

Abschlussbericht zum Vorhaben
**„Entwicklung eines automatisch
schaltenden Radonexposimeters zur
Verbesserung und Vereinfachung der
Personen und Ortsdosimetrie im
Zusammenhang mit Radon“**
(FP476A / FP476B)

Laufzeit

01.12.2021 – 31.10.2023

Bericht vom 31.01.2024

Naber, Matthiesen, Bauer, Peters

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Kurzfassung deutsch.....	4
Kurzfassung englisch	5
1. Problemstellung	6
Radon	6
Rechtliche Grundwerte - Referenzwerte.....	6
Messmethoden	7
Vorarbeiten	9
2. Forschungszweck/-ziel	9
3. Methodik.....	12
Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinition.....	12
Arbeitspaket 2: Produktentwicklung:	12
Gehäuse und Verschluss.....	12
Bewegungserkennung	13
Platinenentwicklung	13
Programmierung.....	13
Gesamtsystem Aufbau, Tests und Optimierung (Meilenstein)	14
Arbeitspaket 3:.....	14
Vorbereitung Testphasen	14
Testphase unter Laborbedingungen.....	14
Testphase mit Probanden.....	14
Wissenschaftlicher Abschlussbericht	14
4. Ergebnisse des Gesamtvorhabens	15
Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinition.....	15
Arbeitspaket 2: Produktentwicklung	16
Gehäuse und Verschluss.....	16
Zuverlässigkeitsanalysen	21
Bewegungserkennung	25
Platinenentwicklung	25
Programmierung.....	26
Gesamtsystem Aufbau, Tests und Optimierung.....	26
Arbeitspaket 3: Testphase mit Radon.....	29
Vorbereitung Testphasen	29
Testphase unter Laborbedingungen.....	29
Überprüfung Bewegungsmodus	37
Testphase mit Probanden.....	40

5. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen.....	40
6. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen	41
7. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan	42
8. Anhang/Anhänge	43
Verschluss Konzeptfindungsphase Kreativitätsworkshop	43
Literaturverzeichnis	45
Unterschriftenseite verpflichtend für Kooperationsprojekte.....	47

Kurzfassung deutsch

Das Forschungsprojekt "Entwicklung eines automatisch schaltenden Radonexposimeters „au.raex“ zur Verbesserung und Vereinfachung der Personen-, und Ortsdosimetrie im Zusammenhang mit Radon, konzentriert sich auf die Messung von Alpha-Strahlung, die beim Zerfall des radioaktiven Gases Radon freigesetzt wird. Da herkömmliche Dosimeter hier nicht zum Einsatz kommen können und das aktuell praktizierte Verfahren oft zu Über- oder Unterschätzungen der Radonexposition führt, soll ein neues Exposimeter "au.raex" einen seriennahen Prototypen liefern, welcher die Messung unterbrechen kann, um genauere, zeitaufgelöste Expositionsdaten während der Arbeitszeit zu ermöglichen.

Das Projekt gliedert sich in drei Arbeitspakete: Anforderungsdefinition, Produktentwicklung und Testphase. In Zusammenarbeit mit der Berufsgenossenschaft werden im ersten Arbeitspaket die Anforderungen definiert. Das Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (IPEK) entwickelt daraufhin im zweiten Arbeitspaket den Prototypen. Dieser soll über drei verschiedenen Betriebsmodi, den manuellen, Timer- und Bewegungsmodus verfügen. Die Testphase und somit Arbeitspaket drei, unterteilt in Labortests und Tests mit Probanden/-innen, soll die Funktionalität der verschiedenen Modi überprüfen.

In der Entwicklung des Prototyps wurde ein Verschlusskonzept gefunden und umgesetzt, das sehr robust funktioniert, nicht zu Verklebungen führt und platzsparend gestaltet werden kann. Zusätzlich wird der Luftaustausch in der Messkammer durch das Wirkprinzip eines Kolbens gefördert. Die drei Betriebsmodi wurden in der Programmierung des Mikrocontrollers umgesetzt, unterstützt durch die jeweiligen Sensoren. Für die Bewegungserkennung wird ein triaxialer MEMS-Beschleunigungssensor eingesetzt, der per Interrupts bei einstellbaren Schwellwerten mit dem Mikrocontroller kommuniziert.

Während des Projektzeitraums konnten die Gehäuse der Prototypen erfolgreich auf die Dichtheit überprüft werden. Ebenfalls erfolgreich waren die Tests mit dem manuellen und zeitgesteuerten (Timer) Modus unter Laborbedingungen. Die geplanten Testphasen im Feld zur Überprüfung des bewegungsgesteuerten Betriebsmodus konnten dagegen nicht vollständig abgeschlossen werden.

Die bisherigen Testergebnisse zeigen, dass sowohl der manuelle-Modus, sowie auch der Timer-Modus die erwarteten Radonkonzentrationen gemessen werden konnten. Der Timer-Modus weist in der Praxis allerdings Einschränkungen auf, da durch die Einstellung der festen Öffnungs- und Schließzeiten vor Expositionsbeginn eventuelle Fehlzeiten nicht ohne eine separate Dokumentation berücksichtigt werden können. Des Weiteren ist der Bewegungsmodus noch nicht ausreichend funktionsfähig, um autark betrieben zu werden und verlässliche Werte zu liefern. Das Ziel eines seriennahen Prototyps ist daher noch nicht vollständig erreicht und weitere Entwicklungsarbeit ist erforderlich.

Kurzfassung englisch

The research project "Development of an automatically switching radon exposimeter "au.raex" for the improvement and simplification of personal and local dosimetry in connection with radon, focuses on the measurement of alpha radiation, which is released during the decay of the radioactive gas radon. As conventional dosimeters cannot be used here and the method currently used often leads to over- or underestimates of radon exposure, a new exposimeter "au.raex" is to provide a near-series prototype that can interrupt the measurement to enable more accurate, time-resolved exposure data during working hours.

The project is divided into three work packages: Requirements definition, product development and test phase. In the first work package, the requirements are defined in collaboration with the employers' liability insurance association. The Institute for Product Development at the Karlsruhe Institute of Technology (IPEK) then develops the prototype in the second work package. This is to feature three different operating modes: manual, timer and motion mode. The test phase and thus work package three, divided into laboratory tests and tests with test persons, is intended to check the functionality of the different modes.

During the development of the prototype, a sealing concept was found and implemented that operates very robustly, does not lead to jamming and can be designed to save space. In addition, the air exchange in the measuring chamber is promoted by the operating principle of a piston. The three operating modes were implemented in the programming of the microcontroller, supported by the respective sensors. A triaxial MEMS acceleration sensor is used for motion detection, which communicates with the microcontroller via interrupts at adjustable threshold values.

During the project period, the housings of the prototypes were successfully tested for leaks. The tests with the manual and time-controlled (timer) mode under laboratory conditions were also successful. However, the planned test phases in the field to check the motion-controlled operating mode could not be fully completed.

The test results to date show that both the manual mode and the timer mode were able to measure the expected radon concentrations. However, the timer mode has limitations in the field, as the setting of fixed opening and closing times before the start of exposure means that any missing times cannot be taken into account without separate documentation. Furthermore, the motion mode is not yet sufficiently functional to be operated autonomously and provide reliable values. The goal of a near-series prototype has therefore not yet been fully achieved and further development work is required.

1. Problemstellung

Radon

Radon (^{222}Rn) ist ein radioaktives Edelgas, welches aus der ^{238}U -Zerfallsreihe natürlich entsteht. Es hat eine Halbwertszeit von 3,8 d und zerfällt unter der Aussendung von Alphastrahlung über verschiedene Isotope von Polonium, Bismut und Blei, bis es schließlich zu stabilem ^{206}Pb wird. Die Zerfallsprodukte, später auch Folgeprodukte genannt, sind oft sehr kurzlebig. ^{218}Po , ^{214}Po und ^{210}Po senden bei ihrem Zerfall ebenfalls Alphastrahlung aus, während ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{210}Bi Betastrahlung emittieren.

Radon wird im Boden kontinuierlich aus Radium (^{226}Ra) gebildet, der Radiumgehalt variiert in den verschiedenen Gesteinsschichten. Insbesondere bei Untergrund aus Granit (im Bereich von 100 Bq ^{226}Ra pro kg) oder Gneis (im Bereich von 75 Bq ^{226}Ra pro kg) muss aufgrund eines hohen mittleren Radiumgehaltes mit viel Radon in der Bodenluft gerechnet werden (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2019).

Nach der Entstehung kann sich das radioaktive Edelgas durch Bodenporen und Risse in der Bodenluft verteilen. Die Freisetzung von Radon aus dem Boden in die Atmosphäre ist durch die Durchlässigkeit der Deckschicht bedingt.

Im Freien vermischen sich Radon und seine Folgeprodukte mit der Umgebungsluft, wodurch in der Regel keine hohen Radonaktivitätskonzentrationen entstehen.

Im Gegensatz dazu kann Radon in Innenräumen zu erheblichen Gesundheitsproblemen führen. Die Höhe der Aktivitätskonzentration in Innenräumen ist abhängig von verschiedenen Faktoren. Diese sind unter anderem das Radonvorkommen in der Bodenluft, die bauliche Abdichtung gegenüber dem Baugrund, Druckunterschiede zwischen Gebäudeinnerem und dem Untergrund und die Luftzirkulation im Gebäude. Auch Baustoffe können natürlicherweise Radium enthalten, wodurch Radon in Gebäude gelangen kann.

Die potenzielle Gefahr für den Menschen im Zusammenhang mit Radon entsteht insbesondere durch seine festen Folgeprodukte und nicht durch das radioaktive Edelgas Radon selbst. Die kurzlebigen Zerfallsprodukte lagern sich im respiratorischen System an und zerfallen vollständig, während Radon selbst zum größten Teil sofort wieder ausgeatmet wird [2].

Die beim Zerfall freigesetzte energiereiche Alphastrahlung kann Schäden in den Zellen im Atemtrakt, insbesondere in den strahlensensiblen Zellen des Bronchial-, Bronchiolar- und Alveolarbereich, verursachen [3]. Durch eine fehlerhafte Reparatur dieser Schäden kann Lungenkrebs entstehen. Für kein anderes umweltrelevantes Kanzerogen ist die epidemiologische Datenlage so umfassend und eindeutig wie beim Radon (Strahlenschutzkommission, 2005).

Studien zeigen mit zunehmender Radonkonzentration in der Atemluft und Länge des Zeitraums, in dem Radon eingeatmet wird, ein steigendes Risiko an Lungenkrebs zu erkranken. In einer europäischen Pooling Studie von S. Darby wurde eine lineare Expositions-Wirkungsbeziehung ohne Schwellenwert von etwa 10% pro 100 Bq/m³ Radonkonzentration ermittelt. Dieser Meinung schloss sich auch die deutsche Strahlenschutzkommission (SSK) an. Radon ist demnach nach Rauchen die häufigste Ursache für Lungenkrebs.

Raucher haben ein wesentlich höheres Ausgangsrisiko für Lungenkrebs als Nichtraucher. Ein vergleichbares relatives Risiko durch Radon führt daher zu einem deutlich höheren absoluten Risiko für Raucher, als für Nichtraucher. Über 90% aller Lungenkrebsfälle sind durch das Rauchen verursacht. Von den übrigen Fällen ist der Großteil durch die Wechselwirkung von Rauchen und einer Radonexposition bedingt und nur ein kleiner Anteil durch die Radonexposition alleine.

Der Studie von S. Darby zufolge lassen sich 9% der Todesfälle durch Lungenkrebs und 2% aller Todesfälle durch Krebs in Europa auf Radon zurückzuführen [5].

Rechtliche Grundwerte - Referenzwerte

Am 17. Januar 2014 wurde die Richtlinie 2013/59/Euratom veröffentlicht, welche in Deutschland für eine komplette Neustrukturierung des Strahlenschutzrechts sorgte.

Insbesondere das Thema Radon wird durch die neue Gesetzesgrundlage detaillierter betrachtet als zuvor. Durch den Erlass der neuen Euratomrichtlinie wurde festgelegt, dass alle Mitgliedstaaten einen nationalen Referenzwert festlegen müssen.

In Deutschland wurde dieser Referenzwert auf 300 Bq/m³ für die über das Jahr gemittelte ²²²Rn-Aktivitätskonzentration in der Luft in Aufenthaltsräumen festgelegt. Die Festlegung dieses Wertes erfolgte unter der Berücksichtigung der Gesundheit der Bevölkerung, der praktischen Umsetzung, der Bewältigung von voraussichtlichen Folgen und der Akzeptanz in der Bevölkerung. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) empfiehlt einen Wert von 100 Bq/m³ in Innenräumen, um die Gesundheitsrisiken durch Radon zu senken. Die neue Gesetzgebung schreibt außerdem vor, dass Radonvorsorgegebiete bestimmt werden müssen, durch welche sich neue Anforderungen für die dort ansässigen Arbeitsplätze abzeichnen. Zur Ausweisung dieser Gebiete wurde die regionale Radonverteilung bestimmt. Mit statistischen Methoden wurden dann Prognosen für die Referenzwertüberschreitungen in Innenräumen erstellt. Die Daten wurden in Form von Karten visualisiert und Beginn des Jahres 2021 vom Bundesamt für Strahlenschutz veröffentlicht.

Für Arbeitgeber*innen in den ausgewiesenen Radonvorsorgegebieten besteht nun auch die Pflicht innerhalb von 18 Monaten Messungen der Radonkonzentration an allen Arbeitsplätzen im Keller- oder Erdgeschoss durchzuführen. Wird durch die Messung eine Überschreitung des Referenzwerts festgestellt, ist der Verantwortliche dazu verpflichtet, Maßnahmen zur Radonreduzierung einzuleiten.

Der Erfolg dieser Maßnahmen muss anschließend entsprechend der gesetzlichen Fristen durch eine Messung überprüft werden. Wird der Referenzwert nach der Durchführung der Maßnahmen nicht unterschritten, muss eine Anmeldung des Arbeitsplatzes gemäß §129 StrlSchG bei der zuständigen Behörde und eine Abschätzung der Dosis der Beschäftigten erfolgen.

Neben den Arbeitsplätzen in Radonvorsorgegebieten bestand bereits zuvor eine Messpflicht für alle Arbeitsfelder, die der Anlage 8 des Strahlenschutzgesetzes zugeordnet werden können.

Diese sind untertägige Bergwerke, Schächte und Höhlen, Radonheilstädter und Radonheilstollen, sowie Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung [6].

Im Jahr 2016 waren in Deutschland 374 Personen als beruflich strahlenexponierte Personen aufgrund von natürlich vorkommenden Stoffen am Arbeitsplatz überwacht. Bei 344, also 92% dieser Personen wurde eine messbare Dosis ermittelt.

Im Jahr 2019 wurden bereits 950 Personen an Arbeitsplätzen mit natürlich vorkommenden radioaktiven Stoffen strahlenschutzüberwacht. Die mittlere effektive Dosis lag dabei bei 1,4 mSv pro Person im Jahr [7 9].

Messmethoden

Zur Bestimmung der Radonexposition können verschiedene Messverfahren eingesetzt werden. Für die Ermittlung der Exposition an Arbeitsplätzen werden prinzipiell langfristig integrierende Messverfahren, wie Aktivkohlesammler, Festkörperspuredetektoren oder Elektrete, eingesetzt. Unter passiven integrierenden Messverfahren versteht man Messverfahren ohne direkt ablesbare Anzeige, welche den Durchschnittswert über den Messzeitraum ermitteln. Das Ergebnis der Messung ist erst nach einer separierten Auswertung ersichtlich.

Im Radonlabor am KIT wurde in den 80er Jahren das Karlsruher Kernspurexposimeter entwickelt, welches seither für die Personen- und Ortsdosimetrie eingesetzt wird. Das Karlsruher Exposimeter (Abbildung 1 und Abbildung 2) besteht aus einer Detektorkapsel (Diffusionskammer), einem Fiberglasfilter und einem Makrofolddetektor, der mit einer Mylarfolie beschichtet ist. Das Exposimeter kann in nahezu allen Umgebungsbedingungen eingesetzt werden.



Abbildung 1 Karlsruhe Radonexposimeter mit Expositionsprotokoll

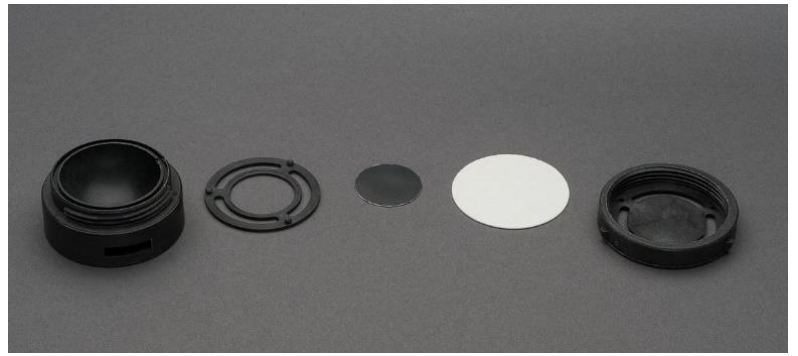


Abbildung 2 Bestandteile Karlsruhe Radonexposimeter

Das Messprinzip basiert auf der Diffusion von Radon in ein definiertes Messvolumen. Durch das Anbringen einer Diffusionsbarriere (Glasfaserfilter) vor dem Kammervolumen wird sichergestellt, dass nur Radon in die Kammer gelangt, und die aerosolgebundenen Folgeprodukte an der Barriere aufgehalten werden.

Radon und die in der Diffusionskammer neu gebildeten Zerfallsprodukte emittieren bei ihrem Zerfall Alphateilchen. Je nach Raumrichtung, in welche die Alphateilchen emittiert werden, treffen sie auf den Makrofoldetektor. Beim Durchgang durch das Material werden die Atome der Polymerkette ionisiert, wodurch latente Schädigungen entlang der Flugbahn des Teilchens im Detektormaterial entstehen. Der Detektor ist empfindlich für energiereiche Masseteilchen, wie beispielsweise Alphateilchen, oder Neutronen mit einer Energie von > 2 MeV.

Die entstandenen Schäden im Detektormaterial können durch eine chemische und elektrochemische Ätzung aufgeweitet werden. Anschließend können die Spuren ausgezählt werden (Abbildung 3, Abbildung 4).

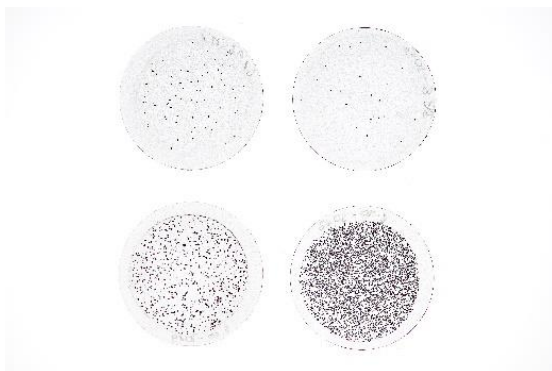


Abbildung 3 Detektoren nach Ätzung



Abbildung 4 Spurenzählsystem

Aus der Spurendichte und der Expositionszeit kann dann die durchschnittliche Aktivitätskonzentration berechnet werden. Weitergehend lässt sich die Exposition an einem Ort oder die Exposition einer Person bestimmen, indem die durchschnittliche Aktivitätskonzentration mit der Expositionszeit verrechnet wird. Mithilfe von Gleichgewichts- und Dosiskonversionsfaktoren lässt sich aus der Exposition einer Person die effektive Dosis berechnen.

