

Trainingssteuerung im Leistungssport: Integration multimodaler Daten durch Datenraumtechnologien

Training control in competitive sports: Integration of multimodal data through data space technologies

Anja Burmann, Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST, Dortmund, Deutschland

anja.burmann@isst.fraunhofer.de

Sebastian Schröder, Enari GmbH, Garching bei München, Deutschland

Florian Lauf, Fraunhofer-Institut für Software- und Systemtechnik ISST, Dortmund, Deutschland

Kurzfassung

Die elektronische Sportakte (eSA) stellt einen innovativen Ansatz dar, der leistungsdiagnostische, sportmedizinische und trainingsbezogene Daten im Leistungssport über einen föderierten Datenraum miteinander verbindet. Durch die Kombination aus Datensouveränität, semantischer Interoperabilität, sicheren Verarbeitungsumgebungen und neutraler Governance entsteht eine Infrastruktur, die sowohl Athlet:innen als auch Trainer:innen, medizinischen Einrichtungen und der Forschung zugutekommt. Moderne Datenraumarchitekturen bieten somit eine tragfähige Grundlage für einen digital unterstützten, evidenzbasierten und verantwortungsvollen Leistungssport.

Abstract

The electronic athlete file (eSA) represents an innovative approach that combines performance diagnostics, sports medicine, and training-related data in competitive sports via a federated data space. The combination of data sovereignty, semantic interoperability, secure processing environments, and neutral governance creates an infrastructure that benefits athletes, coaches, medical facilities, and research. Modern data space architectures thus provide a solid foundation for digitally supported, evidence-based, and responsible competitive sports.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die Digitalisierung des Leistungssports hat in den vergangenen Jahren zu einer erheblichen Zunahme an Mess- und Gesundheitstechnologien geführt. Wearables, Diagnostikgeräte, Trainingssoftware und sportmedizinische Dokumentationssysteme generieren eine Vielzahl multimodaler Daten, die potenziell wertvolle Erkenntnisse zur Leistungssteuerung, Leistungsentwicklung und Prävention liefern können. In der Praxis sind diese Daten jedoch in proprietären Silos eingeschlossen und kaum organisationsübergreifend zugänglich. Dadurch manifestieren sich Informationsbrüche, die das Potenzial integrierter sportwissenschaftlicher Entscheidungen zwischen Trainer:innen, Diagnostiker:innen, Mediziner:innen und Forschenden nicht ausschöpfen [1].

Zentrale Gründe für diese Fragmentierung liegen in einem historisch gewachsenen Ökosystem von Akteursgruppen, Softwaresystemen, und zunehmend multimodale und mobile Sensortechnik. Daraus ergibt sich eine fehlende Systemarchitektur, fehlende Interoperabilität und semantische Standardisierung, sowie organisationsübergreifender Schnittstellen und Workflows. Datenraumarchitekturen bieten einen Lösungsweg, um föderierte und souveränitätsorientierte Datennutzung domänenübergreifend zu ermöglichen [2, 3]. Auch im Gesundheitsbereich wird dieser Ansatz zunehmend relevant, wie der European Health Data

Space (EHDS) zeigt, der föderierte Verarbeitung, interoperable Datenmodelle und sichere Datenverarbeitungsumgebungen (Secure Processing Environments, SPE) vorsieht [4].

Vor diesem Hintergrund untersucht dieser Beitrag die konzeptionelle und technische Ausgestaltung einer elektronischen Sportakte (eSA), welche als Applikation auf Basis von Datenraumtechnologien verteilte Datenquellen für leistungsdiagnostische, sportmedizinische und trainingsbezogene Daten integriert. Der Fokus liegt dabei auf der Frage, wie sportbezogene Gesundheits- und Leistungsdaten organisationsübergreifend, dezentral nutzbar gemacht werden können, und dabei gleichzeitig die Datensouveränität der Athlet:innen in den Fokus zu stellen. Der Beitrag analysiert bestehende Herausforderungen im Leistungssport, leitet Anforderungen an Interoperabilität, Datensouveränität und Governance ab und transferiert diese auf eine Datenraumarchitektur.

