

# Technologische Anforderungen und eines Remote-Surgery Systems im mobilen Kontext

Alexander Garkawj  
Hochschule Furtwangen University  
Furtwangen, Deutschland  
alexander.garkawj@hs-furtwangen.de

Sarah Moser  
Hochschule Furtwangen University  
Furtwangen, Deutschland  
sarah.moser@hs-furtwangen.de

Antonio Raffa  
Hochschule Furtwangen University  
Furtwangen, Deutschland  
antonio.raffa@hs-furtwangen.de

**In Zeiten abnehmender Klinikdichte und damit zunehmender Krankentransportwege steigt die Notwendigkeit von Operationen, welche an Ort und Stelle durchgeführt werden können. Diese Ausarbeitung befasst sich mit den technologischen Herausforderungen, die bei einer Integration eines sog. „Remote-Surgery“ Systems in einen Krankentransportwagen zu beachten sind und gibt Empfehlungen für mögliche Fahrzeuge. Auf eine Untersuchung der organisatorischen Rahmenbedingungen (Rettungsmittel, Ärztedichte) hin werden anhand von Unfallstatistiken theoretische Einsatzgebiete eines da Vinci-Systems dargestellt. Es folgt eine Zusammenfassung der technischen Anforderungen an einen „mobilen Operationssaal“, in dem sich das da Vinci-System nach erfolgreicher Integration befinden wird. Dies umfasst neben interner und externer Kommunikation vor allem Anforderungen, welche im Zusammenhang mit dem Fahrzeugverbau stehen. Hierzu wird exemplarisch das Operationssystem da Vinci TYP Xi auf Integrationsoptionen in ein Referenzfahrzeug des Typs Strobel MB Sprinter VS30 untersucht und entsprechende Erfolgskriterien entwickelt. Diese Anforderungen werden abschließend auf deren Erfüllung hin bewertet und, falls notwendig, alternative Fahrzeuge vorgestellt.**

**Keywords — da Vinci, Remote-Surgery, Fernoperation, Krankentransport, Integration, mobiler Operationssaal**

## I. EINFÜHRUNG

Erste Versuche einer robotergestützten Operationsumgebung erfolgten in den 1990er Jahren durch die „Defense Advanced Research Projects Agency“ (DARPA) in Kooperation mit dem NHS (National Health System). Ziel war es, Operationen in Krisengebieten, ohne einen Operateur vor Ort durchführen zu können. Wenige Jahre später entwickelte das Unternehmen „Intuitive Surgical“ die Prototypen „Lenny“, „Leonardo“ und „Mona“. 1999 erreichte das da Vinci-System Marktreife. Das ZEUS Chirurgie System beispielsweise, welches 2002 in den USA zugelassen wurde, ermöglichte bereits computerunterstützte Operationen, bei denen Patient und Operateur mehrere Meter voneinander entfernt waren [24]. In den darauffolgenden Weiterentwicklungen stieg die Distanz zwischen Operateuren und Patienten kontinuierlich, sodass bereits 2011 der erste Eingriff mit 7000km Operationsdistanz stattfand (bei einer Latenz von 135ms).

Schon jetzt ist durch den Mangel an niedergelassenen Ärzten vor allem im ländlichen Bereich eine zunehmende Distanz zur notfallmedizinischen, prästationären oder stationären Versorgung festzustellen. Daran schließen sich, bedingt durch Reduktion von finanziellen Mitteln im Gesundheitswesen sowie Konsolidierung von Kliniken zusätzliche Verlegefahrten an, welche über den Rettungsdienst abzuwickeln sind. Die sog. Hilfsfrist, der Zeitraum zwischen dem Eingang eines Notrufes und der

notfallmedizinischen Versorgung [1], sollte nicht mehr als 15 Minuten betragen [2][3][6]. Hinzu kommt die durch das Baden-Württembergische (BW) Innenministerium forcierte „Golden Hour“ welche speziell für Schlaganfall- und Herzinfarkt-Patienten relevant ist. Auch hier unterliegt der Prähospitalzeitraum einer Frist von <60 Minuten [6]. Dies erfordert ein enges Netzwerk von Leitstellen und Rettungsstationen. Auf Basis des Qualitätsberichts 2020 der Stelle zur trägerübergreifenden Qualitätssicherung im Rettungsdienst Baden-Württemberg (SQR-BW) [5] ergibt sich untenstehende TABELLE I. Eine Versorgung vor Ort durch qualifiziertes Personal und unter Zuhilfenahme von Remote-Surgery-Systemen erscheint den Autoren als probates Mittel zur (notfall-)medizinischen Versorgung für Patienten, deren Zustand es nicht erlaubt, über weite Distanzen hinweg transportiert zu werden und bei denen der Einsatz von Luftrettungsmaßnahmen nicht durchführbar ist. Eine umfangliche Betrachtung, ob der Einsatz von mobilen Operationssälen anzustreben ist, bedarf einer Analyse der nachfolgenden Faktoren:

1. Übersicht über die Rettungsinfrastruktur in BW [4] sowie die registrierten Einsätze und deren jeweilige Transportmittel (TABELLE I.)
2. Verletzungsgruppen bei Notfalleinsätzen in BW 2020 [4] sowie die relevantesten Einsatzgebiete des da Vinci-Systems (TABELLE III., Spalte A)
3. Praktizierende Ärzte [7] in den relevanten Fachbereichen (TABELLE III., Spalte E)

TABELLE I. NOTFALLRETTUNG: ÜBERSICHT RETTUNGSMITTEL

Typ	BW
Integrierte Leitstellen	34
Notarztstandorte	186
Notärztlich besetzte Rettungsmittel	200
Rettungswachen	300
Rettungswagen	440
Fahrten durch Rettungsmittel	282.052
Fahrten durch Krankentransportwagen	903.255
Fahrten durch Rettungswagen	925.741
Davon mit Notarzt	274.411

Tabelle 1 - Rettungsmittel

Sowohl die Ausrückzeiten notarztgebundener Rettungsmittel (Abb. 1) als auch die Ausrückzeiten von Rettungswagen (Abb. 2) sind im Vergleich zu 2019 gestiegen, was auf längere Kommunikationswege und unzureichende Personaldichte hinweist. Wie auch in [36] diskutiert, steigt die Anzahl der notfallmedizinischen Versorgung bundesweit vor allem im ländlichen Raum.

	2020	2019
▶ Fallzahl:	269.874	285.095
▶ Ergebnis (Median/95. Perz. in mm:ss):	02:03/04:26	01:59/04:20
▶ Referenzbereich:	≤ Median Landeswert	

Abb. 1. Ausrückzeiten notarztgebundener Rettungsmittel [4]

	2020	2019
▶ Fallzahl:	545.470	586.853
▶ Ergebnis (Median/95. Perz. in mm:ss):	01:19/03:00	01:16/02:59
▶ Referenzbereich:	≤ Median Landeswert	

Abb. 2. Ausrückzeiten RTW [4]

Um potenzielle Anwendungsszenarien für einen mobilen Operationssaal zu definieren, ist eine Betrachtung der häufigsten Verletzungsgruppen [5] sinnvoll, siehe Abb. 3. Auffällig ist die Verteilung im Bereich der Extremitäten sowie Schädel-Hirn Traumata. Von den erfassten Einsätzen entfallen auf Sonstige (56%), Notfälle mit internistischem Hintergrund (29%), sonstige Unfälle (12%) und Arbeitsunfall (< 1%) [8]. Ebenfalls in [36] erläutert, ist der Anstieg von Notfällen in lebensbedrohlichen Situationen (Heidelberg 1984-2004: Faktor 3, Leipzig 2003-2013: Faktor 1,5).

