

Journal für

Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie

www.kup.at/
JNeurolNeurochirPsychiatr

Zeitschrift für Erkrankungen des Nervensystems

**Trends & Perspektiven in der
Neurochirurgie: Jenseits der
Momentaufnahme: der „Digitale
Zwilling“ als neuer
epistemologischer Standard der
Neurochirurgie?**

Rauch PR, Gmeiner M

Journal für Neurologie

Neurochirurgie und Psychiatrie

2026; 27 (1), 3-4

Homepage:

www.kup.at/

JNeurolNeurochirPsychiatr

Online-Datenbank
mit Autoren-
und Stichwortsuche

Indexed in
EMBASE/Excerpta Medica/BIOBASE/SCOPUS

Krause & Pachernegg GmbH • Verlag für Medizin und Wirtschaft • A-3003 Gablitz

P.b.b. 02Z031117M,

Verlagsort: 3003 Gablitz, Linzerstraße 177A/21

Preis: EUR 10,-

Journal für

Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie

e-Abo kostenlos

Datenschutz:

Ihre Daten unterliegen dem Datenschutzgesetz und werden nicht an Dritte weitergegeben. Die Daten werden vom Verlag ausschließlich für den Versand der PDF-Files des Journals für Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie und eventueller weiterer Informationen das Journal betreffend genutzt.

Lieferung:

Die Lieferung umfasst die jeweils aktuelle Ausgabe des Journals für Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie. Sie werden per E-Mail informiert, durch Klick auf den gesendeten Link erhalten Sie die komplette Ausgabe als PDF (Umfang ca. 5–10 MB). Außerhalb dieses Angebots ist keine Lieferung möglich.

Abbestellen:

Das Gratis-Online-Abonnement kann jederzeit per Mausklick wieder abbestellt werden. In jeder Benachrichtigung finden Sie die Information, wie das Abo abbestellt werden kann.

Das e-Journal **Journal für Neurologie, Neurochirurgie und Psychiatrie**

- ✓ steht als PDF-Datei (ca. 5–10 MB) stets internetunabhängig zur Verfügung
- ✓ kann bei geringem Platzaufwand gespeichert werden
- ✓ ist jederzeit abrufbar
- ✓ bietet einen direkten, ortsunabhängigen Zugriff
- ✓ ist funktionsfähig auf Tablets, iPads und den meisten marktüblichen e-Book-Readern
- ✓ ist leicht im Volltext durchsuchbar
- ✓ umfasst neben Texten und Bildern ggf. auch eingebettete Videosequenzen.

www.kup.at/JNeurolNeurochirPsychiatr

Jenseits der Momentaufnahme: der „Digitale Zwilling“ als neuer epistemologi- scher Standard der Neurochirurgie?

P.-R. Rauch, M. Gmeiner

Universitätsklinik für Neurochirurgie, Johannes Kepler Universität (JKU) & Kepler Universitätsklinikum (KUK), Linz

■ Die Illusion der Statik in einer dynamischen Disziplin

Die moderne Neurochirurgie operiert in einem fundamentalen Paradoxon. Während unsere mikrochirurgischen und endovaskulären Interventionen in hochkomplexe, fluid-dynamische und metabolisch aktive Systeme eingreifen, basiert die klinische Entscheidungsfindung fast ausschließlich auf statischen Momentaufnahmen. Trotz der enormen technologischen Evolution – von der Pneumoencephalographie über die Computertomographie bis hin zur ultrahochauflösenden 7-Tesla-Magnetresonanztomographie (MRT) – bleibt das Grundprinzip der bildgebenden Diagnostik retrospektiv und statisch. Es können brillante dreidimensionale Karten der Morphologie erstellt werden, jedoch stoßen wir an epistemologische Grenzen bei der Darstellung der zugrunde liegenden Pathophysiologie in der vierten Dimension – der Zeit.

Dieses Defizit manifestiert sich im klinischen Alltag an kritischen Schnittstellen. Das Phänomen des „Brain Shift“ degradiert präzise präoperative Datensätze oft schon wenige Minuten nach Eröffnung der Dura beinahe zur Irrelevanz. Mehr noch: Biologische Prozesse wie die hämodynamische Belastung einer Aneurysmawand oder die diffuse Infiltration eines Glioms entlang stereotyper Muster lassen sich aus einem statischen Datensatz nicht deterministisch ableiten. Die derzeitige Praxis, aus der reinen Morphologie auf die Dynamik zu schließen, wird zunehmend hinterfragt. Die Überwindung dieser „statischen Barriere“ markiert den nächsten notwendigen Evolutionsschritt unseres Fachgebiets: den Übergang von der rein bildgestützten Chirurgie (Image-Guided Surgery) hin zur modellbasierten Prädiktion (Model-Guided Prediction).

