Innovation bei Kernreaktoren : Kugelhaufen, Salzschmelze, Thorium

Autor(en): **Prasser, Horst-Michael**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **105 (2014)**

Heft 11

PDF erstellt am: **31.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-856317

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Innovation bei Kernreaktoren: Kugelhaufen, Salzschmelze, Thorium

Erhöhung der Sicherheit und der Nachhaltigkeit als Ziel

In der öffentlichen Wahrnehmung ist die Kernenergie eine Hochrisikotechnologie. Die Freisetzung des radioaktiven Materials kann das Umland unbewohnbar machen. Barrieren, wie die Brennstabhülle oder das Containment eines Kernkraftwerks, können – wie uns Fukushima gezeigt hat – versagen. Zudem wird die Nachhaltigkeit hinterfragt. Gibt es überhaupt genug Kernbrennstoff für eine Zukunft über die Lebensdauer heutiger Kernkraftwerke hinaus? Und wie kann der ausgediente Kernbrennstoff sicher entsorgt werden? Ein Blick auf Technologien, die diese Situation entschärfen könnten.

Horst-Michael Prasser

Heutige Kernreaktoren gewinnen die Energie hauptsächlich durch Spaltung des natürlich vorkommenden Uranisotops 235. Dabei wird Wasser bei hohem Druck verdampft und mittels einer Turbine ein Generator zur Stromerzeugung betrieben. In den Brennstäben sammeln sich hochradioaktive Spaltprodukte an, zusammen mit Plutonium und anderen Transuranen wie Americium und Curium, die durch Einfang von Neutronen im nicht spaltbaren Isotop Uran 238 entstehen. Hüllrohre aus Zirkonium verhindern, dass diese Bestandteile austreten können. Brennstäbe müssen jedoch ständig gekühlt werden, sonst heizen sie sich durch die Nachzerfallswärme auf, wodurch die Spaltprodukte freigesetzt werden können, auch wenn die Kettenreaktion bereits unterbrochen wurde.

Die Weiterentwicklung dieser sogenannten Leichtwasserreaktoren war vorwiegend darauf gerichtet, die Kühlung bei Störfällen zuverlässiger zu machen. Eine Schwachstelle ist die Stromversorgung für Notkühlsysteme. Die höchste Zuverlässigkeit versprechen heute sogenannte passive Sicherheitssysteme, die ohne eine externe Energieversorgung auskommen. Für die Notkühlung erforderliche Kühlmittelströmungen werden beispielsweise allein durch die Wirkung der Schwerkraft in Gang gehalten.

Es werden zurzeit aber nicht nur Leichtwasserreaktoren weiterentwickelt, sondern man forscht auch an neuen Ansätzen, um die Kernkraft sicherer und nachhaltiger zu machen. Drei Begriffe tauchen in diesem Zusammenhang besonders häufig auf: Kugelhaufen, Salzschmelze und Thorium. Möglicherweise werden diese Technologien einst die heute weit verbreiteten Druck- und Siedewasserreaktoren ablösen.

Kugelhaufenreaktoren

Beim heliumgekühlten Kugelhaufenreaktor kann ganz auf ein Kühlsystem zur Ableitung der Nachzerfallswärme verzichtet werden. Der Brennstoff befindet sich in kleinen, etwa 0,5 mm grossen Kügelchen, die von einer beständigen und hermetischen Schicht aus Siliziumkarbid umgeben sind. Mehrere Tausend dieser sogenannten «Coated Particles» werden in etwa 60 mm grosse Graphitkugeln eingesintert. Die Siliziumkarbidschicht ersetzt das Brennstabhüllrohr im Leichtwasserreaktor. Sie hält aber weit höhere Temperaturen aus als Zirkonium, aus dem die Hüllrohre bestehen. Die radioaktiven Bestandteile des Brennstoffs, insbesondere die flüchtigen Radioisotope der Edelgase Krypton und Xenon sowie radioaktives Jod 131 und die besonders problematischen Cäsium-Isotope 137 und 134, die im Fall von Fukushima weite Landstriche kontaminiert haben, werden durch die Siliziumkarbidschicht zuverlässig eingeschlossen.

