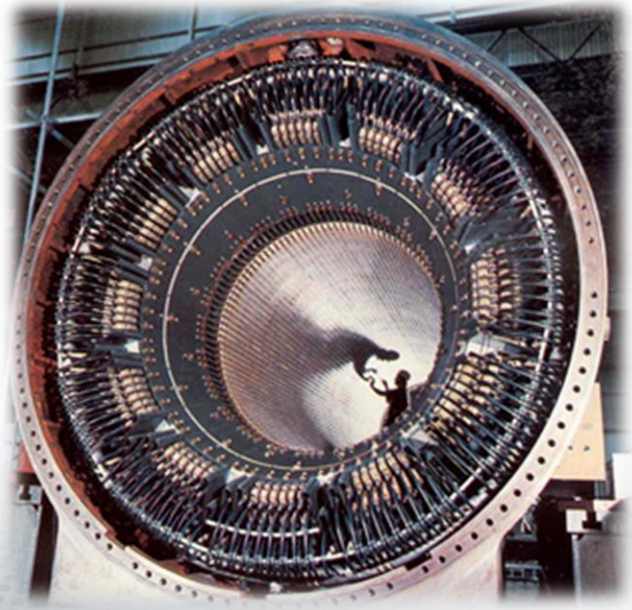
COMPOSITES IN DER HOCHSPANNUNGSISOLATION

4a Technologietag 2016

isovolta GROUP

HOCHSPANNUNGSMASCHINEN

< 1kV → 1kV – 30kV → > 30kV



HOCHSPANNUNGSMASCHINEN

Rotierende elektrische Maschinen

- Motoren/Generatoren
  - Wechselstrommaschinen (AC)
    - *asynchron*
    - *synchron*
    - *umrichterbetrieben*
  - Gleichstrommaschinen (DC)

ROTIERENDE ELEKTRISCHEN MASCHINEN

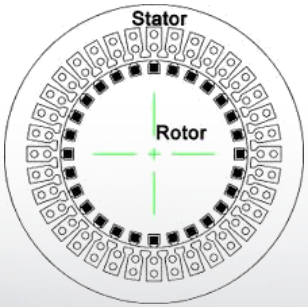
Generatoren

Zum größten Teil werden in elektrischen Kraftwerken 3-Phasen AC Synchrongeneratoren zur Stromerzeugung eingesetzt.

Es wird unter zwei prinzipielle Typen von Generatoren unterschieden:

Turbogeneratoren:
angetrieben durch einen thermischen Prozess
(z.B.: GuD)

Rotor



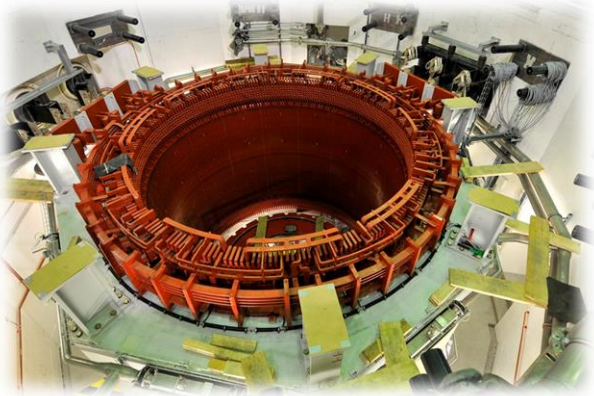
Stator (Vollpol)

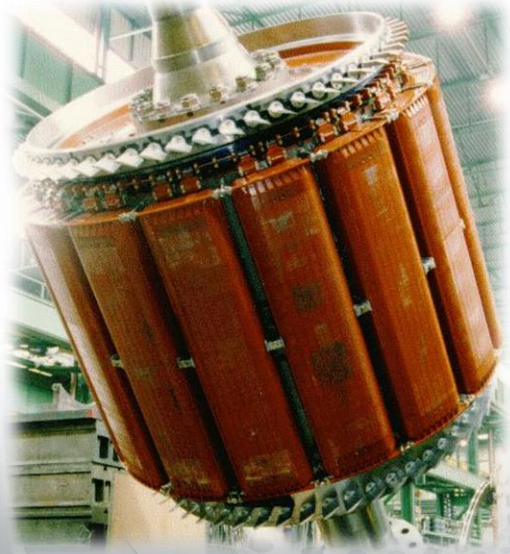
MAPNA

ROTIERENDE ELEKTRISCHEN MASCHINEN

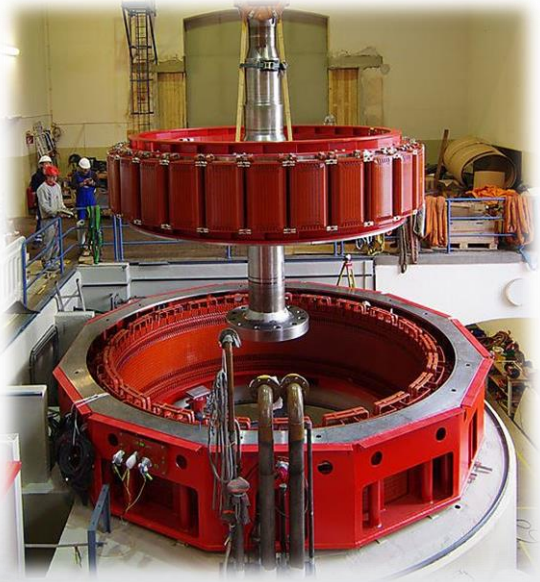
Generatoren

Wasserkraftgeneratoren:
angetrieben durch Wasserturbinen





Rotor (Schenkelpol)



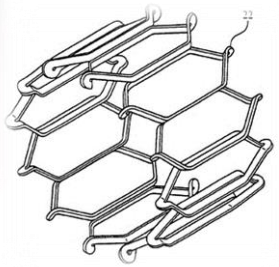
Stator

WICKLUNGSTYPEN – STATOR

Formspulen

- Rechteckige Leiter
- Vorgeformte Spulen → Diamant Form
- Bis zu 15 kV Betriebsspannung
- Motoren & Generatoren von 50 bis 100 MVA

Schümann



Partzsch

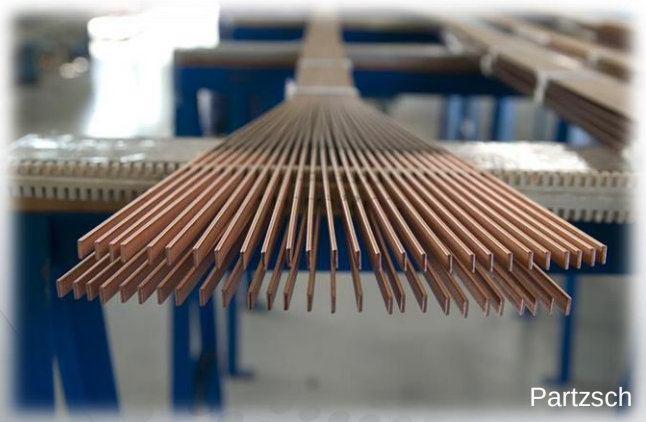
Partzsch

WICKLUNGSTYPEN – STATOR

Roebelstäbe

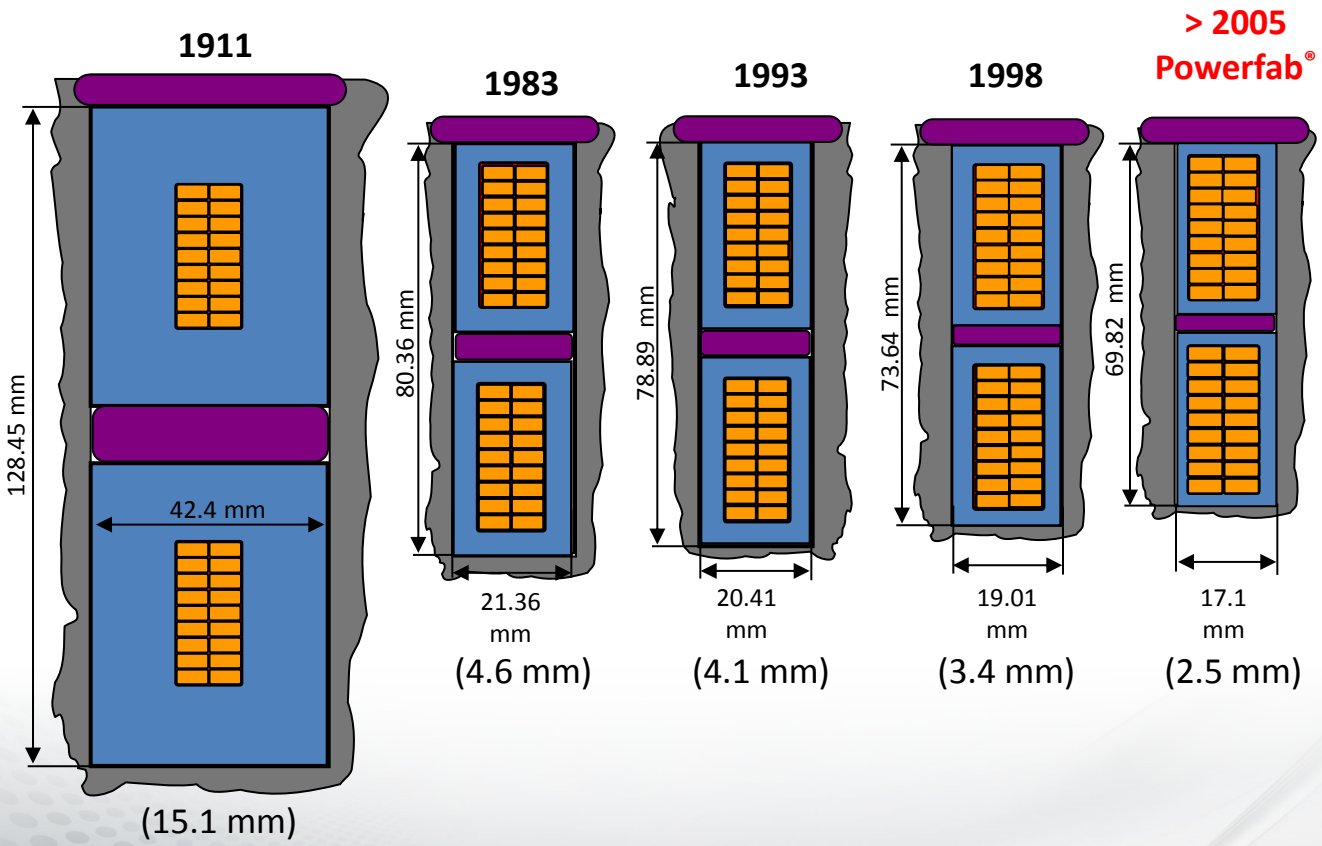
- Rechteckige Leiter
- An Kunden angepasstes Design (Luft, Wasser, Wasserstoff Kühlkanäle)
- Großgeneratoren > 50 MW
- Mechanisch fester