■ Der „Digitale Zwilling“: vom Konzept zur „Roadmap“

In diesem Kontext transformiert sich der Begriff des „Digitalen Zwillings“ (Digital Twin) von einem Schlagwort der Industrie 4.0 zu einem klinischen Imperativ. Wie Laubenbacher et al. kürzlich in *Nature Computational Science* darlegten, darf dieser Begriff nicht inflationär für jedes 3D-Modell verwendet werden. Ein echter digitaler



OA Dr.med.univ.
Philip-Rudolf Rauch, PhD



OA Priv.-Doz.
DDr. Matthias Gmeiner

Zwilling ist ein mechanistisches Modell, das multimodale Datenströme integriert, um physiologische Zustände zu spiegeln und deren zukünftige Trajektorien unter veränderten Bedingungen vorherzusagen [1].

Diese „Roadmap“ fordert eine Abkehr von isolierten Datensilos hin zu einer systemmedizinischen Betrachtung. Die Vision ist der Wechsel von der Deskription (Was ist?) zur Prädiktion (Was wird sein?). Dass dies keine ferne Zukunftsmusik ist, belegen aktuelle High-Impact-Publikationen, die die Translation solcher Modelle in den klinischen Alltag greifbar machen.

■ Paradigmenwechsel in der vaskulären Risikostratifizierung

Die vaskuläre Neurochirurgie fungiert aufgrund der physikalisch definierbaren Strömungslehre als technologischer Vorreiter. Lange Zeit galt die simple Geometrie (Durchmesser, Aspekt-Ratio) als primäres Surrogat für das Rupturrisiko intrakranieller Aneurysmen.

Neuere Daten zeigen jedoch eindrücklich, dass diese eindimensionale Betrachtung der Komplexität der Pathologie nicht gerecht wird. Eine wegweisende Arbeit von Liu et al. in *JAMA Neurology* unterstreicht die Notwendigkeit, fortschrittliche Bildgebungsmarker wie das hochauflösende „Vessel Wall Enhancement“ in die Risikokalkulation einzubeziehen [2].

Diese Erkenntnisse decken sich mit Beobachtungen und Analysen unserer eigenen Arbeitsgruppe. In aktuellen multivariaten Modellen verdichten sich die Hinweise, dass erst die Fusion aus geometrischen Parametern, hämodynamischen Metriken („Wall Shear Stress“) und der biologischen Wandreaktion ein valides Vorhersagemodell liefert [3].

Ein solcher „Digitaler Zwilling“ eines Aneurysmas korreliert die physikalische Belastung mit der biologischen Vulnerabilität der Gefäßwand. Dies erlaubt eine Risikostratifizierung, die weit über generalisierte Scores (wie PHASES) hinausgeht und die Indikationsstellung auf eine patientenindividuelle pathoanatomische Basis stellt.

■ Die onkologische Herausforderung: Radiomics und Forecasting

Während vaskuläre Modelle auf physikalischen Prinzipien (Navier-Stokes-Gleichungen) beruhen, folgt das Glioblastom stochastischen, diffusiven und genetisch heterogenen Wachstumsmustern. Doch auch hier zeichnet sich durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI) ein Wandel ab.

Das Feld der „Radiomics“ erlaubt es, quantitative Bildmerkmale zu extrahieren, die für das menschliche Auge unsichtbar sind. Aktuelle Forschungsansätze verknüpfen diese Merkmale mit molekularen Signaturen, um die biologische Aggressivität von Gliomen zu antizipieren. Wie kürzlich im *Neurosurgical Focus* diskutiert, lassen sich durch solche integrativen Modelle Wachstumsvektoren berechnen, die ein „Forecasting“ der Tumorprogression ermöglichen [4].

Anstatt den Tumor als statische, kontrastmittelaufnehmende Raumforderung zu betrachten, generieren diese Algorithmen Wahrscheinlichkeitskarten der zukünftigen Infiltration. Dies hat direkte Implikationen für die Definition des „Clinical Target Volume“ (CTV) in der Chirurgie und Strahlentherapie. Das Ziel verschiebt sich von der Resektion des sichtbaren Tumors hin zur Behandlung der berechneten Progressionszone.

■ Regulatorische Perspektive und Limitationen

Der Weg zum flächendeckenden Einsatz ist jedoch kein rein technologischer, sondern auch ein regulatorischer. Institutionen wie die FDA und die EMA beginnen, Ergebnisse aus *In-silico*-Studien als komplementäre Evidenz anzuerkennen („In Silico Trials“), doch die Hürden der Validierung bleiben hoch.

