

Geschichte der Simulation / Simulation der Geschichte. Eine Einführung¹

Leif Scheuermann

Abstract: In recent years, simulation has become one of the central methods in natural and technical sciences. However, until today it has played a largely peripheral role in historical sciences, not the least due to the lack of awareness of the possibilities and limits of the technology. In a double approach, the following paper tries to remedy this. On the one hand a close look at the historical development of technology will be taken in order to derive a clear definition of simulation and on the other hand the value and the limits for its use in historical sciences and the existing approaches in ancient studies are discussed. After a general look at simulations of antiquity, the paper focuses on the use of simulation technology for researching transport and traffic in antiquity and concludes with the presentation of considerations for the implementation of a dynamic simulation of ancient transport times.

Einführung

Welche Bedeutung Simulationen in der Gegenwart zukommen, zeigt sich spätestens bei einem Blick auf die Lage der Welt zu Beginn dieses Jahres (2020). Über Kontinente hinweg kommt das kulturelle wie ökonomische Leben zum Erliegen, um den Prognosen zur ungehemmten pandemischen Ausbreitung des Coronavirus SARS-CoV-2 entgegenzutreten. Staaten investieren Milliarden und beschneiden selbst die Menschenrechte ihrer Bevölkerung, um der berechneten Überbeanspruchung der Gesundheitssysteme Herr zu werden. Das eigentlich Neue hierbei ist, dass Simulationsdaten zum Maß aller Dinge werden, da bei Eintritt des errechneten schlimmsten Falls (worst case) die Folgen gesellschaftlich als unvertretbar angesehen werden. Die Immanenz, die sich in den realen Zahlen an Erkrankten und Verstorbenen überall auf der Welt zeigt, lässt dabei (weitestgehend) Kritiker*innen der Simulationsmodelle verstummen, ganz im Gegensatz zur der aktuellen, mindestens genauso bedrohlichen, jedoch zeitlich weitaus längerfristigen Klimakrise, welche immer noch von zahlreichen (politischen) Akteur*innen angezweifelt wird. Gemein ist jedoch der akuten Pandemie wie auch der sich langfristig zeigenden, katastrophalen Erwärmung der Welt, dass sie vorab anhand von Rechenmodellen prognostizierbar erscheinen und dadurch den Folgen entgegengewirkt werden kann. Die Welt wird berechenbar und die zukünftige Realität zur Simulation.² Darin offenbart sich in der Gesamtgesellschaft ein Prozess, der in weiten Teilen der Naturwissenschaft und Technik bereits abgeschlossen ist. In den letzten Dekaden wurden

1 An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich für die Kooperation meiner Kollegen bedanken, die mir in einer Zeit, in der die meisten Bibliotheken geschlossen waren, mit Informationen und Literatur zu den im Beitrag genannten Projekten zur Seite gestanden sind. Dies sind: Dr. Hannes Lehar, Universität Innsbruck; Dr. Patrick Reinard, Universität Trier; Prof. Dr. Peter Scholz, Universität Stuttgart; Prof. Dr. Wolfgang Spickermann, Universität Graz sowie Dr. Pascal Warnking, Universität Trier. Ferner danke ich meinen langjährigen Korrekturleser*innen Anita Neudorfer und Dr. Walter Scheuermann.

2 Baudrillard spricht hier von einer Hyperrealität, die das Reale überlagert und ersetzt. Auf die sich daraus ergebende Gesellschaftskritik kann an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Siehe hierzu: Baudrillard (1981); Baudrillard u.a. (2011).

Simulationen zu zentralen Arbeitsweisen, sei es in der Astronomie, der Biologie, der Medizin, aber auch in der Kerntechnik oder der Fertigungstechnik, um nur ein paar Beispiele zu nennen. In den historischen Wissenschaften hingegen, erscheint die Nutzung von Simulationen noch weitestgehend ein Desiderat der Forschung. Nachdem in der letzten Ausgabe der ‚Digital Classics Online‘³ bereits eine methodologische Betrachtung der Simulation als Quelle für die Altertumswissenschaften erschienen ist, wird in diesem Beitrag ein historischer Zugang gewählt, um eine Bestimmung moderner wissenschaftlicher Simulationen zu erreichen. Anschließend daran werden der spezifische Nutzen, aber auch die Grenzen des Einsatzes der Simulationstechnologie für die historischen Wissenschaften thematisiert.

Nach diesen weitestgehend theoretischen Ausführungen zur Geschichte der Simulation und der Simulation von Geschichte erfolgt in einem zweiten, praktischen Teil des Beitrags eine Vorstellung von Projekten in den Altertumswissenschaften, in denen bereits Simulationstechnologie zum Einsatz kommt. Dabei gilt es allerdings zu konstatieren, dass es sich hier noch weitestgehend um einen blinden Fleck in der Forschung handelt. Eine Ausnahme machen hier die Bereiche der Historischen Geographie und Landschaftsarchäologie, welche in den Fokus der Betrachtungen gerückt werden. Ein besonderes Augenmerk wird dabei (auf Grund seines allgemeinen Bekanntheitsgrades) auf das ORBIS-Projekt der Stanford University zu legen sein, aber auch auf Ansätze der Universität Trier zur Simulation antiker Seerouten. Daran anschließend möchte dieser Beitrag zuletzt eine Zukunftsperspektive eröffnen, indem er einen Ansatz zur Simulation von Reise- und Transportzeiten über Straßen und Flüsse skizziert.

Eine kurze Geschichte der Simulation

Vorgeschichte

Das Wort *simulatio* besitzt vor der heute gebräuchlichen Nutzung bereits eine erhebliche Vorgeschichte. So findet es sich in Ciceros *De officiis* mit der Bedeutung Vortäuschung falscher Tatsachen⁴ oder rechtlich noch verbindlicher mit Aquilius als „arglistige Täuschung“⁵, die nicht zuletzt aus Vernunftgründen keinen Platz im Leben des Einzelnen haben dürfe.⁶ Für die List des Odysseus, sich als Wahnsinniger zu gebärden, um nicht in den Trojanischen Krieg ziehen zu müssen, wird ebenfalls das Wort *simulatio* genutzt. Diese Handlung wird zwar als für den Helden und dessen Familie nützlich, doch als moralisch zutiefst verwerflich und unvertretbar geschildert.⁷ Weniger drastisch nennt Cicero jedoch auch die geistreiche Rede, wie sie Sokrates geführt habe, synonym zu „Ironie“ *simulatio* im Sinne von „Verstellung“ zu Gunsten des Gesprächs.⁸ Dies sind nur einige wenige Beispiele, doch spiegeln sie den Gebrauch des

3 Scheuermann (2019b).

4 *Talis autem simulatio vanitati est coniunctior quam aut liberalitati aut honestati.* [Cic. off. I,44].

5 *Nondum enim C. Aquilius, collega et familiaris meus, protulerat de dolo malo formulas; in quibus ipsis, cum ex eo quaereretur, quid esset dolus malus, respondebat, cum esset aliud simulatum, aliud actum.* [Cic. off. II,60]. Siehe auch: Cic. off. III,74.

6 *Quod si Aquiliana definitio vera est, ex omni vita simulatio dissimulatioque tollenda est. ... Dolus autem malus in simulatione, ut ait Aquilius, continetur.* [Cic. off. II,61]. Siehe auch Cic. off. II,64 Cic. off. II,68.

7 *Utile videbatur Ulixi, ut quidem poetae tragici prodiderunt, nam apud Homerum, optimum auctorem, talis de Ulixee nulla suspicio est, sed insimulant eum tragoediae simulatione insaniae militiam subterfugere voluisse. Non honestum consilium, at utile, ut aliquis fortasse dixerit, regnare et Ithacae vivere otiose cum parentibus, cum uxore, cum filio.* [Cic. off. III,97].

8 *De Graecis autem dulcem et facetum festivique sermonis atque in omni oratione simulatorem, quem eirona Graeci nominarunt, Socratem accepimus, contra Pythagoram et Periclem summam auctoritatem consecutos sine ulla Maritate.* [Cic. off. I,108]. Siehe auch: Cic. off. II,43.

Wortes in der römischen Antike recht umfassend wider. Bis in die Neuzeit ist Simulation die Verstellung eines/einer Akteurs*in, um etwas zu erreichen, sei es moralisch verwerflich oder aber rhetorisch ange-raten.⁹ In ganz ähnlicher Weise wird der Begriff noch in der Psychiatrie des frühen 20. Jahrhunderts ge-nutzt. Als Simulanten bezeichnete man hier die zahlreichen sogenannten „Schüttelneurotiker“, welche mit posttraumatischen Belastungsstörungen in die Heilanstalten eingeliefert und dort mit Stromschlägen behandelt wurden, um ihre Wehrtauglichkeit wiederherzustellen.¹⁰

Unabhängig vom Begriff der Simulation entwickelten Erzieher, wie der Mathematiker und herzoglich Braunschweigische Pagenhofmeister Johann Ludewig Hellwig¹¹ seit Ende des 18. Jahrhunderts unter-haltsame Spiele für die theoretische Ausbildung von „jungen Krieger“¹² und die *Versinnlichung* der Kriegskunst.¹³ Diese können in ihrer Zielsetzung (der Ausbildung durch abstrahierte Nachahmung) wie auch der Umsetzung (in einem klar formulierten Regelwerk) zumindest als Vorstufen zu heutigen Si-mulationen verstanden werden. Bemerkenswert ist dabei, dass bereits Hellwig in seinem Vorwort die Problematik der Eingrenzung eines Szenarios, ebenso wie die Möglichkeit, ja Notwendigkeit der steti-gen Verfeinerung durch die Gruppe der Spielenden hervorhebt.¹⁴ Damit formuliert bereits Hellwig zwei grundlegende Charakteristika moderner Simulationen, nämlich die notwendige Definition und klare Ab-grenzung des Systems der Simulation sowie ihren Näherungscharakter.

Simulation im 20. und 21. Jahrhundert

Im Verlauf des zwanzigsten Jahrhunderts, änderte sich die alltagssprachliche Verwendung des Begriffs Simulation hin zu einem naturwissenschaftlich-technischen Fachbegriff, wie Christiane Spath eindrück-lich am Wandel der entsprechenden Lemmata in populärwissenschaftlichen Lexika darstellt. Stand im

9 Siehe hierzu beispielhaft: Bacon (1985); Zedler (1731–1754). Des Weiteren findet sich im romantischen Kontext Simu-lation bzw. simulieren z.B. bei Bettina von Arnim oder Theodor Fontane als Synonym für „tagträumen“ bzw. „lebhaft imaginieren“ Siehe hierzu: Spath (2009), S. 10.

10 Der Vater der Psychoanalyse, Sigmund Freud, schreibt in einem Bericht an die K&K Kommission zur Behebung militä-rischer Pflichtverletzung hierzu:

„Es schien zweckmäßig, den Neurotiker als Simulanten zu behandeln und sich über den psychologischen Unterschied zwischen bewußter und unbewußter Absicht hinauszusetzen, obwohl man wußte, daß er kein Simulant sei. Diente seine Krankheit der Absicht, sich einer unleidlichen Situation zu entziehen, so grub man ihr offenbar die Wurzeln ab, wenn man ihm das Kranksein noch unleidlicher als den Dienst machte. War er aus dem Krieg in die Krankheit geflüchtet so wendete man Mittel an, die ihn zwangen aus der Krankheit in die Gesundheit also in die Kriegsdiensttauglichkeit zurückzuführen. Zu diesem Zwecke bediente man sich schmerzhafter elektrischer Behandlung und zwar mit Erfolg.“ (Freud [1920]).

Zum Thema „Simulation beim Militär“ nimmt auch der Bericht des Generaloberarztes der königlich sächsischen Armee Ernst Georg Schill in der Deutschen medizinischen Wochenschrift 33/1907 dezidiert Stellung. Neben der „Krankheits-vortäuschung“ bzw. der „unwahren Behauptung über Schmerzen und zeitweise Funktionsstörungen“ werden hier auch Selbstverstümmelungen bzw. das Vortäuschen eines Unfalls, der zur Verstümmelung geführt habe, aufgeführt (Schill [1907]).

11 Hellwig (1803).

12 Hellwig (1803), IV.

13 Hellwig (1803), III.

14 Hellwig (1803), IX. Dies greift er nochmals in seinen abschließenden Bemerkungen auf, wenn er schreibt: „Es sind Regeln, nach welchen ich das Spiel spiele, und also für andere Liebhaber einer solchen Unterhaltung Vorschläge, die sie nach Willkür verändern, und wenn es möglich ist, woran ich gar nicht zweifle, noch verbessern und vermehren können. Die Mittheilung einer solchen Vervollkommnung dieses Spiels, das manche Theorien der Kriegskunst versinnlicht, würde mir angenehm sein. Bis jetzt hat man mir mehr die gefühlten Mängel desselben mitgeteilt, als Vorschläge wie solchen abgeholfen werden könnte.“ (Hellwig [1803], S. 181).

Brockhaus 1956 noch das Vortäuschen bzw. Vorspiegeln im Zentrum,¹⁵ so nennt die Auflage aus dem Jahr 1973 die Nachbildung naturwissenschaftlicher Prozesse und Systeme durch mathematische Modelle,¹⁶ wohingegen 2007 Simulation im Bereich der Informatik verortet wird.¹⁷

Diese Bedeutungsverschiebung im allgemeinen Sprachgebrauch bildet mit nur geringer zeitlicher Verzögerung die technologische und methodologische Entwicklung hin zu modernen Simulationssystemen ab,¹⁸ welche bereits 1945 durch die Entwicklung der sogenannten „Monte-Carlo“-Methode zur Simulation realweltlicher Phänomene unter Zuhilfenahme von Zufallszahlen im Kontext der Forschungen zur Atombombe im Los Alamos National Laboratory ihren Anfang nahm.¹⁹ Durch dieses Verfahren war die Einbeziehung von Wahrscheinlichkeiten in physikalische bzw. technische Berechnungen möglich geworden, was sich als bahnbrechend für die Berechnung natürlicher, also nicht vollständig determinierbarer Prozesse erwies.

Erste grundlegende wissenschaftliche Abhandlungen zur Theorie und Methode der modernen Simulationen wie *The Art of Simulation*²⁰ oder *Prospects for Simulation and Simulators of Dynamic Systems*²¹ erschienen in den folgenden zwei Dekaden, wobei die damals behandelten Fragen z.B. nach Modellierungsweisen und der Umsetzung bis heute zentral für jegliche Implementierung von Simulationssystemen sind.²² Dies zeigt sich beispielhaft in der Serie von den Memoranden, welche Philip Kiviat in den 1960er Jahren für die RAND Corporation²³ verfasste,²⁴ um den Stand der Forschung zu dem Thema für die Verantwortlichen der United States Air Force aufzubereiten.²⁵ Die Aufgabe von Simulationen definiert er im Band zum *Modeling Concepts*²⁶ als das Aufstellen und Erproben von numerischen, computerbasierten Modellen für die Vorhersage und Erklärung des Verhaltens von zeitabhängigen (dynamischen) Systemen. Voraussetzung hierfür sei eine hinreichende Vollständigkeit aller relevanten Aspekte, wobei dies, so der Autor, nur als Annäherung an und nie als erschöpfende Abbildung realweltlicher Systeme

15 Der Große Brockhaus in 12 Bänden, 1956, Bd. 10, S. 724 – nach Spath (2009), S. 11.

16 Brockhaus Enzyklopädie in 20 Bänden, 1973, Bd. 17, S. 444 – nach Spath (2009), S. 11.

17 Der Brockhaus: multimedial premium, 2007 – nach Spath (2009), S. 15. Eine parallele (wenn auch zehn Jahre frühere) Entwicklung kann Spath für den englischsprachigen Raum aufzeigen. Spath (2009), S. 18–22.

