

Fakultät für Physik

Physikalisches Praktikum P2 für Studierende der Physik

Versuch P2-41, 42, 44 (Stand: März 2023)

Raum F1-19

Vakuum

Motivation

Die Abwesenheit von Materie im Raum bezeichnen wir als [Vakuum](#). Die Vorstellung von Raum ohne Materie wurde sowohl von Platon, also auch von Aristoteles, der eine "Abneigung der Natur gegen das Leere" postulierte, die später als *horror vacui* bekannt wurde, abgelehnt. Auch Descartes, der Namensgeber unseres kartesischen Koordinatensystems, war davon überzeugt, dass es keinen materiefreien Raum geben könne. Die Überzeugungen dieser Autoritäten der frühen Wissenschaft wurden nur mühsam durch Experimente im Laufe der Renaissance widerlegt. Sie wirkten noch bis in die Neuzeit und sorgten für Aufsehen über die Ausgänge des Michelson-Morley oder des Rutherford-Experiments.

Das erste von Menschen geschaffene Vakuum ist 1644 von [Evangelista Torricelli](#) überliefert. Populär wurden die 1657 publikumswirksam von [Otto von Guericke](#) in Szene gesetzten Experimente mit den evakuierten [Magdeburger Halbkugeln](#). Noch bis zum Scheitern des Michelson-Morley Experiments war man von der Existenz eines allumfassenden Äthers überzeugt, in dem sich das Licht ausbreiten sollte. Der Ausgang des Rutherford-Experiments deutete darauf hin, dass sich zwischen dem Atomkern, auf den sich die gesamte Masse des Atoms konzentriert und seiner Hülle im wesentlichen nichts befand. Heute würden wir selbst einen von aller Materie befreiten Raum nicht als "leer" bezeichnen, weil er sowohl elektromagnetische Strahlung, Gravitationswellen, als auch allgemeine Quantenfluktuation beinhalten kann, die z.B. durch den [Casimir-Effekt](#) messbar sind. Im bekannten Universum gibt es kein vollständiges Vakuum.

Heutzutage ist das Vakuum vor allem von technischer Bedeutung. Es schafft wichtige Voraussetzungen in Industrie und Technik, zur Konservierung von Lebensmitteln und in der Forschung. Man unterscheidet zwischen Grob-, Fein-, Hoch- und Ultrahochvakuum. Im interplanetaren Raum herrscht ein Vakuum mit Drücken von $< 10^{-18}$ mbar vor. In der [Strahlröhre des LHC](#) am CERN in Genf oder im Vakuumtank des [KATRIN Experiments](#) herrschen Vakua mit Drücken von $< 10^{-10}$ mbar vor.

Dieser Versuch bietet Ihnen Einblicke in die Prinzipien der Vakuumerzeugung und -vermessung. Sie lernen mit einer Vakuumapparatur umzugehen und einfache Experimente im Vakuum durchzuführen.

Lernziele

Wir listen im Folgenden die wichtigsten **Lernziele** auf, die wir Ihnen mit dem Versuch **Lichtgeschwindigkeit** vermitteln möchten:

- Sie lernen den Umgang mit zwei wichtigen Pumpen zur Erzeugung von Fein- ($10^0 - 10^{-3}$ mbar) und Hochvakua ($10^{-3} - 10^{-7}$ mbar).
- Sie erzeugen Hochvakua und führen verschiedene Versuche darin durch.
- Sie untersuchen Gasentladungen und die Durchschlagfestigkeit zweier Kondensatorkugeln bei variierendem Luftdruck und vergegenwärtigen sich den jeweiligen Zusammenhang mit der mittleren freien Weglänge beschleunigter Ladungen.
- Sie überprüfen den Leitwert eines Metallrohrs und die Saugleistung der verwendeten Pumpen.
- Als technische Anwendung dampfen Sie bei variierendem Druck Indium auf eine Plexiglasplatte auf.