Ein digitaler Zwilling ist nur so gut wie die Daten, mit denen er trainiert wird. Die Herausforderung der kommenden Jahre liegt in der Standardisierung der Datenerhebung und der Erklärbarkeit der Algorithmen („Explainable AI“). Wir müssen verhindern, dass die

klinische Entscheidungsfindung an eine „Black Box“ delegiert wird; vielmehr muss die KI als transparenter Assistent fungieren, dessen Prädiktionen ärztlich plausibilisiert werden können.

■ Fazit: Vom Handwerk zur Datenwissenschaft

Die Integration dieser „Digital Twins“ in den klinischen Workflow hat Konsequenzen, die weit über die reine Operationsplanung hinausgehen. Sie revolutioniert die Patientenkommunikation, indem sie komplexe dynamische Risiken visualisierbar macht und so die Compliance stärkt. Gleichzeitig bietet sie neue Möglichkeiten für die Ausbildung, indem komplexe Eingriffe virtuell „geprobt“ werden können.

Wir verlassen die Ära der reinen Bildbetrachtung. Die Zukunft der Neurochirurgie liegt in der datengestützten Simulation biologischer Prozesse. Die Werkzeuge hierfür – validierte Modelle, die Morphologie, Physik und Biologie vereinen – stehen bereit. Es liegt nun an der neurochirurgischen Gemeinschaft, diese epistemologische Erweiterung anzunehmen und verantwortungsvoll in den klinischen Alltag zu integrieren.

Literatur:

1. Laubenbacher R, et al. Digital twins in medicine. *Nat Comput Sci* 2024; 4: 184–91.
2. Liu Q, Nie X, Vergouwen MDI, et al. Gadolinium-enhanced aneurysm wall imaging and risk of intracranial aneurysm growth or rupture. *JAMA Neurol* 2025; 82: 1135–43.
3. Nagy J, Stroh-Holly N, Fenz W, Thumfart S, Maier J, Major Z, Stefanits H, Gollwitzer M, Oberndorfer J, Mazanec V, Giretzlehner M, Sonnberger M, Rauch P, Gruber A, Gmeiner M. Rupture risk assessment for AComA aneurysms with morphological, hemodynamic and structural mechanical analysis. *PLoS One* 2025; 20: e0331297.
4. Rauch P, Aichholzer M, Serra C, Zanier O, Staartjes VE, Boehm P, Gmeiner M, Stefanits H. From molecular signatures to radiomics: tailoring neurooncological strategies through forecasting of glioma growth. *Neurosurg Focus* 2024; 56: E5.

Korrespondenzadresse:

OA Dr. Philip-Rudolf Rauch, PhD
 Universitätsklinik für Neurochirurgie
 Kepler Universitätsklinikum Linz
 Neuromed Campus
 A-4020, Wagner-Jauregg-Weg 15
 E-Mail: philip-rudolf.rauch@kepleruniklinikum.at

Mitteilungen aus der Redaktion

Besuchen Sie unsere zeitschriftenübergreifende Datenbank

☒ [Bilddatenbank](#)

☒ [Artikeldatenbank](#)

☒ [Fallberichte](#)

e-Journal-Abo

Beziehen Sie die elektronischen Ausgaben dieser Zeitschrift hier.

Die Lieferung umfasst 4–5 Ausgaben pro Jahr zzgl. allfälliger Sonderhefte.

Unsere e-Journale stehen als PDF-Datei zur Verfügung und sind auf den meisten der marktüblichen e-Book-Readern, Tablets sowie auf iPad funktionsfähig.

☒ [Bestellung e-Journal-Abo](#)

Haftungsausschluss

Die in unseren Webseiten publizierten Informationen richten sich **ausschließlich an geprüfte und autorisierte medizinische Berufsgruppen** und entbinden nicht von der ärztlichen Sorgfaltspflicht sowie von einer ausführlichen Patientenaufklärung über therapeutische Optionen und deren Wirkungen bzw. Nebenwirkungen. Die entsprechenden Angaben werden von den Autoren mit der größten Sorgfalt recherchiert und zusammengestellt. Die angegebenen Dosierungen sind im Einzelfall anhand der Fachinformationen zu überprüfen. Weder die Autoren, noch die tragenden Gesellschaften noch der Verlag übernehmen irgendwelche Haftungsansprüche.

Bitte beachten Sie auch diese Seiten:

[Impressum](#)

[Disclaimers & Copyright](#)

[Datenschutzerklärung](#)