18 Einführend hierzu: Goldsman u.a. (2009); Nance / Sargent (2002).

19 Siehe hierzu: Metropolis (1987). Ermöglicht wurde diese Methode durch die Entwicklung des ENIAC (Electronic Numerical Integrator and Computer), des ersten elektronischen turingmächtigen Universalrechners. Für einen persönlichen Rückblick auf die Erfindung des ENIAC durch die Entwickler Arthur und Alice Burks siehe: Burks / Burks (1981); Burks / Burks (1988).

20 Tocher (1963).

21 Shapiro, George, Rogers, Milton (1967).

22 So kann es wenig verwundern dass der deutsche Wissenschaftsrat in seiner Stellungnahme zur Bedeutung von Simulationen in den modernen Wissenschaften von 2014 (Wissenschaftsrat [2014], S. 9) auf eine Definition aus dem Jahr 1975 (Shannon [1975]) zurückgreift.

23 Die RAND (Research AND Development) Corporation ist der zentrale Think-Tank der United States Air Force. Unter anderem entwickelte Paul Baran mit dem Memorandum RM-3767 vom August 1964 für diese Agentur die theoretischen Grundlagen das ARPA-Net, den Vorläufer des heutigen Internets. (Baran [1964]).

24 Von zentraler Bedeutung sind hierbei besonders zwei Bände: In „Modelling Concepts“ aus dem Jahr 1967 beschreibt er die Schritte, die nötig sind, um einen als System definierten Ausschnitt der Welt in einem Modell zu formalisieren (Kiviat [1967b]). Der Band „Programming Languages“ von 1969 umfasst eine Evaluation spezifischer für die Erstellung von Simulationen entwickelter Programmiersprachen (GPSS, SIMSCRIPT, SIMULA, CSL) (Kiviat [1969]), welche im Folgenden im Zentrum der Betrachtungen stehen werden.

25 “The Memoranda are being written so that they build upon another and provide an integrated coverage of all aspects of simulation. They should be of particular interest to personnel of the AFLC Logistics Simulator Center, Wright-Patterson Air Force Base, and to Air Force system designers and analysts. Persons concerned with computer applications and computer programming in general should also find the series useful.” (Kiviat [1967b], iii).

26 Kiviat (1967b), S. 2–4.

geschehen kann.²⁷ Des Weiteren, so Kiviat, ist Simulation im Gegensatz zu analytischen Lösungsfindungen eine „experimental, numerical technique“²⁸ zur Analyse von Systemen, bei denen „klassische Experimente“ (unter kontrollierten Verhältnissen) auf Grund der Größe und Komplexität oder auch wegen der Auswirkungen auf die Umwelt nicht möglich sind und statistische Aussagen keine analytische Lösung zulassen.²⁹ Dabei generiere die Abänderung (*manipulation*) einzelner Variablen und deren Auswirkung für das Gesamtsystem adaptiv Einsichten in die Funktionsweisen. Als größtes Problem computerbasierter Simulationen nennt Kiviat die Leichtigkeit, mit der Programme erstellt werden können, die nur vorgeben, das Verhalten eines Systems zu repräsentieren, was er auf die eingängige Floskel zuspitzt: “It is one thing for a model to resemble a system, another to act like it.”³⁰ Um eine Entsprechung mit einem System jedoch zu garantieren, bedürfe es klarer Strukturen, der Definition des Umfangs des Systems (*purpose, scope, system boundaries*) sowie des Detailgrades (*accuracy, precision*) der Simulation und nicht zuletzt der Verifikation und Validierung durch externe Daten.

In einem zweiten Memorandum mit dem Titel “Digital Computer Simulation – Programming Languages” ergänzt Kiviat 1969 seine theoretischen Ausführungen, durch die Betrachtung der statischen und dynamischen Anteile einer Simulation. Während die statischen Strukturen den Status und die Logik des Systems zeitunabhängig abbilden, werden in den dynamischen Systemprozessen die Interaktionen zwischen den einzelnen Akteur*innen im System repräsentiert.³¹ Während sich die Struktur durch Klassen, Objekte, deren Attribute und Beziehungen definieren lasse, müsse das dynamische Verhalten in Prozeduren oder Routinen³² ihren Ausdruck finden, welche wiederum aus Ereignissen (*events*), interaktiven Aktivitäten (*activities*) oder Prozessen (*transaction/flow*) bestünden.³³ Für eine vollständige Simulation, so der Autor, seien jedoch beide Anteile nötig, womit er die Möglichkeit einer statischen Simulation, in welcher „nur“ Zustände betrachtet werden, ausschließt.

Kiviats Memoranden zeigen, wie weit der Stand der methodischen Durchdringung und Ausdifferenzierung in einer Zeit war, deren technische Möglichkeiten heute geradezu vorsintflutlich anmuten. Die weitere Evolution der Simulationstechnik erfolgte im Kontext der revolutionären Entwicklung in der Computertechnologie, welche hochkomplexe Simulationsberechnungen mit großen Datenkorpora erst ermöglicht hat. Maßgebliche Änderungen ergaben sich dabei aus den allgemein bekannten generellen Fortschritten der EDV, also der immensen Vergrößerung der Rechenleistung und Speicherkapazität von Daten, der Entwicklung neuer Mensch-Maschine-(bzw. Maschine-Maschine-)Schnittstellen³⁴ und der Ausdifferenzierung der Programmierparadigmen und -sprachen, um nur die wichtigsten zu nennen.³⁵

27 “While some writers would define studies of systems that are completely described by solvable mathematical equations as simulation studies, this is not what we are describing. ... To us, simulation is the use of a numerical model to study the behavior of a system as it operates over time. In particular, we are interested in models that are implemented on digital computers – models that operate by advancing a system through time discrete steps rather than continuously, as done on analog computers.” (Kiviat [1967b], S. 4).

28 Kiviat (1967b), S. 4.

29 Kiviat (1967b), S. 6.

30 Kiviat (1967b), S. 8.

31 Kiviat (1969), S. 10.

32 Kiviat erläutert in einer Fußnote hierzu, dass er die Begriffe synonym nutzt. (Kiviat [1969], S. 16).

33 Die Ausrichtung auf eine dieser drei Elemente nutzt Kiviat auch zur Charakterisierung einzelner Simulationsprogrammiersprachen (Kiviat [1969], S. 14–26).

34 Darunter fallen die Entwicklung neuer Ausgabegeräte (und die damit verbundene graphische Aufbereitung der Daten), neuer Eingabegeräte, aber auch Computernetzwerke und hierbei besonders das World Wide Web.

35 Die generellen Entwicklungen können in diesem Beitrag jedoch nicht in extenso Betrachtung finden, da sie jeglichen Rahmen sprengen würden. Für eine prägnante Zusammenfassung mit weiterer Literatur siehe Sargent (2017), S. 7.

Während in den 1950er und 1960er Jahren die Entwicklung von eigenen Simulationsprogrammiersprachen im Vordergrund stand,³⁶ wurden – besonders durch das Aufkommen von (zuerst zwei- dann drei und vierdimensionalen) Graphiksystemen und Programmen zur Auswertung von Ergebnissen – die spezifischen Anwendungen immer zentraler. Hinzu kamen die Differenzierung und Spezialisierung der Simulationen in einzelnen Fachdisziplinen³⁷ und nicht zuletzt die Vereinfachung der Handhabung der Software sowie die Reduktion der individuellen Kosten für Infrastruktur, welche die globale Verbreitung von Simulationen erst ermöglichten. Dies führte spätestens seit der New Economy der 1990er Jahre zu einer Kommerzialisierung, die sich dadurch auszeichnete, dass zahlreiche Startup-Unternehmen ihre Chance sahen, Simulationssysteme als Individuallösungen für ganz spezifische Fragestellungen zur Verfügung zu stellen.³⁸ In diesem Kontext muss auch auf die technologischen Fortschritte im Bereich massiv parallele Systeme (Supercomputer) und Multiprozessorsysteme sowie – im größeren Rahmen – auf die Programmieretechniken der Modularisierung und Parallelisierung von einzelnen Simulationssequenzen in Kombination mit Möglichkeiten des vernetzten Rechnens verwiesen werden. In den 1980er Jahren entwickelt, wurden diese seit Beginn der 2000er Jahre (im Kontext des Web 2.0-Paradigma) mit Einführung des Grid-³⁹ und Cloud-Computing auf eine neue Ebene gehoben. Ziel dieser Entwicklung ist es letztlich, ein adaptives interaktives Framework zu schaffen, in dem für die unterschiedlichsten Fragestellungen ohne größeren Programmieraufwand virtuelle, maßgeschneiderte Simulationsumgebungen aufgebaut werden können.

Begriffsbestimmung von Simulation

Was ergibt sich nun aus der skizzierten Entwicklung der Simulation für eine grundlegende Bestimmung des Begriffs? Zum einen konnte gezeigt werden, dass es sich bei Simulation nicht oder nicht mehr um eine einheitliche Technologie, sondern um eine Methode oder noch weiter gefasst eine Herangehensweise handelt, welche sich in den weiten Bereichen der Natur- und Technikwissenschaften etabliert hat und hier zur maßgeblichen Argumentationsform geworden ist. Zum anderen kann aus dem Vorgestellten folgende, für die weiteren Betrachtungen maßgebliche, Definition,⁴⁰ abgeleitet werden:

Eine Simulation ist ein im naturwissenschaftlichen Paradigma verfasstes virtuelles, reproduzierbares Experiment zur Nachbildung eines Prozesses oder Zustands. Zielsetzung ist die Modellierung und Erprobung komplexer Systeme für die Gewinnung eines besseren Verständnisses von Abläufen und Wertigkeiten einzelner Faktoren sowie möglichst realitätsnaher Vorhersagen bzw. starker Eingrenzungen der naturwissenschaftlich möglichen Zukünfte (Möglichkeitsraum).

36 Für den Bereich der Simulation wurden in den 1950er und 1960er Jahren eigene Programmiersprachen wie CSL, SIMSCRIPT, SIMULA oder GGPS entwickelt, wobei die meisten dieser „höheren Sprachen“ auf Fortran oder ALGOL aufgebaut waren. Die spezifischen Simulationssprachen gerieten im Lauf der Zeit jedoch zu Gunsten der generelleren Sprachen in den Hintergrund oder entwickelten sich z.T. hin zu generellen Simulations-Werkzeugen mit graphischer Oberfläche. Für eine detaillierte Einführung in Simulationsprogrammiersprachen und die Beschreibung ihrer frühen Vertreter*innen siehe: Kiviat (1967a); Kiviat (1969). Für eine historische Betrachtung der Entwicklungen der Simulationsprogrammiersprachen siehe: Nance / Overstreet (2017), S. 244–246; Sargent (2017), S. 8.

37 Vorreiter waren hier die Physik und spezifisch die Meteorologie und die Kernphysik / Kerntechnik. Später folgten weitere technische Wissenschaften, wie Maschinenbau und Verfahrenstechnik sowie die Medizin und Biologie. Ferner hielt die Simulation Einzug in die Wirtschaftswissenschaften.

38 Dies zeigen Nance und Overstreet eindrucklich an der thematischen Verteilung von Beiträgen der *Winter Simulation Conference* zwischen 1967 und 2016 (Nance / Overstreet [2017], S. 247–250).

39 Einführend zum Begriff „Grid-Computing“ siehe: Stockinger (2007).

40 Siehe hierzu auch: Shannon (1975), S. 9; Spath (2009).

Unter Experiment wird dabei der Beleg einer klar definierten Hypothese im Rahmen einer wohldefinierten Versuchsanordnung (d.h. unter möglichst starker Isolation externer Faktoren mit einer vollständigen Dokumentation) verstanden. Ziel ist die Bestimmung des Einflusses einzelner Faktoren auf das Gesamtsystem durch deren Änderung sowie (daraus abgeleitet) die Vorhersage zukünftiger Experimente. Zentral dabei ist das naturwissenschaftliche Paradigma der Reproduzierbarkeit – d.h., dass bei annähernd gleichen Voraussetzungen stets dieselben Resultate produziert werden – und die heuristische Annahme eines geschlossenen Systems, welches hinreichend vollständig durch endlich viele Komponenten zeitlich und räumlich diskret bestimmt werden kann.

Zu Beginn bedarf es also immer einer klar definierten Fragestellung, auf deren Grundlage die Modellierung, als Abstraktion eines Ausschnitts von Realität in einem wohl definierten System, steht. Dieses kann entweder in einem realweltlichen Experimentalaufbau oder aber in virtueller Form, algorithmisch ausformuliert und numerisch implementiert, als Simulationssystem umgesetzt werden. Auf dieser Grundlage erfolgt das eigentliche Experiment, welches im Anschluss der realweltlichen Validierung z.B. durch andere Experimente bedarf. Hierbei kommt es zur adaptiven Annäherung des Modells an die Realität, so dass nach einer Phase der Validierung unter dem Axiom der Reproduzierbarkeit ein System der annähernden Vorhersage entsteht, welche mit jedem weiteren Experiment verbessert wird.⁴¹ Im Gegensatz zum realweltlichen Experiment hat die Simulation hierbei den großen Vorteil, dass auf Grund der starken Rechenleistungen moderner Systeme die Anzahl und Komplexität der Versuche fast beliebig gesteigert werden kann. Hier kommt die besondere (virtuelle) Qualität des Simulationsexperiments zum Tragen, wenn eine realweltliche technische Umsetzung zu teuer oder gefährlich ist (wie im Fall der Kerntechnik oder im Flugzeugbau), sich Phänomene nicht direkt beobachten lassen, da der Untersuchungsgegenstand zu groß, zu klein, zu schnell oder zu langsam ist (z.B. in der Molekularbiologie oder der Astrophysik) oder untersuchte Strukturen zu komplex oder noch nicht verstanden sind.

Simulation von Geschichte?

Auch muss hinzugefügt werden, dass bereits vergangene, naturwissenschaftlich fassbare Zustände und Prozesse ebenfalls prädestiniert dafür sind, in Simulationen abgebildet zu werden. Beispielhaft hierfür sind die Arbeiten in der Physik zu nennen, deren Ziel es ist, die Entstehung des Universums bis zum Urknall hin in Modellen zu fassen, welche dann in Simulationen validiert werden.