Partzsch



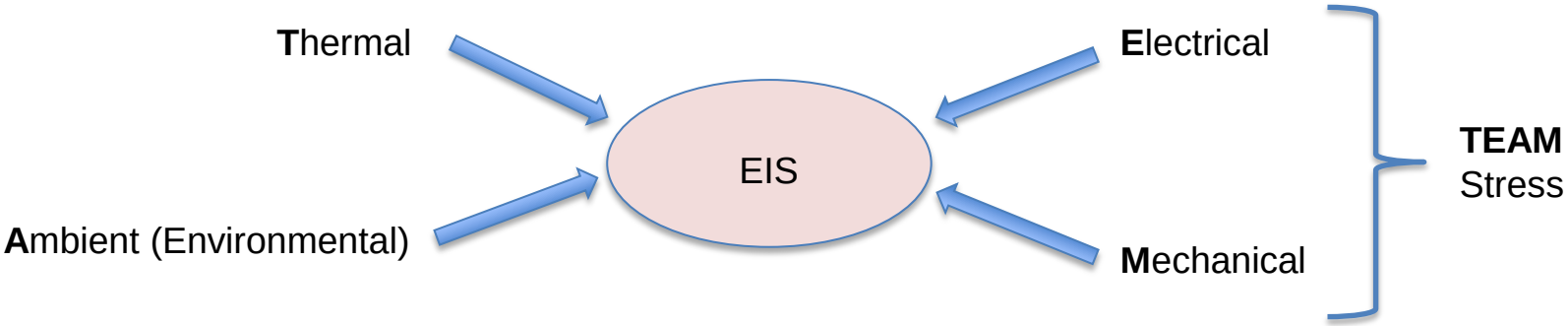
Partzsch

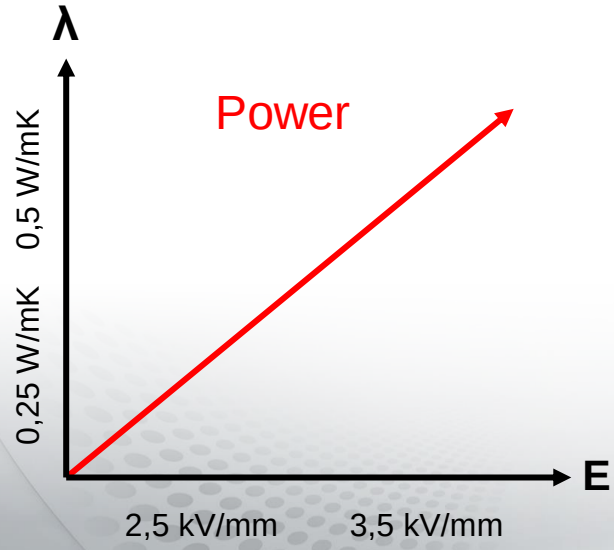
ENTWICKLUNG DER ISOLATIONSDICKEN

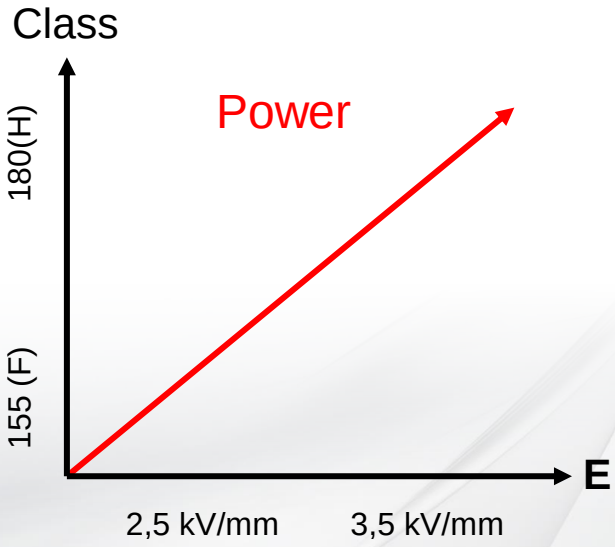


Adapted from: C. N. Glew: „The Next Generation – A Review of the factors influencing the output of electrical machines in the new millennium“, INSUCON/ISOTEC 1998

ANFORDERUNGEN AN DAS EIS

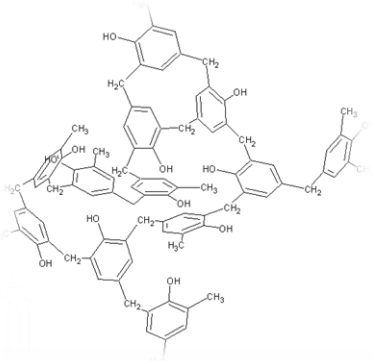


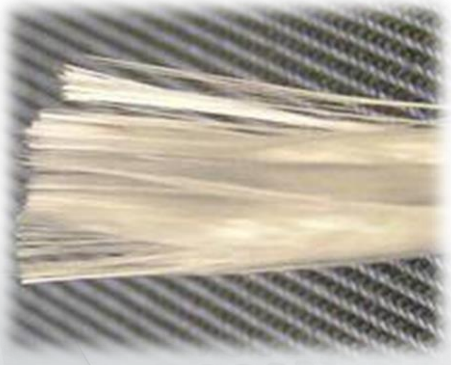


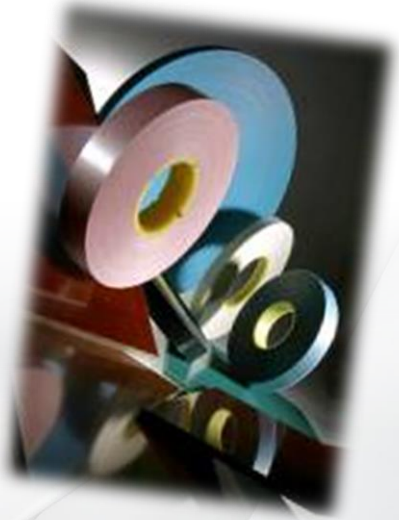


ISOLIERBÄNDER FÜR HV MASCHINEN

- Glimmerpapier
- Träger (Glasgewebe, Folie, Vlies)
- Bindeharz





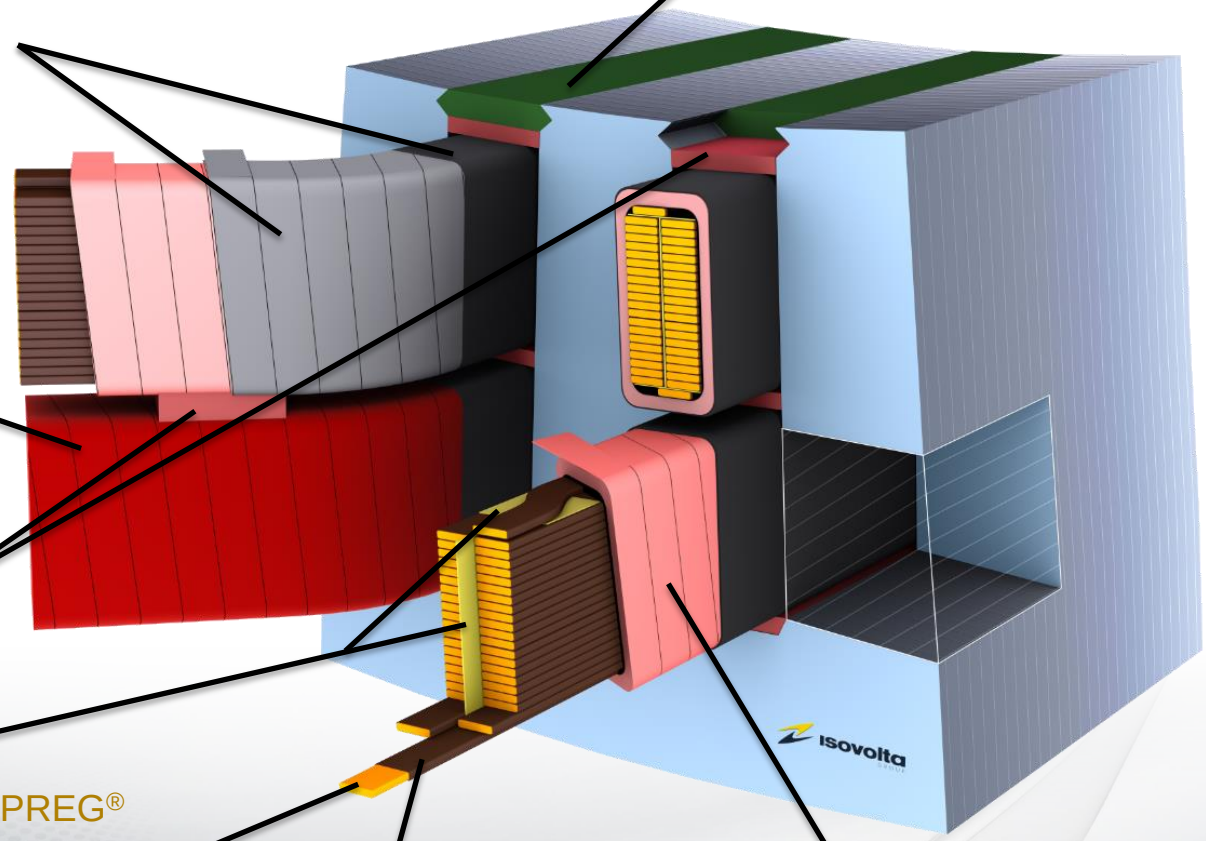


isovolta GROUP

EIGENSCHAFTEN DER ROHSTOFFE

	Unit	Mica	E-glass	EP or UP resin
Electrical field strength at 20°C	kV/mm	60 - 200	10 - 40	20 - 45
Thermal conductivity	W/mK	0.25 - 1.7	1.0	0.12 - 0.2
Specific electrical resistance	Ωcm	10^{14} - 10^{17}	> 10^{10}	10^{13} - 10^{16}
Mechanical properties		↓	↑	↔
Melting point or Tg*	°C	1200	840	80 – 180

VPI - HV STATOR ISOLATIONSSYSTEM



Nutkeile: ISOVAL®, MAGNOVAL®

Glimmschutz:
CONTAFEL®,
CONTAGLAS®,
EGSB®

Schutzband:
ISOSEAL®

Füll- Ausgleichsmaterial:
ISOVAL®, CONTAVAL®,
POROMAT®, POROFILZ®

Vorverfestigung:
VOTAFIX®, VOTASTOP®, ISOPREG®

Leiter

Leiterisolation

Hauptisolation (Nutbereich):
POROFAB®, POROBAND®, POROSPLIT®

isovolta GROUP

PRÜFEN UND TESTEN

Prüfungen am Isolationssystems

Kurzzeitprüfungen:

- Kapazität
- Verlustfaktor (power factor)
- Durchschlagspannung
- Teilentladungen (TE)
- Isolationswiderstand

Langzeitprüfungen:

- Dauerspannungstest
- **Thermisch zyklieren, altern**
- Multistresstest (TEAM stress)

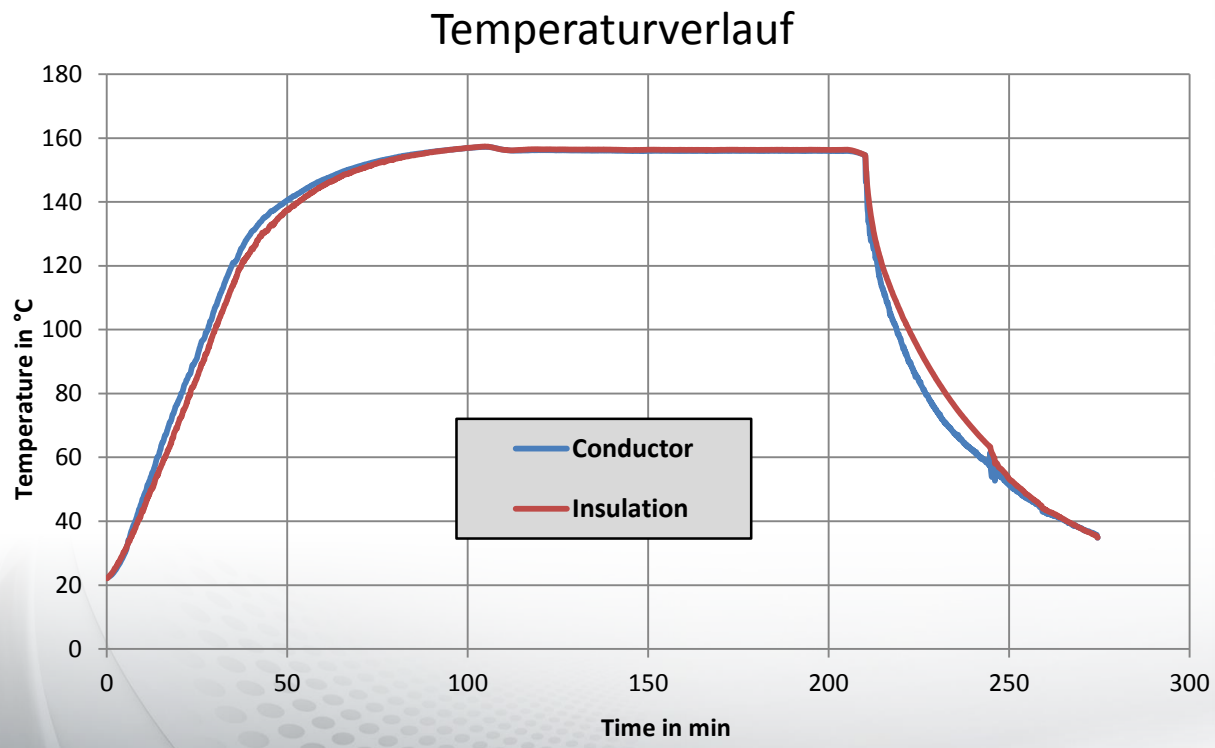
THERMISCH ZYKLIEREN

Bei Isovolta können zwei unterschiedliche thermische Zykliervarianten durchgeführt werden:

- Thermozyklierung in Anlehnung an IEEE 1310
- IPV (interne Prüfvorschrift)

THERMISCH ZYKLIEREN NACH IPV

Aufwärmen im Ofen (90 min.) – Haltezeit 120 min. – Abkühlen auf RT



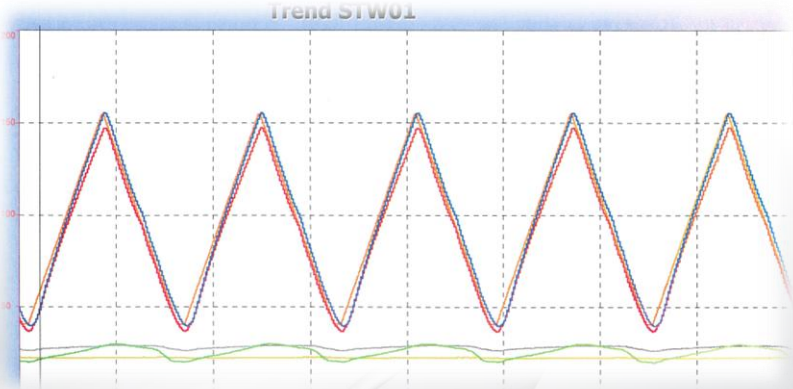
THERMISCH ZYKLIEREN NACH IEEE1310

Langzeittest mit diagnostischen Prüfungen

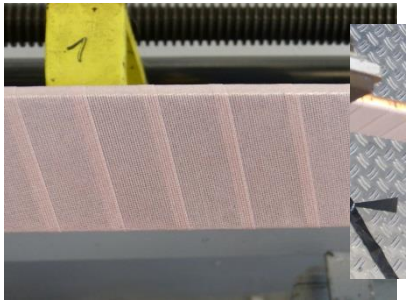
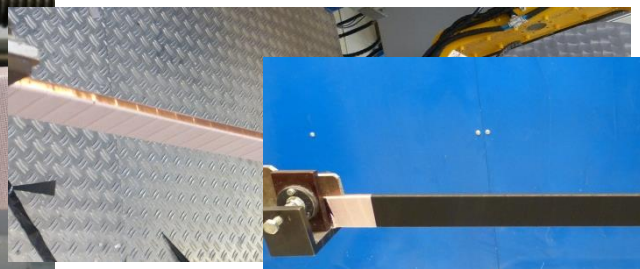
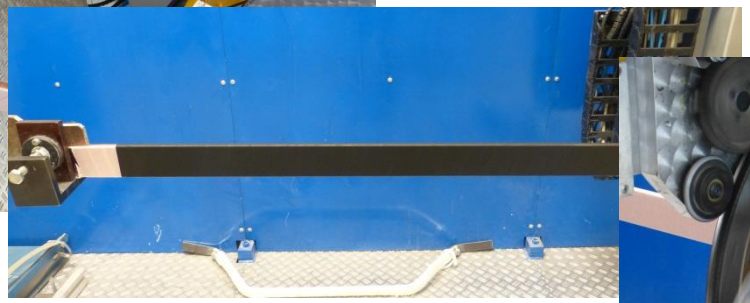
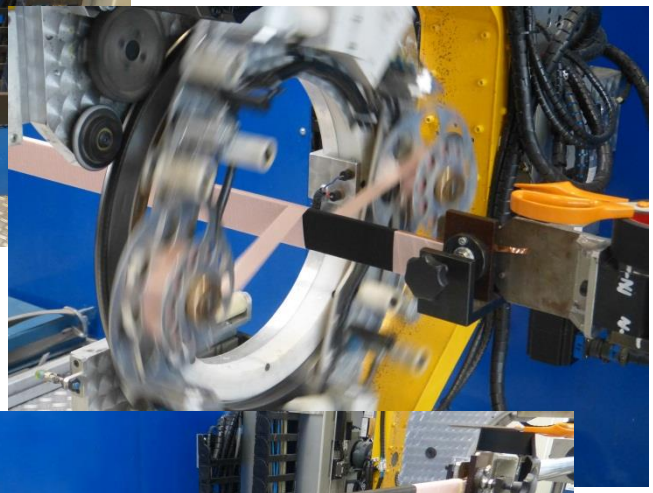
Während des Zyklierprozesses werden verschieden Prüfungen durchgeführt:

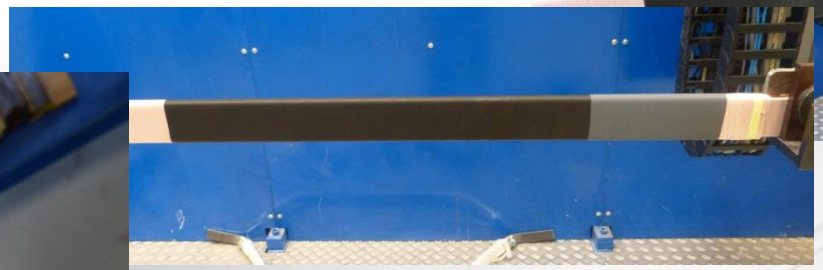
Messungen nach definierter Zyklenanzahl (z.B.: 10, 50, 100, 250,…)

- Stehspannungsprüfung
- Verlustfaktor (power factor)
- TE Messung
- Optische, mechanische Kontrolle
- Delamination



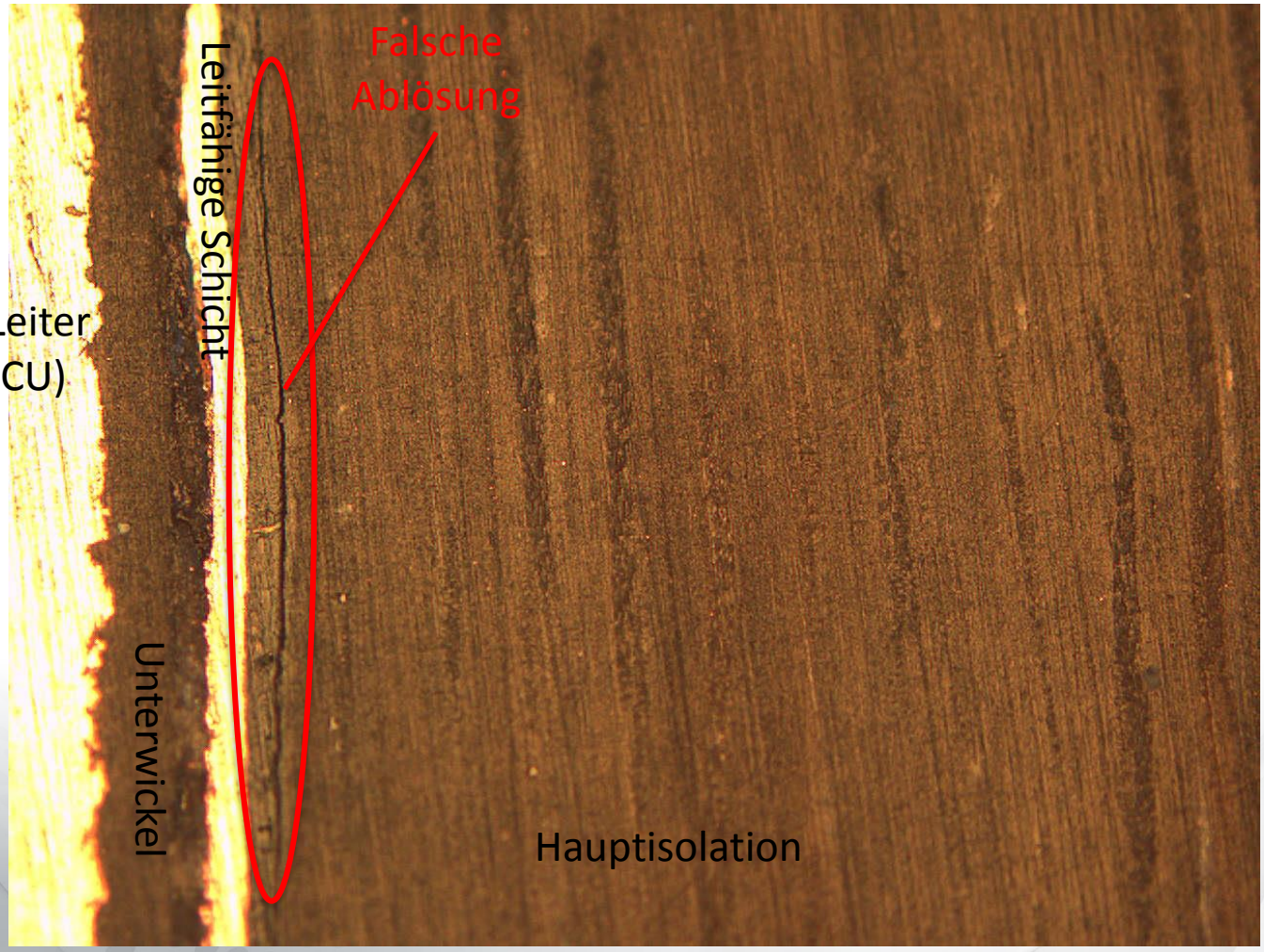
AUFBAU EINES PRÜFSTABES



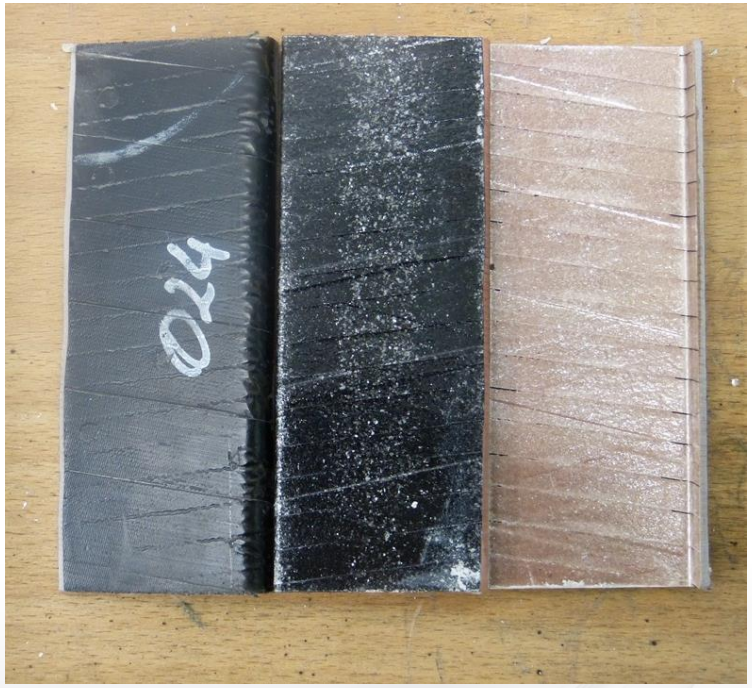
isovolta GROUP

ANALYSE


Falsche
Ablösung
Leitfähige Schicht
Leiter
(CU)
Unterwickel
Hauptisolation

ANALYSE

Nach aufschneiden “Ablösung falsch”