Da es sich bei Radon um ein natürliches Radionuklid handelt, welches kontinuierlich in der Luft vorhanden ist, erschwert es die Personendosimetrie zur Betrachtung der beruflichen Exposition durch Radon am Arbeitsplatz im Vergleich zu der Dosimetrie für künstliche Radionuklide. In der Praxis haben sich Verfahren mit Referenzexposimeter etabliert. Das bedeutet, dass jedes Personenexposimeter einem Referenzexposimeter zugeordnet werden muss. Das Referenzexposimeter wird an einem Ort mit einer niedrigen Radonexposition deponiert. An diesem Ort wird auch das Personenexposimeter nach der Arbeitszeit aufbewahrt, sodass der Wert des Personenexposimeters nach der Auswertung um den Anteil des Referenzexposimeters korrigiert werden kann. Dadurch ist es möglich, nur den Anteil der Strahlung zu bestimmen, welchen die Arbeitnehmer*innen während der Ausführung Ihrer Arbeit ausgesetzt waren. Dieses Verfahren bringt jedoch einen relativ hohen organisatorischen Aufwand mit sich, da zwei

Messgeräte benötigt werden, und die Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer die Zeiten, in welchen sie das Exposimeter tragen, notieren müssen.

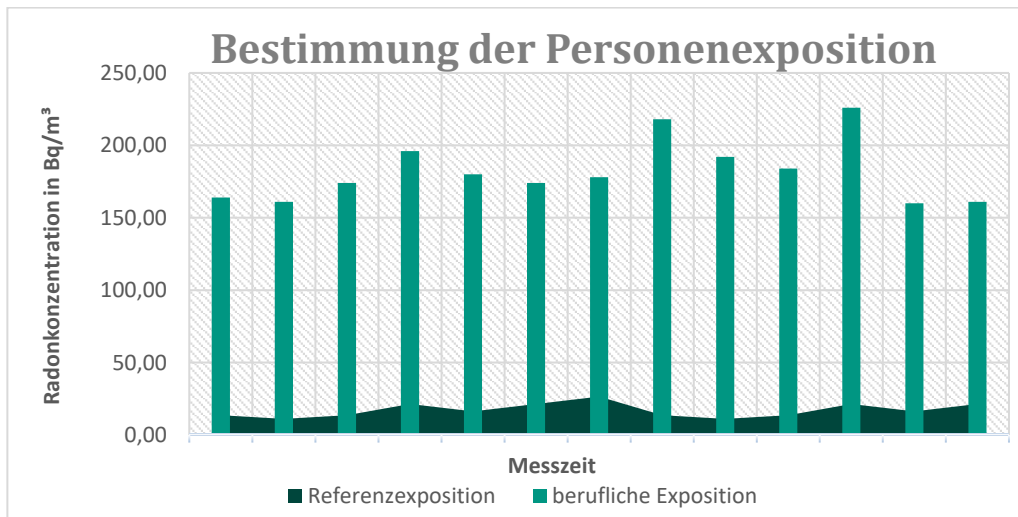


Abbildung 5 Bestimmung der beruflichen Radonexposition -Referenzverfahren

Vorarbeiten

2009 wurde an der Technische Hochschule Mittelhessen (THM) mit der Entwicklung eines automatisch schaltenden Radonexposimeters (au.raex) begonnen. Die Idee war ein Messgerät zu entwickeln, welches die Ermittlung der Personendosis, aber auch die Bewertung der Exposition von Orten im Vergleich zu den bestehenden Verfahren erleichtert und verbessert.

Das Messgerät au.raex zeichnet sich dadurch aus, dass die integrierende passive Radonmessung durch einen Verschluss der Messkammer unterbrochen werden kann (Abbildung 7). Das au.raex basiert auf dem Messprinzip eines Kernspurexposimeters. Die Idee der THM wurde gemeinsam mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) weiterentwickelt und im Rahmen studentischer Arbeiten ein Prototyp entwickelt und getestet (Abbildung 6).



Abbildung 6 Prototyp au.raex

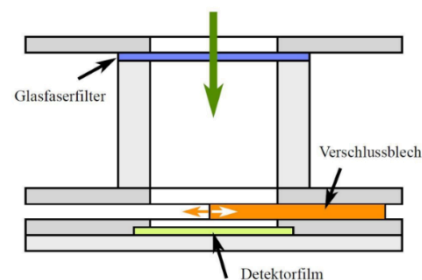


Abbildung 7 Aufbau Messkammer au.raex

Dabei konnten jedoch noch einige Schwachstellen erkannt werden, die einen erhöhten Entwicklungsaufwand darstellten, weshalb das Projekt zunächst keinen Weg in die praktische Anwendung fand. Insbesondere funktioniert die Bewegungserkennung sowie der Verschluss der Messkammer noch nicht.

2. Forschungszweck/-ziel

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines Personendosimeters, welches die Dosimetrie im Zusammenhang mit Radon vereinfacht und verbessert.

In Zusammenarbeit der Stabsstelle für Sicherheit und Umwelt (SUM) mit dem Institut für Produktentwicklung am KIT (IPEK) soll nun ein auf dem aktuellen Stand der Technik basierender Prototyp entwickelt werden, der die Erkenntnisse aus der ersten Testphase berücksichtigt und methodisch so

aufgebaut wird, dass das Potential für zukünftige Serienprodukte, welche tatsächlich in der Arbeitsplatzüberwachung eingesetzt werden können, abgeschätzt werden kann.

Als messtechnische Komponente soll die Kernspurdetektion des Radonlabors beibehalten werden. Darüber hinaus soll das Messgerät, wie auch der Prototyp über drei Messmodi verfügen: Einen *zeitgesteuerten Modus*, einen *bewegungsgesteuerten Modus* und einen *Taster-gesteuerten Modus*. Im zeitgesteuerten Modus können feste Öffnungszeiten der Messkammer einprogrammiert werden. Dadurch kann beispielsweise an festen Arbeitsplätzen die Exposition während der Arbeitszeit beurteilt werden.

Bei kontinuierlich messenden Verfahren kommt es hingegen oft zu einer Fehleinschätzung der Exposition der Arbeitnehmer*innen, da ein Mittelwert aus der Konzentration während Nutzungsphase und der ungenutzten Phase eines Raumes gebildet wird. Mit dem *au.raex* soll hingegen ein realitätsnaher Wert der Expositionszeiten ermittelt werden.

Der bewegungsgesteuerte Modus ist für die Personendosimetrie konzipiert. Bei diesem Modus soll durch einen Bewegungssensor automatisch erkannt werden, wenn ein Mitarbeiter sein Exposimeter trägt. Die Messkammer soll somit beim Antritt der Arbeit automatisiert geöffnet werden und nach Beendigung der Arbeit ebenfalls automatisiert geschlossen werden. Als Bewegungssensor wird ein Beschleunigungssensor oder eine Inertialmesseinheit vorgesehen, die in der Art auch in der Konsumelektronik wie Smartphones verwendet wird.

Im Taster-gesteuerten Modus wird die Messkammer durch das Drücken eines Tasters geöffnet. Dieser dient zur Qualitätssicherung, Wartung, und Prüfung.

Zusätzlich kann das Exposimeter somit auch in Interventionssituationen, zur zusätzlichen Überwachung einzelner Arbeitsschritte, oder als Besuchendosimeter eingesetzt werden und so nur den gewünschten Zeitraum registrieren.

Das Messgerät verfügt außerdem über eine Zeiterkennung, welche die Öffnungsdaten der Messkammer registriert.

Die Zeiten, in der die Messkammer geöffnet ist, soll in allen Modi automatisiert auf einer *micro-SD* Speicherkarte erfasst werden, wodurch die bisher notwendige Dokumentation für die Arbeitnehmer*innen nicht mehr notwendig ist.

Um den Radon-Kernspurdetektor für die Laboruntersuchung aus dem Gehäuse zu entnehmen, wird ein geeigneter Schnellverschluss vorgesehen. Eine Öffnung des Gehäuses durch den Kunden ist nicht vorgesehen.

Um unbefugte Öffnung und Manipulation des Sensors, der Elektronik sowie der aufgezeichneten Öffnungszeiten zu verhindern, wird das Gehäuse versiegelt bzw. verplombt.

Die Energieversorgung erfolgt über eine Lithium-Polymerbatterie, die eine Benutzungsdauer von mehreren Arbeitstagen gewährleistet. Die Batterie kann über ein *Micro-USB* Kabel mit den üblichen 5V aufgeladen werden, sodass die Standard-Handyladegeräte verwendet werden können, was die Alltagstauglichkeit gewährleistet.

Durch die neue Gesetzesgrundlage vergrößert sich das Einsatzgebiet für das Radonexposimeter. Während zuvor nur Messungen an Arbeitsplätzen in untertägigen Bergwerken, Schächten und Höhlen, einschließlich Besucherbergwerken, Radonheilbädern und Radonheilstollen sowie in Anlagen der Wassergewinnung, -aufbereitung und -verteilung durchgeführt werden mussten, sind nun alle Arbeitgeber mit Arbeitsplätzen in Keller- und Erdgeschoss in Radonvorsorgegebieten zur Messung verpflichtet. Die meisten der betroffenen Arbeitgeber*innen und Arbeitnehmer*innen hatten zuvor nie Berührungspunkte mit Radon, weshalb ein einfach handhabbares Messverfahren notwendig ist, das den normalen Berufsalltag nicht zusätzlich erschwert.

Neben den Arbeitsplätzen die der *Anlage 8 des Strahlenschutzgesetzes* zugehören, oder sich in Keller- bzw. Erdgeschoss in Radonvorsorgegebieten befinden, gibt es auch Arbeitsplätze, an welchen aufgrund spezifischer Arbeitsplatzcharakteristika möglicherweise eine potenziell erhöhte Radonbelastung auftreten kann.

Auch in diesen Bereichen würde sich aus präventiver Sicht der Einsatz eines Messgeräts zur Überwachung der Radonexposition während der Arbeitszeit lohnen.

Eine Liste mit Arbeitsplätzen, an welchen eine erhöhte Radonkonzentration auftreten kann, wurde beispielsweise in der Publikation Ermittlung und Quantifizierung der durch die Umsetzung der EURATOM-Direktive von Pflichten betroffene Arbeitsplätze von J. Kemski und A. Kunte erstellt.

Die Liste umfasst Arbeitsplätze in Räumen ohne befestigten Boden, Arbeitsplätze in unterirdischen Räumen bzw. Räumen mit Erdberührung, Arbeitsplätze mit vorgeschriebener Lüftungsanlage, Arbeitsplätze in historischen Gebäuden, Arbeitsplätze mit Materialien mit erhöhter spezifischen Ra-226-Aktivitäten und Anlagen der Wassergewinnung und -aufbereitung außerhalb des Strahlenschutzgesetzes.

Arbeitsplätze ohne befestigten Boden, wie beispielsweise Gewächshäuser oder Stallungen können in landwirtschaftlichen Betrieben, Gartenbaubetrieben, Baumschulen, Gemüse-und/oder Obstanbaubetrieben, Blumen- und Zierpflanzenbau, Gärtnereien und Friedhofsgärtnereien vorhanden sein. Hier kann insbesondere die Ortsdosimetrie mit programmierten Öffnungszeiten für die Arbeitszeit von Interesse sein, da sowohl die tageszeitliche Variation der Radonkonzentration einen großen Einfluss auf die Exposition hat, als auch der Betrieb von Lüftungsanlagen.

An Arbeitsplätzen in unterirdischen Räumen bzw. Räumen mit Erdberührung, wie Tunnelanlagen und U-Bahnschächten, kann im Normalbetrieb davon ausgegangen werden, dass aus Gründen des Arbeitsschutzes stets eine ausreichende Belüftung gegeben sein muss. Besonders im Zusammenhang mit Wartungs-, Reinigungs- und Reparaturarbeiten ist eine Personendosimetrie ohne festen Referenzort jedoch von großem Vorteil.

Weitere potentielle Arbeitsplätze wie Kanalsysteme, Schauhöhlen, militärische Bunkeranlagen, private Bunker, unterirdische Sehenswürdigkeiten, Fels- und Gewölbekeller, unterirdische Speicher sowie viele weitere potentielle Arbeitsplätze, könnten ebenfalls von der programmierbaren Ortsdosimetrie profitieren und so sehr einfach die Expositionsbedingungen an den jeweiligen Arbeitsplätzen ermitteln.

An Arbeitsplätzen, an denen der Betrieb einer Lüftungsanlage zur Absaugung verunreinigter Atemluft aus Gründen des Arbeitsschutzes vorgeschrieben ist, herrschen oft Unterdruckbedingungen, welche die Anreicherung von Radon in der Raumluft begünstigen. Da die Radonkonzentration mit dem Betrieb der Lüftungsanlage in direktem Zusammenhang steht, ist eine Ortsdosimetrie während der Arbeitszeit oder eine individuelle Personendosimetrie unabdingbar, um einen repräsentativen Expositionswert für die Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer zu ermitteln.

Auch in den anderen oben genannten Bereichen, an denen sich die Expositionsbedingungen für einzelne Arbeitsschritte stark unterscheiden oder die Expositionsbedingungen während Arbeits- und nicht Arbeitszeit variieren können, könnte mit dem au.raex eine Möglichkeit geboten werden, eine Messung der Radonkonzentration zu vereinfachen und vor allem repräsentative Werte für die Exposition der Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer zu ermitteln.

3. Methodik

Die Entwicklung des Prototyps erfolgte am Institut für Produktentwicklung (IPEK) gemeinsam mit dem Radonlabor der Stabstelle Sicherheit (SUM) und Umwelt am KIT.

Arbeitspakete	Beginn	1	2	3	4	5	...	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Laufzeit in Monaten
Arbeitspaket 1																		1 Monat (real: 1 Monat)
Vorbereitende Organisationsaufgaben		■																PL+PB SUM
Literaturrecherche		■																PB SUM
Anforderungen, Gesamtsystem		■																PL SUM + PB IPEK
Arbeitspaket 2: Prototypentwicklung																		8 Monate (real: 22 Monate)
Gehäuse + Verschluss			■	■														PB IPEK + Hiwi
Bewegungserkennung				■	■													PB IPEK + Hiwi
Platinenentwicklung				■	■	■	■	■	■									PB IPEK+Hiwi, Dienstleister
Programmierung						■		■	■									PB IPEK + Hiwi
Gesamtsystem Aufbau, Tests, Optimierung										■	■	■	■	■	■			PB IPEK + Hiwi
Arbeitspaket 3: Testphase																		7 Monate (real: 7 Monate)
Detaillierte Konzeption, Probandenaquikse												■	■	■				PB SUM
Testphase in Laborumgebung (Radonfass)													■	■	■			PB SUM+IPEK
Testphase mit Probanden														■	■	■		PB SUM
Datenanalyse																■		PB SUM
Projektabschluss+Abschlussbericht															■			PL+PB SUM+HPK

Abbildung 8: Arbeitsplan mit geplanten (grün) und realen (rot) Zeitauern

Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinition

Im ersten Arbeitspaket erfolgte die Koordinierung des Projektes. Es müssen die Anforderungen an das Gesamtsystem definiert werden. Dazu wurde der aktuelle Stand von Forschung und Technik herangezogen und die Schwachstellen eines bestehenden Prototyps zu analysieren. Gemeinsam mit Berufsgenossenschaften und anderen interessierten Parteien wurden notwendige Funktionen und Limitationen des Messgeräts besprochen. Diese waren beispielsweise die Dichtheit des Verschlusses, die Empfindlichkeit des Bewegungssensors und die Batterielaufzeit des Messgeräts.

Es wurden messbare Anforderungen definiert, die im Rahmen des letzten Arbeitspakets durch laborinterne Tests und Probandenversuche validiert und verifiziert werden können.

Arbeitspaket 2: Produktentwicklung:

Die einzelnen Komponenten des au.raex wurden am IPEK in verschiedenen Phasen entwickelt.

Gehäuse und Verschluss

Das zentrale Element des Gehäuses ist die Radon Messkammer mit dem Verschluss, der elektrisch aktuiert werden muss. Auf Basis der zuvor ermittelten Anforderungen an die Dichtheit und zuverlässiger Funktionsfähigkeit des Verschlusses (kein Verkleben zulässig) wurde ein geeignetes Konzept entwickelt und erprobt. Hierbei wurde die Zuverlässigkeit durch einen robusten Verschlussmechanismus sowie die Minimierung der Reibung durch entsprechende Lagerung berücksichtigt. Dies unterstützt darüber hinaus die Einsparung von Energie, was die Batterielebensdauer verlängert.

Für die Auswahl des Verschlussmechanismus wurden geeignete Konzepte gesammelt und mittels Bewertungsmatrizen sowie morphologischen Kästen bewertet, um die bestmögliche Lösung zu finden. Neben den Mechanismen wurden auch verfügbare Aktoren (Motoren) analysiert und getestet. Sensoren in Form von Endtastern detektieren das korrekte Öffnen und Schließen des Verschlusses. Dieses Signal wird vom später beschriebenen Mikrocontroller ausgewertet und durch LEDs dem Anwender signalisiert. Somit können fehlerhafte Zustände sofort erkannt werden.

Um die Entnahme des Detektors aus der Messkammer für die Laboruntersuchung zu vereinfachen wurde ein Teil des Gehäuses mit einem Schnellverschluss versehen. Um die passenden Geometrien des Schnellverschlusses zu finden erfolgten Parameterstudien, von denen die Vielversprechendsten prototypisch gefertigt und getestet wurden. Der Schnellverschluss wird im Betrieb beim Endanwender mittels eines Siegels oder einer Plombe gegen unbefugte Öffnung abgesichert. Darüber hinaus wird das

komplette Gehäuse mit den Schnittstellen für den Verschluss und die Sensoren sowie übrige Elektronik konstruiert.

Bewegungserkennung

Im nächsten Schritt folgte die Entwicklung des Betriebsmodus der Bewegungserkennung, welche im vorangegangenen Prototyp deutliche Schwachstellen aufwies. Es werden verschiedene MEMS¹ Bewegungssensoren getestet, u.a. triaxiale Beschleunigungssensoren und Inertialmesseinheiten (IMU), die triaxiale Beschleunigungssensoren, Gyrometer und Magnetometer integrieren. Im Antrag waren an dieser Stelle nur Inertialmesseinheiten angedacht, was den Lösungsraum jedoch stark einschränkte. Bei der Bearbeitung wurden deshalb auch zusätzlich Beschleunigungssensoren berücksichtigt. Mittlerweile sind sie in kleiner Form in fast jedem modernen Smartphone zur Bewegungserkennung verbaut, um Schrittzählung durchzuführen oder Gestensteuerung zu ermöglichen. Dies ermöglicht eine große Verfügbarkeit zu günstigen Preisen, was die Serienfertigung begünstigt.

Die Messsignale hängen dabei stark von der Trageweise und Körperhaltung ab und können zwischen Berufsgruppen variieren. Um allgemeingültige Charakteristika zwischen den Berufsgruppen zu erkennen und gleichzeitig geeignete Bewegungssensoren auszuwählen, wurden zunächst 3 verschiedene Sensoren auf Entwicklungsplatinen hinsichtlich Bewegungserkennung, Kommunikation mit dem Mikrocontroller und Energieverbrauch getestet. Mittels Studien wurden typische Arbeitsabläufe für unterschiedliche Berufsgruppen simuliert. Dabei wurden die Messsignale aufgezeichnet und anschließend ausgewertet um die relevanten Charakteristika zu extrahieren und einen Algorithmus zur Bewegungserkennung für den später beschriebenen Mikrocontroller zu programmieren, der den Verschluss zur Öffnung der Messkammer betätigt.