2 Hintergrund

2.1 Informationstechnologie im Leistungssport

Der Leistungssport ist durch eine dezentrale Organisationsstruktur gekennzeichnet, in der Trainingsgruppen, Verbände, Olympiastützpunkte, Vereine und externe Diagnostikzentren zusammenwirken, aber unterschiedliche digitale Infrastrukturen verwenden. Weiterhin werden zunehmend

mobile Sensorik und körpernahe Systeme zum Monitoring eingesetzt, um Daten über den Gesundheits- und Trainingszustand der Athlet:innen zu erheben. Dadurch entsteht eine multimodale Datenlandschaft, die in proprietären Systemen gehalten werden und einem spitzen Nutzungszweck dienen [6].

Zudem führt die zunehmende Verbreitung von Wearables im Spitzen- wie im Breitensport zu einer massiven Ausweitung von Datenvolumen, -geschwindigkeit und -vielfalt, die durch klassische Analyseverfahren kaum mehr zu bewältigen ist. Studien aus der Ganganalyse zeigen, dass moderne Sensorsysteme, wie etwa IMUs, 3D-Motion-Capture oder multimodale Messplattformen pro Athlet:in Hunderttausend bis Millionen Zeitreihenpunkte erzeugen und damit die Kriterien von Big Data erfüllen (Volume, Velocity, Variety, Veracity, Value) [7, 8].

Auch in der sportartspezifischen Leistungsdiagnostik steigen die Anforderungen: Wearables liefern in Echtzeit kinematische, dynamische und physiologische Parameter, ermöglichen Feldmessungen unter Wettkampfbedingungen und erzeugen hochfrequente, heterogene und zum Teil fehlerbehaftete Datenströme, deren Qualität von Sensorfunktion, Kalibrierung und Trägerartefakten abhängt [9].

Parallel zeigt sich in aktuellen Übersichtsarbeiten, dass Wearables zunehmend in komplexe Ökosysteme eingebettet werden, die sowohl Trainingssteuerung, Gesundheitsmonitoring als auch taktische und biomechanische Analysen unterstützen. Dabei wird auf Chancen wie kontinuierliches Monitoring, Echtzeit-Feedback, Individualisierung des Trainings und Integration in digitale Trainingsplattformen verwiesen. Risiken wie mangelnde Standardisierung, Datenschutzprobleme, unzureichende Validierung vieler Systeme sowie Fehlinterpretationen durch Nutzer:innen dürfen dabei nicht außen vor gelassen werden [10].

Diese technologisch getriebene Entwicklung verstärkt die Fragmentierung der Datenlandschaft, da verschiedene Stakeholder, wie Trainer:innen, Wissenschaft, Diagnostikzentren, Athlet:innen, Verbände jeweils proprietäre Systeme nutzen, unterschiedliche Datenformate erzeugen und selten gemeinsame Schnittstellen existieren. Damit wächst der Bedarf an interoperablen Datenräumen, standardisierten Austauschprozessen, gemeinsamen Datenmodellen und semantischen Ebenen, um die Vielzahl dezentral erzeugter sportwissenschaftlicher Daten integrierbar, vergleichbar und auswertbar zu machen.

2.2 Konzept des EHDS

Im Kontext der Gesundheitsversorgung in Europa entwickelt sich mit dem European Health Data Space (EHDS) eine internationale Gesetzgebung, die eine Grundlage für eine organisationsübergreifende Datenverfügbarkeit zum Zwecke der Versorgung (primäre Datennutzung) und Forschung (sekundäre Datennutzung) schafft. Hierfür definiert der EHDS Interoperabilitätsanforderungen an Health-IT-Systemhersteller, spezifiziert Infrastrukturen für die beiden Zieldimensionen, definiert föderierte, sichere Verarbeitungsumgebungen, und schreibt semantische Gesundheitsdatenstandards vor [4]. Von diesen Prinzipien kann bei konzeptioneller Übertragung auch der Leistungssport

profitieren, da sportmedizinische und leistungsdiagnostische Daten ebenso zu primären Zwecken der Trainingssteuerung und sekundär für Forschung und Entwicklung organisationsübergreifend genutzt werden sollen [11].

