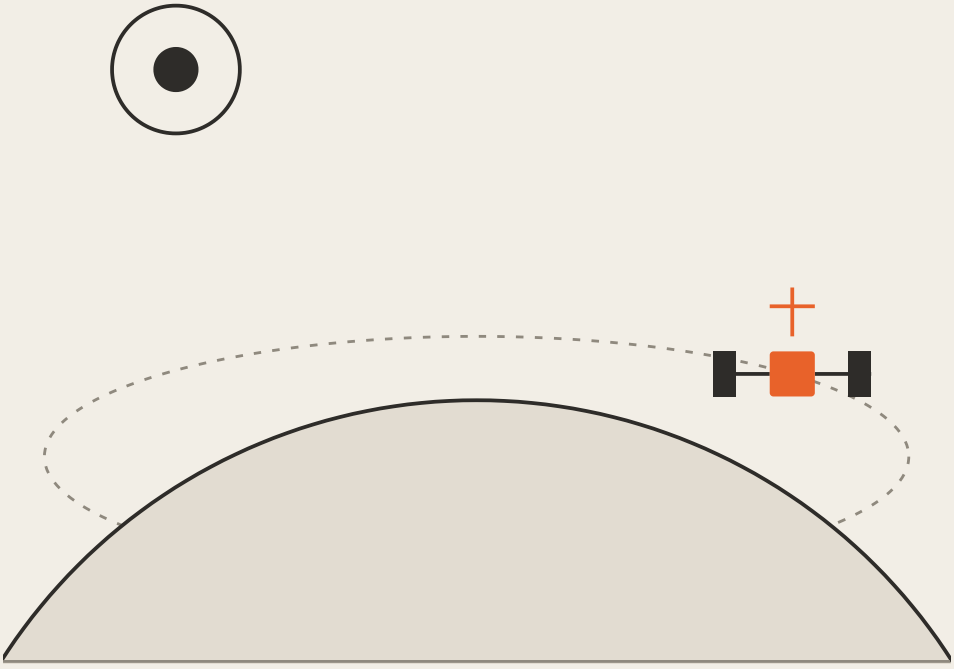


G. K. O’NEILL · THE HIGH FRONTIER · 1977

Rechenzentren im All

Die Cloud greift nach dem Orbit

Reibold Brain-Media.de

Holger Reibold

Das Rechenzentrum im All

Die Cloud über den Wolken. Wie eine Idee aus den 1970er-Jahren zur Milliardenwette wurde

BRAIN-MEDIA.DE

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche, schriftliche Genehmigung des Verlags ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus in irgendeiner Form durch Fotokopien oder ein anderes Verfahren zu vervielfältigen oder zu verbreiten. Dasselbe gilt auch für das Recht der öffentlichen Wiedergabe. Der Verlag macht darauf aufmerksam, dass die genannten Firmen- und Markennamen sowie Produktbezeichnungen in der Regel marken-, patent- oder warenrechtlichem Schutz unterliegen.

Verlag und Autor übernehmen keine Gewähr für die Funktionsfähigkeit beschriebener Verfahren und Standards.

Das **Umschlagmotiv** zeigt einen Rechenknoten auf seiner Umlaufbahn über der Erde, versorgt von der Sonne. Es fasst die Grundidee des Bandes zusammen: Rechenleistung dorthin zu verlagern, wo Energie im Überfluss vorhanden ist.

© 2026 Brain-Media.de

ISBN: 978-3-95444-388-8

Cover: Brain-Media.de

Dr. Holger Reibold – Huber-Müller-Str. 52 – 66113 Saarbrücken

info@brain-media.de – www.brain-media.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....I

Vorwort.....1

Die Cloud ist ein Gebäude.....2

Eine alte Idee mit neuem Treibstoff.....2

Warum dieses Buch weder wirbt noch abrechnet.....3

Worum es in diesem Buch geht.....4

1 Die Erde wird zum Engpass.....7

1.1 Die Cloud hat eine Adresse.....7

1.2 Der Energiehunger der KI.....8

1.3 Nicht der Strom fehlt, sondern der Anschluss.....11

1.4 Wasser, Fläche, Akzeptanz.....12

1.5 Deutschland: Reifegrade und Pflichten.....14

1.6 Fluchtwege auf der Erde.....16

1.7 Warum plötzlich der Orbit.....17

2 Eine Idee aus dem Kalten Krieg.....21

2.1 1945: Arthur C. Clarke und die Relaisstationen im All.....21

2.2 1968: Peter Glaser und das Sonnenkraftwerk im Orbit.....22

2.3 Die 1970er-Jahre: Industrie über den Wolken.....24

2.4 Warum der Traum zerplatzte.....25

2.5 Apollo, Strahlung, Redundanz.....27

2.6 Vom Spaceborne Computer zur Datenverarbeitung im Orbit…29
2.7 2019: ein frühes Fachpapier zum Rechenzentrum im All.....31
2.8 Management Summary.....33
3 Die Cloud entdeckt den Orbit.....37
3.1 Die Zeit der Machbarkeitsstudien.....37
3.2 Starcloud: ein Start-up, eine H100 und ein Modell im Orbit.....39
3.3 Axiom und Kepler: die ersten kommerziellen Rechenknoten....41
3.4 China rechnet mit: die Drei-Körper-Konstellation.....43
3.5 Google Suncatcher: vom Preprint zum Prototyp.....44
3.6 Eine Million Satelliten.....46
3.7 Lonestar: der Mond als Datentresor.....48
3.8 Management Summary.....51
4 Die Thermoskanne: Physik, die sich nicht überlisten lässt.....53
4.1 Ständige Sonne.....53
4.2 Warum das All nicht kühlt.....55
4.3 Ein Megawatt zum Anfassen.....59
4.4 Strahlung: kippende Bits, wachsende Dosis.....62
4.5 Mikrometeoriten, atomarer Sauerstoff und Alterung.....65
4.6 Kein Techniker weit und breit.....66
4.7 Management Summary.....68
5 Ein Rechenzentrum aus tausend Satelliten.....71
5.1 Warum niemand einen einzigen großen Kasten bauen will.....71
5.2 Licht statt Kabel.....73

