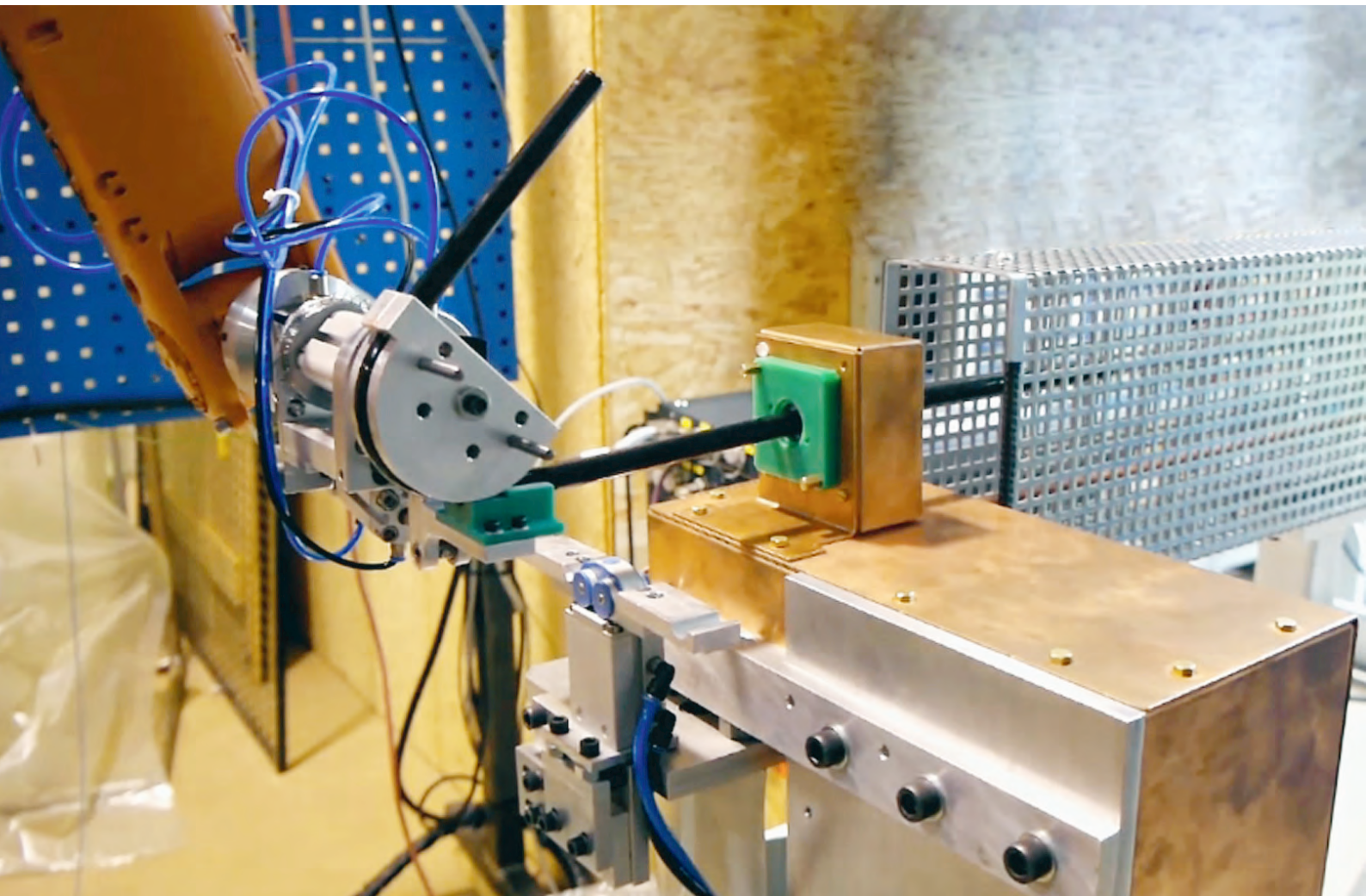


# Dielektrisch gegen Infrarot

## Erwärmungskonkurrenz beim Thermoformen



Neuentwickelter Kunststoff-Rohrbiegeautomat mit Dielektrischer Erwärmungseinheit.