Die kugelförmigen Brennelemente werden in den Reaktorbehälter eingefüllt, bis die kritische Masse bei der gewünschten Betriebstemperatur erreicht wird. Der Abbrand wird nicht wie beim Leichtwasserreaktor durch die kontinuierliche Entnahme von Neutronenabsorbern kompensiert, sondern durch eine ständige Zufuhr von frischen Kugeln. Es ist immer genau so viel Spaltstoff im Reaktor, wie es für eine selbsterhaltende Kettenreaktion braucht, nicht mehr. Zusammen mit starken negativen Rückkopplungen, die die Kettenreaktion dämpfen, wenn sich die Temperatur erhöht, führt dies zu einer wichtigen

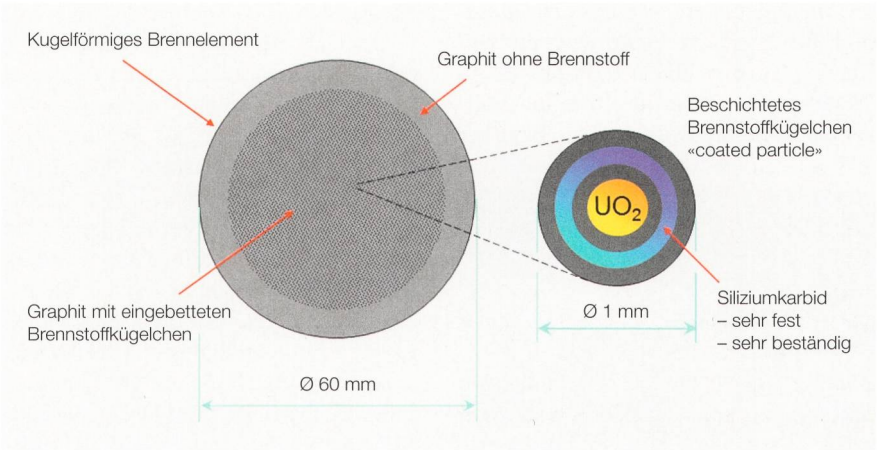


Bild 1 Kugelförmige Brennelemente für heliumgekühlte Hochtemperaturreaktoren (vereinfacht).

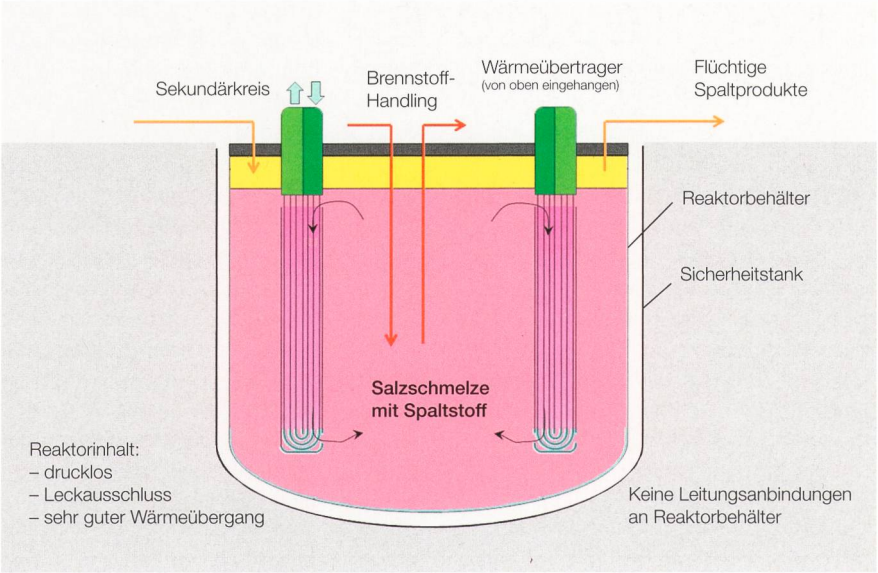


Bild 2 Denkbare Gestaltung eines Salzschmelzereaktors in Pool-Bauweise.

neuen Sicherheitseigenschaft: Selbst bei einem Totalausfall der Heliumkühlung kommt es nicht zu einer unzulässigen Überhitzung des Brennstoffs, da die Reaktorleistung selbsttätig auf ein Niveau abfällt, bei dem die noch freiwerdende Wärme über die Reaktorwand abgeführt werden kann. Der Reaktor ist inhärent sicher in Bezug auf den Ausfall der Kühlung.