5.3 Das zweite Nadelöhr: der Weg zurück zur Erde.....75
5.4 Welche Bahn?.....79
5.5 Ein Betriebssystem für den Orbit.....82
5.6 Management Summary.....84
6 Die Rechnung hinter der Vision.....87
6.1 Was ein Kilowatt auf der Erde kostet.....87
6.2 Kilogramm pro Kilowatt.....88
6.3 Startpreise: Falcon 9 heute, Starship-Hoffnungen morgen.....89
6.4 Ein Megawatt, zweimal gerechnet.....91
6.5 Zwei Rechnungen für dasselbe Rechenzentrum.....93
6.6 Was Europas Studien rechnen.....97
6.7 Die Klimabilanz.....98
6.8 Drei Rechenregime: wann sich der Orbit lohnt.....100
6.9 Management Summary.....101
7 Wem gehört die Cloud über unseren Köpfen?.....103
7.1 Der leere Raum ist nicht herrenlos.....103
7.2 Welches Recht gilt für Daten im Orbit?.....105
7.3 Ein Rechenzentrum als Ziel.....107
7.4 Extra terra nullius: die Kritik an der Flucht ins All.....109
7.5 Schrott, Kollisionen und ein heller werdender Himmel.....111
7.6 Wer verteilt den Himmel?.....113
7.7 Europa zwischen ASCEND, EU Space Act und Fremdraketen.114
7.8 Management Summary.....117

8 Was 2026 im Orbit rechnet und was danach kommt.....119
8.1 Eine nüchterne Bestandsaufnahme.....119
8.2 Erst die Quelle, dann das Netz.....120
8.3 KI-Training im Orbit.....122
8.4 Hardware für die Thermoskanne.....123
8.5 Drei mögliche Zukünfte.....126
8.6 Woran man erkennt, welches Szenario eintritt.....128
8.7 Fragen an einen Anbieter.....129
8.8 Management Summary.....131
9 Zum Schluss.....133
Die Cloud über den Wolken.....133
Was wir wissen.....133
Was wir noch nicht wissen.....134
Morgen war gestern.....135
Anhang A: Glossar.....137
Anhang B: Die Geschichte der Idee in Daten.....146
Anhang C: Die wichtigsten Personen, Projekte, Organisationen.....153
Anhang D: Für Neugierige: Die Physik der Thermoskanne.....159
Literatur- und Quellenverzeichnis.....165
Stichwortverzeichnis.....169
Mehr von Brain-Media.de.....173

Vorwort

Am 1. Oktober 2026 startet eine Falcon 9 mit einer Fracht, die niemand am Startplatz besonders beachtet. Transporter-18 heißt die Mission, eine jener Sammelfahrten, bei denen SpaceX Dutzende kleiner Satelliten gleichzeitig in die Umlaufbahn bringt. Kunden buchen dafür einen Platz wie in einem Reisebus. Universitäten sind darunter, Erdbeobachtungsfirmen, Start-ups mit einem einzigen Prototyp.

Einer dieser Satelliten stammt von Google, gebaut gemeinsam mit dem Satellitenbetreiber Planet. In seinem Inneren sitzen Tensor Processing Units, die Spezialchips, mit denen Google seine KI-Modelle trainiert und betreibt. Auf der Erde stehen diese Chips zu Zehntausenden in klimatisierten Hallen. Im Orbit sollen sie zeigen, ob sie den Start, die Strahlung und die Temperaturschwankungen überstehen. Noch am selben Tag meldet Google, der Kontakt sei hergestellt, der Satellit arbeite wie erwartet.

Ein einzelner Testsatellit ist kein Rechenzentrum. Und doch markiert dieser Start einen Punkt, an dem eine alte Idee die Ebene der Folien verlässt. Google nennt das Vorhaben Project Suncatcher. Der Name verrät das Versprechen: Im Orbit scheint die Sonne fast immer. Wer dort Rechenleistung betreibt, braucht kein Kraftwerk, keinen Netzanschluss, kein Kühlwasser. So lautet zumindest die Erzählung.

Die Cloud ist ein Gebäude

Das Wort Cloud hat einen Nebeneffekt. Es lässt vergessen, dass hinter jedem Suchergebnis, jeder Videokonferenz und jeder Antwort eines Sprachmodells ein Gebäude steht. Eine Halle mit Servern, Transformatoren, Notstromaggregaten und Kühltürmen. Die Cloud hat eine Adresse, einen Stromzähler und einen Wasseranschluss.