2.3 Datenraumtechnologien als Infrastrukturbasis

Datenräume stellen eine dezentrale Infrastrukturform dar, die den Austausch und die Nutzung von Daten unter strikten Bedingungen der Datensouveränität ermöglichen. Im Zentrum steht das Konzept der föderierten Datenhaltung: Daten verbleiben bei den ursprünglichen Datenhaltern, und werden über Konnektoren, Metadatenkataloge, Identitäts- und Zugriffsmanagement sowie Nutzungsrichtlinien so verfügbar gemacht, dass sie in organisationsübergreifenden Anwendungsszenarien genutzt werden können [12, 13]. Die International Data Spaces Reference Architecture (IDSA-RAM) beschreibt hierfür ein Set aus Governance- und Technologiebausteinen, die transparente und auditierbare Datennutzung sicherstellen [2].

2.4 Datenrauminitiative sphin-X

Die Ausgestaltung des EHDS bedarf kanalisierter Beiträge aus allen Organisationen der Gesundheitsbranche, und damit auch der Gesundheitswirtschaft. Die Initiative sphin-X e.V. verfolgt das Ziel, einen interoperablen und souveränitätswahrenden Datenraum anhand von etablierten Referenzarchitekturen für Akteure des Gesundheitswesens und der Gesundheitswirtschaft aufzubauen, und einen wichtigen Beitrag für den EHDS zu leisten [14]. Die Initiative entwickelt technische und organisatorische Bausteine – darunter föderierte Datenzugänge, standardisierte Schnittstellenprofile, sichere Verarbeitungsumgebungen und ein domänenspezifisches Governance-Modell. Neben diesen Bausteinen schafft der sphin-X e.V. eine neutrale Entwicklungsumgebung für die beteiligten Akteure am Aufbau einer eSA innerhalb des Gesundheitsdatenökosystems.

3 Anwendungsfall eSA im föderierten Datenraum

3.1 Primäre Datennutzung: Leistungssteuerung

Der Leistungssport ist ein Paradebeispiel für multimodale und multidisziplinäre Datenprozesse. Leistungsdiagnostische Daten wie Laktatschwellen, VO₂max, Kraftverläufe oder Bewegungsanalysen, werden typischerweise in spezialisierten Zentren erhoben und verbleiben dort. Wearables liefern hochfrequente Zeitreihen zu Belastung und Regeneration, während sportmedizinische Daten in Arztpraxen oder physiotherapeutischen Einrichtungen entstehen. Für Trainer:innen sind diese Daten jedoch nur dann wertvoll, wenn sie im Kontext von Trainingsplänen, subjektiven Belastungswahrnehmungen und langfristigen Entwicklungsverläufen betrachtet werden können.

Voraussetzung für eine sinnvolle organisationsübergreifende Nutzung ist, dass diagnostische Befunde, Wearable-

Daten und subjektive Ratings mit einheitlichen Protokollen erhoben, annotiert und versioniert werden (z. B. standardisierte Testprotokolle, Erfassungszeitpunkte, Metadaten zu Sensor-typen und Kalibrierung).

