

## Ist Röntgenstrahlung bei der industriellen UKP-Laser-Materialbearbeitung eine reale Gefahr?

Die neueste Generation von Ultrakurzpuls(UKP)-Lasern verspricht höchstpräzise Materialbearbeitung mit Strukturgenauigkeiten unter einem Mikrometer. Dazu eignen sich diese UKP-Laser mit Pulsdauern im Bereich von einigen Hundert Femtosekunden bis einige Pikosekunden (siehe Kasten auf S. 9) hervorragend. Weil heute die mittlere Leistung industrietauglicher Laserquellen bereits einige Hundert Watt beträgt, ist auch eine ansprechende Produktivität möglich. Und UKP-Laser mit einer mittleren Leistung von 10 kW sind im Labor bereits gezeigt worden.

### Arbeiten mit UKP-Lasern

Damit mit derart kurzen Pulsen Material bearbeitet werden kann, braucht es hohe Bestrahlungsstärken (siehe Kasten auf S. 9) ab ca.  $10^{11}$  W/cm<sup>2</sup>, der sogenannten Abtragsschwelle. Ab dieser Schwelle gelingt es, auch Metalle und Halbleiter zu verdampfen. Zusätzlich zum Dampf entsteht ein Plasma. Dieses manifestiert sich in erster Linie als helles Leuchten im sichtbaren Bereich, wie in Abbildung 1 deutlich zu sehen ist.

Die freien und gebundenen Elektronen können dabei aber auch Bremsstrahlung und Linienstrahlung mit Photonenenergien bis in den weichen Röntgenbereich erzeugen. Mit zunehmender Bestrahlungsstärke nimmt die Temperatur der Elektronen im Plasma zu. Je höher die Temperatur, umso

härtere Röntgenstrahlung wird erzeugt. Die Bestrahlungsstärke ist also entscheidend für das Spektrum der Röntgenstrahlung, die das Plasma emittiert. Mit zunehmender Bestrah-

lungsstärke wird das Spektrum zunehmend härter (Abb. 2 links mit symbolischer Fe-Linie). Obwohl die Strahlung zu höheren Photonenenergien sehr

stark abnimmt, gibt es prinzipiell keine obere Energiegrenze, im Gegensatz zu der Strahlung aus Röntgenröhren, bei welchen die maximale Photonen-Energie durch die Beschleunigungsspannung begrenzt ist. Ein weiterer großer Unterschied ist, dass eine Röntgenröhre strahlt, solange sie eingeschaltet ist, während die Röntgenstrahlung bei der UKP-Bearbeitung nur während der Pulse entsteht. Die Strahlungsdauer pro Puls ist also nur im Bereich von einer Pikosekunde. In den Pausen zwischen den Pulsen, die üblicherweise

etwa eine Million Mal länger ist als die Pulsdauer, geschieht nichts. Deshalb ist heute noch nicht wirklich geklärt, ob die üblichen Röntgenmessgeräte auch korrekt messen.

Immerhin hat sich gezeigt, dass die Messungen mit den Dosimetern OD-02 von STEP Sensortechnik und DIS-1 von Mirion gut übereinstimmen und auch reproduzierbar sind. Zudem stimmen sie auch gut überein mit den Auswertungen von spektral aufgelösten Messungen.

Die hier besprochene UKP-Bearbeitung erfolgt ausschließlich an Atmosphäre. Weil das Spektrum sehr weich ist, hat die Absorption in der Luft einen großen Einfluss auf das Spektrum. Mit zunehmendem Abstand vom Plasma wird die Strahlung deutlich schwächer und das Spektrum wird „aufgehärtet“ (Abb. 2 rechts). Während in 20 cm Abstand noch der größte Anteil der Strahlung unter 5 keV liegt, ist dieser Anteil in einem Meter Abstand fast vollständig von der Luft absorbiert. Für die Bewertung einer möglichen Strahlenbelastung von Personen ist also deren Abstand von der Bearbeitungszone mitentscheidend.