Lange Zeit fiel das kaum auf. Rechenzentren wurden effizienter, während sie wuchsen. Dann kam die künstliche Intelligenz. Wer den zweiten Band dieser Reihe gelesen hat, kennt die Maschine, die diesen Hunger auslöst: den Transformer, eine Architektur, die mit jeder Verdopplung von Daten und Rechenleistung besser wird. Wer den ersten Band kennt, weiß, warum heutige Computer dabei so viel Energie verschwenden. Sie schieben Daten unablässig zwischen Speicher und Prozessor hin und her.

Inzwischen wächst der Strombedarf der Rechenzentren schneller, als Stromnetze ausgebaut werden können. In Irland verbrauchen Rechenzentren mehr als ein Fünftel des gesamten Stroms. In den USA warten Betreiber jahrelang auf einen Netzanschluss. Tech-Konzerne kaufen die Leistung ganzer Kernkraftwerke. Die Cloud stößt an die Grenzen des Bodens, auf dem sie steht.

Eine alte Idee mit neuem Treibstoff

An diesem Punkt taucht eine Idee wieder auf, die älter ist als das Internet. 1969 fragte ein Physiker in Princeton seine Studenten, ob die Oberfläche eines Planeten überhaupt der richtige Ort für eine wachsende technische Zivilisation sei. Gerard K. O'Neill kam zu einer klaren

Antwort: Die Industrie gehört in den Weltraum, wo die Sonne unbegrenzt Energie liefert. Die Erde könnte dann ein Ort zum Wohnen werden.

Fünfzig Jahre später sagen Jeff Bezos, Elon Musk und eine Reihe von Start-ups beinahe dasselbe. Nur meinen sie nicht mehr Stahlwerke und Solarkraftwerke, sondern Rechenzentren. Bezos war in den 1980er-Jahren Student in Princeton und hat sich wiederholt auf O'Neill berufen. Im Oktober 2025 sagte er auf einer Konferenz in Turin, Rechenzentren mit einem Gigawatt Leistung würden in zehn bis zwanzig Jahren im All gebaut. Im Januar 2026 beantragte SpaceX bei der amerikanischen Telekommunikationsbehörde eine Genehmigung für bis zu eine Million Satelliten, die als Rechenzentren arbeiten sollen. Ein Start-up namens Starcloud hat im November 2025 einen Grafikprozessor vom Typ Nvidia H100 in die Umlaufbahn gebracht und nach eigenen Angaben dort ein kleines Sprachmodell trainiert.

Morgen war gestern. Die Idee ist alt, ihr Treibstoff ist neu. Gefallene Startpreise, wiederverwendbare Raketen, Satelliten, die per Laser miteinander sprechen, und ein Kapitalmarkt, der für alles bezahlt, was mit künstlicher Intelligenz zu tun hat.

Warum dieses Buch weder wirbt noch abrechnet

Über Rechenzentren im All wird gerade viel geschrieben, und das meiste lässt sich in zwei Gruppen teilen. Die einen sehen den nächsten großen Infrastrukturmarkt und rechnen mit unbegrenzter Sonnenenergie und kostenloser Kühlung. Die anderen halten das Ganze für eine Blase, angetrieben von Milliardären, die vor irdischer Regulierung fliehen wollen.

Beide Seiten haben Argumente. Beide machen es sich zu leicht. Die Werbung verschweigt, dass das Vakuum kein Kühlschrank ist, sondern eine Thermoskanne. Die Abrechnung übersieht, dass Satelliten schon heute mit Gewinn im Orbit rechnen, wenn auch in kleinem Maßstab und für sehr bestimmte Aufgaben.

Dieses Buch nimmt einen dritten Weg. Es erzählt die Geschichte der Idee, erklärt die Physik so, dass man sie ohne Formeln versteht, und rechnet nach. Es stützt sich auf begutachtete Fachliteratur, auf Studien europäischer Raumfahrtinstitutionen und auf Modellrechnungen des Jet Propulsion Laboratory der NASA. Wo es nur Ankündigungen von Unternehmen gibt, wird das gesagt. Wo eine Zahl umstritten ist, auch.

Worum es in diesem Buch geht

Das erste Kapitel zeigt, warum die Erde für die Cloud zum Engpass wird, und warum der Engpass weniger die Energie selbst ist als die Zeit, sie bereitzustellen. Das zweite Kapitel geht zurück in den Kalten Krieg, zu Arthur C. Clarke, Peter Glaser und Gerard O'Neill, und zu den Bordcomputern, die lernen mussten, im Weltraum zu überleben. Das dritte Kapitel stellt die Projekte vor, die seit 2023 aus der Idee ein Geschäft machen wollen: europäische Studien, amerikanische Start-ups, eine chinesische Konstellation und die Pläne von Google und SpaceX.

Das vierte Kapitel ist das Herz des Buches. Es erklärt, warum sich die Physik nicht überlisten lässt. Das fünfte zeigt, wie ein Rechenzentrum aus Hunderten Satelliten funktionieren soll, und warum nicht nur die Wärme, sondern auch die Daten in der Thermoskanne festsitzen. Das sechste rechnet: Was kostet ein Kilowatt im Orbit, verglichen mit einem Kilowatt auf der Erde? Das siebte fragt, wem die Cloud über

unseren Köpfen gehört, welches Recht für Daten im Orbit gilt und was mit dem Schrott geschieht. Das achte Kapitel zieht Bilanz und skizziert drei mögliche Zukünfte.