Die eSA ermöglicht diesen organisationsübergreifenden Kontext, indem relevante Daten über föderierte Zugriffe temporär zusammengeführt und visualisiert werden. Ein Trainer kann so beispielsweise Belastungsdaten der letzten Wochen mit diagnostischen Schwellenwerten und aktuellen medizinischen Empfehlungen abgleichen oder in Kontext setzen. Diagnostiker:innen können Vorwerte heranziehen, um Abweichungen präziser einzuordnen, während Mediziner:innen Risiken wie Überlastungen oder kardiale Auffälligkeiten besser erkennen können. Ohne diese Kontextinformationen bleiben Werte wie $VO_2\max$ oder Belastungsindizes aus Wearables nur bedingt vergleichbar und können Trainingsentscheidungen sogar verzerren. Die eSA kann darüber hinaus nicht nur historische Verläufe visualisieren, sondern auch regelbasierte oder modellgestützte Benachrichtigungen (z. B. plötzliche Abweichungen von Belastungs-/Regenerationsprofilen) bereitstellen. Diese werden explizit als Entscheidungsunterstützung und nicht als automatisierte Entscheidung implementiert. Zentral bei all diesen Punkten ist die Einbindung der Athlet:innen: Über ein Consent- und Transparenz-Cockpit innerhalb der eSA können sie nachvollziehen, welche Daten in welchen Kontexten (Training, Medizin, Forschung) genutzt werden und Zugriffe situativ erlauben oder einschränken.

3.2 Sekundäre Datennutzung: Forschung und Entwicklung

Daten aus der Leistungssteuerung können entlang der Prinzipien des EHDS über Datenraumtechnologie für Sekundärnutzung erschlossen werden. Durch die Nutzbarmachung pseudonymisierter Daten über sichere Verarbeitungsumgebungen kann sportwissenschaftliche Forschung ohne zusätzliche Belastung der Athlet:innen durchgeführt werden. Algorithmen zur Leistungssteuerung oder Verletzungsprävention können direkt in diesen Umgebungen ausgeführt werden, ohne dass Rohdaten die Systeme der Datenhaltenden verlassen müssen. Die eSA integriert damit die Datennutzung von der Erhebung über Analyse und Entscheidung bis zur Sekundärnutzung mit dem Beitrag von aggregierten Informationen zu einem wachsenden Wissensschatz. Im Spitzensport ist aufgrund kleiner Kollektive und charakteristischer Belastungs- und Leistungsprofile selbst bei Pseudonymisierung ein erhöhtes Re-Identifikationsrisiko gegeben. Die eSA begegnet diesem Risiko durch Maßnahmen wie strenge Aggregationsgrade, Zugriffsgenehmigungen über Data-Access-Mechanismen und die Trennung von Identitäts- und Nutzungsdaten. Ein Governance-Rahmen stellt sicher, dass aus Sekundäranalysen erzielte Erkenntnisse nicht nur kommerziell verwendet, sondern auch in Form von Leitlinien, Feedback oder innovativen Services an Athlet:innen und betreuende Organisationen zurückgespielt werden. Neben der semantischen Standardisierung adressiert die eSA auch technische

(Schnittstellen, Protokolle) und organisatorische Interoperabilität (Prozessharmonisierung, Zuständigkeiten), um föderierte Datenflüsse praktikabel zu machen.

Das zeigt, dass die heterogene Datenlandschaft im Bereich der Leistungssteuerung sich besonders gut für einen modularen, föderierten Architekturansatz eignet. Durch Standardisierung auf semantischer Ebene, verteilte Verarbeitung und rollenbasierte Zugriffe können Erkenntnisse für Training, Regeneration und Reha effizienter gewonnen werden, ohne zentrale Datenspeicher aufzubauen.

4 Architekturbasis der eSA

Die technische Architektur der eSA besteht aus mehreren interoperablen Komponenten, die gemeinsam einen föderierten Datenraum bilden. Jede teilnehmende Organisation, d.h. Datengebende und Datennutzende, betreibt einen Konnektor, der als geschütztes Gateway fungiert und Datenzugriffe kontrolliert. Dieser Konnektor setzt die Nutzungsregeln um, die in den Consent-Vereinbarungen der Athlet:innen definiert sind, und stellt sicher, dass Daten nur in zulässigen Szenarien geteilt oder verarbeitet werden.

