

Besonderheiten bei Farbeindringprüfungen (PT) am Fusionsexperiment Wendelstein 7-X (W7-X)

Michael SCHRÖDER¹, Christoph BIEDERMANN¹, Reinhard VILBRANDT¹

¹ Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, EURATOM Association
Wendelsteinstraße 1, 17491 Greifswald

Kurzfassung. Der Stellarator Wendelstein 7-X, das weltweit größte Fusionsexperiment seiner Art, wird derzeit in Greifswald aufgebaut und wird ab 2014 in Betrieb gehen [1]. Ziel ist der stationäre Einschluss eines Plasmas mit Temperaturen bis 100 Millionen Grad in einem Magnetfeldkäfig, um die Kraftwerkseigenschaften von Stellaratoren zu untersuchen. Die Erzeugung der Magnetfelder durch supraleitende Spulen und der Plasmaeinschluss im Plasmagefäß erfordern Kryo-Vakuum- bzw. Ultrahochvakuumbedingungen. Um diese Bedingungen zu erreichen, ist die Sauberkeit von Komponenten von entscheidendem Einfluss. Insbesondere Kohlenwasserstoffe, die im Betrieb (besonders bei höheren Temperaturen) ausgasen, können zu einer Verschlechterung des Vakuums beitragen. Deshalb wird der Einsatz der PT als zerstörungsfreies Prüfverfahren für Vakuumkomponenten generell als kritisch angesehen. Andererseits ist die Prüfung von Bauteilen und Schweißnähten ein wesentliches Element der Qualitätssicherung bei der Montage, vor allem weil viele Schweißnähte für spätere Reparaturen nur unter großem Aufwand wieder zugänglich gemacht werden könnten. Da es sich beim W7-X um eine sehr komplexe, dreidimensional geformte Anlage handelt, deren Komponenten mit hoher Qualität und Präzision zu montieren sind, ist neben der Sichtprüfung die PT oftmals das einzige in Frage kommende zerstörungsfreie Prüfverfahren und die Anwendung deshalb aus Sicht der Qualität wünschenswert [2]. Im Beitrag wird die Anwendbarkeit der PT an Vakuumbauteilen des W7-X untersucht. Dazu wurden Proben mit unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften einer PT unterzogen, mit verschiedenen Methoden gereinigt und anschließend das Ausgasverhalten in einer Vakuumkammer mit angeschlossenem Massenspektrometer bei unterschiedlichen Temperaturen untersucht. Als Ergebnis werden die Bedingungen festgelegt, unter denen eine PT bei Vakuumbauteilen des W7-X zulässig ist.

1. Das Fusionsexperiment Wendelstein 7-X

Im Folgenden sind die wesentlichen technischen Daten des W7-X (Abb. 1) zusammengefasst:

- Höhe: 4,5 m, Durchmesser 16 m
- Masse: 725 t, davon 425 t kalte Masse
- 70 supraleitende Spulen (Betrieb bei 4 Kelvin, magnetische Flussdichte von bis zu 3 T)
- Plasmavolumen: 30 m³
- Kryostat-Außengefäß mit ca. 500 Öffnungen



- 254 Stützen zur Versorgung und Diagnostik des Plasmas (120 verschiedene Typen)
- 265 m² Fläche der Komponenten im Plasmagefäß (Wärmebelastung bis zu 10 MW/m²)