Zwischen den Kapiteln erzählen sieben kurze Intermezzi die Geschichte von Gerard O'Neill. Sie beginnt mit einer Frage in einem Seminarraum und endet bei einem seiner ehemaligen Studenten, der heute eine Raketenfirma besitzt.

Am Ende jedes Kapitels steht ein Bild, das sich durch das ganze Buch zieht: die Thermoskanne. Das Weltall hält warm, was man hineinsteckt. Das gilt für die Wärme der Chips, und es gilt, wie sich zeigen wird, für weit mehr.

O'Neill-Intermezzo I - Princeton, 1969

Gerard Kitchen O'Neill ist im Frühjahr 1969 kein Träumer, sondern ein angesehener Experimentalphysiker. 1956 hat er den Speicherring vorgeschlagen, eine Anordnung, in der Teilchen in entgegengesetzter Richtung kreisen und frontal zusammenstoßen. Ohne diese Idee gäbe es die großen Teilchenbeschleuniger nicht, mit denen Physiker später die Bausteine der Materie entschlüsseln. In Princeton unterrichtet O'Neill auch Erstsemester. Für eine kleine Gruppe besonders begabter Studenten sucht er nach Aufgaben, die mehr verlangen als das Lösen von Übungsblättern. Er stellt eine Frage, die mit Physik zu tun hat, aber weit darüber hinausreicht: Ist die Oberfläche eines Planeten wirklich der richtige Ort für eine technische Zivilisation, die immer weiter wächst?

Die Studenten rechnen. Sie vergleichen Flächen, Energie, Baumaterial. Sie kommen zu einem Ergebnis, das O'Neill selbst überrascht. Große rotierende Zylinder im freien Raum, gebaut aus Material vom Mond, könnten mehr Lebensraum bieten als die Oberflächen aller Planeten. Die Rotation erzeugt künstliche Schwerkraft. Spiegel lenken Sonnenlicht hinein. Energie gibt es im Überfluss, denn im All geht die Sonne nicht unter. O'Neill behandelt das Ergebnis zunächst als Gedankenspiel. Doch es lässt ihn nicht los. Er rechnet weiter, an Abenden und Wochenenden, und schreibt einen Aufsatz. Die großen Fachzeitschriften lehnen ab. Das Thema sei zu spekulativ, zu weit entfernt von dem, was ein Physiker von Rang veröffentlichen sollte. Was O'Neill in diesen Jahren entwirft, ist keine Raumstation für Forscher, sondern ein Ort für Industrie. Fabriken und Kraftwerke sollen dort stehen, wo Energie unbegrenzt verfügbar ist. Die Erde, so seine Hoffnung, könnte sich davon erholen.

1 Die Erde wird zum Engpass

1.1 Die Cloud hat eine Adresse

Wer in einer Suchmaschine eine Frage eintippt, denkt nicht an einen Transformator. Wer ein Foto in der Cloud speichert, denkt nicht an einen Kühlturm. Das ist gewollt. Die Cloud ist als Dienst gebaut, der sich anfühlen soll wie Strom aus der Steckdose: immer da, nie sichtbar.

Hinter der Steckdose steht allerdings ein Kraftwerk, und hinter der Cloud ein Gebäude. In den 1990er-Jahren war das meist ein Raum im Keller eines Unternehmens. Ein paar Server in einem Schrank, eine Klimaanlage, ein Kabel ins Netz. Wer IT-Administrator war, kannte diesen Raum und seine Geräusche. Er wusste, welcher Lüfter zu laut war und welche Festplatte bald ausfallen würde.

Mit dem Internet wuchsen die Räume zu Hallen. Erst mieteten Unternehmen Platz in gemeinsamen Rechenzentren, dann lagerten sie ganze Anwendungen zu großen Anbietern aus. Amazon, Microsoft und Google bauten Rechenzentren, die nicht mehr in Quadratmetern, sondern in Megawatt gemessen wurden. Ein Megawatt reicht, um mehrere Hundert Haushalte zu versorgen. Ein großer Campus hat Hunderte Megawatt.

Diese Hyperscale-Rechenzentren, wie die Branche sie nennt, sind Industrieanlagen. Sie bestehen aus Serverhallen, Umspannwerken, Batterieräumen, Dieselgeneratoren für den Notfall und Kühlsystemen, die mit Luft, Wasser oder beidem arbeiten. Sie stehen dort, wo Strom günstig ist, wo Glasfaser verläuft und wo Behörden Genehmigungen

erteilen. Im Großraum um den Washington Dulles International Airport im Norden Virginias stehen so viele davon, dass die Gegend den Spitznamen Data Center Alley trägt. In Europa sind Frankfurt, Amsterdam, London und Dublin die großen Standorte.

Lange Zeit konnte die Branche ein Versprechen halten: Sie wuchs, ohne dass ihr Stromverbrauch im gleichen Maß stieg. Prozessoren wurden sparsamer, Kühlung effizienter, alte Server in Firmenkellern wurden durch ausgelastete Maschinen in großen Hallen ersetzt. Die Kennzahl, an der sich das ablesen lässt, heißt Power Usage Effectiveness, kurz PUE. Sie gibt an, wie viel Strom ein Rechenzentrum insgesamt verbraucht, gemessen an dem Strom, der bei den Servern ankommt. Ein Wert von 2 bedeutet, dass für jedes Watt Rechenleistung ein weiteres Watt für Kühlung, Umwandlung und Beleuchtung anfällt. Moderne Anlagen erreichen Werte um 1,1 bis 1,2.