Allerdings muss die thermische Leistung eines Reaktors auf grössenordnungsmässig 200 bis 300 MW begrenzt werden, sonst kann die Maximaltemperatur im Reaktor nicht unter 1600 °C gehalten werden. Bei höheren Temperaturen beginnen Jod und Cäsium durch die Siliziumkarbidschicht hindurch zu diffundieren und gelangen in den Heliumkreislauf und von dort unter ungünstigen Umständen in die Umgebung. Deshalb sind Kernkraftwerke mit Kugelhaufenreaktoren modular aufgebaut: Mehrere Reaktoren erzeugen Wärme für eine gemeinsame Turbine.

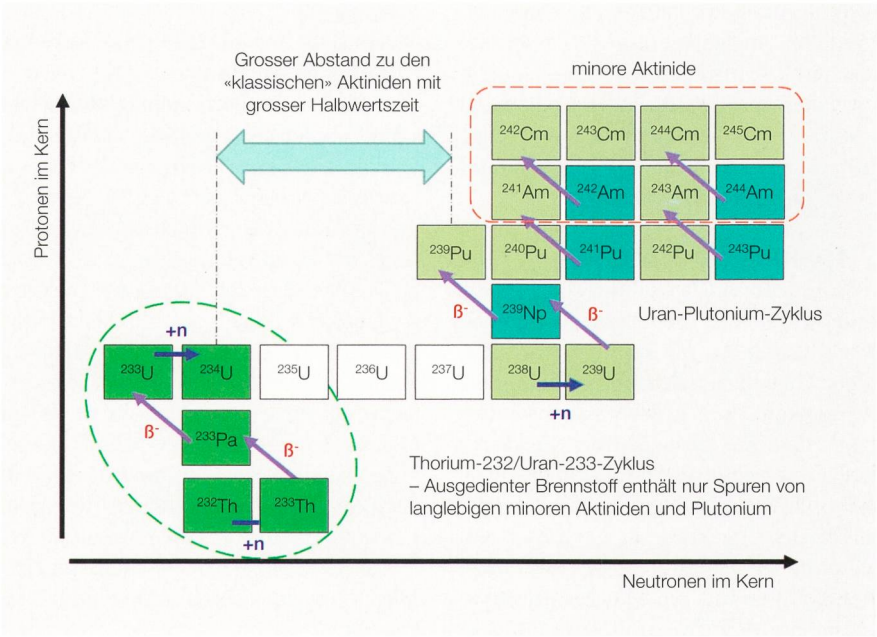
Prototypen von Kugelhaufenreaktoren wurden zuerst in Deutschland gebaut.[1] Unreife technologische Lösungen und abnehmende öffentliche Akzeptanz haben zum Abbruch der Projekte im Forschungszentrum Jülich und in Hamm-Uentrop geführt. Das Konzept wurde von China aufgegriffen und weiterentwickelt. Nach erfolgreichen Versuchen am Testreaktor HTR10 an der Tsinghua-Universität in Beijing hat China mit dem Bau des HTR-PM mit zwei Reaktoren von je 250 MW thermischer und insgesamt 200 MW elektrischer Leistung in Weihai in der Provinz Shangdong begonnen. [2]