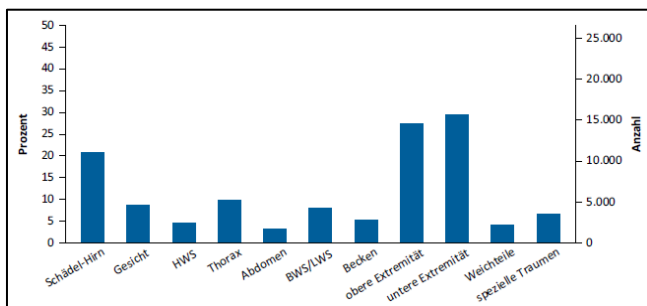


Abb. 3. Verletzungsgruppen [5]

Die deutsche Ärztekammer veröffentlichte zum 31.12.2020 die ausschnittsweise in TABELLE III. dargestellten Zahlen [7]. Die Autoren wiesen jeder Unfallgruppe potenziell beteiligte medizinische Fachbereiche zu. Daraus ergab sich eine theoretische Grundlage zur Einschätzung, wie umfangreich die Zielgruppe der potenziellen Anwender eines da Vinci-Systems sein könnte (Spalte „Summe“). Kombiniert man die bereits bekannten und medizinisch belegten Einsatzgebiete des da Vinci-Systems mit den häufigsten Verletzungsgruppen in BW, ergibt sich nach Ansicht der Autoren eine Überdeckung von Notwendigkeit und Anwendbarkeit in den Bereichen Thorax, Abdomen und Weichteile.

Im Weiteren wird diesem Rechenbeispiel zugrunde gelegt, dass 10% der Ärzte im jeweiligen Fachgebiet über eine

Zusatzqualifikation für da Vinci-Systeme verfügt. Aus Abb. 3 ergibt sich eine geschätzte Anzahl von Fahrten für die Bereiche von Abdomen (~2.000), Thorax (~5.000) und Weichteile (~5.000). Nimmt man an, dass nur die Hälfte der verfügbaren Rettungswagen (220) entsprechend rund 50% der Fahrten erledigen können.

TABELLE II. THEORETISCHE BESETZUNGSQUOTE VON RETTUNGSWAGEN MIT DA VINCI-SYSTEM IM VERGLEICH ZU ERLEDIGTEN FAHRTEN IN 2020 (BW)

Gebiet	Anteil Mediziner (10% von Tabelle 3, E)	Fahrten mit da Vinci-System (Abb. 3)	Quote
Thorax	1.161	2.500	46,44%
Abdomen	1.214	1.000	121,4%
Weichteile	3.387	2.500	121,4%

Tabelle 2 – Besetzungsquote

Aus Tabelle 2 geht soweit eine theoretische Unterdeckung von ausgebildeten Mediziner im Bereich Thoraxchirurgie hervor, wohingegen für Abdomen und Weichteile Kapazitäten für Fernoperationen vorhanden wären.

Als Hypothese dieser Arbeit wird daher angenommen:

- Klinikkonsolidierung, ländliche Strukturen sowie Verletzungsgruppen und Fahrtendichte rechtfertigen den Einsatz mobiler Operationssäle in BW
- Das Rettungsmittelpersonal vor Ort verfügt über eine Qualifikation zum Anästhesisten (Voraussetzung für Operationen vor Ort)
- Das Operationssystem ist in einem Fahrzeug verbaubar
- Das Fahrzeug verfügt über räumliche Kapazitäten für das Operationsteam, Einbauten und technisches Equipment wie Generatoren oder Luftreinigungssysteme
- Durch Nutzung der 5G Infrastruktur in BW werden Fernoperationen mit ausreichend Datenübertragungsqualität und geringen Latenzzeiten ermöglicht

## II. AKTUELLER FORSCHUNGSSTAND

Ende 2021 verzeichnete „Intuitive Surgical©“ die Installation des zweihundertsten da Vinci-Systems in Deutschland und über 200.000 durchgeführte operative Eingriffe. Im Standardfall befinden sich die Chirurgenkonsole und der Patientenwagen im selben Operationsraum [38]. Damit Fernoperationssysteme in mobilen Anwendungsgebieten weiterentwickelt werden können, sind Fortschritte in der Telekommunikationsinfrastruktur und -technik, sowie die Leistung von computergestützten Geräten notwendig, um höhere Mengen an Daten zu verarbeiten und diese Daten mit geringen Latenzen zwischen Chirurgenkonsole und Patientenwagen zu übertragen [27]. Die Verwendung der 5G Telekommunikationstechnologie ermöglicht einem mobilen Fernoperationssystem mit Latenzen von 2 Millisekunden bei einer Distanz von 3000 Kilometer zu arbeiten [28]. Wie in etwa die Platzierung von Patientenwagen in Gebieten, an den ausgebildete Fachärzte nicht verfügbar sind [29].

TABELLE III. GEGENÜBERSTELLUNG

Verletzungsgruppe	Beispielhafte Einsatzgebiete da Vinci-System	Potenziell beteiligte FB	FB [7]	Anzahl berufstätiger Ärzte je FB [7]	Summe
A	B	C	D	E	C + E
Schädel-Hirn	Tumorentfernung [13], Behandlung von Karzinomen im Bereich des Rachens, Behandlung von Schlafapnoe [14]	A, b, h, d, e, f	a. Allgemein Chirurgie Allgemeine Chirurgie <sup>a</sup> Chirurgie	988 875 6.827 (Total: 8.690)	42.220
Gesicht	Rekonstruktion des Gesichts [15],	A, d, g	b. Gefäßchirurgie <sup>b</sup>	1.418	27.869
Halswirbelsäule	Platzierung von Pedikelschrauben an BWS [18]	A, d	c. Herzchirurgie <sup>c</sup>	1.109	26.062
Thorax (Brustkorb)	Thorakoskopische Eingriffe, Lungen(teil-)entfernung, Thymektomie [10]	A, b, c, e	d. Orthopädie, Orthopädie und Unfallchirurgie <sup>d</sup>	5.186 12.186 (Total: 17.372)	11.614
Abdomen (Bauch)	Eingriffe an Magen, Darm, Speiseröhre [11]	A, f	e. Thoraxchirurgie <sup>e</sup>	397	12.147
Brustwirbelsäule/ Lendenwirbelsäule	Platzierung von Pedikelschrauben an BWS [18]	A, d	f. Visceralchirurgie <sup>f</sup> Viszeralchirurgie	1.154 2.303 (Total: 3.457)	26.062
Becken	Prostataentfernung, Zystektomie, Nierenoperationen [12]	A, b, d, i	g. Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie <sup>g</sup>	1.807	33.827
Obere/Untere Extremität	Trizeps und Brachial Plexus [17]	A, b, d	h. Neurochirurgie <sup>h</sup> Neurologie	2.532 8.354 (Total: 10.886)	27.480
Weichteile	(Teil-)Entfernung von: Prostata, Niere, Harnleiter oder Harnblase, Lymphknoten, Cervix	A, b, d, i	i. Urologie <sup>i</sup>	6.347	33.872

Tabelle 3 - Gegenüberstellung

<sup>a</sup> Dient der chirurgischen Basisversorgung. Enthält Teilgebiete der Unfall-, Viszeral- und Gefäßchirurgie

<sup>b</sup> Krampfader, Thrombosen oder eine Verengung der Halsschlagader, Rohrprothesen, Bypässe, endovaskuläre Chirurgie

<sup>c</sup> Koronararterien-Bypässe, Eingriffe an den Herzklappen, Transplantationen

<sup>d</sup> Bereiche: Stütz- und Bewegungsapparat, Endoprothetik, Behandlung von Polytraumata. Diese Spezialisierung muss notfallkompetent sein.

