

# Maskenfreie Patient:innenpositionierung in der Strahlentherapie mittels Surface- Guidance: Eine Pilotstudie

Autor\*in 1: Dávid Kanalas, Hochschule Campus Wien

Autor\*in 2: Viktoria Jörg, Hochschule Campus Wien

**Abstract:** Die konventionelle kraniale Strahlentherapie erfolgt in der Regel unter thermoplastischer Maskenimmobilisation. Gleichzeitig berichten relevante Anteile der Patient:innen über behandlungsassoziierte Angst oder maskenbedingtes Unbehagen, was zu Unterbrechungen oder eingeschränkter Adhärenz führen kann. Fortschritte in der Surface-Guided Radiotherapy ermöglichen erstmals eine präzise, nicht-invasive Positionierung mittels Echtzeitbewegungsüberwachung der Oberfläche. In einer präklinischen Pilotstudie mit fünf freiwilligen Proband:innen wurde die technische Machbarkeit einer vollständig maskenlosen kraniellen Lagerung untersucht. Die intrafraktionellen translatorischen Abweichungen blieben unter 2 mm, die Rotationsbewegungen unter 1°, ohne Hinweis auf einen systematischen Drift. Nicht-rigide Mikrobewegungen wurden zuverlässig von rigiden Kopfbewegungen differenziert, während gezielte Bewegungsprovokationen eindeutig detektiert wurden. Die Ergebnisse bilden die methodische Grundlage für eine anschließende prospektive klinische Machbarkeitsstudie.

**Keywords:** Strahlentherapie, Patient:innenkomfort, Surface-Guided Radiotherapy, Maskenfreie Positionierung

## 1. EINLEITUNG

Die präzise Immobilisation des Kopfes ist eine zentrale Voraussetzung für die sichere Durchführung kranialer Radiotherapie. Traditionell erfolgt diese Immobilisation mittels thermoplastischer Maskensysteme, die eine reproduzierbare Positionierung zwischen und während der Fraktionen gewährleisten. In Kombination mit bildgeführter Strahlentherapie, insbesondere kV-Cone-Beam-Computertomographie, können Lagerungsabweichungen millimetergenau detektiert und korrigiert werden (Grégoire et al., 2020; Tejinder Kataria, 2014).

Unabhängig von der technischen Zuverlässigkeit ist jedoch die psychische Belastung bei Patient:innen mit Kopf-Hals-Tumoren oder intrakraniellen Malignomen hoch. Bis zu 60 % zeigen im Verlauf ihrer onkologischen Behandlung erhöhte Werte für Distress, Angst oder depressive Symptomatik (Cordes et al., 2014; Kilbride et al., 2007; Reich et al., 2014). Im Kontext der Radiotherapie wird insbesondere die Immobilisation mittels thermoplastischer Maske als zusätzliche Belastung beschrieben (Adeberg et al., 2021; Forbes et al., 2023; Nixon et al., 2018). Etwa 26 % der Patient:innen berichten explizit maskenassoziiertes Unbehagen oder Angst (Nixon et al., 2018), wobei Maskenfixationen wiederholt als besonders stressauslösender Bestandteil der Behandlung identifiziert wurden (Adeberg et al., 2021).

Vor dem Hintergrund einer zunehmend patient:innenzentrierten Onkologie stellt sich daher die Frage, ob eine technisch gleichwertige, aber weniger restriktive Form der Lagerung möglich ist.

Optische Oberflächenscanner (Surface-guided Radiotherapy, SGRT) ermöglichen eine kontinuierliche intrafraktionelle Überwachung, das heißt eine Positionskontrolle während der laufenden Bestrahlung, in sechs Freiheitsgraden ohne zusätzliche Strahlenexposition. Positionsabweichungen werden in Echtzeit detektiert und visualisiert (Al-Hallaq et al., 2022; Rudat et al., 2023).

Eine kontinuierliche Positionsüberwachung gewährleistet jedoch nicht per se eine ausreichende intrafraktionelle Stabilität. Intrafraktionell bezeichnet Bewegungen, die während einer einzelnen Bestrahlungsfraction auftreten.