Ein Metadatenkatalog dient der Auffindbarkeit von Datenquellen und beschreibt, unter welchen Bedingungen diese genutzt werden dürfen. Zur semantischen Interoperabilität werden offene Standards eingesetzt, insbesondere HL7 FHIR für gesundheitsnahe Informationen sowie standardisierte Austauschformate für sportdiagnostische Messdaten und Sensorik. Jede Ressource erhält eine eindeutige URI, sodass Daten virtualisiert verknüpft werden können, auch wenn sie physisch verteilt gespeichert sind.

Zur sekundären Datennutzung kommen sichere Verarbeitungsumgebungen (engl. Secure Processing Environments, SPE) zum Einsatz, in denen statistische oder KI-basierte Analysen unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt werden können. Dieser Mechanismus, der in Datenräumen als Compute-to-Data bezeichnet wird, gewährleistet hohe Datenschutzstandards und ermöglicht gleichzeitig evidenzbasierte Weiterentwicklung von Trainings- und Präventionsstrategien. Die gesamte Architektur wird durch Governance-Regeln umrahmt, die Transparenz, Fairness und vertrauenswürdige Zusammenarbeit sichern.

Die Entwicklung und Moderation dieser technischen, organisatorischen und ethischen Rahmenbedingungen wird durch die neutrale Trägerstruktur des sphin-X e.V. begleitet. Eine solche Instanz fungiert als Entwicklungsraum für den vorwettbewerblichen Technologiereifegrad, und muss perspektivisch in eine Governance-Autorität überführt werden, die Zertifizierungsverfahren, Rollenmodelle, Interoperabilitätsstandards und Auditprozesse koordiniert.

Im Falle der eSA kann eine solche Rolle von einer gemeinwohlorientierten Institution übernommen werden, die Innovation, Transparenz und Stabilität im Ökosystem sicherstellt. Diese Instanz ermöglicht den Austausch zwischen Sportpraxis, Wissenschaft und Technologieentwicklung.

Das konzeptionelle Datenmodell der eSA orientiert sich an den Interoperabilitäts- und Governance-Prinzipien des EHDS und integriert semantische Interoperabilität, Zweck-

bindung und Datensouveränität. Es modelliert sportbezogene Gesundheits- und Leistungsdaten als semantisch verknüpfte Entitäten entlang der Ebenen Datenerhebung (Mess- und Diagnosedaten), Kontextualisierung (Trainingsereignisse, medizinische Zustände) und Ableitung (aggregierte Kennzahlen, Entscheidungsunterstützung).

5 Diskussion

5.1 Herausforderungen

Die eSA zeigt, dass föderierte Datenraumarchitekturen einen geeigneten Rahmen für die Integration sportmedizinischer und leistungsdiagnostischer Daten bieten. Dennoch bestehen Herausforderungen, wie die Akzeptanz bei Trainer:innen und Athlet:innen, die Beteiligung von Systemherstellern und die Entwicklung einer langfristigen Betriebs- bzw. Governance-Struktur. Die Akzeptanz der beteiligten Akteure hängt stark von der Benutzerfreundlichkeit der Systeme, den Mehrwertdiensten und der Transparenz der Governance ab. Technisch ist die Integration heterogener Systeme machbar und erfordert klare Schnittstellenstandards. Organisatorisch müssen Verantwortlichkeiten für Betrieb, Zertifizierung und Monitoring eindeutig definiert werden.

5.2 Chancen

Trotz dieser Herausforderungen bietet die eSA die Chance, den Leistungssport datenbasiert, sicher und nachhaltig weiterzuentwickeln. Sie trägt dazu bei, multimodale Daten nahe Echtzeit für die personalisierte Trainingssteuerung nutzen zu können, Doppeluntersuchungen zu vermeiden, Risiken frühzeitig zu erkennen und wissenschaftliche Evidenz stärker in den Trainingsalltag zu integrieren.