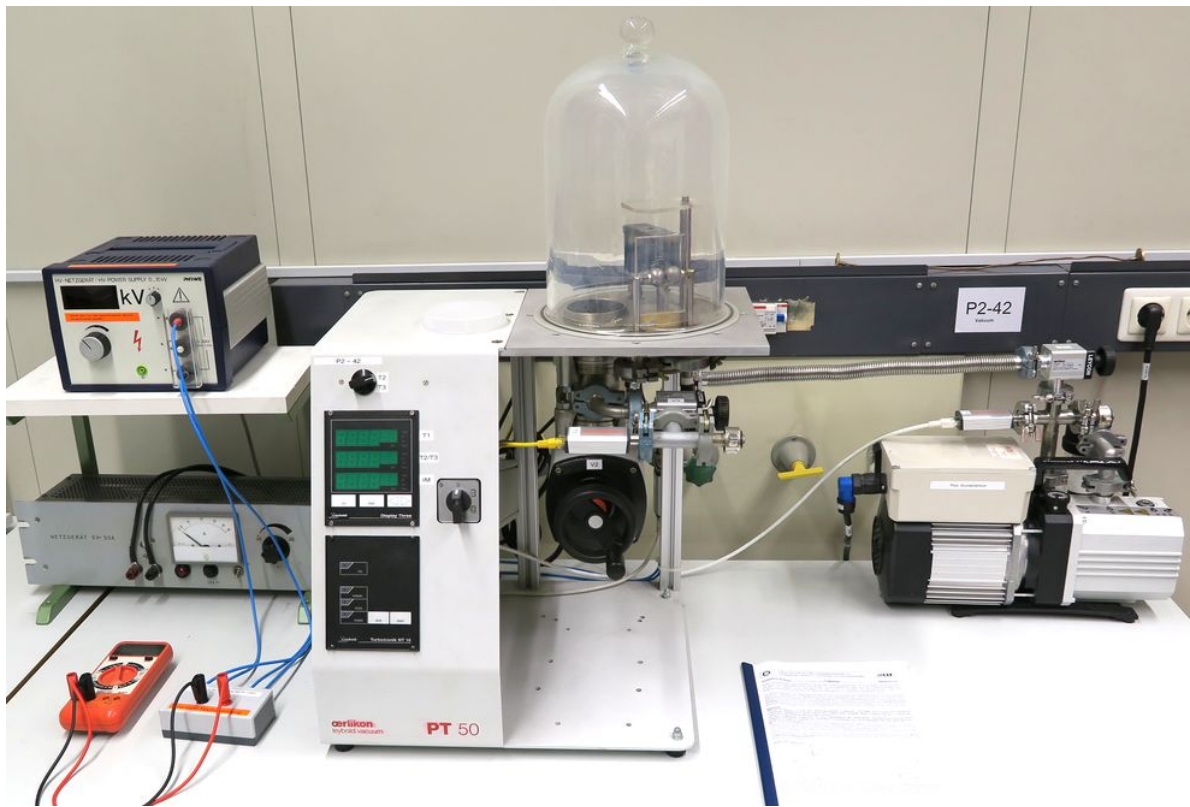
Versuchsaufbau

Die wichtigsten Elemente des Versuchsaufbaus sind:

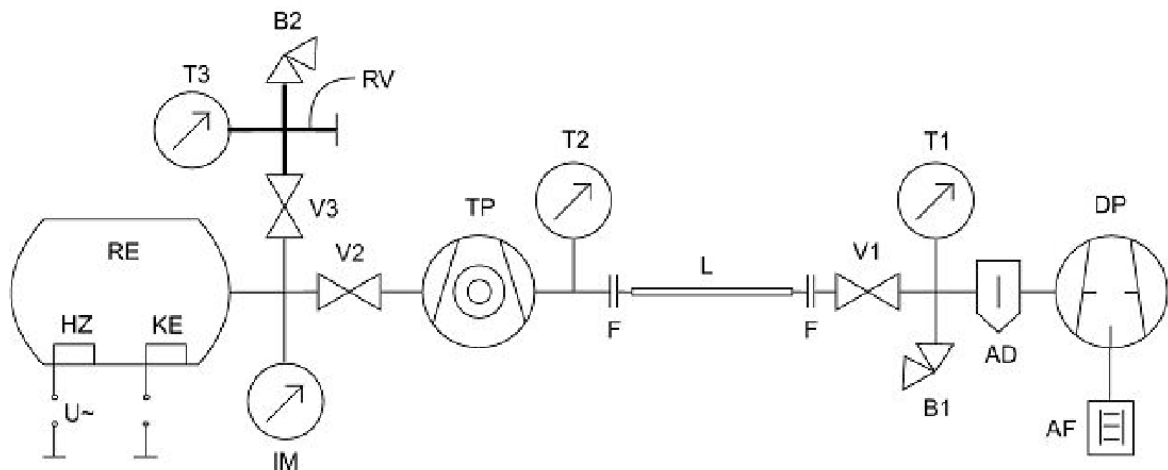
- Eine **Drehschieberpumpe** (DSP, Saugvermögen $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ für die Versuchsaufbauten 41 und 42, $1,6 \text{ m}^3/\text{h}$ für Versuchsaufbau 44).
 - Eine **Turbomolekularpumpe** (TMP, Saugvermögen $\geq 30 \text{ l/s}$, 7200 min^{-1} , ca. 2 min Hochlaufzeit).
 - Drei **Wärmeleitungs-Vakuummeter** (T1–T3, Messbereich: $(5 \times 10^{-4} - 10^3) \text{ mbar}$).
 - Ein **Ionisations-Vakuummeter** (IM, Messbereich: $(10^{-9} - 10^{-2}) \text{ mbar}$).
 - Metallwellschläuche mit den folgenden Abmessungen:
 - $l = 510 \text{ mm}$, $d = 28 \text{ mm}$ (Apparatur 41),
 - $l = 440 \text{ mm}$, $d = 21 \text{ mm}$ (Apparatur 42),
 - $l = 530 \text{ mm}$, $d = 23 \text{ mm}$, (Apparatur 44).
 - Ein dünnes Metallrohr mit $d = 2 \text{ mm}$
 - Eine Glasglocke (mit 220 mm Durchmesser und 250 mm Höhe) auf einem Metallteller mit Gummidichtung bildet den *Rezipienten* (RE) in dem verschiedene Versuche durchgeführt werden können. Darin befinden zwei elektrisch aufladbare Kugelelektroden (KE) und ein elektrisch direkt beheizbares Verdampferschiffchen (HZ). Der RZ hat jeweils das Volumen:
 - $V_{\text{RZ}} = 10,1 \text{ l}$ (Apparatur 41),
 - $V_{\text{RZ}} = 10,0 \text{ l}$ (Apparatur 42),
 - $V_{\text{RZ}} = 9,2 \text{ l}$ (Apparatur 44),
- Die Volumina der Gesamtapparaturen sind jeweils um 0,5 l größer.
- Das RV beträgt für alle Apparaturen $V_{\text{RV}} = 0,034 \text{ l}$.

Die KE sind an ein Netzgerät für Spannungen bis zu 10 kV angeschlossen. Die Spannung zwischen den KE bei der Gasentladung kann mit einem Digital-Multimeter abgelesen werden. Beachten Sie, dass dem Digital-Multimeter ein Widerstand von $10 \text{ M}\Omega$ vorgeschaltet ist, die Anzeige auf dem Gerät ist daher durch 10 zu teilen, um die tatsächliche Spannung zu erhalten.

Das HZ ist mit einer Abschirmung mit Lochblende und einer von außen schwenkbaren Plexiglasplatte versehen. Es wird mit einem Netzgerät für 6 V und 50 A Wechselstrom beheizt.



Skizze der Apparatur:



DP Drehschieberpumpe; AF Auspuff-Filter; (AD Adsorptionsfalle); T1, T2, T3 Wärmeleitvakuummeter (Thermovac-Meßsonde); B1, B2 Belüftungsventil; V1, V2, V3 Vakuumventil; L austauschbare Verbindungsleitung; TP Turbomolekularpumpe (TURBOVAC); IM Ionisationsvakuummeter (Penning-Transmitter); RE Rezipient; RV Referenzvolumen; HZ wechselstrombeheiztes Verdampferschiffchen; KE mit Hochspannung versorgte Kugelelektroden.

Wichtige Hinweise

- Obwohl in diesem Versuch eine splittergeschützte Glasglocke verwendet wird, kann die evakuierte Glasglocke implodieren. Zum Schutz Ihrer Augen müssen Sie daher beim Arbeiten an der evakuierten Apparatur eine **Schutzbrille** getragen.
- Die hier aufgebaute Apparatur ist sehr empfindlich. Bei fehlerhafter Handhabung können teure Schäden entstehen, weshalb die einzelnen

Versuchsteile **nur nach Rücksprache mit dem Betreuer** gestartet werden dürfen.