Platinenentwicklung

Die Platinenentwicklung stellte einen hohen Entwicklungsaufwand im Gesamtprozess dar. Zunächst müssen die elektrischen Bauteile neben Aktor (Kap. Gehäuse und Verschluss) und Bewegungssensor (Kap. Bewegungserkennung) ausgewählt werden. Hierbei sind insbesondere Mikrocontroller zu nennen, die die zentrale Informationsverarbeitung und Steuerung übernehmen, sowie Real-Time-Clock für den zeitgesteuerten Modus und das Speichern der Messzeiten, Batteriemanagement zum Laden und Überwachen der Batterie, Speicherkartenslot für das Aufzeichnen der Messzeiten, Schalter für den manuellen Modus und LEDs zur Benutzerinformation. Von jeder Komponente müssen Anschluss- und Randbedingungen verglichen werden, um die Kompatibilität zu gewährleisten. Des Weiteren erfolgte eine Abschätzung und Hochrechnung des Energieverbrauchs, damit eine entsprechende Batteriekapazität ausgewählt werden kann.

Anschließend kann der Schaltplan erstellt werden und das Design der Leiterbahnplatine erfolgen. Der Schaltplan, das Design der Leiterbahnplatine und die Fertigung sowie Bestückung der Platine erfolgte durch einen Dienstleister.

Der in Abbildung 8 dargestellte Mehraufwand ist Ergebnis der Covid 19 bedingten „Chipkrise“ und Lieferverzögerungen durch den Ukraine-Konflikt. Lieferziele von bestellten Halbleitern konnten nicht eingehalten werden, was zu Verzögerungen im Beschaffungsprozess führte.

Programmierung

Für die zentrale Informationsverarbeitung und Steuerung wird ein Mikrocontroller eingesetzt. Für diesen muss ein Programm zur Steuerung der verschiedenen Betriebsmodi, der Kommunikation mit den dafür notwendigen Sensoren (Schalter, Real-Time-Clock, Bewegungssensor, Endtaster des Verschlusses), die Steuerung des Verschlussaktors (Öffnen, Schließen), der Speicherung der Messwerte und die Benutzerinformation mittels LED-Signalen programmiert werden. Insbesondere wird das korrekte Öffnen der Messkammer sowie der Batteriezustand angezeigt.

Die Programmierung erfolgte in der Integrierten Entwicklungsumgebung vom Hersteller des Mikrocontrollers in der Programmiersprache C. Die aus der Platinenentwicklung entstehende Verzögerung der Lieferungen und teilweise verspätetes Eintreffen von Teillieferungen hatte auch noch Auswirkungen auf diese Teilaktivität. Die ursprünglich knapp geplante Programmierung und erste Tests der

¹ MEMS: Mikro-Elektromechanische Systeme

unterschiedlichen Controller und Sensoren konnte nicht zeitlich geschlossen durchgeführt werden, sondern wurde immer wieder durch Wartezeiten auf Nachlieferungen unterbrochen.

Gesamtsystem Aufbau, Tests und Optimierung (Meilenstein)

Die einzelnen zuvor beschriebenen Komponenten wurden zum Gesamtsystem zusammengebaut. Es erfolgt das ausgiebige Testen aller 3 Betriebsmodi, bei denen das korrekte Öffnen und Schließen des Verschlusses untersucht wurde. Es wurden in diesem Arbeitspaket noch keine Tests mit Radonexposition vorgenommen, dies erfolgt im anschließenden Arbeitspaket. Dabei werden typische Bedienfehler getestet – eine abschließende Untersuchung auf Bedienfehler kann allerdings erst in der Erprobung im Feld erfolgen. Ein Fokus der Tests war die Bewegungserkennung in allen üblichen Arbeitspositionen. Darüber hinaus wurden Langzeittests zum genauen Ausloten der Batterielebensdauer durchgeführt, um daraus minimale Ladezyklen zu definieren. Auf Basis der Tests wurden Optimierungen am System vorgenommen. In einem Meilenstein zum Abschluss dieses Arbeitspakets wurde das System sowie die Testergebnisse den Projektpartnern vorgestellt.

Arbeitspaket 3: Testphase mit Radon

Vorbereitung Testphasen

Vor der Durchführung der Testphasen erfolgte neben der Akquise der Teilnehmerinnen und Teilnehmer, dem Erstellen von Informationsmaterialien zur richtigen Handhabung des Messgeräts auch die Definition von Vergleichskriterien, um anschließend eine statistische Auswertung der Versuche zu ermöglichen.

Testphase unter Laborbedingungen

Im abschließenden Arbeitspaket 3 soll der Prototyp in zwei Testphasen getestet werden.

In der ersten Testphase wurden in einer Radonexpositionsanlage die messtechnischen Komponenten getestet. Die Exposimeter können für unterschiedlich lange Expositionszeiten unterschiedlich hohen Radonkonzentrationen ausgesetzt werden. In dieser Phase kann neben der Validierung der Dichtheit der verschlossenen Messkammer und der Programmierung der verschiedenen Messmodi, eine Kalibrierung des Messgeräts durchgeführt werden.

Die Versuche können im Radonlabor am KIT durchgeführt werden. Aus Qualitätssicherungsaspekten können zusätzlich an Vergleichsbestrahlungen und Blindexpositionen von akkreditierten Kalibrierlaboratorien teilgenommen werden. Durch die angesprochenen Lieferverzögerungen waren jedoch nicht genügend Prototypen des Gesamtsystems gleichzeitig vorhanden, um dies im Projektzeitraum mit statistischer Sicherheit sinnvoll durchzuführen.

Testphase mit Probanden

In einer zweiten Testphase soll das au.raex unter realen Arbeitsbedingungen getestet werden. In Absprache mit der Berufsgenossenschaft und dem Zuwendungsgeber (DGUV) sollen verschiedenen Gruppen an Probanden definiert werden, die das Messgerät unter typischen Arbeitsbedingungen mit sich führen. Zeitgleich werden die Messungen mit einem Verfahren mit Referenzexposimeter durchgeführt. Es werden verschiedenen Kriterien definiert, an welchen das au.raex mit dem Verfahren mit Referenzexposimeter verglichen wird. Es wird für beide Verfahren das mögliche Fehlerpotential ermittelt. In dieser Testphase kam es zu Abweichungen im Vorgehen die auf Schwierigkeiten in der unbetreuten Nutzung des au.raex sowie unvorhergesehenen Ausfällen zurückzuführen sind. Die genaue Beschreibung der Abweichung sind den folgenden Ergebnis-Teilkapiteln zu entnehmen.

Wissenschaftlicher Abschlussbericht

Nach Abschluss der Testphasen wurden alle Erkenntnisse des Projekts in diesem Abschlussbericht dokumentiert. Eine Präsentation des Projektes in verschiedenen Fachgremien wird vorgesehen.

4. Ergebnisse des Gesamtvorhabens

Arbeitspaket 1: Anforderungsdefinition

Die Anforderungen wurden mit den Kooperationspartnern gemeinsam gesammelt, diskutiert, kategorisiert und tabellarisch festgehalten in folgendem Schema (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anforderungsliste (vollständige Liste im Anhang)

ID	Name	Beschreibung	Zuordnung
1	Radon-Messkammer	<ol style="list-style-type: none"> Messkammer kann in ihrer Form frei gestaltet werden Messkammer-Eingang muss einen Filter aufnehmen Messkammer muss Detektorplättchen aufnehmen (Abmaße siehe unten) Detektorplättchen muss einfach wechselbar sein Detektorplättchen darf nicht unter mechanischer Spannung stehen Messkammer muss einen aktuierbaren, gasdichten Verschluss haben (aktuierbar siehe Verschlusssteuerung ID 4) Die Messkammer soll sich nicht statisch aufladen 	IPEK (Konzeption, Konstruktion, Auswahl Aktor), SUM (Detektorplättchen, Filter)
2	Energie	<ol style="list-style-type: none"> Wiederaufladbare Batterie Aufladung über USB (z.B. Micro, USB-C) Energieversorgung bei voller Ladung 3 Monate, minimal 1 Monat zwischen Aufladungen 	IPEK (Batterie und Kapazität), Dienstleister Platine (Batterie-management System)
3	Anzeigen	<ol style="list-style-type: none"> Messkammer offen/geschlossen (optisch) Fehler (optisch, optional akustisch) Batteriestatus (optisch, bei Warnung optional akustisch) 	IPEK, Dienstleister Platine
4	Verschlusssteuerung öffnen/schließen	<ol style="list-style-type: none"> Manuell (Schaltergesteuert, von außen zugänglich) Zeitgesteuert (Echtzeit, z.B. Wochentags 8-17 Uhr) Einstellung der Zeiten ohne Neuprogrammierung ermöglichen (z.B. durch File auf SD-Karte) Bewegungsgesteuert (Bewegung des Trägers bei der Arbeit löst Öffnung aus) Der Modus soll ohne Neuprogrammierung umschaltbar sein (z.B. durch Steckbrücken oder DIP-Schalter) 	IPEK (Programmierung), Dienstleister Platine (Integration der Hardware, Schnittstelle zur Aktoransteuerung durch μC)
5	Log	<ol style="list-style-type: none"> Log der Öffnungs- und Schließzeitpunkte auf File auf SD-Karte (csv o.ä.) Log der Öffnungsdauer auf File auf SD-Karte (csv o.ä.) Die SD-Karte soll nicht von außen entnehmbar sein, nur nach Öffnung des Gehäuses 	IPEK, Dienstleister Platine (Integration der Hardware)

6	Zusätzliche Sensorik	<ol style="list-style-type: none"> 1. Zustand offen/geschlossen des Verschlusses 2. Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck, (Gas) 	IPEK, Dienstleister Platine (Integration der Hardware)
7	Allgemein	<ol style="list-style-type: none"> 1. 20 Prototypen sollen gefertigt werden zum Testen 2. Die Messkammer und die Elektronik wird von einem Gehäuse umfasst, äußere Abmaße maximal 85 * 54 mm (Kreditkarte), Höhe 22 mm 3. Öffnung des Gehäuses von Unbefugten verhindern oder anzeigen 	IPEK, Dienstleister Platine

Arbeitspaket 2: Produktentwicklung

Auf Basis der Anforderungen wurde ein Systemschaubild des au.raex entwickelt, das die Schnittstellen zeigt (siehe Abbildung 9). Dadurch werden Abhängigkeiten frühzeitig visualisiert, um Kompatibilität zu gewährleisten.

Zentrum der Energie- und Informationsflüsse ist der Mikrocontroller (μC). Hier werden durch das Programm die Sensoren der verschiedenen Messmodi ausgelesen, der Verschlussaktor durch den Energiesteller gesteuert, die Positionssensoren des Verschlusses ausgelesen, sowie die Öffnungs- und Schließzeiten auf SD-Karte gespeichert und die Statusanzeige gesteuert.

Anwender können im Betrieb nur an den hier definierten Schnittstellen angreifen. Es erfolgt eine Trennung zwischen Endanwender bei einer Messung und dem mit der Auswertung und Einstellung des au.raex betrauten Person ist hier nicht visualisiert. Ein Endanwender soll bspw. bei einer Messung keinen Zugriff auf die Umschaltung des Messmodus haben.

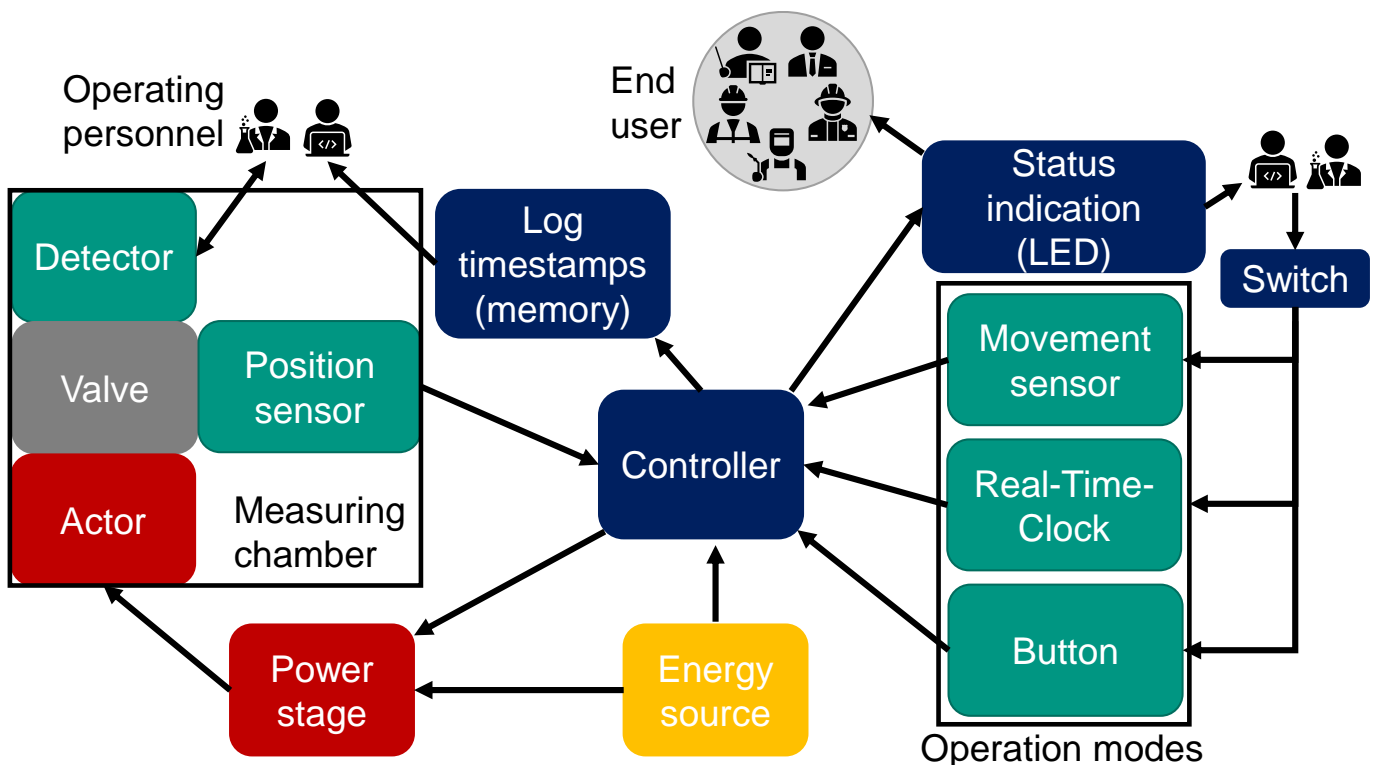


Abbildung 9 Systementwurf mit Schnittstellen zwischen Teilkomponenten

Gehäuse und Verschluss

Im Folgenden wird die Konzeptfindung für den Verschluss der Messkammer beschrieben. Im Rahmen eines Kreativitätsworkshops mit Teilnehmenden der Kooperationspartner IPEK, SUM und dem

Dienstleister für die Platine wurden mehrere Konzepte erarbeitet, unterstützt durch Kreativitätsmethoden wie Reizbilder und SCAMPER².

Die Konzepte wurden bewertet hinsichtlich der folgenden Punkte (siehe Tabelle 2):

- Dichtigkeit
- Totvolumen
- Komplexität
- Platzbedarf
- Gestaltung Messkammer
- Abstrahlung zu Detektor (Querschnitt)
- Energiebedarf

Tabelle 2: Bewertungsmatrix der Verschlusskonzepte. Beste Konzepte mit 28 Punkten sind "Salzstreuer" ("Vollkreis") und "Stempel".

Konzept	Dichtigkeit	Robustheit	Totvolumen (Detektor-Verschluss)	Komplexität (Anzahl Teile, Umsetzbarkeit, Fertigung, Montierbarkeit)	Platzbedarf	Gestaltung Messkammer (Filter, etc.)	Abstrahlung zu Detektor (Querschnitt)	Energiebedarf	Summe
Salzstreuer (Vollkreis)	2	3	4	5	5	5	1	3	28
Kugel	5	3	1	2	1	4	4	4	24
Stempel	5	4	5	2	2	4	2	4	28
Membran	5	2	5	2	3	3	4	1	25
Plättchenklapper	2	1	5	3	2	3	4	3	23

Die drei vielversprechendsten Konzepte „Stempel“, „Membran“, „Viertelkreis“ bzw. „Salzstreuer“ („Vollkreis“) wurden näher ausgearbeitet, um die Umsetzbarkeit zu prüfen. Beim Konzept „Salzstreuer“ stellte sich der Platzbedarf bei näherer Begutachtung als problematisch heraus, weshalb das Konzept „Stempel“ der Favorit ist und weiterverfolgt wird. In Abbildung 10 ist exemplarisch das Konzept „Stempel“ gezeigt, die anderen befinden sich im [Anhang](#). Bei diesem Konzept wird durch eine Drehung der Kulisse (gelb) der Stempel, der den Detektor abdichtet, translatorisch bewegt. Dies wirkt wie ein Kolben und hat dadurch den Vorteil, dass Luft beim Schließen aus der Messkammer herausgedrückt wird und beim Öffnen neue Luft hereingezogen wird. Die Drehung der Kulisse kann durch einen flachen Motor und einem Riemen oder Zahnrad oder durch einen zylindrischen Motor mit Schneckengetriebe erfolgen.

² „SCAMPER“ ist eine kreative Technik zur schnellen Sammlung und Visualisierung von Verbesserungsideen: Substitute, Combine, Adapt, Modify, Put to other uses, Eliminate, Rearrange

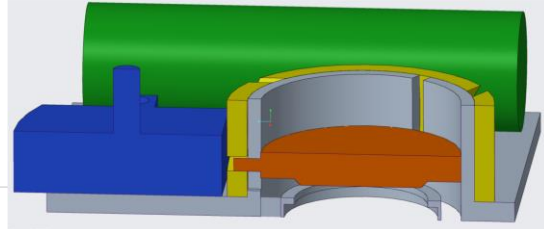
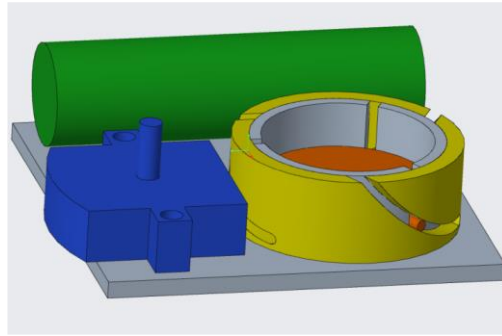
Konzepte: Stempel

Vorteile

- Andruckkraft mit Bahnneigung in Kulisseeinstellbar
- Einfacher Aufbau möglich
- Gute Abdichtung des Detektor mit O-Ring
- Luftaustausch - Zieht Luft in Messkammer und drückt sie raus

Nachteile

- Reibverhalten und Verklebung? - Zu Testen



11 30.01.2024 Julian Peters - Radon Exposimeter

Abbildung 10: Verschlusskonzept „Stempel“. Die gezeigten Komponenten stellen Platzhalter dar für Batterie (grün) und Motor (blau), dies entspricht nicht zwingend den letztendlich verwendeten Komponenten.

Die Fertigung der Kulissee mit den Nuten und der Verzahnung erfolgt als ein Stück durch einen SLS 3D-Druck aus Nylon.



Abbildung 11: Geschlossene Messkammer.



Abbildung 12: Geöffnete Messkammer.