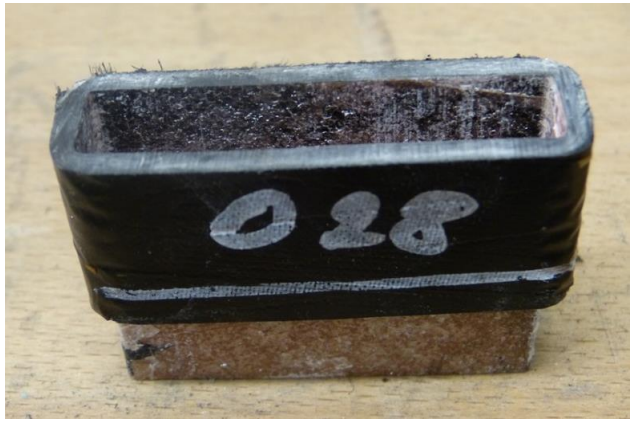
Ausdrücken des Leiters:
hier falsches Ergebnis (schwächste Stelle zwischen leitfähiger Schicht und Hauptisolation)

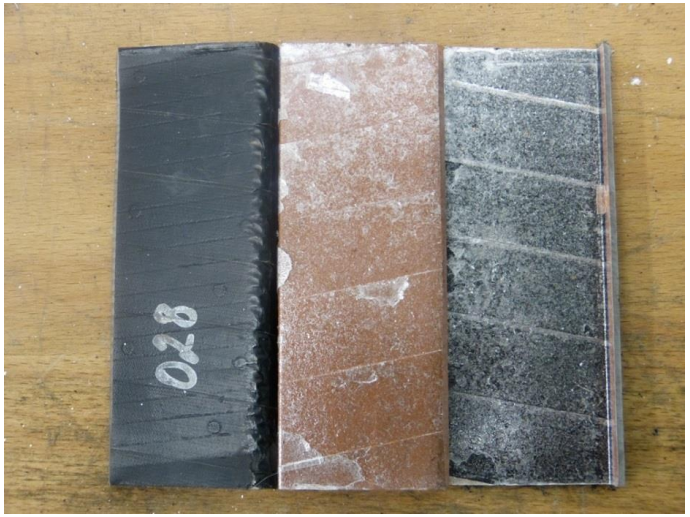
ANALYSE

Richtige Ablösung
Leitfähige Schicht
Leiter (CU)
Unterwickel
Hauptisolation

ANALYSE

Nach aufschneiden “Ablösung richtig”





Ausdrücken des Leiters:
hier richtiges Ergebnis (schwächste Stelle zwischen Leiter und Unterwickel)

DANKE FÜR IHRE AUFMERKSAMKEIT!

isovolta GROUP

Composites in der Hochspannungsisolation – PART2

Plausibilisierung durch Materialcharakterisierung und Simulation

R. Dornhofer (Isovolta AG), Ch. Weinberger (4a engineering GmbH)

ISOVOLTA GROUP
A-8402 Werndorf

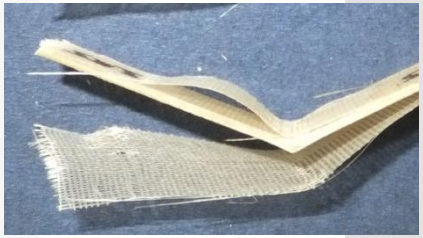
4a engineering GmbH
Industriepark 1
8772 Traboch

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

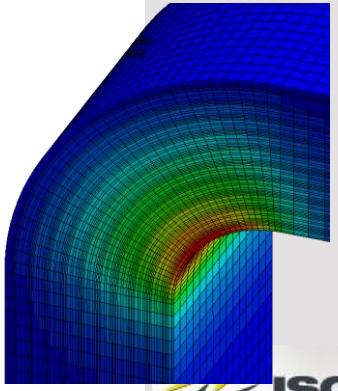
Materialcharakterisierung und Simulation
Inhalt

- Versuchsprogramm
- Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Einzelschichten
  - Harz, Glas und MICA (Glimmer)
  - Validierungen der Eigenschaften
  - Eigenschaftsvisualisierung E-Modul und Alpha
- Mechanische Eigenschaften des Verbundes
- Scherfestigkeit (τ_{ILSS})

Quelle: Wikipedia



- Aufbau Simulationsmodell
- Simulation der Isolierung ohne Kupferstab
- Darstellung der Ergebnisse aus der Simulation
- Variantenbetrachtungen und abgeleitete Produktverbesserungen

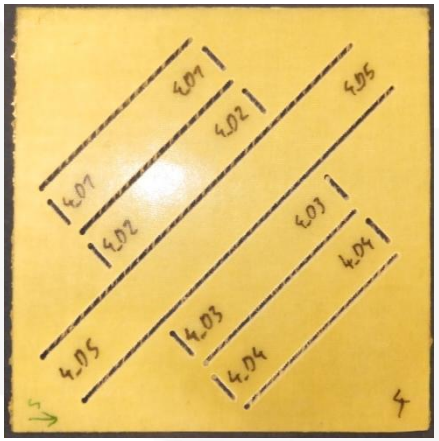


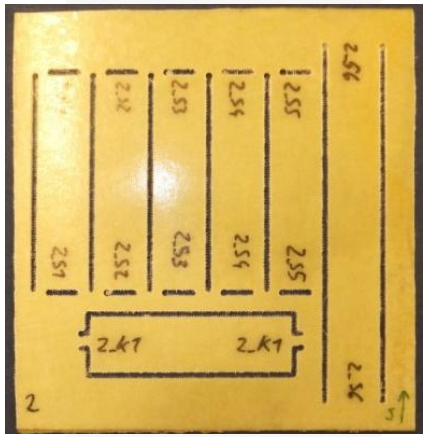
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Versuchsprogramm und Messergebnisse

- 3 bereitgestellte Materialien (120x120 Platten):
  - Glas parallel
  - Calmicaglas parallel und kreuz
  - Calmicafab parallel und kreuz

- Prüfprogramm
  - 3 Punkt Biegung (quasistatisch)
  - Raumtemperatur und Hochtemperatur (155°C)
  - Kurzbiegung (Scherfestigkeit)

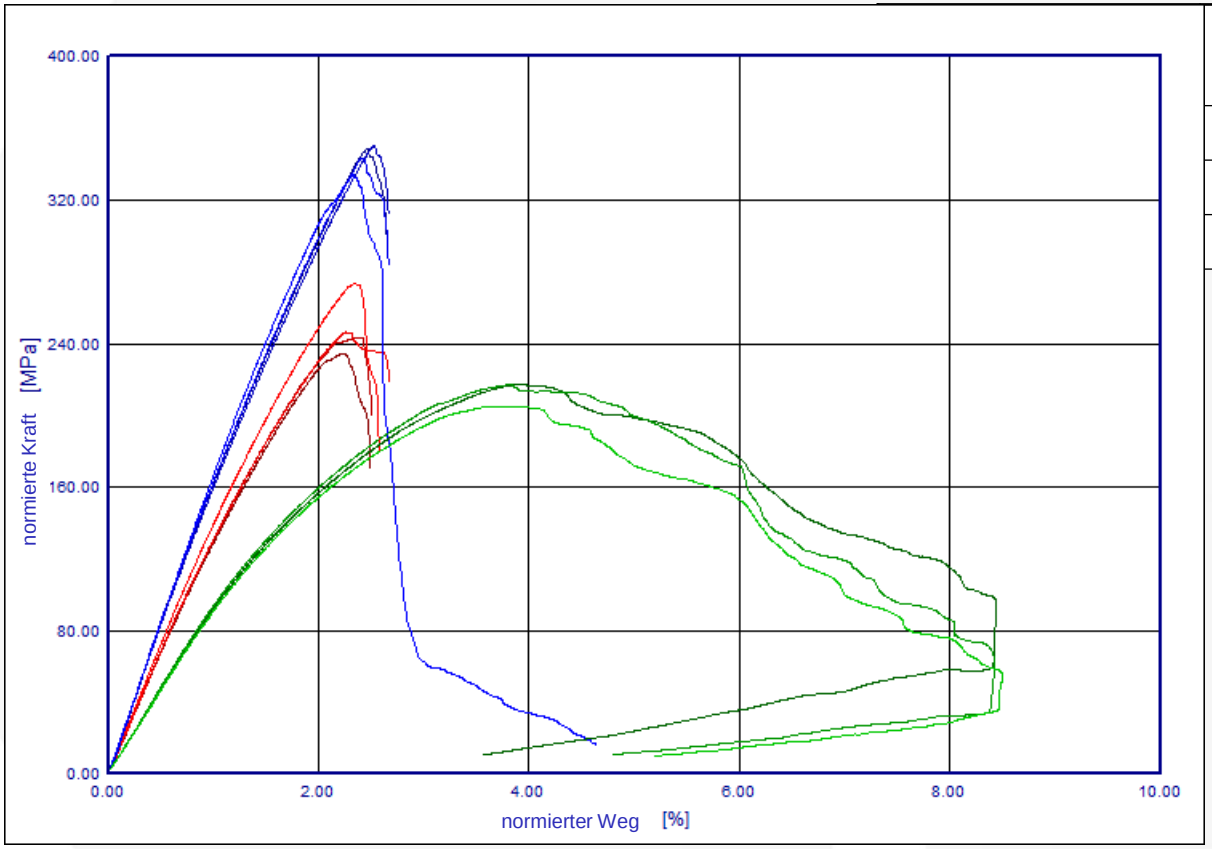




© 4a engineering GmbH, all rights reserved

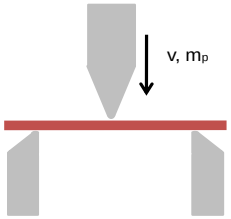
Messergebnis 3-Punkt-Biegung, Glas parallel

Randfaserspannung/-dehnung



v_0 [m/s]	l_w [mm]	$m_{Pendular}$ [g]	b [mm]	t [mm]	l [mm]
0.001	39.95	0	15.14	1.26	60.27
0.001	39.95	0	15.16	1.40	59.75
0.001	39.95	0	15.16	1.51	60.35

RT Schuss
RT Kette
RT Diagonal

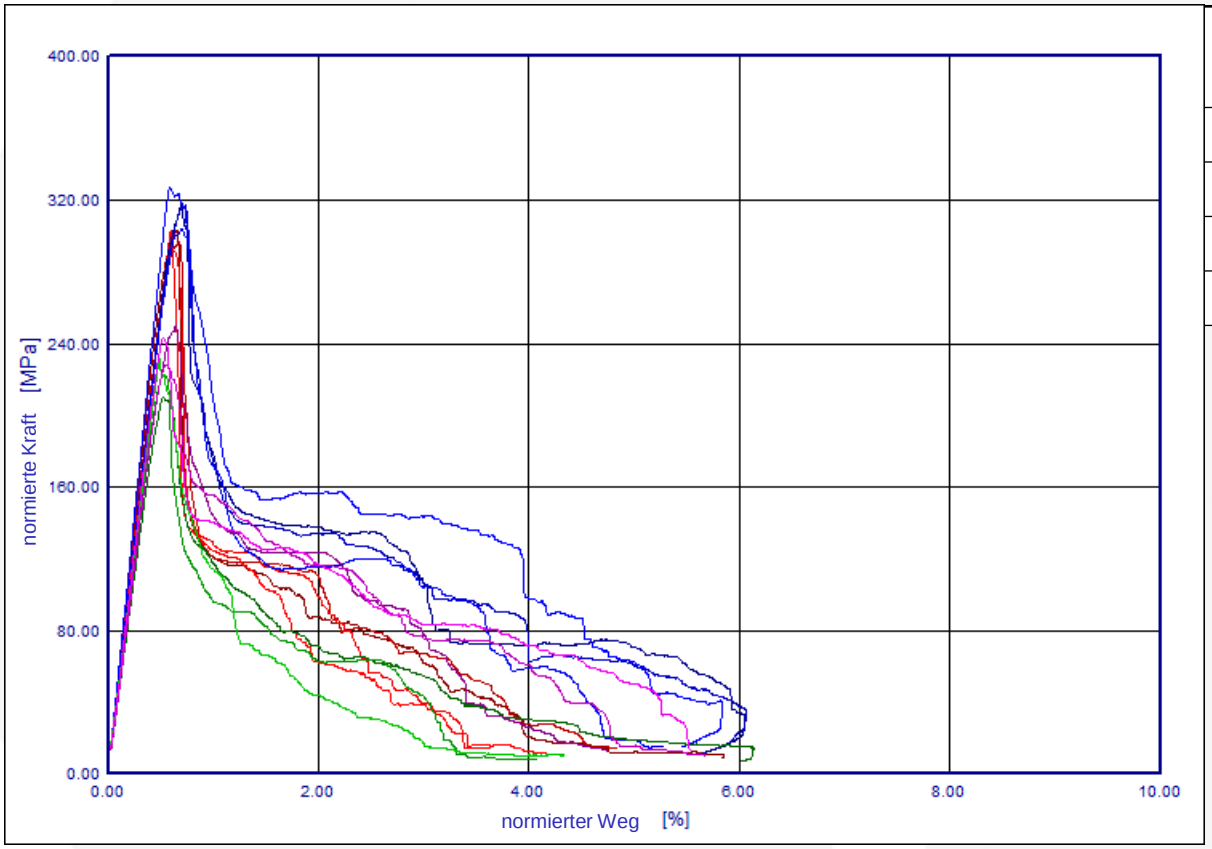


- Der Glasverbund (30 Schichten parallel) zeigt die Richtungsabhängigkeit in Kett- (26 Fäden), Schuss- (15 Fäden) und Diagonalrichtung (Harz)

