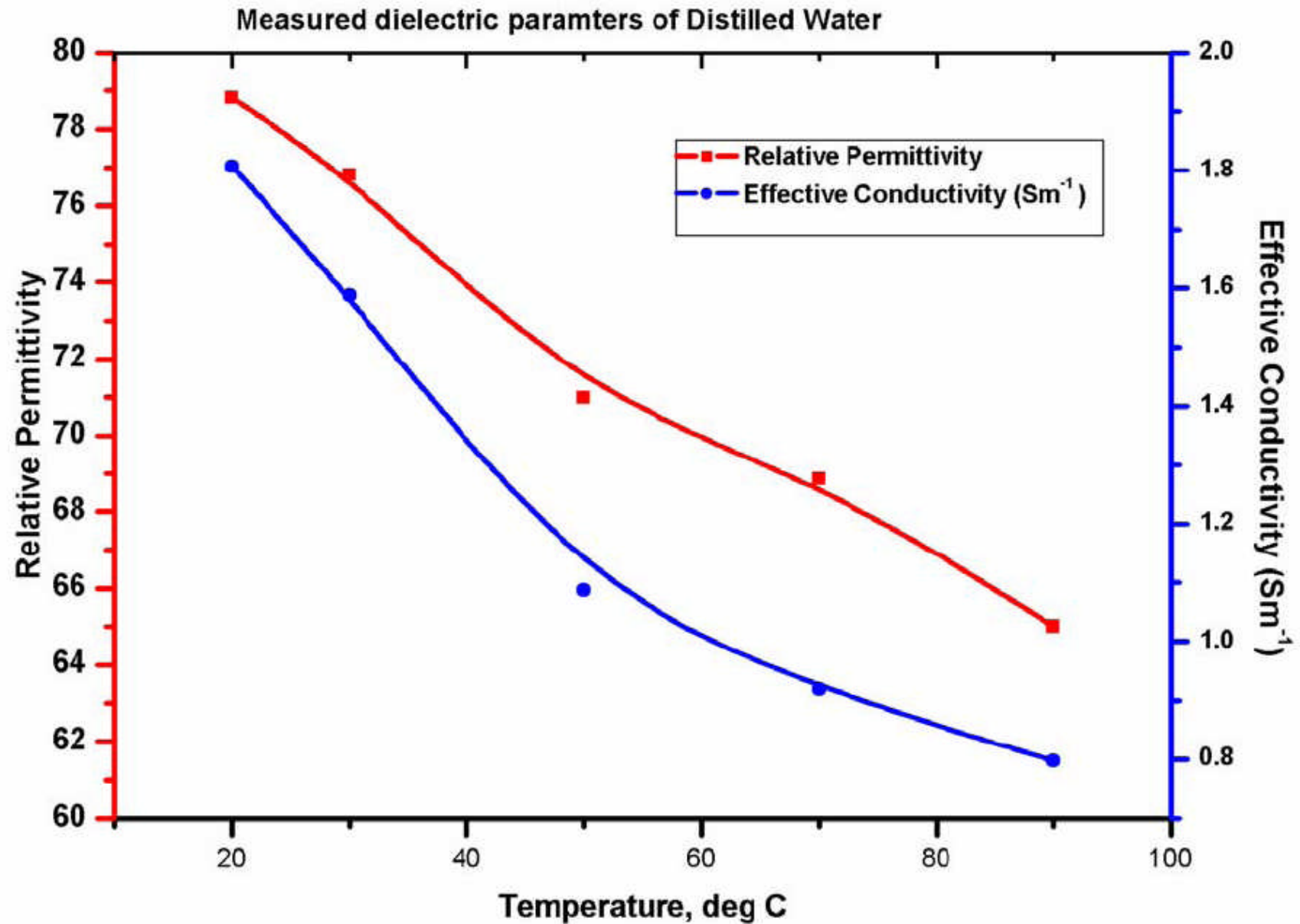
$$\langle P_{abs} \rangle = -\frac{1}{2} \iiint \sigma_{eff} |\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{x})|^2 dV$$

Wasser im klassischen Debye-Modell

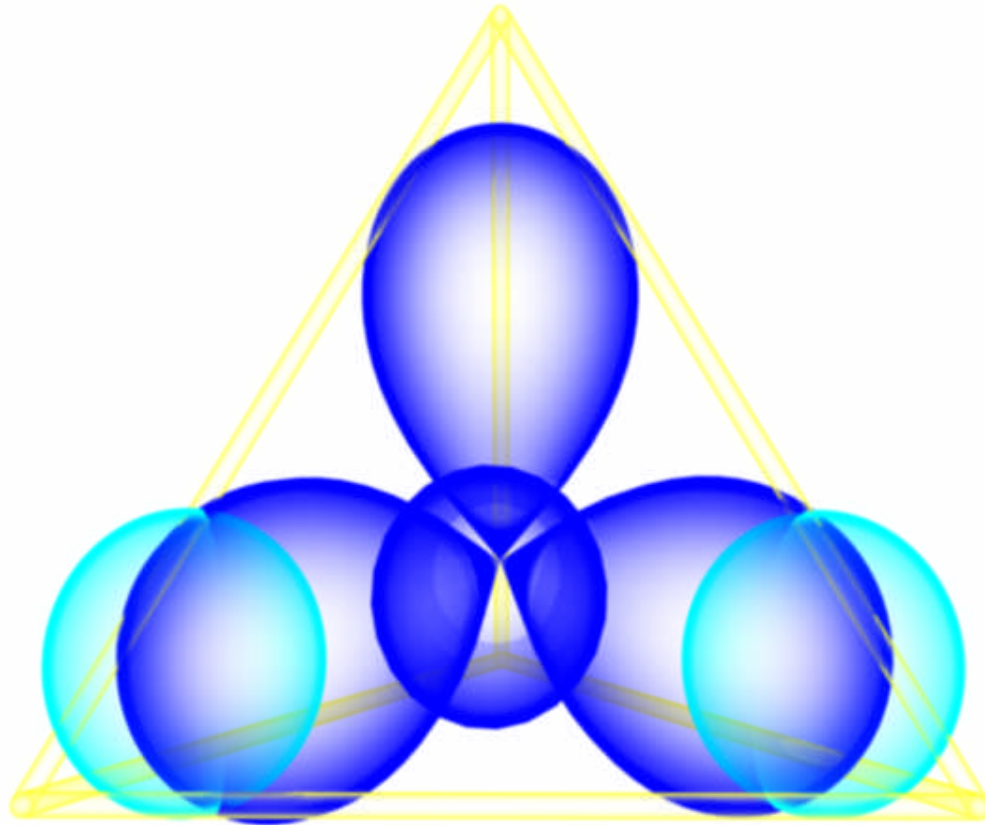


Zweifellos wird Wasser in der Küchenmikrowelle warm

Messung der dielektrischen Parameter von Wasser



Was sagt die Quantenmechanik dazu?



$$\hat{H}_{rot} |\Psi\rangle = E_{rot} |\Psi\rangle$$

$$E_{rot} = \frac{1}{2} \frac{j(j+1)\hbar^2}{J}$$

Die Grundfrequenz um Wasser zu erwärmen müsste bei ca. 550 GHz liegen – Wieso koppelt dann Wasser überhaupt an?

Die einzelnen Wassermoleküle bilden QM-Droplets



Allgemeiner Energieerhaltungssatz

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{\mathcal{S}}_p + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \varepsilon |\vec{\mathbf{E}}|^2 + \frac{1}{2\mu} |\vec{\mathbf{B}}|^2 \right) = -\sigma_{eff} |\vec{\mathbf{E}}|^2$$

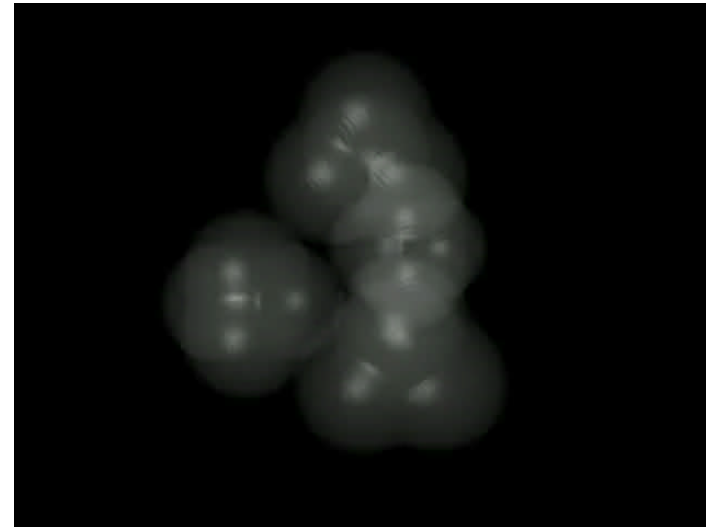
In einem Material mit Volumen V umgesetzte Leistung

$$\langle P_{abs} \rangle = -\frac{1}{2} \iiint \sigma_{eff} |\vec{\mathbf{E}}(\mathbf{x})|^2 dV$$