Diese Vorgehensweise erscheint, da sie auf physikalischen Prozessen und Berechnungen beruht, die auf den ersten Blick objektiv sind, was im unkritischen Gebrauch derselben letztlich zu dem absoluten und diktatorischen Anspruch führt, die Wahrheit der Geschichte zu besitzen.⁴² Die Autorität der Algorithmen

41 Für eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs einer Simulation siehe: Scheuermann (2019b).

42 Diese vermeintliche Autorität der Methode entspricht den zentralen Verlockungen der Nutzung der elektronischen Datenverarbeitung für die Historiographie. Michel de Certeau schreibt dazu in seinem weit über seine Zeit hinausreichenden letzten Werk mit dem Titel „Histoire et psychanalyse entre science et fiction“ bereits in den 1980er Jahren: „Für den Historiker ist das die Entdeckung der Schatzinsel: Endlich wird es ihm möglich sein, sich aus den kompromittierenden Beziehungen zu Rhetorik zu befreien und damit zum metonymischen oder metaphorischen Gebrauch der stets für das Ganze einstehenden Details und zu all den Kniffen der Redekunst. Und er wird sie auch aus der Abhängigkeit vom kulturellen Umfeld lösen, dessen Vorurteile im Vorhinein Postulate, Untersuchungseinheiten und Interpretationen erzeugen. Dank der Informatik kommt der Historiker nun in die Lage, die Zahlen zu meistern, Regelmäßigkeiten herzustellen und die Perioden nach Korrelationskurven zu bestimmen – drei neuralgische Punkte in seiner Forschungsstrategie. Ein statistischer Rausch hat also die Geschichtsforschung ergriffen. Und so füllen sich Bücher mit Zahlen, die Garanten der Objektivität bilden.“ (Certeau u.a. [2019], S. 73). Wie Certeau weiter zeigt, ist diese Art der quantitativen digitalen Geschichtswissenschaft letztlich auf die Beherrschung der Geschichte ausgerichtet. Dies wird nicht zuletzt durch die Entwicklung „künst-

men und die hyperreale Visualisierung führen zur Aufhebung der Bruchs zwischen dem Diskurs und dem Realen.⁴³ So wird der Jahrhunderte alte Traum befeuert, absolut und für alle Zeit zu wissen, wie es gewesen ist.⁴⁴ Darüber hinaus verspricht Simulation (so man diesen Machtphantasien nicht Einhalt gebietet) sogar die Herrschaft über das „was wäre, wenn“ in der Geschichte, da dies ja nun „experimental“ nachweisbar sei. Dies entspricht natürlich in keinem Fall dem Anspruch einer aufgeklärten digitalen Geschichte, weshalb die Grenzen der Nutzung einer Technologie klar abgesteckt werden müssen.

1. Zum einen muss festgehalten werden, dass die bereits von Wilhelm Dilthey⁴⁵ formulierte Trennung zwischen Natur- und Geisteswissenschaften auch für die Nutzung von Simulationen gilt. Simulationen sind, wie bereits dargestellt, klar im Bereich der Naturwissenschaften zu verorten, so dass menschliches Erleben und das daraus resultierende Handeln nicht simuliert werden kann. Einzig die natürlichen (physikalischen, biologischen etc.) historischen Lebensumstände sind durch Simulationstechnologie erfassbar, das menschliche Verhalten (von Gruppen oder Individuen) dazu jedoch nicht.
2. Als naturwissenschaftliche Methode sind Simulationen nicht individuell verifizierend, sondern falsifizierend.⁴⁶ Das heißt, dass – im Gegensatz zu belegenden Schriftquellen oder Messdaten – keine eindeutigen Aussagen zu Verhältnissen getroffen, sondern (lediglich) Möglichkeitsräume abgegrenzt und Wahrscheinlichkeiten berechnet werden können. Diese können (wie z.B. bei heutigen Wettervorhersagen) sehr stark eingegrenzt sein, so dass die Eintrittswahrscheinlichkeit einer möglichst exakten Prognose gegen 100% tendiert. Dennoch bleiben die Ergebnisse immer abgrenzend, d.h. es können nur Ereignisse und Zustände ausgeschlossen werden. Wie es sein wird (oder gewesen ist) kann hingegen nicht ermittelt werden und die Möglichkeit des Anderen ist (in Grenzen) stets gegeben.
3. Wie bereits im historischen Abriss und der Begriffsbestimmung betont wurde, spielt die Zeitlichkeit in Simulationen eine zentrale Rolle, wobei die Gerichtetheit dieser (von einem Zeitpunkt in die Zukunft oder in die Vergangenheit) auf Grund der physikalischen Gesetzmäßigkeit der modellierten Prozesse keinen Einfluss haben darf. Dennoch ist die überwiegende Mehrheit der heute bestehenden Simulationen prognostisch, also in die Zukunft gerichtet. Für historische Simulationen bedeutet dies, dass sie von einem Zeitpunkt in der Geschichte ausgehend, letztlich in unserer Gegenwart und darüber hinaus in die Zukunft reichen. Die entstehenden Möglichkeitsräume können also als historisch-prognostisch bezeichnet werden. Die dabei entstehenden Probleme liegen zum einen in der Bestimmung des Anfangspunktes, bzw. der historischen Ausgangsdaten, welche aus den klassischen historischen Quellen (und hier besonders archäologischen Quellen) konstruiert werden müssen, zum anderen aber auch darin, dass die Möglichkeitsräume alle historische Zustände und Vorgänge, welche durch die bestehenden Quellen individuell verifizierend dokumentiert sind, umfassen müssen. Dies hat positiv zur Folge, dass neben der experimentellen Simulation auch eine quellenbasierte Validierungsmöglichkeit besteht, wobei das Faktum, dass etwas auf eine

licher Intelligenz“, welche – so die Hoffnung mancher „digitaler Geisteswissenschaftler“ – die analytische Aufgabe des/der Historikers*in zu einem objektiven Ende führt, weiter befeuert.

43 „Der Einsatz des Computers in diesem Bereich lässt sich nicht von all den Glaubenseffekten trennen, die Historiker*innen erzielen können, und auch nicht von dem bei ihnen vorausgesetzten Glauben“ (Certeau u.a. [2019], S. 81).

44 Über diese Problematik in der Anwendung digitaler Techniken in der modernen Geschichtsforschung siehe u.a.: Scheuermann (2014), (2016).

45 „Die Menschheit wäre, aufgefasst in Wahrnehmung und Erkennen, für uns eine physische Tatsache, und sie wäre als solche nur den Naturwissenschaften zugänglich. Als Gegenstand der Geisteswissenschaften entsteht sie aber nur, sofern menschliche Zustände erlebt werden, sofern sie in Lebensäußerungen zum Ausdruck gelangen und sofern diese Ausdrücke verstanden werden.“ (Dilthey [2006], S. 376).

46 Popper (2013).

Weise historisch stattgefunden hat, den historisch-prognostischen Möglichkeitsraum eingrenzt, da eine zwingende Notwendigkeit des Geschehenen nur rekonstruktiv, also aus dem Blickwinkel des/der heutigen Betrachtenden besteht.

Für das Verhältnis von historischen Quellen und Simulationsresultaten ergeben sich aus diesen Ansätzen folgende Möglichkeiten:⁴⁷

1. Die historischen Quellen liegen im Möglichkeitsraum der Simulation. Daraus resultiert, dass die Simulation historisch valide ist. Dies heißt jedoch nicht, dass sie im ontologischen Sinne wahr wäre, sondern nur, dass das Modell nicht widerlegt werden kann. Darin unterscheidet sich dieses Modell jedoch nicht von allen anderen historischen Modellen, welche z.B. bei einem Neufund revidiert werden müssen.
2. Die Quellen stimmen nicht mit den Simulationsergebnissen überein.
 - a. Dies kann zum einen daher rühren, dass die Simulation fehlerhaft oder noch nicht präzise genug ist. Dies mag an falschen Grundannahmen bzw. Ausgangsdaten liegen oder aber am unzureichenden Modell. Eine Hinterfragung und Schärfung beider Faktoren ist ein maßgeblicher Teil des historischen Erkenntnisprozesses, welcher durch Simulation erfolgen kann. Hierzu gehört auch, dass möglicherweise die historischen Quellen nicht auf die Ergebnisse der Simulation bezogen werden können.
 - b. Die historische Quelle – und hier besonders die beschreibenden Quellen – dokumentieren nicht oder unzutreffend die naturwissenschaftlich begründeten Verhältnisse. So kann z.B. ein antiker Autor behaupten, er habe einen Weg in weitaus kürzerer Zeit zurückgelegt, als dies mit vormodernen Verkehrsmitteln möglich gewesen ist. Die Simulation kann des Weiteren zeigen, dass die minimale Reisedauer über der angegebenen liegt. Dies bedeutet jedoch nicht, dass die Quelle falsch liegt, sondern vielmehr, dass der/die Autor*in etwas anderes aussagt. Die Aufgabe des/der Historikers*in ist es nun diese Diskrepanz zu thematisieren und Erklärungen hierfür zu finden.

Zusammenfassend zeigt sich also, dass Simulation als naturwissenschaftliches Verfahren durchaus einen Mehrwert für die historischen Wissenschaften besitzt. Wichtig dabei ist es allerdings, die spezifischen Grenzen im Blick zu haben und gerade nicht zu erwarten, dass die computerbasierte Simulation die Aufgaben des/der Historikers*in übernimmt. Sie ist eine Quelle, welche historisch kritisch zu interpretieren ist und ergänzt damit den klassisch-altertumswissenschaftlichen Kanon.

Simulationen in den Altertumswissenschaften – Stand der Forschung

Nach dieser generellen Erörterung von Simulation und deren möglichem Wert für die historischen Wissenschaften, wird im Folgenden ein genereller Blick auf bestehende Anwendungen von Simulationen in den Altertumswissenschaften geworfen werden, bevor dann speziell auf die Nutzung der Simulationstechnologie zur Berechnung möglicher Reisezeiten und -kosten eingegangen wird. Betrachtet man den Stand der Forschung, so zeigt sich, dass die in den Natur- und Technikwissenschaften eingeführte

47 Für eine ausführliche Betrachtung von Simulation als Methode in den historischen Wissenschaften siehe: Scheuermann (2019b).

Methode bis dato noch kaum Eingang in die historischen Wissenschaften gefunden hat. Dies geht einher mit einem unkritischen Umgang mit dem Terminus, was dazu führt, dass historische Computerspiele,⁴⁸ welche sich aus den Taktikspielen des 18. und 19. Jahrhunderts entwickelt haben,⁴⁹ ebenso als Simulation bezeichnet werden, wie 3D-Rekonstruktionen, oder die sogenannte *virtual reality*, die ein authentisches Antikenerlebnis⁵⁰ verspricht und somit einem ungehemmten Romantizismus Tür und Tor öffnet.⁵¹

Eine Sonderrolle in den ‚simulationsähnlichen‘ Technologien kommt den sogenannten ‚agentenbasierten Simulationen‘ zu.⁵² In diesen werden größere Prozesse als Summe vieler ‚Entscheidungen‘ unabhängiger Akteure (Agenten) modelliert, um eine Brücke zwischen der Mikro- und Makro-Ebene zu schlagen.⁵³ Eine große Anzahl dieser mit einem eigenständigen Satz an Regeln⁵⁴ ausgestatteten Agenten werden in virtuellen Experimenten in einem klar abgegrenzten Raum für eine gewisse Zeit miteinander ‚konfrontiert‘. Die häufige Wiederholung dieser Experimente führt dann letztlich zu einem statistisch relevanten Ergebnis,⁵⁵ wobei die Verfeinerung der Regeln für die Akteure ebenso analytisch Betrachtung findet, wie das Ergebnis der Berechnungen.

Insofern ist eine Nähe zu Simulationen, wie sie hier definiert wurden, nicht von der Hand zu weisen. Als problematisch erweist sich jedoch, dass die Behauptung, es handle sich dabei um Simulationen im strengen Sinne, impliziert, dass das menschliche Verhalten zumindest auf Gruppen- bzw. gesellschaftlicher Ebene nicht auf den individuellen, (zumindest zu einem gewissen Maß) freien Entscheidungen der Einzelnen beruhe, sondern naturwissenschaftlichen Gesetzen folge,⁵⁶ welche zudem in einem stark begrenzten Regelwerk modellierbar seien. Zwar wird diese Annahme durch die Integration der Monte-Carlo-Methode⁵⁷ relativiert, die hermeneutische Dimension des menschlichen Erlebens⁵⁸ wird jedoch vollständig negiert, so dass die erzielten Ergebnisse auf Grund der unterkomplexen Modellierung allenfalls heuristischen, wenn nicht gar nur spekulativen Wert besitzen.

Neben dem weiten Feld an simulationsähnlichen Ansätzen finden sich einige wenige Projekte, die Simulationstechnologie aus den Naturwissenschaften einsetzen, wobei sie die Adaption der Technologie meist nur peripher thematisieren. So nutzt Monika Wirth in ihrer Dissertation zur Rekonstruktion bronzezeitlicher Gusstechniken zwar neben realweltlichen Experimenten und den nachfolgenden werk-

48 Siehe hierzu: Rollinger (2020); Vorwinckel (2009).

49 S.o.

50 Über die Unmöglichkeit ein solches Versprechen einlösen zu können siehe: Scheuermann (2014), (2019a).

51 Doch kann bei all diesen Anwendungen allenfalls von simulationsähnlichen Technologien gesprochen werden, da die aufgezeigten wissenschaftlichen Anforderungen nicht erfüllt werden. An dieser Stelle kann leider nicht weiter auf den wissenschaftlichen und didaktischen Wert solcher simulationsähnlichen Technologien en détail eingegangen werden.

52 Zum Einsatz agentenbasierter Simulationen in der Archäologie siehe u.a.: Wurzer u.a. (2015). Als Beispiel für den Einsatz in den Geschichtswissenschaften siehe: Ewert u.a. (2007).

53 Ein solcher Ansatz wird im allgemeinen Sprachgebrauch mit dem Begriff der Schwarmintelligenz in Beziehung gebracht. Siehe hierzu u.a. Bogon (2013).

54 Hier wird das zeitabhängige Verhalten der Agenten, das Verhalten zur Umwelt und besonders die ‚Interaktion‘ mit anderen Akteuren definiert, was auch Lernszenarien, also die adaptive Änderung der Regeln beinhaltet.

55 Neben anderen Modellen kam dieser Ansatz für die Modellierung der Corona-Pandemie zum Einsatz. Siehe hierzu u.a. Popper / Bicher (2020); Vermeulen u.a. (2020). Ein anderer Ansatz bildet das SEIR-Modell. Siehe hierzu u.a. Der Heiden / Buchholz (2020).

56 “This model is built on the grounds of the behavioral concept of rational choice, this implying the standard assumptions made in economic theory about the decision making of producers and consumers.” (Ewert u.a. [2007], S. 130).