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

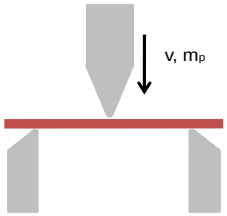
Messergebnis 3-Punkt-Biegung, Calmicaglas parallel

Randfaserspannung/-dehnung



v_0 [m/s]	l_w [mm]	$m_{Pendular}$ [g]	b [mm]	t [mm]	l [mm]
0.001	39.95	0	15.01	1.04	60.20
0.001	39.95	0	14.95	1.07	59.60
0.001	39.95	0	15.01	1.06	60.23
0.001	39.95	0	14.98	1.06	59.49

RT Schuss
RT Kette
HT Schuss
HT Kette

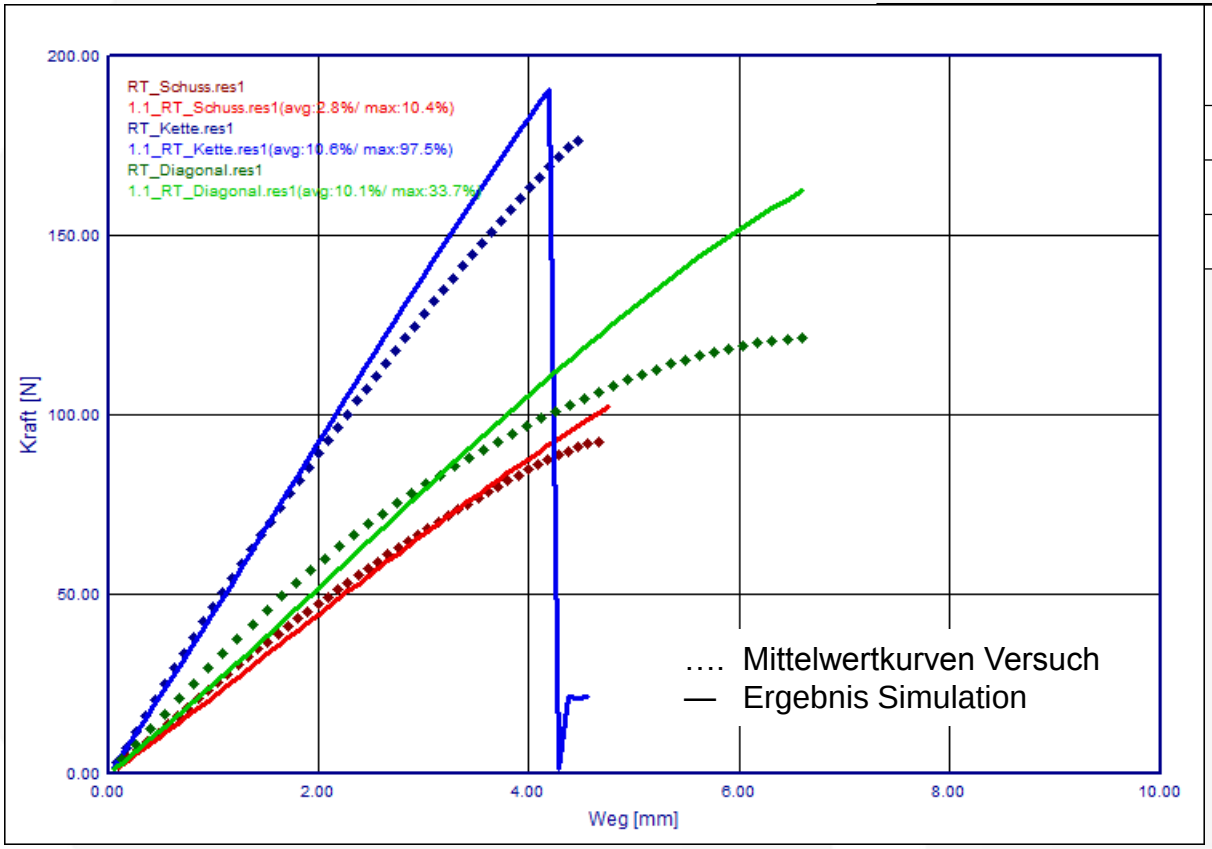


- Richtungsabhängigkeit geht verloren
- Festigkeit des Verbundes bei erhöhter Temperatur geringer

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

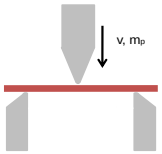
Eigenschaften der Einzelschichten

Harz, Glas



v_0 [m/s]	l_w [mm]	$m_{Pendular}$ [g]	b [mm]	t [mm]	l [mm]
0.001	39.95	0	15.13	1.24	60.29
0.001	39.95	0	15.15	1.43	60.25
0.001	39.95	0	15.16	1.51	60.35

Modell 151007_014
Solver: LS DYNA, Metamodell: 7500_MAT22, Elementgröße: 2mm, Elementtyp:16: Fully integrated shell element (very fast), Anzahl der Integrationspunkte: 60
Annahmen: Querk. 0.35, Reibk. 0.1

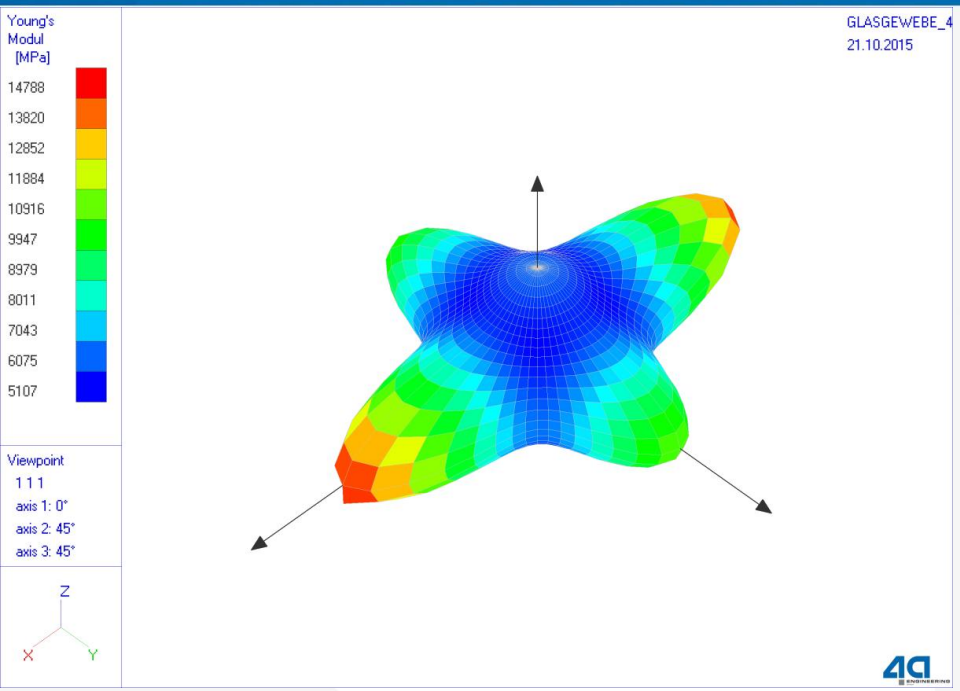


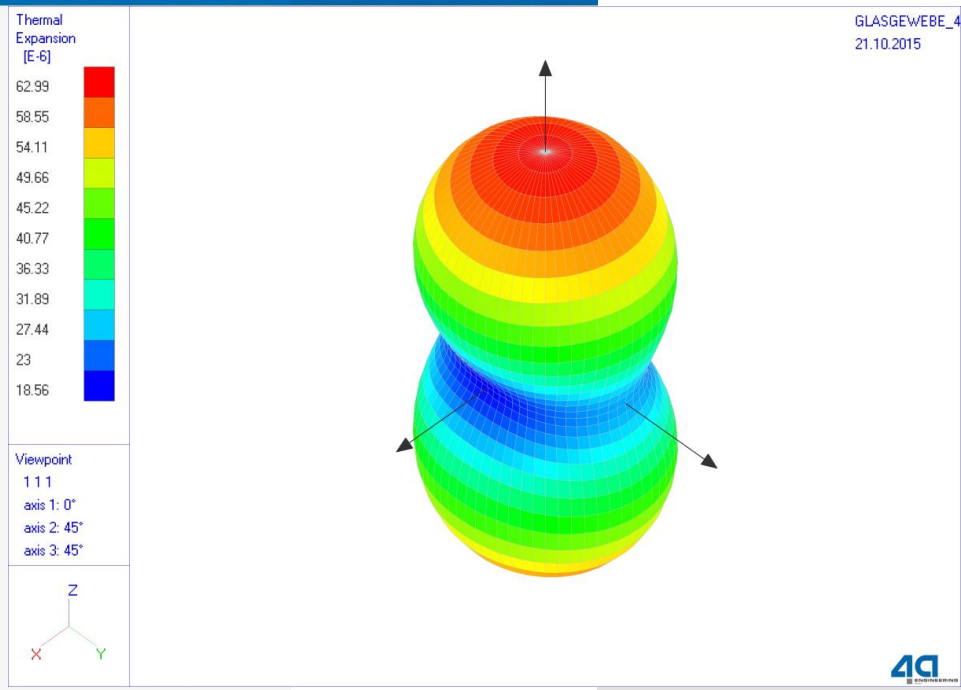
- Aus dem Glasverbund (30 Schichten parallel) wurden Dichten und E-Modul von Harz und Glas auf Basis von Literaturkennwerten gesetzt.
  - Harz: Dichte 1200 g/dm^3, Elastizitätsmodul 3500 MPa, α 55e-6 1/K
  - Glas: Dichte 2500 g/dm^3, Elastizitätsmodul 71000 MPa, Festigkeit 1700 MPa, α 5e-6 1/K

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Eigenschaften der Einzelschichten