5.3 Fazit

Die eSA beschreibt den Ansatz, leistungsdiagnostische, sportmedizinische und trainingsbezogene Daten im Leistungssport über einen föderierten Datenraum miteinander zu verbinden. Datenraumtechnologie definiert eine flexible Schnittstelle und Nutzungsbedingungen, sodass dezentrale Datenquellen im Ökosystem integriert werden können. Durch die Kombination aus Datensouveränität, semantischer Interoperabilität, sicheren Verarbeitungsumgebungen und neutraler Governance entsteht eine Infrastruktur, die sowohl Athlet:innen als auch Trainer:innen, medizinischen Einrichtungen und der Forschung zugutekommt. Moderne Datenraumarchitekturen bieten somit eine tragfähige Grundlage für einen digital unterstützten, evidenzbasierten und verantwortungsvollen Leistungssport.

6 Literatur

- [1] Torres-Ronda, L.; Beanland, E.; Whitehead, S. *et al.* Tracking Systems in Team Sports: A Narrative Review of Applications of the Data and Sport Specific Analysis. *Sports Med - Open* **8**, 15 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00408-z>
- [2] Steinbuss, S.; Otto, B.; Teuscher, A.; Pettenpohl, H.: IDS Reference Architecture Model 4 (IDS-RAM 4). (2022).
- [3] Gaia-X AISBL: Gaia-X – Architecture Document - 22.04 Release, 2022.
- [4] European Commission: European Health Data Space Regulation. 2025.
- [5] Bundesinstitut für Sportwissenschaft: Chancen neuer (techno-logischer) Entwicklungen. https://www.bisp.de/DE/Forschungsschwerpunkte/TechnologischeEntwicklung/technologische-entwicklung_node.html. [abgerufen 10.12.2025]
- [6] Montull, L.; Slapšinskaitė-Dackevičienė, A.; Kiely, J. *et al.* Integrative Proposals of Sports Monitoring: Subjective Outperforms Objective Monitoring. *Sports Med - Open* **8**, 41 (2022). <https://doi.org/10.1186/s40798-022-00432-z>
- [7] Phinyomark, A.; Petri, G.; Ibáñez-Marcelo, E. *et al.* Analysis of Big Data in Gait Biomechanics: Current Trends and Future Directions. *J. Med. Biol. Eng.* **38**, 244–260 (2018). <https://doi.org/10.1007/s40846-017-0297-2>
- [8] Phinyomark, A.; Petri, G.; Ibáñez-Marcelo, E.; Osis, S. T., & Ferber, R. (2018). Analysis of Big Data in Gait Biomechanics: Current Trends and Future Directions. *Journal of medical and biological engineering*, 38(2), 244–260. <https://doi.org/10.1007/s40846-017-0297-2>
- [9] Camomilla, V.; Bergamini, E.; Fantozzi, S.; Vannozzi, G. Trends Supporting the In-Field Use of Wearable Inertial Sensors for Sport Performance Evaluation: A Systematic Review. *Sensors* **2018**, 18, 873. <https://doi.org/10.3390/s18030873>
- [10] Drummond, K.; Lewandowski, B.; Massaroni, C.; (2022) Editorial: Wearable Technology for Human Performance. *Front. Physiol.* 13:871159. doi: 10.3389/fphys.2022.871159
- [11] Robertson, S.: Integration von menschlicher und künstlicher Intelligenz zur Entscheidungsfindung im Leistungssport. In: Memmert, D. (eds) Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen in der Sportwissenschaft. Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, 2025. https://doi.org/10.1007/978-3-662-68950-9_6
- [12] Nagel, L.; Lycklama, D.: How to Build, Run, and Govern Data Spaces. In: Otto, B., ten Hoppel, M., Wrobel, S. (eds) Designing Data Spaces . Springer, Cham, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93975-5_2
- [13] Gersch, M.; Kari, A.; Schurig, T.; Lauf, F.; Wagener, H.: Europäischer Gesundheitsdatenraum: die zukünftige Ausgestaltung digitaler Infrastrukturen. In: Gemeinschaftsprojekt Gesundheit: Wie Value-Based Care das Gesundheitswesen neu erfindet (Hrsg: Hager, L), Berlin: MWV Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 2024, S. 235–244.
- [14] sphin-X e.V. <https://sphin-x.de/> [abgerufen 28.01.2026]