57 S.o.

58 Dilthey (2006). Siehe auch: Scheuermann (2016).

stofftechnischen Untersuchungen der Gussstücke auch numerische Simulationsmodelle, doch werden (zumindest in der publizierten Form der Arbeit) keine näheren Angaben zu den Simulationen gemacht.⁵⁹

Ähnlich (wenn auch weniger ausgeprägt) verhält es sich mit den langjährigen akribischen Studien zu römischen Hypokaustenheizungen von Hannes Lehar.⁶⁰ Auch hier steht das realweltliche Experiment im Fokus der Betrachtungen. Die gleichzeitig in Kooperation mit der staatlichen Versuchsanstalt für Maschinenwesen am Technologischen Gewerbemuseum Wien (TGM) entstandene Simulation zur Rauchgasströmung unter Nutzung von Open-source CFD-Simulationssystemen (Computational Fluid Dynamics), findet hingegen in den Publikationen kaum ihren Niederschlag.⁶¹ Eine mögliche Begründung für dieses Phänomen liegt darin, dass die Expertise der Autor*innen (der Publikationen zu den Forschungen) im Bereich der Experimentalarchäologie liegt, wohingegen die computerbasierten Simulationen von externen Partner*innen durchgeführt werden, die ihrerseits wenig zu den fachspezifischen Fragestellungen beizutragen haben. Hinzu kommt, dass der Begriff der Simulation gerade in der Experimentalarchäologie sehr weit gefasst und nicht auf numerische Simulationen beschränkt ist,⁶² was in Kombination dazu führt, dass die Berechnungsgrundlagen und Verfahren der Simulation im Gegensatz zu den Ergebnissen der Experimente nicht im Zentrum stehen.⁶³

Auch im Bereich der Geschichtswissenschaften finden sich vereinzelt Projekte, die bestehende naturwissenschaftliche Simulationstechnologie nutzen, um spezifische historische Fragestellungen zu betrachten. So widmet sich der interdisziplinäre Forscherverbund „Reden ohne Mikrophon“⁶⁴ der Simulation und Analyse oratorischer Räume und Praktiken von der Antike bis in die Neuzeit. Ziel ist die Analyse der Beziehung von Raum und Sprechstimme und, daraus resultierend, der Anforderungen an die Redner*innen, der oratorischen Praktiken sowie der gesellschaftlichen Funktionen der Reden in öffentlichen (politischen, religiösen und jurisdiktionellen) Räumen.⁶⁵ Hierfür wurden (im althistorischen Kontext) verschiedene Rekonstruktionen der unterschiedlichen Ausbaustufen des Bouleuterions in Athen sowie der Curia in Rom in 3D-Modellen umgesetzt und in das für Akustik-Simulationen mittelgroßer und großer Räume ausgelegte Programm „Odeon“ integriert.⁶⁶ Die Software berechnet die Ausbreitung und Reflektion von Schall generell und ausgehend von unterschiedlichen Quellen im Raum, wobei verschie-

59 Wirth (2003).

60 Zentral hierfür: Lehar (2012), (2014), (2017), (2020).

61 Nur in Anhang 8 der über 800-seitigen Dissertation Lehars mit dem Titel: „Die römische Hypokaustenheizung: Berechnungen und Überlegungen zu Leistung, Aufbau und Funktion“ (Lehar [2012]) findet sich ein zusammenfassender sechsseitiger Bericht des TGM. Ferner sind die Berechnungsergebnisse im Katalogteil in Tabellenform und ohne bildliche Visualisierung abgedruckt.

Es bleibt zu hoffen, dass die angekündigten Studien von Ursina Jecklin-Tischhauser zu mittelalterlichen Heizsystemen (Jecklin-Tischhauser [2020 {in Vorb.}]) und des DAI-Rom zu Klimatisierung von Wohn- und Repräsentationsarchitektur in Rom und Latium, in welchen ebenfalls Simulationssysteme zum Einsatz kamen, ein verstärktes Augenmerk auf die numerische Umsetzung legen.

62 Hier verschwimmen die Begriffe Rekonstruktion, Reenactment und Simulation zusehends (siehe z.B. Lessig-Weller [2010] oder Vorwinckel [2009]), was eben dazu führt, dass selbst bei Einsatz computer-basierter Simulationen in der Experimentalarchäologie die simulationstechnologischen Spezifika nicht oder nur sehr am Rande thematisiert werden.

63 Dies liegt gewiss auch daran, dass die Fachwissenschaftler*innen für die Umsetzung computerbasierter Simulationen die Expertise externer Partner heranziehen müssen, da die Kompetenzen im Fach noch nicht in dem Maße vorhanden sind. Es bleibt zu hoffen, dass sich dies zukünftig ändern wird.

64 „Reden ohne Mikrophon“ ist eine seit 2012 bestehende Kooperation von Historiker*innen, Architekturhistoriker*innen, Rhetoriker*innen, Visualisierungsforscher*innen und Akustiker*innen der Universitäten Stuttgart und Tübingen. Weiteres hierzu findet sich unter der URL: <https://www.hi.uni-stuttgart.de/ag/forschung/rom/> (zuletzt abgerufen am 06-05-2020).

65 Fron u.a. (2020), S. 274–275.

66 Zur genutzten Software siehe: URL: <https://odeon.dk/> (zuletzt abgerufen am 06-05-2020). Diese Software ist spezialisiert auf Konzerträume, Theater, aber auch Sakralgebäude oder Bahnhöfe.

dene Oberflächen ebenso variiert werden können, wie Hintergrundgeräusche durch eine angenommene Zuhörerschaft. Ferner können Sprechweisen (mit unterschiedlicher Lautstärke, Geschwindigkeit etc.) variiert werden, woraus sich ein realitätsnahes Bild des antiken rednerischen Geschehens ergibt.

Die Fragestellungen des interdisziplinären Forscherteams betreffen die akustische Qualität der verschiedenen Rekonstruktionen der Gebäude, aber auch die Ausdehnung des Schalls auf die vorgelagerten Freiflächen, die idealen Positionen der Redner*innen und Zuhörerschaft und die Auswirkungen der unterschiedlichen Sprechweisen auf ein mögliches Verstehen.⁶⁷ Aus den erstellten Simulationen ergeben sich neue Einsichten in die Akustik antiker Räume, doch muss klar sein, dass nur sehr begrenzt Aussagen über das tatsächliche rednerische Geschehen oder gar die individuelle akustische Wahrnehmung der Akteur*innen getroffen werden können. Denn zum einen muss das bestmögliche Ergebnis nicht zwangsläufig der historischen Realität entsprechen und zum anderen ist das Hören, wie alle Wahrnehmungsarten, zumindest zu einem gewissen Grad erlernt (d.h. kulturell abhängig). Aussagen hierüber erschließen sich daher nur aus den beschreibenden Zeugnissen der Akteur*innen, doch kann das geschilderte Simulationssystem Möglichkeitsräume⁶⁸ akustischer Wahrnehmung eröffnen, in welchen sich die antike Wirklichkeit abgespielt haben muss.⁶⁹

Simulation von Transport und Verkehr der Antike

Zusammenfassend muss konstatiert werden, dass Simulationen trotz vielversprechender Ansätze in den Altertumswissenschaften bis dato generell noch eine marginale Rolle spielen. Eine Ausnahme stellt dabei jedoch die Historische Geographie dar⁷⁰ – und besonders die Erforschung von Handel und Verkehr in historischen und prähistorischen Zeiten –, da hier spätestens seit den 1990er Jahren⁷¹ Simulationen bzw. simulationsnahe Berechnungen im wissenschaftlichen Diskurs vertreten sind. Neben agentenbasierten Ansätzen,⁷² sind hier besonders Least-Cost-Path Berechnungen⁷³ und Netzwerkanalysen⁷⁴ zu nennen.

67 Für erste Ergebnisse siehe: Fron u.a. (2020) sowie im historischen Kontext: Fron / Scholz (2019), Scholz / Winkle (2019).

68 S.o.

69 Um es vereinfacht zu formulieren: Wenn der Schall nicht an einen Ort (z.B. außerhalb der römischen *curia*) in entsprechendem Maße gelangt ist, so kann auch der/die aufmerksamste Zuhörer*in nichts mitbekommen haben. Gleichzeitig muss jedoch die reine Tatsache, dass ein/eine Redner*in an einer Position zu hören gewesen sein muss, nicht bedeuten, dass ihm/ihr auch Gehör geschenkt wurde.

70 Historische Geographie wird hier in seiner weiten Bedeutung als Überbegriff für die Erforschung der Beziehung von Mensch und Landschaft verwendet und nicht als Teildisziplin der Geographie. Siehe hierzu: Olshausen (1991).

71 Leusen (1993), (1996); Verhagen u.a. (1995) Für einen Abriss der Forschungsgeschichte siehe: Verhagen u.a. (2019).

72 S.o. und einleitend siehe hierzu: Wurzer u.a. (2015); Lake (2014).

73 Hier wird auf Basis der geographischen Gegebenheiten das ‚natürliche‘ Potential eines Ortes errechnet, als Weg zu dienen. Zentral hierfür ist der Energieaufwand, der benötigt wird, den Ort zu erreichen bzw. ihn zu durchqueren. Anschließend werden algorithmisch „Beste Wege“ (= energieeffizienteste Wege) durch ein Territorium errechnet, wobei davon ausgegangen wird, dass diese Least-Cost-Paths in der Vergangenheit auch erkannt wurden und Verwendung fanden. Maßgeblich wurde diese Methode entwickelt, um mögliche Wanderbewegungen prähistorischer Stämme zu rekonstruieren, wobei die Methode in Folge für historische Zeiten (und hier besonders die römische Antike) Anwendung fand. Weitere Entwicklungen betreffen die Integration natürlicher Hindernisse (wie Flüsse, Gebirge oder Moore) und den Übergang von einzelnen Routen hin zu Least-Cost-Korridoren. Einleitend und zum Stand der Forschungen siehe zuletzt: Verhagen u.a. (2019) – mit weiterer Literatur.

74 In Kombination mit den Least-Cost-Berechnungen wurden Netzwerkanalysen entwickelt, die Energiekosten für vorgegebene historische Wege berechnen. Diese werden als Wertigkeiten den Start- und Endpunkten der Wege (meist Siedlungen) zugeordnet, welche in Folge als Knoten in einem Netzwerk verstanden und analysiert werden. Ziel ist es hierbei, die Langzeitentwicklung einer Region und transregionale Prozesse besser zu fassen und zu verstehen. Einleitend und zum

Da bei diesen Berechnungen der zeitlich-dynamische Charakter zu Gunsten des Energieaufwandes, welche nötig ist, an einen Ort zu kommen, in den Hintergrund tritt⁷⁵ und eine experimentelle Validierung nicht möglich ist, kann auch hier wieder ‚nur‘ von Simulationsähnlichkeit gesprochen werden.

Das ORBIS-Projekt

Einen anderen Ansatz verfolgt das in weiten Kreisen der Altertumswissenschaften bekannte⁷⁶ ORBIS-Projekt der Stanford University,⁷⁷ dessen Ziel es ist, Reisezeiten und -kosten⁷⁸ zu Land und zu Wasser für das gesamte römische Reich in seiner größten Ausdehnung zu berechnen. Um eine so gewaltige Fläche⁷⁹ in wenigen Jahren (von 2011–2014) mit einer sehr begrenzten Anzahl an Mitarbeiter*innen zu erfassen, wurde der Fokus auf das Verkehrssystem als Ganzes gelegt. Dies hat allerdings zur Folge, dass die Distanzen der Strecken im System gravierend von den archäologisch rekonstruierten Entfernungen abweichen.

Um hier ein Beispiel anzubringen: Die schnellste Route zwischen Aquileia am Mittelmeer und Lauriacum⁸⁰ (heute Enns an der Donau) am Norischen Limes beträgt in ORBIS 436 km, dieselbe im archäologischen Befund gut dokumentierte Wegführung beträgt hingegen 468 km,⁸¹ also 32 km mehr (= 7 %).⁸² Eine solche Unschärfe bedeutet (nach den Berechnungen des ORBIS-Projekts)⁸³ mehr als einen ganzen Tagesmarsch zu Fuß und mehr als 2 ½ Tage Verzögerung mit dem Ochsenkarren.

Stand der Forschungen siehe zuletzt de Soto (2019) – mit weiterer Literatur.

- 75 Auch die Ansätze, die eine Korrelation zwischen Reisezeiten und Energieaufwand der Reise thematisieren (z.B. Groenhuijzen / Verhagen [2015]), bleiben letztlich statisch.
- 76 Grund für die Bekanntheit ist nicht zuletzt die leicht erreichbare Web-Präsenz und die einfache Handhabung. So wird es mehrfach im Internet als “Google Maps for the ancient world, complete with the ‘Avoid Highways’ feature” gepriesen, da man in ORBIS die besten, günstigsten und schnellsten Routen innerhalb des Verkehrsnetzes des Imperium Romanum finden könne. (URL: <http://www.scottbot.net/HIAL/index.html?p=15585.html> [zuletzt abgerufen am 06-05-2020]. Ähnliches findet sich z.B. unter der URL: <https://urbnet.au.dk/news/nyhed/artikel/digitizing-the-roman-imperial-road-network/> [zuletzt abgerufen am 06-05-2020]).
- 77 URL: <http://orbis.stanford.edu/> (zuletzt abgerufen am 06-05-2020).
- 78 Im Aufsatz von U. Fellmeth in diesem Band S. 137–154 (Fellmeth [2020]) werden explizit die wirtschaftlichen Aspekte des ORBIS-Projektes thematisiert, weshalb im Folgenden einzig auf die Reisezeiten eingegangen wird. Da die errechneten Kosten jedoch zentral von den genutzten Transportarten und -zeiten abhängen, ergibt sich, dass die Fehler in der Wege-Simulation sich auch auf die Kosten auswirken.
- 79 Das modellierte Straßennetz umfasst 84 631 km, welche 632 Orte miteinander verbinden. Hinzu kommen 28 272 km Flüsse und Kanäle (wobei nur 25 Flüsse im römischen Reich als schiffbar klassifiziert sind [Scheidel / Meek {2015}, S. 3]) sowie 1026 Seerouten mit einer Gesamtlänge von 192 810 km. Es erstreckt sich von der Atlantikküste im Westen bis zum Ostufer des Schwarzen Meers und vom Hadrianswall im Norden bis Koptos in Ägypten und deckt somit eine Gesamtfläche von beinahe 10 Millionen Quadratkilometer ab. (Scheidel / Meek [2015], S. 2).
- 80 Die Route führt über das Valle di Fiume und die Kärntner Seen zur norischen Provinzhauptstadt Virunum, von dort nördlich ins obere Murtal, über die Hohen Tauern ins Ennstal und Ovilia (heute Wels, Oberösterreich) nach Lauriacum (Enns an der Donau, Oberösterreich).
- 81 Rutter (2018).
- 82 Übertragen auf das gesamte Straßennetz ergäbe sich dabei eine Abweichung von knapp 6000 km (= 200 Tagesmärsche zu Fuß).
- 83 Hierauf wird im Folgenden noch Bezug zu nehmen sein.