Eine maskenlose Lagerung ist technisch anspruchsvoll, da ohne starre Fixierung die Stabilität stärker von der Mitarbeit der gelagerten Person abhängt. Bewegungen können auch ohne bewusste Kopfverlagerung entstehen, etwa durch Schlucken, Mimik, Muskelrelaxation oder minimale Haltungsveränderungen. Zudem muss sichergestellt werden, dass nicht-rigide Oberflächenveränderungen (z.B. Mimik) korrekt von rigiden Kopfbewegungen unterschieden werden.

Vor einer klinischen Implementierung maskenloser Lagerungskonzepte wurde in dieser präklinischen Pilotstudie unter strahlungsfreien Simulationsbedingungen geprüft, ob intrafraktionelle Positionsabweichungen innerhalb klinisch relevanter Toleranzgrenzen verbleiben, translatorische und rotatorische Bewegungen in sechs Freiheitsgraden zuverlässig detektiert werden, nicht-rigide Oberflächenveränderungen - insbesondere durch mimische Aktivität - korrekt von klinisch relevanten Kopfbewegungen differenziert werden können und eine reproduzierbare Ausgangsposition ohne starre Fixation gewährleistet ist.

## 2. METHODIK

### 2.1. Studiendesign und Setting

Es wurde eine experimentelle Pilotstudie in der Klinik Donaustadt (Wien, Österreich) unter kontrollierten Bedingungen als strahlungsfreie technische Simulation durchgeführt. Fünf freiwillige Proband:innen wurden ohne thermoplastische Maske auf einem standardisierten kraniellen Immobilisationssystem gelagert. Die Positionierung erfolgte auf dem HeadSTEP iBEAM evo (IT-V, Innsbruck, Österreich). Zur Stabilisierung wurden eine Plexiglasplatte sowie ein KneeSTEP ABS-Kniekeil (IT-V, Innsbruck, Österreich) verwendet.

Die Experimente wurden an Linearbeschleunigern vom Typ Elekta Infinity, Elekta Versa HD sowie unter Verwendung eines Precise Treatment Table mit Hexapod (Elekta, Stockholm, Schweden) durchgeführt.

Die Erfassung der Kopfoberfläche erfolgte mittels Catalyst HD bzw. Catalyst+ HD (C-RAD AB, Uppsala, Schweden). Das SGRT-System analysierte mithilfe strukturierter Lichtmuster und drei Kameras Positionsveränderungen in sechs Freiheitsgraden (Translation in x-, y- und z-Richtung sowie Rotation in Pitch, Roll und Yaw). Zu Beginn jeder Messung wurde eine Referenzoberfläche

definiert, gegen die die kontinuierlich erhobenen intrafraktionellen Messwerte verglichen wurden. Die Oberflächenerfassung erfolgte innerhalb einer definierten Boundingbox, die den kraniofazialen Bereich umfasste und von nicht-relevanten Körperregionen abgegrenzt wurde (Abbildung 1).