Salzschmelzereaktoren

Während der Kugelhaufenreaktor auf das neuartige Barrierenkonzept der «Coated Particles» setzt, versucht man beim Salzschmelzereaktor [3,4], das radioaktive Inventar im Reaktorkern niedrig zu halten. Bei einem Störfall können dann keine grösseren Mengen mehr freiwerden. Im Reaktor befindet sich eine Salzschmelze mit einer Temperatur zwischen 500 und 700 °C oder sogar darüber. Der eigentliche Spaltstoff wird in einem geschmolzenen Gemisch aus verschiedenen Salzen, wie Lithiumfluorid, Berylliumfluorid oder Zirkoniumfluorid, aufgelöst. Dabei kann es sich um unterschiedliche spaltbare Nuklide, wie Uran 235, Plutonium 239 oder auch Uran 233, das aus Thorium gewonnen wird, handeln. Werden der Salzschmelze die entsprechenden Ausgangsnuklide Uran 238 oder Thorium 232 zugegeben, dann kann der Reaktor als Brüter für Plutonium 239 oder Uran 233 dienen. Ebenso können Transurane wie Americium und Curium aus dem Abfall anderer Reaktorlinien gespalten und damit beseitigt werden, wenn man sie hinzufügt.

Salzschmelzereaktoren sind hinsichtlich der Brennstoffzusammensetzung sehr flexibel. Letztlich wird stets so viel Spaltstoff dosiert, dass die Kettenreaktion unterhalten werden kann. Deshalb haben auch Salzschmelzereaktoren keine Überschussreaktivität, was ein sicherheitstechnischer Vorteil ist, ebenso wie der drucklose Reaktorbehälter. Je nachdem, ob Graphit als Moderator eingesetzt wird, kann man den Reaktor mit thermischen oder mit schnellen Neutronen betreiben. Die Entscheidung wird davon abhängen, welchen Brut- oder Transmutationsprozess man realisieren will. Jedenfalls weisen Salzschmelzereaktoren eine sehr gute Neutronenbilanz auf. Da konstruktionsbedingte Reaktoreinbauten fehlen, gibt es keine Neutronenverluste durch Absorption in Konstruktionsmaterialien. Der vergleichsweise grosse Neutronenüberschuss gestattet sehr effizientes Brüten und Transmutieren.

Wie beim heliumgekühlten Kugelhaufenreaktor erlaubt die hohe Betriebstemperatur Kraftwerksprozesse mit hohem thermischen Wirkungsgrad oder die Bereitstellung von Prozesswärme. Flüchtige



Bilder: Prasser

Bild 3 Nuklidkarte mit Uran-Plutonium und Thorium-Uran-233-Zyklus.

Spaltprodukte werden bei diesen Temperaturen bereits von selbst aus der Salzschmelze austreten. Diesen Prozess kann man intensivieren, indem ein Inertgas durch die Schmelze geperlt wird. Gasförmige und leicht flüchtige Spaltprodukte können so kontinuierlich abgetrennt, separat konditioniert und gelagert werden. Dadurch wird die Freisetzung von radioaktivem Material bei einem eventuellen Störfall um Grössenordnungen niedriger gehalten als beim Versagen der Barrieren in einem Reaktor, in dem sich die Spaltprodukte über den Betriebszyklus ansammeln.

Diese Eigenschaft ist die wichtigste sicherheitsrelevante Innovation, die die Entwicklung von Salzschmelzereaktoren zu bieten hat. Die weit verbreitete Risikoaversion, die einer grossen Schadenshöhe ein stärkeres Gewicht gibt als einer kleinen Eintrittswahrscheinlichkeit, wird vorrangig von den grossen radioaktiven Inventaren, die in der Anlage vorhanden sind, gespeist. Barrieren gegen die Freisetzung des Inventars senken aber nur die Eintrittswahrscheinlichkeit, denn Szenarien, die zu ihrer Zerstörung führen, können immer postuliert und weiter verschärft werden. Der Ansatz der räumlichen Trennung von Reaktor und den gefährlichen flüchtigen Spaltprodukten sowie deren sicheren Konditionierung könnte somit dazu beitragen, die Akzeptanz der Kerntechnik zu verbessern.

Ein weiterer Punkt ist die Nachhaltigkeit in Bezug auf die Entsorgung der radioaktiven Abfälle. Hier könnte der Salzschmelzereaktor die Rolle eines Transmutationssystems übernehmen. Der Grundgedanke besteht in der Umwandlung von langlebigen und stark radiotoxischen Transuranen in Spaltprodukte, die innert einiger 100 Jahre weitgehend zerfallen. Dadurch kann die notwendige Einschlusszeit im Tiefenlager auf unter 1000 Jahre reduziert werden.