Dann änderte sich die Art der Arbeit, die in diesen Hallen erledigt wird.

1.2 Der Energiehunger der KI

Ein klassischer Webserver langweilt sich die meiste Zeit. Er wartet auf Anfragen, beantwortet sie in Millisekunden und wartet wieder. Ein Server, auf dem ein großes Sprachmodell trainiert wird, langweilt sich nie. Seine Grafikprozessoren rechnen über Wochen ohne Pause, jeder einzelne mit einer Leistungsaufnahme von 700 Watt und mehr. Tausende davon arbeiten zusammen, verbunden über Netzwerke, die selbst Strom verbrauchen.

Der zweite Band dieser Reihe hat erzählt, wie es dazu kam. 2017 veröffentlichten acht Forscher bei Google eine Architektur namens

Transformer. Sie hatte eine Eigenschaft, die zunächst niemand in ihrer Tragweite erkannte: Sie wird besser, je mehr Daten und Rechenleistung man ihr gibt, und zwar über viele Größenordnungen hinweg. Daraus wurde eine Wette, und die Wette wurde zu einer Industrie. Wer das beste Modell haben will, braucht die meisten Chips. Wer die meisten Chips hat, braucht den meisten Strom.

Der erste Band dieser Reihe hat einen anderen Teil der Geschichte erzählt. Heutige Computer trennen Speicher und Prozessor. Jede Rechnung erfordert, dass Daten vom einen zum anderen und zurück wandern. Bei künstlicher Intelligenz, die mit Milliarden von Parametern arbeitet, verbraucht dieses Hin und Her mehr Energie als das Rechnen selbst. Der Memristor ist eine der Ideen, die das ändern könnten, indem Daten dort verarbeitet werden, wo sie gespeichert sind. Im letzten Kapitel dieses Buches wird diese Idee zurückkehren.

Wie viel Strom Rechenzentren tatsächlich verbrauchen, ist schwer zu messen, weil die Betreiber wenig veröffentlichen. Die besten Schätzungen stammen von der Internationalen Energieagentur und vom Lawrence Berkeley National Laboratory, einem Forschungslabor des amerikanischen Energieministeriums.

Die Internationale Energieagentur schätzt den weltweiten Verbrauch von Rechenzentren für 2024 auf rund 415 Terawattstunden. Das sind etwa 1,5 Prozent des gesamten Stromverbrauchs der Welt. Bis 2030 könnte sich der Wert auf rund 945 Terawattstunden mehr als verdoppeln. Das wäre etwas mehr, als ganz Japan heute verbraucht. Knapp die Hälfte des Verbrauchs entfällt auf die USA, ein Viertel auf China, rund 15 Prozent auf Europa.

Für die USA ist die Rechnung des Lawrence Berkeley National Laboratory noch deutlicher. 2023 verbrauchten amerikanische Rechenzentren rund 176 Terawattstunden, etwa 4,4 Prozent des Stroms im Land. Für 2028 nennt der Bericht eine Spanne von 325 bis 580 Terawattstunden. Das entspräche 6,7 bis 12 Prozent des amerikanischen Stromverbrauchs. Die Spanne ist breit, weil niemand weiß, wie schnell der Ausbau der KI weitergeht. Aber selbst ihr unteres Ende bedeutet fast eine Verdopplung in fünf Jahren.

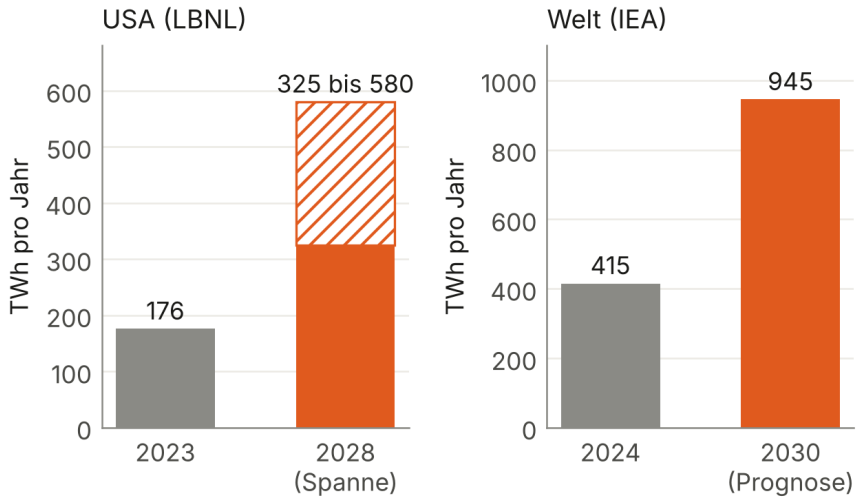


Abbildung 1.1: Stromverbrauch von Rechenzentren. Links: USA 2023 und die Spanne für 2028 nach Lawrence Berkeley National Laboratory. Rechts: weltweit 2024 und Prognose für 2030 nach Internationaler Energieagentur.

Diese Zahlen sind keine Naturgesetze. Effizientere Chips, kleinere Modelle oder eine abkühlende Investitionswelle könnten den Anstieg

bremsen. Doch sie erklären, warum Energieversorger, Netzbetreiber und Regierungen nervös werden. Und sie erklären, warum Unternehmen nach Auswegen suchen, die vor wenigen Jahren noch absurd geklungen hätten.