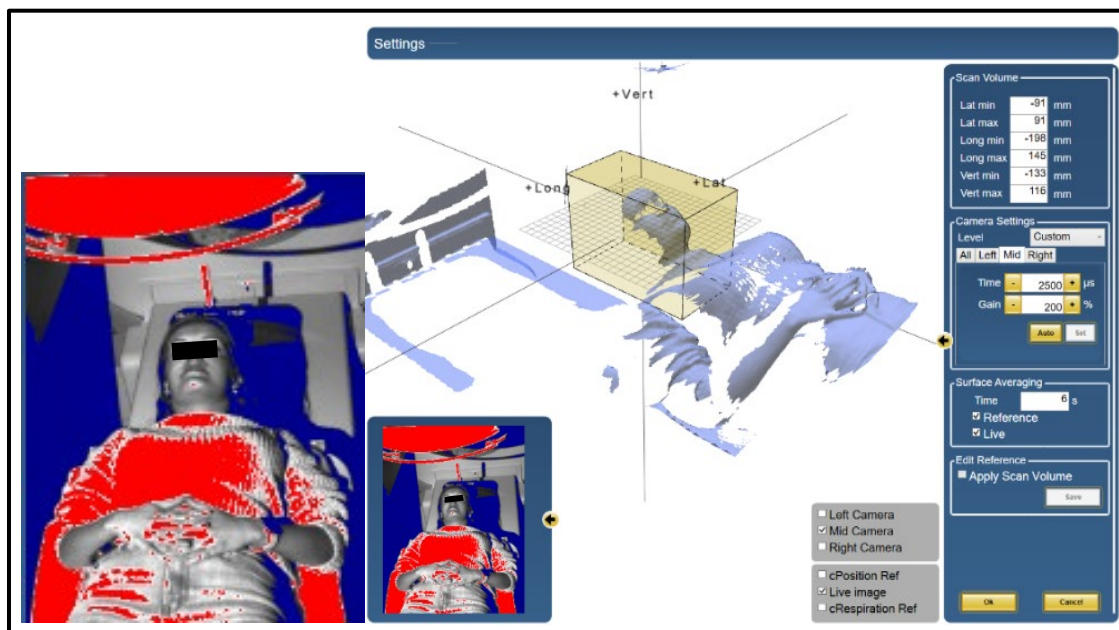


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Oberflächenerfassung mittels Catalyst™ HD. Links: Live-Oberflächenprojektion mit markierter Referenzfläche. Rechts: dreidimensionale Rekonstruktion der Kopfoberfläche mit definierter Boundingbox (gelb) zur Festlegung der Trackingregion. Die Referenzoberfläche wurde zu Beginn jeder Messung gespeichert und diente als Vergleichsbasis für die intrafraktionelle Positionsanalyse.

Die in der klinischen Praxis häufig verwendete Toleranzgrenze von 3 mm orientiert sich an typischen Sicherheits-Margen von 5 mm unter Berücksichtigung systematischer und zufälliger Unsicherheiten und diente in der vorliegenden Untersuchung als orientierender Referenzwert für die technische Bewertung der Positionsstabilität (van Herk et al., 2000).

Untersucht wurden drei Szenarien:

1. **Ruhebedingung:** Erfassung natürlicher Mikrobewegungen zur Analyse der Grundstabilität und eines möglichen Driftverhaltens.
2. **Gesichtsausdrücke:** Simulation mimischer Aktivität (Augenöffnen/-schließen, Stirnrunzeln, Sprechen), um zu prüfen, inwieweit der Algorithmus zwischen rigiden Kopfbewegungen und lokalen Weichteilveränderungen differenzieren kann.
3. **Kontrollierte Bewegungsprovokationen:** Aktive Rollbewegungen wurden durchgeführt, um die Detektionssensitivität gegenüber rotatorischen Veränderungen zu untersuchen. Translationale Veränderungen wurden ausschließlich über definierte Tischverschiebungen erzeugt, um die Systemreaktion auf lineare Positionsänderungen unabhängig von aktiven Kopfbewegungen zu evaluieren.

Erfasst wurden Translationen, Rotationen sowie der kombinierte 3D-Betragsvektor. In jeder Sitzung wurden mehrere Minuten kontinuierlicher Daten aufgezeichnet, um stabile Mittelwerte,

zeitliche Verläufe sowie die kurzfristige Repositionierbarkeit zu analysieren. Die Untersuchung der Repositionierbarkeit bezog sich ausschließlich auf kurze Unterbrechungen innerhalb derselben Sitzung (kurzes Lockerlassen und erneutes Auflegen des Kopfes) und nicht auf unabhängige Sitzungen.

## 2.2. Statistische Analyse

Die intrafraktionellen Positionsdaten wurden aus dem Catalyst™-System exportiert und in sechs Freiheitsgraden ausgewertet. Zusätzlich wurde der kombinierte 3D-Betragsvektor als Maß der Gesamtverschiebung berechnet. Die Auswertung erfolgte rein deskriptiv. Für jede Proband:in und jedes Szenario wurden Medianwerte sowie 95%-Perzentile berechnet, um die typische Positionsstabilität von sporadischen Bewegungsmaxima zu differenzieren. Insbesondere wurden 95%-Perzentile herangezogen, um seltene, aber klinisch relevante Ausschläge systematisch zu erfassen. Maximale Einzelabweichungen wurden ergänzend dokumentiert. Zur Beurteilung der Positionsstabilität wurde analysiert, in welchem Ausmaß Abweichungen den klinisch relevanten Referenzwert von 3 mm/3° überschritten.