- Beim Arbeiten am Rezipienteninneren decken Sie die Pumpenöffnung mit der bereitliegenden Plastikkappe ab, um Verunreinigungen zu vermeiden. Vor dem Verbinden von Bauteilen mit Hilfe von Dichtungsringen sollten Sie die Ringe und Dichtflächen ebenfalls **sorgfältig reinigen**.
- Die **Turbomolekularpumpe** darf nur bei einem Vorvakuumdruck von weniger als 0,1 mbar eingeschaltet werden. Die Apparatur darf erst dann belüftet werden, wenn der Rotor nach dem Abschalten völlig zum Stillstand gekommen ist. Dies dauert einige Minuten. Ein Lufteinbruch solange der Rotor sich noch bewegt kann die Pumpe zerstören.

Durchführung

Vorbereitung

Verschaffen Sie sich einen Überblick über die Apparaturen. Verfolgen Sie die Leitungen und identifizieren Sie die verwendeten Elemente aus der obigen Skizze. Sie sollten den Versuchsaufbau wie folgt vorfinden:

- Alle Apparaturen sind bei Atmosphärendruck belüftet.
- Das HZ ist mit Indium bestückt.
- Die Glasglocke wurde von alten Aufdampfbelägen gereinigt.

Die drei Versuchsaufbauten sind fast gleich; Apparatur 44 ist als einzige mit der Gasentladungsröhre für Aufgabe 1 ausgestattet, dafür fehlt dort die Möglichkeit zur Messung der Überschlagsfestigkeit für Aufgabe 6.

Aufgabe 1: Gasentladung

Diesen Versuch sollten alle Praktikumsteilnehmer:innen an Apparatur 44 durchführen. Evakuieren Sie den Rezipienten und die Gasentladungsröhre gemeinsam mit Hilfe der DSP (Ventile V1 und V2 öffnen). Die TMP bleibt für diesen Versuchsteil außer Betrieb. Das Hochspannungsgerät zur Erzeugung der Gasentladungen sollte zu jedem Zeitpunkt eingeschaltet sein. Senken Sie den Druck kontinuierlich, bis die Gasentladung erlischt. Skizzieren und beschreiben Sie die Gasentladung in Abhängigkeit vom Gasdruck.

Schließen Sie nach dieser Aufgabe das Ventil zur Gasentladungsröhre für alle folgenden Aufgaben.

Lösung:

Sie können Ihr Protokoll direkt in dieses Dokument einfügen. Wenn Sie dieses Dokument als Grundlage für ein [Jupyter notebook](#) verwenden wollen können Sie die Auswertung, Skripte und ggf. bildliche Darstellungen mit Hilfe von [python](#) ebenfalls hier einfügen. Löschen Sie hierzu diesen kursiv gestellten Text aus dem Dokument.

Aufgabe 2: Strömungsleitwert eines Metallrohrs

Bei der Verbindungsleitung L in der obigen Skizze handelt es sich um einen Metallwellschlauch. Tauschen Sie diesen gegen das bereitliegende etwa gleichlange Metallrohr mit einem Innendurchmesser von $d = 2 \text{ mm}$ aus. Zeichnen Sie fünf Minuten lang etwa alle fünf Sekunden den zeitlichen Verlauf des Drucks jeweils bei T1 und T2 auf. Bestimmen Sie den Leitwert eines Metallrohres und diskutieren Sie Ihr Ergebnis.

Schalten Sie nach der Messung die DSP ab, belüften Sie den RZ und tauschen Sie das Metallrohr wieder gegen den Metall-Wellschlauch aus.

Lösung:

Sie können Ihr Protokoll direkt in dieses Dokument einfügen. Wenn Sie dieses Dokument als Grundlage für ein [Jupyter notebook](#) verwenden wollen können Sie die Auswertung, Skripte und ggf. bildliche Darstellungen mit Hilfe von [python](#) ebenfalls hier einfügen. Löschen Sie hierzu diesen kursiv gestellten Text aus dem Dokument.

Aufgabe 3: Saugvermögen der DSP

Evakuieren Sie die Apparatur mit Hilfe der DSP. Nehmen Sie dabei den zeitlichen Verlauf des Drucks p bei T1 auf. Tragen Sie p geeignet als Funktion der Zeit t auf und bestimmen Sie das mittlere Saugvermögen S .