Die eben erwähnten Kategorien (Fußmarsch und Ochsenkarren) sind zwei der neun Fortbewegungsweisen zu Land, welche in Orbis wählbar sind.⁸⁴ Die dazugehörigen durchschnittlichen täglichen Reichweiten der Verkehrsmittel sind, nach Angaben der Ersteller der Simulation, aus nicht näher spezifizierten antiken und vormodernen Quellen entnommen,⁸⁵ wobei gegebenenfalls Höhenunterschiede in den Wegstrecken mit 0,5–1,5 Extratagen einberechnet wurden.⁸⁶

Dasselbe gilt für die beiden Kategorien der Fortbewegung auf Flüssen: “Military” und “Civil”⁸⁷, wobei lediglich 29 Flüsse und Kanäle im gesamten römischen Reich als “major and reasonably reliable”⁸⁸ für eine ganzjährige Nutzung als Verkehrsweg angesehen werden,⁸⁹ was keinesfalls der historischen Realität entspricht.⁹⁰ Aus den Kombinationen der ‚Art der Fortbewegung‘, der Richtung des Weges (flussaufwärts oder -abwärts) und einer Annahme der Fließgeschwindigkeit des Flusses ergeben sich in ORBIS folgende durchschnittlichen Tagesdistanzen:

84 Die Kategorien im ORBIS-System lauten:

“Foot (30 km/day); Oxcart (12 km/day); Porter (30 km/day); Horse (56 km/day); Private (36 km/day); Porter (50 km/day); Fast Carriage (30 km/day); Horse Relay (250 km/day); Rapid Military March (60 km/day).” (URL: <http://orbis.stanford.edu/> [zuletzt abgerufen am 06-05-2020]).

Über die Sinnhaftigkeit dieser Einteilung lässt sich streiten. Zur Erläuterung dieser z.T. nicht gleich eingängigen Einteilung schreibt Scheidel: “The model allows for fourteen different modes of road travel (ox cart, porter, fully loaded mule, foot traveler, army on the march, pack animal with moderate loads, mule cart, camel caravan, rapid military march without baggage, horse with rider on routine travel, routine and accelerated private travel, fast carriage, and horse relay) that generate nine discrete outcomes in terms of speed and three in terms of expense for each road segment.” (Scheidel / Meek [2015], S. 2–3). Siehe hierzu auch: Scheidel (2014), S. 8.

85 “Information on terrestrial and riverine travel speed was gathered from ancient and later premodern sources.” (Scheidel [2014], S. 8) In der Online-Dokumentation (Abschnitt Building/Roadtransport/Time) (Scheidel / Meek [2013–2015]) schreiben die Autoren hierzu: “Numerous studies were employed in establishing simulation parameters” und fügen insg. 39 Literaturangaben (mit Erscheinungsdaten zwischen 1897 und 2007) an, auf welche jedoch inhaltlich nicht weiter eingegangen wird. Stattdessen heißt es: “The considerable amount of relevant scholarship – much more substantial than for sea and river transport costs – makes it impossible to provide even a short review of the complexities of the material (for which see Scheidel in preparation).” Der Beitrag, auf den hier verwiesen wird, ist jedoch (nach Kenntnis des Verfassers dieses Aufsatzes) bis dato nicht erschienen (Stand 08-05-2020), so dass die Gründe für die Festlegung der täglichen Distanzen im Dunklen bleiben.

86 Diese Information findet sich ebenfalls lediglich in der Online-Dokumentation (Abschnitt Building/Roadtransport/Time) (Scheidel / Meek [2013–2015]). Ferner wird hier vermerkt, dass spezifische Verkehrsmittel, wie Ochsenkarren und schnelle Kutschen (Fast carriages), generell im Winter im Hochgebirge nicht genutzt werden konnten.

87 “Military” bedeutet in dieser Unterscheidung Ruderboote mit der Möglichkeit zu segeln, während in der mit “Civil” einfache Prahmen gemeint sind.

88 Abschnitt Building/Rivertransport/Time (Scheidel / Meek [2013–2015]).

89 Herausforderungen, wie die Rekonstruktion antiker Flussläufe und die Varianz von Strömungen (siehe die Aufsätze von U. Arauner S. 59–79 und T. Bongers S. 33–58 in diesem Band [Arauner {2020}, Bongers {2020}], sowie verschiedenen Fortbewegungsweisen (siehe den Aufsatz von P. Reinard S. 80–119 in diesem Band [Reinard {2020}]), werden dabei systematisch ausgeblendet. Siehe hierzu den Abschnitt Building/Rivertransport/Time in der Online Dokumentation (Scheidel / Meek [2013–2015]).

90 Allein schon die Funde römischer Flussschiffe, wie z.B. ein Lastkahn in dem Flüsschen Ljubljanica in Slowenien (Gaspari [1998]; Istenič [2015]; Turk / Andrič / Smith-Demo [2009]) belegen, dass zumindest zeitweise mittlere bis kleine Flüsse für den Transport von Waren, Personen und Informationen genutzt wurden. Siehe auch: Bongers (2018); Bockius (2000); Eckoldt (1983) sowie den Aufsatz von T. Bongers S. 33–58 in diesem Band (Bongers [2020]). Dies wird in ORBIS keineswegs bestritten, doch, so die Entwickler der Anwendung, sei der Forschungsstand in diesem Bereich noch nicht dazu geeignet, Eingang in die Simulation zu finden. Siehe hierzu die Online-Dokumentation (Abschnitt Building/Rivertransport/Time) (Scheidel / Meek [2013–2015]).

	“Military”		“Civil”	
	Flussabwärts	Flussaufwärts	Flussabwärts	Flussaufwärts
Upper Euphrates	120 km/Tag	50 km/Tag	75 km/Tag	15 km/Tag
Upper Tiber, Po, Arno, Rhine, Mosel, Tyne, Ouse, Witham, Upper Seine, Upper Loire, Upper Garonne, Guadalquivir, Guadiana, Tagus, Upper Danube, Inn, Drava, Sava, Nisava, Middle Orontes, Khabur	120 km/Tag	50 km/Tag	65 km/Tag	15 km/Tag
Lower Tiber, Rhone	120 km/Tag	50 km/Tag	65 km/Tag	10 km/Tag
Lower Euphrates	120 km/Tag	50 km/Tag	65 km/Tag	20 km/Tag
Lower Loire, Lower Garonne	120 km/Tag	50 km/Tag	60 km/tag	20 km/Tag
Middle Danube	120 km/Tag	50 km/Tag	55 km/Tag	20 km/Tag
Lower Seine	120 km/Tag	50 km/Tag	50 km/Tag	30 km/Tag
Lower Danube	120 km/Tag	50 km/Tag	45 km/Tag	25 km/Tag
Nile (Lower Egypt)	120 km/Tag	50 km/Tag	Juli – Okt: 90 km/Tag Nov. – Juni: 30 km	Juli – Okt: 90 km/Tag Nov. – Juni: 35 km
Nile (Upper Egypt)	120 km/Tag	50 km/Tag	Juli – Okt: 65 km/Tag; Nov. – Juni: 35km	Juli – Okt: 100 km/Tag; Nov. – Juni: 50km
“Canals”	120 km/Tag	50 km/Tag	15 km/Tag	15 km/Tag

Tab. 1: Tagesdistanzen der Flussschiffe im ORBIS-Projekt nach Angaben der Online-Dokumentation (Abschnitt Building/Roadtransport/Time) (Scheidel / Meek [2013-2015]) (Ersteller: L. Scheuermann).

Abgesehen davon, dass die Unterteilungen “Upper” und “Lower” der Präzisierung (z.B. in Flusskilometern) bedürfen, erscheint – berücksichtigt man die allgemein bekannten Wetterlagen und sich daraus ergebenden Pegelstände sowie Fließgeschwindigkeiten – eine solche Unterteilung bei Weitem als zu grob, um die Nutzung (der wenigen überhaupt in die Simulation aufgenommenen) größeren Flüsse adäquat zu modellieren.

Dasselbe Problem des unzureichenden Detailgrades der Simulation zeigt sich auch im Bereich der Seerouten, wie Pascal Warnking in seiner Dissertation aus dem Jahr 2015 en détail nachweisen konnte.⁹¹ Er bemängelt zu Recht, dass a) das Netz an Winddaten vollkommen unzureichend ist,⁹² b) die Winddaten nur als Monatsdurchschnitte genutzt werden, was der Wettersituation im Mittelmeer keinesfalls gerecht wird, c) die Routen als Summe einzelner Teilschritte gesehen werden, so dass die Berechnungen nur dann Sinn machen würden, wenn es möglich wäre „auf offenem Meer anzuhalten und auf Wind aus der richtigen Richtung zu warten.“⁹³

91 Warnking (2015), S. 178–182.

92 Das gesamte Mittelmeer wird gerade einmal durch 20 Datenpunkte mit einer Rastergröße von fünf Breitengraden abgedeckt.

93 Warnking (2015), S. 181.

Den Beteuerungen der Online Dokumentation “more fine grained coverage would not significantly contribute”⁹⁴ ist hier, wie auch im gesamten ORBIS-Projekt, aufs Vehementeste zu widersprechen, ebenso wie der Vorstellung, dass die Unschärfen sich mit der Größe des Modells relativieren würden. Ganz im Gegenteil summieren sich die Abweichungen gerade auf langen Strecken derart, dass die Ergebnisse nur mehr wenig mit realistischen Angaben gemein haben.⁹⁵

Als Fazit dieser kritischen Betrachtung des ganzen ORBIS-Projektes muss man sich Warnkings Beobachtungen anschließen, der zwar den Innovationsgrad hervorhebt, doch auf Grund der zahlreichen Schwächen und Unschärfen zu dem Resultat kommt: „ORBIS liefert also Hinweise, aber nicht unbedingt verlässliche Resultate.“⁹⁶

Neue Ansätze zur Simulation von Transportzeiten

Nach dieser ernüchternden Betrachtung, gilt es zu fragen, wie eine Simulation aussehen kann, mit der Reise- und Transportzeiten in der Antike realistisch ermittelt werden können.

Vorab ist dabei nochmals festzuhalten, dass Simulationen keine positiven Aussagen über Reisezeiten oder Routen treffen können, sondern allenfalls Möglichkeitsräume eröffnen, welche sich aus den physikalischen Bedingungen ergeben. Wie lang also ein Händler exakt z.B. von Rom bis zum nächstgelegenen Hafen Ostia (Luftlinie 23 km) benötigt hat, ist nicht simulierbar, da etliche zeitverzögernde Aspekte, wie die Wahl der spezifischen Route oder die Häufigkeit der Einkehr in Tavernen⁹⁷ von individuellen bzw. gesellschaftlich geprägten Entscheidungen abhängig sind. Simulationen können jedoch Minimalzeiten errechnen sowie die Wahrscheinlichkeit mit der ein/eine Akteur*in, welche*r ohne größere Verzögerungen auf dem Weg ist, angekommen sein kann. Ferner kann davon ausgegangen werden, dass antike Reisende zumindest in größeren Teilen des römischen Reichs eine Vorstellung davon hatten (oder sie durch Erfragen erlangten), wieviel Zeit sie ungefähr benötigen würden. Diese wiederum wird unweigerlich in die Planungen von Händlern, Militärs aber auch Privatleuten eingeflossen sein, so dass uns die Berechnungen der Simulationen einen Einblick in die antike Lebenswelt vermitteln, ohne jedoch auszudrücken zu können, wie es exakt gewesen ist.

Für Seerouten hat Pascal Warnking,⁹⁸ aufbauend auf den Arbeiten von Arnaud⁹⁹ und dem Oxford Roman Economy Project¹⁰⁰ und unter Adaption des modernen Regatta-Navigationsprogramms „Expedition“¹⁰¹

94 Online-Dokumentation (Abschnitt Understanding) Scheidel / Meek (2013–2015).

95 Um dies nochmals am bereits vorgestellten Beispiel zu verdeutlichen: Der kostengünstigste Weg zwischen Aquileia und Lauriacum, so das Ergebnis des ORBIS-Projektes, führt über Verona, den Brenner-Pass und Passau. Er hat eine Länge von insg. 922 km. Das ist 486 km weiter als der kürzeste durch ORBIS errechnete Weg und dauert 20 Tage länger. Es zeigt sich also, dass, selbst wenn man ORBIS nicht mit archäologischen Quellen vergleicht, dennoch zumindest einige Ergebnisse schlicht als absurd zu bezeichnen sind.

96 Warnking (2015), S. 179.

97 Als literarischer Verweis sei das moderne Poem von Wenedikt Jerofejew „Moskwa-Petuschki“ (dt. Reise nach Petjuschki) genannt (Jerofejew [2015]), in welchem der Protagonist versucht vom Kursker-Bahnhof in Moskau bis in den knapp 100 km entfernten Ort Petuschki zu gelangen, wo er jedoch alkoholbedingt niemals ankommen sollte.

98 Warnking (2015), (2016), (2018).

99 Arnaud (2005).

100 URL: <http://oxrep.classics.ox.ac.uk/> (zuletzt abgerufen am 06-05-2020).

101 URL: <http://www.expeditionmarine.com> (zuletzt abgerufen am 06-05-2020). Zur Anwendung sowie den Grenzen der Nutzung des Systems für die Rekonstruktion Antiker Seerouten siehe: Warnking (2015), S. 185–191.

eine Simulation entwickelt, welche – unter Heranziehung von Polardiagrammen historischer Segelschiffe¹⁰² sowie Strömung-¹⁰³ und Wetterdaten¹⁰⁴ – realitätsnah¹⁰⁵ den besten Streckenverlauf sowie die benötigten Zeiten errechnet. Hierfür wurden mehrere tausend Simulationsexperimente mit verschiedenen Wetterlagen für die Verbindungen zwischen antiken Häfen gemacht und diese statistisch analysiert, um Routen und Fahrtzeiten zu ermitteln.¹⁰⁶

Mit dem Nachbau eines römischen Seeschiffs auf Grundlage der bei Marseille gesunkenen „Laurons 2“¹⁰⁷ durch die Universität Trier wird man zukünftig in der Lage sein, durch Testfahrten die Simulationsergebnisse experimentell zu validieren, erstmals eigene Polardiagramme für ein antikes Handelsschiff zu erstellen und somit die Simulation nochmals entscheidend zu verbessern.¹⁰⁸ Ferner können Vergleiche der Strömungsverhältnisse zwischen der Rekonstruktion und Modellen des Schiffs im Strömungskanal erfolgen, welche es zukünftig erlauben werden, auch andere Schiffstypen (ohne die aufwendige 1:1 Rekonstruktion) so zu vermessen, dass sie in das Simulationssystem integriert werden können. Doch auch wenn die endgültige Validierung und die Erweiterungen des Systems noch in der Zukunft liegen, lässt sich bereits zu diesem Zeitpunkt feststellen, dass es sich hierbei im besten Sinne um ein Simulationssystem handelt, welches nicht nur einen signifikanten Beitrag für unser Verständnis von der antiken Seefahrt leistet, sondern auch als Vorbild für die Modellierung des Transports von Menschen, Waren und Informationen auf Straßen und Flüssen dienen kann.

Eine solche Simulation der Transportzeiten im Binnenland, die sich qualitativ von groben Schätzungen abhebt und erstmals ‚realistische‘ Zahlen zur Verfügung stellt, harret allerdings bis dato noch der Umsetzung. Doch können erste Ansätze hierzu im Folgenden am Ende dieses Beitrags präsentiert werden.