1.3 Nicht der Strom fehlt, sondern der Anschluss

Auf den ersten Blick scheint das Problem einfach. Rechenzentren brauchen mehr Strom, also muss mehr Strom erzeugt werden. Doch das eigentliche Hindernis liegt woanders. Slava Turyshev, Physiker am Jet Propulsion Laboratory der NASA, hat 2026 in einer Analyse zu Rechenzentren im Orbit genau diesen Punkt herausgearbeitet. Seine Arbeit liegt bislang als Preprint vor, also noch ohne abgeschlossene Begutachtung durch Fachkollegen. Sie wird in diesem Buch noch oft vorkommen.

Turyshev übersetzt die Prognosen des Berkeley-Labors in eine andere Einheit: in Leistung, die jedes Jahr zusätzlich bereitgestellt werden muss. Steigt der Verbrauch amerikanischer Rechenzentren bis 2028 wie vorhergesagt, dann muss das Stromnetz dort im Durchschnitt 17 bis 46 Gigawatt mehr liefern als 2023. Auf fünf Jahre verteilt sind das 3,4 bis 9,2 Gigawatt pro Jahr. Ein großes Kernkraftwerk hat eine Leistung von etwa einem Gigawatt.

Dabei geht es nicht darum, ob genug Energie im Jahresmittel erzeugt werden kann. Es geht darum, ob die Leistung zur richtigen Zeit am richtigen Ort ankommt. Rechenzentren laufen Tag und Nacht. Sie brauchen Strom auch dann, wenn kein Wind weht und die Sonne nicht scheint. Sie stehen an wenigen Orten konzentriert, die Netzplaner

Lastzentren nennen. Und sie brauchen einen Anschluss an das Hochspannungsnetz, mit Umspannwerk, Leitungen und Schutztechnik.

Genau hier entsteht der Engpass. Neue Leitungen brauchen in vielen Ländern zehn Jahre und mehr, bis sie genehmigt und gebaut sind. Große Transformatoren haben Lieferzeiten von mehreren Jahren. Kraftwerke, die rund um die Uhr Strom liefern, entstehen nicht schneller. Turyshev nennt die entscheidende Größe die Zeit bis zur Stromversorgung. Ein Rechenzentrum lässt sich in achtzehn Monaten bauen. Der Anschluss, der es versorgt, braucht oft deutlich länger.

Für die Betreiber ist das eine neue Erfahrung. Jahrzehntelang war Strom eine Rechnungsposition, die man über Verträge regelte. Jetzt ist er die knappste Ressource im Geschäft. Wer heute einen Netzanschluss für hundert Megawatt bekommt, hat einen Wettbewerbsvorteil, der sich nicht kopieren lässt.

1.4 Wasser, Fläche, Akzeptanz

Zum Strom kommen weitere Konflikte. Viele Rechenzentren kühlen ihre Server mit Verdunstungskühlung. Dabei wird Wasser versprüht oder über Kühltürme geleitet, und ein Teil davon verdunstet. Das ist energiesparend, verbraucht aber Wasser. Hinzu kommt das Wasser, das in Kraftwerken für die Stromerzeugung verdampft. In trockenen Regionen wie Arizona oder Teilen Spaniens führt das zu Streit mit Landwirten und Gemeinden.

Fläche ist ein weiteres Thema. Ein großer Campus belegt Dutzende Hektar, oft am Rand von Städten, wo Land für Wohnungen oder Landwirtschaft gebraucht wird. Anwohner klagen über das Brummen

der Lüfter, über Dieselgeneratoren, die bei Tests anspringen, und über den Verkehr während der Bauphase.

Das deutlichste Beispiel in Europa ist Irland. Dort verbrauchen Rechenzentren inzwischen mehr als ein Fünftel des gesamten Stroms. Nach Zahlen des irischen Statistikamts lag der Anteil 2024 bei rund 22 Prozent. Zehn Jahre zuvor waren es 5 Prozent. Der irische Netzbetreiber erwartet bis 2034 einen Anteil von 31 Prozent. Neue Anschlüsse im Großraum Dublin wurden über Jahre faktisch nicht mehr vergeben. Im Dezember 2025 hat die irische Regulierungsbehörde neue Regeln beschlossen. Rechenzentren müssen künftig eigene Erzeugungs- oder Speicheranlagen vorhalten, die ihrer beantragten Leistung entsprechen, und einen großen Teil ihres Jahresverbrauchs durch zusätzliche erneuerbare Anlagen in Irland decken.

Das irische Beispiel zeigt, was passiert, wenn eine Branche schneller wächst als die Infrastruktur, auf die sie angewiesen ist. Die Debatte dort wird inzwischen auf höchster politischer Ebene geführt. Regierungsbeamte warnten öffentlich, die freie Kapazität des Netzes sei aufgebraucht. Der Regierungschef nannte die Kritik an Rechenzentren überzogen. Beide Positionen haben ihre Berechtigung. Rechenzentren bringen Investitionen und Steuereinnahmen. Sie belegen aber auch Netzkapazität, die anderen fehlt.

Ähnliche Konflikte gibt es in den Niederlanden, in Teilen Skandinaviens, in Virginia und Texas. Sie werden selten laut, aber sie verlangsamen den Ausbau. Für eine Branche, deren Geschäftsmodell auf schnellem Wachstum beruht, ist Langsamkeit ein Problem.