Schalten Sie die DSP nach der Messung ab.

Lösung:

Sie können Ihr Protokoll direkt in dieses Dokument einfügen. Wenn Sie dieses Dokument als Grundlage für ein [Jupyter notebook](#) verwenden wollen können Sie die Auswertung, Skripte und ggf. bildliche Darstellungen mit Hilfe von [python](#) ebenfalls hier einfügen. Löschen Sie hierzu diesen kursiv gestellten Text aus dem Dokument.

Aufgabe 4: Saugvermögen der TMP

Bestimmen Sie analog zu Aufgabe 3 das Saugvermögen der TMP. Da die TMP bis zur vollen Saugleistung eine Anlaufzeit von ca. 2 min benötigt, sollte sie nicht erst bei sehr niedrigem Druck eingeschaltet werden. Die Apparatur sollte vor Beginn dieses Versuchsteils mindestens bis zu einem Druck von $\approx 0,2$ mbar teilbelüftet sein. Evakuieren Sie die Apparatur dann mit der DSP und schalten Sie bei einem Druck von ≈ 0.08 mbar die TMP zu. Lesen Sie den Druck bei IM ab.

Beachten Sie die Hinweise des Betreuers bzgl. der TMP und diskutieren Sie die physikalischen Hintergründe. Schätzen Sie ab, mit welcher Kraft die Glasglocke auf die Gummidichtung gedrückt wird.

Lassen Sie die TMP für den nächsten Versuchsteil eingeschaltet.

Lösung:

Sie können Ihr Protokoll direkt in dieses Dokument einfügen. Wenn Sie dieses Dokument als Grundlage für ein [Jupyter notebook](#) verwenden wollen können Sie die Auswertung, Skripte und ggf. bildliche Darstellungen mit Hilfe von [python](#) ebenfalls hier einfügen. Löschen Sie hierzu diesen kursiv gestellten Text aus dem Dokument.

Aufgabe 5: Statisches Kalibrierungsverfahren

Bei diesem Versuchsteil führen Sie, unter Anwendung des Gesetzes von [Boyle-Mariotte](#), ein einstufiges, statisches Kalibrierungsverfahren durch, wie man es z.B. zur Kalibration von Druckmessgeräten verwenden könnte. Gehen Sie hierzu iterativ wie folgt vor:

In der Ausgangssituation sollte V3 geschlossen, B2 geöffnet und der RZ mit Hilfe der DSP und der TMP evakuiert sein. Schließen Sie V2 bei einem Druck von $p < 10^{-4}$ mbar und trennen Sie damit den RZ vom Rest der Apparatur ab. Sie können die beiden Pumpen daraufhin abschalten.

1. Schließen Sie B2. Öffnen Sie daraufhin V3 und lesen Sie den sich einstellenden Druck bei T3 ab.
2. Schließen Sie V3 und öffnen Sie daraufhin B2 damit sich im kleineren Referenzvolumen (RV in der Skizze) erneut Atmosphärendruck einstellt.

Wiederholen Sie diesen Vorgang beginnend mit "1." solange bis sich im RZ ein Druck von $p \approx 80$ mbar einstellt. Skizzieren Sie den Druckverlauf als Funktion der durchgeführten Iterationen und bestimmen Sie das Expansionsverhältnis dieses Expansionssystems.

Lösung:

Sie können Ihr Protokoll direkt in dieses Dokument einfügen. Wenn Sie dieses Dokument als Grundlage für ein [Jupyter notebook](#) verwenden wollen können Sie die Auswertung, Skripte und ggf. bildliche Darstellungen mit Hilfe von [python](#) ebenfalls hier einfügen. Löschen Sie hierzu diesen kursiv gestellten Text aus dem Dokument.

Aufgabe 6: Elektrische Durchschlagfestigkeit

Bei dieser Aufgabe bestimmen Sie die elektrische Durchschlagfestigkeit der KE als Funktion des Umgebungsdrucks in Luft. Diese Aufgabe kann nur an den Apparaturen 41 und 42 durchgeführt werden. Schalten Sie hierzu zunächst die TMP aus und evakuieren Sie den RZ nur mit Hilfe der DSP. Schließen Sie nach Erreichen des gewünschten Drucks jeweils V1, so dass der Druck im RZ während der sich anschließenden Messung konstant bleibt.