Aufgrund des explorativen Charakters der Untersuchung und der geringen Stichprobengröße ( $n = 5$ ) wurde keine inferenzstatistische Hypothesentestung durchgeführt. Die Ergebnisse sind als technische Machbarkeitsdaten zu interpretieren.

### 3. ERGEBNISSE

Unter maskenloser Lagerung zeigten alle fünf Proband:innen eine konsistent hohe Positionsstabilität (Abbildung 2). Die Medianwerte lagen bei  $-0,07$  mm (lat),  $0,28$  mm (long) und  $0,27$  mm (vert). Das 95 %-Perzentil verblieb in sämtlichen Richtungen innerhalb eines Bereichs von  $0,6$  mm bis  $1,2$  mm. Die Rotationsbewegungen lagen bei den meisten Proband:innen im Median nahe  $0^\circ$ ; für Rollbewegungen wurden Medianwerte zwischen  $-0,5^\circ$  und  $+0,5^\circ$  beobachtet. Der Großteil der Messwerte befand sich innerhalb von  $\pm 1^\circ$ . Ein systematischer Drift konnte über die Messdauer nicht beobachtet werden. Die 3D-Vektorabweichungen blieben unter  $2$  mm.

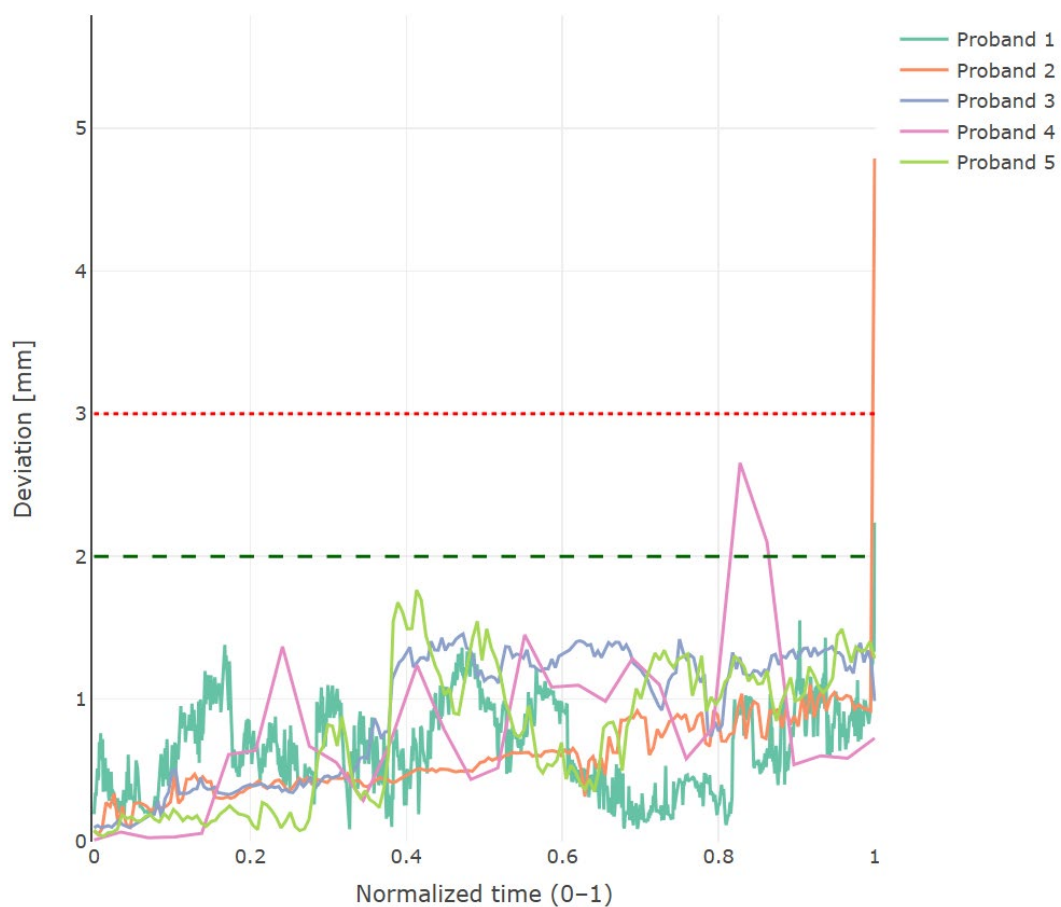


Abbildung 2: Intrafraktioneller Verlauf der translatorischen Gesamtabweichung (3D-Vektor, mm) pro Proband:in, dargestellt über die normierte Messdauer (0–1). Die horizontalen Referenzlinien markieren 2 mm (grün) und 3 mm (rot).