So wie die Simulation des Seetransportes grundlegend auf den Meeresströmungen basiert, bedarf es für den Binnenlandtransport zunächst eines möglichst detaillierten Geländemodells¹⁰⁹ und der exakten Lokalisierung der Trassen und Flussverläufe. Doch können hierfür nicht einfach rezente Verhältnisse übernommen werden. Als erste Voraussetzung ergibt sich also die möglichst exakte Rekonstruktion der Landschaft und der Verkehrswege. Wie das ORBIS-Projekt gezeigt hat, haben hier bereits kleinere Unschärfen, die sich summieren, große Auswirkungen auf das Gesamtsystem. Diese Erfahrung lehrt, dass ein Top-Down-Ansatz, also die Simulation des gesamten römischen Reichs zum Scheitern verurteilt ist, und dass stattdessen die exakte kleinräumige archäologische und historisch-geographische Arbeit unerlässlich ist. Auf welche Art die Rekonstruktion der antiken Verhältnisse durch die Kombination von digitalen Daten mit historischen Quellen (und hier besonders Karten) und nicht zuletzt der Autopsie der Landschaft durch den/die Forscher*in möglich ist, zeigen u.a. Klaus Tausend für Straßen und Uwe Arauner sowie Toon Bongers für Flüsse bzw. Flusssysteme.¹¹⁰

102 Warnking (2015), S. 191–201.

103 Warnking (2015), S. 183–185.

104 Warnking (2015), S. 126–136 sowie S. 183–185.

105 Dies zeigt sich nicht zuletzt daran, dass die Software mehrfach erfolgreich beim Volvo Ocean Race und dem Americas Cup zur Anwendung kam.

106 Auch hier zeigten sich ganz erhebliche Unterschiede zu den Daten des ORBIS-Projekts. (Warnking [2015], S. 252–284).

107 Stapellauf Juli 2019.

108 Für ausführliche Informationen zu diesem Projekt siehe: <https://www.uni-trier.de/index.php?id=62438&L=2> (zuletzt abgerufen am 06-05-2020). Zur Methode der Ermittlung der Fahrteigenschaften antiker Schiffs- und Bootsrekonstruktionen mit dem NX-2 System siehe einleitend: (Brechtel u.a. [2016]).

109 Hierfür stellt z. B. das *Copernicus system for monitoring the Earth* der Europäischen Kommission das EU-DEM V1.1 Modell mit einer vertikalen Gesamtgenauigkeit von 2 m zur Verfügung. Für weitere Informationen siehe: <https://land.copernicus.eu/imagery-in-situ/eu-dem>. (zuletzt abgerufen am 06-05-2020). Zu Fragen der Validierung des Modells siehe: Dufourmont u.a. (2014).

110 Siehe Tausend S. 120–136 sowie Arauner S. 59–79 und Bongers S. 33–58 in diesem Band (Tausend [2020]; Arauner

Ein zweites zentrales Element einer solchen Simulation ist die Leistungscharakteristik der Verkehrsmittel. Für Flussschiffe in verschiedenen Antriebsformen existieren bereits detaillierte Forschungen, welche Patrick Reinard in diesem Themenheft präsentiert.¹¹¹ Die Kombination dieser Messungen mit den rekonstruierten Flussverläufen und Fließgeschwindigkeiten erlaubt es, wie Uwe Arauner in seinem Beitrag zeigt,¹¹² Distanzen und Fahrtgeschwindigkeiten zu ermitteln. Im Bereich des Landtransportes bedarf es hingegen noch der Grundlagenforschung. Zwar gibt es Studien zur generellen Leistungsfähigkeit von Fußgänger*innen¹¹³ und (modernen) Pferden,¹¹⁴ doch sind physiologische Untersuchungen, deren experimentelle Ergebnisse in Simulationen zur Anwendung kommen könnten, noch selten.¹¹⁵ Hier bedarf es kontrollierter Versuchsreihen (ähnlich wie im Bereich der Schifffahrt), um den Einfluss von Steigung, Untergrund bei verschiedenen Wetterlagen (z.B. Fels, Matsch oder Schnee), Temperatur und Müdigkeit bei längeren Wegen, auf die Geschwindigkeiten zu ermitteln, welche dann in das System einfließen können.

In diesem Kontext zeigt sich bereits ein nächster zentraler Faktor für eine Simulation der Land- und Flusstransporte, nämlich das Wetter.¹¹⁶ Dabei kommt der Forschung zu Gute, dass die Wetterverhältnisse der 1990er Jahre denen am Ende des ersten Jahrhunderts n. Chr. in weiten Teilen entsprechen, so dass (zumindest statistisch) bestehende Daten für diesen speziellen antiken Zeitraum genutzt werden können.¹¹⁷ Feingranulare Wetterdaten für diese Jahre sind u.a. über das Copernicus Earth Observation Programme der Europäischen Kommission frei verfügbar, so dass – zumindest für den europäischen Bereich des römischen Reiches – auf ein adäquates Datenmaterial zugegriffen werden kann.¹¹⁸

Aus diesen Grunddaten gilt es ein Modell zur Berechnung der Transportzeiten aufzubauen, welches in Folge algorithmisch umgesetzt und anhand von realweltlichen Versuchen validiert und verfeinert werden muss. Hier ein erster genereller Ansatz für ein solches Modell:

[2020]; Bongers [2020]). Des Weiteren muss an dieser Stelle auf die beispielhaften Arbeiten zur Rekonstruktion der Via Claudia Augusta von Gerald Grabherr verwiesen werden: Grabherr (2004); Walde / Grabherr (2006). Für Flusslandschaften siehe außerdem: Franconi (2017).

111 Reinard s. 80–119 in diesem Band (mit weiterer Literatur); Arauner S. 59–79 in diesem Band (Reinard [2020]; Arauner [2020]). Für die Untersuchungen von Militärschiffen siehe zudem: Abkamp / Schäfer (2009); Brechtel u.a. (2016); Schäfer / Günther (2008); Schäfer (2017).

112 Arauner S. 59–79 in diesem Band (Arauner [2020]).

113 Z.B. im Bereich der Wanderliteratur: Österreichischer Alpenverein / Deutscher Alpenverein (2016).

114 Junkelmann (2008); Lefebvre des Noëttes (1931), (1924); Löffl (2011); Österreichisches Bundesheer (2016).

115 Ausnahmen bilden hierbei Pferde: Wickler u.a. (2001). Für Fußgänger finden sich vielversprechende Ansätze bei: Gruchy u.a. (2017). Hier gilt es noch zu klären, inwiefern sport- und veterinärmedizinische Forschungen herangezogen werden können. Für die in der Antike meist genutzten Lasttiere (Maultiere und Esel) konnten durch den Autor dieses Beitrags bis dato noch keine nutzbaren Informationen gefunden werden, ebenso wenig wie für die Fahrteigenschaften antiker Karren. Zur Rekonstruktion von Karren und Zuggeschirren siehe: Doorewaard (2010); Haser / Maise (2003); Leusen (1989); Roering (1983); Schleiermacher (1996); Simon (2009).

116 Hierbei sind sowohl die direkten Einflüsse, die eine Reise teilweise zum Erliegen bringen können, wie z.B. Starkregen, Schneestürme etc. aber auch längerfristige Faktoren, wie Pegelstände der Flüsse oder Schneebelag von Bedeutung.

117 Harper / McCormick (2018); McCormick u.a. (2012); McCormick (2013); Manning (2013).

118 URL: <https://climate.copernicus.eu/> (zuletzt abgerufen am 06-05-2020). Siehe einführend: Raoult u.a. (2017).

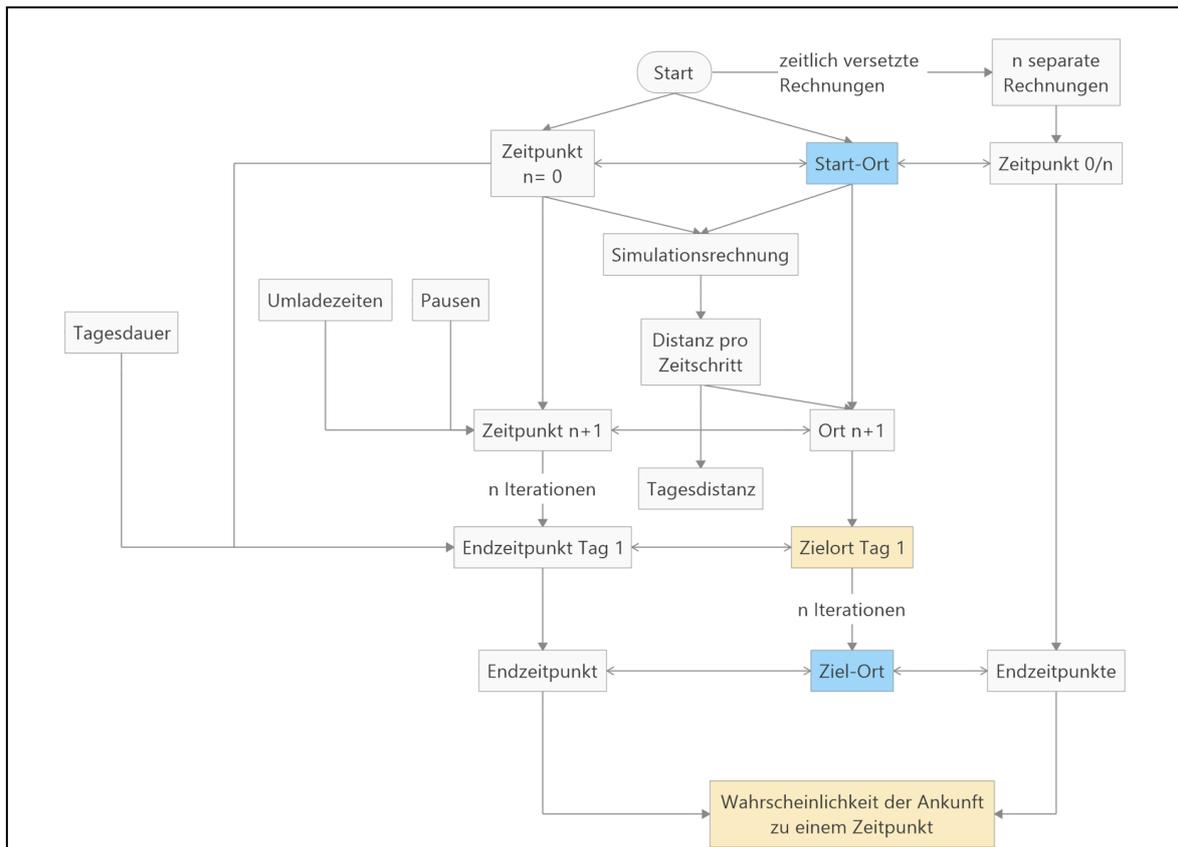


Abb. 1: Ansatz für ein Modellierung der Simulation der historischen Transportzeiten (Ersteller: L. Scheuermann).

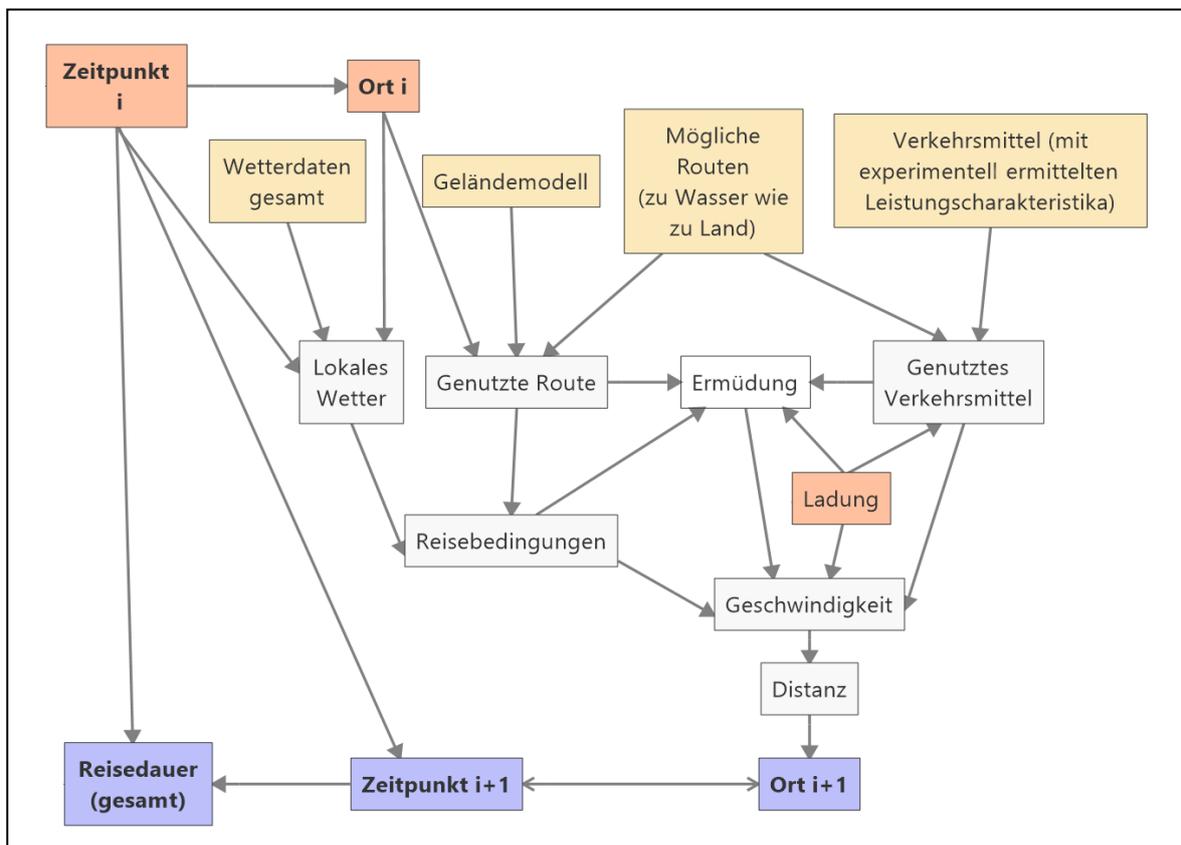


Abb. 2: Ansatz für eine Modellierung eines Zeitschritts der Simulation der historischen Transportzeiten. Dabei ist anzumerken, dass das Geländemodell auch Flussverläufe und Strömungen umfasst (Ersteller: L. Scheuermann).

Grundlegend handelt es sich bei dem hier vorgeschlagenen Konzept der Simulation historischer Transportzeiten um einen iterativen Ansatz; das heißt, dass die gesamte Berechnung in eine Reihe diskreter Zeitschritte (z.B. mit einer Länge von 10 Minuten) eingeteilt wird, welche separat berechnet werden, wobei der (räumliche und zeitliche) Startpunkt der gesamten Reise $i = 0$ ist, aus dem sich nach Abschluss des ersten Zeitschritts ein Endpunkt $i + 1 = 1$ ergibt.