Im Folgenden werden verschiedene Motoren zur Aktuierung des Verschlusses untersucht. Die Wahl fällt auf Schrittmotoren mit Spindel, wie sie in CD/DVD-Laufwerken zur Bewegung des Lasers verwendet werden. Dies hat den Vorteil, dass diese Motoren zu günstigen Preisen in hoher Stückzahl verfügbar sind. Es werden verschiedene Baugrößen und Spindelgeometrien getestet, siehe Abbildung 13. Als Testumgebung dient ein 3D-Druck des Verschlusskonzeptes „Stempel“. Für die Motoransteuerung wird ein Breakout-Board eines Schrittmotortreibers (Energiessteller) verwendet, der auch zur direkten Platinenmontage geeignet ist. Energiebedarf sowie Verfahrszeiten und Erreichen der Endpositionen wird getestet. Die Entscheidung fällt auf die große Baugröße mit der kurzen Spindel (in der Abbildung 13 die beiden mittleren Motoren).

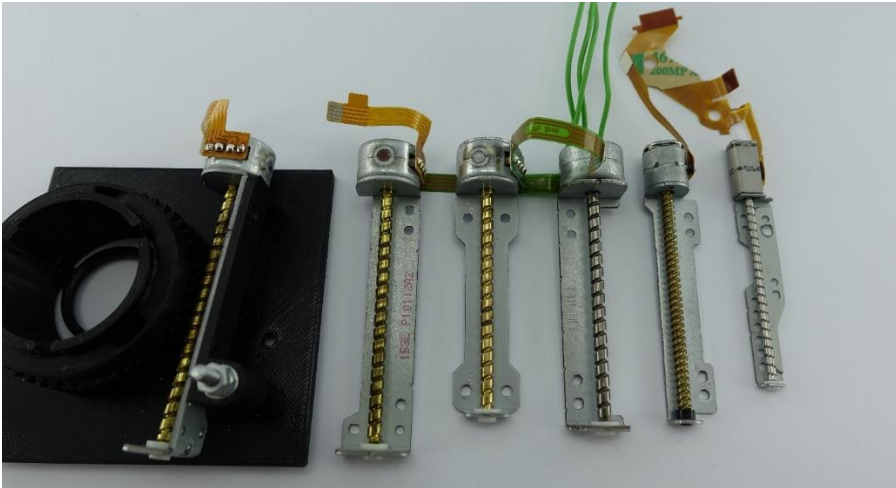


Abbildung 13: Schrittmotoren im Test zur Aktuierung des Verschlusses.

Des Weiteren werden verschiedene Geometrien der Kulisse getestet (Abbildung 14). Variiert werden die Verzahnung und die Steigung der Nuten. Die Verzahnung muss klein genug sein, um in die Verzahnung der Spindel des Motors eingreifen zu können. Gleichzeitig darf sie nicht zu klein werden, um fertigbar zu bleiben und nicht zu schnell zu verschleifen.



Abbildung 14: Kulissen im Test zur Verfassung des Stempels (Ventils)

Auch der Schnellverschluss zum Wechsel des Radondetektors wurde einer Parameterstudie unterzogen (vgl. Abbildung 15). Es wurden sowohl ein Schiebemechanismus als auch ein Drehmechanismus in Form eines Bajonetts mit jeweils verschiedenen Übermaßen der Hinterschnitte erprobt. Ziel war ein Kompromiss aus Betätigungskraft beim Öffnen bzw. Schließen und Reibung zu erhalten, damit ein unbeabsichtigtes Öffnen vermieden wird. Der Drehverschluss (Bajonett) wies dabei bessere Eigenschaften auf und zeigt sich als robuster gegen Verklemmung.

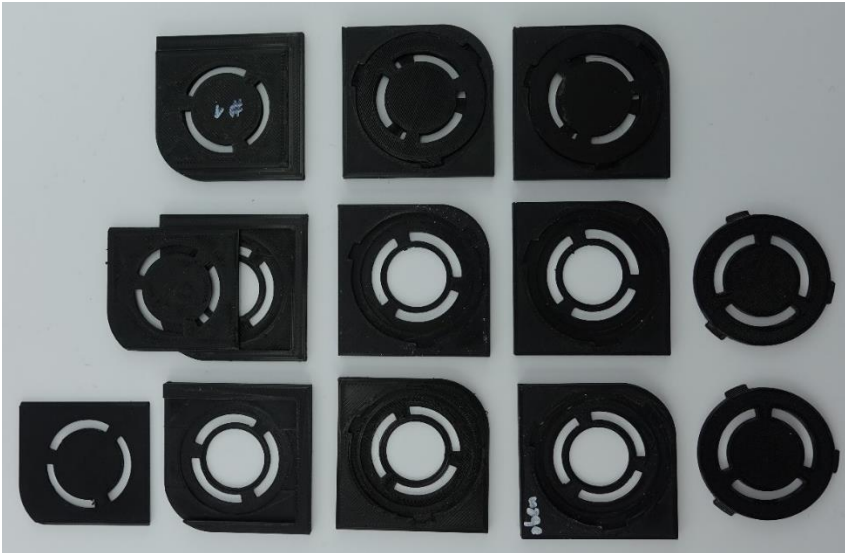


Abbildung 15: Schnellverschluss für Radondetektor im Test.

Weiterhin wird im Verschluss wie angefordert die Reibung reduziert, um den Energiebedarf zu senken und die Robustheit zu erhöhen, indem Berührungen sich bewegender Teile (hauptsächlich die Kulissee, orange in der Abbildung 16) reduziert werden. Dafür wurden Aussparungen und Absätze vorgesehen, z.B. zwischen Kulissee (orange) und Messkammer (grün, Abbildung 16).

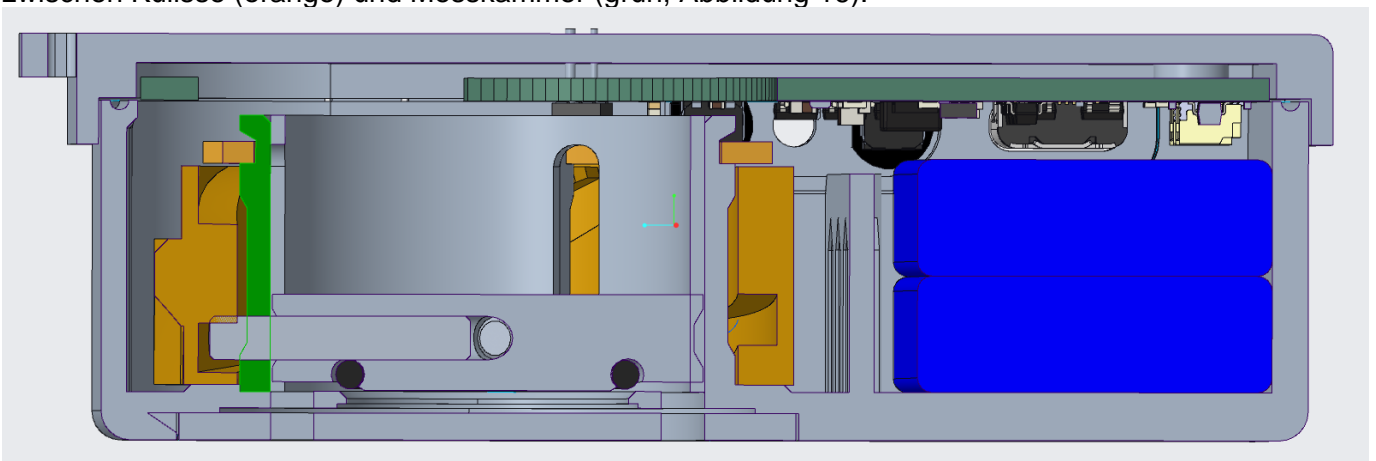


Abbildung 16: Schnitt durch den Verschluss, Ausschnitt aus dem CAD-Programm. Drehkulissee in Gelb.

Der Rest des Gehäuses wird als Form eines Hohlen Quaders ausgeführt. Der Schrittmotor wird drehbar gelagert und drückt mit einer Feder auf die Verzahnung der Kulissee. Dadurch ist sichergestellt, dass zu grobe Fertigungstoleranzen nicht zu einer Fehlfunktion führen. Falls die Endlagenerkennung ausfällt, schützt dieser Aufbau das System, da der Motor sich durch die Federung aus dem Eingriff herausdrücken kann. Weiterhin ist Platz für bis zu zwei Batterien abgegrenzt. Der für Batterien freie Platz, lässt eine maximale Kapazität von ca. 800 mAh bei einer Verwendung von 2 parallelverschalteten Lithium-Polymer Akkus von jeweils ca. 400 mAh zu. Batterien mit größerer Kapazität können nur bei Änderung der Anforderung „äußere Abmaße“ verwendet werden. Abbildung 17 zeigt das geöffnete Gehäuse mit Messkammer, Motor und Akku.

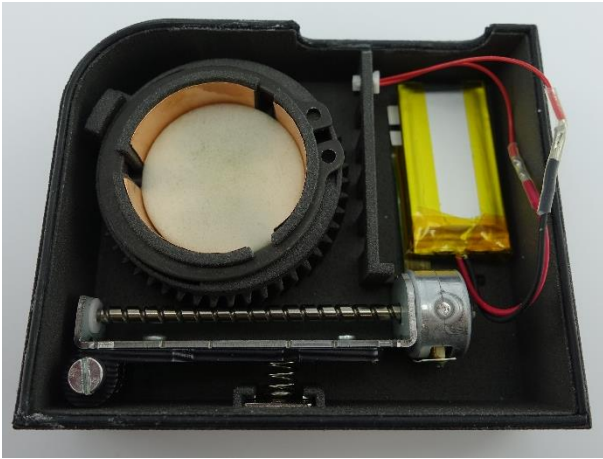


Abbildung 17: Gehäuse des au.raex mit Kulissee, Motor und Batterie.

Zuverlässigkeitsanalysen

Die Zuverlässigkeit des au.raex wird direkt von Beginn an mitgedacht, indem eine detaillierte Zuverlässigkeitsanalyse auf Konzeptebene erfolgt. Die Inhalte der Zuverlässigkeitsbetrachtung wurden auf der „32nd European Safety and Reliability Conference (ESREL 2022)“ vorgestellt³ und sind im folgenden ausschnitthaft dargestellt.

Das Vorgehen richtet sich nach der methodischen Systemzuverlässigkeitsanalyse nach Bertsche et al. bzw. Gäng et al. [8,9]. Das Vorgehen ist im Folgenden abstrahiert:

1. Zuverlässigkeitsziele und Hauptfunktionen/Hauptfehlzustände definieren.
2. Systemrepräsentation mit Flüssen für Stoff, Energie, Information erstellen.
3. Zuverlässigkeitsblockdiagramme (RBD) nach DIN EN 61078 [12] erstellen mit:
 - a. Fehlerraten basierend auf Literatur und Handbüchern (MIL-HDBK-217F [10], NPRD-91 [11]).
 - b. Berechnung von mittleren Ausfallzeiten (MTTF) auf Basis von Formeln der DIN EN 61078 [12] und Birolini [13].
4. Fehler-Möglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA) nach DIN EN 60812:2015-08 2015 [14] erstellen.
5. Iteration: Risiko reduzieren.

Erstens wird das Zuverlässigkeitsziel (Betriebszeit) für das gesamte System definiert. Darüber hinaus werden die Hauptfunktionen/Hauptfehlzustände identifiziert. Anhand dieser Werte (Betriebszeiten) werden die Ergebnisse der Analyse überprüft.

Zweitens wird eine Systemdarstellung erstellt, die Ein- und Ausgangsstruktur unter Verwendung von Material, Energie und Informationsflüssen abbildet. Dies dient als Grundlage für die Zuverlässigkeits-Blockdiagramme, die im Folgenden beschrieben werden.

Drittens wird die Struktur der Systemdarstellung aus dem vorherigen Schritt in ein Zuverlässigkeits-Blockdiagramm (RBD) überführt. Die Systemzuverlässigkeit wird mit einem Schwerpunkt auf den kritischen Komponenten bewertet.

Die Quantifizierung mit verfügbaren generischen Zuverlässigkeitsdaten auf Komponentenebene wird verwendet, um zwischen konkurrierenden Designalternativen zu entscheiden. Dazu werden generische Ausfallraten für die Komponenten in der Literatur und in Katalogen wie MIL-HDBK-217F, NPRD-91 recherchiert. Auf dieser Grundlage wird eine Schätzung für die mittlere Ausfallzeit (MTTF) erstellt und mit den Anforderungen aus Schritt 1 verglichen.

Viertens: Die Identifizierung kritischer Komponenten des au.raex wird durch eine FMEA durchgeführt.

Fünftens wird das Risiko reduziert, indem die Schwere, Wahrscheinlichkeit oder Entdeckung durch Maßnahmen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit, wie Redundanz oder Notbetrieb. Die zu verbessernden Komponenten basieren auf der FMEA Bewertung. Die Entscheidung über die verschiedenen Arten von

³ doi: 10.3850/978-981-18-5183-4_R29-13-150-cd

Redundanzarten ist expertenbasiert mit einer starken Berücksichtigung der vorhandenen Sensoren und Logikteile unter der Voraussetzung geringer Kosten für zusätzliche Hardware. Diese Verbesserungen werden im RBD neu berücksichtigt.

Nach *Schritt 1* werden hier die Hauptfunktion des au.raex wie folgt definiert: *den Radondetektor zu beherbergen, ihn von der Umgebung bei Bedarf abzuschotten und von Personen (Benutzern) getragen werden zu können*, siehe Systemübersicht in Abbildung 9. Der Detektor muss sich in einer Messkammer mit einem definierten Luftvolumen befinden, die in drei Modi, die vor der Aushändigung an die Benutzer voreingestellt sind, zur Umgebung geöffnet und gasdicht geschlossen werden kann. Die Modi sind:

- Bewegungskontrolle (durch Beschleunigungssensor)
- Zeitsteuerung (durch Echtzeituhr, RTC)
- Manuelle Steuerung (über eine Taste)

Die Benutzer können den voreingestellten Modus nicht ändern, um falsche Messungen zu vermeiden. Die Öffnungs- und Schließzeiten der Messkammer werden in einem Flash-Speicher im Inneren des au.raex gespeichert.

Das Zuverlässigkeitsziel für das gesamte System ist auf mindestens ein Jahr ohne Wartung festgelegt. Die häufigsten Fehlfunktionen sind:

- Detektorverschlusseinheit öffnet oder schließt nicht
- Logzeiten werden nicht oder falsch gespeichert

Die Systemrepräsentation nach *Schritt 2* ist in Abbildung 18 gezeigt.

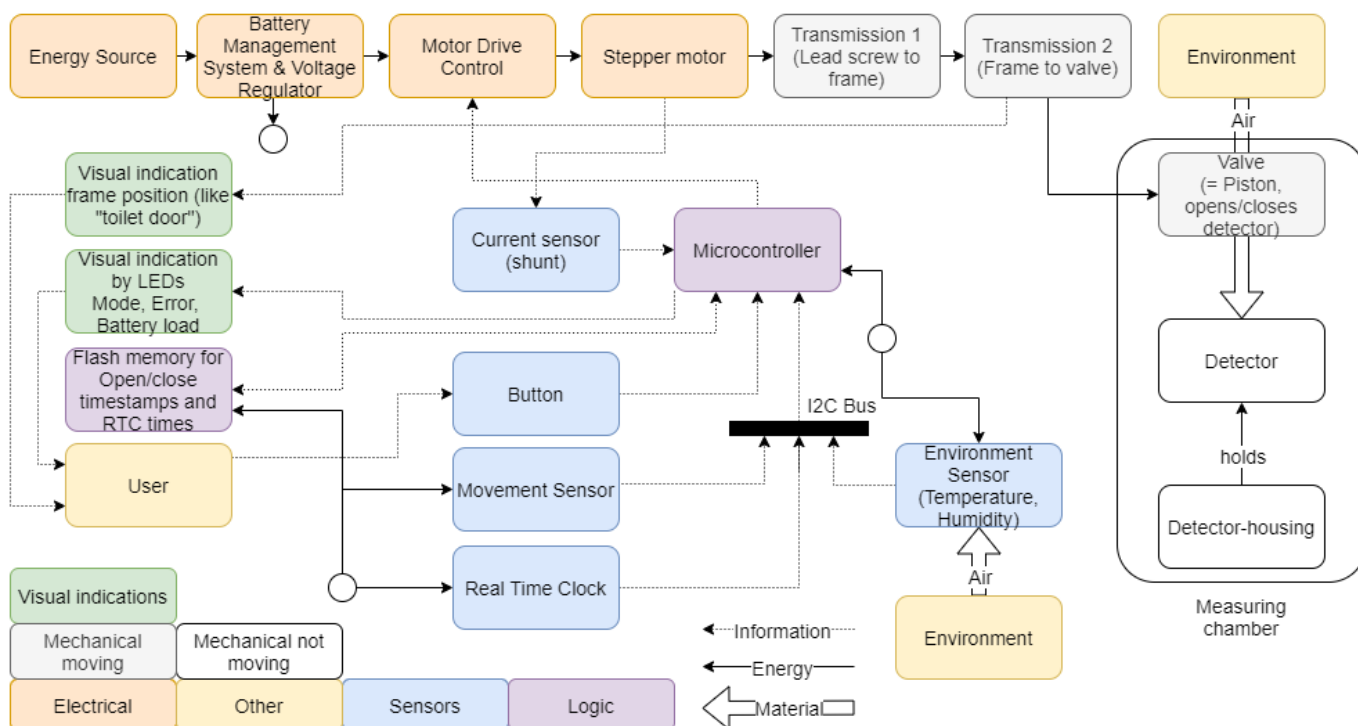


Abbildung 18: Systemrepräsentation mit Material, Energie- und Informationsflüssen

Das Zentrum des au.raex ist die Messkammer, in der sich der Detektor befindet. Ein kolbenartiger Mechanismus, Ventil genannt, öffnet und schließt die Messkammer zur Umgebung und ermöglicht den Luftaustausch.

Das Ventil wird von einem Schrittmotor über zwei Getriebe (Zahnradsätze) betätigt. Bei Getriebe 1 handelt es sich um ein Schneckengetriebe und bei Getriebe 2 um einen speziell konstruierten rotierenden Rahmen (Frame) mit Nuten (weiter als Kulisse bezeichnet), der das Ventil in der linearen Richtung bewegt, die zum Schließen oder Öffnen des Lufteinlasses erforderlich ist. Der Schrittmotor ist über eine Leistungsstufe, die Motorantriebssteuerung, mit einem Mikrocontroller verbunden.

Die Endlagen des Getriebes werden durch Messung der Stromspitze des Motors beim Auftreffen auf die harten Endanschläge erkannt. Alternativen dazu sind Positions-Endschalter an der Kulisse (Frame).

Auf Basis der Systemrepräsentation kann nun das RBD erstellt werden, die Werte für einzelne Komponenten wurden aus den o.g. Handbüchern entnommen. An dieser Stelle ist exemplarisch die RBD für den Bewegungsmodus abgebildet.

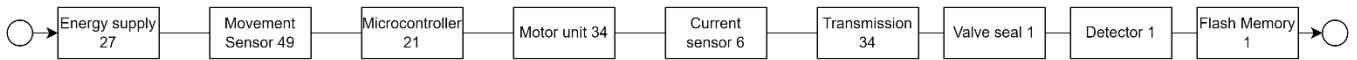


Abbildung 19: Zuverlässigkeitsblockdiagramm für den Bewegungsmodus, Werte in Fehler pro Million Stunden.

Daraus lässt sich die Block-Fehlerrate und die MTTF anhand von Formeln aus DIN EN 61078 bzw. Birolini [13]: berechnen (Formeln (1)-(2)):

$$\lambda_{move} = \sum_{i=1}^n \lambda_{move,i} = 185 \quad (1)$$

$$MTTF_{move} = \frac{1}{\lambda_{move}} = 5405 \text{ h} = 0.62 \text{ y} \quad (2)$$

Diese Werte sind generisch und höchstwahrscheinlich nicht absolut realistisch, dienen aber als erster Anhaltspunkt dafür, ob das Zuverlässigkeitsziel mit dem aktuellen System erreicht werden kann und um die Wahrscheinlichkeit von Fehlerursachen in der FMEA (nächster Abschnitt) zu bewerten.