**Spezifischer Energieverbrauch auf der einen Seite, präzise Steuerungsmöglichkeit der Temperatur, Gleichmäßigkeit der Erwärmung und weitere Parameter definieren maßgeblich die Effizienz thermischer Umformprozesse und die Qualität der Endprodukte. Verschiedene Verfahren werden in der Praxis eingesetzt, am mit Abstand häufigsten sind Infrarotsysteme im Einsatz. Vergleichsweise neu ist die dielektrische Erwärmung, die einige Anwendungsvorteile verspricht.**

**T**hermoplastische Kunststoffe werden bisher – einschließlich der vergleichsweise neuen dielektrischen Technologie – vornehmlich mit vier Verfahren auf ihre Erweichungs- und Verformungstemperatur gebracht:

- Heißluftofen
- Thermo-Ölbad

- Infrarot-Strahler (IR)
- Dielektrische Erwärmung mit zwei Hochfrequenzelektroden

Die beiden erstgenannten Verfahren sind sehr energieaufwändig, da mit dem Werkstück oft auch „metallene Backformen“ und ein noch größeres Volumen der Wärmeübertragungsmedien Luft oder

Öl erhitzt werden müssen. Zudem sind sie nur eingeschränkt automatisierbar. Das Thermo-Ölbad verursacht darüber hinaus häufig Probleme mit anhaftenden Öl-Rückständen.

Die verschiedenen IR-Technologien sind sauber und zumeist mit engen Toleranzen regelbar. Erwärmung und Verformung

sind in einigen Anwendungen jedoch nicht im selben Werkzeug möglich, das erwärmte Werkstück muss im sensiblen, weichen Zustand vom IR-Strahler zur Umformstation gebracht werden.

Die relativ geringe Eindringtiefe der kurzwelligen IR-Strahlung, vor allem bei gerußten (schwarzen) Kunststoffen, beschränkt die Anwendung auf dünnwandige Materialien, da sie die gesamte Strahlungsenergie unmittelbar an der Oberfläche absorbieren. Eine Tiefenerwärmung findet hier nur durch Wärmeleitung statt.

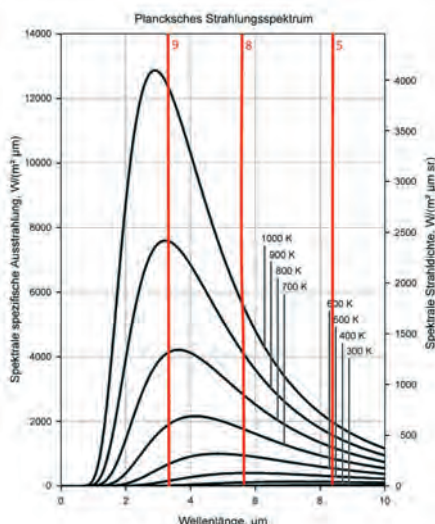
Gegenteilige Effekte weisen reine, opaken oder transparente Kunststoffe auf: Sie absorbieren nur wenige, singuläre Frequenzen aus dem breiten IR-Strahlungsspektrum der üblichen Quellen. Der Großteil des Spektrums bleibt ungenutzt und somit der Wirkungsgrad dieses Verfahrens bescheiden.

### Infrarot – Klassiker bei geringen Wanddicken

Das Thermoformen von Kunststoffen ist besonders in der Verpackungstechnik ein zentraler Prozess. Dafür werden je nach Material und Verfahren Temperaturen des Ausgangsmaterials von etwa 100 bis knapp unter 300 °C benötigt. Wichtig ist hier eine möglichst homogene Temperaturverteilung in dem zwecks anschließender Verformung auf Erweichungstemperatur zu erwärmenden Kunststoff. Zur Energieübertragung nutzen moderne Thermoformungsanlagen meist Infrarotstrahlung im Wellenlängenbereich länger 0,8 µm, also oberhalb des sichtbaren Lichtspektrums zwischen 0,38 und 0,78 µm<sup>1)</sup>.