Für den einzelnen Zeitschritt liegen ein spezifischer Zeitpunkt sowie ein Ort vor. Hinzu kommt als Option die Festlegung der Größe und des Gewichtes der Ladung, die sich im Folgenden auf die Wahl des Verkehrsmittels,¹¹⁹ die Geschwindigkeit sowie die Ermüdung der Akteur*innen auswirken wird. Neben diesem (durch die Nutzer*innen wählbaren) Faktor, kommen die bereits beschriebenen Wetterdaten, das Geländemodell, die möglichen Routen sowie die Verkehrsmittel (samt ihrer Leistungscharakteristika) hinzu. Aus ihrer Kombination ergibt sich zum einen die genutzte Route und das dazu gehörige Verkehrsmittel sowie das lokale Wetter bzw. die Reisebedingungen, aus welchen sich wiederum die Geschwindigkeit des Verkehrsmittels und die damit zurückgelegte räumliche Distanz für diesen spezifischen Zeitschritt errechnen lässt. Kombiniert man letztere mit dem Anfangsort und der gewählten Route, so ergibt sich Ort $i + 1$, welcher wieder Ausgangspunkt für den nächsten Zeitschritt ist.

Der Faktor der Ermüdung muss in dem hier vorgestellten Ansatz eine besondere Erwähnung finden, da er Auswirkungen auf den einzelnen Zeitschritt und auch auf die Tagesdistanz hat. Hintergrund ist die einfache Tatsache, dass die Leistung von Menschen und Tieren im Laufe einer Strecke sukzessive abnimmt und genügend Pausen gerade bei mehrtägigen Touren von zentraler Bedeutung sind. Hierbei spielen natürlich das gewählte Verkehrsmittel, aber auch die Route, die Bodenbeschaffenheit und das Wetter eine nicht unbedeutende Rolle, da diese Elemente den Leistungsabfall massiv beschleunigen können.¹²⁰ Um dies zu berücksichtigen, wurde der Faktor der Ermüdung eingeführt, welcher sich negativ auf die Geschwindigkeit auswirkt. Überschreitet sie einen gewissen Wert, so müssen Pausen genommen werden.¹²¹ Hinzu kommen natürlich im Laufe des Tages auch Pausen zur Nahrungsaufnahme für Mensch und Tier sowie kurze Stopps, in welchen die Befestigung der Ladung überprüft werden muss.¹²²

Die Rechnung wird so lange fortgesetzt, bis der Ankunftsort erreicht ist, oder die Reise (auf Grund der fortgeschrittenen Zeit, der Ermüdung oder des Wetters) an diesem Tag nicht weitergeführt werden kann.¹²³ Sollte letzteres der Fall sein, wird die Rechnung für den nächsten Tag fortgesetzt, wobei der neue Startpunkt $i = 0$ räumlich mit dem Endpunkt des vorherigen Tages übereinstimmt.

Um der Möglichkeit Rechnung zu tragen, dass es stets mehrere Routen gibt und zumindest an gewissen Orten die Verkehrsmittel gewechselt werden können, genügt es nicht, das geschilderte Simulationsexperiment einmal durchzuführen. Es muss so oft wiederholt werden, dass alle Kombinationen an möglichen Verkehrsmitteln und Strecken abgedeckt sind. Hinzu kommt, dass ein einziger, genau fixierter Startzeitpunkt nicht vorliegt, so dass die Rechnung auch mit multiplen Startzeiten wiederholt werden muss.¹²⁴

119 Manche Waren sind auf Grund ihrer Größe und des Gewichtes mit manchen Verkehrsmitteln nicht transportierbar.

120 Bei einer beschaulichen Bootsfahrt stromabwärts auf einem trägen Fluss, wird der Faktor der Ermüdung gegen Null gehen, wohingegen das Ersteigen eines Passes in den Alpen bei strömendem Regen, zu Fuß und voll beladen die Ermüdung massiv beschleunigt, wie der Autor dieses Beitrages aus leidvoller Erfahrung zu berichten weiß.

121 Diese werden im System durch eine Geschwindigkeit von 0 repräsentiert.

122 An dieser Stelle sei dem Tragtierzentrum des Österreichischen Bundesheeres für zahlreiche praktische Hinweise zur Nutzung von Zug- und Lasttieren mein Dank ausgesprochen.

123 Dieser Endzeitpunkt ist natürlich abhängig von der Tageslänge und damit der Jahreszeit sowie der Witterung.

124 Hier wird momentan von einem Zeitraum zwischen drei Stunden vor Sonnenaufgang und Mittag ausgegangen. Das Intervall der Startzeiten ist dabei gleich der für die Rechnungen genutzten Zeitschrittlänge (10 Minuten). Der Zeitraum und die Zeitschrittlänge beruhen derzeit allerdings noch auf einer groben Schätzung, welche im Laufe der Validierung der Simulation zu präzisieren sein wird.

Dies ist umso wichtiger, da sich im Laufe eines Tages die Wetterverhältnisse massiv ändern können, was wiederum einen entscheidenden Einfluss auf die Tagesdistanzen haben wird.

Das Ergebnis der Gesamtsimulation ist daher kein einzelnes exaktes Ergebnis (die einzig wahre Reisezeit), sondern vielmehr ein Zeitraum, in dem die Möglichkeit des Erreichens des Zieles immer wahrscheinlicher wird, wobei, um dies abschließend nochmals zu betonen, damit keine positive Aussage über die Ankunftszeit eines/einer spezifischen historischen Akteurs*in möglich ist, sondern nur ein Maß der Wahrscheinlichkeit, welche jedoch mit dem generellen Erfahrungshorizont der Akteur*innen deckungsgleich ist.

Fazit

Der vorliegende Beitrag spannt einen weiten Bogen von der Geschichte des Begriffs Simulation und der Entwicklung hin zu einem der grundlegenden methodischen Ansätze in den Natur- und Technikwissenschaften, über die Problematisierung der Möglichkeit der Anwendung in den Geschichtswissenschaften sowie Beispielen, in denen dies bereits der Fall ist, hin zum Gegenstand dieses Themenheftes – der Simulation von Handel und Verkehr der Antike. Nach der Präsentation des aktuellen Forschungsstands wurde abschließend ein Ansatz für die Simulation der Transportzeiten auf Flüssen und Straßen skizziert. Im Laufe des Beitrags wurde auch immer wieder auf die weiteren Beiträge dieses Themenheftes verwiesen, um so die Gesamtkonzeption des Bandes den Leser*innen zu verdeutlichen. Vieles des Geschriebenen – besonders in den letzten Abschnitten des Beitrags – ist bis dato nur in seiner Konzeption und der Vorstellung des Autors vorhanden und erst die Umsetzung im Rahmen eines größeren Projektes wird erweisen, wie sich der vorgebrachte Ansatz zukünftig realisieren lässt.

Literatur

- Arauner (2020): U. Arauner, „Donauschiffahrt im Ingolstädter Becken in römischer Zeit. Von der Rekonstruktion bis zur Reisezeit“, in: DCO 6,1 (2020), S. 59–79.
- Arnaud (2005): P. Arnaud, *Les routes de la navigation antique. Itinéraires en Méditerranée*, Paris 2005.
- Aßkamp / Schäfer (2009): R. Aßkamp / C. Schäfer, „Projekt Römerschiff. Nachbau und Erprobung für die Ausstellung ‚Imperium, Konflikt, Mythos – 2000 Jahre Varusschlacht‘“, in: LwL Römermuseum / Landesverband Lippe / VARUSSCHLACHT im Osnabrücker Land GmbH – Museum und Park Kalkriese (Hgg.), *2000 Jahre Varusschlacht. Imperium – Konflikt – Mythos*, Stuttgart 2009.
- Bacon (1985): F. Bacon, „Of Simulation and Dissimulation“, in: F. Bacon (Hg.), *The Essays or Counsels, Civil and Moral*, Oxford 1985.
- Baran (1964): P. Baran, *On Distributed Communications*, Santa Monica 1964.
- Baudrillard (1981): J. Baudrillard, *Simulacres et simulation*, Paris 1981.
- Baudrillard u.a. (2011): J. Baudrillard / G. Ricke / R. Voullié / G. Bergfleth, *Der symbolische Tausch und der Tod*, Berlin 2011.
- Bockius (2000): R. Bockius, „Antike Schwergutfrachter. Zeugnisse römischen Schiffbaus und Gütertransports“, in: R. Bockius (Hg.), *Steinbruch und Bergwerk. Denkmäler römischer Technikgeschichte zwischen Eifel und Rhein*, Mainz 2000, S. 110–132.
- Bogon (2013): T. Bogon, *Agentenbasierte Schwarmintelligenz*, Wiesbaden 2013.
- Bongers (2018): T. Bongers, „Riverine Transport. Roman Gaul“ URL: https://www.researchgate.net/publication/327630690_Riverine_Transport_Roman_Gaul (zuletzt abgerufen am 12-05-2020).
- Bongers (2020): T. Bongers, „Connectivity in the Scheldt Basin. The role of the river Scheldt in the Roman-era transport network“, in: DCO 6,1 (2020), S. 33–58.
- Brechtel u.a. (2016): F. Brechtel / C. Schäfer / G. Wagener (Hgg.), *Lusoria Rhenana. Ein römisches Schiff am Rhein*, Hamburg 2016.
- Burks / Burks (1981): A. W. Burks / A. R. Burks, „The ENIAC. First general-purpose electronic computer“, in: *IEEE Annals of the History of Computing* 3 (1981), S. 310–399.
- Burks / Burks (1988): A. R. Burks / A. W. Burks, *The first electronic Computer. The Atanasoff story*, Ann Arbor 1988.
- Certeau u.a. (2019): M. de Certeau / A. Mayer / L. Giard, *Theoretische Fiktionen. Geschichte und Psychoanalyse*, Berlin 2019.
- de Soto (2019): P. de Soto, „Network Analysis to Model and Analyse Roman Transport and Mobility“, in: P. Verhagen / J. Joyce / M. R. Groenhuijzen (Hgg.), *Finding the Limits of the Limes. Modelling Demography, Economy and Transport on the Edge of the Roman Empire*, Cham 2019, S. 271–289.

- Der Heiden / Buchholz (2020): M. an Der Heiden / U. Buchholz, Modellierung von Beispielszenarien der SARS-CoV-2-Epidemie 2020 in Deutschland, Berlin 2020.
- Dilthey (2006): W. Dilthey, Der Aufbau der geschichtlichen Welt in den Geisteswissenschaften, mit einem Vorwort von M. Riedel, Frankfurt am Main 2006.
- Doorewaard (2010): T. Doorewaard, Karren en wagens. Constructie en gebruik van voertuigen in Gallia en de Romeinse Rijn-Donauprovincies, Amsterdam 2010.
- Dufourmont u.a. (2014): H. Dufourmont / J. Gallego / H. Reuter / P. Strobl, EU-DEM Statistical Validation, Copenhagen 2014.
- Eckoldt (1983): M. Eckoldt, „Schiffahrt auf kleinen Flüssen“, in: Deutsches Schifffahrtsarchiv 6 (1983), S. 11–24.
- Ewert u.a. (2007): U. C. Ewert / M. Roehl / A. M. Uhrmacher, Hunger and Market Dynamics in Pre-Modern Communities: Insights into the Effects of Market Intervention from a Multi-Agent Model 2007.
- Fellmeth (2020): U. Fellmeth, „Möglichkeiten und Grenzen der Quantifizierung und Modellierung von antiken Handels-Transportbedingungen. aus ökonomischer Sicht“, in: DCO 6,1 (2020), S. 137–154.
- Franconi (2017): T. V. Franconi (Hg.), Fluvial Landscapes in the Roman World, Portsmouth, Rhode Island 2017.
- Freud (1920): S. Freud, „Gutachten über die elektrische Behandlung der Kriegsneurotiker. Ka Kommission zur Erhebung militärischer Kriegsverletzung, KTN. 15, NR.436/1920“ URL: <http://wk1.staatsarchiv.at/sanitaet-und-hygiene/sigmund-freud-gutachten-zu-elektroschocks/#/?a=artefactgroup264> (zuletzt abgerufen am 12-05-2020).
- Fron / Scholz (2019): C. Fron / P. Scholz, „3. Räume, Institutionen und Kontexte von Rhetorik in der griechischen Kultur“, in: M. Erler / C. Tornau (Hgg.), Handbuch Antike Rhetorik, Berlin, Boston 2019, S. 81–126.
- Fron u.a. (2020): C. Fron / V. Stappmanns / X. Zhou / P. Leistner, “Comparing Greek ‘Bouleuteria’ and Roman ‘Curiae’. Two Case Studies on the Parallels and Differences in the Acoustic Reconstruction and Simulation of Roman Senate Sessions and Greek Boule Meetings”, in: P. Sapirstein (Hg.), New directions and paradigms for the study of Greek architecture. Interdisciplinary dialogues in the field, Leiden, Boston 2020, S. 274–288.
- Gaspari (1998): A. Gaspari, „Das Frachtschiff aus Lipe im Moor von Laibach (Ljubljana)“, in: JRGZM 45 (1998), S. 527–550.
- Goldsman u.a. (2009): D. Goldsman / R. Nance / J. Wilson, “A Brief History of Simulation”, in: A. Dunkin (Hg.), Winter Simulation Conference, s.l. 2009, S. 310–313.
- Grabherr (2004): G. Grabherr, „Methodische Ansätze der Römerstraßenforschung im Alpenraum am Beispiel der Via Claudia Augusta“, in: H. Koschik (Hg.), „Alle Wege führen nach Rom ...“. Internationales Römerstraßenkolloquium Bonn [vom 25. bis 27. Juni 2003], Pulheim-Brauweiler 2004, S. 117–130.