Wie die Werte zeigen, kann das Zuverlässigkeitsziel von 1 Jahr mit dem aktuellen System nicht erreicht werden, es müssen Verbesserungen vorgenommen werden.

Als Schritt 4 wird nun eine FMEA durchgeführt. Die Top-Fehlfunktionen werden als Fehlerbeschreibung verwendet. Es werden mögliche Ursachen für diese Ausfälle abgeleitet, u.a. das mechanische Getriebe, die Motorsteuerung, der Mikrocontroller, das Batteriemanagementsystem, der Speicher und die Sensoren für die Betriebsarten.

Die Ausfallraten aus den RBDs dienen als Bewertung für das Auftreten von Ausfällen (O). Der Schweregrad (S) für Fehler 1 - Messung nicht auswertbar - wird durchgängig als am höchsten eingestuft (S = 10). Mit Hilfe der Risikoprioritätszahl (RPZ = S * O * D) werden die kritischsten Ursachen für Ausfälle ermittelt (in der FMEA dunkelrot markiert, Abbildung 9). Diese sind:

1. Ausfall des Bewegungssensors
2. Ausfall des Mikrocontrollers
3. Ausfall der Echtzeituhr (RTC)
4. Ausfall der Übertragung
5. Ausfall des Batteriemanagements (BMS) und des Spannungsreglers

Der Ausfall eines Bewegungssensors ist kritisch, da der Mikrocontroller kaum eine Chance hat, zu erkennen, ob der Sensor ausgefallen ist oder einfach keine Bewegung wahrnimmt. Es gibt zwar Statusregister im Sensor, die abgefragt werden können, aber sie zeigen nicht jeden möglichen Fehler an. Außerdem sind die allgemeinen Ausfallraten von Bewegungssensoren in der zitierten Literatur hoch.

Der Ausfall des Mikrocontrollers ist kritisch, da er das Herzstück der Steuerung des Systems ist. Einige Ausfälle können nicht durch LEDs oder nur durch das Fehlen blinkender LEDs angezeigt werden und müssen durch die mechanische visuelle Anzeige (Prinzip einer Toilettentür) der Übertragung Transmission 2 erkannt werden. RTC-Ausfälle sind von der Bewertung ähnlich wie beim Bewegungssensor.

Getriebefehler sind kritisch, da sowohl die Wahrscheinlichkeit als auch die Erkennung auf einem mittleren Niveau liegen.

Der Ausfall des Batteriemanagements und des Spannungsreglers ist kritisch, weil die Erkennung schwierig ist, ähnlich wie bei den Ausfällen des Mikrocontrollers. Ohne Energie kann der Mikrocontroller nicht arbeiten.

Tabelle 3: Auszug aus der FMEA für das au.raex.

Element / Function	Possible failure consequences	Severity	Possible failures	Possible failure causes	actual state					improved state						
					Measures for avoidance	Failures / e6h	Occurrence	Measures for detection	Detection	Risk Priority Number (S*P*D)	Measures taken	Severity	Probability	Detection	RPN (S*P*D)	
1 Measurement not analysable	Detector closure unit does not open or close	10		transmission	Reduce friction, adjust design of parts to minimize jam risk	14	6	Current sensors	5	300	Redundancy detector switches	10	5	1	50	
		10		motor failure	no overloading, sufficient cooling	13	5	Open/close sensors	1	50		10	5	1	50	
		10		motor controller failure	Implementation strictly as recommended, adjust motor current, prevent overheating	21	7	Read out fault pin and open/close sensors	1	70		10	7	1	70	
		10		microcontroller failure	Implementation strictly as recommended, stable power regulator	21	8	user: status LED mechanical visual indication	7	560		10	8	5	400	
		10		Battery failure	Robust, suitable load	13	5	Measure voltage	3	150		10	3	3	90	
		10		Battery Management, Voltage Regulator	implementation strictly as recommended	7	4	user: status LED	7	280		10	2	7	140	
		10		Real-Time-Clock failure	Implementation strictly as recommended	12	5	read sensor status register	8	400		10	5	5	250	
		10		movement sensor fault	Implementation strictly as recommended, solder pads inspection	49	10	read sensor status register	8	800		5	10	8	400	
		9		Logtimes not saved / incorrect	Real-Time-Clock failure	Implementation strictly as recommended	12	5	read sensor status register	8		360	9	5	5	225
		9			Memory failure	Implementation strictly as recommended	0,2	2	read memory status register	7		126	9	2	3	54
2 Measurement not analysable		7		Connection to PC failure	solder pad inspection	3,7	6		1	42	Dismount memory /alternative connection to PC	5	6	1	30	
		9		current sensor failure	design for appropriate current	6	4	Step counting from end to end-position	7	252	Redundancy detector switches	5	1	7	35	

Wie im *Schritt 5* vorgesehen werden Verbesserungen vorgeschlagen, um die Ziel-MTTF zu erreichen. Für den Bewegungssensor kann ein Notfallmodus implementiert werden, um den Schweregrad zu reduzieren (Wert S). Im Falle eines Ausfalls des Bewegungssensors fällt das System in den zeitgesteuerten Modus zurück. Dies ist im Hinblick auf eine Kostenreduzierung praktisch, da die RTC ohnehin enthalten ist.

Die Erkennung des Ausfalls des Bewegungssensors kann durch die Implementierung einer maximalen Zeit ohne Bewegung erreicht werden, falls die täglichen Routinen des Benutzers bekannt sind. Die Änderung der jeweiligen RBD ist in Abbildung 20 als „kalte“ Redundanz dargestellt. In der FMEA wird der Schweregrad dadurch halbiert.

Die Erkennung von Mikrocontroller-Fehlern wird verbessert, indem eine gute Sichtbarkeit der LEDs sichergestellt wird.

Die Erkennung von RTC-Fehlern wird verbessert, indem die Fehler auf den LEDs angezeigt werden und der Benutzer angewiesen wird, sie zu erkennen.

Die Erkennung von Übertragungsfehlern wurde durch das Hinzufügen von Detektorschaltern verbessert, die als Endanschläge als „heiße“ Redundanz zur Strommessung dienen und die vollständig geöffneten und geschlossenen Positionen anzeigen, die für die Gesamtfunktion entscheidend sind. Diese sind näher an der Gesamtfunktion (Öffnen/Schließen der Messkammer) und führen eine parallele Struktur in den RBDs ein, siehe Abbildung 20

Daraus errechnet sich eine neue MTTF für den Bewegungsmodus von 0.93 Jahren, was nahe an das Ziel von einem Jahr herankommt. Da die Werte an dieser Stelle nur generische Abschätzungen sind, wird keine weitere Optimierungsschleife in dieser Phase mehr vorgenommen.

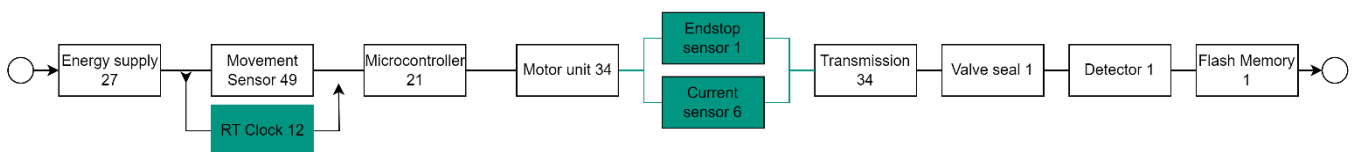


Abbildung 20: Verbesserungen im System, um Risiko eines Ausfalls zu senken

Bewegungserkennung

Es werden verschiedenen Bewegungssensoren getestet, darunter triaxiale Beschleunigungssensoren und Inertiale Messeinheiten. Bewertet werden die folgenden Punkte:

- Sensitivität der Erkennung von Bewegungen des Körpers beim Arbeiten (möglichst hoch),
- Kommunikation mit dem Mikrocontroller (mittels Motion / no Motion Interrupts),
- Energiebedarf (möglichst gering).

Dazu werden verschiedene verfügbare MEMS Bewegungssensoren als Breakout-Boards beschafft, an einen geeigneten Mikrocontroller angeschlossen und die Bewegungsdetektion am Körper getestet.

- Beschleunigungssensor ST Microelectronics LIS2DW12
- Beschleunigungssensor Analog Devices ADXL345Z
- Beschleunigungssensor AnalogDevices ADXL372Z
- Inertialmesseinheit ST Microelectronics LSM9DS1

Als geeignetster Kandidat erweist sich der LIS2DW12, da er sehr sensitiv eingestellt werden kann, ein geringes Rauschen hat, über die geforderten Interrupts verfügt und einen sehr geringen Strombedarf von 50 nA in „power-down mode“ und kleiner als 1 μ A in „active low-power mode“ hat.

Platinenentwicklung

Mit dem zuvor ausgewählten Beschleunigungssensor und Motor zur Verschlussaktuierung kann das Platinendesign durchgeführt werden. Weitere Komponenten zum Aufbau der in Abbildung 18 dargestellten Systemarchitektur werden definiert:

- Schrittmotortreiber ST Microelectronics STSPIN220
- Umgebungsluftsensor Sensirion SHTC3
- Mikrocontroller ST Microelectronics STM32L562RE
- Batterieladeregler für Anschluss an USB 5V.

Der Mikrocontroller ist aus der „low power“ Reihe des Herstellers und verfügt über die notwendigen Schnittstellen, um mit der Peripherie kommunizieren zu können (siehe Abbildung 9). Dazu gehören u.a.:

- I2C Bus für Bewegungssensor und Umgebungsluftsensor,
- SDIO/SDMMC Bus für Kommunikation mit der SD-Karte,
- USB Bus für optionale Kommunikation mit einem PC,
- Integrierte Real-Time Clock (RTC, Echtzeituhr)
- Pulsweitenmodulierbare (PWM) Ausgänge für Ansteuerung des Schrittmotortreibers
- Analoge Eingänge zur Messung der Batteriespannung
- Interruptfähige Eingänge für die Detektion von Motion / no Motion Interrupts des Bewegungssensors sowie Betätigungen der Positions-Endschalter
- Digitale Eingänge für die Umschaltung der Betriebsmodi, durch ein DIP-Schalter realisiert.
- Low-Power Modi

Die gestaltete Platine ist in Abbildung 21 zu sehen. Die Runde Aussparung lässt Platz für die Messkammer. Batterie sowie Endanschlüsse sind als Lötkontakte vorgesehen, da dies platzsparender als ein Stecker ist. Der Anschluss des Motors erfolgt über Schraubklemmen.

Es ist eine mehrfarbige RGB-LED vorgesehen, um über Farbcodierung mehr Zustände anzeigen zu können. Der Laderegler hat eine eigene LED, die den Ladezustand anzeigt. Somit kann angezeigt werden, wenn der Ladevorgang abgeschlossen ist.

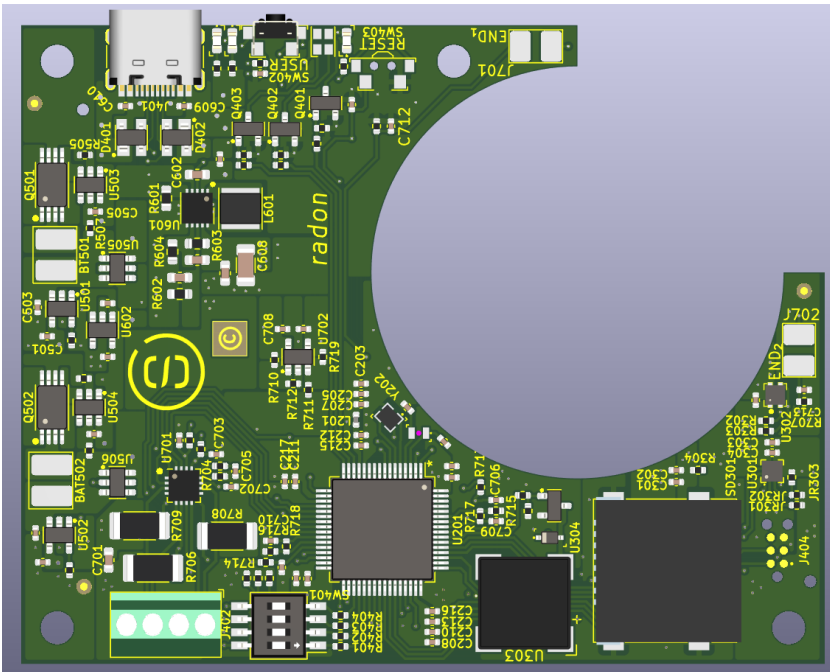


Abbildung 21: Rendering der Platine für das au.raex (1. Generation)

Programmierung

Die Programmierung erfolgt in der Entwicklungsumgebung des Herstellers des Mikrocontrollers (ST Microelectronics).

Das Konzept des Programmes besteht auf einer State-Machine, die die Zustände „sleep“, Öffnungs-/Schließungsanforderung, Verfahren des Verschlusses, Log der Zeiten und Umgebungsluftbedingungen auf SD-Karte beinhaltet. Zustände werden gewechselt durch Kommunikation der entsprechenden Sensoren über die zuvor genannten Kanäle (Interrupt, etc.).

Beim Verfahren des Motors werden sowohl die Schritte gezählt, womit der Drehwinkel berechnet werden kann, als auch die Positions-Endschalter ausgewertet. Eine Abweichung kann zur Detektion eines Fehlers verwendet werden.

Ein Logik, die den Bewegungssensor überwacht wie im Kapitel *Zuverlässigkeitsanalysen* vorgeschlagen, konnte an dieser Stelle noch nicht implementiert werden, da die zeitlichen Abläufe für die Echtzeit-Überwachung noch nicht bekannt sind.

Die Einstellung der aktuellen Uhrzeit und der Öffnungs- und Schließzeiten für den Zeitgesteuerten Modus erfolgt über die SD-Karte mit speziell formatiertem Text-Input.

Die RGB-LED zeigt verschiedene Zustände an, wie die Initialisierung, das erfolgreiche Anfahren des offenen (blau) und geschlossenen (grün) Zustands, sowie Fehlercodes (rot).

Gesamtsystem Aufbau, Tests und Optimierung

Abbildung 22 zeigt das zusammengebaute Gesamtsystem der ersten Generation. Die Platine befindet sich im Deckel, die Taster und der USB-Port sind von außen zugänglich.

Die durchgeführten Tests zeigen, dass das Verfahren des Verschlusses, also das Öffnen und Schließen, zuverlässig funktioniert. Es treten keine Verklümmungen oder ähnliches auf. Des Weiteren funktioniert der Schutzmechanismus des Motors, die Federung, wie vorgesehen und schützt dadurch Motor, Motorcontroller und letztendlich die Batterie.

Der Stromverbrauch des Gesamtsystems wurde gemessen, siehe Abbildung 23, indem das Gesamtsystem über den USB-Port mit dem Power Profiler Kit II von Nordic⁴ versorgt wurde. Die Batterien wurden dafür abgeklemmt.

Mit den gemessenen Werten ergibt sich unter der Annahme von vier Betätigungen ein Stromverbrauch von 28.038 mAh. Daran hat der Ruhemodus mit 28 mAh den größten Anteil. Mehr Betätigungen am Tag würden also nur geringfügig ins Gewicht fallen. Bei einer Batteriekapazität von 800 mAh (Vgl. Batteriekapazität im Kapitel Gehäuse und Verschluss) errechnet sich eine Laufzeit von 28 Tagen, bis aufgeladen werden muss. Bei real nutzbaren Kapazitäten verringert sich dieser Wert auf ca. 22 Tage. Dies

⁴ <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/Power-Profiler-Kit-2>

verfehlt knapp die Anforderung an eine Mindestlaufzeit von einem Monat. Größere Batteriekapazitäten erfordern eine Vergrößerung des Gehäuses, die in diesem Projekt nicht mehr durchgeführt werden kann. Alternativ kann in den Nutzungsanforderungen festgeschrieben werden, dass die Radonexposimeter öfter geladen werden müssen, z.B. jede Woche.

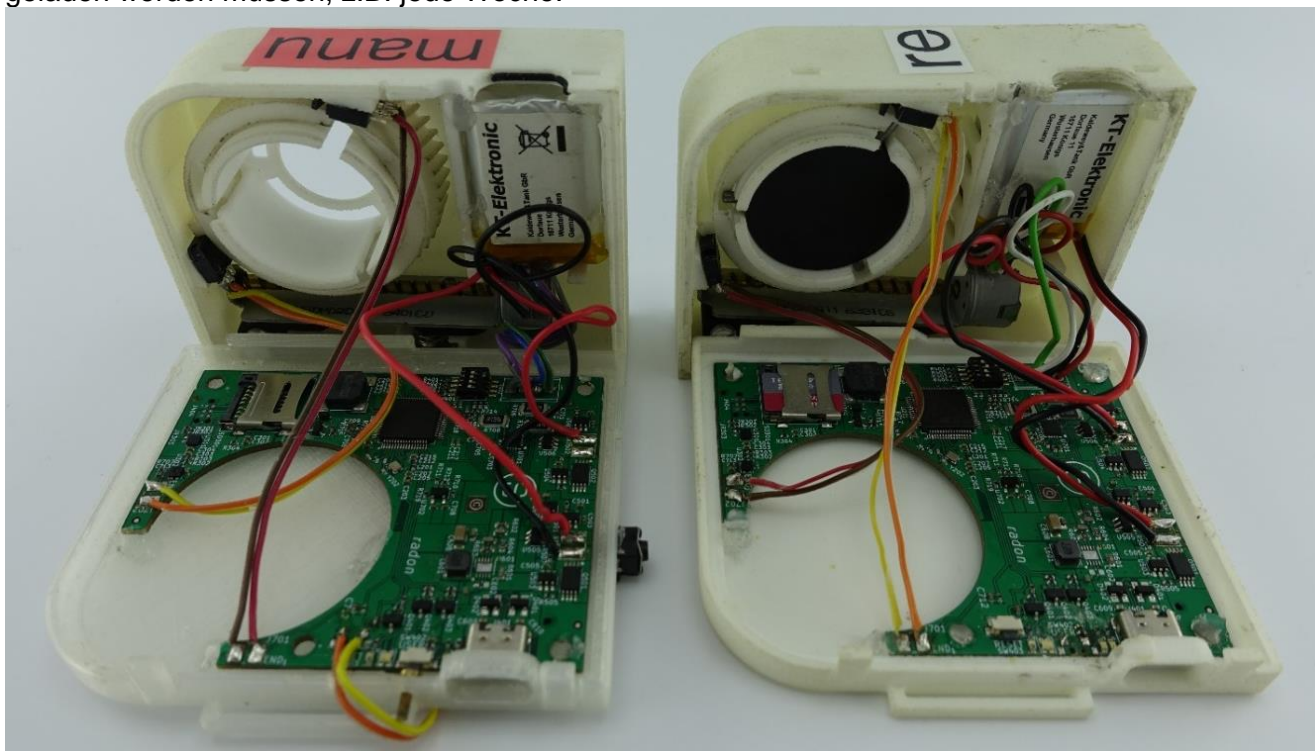


Abbildung 22: Gesamtsystem der 1. Generation

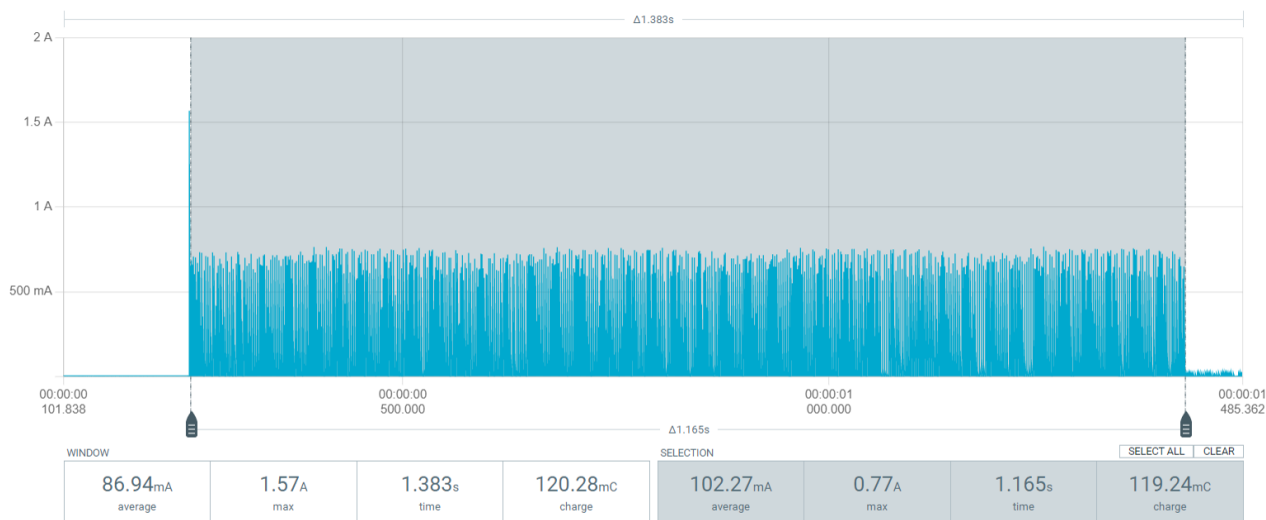


Abbildung 23: Test des Stromverbrauchs im Betrieb mit den Abschnitten Ruhemodus mit 1.18 mA, Spitze beim Einschalten des Motors von 1.57 A, Verfahren des Motors mit 0.77 A, Speicherung der Werte und Anzeige der LEDs mit 2.32 mA.