<sup>e</sup> Zusammenfassend: Verletzungen an Brustfell (Pleura), Lunge, Luftröhre und Bronchien, Mittelfells und Thoraxwand.

<sup>f</sup> Zusammenfassend: Bauchraum, Bauchwand, Weichteile. Ebenso die Behandlung von Schilddrüse/Nebenschilddrüse, Behandlung von Eingeweidebrüchen und Transplantation von Bauchhöhlenorganen

<sup>g</sup> Operative Entfernung von Zähnen, parodontale Chirurgie, Implantologie, Erkennung und Behandlung akuter Notfälle, Kardiopulmonale Reanimation, Osteosynthesen

<sup>h</sup> Degenerative Erkrankungen der Wirbelsäule, Hirntumore, intrakraniellen Druck (Hirndruck), Schädel-Hirn-Verletzungen

<sup>i</sup> Harnwegsinfektionen, Abszesse oder Krebserkrankungen an Blase oder Niere, Diagnostik und Behandlung von Symptomen und Krankheiten an Penis, Hoden und Prostata.

Für diese Arbeit als relevant eingestufte Primärliteratur ist unter anderem „Telesurgery“ von Sajeesh Kumar et al., welches einen tiefen Einblick in Fernoperationssysteme von der Entstehung, über Ausbildung von Fachpersonal bis hin zu Anwendungsfällen unterschiedlicher Operationsmöglichkeiten gibt [24].

Bedeutsam und aktiv erforscht ist die Thematik der Kommunikation von Chirurgenkonsole und Patientenwagen mit einer großen Distanz über Funknetze. Essenziell hierbei ist die Einhaltung von möglichst kurzen Latenzen unterhalb von 150 Millisekunden bei einer stabilen Verbindung [24]. Sogenannte „Low-Latency“ Kommunikation ist Forschungsthema in den Artikel von Duc Tran Le et al. „The 1-Millisecond Challenge – Tactile Internet: From Concept to Standardization“ und „Evaluation of Remote Surgery in Ultra-Reliable Low Latency Communication Framework“ von Jonas Kolb et al. [30][31].

Erkenntnisse in Bezug auf mobile Operationen unter klimatisch herausfordernden und hygienisch schwierigen Rahmenbedingungen lieferten uns Mitchell J. H. Lum et al vor dem Hintergrund militärischer Anwendung in Krisengebieten und bei der Nutzung auf unbemannten Fahrzeugen [37].

### III. FORSCHUNGSFRAGE

Um Anforderungen an ein Fernoperationssystem bestimmen zu können, müssen die Autoren das System und sein übliches Anwendungsgebiet verstehen und auf ein mobiles Anwendungsszenario anwenden. Daraus ergeben sich Systemgrenzen, welche für die Ausarbeitung von Anforderungen an das neue, mobile System relevant sein werden. Die Forschungsfragen für diese Arbeit lauten folglich:

A. Welche Anforderungen an ein mobiles Remote-Surgery System gibt es?

B. Welche Fahrzeuge entsprechen diesen Anforderungen?

### IV. SYSTEMBESCHREIBUNG- UND GRENZEN

Arbeitshypothese dieses Beitrages ist, dass das da Vinci-System für den mobilen Einsatz geeignet ist und sowohl wirtschaftlich als auch aus Gesichtspunkten der Ressourcenverfügbarkeit sinnvoll erscheint.

### A. Systembestandteile

Das Remote-Surgery System besteht aus drei Funktionsblöcken. Erstens, die Durchführung der ferngesteuerten Operation durch einen Operateur an der Chirurgenkonsole in einem Krankenhaus. Zweitens die Netzwerkkommunikationsschnittstelle für die Gewährleistung der Durchführung der Operation. Dritter Block ist der zusammenzustellende mobile Operationssaal. Darunter finden sich die Blockbestandteile des Patientenwagens, des laparoskopischen Turms sowie des Anästhesisten samt Narkosegerät Abb. 4.

- **Patientenwagen da Vinci**

Der Patientenwagen befindet sich beim Patienten und ist ausgestattet mit einem 3D Kamerasystem und chirurgischen Instrumenten. Diese sind an den computergestützten Roboterarmen verbaut und auf den Operationstisch ausgerichtet. Die Konfigurationsauswahl der Operationsarme sowie die Wahl des zu benutzenden Operationswerkzeugs ist individuell zum Operationseingriff [24] konfigurierbar.

- **Chirurgenkonsole da Vinci**

Die Chirurgenkonsole wird vom Operateur bedient und ermöglicht eine komfortable Haltung für längere Operationen, sowie eine 3D Projektion an einem Monitor, durch das steuerbare Kamerasystem am Patientenwagen. Die Software des computergestützten Systems übersetzt hierbei die Eingaben des Operateurs in präzise Bewegungen an die Roboterarme [24], [35]. In diesem Paper wird davon ausgegangen, dass die Chirurgenkonsole nicht im Rettungswagen installiert ist, sondern sich in einem beliebigen Krankenhaus befindet und über drahtlose Internetverbindungen kommuniziert.

- **Laparoskopische Turm da Vinci**

Weiterer Bestandteil eines Remote-Surgery-Systems ist der laparoskopische Turm. Dieser ist ausgestattet mit einem Bildschirm für die assistierenden Ärzte beim Patienten, sowie einen Generator zur Versorgung der Roboterarme, den Insufflator (ein Gerät für die Pneumoperitoneums, also das einsufflieren von CO<sub>2</sub> in die Öffnung am Körper des Patienten als Teil des minimalinvasiven Eingriffs) und Geräte für Videoaufzeichnungen [23].