Harz, Glas Gewebe



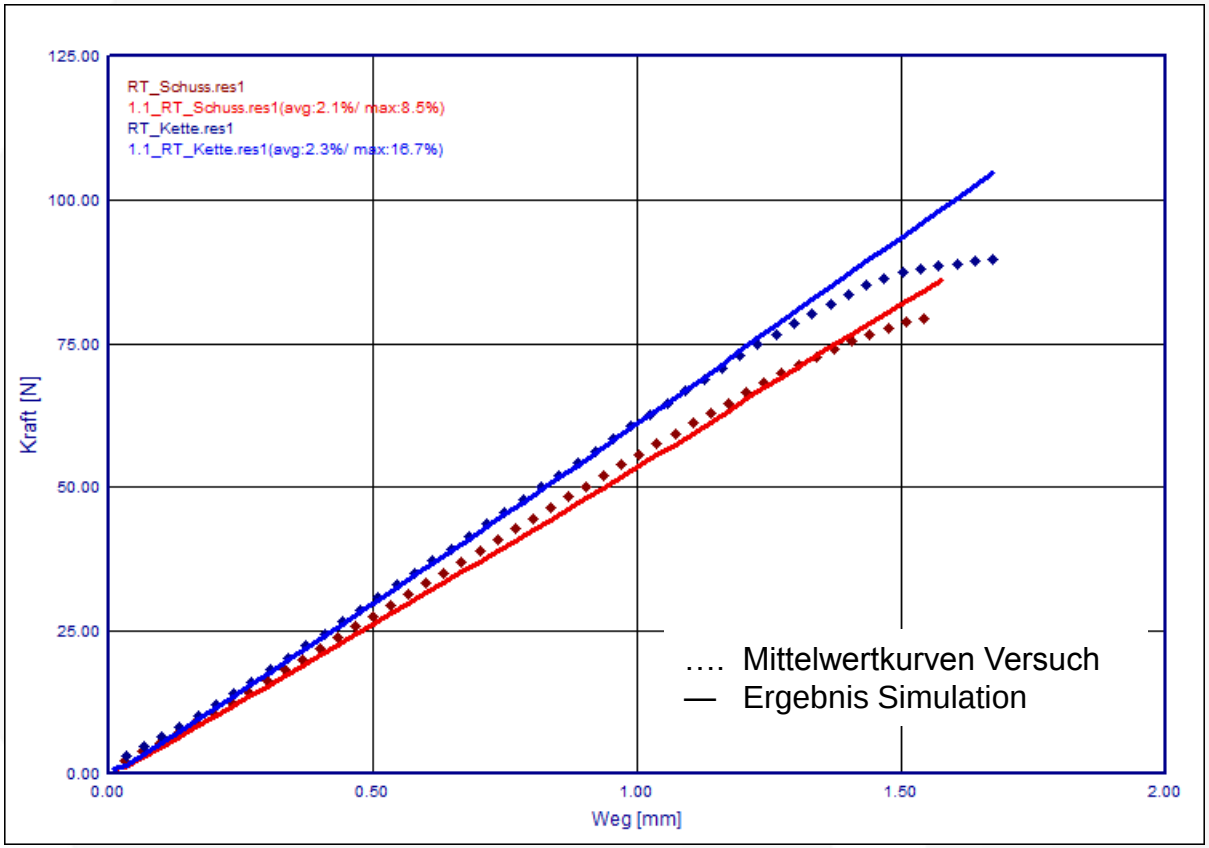


- Mit der micromechanischen Betrachtung in 4a Micromec zeigt sich die Richtungsabhängigkeit des Glasgewebes hinsichtlich Steifigkeit (E-Modul linkes Bild) und thermischen Ausdehnungskoeffizienten (rechtes Bild).

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Eigenschaften der Einzelschichten

CG4202: Harz, Glas und MICA



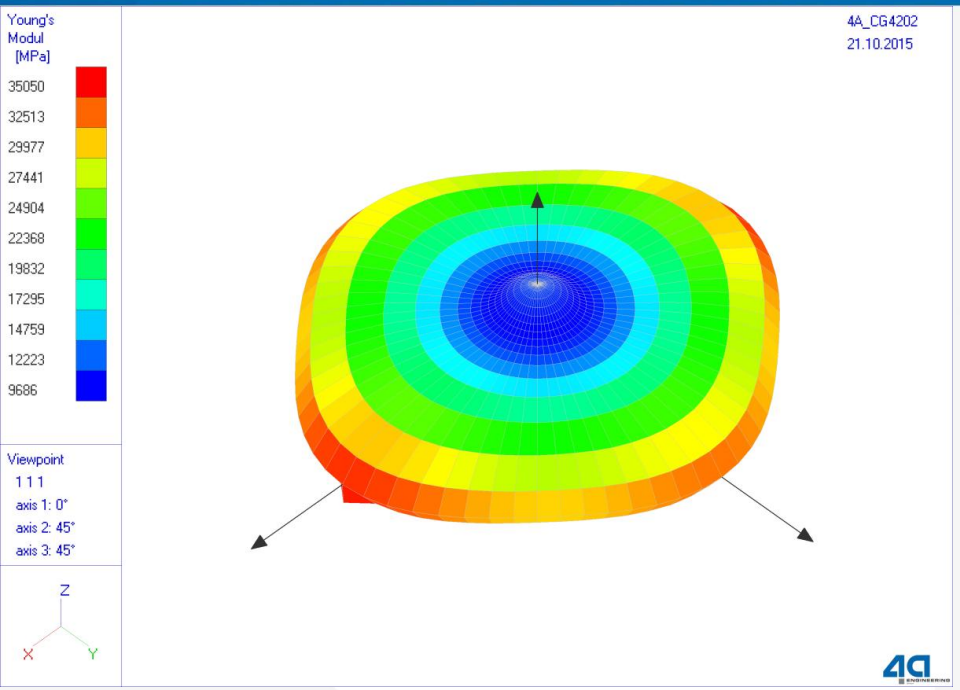
Modell 151007_016
Solver: LS DYNA, Metamodell: P:\isv_qff_HIGHVOLTAGE\G-Material-und-Bauteilpr_fung\a-Materialpr_fung\P1-Pr_fungxx-vom-yymmdd\usermat\15100701_qff_mr_CG420240Layer.inp, Elementgröße: 2mm,
Elementtyp:16: Fully integrated shell element (very fast), Anzahl der Integrationspunkte: 40
Annahmen: Querk. 0.35, Reibk. 0.1
MICA 125 GPa

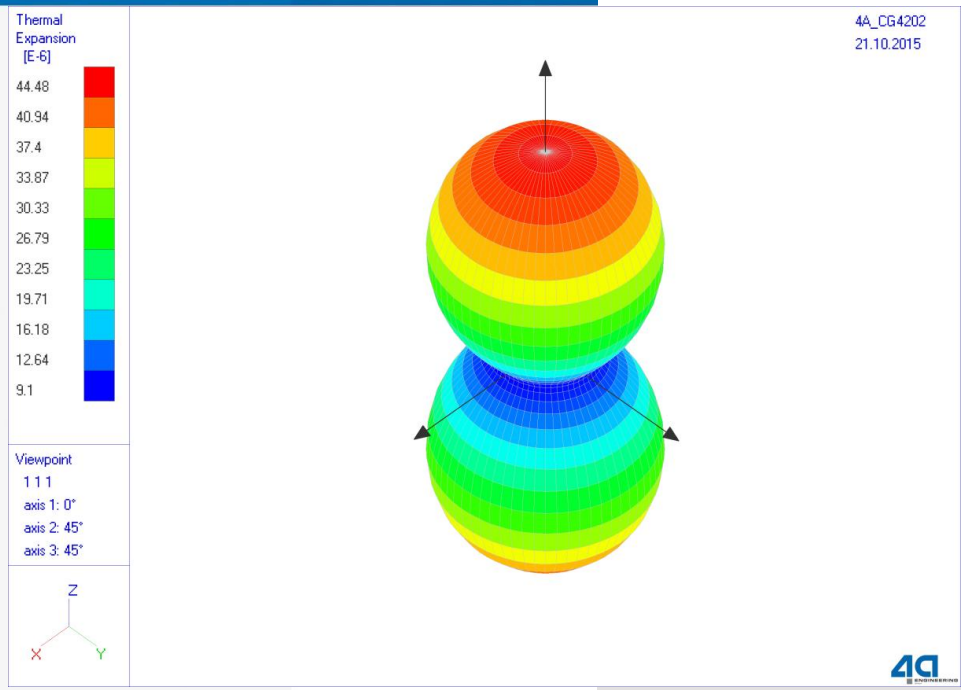
- Am Verbund CG4202 wurde die MICA-Schicht auf Basis von Literaturkennwerten gesetzt:
  - MICA: Dichte 2500 g/dm³, Elastizitätsmodul 125000 MPa, α 6e-6 1/K
  - Reines MICA Elastizitätsmodul ~170 GPA
  - Reines MICA Druckfestigkeit 190-280 MPa, Scherfestigkeit 215-265 MPa

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Eigenschaften der Einzelschichten

Calmicaglas: Harz, Glas und MICA



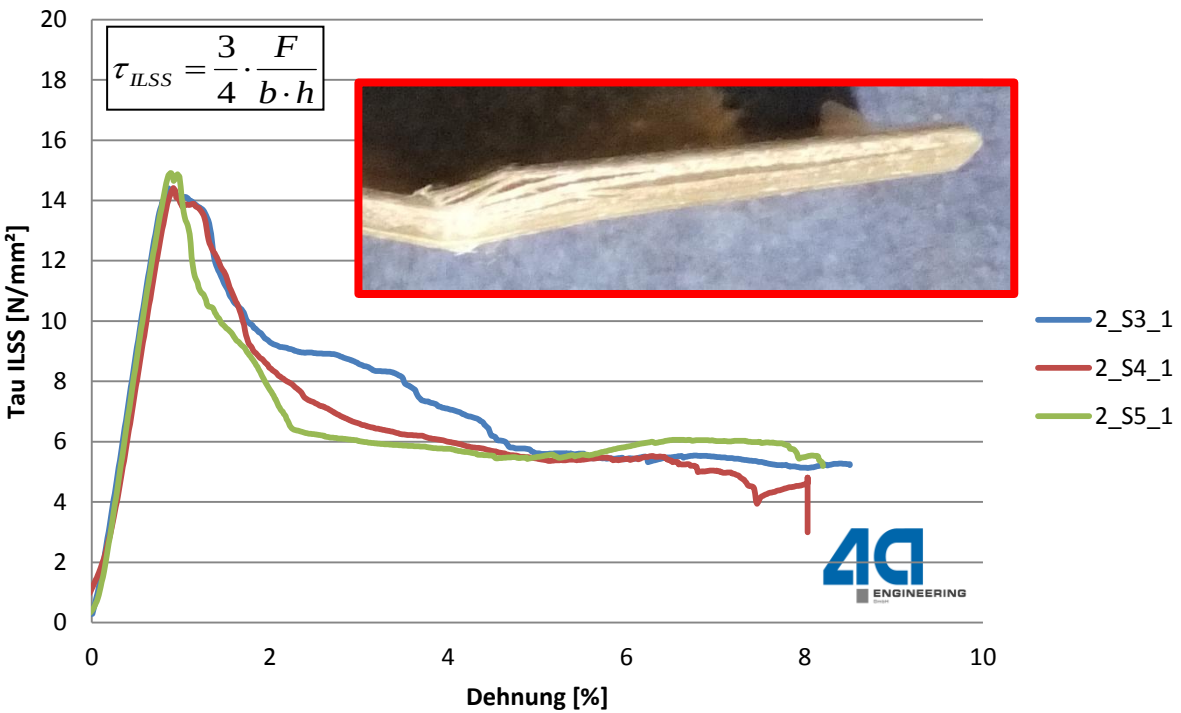


- Durch die nun enthaltene sehr dominante Micaschicht im Verbund Calmicaglas zeigt sich in der Ebene kaum eine Richtungsabhängigkeit hinsichtlich Steifigkeit (E-Modul linkes Bild) und thermischen Ausdehnungskoeffizienten (rechtes Bild).

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

3-Punkt-Kurzbiegung, Calmicaglas parallel

τ_{ILSS} / Dehnung bei RT



v_0 [m/s]	l_w [mm]	$m_{Pendular}$ [g]	b [mm]	t [mm]	l [mm]
0.00002	**10.08**	**0**	**15.08**	**0.96**	**29.28**

Material	Mittelwert max. τ_{ILSS}
4202 parallel	**14,58**
2_S3_1	14,40
2_S4_1	14,41
2_S5_1	14,91

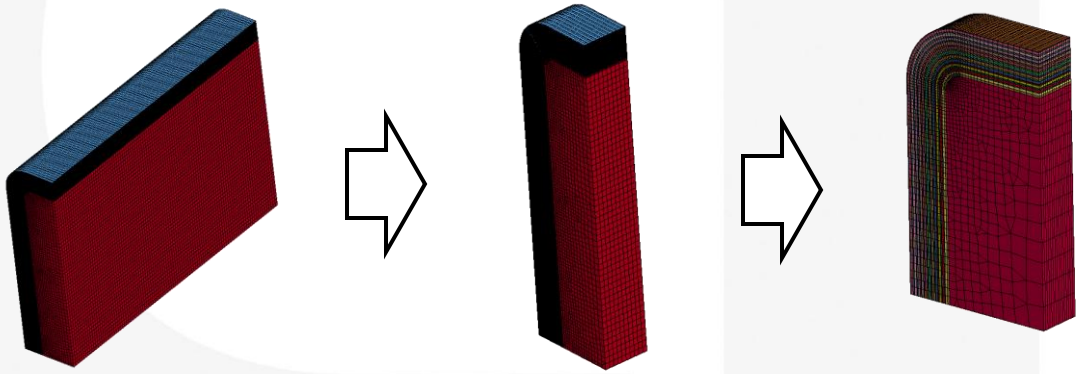
- Deutlich zu erkennen ist das interlaminare Scherversagen in den Kurzbiegeproben (Bild) bei Raumtemperatur.