Infrarotstrahlung ist dabei einfach zu erzeugen und schnell zu regeln. Meist kommen Halogenstrahler oder Keramikheizelemente zum Einsatz. Der Wirkungsgrad dieser Art der Energieübertragung ist jedoch vergleichsweise gering, da der Werkstoff nur einzelne, diskrete Frequenzen absorbieren kann.

Trifft Infrarotstrahlung auf einen Körper, werden dessen Atomverbindungen zum Schwingen angeregt. Je nach Masse der beteiligten Atome sowie Länge und Winkel der Atomverbindung weist jede Verbindung spezifische Resonanzfrequenzen auf, bei denen die Energie der Infrarotstrahlung effizient absorbiert wird. Andere Frequenzen finden nur eine geringe Grundabsorption und können somit kaum zur Erwärmung beitragen.



Temperaturabhängige Strahlungsspektren eines typischen Dunkelstrahlers mit Molekülresonanzfrequenzen von PMMA<sup>3</sup> bei verschiedenen Temperaturen in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die roten vertikalen Linien (9, 8 und 5) markieren drei der Molekül-Resonanzfrequenzen von PMMA (weitere Resonanzfrequenzen siehe Bild 2).

### IR-Erwärmung – energetische Betrachtung

Die Kenngröße „Absorbance“ (auf y-Achse) beschreibt das logarithmische Verhältnis der zugeführten zur transmittierten (das Werkstück durchdringende) Strahlungsleistung. Damit lässt sich der Wirkungsgrad der Infrarotstrahlung für einzelne Frequenzen einfach berechnen.

Bei einer Wellenlänge von 5,7 µm (Peak 8) gilt zum Beispiel:  
 $Absorbance = \log_{10}(P_{\text{auftreff}} / P_{\text{transmittiert}}) \approx 1,4$   
 $P_{\text{auftreff}} / P_{\text{transmittiert}} \approx 25$

Unter Vernachlässigung der am Werkstück reflektierten Leistung  $P_{\text{reflektiert}}$  sowie der Streuverluste  $P_{\text{streu}}$  kann auf Grund der Energieerhaltung folgender Zusammenhang definiert werden.

$$P_{\text{auftreff}} = P_{\text{absorbiert}} + P_{\text{transmittiert}}$$

Werden beide Gleichungen kombiniert, lässt sich der Wirkungsgrad der Absorption bei Peak 8 berechnen zu:

$$P_{\text{auftreff}} = P_{\text{absorbiert}} + P_{\text{auftreff}} / 25$$

$$P_{\text{absorbiert}} = P_{\text{auftreff}} * 24/25$$

was dem sehr hohen Absorptionsanteil von 96 % entspricht. Offensichtlich ist die Wellenlängen 5,7 µm (Peak 8) besonders geeignet. Zwischen den Peaks findet die

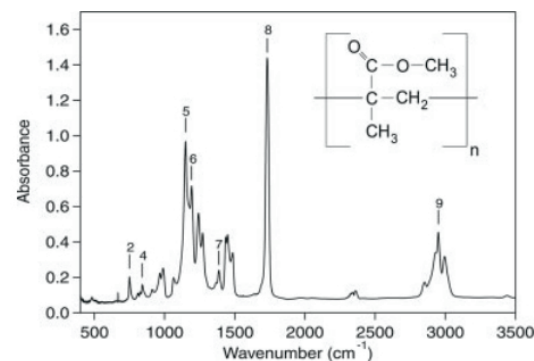
Absorption aber weit weniger effizient statt. Bei 5,0 µm Wellenlänge berechnet sie sich zu:

$$Absorbance = \log_{10}(P_{\text{auftreff}} / P_{\text{transmittiert}}) \approx 0,1$$

$$P_{\text{auftreff}} / P_{\text{transmittiert}} \approx 1,25$$

$$P_{\text{absorbiert}} = P_{\text{auftreff}} * 0,25/1,25$$

Demnach würden bei dieser Wellenlänge nur 20 % der am Werkstück auftreffenden Strahlung absorbiert.