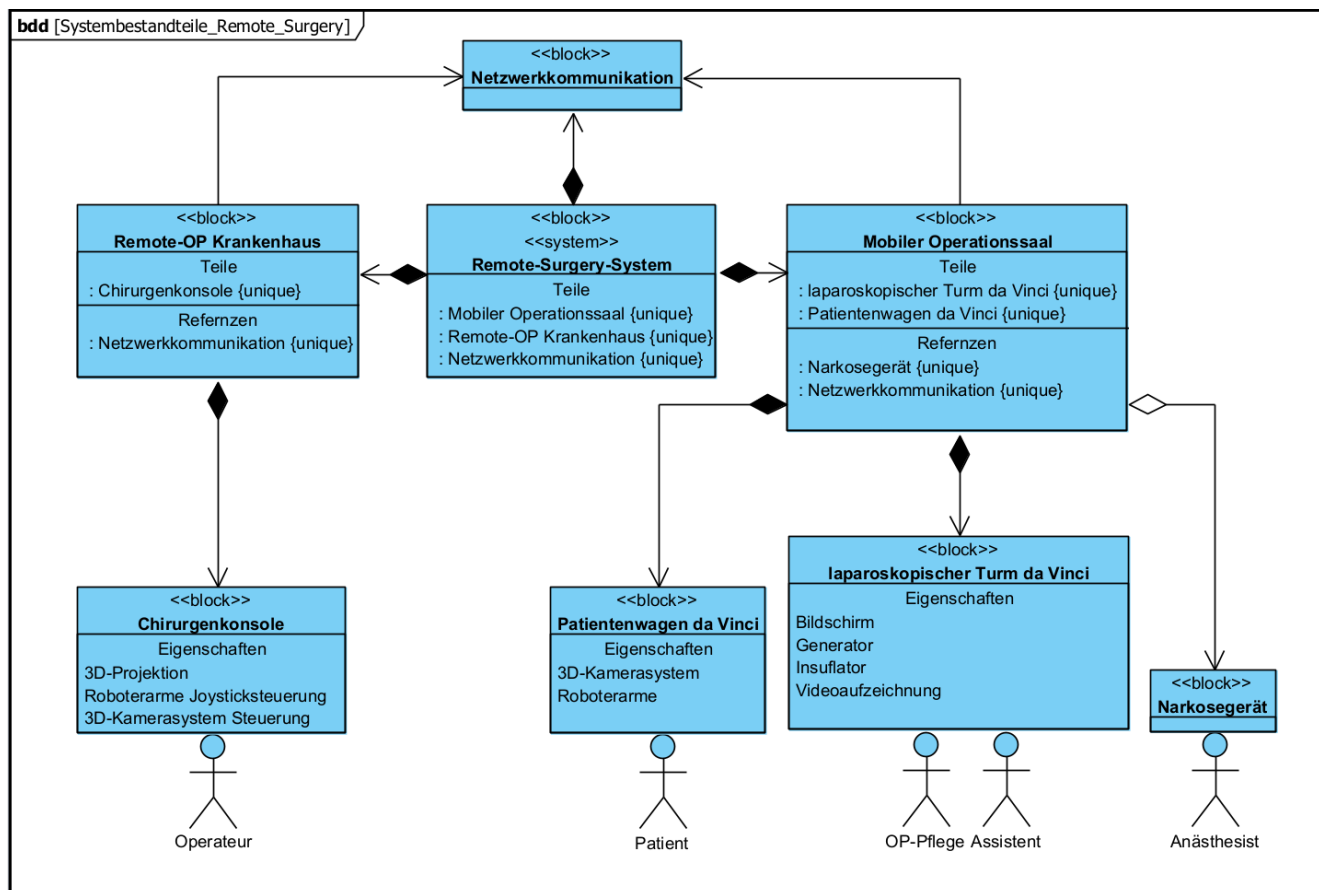


Abb. 4. Systembestandteile\_Remote\_Surgery, basierend auf [20][43]

TABELLE IV. HARDWARE-ANFORDERUNGEN AN DAS FAHRZEUG

Block: Fahrzeug	Anforderung	Strobel Machbarkeit
Gewicht Patientenwagen & laparoskopischer Turm	821 kg & 258.5 kg [32]	X
Dimensionen Patientenwagen & laparoskopischer Turm	Höhe x Breite x Länge in cm Patientenwagen verstaute: 174 x 115 x 149 Patientenwagen max. entfaltet: 247 x 140 x 204 Turm: 193-223 (Bildschirm ein-/ausgefahren) x 68 x 93 [32]	-
Unterbringung Operationsrelevanter Hardware und Materialien	Beatmungsgerät, Narkosegerät, Wärme- und Kühlschränke, Aufbewahrungs- und Arbeitsfläche, Sauerstoffflaschen [26]	-
Stromversorgung	Patientenwagen: 3,8 A bei 230 V Laparoskopischer Turm: 6 A bei 230 V [32] Zusätzlich zum Operationsraum: Beleuchtung, Wärme-/ Kühlschränke, Wasserpumpe, Beatmungsgerät, Lebenserhaltungsgeräte, Luftführungs- und Klimasystem [25]	-
CO <sub>2</sub> -Flaschen	Für eine unproblematische minimalinvasive Operation wird zirka 3 – 5 Liter CO <sub>2</sub> in die Operationswunde einsuffliert [26]. Der laparoskopische Turm besitzt eine Vorrichtung zur Installation von zwei Gasflaschen (jeweils 22 kg) und kann somit ausreichend CO <sub>2</sub> mitführen [33].	X
Raumlufttechnische Anlage	Zur Minderung von Infektionsrisiken ist ein Luftführungssystem mit turbulenzarmer Luftströmung vorzusehen [25].	X
Wasserversorgung	Ein Wassertank- und Anlage für die Verwendung eines Waschbeckens [25].	-
Abfallmanagement	Ein Tank für kontaminiertes Wasser und Abfallbehälter für Sondermüll und Giftstoffe [25].	-
Raumaufteilung des Operationsraumes & Personalschleuse	Personal muss durch einen Vorbereitungsraum in den Operationssaal gelangen (Einhaltung hygienischer Anforderungen). Platzangebot für mindestens 3 Personen im Operationsraum ist einzuhalten [25][26].	-
Hydraulische Stützfüße	Während einer Operation darf der mobile Operationssaal sich nicht in Bewegung befinden, vibrieren oder schwingen. Darum müssen hydraulische Stützfüße am Fahrzeug montiert sein [25].	X

Tabelle 4 – Anforderungsübersicht

## V. ANFORDERUNGEN FÜR DEN EINBAU IM FAHRZEUG

### A. Hardware-Anforderungen

Die Hardwareanforderungen in diesem Abschnitt sind aus der von den Autoren erstellten TABELLE IV. ausgezogen und werden hier schriftlich ergänzt.

Zu dem physikalischen Einbau in einem Sondereinsatzfahrzeug sind die Dimensionen und das Gewicht des Patientenwagens und des laparoskopischen Turms zu berücksichtigen, sowie genügend Freiraum für das Personal, welches den Patienten pflegt und das da Vinci-System bedient [24]. Weitere dimensionsabhängige Anforderungen an das Fahrzeug sind die Unterbringung von Hardware und Materialien zur Verwendung, während einer Operation an einem Patienten und die Raumaufteilung zwischen Operationsraum und einen Vorbereitungsraum, damit der Eingriff unter möglichst sterilen Umgebungsbedingungen stattfinden kann. [25]. Weitere Anforderungen an Hygienebestimmungen sind die Verwendung einer raumlufttechnischen Anlage, um Infektionsgefahren am Patienten im Operationsraum zu vermindern [25]. Ergänzende Anforderungen sollen die Ausführung einer Operation ermöglichen. Dazu gehört zu einem die Stromversorgung des da Vinci-Systems und weitere Gerätschaften, sowie die Beleuchtung. Zu berücksichtigen ist auch die Installation eines Wassertanks und eines Pumpensystems für fließendes Wasser im Arbeitsbereich, die Möglichkeit Abfälle (Giftstoffe, Sondermüll) für die Entsorgung zu verstauen und damit der Operationsraum nicht durch Umwelteinflüsse wackelt, hydraulische Stützfüße die am Fahrzeug angebracht sind [25], [26], [32].