Beginnen Sie mit der belüfteten Apparatur bei Atmosphärendruck und erhöhen Sie die Spannung zwischen den KE bis zur Entladung. Evakuieren Sie daraufhin den RZ bis auf halben Atmosphärendruck. Erhöhen Sie die Spannung bis zur Entladung. Wiederholen Sie diese Vorgehensweise bis Sie einen Druck von $p \approx 0,05$ mbar erreicht haben.

In diesem Druckbereich wird es zunehmend schwieriger den Druck im RZ konstant zu halten. Um leichter und schneller an weitere Messwerte zu gelangen, evakuieren Sie nun zusätzlich und ohne Unterbrechung mit der TMP bis zu einem Druck von $p \approx 2 \times 10^{-4}$ mbar. Schalten Sie die TMP aus und schließen Sie V2. Der Druck im RZ wird nun von allein steigen. Nehmen Sie sobald wie möglich (für $U \leq 9$ kV) weitere Messwerte auf. Die Messreihe endet, wenn ein Druck von $p \approx 0,05$ mbar erreicht ist.

Diskutieren Sie warum sich der Druck ab einem bestimmten Druckbereich nicht mehr genau einstellen lässt und warum er bei sehr kleinen Werten kontinuierlich steigt. Beschreiben, skizzieren und diskutieren Sie das Ergebnis der Messung und die Art der Gasentladung die Sie in den unterschiedlichen Druckbereichen beobachten.

Lösung:

Sie können Ihr Protokoll direkt in dieses Dokument einfügen. Wenn Sie dieses Dokument als Grundlage für ein [Jupyter notebook](#) verwenden wollen können Sie die Auswertung, Skripte und ggf. bildliche Darstellungen mit Hilfe von [python](#) ebenfalls hier einfügen. Löschen Sie hierzu diesen kursiv gestellten Text aus dem Dokument.

Aufgabe 7: Aufdampfen von Indium

Bei dieser Aufgabe dampfen Sie bei drei verschiedenen Drücken jeweils eine Indium-Schicht durch eine Kreisblende auf eine schwenkbare Plexiglasplatte auf. Es soll jeweils ein Fleck bei einem Druck von

- $p \lesssim 8 \times 10^{-5}$ mbar,
- $p \approx 10^{-4}$ mbar und
- $p \approx 10^{-3}$ mbar aufgedampft werden.

Beobachten den benötigten Heizstrom und diskutieren Sie die Randschärfe der aufgedampften Flecken. Gehen Sie wie dabei folgt vor:

- Evakuieren Sie den RZ mit der TMP;
- dampfen Sie den ersten Fleck bei $p \lesssim 8 \times 10^{-5}$ mbar auf;
- schließen Sie V2;
- dampfen Sie den zweiten Fleck bei $p \approx 10^{-4}$ mbar auf;
- schalten Sie die TMP ab und lassen Sie den Druck ansteigen;
- bei Erreichen von $p \approx 10^{-3}$ mbar dampfen Sie den dritten Fleck auf.

Achtung: Die verfügbare Heizleistung reicht aus, um das HZ vollständig zu zerstören! Der Heizstrom darf daher erst langsam(!) hochgeregelt werden, sobald das gewünschte Vakuum für den ersten Fleck erreicht ist. Beobachten Sie das HZ beim Hochregeln des Heizstroms. Es soll zwar glühen, aber nicht schmelzen.

Lösung:

Sie können Ihr Protokoll direkt in dieses Dokument einfügen. Wenn Sie dieses Dokument als Grundlage für ein [Jupyter notebook](#) verwenden wollen können Sie die Auswertung, Skripte und ggf. bildliche Darstellungen mit Hilfe von [python](#) ebenfalls hier einfügen. Löschen Sie hierzu diesen kursiv gestellten Text aus dem Dokument.

Wiederherstellung der Apparatur

Stellen Sie nun die Apparatur für Ihre Nachfolger:innen wieder her:

- Belüften Sie die Apparatur;
- reinigen Sie die Plexiglasplatte und die Glasglocke von eventuellen Aufdampfbelägen;
- bestücken Sie das HZ mit etwas Indium (lassen Sie die Menge vom Betreuer überprüfen); und
- setzen Sie die Glocke wieder auf den Dichtungsring.