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Simulation – Lagenaufbau

Validierung 4rtel-Modell

- Darf man den Roebelstab auf ein flaches 4rtel Modell reduzieren ohne Effekte zu verlieren?
- Um diese Frage zu beantworten werden vorab einige Modelle aufgebaut, schrittweise vereinfacht und die Ergebnisse verglichen:



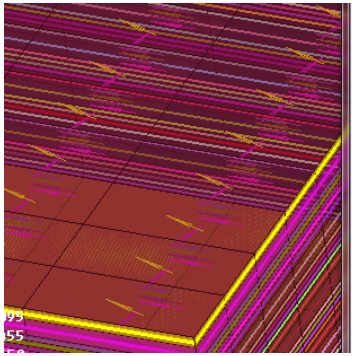
- Reduzierung der Elementanzahl von ~1.2Mio auf ca. 200.000 ohne Verlust an Informationen (vergleichbare Ergebnisse)
- Rechenzeit ca. 1h

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

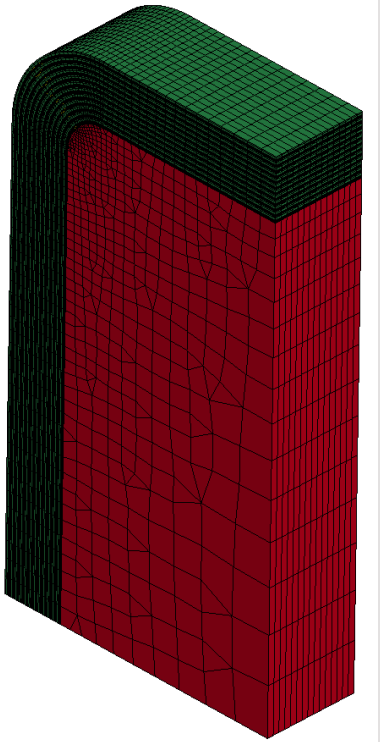
Simulation – Lagenaufbau

Allgemein

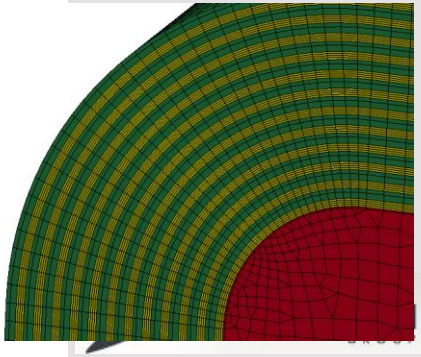
- Kupfer-Kern (8200 Elemente)
- Isolierung die aus MICA + GFK (SOLID-LAMINATE; 100.000 – 200.000 Elemente je nach #Lagen)
- Lagen mittels **LAMINATE-Tool** im ANSA flexibel aufgebaut werden.



A/A		Color	Type	GPLYID	MID	Material name
1			Sequence			
	1		Layer	3	3	MR_GLAS4203_DIR_MAT
	2		Layer	4	3	MR_GLAS4203_DIR_MAT
	3		Layer	5	4	MR_GLIMMER_MAT23 M
	4		Layer	6	4	MR_GLIMMER_MAT23 M
	5		Layer	7	4	MR_GLIMMER_MAT23 M
	6		Layer	8	4	MR_GLIMMER_MAT23 M
2			Sequence			
	1		Layer	9	3	MR_GLAS4203_DIR_MAT
	2		Layer	10	3	MR_GLAS4203_DIR_MAT
	3		Layer	11	4	MR_GLIMMER_MAT23 M
	4		Layer	12	4	MR_GLIMMER_MAT23 M
	5		Layer	13	4	MR_GLIMMER_MAT23 M
	6		Layer	14	4	MR_GLIMMER_MAT23 M
3			Sequence			



- Randbedingungen: Symmetriebedingungen (Ausdehnung in der Schnittebene erlaubt)
- Hohe **Flexibilität** durch automatisch generiertes Netz

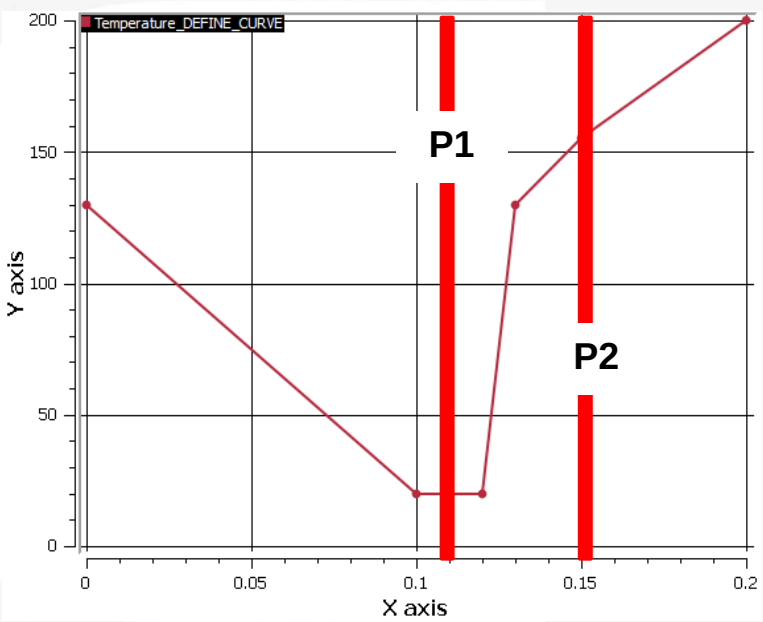


© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Simulation – Lagenaufbau

Thermischer Lastfall

- Lastfall: Aushärten des Stabes bei **130°C** – Abkühlung auf **RT** – Betrieb bei **155°C**



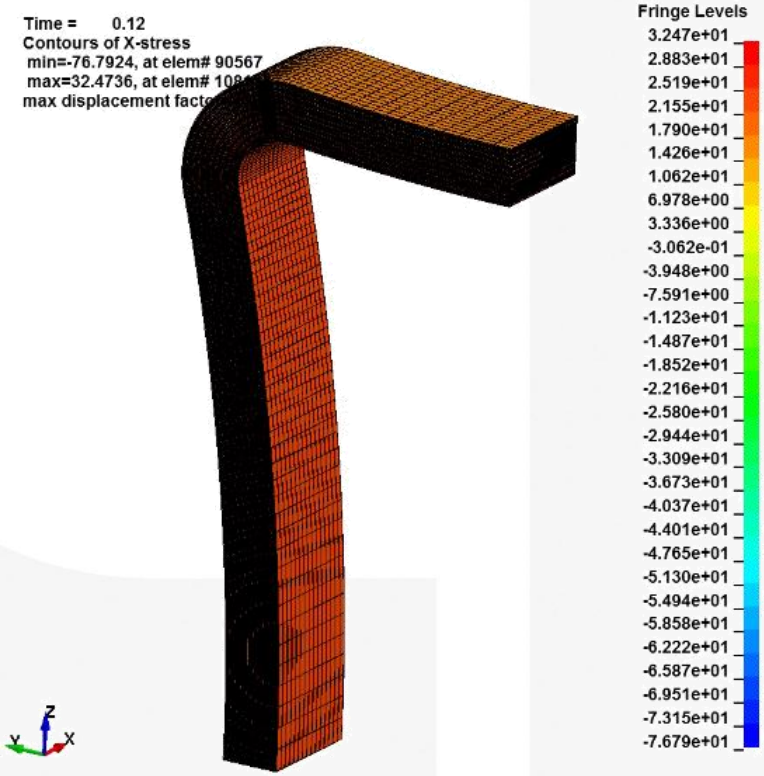
- Die Spannungen werden an den beiden kritischen Punkten P1 und P2 ausgewertet. P1 stellt die Raumtemperatur (20°C) dar und P2 die Betriebstemperatur von 155°C.

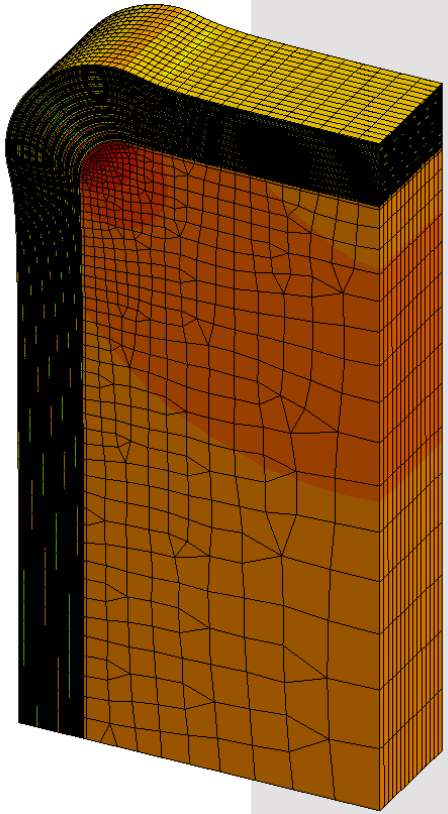
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Simulationsergebnisse

Isolierung ohne Kupferstab

- Um ein besseres Verständnis zu bekommen warum gewisse Spannungen entstehen, wurde eine Simulation der Isolierung ohne Kupferkern durchgeführt:



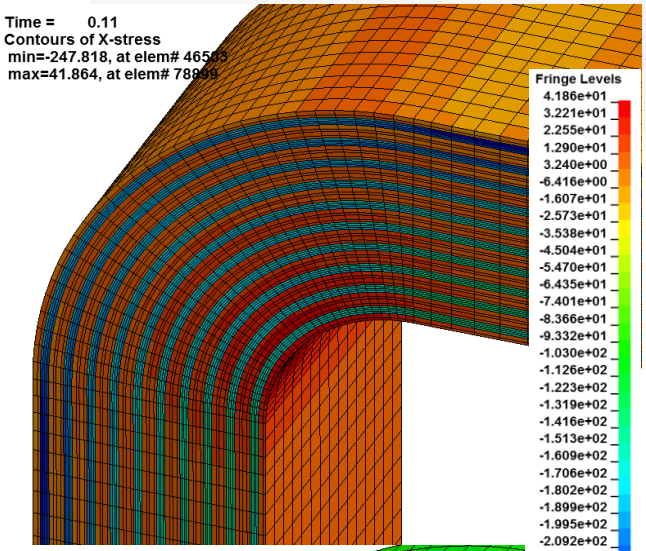


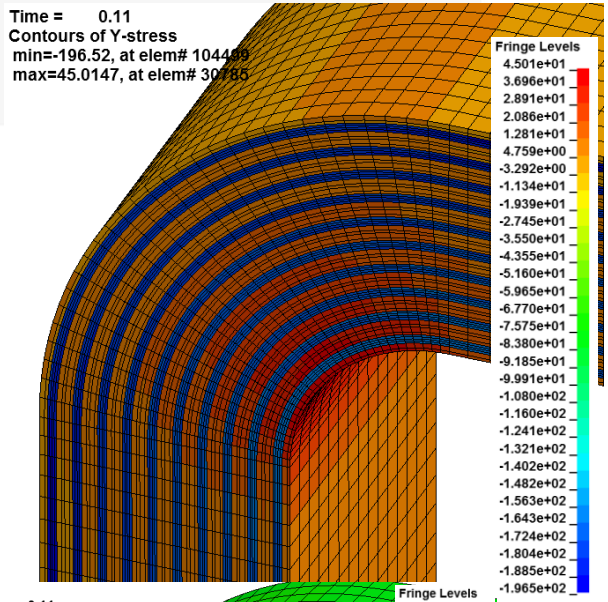
- Skalierung der Verformung: Faktor 50
- Bild rechts zeigt die Verformung mit Kupfer als Vergleich