### B. Kommunikationsinfrastruktur

OnSite™ und OnSite® stellen softwareseitig die da Vinci®-Surgical-System Netzwerkommunikation bereit. Die im Onsite® Handbuch ([43], S.4) dargestellte Schemazeichnung diente den Autoren als Referenz zur Ermittlung von Anforderungen (TABELLE V. [20], [43]) an das Gesamtsystem in Abb. 4 [20], [43].

Die Hauptfunktionalitäten der OnSite® Software sind:

- Übermittlung von Systeminformationen
- Überwachung und Verwaltung aller Blockkomponenten des Remote-Surgery Systems über eine kabelgebundene oder drahtlose Netzwerkverbindung
- Bereitstellung einer zentralen Schnittstelle zwischen dem mobilen Operationssaal und der Chirurgenkonsole mittels IP-Infrastruktur

### C. Kommunikation extern

Notwendig für den mobilen Einsatz ist eine Funkverbindung mit mindestens LTE bis 5G Netztechnologie [31]. Zu berücksichtigen ist der Einsatzort BW und dessen Netzabdeckung, denn diese weist vor allem bei der 5G Abdeckung große Lücken auf [41]. Da das da Vinci-System nur in einer unveränderlichen Position verwendet werden darf (TABELLE IV. Operation nur bei Stillstand) entfällt die Gefahr von Verbindungsabbrüchen durch einen dynamischen Nutzungskontext. Des Weiteren kann das mobile System sich gezielt an einem Standort platzieren, der durch Messungen der Signalstärke als geeignet eingestuft werden kann. Mögliche Signalredundanzen durch eine dynamische Umgebung (bspw. Wettereinflüsse) müssen berücksichtigt werden,

damit eine Latenz von unter 150ms mit einer ständigen Verfügbarkeit und Verbindung zum LTE und / oder 5G Netz gewährleistet werden kann [39]. Vom Sender/Empfänger-Modul des mobilen da Vinci-Systems wird gefordert, bei einem bidirektionalen Wechsel von LTE auf 5G einen nahtlosen Übergang zu gewährleisten (für eine ungestörte Kommunikation zwischen Chirurgenkonsole und Patientenwagen). Erreicht wird dies durch eine Non-Stand-Alone-Infrastruktur (NSA) und einer effizienten Breitband Zwei-Chip Versorgungsmodulator-Architektur im Gerät, die es ermöglichen, dass LTE und 5G gleichzeitig verbunden sind [39][40]. Übertragungsgeschwindigkeit ist zentrale Anforderung im Kontext mobiler Anwendung, da es im Fahrzeug, dem mobilen Operationssaal, keine kabelgebundene Internetverbindung gibt. Zwar können über eine Verlegung im Fahrzeugboden der laparoskopische Turm und der Patientenwagen an einen fest verbauten Router angeschlossen werden, doch spätestens ab der Karosseriegrenze erfordert das System zur externen Kommunikation eine 4G bzw. 5G Verbindung.

Wie bereits in [44] dargelegt, verfügt HSPA über eine Latenz von ~70ms bei einer Datentransferrate (Spitze) von 42Mb/s bzw. 30ms bei einer Spitzenübertragung von 300Mb/s. LTE-A war im Stande, eine Latenz von 20ms bei 1Gb/s Übertragung zu erreichen. Vor allem im medizinischen Bereich steigen die Anforderungen an hoch performante, latenzarme und hochverfügbare Netzwerke. Man spricht von „low latency networks“ als Voraussetzung für das „Tactile Internet“ [46]. Im Bereich der Fernoperation ist es essenziell, einen Roundtrip von  $\leq 1$ ms zu erreichen, um dem Operateur in Echtzeit Informationen zum laufenden Eingriff bereitzustellen und so die Sinneseindrücke einer Operation vor Ort zu übermitteln. Unterschieden werden NGN (Next-Generation-Network bei  $\leq 100$ ms bei wenigen Mb/s), „Low-Latency networks“ ( $\leq 10$ ms Latenz bei wenigen hundert GB/s) für medizinische Anwendungen und „Ultra-low latency“ Netzwerke ( $\leq 1$ ms bei mehreren Tb/s) für das „Tactile Internet“. Die benötigte Information müssen innerhalb dieser Zeit verschlüsselt (AES-256), übertragen und entschlüsselt werden. Ein effizientes, overheadarmes und möglichst verlustfreies Protokoll sowie effizientes Queueing sind hierzu notwendig. Zur effizienten Nutzung vorhandener Frequenzen sei auf die Ausführungen von Lee et al [31] zu Polar Code, SCMA (Sparse Code Multiple Access), filtered-OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) und MUSA (Multi-User Shared Access) verwiesen.

Nachfolgend der von Cakuli 2016 [45] vorgestellte Roundtrip:

- Sensor (Client) – Encoder (Client)– Transceiver (Client): 0.3ms
- Transceiver (Client) – Transceiver (Base Station): 0.2ms
- Transceiver (Base Station) – Mobile edge cloud/steering Server) – Transceiver (Base Station): 0.5ms
- Transceiver (Base Station) – Transceiver (Client): 0.2ms
- Transceiver (Client) – Decoder (Client) – Aktuator (Client): 0.3ms

## VI. FAZIT

Ziel dieser Arbeit war eine Analyse der organisatorischen und technischen Anforderungen für den Einsatz mobiler Operationssäle in Baden-Württemberg. Basierend auf Forschungsfrage A wurden Anforderungen erarbeitet und an einem Referenzfahrzeug evaluiert. Die Machbarkeit an einem Rettungswagen des Typ Strobel MB Sprinter VS30 lässt sich aufgrund der Anforderungen aus TABELLE IV. ausschließen. Sowohl die physikalische Dimension des Fahrzeuges und weitere Anforderungen zum Betrieb eines mobilen Operationssaals als auch die Ressourcenverfügbarkeit in den Punkten Raumangebot, Energieversorgung und zusätzlicher technischer Systeme sprechen gegen einen Verbau des da Vinci-Systems in das Referenzfahrzeug.