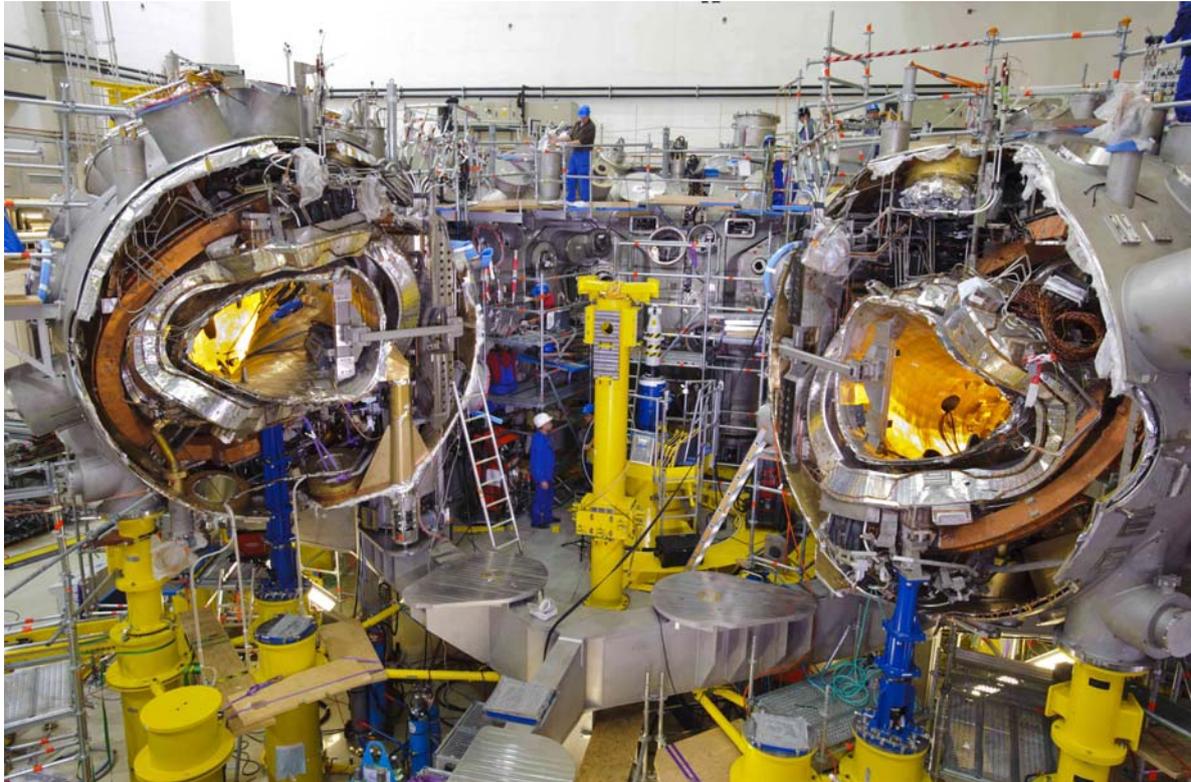


Abb. 1 Blick in das Innere des W7-X nach der Montage von 3 von insgesamt 5 Modulen

2. Bedeutung und Risiko von Eindringprüfungen (PT) am W7-X

Der Stellarator W7-X ist eine sehr komplexe Anlage mit komplizierter dreidimensionaler Geometrie. Er soll über einen Zeitraum von mindestens 15 Jahren betrieben werden. Unterbrechungen oder Störungen im Betrieb durch das Versagen von Schweißnähten oder Bauteilen können unter Umständen sehr lang sein, da durch fehlende Zugänglichkeit die Fehlersuche und Reparatur extrem schwierig und sehr aufwändig ist. Um solche Störungen zu vermeiden, ist ein hoher Aufwand an qualitätssichernden Maßnahmen wie z.B. zerstörungsfreie Prüfungen an Bauteilen und Schweißnähten während der Herstellung von Komponenten und deren Montage erforderlich [3]. Neben der visuellen Prüfung (VT) und Lecktests (LT) ist die Eindringprüfung (PT) das am meisten angewendete und wegen der Geometrie oft das einzig praktikable zerstörungsfreie Prüfverfahren für Komponenten und Schweißnähte.

Einer umfangreichen PT-Anwendung steht allerdings die Befürchtung entgegen, dass PT geprüfte Bauteile, die sich während des Betriebes im Kryovakuum oder - besonders kritisch - im Ultra-Hochvakuum (UHV) (Druck $<10^{-8}$ mbar) befinden, durch das Prüfmittel so verunreinigt werden, dass sie die Sauberkeitsanforderungen für Vakuumbauteile nicht mehr erfüllen. Diese Befürchtung beruht auf der hohen Kriechfähigkeit des Eindringmittels, einer für die Prüfung notwendigen Eigenschaft. Nach dem Eindringen des Prüfmittels in Hohlräume wie Kerben, Oberflächenporen oder Spalte gas dieses im Vakuum aus und verursacht virtuelle Lecks. Da das Eindringmittel in erster Linie aus Kohlenwasserstoffen besteht, die als besonders kritisch für das Ausgasen im UHV des Plasmagefäßes des W7-X betrachtet werden, wird der Einsatz der PT für Vakuumbauteile generell als problematisch angesehen.