Thorium als Brutstoff

An dieser Stelle kommt Thorium ins Spiel. Die grosse Differenz zwischen den Massenzahlen von Thorium 232 bzw. Uran 233 und der wichtigsten Plutonium-, Americium- und Curiumisotope führt dazu, dass nur geringste Mengen dieser langlebigen und hochradiotoxischen Bestandteile gebildet werden. Deshalb reduzieren sich die erforderlichen Einschlusszeiten für hochaktiven Abfall aus einem reinen Thorium-Uran-233-Brennstoffzyklus bereits ohne Transmutation und Wiederaufarbeitung auf unter 1000 Jahre. Ein weiteres Nachhaltigkeitsargument ist die grosse potenzielle Reichweite von Thoriumvorkommen, die die Brennstoffversorgung noch weitaus länger sicherstellen können als die Nutzung von Natururan in Brutreaktoren. Allerdings muss eine lange Übergangsphase bewältigt werden, denn es ist derzeit nur wenig Uran 233 vorhanden. Man kann also nicht von heute auf morgen eine grössere Anzahl von Reaktoren allein mit Thorium und Uran 233 in Betrieb nehmen, sondern müsste anderen Spaltstoff, z.B. Plutonium, zuführen, wodurch die Vorteile beim Abfall zunächst nicht in Erscheinung treten würden.

Fazit

Kugelhaufenreaktoren könnten in nicht allzu ferner Zukunft zur technischen Reife gelangen. Sie verfügen über ein stark verbessertes Barrierenkonzept und können möglicherweise die ständig steigenden Anforderungen an die nukleare Sicherheit besser und kostengünstiger erfüllen als Leichtwasserreaktoren. Ihre inhärenten Sicherheitseigenschaften können sie aber nur entwickeln, wenn ihre Leistung auf das Niveau von kleinen modularen Reaktoren begrenzt wird. In diesem Bereich haben sie jedoch wegen ihrer Einfachheit gute Chancen, wirtschaftliche Konkurrenzvorteile zu entwickeln, führen doch die inhärenten Sicherheitseigenschaften dazu, dass komplizierte und teure Sicherheitssysteme eingespart werden können.

Weitere Vorteile liegen in der Möglichkeit, höhere Temperaturniveaus zu erschliessen. Das kann für die Erhöhung des Kraftwerkswirkungsgrads, aber auch für die Versorgung mit Prozesswärme genutzt werden. Eine Herausforderung besteht in den grossen Volumen des hochaktiven Abfalls, der sehr viel Graphit enthält. Ein erster Schritt wäre eine Wiederverwendung des Graphits, aber auch dann bleibt der Kugelhaufenreaktor noch immer nur etwa auf dem Nachhaltigkeitsniveau heutiger Leichtwasserreaktoren. Eine neue Qualität wird erst erreicht, wenn es gelingt, den Brennstoffkreislauf zu schliessen, d.h. alles Uran und alle Transurane zu rezyklieren. Das bleibt den Reaktoren mit schnellen Neutronen und dem Salzschmelzereaktor vorbehalten.

Salzschmelzereaktoren bieten einen gänzlich neuen Ansatz zur Erhöhung der Sicherheit durch die Reduzierung des radioaktiven Inventars im Reaktor, indem volatile Spaltprodukte kontinuierlich aus der Schmelze entfernt und entsorgungsgerecht konditioniert werden. Die gute Neutronenbilanz und die hohe Flexibilität hinsichtlich der Zusammensetzung des Brennstoffs erlauben wahlweise die Nutzung als Brüter oder Transmuter. Auch hier wird Wärmeenergie auf hohem Temperaturniveau bereitgestellt.

Thorium ist ein interessanter Brutstoff für die Zukunft. Nach Umwandlung in Uran 233 können unterschiedliche Reaktorsysteme damit betrieben werden. Kugelhaufenreaktoren, und insbesondere Salzschmelzereaktoren, sind für die Nutzung von Thorium besonders geeignet. Der Hauptvorteil besteht in einer drastischen Verringerung der Produktion von minoren Aktiniden, die lange Halbwert-

Résumé

Innovation pour les réacteurs nucléaires: lit de boulets, sels fondus et thorium

Objectif augmentation de la sécurité et de la durabilité

Pour l'opinion publique, l'énergie nucléaire représente une technologie à haut risque. Si des barrières, telles que l'enveloppe des barres de combustible ou le confinement de la centrale nucléaire, ne remplissent plus leur fonction, la matière radioactive est alors susceptible de rendre la zone périphérique inhabitable. De plus, la durabilité de l'énergie nucléaire est également remise en question.