Dieses kann quantenmechanisch hergeleitet werden

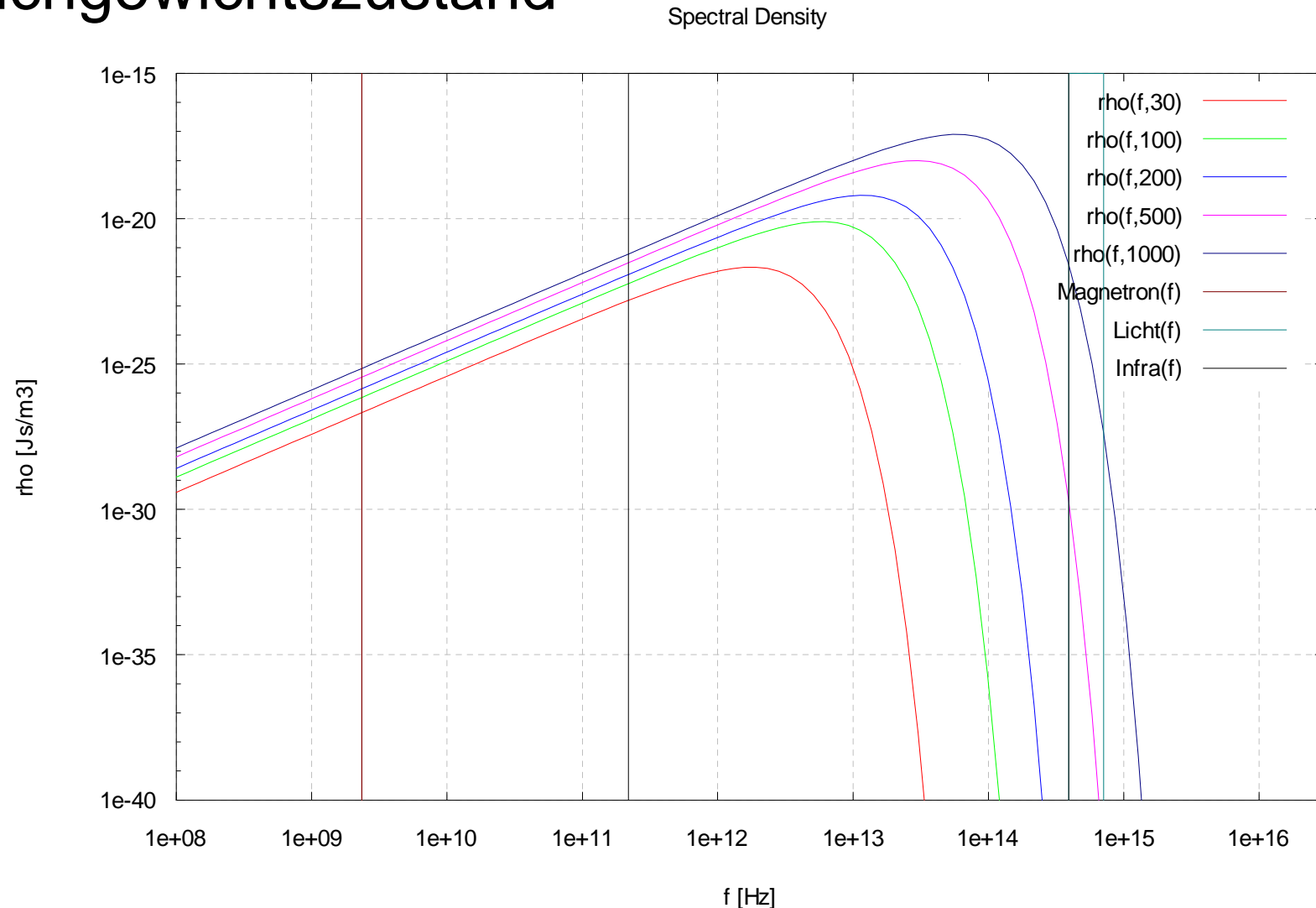
$$\sigma_{i \rightarrow j} = \frac{16\pi^2 e^4}{3\hbar^2 c} \frac{d}{dV} \left| \langle \Psi_i | \hat{x} | \Psi_j \rangle \right|^2$$

$$\sigma_{eff} = \sum_{i \rightarrow j}^{alle \text{ Zustände}} \sigma_{i \rightarrow j}$$



L.Feher Juli 2007,
Paper submitted

Mikrowellenerwärmung – Energiekonversion in einem Ungleichgewichtszustand



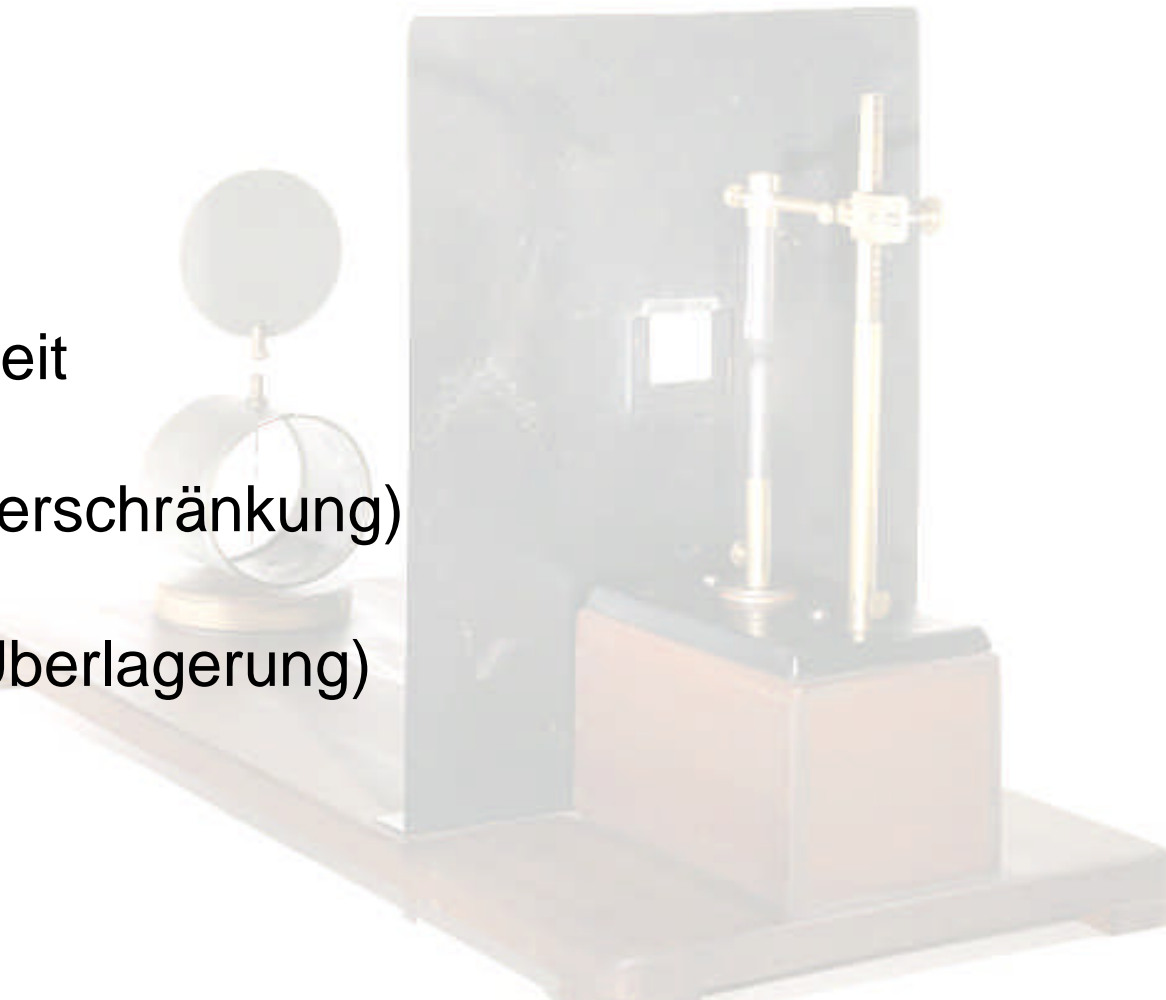
Innerhalb eines Resonators trennen wir die im Resonator sich befindenden Objekte von der Umwelt dadurch, daß diese sich bei Vorhandensein eines Mikrowellenfeldes nicht im thermischen Gleichgewicht befinden können. Diese Objekte sind über das Mikrowellenfeld kohärent miteinander verbunden und zeigen damit nichtklassische Phänomene.

Quantelung

Wahrscheinlichkeit

Nichtlokalität (Verschränkung)

Superposition (Überlagerung)



Klassische Materialparameter als Funktion der Temperatur hochgradig nichtlinear !!!

Ich habe nie aufgehört, mich mit technischen Dingen zu beschäftigen. Dies war auch für das wissenschaftliche Forschen vorteilhaft.

Einstein, in einem Brief an Emile Meyerson, Berlin, 27. Januar 1930.