Desweiteren wird befürchtet, dass das Prüfmittel reale Lecks verschließen könnte und damit das Auffinden dieser Lecks verhindern würde.

3. Untersuchungen zu Anwendungen von PT an Vakuumbauteilen des W7-X

3.1 Herangehensweise und Versuchsdurchführung

Es wurden unterschiedliche Proben mit spezifischen Oberflächen PT geprüft und gereinigt. Anschließend wurden die Proben in einer Vakuumkammer ausgegast und das Restgas mit einem Massenspektrometer untersucht [4]. Dabei wurden unterschiedliche Einflüsse untersucht, ob und wie das Eindringmittel die Zusammensetzung des Restgases im Vakuum beeinflusst. Folgende Aspekte können eine Rolle spielen:

- Art der Prüfoberfläche
- Geometrie des Prüfgegenstandes
- vorhandene Oberflächenfehler
- angewendete Reinigungsverfahren nach der PT
- Ausheizen des Prüfgegenstandes nach der PT
- Art des Prüfmittels

3.2 Untersuchte Proben

Es wurden Probebleche 150x55x10 mm aus austenitischem Stahl 1.4429 mit unterschiedlichen Oberflächen hergestellt und geprüft. Dabei wurde lediglich eine Fläche 150x55 mm modifiziert (Prüffläche). Alle anderen Flächen wurden gefräst ($R_a = 0,15 \mu\text{m}$). Folgende Probenoberflächen mit zunehmender Oberflächenstruktur wurden untersucht (Abb. 2):

- Probe Nr. 1: gefräste Oberfläche (Rauigkeit $R_a = 0,15 \mu\text{m}$)
- Probe Nr. 3: walzraues Blech (Rauigkeit $R_a = 4,81 \mu\text{m}$)
- Probe Nr. 5: feine WIG-Auftragschweißung
- Probe Nr. 6: grobe WIG-Auftragschweißung
- Probe Nr. 7: feine MAG-Auftragschweißung
- Probe Nr. 8: grobe MAG-Auftragschweißung