Absorptionsspektrum und Molekülaufbau von PMMA<sup>3</sup>. Die mit Nummern gekennzeichneten Peaks lassen sich dabei mathematisch je zu einer bestimmten Atomverbindung zuordnen, Absorptions-Peak 8 bei einer Wellenlänge von etwa 5,7 µm ist auf die [C=O]-Verbindung zurückzuführen<sup>2)</sup>.

Diese großen Differenzen im Absorptionsverhalten bei unterschiedlichen IR-Frequenzen sind für den über das gesamte IR-Spektrum recht geringen Wirkungsgrad von Infrarotstrahlern verantwortlich. Herkömmliche Strahler emittieren die Strahlungsleistung immer über einen weiten Frequenzbereich und nicht bei singulären Frequenzen. Im unmittelbaren Bereich der roten Markierungen in Bild 1 ist demnach eine besonders effiziente Energieabsorption im PMMA-Werkstück gegeben. Zwischen diesen gekennzeichneten Wellenlängen und besonders im energiereichen Bereich zwischen den Linien 8 und 9 ist die Energieabsorption im Kunststoff mit rund 20 % jedoch gering. Bei diesen Wellenlängen durchdringt ein hoher Anteil der am Infrarotstrahler emittierten Energie das Werkstück, ohne es zu erwärmen.

Hinzu kommen die in der vorangehenden Berechnung vernachlässigten Streu- und Reflexionsverluste, die den Wirkungsgrad, wenn auch in geringerem Maße, weiter reduzieren.

Neben der geringen Absorption von Infrarotstrahlung im Kunststoff ist auch die schlechte Wärmedurchdringung der

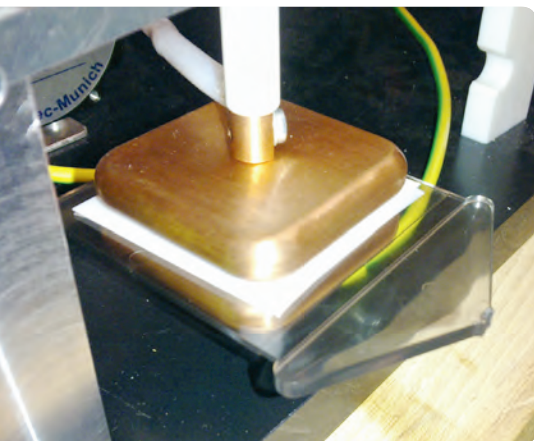


Schematischer Aufbau des Hochfrequenz-Heizsystems, das Umformwerkzeug ist nicht dargestellt.

Werkstücke ein Problem. Nach dem Bouguer-Lambert-Beerschen Gesetz nimmt die Intensität einer Strahlung bei Durchqueren eines Medium exponentiell mit der durchstrahlten Schichtdicke ab<sup>4)</sup>. Aufgrund dieser Gesetzmäßigkeit findet die Energieabsorption aus der IR-Erwärmung nur in der äußeren Kunststoffschicht statt. Es besteht damit prinzipiell die Gefahr, dass der Kunststoff an seiner Oberfläche durch zu hohe Temperaturen bereits zersetzt wird, während sein Inneres die Erweichungstemperatur noch nicht erreicht hat.

## Alternative Hochfrequenz

Mit EU-Patent EP2399717 hat das Labor für Angewandte Mechatronik und Systemkonstruktion (LAMS) der Hochschule Furtwangen zusammen mit ihrem Transferpartner, der Rosenberger AG, und gefördert über ein ZIM-Projekt ein hochfrequenzbasiertes Verfahren zum schnellen und lokal präzisen Erwärmen von Thermoplasten entwickelt und in einem Biegeautomaten zur Serienreife gebracht. Dieses dielektrische Erwärmungsverfahren ist etwa mit der Erwärmung im Mikrowellenherd vergleichbar und für nahezu beliebig dicke Werkstücke in Rohr- oder Plattenform anwendbar. Zur dielektrischen Erwärmung wird das Werkstück zwischen zwei PTFE- oder Keramikbeschichteten Hochfrequenzelektroden