Bei den Tests sind allerdings auch auf der negativen Seite folgende Punkte aufgefallen, die in Tabelle 4 zusammengefasst sind.

Ein wesentlicher Teil ist die Batterielaufzeit, diese entleert sich schneller als die initialen Tests zeigen.

Tabelle 4: Schwachstellen der 1. Generation und Optimierung für die 2. Generation.

Schwachstelle der 1. Generation	Optimierung für die zweite Generation
Montage der Batterien mit Lötkontakten. Erschwert Wechsel der Batterien bei einem Defekt. Kabel neigen zum Bruch direkt am Lötkontakt.	Stecker kleiner Baugröße für Batterien vorsehen.
Schraubklemmblock zum Anschluss des Motors zu groß. Drückt im geschlossenen Zustand auf den Motor und behindert dadurch das Verfahren. Zusätzlich neigen Kabel zum abknicken direkt am Klemmblock. Bei der ersten Generation wurde der Klemmblock deshalb entfernt und die Kabel des Motors direkt angelötet, was einen großen Aufwand dargestellt hat.	Buchse für Flachbandkabel vorsehen, sie sind kleiner im Vergleich zum Schraubklemmblock. Die verwendeten Schrittmotoren aus CD/DVD-Laufwerken werden standardmäßig sowieso damit ausgeliefert.
Die Montage der Positions-Endstops ist sehr aufwendig, diese müssen am Gehäuse verklebt werden, dann müssen Kabel zwischen den Endstops und den Lötkontakten auf der Platine verlegt werden. Diese stören dann beim Öffnen des Gehäuses.	Die Endstops werden nun direkt auf der Platine vorgesehen, wodurch die Verkabelung entfällt. Die Nase auf der Kulisse, die die Endstops auslöst, wird diesbezüglich angepasst. Dies erfordert ein sehr genaues Design und geringere Toleranzen bei der Fertigung, damit die Nase der Kulisse die Endstops in der richtigen Position auslöst.
Die Taster erwiesen sich als zu schwach, mehrere Taster wurden abgerissen.	Es werden robustere und größere Taster vorgesehen.
Rasthaken des Deckels brechen beim Herunterfallen ab.	Robustere Rasthaken gestalten.
Sensitivität des Bewegungssensors zu niedrig eingestellt. Weiterhin schließt das Verschluss nach zu kurzer Ruhezeit (12 s) wieder	Die Sensitivität wurde in der Initialisierung des Programms erhöht. Die Ruhezeit, nach der der Verschluss wieder schließt wurde erhöht, in dem die No-Motion Interruptzeit des Bewegungssensors auf 5 min angepasst wurde.
Einstellung von Zeiten für den Zeitmodus im Textdokument auf der SD-Karte wurden als zu umständlich erachtet und sind nur in vollen Stunden möglich. Auch halbe Stunden werden von SUM gewünscht.	Formatierung der Konfigurationsdatei auf SD-Karte wurden vereinfacht. Halbe Stunden sind nun einstellbar.
Programm stürzt mitunter ab. Als Ursache wurde mehrmaliges Auslösen des Positions-Endstops identifiziert.	Der Fehler wurde in der neusten Generation bereinigt.
Die Batterielaufzeit ist geringer als mit den Messungen errechnet. Die Vermutung liegt auf qualitativ schlechten Batterien, die eine höhere Selbstentladung aufweisen.	Es werden neuen Batterien mit höherer Qualität beschafft.

Die in Tabelle 4 notierten Optimierungen wurden in einer zweiten Prototypengeneration umgesetzt. Das Ergebnis ist in Abbildung 24 zu sehen. Der Verkabelungsaufwand ist wesentlich geringer, es muss nun lediglich das Flachbandkabel des Motors und der Stecker der Batterie(n) montiert werden, dann ist das Gerät einsatzbereit.

Die Taster sind nun robuster und transparent ausgeführt, sodass die LEDs von außen besser sichtbar sind. Zudem sind die Rasthaken des Deckels nun größer und damit stabiler.

Die Optimierungen den Programmcode betreffend wurden sukzessive am Gesamtsystem der zweiten Generation umgesetzt. Im Arbeitspaket 3 sind deshalb verschiedene Generationen des Programmcodes in Verwendung.

Alle weiteren Optimierungen wurden umgesetzt und funktionieren, bis auf die Batterielaufzeit. Diese ist auch mit neuen Batterien noch nicht so hoch wie sie laut Rechnung sein soll. Zudem gibt es bei manchen Batterien Probleme mit der Parallelschaltung von 2 Batterien, um die Kapazität von 800 mAh zu erreichen.

Bei der neuen Platinengeneration wurde vom Fertiger die Lötpasteneinstellungen geändert, weswegen es zu defekten Lötstellen an manchen Komponenten wie der SD-Karte, dem Motor-Connector und dem Schrittmotortreiber kam. Diese mussten mit Mehraufwand beseitigt werden.



Abbildung 24: Gesamtsystem der 2. Generation

Arbeitspaket 3: Testphase mit Radon

Vorbereitung Testphasen

Zur Vorbereitung der Testphase mit Probanden konnten Mitarbeitende eines Wasserwerkes akquiriert werden. Eine entsprechende Handlungsanweisung zur Nutzung des au.raex wurde vorbereitet.

Testphase unter Laborbedingungen

Dichtigkeitsprüfung

Die Prototypen werden für einen bestimmten Zeitraum einer definierten Aktivitätskonzentration ausgesetzt und anschließend ausgewertet. Ziel dieser Versuche ist, die Validierung der Dichtheit bei verschlossener Messkammer der Messgeräte, sowie die Programmierung des Zeit-Modus.

Die Dichtheitsprüfung des Verschlusses der Messkammer wird in der Karlsruher Expositionsanlage durchgeführt.



Abbildung 25: Karlsruher Expositionsanlage mit Pufferbehälter [1], Pumpe [2] und dem Expositionsfass [3]

Die Expositionsanlage besteht aus einem Pufferbehälter [1], an welchem die definierte Radonkonzentration eingestellt wird, einer Pumpe [2] und dem Expositionsfass [3] (s. Abbildung 26).

Ziel dieses Versuchs ist es, die Dichtheit des Verschlusses unter realitätsnahen Radonkonzentrationen zu überprüfen. Dabei wurde die Sollwertkonzentration so festgelegt, dass sie einer typischen Radonkonzentration in Wasserwerken entspricht.

Durchführung

Für den Versuch werden drei Karlsruher Radonexposimeter, ein Alpha-GUARD und ein au.raex – Messgerät in den Expositionsbehälter gelegt. Der Alpha-GUARD wird dabei im zehnmütigen Diffusionsmodus betrieben und dient als Referenz für die tatsächlich vorherrschende Konzentration im Fass. Anhand der Messwerte der Karlsruher Radonexposimeter im Vergleich zu den Messwerten der au.raex Prototypen kann die prozentuale Abweichung und somit die Dichtheit ermittelt und überprüft werden.

In diesem Versuch wurde eine definierte Aktivitätskonzentration von 3000 Bq/m^3 in einem Zeitraum von ca. 72 Stunden und 47 Minuten verwendet.

Expositionsbeginn: 27.06.2023; Start: 11:51 Uhr
 Expositionsende: 30.06.2023; Ende: 12:38 Uhr
 Expositionszeitraum: 72 Stunden und 47 Minuten

Um während des Expositionszeitraums eine konstante Radonkonzentration im Behälter gewährleisten und den Zerfall von Radon ausgleichen zu können, muss nach 30362 Sekunden ein weiterer Pumpenhub nachdosiert werden. Dieser Parameter wird anhand von Berechnungsvorschriften ermittelt werden.

Auswertung

Auswertung Alpha-GUARD

Anhand der kontinuierlichen Aufzeichnung der Messwerte durch die zeitaufgelöste Messung, kann der Konzentrationsverlauf im Fass betrachtet werden. In Abbildung 26 sind die detektierten Messergebnisse mittels Diagramms dargestellt.

Die Maximale Aktivitätskonzentration ist 3776 Bq/m^3 . Die mittlere Aktivitätskonzentration ist 2970 Bq/m^3 .

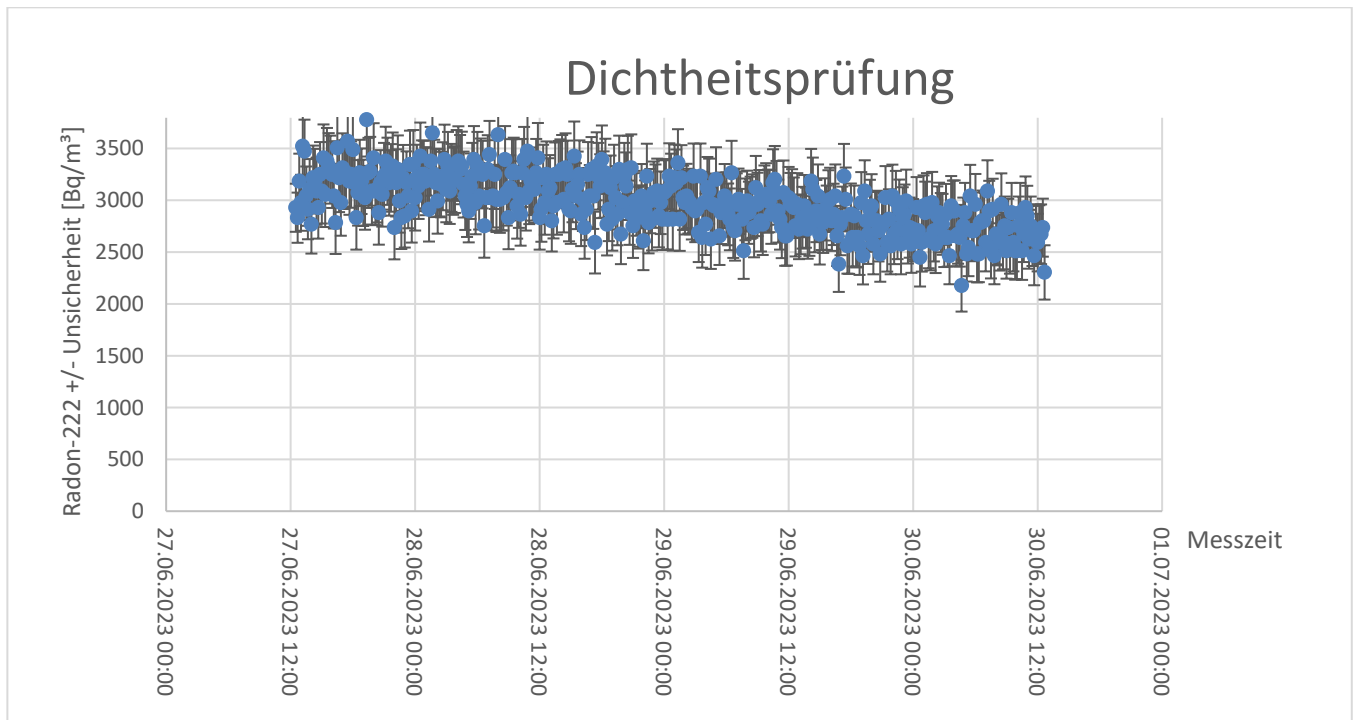


Abbildung 26: Diagramm Auswertung Dichtheitsprüfung

Auswertung Karlsruher Exposimeter:

Im Folgenden ist eine Tabelle mit der ermittelten Spurendichte der Referenzexposimeter dargestellt:

Tabelle 5: Dichtheitsprüfung mit ermittelten Spurendichten der Exposimeter

Exposimeter	SpD
Au.raex.ref1	135,55
Au.raex.ref2	147,94
Au.raex.ref3	160,47
Au.raex_Prototyp offen (hell)	159,68
Au.raex_Prototyp geschlossen (dunkel)	8,61
Durchschnitt ref 1-3	147,99
Durchlässigkeit:	5,80%

Die erwartete Spurendichte bei offener Messkammer und einer Sollaktivität von 3000 Bq/m³ liegt bei ca. 213 Sp/cm².

Die Netto-Spurendichte der Referenzexposimeter und des au.raex werden miteinander verglichen, so dass der prozentuale Abweichungsanteil dieser Messgeräte ermittelt werden kann. Aus dem Vergleich der Spuren der Karlsruher Exposimeter mit dem au.raex mit geschlossener Messkammer ergibt sich eine Durchlässigkeit von 5,80 %.

In vorherigen Versuchen wurde die Dichtigkeit mit unterschiedlichen Prototypen getestet. Bei allen Versuchen ergab sich eine Durchlässigkeit von 5-6%.

Folgende Tabelle zeigt die Durchlässigkeit in Prozent der vorherigen Versuche:

Tabelle 6: Dichtheitsprüfung Übersicht vorherige Versuche

Versuch	Durchlässigkeit [%]
Versuch 1 (18.08.2022 – 22.08.2022)	5,98%
Versuch 2 (26.08.22 - 02.09.22)	6,76%
Versuch 3 (09.09.2022 – 04.10.2022)	4,77 %
Versuch 4 (15.12.2022 – 21.12.2022)	5,94%

Basierend auf den ermittelten Daten kann die Dichtheit der Prototypen als ausreichend identifiziert werden.

Überprüfung des zeitgesteuerten Modus

Durchführung

Die Überprüfung des Zeit-Modus wird ebenfalls in der Karlsruher Expositionsanlage durchgeführt.

Tabelle 7: Test Timer-Modus

Exposimeter	Öffnungs-/Schließzeit	Expositionsdauer pro Tag	Expositionsdauer über 5 Tage
Au.raex ref1	Dauerhaft geöffnet	24	120
Au.raex ref2	Dauerhaft geöffnet	24	120
Au.raex ref3	Dauerhaft geöffnet	24	120
Au.raex ref4	Dauerhaft geöffnet	24	120
Au.raex ref5	Dauerhaft geöffnet	24	120
Au.raex_Prototyp1 8 Stunden pro Tag geöffnet	08:00 - 16:00 Uhr (Arbeitstag)	9	45
Au.raex_Prototyp2 dauerhaft geöffnet	Dauerhaft geöffnet	24	120
Au.raex_Prototyp3 dauerhaft geschlossen	Dauerhaft geschlossen (Urlaub, Arbeitsfrei etc.)	0	0
Au.raex_Prototyp4 6,5 Stunden am Tag geöffnet	07:30 - 14:00 Uhr (verkürzter Arbeitstag)	6,5	32,5

Für den ersten Versuch über fünf Tage werden fünf Karlsruher Radonexposimeter, ein Alpha-GUARD und vier au.raex – Messgeräte in den Expositionsbehälter gelegt. Der Alpha-GUARD wird dabei im zehnmütigen Diffusionsmodus betrieben und dient als Referenz für die tatsächlich vorherrschende Konzentration im Fass. Um die Funktionsfähigkeit des Modus zu überprüfen, werden im Vorfeld festgelegte Öffnungs-, und Schließzeiten der Messkammer über ein File (time.txt) auf die SD-Karte der Geräte programmiert. Im Folgenden sind die Öffnungszeiten der Messkammer der au.raex Messgeräte tabellarisch dargestellt:

- Die Messkammer des Prototyp 1 ist 8 Stunden am Tag geöffnet und stellt somit einen typischen Arbeitstag dar.
- Die Messkammer des Prototyp 2 ist dauerhaft geöffnet und stellt somit einen Vergleichswert zu den Karlsruher Exposimetern dar.
- Die Messkammer Prototyp 3 ist dauerhaft geschlossen und repräsentiert Urlaub, arbeitsfreie Zeit etc.
- Die Messkammer des Prototyp 4 ist 6,5 Stunden pro Tag geöffnet und symbolisiert somit einen verkürzten Arbeitstag.