Für die Umsetzung der Integration des da Vinci-Systems in einen mobilen Kontext schlagen die Autoren folgendes Fahrzeug als Alternative vor:

Die Weihai Guangtai Airport Equipment Co., Ltd. Stellt den „Mobile Surgery Unit 12m Mobile Surgery Vehicle“ mit der Modelnummer WGT5200XSS her. Hauptabsatzmarkt laut Hersteller ist jedoch der asiatische Raum [42]. Eine konzeptionelle Betrachtung zeigt, dass die in diesem Paper aufgestellten Anforderungen aus den Forschungsfragen eine theoretische Integration des da Vinci-Systems hinsichtlich der Hardware-Anforderungen des Fahrzeugs an Innenraumgröße, technischen Parametern für Arbeitsbedingungen und Grundrissaufteilung, die Aufstellung des laparoskopischen Turmes mit Patientenwagen, Narkosegerät und Personal ermöglicht. Ferner müssten Rahmenwerke wie die Vorgaben zur prästationären Versorgung, die Hilfsfrist und „Golden Hour“-Regelung entsprechend dem Szenario mobile Operation angepasst werden.

Mit verbesserter Netzabdeckung in Baden-Württemberg entstehen zusätzliche regionale Einsatzgebiete für einen mobilen Operationssaal. Gerade in abgelegenen Gebieten, örtlich versprengten Hofanlagen und Dörfern, welche aufgrund von fehlender stationärer Versorgung nicht über Möglichkeiten zur Durchführung von Eingriffen verfügen sehen wir steigenden Bedarf. Als weitere Faktoren zur Begünstigung mobiler Operationen zählen der Wegzug aus ländlichen Gebieten, sowie der demografische Wandel (steigende Patientenzahlen im letzten Lebensdrittel).

## VII. OFFENE FRAGESTELLUNGEN

Die Autoren dieser Arbeit sehen im Wesentlichen weiterführenden Forschungsbedarf in Bezug auf die Erreichung der Latenzanforderungen durch Nutzung von 5G sowie der Entwicklung von Protokollen mit geringem Informationsoverhead bei gleichzeitiger Gewährleistung von Verlässlichkeit, Performanz und Verfügbarkeit der Kommunikation.

Um ein Fahrzeug, wie den WGT5200XSS, für den Einsatz in Deutschland zu nutzen, ist eine ingenieurtechnische Zulassungsuntersuchung nach geltenden Standards notwendig (TÜV).

TABELLE V. KOMMUNIKATIONSSCHNITTSTELLEN

Kommunikationsschnittstellen					Anforderungen als Stichpunkte				
Schnittstelle	Da Vinci-System		Mobiler Operationsaal		Security (Verschlüsselung, Authentifizierung)	Zuverlässigkeit (Verlässlichkeit, Integrität, Reichweite)	Bandbreite	Protokolle	Anderes
	intern	extern	intern	extern					
BOS (Funk): Air Interface (AI) [19]				x	- TETRA <sup>a</sup> -Encryption zwischen Basisstation und Endgerät - Ende-zu-Ende Verschlüsselung der Kommunikation zwischen Endgeräten mittels BOS Sicherheitskarte	- Netzabdeckung ~ 99,2% - (M)DMO <sup>b</sup> DMR <sup>c</sup> , Gateway-Funktion <sup>d</sup> möglich - TMO <sup>h</sup> über AI	- Schutzstufe 1 (ungeschützt): 7,2 bis 28,8kbit/s - Schutzstufe 2 (geschützt): 4,8 bis 19,2kbit/s - Schutzstufe 3 (hoch): 2,4 bis 9,6kbit/s - 25KHz Kanalraaster	- N/a	- Zeitmultiplex TDMA - Gruppenrufe im Halbduplexverfahren - 4 Leistungsklassen (1,3,10,30W) - ACELP Sprachcodex
Mobile Datenverbindung GSM, 2G-5G	x	x			- Einfache Klartext-Authentifizierung - http-Proxys: keine Authentifizierung - 128-bit Verschlüsselung	- 1024-bit RSA privater Zugangsschlüssel	- Statuspaket: 4Kb pro 10sec - UPLOAD: Langstrecke 1Kb bis 10MB: 1000Kb pro 15 bis 30min! - Remote-Zugang bei bestehender laufender Verbindung: ~ 1,5Mb	- https (TLS 1.2) Outbound-Zugang auf Port 443	- dvms-dv.intusurg.com (65.160.57.30) - dvms-dv.davincionsite.com (199.87.79.30) - keine SSL-Proxys
Mobile Datenverbindung GSM, 2G-5G				x	- Hardware Security Module - TETRA <sup>e</sup>	- LTE CAT 4 <sup>e</sup>	- N/a	- N/a	- N/a
(W-)LAN: Rescue-Track-System					- Hardware Security Module - TETRA <sup>e</sup>	- N/a	- N/a	- WiFi 802.11ac 2 und 5 GHz <sup>e</sup> (802.1X EAP)	- CAN Decoder <sup>e</sup> - REST API <sup>e</sup>
(W-)LAN: da Vinci-System	x	x	x	x	- Da Vinci Si und neuer: TLS (1.2) Kryptographie - Da Vinci S: SSL 3.0	- Wireless AP <sup>g</sup> max. 75fuß im Fahrzeug zum da Vinci-System entfernt - Max. Latenzzeit: 50ms zw. Wireless Bridge und Wireless AP <sup>g</sup> zum Krankenhaus	- Genutzte Bandbreitenauslastung muss zu 80% frei sein. - Datenpaketverlust max. 10%	- IEEE 802.11 Wireless Standard - 802.11B, G, N bei einer 2,4GHz Frequenz über die WLAN-Bridge in der "da Vinci-System vision cart"	- Latenzen: max. 300ms - Als Modul zusätzlich benötigt: "da Vinci-System vision cart"
Ethernet und IP-Adressierung	x	x			- Keine Authentifizierung in IP-Adressierung	- N/a	- 10/100/1000bT Ethernet	- Aktivierung Inbound Ports und Network Address Translation (Ethernet) - TCP/IP Port 443 (IP-Adressierung)	- N/a
Firewall	x	x	x	x	- Aktualisierung der System-Uhr über NTP-Server - OnSite Server limitierter Zugang über Vertrauens-/Widerrufs- Zertifikat, ADA <sup>f</sup> /	- da Vinci System authentifiziert über eine Public Key Infrastructure (PKI) System-Zertifikat	- N/a	- ausgehende HTTPS Verbindung (TCP/IP Port 443)	- Kommunikation geht standardmäßig von da Vinci aus -> keine Inbound Firewall

Tabelle 5 – Kommunikationsschnittstellen

<sup>a</sup>. TETRA: Terrestrial Trunked Radio, Standard

<sup>b</sup>. A Direkte Nachrichtenübermittlung ohne Zugriff auf weitere Infrastruktur (Nachteil: kurze Reichweite). Auch als Managed Direct Mode möglich (MDMO). Hierbei erfolgt die Kanalvergabe durch das Netz

<sup>c</sup>. DMR: Direct Mode Repeater: Nutzung eines mobilen Endgerätes als Signalverstärker. Erfordert 2 Zeitschlitz/DMO Kanäle

<sup>d</sup>. (M)DMOG (Managed) Direct Mode Gateway: Mittels Gateway-Funkgerät kann an Stellen ohne TMO Verbindung über das Gateway Kontakt zur Leitstelle gehalten werden