Amorpher PET-Prüfling zwischen den Kupferelektroden im Laborversuch.

platziert und über das elektrische Wechselfeld innerhalb weniger Sekunden von innen heraus erwärmt. Nach Erreichen der Verformungstemperatur wird es im erweichten Zustand über den Werkstückvorschub direkt in das Verformungswerkzeug geschoben, verformt und danach zwangsweise oder ohne Hilfsmittel unter seine Glasübergangstemperatur gekühlt. Nach somit eingetretener Erstarrung kann es das Handlingsystem (Roboter) entnehmen.

## Optimale Verformungs- und Handling-Temperatur

Beim konkurrierenden Erwärmungsverfahren Infrarot muss das Werkstück – nachdem es mit seiner Erweichungstemperatur aus der Erwärmungseinheit entnommen wird – in diesem form-instabilen und empfindlichen Zustand zum Verformungswerkzeug transportiert werden. Dabei verliert es schnell an Temperatur. Bei der dielektrischen Erwärmung heizt das Werkstück, da die Wärme von innen heraus noch nach außen geleitet wird, während des Vorschubs zum Verformungswerkzeug nach. Dementsprechend lässt sich bezüglich des Einhaltens der genauen Erweichungstemperatur während der Verformung eine Punktlandung anvisieren. Dies garantiert eine besonders spannungsarme Verformung und damit beispielsweise ein reduziertes „Aufgehen“ im Wärmetest.

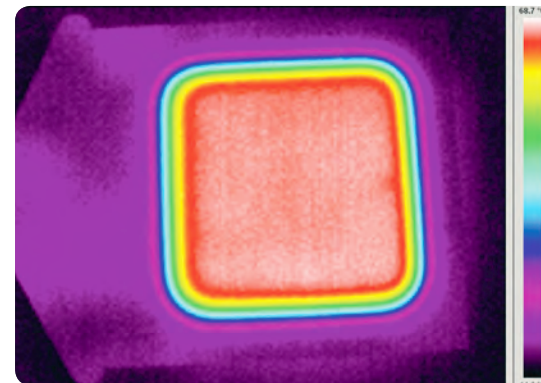
## Feldtest und Markteinführung

Die Hochfrequenz-basierte, dielektrische Erwärmung ist seit Herbst 2014 in einem per Roboter automatisierten Rohrbiegeautomaten beim Unternehmen Rosenberger im Feldversuch. Da die dielektrische Kunststoff-erwärmung – einer Recherche des LAMS nach – wissenschaftliches Neuland ist, wurde parallel zum Produktionsautomaten in einem weiteren ZIM-Projekt ein Analyseautomaten und eine HF-Spektroskopie-Messapparatur entwickelt und gebaut.

Thermoformer, die an der industriellen Verarbeitung eines Ihrer Kunststoffe in dem EU-patentierten Verfahren interessiert sind, können somit Werkstücke zu einer quali-

fizierten Eignungsprüfung für das Dielektrische Erwärmungsverfahren ins LAMS bringen und erhalten dann neben einer Qualitätsbeurteilung des Umformvorgangs die Parametervorgaben für den Produktionsautomaten. Allerdings eignet sich nicht jeder Kunststoff für die Dielektrische Erwärmung.

- Die besten Ergebnisse wurden erreicht mit PVC, PET, PMMA (Plexiglas), PA11, PA12 und POM.
- Schwieriger, aber prozesstechnisch beherrschbar sind beispielsweise PA6, PA6.10 und PA6.12.
- Dielektrisch nicht erwärmbar sind alle „HF-Materialien“ wie PTFE (Teflon).



Temperaturverteilung im Flachmaterial bei 67°C ±0,5 K am PET-Prüfling über 45 × 45 mm nach 3 s.