Simulierte mimische Bewegungen (Augenbewegungen, Stirnrunzeln, Sprechen) führten zu keiner klinisch relevanten Verschiebung der berechneten Kopfposition. Ein repräsentativer Zeitverlauf ist in Abbildung 3 dargestellt.

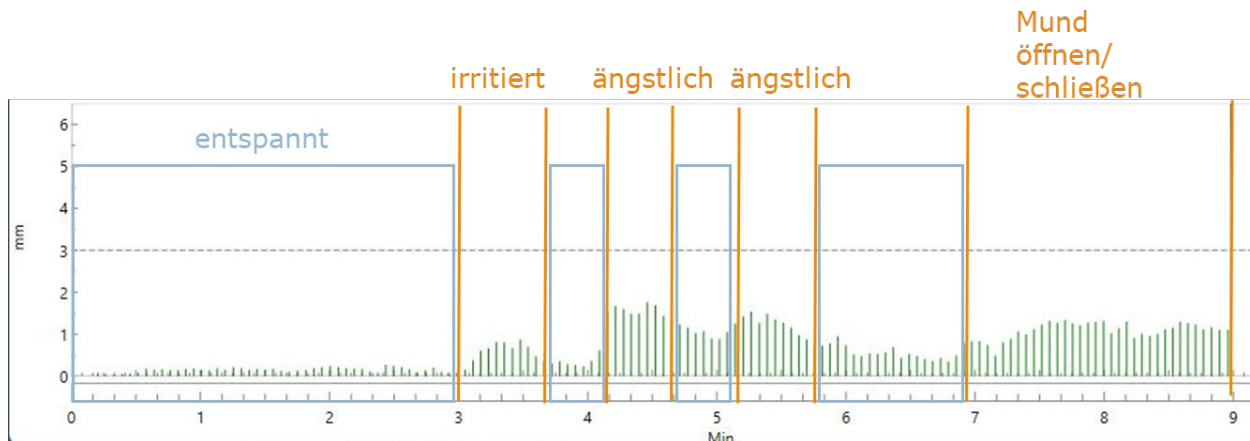


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf der intrafraktionellen translatorischen Abweichungen (3D-Vektor, mm) bei Proband:in 4. Die Ruhephase („entspannt“) zeigt stabile Submillimeterwerte ohne Drift. Die orangen markierten Zeiträume kennzeichnen definierte mimische Bewegungen. Trotz lokaler Oberflächenveränderungen bleiben die gemessenen Positionsabweichungen unterhalb der klinisch orientierenden 3-mm-Grenze (gestrichelte Linie).

Ein besonderer Einflussfaktor zeigte sich bei Einbeziehung von Gesichtsbehaarung in die Trackingregion. In dieser Konfiguration traten wiederholt Abweichungen über 3 mm auf. Nach Anpassung der Boundingbox und Ausschluss des Bartbereichs blieben die Messwerte stabil im Toleranzbereich. Bei bewusst ausgelösten Rollbewegungen wurde eine kurzfristige translatorische Abweichung von bis zu 7,93 mm gemessen. Nach Beendigung der Bewegung stabilisierte sich die Position wieder unter 1 mm. Diese Ergebnisse belegen die hohe Sensitivität des Systems gegenüber rigiden Kopfbewegungen.

Nach kurzen Unterbrechungen innerhalb derselben Sitzung konnten die Proband:innen die Ausgangsposition eigenständig und reproduzierbar wieder einnehmen. Vollständige Neupositionierungen waren nicht erforderlich.

## 4. DISKUSSION

Die vorliegende Pilotstudie zeigt, dass maskenlose kraniale Lagerung unter Verwendung von SGRT unter kontrollierten Bedingungen eine hohe intrafraktionelle Stabilität erreichen kann. Die gemessenen Positionsabweichungen blieben deutlich unter der klinisch orientierenden 3-mm-Grenze und lagen im Submillimeterbereich.