Folgende Parameter wurden für den Versuch festgelegt:

- Expositionszeitraum: 15.11.2023; 07:29 Uhr – 20.11.2023; 07:29 Uhr
- Expositionszeitraum: 120 Stunden
- Sollaktivitätskonzentration c_{soll} : 3000 Bq/m³
- Erwartete Spurendichte bei dauerhaft geöffneter Messkammer: 303 Sp/cm²

Im folgenden Beispiel ist die Eintragung der formatierten Textdatei für die Öffnungszeit von acht Stunden zu sehen:

1;00:08-08;1-5.11-11

0;00:16-16;1-5.11-11

Die Zeichenfolge kann dabei wie folgt interpretiert werden:

Aktion öffnen = 1; Minuten 00: Stunden Anfang 08 – Stunden Ende 08; Wochentag Anfang 1 – Wochentag Ende 5. Monat Anfang 11 – Monat Ende 11

Auswertung:

Alpha-GUARD:

Das Diagramm mit den Messergebnissen der zeitaufgelösten Messung des Alpha-GUARD's ist im Folgenden abgebildet:

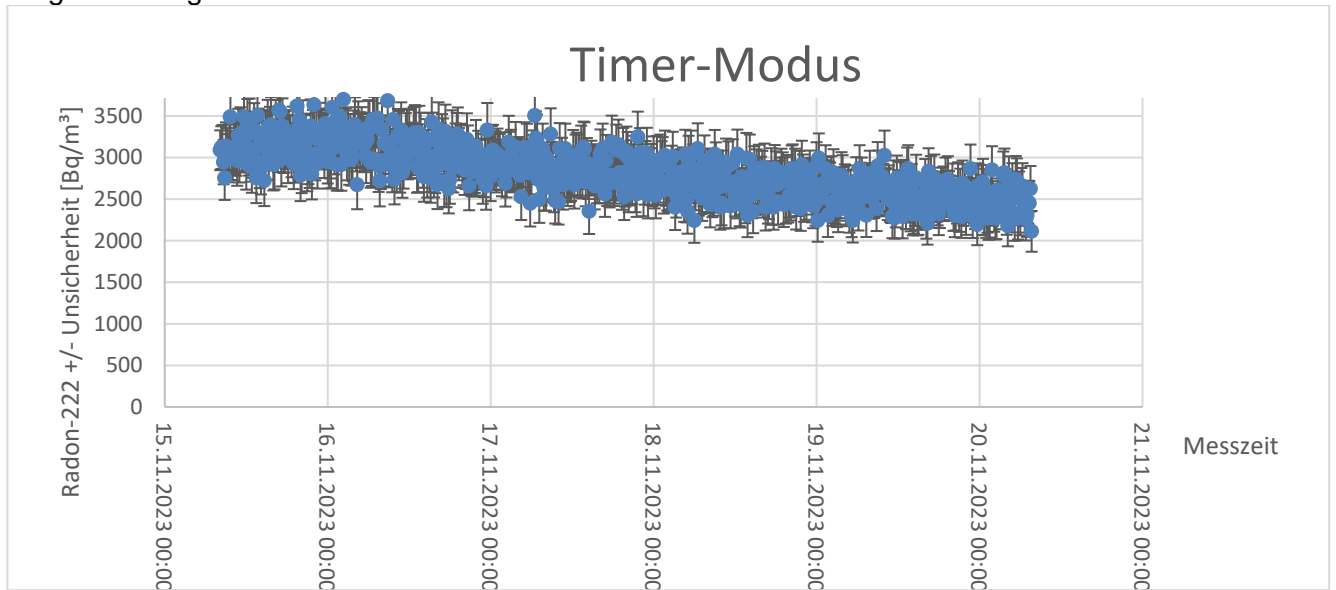


Abbildung 27: Auswertung Alpha-GUARD Test Timer-Modus 1

Maximale Aktivitätskonzentration: 3696 Bq/m³

Mittlere Aktivitätskonzentration: 2818 Bq/m³

Radonexposimeter und au.raex Prototypen

Die ermittelten netto Spurendichten sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 8: Übersicht Versuch Timer-Modus

Exposimeter	Öffnungs-/Schließzeit	Expositionszeit pro Tag	Expositionszeit über 5 Tage	SpDnetto
Au.raex ref1	Dauerhaft geöffnet	24	120	295,89
Au.raex ref2	Dauerhaft geöffnet	24	120	238,75
Au.raex ref3	Dauerhaft geöffnet	24	120	276,32
Au.raex ref4	Dauerhaft geöffnet	24	120	204,31
Au.raex ref5	Dauerhaft geöffnet	24	120	231,7
Au.raex_Prototyp1	08:00 - 16:00 Uhr (Arbeitstag)	8	40	117,42
Au.raex_Prototyp2	Dauerhaft geöffnet	24	120	173,78
Au.raex_Prototyp3	Dauerhaft geschlossen (Urlaub/Arbeitsfrei etc.)	0	0	6,27
Au.raex_Prototyp4	07:30 - 14:00 Uhr (verkürzter Arbeitstag)	6,5	32,5	209

Aufgrund der Auswertung des Alpha GUARDs ergibt sich eine erwartete Spurendichte bei offener Messkammer mit Konzentrationsmittelwert von 303 Sp/m².

Die Referenzexposimeter weisen mit der Ausnahme eines Exposimeters ähnliche Spurendichten auf. Der Au.raex Prototyp 2 mit dauerhaft geöffneter Messkammer weist mit 173,78 Sp/cm² im Vergleich eine geringere Spurendichte auf. Während der gesamten Versuchsdauer wurde kein Schließvorgang auf der SD-Karte registriert, womit dies als möglicher Grund ausgeschlossen werden kann. Möglicherweise wurde der Detektor nicht richtig eingelegt.

Die Öffnungs-, und Schließzeiten des Prototyp 1 und 4 können über das Auslesen der jeweiligen SD-Karte überprüft werden. Für jeden Tag wird eine separate CSV-Datei erstellt. Im Folgenden ist eine Beispieldatei zu sehen:

Tabelle 9: CSV-Datei Öffnungs- und Schließzeiten

Messkammer	Uhrzeit	Temperatur in milli °C	Relative Luftfeuchte RH in milli %
close	00:00:02	19281	46636
close	01:00:02	19281	46856
close	02:00:02	19263	47099
close	03:00:02	19279	47380
close	04:00:02	19273	47674
close	05:00:02	19300	48020
close	06:00:02	19231	50018
close	07:00:02	19730	51661
open	08:00:04	20211	51768
open	09:00:02	22411	51905
open	10:00:02	21209	50450
open	11:00:02	20368	52458
open	12:00:02	20392	53971
open	13:00:02	20203	55278
open	14:00:02	20371	57009
open	15:00:02	20454	58085
close	16:00:04	20368	58522
close	17:00:02	20208	58709
close	18:00:02	20117	59132
close	19:00:02	20045	59593
close	20:00:02	20082	60087
close	21:00:02	19997	60542
close	22:00:02	19888	60795
close	23:00:02	19794	60569

Die gewünschten Öffnungszeiten von acht Stunden am Tag für Prototyp1 konnten somit erfolgreich überprüft werden. Die Spurendichte des Prototyp 4 (verkürzter Arbeitstag) dagegen war mit 209 Sp/cm² deutlich höher als von Prototyp 1. Dieser Wert ist unplausibel, da die Messkammer des Prototyps 4 über den Messzeitraum über eine kürzere Zeitspanne geöffnet war, als die von Prototyp 1. Aus diesem Grund wurden die Öffnungs-, und Schließzeiten der CSV-Dateien überprüft. Auf der SD-Karte wurde lediglich eine CSV-Datei am Starttag des Expositionszeitraums generiert. Die Messkammer wurde zwar wie gewünscht um 07:30 Uhr geöffnet, hat sich jedoch nicht mehr geschlossen und war dauerhaft geöffnet. Dies lässt auf einen Handhabungsfehler bei der Programmierung des time.txt. Files schließen, mit welchem die Öffnungs- und Schließzeiten programmiert werden.

Nach Rücksprache können in der im Versuch verwendeten Version der Prototypen lediglich ganze Stunden als Öffnungs-, bzw. Schließzeiten festgelegt werden.

Wiederholung der Überprüfung des Zeitgesteuerten-Modus

Durchführung

In diesem Versuch wurden die identischen Parameter gewählt, wie in Versuch 1. In diesem Versuch wurden nur volle Stunden gewählt. Der Programmcode des au.raex wurde als Konsequenz angepasst, sodass nun auch halbstündige Öffnungsintervalle eingefügt werden können.

Im Folgenden sind die Öffnungszeiten der Messkammer der au.raex Messgeräte tabellarisch dargestellt:

Tabelle 10: Timer-Modus Versuch 2

Exposimeter	Öffnungs-/Schließzeit	Expositionsdauer pro Tag	Expositionsdauer über 5 Tage
Au.raex ref1	Dauerhaft geöffnet	24	120
Au.raex ref2	Dauerhaft geöffnet	24	120
Au.raex ref3	Dauerhaft geöffnet	24	120
Au.raex_Prototyp 1	08:00 - 16:00 Uhr (Arbeitstag)	8	40
Au.raex_Prototyp 2	08:00 - 16:00 Uhr (Arbeitstag)	8	40
Au.raex_Prototyp 3	Dauerhaft geschlossen (Urlaub/Arbeitsfrei etc.)	0	0

Die Messkammern des Prototyp 1 und 2 sind 8 Stunden am Tag geöffnet und stellen somit einen typischen Arbeitstag dar. Die Messkammer Prototyp 3 ist dauerhaft geschlossen und repräsentiert Urlaub, arbeitsfreie Zeit etc.

Folgende Parameter wurden für den Versuch festgelegt:

- Expositionszeitraum: 22.11.2023; 07:29 Uhr – 27.11.2023; 07:29 Uhr
- Expositionszeitraum: 120 Stunden

Auswertung:

Alpha-GUARD

Das Diagramm mit den Messergebnissen der zeitaufgelösten Messung des Alpha-GUARD's ist im Folgenden abgebildet:

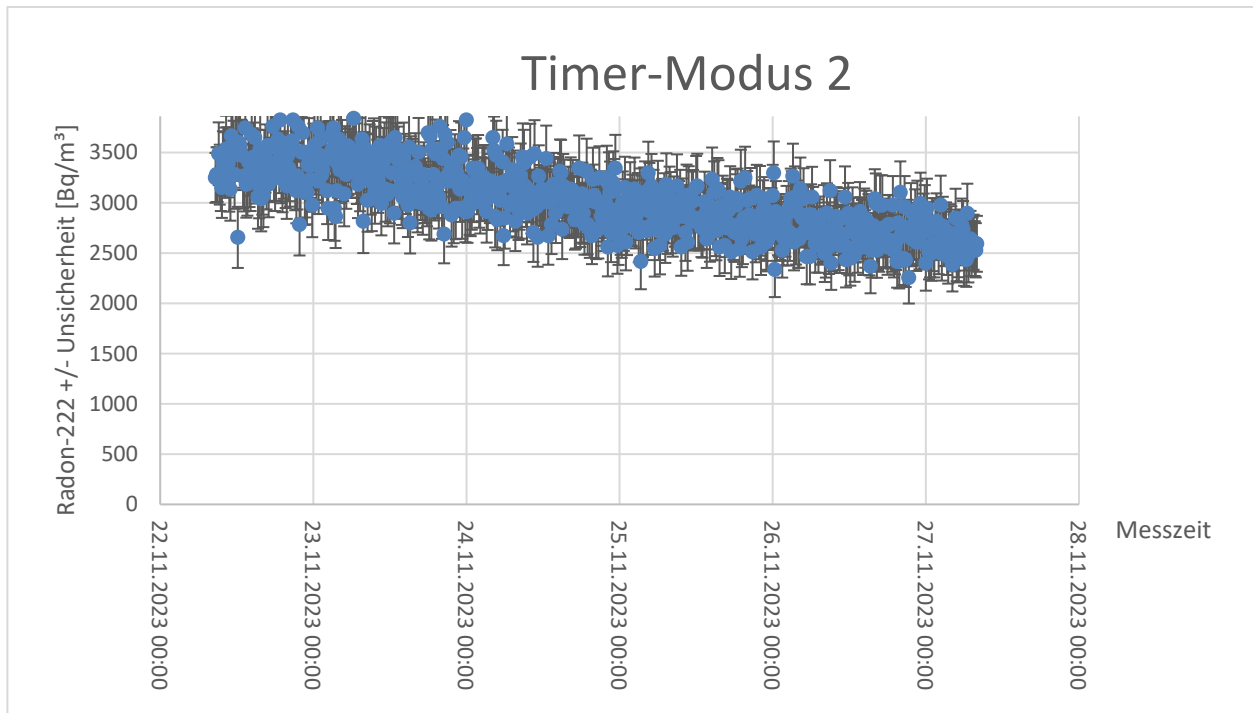


Abbildung 28: Auswertung Alpha-GUARD Test Timer-Modus 2

Maximale Aktivitätskonzentration: 3840 Bq/m³

Mittlere Aktivitätskonzentration: 3018 Bq/m³

Radonexposimeter und au.raex Prototypen

Die ermittelte netto Spurendichte sind der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 11: Übersicht Versuch Timer-Modus 2

Exposimeter	Öffnungs-/Schließzeit	Expositions-dauer pro Tag	Expositions-dauer über 5 Tage	SpDnetto
Au.raex ref1	Dauerhaft geöffnet	24	120	250,49
Au.raex ref2	Dauerhaft geöffnet	24	120	268,5
Au.raex ref3	Dauerhaft geöffnet	24	120	239,56
Au.raex_Prototyp1	08:00 - 16:00 Uhr (Arbeitstag)	8	40	66,54
Au.raex_Prototyp2	08:00 - 16:00 Uhr (Arbeitstag)	8	40	90,02
Au.raex_Prototyp3	Dauerhaft geschlossen (Urlaub/Arbeitsfrei etc.)	0	0	10,18

Die Referenzexposimeter weisen auch hier ähnliche Spurendichten auf. Die Öffnungs-, und Schließzeiten des Prototyp 1 und 2 können über das Auslesen der jeweiligen SD-Karte überprüft werden. Es können für jeden Expositionstag die korrekten Öffnungs-, und Schließzeiten festgestellt werden.

Überprüfung der Umgebungsluftwerte Temperatur und relative Luftfeuchte

In den CSV-Dateien der Prototypen werden nicht nur die jeweiligen Zeitstempel, sondern auch die Temperatur und die relative Luftfeuchte erfasst (s. Tabelle 5). Um diese Werte auf Plausibilität zu überprüfen, werden sie mit den Werten des Alpha-GUARDS während der Versuche des Zeit-Modus verglichen. In der folgenden Tabelle sind die durchschnittlichen Werte über die Versuchszeiträume dargestellt:

Tabelle 12: Übersicht Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Versuch	Messgerät	Mittlere Temperatur in °C	Mittlere relative Luftfeuchte RH in %
1	Alpha GUARD	20,86	55,02
1	au.raex1	20,06	49,12
2	Alpha GUARD	19,89	48,94
2	au.raex1	19,53	47,53
2	Au.raex2	19,33	46,32

Die registrierte durchschnittliche Temperatur und relative Luftfeuchte des au.raex sind nahezu identisch mit den Werten des Alpha-GUARDS und somit plausibel.

Überprüfung Bewegungsmodus

Versuchsplanung:

Zur Überprüfung des Bewegungsmodus sollen insgesamt zwei Versuche durchgeführt werden, die jeweils über die Dauer von sieben Stunden und 30 Minuten erfolgen sollen. Vor der Durchführung der Versuche wurde davon ausgegangen, dass sich die Messkammer zweimal pro Tag öffnen und schließen wird. Öffnen soll sich die Messkammer zu Beginn der Arbeit und nach der Mittagspause. Entsprechend schließen soll die Messkammer zur Mittagspause und nach Beendigung der Arbeit. In einer ersten Testphase wird ein praxisnaher Arbeitstag eines Beschäftigten simuliert, welcher sowohl Arbeiten am Computer als auch in Bewegung ausübt.

In der zweiten Testphase wird die Arbeit unter permanenter Bewegung simuliert. Mögliche Testpersonen für die Funktionalitätsprüfung sind beispielsweise Beschäftigte eines Wasserwerks oder KIT-Beschäftigte des operativen Strahlenschutzes.

Für eine sachgerechte Evaluation sollten die Proband*innen die vorgegebene Dauer des Arbeitstags einhalten und die Prototypen an einer repräsentativen Stelle tragen.

Versuchsdurchführung Testreihe 1:

Für die ersten Versuche wurden die Prototypen mit einem Clip zur Befestigung versehen und von Mitarbeiter*innen des operativen Strahlenschutzes, sowie innerhalb der eigenen Abteilung getestet. Der Testzeitraum war vom 17.08.2023 bis zum 06.09.2023.

Auswertung Testreihe 1:

Während der Durchführung der Testphase sind einige Probleme und Handhabungsfehler aufgetreten.

Test 1 (17.08.2023):

Für diesen Tag wurden keine Öffnungs-, und Schließzeiten auf der SD-Karte registriert. Grund hierfür war ein Handhabungsfehler bei der Einstellung des Modus. Zudem hat sich der Clip im Laufe des Tages geöffnet und das Messgerät ist aus kurzer Distanz heruntergefallen und auf dem Boden aufgekommen. Dabei ist der Verschluss gebrochen und die Platine im Gehäuse hat sich gelöst, so dass der Modus nicht mehr funktionierte. Folglich ist das Material der im Versuch verwendeten Prototypen zu instabil beziehungsweise die Geräte sind zu schwer für die herkömmlichen Clips. Eine Anpassungskonstruktion der Gehäusebaugruppe wurde daher als notwendiger Schritt für die weitere Entwicklungsarbeit identifiziert.

Test 2 (18.08.2023):

Da die Platine locker war und der Bewegungssensor deshalb nicht funktionierte, konnten an diesem Tag keine Tests durchgeführt werden. Außerdem reagierte das Gerät nach nur einem Tag nicht mehr, da laut LED-Anzeige der Akku leer war. Der Sachverhalt wurde allerdings nochmals in einem weiteren Versuch untersucht. Die gelöste Platine konnte provisorisch fixiert werden, was den Bewegungsmodus wieder funktionsfähig machte.

Test 3 (28.08.2023):

Für einen weiteren Test der Akkulaufzeit wurde das Exposimeter am Tag zuvor vollgeladen. Folgende Daten konnten ausgelesen werden:

Tabelle 13: CSV-Datei Bewegungsmodus

Messkammer	Uhrzeit	Temperatur in milli °C	Relative Luftfeuchte RH in milli °C
close	07:03:09	25647	54559
open	07:52:31	24235	57466
close	07:53:29	24571	61535
open	07:55:02	24523	57661
close	13:29:56	24432	58908
open	13:30:10	24470	57022
close	13:30:36	24448	54602
close	13:31:19	24384	52575
close	14:31:39	24806	58708
open	14:31:55	24921	55300

Es wurden insgesamt vier korrekte Öffnungs-, und Schließzyklen registriert. Unplausibel und fehlerhaft sind die drei „close“ Stempel um 13:30:36, 13:31:19 und 14:31:39. Die Korrektheit des ersten Zeitstempel ist nicht auszuschließen, da sich die Messkammer nach einer Ruhezeit von zwölf Sekunden schließt. Allerdings kann bei keinem der drei Zeitstempel mit Sicherheit festgelegt werden, ob diese korrekt oder inkorrekt sind. Zudem endet die Aufzeichnung der CSV-Datei mit einem „open“, was ebenfalls nicht den erwarteten Ergebnissen entspricht.

Test 4 (29.08.2023):

Beim Auslesen der Daten von Test 4 konnte keine CSV-Datei auf der SD-Karte gefunden werden. Gemäß den Angaben des Probanden, welcher das Exposimeter an diesem Tag mit sich führte, hat sich die Messkammer jedoch mehrmals geöffnet beziehungsweise geschlossen. Zudem wurde der Akku des Exposimeters nicht erneut geladen.

Test 5 (30.08.2023):

Der Prototyp wurde im Laufe des Morgens von der Testperson zurückgebracht, da sich die Messkammer bei Bewegungen nicht mehr geöffnet hat.

Gemäß ausgelesener CSV-Datei wurden im Zeitraum von 07:01:09 bis 08:14:20 Öffnungszyklen registriert.

Tabelle 14: CSV-Datei Bewegungsmodus Test 5

Messkammer	Uhrzeit	Temperatur in milli °C	Relative Luftfeuchte RH in milli °C
Open	07:01:09	24643	73641
Open	07:01:17	24697	71784
Close	07:03:05	25111	53601
Open	07:06:17	23490	58822
Close	07:06:40	23207	58143
Open	07:11:24	33111	56179

Close	07:12:15	36814	35639
Close	07:01:09	35450	34851
Open	07:44:32	22459	60758
Close	07:47:46	23458	58287
Open	07:47:55	23466	58790
Close	07:48:43	23495	61013
Open	07:52:00	23466	60914
Close	07:53:00	23508	60734
Open	07:55:39	23436	60566
Close	08:02:04	24424	59286
Open	08:02:17	24512	59130
Close	08:03:47	24782	58619
Open	08:05:39	25100	57943
Close	08:06:59	25284	57652
Open	08:08:07	25281	57998
Close	08:08:43	25236	58261
Open	08:08:54	25228	58190
Close	08:14:20	23041	57249

In diesem Zeitraum wurden insgesamt elf korrekte Öffnungs-, und Schließvorgänge aufgezeichnet. Auffällig sind die beiden grau hinterlegten Stati der Messkammer. Hierbei wurde der Status „open“ sowie „close“ mit dem identischen Zeitstempel aufgezeichnet. Außerdem wird hier deutlich, dass aufgrund der Sensibilität des Bewegungssensors und der kurzen Ruhezeit von zwölf Sekunden deutlich mehr Öffnungszyklen generiert werden, als erwartet.