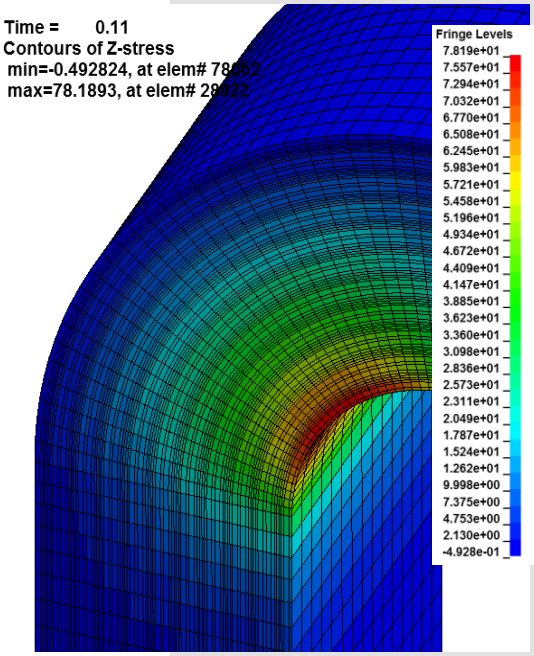
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

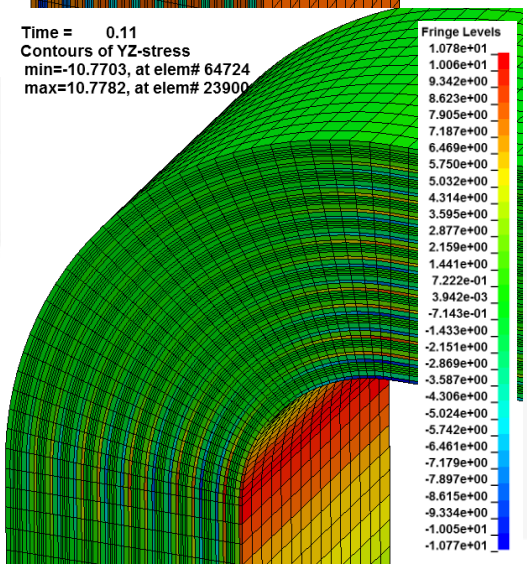
Simulationsergebnisse

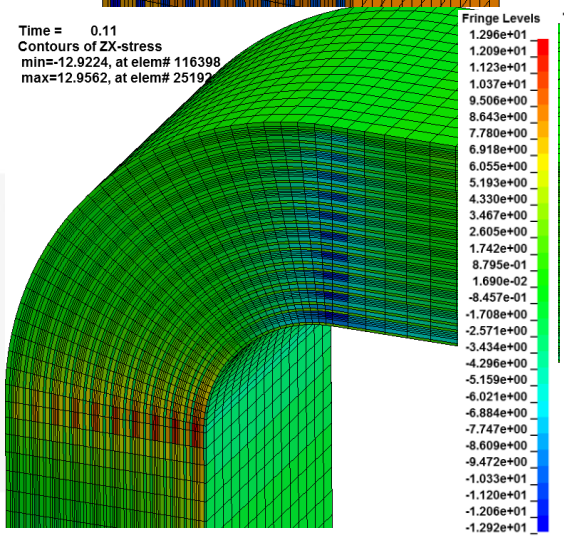
Calmicaglas P1











© 4a engineering GmbH, all rights reserved

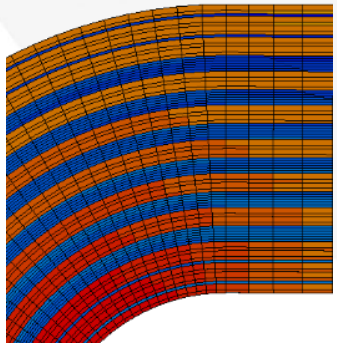
Simulationsergebnisse

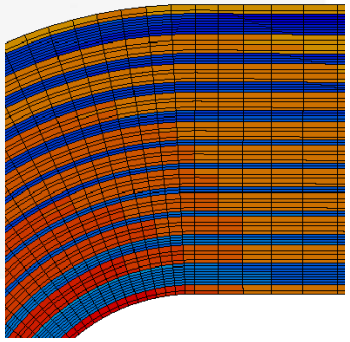
Übersicht - Varianten

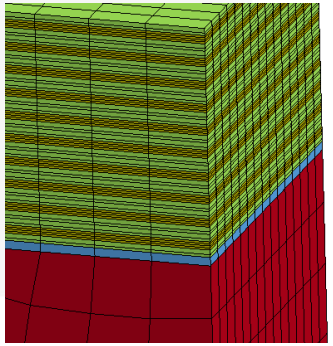
- Eine Reihe an Varianten wurden gerechnet um unterschiedlichste Auswirkungen auf das Spannungsniveau zu zeigen
- Dabei wurde die Anzahl der Schichten, Schichtdicken oder Zwischenschichten variiert

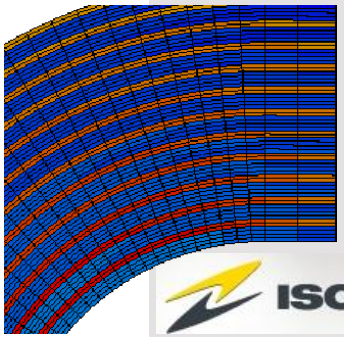
	RT 20°C					HT 155°C				
	sigma x		sigma z		tau zx	sigma x		sigma z		tau zx
	max	min	max	min	abs	max	min	max	min	abs
SIM15_	42	-248	78	-0.5	13	49	-5	0	-17	3.2
SIM16_	42	-247	78	-0.5	13	49	-5	0	-17	3.2
SIM17_	42	-249	78	-0.5	13	49	-5	0	-17	3.3
SIM40_	40	-233	89	-0.4	16	46	-5	0	-19	3.6
SIM43_	40	-233	89	-0.4	16	47	-5	0	-19	3.6
SIM44_	39	-232	88	-0.4	16	47	-5	0	-19	3.5
SIM15_	42	-248	78	-0.5	13	49	-5	0	-17	3.2
SIM18_	40	-257	75	-0.5	14.6	51	-5	0	-16	3.7
SIM20_	42	-251	79	-0.5	15	51	-6	0	-17	3.8
SIM23_	59	-254	112	-1	19	48	-9	0	-22	4.3
SIM24_	27	-244	49	-0.4	7.6	51	-2	0	-11	2.2
SIM40_	40	-233	89	-0.4	16	46	-5	0	-19	3.6
SIM46_	55	-199	118	-0.3	24	42	-8	0	-25	5
SIM49_	41	-205	89	-0.3	18	44	-5	0	-20	3.8
SIM15_	42	-248	78	-0.5	13	49	-5	0	-17	3.2
SIM19_	37	-230	58	-0.6	14	45	-4	0	-13	3.4
SIM22_	31	-80	5	-0.3	2	12	-12	0	-1	0.5
SIM40_	40	-233	89	-0.4	16	46	-5	0	-19	3.6
SIM45_	33	-215	63	-0.5	16	43	-4	0	-14	3.8
SIM48_	38	-63	5	-0.3	2.1	11	-12	0	-1	0.5

…Spannungen in MPa









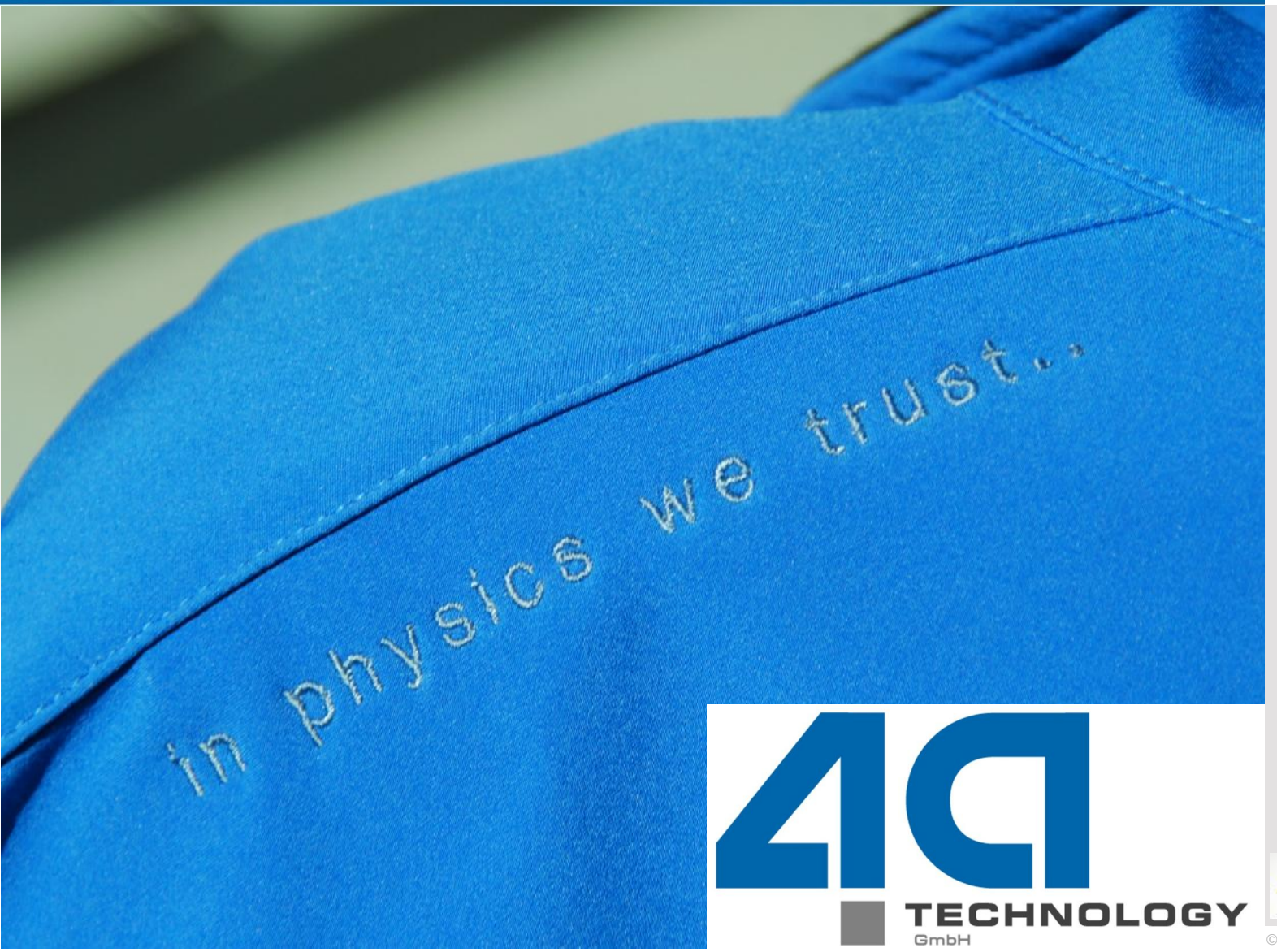
© 4a engineering GmbH, all rights reserved

Lagenaufbau
Zusammenfassung

- Durch die Materialcharakterisierung wurden die thermomechanischen Eigenschaften der einzelnen Materialien erarbeitet
- Die wesentliche Erkenntnis daraus war die hohe Steifigkeit des Verbundes aufgrund der Micaschichten und der damit verbundene Relevanz-Verlust des Glasgewebes
- Orientierung vom GLAS aufgrund der geringen Steifigkeit im Vergleich zur MICA Schicht vernachlässigbar
- Die Simulation zeigt das Spannungsniveau und die Verformungen aufgrund der thermomechanischen Eigenschaften und schafft so mehr Verständnis dafür was im Betrieb geschieht
- Durch die Betrachtung von Varianten werden Ideen zur Verbesserung des Produktes generiert

© 4a engineering GmbH, all rights reserved

4a ENGINEERING GmbH



4a TECHNOLOGY GmbH

isovolta GROUP

© 4a engineering GmbH, all rights reserved