### Messen Röntgenmessgeräte korrekt?

### Bestrahlungsstärke ist entscheidend

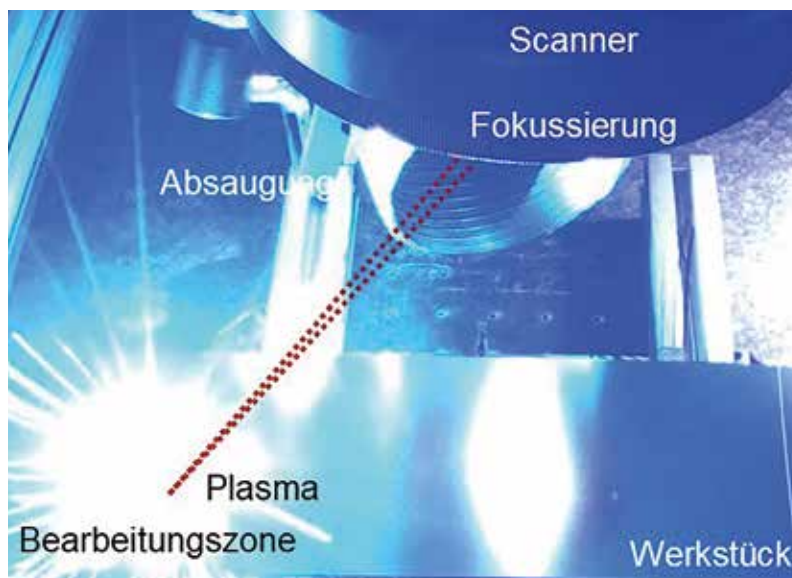


Abb. 1: Bearbeitung einer Stahloberfläche mit ultrakurzem Laserpuls am IFSW

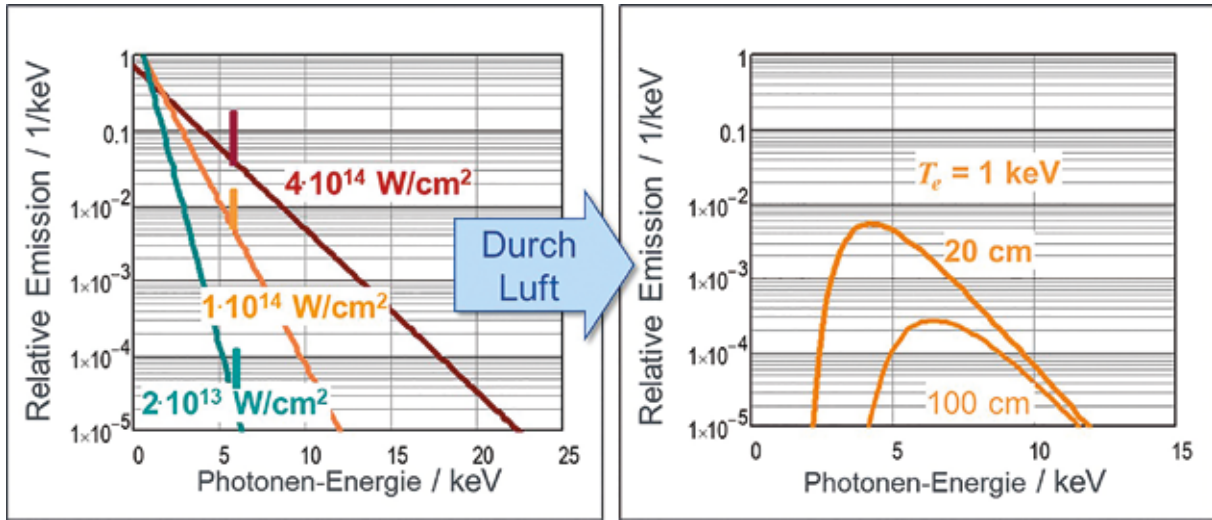


Abb. 2: Links: Spektrum der Plasmaemission (mit symbolischer Fe-Linie): Mit zunehmender Bestrahlungsstärke wird das Spektrum „härter“. Rechts: Einfluss der Absorption in Luft auf das gemessene Spektrum: Mit zunehmendem Abstand vom Plasma wird die Strahlung deutlich schwächer und das Spektrum wird „aufgehärtet“.