<sup>e</sup>. Basierend auf Spezifikationen der „Rescuetrack“-Systeme

<sup>f</sup>. ADA: Active Directory Accounts

<sup>g</sup>. Wireless AP: Wireless Access Point

<sup>h</sup>. TMO: Trunked Mode Operation

## REFERENCES

- [1] DIN 13050:2002-09 Punkt 3.11, „Rettungswesen -Begriffe“  
DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, 2009
- [2] Ausschuß Rettungswesen: Bericht der Arbeitsgruppe „Hilfsfrist“ des Ausschuß Rettungswesen vom 14. August 1997, Handbuch des Rettungswesen B III. 0.5.3
- [3] Ausschuß Rettungswesen: Abschlußbericht der Arbeitsgruppen „Strukturfragen, Hilfsfrist und Massenansturm von Verletzten“, 2001, Mendel Verlag Aachen
- [4] KG 2-Statistik, Bundesministerium für Gesundheit. „Leistungsfälle bei Rettungsfahrten und Krankentransporten der Versicherten der gesetzlichen Krankenversicherung (Anzahl). Gliederungsmerkmale: Jahre, Deutschland, Rettungs-/Transportmittel, Kassenart, Versichertengruppe“. Gesundheit Statistik Gesundheitsberichterstattung des Bundes. [https://www.gbe-bund.de/gbe/pkg\\_isgbe5.prc\\_menu\\_olap?p\\_uid=gast&p\\_aid=44\\_113531&p\\_sprache=D&p\\_help=2&p\\_indnr=282&p\\_indsp=50889&p\\_ityp=2&p\\_fid=22861](https://www.gbe-bund.de/gbe/pkg_isgbe5.prc_menu_olap?p_uid=gast&p_aid=44_113531&p_sprache=D&p_help=2&p_indnr=282&p_indsp=50889&p_ityp=2&p_fid=22861) (Zugriff am 4. Januar 2022).
- [5] SQR-BW, K. Beck und T. Lohs, „Qualitätsbericht, Berichtsjahr 2020, Rettungsdienst Baden-Württemberg“, SQR-BW, Lahr/Schwarzwald, Juni 2021. Zugriff am: 4. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.sqrbw.de/fileadmin/SQRBW/Downloads/Qualitaetsberichte/SQRBW\\_Qualitaetsbericht\\_2020\\_Inhalt\\_web2.pdf](https://www.sqrbw.de/fileadmin/SQRBW/Downloads/Qualitaetsberichte/SQRBW_Qualitaetsbericht_2020_Inhalt_web2.pdf)
- [6] Ministerium des Inneren, für Digitalisierung und Kommunen Baden-Württemberg. „Rettungskette“. Baden-Württemberg.de. <https://im.baden-wuerttemberg.de/de/sicherheit/rettungsdienst/rettungskette/?type=98> (Zugriff am 18. Februar 2022).
- [7] „Ergebnisse der Ärztestatistik zum 31.12.2020“. Bundesärztekammer. <https://www.bundesaeztekammer.de/ueber-uns/aerztestatistik/aerztestatistik-2020/> (Zugriff am 4. Januar 2022).
- [8] Bundesanstalt für Straßenwesen. „BAST-Bericht M 290 - Leistungen des Rettungsdienstes 2016/17“. BAST - Startseite. <https://www.bast.de/DE/Publikationen/Berichte/unterreihe-m/2020-2019/m290.html?nn=1831484> (Zugriff am 4. Januar 2022).
- [9] Autoren der Wikimedia-Projekte. „Liste der BOS-Leitstellen“. Wikipedia - Die freie Enzyklopädie. [https://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_BOS-Leitstellen](https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_BOS-Leitstellen) (Zugriff am 4. Januar 2022).
- [10] Universitätsklinikum Heidelberg. „Da Vinci Roboter - Thoraxchirurgie“. Thoraxklinik Heidelberg. <https://www.thoraxklinik-heidelberg.de/verfahren/da-vinci-roboter-205940> (Zugriff am 5. Januar 2022).
- [11] Alb Fils Kliniken GmbH, F.C. Thiel, M. Hahn, B. Keim. „Einsatzgebiete der da Vinci-Operationsmethode | da Vinci-Zentrum“. Home | Alb Fils Kliniken. <https://www.alb-fils-kliniken.de/da-vinci-zentrum/operationsroboter-da-vinci/einsatzgebiete-der-da-vinci-methode/> (Zugriff am 5. Januar 2022).
- [12] Gesundheit Nord - Klinikverbund Bremen. „DAS „DA VINCI“-SYSTEM“. Gesundheit Nord - Klinikverbund Bremen. <https://www.gesundheitnord.de/urologischeklinik/das-da-vinci-system.html> (Zugriff am 5. Januar 2022).
- [13] Ş. Güner. „First brain surgery completely done with robotics“. Daily Sabah. <https://www.dailysabah.com/health/2018/05/30/first-brain-surgery-completely-done-with-robotics> (Zugriff am 5. Januar 2022).
- [14] Weinstein GS, et al: “Transoral robotic surgery for advanced oropharyngeal carcinoma.” Arch Otolaryngol Head Neck Surg 2010; 136: 1079–1085
- [15] Liu, Hang-Hang et al. “Robotic surgical systems in maxillofacial surgery: a review.” *International journal of oral science* vol. 9,2 (2017): 63-73. doi:10.1038/ijos.2017.24
- [16] Dobbs, Thomas D et al. “A Systematic Review of the Role of Robotics in Plastic and Reconstructive Surgery-From Inception to the Future.” *Frontiers in surgery* vol. 4 66. 15 Nov. 2017, doi:10.3389/fsurg.2017.00066
- [17] de Melo PP, Garcia JC, de Souza Montero EF, Atik T, Robert EG, Facca S, et al. Feasibility of an endoscopic approach to the axillary nerve and the nerve to the long head of the triceps brachii with the help of the Da Vinci Robot. *Chir Main* (2013) 32(4):206–9.10.1016/j.main.2013.05.003
- [18] G. Shangju et al., „Accuracy of Robot-Assisted Percutaneous Pedicle Screw Placement under Regional Anesthesia: A Retrospective Cohort Study“, *Postoperative Pain Management of Orthopaedic Surgeries*, Volume 2021, Dezember 2021, Art. Nr. 6894001. Zugriff am: 5. Januar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1155/2021/6894001>
- [19] Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben. „Wir sind die Netzbetreiberin des Bundes“. BDBOS. [https://www.bdbos.bund.de/DE/Home/home\\_node.html](https://www.bdbos.bund.de/DE/Home/home_node.html) (Zugriff am 10. Januar 2022).
- [20] Intuitive Surgical, Inc. “OnSite™ for the da Vinci® Surgical System Overview Document Number: 813331-33 rev C Intuitive Surgical, Inc.”. [Mats.Gunnarsson@intusurg.com](https://www.intuitive.com/usa/Products/da-vinci-surgical-system/onsite) (Zugriff am 15. Februar 2022).
- [21] Rescuetrack GmbH: “RDG1110”, Autor nicht benannt <https://www.rescuetrack.de/de-de/products/rdg1110/> ohne Datum [online, abgerufen am 10.01.2022, 14:29]
- [22] Dr. med. Christian Bach, Sektion Robotische Urologie da Vinci®-Operation: Roboter-Methode <https://www.ukaachen.de/kliniken-institute/klinik-fuer-urologie/sektion-robotik/> [online, abgerufen am 23.01.2021]
- [23] T. Hackert und R. S. Croner, Hrsg., *Roboterassistierte Viszeral- und Thoraxchirurgie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60457-1>
- [24] S. Kumar und J. Marescaux, Hrsg., *Telesurgery*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72999-0> [S. 4-5]
- [25] N. A. Not Available, „Anforderungen der Hygiene bei Operationen und anderen invasiven Eingriffen“, *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, Bd. 43, Nr. 8, S. 644–648, August 2000. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s001030070027>
- [26] „15 Laparoskopische Eingriffe“, in *Anästhesie compact*, N. Roewer, H. Thiel und C. Wunder, Hrsg. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 2012. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1055/b-0033-1387>
- [27] G. Sankaranarayanan et al., „Portable surgery master station for mobile robotic telesurgery“, in *1st International ICST Conference on Robot Communication and Coordination*, Athens, Greece, 14.–16. Oktober 2007. ICST, 2007. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.4108/icst.robocomm2007.2217>
- [28] Robotics Online Marketing Team. „5G-Powered Medical Robot Performs Remote Brain Surgery“. Automate. <https://www.automate.org/blogs/5g-powered-medical-robot-performs-fern-brain-surgery> (Zugriff am 15. Februar 2022).
- [29] „World's First Remote Operation Using 5G Surgery“. huawei. <https://www.huawei.com/en/technology-insights/industry-insights/outlook/mobile-broadband/wireless-for-sustainability/cases/worlds-first-remote-operation-using-5g-surgery> (Zugriff am 15. Februar 2022).
- [30] J. Kolb, S. Hodgson, W. Fung und Y. Zhao, „Evaluation of Remote Surgery in an Ultra-Reliable Low Latency Communication (URLLC) Framework“, 18. Oktober 2020. Guildford: University Of Surrey. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.researchgate.net/publication/346006621\\_Evaluation\\_of\\_Remote\\_Surgery\\_in\\_an\\_Ultra-Reliable\\_Low\\_Latency\\_Communication\\_URLLC\\_Framework](https://www.researchgate.net/publication/346006621_Evaluation_of_Remote_Surgery_in_an_Ultra-Reliable_Low_Latency_Communication_URLLC_Framework)
- [31] D. T. Le, T. G. Nguyen und T. T. T. Tran, „The 1-Millisecond Challenge – Tactile Internet: From Concept to Standardization“, *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*, Bd. 8, Nr. 2, S. 56–93, Mai 2020. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online].
- [32] Intuitive Surgical, Inc. „da Vinci Xi® Surgical System Readiness Guide“. <http://mplusmedtech.com/16001/pdf/11687.pdf> (Zugriff am 15. Februar 2022).
- [33] Intuitive Surgical, Inc. „da Vinci Si® Surgical System User Manual“. <https://usermanual.wiki/Intuitive-Surgical/CHB01-2607924.pdf> (Zugriff am 15. Februar 2022).
- [34] SYSTEM STROBEL GmbH & Co. KG. „Rettungswagen auf Basis MB Sprinter mit Kofferaufbau“. [https://www.system-strobel.de/wp-content/uploads/2018/11/Strobel\\_RTW\\_MB\\_Sprinter\\_VS30\\_2018\\_4.pdf](https://www.system-strobel.de/wp-content/uploads/2018/11/Strobel_RTW_MB_Sprinter_VS30_2018_4.pdf) (Zugriff am 15. Februar 2022).