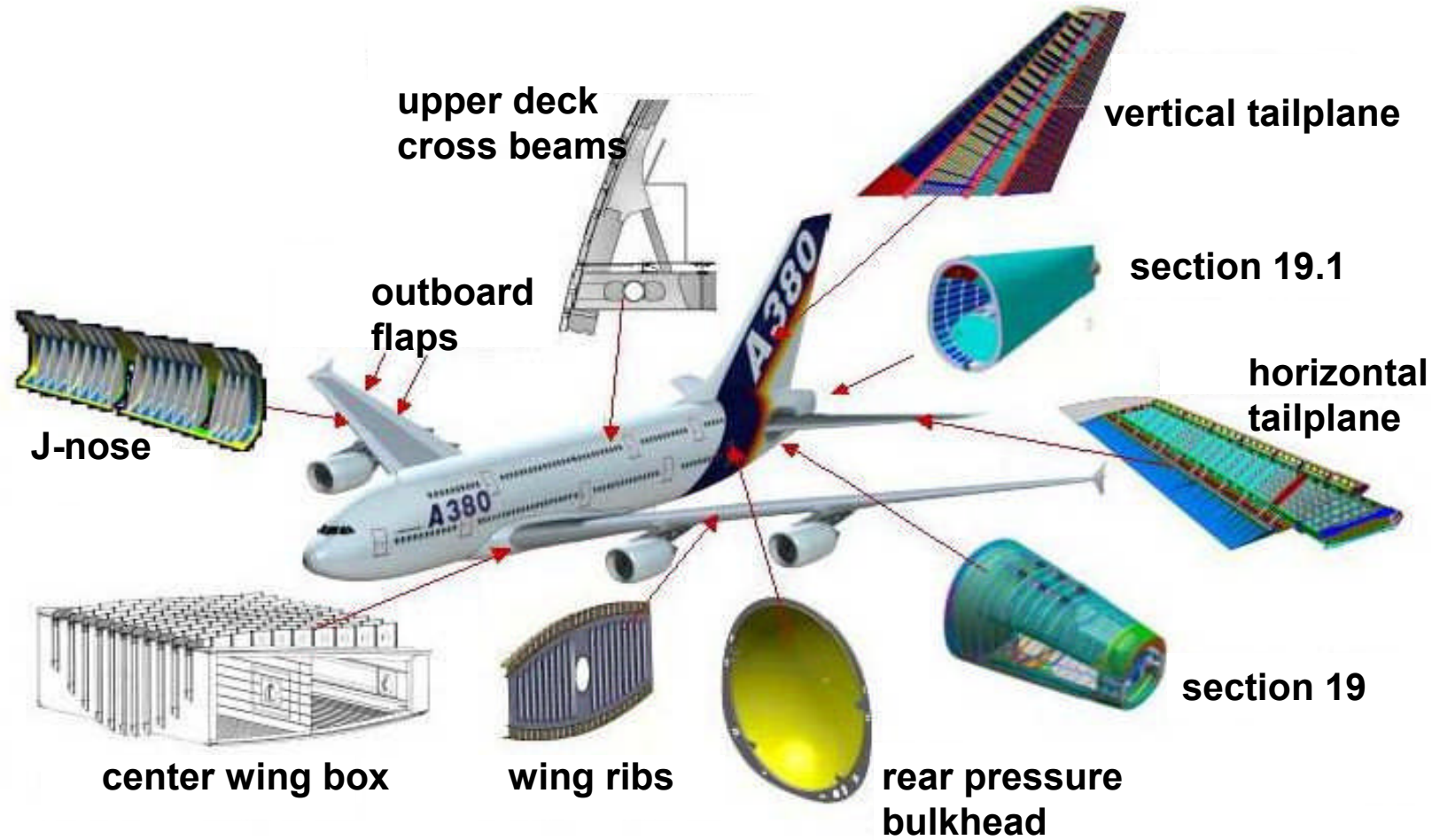


MW-Fabrication of Large CFC Structures



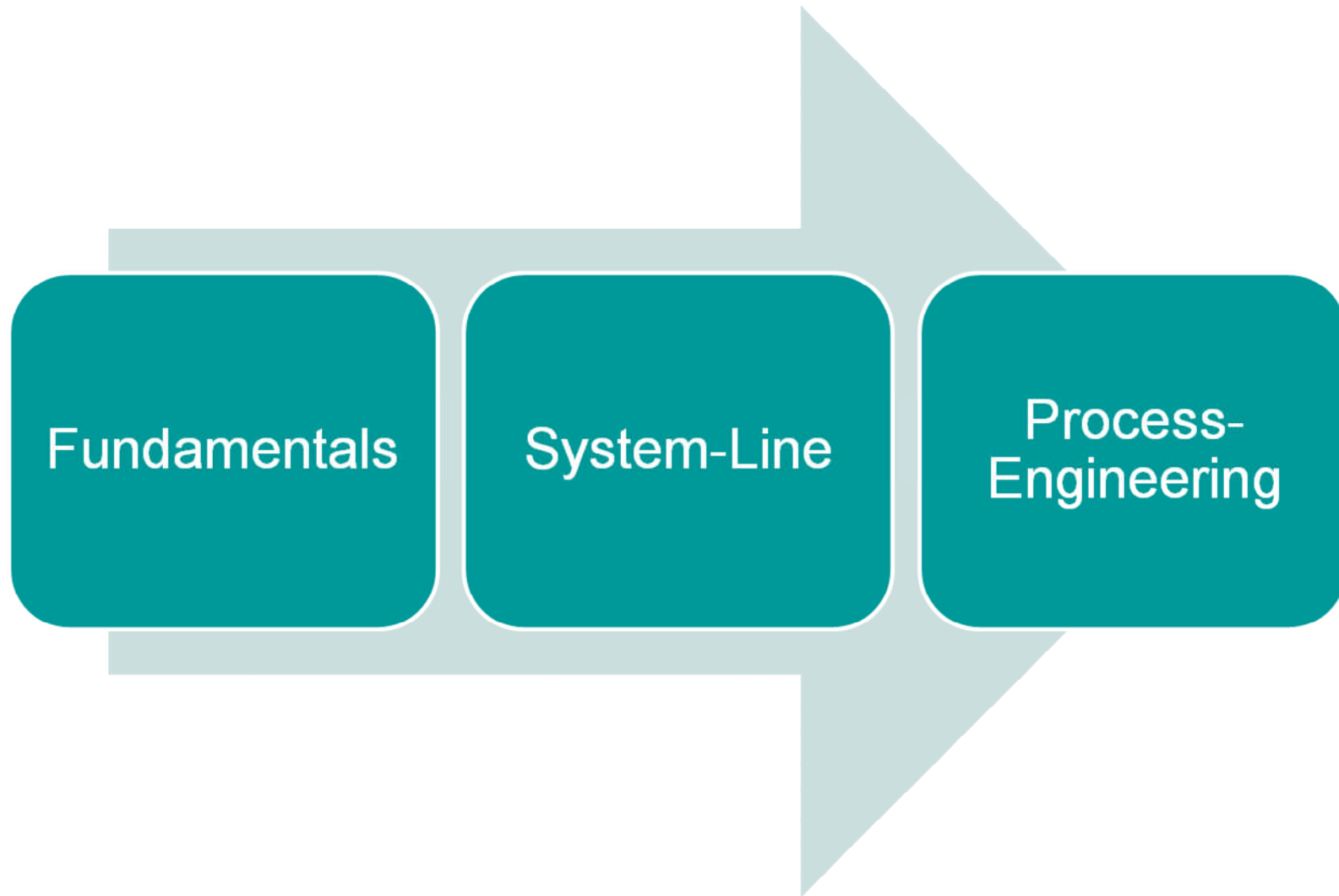
IFB Institut für Flugzeugbau
Universität Stuttgart