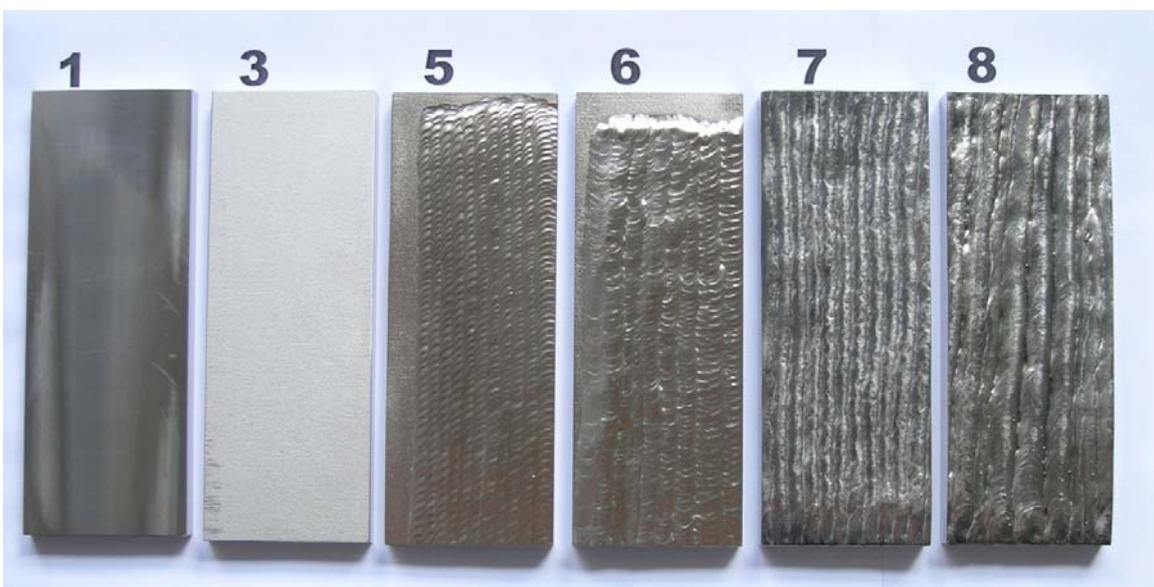


Abb. 2 Verwendete Proben

Die Proben Nr. 2 und 4 waren Ersatzproben für die Proben Nr. 1 bzw. Nr. 3 und wurden für die Untersuchungen nicht verwendet. Vor allen Tests wurden die Proben im Ultraschallbad gereinigt, mit destilliertem Wasser abgespült, mit heißer Luft getrocknet und anschließend mit Ethanol abgewischt. Dieses ist eine übliche Reinigungsprozedur für Metallkomponenten, die für Vakuumanforderungen im W7-X vorgesehen sind.

3.3 PT-Durchführung und Prüfbefunde

Die Proben wurden gemäß DIN EN 571-1 [5] PT geprüft (Prüfmittelsystem IICd). Die Eindring- und die Entwicklungszeiten betragen jeweils 30 min. Die Prüfbefunde werden in Tab. 1 gezeigt.

Tabelle 1. PT Prüfbefunde

Probe Nr.	PT Befund	Bemerkung
1	keine Anzeige	
3	keine Anzeige	
5	2 nichtlineare Anzeigen < 1mm	Schweißspritzer
6	1 nichtlineare Anzeige < 1mm	Schweißspritzer
7	diverse nichtlineare Anzeigen < 3 mm lineare Anzeigen	Endkraterlunker Einbrandkerben zwischen den Lagen
8	diverse nichtlineare Anzeigen < 5 mm lineare Anzeigen	Endkraterlunker Einbrandkerben zwischen den Lagen (siehe Abb. 3)



Abb. 3 Probe 8 nach PT

3.4 Prüfmittel

Als Prüfmittel wurde die NORD-TEST-Serie der Fa. Helling verwendet. Sie besteht aus dem Eindringmittel U88, dem Reiniger U87 und dem Entwickler U89. Die genauen Bestandteile der Prüfmittel waren vom Hersteller nicht zu erfahren, so dass nur Informationen aus den Sicherheitsdatenblättern [6] zur Verfügung standen. Demnach setzt sich das Eindringmittel aus Fettsäureester (Kohlenwasserstoff) und dem Diazo-Farbstoff Solvent Red 164 (Kohlenwasserstoff-Stickstoff-Verbindung) zusammen. Der Reiniger besteht aus Ethanol und der Entwickler besteht aus einer Suspension aus anorganischen Feststoffen mit Ethanol. Reiniger und Entwickler kommen aus der Spraydose (Treibmittel: Propan, Butan). Kritisch für die Verunreinigung der Bauteile ist nur das Eindringmittel wegen seiner Kriecheigenschaften.

Andere Prüfmittel wurden nicht getestet.

3.5 Endreinigungsverfahren

Nach der Durchführung der PT wurden die Proben jeweils auf folgende unterschiedliche Weise gereinigt:

- A) Reiniger U87 und Lappen, Kryostrahlen mit CO₂, Trocknen mit heißer Luft, Wischen mit Ethanol
- B) Reiniger U87 und Lappen, Trocknen an Luft
- C) Zwischenreinigung nach dem Eindringvorgang mit Reiniger U87 und Lappen (hier ohne nachträgliches Aufbringen des Entwicklers) – dabei verbleiben üblicherweise Reste des Eindringmittels auf der Oberfläche, insbesondere bei rauen Prüfflächen

Es wird erwartet, dass der Reinigungseffekt bei A) am besten und bei C) am schlechtesten ist.

3.6 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 4 dargestellt. Die Vakuumkammer konnte über äußere Heizbänder bis 150°C geheizt werden. Dies ist die Standardtemperatur, bei der Vakuumkomponenten des W7-X ausgeheizt werden. Da die Wärme hauptsächlich nur über Strahlung zur Probe selbst übertragen wird, ist davon auszugehen, dass die Proben temperatur < 150 °C ist. Dies wurde in Kauf genommen.