Plusieurs travaux sont actuellement menés sur des technologies de réacteur qui sont censées augmenter à la fois la sécurité et la durabilité. Dans ce contexte, les termes lit de boulets, sels fondus et thorium reviennent fréquemment. Les réacteurs à lit de boulets disposent d'un concept de barrière fortement amélioré afin de pouvoir mieux, et à moindre coût, satisfaire aux exigences sans cesse croissantes en termes de sécurité nucléaire. Les réacteurs à sels fondus proposent une nouvelle approche en matière de sécurité qui consiste à réduire l'inventaire radioactif dans le réacteur en extrayant en continu les produits de fission volatiles de la matière fondue. Quant au thorium, il constitue également un élément fertile intéressant pour l'avenir. Une fois transformé en uranium 233, il permet de faire fonctionner différents systèmes de réacteur. Son avantage majeur réside dans la réduction drastique de la production d'actinides mineurs qui présentent de longues demi-vies, de même qu'une radiotoxicité élevée.

No

zeiten und eine hohe Radiotoxizität aufweisen. Einschlusszeiten im Tiefenlager könnten auf unter 1000 Jahre reduziert werden.

Beides, Salzschmelzereaktoren und Thorium, sind längerfristige Zukunftsoptionen, die noch viel Forschung, Entwicklung und, wie oben dargestellt, eine längere, technologisch bedingte Übergangsphase erfordern. Erste Schritte zum industriellen Einsatz von Thorium in schwerwassermoderierten Reaktoren werden in Indien unternommen. Der Möglichkeit, Gadolinium durch Thorium als abbrennbaren Absorber zur besseren Steuerung von Leichtwasserreaktoren zu ersetzen, wird in Norwegen untersucht. Hier deutet sich ein Einstieg in eine Thorium-Wirtschaft an, die Potenziale einer Ausweitung in sich trägt. Beides zeigt, dass es durchaus Sinn macht, solche Langzeitoptionen kontinuierlich zu verfolgen.

Referenzen

[1] R. Schulten, «Pebble bed HTRs», Annals of Nuclear Energy, Vol.5, pp.357 to 374.
[2] Zuoyi Zhang, Zongxin Wu, Dazhong Wang, Yuanhui Xu, Yuliang Sun, Fu Li, Yujie Dong, «Current status and technical description of Chinese 2×250 MWth HTR-PM demonstration plant», Nuclear Engineering and Design 239 (2009) 1212–1219.
[3] H. G. MacPherson, «The Molten Salt Reactor Adventure», Nuclear Science and Engineering: 90 (1985), 374–380.
[4] David LeBlanc, «Molten salt reactors: A new beginning for an old idea», Nuclear Engineering and Design 240 (2010) 1644–1656.

Autor

Prof. Dr. **Horst-Michael Prasser** ist seit 2006 Professor für Kernenergiesysteme am Department für Maschinenbau und Verfahrenstechnik (MAVT) der ETH Zürich und Leiter des Labors für Thermohydraulik am PSI. Er befasst sich mit Thermofluiddynamik und der Sicherheit von Kernkraftwerken.
ETH Zürich, 8092 Zürich, prasser@lke.mavt.ethz.ch

«Anhörung Verkehrserleichterungen für elektrische Mobilitätshilfen»

Leserbrief zu Beitrag auf Bulletin-Online 8/2014

Ausgerechnet das weltweit meistverkaufte und seit über zehn Jahren bewährte Velotaxi (Pedalantrieb mit Elektrounterstützung) soll von der Verkehrserleichterung ausgeschlossen werden, weil es mit seinen 1,06 m zu breit ist?