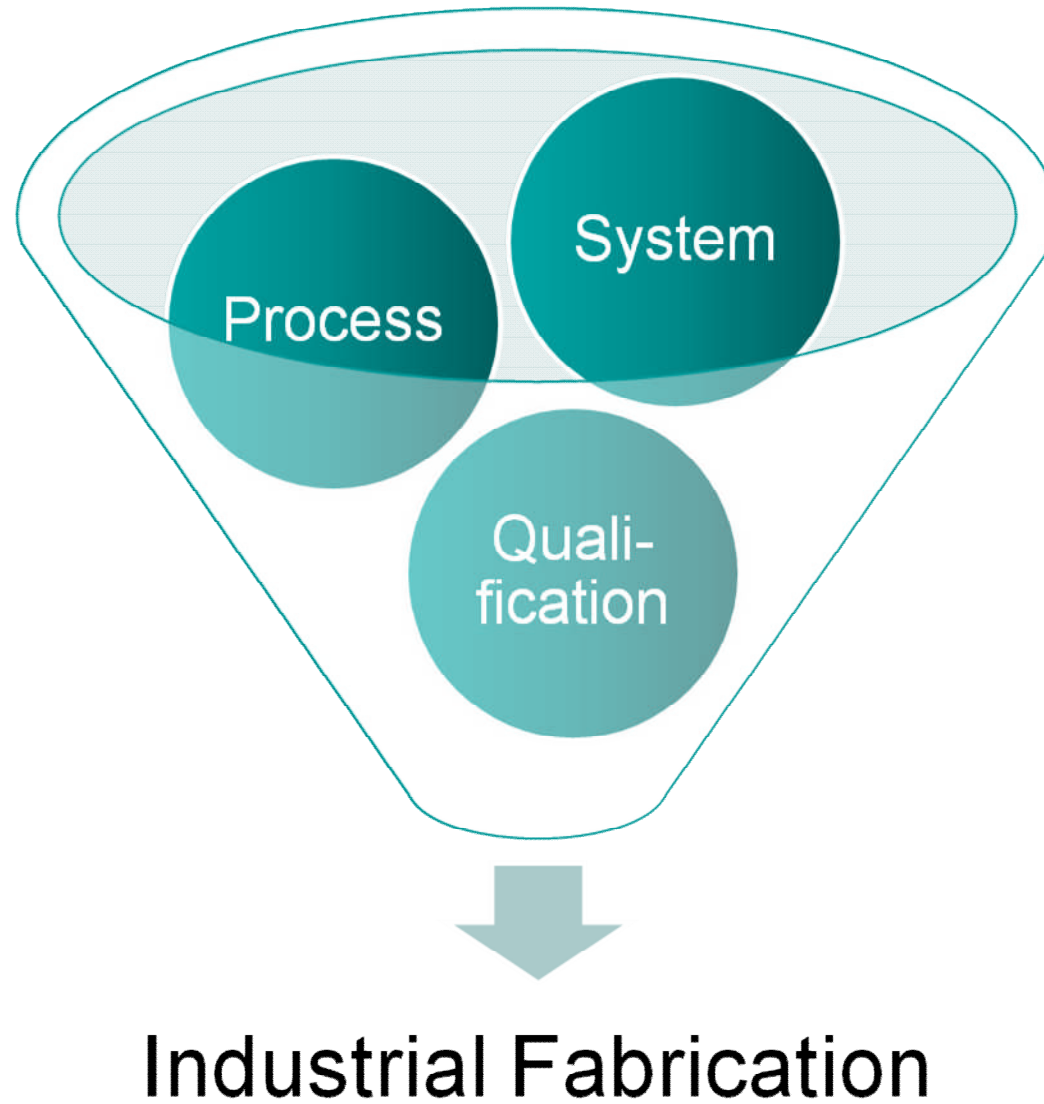


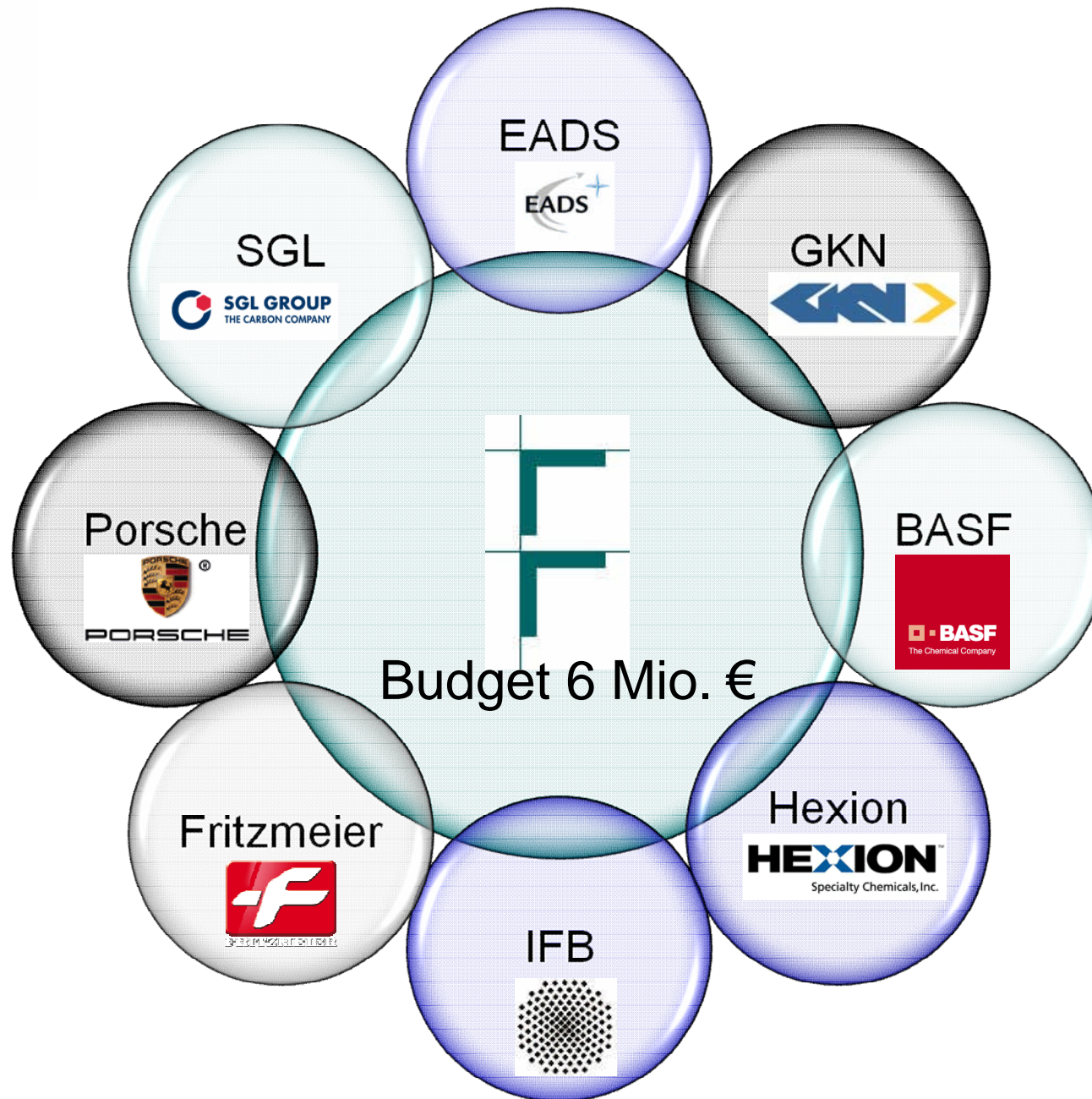


[M. Kolax; C. Mudra: DGLR Symposium Munich, 2003]



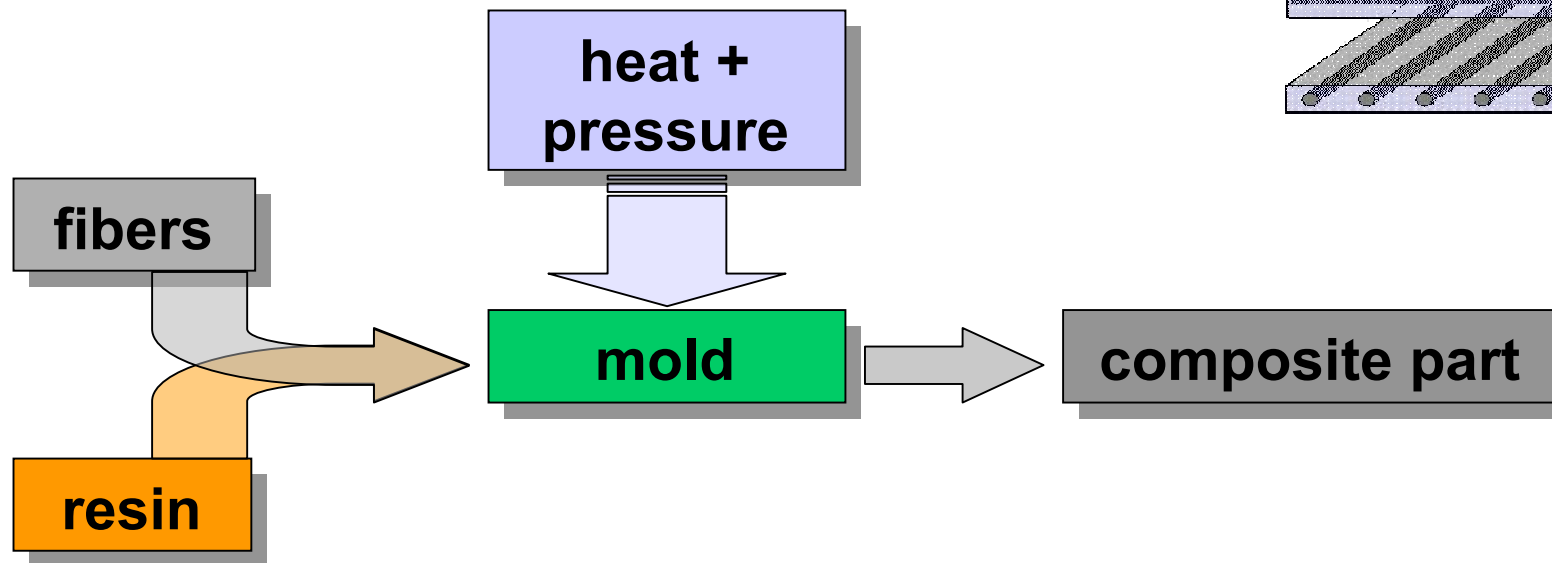
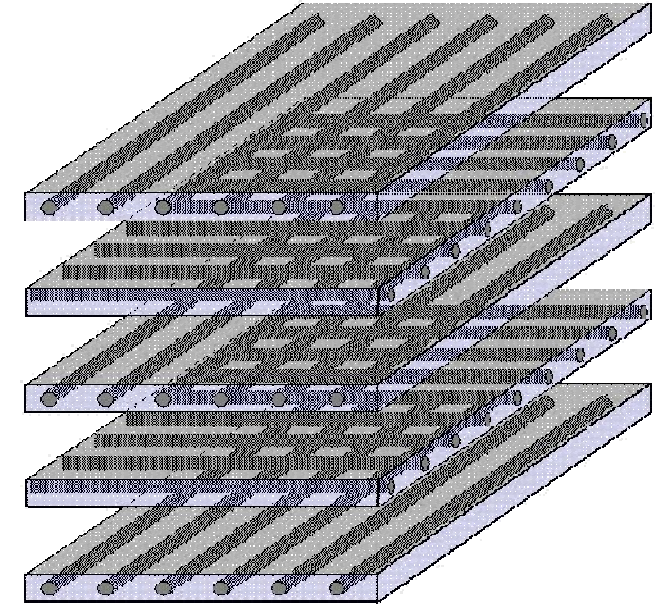






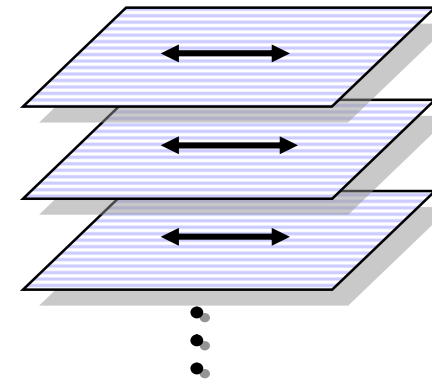
Composite Materials

- fibers (e.g. carbon) + matrix (e.g. epoxy)
- orthotropic mechanical properties
- stacking of layers with individual orientation
 → mechanical properties of the laminate can be designed
- processing:

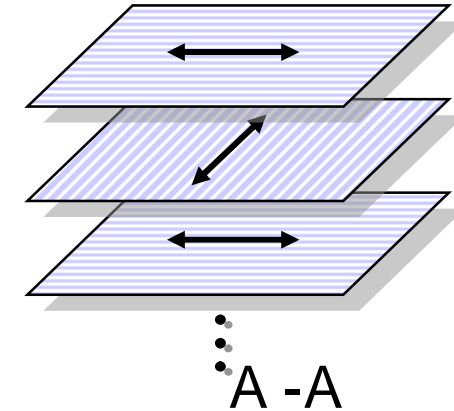


- Composite material: A stack of carbon fiber fabric layers embedded in a polymer

UD Fiber Orientation

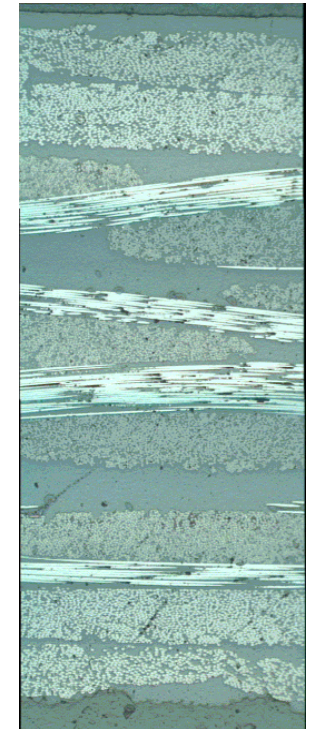
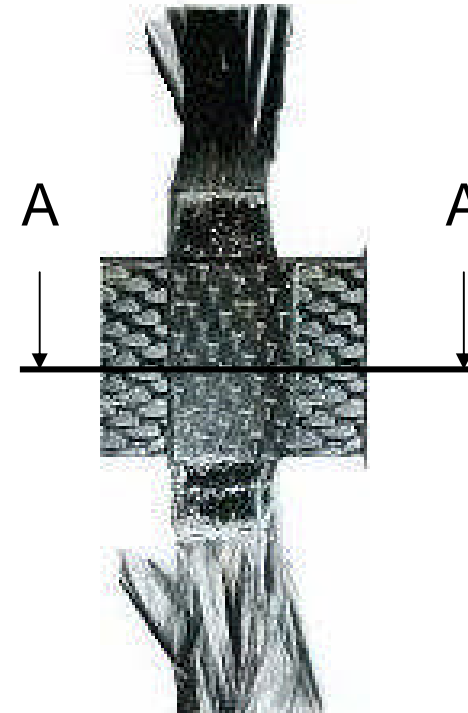


MD Fiber Orientation



The challenge for microwave curing:

- Carbon fibers are electrical conductive
- Exothermic polymerization reaction of epoxy polymers



- Polymerization requires activation energy in form of heat (typically 180°C)
- Pressure for compaction and compression of voids
- Inconveniences:
 - Slow process
 - High energy consumption
 - High system inertia
 - High installation cost



CFRP – applications in aviation

- Higher share of CFRP's in all new aviation programs, large structures
- Few cost improvements achieved, autoclaving is still the industry “backbone” to manufacture CFRP's

 Manufacturing and processing costs have to be lowered to maintain competitiveness



Courtesy of Airbus



Courtesy of Boeing

Why curing CFRP's with microwaves?