### Dosisleistungsmessungen der Röntgenstrahlung

Vor wenigen Jahren haben einige Publikationen für Aufsehen gesorgt [1–3], in denen die Messung von sehr hohen  $\dot{H}(0,07)$ -Dosisleistungen dokumentiert wurde. Dabei wurde beim UKP-Abtrag von Oberflächen möglichst viel Röntgenstrahlung erzeugt und in geringem Abstand vom Plasma eine Art „maximal mögliche Dosisleistung“ gemessen. Zu  $\dot{H}(10)$ -Dosisleistungen gibt es leider aktuell fast keine publizierten Ergebnisse. Dies vor allem deshalb, weil das Spektrum so weich ist, dass die  $\dot{H}(10)$ -Messung aufgrund der schwachen Signale sehr schwierig ist.

### $\dot{H}(10)$ -Messung sehr schwierig

grund der schwachen Signale sehr schwierig ist.

Deshalb spielt die  $\dot{H}(10)$ -Dosisleistung aus Sicht des Strahlenschutzes nur eine unbedeutende Rolle.

Da die Dosisleistung von fast allen Laserparametern der Bearbeitung abhängt und da insbesondere die Dosisleistung proportional zur mittleren Laserleistung ist, ist eine normierte Darstellung sinnvoll (nach einem Vorschlag von Dr. Rothmund, RP Stuttgart). Abbildung 3 zeigt die Dosisleistung pro Watt mittlere Laserleistung

für verschiedene Abstände vom Plasma bei der Bearbeitung von Stahl. Der aktuell diskutierte Grenzwert von  $10 \mu\text{Sv/h}$  (s. Kasten) für die Anzeigepflicht ist als horizontale, rot gestrichelte Linie eingezeichnet. Die Kurven wurden mit einem Modell berechnet, welches mit den oben erwähnten, maximal gemessenen Dosisleistungen kalibriert wurde [3]. Für andere Materialien und Prozesse fehlen aktuell noch ausreichend verifizierte Messdaten. Mit den Kurven in Abbildung 3 kann also die bei der verwendeten Bestrahlungsstärke maximal zu erwartende Dosisleistung ohne Abschir-

mung ermittelt werden. Dies ist für verschiedene Abstände vom Plasma, bei 1 Watt mittlerer Laserleistung und der Bearbeitung von Stahl möglich. Der Wert für die so ermittelte Dosisleistung muss nun noch mit der verwendeten Laserleistung multipliziert werden, um die tatsächlich maximal zu erwartende Dosisleistung zu erhalten.

### Wie sicher ist das Arbeiten mit UKP-Lasern?

In den publizierten Messdaten betrug die verwendete Bestrahlungsstärke bis weit über  $10^{14} \text{ W/cm}^2$ . Bei 100 W Laserleistung konnte so im Abstand

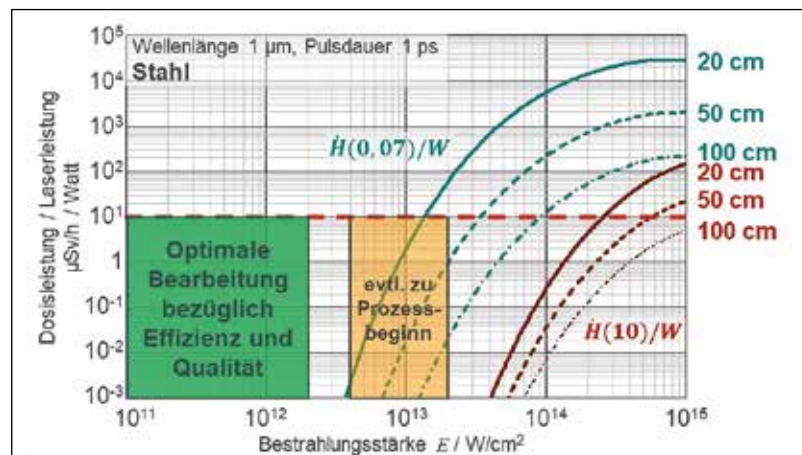


Abb. 3: Dosisleistung pro Watt mittlere Laserleistung für verschiedene Abstände vom Plasma bei der Bearbeitung von Stahl; hohe Qualität und hohe Effizienz wird bei der UKP-Bearbeitung von Metall- und Halbleiteroberflächen nur im grünen Bereich erreicht.

von 20 cm ein  $\dot{H}(0,07) > 500$  mSv/h erreicht werden.