- [35] B. Challacombe, L. Kavoussi, A. Patriciu, D. Stoianovici und P. Dasgupta, „Technology Insight: telementoring and telesurgery in urology“, *Nature Clinical Practice Urology*, Bd. 3, Nr. 11, S. 611–617, November 2006. Zugriff am: 16. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/ncpuro0626>
- [36] F. Sieber, R. Kotulla, B. Urban, S. Groß und S. Prückner, „Entwicklung der Frequenz und des Spektrums von Rettungsdienstseinsätzen in Deutschland“, *Notfall + Rettungsmedizin*, Bd. 23, Nr. 7, S. 490–496, Oktober 2020. Zugriff am: 18. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s10049-020-00752-1>
- [37] M. J. H. Lum *et al.*, „Telesurgery via Unmanned Aerial Vehicle (UAV) with a field deployable surgical robot“, in *Medicine Meets Virtual Reality 15*. 125. Aufl. Seattle, WA, USA: University of Washington, 2007. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17377292/>
- [38] Intuitive Surgical, Inc. „Meilenstein Erreicht“. Robotic Surgical Systems | Da Vinci | Ion | Intuitive. <https://www.intuitive.com/de-de> (Zugriff am 15. Februar 2022).
- [39] J.-S. Paek, D. Kim, J.-Y. Han, Y. Choo und J. Lee, „Efficient RF-PA Two-Chip Supply Modulator Architecture for 4G LTE and 5G NR Dual-Connectivity RF Front-End“, in *2021 Symposium on VLSI Circuits*, Kyoto, Japan, 13.–19. Juni 2021. IEEE, 2021. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.23919/vlsicircuits52068.2021.9492518>
- [40] M. Agiwal, H. Kwon, S. Park und H. Jin, „A Survey on 4G-5G Dual Connectivity: Road to 5G Implementation“, *IEEE Access*, Bd. 9, S. 16193–16210, 2021. Zugriff am: 15. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3052462>
- [41] Bundesnetzagentur. „Mobilfunk-Monitoring Karte | Breitband-Monitor der Bundesnetzagentur“. Breitband-Monitor der Bundesnetzagentur. <https://www.breitband-monitor.de/mobilfunkmonitoring/karte> (Zugriff am 16. Februar 2022).
- [42] Manufacturer/Factory & Trading Company. „Mobile Surgery Unit 12m Mobile Surgery Vehicle“. Made-in-China.com. <https://weihai Guangtai.en.made-in-china.com/product/LZYfugOjhAr/China-Mobile-Surgery-Unit-12m-Mobile-Surgery-Vehicle.html> (Zugriff am 16. Februar 2022).
- [43] Intuitive Surgical, Inc. “OnSite™ for the da Vinci® Surgical System Overview Document Number: 813331-33 rev E Intuitive Surgical, Inc.”. [https://www.davincisurgerycommunity.com/intuitive/docs/813331-33\\_OnSite\\_OverView.pdf](https://www.davincisurgerycommunity.com/intuitive/docs/813331-33_OnSite_OverView.pdf) (Zugriff am 15. Februar 2022).
- [44] T. Alam, „5G-Enabled Tactile Internet for smart cities: vision, recent developments, and challenges“, *Jurnal Informatika*, Bd. 13, Nr. 2, S. 1, Juli 2019. Zugriff am: 17. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.26555/jifo.v13i2.a13426>
- [45] J. Cakuli, „Application Scenarios, Research Challenges and Standardization for Tactile Internet“, Masterarbeit, International Hellenic University, Thessaloniki, 2017. Zugriff am: 16. Februar 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://repository.ihu.edu.gr/xmlui/handle/11544/15243>
- [46] Koucheryavy, A., Paramonov, A. & Al-Naggar, I. (2013). Communication networks with low latency. *Elektrosvyaz*, 12, 15–19.