To shorten process time by higher heating rates

To save energy by heating more selectively

New Autoclave-less methods and Processes

To Reduce the System and Overall Costs of CFRP Fabrication

- Reduced Cycle Times
- Lower Cost Tool Materials
- Reduced Production of Volatiles
- Process Automation
- Large Part Capability
- Energy Savings

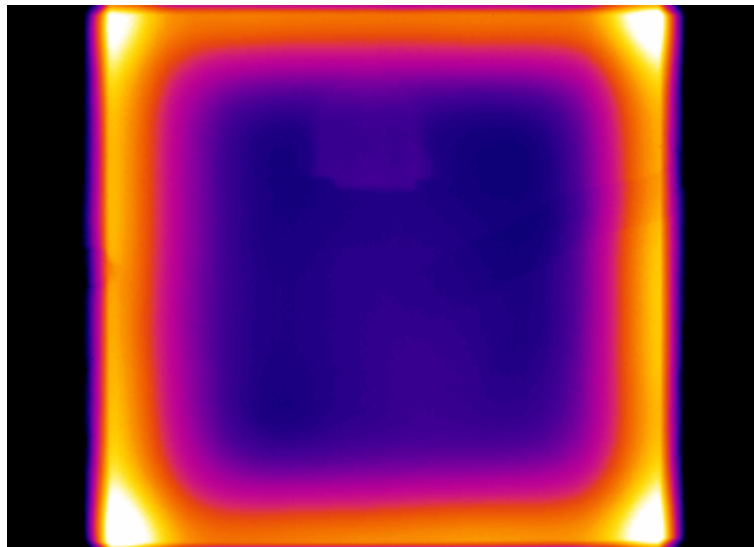
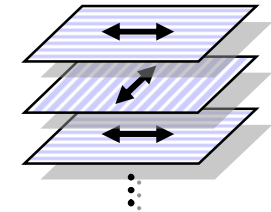




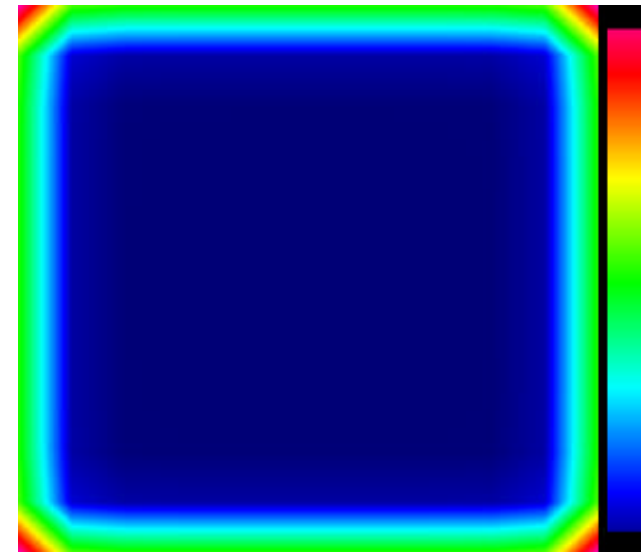
- Autoclave: Heating of surrounding
- Microwave: Heating of Part

$$\hat{\epsilon}^* = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp}^* & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\parallel}^* & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\perp}^* \end{pmatrix} = \hat{\epsilon}_r - j \frac{\hat{\sigma}_e}{\omega \epsilon_0}$$

MD Fiber Orientation



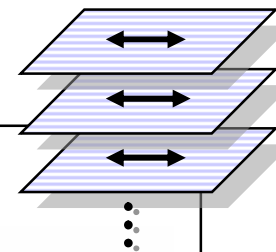
IR image approx. 20 s after stop of the process



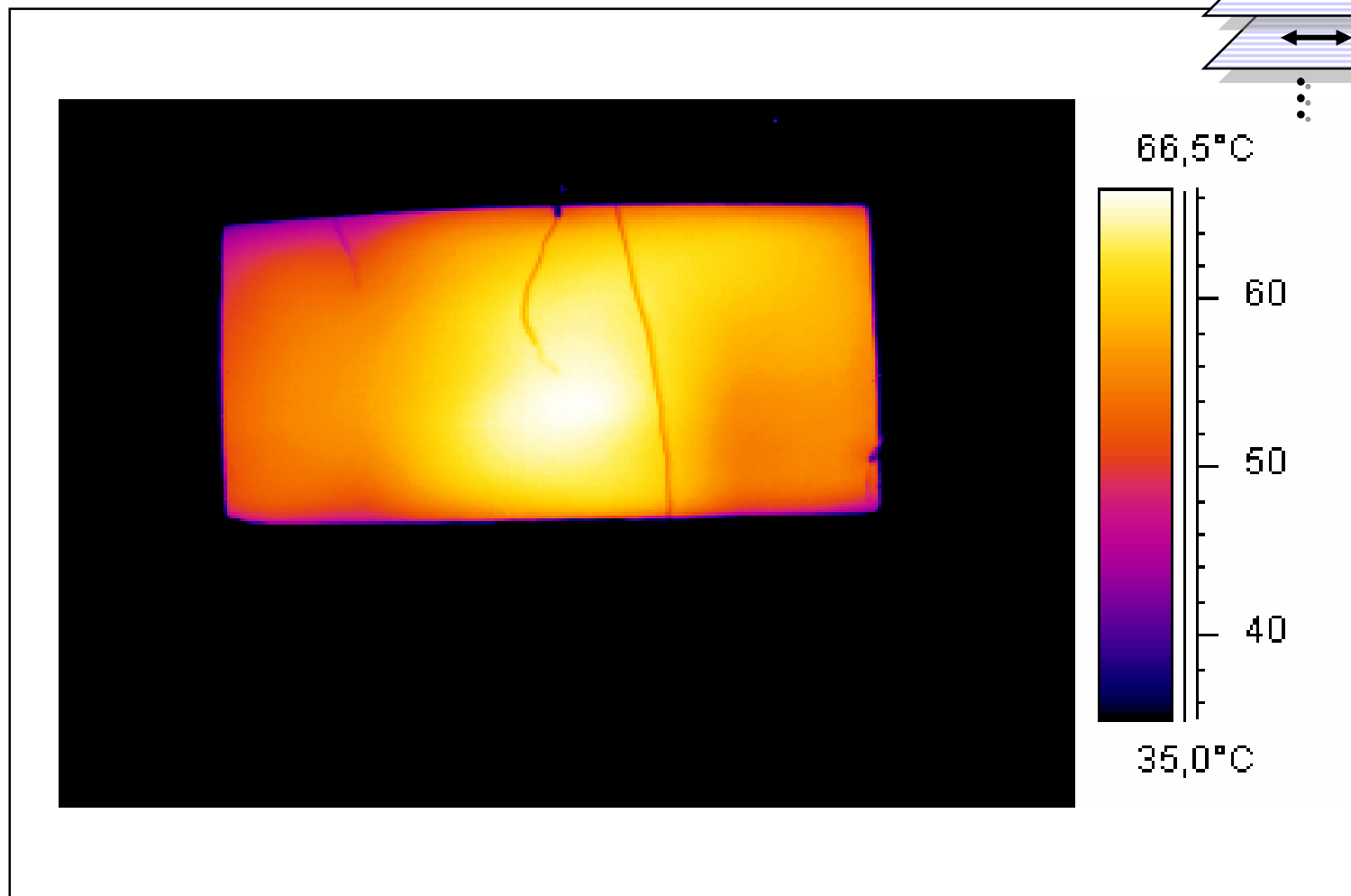
simulated temperature profile (at an earlier point in time)

- Simulation results correspond qualitatively to experiments
- Differences in profiles can be explained by cooling time before IR was taken

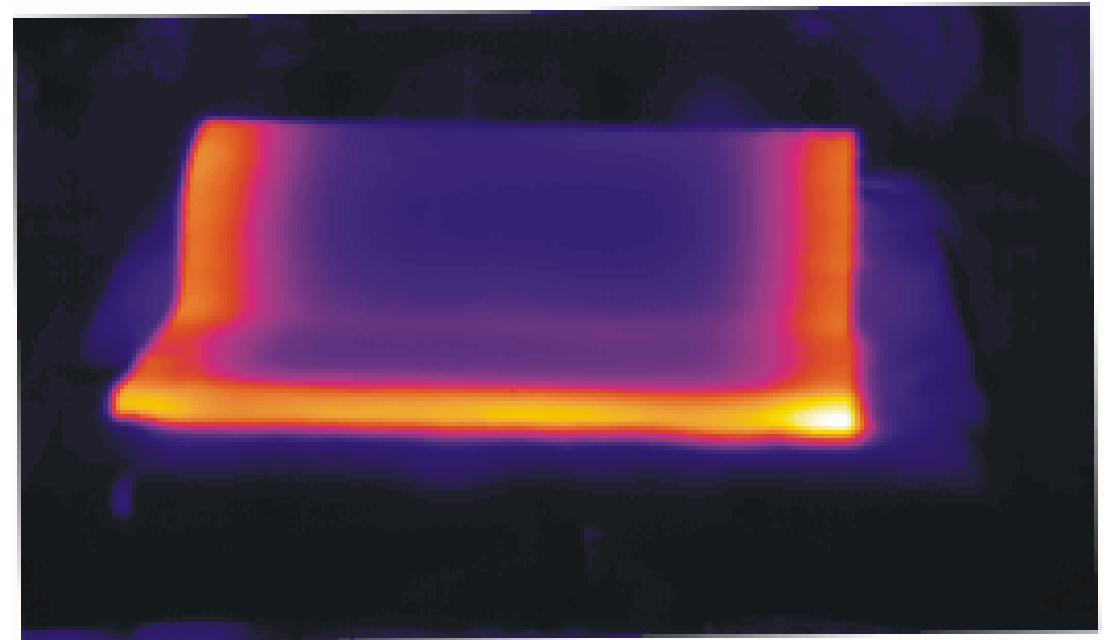
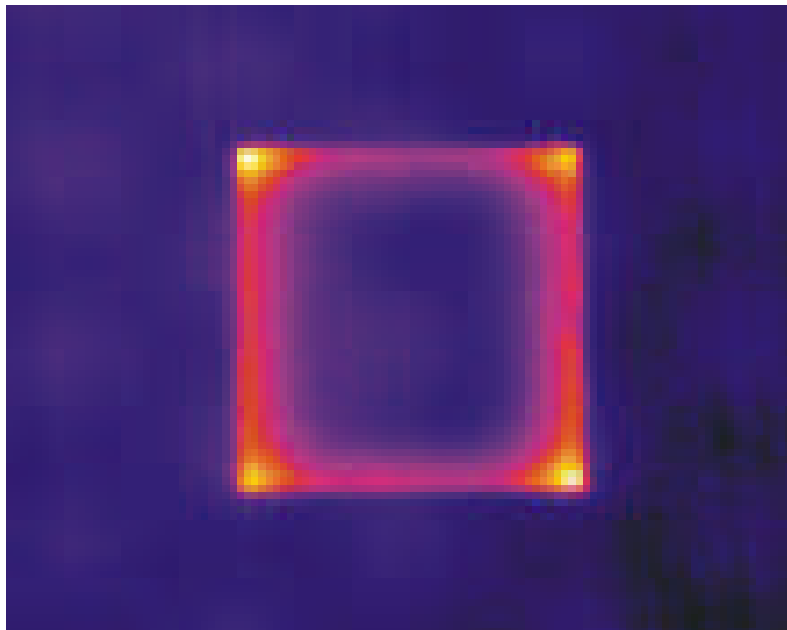
UD Fiber Orientation



$$^* = \begin{pmatrix} \epsilon_{\perp}^* & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_{\square}^* & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{\perp}^* \end{pmatrix} = \hat{\epsilon}_r - j \frac{\hat{\sigma}_e}{\omega \epsilon_0}$$