**Das klingt dramatisch. Aber ist es das im täglichen Gebrauch auch?**

Seit vielen Jahren ist bekannt, dass Präzisionsbearbeitung mit UKP-Lasern nur bei Bestrahlungsstärken bis maximal ca. 10-mal der Abtragschwelle effizient ist [4] und gute Qualität [5] liefert, d. h. bei Bestrahlungsstärken, die kleiner sind als ca.  $2 \times 10^{12}$  W/cm<sup>2</sup> (grüne Fläche in

Abb. 3). Wie Abbildung 3 zeigt, entsteht in diesem Bereich keine nennenswerte Röntgenstrahlung.

Wenige Prozesse werden bei wenigen  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> begonnen (gelbe Fläche in Abb. 3), wie z. B. beim Einstechen beim Schneiden, zu Beginn einer Bohrung oder beim groben Abtragen („Schrubben“). Aus geometrischen Gründen oder weil die Qualität zu schlecht ist, wird die Bestrahlungsstärke aber sehr schnell für den Rest der Bearbeitung verringert. Zusätzlich findet bei häufigen UKP-Anwendungen wie Bohren und Schneiden der Prozess im Inneren des Materials statt, sodass sich die Strahlung über einen großen Bereich des Raumes selbst zusätzlich abschirmt, d. h.,

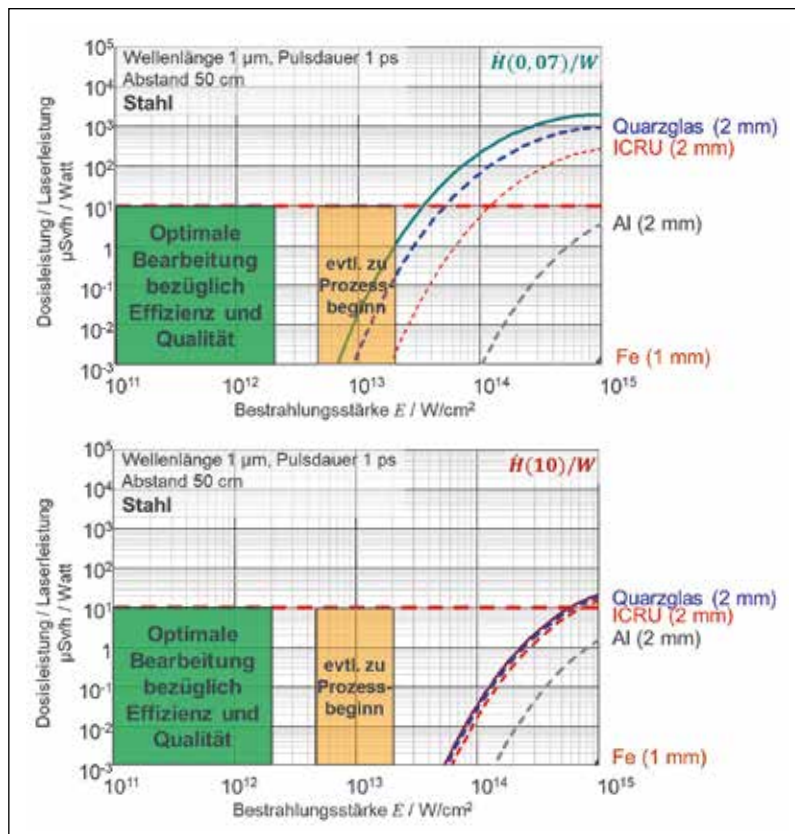
im Bohrloch schirmt das Material um das Bohrloch ab. Außerdem gilt auch bei der UKP-Bearbeitung, dass zusätzlicher Abstand hilft: Im

Abstand von 1 m ist man auch bei  $10^{13}$  W/cm<sup>2</sup> und auch bei 10 kW mittlerer Laserleistung sicher.