Die zuverlässige Detektion bewusst ausgelöster Rollbewegungen bei gleichzeitiger Stabilität während mimischer Aktivität belegt die Sensitivität und Spezifität des Systems gegenüber rigiden Kopfbewegungen. Gleichzeitig zeigte sich, dass die Definition der Trackingregion einen wesentlichen Einfluss auf die Messgenauigkeit hat. Die Einbeziehung von Gesichtsbehaarung führte zu relevanten Artefakten, während die Anpassung der Boundingbox stabile Submillimeterwerte ermöglichte. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer standardisierten Konfiguration bei maskenlosen Konzepten.

Die hohe Repositionierbarkeit innerhalb derselben Sitzung deutet auf eine ausreichende Eigenstabilität unter kontrollierten Bedingungen hin. Gleichwohl ist zu berücksichtigen, dass die

Untersuchung an gesunden Proband:innen ohne klinische Einflussfaktoren durchgeführt wurde. Schmerz, Angst, neurologische Einschränkungen oder längere Bestrahlungszeiten könnten das intrafraktionelle Bewegungsverhalten beeinflussen.

Bereits Cerviño et al. beschrieben 2012 in ihrer initialen klinischen Erfahrung eine masken- und rahmenlose Stereotaktische Radiochirurgie unter minimaler Immobilisation mit Echtzeit-Oberflächenüberwachung und zeigten, dass eine kontinuierliche Motion-Monitoring-Strategie rigidere Fixationskonzepte teilweise ersetzen kann (Cerviño et al., 2012). Dekker et al. berichteten in einer klinischen Untersuchung zur maskenlosen Ganzhirnbestrahlung eine mittlere intrafraktionelle Vektorabweichung von 1,1 mm bei über 95 % der Messpunkte innerhalb von 3 mm (Dekker et al., 2021). Auch Essers et al. zeigten unter Verwendung einer dorsalen Schale intrafraktionelle Abweichungen im Bereich von etwa 1 mm sowie eine ausreichende Gesamtsicherheitsmarge von 3 mm (Essers et al., 2025). Zusammen mit diesen experimentellen Daten deutet sich ein gradueller Wandel an: weg von primär rigider Immobilisation hin zu einer kontinuierlich 3D-Positionskontrolle. Die vorliegende Pilotstudie erweitert dieses Konzept, indem sie unter kontrollierten Bedingungen eine hohe intrafraktionelle Eigenstabilität selbst ohne zusätzliche dorsale Stabilisierung zeigt. Ob diese Eigenstabilität unter realen klinischen Bedingungen ausreichend ist, muss in einer prospektiven Studie systematisch untersucht werden.

## Literaturverzeichnis

- Adeberg, S., Sauer, C., Lambert, L., Regnery, S., Windisch, P., Zaoui, K., Freudlsperger, C., Moratin, J., Farnia, B., Nikendei, C., Krauss, J., Ehrenthal, J. C., El Shafie, R., Hörner-Rieber, J., König, L., Akbaba, S., Lang, K., Held, T., Rieken, S., . . . Maatouk, I. (2021). Screening and Psycho-Oncological Support for Patients With Head and Neck Cancer and Brain Malignancies Before Radiotherapy With Mask Fixation: Results of a Feasibility Study. *Frontiers in Psychology*, 12, 760024. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.760024>
- Al-Hallaq, H. A., Cerviño, L., Gutierrez, A. N., Havnen-Smith, A., Higgins, S. A., Kügele, M., Padilla, L., Pawlicki, T., Remmes, N., Smith, K., Tang, X., & Tomé, W. A. (2022). Aapm task group report 302: Surface-guided radiotherapy. *Medical Physics*, 49(4), e82-e112. <https://doi.org/10.1002/mp.15532>
- Cerviño, L. I., Detorie, N., Taylor, M., Lawson, J. D., Harry, T., Murphy, K. T., Mundt, A. J., Jiang, S. B., & Pawlicki, T. A. (2012). Initial clinical experience with a frameless and maskless stereotactic radiosurgery treatment. *Practical Radiation Oncology*, 2(1), 54–62. <https://doi.org/10.1016/j.prro.2011.04.005>
- Cordes, M.-C., Scherwath, A., Ahmad, T., Cole, A. M., Ernst, G., Oppitz, K., Lanfermann, H., Bremer, M., & Steinmann, D. (2014). Distress, anxiety and depression in patients with brain metastases before and after radiotherapy. *BMC Cancer*, 14, 731. <https://doi.org/10.1186/1471-2407-14-731>
- Dekker, J., van Wagenberg, T. P., Smet, M. de, Essers, M., Kusters, M., & Kruijff, W. de (2021). Geometrical analysis for motion monitoring of rigid bodies with optical surface scanning