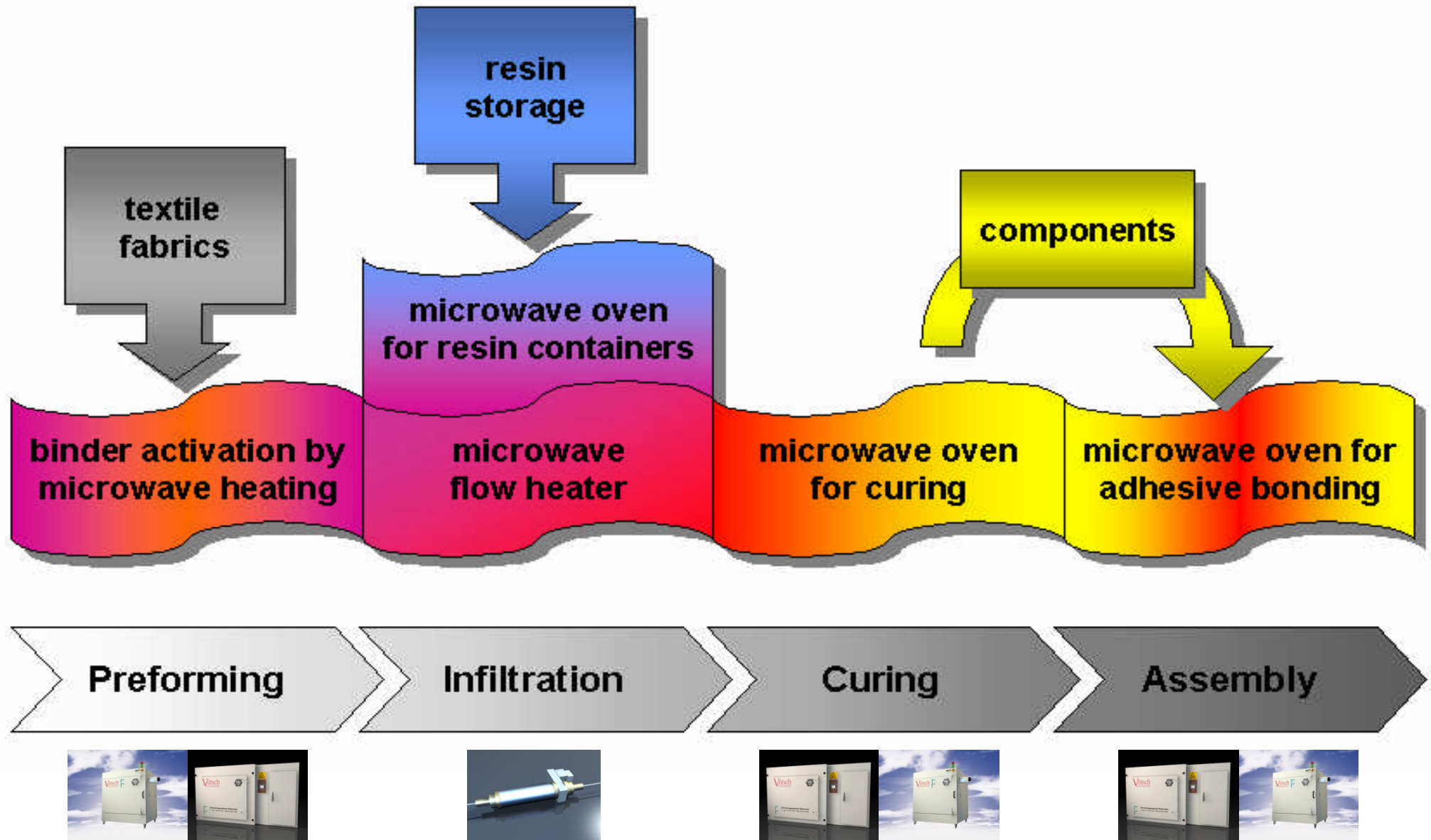


$p_{\text{elec}}(\vec{x}, t) \approx \frac{1}{2} \sigma_{\square} E_{\square}^2(x, t)$ heats at carbon fibres, other components heat the resin matrix volumetrically



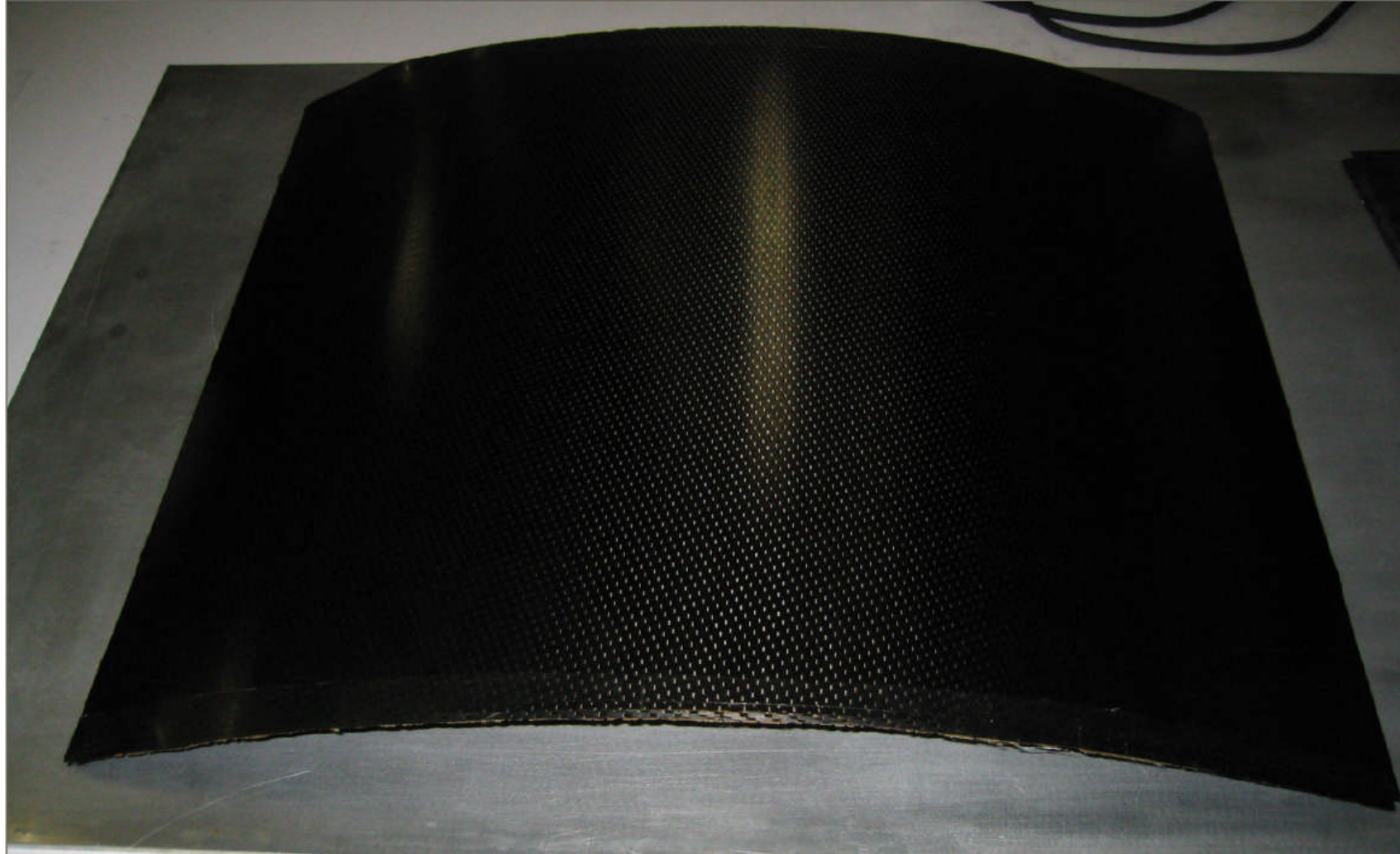
The influence of a curved geometry of the CFC part does not have a significant change on the temperature distribution (therefore in consequence the homogeneity of the surrounding microwave field in the hexagonal HEPHAISTOS cannot be changed by the differently shaped load as well).