Dazu sei erwähnt, dass die maximale Dosisleistung, wie sie in den Kurven dargestellt ist, während eines realen Prozesses nur selten erreicht wird. Aufgrund von Totzeiten, welche sich z. B. aus der Strahlpositionierung, dem Be- und Entladen oder dem Einrichten des Prozesses ergeben, reduziert sich die effektive Bearbeitungs- respekti-

**Bestrahlungsstärken**  
**<  $2 \times 10^{12}$**   
**W/cm<sup>2</sup>**

**Zusätzlicher Abstand hilft**



**Abb. 4: Abschirmwirkung verschiedener Materialien verschiedener Dicke (jeweils rechts im Bild) für die Dosisleistungen  $\dot{H}(0,07)$  (oben) und  $\dot{H}(10)$  (unten) im Abstand von 50 cm vom Plasma.**

ve „Röntgenstrahlungszeit“ leicht um eine Größenordnung, was die effektive Dosis natürlich weiter stark reduziert.  
**UKP-Bearbeitung im industriellen Umfeld**

UKP-Bearbeitung im industriellen Umfeld findet zudem immer in geschlossenen Laserkabinen statt – Laserstrahlung kann nämlich auch sehr gefährlich sein. Für eine CE-Zertifizierung braucht es Sicherheitsschalter, die das Betreiben der Anlage bei offenem Gehäuse verhindern. Im Bearbeitungsraum in der Maschine stehen optische Komponenten und oft lineare oder Rotationsachsen, um den Laserstrahl oder das Werkstück zu bewegen (siehe Abbildung 1). Das heißt, die Gehäusewand ist meistens mehr als 30 cm vom Plasma entfernt. Die Gehäuse bestehen üblicherweise aus Stahl, manchmal aus Aluminium. Bei älteren Anlagen haben sie Sichtfenster aus Laserschutzglas, das in etwa dem

Material Quarzglas entspricht. Abbildung 4 zeigt anhand der Dosisleistungen  $\dot{H}(0,07)$  (oben) und  $\dot{H}(10)$  (unten), wie verschiedene Materialien die weiche Röntgenstrahlung abschwächen: Die Abschirmung mit 1 mm Stahl ist sowohl für  $\dot{H}(0,07)$  als auch für  $\dot{H}(10)$  sicher. Eine Abschirmung mit 2 mm Alu ist bis ca.  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> ausreichend. Nur Quarzglas schwächt praktisch nicht ab. Im Zweifelsfalle sollten also Sichtfenster mit einem Stahlblech verschlossen werden.

**Fazit und offene Fragen**

Bei der Materialbearbeitung mit UKP-Lasern kann ohne Zweifel Röntgenstrahlung entstehen, und es können auch sehr hohe Dosisraten gemessen werden.

Dabei gibt es noch zahlreiche offene Fragen, wie z. B. nach dem Einfluss der Pulsdauer und der Wellenlänge auf die Röntgenemission. Es sei zudem

### Von ps und fs

Eine Pikosekunde (ps) ist  $10^{-12}$  Sekunden, d. h. ein Millionstel von einer Millionstelsekunde. Eine Femtosekunde (fs) ist nochmals tausendmal kürzer. Ein Lichtpuls von 1 ps, der wie üblich mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist, ist noch gerade ca. 0,3 mm lang.

### Maximale Bestrahlungsstärke

Die Bestrahlungsstärke sagt aus, wie viel Laserleistung pro Fläche auf der Oberfläche des zu bearbeitenden Materials auftrifft. Die mit einem UKP-Laser mit einem Rohstrahldurchmesser  $d_R$  und einer gegebenen Bearbeitungsoptik mit einer Brennweite  $f$  maximal auftretende Bestrahlungsstärke, angegeben in den üblichen  $W/cm^2$ , kann mit der folgenden Formel einfach berechnet werden:

$$E_{0,max} \cong 10^{14} \cdot \frac{Q}{\lambda^2 \cdot t_H} \cdot \frac{c_{Strahl} \cdot \cos(\alpha)}{(f/d_R)^2} \frac{W}{cm^2}$$

Dabei ist die Wellenlänge  $\lambda$  in  $\mu m$ , die Pulsdauer  $t_H$  in ps und die Pulsenergie  $Q$  in  $\mu J$  zu nehmen.  $\alpha$  ist der Winkel, mit dem die Strahlung auf die Oberfläche auftrifft. Für örtlich und zeitliche Gauß-Strahlen mit  $M^2 \cong 1,3$  ist  $c_{Strahl} \cong 1$ .