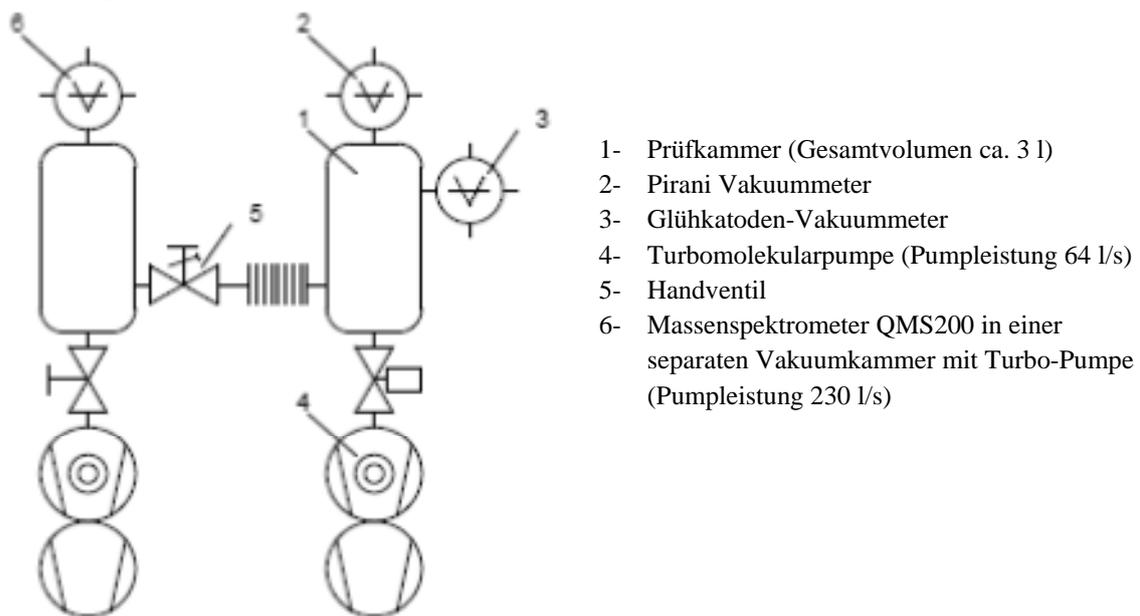


Abb. 4 Prinzipieller Testaufbau

4. Testergebnisse und Interpretation

4.1 Massenspektren bei Raumtemperatur

Um den grundsätzlich negativen Einfluss des Eindringmittels auf die Vakuumtauglichkeit von Bauteilen zu zeigen, wurde die Probe 8 nach einer mangelhaften Reinigung, nach der noch deutlich Reste des Eindringmittels sichtbar waren, im Massenspektrometer untersucht. Deutlich sichtbar sind die Kohlenwasserstoffbruchstücke bei Massenzahlen zwischen 45 und 100 (Abb. 5).