1.5 Deutschland: Reifegrade und Pflichten

Auch in Deutschland ist der Engpass angekommen. Frankfurt am Main ist einer der wichtigsten Rechenzentrumsstandorte Europas. Hier steht einer der größten Internetknoten der Welt, und rund um die Stadt sind in den vergangenen zwanzig Jahren Dutzende Rechenzentren entstanden. Der Stromverbrauch der Stadt lag 2024 bei rund 6,5 Terawattstunden, mehr als ein Viertel über dem Wert von zehn Jahren zuvor. Der örtliche Netzbetreiber erwartet bis Mitte der 2030er-Jahre Einschränkungen bei der Vergabe neuer Anschlussleistung. Neue Leistung ab 3,5 Megawatt wird in Frankfurt inzwischen anteilig auf die Antragsteller verteilt, in einem besonders belasteten Gebiet schon ab einem Megawatt. Der Energieversorger Mainova will gemeinsam mit dem Übertragungsnetzbetreiber Tennet rund 1.000 Megawatt zusätzliche Kapazität schaffen.

In Berlin wurden 2025 rund 70 Anfragen von Großverbrauchern mit zusammen etwa 2.300 Megavoltampere gestellt. Verfügbar waren 365. Ein Netzbetreiber in Mitteldeutschland meldete Ende 2025 Anfragen von Rechenzentren über 16,8 Gigawatt, von denen Projekte mit etwa 1,4 Gigawatt verbindlich reserviert wurden. Solche Zahlen überzeichnen den tatsächlichen Bedarf, weil Projekte an mehreren Orten gleichzeitig anfragen. Aber sie zeigen das Ausmaß des Andrangs. Seit April 2026 verteilen die vier deutschen Übertragungsnetzbetreiber knappe Kapazität nach einem Reifegradverfahren. Wer nachweisen kann, dass sein Projekt weit fortgeschritten ist, kommt zuerst zum Zug. Die Bundesregierung spricht in ihrer Rechenzentrumsstrategie von einem Antragsstau und will die KI-Rechenleistung in Deutschland bis 2030 vervierfachen.

Deutschland hat zudem eine Besonderheit, die für dieses Buch aufschlussreich ist. Das Energieeffizienzgesetz von 2023 verpflichtet Rechenzentren zu Dingen, die anderswo freiwillig sind. Neue Rechenzentren, die ab Juli 2026 in Betrieb gehen, müssen eine PUE von höchstens 1,2 erreichen. Sie müssen, gestaffelt nach dem Datum der Inbetriebnahme, einen Teil ihrer Abwärme nutzen lassen, bis zu 20 Prozent. Ab 2027 müssen sie ihren Strombedarf bilanziell vollständig aus erneuerbaren Energien decken. Die Bundesregierung hat angekündigt, das Gesetz zu vereinfachen und stärker an das europäische Mindestmaß anzupassen. Ob alle Werte bestehen bleiben, ist offen.

Die Pflicht zur Abwärmenutzung ist in der Praxis schwierig. Die Wärme eines Rechenzentrums hat meist eine Temperatur von 30 bis 40 Grad Celsius. Für ein Fernwärmenetz ist das zu kalt, sie muss mit Wärmepumpen angehoben werden, und dafür braucht es Strom. Außerdem braucht es einen Abnehmer in der Nähe, ein Wohnviertel, ein Schwimmbad, ein Gewächshaus, und Wärmenetze werden nicht auf Vorrat gebaut.

Für die Frage dieses Buches ist das ein bemerkenswerter Gegensatz. Auf der Erde ist Abwärme ein Rohstoff, den der Gesetzgeber nutzen will, weil sie Häuser heizen kann. Im Orbit ist dieselbe Abwärme das zentrale technische Problem, für das Ingenieure Radiatoren von der Größe eines Fußballfelds entwerfen. Ein Rechenzentrum in Frankfurt kann seine Wärme an ein Neubaugebiet abgeben. Ein Rechenzentrum im All kann sie nur in den dunklen Himmel strahlen.

1.6 Fluchtwege auf der Erde

Die Branche reagiert auf diese Engpässe mit Ideen, die zeigen, wie groß der Druck geworden ist.

Die erste Antwort heißt Kernkraft. Microsoft hat 2024 einen Vertrag geschlossen, der die Wiederinbetriebnahme eines Reaktors am Standort Three Mile Island in Pennsylvania ermöglichen soll, dem Ort des schwersten Unfalls der zivilen Kernkraft in den USA. Google und Amazon investieren in kleine modulare Reaktoren, die es bisher fast nur auf dem Papier gibt. Die Botschaft ist klar: Wer verlässlich Strom will, rund um die Uhr und ohne Kohlendioxid, greift zu Technologien, die vor wenigen Jahren noch als politisch erledigt galten.

Die zweite Antwort heißt Gas. Meta baut in Louisiana einen Rechenzentrumscampus namens Hyperion, der nach Angaben des Unternehmens auf mehrere Gigawatt Leistung wachsen soll. Versorgt werden soll er zunächst zu großen Teilen mit neuen Gaskraftwerken. Das ist schnell und verlässlich, aber es widerspricht den Klimazielen, die sich die Konzerne selbst gesetzt haben.