### Dosisleistung und Dosis

Im Strahlenschutz sind die Grenzwerte als Dosis definiert. Für die Röntgenstrahlung aus der UKP-Bearbeitung hat sich aber eine Dosisleistung als Grenzwert eingeschlichen. Genehmigungspflichtig sind aktuell Anlagen, in welchen Prozesse gefahren werden, die im Abstand von 10 cm von der berührbaren Oberfläche mehr als  $1 \mu Sv/h$  erzeugen. In Zukunft soll zwischen  $1 \mu Sv/h$  und  $10 \mu Sv/h$  die Anzeigepflicht eingeführt werden, sodass nur noch für Anlagen mit mehr als  $10 \mu Sv/h$  die Genehmigungspflicht gilt.

hier erwähnt, dass die Röntgenstrahlung aus UKP-Laser-Plasmen durchaus auch ausgenutzt werden könnte, z. B. als effiziente Röntgenquelle im sehr weichen Röntgenbereich oder für die Einstellung von Laseranlagen, da die Röntgenemission ein sehr empfindlicher Indikator für die Bestrahlungsstärke und damit für die Fokusslage ist. Projekte zu solchen Themen laufen am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) bereits oder sind in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Planung. Im industriellen Umfeld, bei aktuellen Anwendungen der UKP-Techno-

logie, stellt nach heutigem Stand des Wissens die Röntgenstrahlung aber kein ernsthaftes Problem dar. Dies wird bestätigt durch zahlreiche, leider nicht publizierte Messungen an industriellen Anlagen im Produktionsbetrieb sowie durch einige Anlagenvermessungen des Autors als Gutachter: Röntgenstrahlung konnte nur beim Optimieren des Prozesses auf Röntgenemission innerhalb des Laserschutzgehäuses detektiert werden. Bei industriell genutzten realen Anwendungen wurde meistens nicht einmal in nächster Nähe des Plasmas Röntgenstrahlung gemessen.

Rudolf Weber 



## Fortbildung (Auszug)

### Radioanalytik, z.B.

Grundlagen der Gamma-Spektrometrie (SA270), 26. bis 29.10.2021

Der Wischtest in der Strahlenschutzpraxis (SA260), 28.09.2021

### Kenntniserwerb im Strahlenschutz

Einführung Strahlenschutz (ST010), 15. bis 18.06.2021, 30.11. bis 03.12.2021

Einführung in die Strahlenschutzmesstechnik (ST020), 20. bis 22.07.2021

Radioaktive Reststoffe und Abfälle (ST550), 21. bis 25.06.2021

S3 - Kenntniserwerb (SK320), 05. bis 16.07.2021, 08. bis 19.11.2021

### Fachkunderwerb StriSchV:

Eingebaute radioaktive Strahler (ST130), 20. bis 21.09.2021, 06. bis 07.12.2021

Radioaktive Stoffe (ST110, ST115), 21. bis 25.06.2021, 20. bis 24.09.2021

Beförderung radioaktiver Stoffe Komplettkurs (ST530), 20. bis 22.09.2021, 06. bis 08.12.2021

Aufbaukurs: Modul BF (ST531), 22.09.2021, 08.12.2021

Strahlenschutz Beschleuniger: Modul BG/BH (ST160/ST161), 13. bis 15.10.2021

Kurse zur Fachkundegruppe S9.1 „Tätigkeiten an Arbeitsplätzen mit NORM oder im Zusammenhang mit der Stilllegung und Sanierung der Betriebsanlagen und -stätten des Uranerzbergbaus (Geringes Anforderungsniveau)“ (ST910), 20. bis 23.09.2021

### Fachkunderhalt StriSchV:

Umschlossene radioaktive Stoffe, zerst.-freie Prüfung (ST103/SR104), 28.09.2021

Beschäftig. nach § 25 StriSchG (ST102), 29.06.2021, 30.09.2021, 25.11.2021

### Fachkunde für Röntgengeräte:

Strahlenschutz bei Röntgeneinrichtungen im nichtmedizinischen Bereich (SR610), 20. bis 23.09.2021, 29.11. bis 02.12.2021

Wartung und Erprobung von Röntgeneinrichtungen mit QS (SR660), 20. bis 24.09.2021, 29.11. bis 03.12.2021

(Verkürzter) Aktualisierungskurs Röntgentechnik (SR601/SR600), 15.07.2021, 09.09.2021, 26.10.2021

### Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt (FTU), Fon: 0721 608-24801, E-Mail: strahlenschutz@ftu.kit.edu, [www.fortbildung.kit.edu](http://www.fortbildung.kit.edu)