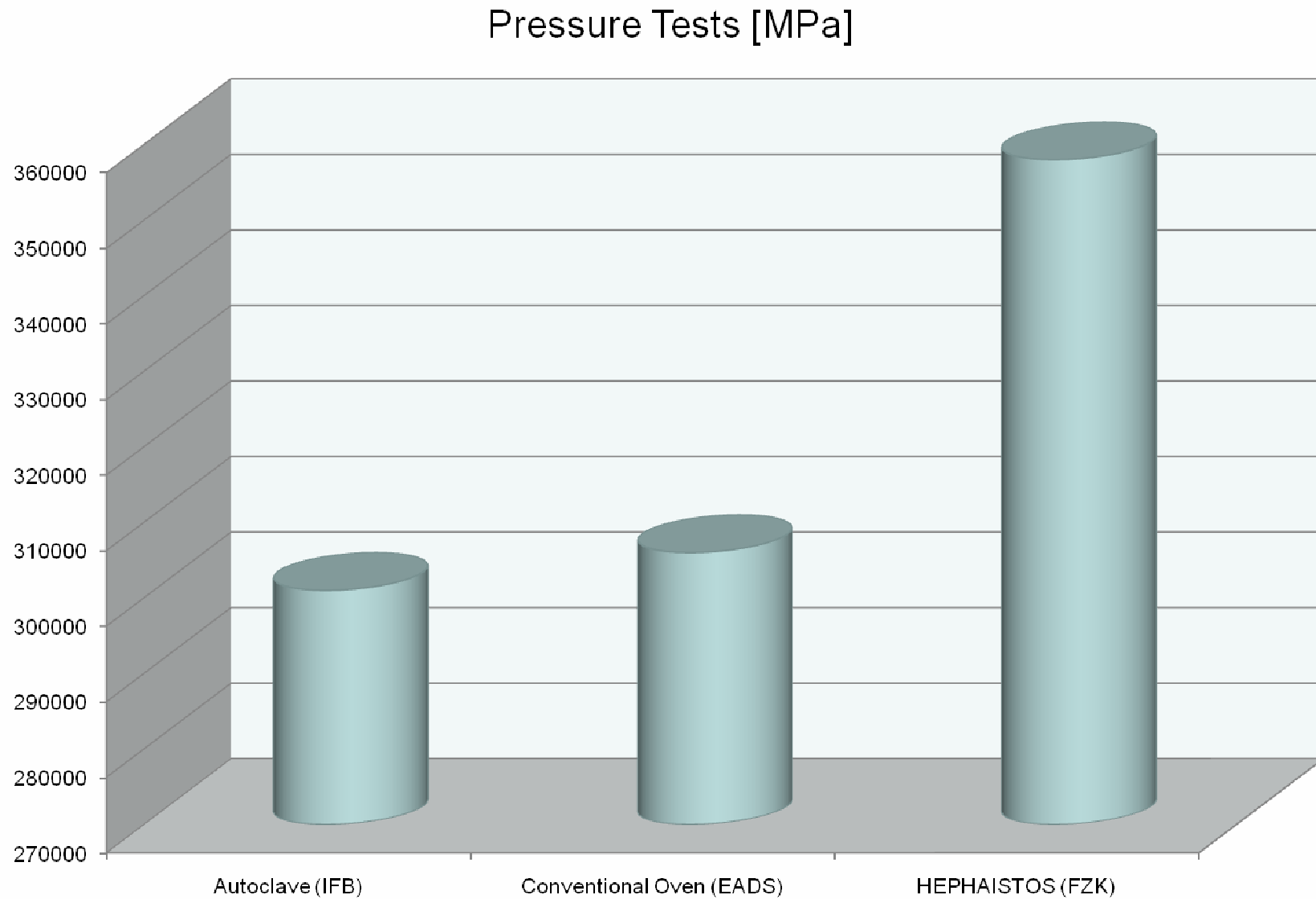
Microwave based CFRP Production Concept



Curing of Large Structures in Standard Metal Tools

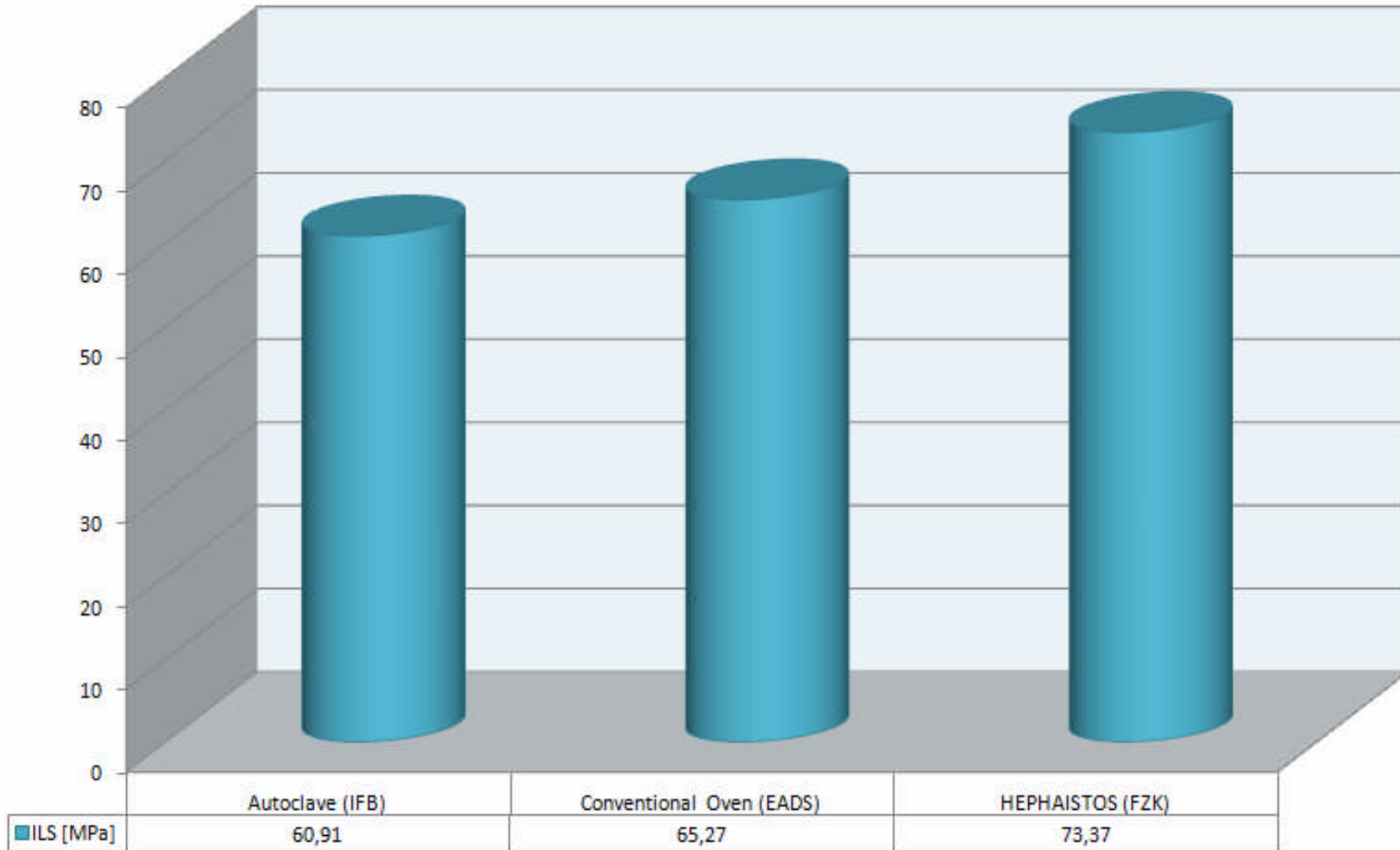




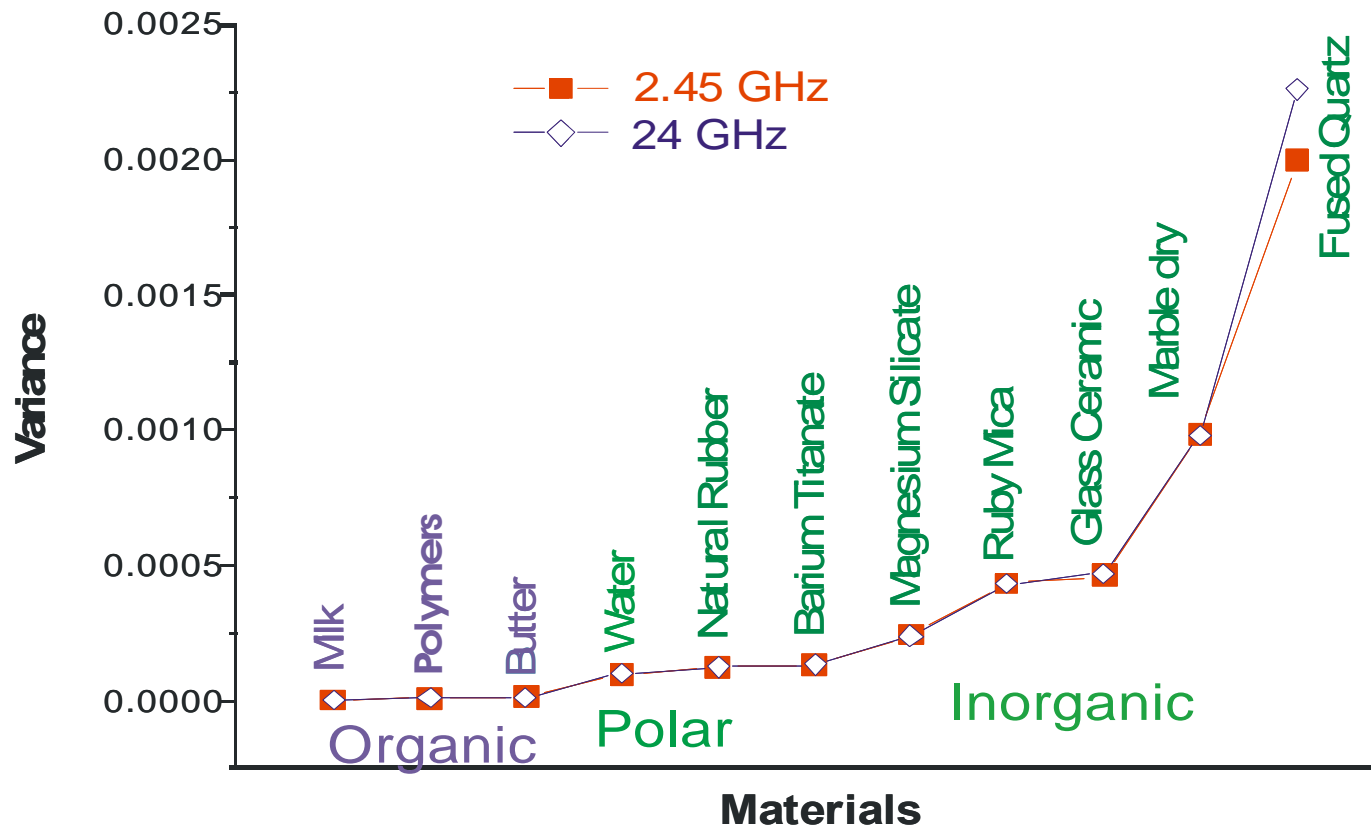


Interlaminary Shear Strength - Comparison of Methods

ILS [MPa]