Die dritte Antwort sind ungewöhnliche Standorte. Rechenzentren in Nordschweden, Finnland und Island nutzen kalte Luft und günstigen Strom aus Wasserkraft. Microsoft versenkte 2018 vor den schottischen Orkney-Inseln einen Stahlzylinder mit 864 Servern in etwa 36 Meter Tiefe. Das Projekt hieß Natick. Nach zwei Jahren holte Microsoft den Zylinder wieder herauf. Die Server waren in dieser Zeit nur etwa ein Achtel so oft ausgefallen wie eine Vergleichsgruppe an Land. Die Forscher vermuteten, dass die Stickstoffatmosphäre im Inneren und das Fehlen menschlicher Eingriffe die Technik schonten. Ein regulärer Betrieb unter Wasser wurde trotzdem nicht daraus.

Natick ist für dieses Buch aus einem Grund interessant. Es war ein Rechenzentrum, das niemand betreten konnte. Wenn ein Server ausfiel, blieb er ausgefallen. Die Planung musste damit rechnen, dass ein Teil der Hardware über die Lebensdauer verloren geht. Genau diese Bedingung gilt auch im Orbit, nur in verschärfter Form.

Jede dieser Antworten hat ihren Preis. Kernkraft braucht Jahre bis Jahrzehnte. Gas widerspricht Klimazielen. Kalte Standorte liegen weit von den Nutzern entfernt. Unterwasserrechenzentren lassen sich schlecht warten. Keine Antwort beseitigt den Engpass. Sie verschieben ihn nur.

1.7 Warum plötzlich der Orbit

In dieser Lage klingt ein Vorschlag verlockend, der alle Probleme auf einmal zu lösen verspricht. Im Orbit scheint die Sonne. Auf bestimmten Bahnen fast ununterbrochen, ohne Wolken, ohne Nacht, ohne Jahreszeiten. Ein Solarmodul liefert dort mehrfach so viel Energie wie dasselbe Modul in Deutschland. Es gibt keine Anwohner, die sich über Lüfter beschweren, keinen Wasserverbrauch, keine Flächenkonkurrenz und keinen Netzbetreiber, der einen Anschluss verweigert.

Philip Johnston, Mitgründer des amerikanischen Start-ups Starcloud, hat die Begründung auf drei Punkte gebracht. Erstens wächst die Nachfrage nach KI-Rechenleistung rasant. Zweitens steigen die Energiepreise auf der Erde. Drittens fallen die Kosten, um Material in den Orbit zu bringen. Wenn alle drei Entwicklungen anhalten, so seine Argumentation, wird es irgendwann günstiger, Rechenzentren im All zu bauen als auf der Erde.

Mehr von Brain-Media.de

Aus der Reihe „Morgen war gestern. Bahnbrechende Tech-Konzepte“:

Der Memristor. Der Transformer. Der Hypertext, Die Kompression, Frequenzspringen u.v.m.

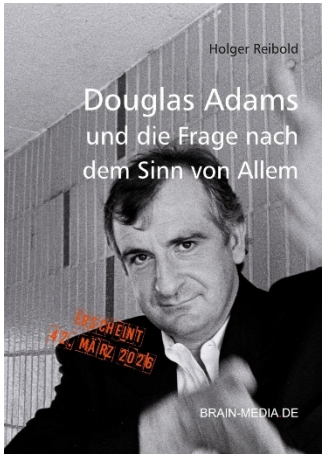
Brain-Media Compliance Complete

Der CRA steht selten allein. Wer Produkte mit digitalen Elementen herstellt, hat es meist auch mit NIS-2, der DSGVO, dem EU AI Act oder ISO 27001 zu tun. Brain-Media Compliance Complete bündelt dieses Wissen in einem Jahreszugang zur Fachbibliothek von Brain-Media.-de. Ein Abonnement, ein Login, alle Titel.

Das Abonnement umfasst die aktuellen Compliance- und Zertifizierungstitel als E-Book, darunter Bücher zu NIS-2, DORA, CRA, EU AI Act, DSGVO und ISO 27001. Hinzu kommen die Bonus-Downloads zu den Büchern und die drei Research Reports zu Compliance- und ISMS-Software im DACH-Raum. Außerdem enthält es den Zugang zu den Prüfungsplattformen mit den Fragenpools für CISM, CISA, AAIA und CRISC. Alle Inhalte stehen in einer digitalen Bibliothek bereit. Das lohnt sich besonders, wenn im Unternehmen neben dem CRA weitere Regelwerke umzusetzen sind.

Details finden Sie unter folgender URL:

www.brain-media.de/compliance-complete.html



42 – Douglas Adams und die Frage nach dem Sinn von Allem

Am 11. Mai 2026 ist Douglas Adams 25 Jahre tot. Der Kultautor hat der Welt wunderbar, skurrile Werke geschenkt. Jetzt ist es an der Zeit, den Autor kennenzulernen.

Umfang: 140 Seiten

Preis: 14,99 EUR

Erschienen: 42. März 2026



Das Douglas-Adamds-Bundle:
das **Buch** Zweiundvierzig,
das **Handtuch** zum Towelday
und
das **Hörbuch** für unterwegs.

Mit dem Towelday, erinnern sich Fans an Douglas Adams und huldigen dem Kultautor.
100 % intergalaktisch geprüfte Baumwolle, nachhaltig Produktion.
Exklusiv bei Brain-Media.de: Bundle zum Preis von 42 EUR.