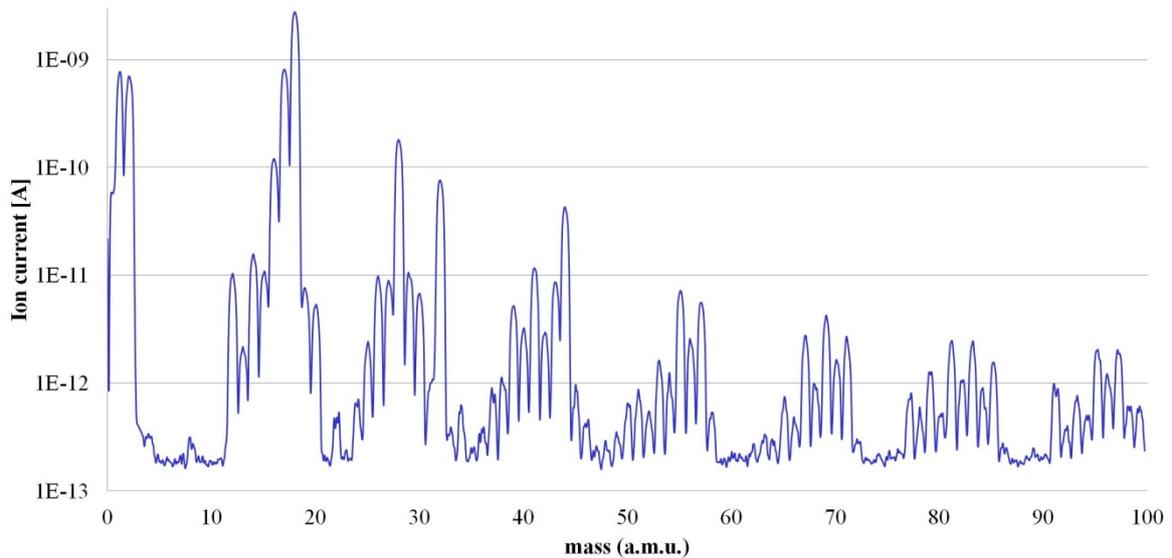


Abb.5 Massenspektrum der Probe 8 mit Verunreinigungen durch Eindringmittel

4.1.1 Vergleich unterschiedlicher Oberflächen

Die Ausgasraten unterschiedlicher PT geprüfter Oberflächen, die auf dieselbe Art und Weise gereinigt wurden, zeigen keine wesentlichen Unterschiede. Alle Probenoberflächen konnten ausreichend gereinigt werden, wobei allerdings die Reinigung rauer Oberflächen wesentlich aufwändiger ist als die glatter.

4.1.2 Vergleich vor und nach dem Ausheizen

Abb. 6 zeigt am Beispiel der Probe 5, die mit Verfahren B (vgl. 2.4) gereinigt wurde, das Massenspektrum vor und nach dem Ausheizen (3,5 h bei 150°C). Deutlich ist im verbesserten Restspektrum erkennbar, dass durch das Ausheizen ein Reinigungseffekt eintritt.

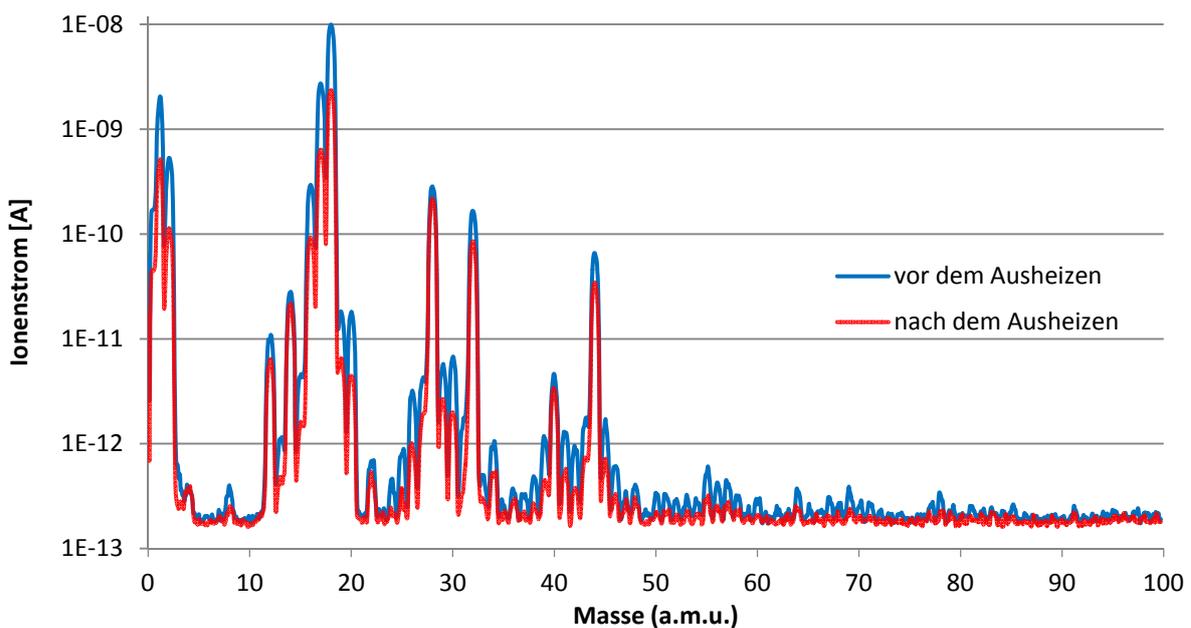


Abb. 6 Probe 5 vor und nach dem Ausheizen

4.1.3 Vergleich unterschiedlicher Reinigungsverfahren

Der Vergleich von Massenspektren von unterschiedlich nach der PT gereinigten Proben (vgl. Reinigungsverfahren gemäß 3.4) zeigt keinen wesentlichen Einfluss der angewandten Reinigungsverfahren auf die Ausgasrate erkennbar. Alle Probenoberflächen konnten schon mit Reiniger und Lappen ausreichend gereinigt werden. Das Kryostrahlen kann die Sauberkeit noch verbessern. Allerdings werden die Oberflächen durch die starke Abkühlung durch Kondenswasser feucht und müssen anschließend getrocknet werden.