## Verfahren bewerten

Die Erwärmung von Kunststoffen für die Thermoformung von Halbzeugen ist – aus wissenschaftlicher Sicht – eine sehr konventionell besetzte Branche. Die beiden schlecht automatisierbaren und energieineffizienten Erwärmungsverfahren mit Heißluft und Thermo-Öl werden weiter betrieben, weil die Anlagen schon stehen und weil jede Innovation in des Massenproduktion, besondere bei funktionskritischen Kunststoffteilen für OEM, auch mit Risiken verbunden ist. Wegen Verwendung von „Backformen“ sind diese Verfahren oft auf Serien mit hohen Stückzahlen beschränkt.

Der einzige „echte Konkurrent“ des Dielektrischen Verfahrens ist die Infrarot-Erwärmung. Gegenüber Infrarot punktet die neue Technik sobald die zu erwärmenden Werkstücke größere Wanddicken aufweisen und/oder das auf Verformungstemperatur erwärmte Werkstück von der Erwärmungs- zur Verformungseinheit transportiert werden muss. Auch kleine Losgrößen lassen sich dielektrisch wirtschaftlich verformen, da ein Produktwechsel im Standardfall nur einen Werkzeugwechsel in der Erwärmungseinheit und einen in der Umformeinheit erfordert. Außerdem wurde, auf Basis wissenschaftlich ermittelter Daten die höchste Energie-Effizienz für das dielektrische Erwärmungsverfahren ermittelt, gefolgt vom Infrarot-Verfahren.

Diese Entwicklung wurde im Rahmen des Förderprogramms ZIM vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi, Projektträger AiF), über zwei

ZIM-Projekte im Zeitraum im Jahr 2014 gefördert.

### Literatur

- 1 <https://de.wikipedia.org/wiki/Infrarotstrahler>
- 2 [http://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches\\_Strahlungsgesetz](http://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz)
- 3 [http://www.people.fas.harvard.edu/~rkraus/Publications\\_and\\_Presentations\\_files/Emmons,%20High%20Pressure%20Infrared%20absorptions%20spectroscopy%20of%20poly\(methyl%20methacrylate\).pdf](http://www.people.fas.harvard.edu/~rkraus/Publications_and_Presentations_files/Emmons,%20High%20Pressure%20Infrared%20absorptions%20spectroscopy%20of%20poly(methyl%20methacrylate).pdf)
- 4 [https://de.wikipedia.org/wiki/Lambertsches\\_Gesetz](https://de.wikipedia.org/wiki/Lambertsches_Gesetz)

Reto Gloor: Entwicklung eines Messgeräts für die spektroskopische Untersuchung der dielektrischen Erwärmbarkeit von Kunststoffen. Bachelor-Thesis an Hochschule Furtwangen/Studiengang ICS im SS15

### Die Autoren

Franz Aßbeck ist seit 1990 Professor für Antriebs-, Regelungs- und Hochfrequenztechnik/EMV an der Hochschule Furtwangen und Leiter des dortigen LAMS (Labor für Angewandte Mechatronik und Systemkonstruktion).

Simon Grigull ist seit 2011 Entwicklungsingenieur am LAMS und Mitentwickler des Basis-Patents der Hochfrequenz-Erwärmung. Vorher war er „First Electrician and Purchase Engineer“ bei Aida Cruises und mehrere Jahre in der Elektronik-Entwicklung selbständig.

Reto Gloor war als studentische Hilfskraft am LAMS und erstellte dort auch seine Bachelor-Thesis.

### Dielektrische Erwärmung

LAMS, [www.lams.hs-furtwangen.de](http://www.lams.hs-furtwangen.de)



COMPOSITES EUROPE

10 JAHRE



Visions become reality.

# COMPOSITES EUROPE

22.-24. Sept. 2015 | Messe Stuttgart

10. Europäische Fachmesse & Forum für Verbundwerkstoffe, Technologie und Anwendungen

[www.composites-europe.com](http://www.composites-europe.com)

Parallelveranstaltung:



Tickets sind gültig für beide Veranstaltungen.