- Gruchy u.a. (2017): M. de Gruchy / E. Caswell / J. Edwards, “Velocity-Based Terrain Coefficients for Time-Based Models of Human Movement”, in: *Internet Archaeology* 92 (2017), S. 179.
- Harper / McCormick (2018): K. Harper / M. McCormick, “Reconstructing Roman Climate”, in: W. Scheidel (Hg.), *The Science of Roman History. Biology, Climate, and the Future of the Past*, Princeton, Oxford 2018, S. 11–52.
- Haser / Maise (2003): J. Haser / C. Maise, „Zum Nachbau eines römischen Reisewagens. Grundlagen und Aufwandsberechnung“, in: *Jahresberichte aus Augst und Kaiseraugst* 24 (2003), S. 193–223.
- Hellwig (1803): J. Hellwig, *Das Kriegsspiel. Ein Versuch die Wahrheit verschiedener Regeln der Kriegskunst in einem unterhaltenden Spiele anschaulich zu machen*, Braunschweig 1803.
- Istenič (2015): J. Istenič (Hg.), *Roman Stories from the Crossroads*, Ljubljana 2015.
- Jecklin-Tischhauser (2020): U. Jecklin-Tischhauser, „Mittelalterliche Heizsysteme“, in: *Schweizer Beiträge zur Kulturgeschichte und Archäologie des Mittelalters* 47 (2020 – in Vorb.).
- Jerofejew (2015): W. Jerofejew, *Die Reise nach Petuschki. Ein Poem*, München, Berlin, Zürich 2015.
- Junkelmann (2008): M. Junkelmann, *Die Reiter Roms. Reise, Jagd, Triumph und Circusrennen*, Mainz am Rhein 2008.
- Kiviat (1967a): P. J. Kiviat, *Computer Simulation Programming Language. Perspective and Prognosis*, Santa Monica 1967.
- Kiviat (1967b): P. J. Kiviat, *Digital Computer Simulation. Modeling Concepts*, Santa Monica 1967.
- Kiviat (1969): P. J. Kiviat, *Digital Computer Simulation. Programming Languages*, Santa Monica 1969.
- Lake (2014): M. Lake, “Trends in Archaeological Simulation”, *Journal of Archaeological Method and Theory* 21 (2014), S. 258–287.
- Lefebvre des Noëttes (1924): R. J. É. C. Lefebvre des Noëttes, *Force motrice animale à travers les âges*, Berger-Levrault 1924.
- Lefebvre des Noëttes (1931): R. J. É. C. Lefebvre des Noëttes, *L’ Attelage [et] Le Cheval de Selle a travers les Ages*, Paris 1931.
- Lehar (2012): H. Lehar, *Die römische Hypokaustheizung*, Universität Innsbruck 2011.
- Lehar (2014): H. Lehar, „Dem Ignis Languidus auf der Spur. Kann man von einem römischen Dichter Heiztechnik lernen?“, in: E. Trinkl (Hg.), *Akten des 14. Österreichischen Archäologentages am Institut für Archäologie der Universität Graz vom 19. bis 21. April 2012*, Wien 2014, S. 239–246.
- Lehar (2017): H. Lehar, „Römische Heizsysteme und ihr Verbrauch. Wie viel Wald frisst die Heizung einer römischen Stadt?“, in: T. Kaszab-Olschewski / I. Tamerl (Hgg.), *Wald- und Holznutzung in der römischen Antike*, Heidelberg 2017, S. 203–214.

- Lehar (2020): H. Lehar, „Die Hypokaustheizung als Luftheizung. Kann das funktionieren?“, in: L. Berger / L. Huber / J. Weilhartner (Hgg.), Akten des 17. Österreichischen Archäologentages. am Fachbereich Altertumswissenschaften, Klassische und Frühägäische Archäologie der Universität Salzburg vom 26. bis 28. Februar 2018, Salzburg 2020, S. 275–284.
- Leusen (1989): P. M. v. Leusen, Roman Vehicles. Construction, Draught and Use, Amsterdam 1989.
- Leusen (1993): P. M. v. Leusen, „Cartographic Modelling in a Cell-Based GIS“, in: J. Andresen (Hg.), CAA 1992 – Computing the Past. Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, Aarhus 1993, S. 105–124.
- Leusen (1996): P. M. v. Leusen, „GIS and Locational Modeling in Dutch Archaeology. A Review of Current Approaches“, in: H. D. Maschner (Hg.), New Methods, old Problems. Geographic Information Systems in Modern Archaeological Research, [Carbondale, Ill.] 1996.
- Löffl (2011): J. Löffl, Die römische Expansion, Berlin 2011.
- Manning (2013): S. Manning, „The Roman World and Climate. Context, Relevance of Climate Change, and Some Issues“, in: W. Harris (Hg.), The Ancient Mediterranean Environment between Science and History, Leiden 2013, S. 103–171.
- McCormick u.a. (2012): M. McCormick / U. Büntgen / M. Cane / E. R. Cook / K. Harper / P. Huybers / T. Litt / S. Manning / P. Mayewski / A. More / K. Nicolussi / W. Tegel, „Climate Change during and after the Roman. Empire: Reconstructing the Past from Scientific and Historical Evidence“, The Journal of Interdisciplinary History 42 (2012), S. 169–220.
- McCormick (2013): M. McCormick, „What Climate Science, Ausonius, Nile Floods, Rye, and Thatch Tell Us about the Environmental History of the Roman Empire“, in: W. Harris (Hg.), The Ancient Mediterranean Environment between Science and History, Leiden 2013, S. 61–87.
- Metropolis (1987): N. Metropolis, „The Beginning of the Monte Carlo Method“, Los Alamos Science - Special Issue (1987), S. 125–130.
- Nance / Sargent (2002): R. E. Nance / R. G. Sargent, „Perspectives on the Evolution of Simulation“, in: Operations Research 50 (2002), S. 161–172.
- Nance / Overstreet (2017): R. E. Nance / C. M. Overstreet, „History of computer simulation software: An initial perspective“, in: W. K. Chan / A. D’ Ambrogio / G. Zacharewicz / N. Mustafee / G. Wainer / E. H. Page (Hgg.), Simulation Conference (WSC) 2017 Winter. WSC turns 50: simulation everywhere! (2017 Winter Simulation Conference (WSC), 12/3/2017 – 12/6/2017), Piscataway, NJ 2017, S. 243–261.
- Olshausen (1991): E. Olshausen, Einführung in die historische Geographie der Alten Welt, Darmstadt 1991.
- Österreichischer Alpenverein / Deutscher Alpenverein (2016): Österreichischer Alpenverein / Deutscher Alpenverein, Wegehandbuch des Alpenvereins, München, Innsbruck 2016.
- Österreichisches Bundesheer (2016): Österreichisches Bundesheer, Verwendung und Einsatz von Militärpferden und Tragtieren. Dienstvorschrift für das Bundesheer, Wien 2016.

- Popper (2013): K. R. Popper, Logik der Forschung, hrsg. von H. Keuth, Berlin 2013.
- Popper / Bicher (2020): N. Popper / M. Bicher, „Simulation der SARS-CoV-2 Epidemie in Wien“ URL: http://www.dwh.at/site/assets/files/1949/covid-19_-_beschreibung_covid-19_modellerweiterung_-_v04.pdf (zuletzt abgerufen am 12-05-2020).
- Raoult u.a. (2017): B. Raoult / C. Bergeron / A. López Alós / J.-N. Thépaut / D. Dee, “Climate service develops user-friendly data store” URL: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/151/meteorology/climate-service-develops-user-friendly-data-store> (zuletzt abgerufen am 12-05-2020).
- Reinard (2020): P. Reinard, „... treidelten wir das Schiff mit Mühe in den Hafen des Arsinoites“. Überlegungen zu den Akteuren in der Binnenschifffahrt und zu Quantifizierungsmöglichkeiten“, in: DCO 6,1 (2020), S. 80–119.
- Roering (1983): C. W. Roering, Untersuchungen zu römischen Reisewagen, Koblenz 1983.
- Rollinger (2020): C. Rollinger, Classical Antiquity in Video Games. Playing with the Ancient World, London 2020.
- Rutter (2018): S. R. Rutter, Die Erfassung des Verlaufs der sog. norischen Hauptstraße in Kärnten mittels archäologischer und naturwissenschaftlicher Prospektionsmethoden, Graz 2018.
- Sargent (2017): R. G. Sargent, “A perspective on fifty-five years of the evolution of scientific respect for simulation”, in: W. K. Chan / A. D’Ambrogio / G. Zacharewicz / N. Mustafee / G. Wainer / E. H. Page (Hgg.), Simulation Conference (WSC) 2017 Winter. WSC turns 50: simulation everywhere! (2017 Winter Simulation Conference (WSC), 12/3/2017 – 12/6/2017), Piscataway, NJ 2017, S. 3–15.
- Schäfer / Günther (2008): C. Schäfer / H. M. Günther, Lusoria. Ein Römerschiff im Experiment, Hamburg 2008.
- Schäfer (2017): C. Schäfer, „Experimentelle Archäologie trifft auf Schifffahrt. Ein römischer Prahm im Test“, in: Antike Welt (2017), S. 76–83.
- Scheidel / Meek (2013–2015): W. Scheidel / E. Meek, “Online Documentation” URL: <http://orbis.stanford.edu> (zuletzt abgerufen am 12-05-2020).
- Scheidel (2014): W. Scheidel, “The Shape of the Roman World. Modelling Imperial Connectivity”, in: Journal of Roman Archaeology 27 (2014), S. 7–32.
- Scheidel / Meek (2015): W. Scheidel / E. Meek, Orbis. The Stanford Geospatial Network Model of the Roman World, Stanford 2015.
- Scheuermann (2014): L. Scheuermann, “Lived time and space”, EspacesTemps.net (2014).
- Scheuermann (2016): L. Scheuermann, „Die Abgrenzung der digitalen Geisteswissenschaften“, in: DCO 2,1 (2016). DOI: <https://doi.org/10.11588/dco.2016.1.22746> (zuletzt abgerufen am 14-05-2020).
- Scheuermann (2019a): L. Scheuermann, Image of the Urbs. Raumwahrnehmung der Stadt Rom im ersten Jahrhundert vor Christus, Graz 2019.

- Scheuermann (2019b): L. Scheuermann, „Simulation als Methode für die Altertumswissenschaften“, DCO 5,2 (2019). DOI: <https://doi.org/10.11588/dco.2019.2.68127> (zuletzt abgerufen am 14-05-2020).
- Schill (1907): E. G. Schill, „Ueber Simulation beim Militär“, in: Deutsche Medizinische Wochenschrift 33 (1907), S. 973–974.
- Schleiermacher (1996): M. Schleiermacher, „Wagenbronzen und Pferdegeschirr im Römisch-Germanischen Museum Köln“, in: Kölner Jahrbuch für Vor- und Frühgeschichte (1996), S. 205–295.
- Scholz / Winkle (2019): P. Scholz / C. Winkle, „4. Räume, Institutionen und Kontexte von Rhetorik in der römischen Kultur“, in: M. Erler / C. Tornau (Hgg.), Handbuch Antike Rhetorik, Berlin, Boston 2019, S. 127–184.
- Shannon (1975): R. E. Shannon, Systems Simulation. The Art and Science, Englewood Cliffs, NJ 1975.
- Shapiro / Rogers (1967): G. Shapiro / M. Rogers (Hgg.), Prospects for simulation and simulators of dynamic systems, New York 1967.
- Simon (2009): C. Simon, „Die Rekonstruktion von römischem Zuggeschirr mit Halsjoch und Unterhalsbügel. Die neue kummetartige Schirring der römischen Kaiserzeit“, in: M. Müller (Hg.), Xantener Berichte 15. Grabung – Forschung – Präsentation, Mainz am Rhein 2009, S. 85–128.
- Spath (2009): C. Spath, Simulationen. Begriffsgeschichte, Abgrenzung und Darstellung in der wissenschafts- und technikhistorischen Forschungsliteratur, Stuttgart 2009.
- Stockinger (2007): H. Stockinger, „Defining the grid: a snapshot on the current view“, The Journal of Supercomputing 42 (2007), S. 3–17.
- Tausend (2020): K. Tausend, „Zur Rekonstruktion antiker Verkehrswege“, in: DCO 6,1 (2020), S. 120–136.
- Tocher (1963): K. D. Tocher (Hg.), The Art of Simulation, London 1963.
- Turk / Andrič / Smith-Demo (2009): P. Turk / M. Andrič / B. Smith-Demo, The Ljubljana. A river and its Past, Ljubljana 2009.
- Verhagen u.a. (1995): P. Verhagen / J. McGlade / R. Risch / S. Gili, „Some Criteria for Modelling Socio-Economic Activities in the Bronze Age of South-East Spain“, in: G. Lock / Z. Stančič (Hgg.), Archaeology and Geographical Information Systems. A European Perspective, London 1995, S. 187–209.
- Verhagen u.a. (2019): P. Verhagen / L. Nuninger / M. R. Groenhuijzen, „Modelling of Pathways and Movement Network in Archaeology. An Overview of Current Approaches“, in: P. Verhagen / J. Joyce / M. R. Groenhuijzen (Hgg.), Finding the Limits of the Limes. Modelling Demography, Economy and Transport on the Edge of the Roman Empire, Cham 2019.
- Vermeulen u.a. (2020): B. Vermeulen / A. Pyka / M. Müller, „An agent-based policy laboratory for COVID-19 containment strategies“ <https://inno.uni-hohenheim.de/corona-modell> (zuletzt abgerufen am 19-05-2020).

- Vorwinckel (2009): A. Vorwinckel, "Past Futures. From Reenactment to the Simulation of History in Computer Games", *Historical Research / Historische Sozialforschung* 34 (2009), S. 322–332.
- Walde / Grabherr (2006): E. Walde / G. Grabherr (Hgg.), *Via Claudia Augusta und Römerstraßenforschung im östlichen Alpenraum*, Innsbruck 2006.
- Warnking (2015): P. Warnking, *Der römische Seehandel in seiner Blütezeit*, 2015.
- Warnking (2016): P. Warnking, "Roman Trade Routes in the Mediterranean Sea. Modelling the routes and duration of ancient travel with modern offshore regatta software", in: C. Schäfer (Hg.), *Connecting the Ancient World. Mediterranean Shipping, Maritime Networks and their Impact*, Rahden/Westf. 2016, S. 40–90.
- Warnking (2018): P. Warnking, „Der römische Seehandel“, in: C. Eger (Hg.), *Warenwege – Warenflüsse. Handel, Logistik und Transport am römischen Niederrhein*, Mainz 2018, S. 25–44.
- Wickler u.a. (2001): S. J. Wickler / D. F. Hoyt / E. A. Cogger / K. M. Hall, "Effect of Load on Preferred Speed and Cost of Transport", in: *Journal of Applied Physiology* (Bethesda, Md. : 1985) 90 (2001), S. 1548–1551.
- Wirth (2003): M. Wirth, *Rekonstruktion bronzezeitlicher Gießereitechniken mittels numerischer Simulation, gießtechnologischer Experimente und werkstofftechnischer Untersuchungen an Nachguss und Original*, Aachen 2003.
- Wissenschaftsrat (2014): *Wissenschaftsrat, Bedeutung und Weiterentwicklung von Simulation in der Wissenschaft*, Berlin 2014.
- Wurzer u.a. (2015): G. Wurzer / K. Kowarik / H. Reschreiter (Hgg.), *Agent-based Modeling and Simulation in Archaeology*, Cham, s.l. 2015.
- Zedler (1731–1754): J. H. Zedler (Hg.), *Grosses vollständiges universal Lexikon*, Halle / Leipzig 1731–1754.

Abbildungs-/ Tabellennachweise:

Abbildung 1–2 L. Scheuermann
Tabelle 1 L. Scheuermann

Autorenkontakt¹²⁵

Priv.-Doz. Dr. Leif Scheuermann M.A.

Institut Zentrum für Informationsmodellierung – Austrian Centre for Digital Humanities
Karl-Franzens-Universität Graz
Elisabethstraße 59/III,
8010 Graz, Austria

E-Mail: Leif.Scheuermann@gmail.com

125 Die Rechte für Inhalt, Texte, Graphiken und Abbildungen liegen, wenn nicht anders vermerkt, bei dem Autor. Alle Inhalte dieses Beitrages unterstehen, soweit nicht anders gekennzeichnet, der Lizenz CC BY 4.0.