4.2 Massenspektren bei erhöhten Temperaturen

Nach der PT ausreichend gereinigte Proben, von denen bei Raumtemperatur keine Kohlenwasserstoffe mehr ausgasen, zeigen bei erhöhten Temperaturen ein anderes Verhalten. Bereits bei 40°C beginnen diese Proben stark auszugasen und dieser Effekt setzt sich bei weiterer Temperaturerhöhung fort. Heizt man aber dann die Proben 3 bis 4 Stunden bei 150°C aus, tritt dadurch ein Reinigungseffekt ein und die Verunreinigungen verschwinden. Dies war sogar bei den Proben 7 und 8 zu beobachten, die (nach gängigen Regelwerken für Schweißnähte) unzulässige PT-Anzeigen zeigten. Auch wenn durch die äußere Heizung der Proben über Strahlung, die Proben selbst nicht die Temperatur der Wände der Vakuumkammer erreichten, war der Reinigungseffekt durch das Ausheizen ausreichend. Abb. 7 zeigt die Massenspektren der Probe 7 bei einer Temperatur der Vakuumkammer von 150°C unmittelbar nach dem Erreichen dieser Temperatur und nach 4 Stunden Ausheizen bei 150°C.

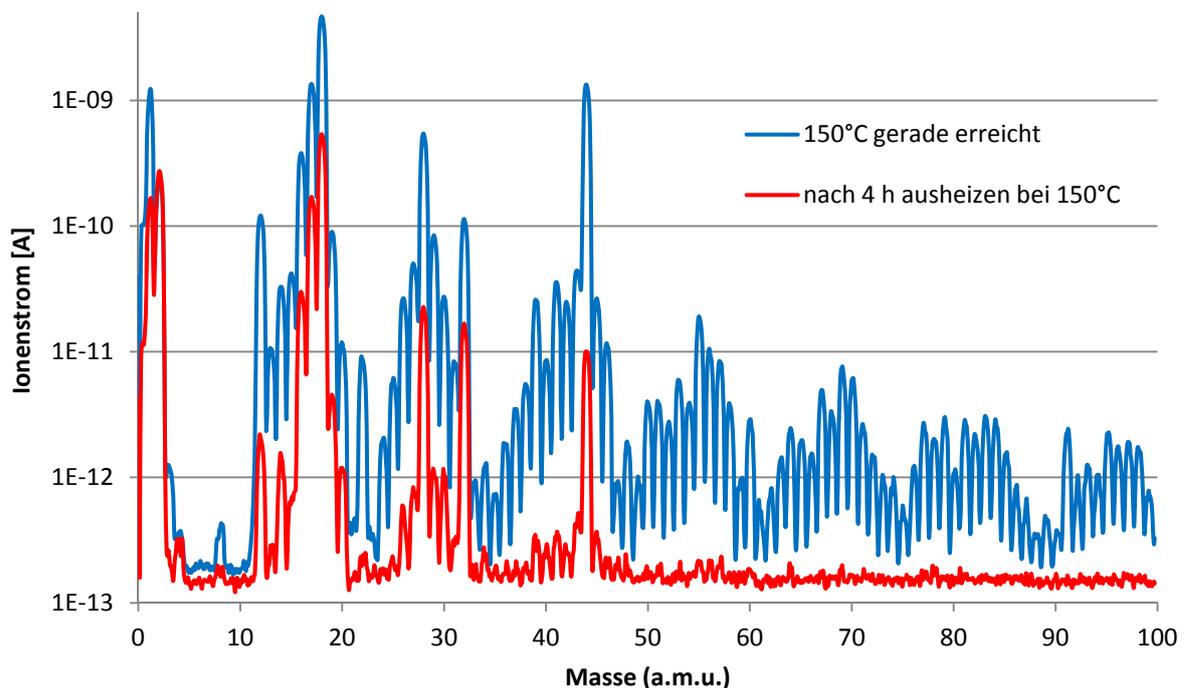


Abb. 7 Massenspektren der gereinigten Probe 7 bei 150°C

5. Schlussfolgerungen für die PT-Anwendung an Vakuumbauteilen des W7-X

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass das PT-Verfahren zur Prüfung von Vakuumbauteilen am W7-X grundsätzlich anwendbar ist. Folgende Hinweise sind zu beachten:

- Die Bauteile sollten in Bezug auf die Prüffläche eine möglichst einfache Geometrie haben. Auf keinen Fall dürfen Spalte oder Öffnungen vorhanden sein, in die das Eindringmittel gelangen und nicht mehr entfernt werden kann.
- Schweißnähte mit Dichtfunktion müssen vor der PT-Anwendung Leck getestet werden, damit ausgeschlossen ist, dass das Eindringmittel eventuell vorhandene Lecks verschließt.
- Vereinzelt kleine Anzeigen die im Zulässigkeitsbereich gängiger Regelwerke liegen (z.B. DIN EN 23277 [7], Zulässigkeitsgrenze 1 oder AD2000 HP 5/3 [8]) können belassen werden. Größere Anzeigen, die eine größere Menge Eindringmittel einschließen, sollten ausgeschliffen und repariert werden.
- Eine gründliche Nachreinigung ist erforderlich. Allerdings reicht dafür offensichtlich schon die gründliche Reinigung mit Ethanol und Lappen bis keine Rückstände mehr sichtbar sind.
- Im Vergleich zu MAG Schweißnähten sind WIG Schweißnähte wegen ihrer feineren Oberfläche grundsätzlich besser für PT geeignet und lassen sich anschließend einfacher reinigen. Wenn PT vorgesehen ist, sollte WIG als Schweißverfahren gewählt werden.
- PT-geprüfte Bauteile sollten nach der Reinigung in einer Vakuumkammer bei mindestens 150°C ausgeheizt werden. Für einfache Bauteile reichen dafür wenige Stunden. Es muss durch gleichmäßiges Ausheizen aller Flächen sichergestellt werden, dass sich keine Kohlenwasserstoffe auf kalten Flächen niederschlagen.
- Es wurde hier nur ein spezielles Prüfmittel untersucht. Andere Prüfmittel können ein abweichendes Verhalten zeigen und sollten vor der Anwendung an Vakuumkomponenten auf ähnliche Weise untersucht werden.

Referenzen

- [1] T. Klinger, C. Beidler, J. Boscary, H.S. Bosch, A. Dinklage, P. Helander, H. Maaßberg, T.S. Pedersen, T. Rummel, F. Schauer, L. Wegener, R. Wolf, Wendelstein 7-X Team: Towards Assembly Completion and Preparation of Experimental Campaigns of Wendelstein 7-X in the Perspective of a Stellarator Path to DEMO, 27th SOFT 2012, Liège
- [2] D. Hartmann, Wendelstein 7-X Team: Building a large Cryogenic Device – Experience from Wendelstein 7-X, 26th SOFT 2010, Porto
- [3] Reinhard Vilbrandt, W7-X Team, Quality assurance during assembly of Wendelstein 7-X, Fusion Engineering and Design, Volume 86, Issues 6–8, October 2011, Pages 655-658, ISSN 0920-3796
- [4] M. Schröder, C. Biedermann, R. Vilbrandt: On the applicability of dye penetrant tests on vacuum components – allowed or forbidden?, Fusion Engineering and Design, available online 29 December 2012, ISSN 0920-3796, 10.1016/j.fusengdes.2012.11.019
- [5] DIN EN 571-1: Zerstörungsfreie Prüfung, Eindringprüfung, Allgemeine Grundlagen
- [6] Sicherheitsdatenblatt – NORD-TEST Kontrastrot U88
- [7] DIN EN 23277: Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Eindringprüfung von Schweißverbindungen - Zulässigkeitsgrenzen
- [8] AD2000 HP 5/3: Herstellung und Prüfung der Verbindungen – Zerstörungsfreie Prüfung der Schweißverbindungen