Wir begrüssen die in den «Verkehrserleichterungen für elektrische Mobilitätshilfen» vorgeschlagene Klassifizierung grundsätzlich, fordern aber, dass bei der Festlegung der Fahrzeugbreite für Rikschaartige ein Ermessensspielraum von 10–20 % zugestanden wird. Ohne äusseren Anlass würde bequemen Hybrid-Fahrzeugen der Riegel geschoben. Experten im In- uns Ausland haben Breiten >1m bisher in keiner Weise als problematisch eingestuft.

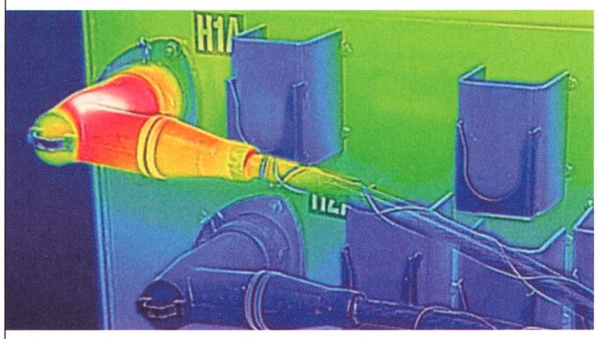
Die Grundsatz-Diskussion ist auch Rikscha-Inhabern mit reinem Pedalantrieb willkommen, wie ich bei meinen Recherchen im In- und Ausland feststellen konnte.

Tilmann Schor, 4051 Basel

Anzeige

Mit uns thermografieren Sie besser...

emitec industrial - Ihr Kompetenzzentrum für Ihre heutige und zukünftige Infrarotkamera

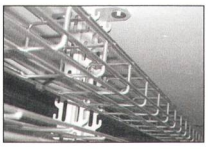
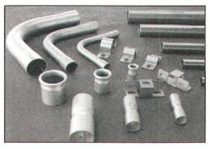
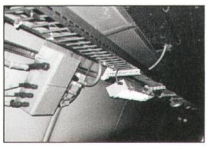


- Grösste Auswahl von Flir Thermografiekameras
- Beratung und Support durch ausgewiesene Thermografen (EN ISO 9712)
- Eigenes Kalibrationslabor (für alle Marken)
- Eigenes Thermografie Schulungszentrum
- Zertifizierungskurse nach EN ISO 9712

Weitere Infos unter:
www.emitec.ch/flir

emitec industrial

emitec messtechnik ag birkenstrasse 47 6343 rotkreuz
tel +41 (0)41 748 60 10 info@emitec.ch www.emitec.ch

LANZ moderne Kabelführung aus rostfreiem Stahl A4

- Kabelschonend • E 30 / E 90 • Korrosionsbeständig
- Koordinierbar • Preisgünstig • Sofort lieferbar

LANZ fabriziert für die Lebensmittelindustrie, für die chem. Industrie, für Abwasserreinigungs- und Kehrichtverbrennungsanlagen, Spitäler, unterirdische Bauten, Metro-, Bahn- und Strassentunnel:

- LANZ C*- und G*-Kanäle 50 x 50 mm bis 75 x 100 mm
- ESTA Elektro-Installationsrohre Ø M16 – M40*
- LANZ Gitterbahnen 100 mm – 400 mm Breite*
- LANZ Flachbahnen nur 70 mm hoch
- Multibahnen* und Weitspann-MB 100 mm – 400 mm, 3 m lang, mit verzahntem MULTIFIX-Trägermaterial
- V-Rohrschellen für koordinierbare Installationen

→ Stahl A4 WN 1.4571 und 1.4539 korrosionsbeständig
→ Schockgeprüft 1 bar Basisschutz (ACS) und
→ *Geprüft für Funktionserhalt im Brandfall E 30 / E 90 und
→ Geprüft auf Erdbebensicherheit (EMPA).

☐ Bitte senden Sie Unterlagen über .....
☐ Könnten Sie mich besuchen? Bitte tel. Voranmeldung!
Name / Adresse / Tel. _____
•K2

lanz oensingen ag
CH-4702 Oensingen Südringstrasse 2
Telefon 062 388 21 21 Fax 062 388 24 24
www.lanz-oens.com info@lanz-oens.com