Als Grund für die geringe Versuchszeit, konnte die Akkuleistung identifiziert werden. Gemäß LED-Anzeige war der Akku leer. Dies bestätigt die geringe Akkuleistung von nur 1-2 Tagen aus Versuch 2, die nicht den festgelegten Anforderungen an den Prototypen entspricht.

Test 6 (31.08.2023):

Auch in diesem Versuch wird deutlich, dass der Bewegungssensor zu diesem Zeitpunkt zu sensibel eingestellt und die Ruhezeit des Exposimeters zu kurz war. Gemäß generierter CSV-Datei konnten im Zeitraum von 07:21:42 bis 14:47:57 insgesamt 47 Öffnungszyklen aufgrund kurzer Bewegungsunterbrechungen aufgezeichnet werden. Dabei war ein Zeitstempel mit dem Status „close“ fehlerhaft.

Test 7 (06.09.2023)

In Versuch 7 konnten insgesamt 50 Öffnungszyklen ohne fehlerhafte Öffnungs-, und Schließvorgänge ausgelesen werden.

In folgender Tabelle sind die Ergebnisse der Testphase zusammengefasst:

Tabelle 15: Übersicht Überprüfung Bewegungsmodus

Versuch	Dauer in Stunden	Öffnungs- /Schließvorgänge	Fehlerhafte Öffnungs- /Schließvorgänge
1	Es wurde keine CSV-Datei generiert aufgrund eines Handhabungsfehlers		
2	Platine locker, Versuch konnte nicht durchgeführt werden		
3	7,48	4	2 close, 1 open
4	Es wurde keine CSV-Datei generiert		
5	1,22	11	1 close, 1 open
6	7,43	47	1 close
7	8,07	50	0

Da für jeden getragenen Tag eine separate CSV-Datei erstellt wird, kann ein Makro Abhilfe schaffen, um die Zeitspannen, in denen die Messkammer geöffnet oder geschlossen ist, leichter und effizienter herauszufiltern.

Anpassungen an den Prototypen:

Basierend auf den Erkenntnissen aus der Überprüfung des Bewegungsmodus wurden Änderungen an den Prototypen angedacht und vorgenommen (vgl. Tabelle 4 im Kapitel Optimierung bei Arbeitspaket 2). Bezüglich der Instabilität des Deckels sind bei der aktuellen Generation keine konstruktiven Veränderungen mehr möglich. Der Rand des Deckels könnte gummiert werden, um eventuelle Aufprälle abzdämpfen. Des Weiteren wurde die Sensibilität des Sensors angepasst und die Ruhezeit bis zum Schließen der Messkammer auf fünf Minuten erhöht (Vgl. Tabelle 4 im Kapitel Optimierung bei Arbeitspaket 2).

Auswertung Überprüfung Bewegungsmodus nach Anpassung der Prototypen:

Für die Überprüfung des Bewegungsmodus nach Anpassung der Prototypen gibt es keine Auswertung, da der Modus nicht mehr zuverlässig funktioniert. Das Exosimeter reagiert teilweise nicht auf Bewegungen oder funktioniert nach ein paar Stunden plötzlich nicht mehr.

Eine weitere Iteration im Programmcode wurde getätigt, um die Programmabstürze zu unterbinden, die Testphase konnte aber zum Zeitpunkt des Berichts nicht mehr ausgewertet werden. Dies wird im Nachgang geschehen.

Testphase mit Probanden

Eine Versuchsreihe mit Mitarbeitenden des Wasserwerkes Linkenheim ist angestrebt, insbesondere um den Bewegungsmodus zu testen. Das Wasserwerk wurde einerseits aufgrund der räumlichen Nähe zum KIT, andererseits aufgrund der Tatsache, dass die Radonsituation vor Ort durch vorausgegangene passive Ortsmessungen bekannt war, ausgewählt. Aufgrund der noch unerwartet auftretenden Ausfälle des Systems im autarken Betrieb, insbesondere im Bewegungsmodus, konnte zum Zeitpunkt der Berichterstellung die Testphase noch nicht sinnvoll abgeschlossen werden. Der Programmcode wurde dementsprechend bereits angepasst, die Testphase wird zum Zeitpunkt der Berichterstellung durchgeführt und nachgelagert ausgewertet. Es erfolgt eine „open access“ Veröffentlichung der Ergebnisse auf der KITopen Plattform des KIT.

5. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

Bitte geben Sie an, ob seit Projektbeginn relevante Publikationen u. ä. von Dritten zur Forschungsthematik veröffentlicht wurden. Falls ja, diese Publikationen sowie Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte bitte auflisten und angeben, ob und ggf. welche Konsequenzen diese für das Projekt hatten bzw. haben.

Gwosch, Peters, Pehlivan, Naber. Reliability Model of an Automatically Switching Radon Exosimeter for System Design Evaluation, ESREL 2022, 2022, doi: 10.3850/978-981-18-5183-4_R29-13-150-cd.

6. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

Beschreibung der Relevanz der Ergebnisse für die gesetzliche Unfallversicherung insbesondere im Hinblick auf die Praxisverknüpfung. Auch der Beschreibung für geplante Schritte einer Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Routine-Anwendung.

Das **Arbeitspaket 2** wurde mit der Entwicklung des Prototyps durch das IPEK abgeschlossen. Es konnte ein Verschlusskonzept gefunden werden, das sehr robust funktioniert, nicht zu Verklemmungen führt und platzsparend gestaltet werden kann. Zusätzlich wird der Luftaustausch in der Messkammer durch das Wirkprinzip eines Kolbens gefördert. Negativ zu erwähnen ist die aktuelle Herstellung der Kulisse als SLS 3D-Druck. Diese ist recht kostspielig. Für eine Serienfertigung muss daher auf ein massentaugliches Fertigungsverfahren wie Spritzguss skaliert werden, wodurch eventuell konstruktive Anpassungen an der Kulisse notwendig sind.

In der Entwicklung des au.raex wurden viele Komponenten verwendet, die für eine Serienfertigung tauglich sind. Dazu zählt u.a. der Schrittmotor aus CD/DVD-Laufwerken, der günstig in großen Mengen beschafft werden kann. Batterien der verwendeten Form gibt es ebenfalls in großen Abnahmemengen bei ostasiatischen Anbietern. Die auf der Platine eingesetzten Chips wie Mikrocontroller und Schrittmotortreiber sind die kostspieligsten Bauteile. Hier kann auf Alternativen mit geringerem Speicher oder Leistung zurückgegriffen werden.

Bei der Platinenentwicklung kam es zu massiven Verzögerungen in der Lieferzeit des ausgewählten Mikrocontrollers von über einem Jahr, bedingt durch die „Chipkrise“ während Corona und die verlängerten Lieferzeiten am Anfang des Ausbruchs des Ukraine-Kriegs.

Deshalb wurde zwischenzeitlich ein anderer Mikrocontroller beschafft, der jedoch nicht alle Funktionalitäten bereitstellen konnte, insbesondere was die Speicherung von Daten auf SD-Karte angeht. Dies bedingte einen erheblichen Mehraufwand in der Beschaffung und Programmierung, wodurch es zu Verzögerungen in der Bereitstellung von Prototypen an die SUM kam. Dadurch konnten die Testphasen des Arbeitspakets 3 im Berichtszeitraum nicht komplett abgeschlossen werden.

Die bisher ermittelten Ergebnisse aus den durchgeführten Testphasen des **Arbeitspakets 3** entsprechen aktuell noch nicht dem gewünschten Ziel eines seriennahen Prototyps. Der Timer-Modus ist funktionsfähig, in der Praxis muss allerdings darauf geachtet werden, dass die Öffnungs- und Schließzeiten vor Expositionsbeginn fest eingestellt wurden und es zu Diskrepanzen durch Fehlzeiten oder verkürzte Arbeitstage geben kann, die ohne eine separate Dokumentation zu Fehlauswertungen führen können.

Der Bewegungsmodus ist aufgrund der kurzen Ruhezeit und der Sensibilität noch nicht funktionsfähig genug, um zuverlässige Werte zu liefern. Die Optimierung dieser Einstellungen konnten zum Zeitpunkt des Abschlussberichts nicht mehr an Probanden getestet werden und wird im Nachgang geschehen. Zudem hat die aktuell kurze Akkulaufzeit ein hohes Fehlerpotential, da sich die Zeiteinstellungen der SD-Karte mit leer werdender Batterie zurücksetzen und neu eingestellt werden müssten, was zu fehlerhaften Zeitstempeln führt.

Außerdem konnte aufgrund der durch die genannten Lieferverzögerungen geringen Menge an Prototypen, die zeitgleich zur Verfügung standen, die geplante Teilnahme an Vergleichsbestrahlungen nicht angetreten werden.

7. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

Grundsätzlich besteht der Plan, die entwickelten seriennahen Prototypen zusammen mit einem namhaften Messgerätehersteller zum serienreifen Prototypen weiterzuentwickeln. Da die Entwicklung des Prototyps derzeit noch nicht fertiggestellt ist, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch kein Zeithorizont genannt werden. Die Auswertung der diesbezüglich optimierten 2. Generation des Projekts, die kurz vor Ende des Projektbearbeitungszeitraums fertiggestellt wurde und noch nicht in der Testphase teilnehmen konnte, wird hierzu näher Aufschluss geben.

8. Anhang/Anhänge

Bei Forschungs Kooperationen ist das ausgefüllte und unterschriebene Formblatt „Erklärung für das Berichtswesen in Kooperationsprojekten“ beifügen. Bei Bedarf können weitere Anhänge (z. B. im Projekt entwickelte Fragebögen) ergänzt werden.

Verschluss Konzeptfindungsphase Kreativitätsworkshop

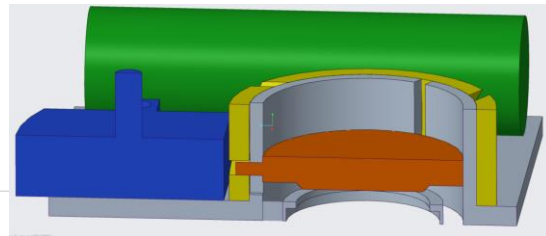
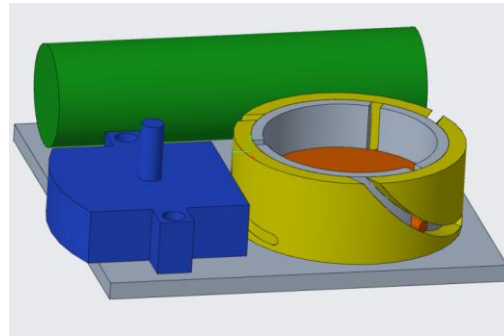
Konzepte: Stempel

Vorteile

- Andruckkraft mit Bahnneigung in Kulissee einstellbar
- Einfacher Aufbau möglich
- Gute Abdichtung des Detektor mit O-Ring
- Luftaustausch - Zieht Luft in Messkammer und drückt sie raus

Nachteile

- Reibverhalten und Verklebung? - Zu Testen

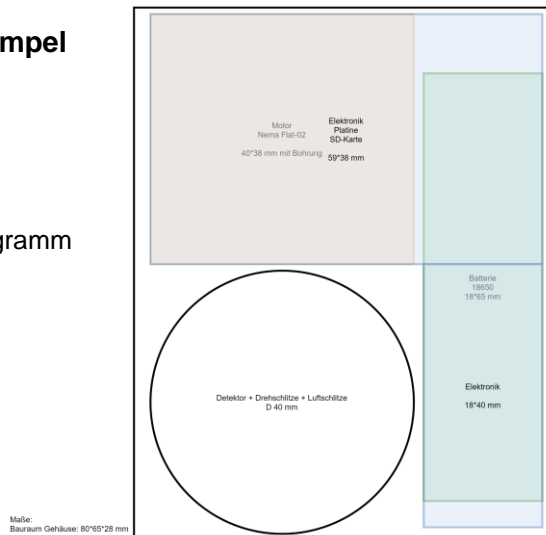


11 30.01.2024

Julian Peters - Radon Exosimeter

Konzepte: Stempel Bauraum

In Sketch Programm



12 30.01.2024

Julian Peters - Radon Exosimeter



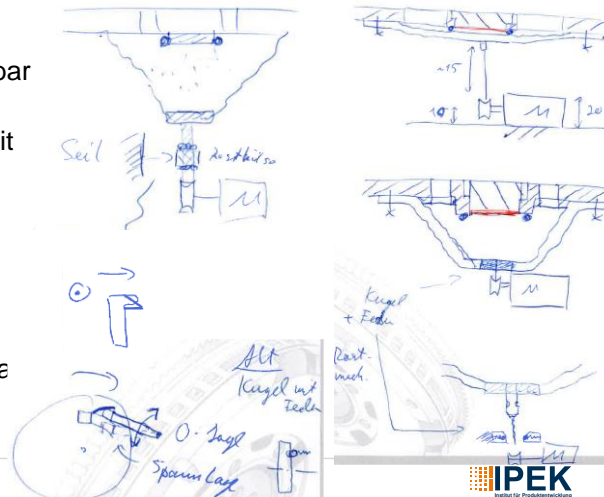
Konzepte: Membran

Vorteile

- Andruckkraft mit Kulisser einstellbar
- Einfacher Aufbau möglich
- Gute Abdichtung des Detektor mit O-Ring

Nachteile

- Verfügbarkeit passender Membrane
- Ausleiern der Membran - Dichtigkeit
- Hoher Energiebedarf um Membran aufzuhalten - Rastmechanismus



13

30.01.2024

Julian Peters - Radon Exosimeter

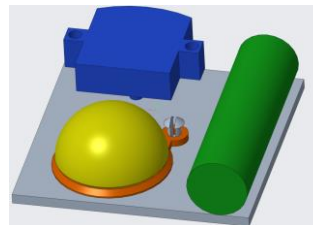
Konzepte: Viertelkreis

Vorteile

- Einfacher Aufbau möglich

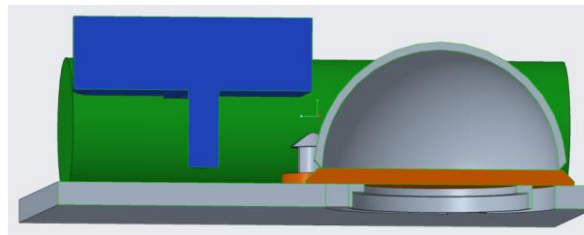
Nachteile

- Platzbedarf
- Dichtwirkung
- Montage der Kuppel mit Feder



Sandwichplatte zwischen Schieber und Kuppel

Optional:
Erweiterung auf Vollkreis



14

30.01.2024

Julian Peters - Radon Exosimeter

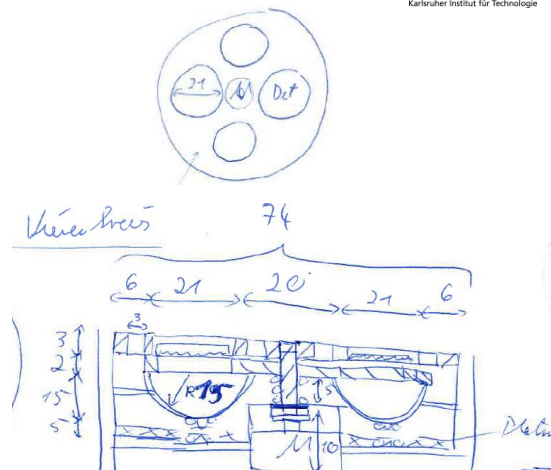
Konzepte: Vollkreis

Vorteile

- Gute Platzausnutzung
- Integration von 4 Detektoren

Nachteile

- Insgesamt hoher Platzbedarf
- Dichtwirkung



15

30.01.2024

Julian Peters - Radon Exosimeter

Kugelhahn

- Kugelhahn (Absperrventil) wie bei Schlauchleitungen / Bierbrau- /zapfanlagen

Vorteil

- Funktionierendes, dichtes System

Nachteil

- Größe



16 30.01.2024

Julian Peters - Radon Exosimeter

Kameraverschluss

- Verschluss des Sensors einer Kamera (z.B. Spiegelreflex)

Vorteil

- Funktionierendes, aktuiertes System
- Geringes Gewicht
- Geringer Platzbedarf (Lamellen falten sich)
- Lichtdicht

Nachteil

- Ansteuerung
- Nicht unbedingt gasdicht
- Energiebedarf (Federrückgespannt – geringe Öffnungszeit)
- Relativ teuer als Zukaufteil (30 € bzw. 80 €)



17 30.01.2024

Julian Peters - Radon Exosimeter

Literaturverzeichnis

- [1] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, „Schutz vor Radon,“ Referat 36: Strahlenschutz, Stuttgart, Karlsruhe, 2019.
- [2] „DIN EN ISO 11665-1: 2020-02 Ermittlung der Radioaktivität in der Umwelt – Luft: Radon-222 Teil 1: Radon und seine kurzlebigen Folgeprodukte: Quellen und Messverfahren,“ 2020-02.
- [3] W. Blair, Chairman und E. al., „Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection,“ ICRP, 1994.
- [4] Strahlenschutzkommission, „Lungenkrebsrisiko durch Radonexpositionen in Wohnungen - Stellungnahme der Strahlenschutzkommission,“ Strahlenschutzkommission, Bonn, 2005.

- [5] S. Darby, D. Hill, A. Auvinen und J. M. Barros-Dios, „NCBI; US National Library of Medicine National Institutes of Health,“ 2005. [Online]. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC546066/>. [Zugriff am 2 April 2020].
- [6] H.-. M. Veith, Strahlenschutzgesetz mit Verordnungen; Textausgabe mit erläuternder Einführung, Reguvis Fachmedien GmbH, 2019.
- [7] Bundesamt für Strahlenschutz, „Aktuelle Auswertung aus dem Strahlenschutzregister,“ 22 05 2018. [Online]. Available: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/beruf/strahlenschutzregister/strahlenschutzregister-auswertungen.html>. [Zugriff am 03 08 2020].
- [8] Bertsche, Bernd, Peter Göhner, Uwe Jensen, Wolfgang Schinköthe, and Hans-Joachim Wunderlich. 2009. Zuverlässigkeit Mechatronischer Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [9] Gäng, J., M. Wedel, B. Bertsche, and Göhner P. 2007. “Determining Mechatronic System Reliability Using Quantitative and Qualitative Methods.” In Proceedings of the European Conference of Safety and Reliability.
- [10] US Department of Defense. 1991. “MIL-HDBK-217F: RELIABILITY PREDICTION of ELECTRONIC EQUIPMENT.” Accessed 09.05.22. http://everyspec.com/MIL-HDBK/MILHDBK-0200-0299/MIL-HDBK-217F_14591/.
- [11] Denson, W., G. Chandler, W. Crowell, and R. Wanner. 1991. “NPRD-91: Nonelectronic Parts Reliability Data.” Accessed 09.05.22. http://www.mwfr.com/CS2/NPRD-91_a242083.pdf.
- [12] DIN EN 61078:2018-03: Reliability Block Diagrams. 2018. Berlin: Beuth.
- [13] Birolini, Alessandro. 2017. Reliability Engineering: Theory and Practice : With 210 Figures, 60 Tables, 140 Examples, and 80 Problems for Homework. 8th Edition. Berlin, Heidelberg: Springer.
- [14] DIN EN 60812:2015-08: Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). 2015. Berlin: Beuth.