- in radiation oncology. *Physics and Imaging in Radiation Oncology*, 20, 105–110.  
<https://doi.org/10.1016/j.phro.2021.11.006>
- Essers, M., Mesch, L., Beugeling, M., Wee, E. de, Poorter, R., Hamelink, R., & Kruijf, W. de (2025). Goodbye face masks! Accurate head and neck radiotherapy using individual dorsal shells and surface guidance. *Radiotherapy and Oncology : Journal of the European Society for Therapeutic Radiology and Oncology*, 208, 110909.  
<https://doi.org/10.1016/j.radonc.2025.110909>
- Forbes, E., Clover, K., Baker, A. L., Britton, B., Carlson, M., & McCarter, K. (2023). 'having the mask on didn't worry me until ... they clamped my head down so I wouldn't move': A qualitative study exploring anxiety in patients with head and neck cancer during radiation therapy. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 70(3), 283–291.  
<https://doi.org/10.1002/jmrs.658>
- Grégoire, V., Guckenberger, M., Haustermans, K., Lagendijk, J. J. W., Ménard, C., Pötter, R., Slotman, B. J., Tanderup, K., Thorwarth, D., van Herk, M [Marcel], & Zips, D. (2020). Image guidance in radiation therapy for better cure of cancer. *Molecular Oncology*, 14(7), 1470–1491. <https://doi.org/10.1002/1878-0261.12751>
- Kilbride, L., Smith, G., & Grant, R. (2007). The frequency and cause of anxiety and depression amongst patients with malignant brain tumours between surgery and radiotherapy. *Journal of Neuro-Oncology*, 84(3), 297–304. <https://doi.org/10.1007/s11060-007-9374-7>
- Nixon, J. L., Cartmill, B., Turner, J., Pigott, A. E., Brown, E., Wall, L. R., Ward, E. C., & Porceddu, S. V. (2018). Exploring the prevalence and experience of mask anxiety for the person with head and neck cancer undergoing radiotherapy. *Journal of Medical Radiation Sciences*, 65(4), 282–290. <https://doi.org/10.1002/jmrs.308>
- Reich, M., Leemans, C. R., Vermorken, J. B., Bernier, J., Licitra, L., Parmar, S., Golusinski, W., & Lefebvre, J. L. (2014). Best practices in the management of the psycho-oncologic aspects of head and neck cancer patients: Recommendations from the European Head and Neck Cancer Society Make Sense Campaign. *Annals of Oncology : Official Journal of the European Society for Medical Oncology*, 25(11), 2115–2124.  
<https://doi.org/10.1093/annonc/mdu105>
- Rudat, V., Shi, Y., Zhao, R., Xu, S., & Yu, W. (2023). Setup accuracy and margins for surface-guided radiotherapy (SGRT) of head, thorax, abdomen, and pelvic target volumes. *Scientific Reports*, 13(1), 17018. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-44320-2>
- Tejinder Kataria, S. G. (2014). Image Guided Radiation Therapy. *Journal of Nuclear Medicine & Radiation Therapy*, 05(02). <https://doi.org/10.4172/2155-9619.1000179>
- van Herk, M [M.], Remeijer, P., Rasch, C., & Lebesque, J. V. (2000). The probability of correct target dosage: Dose-population histograms for deriving treatment margins in radiotherapy. *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*, 47(4), 1121–1135. [https://doi.org/10.1016/s0360-3016\(00\)00518-6](https://doi.org/10.1016/s0360-3016(00)00518-6)