Effect of Frequency on Temperature Homogeneity



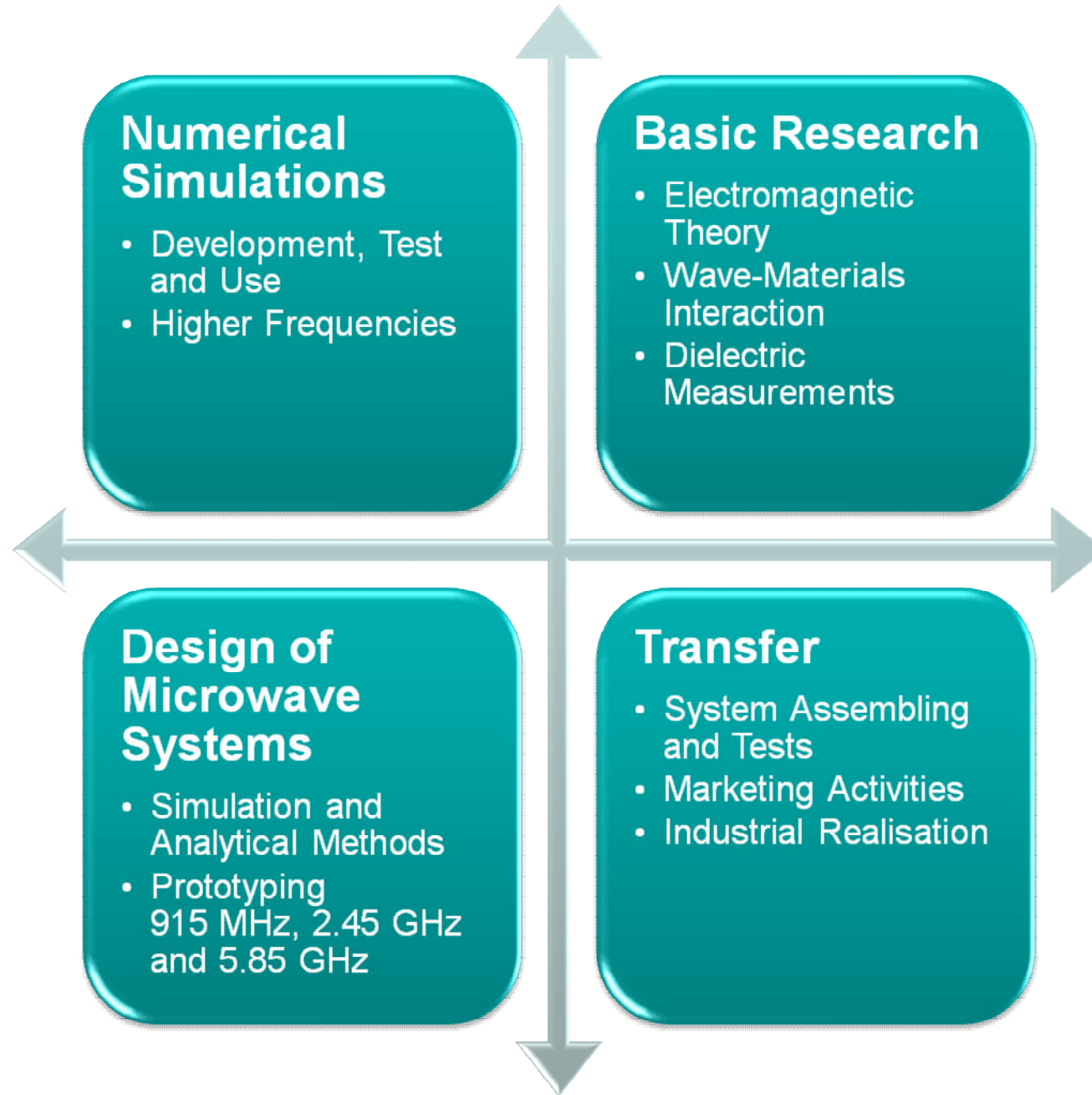
M. Paulson, L. Feher, Loughborough 2003



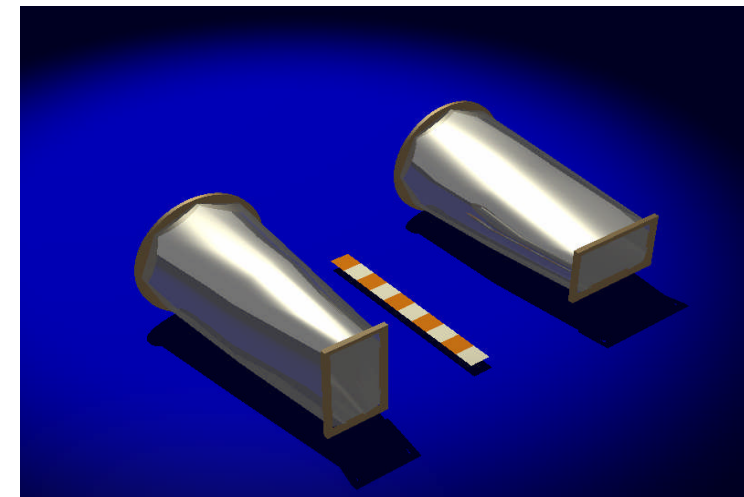
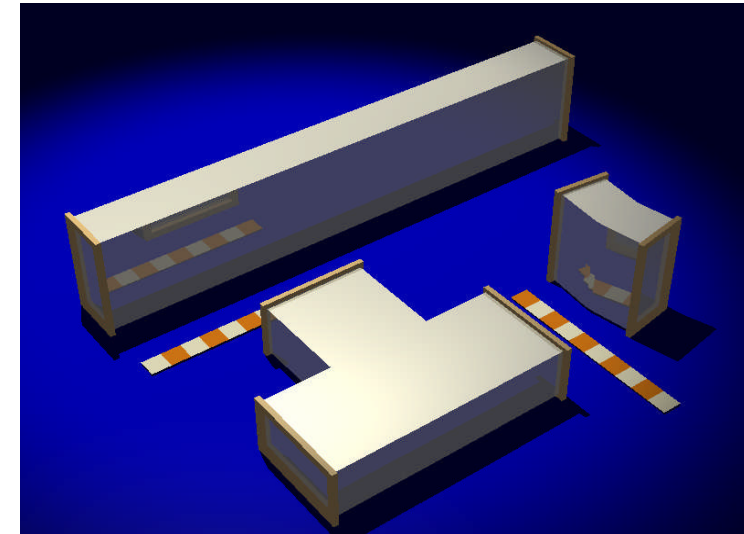
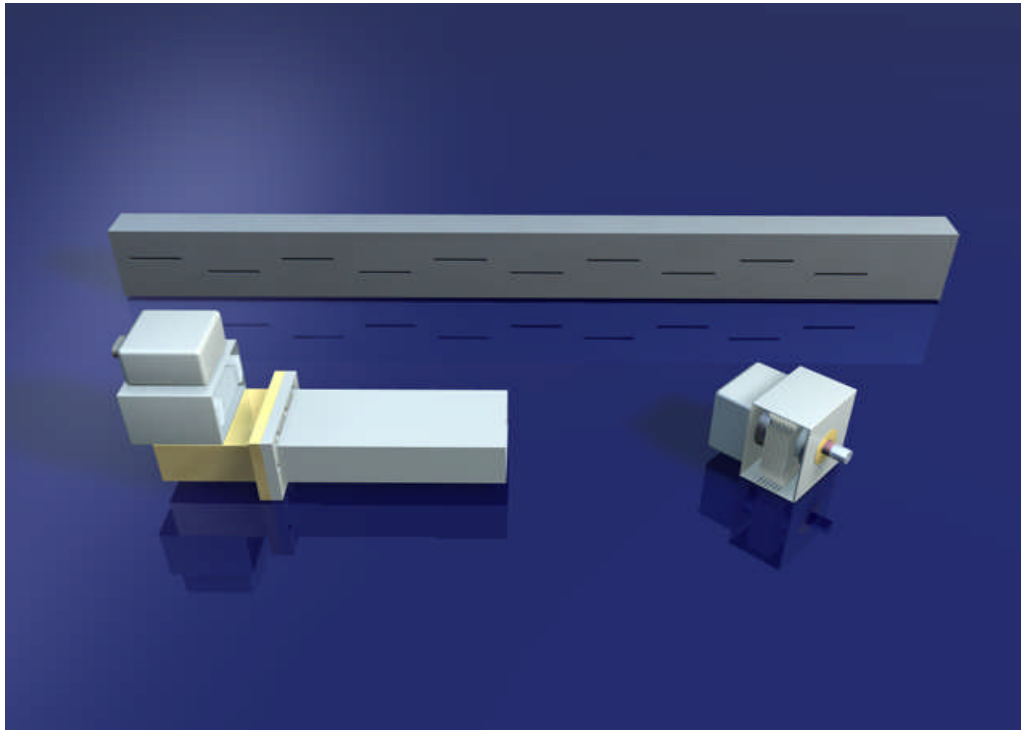
		<u>CA1: VHM 100/100</u>	<u>CA2: VHM 180/200</u>	<u>CA3: VHMD 180/300</u>
Nenntemperatur	Grad C	400	400	400
Nutzraum-Volumen, ca.	ltr	750	4200	7000
<u>Innenmaße:</u>				
Hüllkreis-Durchmesser (Hexagon)	mm	1050	1800	1800
Breite x Höhe x Tiefe	mm	1050 x 910 x 1050	1800 x 1560 x 2000	1800 x 1550 x 3300
<u>Außenmaße:</u>				
Breite x Höhe x Tiefe	mm	1500 x 1800 x 1470	4200 x 2900 x 2200	2600 x 2550 x 3500
Gewicht, ca.	kg	850	1800	3000
Nennspannung	V, Hz	400 V; 50/60 Hz	400 V; 50/60 Hz	400 V; 50/60 Hz
Mikrowellenleistung	kW	ca. 10-14	ca. 20-30	ca. 31
Anschlußwert	kW	ca. 22,4	ca. 65	ca. 68
Magnetron	GHz	2,45	2,45	2,45
Beheizungsart		Mikrowelle	Mikrowelle	Mikrowelle
Innenbehälter-Werkstoff		Edelstahl 1.4301	Edelstahl 1.4301	Edelstahl 1.4301
Regelung		S!MCON/32-System	S!MCON/32-System	S!MCON/32-System
Technische Änderungen vorbehalten				



Industrial Microwave Technology - Methodology



(Dr.Stanculovic)



Design of Microwave Waveguide Devices

Simulation and Analytical Methods

Prototyping 915 MHz, 2.45 GHz, 5.85 GHz

